

T000037171

발간등록번호
11- 1611000-001951-01

MONO1201230888

이어도 기지를 활용한 한반도 상륙 태풍 특성조사 및 예측 연구

2011. 11.

국토해양부
국립해양조사원

Korea Hydrographic and Oceanographic Administration
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs
Republic of Korea

제 출 문

국토해양부 국립해양조사원장 귀하

귀 원에서 연구위탁한 「이어도 기지를 활용한 한반도 상륙 태풍
특성조사 및 예측 연구」의 최종보고서를 과업지시서에 따라 제출합
니다.

2011. 11.

제주대학교 해양산업경찰학과 문일주

참 여 진

참여연구진

연구책임자	제주대학교	문 일 주
연 구 원		김 성 훈
		김 민 영
		오 상 명
		고 철 민
		김 광 석

요 약 문

I. 제 목

이어도 기지를 활용한 한반도 상륙 태풍 특성조사 및 예측 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발 최종목표

- 이어도 기지에서 관측된 해양 및 대기 자료를 이용한 한반도 상륙 태풍 특성 조사 및 태풍 예측 기술 향상.

III. 연구개발 내용 및 범위

- 이어도 기지를 통과한 태풍에 대한 기상 관측자료(바람, 기온, 기압 등)와 해양 관측자료(수온, 해수면, 해류 등) 분석
- 이어도 해양/기상 자료와 한반도 상륙 태풍강도 변화의 연관성 분석
- 지난 55년간 RSMC, JTWC 태풍자료 및 전구재분석자료를 이용한 한반도 상륙 태풍 강도/진로 분석 및 해양/기상 환경과의 연관성 조사
- 이어도 주변 여름철 태풍 경로 상의 해양환경 조사: 연안관측 수온 및 염분 자료 분석
- 기후변화에 따른 한반도 상륙 태풍특성 분석
- 이어도 기지 해양대기 관측 자료의 검 보증 및 수치모델 결과와 비교
- 이어도 기지에서 관측된 태풍 통과 시 해양의 반응을 조사하여 TMI 위성자료와 ARGO float의 연직 수온 자료와 비교
- 수치모델을 이용한 태풍 에워니아 통과 시 해양의 수온 변화 조사
- 태풍 강도에 영향을 주는 황해 저층 냉수 조사 : 미해군 자료동화 자료와 한국해양 자료센터 자료 분석
- ROMS 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍에 대한 해양반응 조사 및 모델검증
- WRF모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍의 해양-대기 상호작용 연구 및 모델검증
- 이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 초기조건 개선
- 이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 검증
- 이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료 분석

IV. 연구개발 결과

1. 이어도 기지자료에서 관측된 과거 태풍 자료 분석 및 한반도 상륙 태풍 특성 조사

- 이어도 과학기지를 활용하여 한반도에 상륙한 태풍의 특성을 조사하였다. 조사결과 이어도 과학기지는 한반도에 상륙한 태풍의 63%가 지나는 길목에 위치하고 있으며, 매년 평균 한 개의 태풍이 기지 근처를 통과하는 것으로 나타남. 또한 이어도 과학기지는 한반도 북상하는 태풍이 서귀포에 도달하기 평균 4-6시간 전, 한반도 내륙에 도달하기 평균 8-10 시간 전의 귀중한 태풍자료를 관측하는 것으로 조사되었음.
- 이어도 과학기지는 쿠로시오 난류와 황해저층냉수가 만나는 경계에 위치하고 있어 태풍강도를 결정하는 해양의 수온변동을 모니터링하기에 가장 좋은 장소로 밝혀졌음. 실제로 2006년 태풍 예위니아 시기에 이어도 기지에서 관측된 층별수온 관측자료에서 최대 12°C의 수온 하강이 관측됨. 이러한 수온하강은 한반도에 상륙한 태풍의 강도약화에 크게 기여한 것으로 사료됨.
- 이어도 기지가 관측을 시작한 2003년 이후부터 2006년까지 기지를 가까이 통과한 태풍 매미(2003), 민들레(2004), 메기(2004), 예위니아(2006)에 대해 기상 및 해양 관측자료를 분석함. 특히, 태풍이 외해에서부터 육지에 상륙하기까지 연속적인 변화특성을 모니터링하기 위하여 이어도 기지와 육지 기상청 관측소를 연계하여 자료를 분석함. 향후 이러한 자료들은 지속적인 연구를 통하여 한반도에 상륙하는 태풍의 특성을 파악하고 궁극적으로 태풍예측에 활용할 계획임.

2. 한반도 상륙 태풍 강도를 결정하는 해양·기상 요인 조사 및 이어도 태풍 관측자료 검증

- 1950부터 2004년까지 한반도에 상륙한 태풍의 경로와 강도를 조사한 결과, 제주도 우측을 통과해 우리나라 남해안으로 상륙한 태풍들은 제주도 좌측을 통과해 우리나라 서해안으로 상륙한 태풍들에 비해 평균적으로 높은 강도를 유지하였던 것으로 나타남. 이것은 제주도 우측을 흐르는 따뜻한 쿠로시오 해류가 태풍에 에너지를 공급하여 그 강도를 유지 시키는 것에 반해 제주도 좌측에 위치한 황해저층냉수는 Cold Wake에 의해 태풍의 강도를 약화시키는 요인으로 작용하기 때문임.
- 해수면 온도 증가율의 경우 과거 약 140년간 보다 최근 30년간이 약4배가량 더 가파르게 증가하는 경향을 보이며 지역적으로도 수온증가율이 최근 한반도 지역에서 열대 지역보다 무려 4~6배 이상 임을 보이고 있음.
- 태풍의 생성 및 발달에 영향을 주는 대기 요소인 수직바람시어를 계산 해본 결과 최근 30년간 한반도 주변에서 감소하는 경향을 볼 수 있었음.
- 한반도 주변의 이 같은 조건은 태풍이 발달하기 좋은 조건으로 향후 태풍 발생 시 태

풍의 강도가 유지 될 수 있는 환경 조건임. 따라서 이 같은 해양과 대기의 조건은 한반도로 상륙하는 태풍의 강도가 강해질 것임을 보여줌.

- 3차원 해양모델을 이용하여 태풍 에위니아 시기의 해양의 반응을 조사한 결과, 태풍 에위니아는 북상하는 동안 북위 21도 근처에서 가장 큰 크기의 해수면 냉각(약 7°C)이 일어남. 이 시기에 태풍은 전향을 시작하였고 이동속도가 매우 느렸음.
- 태풍 에위니아는 한반도에 접근하여 제주도 남쪽을 통과할 무렵 또다시 강한 해수면 냉각이 발생하였는데 이 시기에 태풍의 이동속도는 비교적 빨랐지만 이 지역에 발달한 황해 저층냉수로 형성된 얇은 혼합층 때문에 해수면 냉각이 컸던 것으로 사료됨.
- 이어도 기지에서 에위니아 통과시기에 관측된 층별 수온 분포에서는 16m 수심에서 최대 11°C까지 수온 감소가 발생하였음. 그러나 모델에서 나타난 최대 수온 감소는 6°C에 불과하였음. 이러한 차이는 모델에 사용된 초기 수온분포가 실제와는 차이가 컸기 때문인 것으로 사료됨. 보다 정확하고 현실적인 모델의 초기장 생성은 향후 해결해야 과제임.

3. 이어도 기지를 이용한 태풍-해양 상호작용 연구 및 한반도 상륙 태풍 강도 예측

- 해양에서 현장자료를 수집하는 것은 많은 비용과 어려움이 있음. 특히 태풍같은 악기상시 현상자료를 직접 수집하는 것은 매우 어려움. ARGO (Array for Real-time Geostrophic Oceanography)는 이러한 어려움을 보완할 수 있으며 위성자료와 달리 수직 수온 분포를 관찰 할 수 있음. 태풍 에위니아의 바람 응력에 의해 수온의 혼합효과가 발생하여 전 후로 혼합층이 더욱 깊어졌음 (약 30 - 35m).
- TMI는 NASA의 위성으로 마이크로웨이브 라디오미터 (Microwave Radiometer)로 측정되어 구름층을 투과하여 해수면의 온도를 산출 할 수 있음. 에위니아가 통과하기 전과 통과 후를 비교해보면 태풍경로를 따라 20 - 23°N에서 약 4 - 5°C 해수면 냉각이 관측됨. 또한 이어도 주변 해역에도 약 4°C 냉각이 나타남.
- 1994년부터 2007년까지 14년 동안 8월 KODC (Korea Oceanographic Data Center) 황해저층 냉수 12°C 등온선을 그려 조사함.
- 황해 저층 냉수 분포는 해마다 분포가 달라지고 있으며 그 장기 변화 경향을 파악하기 위해서는 보다 긴 기간의 관측자료가 필요함.

4. 태풍 예측기술 향상을 위한 이어도 기지 관측 자료를 이용한 해양 및 대기 모델의 검증

- 3차원 해양수지모델을 사용하여 태풍 에위니아에 의한 해양반응을 재현한 결과, 비교적 이어도 과학기지에서 관측한 결과와 유사한 결과를 얻어 낼 수 있었음.
- 2006년 태풍 에위니아 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 기록적인 수온 하강의 원인을 아래와 같이 찾아냄.
 - i) 이어도 과학기지 주변 해역의 특이성 : 얇은 혼합층, 큰 수직 수온 구배
 - ii) 조류와 태풍에 의한 해류의 상호작용에 의한 용승 강화
 - iii) 용승을 강화 시키는 해저 지형
- 저해상도의 초기 대기 입력장의 한계를 극복하기 위하여 GFDL 타입의 태풍 보거싱을 통해 태풍 초기 조건개선을 위한 연구를 진행함. 이후 개선된 초기장을 이용하여 2003년 태풍 매미를 재현해본 결과 강도 및 진로에서 관측치와 상당히 일치함을 확인함.
- 현재 제공되고 있는 위성 해수면 온도 자료와 모델과의 민감도 테스트를 진행하였으나 한반도 연안에서 시공간적으로 빠르게 변화하는 해양의 특성을 재현하는 데에는 한계가 있음을 시사함.
- 2010년 이어도 과학기지를 통과한 3개의 태풍에 대한 분석을 진행함. 태풍 곤파스의 경우 약 5℃의 해수냉각과 약 10pus정도의 염분 상승이 관측되었다. 태풍 곤파스와 태풍 말로는 약 4일의 시간차이를 두고 거의 비슷한 진로로 한반도에 접근하였다. 따라서 태풍 말로의 경우는 태풍 곤파스가 냉각시켜놓은 뒤 아직 회복되지 못한 차가운 해양위를 지나온 것으로 세력이 크게 발달하지 못하였음.

5. 이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 초기 조건 개선 및 예측능력 향상

- 이어도 기지자료를 토대로 태풍-해양 접합모델을 이용하여 태풍 통과 시 나타나는 중요한 해양요소들의 변화와 이에 따른 태풍의 반응을 조사함.
- GFDL-POM coupled model를 이용하여 이어도 주변 해역의 초기 해수면 온도와 혼합층 깊이에 따른 표층해수 냉각과 태풍강도의 민감도를 조사한 결과 초기 혼합층 깊이가 동일하다면 초기 해수면 온도가 높을수록 태풍의 강도가 강화되어 해수면 냉각이 커짐을 확인 하였으며 같은 해수면 온도를 갖더라도 초기 혼합층 깊이가 깊을수록 표층 냉각이 약화되어 태풍강도가 강해짐을 확인함.
- 강수가 집중되는 여름철에는 이어도 과학기지에 저염수가 관측 되며 태풍 역시 짙은 빈도로 그 위를 지나감. 본 연구에서는 이어도 기지에서 관측된 수직염분 프로파일을

토대로 저염 패치를 재현하여 태풍이 그 위를 지나갈 때 태풍강도 변화를 확인함

- 실험 결과 태풍이 저염 패치 위를 지나가는 경우 그렇지 않은 경우보다 작은 해수면 냉각이 일어남을 확인함. 저염수에 의한 성층은 수직 점도(viscosity)를 줄여 운동량이 하층으로 전달되는 것을 억제함. 따라서 해류시어에 의한 혼합이 얇은 수심에서만 일어나게 되며 결국 해수면 냉각이 적게 일어나게 되며 이러한 해수면 냉각의 저하는 해수면 플릭스의 증가를 불러일으켜 태풍의 강도를 강하게 함.
- WRF-ROMs접합 모델을 이용하여 이어도 기지 근처를 지나간 에위니아(2006)와 콤파스(2010) 두 태풍 사례를 재현하여 관측 치와 비교함. 그 결과 콤파스의 경우 진로가 관측치보다 약간 오른쪽으로 편중 되어 있으며 이동속도가 조금 느리나 비교적 정확히 묘사 되었음. 특히 5일 예보 진로 오차가 약 190km로 상당히 잘 묘사되었음. 에위니아 역시 모델에서 초반 바람을 강하게 모의하는 점을 제외하면 비교적 일치함을 보였음.
- 수온은 태양 복사에너지 유입량의 변화로 계절별 특징이 나타남. 겨울은 복사에너지의 유입량이 적으므로 전체적으로 수온이 낮고 성층화가 뚜렷하게 나타나지 않음. 반면 여름은 태양의 복사 에너지량이 많으므로 겨울보다 가열되어 해수면에서 약 4m깊이 수온은 약 30℃에 이름. 여름의 따뜻한 표층수는 아래에 존재하는 찬물보다 밀도가 낮고 아래로 쉽게 섞이지 않으므로 성층화가 뚜렷함.
- 해양은 대체적으로 겨울에는 해양 내부의 성층화를 보기 힘들고 최대 냉각현상이 나타나게 됨. 따라서 3월이 가장 최소 표층 수온을 보이며 태양열이 표면 가까이 흡수되기 때문에 수온의 계절 변화는 대부분 비교적 얇은 표층에 국한됨 따라서 점점 일사량의 증가로 최고로 가열된 달은 8월이고 성층화도 제일 두드러짐.

IV. 연구개발 결과의 활용계획

- 태풍 바람 응력으로 인한 해양반응의 연구 활용
- 태풍의 진로와 강도 예측에 있어 해양의 영향을 조사하는데 활용
- 우리나라로 접근하는 태풍의 진로 및 강도 예측에 활용
- 이어도 주변 해역의 특징적인 해양환경을 실시간 관측자료의 사용으로 해수, 염분의 모니터링에 활용
- 바람응력과 파의 나이의 상관관계 연구에 활용
- 실시간 관측자료를 기상 및 날씨 예보에 활용

< 차 례 >

<그림차례>	9
<표 차례>	16

제 1 장 연구개발과제의 개요	17
------------------------	----

1. 연구개발의 목적	17
(1) 연구개발의 최종 목적	
(2) 장기목표 / 전략성과의 연계성	
(3) 내용 및 범위	
(4) 연차별 연구 목표 및 내용	
2. 연구개발의 필요성	19
(1) 기술적 측면	
(2) 경제 · 산업적 측면	
(3) 사회 · 문화적 측면	

제 2 장 국내외 기술개발 현황 및 과학기술정보	23
----------------------------------	----

1. 국내 · 외 연구개발 동향	23
2. 지금까지의 연구개발 현황	24
3. 현 기술 상태의 취약성	25

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	26
-----------------------------	----

1. 이어도 기지자료에서 관측된 과거 태풍 자료 분석 및 한반도 상륙태풍 특성 조사	26
(1) 태풍 예위니아(2006)시기에 관측된 기록적인 수온하강	

(2) ROMS 모델을 이용한 태풍 통과 시 해양반응조사	
2. 한반도 상륙 태풍 강도를 결정하는 해양·기상 요인 조사 및 이어도 태풍 관측 자료 검증	54
(1) WRF 모델에서 보거싱 기법을 이용한 태풍 초기 조건 개선	
(2) 해수면 온도(SST) 입력자료에 따른 WRF 모델 성능 비교	
3. 이어도 기지를 이용한 태풍-해양 상호작용 연구 및 한반도 상륙 태풍 강도 예측	92
(1) 2010년 태풍 통과 시기 관측 자료 분석	
(2) 이어도 기지에서 관측된 장기 층별 수온염분 자료 분석	
4. 태풍 예측기술 향상을 위한 이어도 기지 관측 자료를 이용한 해양 및 대기 모델의 검증	129
(1) 2010년 태풍 통과 시기 관측 자료 분석	
(2) 이어도 기지에서 관측된 장기 층별 수온염분 자료 분석	
5. 이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 초기 조건 개선 및 예측능력 향상	167
(1) 2010년 태풍 통과 시기 관측 자료 분석	
(2) 이어도 기지에서 관측된 장기 층별 수온염분 자료 분석	
6. 결과 및 고찰	199
제 4 장 연구개발 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	202
1. 연구개발 목표 및 내용	202
2. 연구평가의 착안점 및 척도	203
3. 연구개발 목표 달성도	204
4. 관련분야에의 기여도	209
5. 연구 성과	210
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	214
<참고문헌>	215

< 그림 차례 >

<그림 1-1> (a) 55년간 한반도에 상륙한 태풍(파란색) 중에 이어도 기지 150km 반경 내를 지나간 태풍(빨간색)의 트랙. (b) 55년간 이어도 기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍의 모든 경로.	19
<그림 1-2> 태풍 에위니아(0603)가 지날 때 각기 다른 관측소에서의 기압 시계열 자료(인용 : 문일주, 2009).	20
<그림 1-3> 이어도 해양기지에서 태풍 에위니아(2006) 통과 시기에 관측된 증별수 온 자료(인용 : 문일주, 2009).	20
<그림 1-4> 우리나라 자연재해 피해 현황.	21
<그림 1-5> 한반도 상륙 태풍에 의해 생긴 재산피해 규모의 변화(인용: 문일주, 2009).	21
<그림 1-6> 한반도 상륙태풍들의 최소중심기압 변동 시계열.	22
<그림 2-1> 허리케인 리타의 진로를 따라 강한 바람의 혼합작용으로 발생한 Cold Wake(왼쪽그림). 높은 수온의 Gulf Stream 루프 위를 지나면서 이를 만에 1등급에서 5등급으로 급격히 발달한 허리케인 카트리나와 리타의 이동경로 및 그때의 수온과 해류 분포(오른쪽 그림).	25
<그림 3-1-1> 이어도 과학기지의 위치.	27
<그림 3-1-2> 이어도 과학기지 주변 지형도 및 설치 위치. (위: 3차원 해저 지형도, 아래: 지형과 수심에 따른 수직단면도).	28
<그림 3-1-3> 이어도 과학기지에 설치된 해양기상 관측 장비 및 설비.	29
<그림 3-1-4> 이어도 과학기지에 설치된 주요 해양기상 관측설비 장비사진과 관측요소 30	30
<그림 3-1-5> 원격 관측 및 제어를 위한 통신망의 흐름도.	31
<그림 3-1-6> (a) 1950부터 2004년까지 한반도에 상륙한 태풍의 경로. 이 중에 이어도 과학기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍(빨간 선 표시)은 63%를 차지함. (b) 1950부터 2004년까지 이어도 과학기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍.	34
<그림 3-1-7> 태풍 에위니아(2006)의 이동경로와 이 시기의 이어도, 서귀포, 진도에서의 해면기압 시계열 분포.	35
<그림 3-1-8> (좌측그림) 한반도 근해의 주요한 해류 및 수괴 분포. (우측그림) 1. 난류가 지나는 제주도 우측 해역을 통과하여 주로 남해안으로 상륙하는 태풍의 유형. 2. 황해저층냉수가 분포하는 제주도 좌측을 통과하여 주로 서해안으로 상륙하는 태풍의 유형.	36
<그림 3-1-9> 태풍 에위니아 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 증별 수온분포.	37

<그림 3-1-10> 태풍 매미 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 (a) 기압, (b) 온도, (c) 습도, (d) 풍속, (e) 풍향의 시계열 분포.	39
<그림 3-1-11> 태풍 매미 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 (a) 해수면, (b) 수온, (c) 전기전도도(d) 최대파고, (e) 유의파고의 시계열 분포.	41
<그림 3-1-12> 태풍 매미가 이어도 기지를 가장 가까이 통과한 9월 12일 12경에 (a) 주파수 스펙트럼과 (b) 방향별주파수 스펙트럼의 분포.	42
<그림 3-1-13> 2003년부터 2006년까지 이어도 기지를 통과하여 한반도에 상륙한 태풍의 경로: 1. 매미(2003), 2. 메기(2004), 3. 에위니아(2006), 4. 민들레(2004).	44
<그림 3-1-14> 태풍 매미(2003), 메기(2004), 에위니아(2006), 민들레(2004)의 최대풍속과 태풍의 이동속도.	45
<그림 3-1-15> (상단) 태풍 매미(2003) 시기에 JTWC의 태풍정보와 기상관측소에 관측한 자료의 비교. 붉은 선은 JTWC 자료, 파란 사각형은 7지점에서 관측된 값을 나타냄. (하단) 각 지점에서 관측된 풍속과 기압의 시계열.	46
<그림 3-1-16> 그림 3-1-15와 동일하지만 태풍 메기(2004) 시기의 자료.	47
<그림 3-1-17> 그림 3-1-15와 동일하지만 태풍 민들레(2004) 시기의 자료.	48
<그림 3-1-18> 그림 3-1-15와 동일하지만 태풍 에위니아(2008) 시기의 자료.	49
<그림 3-1-19> 태풍 매미 시기(2003년 9월 12일 12UTC)에 해상풍 모델과 파랑모델로부터 모사된 해상풍과 유의파고의 공간적인 분포. 여기서 붉은 선은 태풍의 이동경로를 나타냄.	51
<그림 3-1-20> 태풍 매미 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 풍속(상단)과 풍향(하단)의 시계열 자료를 해상풍 모델의 결과와 비교. 점선은 관측값, 실선은 모델값을 나타냄.	52
<그림 3-1-21> 태풍 매미 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 유의파고(상단), 피크주기(중단), 평균파향(하단)의 시계열 자료를 파랑모델의 결과와 비교. 점선은 관측값, 실선은 모델값을 나타냄.	53
<그림 3-2-1> S1 시나리오와 H2 시나리오 사이의 해수면 온도 차. 한반도 주변이 다른 지역보다 해수면온도 증가량이 월등히 높음.	54
<그림 3-2-2> 해수면 온도(SST)의 공간적 증가경향. (a)1870년부터 2007년까지 전 계절간의 SST증가율. (b)1979년부터 2007년까지 전 계절간의 SST증가율.	55
<그림 3-2-3> 열대지역(20N-20S)의 해수면 온도 시계열. 각 자료별 파선은 5년 이동평균을 실선은 선형회귀선을 나타냄. 1982년을 경계로 이전 약 130년과 이후 약 25년 사이의 증가율을 비교하였음.	56
<그림 3-2-4> 전 지역과 열대지역(20N-20S)의 SST증가정도의 비율. 전체지역의 증가율을 열대지역의 증가율의 평균으로 나눔. 한반도 주변해역에서 약 4에서 7의 값을 가지며 이는 열대지역보다 4배에서 7배 더 많이 SST가 증가함을 의미함.	56
<그림 3-2-5> 우리나라 주변의 해수면온도(SST) 증가율 (1979-2007. NOAA-ER SST V3). 우리나라 주변에서 높은 증가 경향을 보임.	57
<그림 3-2-6> 우리나라 주변의 수직바람시어 증가경향 (1979-2007. NCEP Reanalysis data). 우리나라 주변에서 음의 수직바람시어가 생겨 태풍발달에 유리한 기상조건을 보임.	57

<그림 3-2-7> 태풍 예위니아의 이동경도와 수온의 단면을 조사하기 위한 선. A는 이어도를 지나는 동서 단면(32.1°N), B는 126°E 경도 선상의 남북 단면, 그리고 C는 제주도를 지나는 동서 단면(33.4°N).	58
<그림 3-2-8> 이어도 기지를 지나는 동-서 단면의 수온 분포. (위) 6 July 2006 00Z, (중간) 11 July 2006 00Z, (아래) 26 July 2006 00Z. $\times\times\times$ 표시는 이어도 기지의 위치를 나타냄. 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 임.	59
<그림 3-2-9> 제주도를 지나는 동-서 단면의 수온 분포. (위) 6 July 2006 00Z, (중간) 11 July 2006 00Z, (아래) 26 July 2006 00Z. 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 임. ..	60
<그림 3-2-10> 126°E 를 지나는 남-북 단면의 수온 분포. (위) 6 July 2006 00Z, (중간) 11 July 2006 00Z, (아래) 26 July 2006 00Z. 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 임. ..	61
<그림 3-2-11> 한반도 근해 7월의 층별 수온의 수평분포. (a) 표층, (b) 24m, (c) 48m, (d) 72m.	62
<그림 3-2-12> 태풍 예위니아 통과 시기에 표층해류(화살표)와 SST(칼라)의 변화. (a)~(w)는 6시간 간격의 해수면 온도와 표층해류의 모습. $\times$ 표시는 이어도 기지의 위치를, 흰 선은 태풍경로를 나타냄.	65
<그림 3-2-13> 태풍 예위니아 통과 시기에 SST Anomaly의 변화. (a) 8 July 2006 00Z, (b) 9 July 2006 00Z, (c) 10 July 2006 00Z, (d) 11 July 2006 00Z. $\times$ 표시는 이어도 기지의 위치를, 검은 선은 태풍경로를 나타냄.	78
<그림 3-2-14> 태풍 예위니아 통과 시기에 혼합층 깊이의 변화. (a) 8 July 2006 00Z, (b) 9 July 2006 00Z, (c) 10 July 2006 00Z, (d) 11 July 2006 00Z. $\times$ 표시는 이어도 기지의 위치를, 검은 선은 태풍경로를 나타냄.	80
<그림 3-2-15> 태풍 예위니아 통과 시기에 이어도 기지를 지나는 동-서 단면에서 수온의 수직분포 변화. (a) 9 July 2006 12Z, (b) 9 July 2006 18Z, (c) 10 July 2006 00Z, (d) 11 July 2006 00Z. $\times$ 표시는 이어도 기지의 위치를 나타냄.	82
<그림 3-2-16> 태풍 예위니아 통과 시기에 126°E 경도 선상의 남북 단면에서 수온의 수직분포 변화(아래), 중심기압변화(위), 그리고 바람응력과 SST 변화(중간). (a) 8 July 2006 13Z, (b) 8 July 2006 18Z, (c) 9 July 2006 00Z, (d) 09 July 2006 06Z, (e) 09 July 2006 12Z, (f) 9 July 2006 18Z, (g) 10 July 2006 00Z, (h) 10 July 2006 06Z.	86
<그림 3-2-17> 태풍 예위니아 통과 시기(2006년 7월 10일 00시)에 126°E 경도 선상의 남북 단면에서 수온과 혼합층 깊이 비교. (위) Control 실험, (아래) 태풍 실험, (중간) 두 실험의 MLD 차이. (a) 8 July 2006 13Z, (b) 8 July 2006 18Z, (c) 9 July 2006 00Z, (d) 09 July 2006 06Z, (e) 09 July 2006 12Z, (f) 9 July 2006 18Z, (g) 10 July 2006 00Z, (h) 10 July 2006 06Z.	90
<그림 3-2-18> 태풍 예위니아 통과 시기에 (a) 이어도 기지에서 관측된 층별 수온, (b) 이어도 기지에서 모델의 층별 수온, (c) 이어도 기지에서 0.5°E 우측에서의 모델결과, (d) 이어도 기지에서 0.7°E 우측에서의 모델결과.	91
<그림 3-3-1> (a) 1950부터 2004년까지 한반도에 상륙한 태풍의 경로. 이 중에 이어도	

과학기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍 (빨간 선 표시)은 54%를 차지함. (b) 1950부터 2004년까지 이어도 과학기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍.	92
<그림 3-3-2>한반도 상륙 태풍의 강도를 결정하는 두 가지 이동 경로의 구분. 좌측 (Type B)은 난류는 피해가고 황해저층냉수를 통과하는 태풍이며 우측 (Type A)은 난류를 통과하여 강한 태풍으로 한반도에 상륙한 태풍. (인용 : 문일주, 2009)	93
<그림 3-3-3> 표층 (좌측)과 그 아래 수심에서 수온의 분포. (인용 : 문일주, 2009)	94
<그림 3-3-4> 1950부터 2004년까지 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 의 격자에 통과한 태풍의 개수 (위)와 평균 풍속 (아래). (인용 : 문일주, 2009)	95
<그림 3-3-5> (a) 태풍 에위니아 경로와 ARGO위치를 나타냄. 파란 선은 태풍 경로로 6시간 간격의 태풍 중심과 최소 중심기압을 표현함. X 마크는 이어도 종합해양기지가 있고 삼각형은 ARGO 위치를 나타냄. (b) TMI 위성자료로 태풍 에위니아가 지나가기 전 (7월 1일)의 수온 분포를 표현함. (c) 태풍이 한반도를 통과한 후 (7월 13일)의 위성자료.	97
<그림 3-3-6> ARGO float에서 얻은 수온 프로파일. 파선은 태풍 에위니아가 통과하기 전, 실선은 태풍이 통과한 후를 표현함. (a) 는 그림 12에서 G2이고, (b)는 G3임.	99
<그림 3-3-7> 태풍 에위니아에 대한 수치모델의 바람장 (m/s). 등풍속선은 각각 17m/s 와 32m/s 풍속일 때를 나타냄.	102
<그림 3-3-8> (a - d) 태풍 통과 전의 ARGO와 비교한 수치모델의 수온분포. (e) G5에서 태풍 통과 후 수치모델과 ARGO 비교. 점선은 수치모델, 실선은 ARGO의 수온분포 (각각 G1, G2, G4 과 G5).	103
<그림 3-3-9> (a) 수치모델에서 얻은 초기 해수면 온도와 등수심선은 혼합층 깊이. (b)는 해양열용량. (c) 태풍 통과 전 Jason-2 satellite의 해수면 고도.	106
<그림 3-3-10> (a) 최대 풍속 반경 + 5km 안에서 태풍에 의해 해수면 온도 변화. 가로축은 7월 5일 6시부터 7월 10일 18시까지 12시간 간격의 시간을 나타내고 세로축은 태풍 중심을 위경도로 나타냄. (b) 에위니아 경로에서 태풍 자취 (footprint)에 선정된 10개 지역을 표현함.	108
<그림 3-3-11> (a) 최대 수온 하강 흔적도 (cooling swath). (b) 태풍 통과 후 최대 수온 하강 발생시간 (Cooling swath day).	110
<그림 3-3-12> (a) 최소 중심기압, 풍속의 시계열, (b) 이동속도 (c) 태풍 트랙을 따라 최대 풍속반경 + 5km 내의 평균값인 해수면 냉각 (d) 혼합층 깊이 (e) 해양열용량.	112
<그림 3-3-13> 한국 해양 자료센터의 수심 0m(위 그림), 50m(아래 그림)의 수평 수온 분포.	113
<그림 3-3-14> 한반도 근해 7월의 층별 수온의 수평분포. (a) 표층, (b) 24m, (c) 48m, (d) 72m (인용 : 문일주, 2009)	115
<그림 3-3-15> 황해 저층 냉수의 수평분포. (a) 1980년부터 2007년 (b) 1980년대 (c) 1990년대 (d) 2000년대 (e) 1994년부터 2007년.	118
<그림 3-3-16> 2008 - 2009년도 이어도기지를 활용한 자료 모음. (a) IORS에서 수온 (Row data) (b) 전기전도도 (Row data) (c) 월별 오류 개수.	121

<그림 3-3-17> (a) 자료 보정한 수온 (b) 자료 보정한 염분 (c) 수온 프로파일의 변화.	124
<그림 3-3-18> IORS와 분석에 사용된 KODC 관측 위치.	126
<그림 3-3-19> (a) IORS와 KODC의 2월 수온 비교 (b) 2월 염분 비교 (c) 8월 수온 비교 (d) 8월 염분비교.	127
<그림 3-4-1> 이어도 관측기지 위치(x표시) 및 태풍 에위니아 전로도(검은 실선).	129
<그림 3-4-2> 태풍 에위니아가 이어도 과학기지를 (a)통과 하기 전과 (b)통과한 후의 해수면 온도.	130
<그림 3-4-3> 본 연구에 사용된 수치모델의 도메인 및 모델에 입력된 바람장의 모습.	132
<그림 3-4-4> 2006년 7월 1일부터 15일까지 태풍 에위니아의 통과 시기에 관측과 모델로부터 모의된 여러 해양 및 기상 요소들의 시계열 변화.	133
<그림 3-4-5> 태풍 에위니아 통과 전후 해수면 온도.	134
<그림 3-4-6> 세 경우의 수치모델결과 비교.	135
<그림 3-4-7> (a-c) 7월 9일 22시의 수치모델에서 얻은 이어도 기지 주변의 바닥흐름, 수온과 지형(X표시, 역삼각형은 이어도 기지).	136
<그림 3-4-8> Response function used in this model	138
<그림 3-4-9> 850hPa total wind field of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 before filtering.	138
<그림 3-4-10> 850hPa basic wind field of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 after filtering.	139
<그림 3-4-11> 850hPa disturbance wind field of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 after filtering.	139
<그림 3-4-12> The filter to remove an analyzed vortex in 850hPa disturbance wind field of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 after Lanczos filtering.	141
<그림 3-4-13> 850hPa disturbance wind field removed TC component on inner filter area of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 after Lanczos filtering.	142
<그림 3-4-14> 850hPa axisymmetric wind field in the inner filter area of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 after Lanczos filtering.	145
<그림 3-4-15> 850hPa artificial vortex wind field of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 after Lanczos filtering.	145
<그림 3-4-16> Sea level pressure and wind field of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 (a) before bogus and (b) after bogus	146
<그림 3-4-17> Longitudinal vertical structure of y-wind component near TC center	147
<그림 3-4-18> WRF 모델에서 모의된 과거 2003년 9월 태풍 매미. (a)는 2003년 9월 12일 03시, (b)는 06시, (c)는 09시, (d)는 12시, (e)는 15시, (f)는 18시.	148
<그림 3-4-19> Spatial distributions of various sea surface temperature data used as initial conditions of WRF model: (a) GFS 100 km, (b) RTG	

100 km, (c) RTG 50 km, (d) NGSST 5 km, (e) AVHRR 4 km, and (f) HYCOM 9 km.	153
<그림 3-4-20> Comparison of simulated wind speed at Wando (upper panel) and Ulsan (lower panel) according to various experiments based on Table 2.154	
<그림 3-4-21> 이어도 과학기지를 통과한 2010년 4호 태풍 덴무(DIANML)의 진로.	155
<그림 3-4-22> 이어도 과학기지를 통과한 2010년 7호 태풍 곤파스(KOMPASU)의 진로.	156
<그림 3-4-23> 이어도 과학기지를 통과한 2010년 9호 태풍 말로(MALOU)의 진로.	157
<그림 3-4-24> 이어도 과학기지에서 관측된 2010년 8월-9월 (a)기압, 기온, (b)유의파고, 최대파고의 시계열.	158
<그림 3-4-25> 이어도 과학기지에서 관측된 (a)바람세기, (b)바람세기 및 풍향.	158
<그림 3-4-26> 이어도 과학기지에서 관측된 자료 보정 전 (a)층별 수온, (b)층별 염분.	159
<그림 3-4-27> 이어도 과학기지에서 관측된 자료 보정 후 (a)층별 수온, (b)층별 염분.	160
<그림 3-4-28> 태풍 덴무 시기의 이어도 과학기지 통과 (a) 1일 전, (b) 1일 후, (c) 2일 후 해수면 온도.	161
<그림 3-4-29> 태풍 곤파스 시기의 이어도 과학기지 통과 (a) 1일 전, (b) 1일 후, (c) 2일 후 해수면 온도.	162
<그림 3-4-30> (a) 태풍 곤파스가 이어도 과학기지를 통과하고 난 3일 후의 해수면 온도, (b) 태풍 말로가 이어도 과학기지 통과하기 하루 전의 해수면 온도.	163
<그림 3-4-31> 2008월 1월부터 2010년 8월까지 이어도 과학기지에서 관측된 층별 (a) 수온 및 (b)염분의 시계열.	164
<그림 3-4-32> 2008월 1월부터 2010년 7월까지 이어도 과학기지에서 관측된 층별 수온의 월평균 시계열.	165
<그림 3-4-33> 2008월 1월부터 2010년 3월까지 이어도 과학기지에서 관측된 월평균 수온수직 프로파일.	166
<그림 3-5-1> 실험에 사용된 연구 범위와 격자 별 해상도.	167
<그림 3-5-2> 각 실험별 수온 수직 프로파일. 각각의 프로파일은 이어도 기지의 관측치를 참고하여 작성됨.	168
<그림 3-5-3> 각 실험별 72시간 뒤 해수면 냉각 결과 치. 각 값들은 태풍 중심 내 평균값임.	168
<그림 3-5-4> 각 실험 별 최저 중심기압(상단)과 최대풍속(하단)의 시계열.	169
<그림 3-5-5> 여름철 동중국해 해수면 염분 분포도. 점선은 7~8월 30psu 염분선을 의미하며 흰 실선은 저염수 위를 지나간 태풍의 진로임. 빨간색 실선 밑은(하단) 상층에 저염수가 존재하여 강한 성층이 생김.	172
<그림 3-5-6> 태풍 내습 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 (a)층별 수온, (b)층별 염분.	173
<그림 3-5-7> 저염 패치 실험에 사용된 저염수 패치의 수평(상단), 수직(하단) 구조.	174
<그림 3-5-8> 성층 정도에 따른 태풍 강도 변화 확인 실험에 사용된 염분 수직 프로파일.	175
<그림 3-5-9> 각 실험별 해수면 염분 분포(상단) 및 해수면 온도 분포(하단). 좌측은 저염 패치가 없는 경우이며 우측은 저염 패치가 있는 경우. x표시는 저	

염 패치의 중심을 의미함.	176
<그림 3-5-10> 저염 패치 통과 실험에서 각 실험 별 (a)해수면 냉각, (b)최저 중심 기압의 시계열. 빨간색 박스는 저염 패치 안을 의미하며 파란색 박스는 해수면 온도 되먹임(Sea Surface Temperature Feedback) 효과를 볼 수 있는 부분을 의미함.	179
<그림 3-5-11> 성층 정도에 따른 태풍 강도 변화 실험의 최저 중심 기압 시계열.	180
<그림 3-5-12> 대기모델의 연직 좌표.	181
<그림 3-5-13> 대기모델의 물리과정 모식도.	182
<그림 3-5-14> 대기-해양 플럭스 교환 모식도.	182
<그림 3-5-15> 해양모델의 연직 좌표.	183
<그림 3-5-16> 태풍에 의한 해양 혼합 과정인 수직혼합 과정(상단)과 용승과정(하단) 모식도.	184
<그림 3-5-17> 접합 모델 내 MPI 서브루틴 모식도.	185
<그림 3-5-18> 접합모델 연구 도메인.	187
<그림 3-5-19> 태풍 에위니아 시기의 각 민감도 실험별 태풍 진로도.	189
<그림 3-5-20> 태풍 에위니아 시기의 각 민감도 실험별 최저중심기압 (상단) 최대 강풍(하단) 비교 시계열.	190
<그림 3-5-21> 태풍 에위니아 시기의 연직 시어 분포도. (a)NCEP-FNL 분석값. (b)~(d)는 접합 모델 결과로 3일 간격 임.	191
<그림 3-5-22> 태풍 에위니아 시기의 해수면 온도 및 해류 분포도. 흰색 실선은 태풍의 진로를 의미하며 파란색 박스는 최대 해수면 냉각이 보인 지점을 의미함.	193
<그림 3-5-23> 최대 해수면 냉각을 보인 지점(그림 3-5-18의 파란 박스)의 해수면 온도 평균의 시계열. 빨간색 실선은 모델 결과를 의미하며 파란색 실선은 관측치를 의미함.	194
<그림 3-5-24> 태풍 곤파스 시기 접합모델의 진로 예측도. 검정실선은 관측치를 의미하며 빨간색 실선은 모델 예측치임.	195
<그림 3-5-25> 태풍 곤파스 시기 접합 모델의 최저 중심기압(상단) 및 최대 풍속(하단)의 시계열. 검정실선은 관측치를 의미하며 빨간색 실선은 모델 예측치임.	196
<그림 3-5-26> 2008월 1월부터 2011년 8월까지 이어도 과학기지에서 관측된 층별 수온 시계열.	197
<그림 3-5-27> 2008월 1월부터 2011년 8월까지 이어도 과학기지에서 관측된 층별 염분 시계열.	198

< 표 차 례 >

<표 1> 1950년에서 2008년까지 JTWC 최적 경로 자료를 사용한 한반도에 상륙한 태풍 경로에 대한 분류. (인용 : 문일주, 2009)	96
<표 2> Experimental design for sensitive test using various sea surface temperature in offshore wind simulation.	151
<표 3> Summary of WRF and ROMS model configuration.	186
<표 4> Design of sensitivity experiments.	187

제1장 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 목적

(1) 연구개발의 최종 목적

- 이어도 기지에서 관측된 해양 및 대기 자료를 이용한 한반도 상륙 태풍 특성 조사 및 태풍 예측기술 향상

(2) 장기목표/전략과의 연계성

- 장기목표: 해양-대기 상호작용을 고려한 태풍예측 모델 개발로 한반도 상륙 태풍예측 기술 향상.
- 장기목표/전략과의 연계성: 해양-대기 상호작용을 고려한 우리나라 태풍 예측 시스템을 구성하기 위해서는 태풍의 이동 경로에 있는 해상의 상태를 모니터링 할 필요가 있음. 이어도 기지의 해양 및 대기 관측 자료는 향후 개발될 태풍 예측 모델의 초기조건의 생성에 활용될 예정임.

(3) 내용 및 범위

- 이어도 기지를 통과한 태풍에 대한 기상 관측자료(바람, 기온, 기압 등)와 해양 관측자료(수온, 해수면, 해류 등) 분석
- 이어도 해양/기상 자료와 한반도 상륙 태풍강도 변화의 연관성 분석
- 지난 55년간 RSMC, JTWC 태풍자료 및 전구제분석자료를 이용한 한반도 상륙 태풍 강도/진로 분석 및 해양/기상 환경과의 연관성 조사
- 이어도 주변 여름철 태풍 경로 상의 해양환경 조사: 연안관측 수온 및 염분 자료 분석
- 기후변화에 따른 한반도 상륙 태풍특성 분석
- 이어도 기지 해양대기 관측 자료의 검·보증 및 수치모델 결과와 비교
- 이어도 기지에서 관측된 태풍 통과 시 해양의 반응을 조사하여 TMI 위성자료와 ARGO float의 연직 수온 자료와 비교
- 수치모델을 이용한 태풍 에워니아 통과 시 해양의 수온 변화 조사
- 태풍 강도에 영향을 주는 황해 저층 냉수 조사 : 미해군 자료동화 자료와 한국해양자료센터 자료 분석
- ROMS 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍에 대한 해양반응 조사 및 모델검증
- WRF모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍의 해양-대기 상호작용 연구 및 모델검증

- 이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 초기조건 개선
- 이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 검증
- 이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료 분석

(4) 연차별 연구 목표 및 내용

구 분	목 표	내 용 및 범 위
1 차년도 (2007)	- 이어도 기지에서 관측된 과거 태풍 자료 분석하여 한반도에 상륙한 태풍의 특성 조사	- 이어도 기지를 통과한 태풍에 대한 기상 관측자료(바람, 기온, 기압 등)와 해양 관측자료(수온, 해수면, 해류 등) 분석 - 이어도 해양/기상 자료와 한반도 상륙 태풍강도 변화의 연관성 분석
2 차년도 (2008)	- 한반도 상륙 태풍 강도를 결정하는 해양/기상 요인 조사 및 이어도 태풍 관측자료 검증.	- 지난 55년간 RSMC, JTWC 태풍자료 및 전구개 분석자료를 이용한 한반도 상륙 태풍 강도/진로 분석 및 해양/기상 환경과의 연관성 조사 - 이어도 주변 여름철 태풍 경로 상의 해양환경 조사: 연안관측 수온 및 염분 자료 분석 - 기후변화에 따른 한반도 상륙 태풍특성 분석 - 이어도 기지 해양대기 관측 자료의 검증 및 수치모델 결과와 비교
3 차년도 (2009)	- 이어도 기지를 이용한 태풍-해양 상호작용 연구 및 한반도 상륙 태풍 강도 예측	- 이어도 기지에서 관측된 태풍 통과 시 해양의 반응을 조사하여 TMI 위성자료와 ARGO float의 연직 수온 자료와 비교 - 수치모델을 이용한 태풍 에워니아 통과 시 해양의 수온 변화 조사 - 태풍 강도에 영향을 주는 황해 저층 냉수 조사 : 미해군 자료동화 자료와 한국 해양자료 센터 자료 분석 - 이어도 기지의 층별 수온과 염분의 계절 변화 특성 조사
4 차년도 (2010)	- 태풍예측기술 향상을 위한 이어도 기지 관측자료를 이용한 해양 및 대기 모델의 검증	- ROMS 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍에 대한 해양반응 조사 및 모델검증 - WRF 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍의 해양-대기 상호작용 연구 및 모델검증 - 이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료 분석
5 차년도 (2011)	- 이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 초기조건 개선 및 예측능력 향상	- 이어도 기지에서 관측된 풍속, 풍향, 기압, 온도, 수온, 조위, 자료를 분석하여 태풍-해양 접합모델의 초기 값 및 모델검증에 활용. - 실시간 수온자료는 해양모델의 초기화과정에 사용되고 바람자료는 태풍모델 초기화과정에 활용. - 이어도 관측자료를 사용하여 검증모델의 검증에 활용

2. 연구개발의 필요성

(1) 기술적 측면

- 이어도 과학기지는 우리나라 최남단 마라도에서 남서쪽으로 149km 떨어진 수심 55m 암초에 세워진 해양 및 기상 관측 타워로 우리나라에 상륙하는 대부분의 태풍이 통과하는 길목에 위치함(그림 1-1).
- 55년간 한반도 상륙 태풍의 63%가 이어도 기지를 가까이 통과하였고, 매년 평균 한 개의 태풍의 이어도 기지 주변을 통과함(그림 1-1).

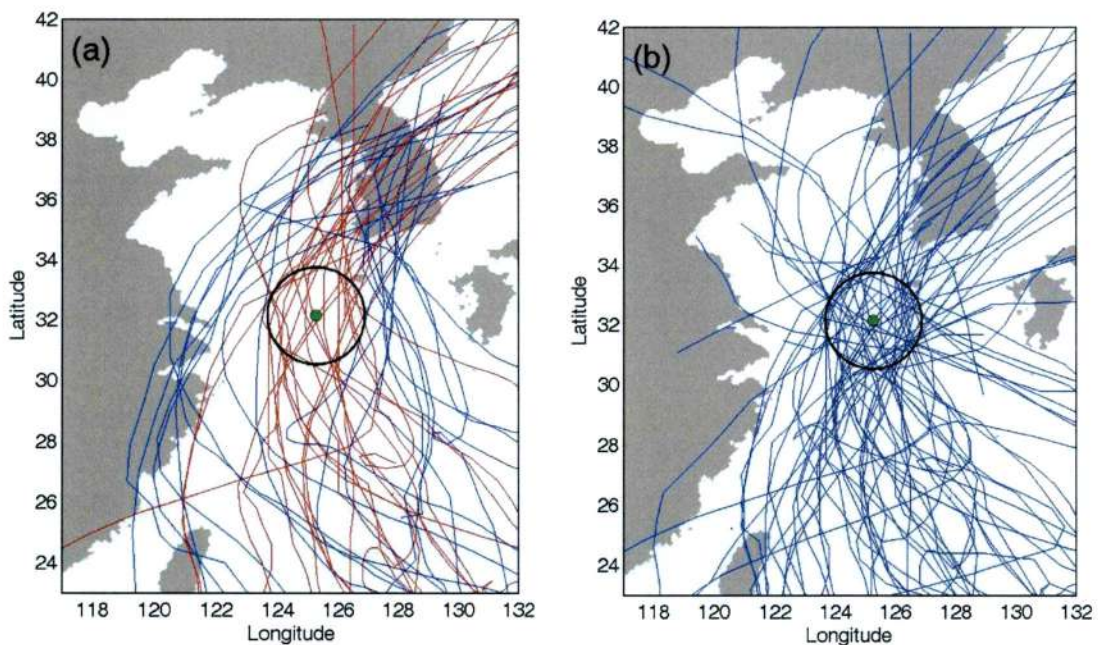


그림 1-1. (a) 55년간 한반도에 상륙한 태풍(파란색) 중에 이어도 기지 150km 반경 내를 지나간 태풍(빨간색)의 트랙. 한반도 상륙 태풍의 63%가 이어도 기지를 통과하였음. (b) 55년간 이어도 기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍의 모든 경로. 매년 평균 한 개의 태풍의 이어도 기지 주변을 통과함.

- 이어도 기지는 태풍이 제주도에 도달되기 4-6시간, 그리고 우리나라 내륙지방에 상륙하기 8-12 시간 전에 중요한 기상 및 해양 자료를 제공함(그림 1-2).
- 이어도 기지에서 관측되는 중요한 자료 중에 하나는 태풍의 강도에 크게 영향을 미치는 해양의 층별 수온 자료임.
- 2006년 태풍 에위니아가 이어도 기지를 가까이 통과할 때 층별로 최대 12°C의 수온 하강이 기록되었음(그림 1-3). 이때 태풍 에위니아는 급격한 수온 감소로 인해 그 세력이 급격히 약해져 이어도 기지를 통과한 후 열대폭풍으로 약화되었음. 태풍은 진로상의 표층수온이 1°C만 감소하여도 그 강도에 크게 영향을 받음.

- 이어도 기지의 수온자료는 태풍의 강도를 예측하는데 유용하게 사용될 수 있음.
- 이어도 기지의 수온자료 뿐 아니라 태풍의 기압, 바람 등 기상자료도 태풍의 강도를 예측하는 데 매우 유용하게 사용될 수 있음.
- 우리나라는 아직까지 이어도 기지의 자료를 활용한 한반도 상륙 태풍 특성 파악 및 예측 연구가 없었음.

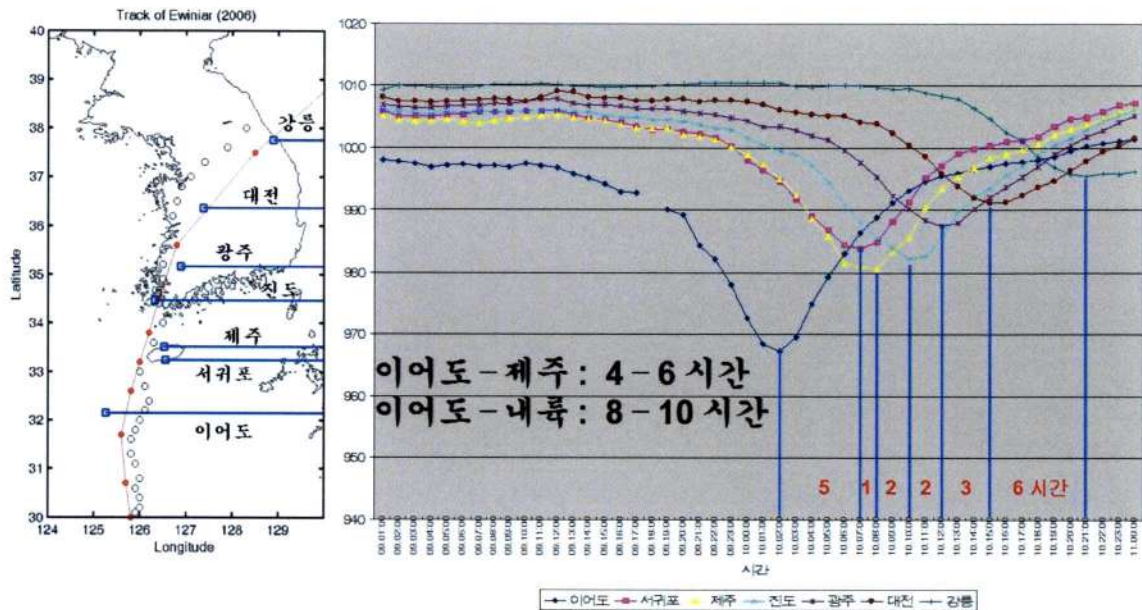


그림 1-2. 태풍 에위니아(0603)가 지날 때 각기 다른 관측소에서의 기압 시계열자료(인용 : 문일주, 2009).

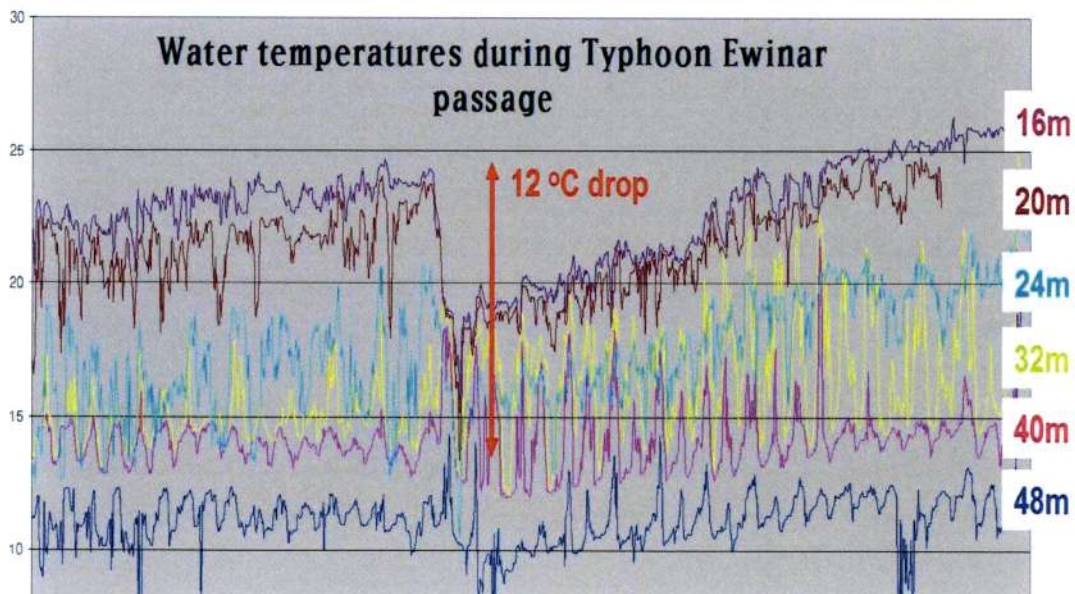


그림 1-3. 이어도 해양기지에서 태풍 에위니아(2006) 통과 시기에 관측된 층별수온 자료(인용 : 문일주, 2009)

(2) 경제 · 산업적 측면

- 지난 10년간 (1995-2004년) 우리나라에서 발생한 자연재해를 원인별로 분석해 보면 태풍에 의한 피해가 전체의 약 60%를 차지하고 있음(그림 1-4 참고). 또한 태풍에 의한 피해액은 꾸준히 증가하여 지난 50년 동안 피해액은 약 50배 증가하였음(그림 1-5 참고)
- 태풍에 의한 피해 중에 적절한 대비를 하지 않아 입은 피해가 매우 크기 때문에 태풍 접근 시에는 신속하고 정확한 태풍의 진로와 강도, 파랑 및 폭풍해일에 대한 예보는 자연재해에 의한 인명과 재산 피해를 줄이는데 크게 기여할 수 있음.
- 수출에 크게 의존하는 우리나라는 태풍과 이로 인해 발생하는 파랑 및 폭풍해일에 대한 종합적인 해상 악기상 예보가 물류수송의 기반이 되는 연안부두 방재 및 선박의 안전 운행에 필수적임.
- 이어도 기지의 관측자료는 태풍, 파랑, 폭풍해일의 예측기술 향상에 기여할 수 있음.

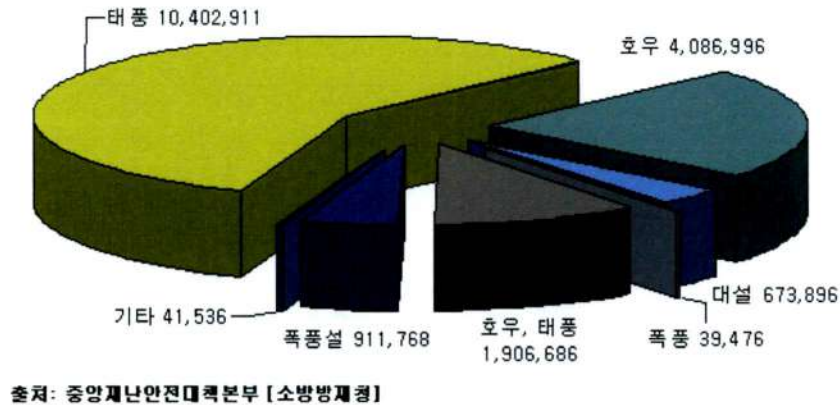


그림 1-4. 우리나라 자연재해 피해 현황

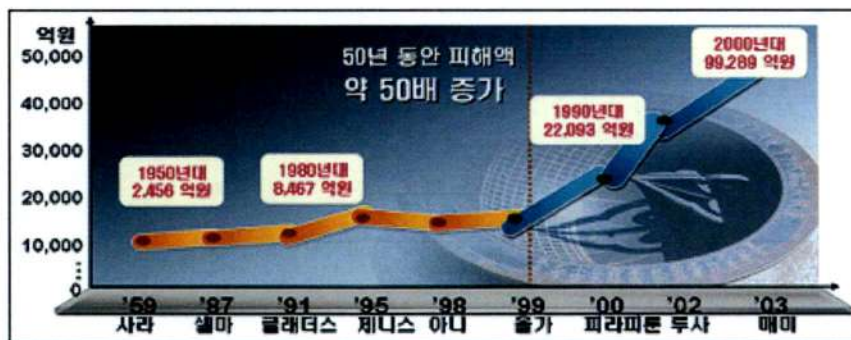


그림 1-5. 한반도 상륙 태풍에 의해 생긴 재산피해 규모의 변화(인용:문일주,2009)

(3) 사회 · 문화적 측면

- 바다와 해안에서 레저인구의 증가로 양질의 태풍 예측자료를 필요함.
- 태풍 예측기술 향상은 해난사고와 돌발성 자연재해로 인한 피해를 예방함으로써 국민복지에 기여함.
- 우리나라에 상륙한 태풍의 강도를 분석해 본 결과 지난 55년간 꾸준히 중심기압이 감소한 것으로 나타남(그림 1-6 참고). 평균적으로 태풍의 강도는 1970년대보다 2000년대에 중심기압이 25hPa 더 낮아진 것으로 나타남(문, 2006; 문 등, 2007 a,b,c).
- 이것은 우리나라에 상륙하는 태풍의 강도가 점점 세어지고 있다는 증거임. 향후 방파제 및 댐 건설 등 구조물 축조 시 기초 자료로 사용되고 기상 특보와 주민 대피시스템을 개선하는 측면에서 중요한 변수로 작용할 수 있음.

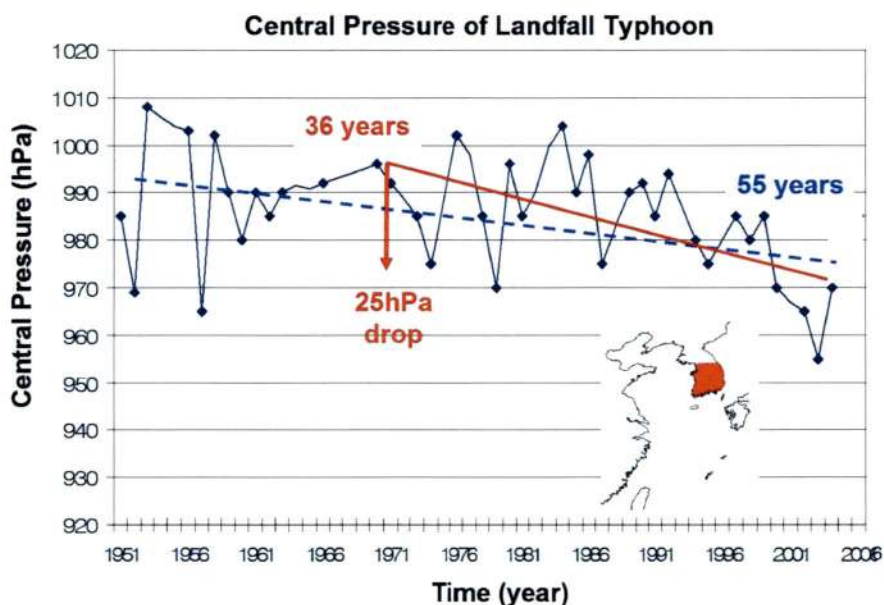


그림 1-6. 한반도 상륙태풍들의 최소중심기압 변동 시계열. 실선과 점선은 각각 36년간과 55년간의 선형회귀선임. 분석 자료는 RSMC의 best track 자료를 사용하였음(인용 : 문일주, 2009)

제 2 장 국내외 기술개발 현황 및 과학기술정보

1. 국내 · 외 연구개발동향

연구개발대상 기술	선진국 수준	국내수준	선진국 100% 대비수 준
태풍예보 시 관측자료 활용기술	- 미국은 3-6시간 간격으로 항공기를 이용하여 허리케인 내부의 대기해양 관측자료를 수집하여 예보에 활용하고 있음. - 또한 항공기에서 뜰개를 허리케인 전방에 투하하여 해양 대기 관측자료를 수집함.	- 항공기에 의한 태풍의 관측이 이루어지고 있지 않음. - 인공위성 자료와 육지와 해상의 관측소 자료를 제외하고는 거의 태풍 시기의 관측자료 활용이 불가능함. - 태풍이 외해에 있을 때 관측자료를 구할 수가 없음.	20%
관측자료를 활용한 태풍 시기의 대기-해양 상호작용 연구	- 태풍과 같은 강한 풍속 하에 대기-해양 상호작용 연구를 위한 대규모 프로그램 (예: CBLAST)을 운영 중임. - 모델, 관측, 그리고 이론에 의한 태풍의 대기-해양 상호작용 연구가 심도 깊게 이루어지고 있음.	- 태풍의 대기-해양 상호작용 연구는 관측자료 부재와 모델 접합기술의 미흡으로 시작단계에 불과함.	30%

2. 지금까지의 연구개발 현황

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황
NOAA	해양-대기 상호작용 연구를 위한 허리케인 내부의 파랑스펙트럼 관측	허리케인 출현 시 항공기의 레이다를 이용한 파랑의 관측이 실용화 단계에 있음.
Scripps Institution of Oceanography	Minimet Wind Drift를 이용한 허리케인 바람, 압력, 수온 관측	허리케인 진로에 Drift를 투하하여 대기-해양 자료의 관측이 실용화 단계에 있음.
MIT	모멘텀과 에너지 수지로부터 강한 풍속에서 대기-해양 플럭스의 추정	허리케인 모델의 역학 개선에 활용.
University of Miami, RSMAS	해양-파랑-해양 접합모델로부터 대기-해양 플럭스 추정	접합모델을 이용한 대기-해양 상호작용 연구에 활용. 실용화되지 못하고 연구용으로 사용.
HRD/NOAA	허리케인 바람장의 실시간 생성	항공기와 관측소의 자료를 이용하여 거의 실시간으로 허리케인 바람장 생성. 실용화 단계임.
University of Rhode Island, GSO	허리케인-파랑-해양 접합모델을 이용한 허리케인 예측	접합모델은 최종 완성 단계에 있으며, 이 모델은 미국 NCEP의 현업 허리케인 예보 모델로 사용될 예정임.

3. 현 기술 상태의 취약성

- 지구온난화의 영향으로 앞으로 태풍의 강도가 점점 커질 것으로 예상되어 이에 대한 적절한 대비가 요구됨. 이를 위해서는 정확한 태풍의 진로 및 강도 예측이 요구됨.
- 정확한 태풍의 진로 및 강도 예측에는 해표면의 수온이 매우 큰 역할을 하는 것으로 밝혀짐(Ginis, 2002; Moon et al., 2004c).
- 태풍의 진로 상에 발생하는 Cold Wake는 태풍의 강도를 약화시키고(그림 2-1a), 고온의 난류(warm current)는 태풍을 강화 시키는 역할을 함(그림 2-1b).
- 우리나라의 태풍 예측 시스템은 태풍의 강도와 진로 예보에 중요한 해양의 수온 변화를 적절히 고려하지 않아 예보 정확도가 선진국에 비해 떨어짐.

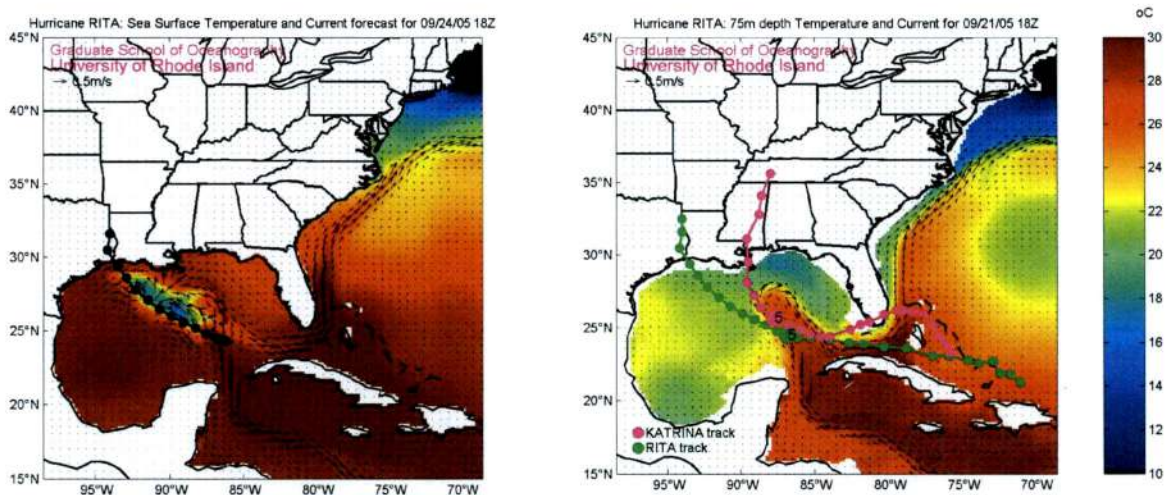


그림 2-1. 허리케인 리타의 진로를 따라 강한 바람의 혼합작용으로 발생한 Cold Wake(왼쪽그림). 높은 수온의 Gulf Stream 루프 위를 지나면서 이틀 만에 1등급에서 5등급으로 급격히 발달한 허리케인 카트리나와 리타의 이동경로 및 그때의 수온과 해류 분포(오른쪽 그림). 숫자 5는 각각 5등급 허리케인이 된 시기를 나타냄(인용 : 문일주, 2009).

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

1. 이어도 기지에서 관측된 과거 태풍 자료 분석 및 한반도 상륙 태풍 특성 조사

(1) 이어도 과학기지개관

이어도 해양과학기지는 우리나라 최초의 고정식 해양구조물로서 마라도 남서쪽으로 149km(81해리) 떨어진 북위 32° 07' 22.63", 동경 125° 10' 56.81"의 이어도 해역에 건설되었다(그림 3-1-1). 과학기지의 설치위치는 이어도 정상에서 남쪽으로 약 700m 떨어진 자점 수심 41m에 해당한다(그림 3-1-2). 이어도 주변해역의 수심은 약 55m이고, 최정상부에서의 수심은 약 4.5m 정도이다(해양수산부, 1997). 이어도 해양과학기지의 하부는 통상 설계기준면(약최저저조위)을 기준으로 수심 41m에 설치된 고정식 자켓구조물이며, 상부는 약 400평 규모의 장비설치를 위한 하부 데크(cellar deck), 주거지 및 실험실을 위한 주 테크(main deck), 해난구조와 장비 및 인력의 수송을 위한 헬기 이·착륙장(helideck) 등으로 구성되어 있다.

이어도 과학기지에는 등대, 관측실험실, 회의실, 침실, 발전실, 등대시설, 선박 계류시설, 오폐수처리 시설, 화재진압 시설, 식수 및 연료 탱크, 침입자 감시장비 등을 갖추고 있으며, 8인이 15일간 임시 거주할 수 있는 모든 시설을 갖추고 있다. 기지에 설치된 관측장비는 기상관측용 13종, 해양관측용 20종, 구조물 계측용 4종, 환경관측 및 기타 6종이 있다(그림 3-1-3, 그림 3-1-4). 이들 장비는 원격관측 및 제어가 가능하도록 설계되었으며, 관측된 자료는 무궁화위성과 글로벌스타를 통해 육상기지와 송수신 된다(Shim et al., 2004). 육상기지에는 전송된 자료가 안정적으로 저장, 활용될 수 있도록 주서버와 보조서버가 설치되어 운영되고 있으며, 실시간 기반으로 이어도 해양과학기지의 모든 설비 및 장비상태를 감시(monitoring)하고 필요시 원격 제어할 수 있도록 기능이 갖추어져 있다. 이어도 해양과학기지와 한국해양연구원의 육상기지에 설치 또는 구현되어 운영되고 있는 원격관측 및 제어시스템과 위성통신시스템의 구성내역 및 단계별 구분은 그림 3-1-5와 같다.

전송된 관측 자료는 기본적인 질 검증 단계를 거쳐 데이터베이스 저장과 함께 홈페이지(<http://ieodo.nori.go.kr/>)를 통해 일반 이용자에게 서비스되고, 동시에 인터넷망을 통하여 기상청을 비롯한 유관기관에 실시간으로 관측자료가 전달되고 있다. 이러한 모든 과정은 자동으로 이루어지고 있으며 이를 위해 필요한 각종 모듈이 상호 유기적으로 연계될 수 있도록 운영되고 있다. 그리고 통상 실시간 자료는 기상요소 전부와 대부분의 해양요소로서 특별한 요소를 제외하고는 거의 모두 매 10분 간격으로 관측하여 제공되고, 비실시간 자료는 수질 및 대기환경요소로서 연구자의 연구목적과 유지보수기간에 부합되는 관측간격으로(통상 30분) 저장된다.

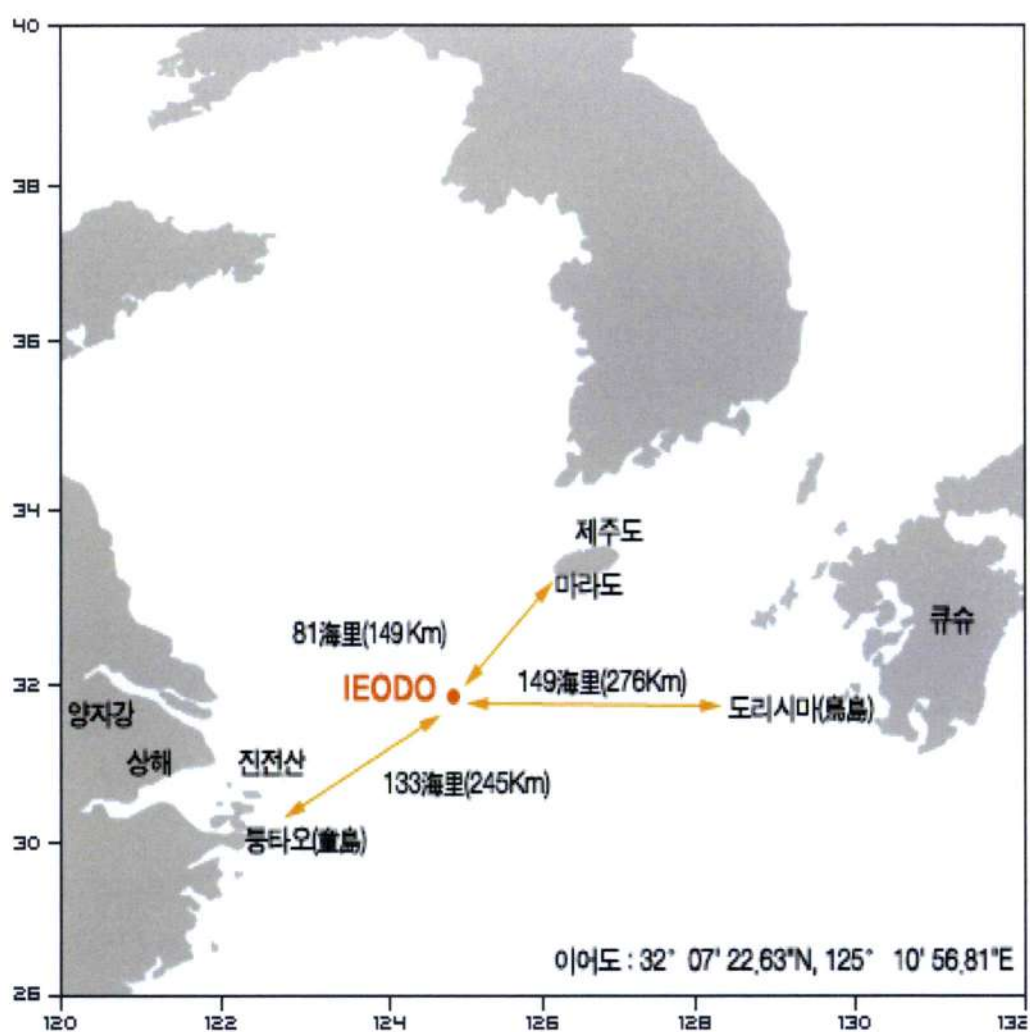


그림 3-1-1. 이어도 과학기지의 위치

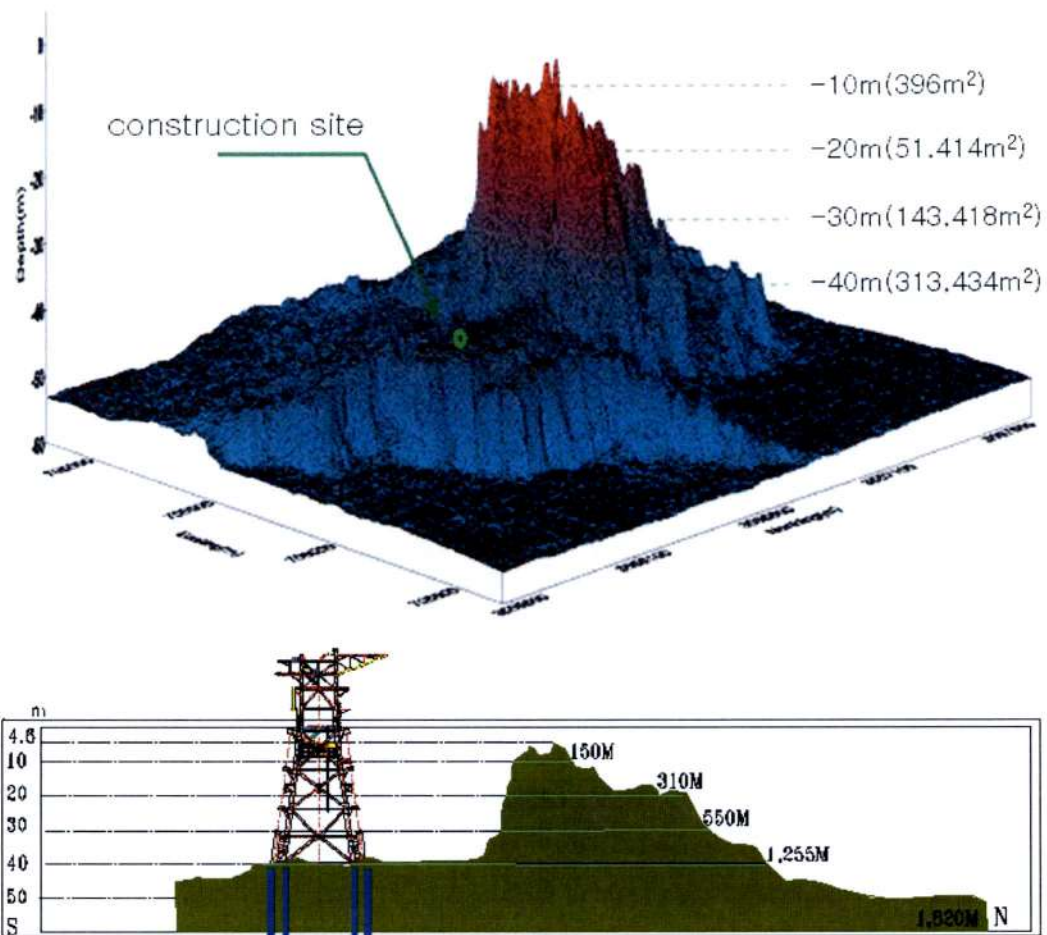


그림 3-1-2. 이어도 과학기지 주변 지형도 및 설치 위치. (위: 3차원 해저 지형도, 아래: 지형과 수심에 따른 수직단면도)

이어도 종합해양과학기지 관측장비 및 설비

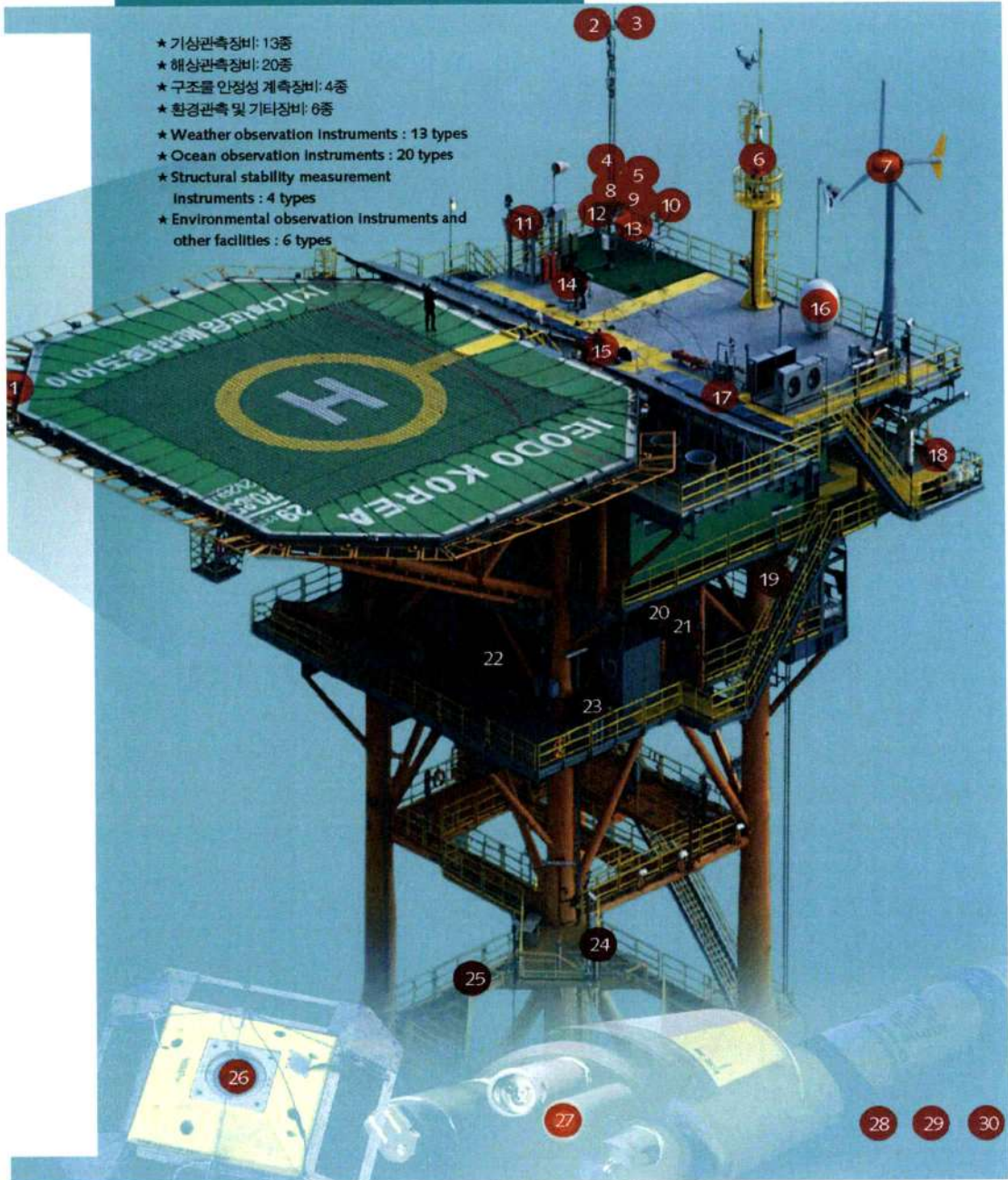


그림 3-1-3. 이어도 과학기지에 설치된 해양기상 관측 장비 및 설비



그림 3-1-4. 이어도 과학기지에 설치된 주요 해양기상 관측·설비 장비사진과 관측요소

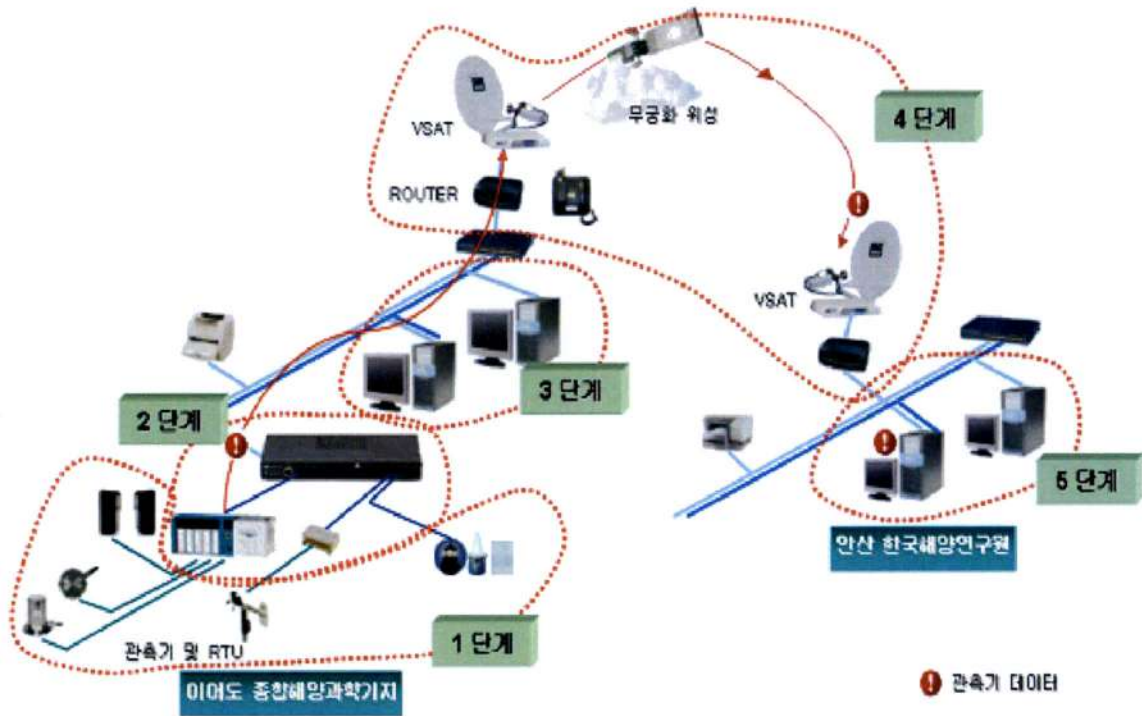


그림 3-1-5. 원격 관측 및 제어를 위한 통신망의 흐름도

(2) 태풍연구를 위한 이어도 기지의 중요성

이어도 과학기지는 우리나라에 상륙하는 많은 태풍의 길목에 위치하며, 태풍이 한반도에 상륙하기 전의 귀중한 자료를 제공할 수 있다. 이 장에서는 실제로 한반도에 상륙하는 태풍 중에 이어도 과학기지를 통과한 비율이 얼마나 되며, 이어도 기지의 태풍관측은 태풍이 한반도 상륙하기 몇 시간 전에 이루어지는 지, 그리고 태풍예측에 있어 이어도 기지 주변해역의 중요성에 대해 조사하고 자 한다.

1) 한반도 상륙 태풍의 길목에 위치한 이어도 기지

먼저 1950년부터 2004년까지 Joint Typhoon Warning Center (JTWC)의 태풍자료(6시간 간격의 태풍 중심위치, 중심기압, 최대풍속)를 이용하여 지난 55년간 한반도에 상륙한 태풍의 경로를 조사하였다(그림 3-1-6a). 여기서 한반도에 상륙한 태풍은 $1/6^{\circ}$ 격자의 중심자료를 이용하여 태풍의 중심이 한반도의 육지 격자에 한번이라도 들어왔을 때로 정의하였다. 또한 한반도 근처에서 태풍의 이동속도는 매우 빠르기 때문에 JTWC의 6시간 자료는 한반도를 지나더라도 $1/6^{\circ}$ 육지격자를 지나칠 수 있어, 보다 정확한 분석을 위하여 태풍자료는 30분 간격으로 내삽하여 적용하였다. 이와 같은 방법으로 지난 55년간 한반도에 상륙한 태풍 중에 이어도 과학기지 150km 내를 통과한 태풍(그림 3-1-6a에서 빨간 선)을 구해본 결과, 한반도 상륙 태풍의 63%가 이어도 기지를 가까이 통과하는 것으로 나타났다. 연도별로 보면 50년대 44%, 60년대 91%, 70년대 93%, 80년대 88%, 90년대 42%, 2000년대 23%로, 80년대 이전에 더 높은 비율을 보였다. 또한 1950부터 2004년까지 이어도 과학기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍만을 조사해보면 55년간 총 56개의 태풍이 지나갔음을 알 수 있다(그림 3-1-6b). 즉 이 결과는 평균적으로 매년 한 개의 태풍이 이어도 기지 주변을 통과하고 있음을 나타낸다.

2) 한반도 상륙 전 태풍정보 제공

이어도 과학기지에서 관측된 기압자료를 분석하면 태풍이 이어도 기지를 가장 가까이 통과한 시점을 알 수 있다. 그림 3-1-7는 태풍 에위니아(2006)의 이동경로와 세 지점(이어도, 서귀포, 진도)에서의 해면기압 시계열 분포를 나타낸다. 여기에서 세 지점의 기압이의 최저인 시기를 구하면, 태풍이 이어도 과학기지를 통과한 후 약 5 시간 만에 서귀포에 도달하였고, 약 8시간 후에는 진도에 도달한 것을 알 수 있다. 이어도 기지를 통과하여 한반도에 상륙한 다른 태풍, 즉 매미(2003), 민들레(2004), 매기(2004)의 경우에도 같은 방법으로 분석해 보면, 이어도 과학기지는 태풍이 서귀포에 도달하기 평균 4-6시간 전, 한반도 내륙에 도달하기 평균 8-10 시간 전의 귀중한 태풍 자료를 관측하는 것으로 나타났다.

3) 태풍예측에 있어 이어도 기지 주변해역의 중요성

이어도 과학기지는 우리나라 최남단 마라도에서 남서쪽으로 149km 떨어진 수심 55m 암초에 세워진 해양 및 기상 관측 타워이다(한국해양연구원, 1999, 2000, 2001). 이어도 기지는 동중국해에서 남해, 황해, 동해로 잇는 길목에 위치하여 해양학적으로 매우 중요한 지점이다. 먼저 이 곳은 난류인 쿠로시오와 대만해류의 지류가 황해로 유입되는 입구일 뿐 아니라 양자강의 저염수가 확장되어 우리나라 근해로 유입되는 곳이다. 여름철 황해저층에서 발견되는 냉수괴가 확장되는 곳도 이 곳 부근이다. 또한 이어도 과학기지는 동중국해 대륙붕 중심에 위치하여 해양 생물 및 지질학적으로도 매우 중요하다.

태풍의 강도는 이동경로상의 수온분포에 크게 좌우된다. 수온분포는 그 해역의 수괴 특성과 해류의 분포에 의해 주로 결정된다. 한반도에 상륙하는 태풍은 우리나라 남해, 황해, 그리고 동중국해를 통과한다. 이 해역의 수온분포를 좌우하는 가장 큰 요소는 쿠로시오와 그 지류이다(그림 3-1-8). 쿠로시오는 27°C 이상의 고온의 난류로 우리나라에 상륙하는 태풍의 길목에 위치하고 있다. 다행스러운 것은 태풍의 진로와 쿠로시오는 진행방향이 달라 비교적 짧은 시간에 둘은 서로 마주치게 된다. 그러나 제주도 우측을 통과해 우리나라 남해안으로 상륙한 태풍들은 쿠로시오 지류가 남해안을 지나는 곳에서 다시 만나게 된다. 따라서 이 경로를 지나간 태풍 사라(1959), 루사(2002), 매미(2003) 등은 난류에 의해 그 강도가 유지되어 우리나라 역사상 가장 큰 피해를 입혔다(그림 3-1-8).

한편 우리나라 황해는 여름철에 수심 50m만 내려가도 수온의 차이가 18°C 이상 차이가 나는 곳이 많다. 이것은 태양열에 의해 가열된 고온의 표층수와 겨울철에 냉각되어 저층에 자리잡고 있는 저온의 냉수대가 층을 이루고 분포하기 때문이다. 따라서 이러한 저층냉수 위를 통과하는 태풍은 강한 바람에 의한 혼합작용과 저기압에 의한 용승작용으로 쉽게 표층수와 저층냉수가 혼합되어 표층수온이 급격하게 떨어지게 된다(문, 2006). 제주도 좌측을 통과해 황해를 거쳐 우리나라 서해안으로 상륙한 태풍들은 대부분 황해저층냉수의 영향을 받아 그 강도가 급격히 떨어졌었다. 람마순(2002), 카눈(2005), 에위니아(2006)는 이러한 경로로 이동해 강도가 약해졌던 대표적인 태풍들이다(그림 3-1-8). 태풍 에위니아 통과 시기에 황해저층냉수가 분포했던 이어도 과학기지에서 관측된 층별수온 분포를 보면(그림 3-1-9), 태풍의 영향으로 수온이 최대 12°C 감소한 것을 알 수 있다(문 등, 2007).

이어도 과학기지는 쿠로시오 난류와 황해저층냉수가 만나는 경계에 위치하고 있어 해양의 수온변동을 모니터링하기에 가장 좋은 장소이다. 특히, 이곳은 계절별과 쿠로시오 난류와 황해저층냉수의 확장 및 축소 등 시공간적인 변동이 심하여 이어도 기지에서 지속적인 수온변동 모니터링은 한반도로 북상하는 태풍의 강도를 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다.

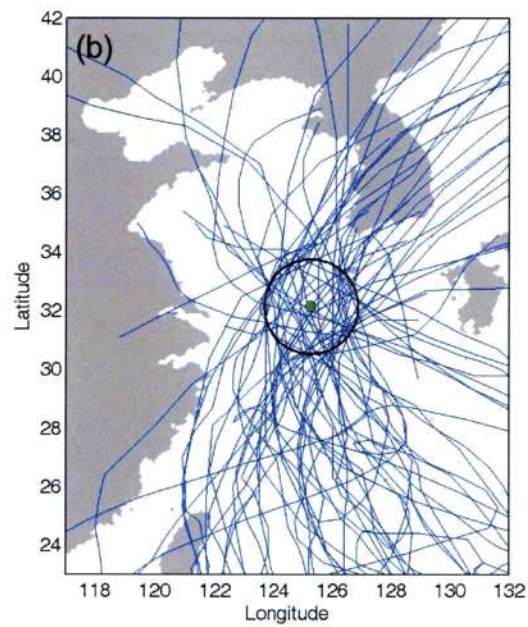
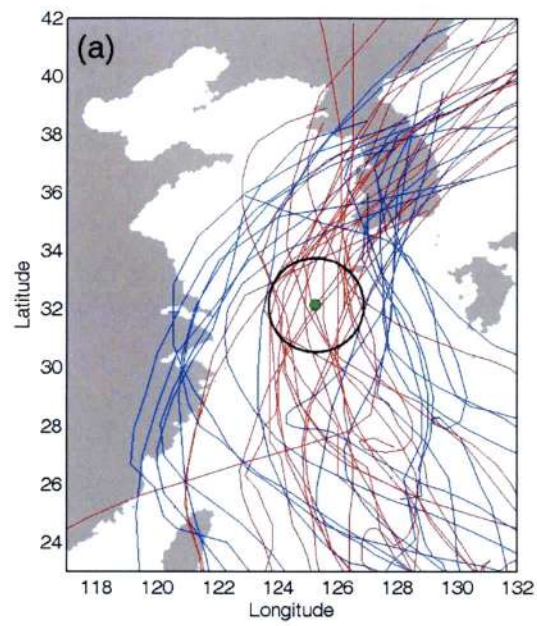


그림 3-1-6. (a) 1950부터 2004년까지 한반도에 상륙한 태풍의 경로. 이 중에 이어도 과학기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍(빨간 선 표시)은 63%를 차지함. (b) 1950부터 2004년까지 이어도 과학기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍. 55년간 총 56개의 태풍이 지나 갔음.

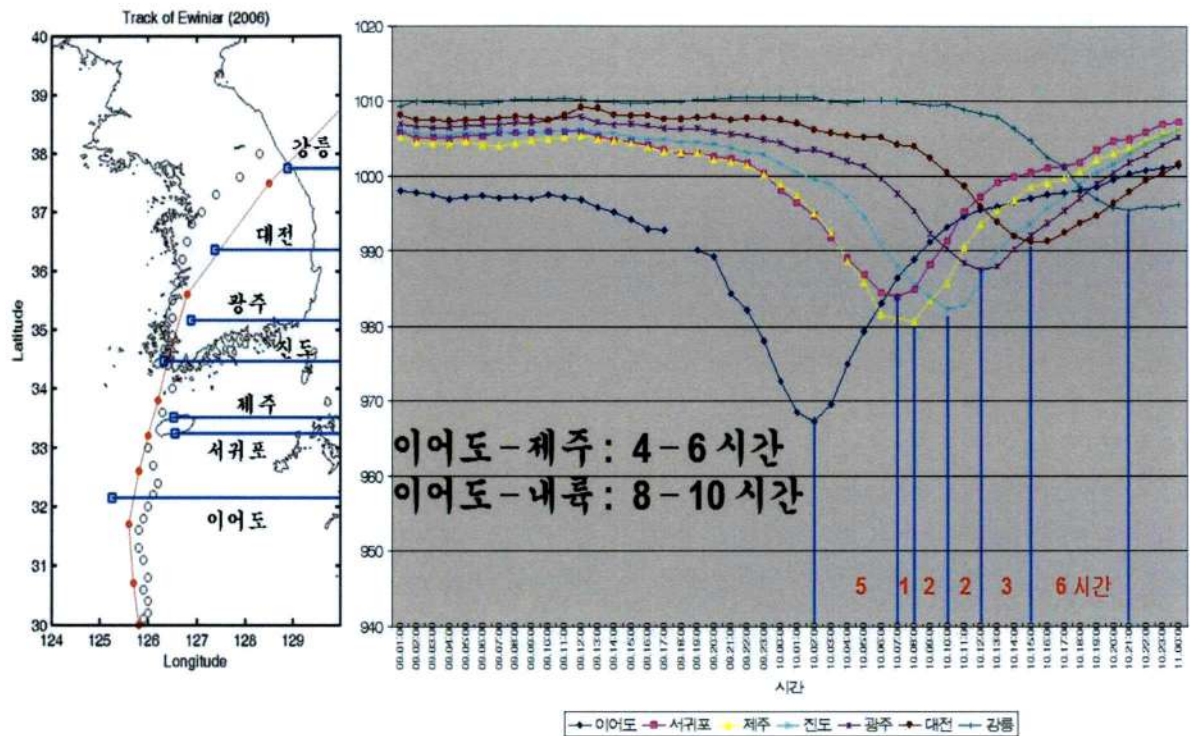
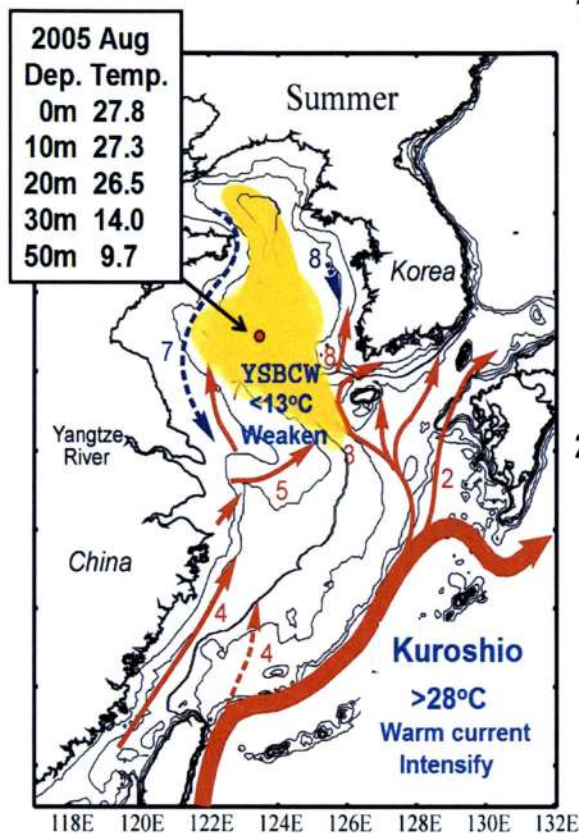
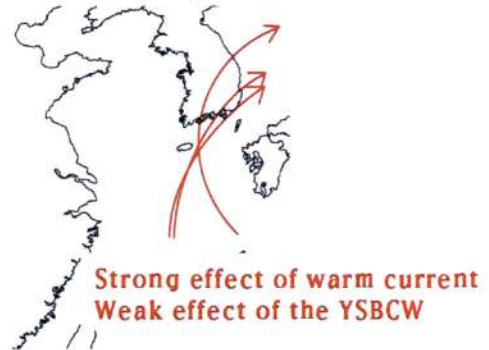


그림 3-1-7. 태풍 에위니아(2006)의 이동경로와 이 시기의 이어도, 서귀포, 진도에서의 해면기압 시계열 분포. 태풍이 이어도 과학기지를 통과한 후 약 5 시간 만에 서귀포에 도달하고, 약 8시간 후에는 진도에 도달함.



1. Passing through the South Sea in the eastern side of Jeju Island



2. Passing through the Yellow Sea in the western side of Jeju Island

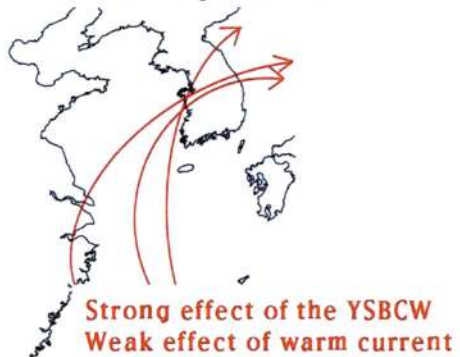


그림 3-1-8. (좌측그림) 한반도 근해의 주요한 해류 및 수괴 분포. 붉은색 선은 우리나라 주변의 난류를 나타내고 노란색 지역은 황해저층냉수를 나타냄. 좌상측 표는 2005년 8월에 황해 중심에서 관측된 수온의 깊이에 따른 변화를 나타냄. (우측그림) 1. 난류가 지나가는 제주도 우측 해역을 통과하여 주로 남해안으로 상륙하는 태풍의 유형. 화살표는 이 경로를 통해 한반도에 상륙한 태풍 매미(2003), 루사(2002), 사라(1959)의 이동경로를 나타냄. 2. 황해저층냉수가 분포하는 제주도 좌측을 통과하여 주로 서해안으로 상륙하는 태풍의 유형. 화살표는 이 경로를 통해 한반도에 상륙한 태풍 람마순(2002), 카눈(2005), 에워니아(2006)의 이동경로를 나타냄.

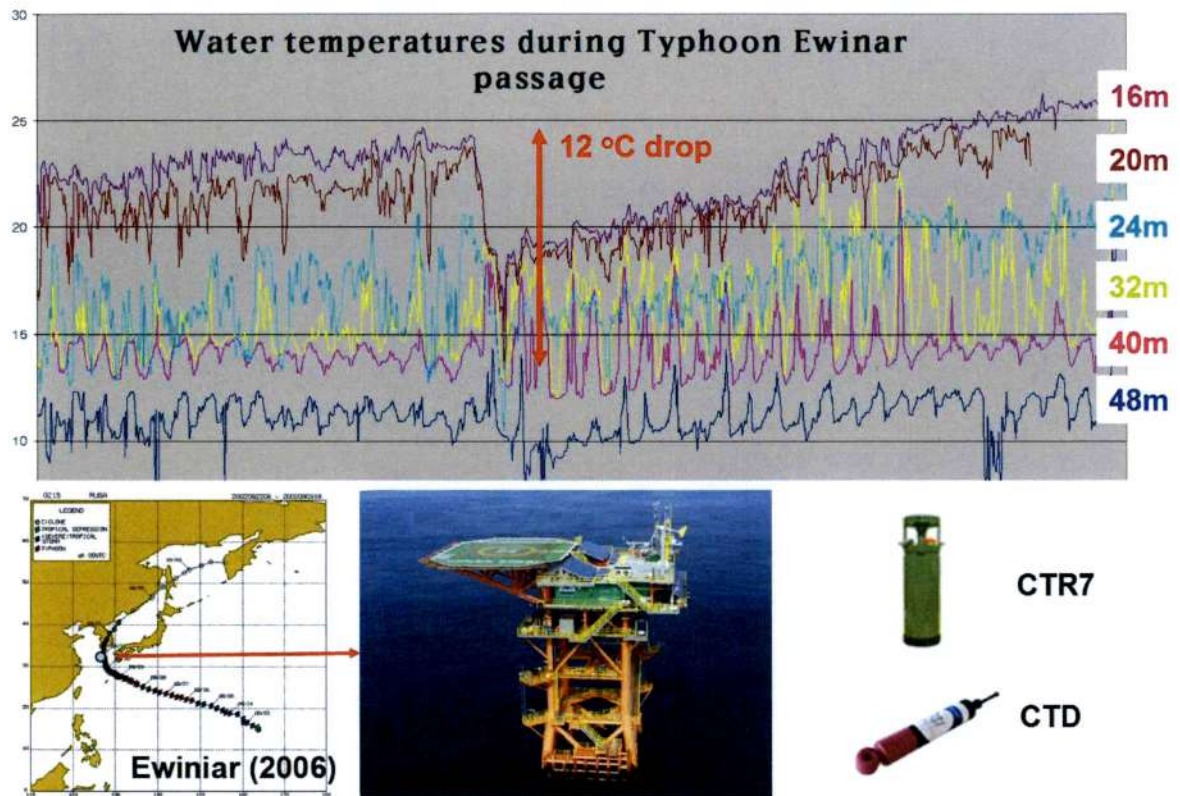


그림 3-1-9. 태풍 에위니아 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 층별 수온분포. 태풍 통과 시기에 이어도 과학기지 주변에 분포하고 있는 황해저층냉수의 영향으로 최대 12℃의 수온 감소가 관측됨

(3) 이어도 과학기지에서의 태풍관측

1) 기상관측

태풍 시기에 이어도 과학기지에서 관측되는 주요 기상관측 요소는, 기압, 풍속, 풍향, 온도, 습도 등이다. 이어도 기지에서 기압은 수면에서 34m에서 지점에서 관측되므로 해면에서 기압은 높이에 따른 기압하강을 보정하여 사용한다. 그림 3-1-10a는 태풍 매미 시기에 해면기압의 시계열분포로써 태풍중심이 기지를 가장 가까이 통과한 2003년 9월 12일 12경에 최저기압(982.52hPa)을 기록하였다. 이 값은 같은 시기의 태풍중심 기압(945hPa)보다 약 38hPa 높은 값을 나타낸다. 이때 이어도 기지와 태풍중심 간의 거리는 약 220km 였다. 태풍 민들레와 메기 시기에 관측된 최소기압은 각각 982.2hPa과 986.1hPa 였다.

태풍 매미가 이어도 기지를 통과할 때 기온변화를 살펴보면, 태풍이 접근하면서 기온이 상승하지만 이어도 기지가 태풍의 영향권 내에 들어가면서부터 급속한 기온 하락을 보인다(그림 3-1-10b). 이러한 기온의 감소경향은 태풍중심이 통과 한 후에도 어느 정도 계속된다. 이것은 태풍이 북상하면서 열대지역의 더운 공기를 이동시켜 기온이 상승하지만 태풍이 더 가까워져 태풍의 영향권에 들면 태풍에 동반된 구름과 강수의 영향으로 기온이 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 태풍 매미, 민들레, 메기 시기에 기록된 최대 기온하강 값은 각각 4°C, 7°C, 5°C로 나타났다. 기온과 달리 습도는 태풍이 가까워질수록 높은 값을 보인다(그림 3-1-10c).

이어도 기지에서 풍속은 수면에서 44m 높이의 기상타워에서 관측되었다. 그림 3-1-10d와 3-1-10e는 태풍 통과 시 관측된 순간최대풍속(풍향)과 10분 평균풍속(풍향)을 나타낸다. 여기에서 가장 강한 바람(35m/s)이 관측된 시기는 12일 13시이며 이 시간은 앞에서 언급한 최저 기압의 통과 시점보다 약 1시간 늦다. 이것은 이어도 기지가 태풍 진행방향의 좌측에 위치하고 있었고 보통 가장 강한 바람은 태풍진로 우측(또는 1사분면)의 태풍 눈벽에 분포하므로, 이 눈벽이 이어도 기지를 가장 가깝게 통과한 시점과 태풍중심이 통과한 시점은 차이가 나기 때문이다. 이어도 기지에서 풍속의 변화 경향을 살펴보면, 태풍이 영향권에 들기 전까지는 시계방향으로 순전하다가 영향권에 든, 즉 15m/s 이상의 강한 풍속이 관측되기 시작한, 12일 00시부터 반시계방향으로 반전한 것을 알 수 있다.

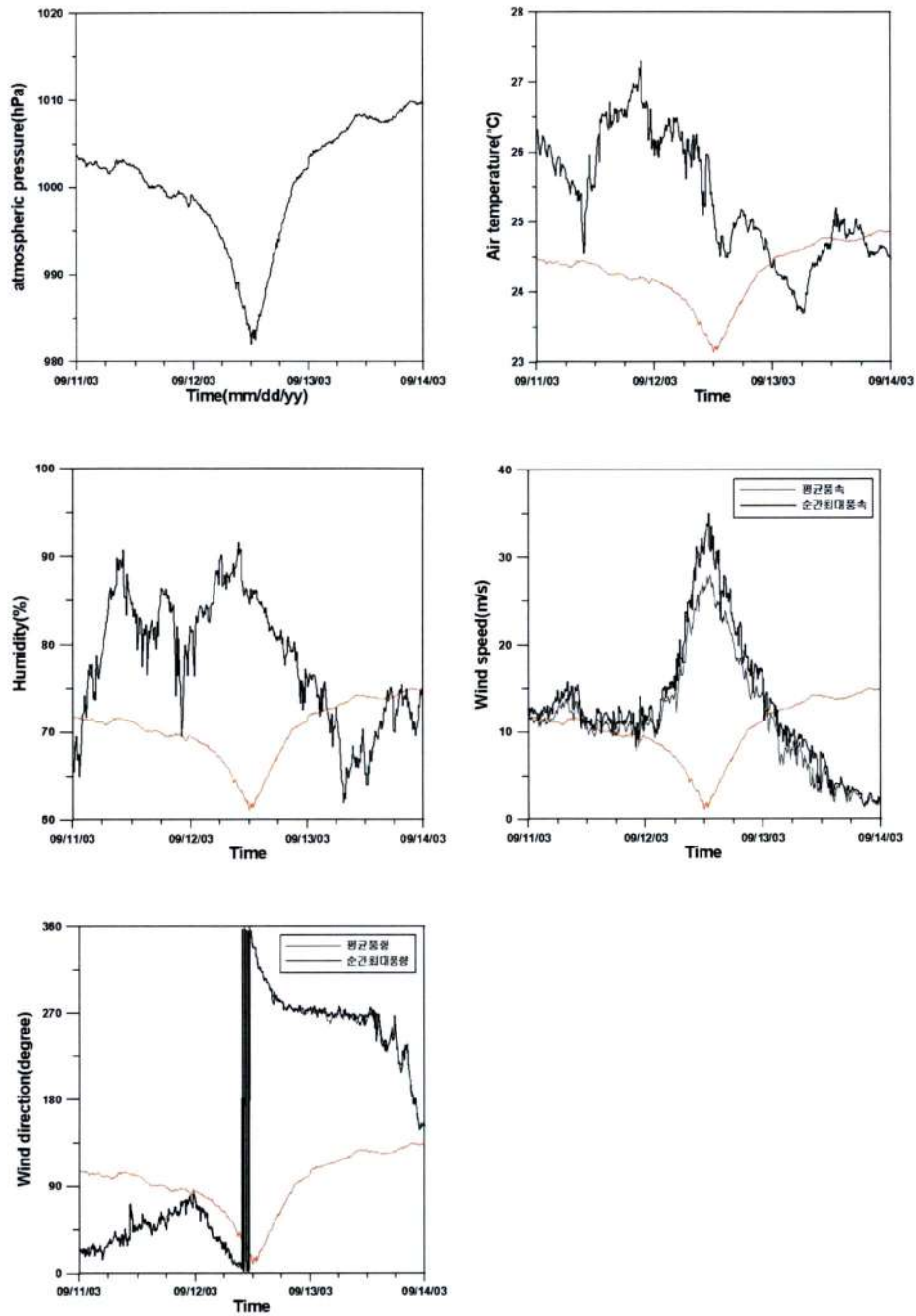


그림 3-1-10. 태풍 매미 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 (a) 기압, (b) 온도, (c) 습도, (d) 풍속, (e) 풍향의 시계열 분포.

2) 해양관측

태풍 시기에 이어도 과학기지에서 관측되는 주요 해양관측 요소는 해수면, 파랑, 수온, 염분, 용존산소, 산성도, 해류 등이다. 해수면 변동은 수면에서 29m 위의 메인데크에 설치된 영국 W. S. Ocean사의 Sea Level Monitor에서 관측되었다(그림 3-1-11a). 해수면 자료에서는 하루에 두 번 발생하는 고조(또는 저조)의 값이 다른 ‘일조부등’ 현상이 뚜렷이 보이며, 태풍 통과 전후의 조차는 약 1.5m~2.3m를 보였다. 특히, 태풍이 이어도 과학기지를 가장 가까이 통과한 2003년 9월 12일 12경에는 만조 시간대였으며 천문조 이외에 기압하강으로 약 20cm 해수면 상승이 추가적으로 발생한 것으로 추정된다.

해수면 수온은 태풍 매미가 이어도 기지를 통과할 때 27°C에서 23°C이하로 약 4°C 이상 감소하였다(그림 3-1-11b). 이것은 태풍에 수반되는 강한 바람(그림 3-1-10d)에 의한 수직혼합과 기압하강(그림 3-1-10a)에 의한 용승작용의 결과로 사료된다. 태풍 시기에 감소된 수온은 태풍이 통과한 후에도 한동안 지속되었으며 관성운동에 의해 주기적인 변동 특성을 보였다. 이어도 기지에서 관측된 4°C의 표층수온 하강은 이어도 기지와 태풍중심과 거리(220km)를 고려하면 꽤 높은 값이다. 이것은 이어도 주변해역이 여름철에 태양복사열에 의한 가열된 표층수와 그 밑에 자리잡고 있는 황해저층냉수가 얇은 수심에 분포하고 있어 혼합과 용승작용에 의한 표층수온의 하강이 매우 잘 일어나기 때문인 것으로 사료된다. 염분은 태풍에 수반되는 강우의 영향으로 태풍 영향권에 들면서 계속적으로 감소하여 태풍이 통과한 6시간 후에 최저값을 보였다. 이것은 강수량이 태풍중심보다는 태풍 눈벽과 나선강우대에서 많이 발생하기 때문에 태풍이 중심에서 멀어지더라도 여전히 기지에서는 강우가 기록되었음을 의미한다.

이어도 기지의 파랑정보는 레이더방식인 노르웨이 MIROS사의 Wave radar에 의해 관측된다. 관측사양은 파고(0.2~30m, $\pm 5\%$ 오차범위), 주기(3~30초, $\pm 5\%$), 파향($0\sim 360^\circ$, $\pm 7^\circ$), 표층유속(0~2.5m/sec, $\pm 5\text{cm/sec}$), 유향($0\sim 360^\circ$, $\pm 7^\circ$)이다. MIROS Wave radar는 과학기지 루프데크 남동쪽 모서리 33.5m 높이에 설치 되어있으며 6개의 안테나를 사용하여 전방 180° 범위로 수평에서 10° 아래로 전자기파를 주사하므로 장비위치로부터 파랑 관측점까지의 수평거리 l 은 장비의 설치높이를 h 로 하는 경우 $l=h/\tan 10^\circ=190\text{m}$ 이다. 따라서 MIROS Wave radar의 파랑 관측위치는 이어도 해양과학기지에서 약 200m 떨어진 $45^\circ\sim 225^\circ$ 방향을 관측한다(해양수산부, 1999). 그림 3-1-11d와 3-1-11e는 태풍 매미 시기에 관측된 최대파고와 유의파고의 시계열을 각각 나타낸다. 최대파고와 유의 파고는 태풍의 중심이 가장 기지에 접근한 9월 12일 12경에 최대값을 보였다. 가장 높은 파고를 보인 시기에 주파수 스펙트럼과 방향별주파수 스펙트럼 분포를 보면(그림 3-1-12), 서쪽 방향으로 전파하는 너울과 남동방향의 풍파가 뚜렷이 나타난다. 이것은 태풍 근접 시 이어도 기지는 태풍의 좌측에 위치하고 있어, 태풍의 눈벽에서 부는 강한 서풍에 의해 전파된 너울과 이어지 기지에 붙고 있는 북서풍에 의해 금방 발생된 풍파가 동시에 존재하기 때문이다.

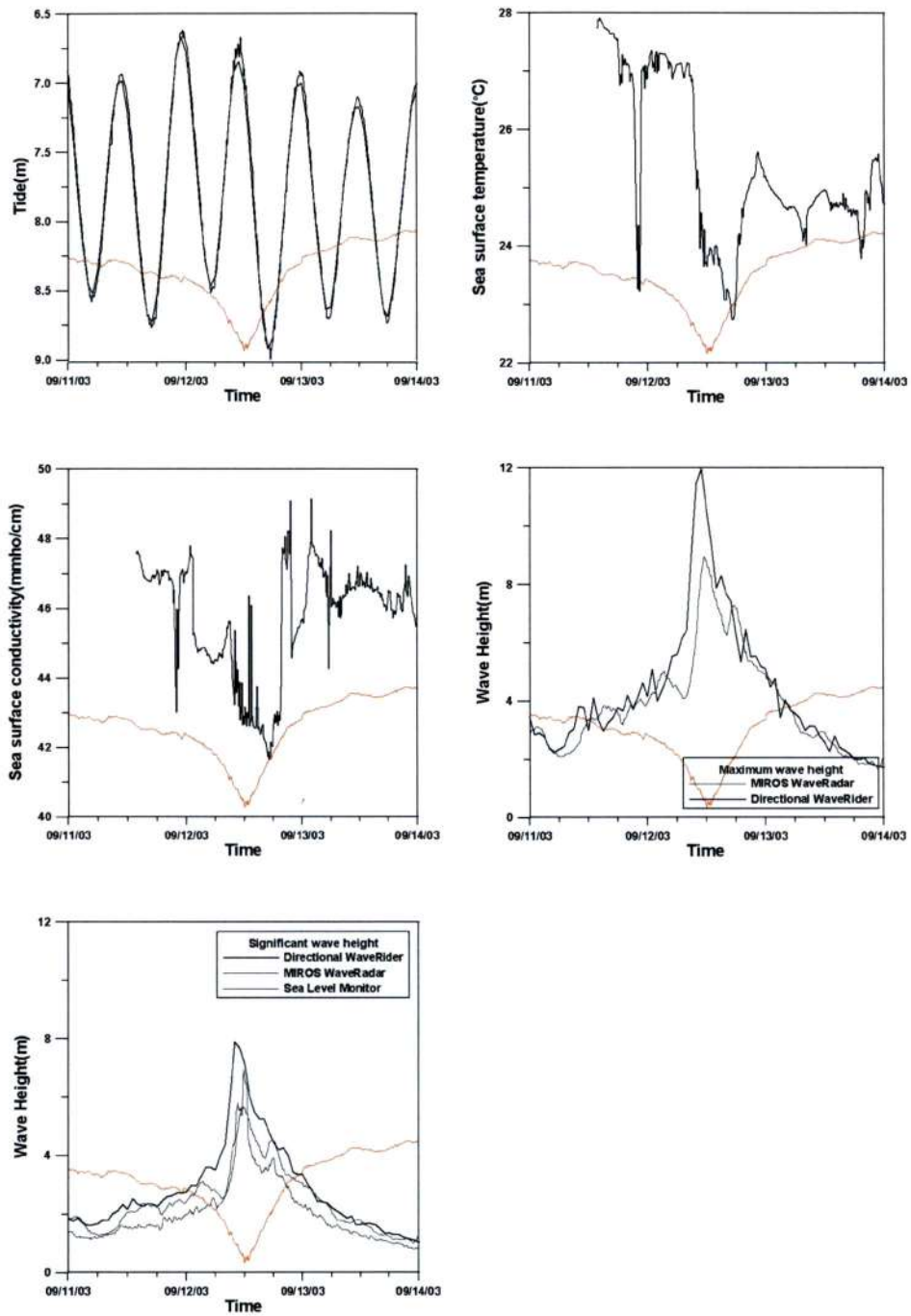


그림 3-1-11. 태풍 매미 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 (a) 해수면, (b) 수온, (c) 전기전도도(d) 최대파고, (e) 유의파고의 시계열 분포.

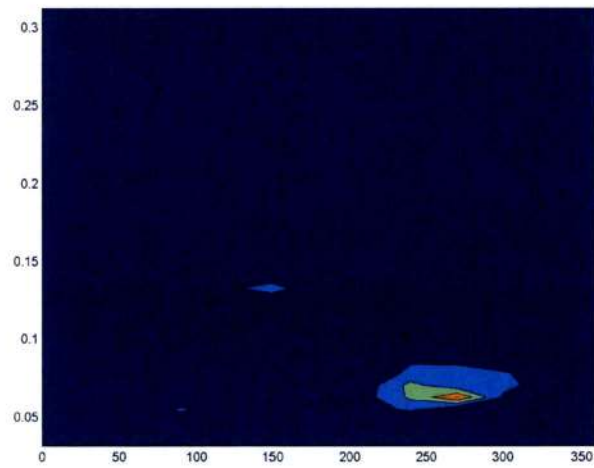
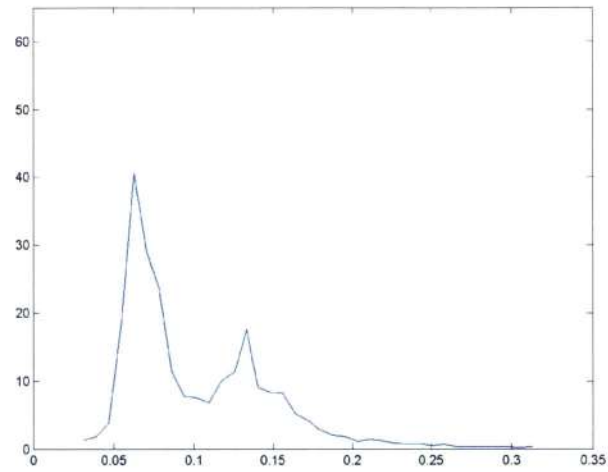


그림 3-1-12. 태풍 매미가 이어도 기지를 가장 가까이 통과한 9월 12일 12경에 (a) 주파수 스펙트럼과 (b) 방향별주파수 스펙트럼의 분포

(4) 이어도 기지에서 관측된 한반도 상륙 태풍 특성

2003년부터 2006년까지 이어도 기지를 가까이 통과하여 한반도에 상륙한 태풍은 매미(2003), 민들레(2004), 메기(2004), 에위니아(2006)이다(그림 3-1-13). 여기서 태풍민들레(2004)와 에위니아(2006)는 한반도에 상륙 당시 열대폭풍으로 약화되었지만 태풍 매미(2003)와 메기(2004)는 태풍급의 강도를 유지하고 있었다. 각 태풍에 대한 풍속의 변화를 보면(그림 3-1-14), 태풍 에위니아와 메기가 모두 북위 30° 근처에서 비슷한 강도와 경로를 가지고 북상을 하였지만 제주도 좌측으로 간 에위니아가 제주도 우측으로 간 메기에 비해 강도가 더 약해졌다. 실제로 상륙 당시 에위니아는 열대폭풍으로 약화되었지만 태풍 메기는 그 강도를 유지하고 있었다. 이것은 앞서 3장에서 언급한 바와 같이 제주도를 경계로 황해저층냉수와 쿠로시오 난류가 존재하여 태풍의 강도에 크게 영향을 미친 것으로 사료된다. 특히 고위도 지역에서는 태풍의 이동속도가 빠를수록 혼합작용에 의한 수온 감소율이 작기 때문에 태풍의 강도가 잘 약해지지 않는다. 태풍의 이동속도만을 비교했을 때에도 태풍 메기의 속도가 에위니아에 비해 더 빨라 더 센 태풍의 강도를 유지할 수 있었다.

그림 3-1-15, 3-1-16, 3-1-17, 3-1-18은 이어도 기지에서 관측된 4개의 태풍에 대해 JTWC에서 발표한 태풍정보(중심기압, 중심위치, 최대풍속)와 태풍 통과시 우리나라 기상 관측소에 관측한 자료를 비교하고 있다. 태풍 매미의 자료(그림 3-1-15 상단)를 보면, 관측된 기압은 태풍중심과의 거리에 비례하며 관측된 풍속은 관측된 기압과 반비례하고 있음을 알 수 있다. 그렇지만 제주와 서귀포에서는 예외적으로 높은 기압에서 강한 바람, 낮은 기압에서 약한 바람을 나타내고 있다. 이러한 현상은 태풍 매미와 에위니아에서도 발견된다(그림 3-1-16, 3-1-18). 이것은 제주도의 한라산이 반시계 방향으로 회전하는 태풍의 바람을 막는 방패의 역할을 하기 때문에 비록 서귀포가 제주시보다 기압이 더 낮고 태풍중심과 더 가깝지만은 풍속은 더 약하게 관측될 수 있는 것이다.

태풍 매미 통과시기에 이어도, 서귀포, 제주, 여수, 통영, 울진, 울릉도에서 관측된 풍속과 기압의 시계열 자료를 보면(그림 3-1-15 하단) 태풍이 한반도로 접근하면서 관측소별로 최대풍속과 최저기압이 다른 시간대에 관측된 것을 알 수 있다. 이러한 자료는 앞서 3장에서 언급한 바와 같이 태풍에 의해에서 육지로 상륙할 때까지 어느 정도 시간이 걸리는지를 추정하는 데 사용 할 수 있을 뿐 아니라 지역적인 특성에 따라 태풍의 영향을 비교하는 데에도 사용될 수 있다. 참고로 관측된 기압자료가 가장 낮을 때가 태풍이 가장 가까이 통과한 시기가 된다. 최대풍속은 주로 태풍의 눈벽 주위에서 관측되기 때문에 최대풍속과 최저기압이 관측되는 시기는 약간의 차이가 날 수 있다. 태풍 매미 시기에 이어도 기지는 태풍경로의 좌측에 위치하였을 뿐 아니라 태풍중심에서 가장 먼 곳에 위치하고 있어 30m/s 이상의 강풍이 관측된 제주, 여수, 통영, 울진에 비해 약한 풍속을 보였다. 태풍의 이동속도는 북위 30°부터 10m/s 이상이 기록되었다. 이렇게 빠른 속도로 태풍이 북상하게 되면 고위도로 올수록 급격히 약화되어야 할 태풍이 그 강도를 유지할 수 있는 원인이 된다. 따라서 태풍 매미가 한반도까지 센 강도를 유지할 수 있었던 원인은 '빠른 태풍의 이동속도'와 '난류 위 통과'라는 두 가지 요인이 크게 작용한 것으로 사료된다.

태풍 메기는 이동속도가 매미보다 더 빠른 15m/s를 기록하였다(그림 3-1-16). 태풍 메기는 최대전성기 때에도 그 강도가 세지 않았지만 이렇게 빠른 이동속도로 난류 위를 통과하면서 한반도까지 비교적 센 강도를 유지한 태풍이었다. 태풍 민들레와 에위니아는 최대전성기 때의 센 강도에 비해 북상하면서 급격히 약화된 태풍이다(그림 3-1-17, 3-1-18). 다른 요인도 있겠지만 이 두 태풍은 북상하면서 황해저층냉수에 의한 수온하강으로 태풍이 급격히 약화된 것으로 사료된다.

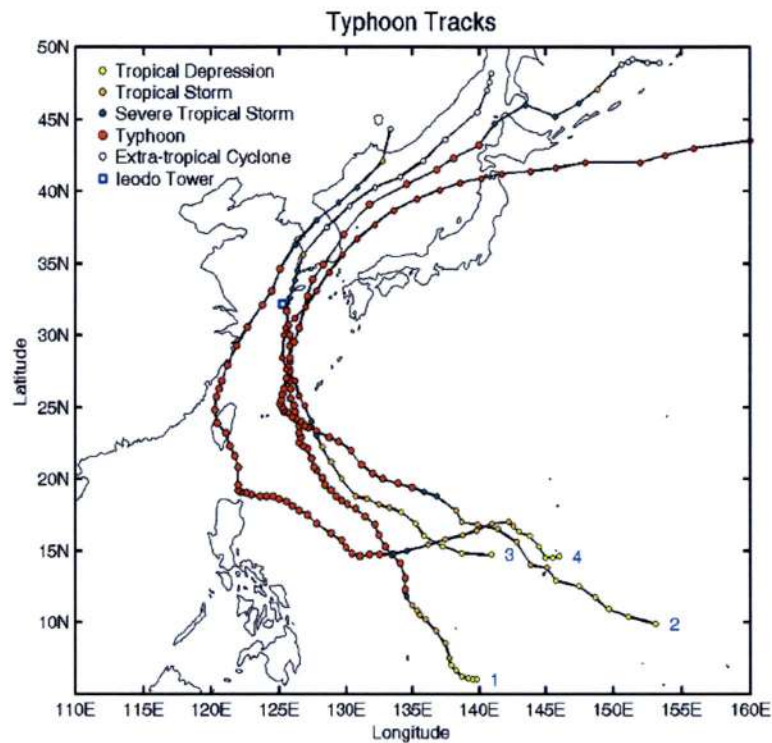


그림 3-1-13. 2003년부터 2006년까지 이어도 기지를 통과하여 한반도에 상륙한 태풍의 경로: 1. 매미(2003), 2. 메기(2004), 3. 에위니아(2006), 4. 민들레(2004)

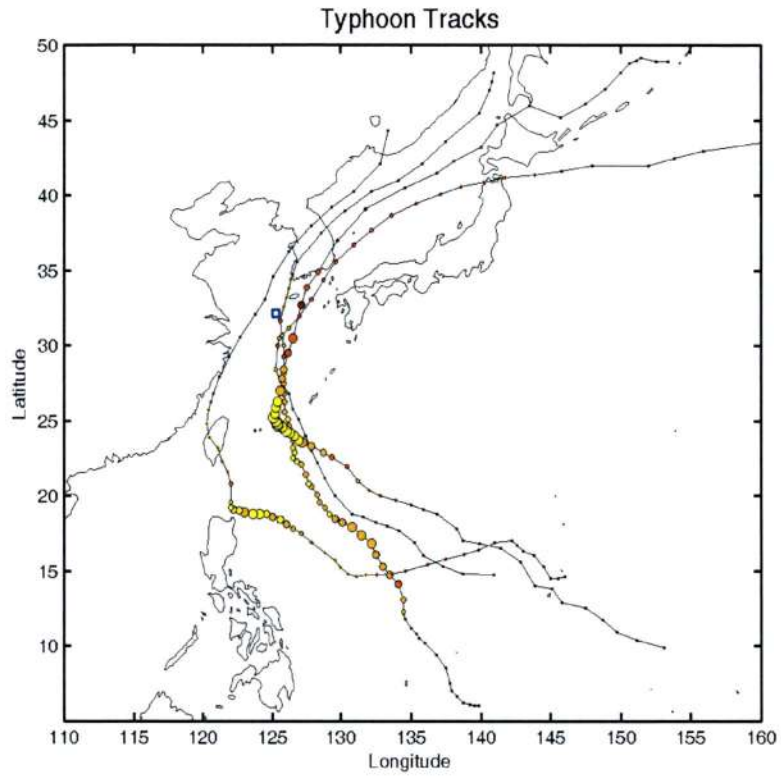
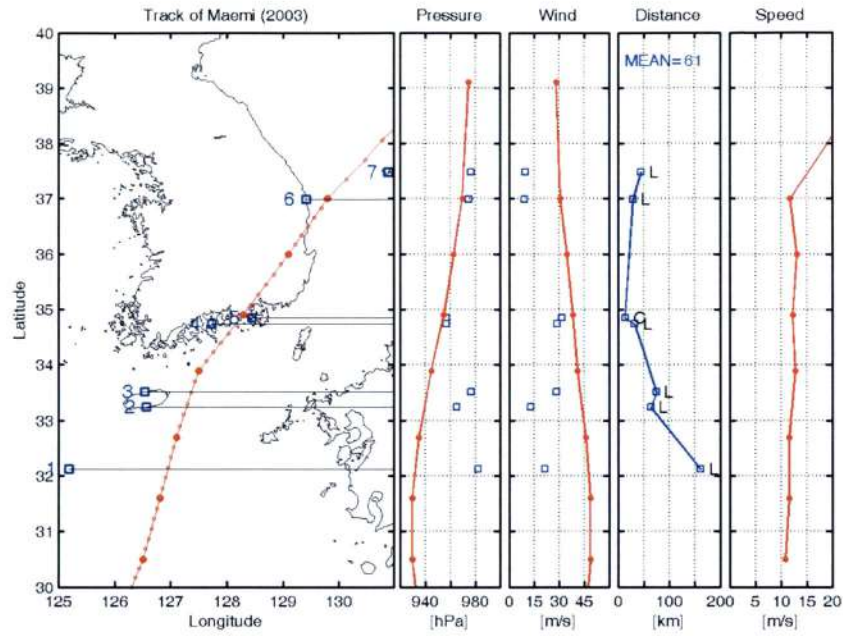
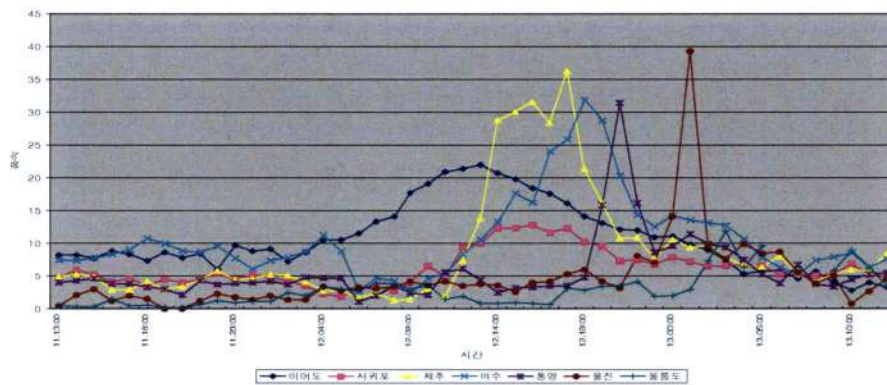


그림 3-1-14. 태풍 매미(2003), 메기(2004), 에워니아(2006), 민들레(2004)의 최대풍속과 태풍의 이동속도. 그림 5-1과 같지만 원의 크기는 태풍의 최대풍속에 비례하며, 색깔은 붉은 색으로 갈수록 이동속도가 빨라짐을 의미함.



풍속(매미)



기압(매미)

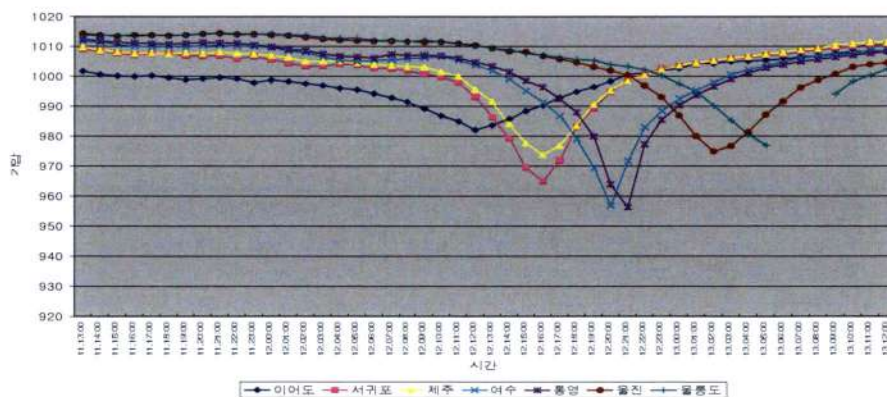
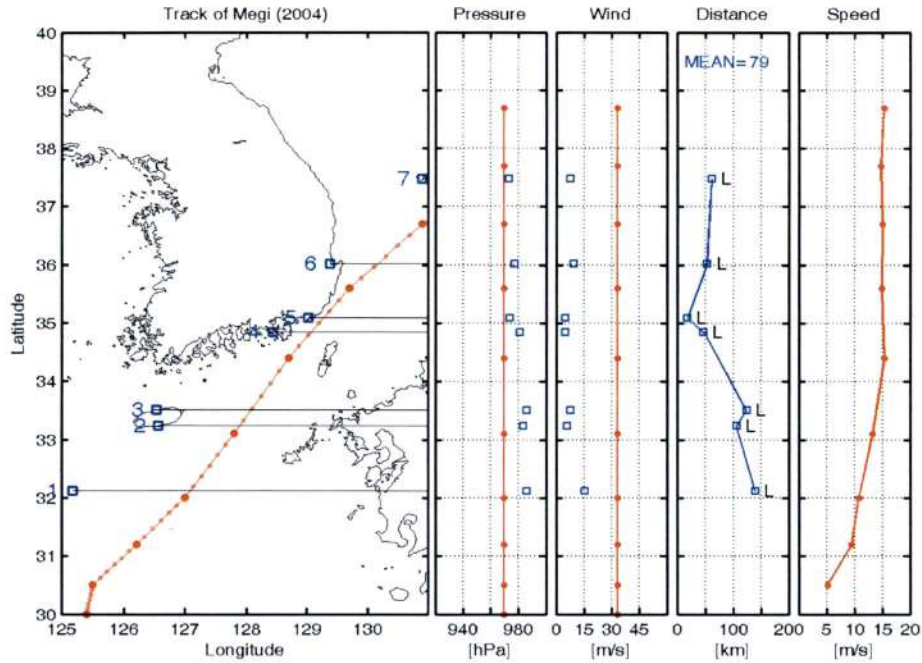
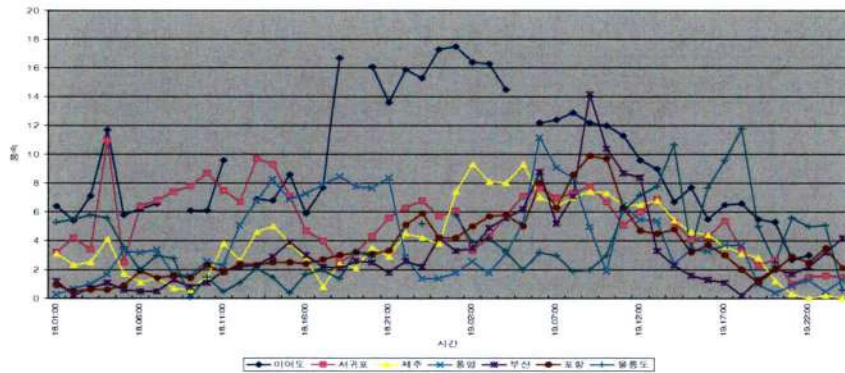


그림 3-1-15. (상단) 태풍 매미(2003) 시기에 JTWC의 태풍정보(중심 기압과 위치, 최대 풍속)와 기상관측소에 관측한 자료의 비교. 붉은 선은 JTWC 자료, 파란 사각형은 7지점에서 관측된 값을 나타냄. (하단) 각 지점에서 관측된 풍속과 기압의 시계열.



풍속(메기)



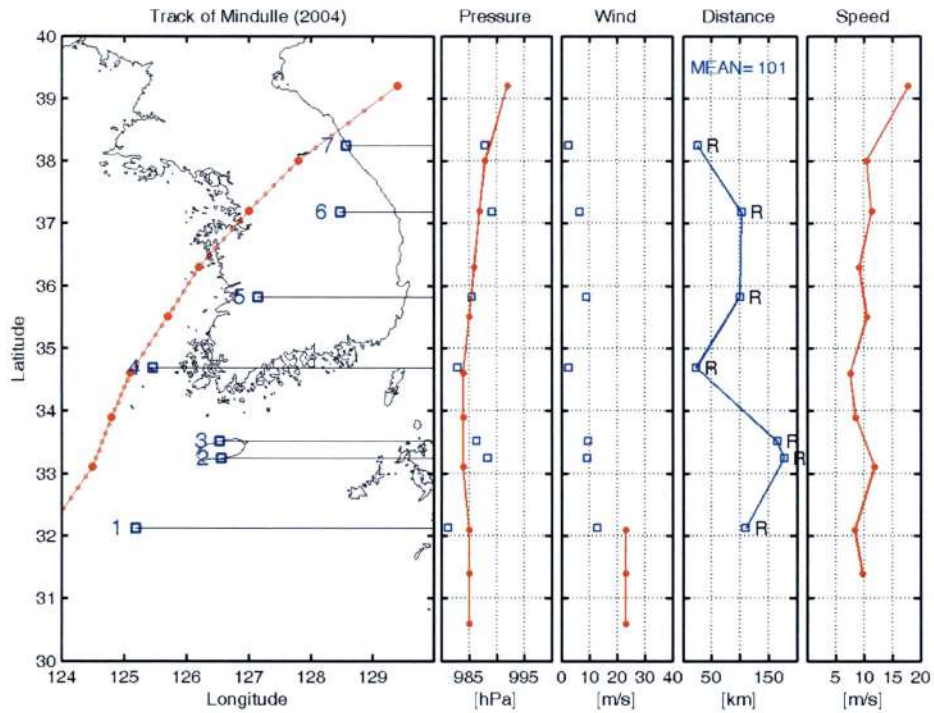


그림 3-1-17. 그림 3-1-15와 동일하지만 태풍 민들레(2004) 시기의 자료

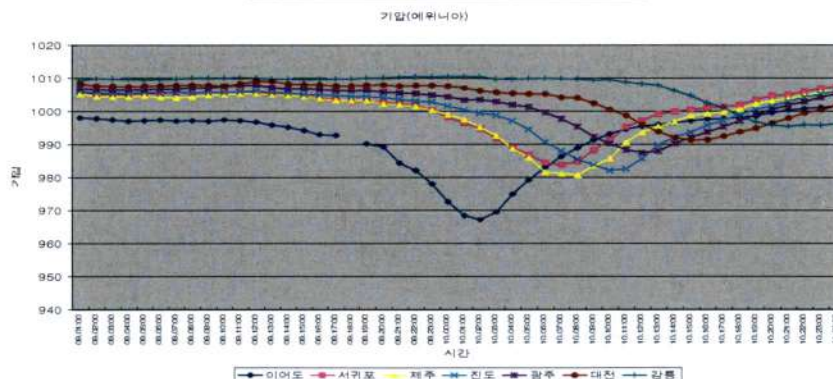
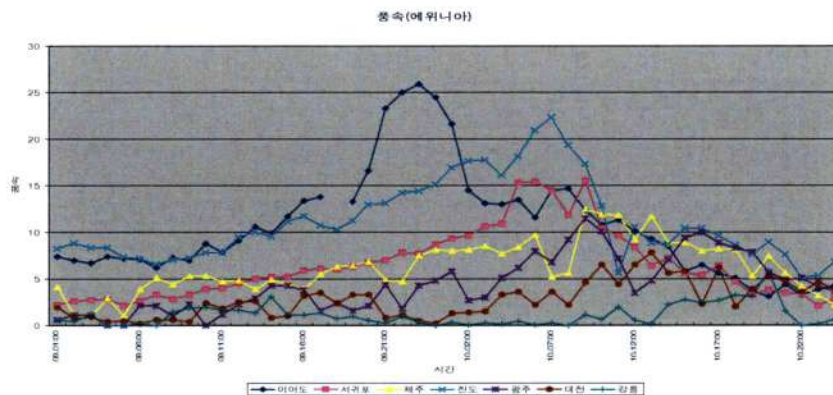
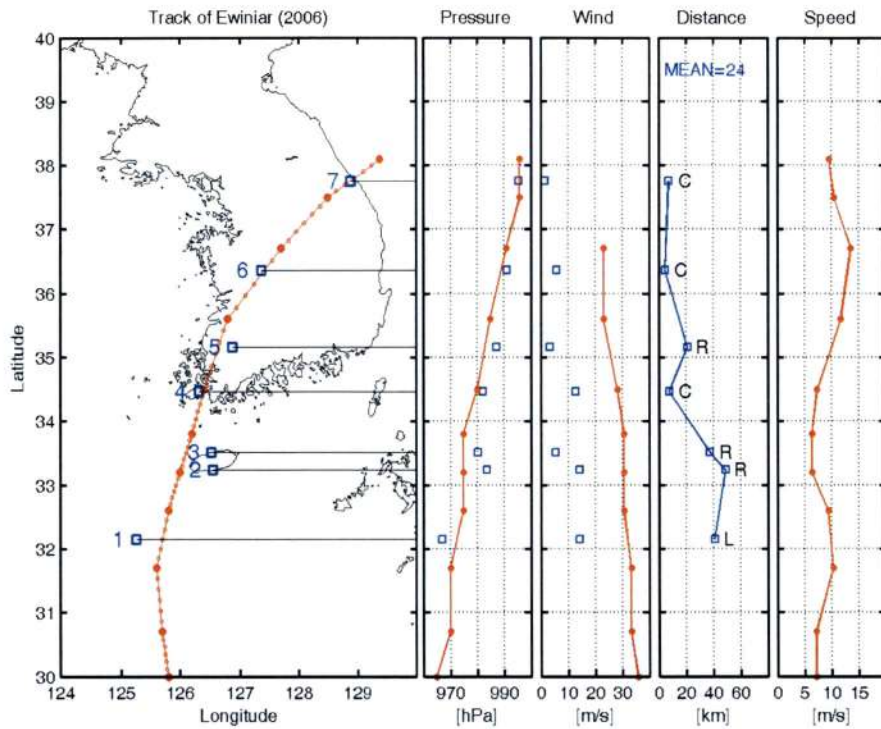


그림 3-1-18. 그림 3-1-15와 동일하지만 태풍 에위니아(2008) 시기의 자료

(5) 이어도 관측자료를 활용한 해양·기상 모델의 검증

수치모델을 이용하여 해양과 대기 현상들을 정확하게 예측하기 위해서는 무엇보다도 모델 영역내에 양질의 관측자료가 필요하다. 관측자료는 모델 예측 결과를 좌우하는 초기조건 생성에 결정적인 역할을 할 뿐 아니라 모델의 개발 및 검증에도 활용된다. 이어도 기지의 자료는 육지의 영향을 받지 않은 외해의 특성을 지니고 있기 때문에 외해와 내해의 특징이 뚜렷이 구별되는 해상풍 및 파랑의 연구에 적합하다. 특히, 우리나라로 접근하는 태풍에 대해 육지의 영향을 받기 전의 해상풍과 파랑을 포함한 여러 가지 특성을 분석하여 모델의 검증에 활용할 수 있다.

그림 3-1-19은 태풍 매미 시기에 해상풍 모델과 파랑모델로부터 계산된 바람과 파랑의 공간적인 분포를 나타낸다. 사용된 해상풍 모델은 Holland (1980)의 해석해에 기초를 둔 모수화 모델이며(문과 오, 2003), 파랑모델은 NOAA의 WAVEWATCH III (Tolman, 2002)이다. 수행된 모델 결과를 보면 태풍 매미의 중심 부근에는 50m/s 이상의 강한 바람이 형성되고 이로 인해 20m 이상의 높은 유의파고가 태풍진로의 우측에서 발생하였다. 이러한 높은 파고는 태풍 진로의 우측에서 바람방향, 파의 진행방향, 태풍이동방향이 일치하게 되어 일종의 공명 현상으로 형성된 것이다(Moon, et al., 2003).

태풍 매미가 이어도 기지를 가까이 통과한 시기에 해상풍 모델의 결과를 관측 값과 비교해보면(그림 3-1-20), 두 결과에서 풍속의 최대값과 그 발생 시기가 비교적 잘 일치한다. 그러나 전체적으로 모델 값이 관측 값보다 약한 풍속을 나타낸다. 풍향은 태풍 영향권에서 멀 때에 모델의 오차가 크지만 태풍 접근 시에 비교적 두 값이 잘 일치한다. 이러한 전반적인 해상풍 모델의 결과는 파랑모델의 결과에서도 비슷하게 나타났다. 즉, 태풍 접근 시에 최대 유의파고(6m)는 모델에 의해 비교적 잘 모사되었으나 태풍 접근 전에는 그 오차가 크게 나타난다(그림 3-1-21). 이것은 계산된 유의파고, 주기, 파향의 정확도가 파랑모델의 입력 자료인 해상풍 자료에 크게 영향을 받았기 때문이다.

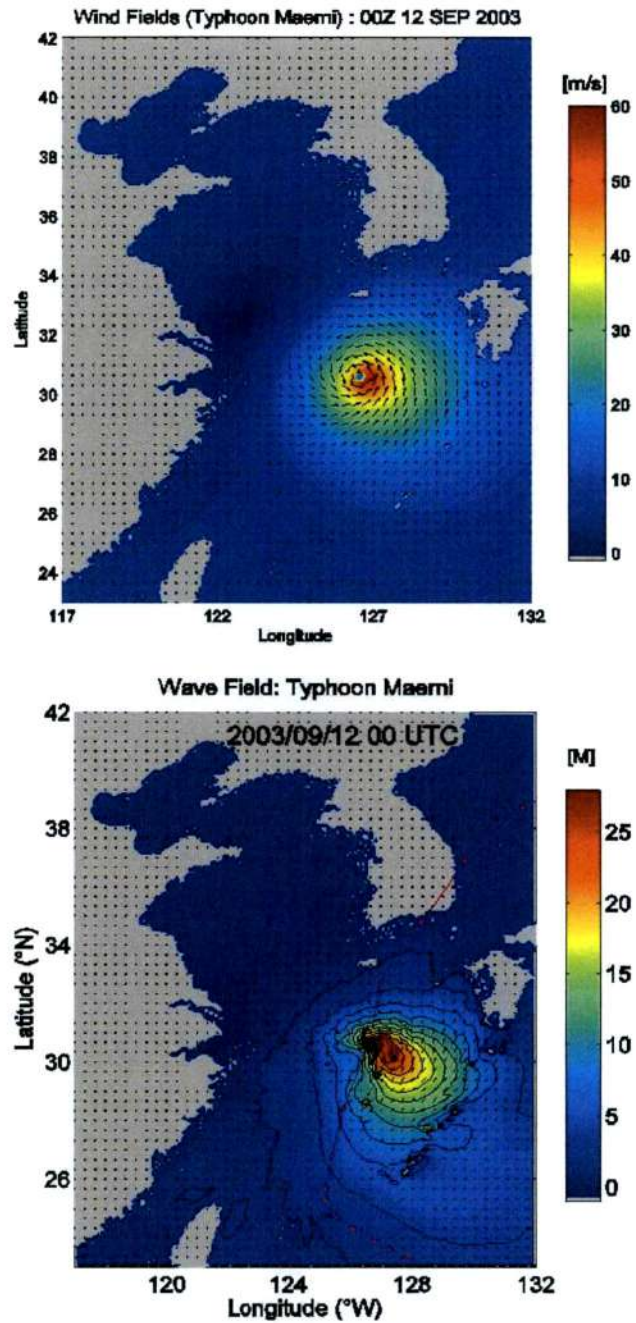


그림 3-1-19. 태풍 매미 시기(2003년 9월 12일 12UTC)에 해상풍 모델과 파랑모델로부터 모사된 해상풍과 유의파고의 공간적인 분포. 여기서 붉은 선은 태풍의 이동경로를 나타냄.

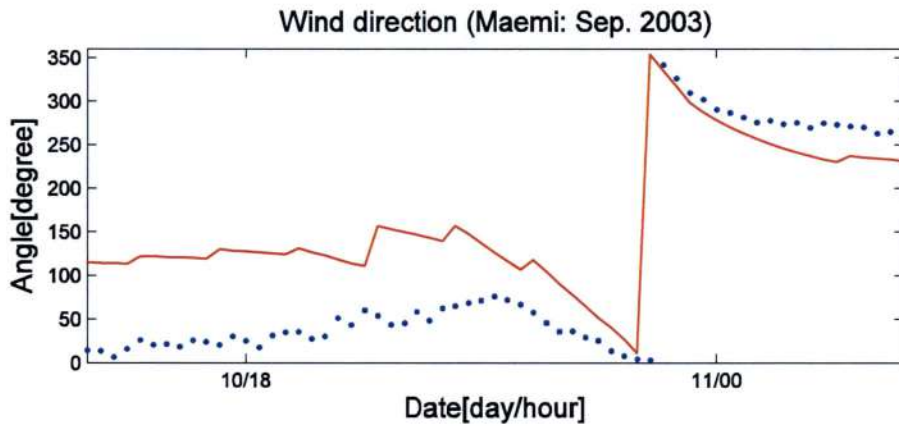
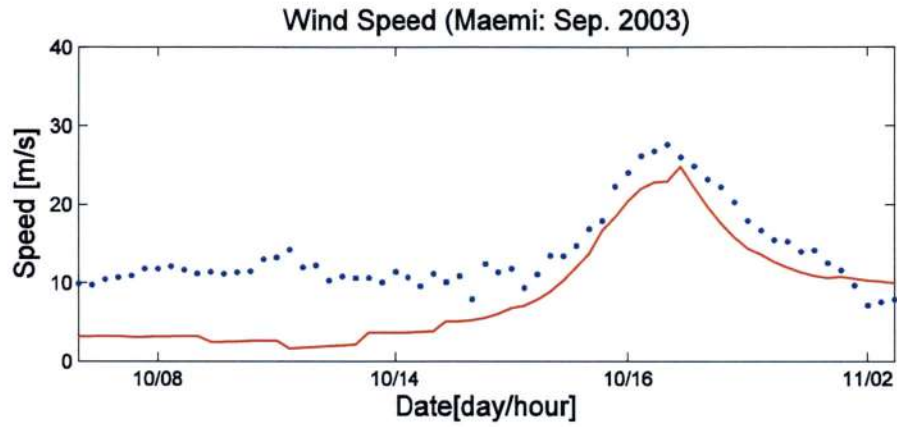


그림 3-1-20. 태풍 매미 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 풍속(상단)과 풍향(하단)의 시계열 자료를 해상풍 모델의 결과와 비교. 점선은 관측값, 실선은 모델값을 나타냄.

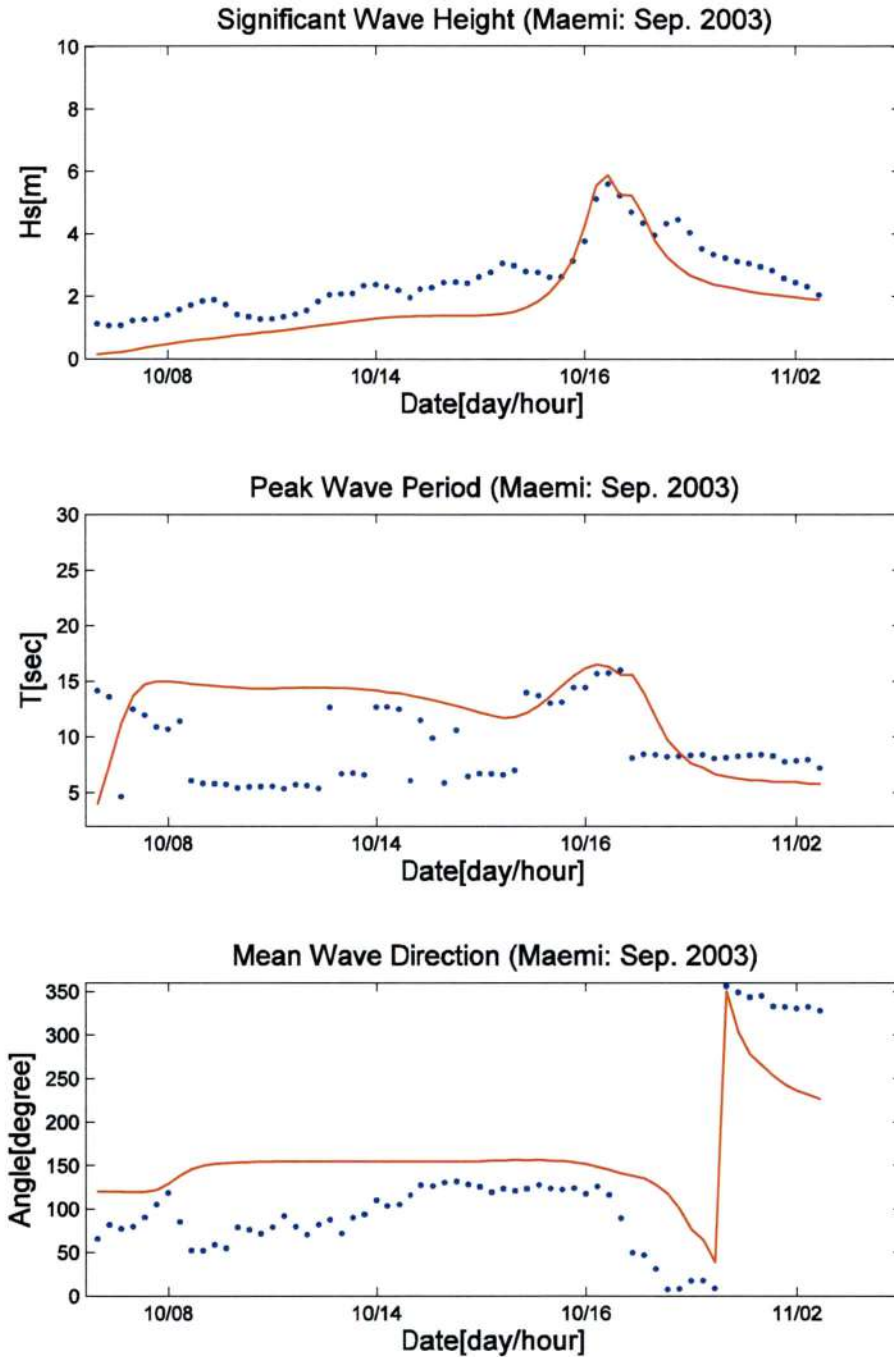


그림 3-1-21. 태풍 매미 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 유의파고(상단), 피크주기(중단), 평균파향(하단)의 시계열 자료를 파랑모델의 결과와 비교. 점선은 관측값, 실선은 모델값을 나타냄.

2. 한반도 상륙 태풍 강도를 결정하는 해양·기상 요인 조사 및 이어도 태풍 관측자료 검증

(1) 기후변화에 따른 한반도 상륙 태풍 특성 변화 조사

기후모델 실험에 따르면 모든 복사 강제력이 2000년 수준으로 유지된다 할지라도 해양의 느린 반응으로 인하여 향후 20년간 약 $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 의 온난화가 전망된다. 하지만 한반도 주변의 경우 최근 36년간 전 세계 평균치를 훨씬 웃도는 증가율을 보이고 있으며 (민 등, 2006) 기상 연구소의 예상으로는 100년 뒤 한반도 근해 해수면 온도는 약 2.5°C 에서 약 4°C 가량 증가할 것이라고 내다 봤다 (그림 3-2-1). 해수면 온도 증가율의 경우 과거 약 140년간 보다 최근 30년간이 약 4배가량 더 가파르게 증가하는 경향을 보이며 (그림 3-2-2, 그림 3-2-3) 지역적으로도 수온증가율이 최근 한반도 지역에서 열대 지역보다 무려 4~6배 이상 임을 보이고 있다 (그림 3-2-4, 그림 3-2-5).

또한 태풍의 생성 및 발달에 영향을 주는 대기 요소인 수직바람시어를 계산 해본 결과 최근 30년간 한반도 주변에서 감소하는 경향을 볼 수 있었다(그림 3-2-6). 수직바람시어는 태풍의 발달을 억제하는 역할을 한다. 따라서 한반도 주변의 이 같은 조건은 태풍이 발달하기 좋은 조건으로 향후 태풍 발생 시 태풍의 강도가 유지 될 수 있는 환경 조건인 것이다. 따라서 이 같은 해양과 대기의 조건은 한반도로 상륙하는 태풍의 강도가 강해질 것임을 보여준다.

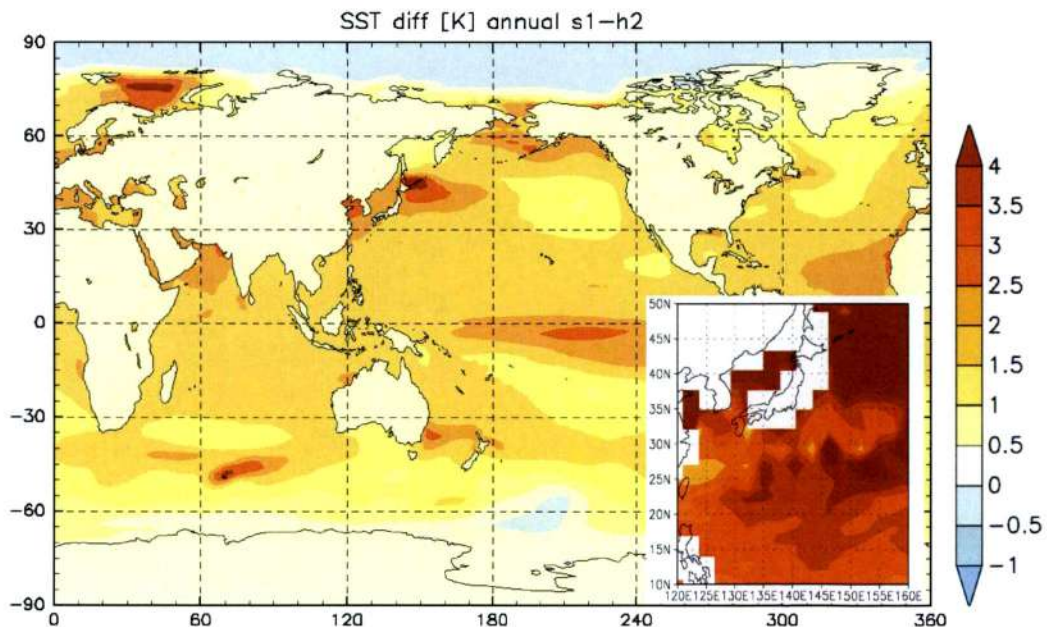
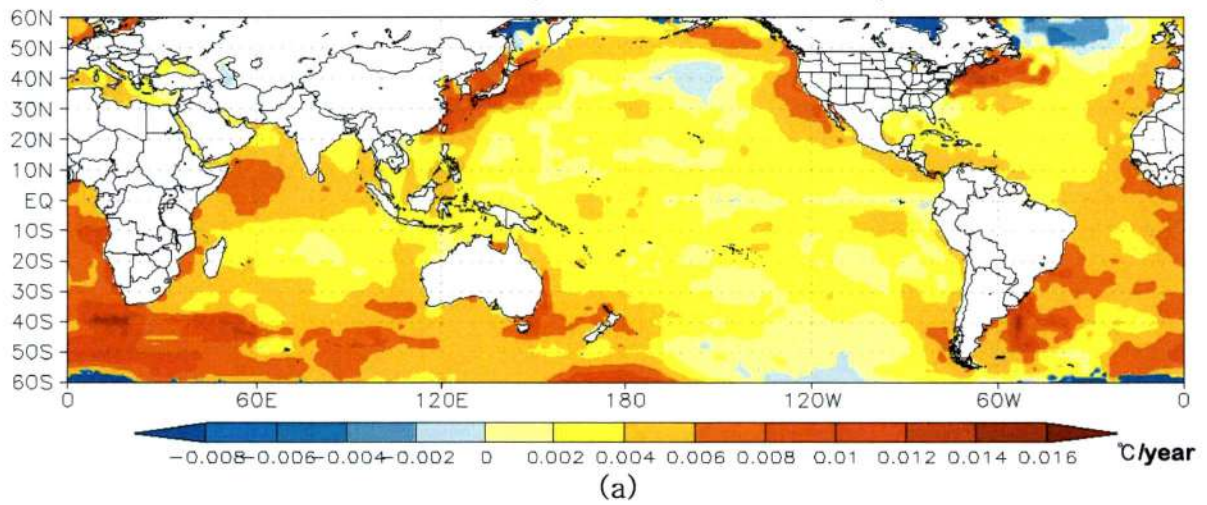


그림 3-2-1. S1 시나리오와 H2 시나리오 사이의 해수면 온도 차. 한반도 주변이 다른 지역보다 해수면온도 증가량이 월등히 높음.

Trend of SST (1870-2007 all season)



Trend of SST (1979-2007 all season)

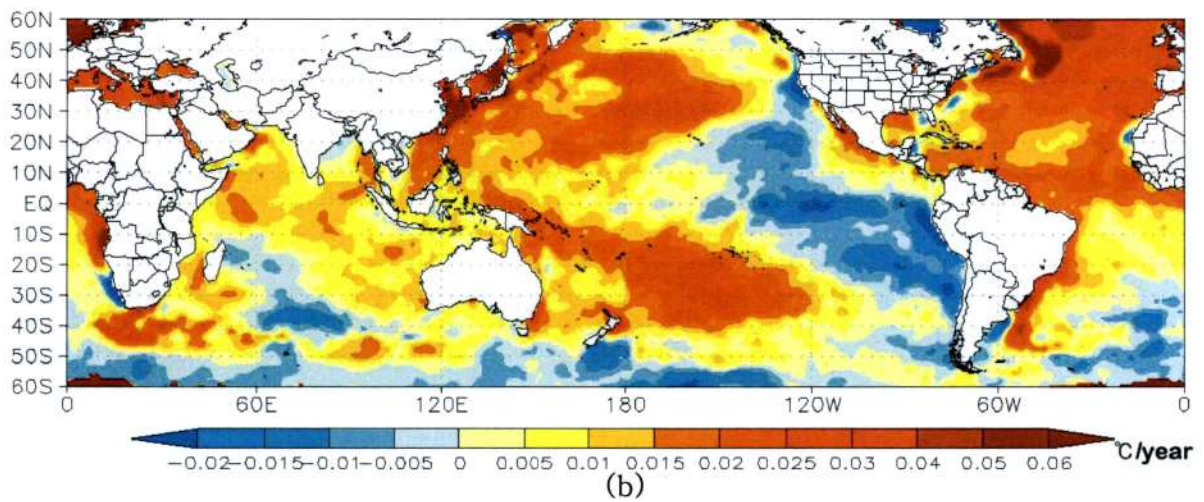


그림 3-2-2. 해수면 온도(SST)의 공간적 증가경향. (a)1870년부터 2007년까지 전 계절간의 SST증가율. (b)1979년부터 2007년까지 전 계절간의 SST증가율. 최근 29년간의 경우 과거에 증가율에 비해 대체적으로 많이 증가함을 볼 수 있음. 자료는 Hadly SST의 자료를 사용하였으며 증가율은 선형회귀방정식으로 계산하였음.

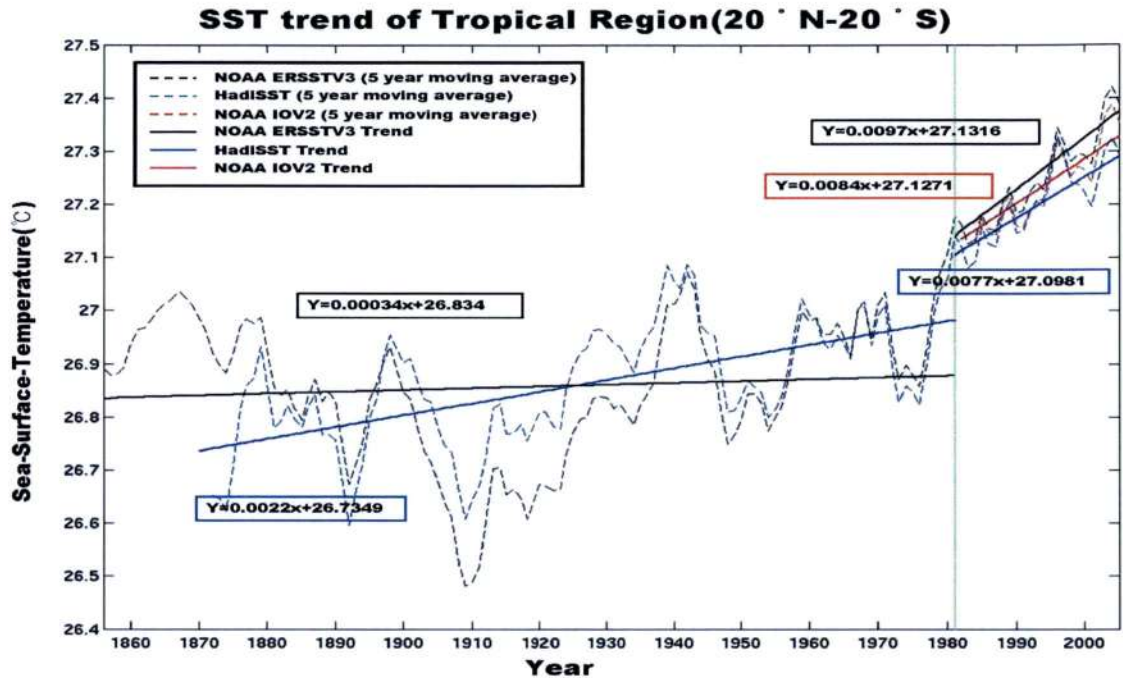


그림 3-2-3. 열대지역(20N-20S)의 해수면 온도 시계열. 각 자료별 파선은 5년 이동평균을 실선은 선형회귀선을 나타냄. 1982년을 경계로 이전 약 130년과 이후 약 25년 사이의 증가율을 비교하였음.

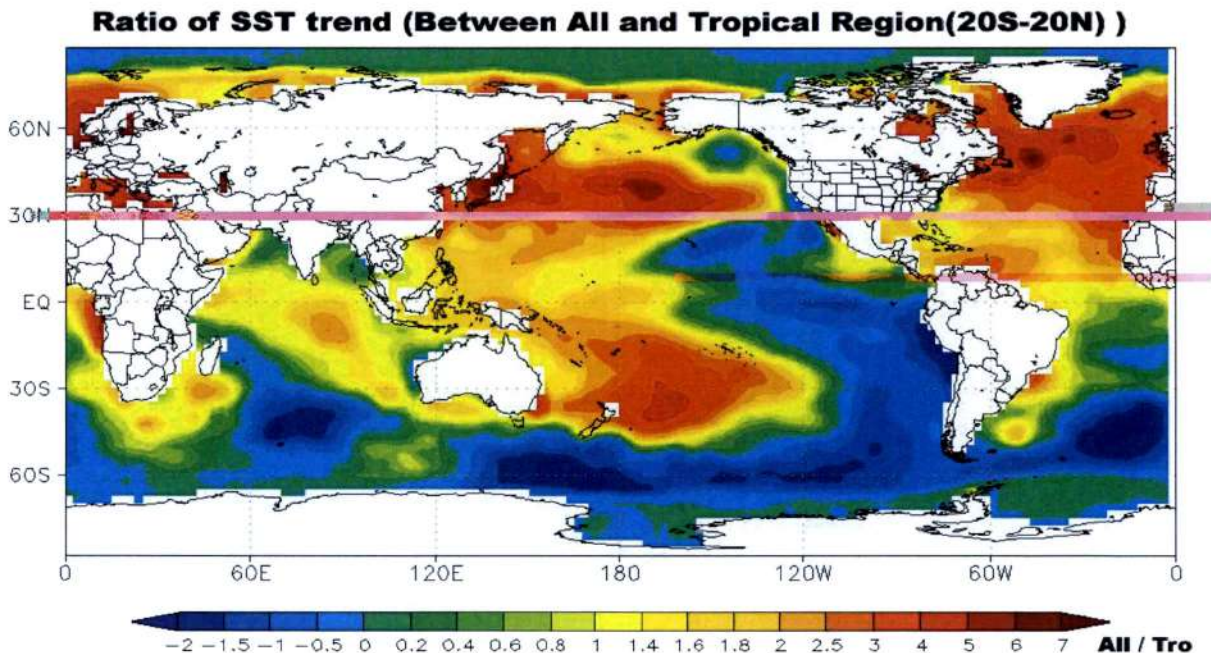


그림 3-2-4. 전 지역과 열대지역(20N-20S)의 SST증가정도의 비율. 전체지역의 증가율을 열대지역의 증가율의 평균으로 나눔. 한반도 주변해역에서 약 4에서 7의 값을 가지며 이는 열대지역보다 4배에서 7배 더 많이 SST가 증가함을 의미함.

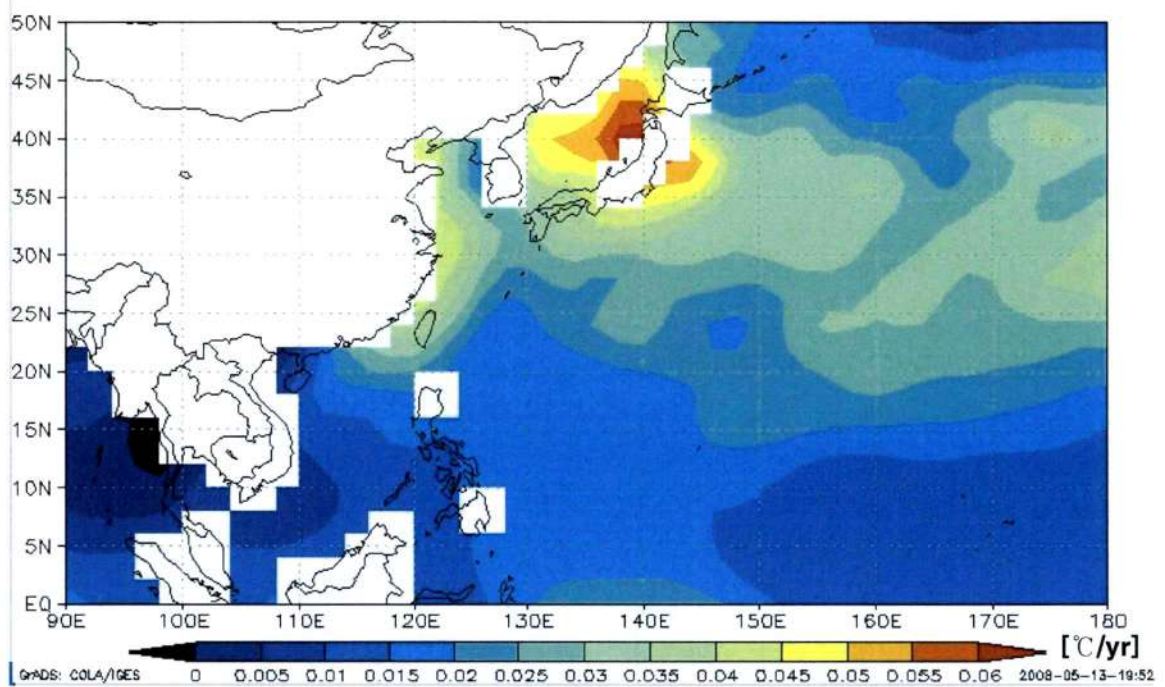


그림 3-2-5. 우리나라 주변의 해수면온도(SST) 증가율 (1979-2007. NOAA-ER SST V3). 우리나라 주변에서 높은 증가 경향을 보임.

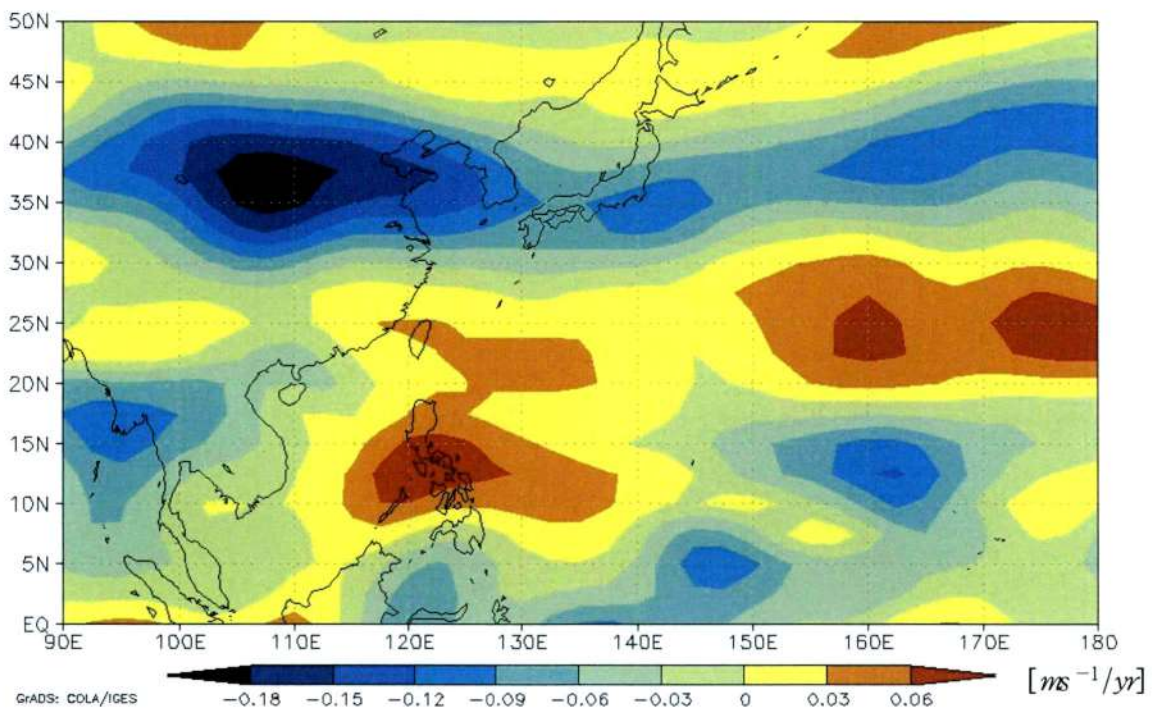


그림 3-2-6. 우리나라 주변의 수직바람시어 증가경향 (1979-2007. NCEP Reanalysis data). 우리나라 주변에서 음의 수직바람시어가 생겨 태풍발달에 유리한 기상조건을 보임.

(2) 태풍 에위니아에 대한 이어도 주변 해양의 반응

1) 이어도 주변해역의 수온분포

우리나라에 상륙하는 태풍은 동중국해를 지나 남해 또는 황해를 거치게 된다. 따라서 이 장에서는 여름철 태풍이 올라오는 길목인 동중국해, 남해, 황해의 평균적인 수평 및 수직 수온 분포를 살펴보고자 한다. 사용한 자료는 World Ocean Atlas 2005과 미해군 자료동화 자료이다.

수온구조는 수평적 분포와 수직적 분포를 동시에 조사하였다. 수평분포는 표층과 24 m, 48 m, 72 m에서의 수온을 조사하였고, 수직분포는 이어도를 지나는 동서 단면, 제주도 지나는 동서단면, 그리고 126°E 경도 선상의 단면을 조사하였다(그림 3-2-7).

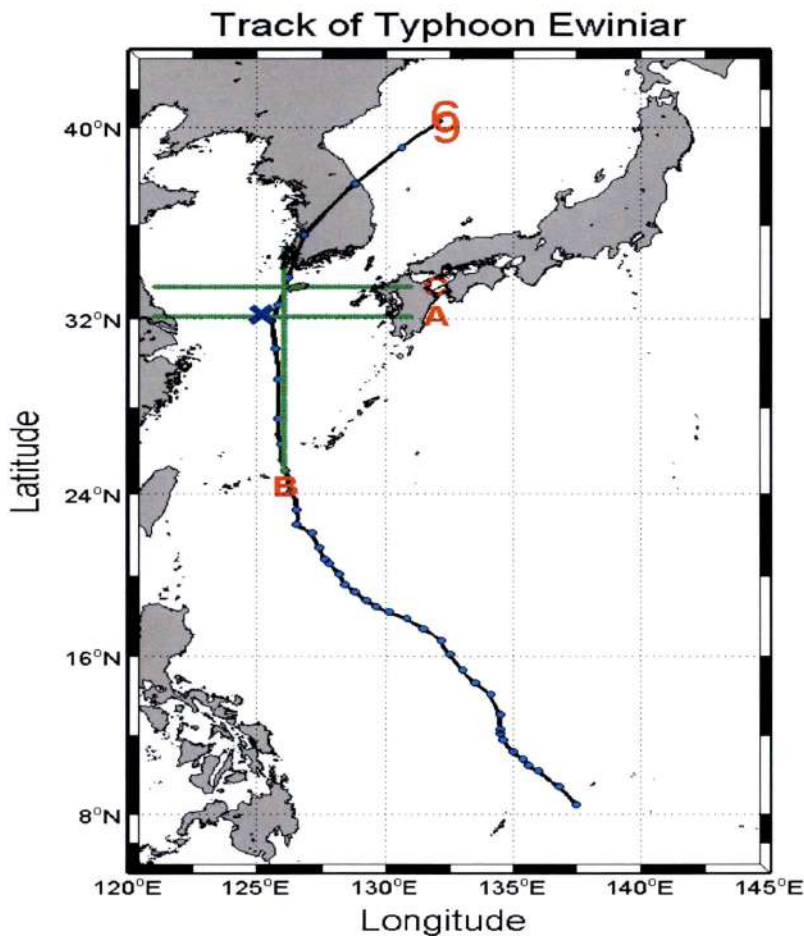


그림 3-2-7. 태풍 에위니아의 이동경로와 수온의 단면을 조사하기 위한 선. A는 이어도를 지나는 동서 단면(32.1°N), B는 126°E 경도 선상의 남북 단면, 그리고 C는 제주도를 지나는 동서 단면(33.4°N).

가. World Ocean Atlas 2005 자료

(가). 여름철 이어도 기지 동-서 단면의 수온 분포

이어도 기지(×× 표시) 아래 30-80m 수심에서는 7월에 12-15°C의 수온을 가지는 황해저층 냉수가 위치하며, 일본 연안 쪽 129°E 부근에는 25°C 이상의 고온의 쿠로시오 지류가 지나간다. 따라서 같은 위도에서 동서 간의 온도 차이가 매우 크다(그림 3-2-8).

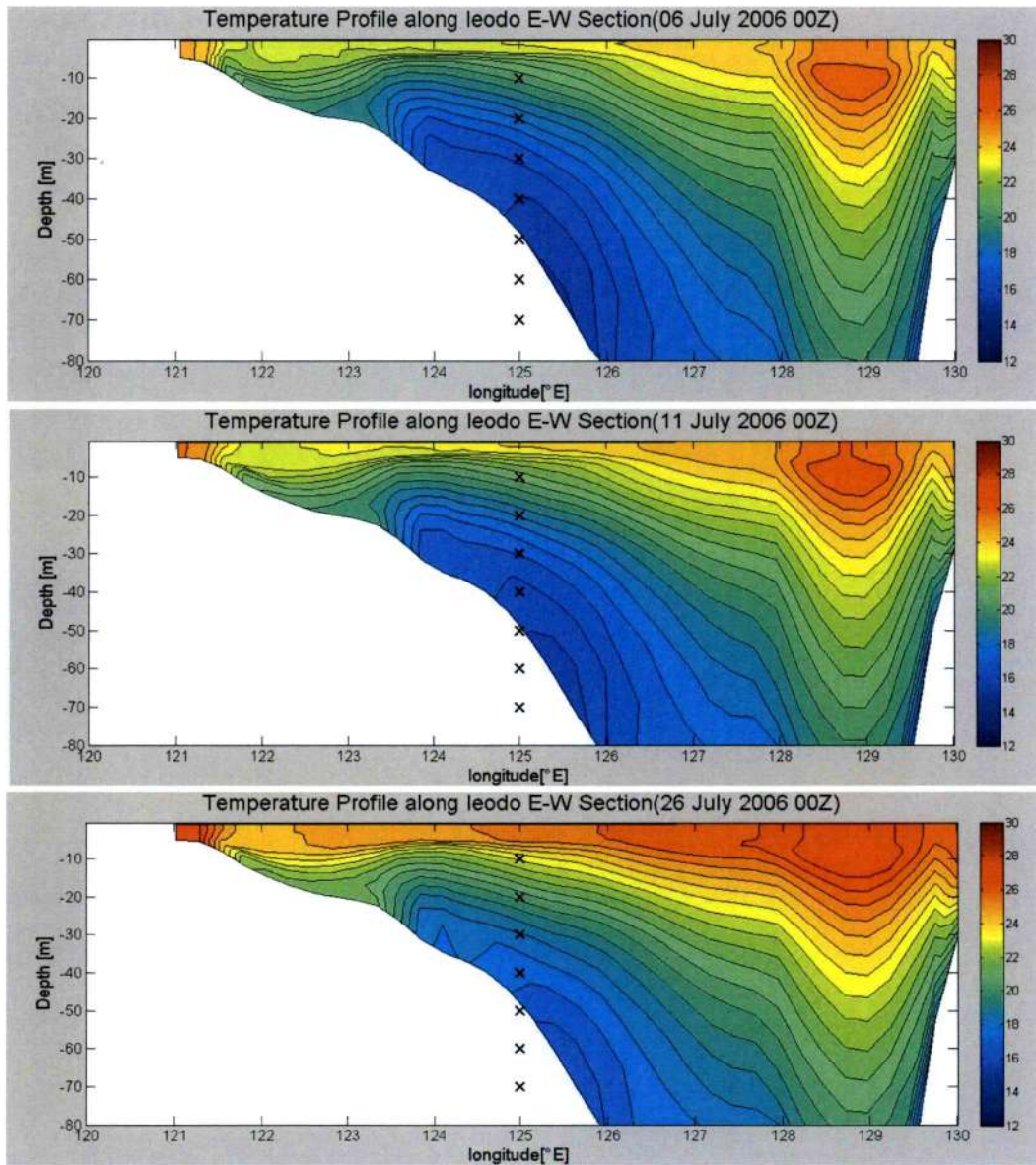


그림 3-2-8. 이어도 기지를 지나는 동-서 단면의 수온 분포. (위) 6 July 2006 00Z, (중간) 11 July 2006 00Z. (아래) 26 July 2006 00Z. ××× 표시는 이어도 기지의 위치를 나타냄. 단 위는 °C 임.

(나) 여름철 제주도 동-서 단면의 수온 분포

제주도(126°E-127°E 사이) 아래 20-80m 수심에서는 10-15°C의 수온을 가지는 황해저층 냉수가 지나간다. 저층냉수의 주축은 제주도 서쪽의 경사면에 위치하고 있다(그림 3-2-9). 제주도 우측은 쿠로시오 해류가 깊은 수심까지 확장되어 있어 저층냉수가 멀리 확장되지 못한다.

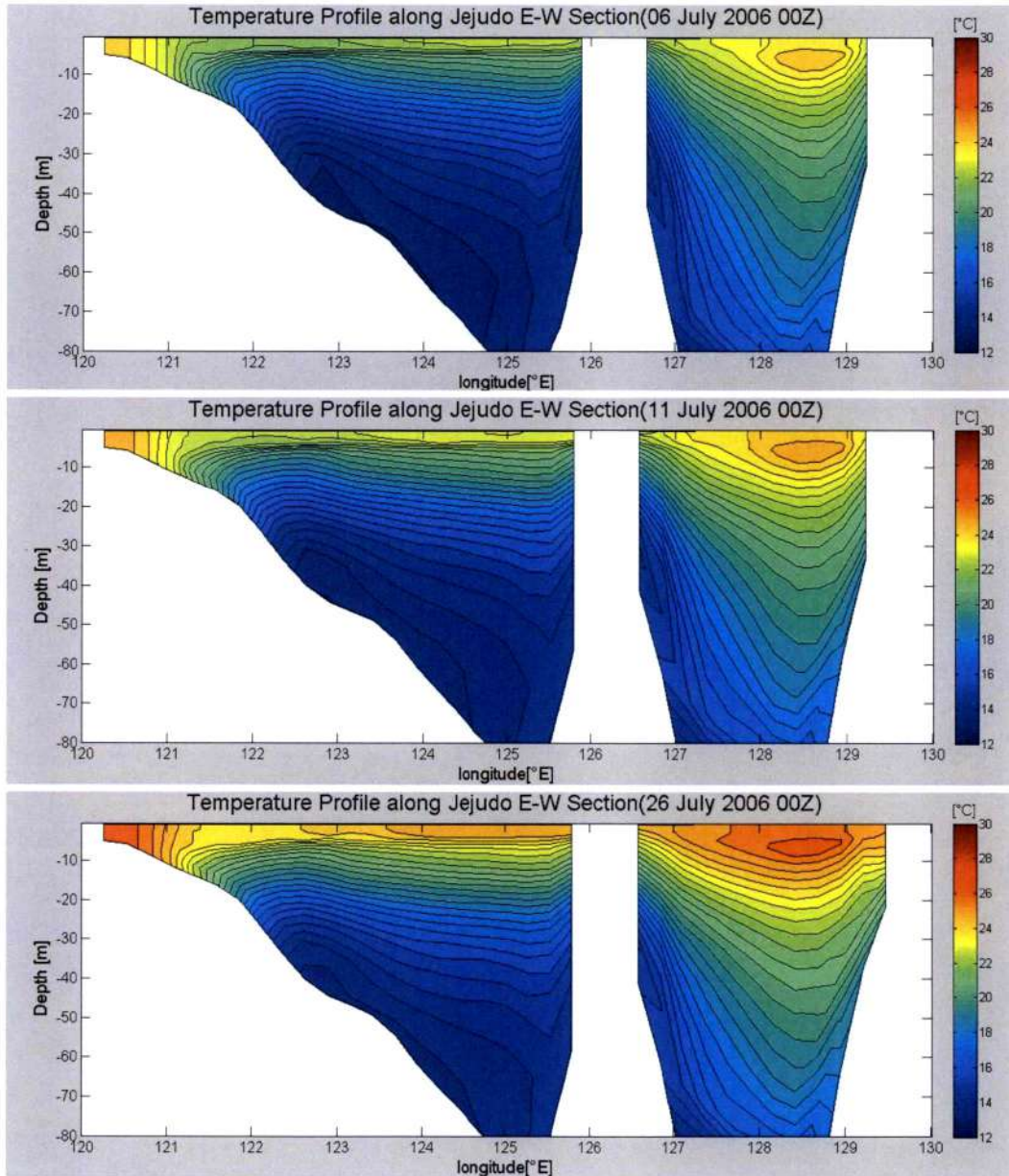


그림 3-2-9. 제주도를 지나는 동-서 단면의 수온 분포. (위) 6 July 2006 00Z, (중간) 11 July 2006 00Z. (아래) 26 July 2006 00Z. 단위는 °C 임.

(다) 여름철 126°E 선상 단면의 수온 분포

태풍 에위니아의 이동경로와 거의 일치하는 126°E 선상의 남북 단면(그림 3-2-7 참조)에서 수온분포를 보면(그림 3-2-10), 위도 28°N까지 황해저층냉수가 확장되어 있음을 알 수 있다. 그러나 12-15°C의 찬 수괴는 32°N까지만 분포한다. 여기서 이어도 기지는 위도 32.1°N에 위치한다.

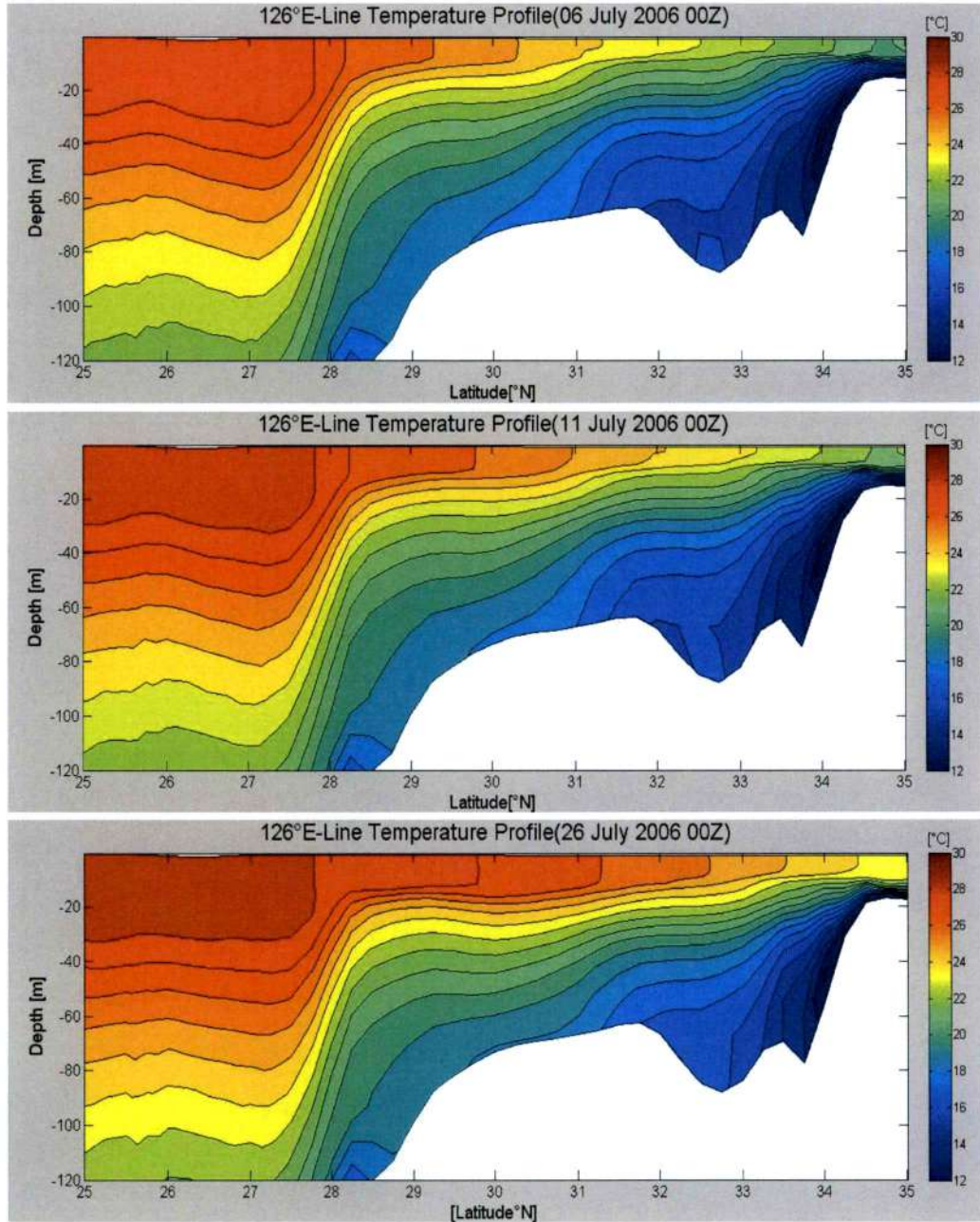


그림 3-2-10. 126°E를 지나는 남-북 단면의 수온 분포. (위) 6 July 2006 00Z, (중간) 11 July 2006 00Z. (아래) 26 July 2006 00Z. 단위는 °C 임.

나. 이해군 자료동화 자료

(가) 여름철 층별 수온의 수평 분포

한반도 근해 여름철(7월) 층별 수온분포를 보면(그림 3-2-11), 따뜻한 쿠로시오 해류와 황해저층냉수가 만나는 지점이 126°E 선상에 분포한다. 수심이 깊어질수록 이 선을 경계로 두 곳의 온도차가 더욱 커진다.

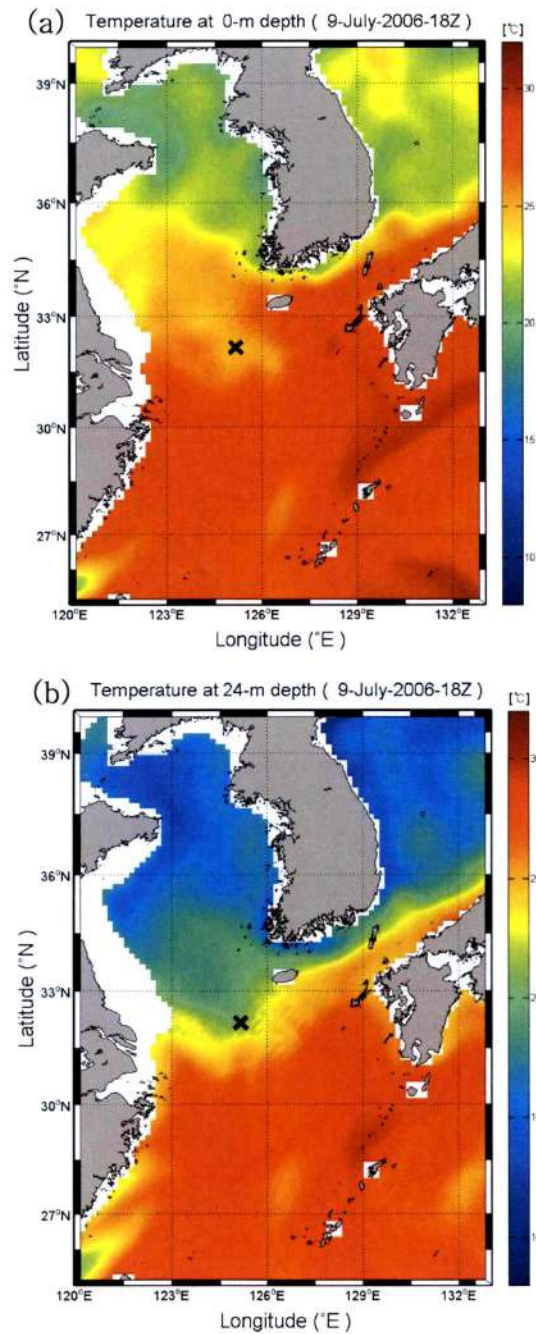


그림 3-2-11. 한반도 근해 7월의 층별 수온의 수평분포. (a) 표층, (b) 24m, (c) 48m, (d) 72m

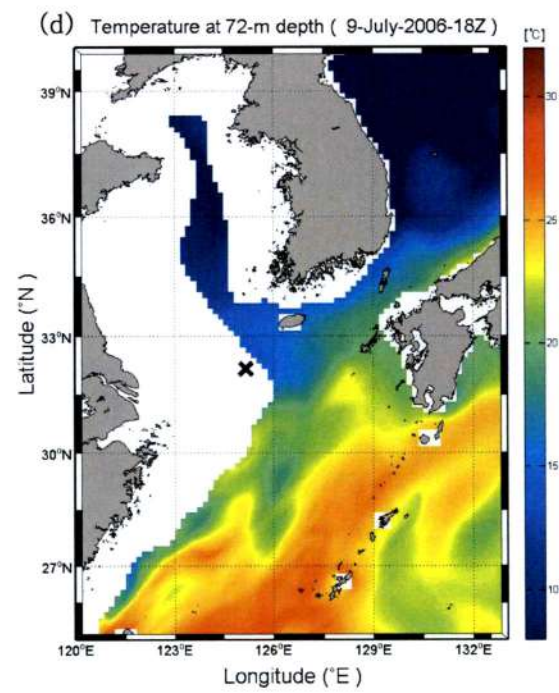
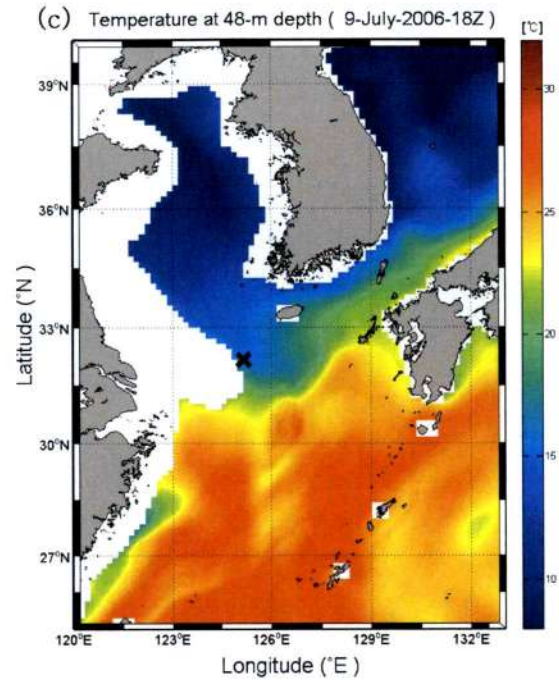


그림 3-2-11. 계속

2) 태풍에 의한 수평, 수직적인 해양특성 변화

3차원 해양모델 POM을 이용하여 태풍 에위니아 시기의 해양의 반응을 조사하였다. 모델의 바람장은 GFDL태풍모형에서 사용되는 경험식에 의해 계산되었다(Moon et al., 2003). 격자간격은 $1/6^\circ \times 1/6^\circ$ 이며, 초기장은 미해군의 자료동화 자료를 이용하여 생성하였다(그림 3-2-12). 수치실험에서는 바람장 없이 태풍 에위니아 기간 동안 계산된 수온분포와 태풍 에위니아의 바람장을 사용하여 계산된 수온분포를 비교하였다.

수치실험 결과, 태풍 에위니아는 북상하는 동안 북위 21도 근처에서 가장 높은 SST cooling(약 7°C)를 기록하였다(그림 3-2-12, 그림 3-2-13). 이 시기에 태풍은 전향을 시작하였고 이동속도가 매우 느렸다. 태풍 에위니아는 한반도에 접근하여 제주도 남쪽을 통과할 무렵 또다시 강한 SST cooling이 발생하였다. 이 시기에 태풍의 이동속도는 비교적 빨랐지만 이 지역에 발달한 황해 저층냉수로 형성된 얇은 혼합층 때문에 SST의 하강이 컸던 것으로 사료된다. 태풍 통과 시기의 표층해류는 시계방향으로 회전을 하며, 태풍이 통과한 후에도 관성에 의해 회전 운동을 계속하였다(그림 3-2-14).

태풍에 수반되는 강한 바람에 의한 혼합작용으로 태풍 진로를 따라 혼합층 두께는 깊어졌다(그림 3-2-13). 그러나 태풍 중심을 따라서는 발산과 융승 작용으로 혼합층은 도리어 얇아졌다(Schade and Emanuel, 1999). 이어도를 지나는 동서 단면에서 태풍 통과시기에 수온의 수직분포를 보면(그림 3-2-15), 수심 20m 이하에 분포하는 저층냉수가 태풍에 의한 혼합과 융승작용으로 표층으로 확산되는 것을 알 수 있다. 또한 태풍의 진로와 나란한 126°E 선을 따라시도 태풍의 영향으로 SST는 $2\text{--}6^\circ\text{C}$ 하강하고 혼합층 깊이는 최대 25cm까지 더 깊어졌다(그림 3-2-16, 그림 3-2-17). 126°E 선에서 가장 높은 SST cooling은 이어도 기지 근처에서 발생하였다(그림 3-2-17).

이어도 기지에서 에위니아 통과시기에 관측된 층별 수온 분포에서는 16m 수심에서 최대 11°C 까지 수온 감소를 발견하였다(그림 3-2-18). 그러나 모델에서 나타난 최대 수온 감소는 6°C 에 불과하였다. 이러한 차이는 모델에 사용된 초기 수온분포가 실제와는 차이가 컸기 때문인 것으로 사료된다. 실제로 수심 48m에서의 평균 수온을 비교해 보면 이어도 기지에서는 약 11°C 인 반면 모델에서는 약 15°C 로 나타나 4°C 정도의 차이가 있었다.

가. 표층해류와 SST의 변화

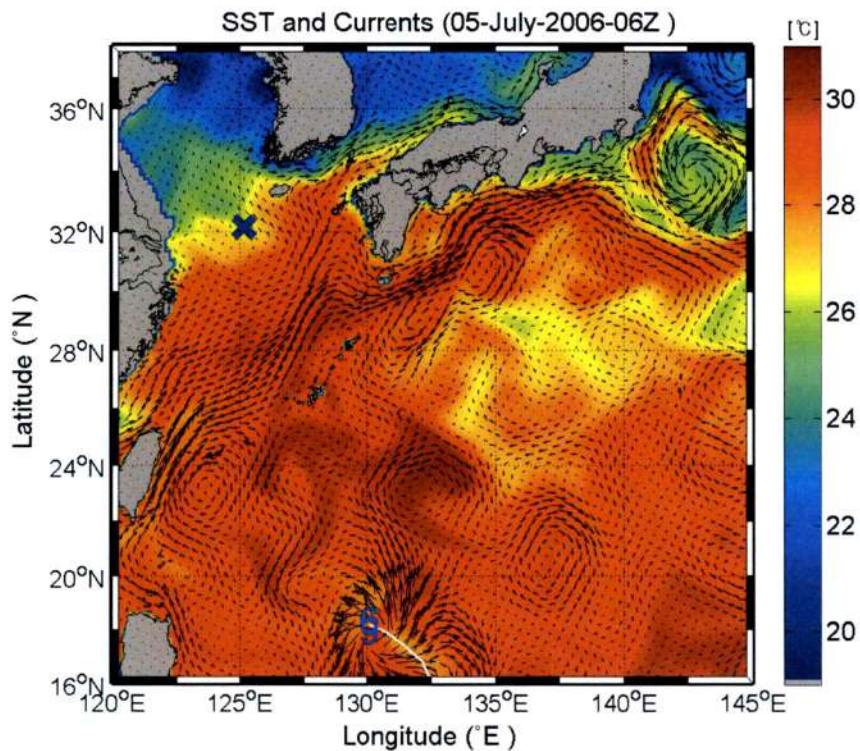
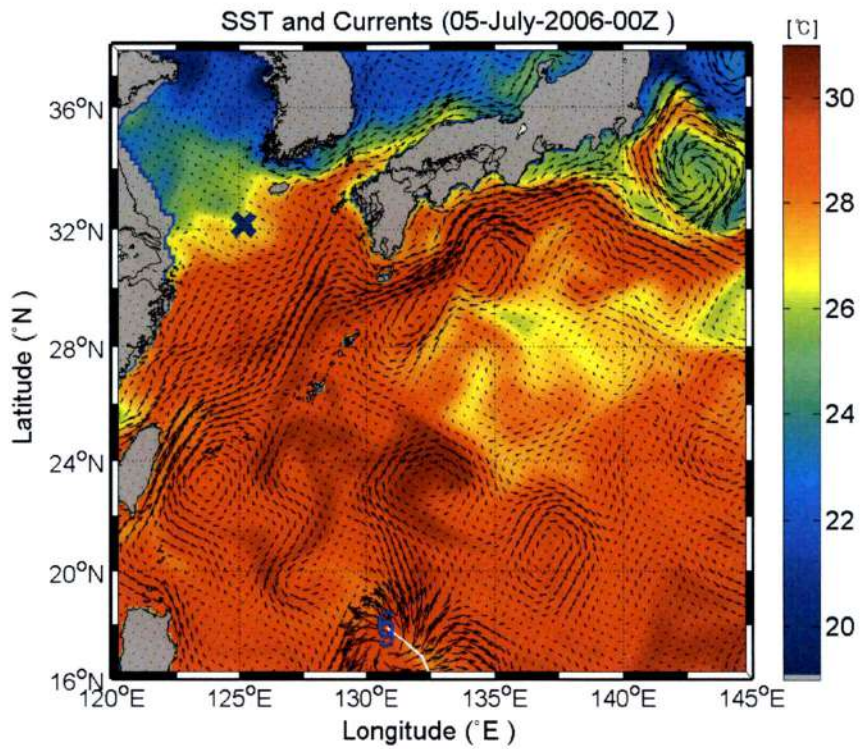


그림 3-2-12. 태풍 에위니아 통과 시기에 표층해류(화살표)와 SST(칼라)의 변화. (a)~(w)는 6 시간 간격의 해수면 온도와 표층해류의 모습. × 표시는 이어도 기지의 위치를, 흰 선은 태풍경로를 나타냄.

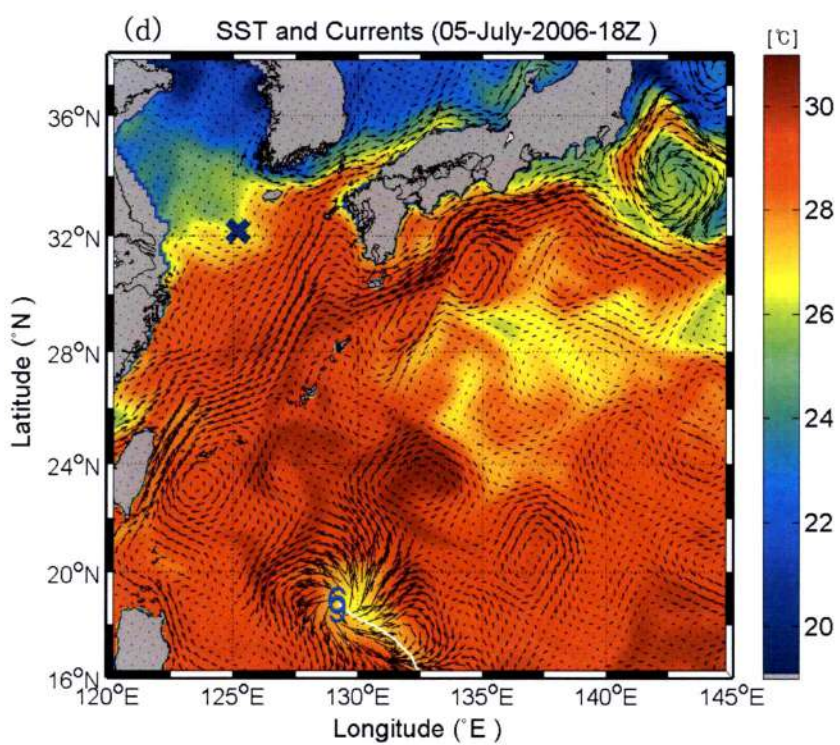
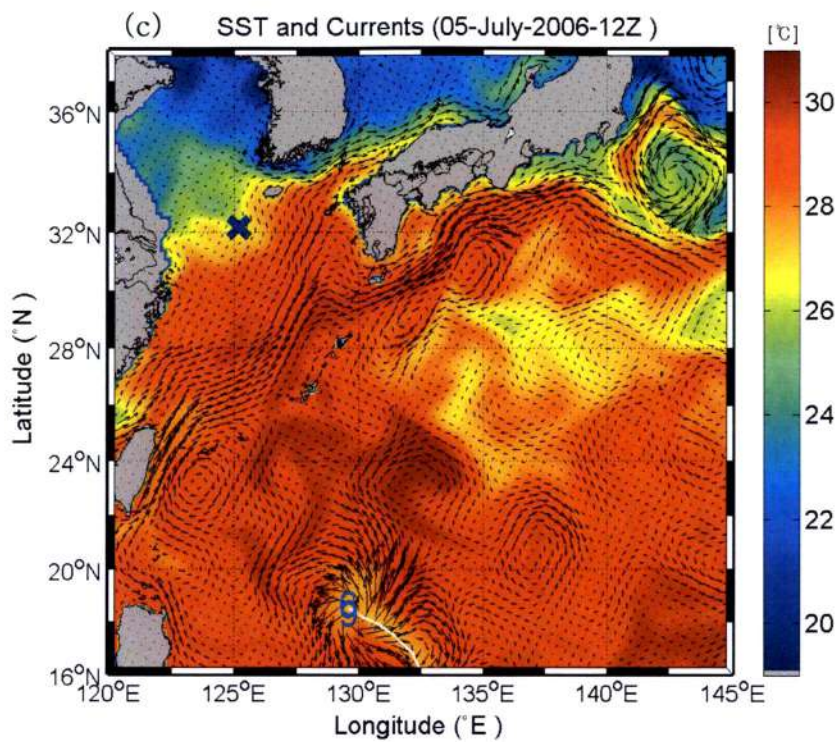


그림 3-2-12. 계속

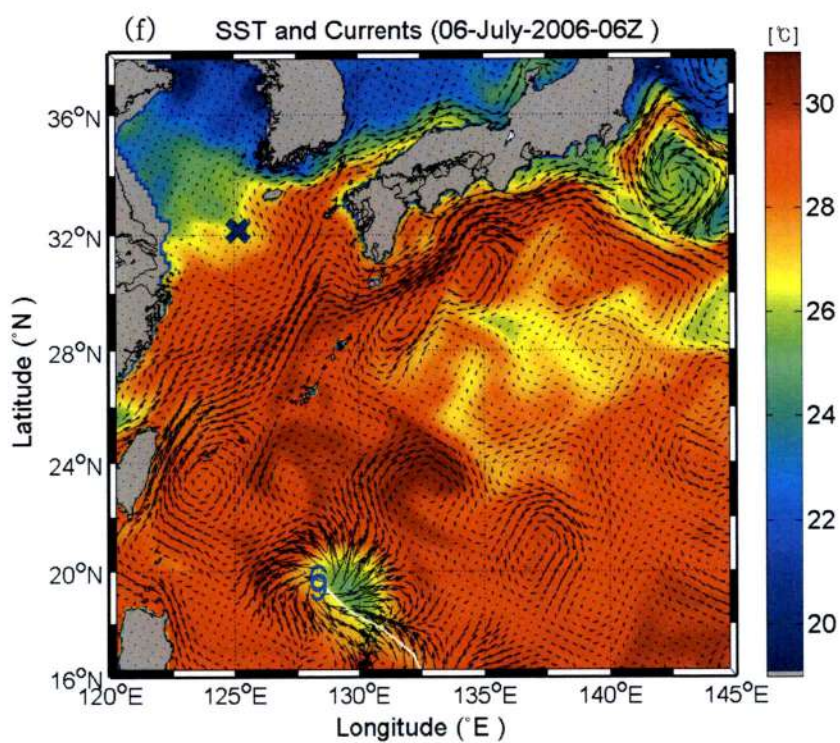
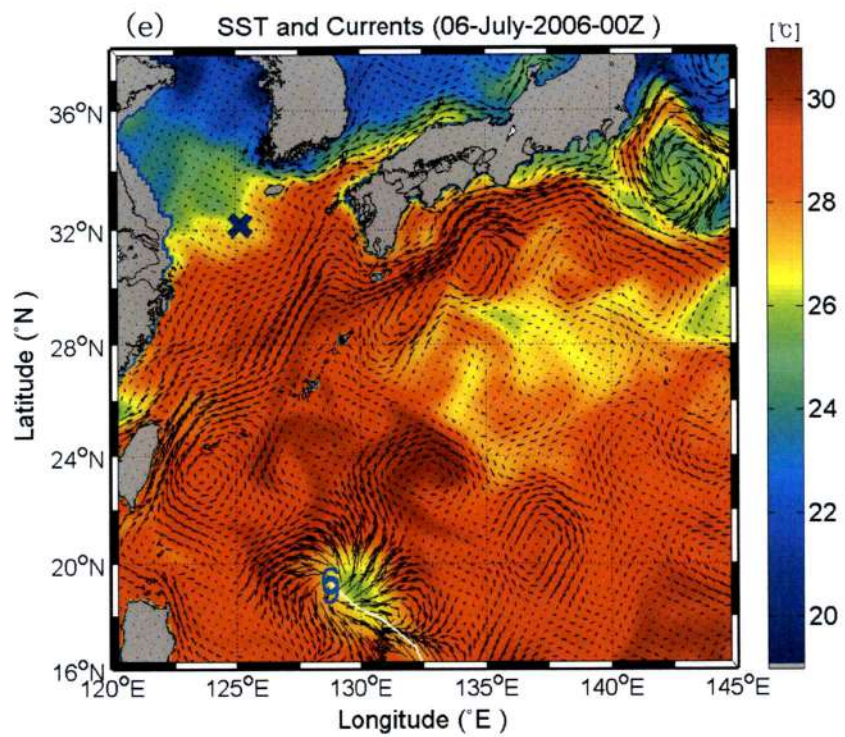


그림 3-2-12. 계속

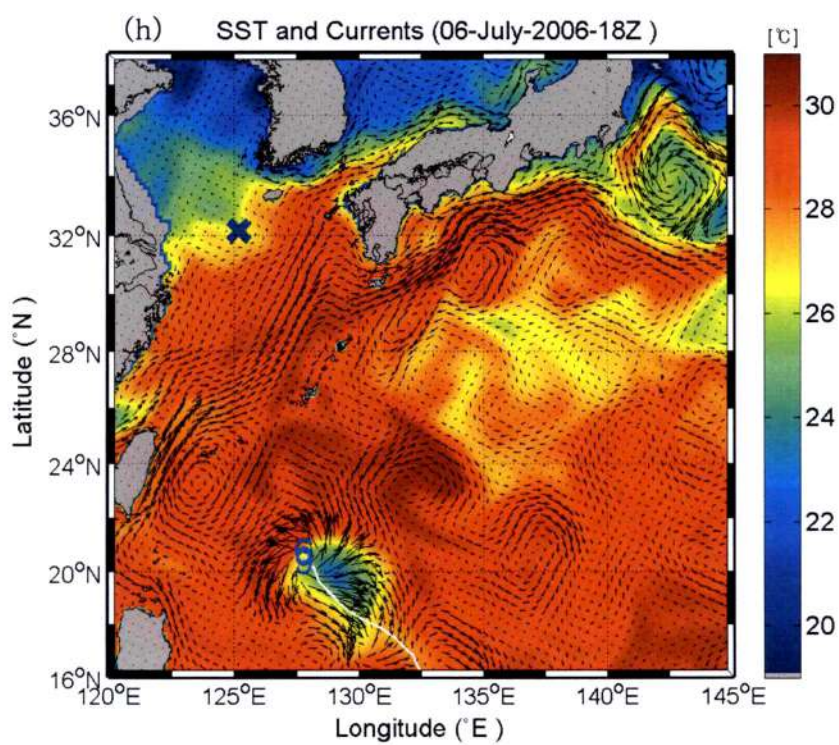
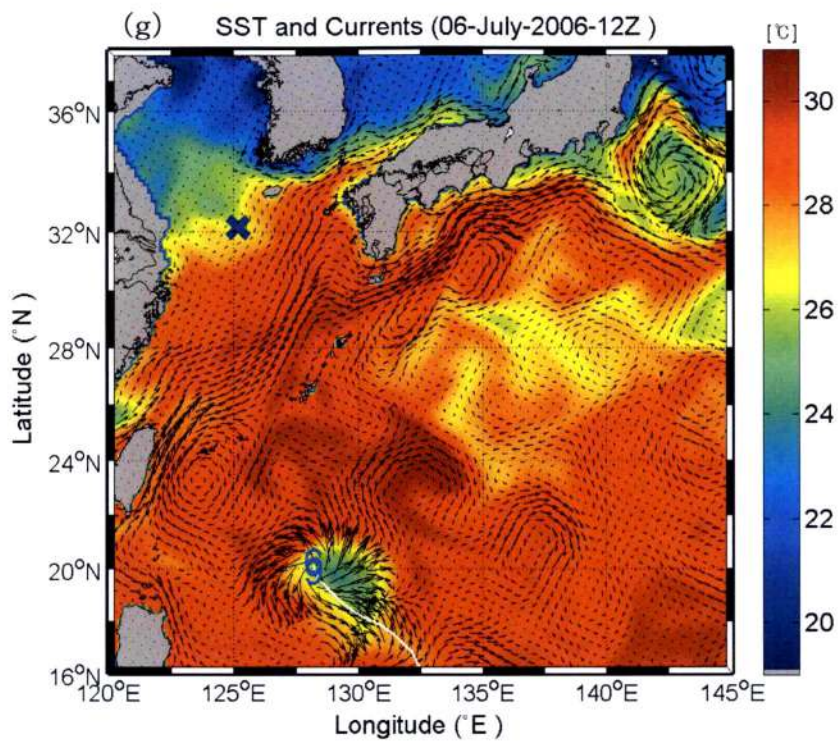


그림 3-2-12. 계속

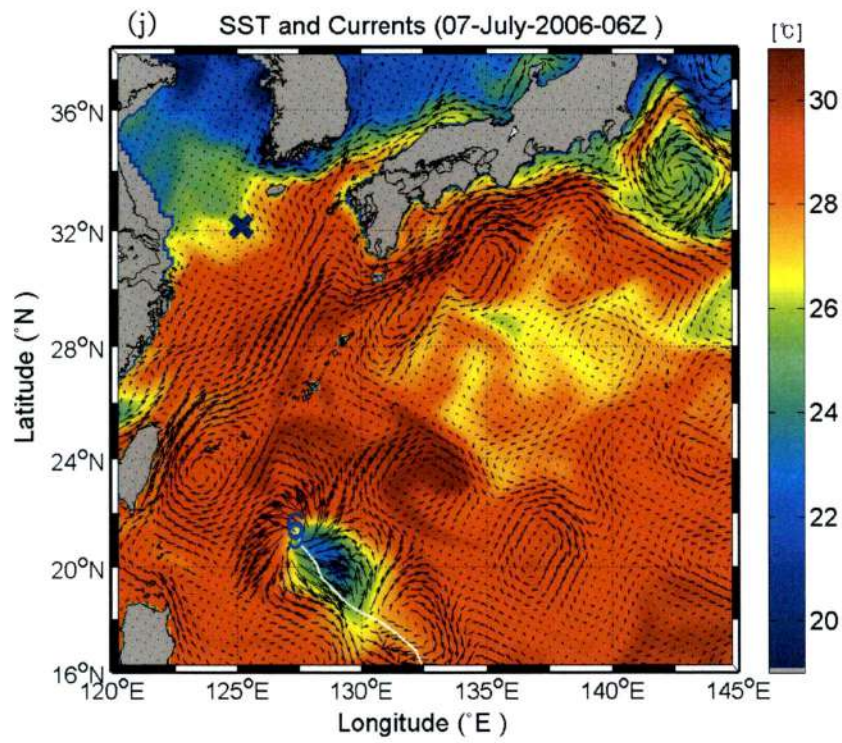
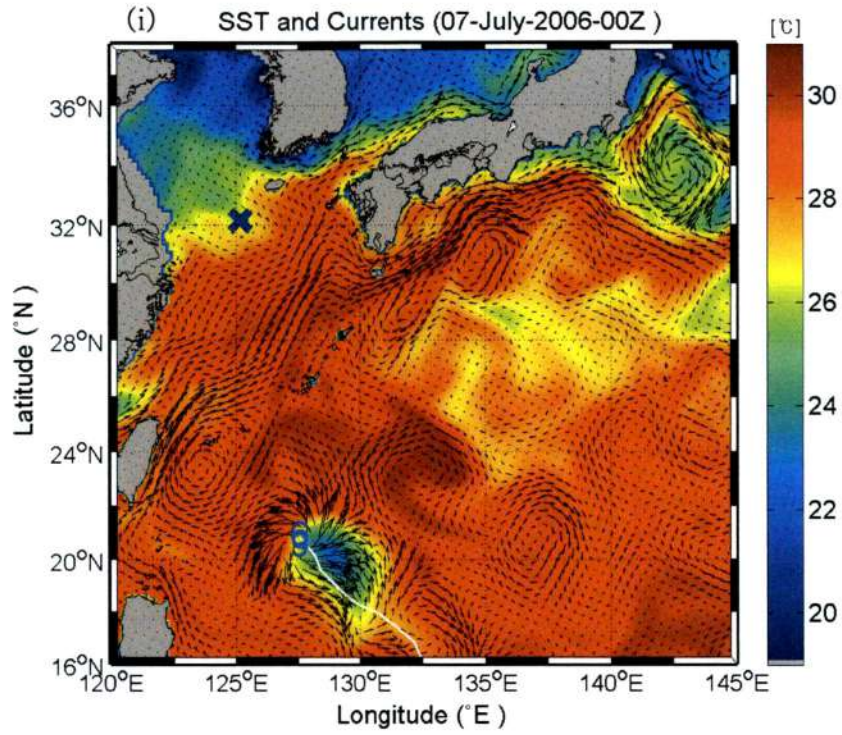


그림 3-2-12. 계속

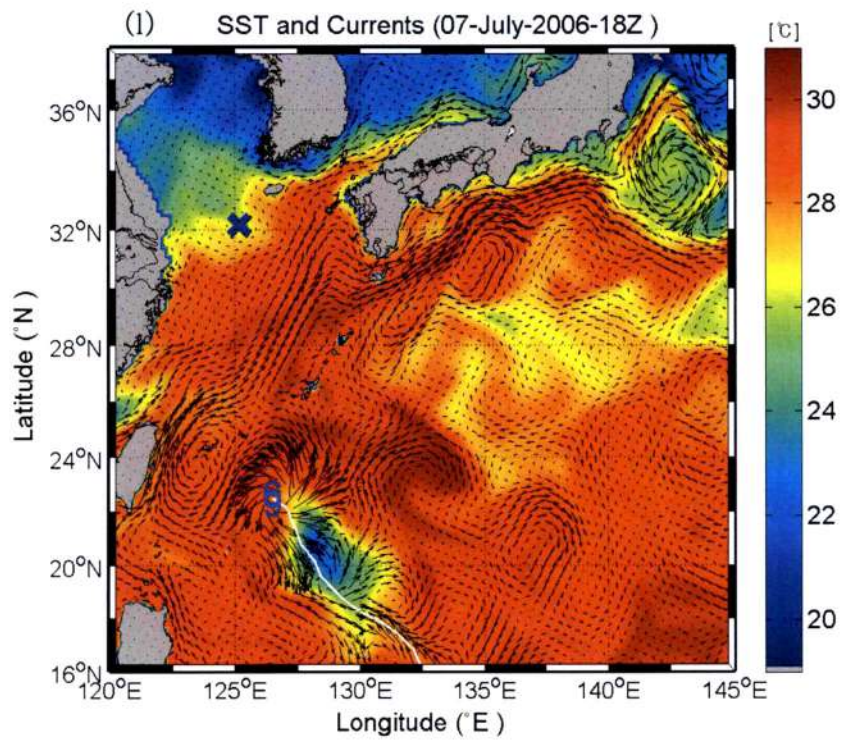
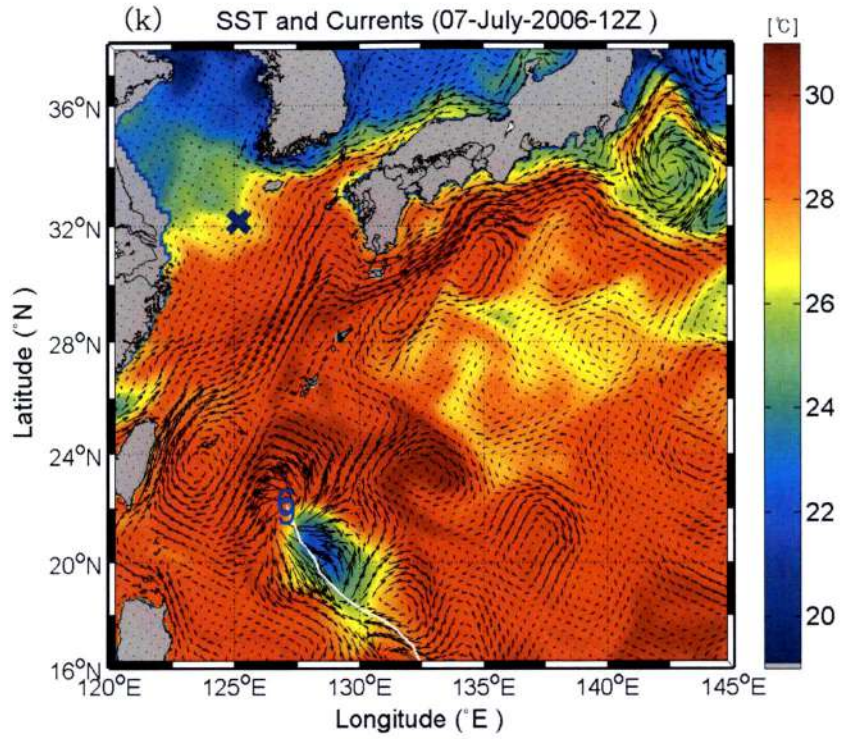


그림 3-2-12. 계속

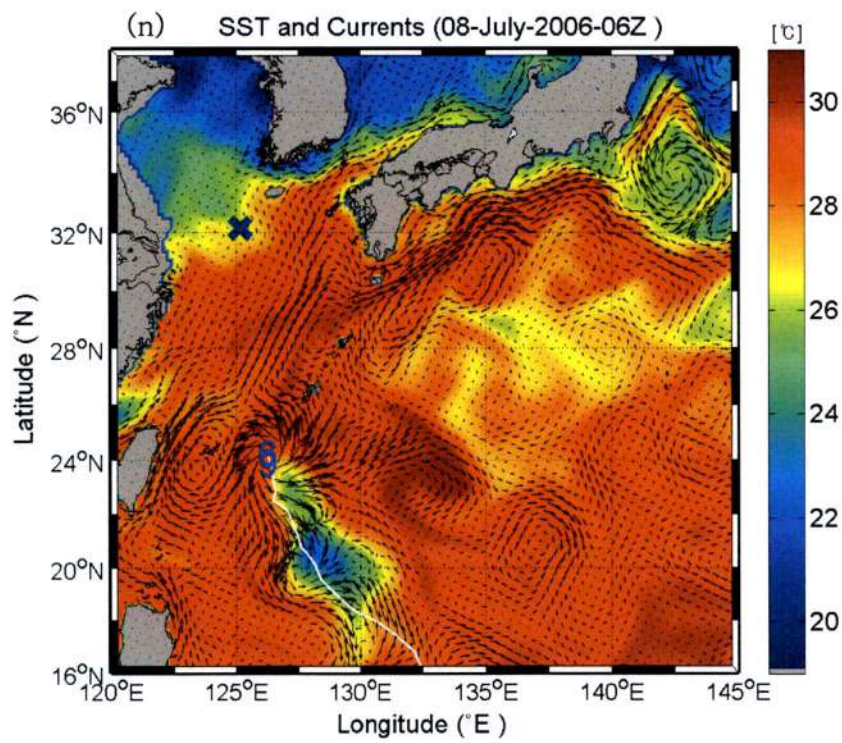
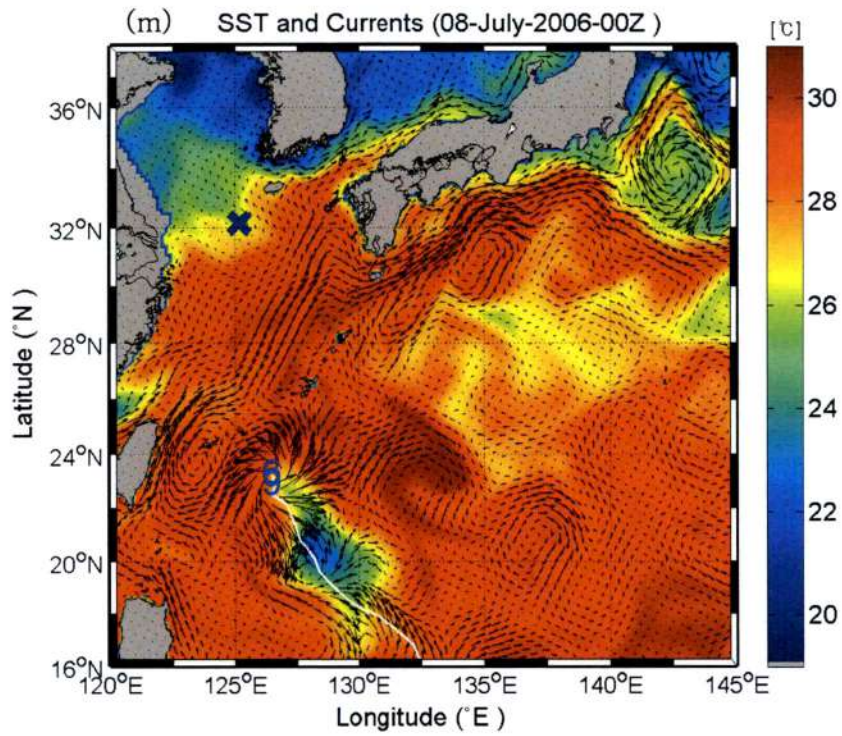


그림 3-2-12. 계속

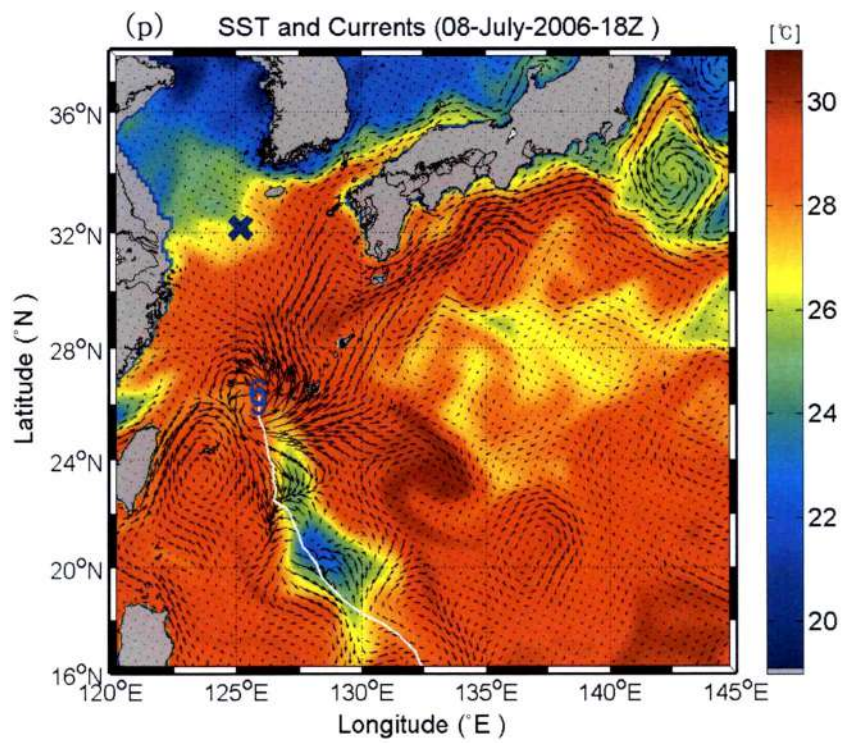
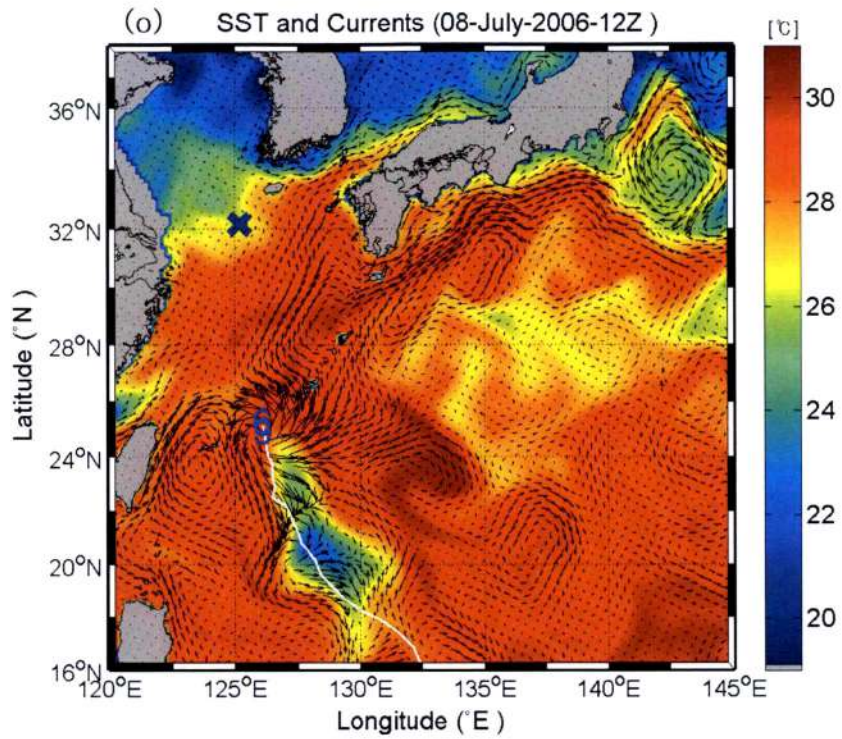


그림 3-2-12. 계속

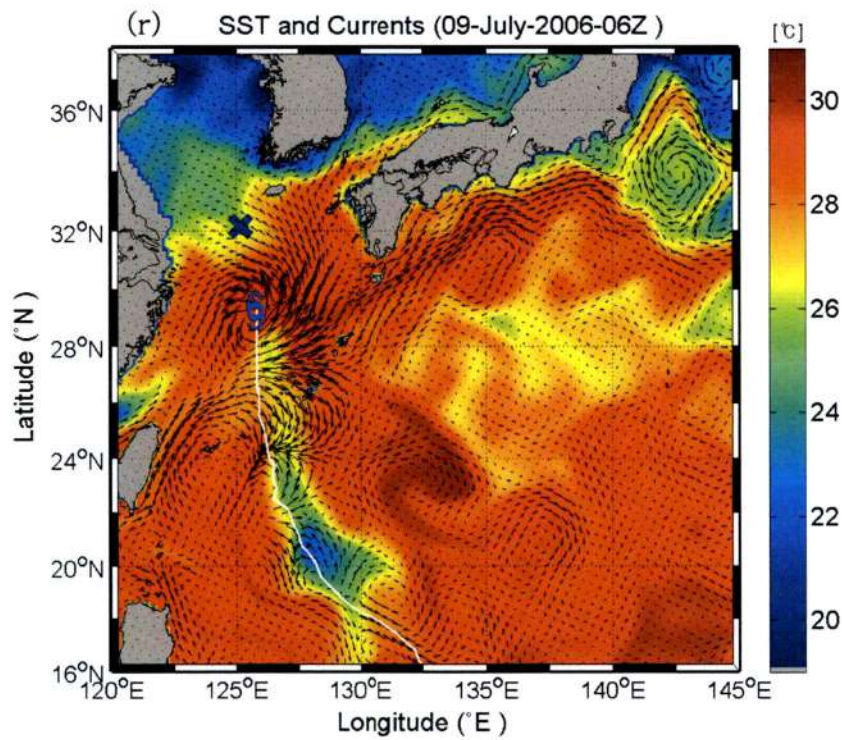
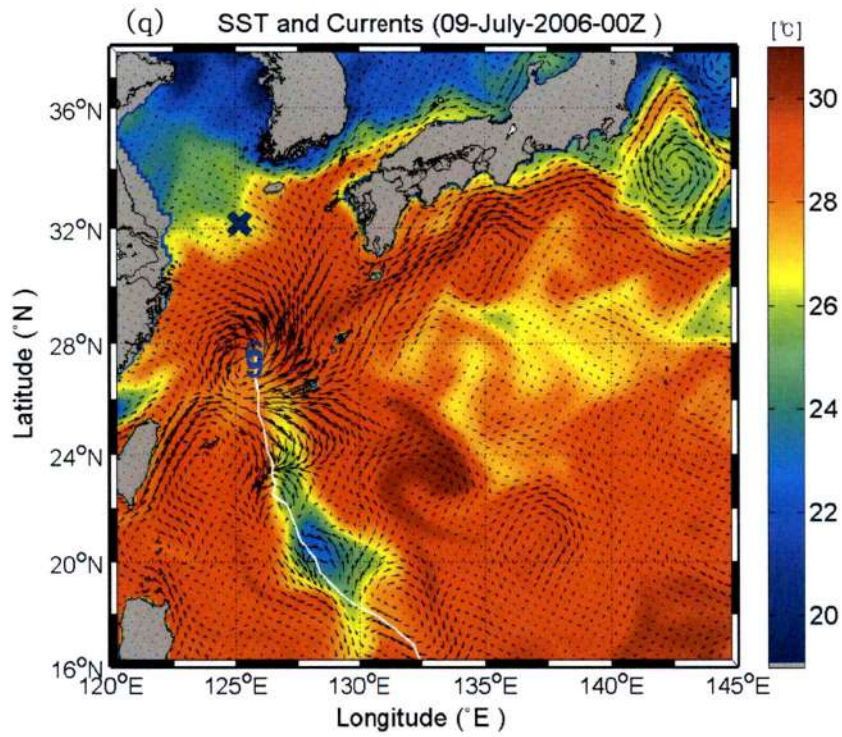


그림 3-2-12. 계속

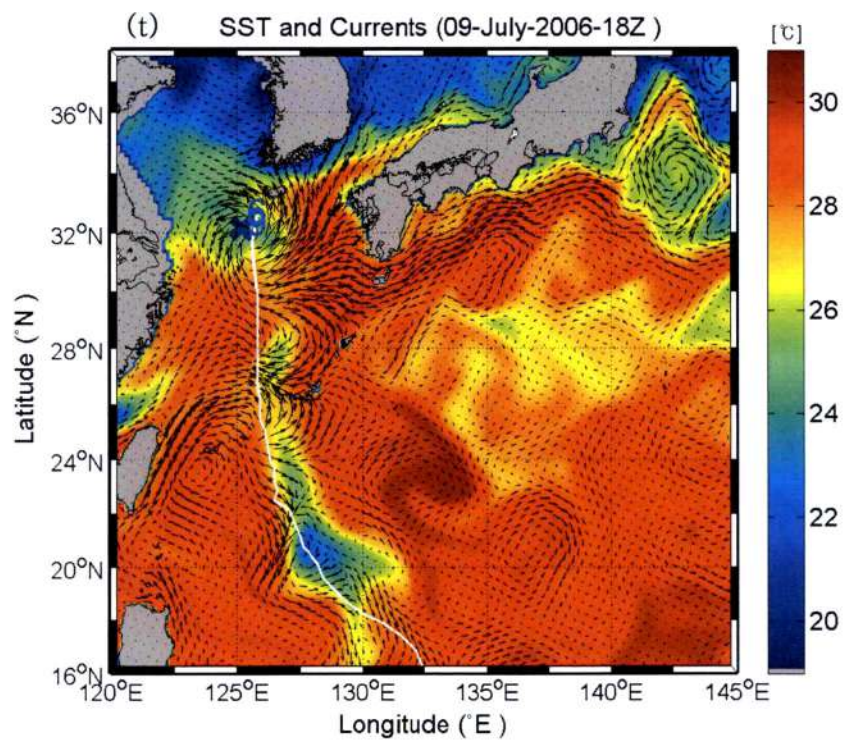
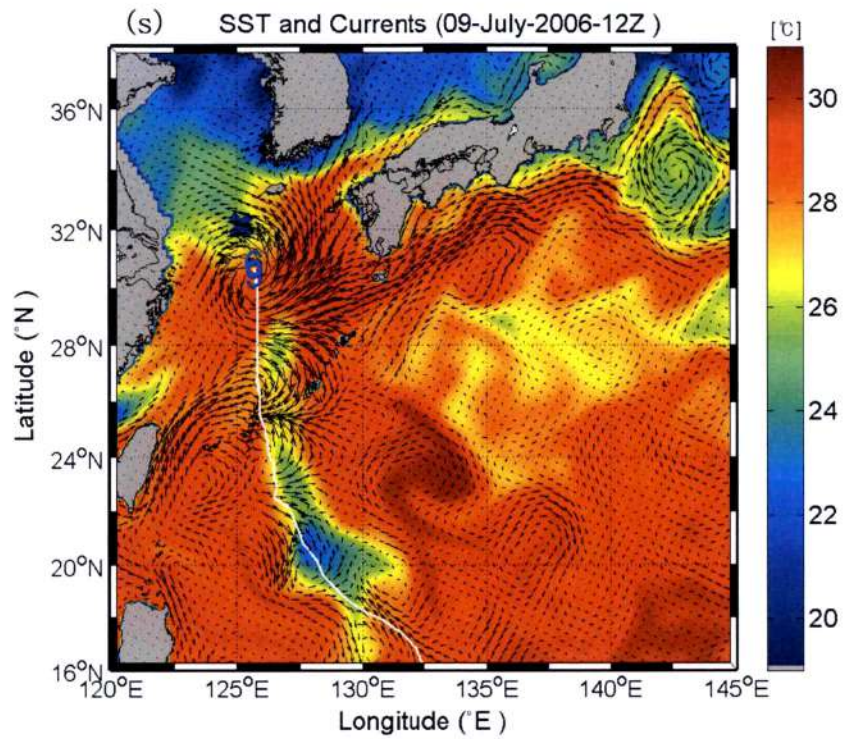


그림 3-2-12. 계속

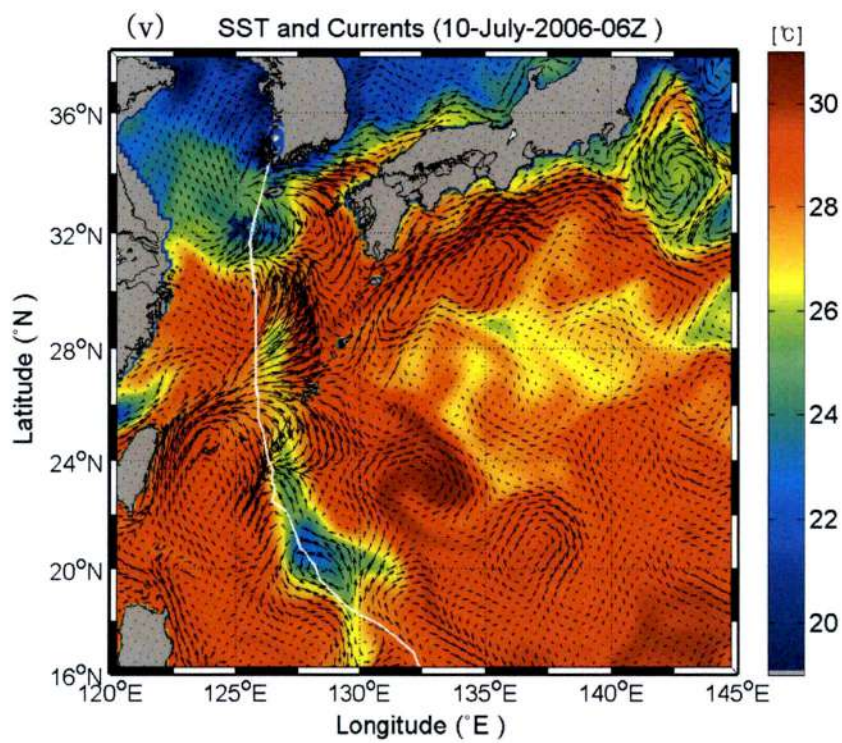
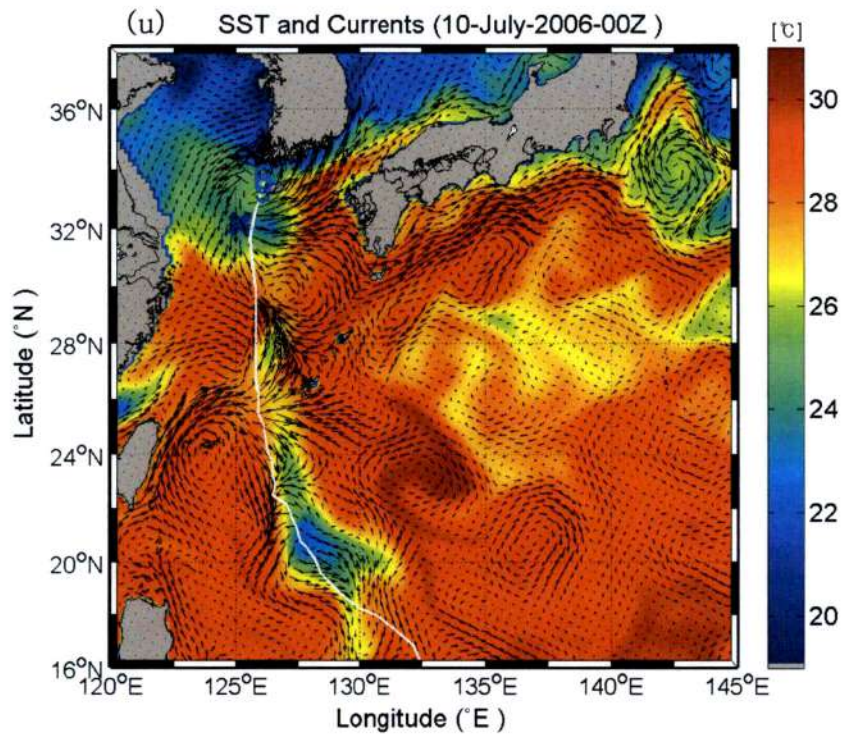


그림 3-2-12. 계속

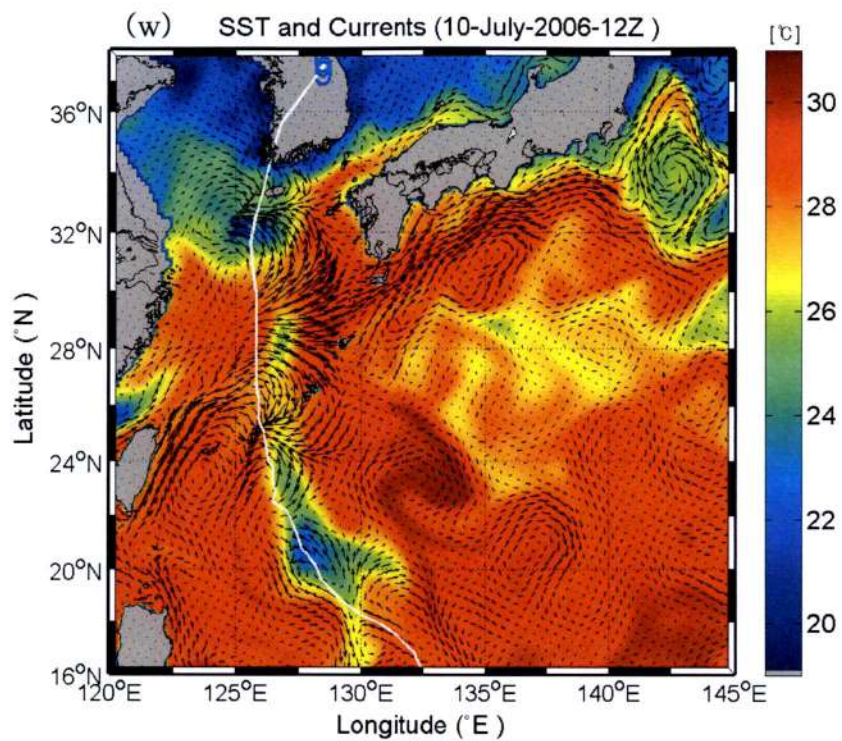


그림 3-2-12. 계속

나. 태풍에 의한 SST Cooling 변화

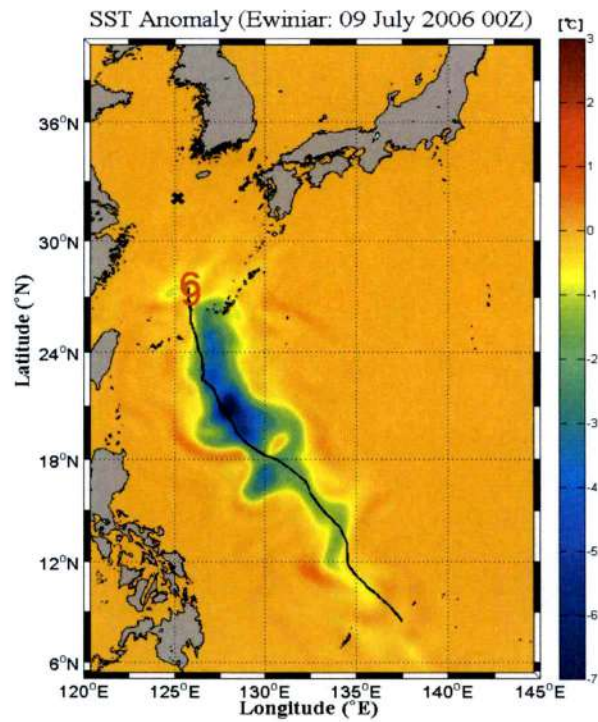
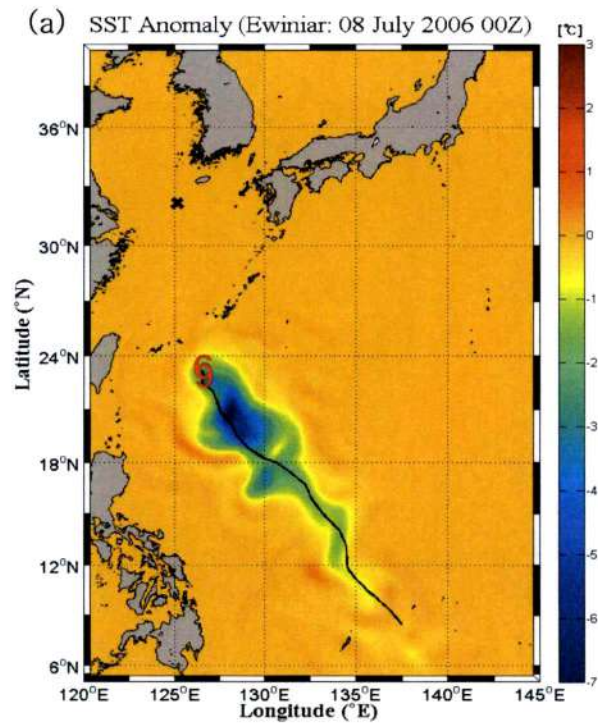


그림 3-2-13. 계속

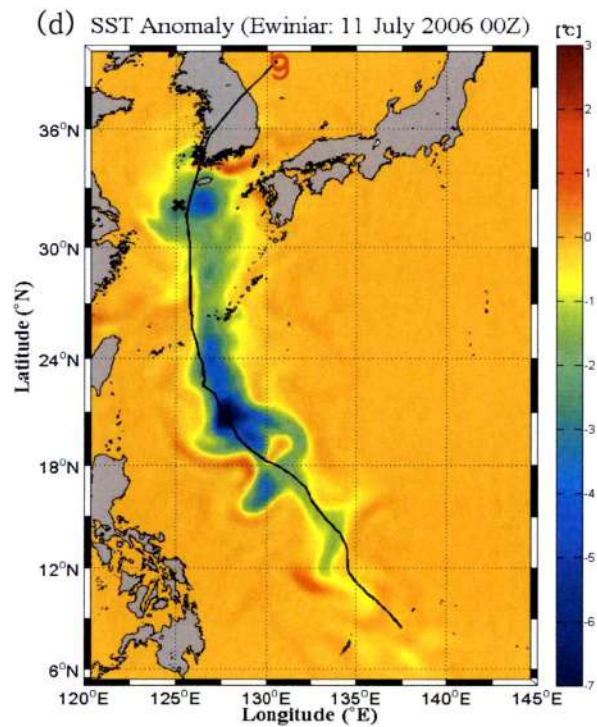
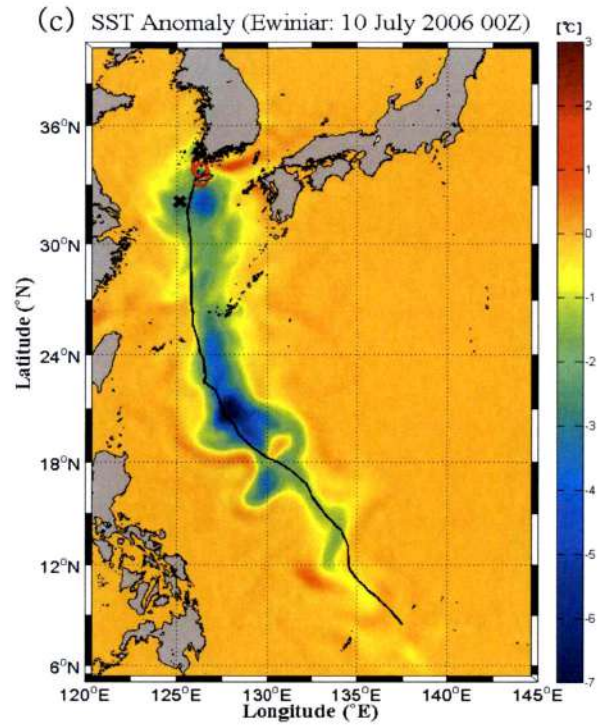


그림 3-2-13. 태풍 에위니아 통과 시기에 SST Anomaly의 변화. (a) 8 July 2006 00Z, (b) 9 July 2006 00Z, (c) 10 July 2006 00Z, (d) 11 July 2006 00Z. × 표시는 이어도 기지의 위치를, 검은 선은 태풍경로를 나타냄.

다. 태풍에 의한 혼합층(MLD)의 변화

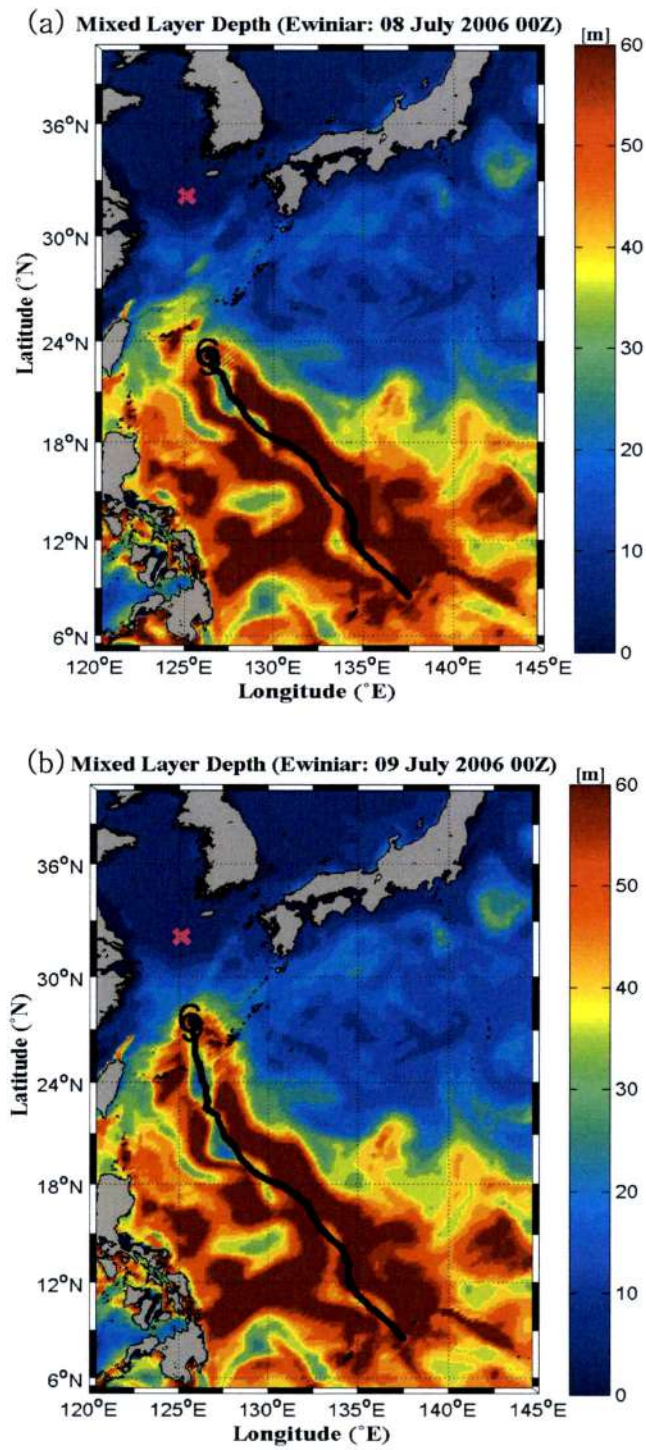


그림 3-2-14. 계속

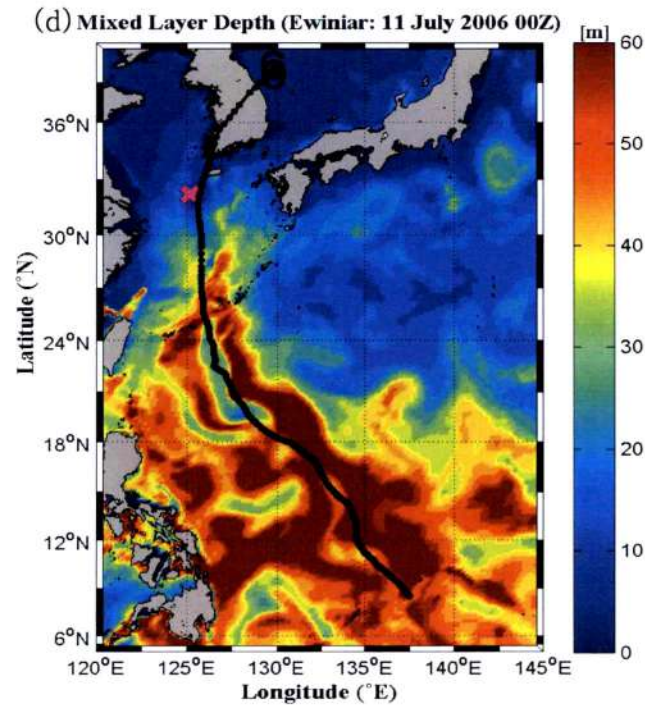
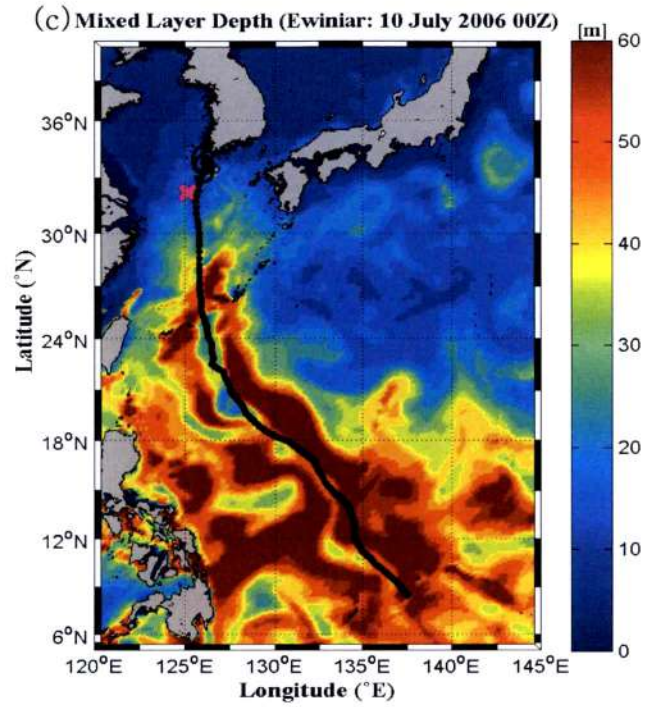


그림 3-2-14. 태풍 에위니아 통과 시기에 혼합층 깊이의 변화. (a) 8 July 2006 00Z, (b) 9 July 2006 00Z, (c) 10 July 2006 00Z, (d) 11 July 2006 00Z. × 표시는 이어도 기지의 위치를, 검은 선은 태풍경로를 나타냄.

라. 이어도 기지의 동-서 단면에서 수온의 수직분포 변화

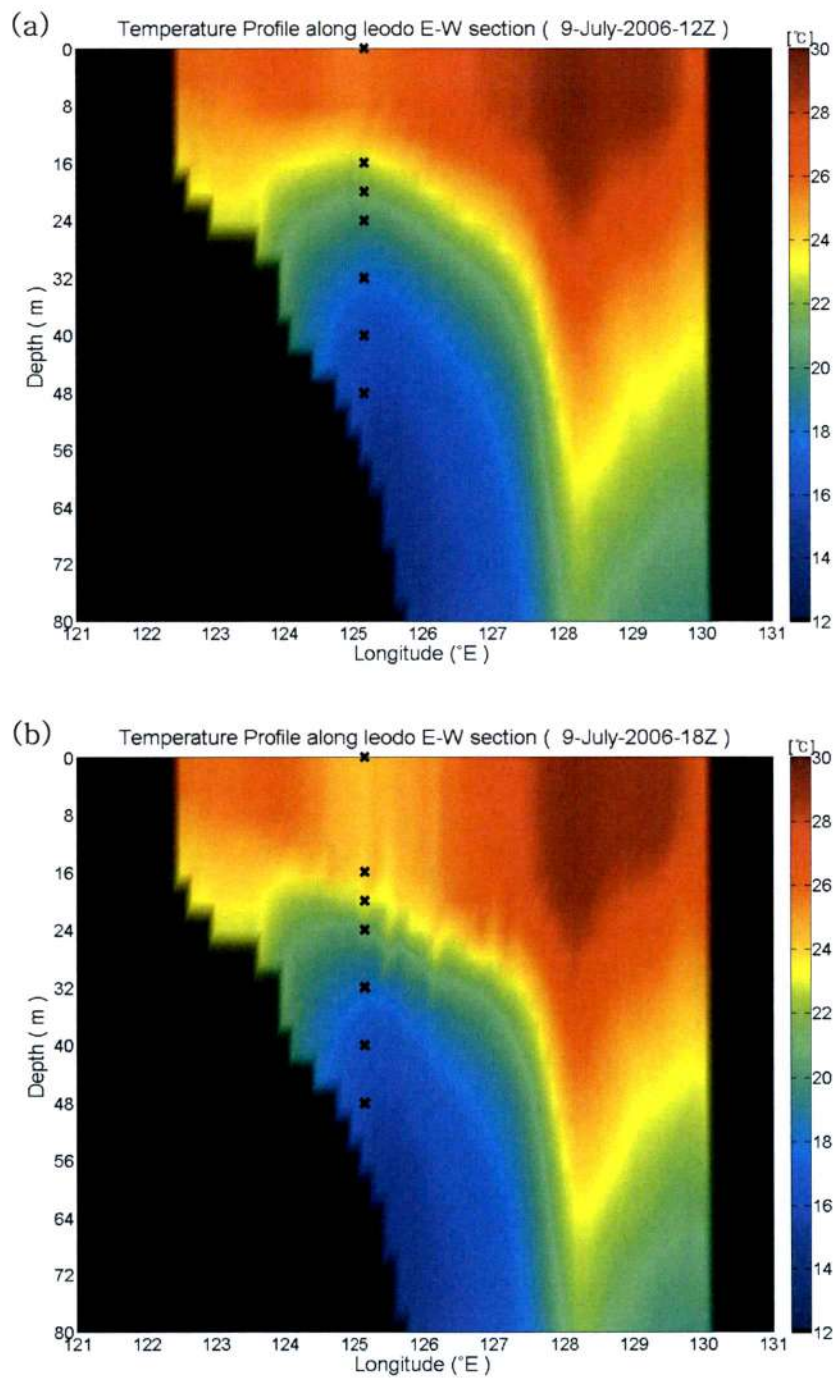


그림 3-2-15. 계속

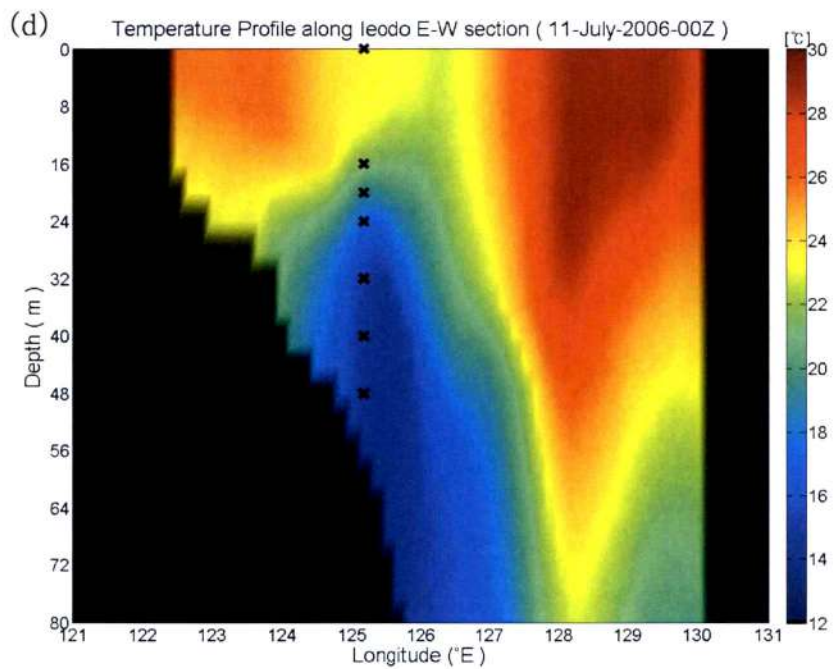
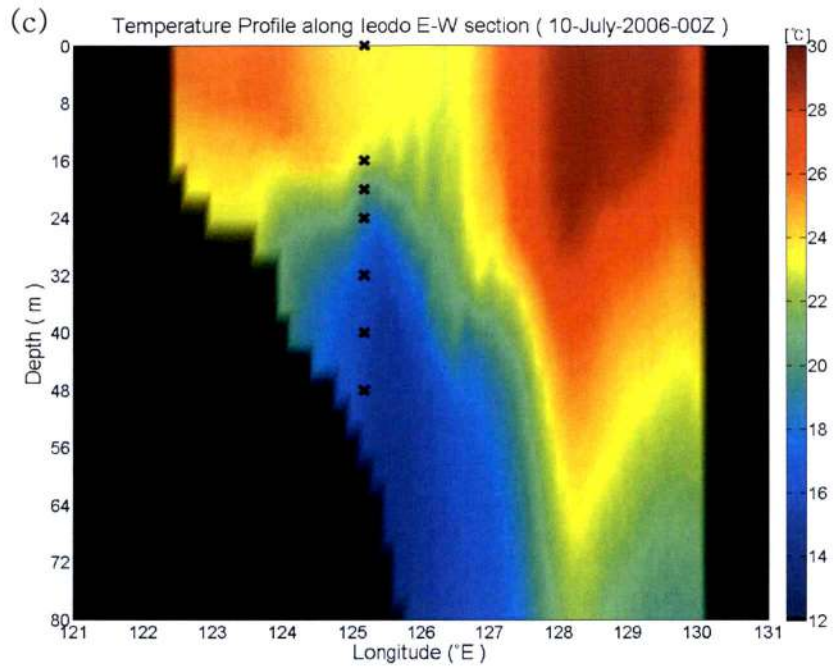


그림 3-2-15. 태풍 예위니아 통과 시기에 이어도 기지를 지나는 동-서 단면에서 수온의 수직분포 변화. (a) 9 July 2006 12Z, (b) 9 July 2006 18Z, (c) 10 July 2006 00Z, (d) 11 July 2006 00Z. × 표시는 이어도 기지의 위치를 나타냄.

마. 태풍 진로 상 단면에서 수온과 혼합층 변화

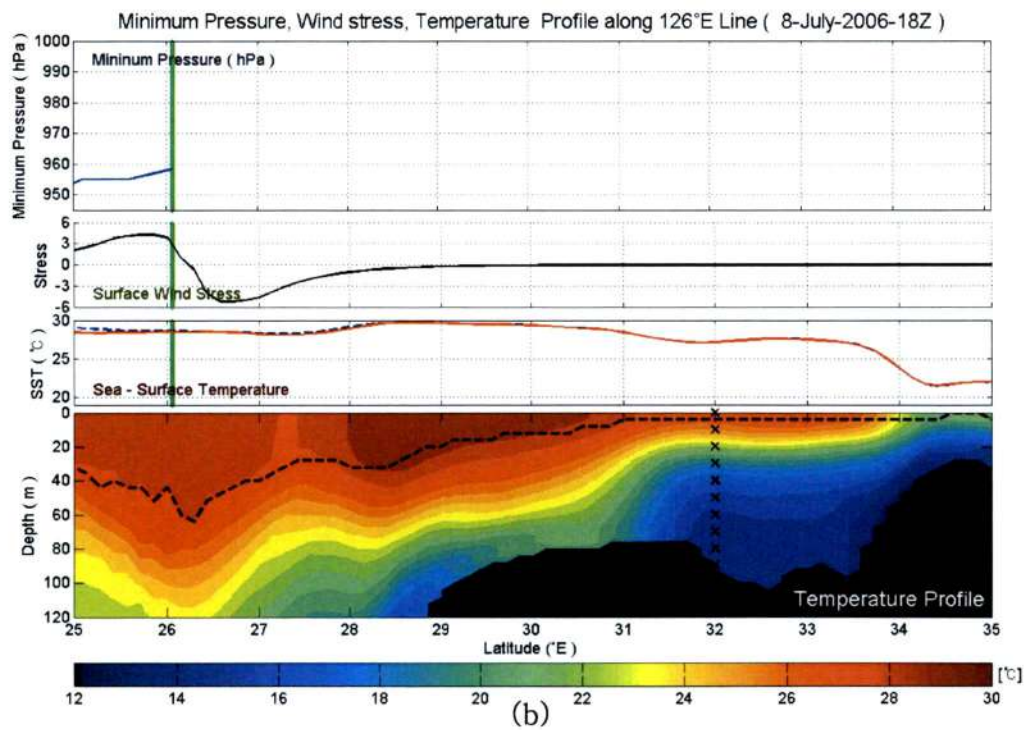
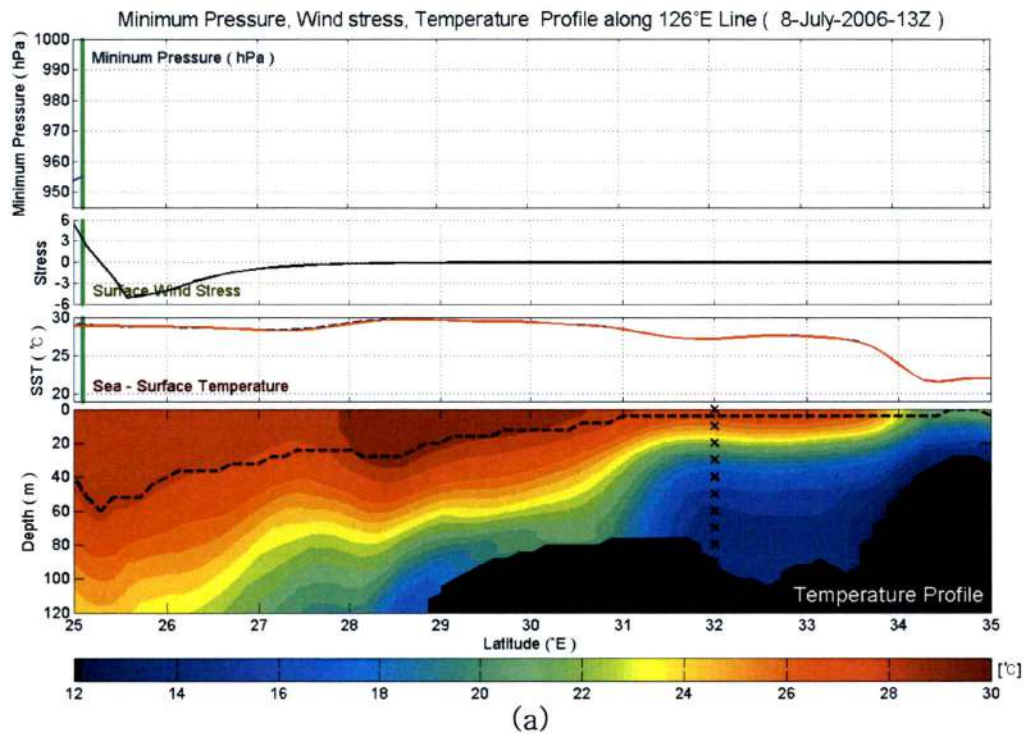


그림 3-2-16. 계속

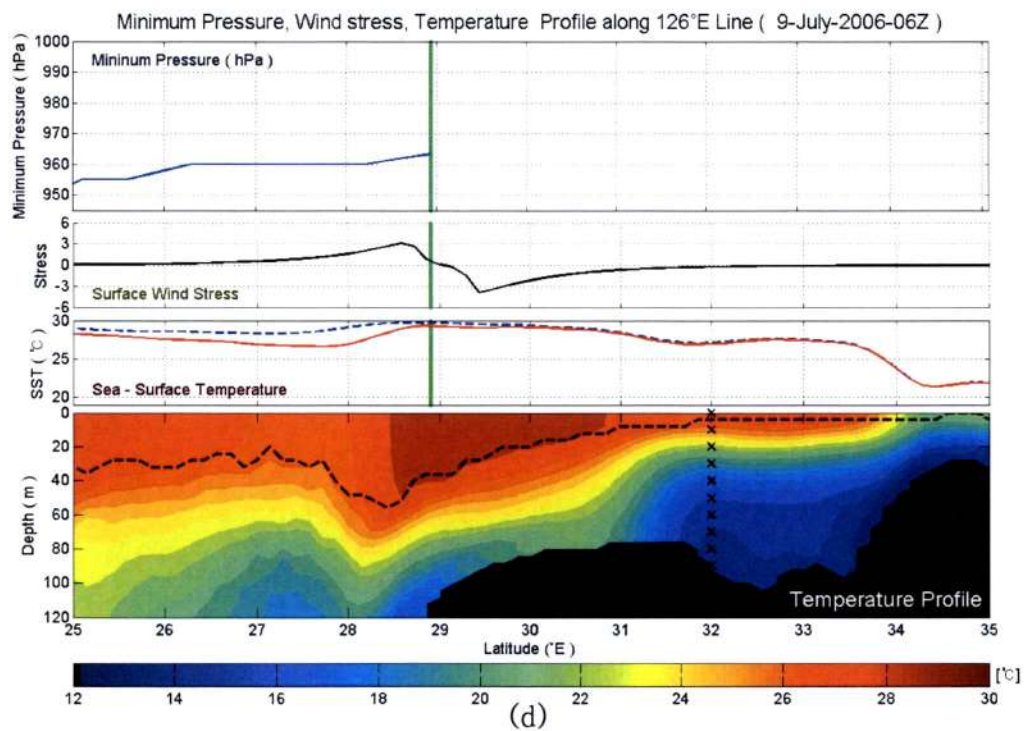
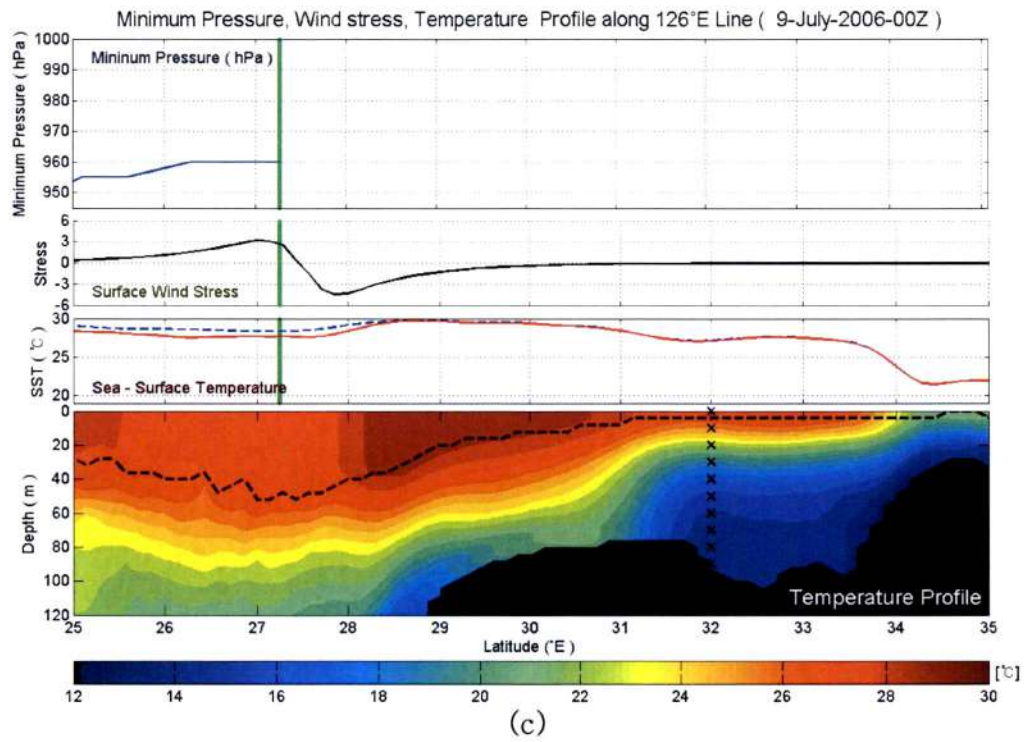


그림 3-2-16. 계속

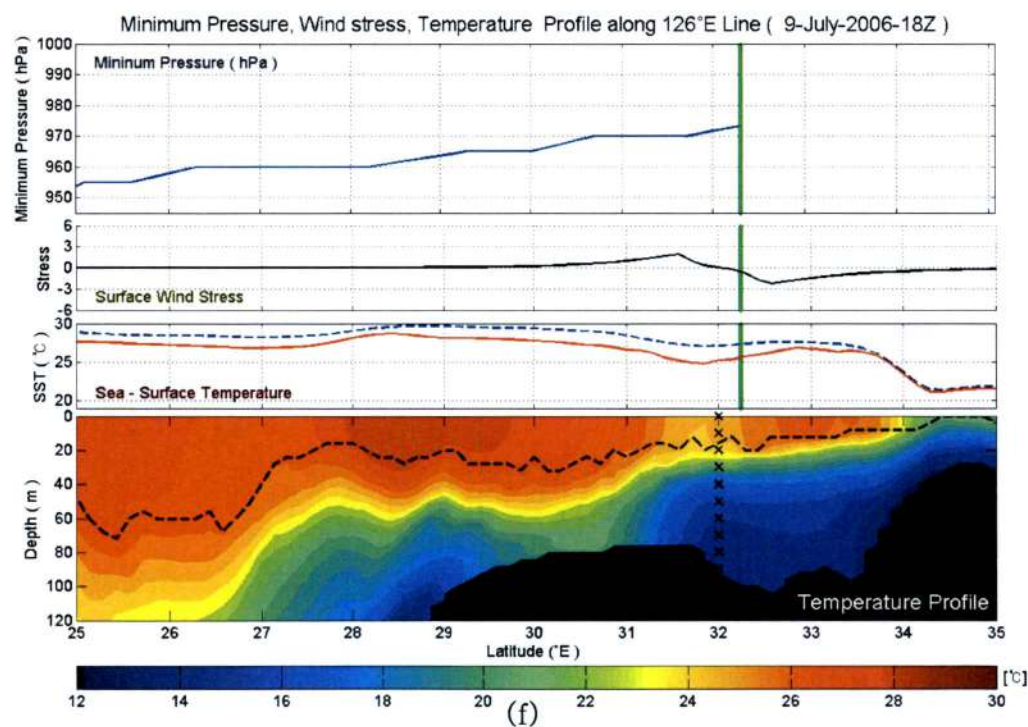
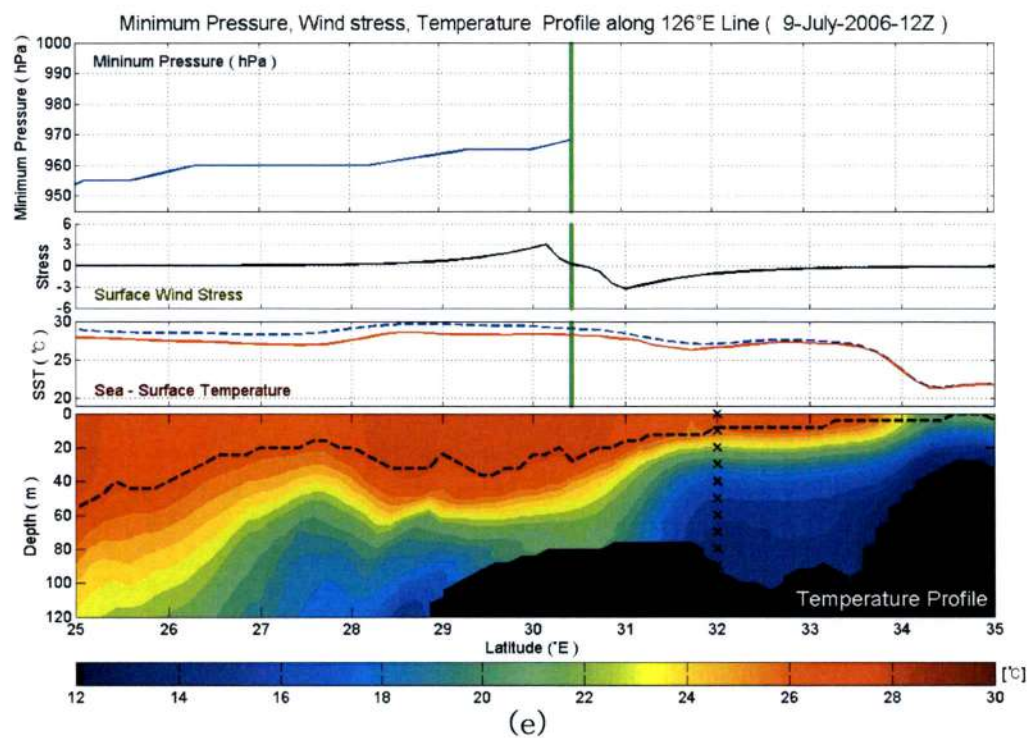


그림 3-2-16. 계속

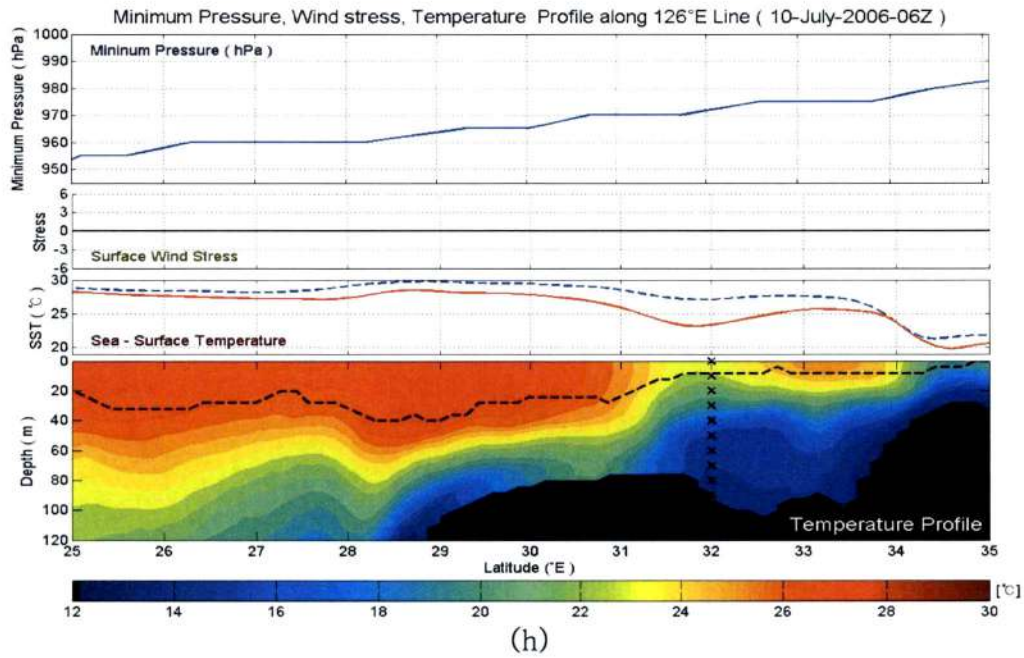
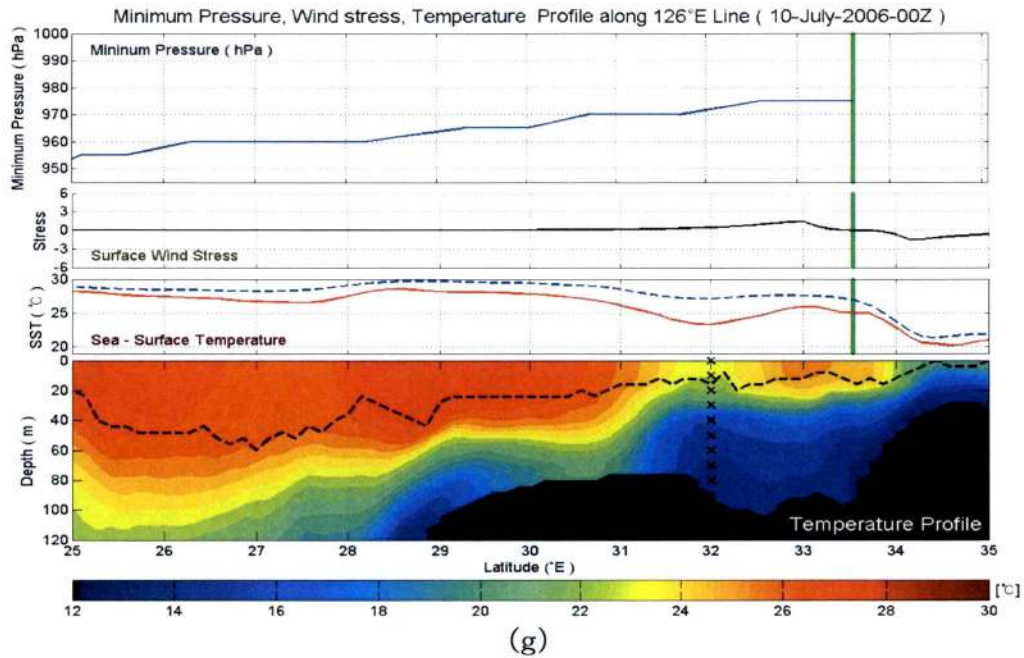


그림 3-2-16. 태풍 에위니아 통과 시기에 126°E 경도 선상의 남북 단면에서 수온의 수직분포 변화(아래), 중심기압변화(위), 그리고 바람응력과 SST 변화(중간). (a) 8 July 2006 13Z, (b) 8 July 2006 18Z, (c) 9 July 2006 00Z, (d) 09 July 2006 06Z, (e) 09 July 2006 12Z, (f) 9 July 2006 18Z, (g) 10 July 2006 00Z. (h) 10 July 2006 06Z. × 표시는 이어도 기지의 위치를 나타냄. 녹색선은 태풍 중심의 위치, 단면의 점선은 혼합층 깊이, SST 그림에서 파란 점선은 태풍 통과 전 그리고 빨간선은 태풍에 의해 바뀐 SST.

바. 태풍에 의한 수직 수온분포와 혼합층 깊이 변화

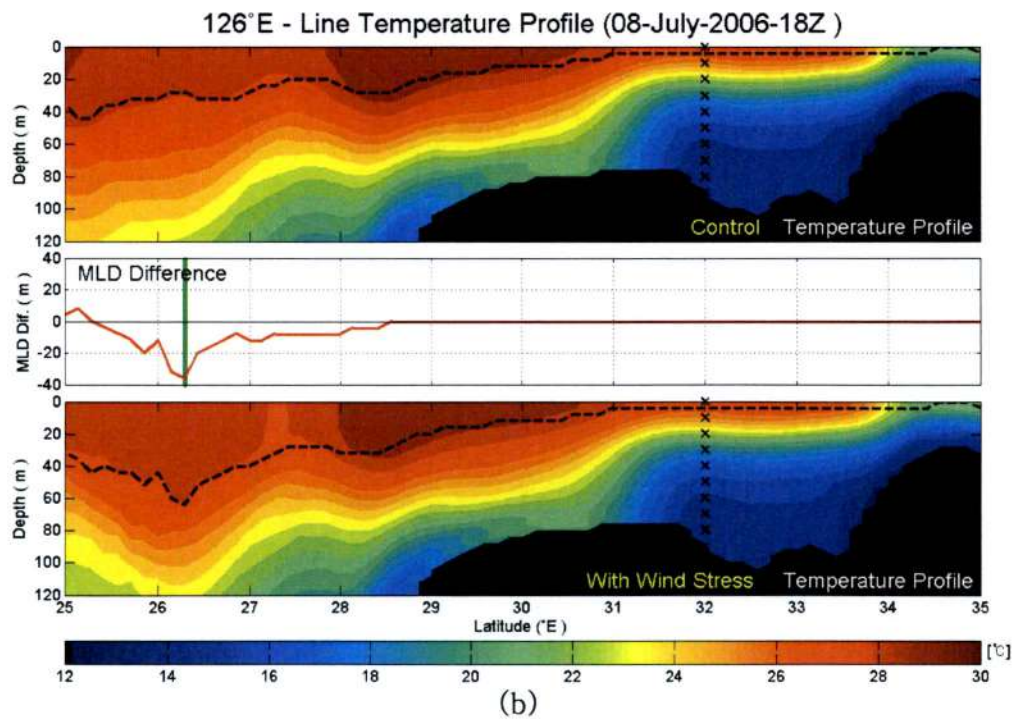
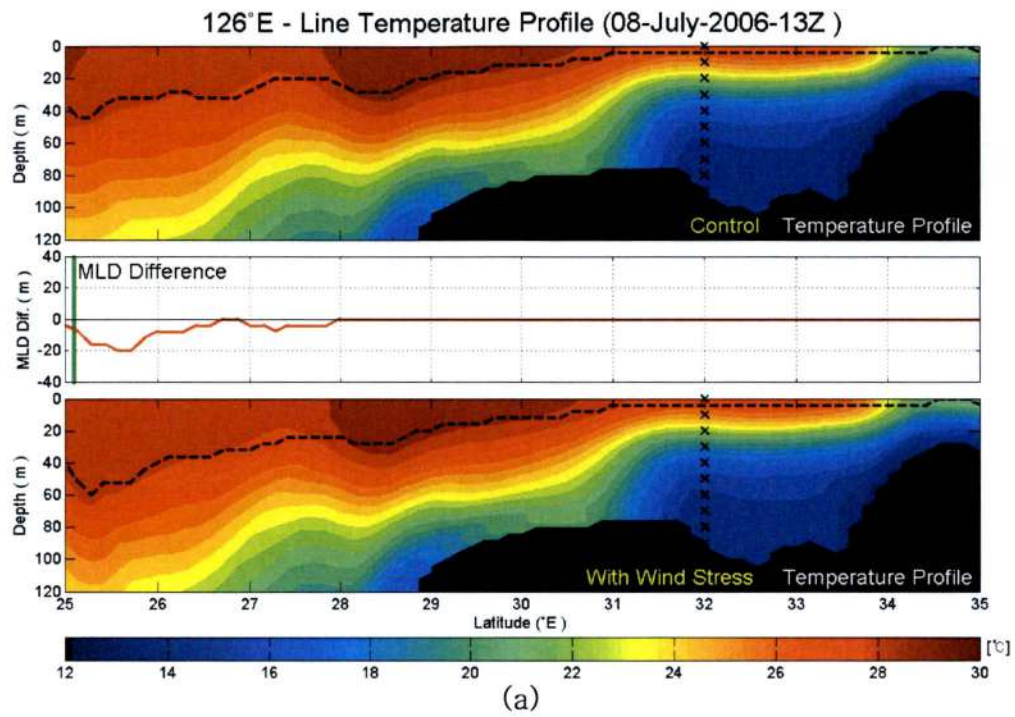


그림 3-2-17. 계속

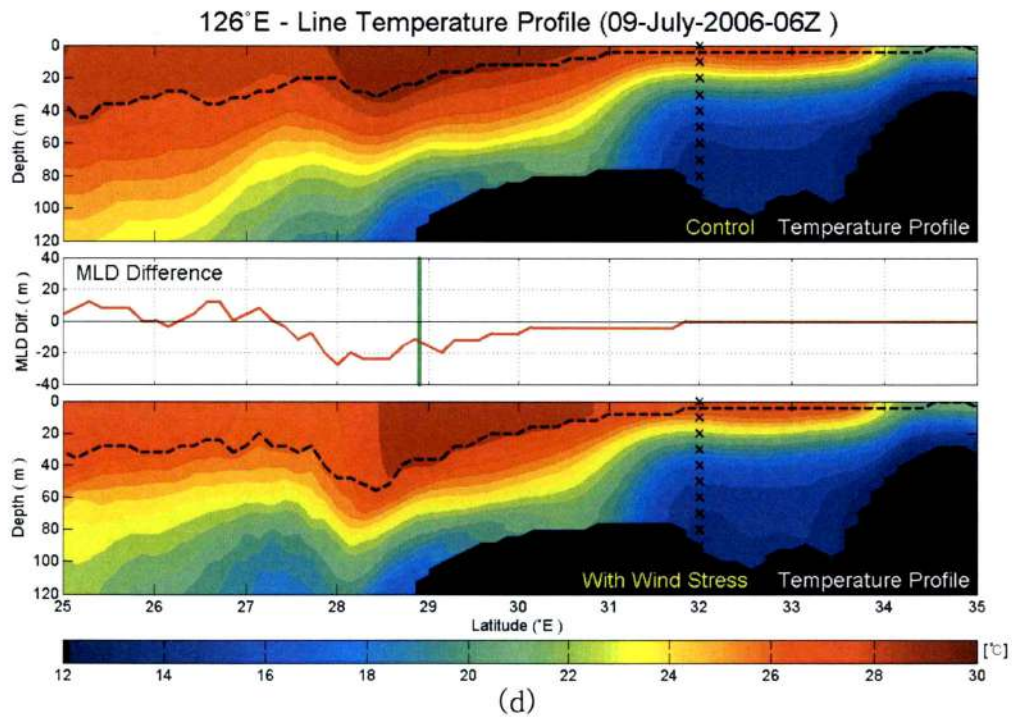
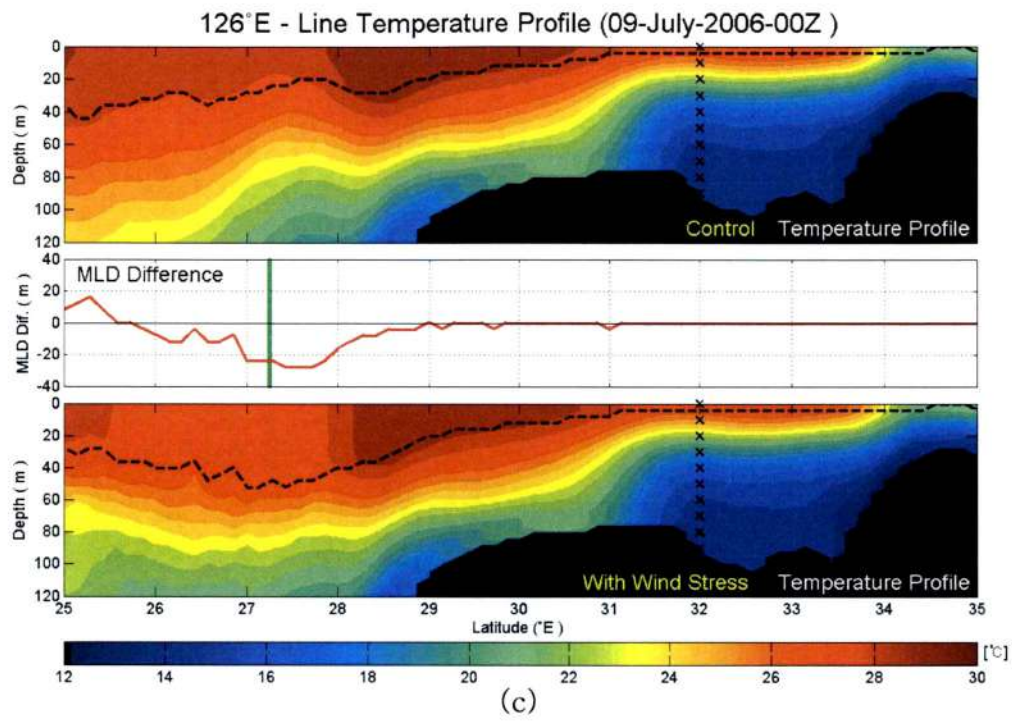


그림 3-2-17. 계속

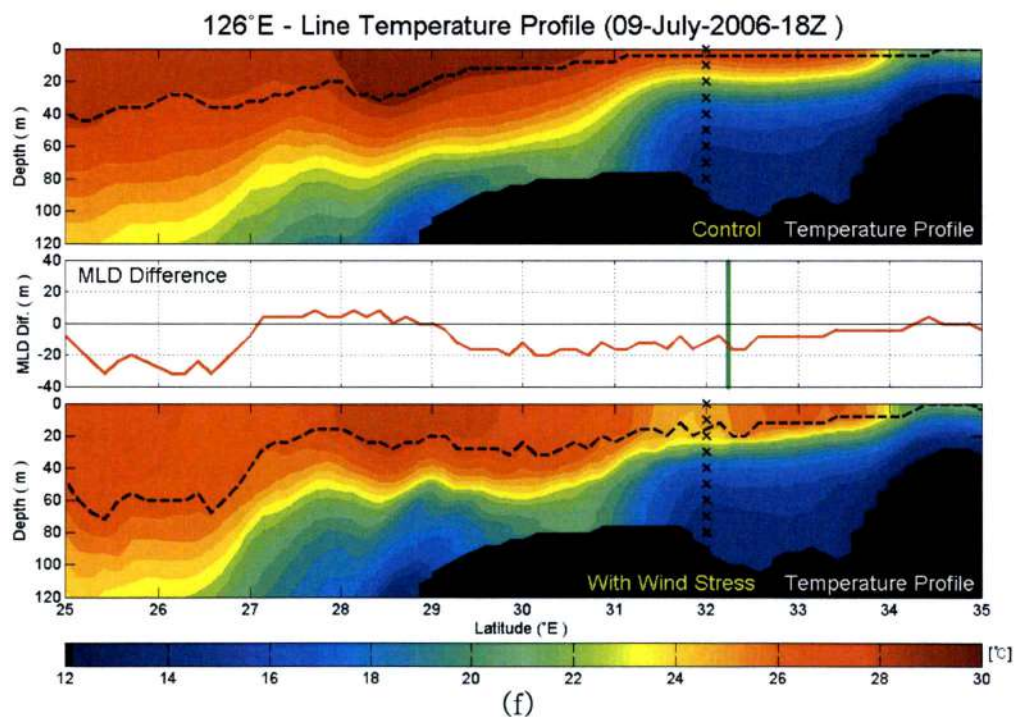
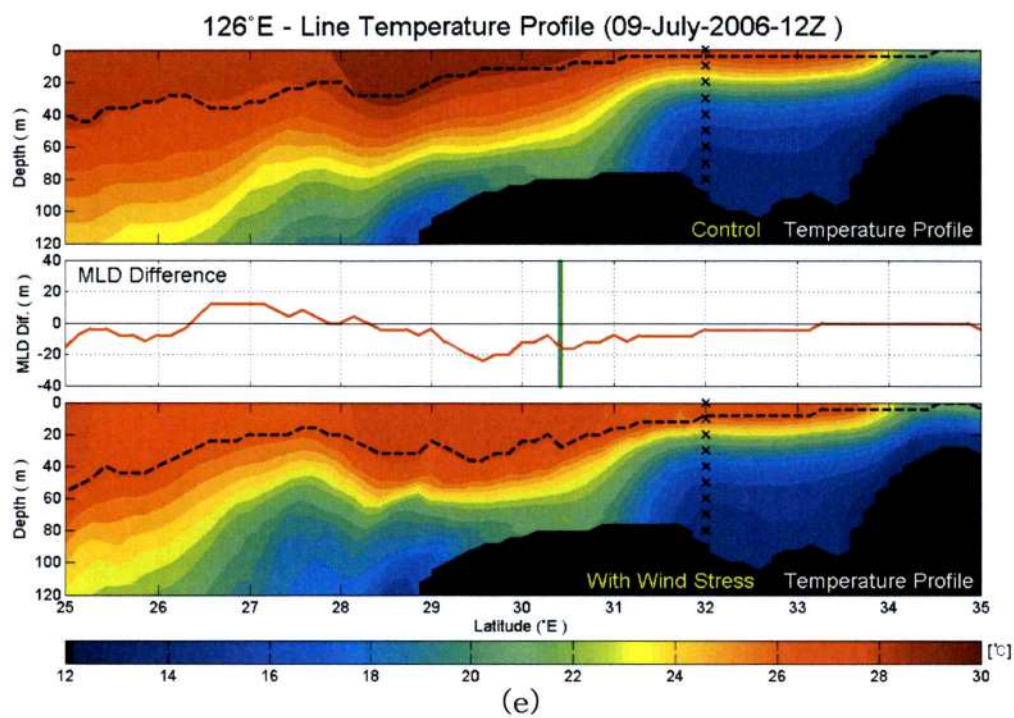


그림 3-2-17. 계속

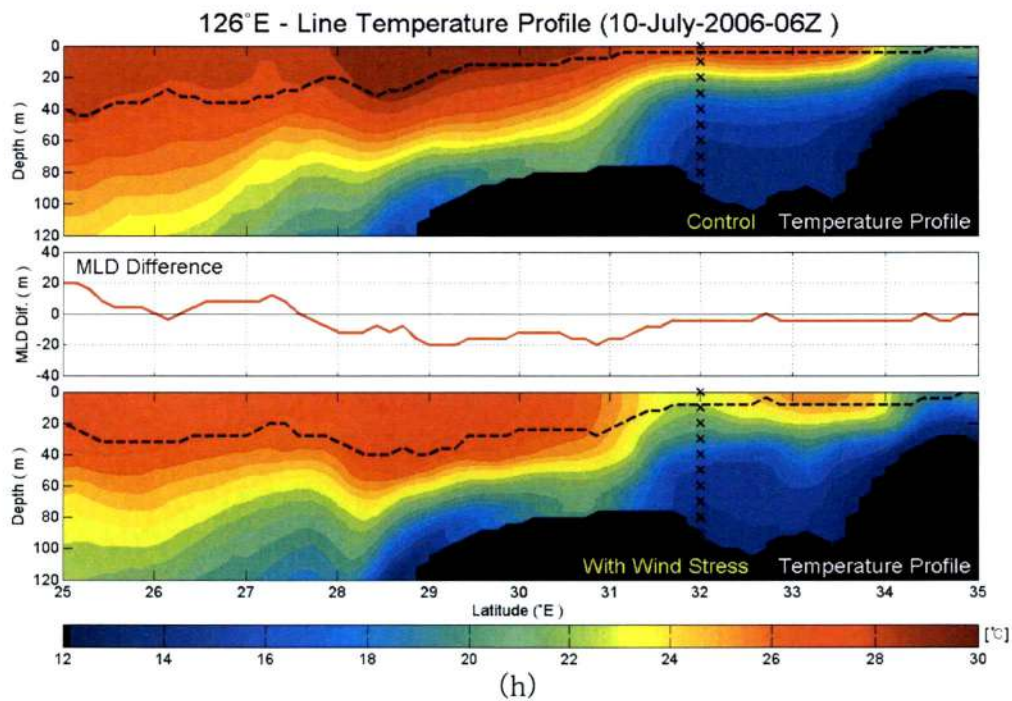
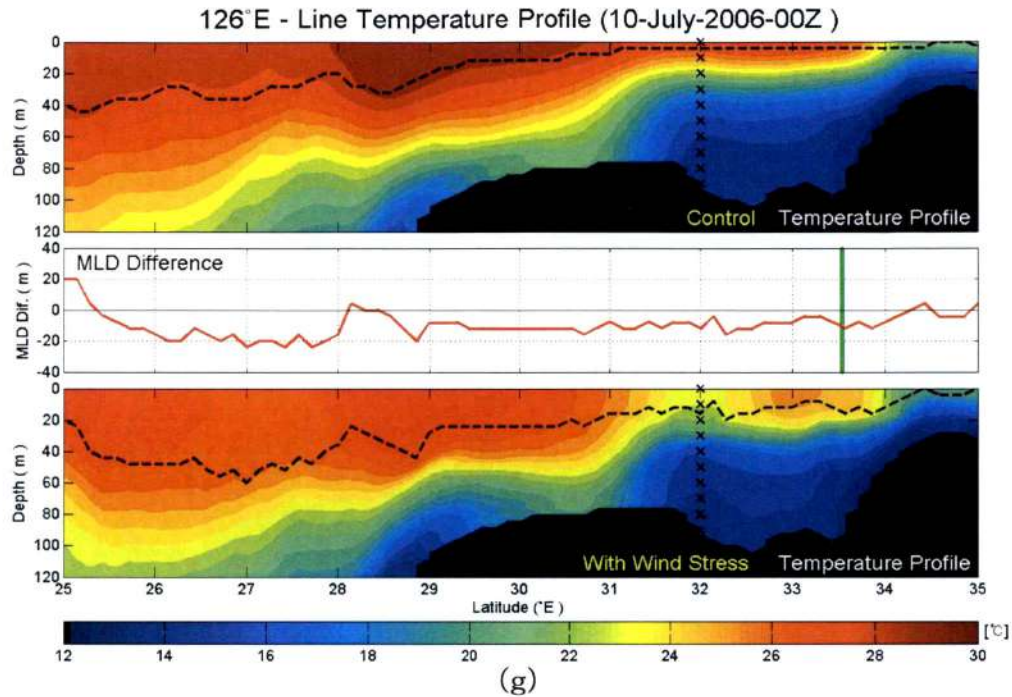


그림 3-2-17. 태풍 에위니아 통과 시기(2006년 7월 10일 00시)에 126°E 경도 선상의 남북 단면에서 수온과 혼합층 깊이 비교. (위) Control 실험, (아래) 태풍 실험, (중간) 두 실험의 MLD 차이. (a) 8 July 2006 13Z, (b) 8 July 2006 18Z, (c) 9 July 2006 00Z, (d) 09 July 2006 06Z, (e) 09 July 2006 12Z, (f) 9 July 2006 18Z, (g) 10 July 2006 00Z. (h) 10 July 2006 06Z. × 표시는 이어도 기지의 위치를 나타냄. 녹색선은 태풍 중심의 위치, 단면의 점선은 혼합층 깊이를 나타냄.

사. 이어도 기지의 층별 수온 관측자료와 모델결과의 비교

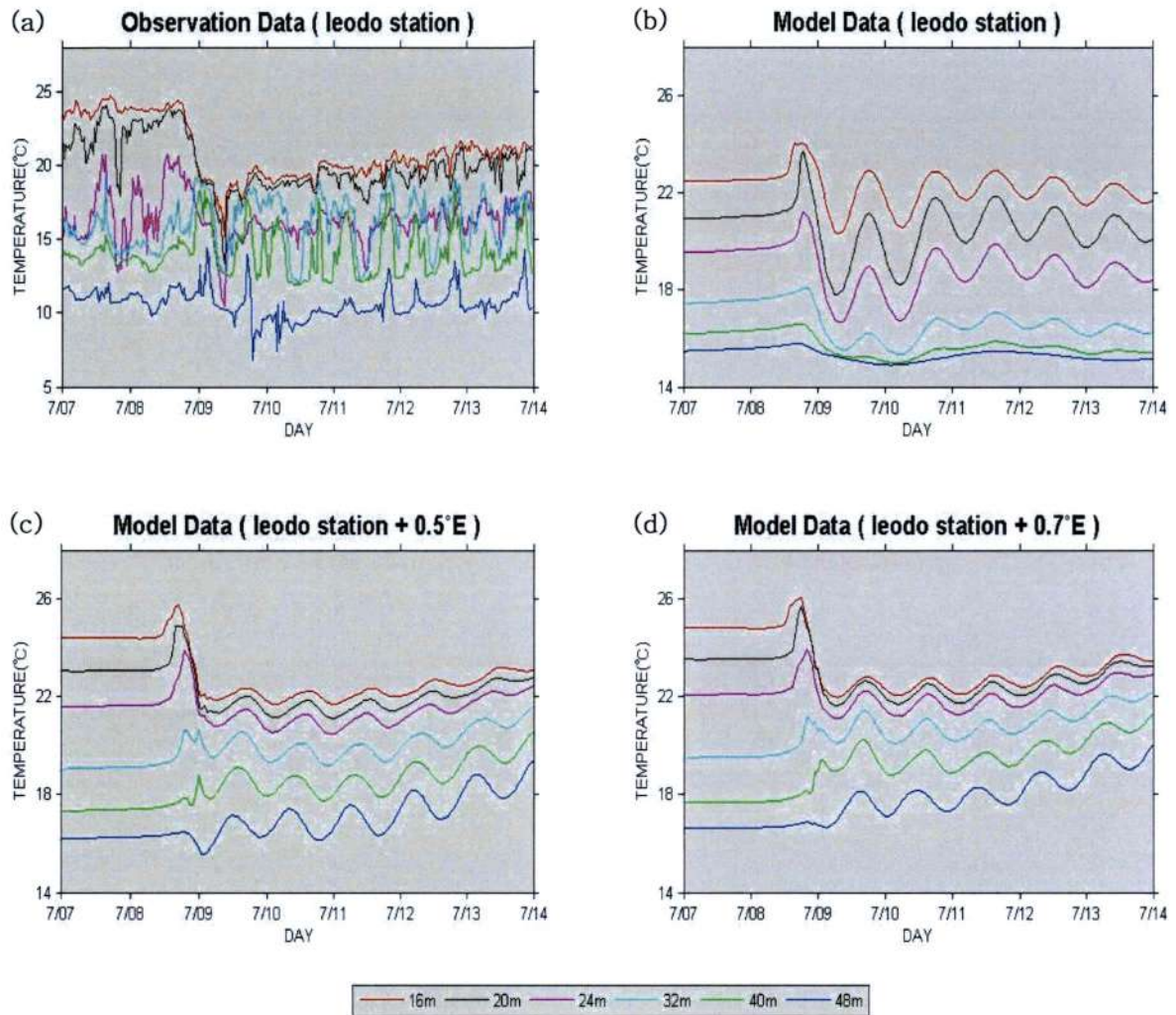


그림 3-2-18. 태풍 에워니아 통과 시기에 (a) 이어도 기지에서 관측된 층별 수온, (b) 이어도 기지에서 모델의 층별 수온, (c) 이어도 기지에서 0,5°E 우측에서의 모델결과, (d) 이어도 기지에서 0,7°E 우측에서의 모델결과.

3. 이어도 기지를 이용한 태풍-해양 상호작용 연구 및 한반도 상륙 태풍 강도 예측

(1) 이어도 기지에서 관측된 태풍 통과 시 해양의 반응 조사

1) 태풍 진로에 따른 한반도 상륙 태풍 강도의 변화

1950부터 2004년까지 한반도에 상륙한 태풍의 경로 중에 이어도 과학기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍은 54%를 차지하고 이어도 과학기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍은 55년간 총 56개이다. 따라서 이어도 기지는 한반도 상륙 태풍 연구를 위한 최적의 장소이다 (그림 3-3-1).

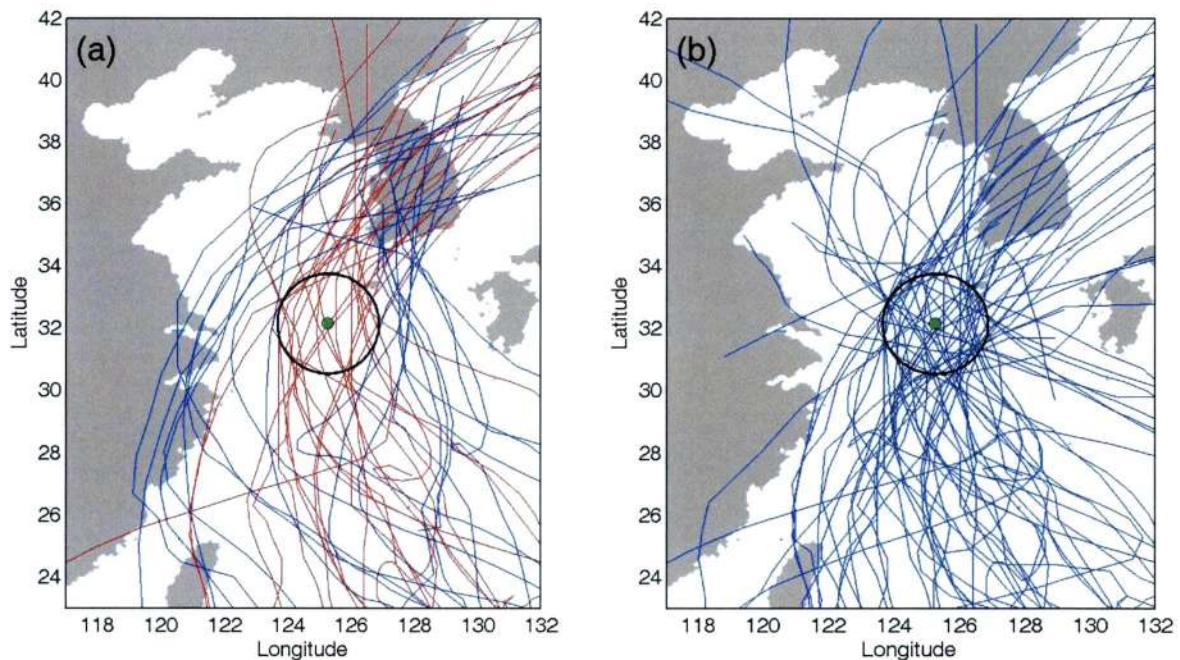


그림 3-3-1. (a) 1950부터 2004년까지 한반도에 상륙한 태풍의 경로. 이 중에 이어도 과학기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍 (빨간 선 표시)은 54%를 차지함. (b) 1950부터 2004년까지 이어도 과학기지 반경 150km 이내를 통과한 태풍. 55년간 총 56개의 태풍이 지나갔음. (인용 : 문일주, 2009)

태풍의 에너지원은 고온의 해수에서 발생하는 잠열이기 때문에 태풍의 강도는 이동경로상의 수온분포에 크게 좌우된다. 또한 수온분포는 그 해역의 수괴 특성과 해류의 분포에 의해 주로 결정된다. 한반도에 상륙하는 태풍은 우리나라 남해, 황해, 그리고 동중국해를 통과하기 때문에 이 해역의 수온분포를 좌우하는 가장 큰 요소는 쿠로시오와 그 지류이다.

쿠로시오는 27°C 이상의 고온의 난류로 우리나라에 상륙하는 태풍의 길목에 위치하고 있다. 다행스러운 것은 태풍의 진로와 쿠로시오는 진행방향이 달라 비교적 짧은 시간에 둘은 서로 마주치게 된다. 그러나 제주도 우측을 통과해 우리나라 남해안으로 상륙한 태풍들은 (Type A) 쿠로시오 지류가 남해안을 지나는 곳에서 다시 만나게 된다. 따라서 이 경로를 지나간 태풍 사라 (1959), 루사 (2002), 매미 (2003) 등은 난류에 의해 그 강도가 유지되어 우리나라 역사상 가장 큰 피해를 입혔다 (그림 3-3-2a).

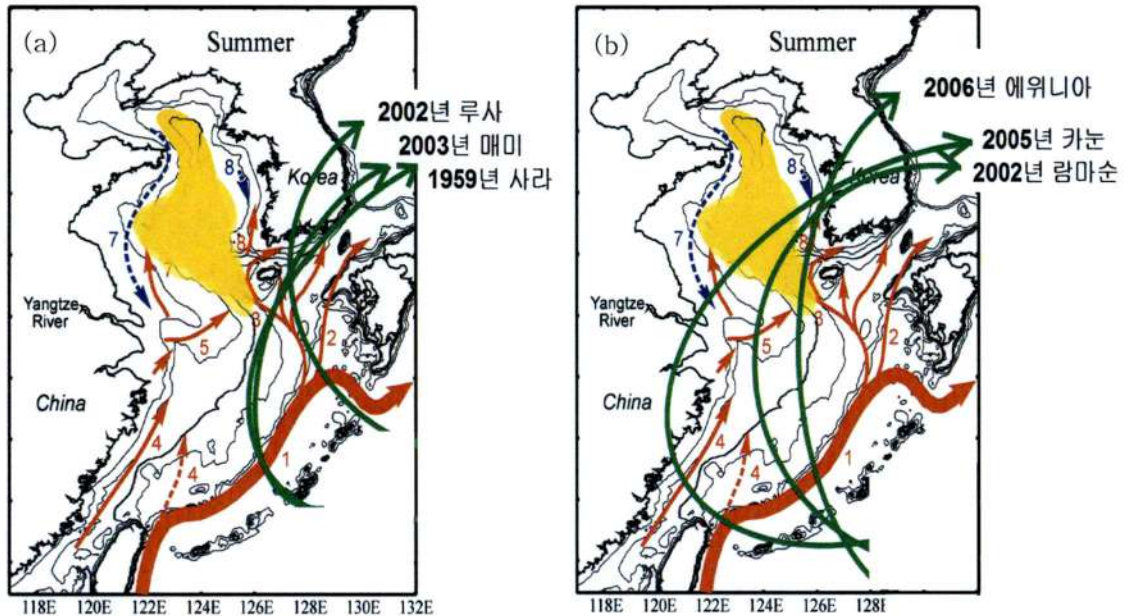


그림 3-3-2. 한반도 상륙 태풍의 강도를 결정하는 두 가지 이동 경로의 구분. 좌측 (Type B)은 난류는 피해가고 황해저층냉수를 통과하는 태풍이며 우측 (Type A)은 난류를 통과하여 강한 태풍으로 한반도에 상륙한 태풍. (인용 : 문일주, 2009)

한편, 우리나라 황해는 여름철에 수심 50m만 내려가도 수온의 차이가 18°C 이상 차이가 나는 곳이 많다. 이것은 태양열에 의해 가열된 고온의 표층수와 겨울철에 냉각되어 저층에 자리잡고 있는 저온의 냉수대가 층을 이루고 분포하기 때문이다. 따라서 이러한 저층냉수 위를 통과하는 태풍 (Type B)은 강한 바람에 의한 혼합작용과 저기압에 의한 용승작용으로 쉽게 표층수와 저층냉수가 혼합되어 표층수온이 급격하게 떨어지게 된다 (Moon, 2005, Wada et al., 2005).

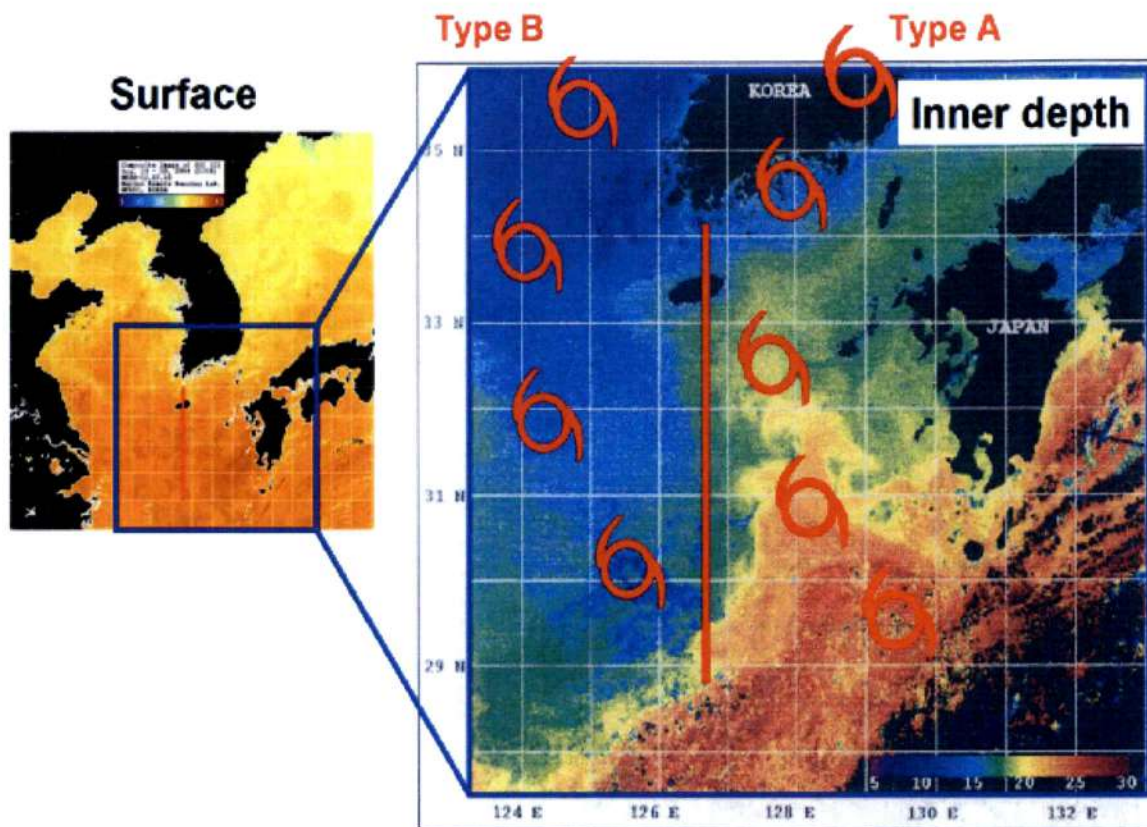


그림 3-3-3. 표층 (좌측)과 그 아래 수심에서 수온의 분포. (인용 : 문일주, 2009)

실제로 제주도 좌측을 통과해 황해를 거쳐 우리나라 서해안으로 상륙한 태풍들은 대부분 황해저층냉수의 영향을 받아 그 강도가 급격히 떨어졌었다. 람마순 (2002), 카눈 (2005), 예위니아 (2006)는 이러한 경로로 이동해 강도가 약해졌던 대표적인 태풍들이다 (그림 3-3-2b). 여름철 동중국해의 수온분포를 보면 (그림 3-3-3), 표층과 그 아래층은 수온 구조가 완전히 다르다는 것을 알 수 있다. 즉 표층에서는 표면가열 때문에 제주도를 경계로 양쪽에서 큰 수온차이는 보이지 않지만 그 아래 수심에서는 제주도 왼쪽 편은 황해저층냉수의 영향으로 낮은 수온이, 오른쪽 편은 쿠로시오 해류의 영향으로 높은 수온이 분포한다. 따라서 태풍이 어느 경로를 따라 북상하느냐에 따라 한반도에 상륙하는 태풍의 강도는 크게 영향을 받는다.

실제로 1950부터 2004년까지 한반도에 상륙한 태풍을 Type A와 Type B로 구분하여 분석하였다. Type A는 제주도 오른쪽을 통과해 우리나라 남해안으로 상륙한 태풍, Type B는 제주도 왼쪽을 통과해 우리나라로 상륙한 태풍으로 구별하였다. 그리고 본 사례에서는 Type B를 전형적으로 제주도 왼쪽을 통과한 B1과 중국에 상륙했다가 우리나라 서해안으로 다시 상륙한 B2로 분류하였다 (Table. 1). 한반도에 상륙한 개수는 Type B (32회)가 Type A (16회)에 비해 두 배로 많았지만 최대풍속의 평균은 Type A (28.4 m/s)가 Type B (23.6 m/s)보다 5 m/s 더 강한 것으로 나타났다 (그림 3-3-4).

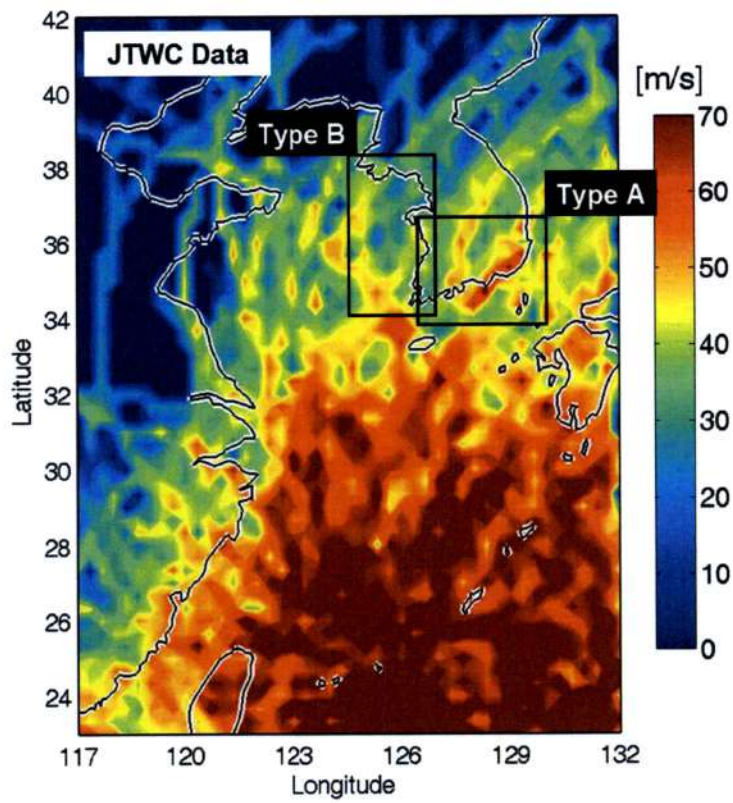
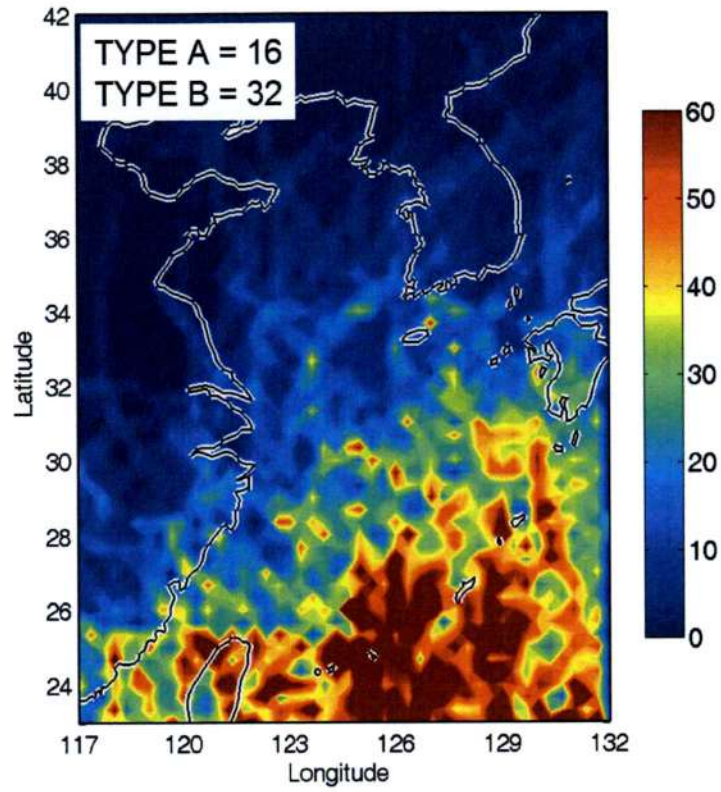


그림 3-3-4. 1950년부터 2004년까지 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 의 격자에 통과한 태풍의 개수 (위)와 평균 풍속 (아래). (인용:문일주,2009)

표 1. 1950년에서 2008년까지 JTWC 최적 경로 자료를 사용한 한반도에 상륙한 태풍 경로에 대한 분류. (인용 : 문일주, 2009)

Type	Total Landfall Number	Landfall Typhoon Mean Wind Speed (m/s)
A	16	28.4
B (B ₁ + B ₂)	32	23.6
B ₁	22	24.4
B ₂	10	20.7

이상에서 살펴본 바와 같이 이어도 과학기지는 쿠로시오 난류와 황해저층냉수가 만나는 경계에 위치하고 있어 해양의 수온변동을 모니터링하기에 가장 좋은 장소이다. 특히, 이곳은 계절별과 쿠로시오 난류와 황해저층냉수의 확장 및 축소 등 시공간적인 변동이 심하여 이어도 기지에서 지속적인 수온변동 모니터링은 한반도로 북상하는 태풍의 강도를 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다.

2) 이어도 기지에서 관측된 태풍 통과 시 해양의 반응 조사

태풍 에위니아는 6월 29일에 열대저기압 (tropical depression)으로 발달하였다. 그리고 48시간 뒤 (7월 1일) 열대폭풍 (tropical storm)으로 발달하였다 (그림 3-3-5a). 에위니아는 5일 동안 천천히 북서쪽으로 이동하면서 (3m/s 이하) 7월 5일에 최소 기압에 도달하였다. 그 위치는 18°N, 131°E이고 최대 풍속은 약 59m/s이다. 그 후 위도 20°N를 넘어서 세력이 약해졌고 한반도를 향하여 북진했다.

TMI는 NASA의 위성으로 마이크로웨이브 라디오미터 (Microwave radiometer)로 측정되어 구름층을 투과하여 해수면의 온도를 산출 할 수 있다. 그러므로 구름으로 가려진 해양반응을 확인 할 수 있다. 그림 3-3-5 (b, c)는 TMI 해수면 온도 자료이다. 에위니아가 통과하기 전 (b, 01 July)보다 통과 후 (c, 13 July)를 비교해보았다. 태풍경로를 따라 20 - 23°N에서 약 4 - 5°C 표층수온하강이 관찰되었다. 또한 이어도 (X 마크) 주변해역에도 약 4°C 냉각현상이 나타났다.

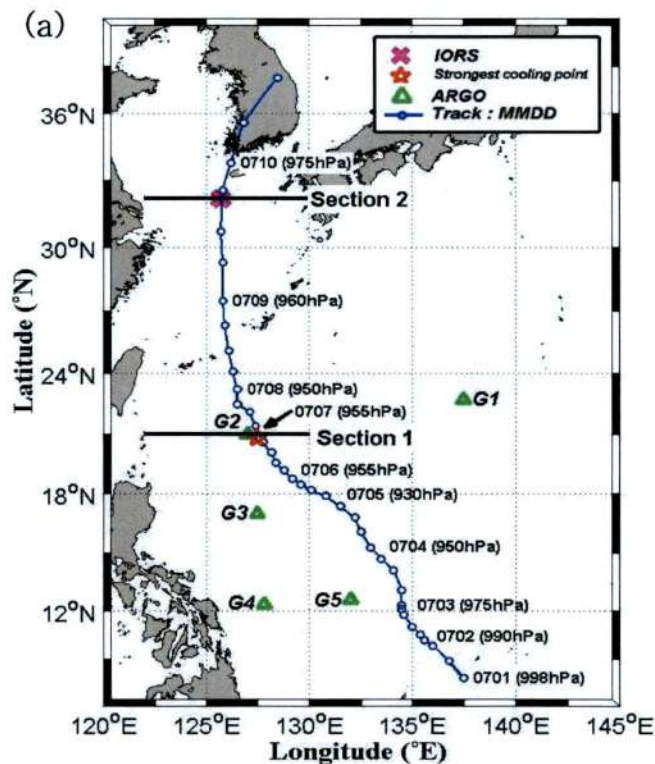


그림 3-3-5. (a) 태풍 에위니아 경로와 ARGO위치를 나타냄. 파란 선은 태풍 경로로 6시간 간격의 태풍 중심과 최소 중심기압을 표현함. X 마크는 이어도 종합해양기지이고 삼각형은 ARGO 위치를 나타냄. (b) TMI 위성자료로 태풍 에위니아가 지나가기 전 (7월 1일)의 수온 분포를 표현함. (c) 태풍이 한반도를 통과한 후 (7월 13일)의 위성자료.

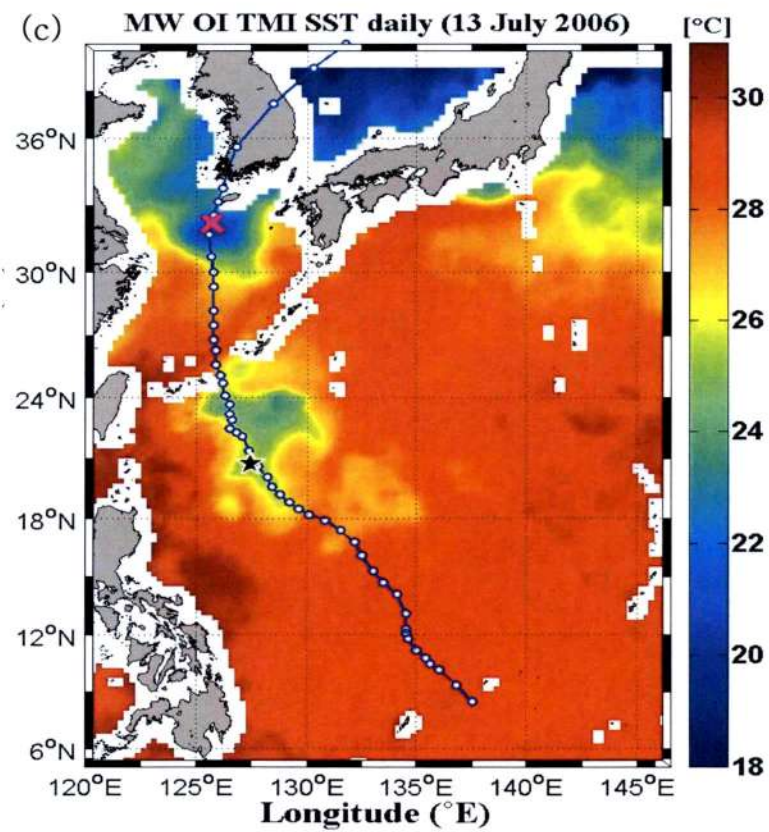
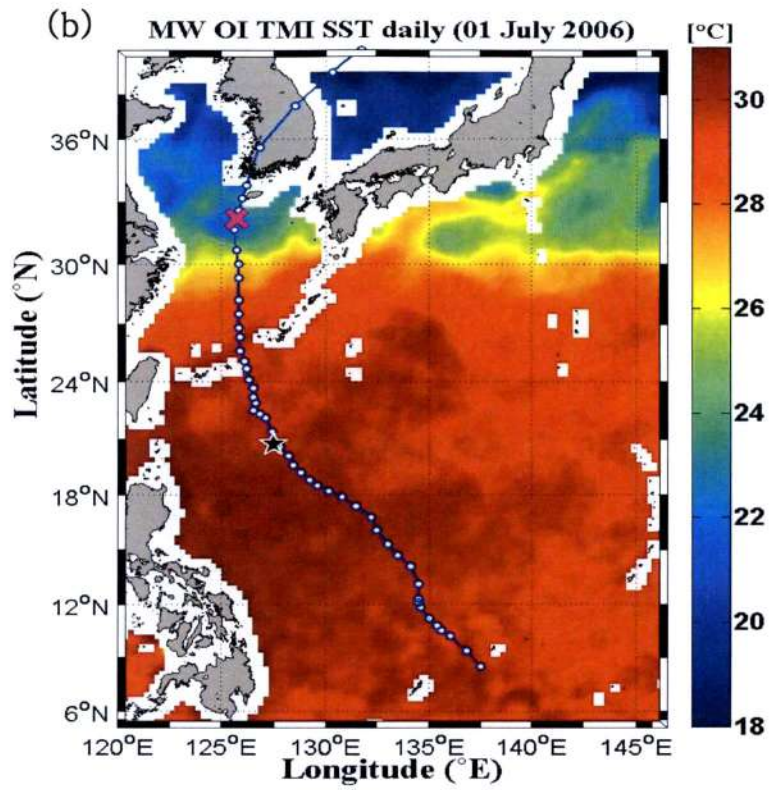


그림 3-3-5. 계속

해양에서 현장자료를 수집하는 것은 많은 비용과 어려움이 있다. 특히 태풍같은 악기상 시 현장자료를 직접 수집하는 것은 매우 힘들다. ARGO (Array for Real-time Geostrophic Oceanography) float는 이러한 어려움을 보완할 수 있으며 위성자료와 달리 수직 수온 분포를 관찰 할 수 있다.

그림 3-3-6은 태풍 예위니아 시기에 ARGO에서 관측된 수온의 수직 구조를 나타낸다. 여기서 각각의 관측 시간별 혼합층 깊이는 그림의 하단에 표시하였다. 태풍의 바람 응력에 의해 수온의 혼합효과가 발생하여 전·후로 혼합층이 더욱 깊어진 것을 확인 할 수 있다 (약 30 - 35m). 이러한 혼합효과는 표층수온의 냉각현상 (약 1.5 - 4℃)을 유발한다.

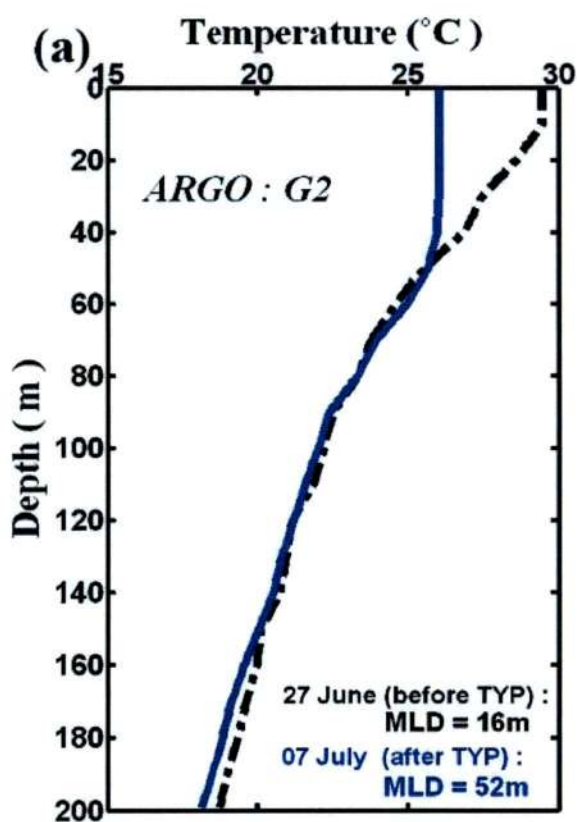


그림 3-3-6. ARGO float에서 연직 수온 프로파일. 파선은 태풍 예위니아가 통과하기 전, 실선은 태풍이 통과한 후를 표현함. (a) 는 그림 12에서 G2이고, (b)는 G3임.

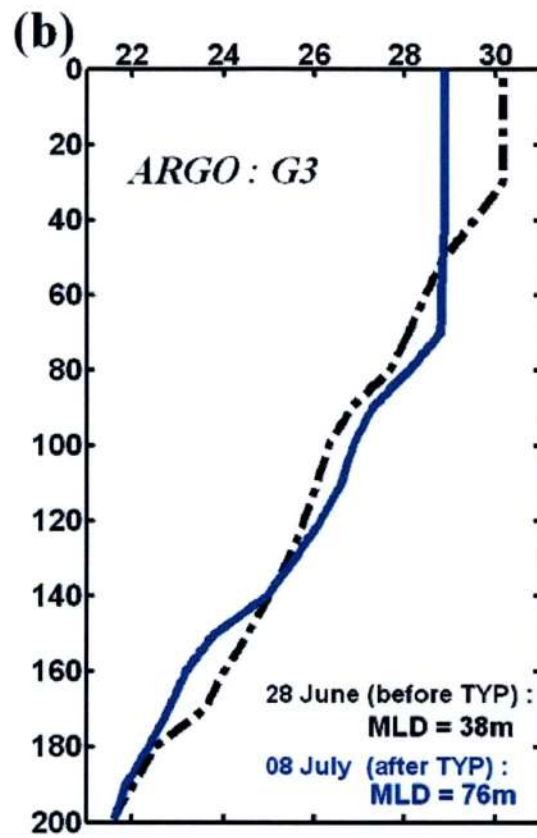


그림 3-3-6. 계속

(2) 수치모델을 이용한 태풍 통과 시 해양의 수온 변화 조사

1) 서론

일찍이 대서양에서 허리케인의 영향으로 발생하는 수직적이고 수평적인 상층해양상태를 많은 관측을 통해 분석해왔다 (Price, 1981; Shay et al, 1992; Cione, 2003). 그 중 가장 흥미로운 관측결과로 태풍의 진로를 따라 나타나는 표층 냉각이 있으며 일반적으로 표층 냉각의 범위는 대체로 1 - 6℃ 범위로 보고되었다 (Jordan, 1964; Leipper, 1967). Price (1981)는 1975 - 1978년 사이에 발생한 열대 사이클론 통과 전·후의 해양반응을 언급하며 가장 냉각이 많은 부분은 허리케인의 오른쪽 반경에 위치함을 설명하였다. Black (1983)은 10년 동안의 관측자료를 사용하여 허리케인 통과 시 수온관측자료를 사용하여 해양 열적 반응을 종합하였다. 대체적으로 태풍 경로 오른쪽의 수온은 허리케인 통과 후 약 0.6 - 1.4일 사이에 1 - 2℃ 감소함을 밝혔다. 또한 비슷한 유형으로 허리케인 Georges (1998)가 통과한 후, 해수면 냉각이 발생하여 표층 수온이 4 - 5℃ 감소하였다 (Cione, 2003). 이와 같이 각 지점에 대기 외력으로 인해 표층 냉각이 최대로 발생하는 시점은 태풍이 통과하고 일정 시간 후에 나타난다. 이러한 냉각현상의 발견뿐만 아니라 이것의 발생원리도 관측과 수치모델에 의해 지금까지 지속적으로 연구되고 있다 (Elsberry et al, 1976; Black, 1983).

태풍에 의한 표층 수온의 하강은 다음과 같은 과정을 거치는 것으로 알려져 있다. 첫째, 태풍에 의한 바람응력은 해수의 연직시어를 발생시켜 교란에 의해 수직적인 혼합작용을 일으키게 된다 (Pollard et al, 1973; Price, 1981; Shade, 1998). 둘째, 반시계방향의 바람응력은 표층 해수의 발산을 일으키고 이에 따라 수온약층수의 용승을 유도한다 (Price, 1994). 이러한 표층 수온의 하강은 일반적으로 태풍의 강도가 강할수록 이동속도가 느릴수록, 해수면 고도가 낮은 지역, 혼합층이 얇은 지역, 해양 열용량이 낮은 지역에서 더욱 강하게 나타난다 (Lin et al, 2008).

2) 연구방법

해양관측자료의 시공간적인 제한성을 극복하기 위해서 본 연구에서 수치모델을 사용하여 태풍 에위니아 시기의 해양의 반응을 조사하였다. 사용된 수치모델은 POM (Princeton Ocean Model)로 1977년 Meller와 Alan Blumberg에 의해 개발되었다. 본 연구에서는 모델 격자를 북서태평양을 포함하는 수평적으로 $5 - 50^{\circ}\text{N}$, $99 - 190^{\circ}\text{E}$ 의 영역과 수직적으로 49개의 연직층으로 나누어 수치실험을 수행하였다. 모델 해상도는 경도 $1/7$, 위도 $1/6$ 간격이며 Sigma coordinate를 사용한다.

수치실험은 태풍 에위니아가 동중국해를 통과한 2006년 6월 28일부터 7월 15일까지 18일간 수행하였다. 수치모델의 초기조건은 미해군 자료동화자료를 사용하였다. 수직혼합은 Meller Yamada (1996)의 혼합 방법을 사용하였다. 수치실험에 사용된 모델의 바람장은 GFDL태풍모형에서 사용되는 Holland (1980)경험식에 의해 계산되었다 (Moon et al, 2003).

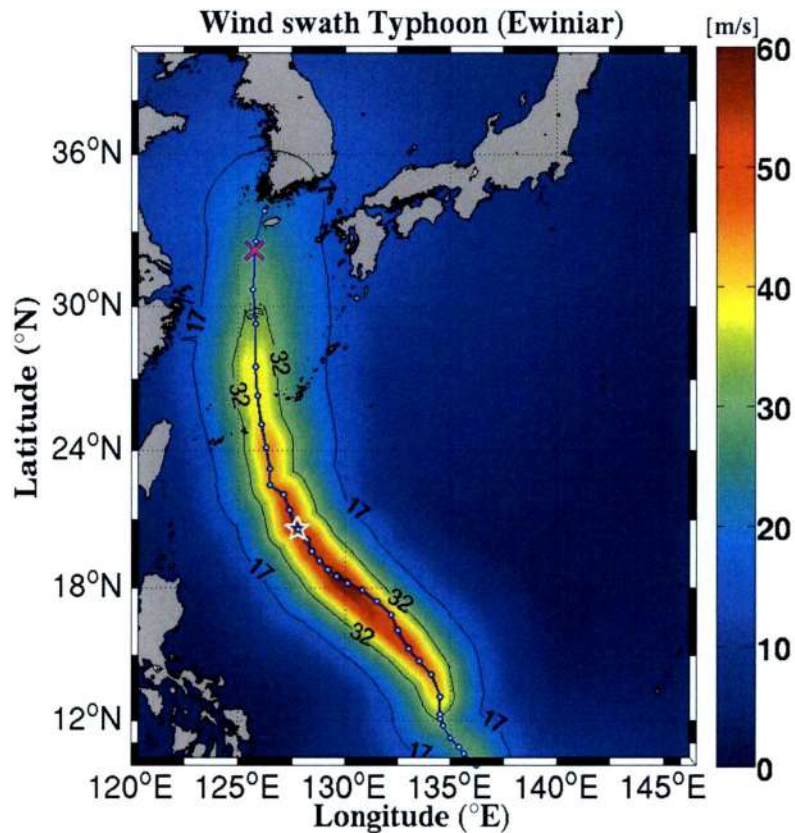


그림 3-3-7. 태풍 에위니아에 대한 수치모델의 바람장 (m/s). 등풍속선은 각각 17m/s 와 32m/s 풍속일 때를 나타냄.

본 사례에 사용된 수치모델이 관측자료와 비교하여 재현이 잘 되었는지 확인하기 위하여 ARGO float 수온자료와 모델결과를 먼저 비교하였다. 태풍 통과 전 동중국해 해역에서 ARGO float 수온자료와 수치모델의 초기 수온자료와 비교하였다 (그림 3-3-7). 표층 수온은 관측자료와 수치모델 재현된 값과 거의 일치한다. 동중국해에 태풍 통과 후 G5지역의 같은 날 ARGO float 연직수온과 모델결과를 비교한 결과에서도 두 값이 잘 일치함을 알 수 있다 (그림 3-3-8e).

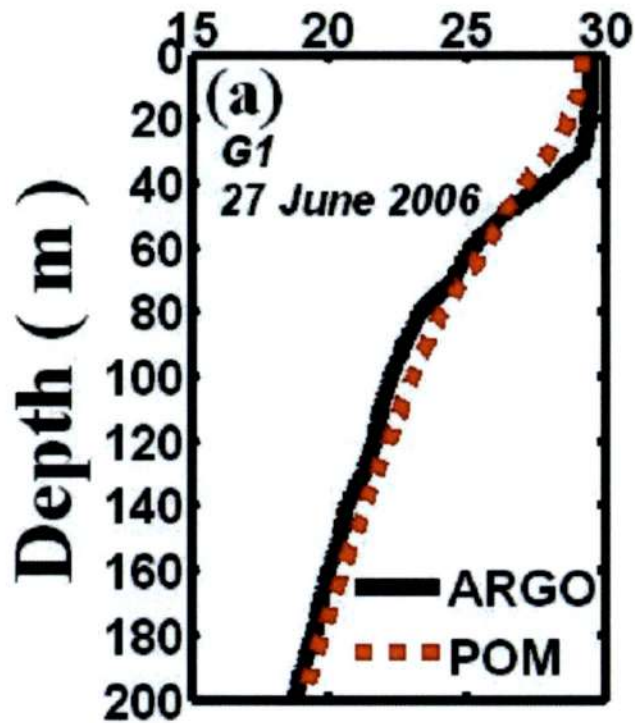


그림 3-3-8. (a - d) 태풍 통과 전의 ARGO와 비교한 수치모델의 수온분포. (e) G5에서 태풍 통과 후 수치모델과 ARGO 비교. 점선은 수치모델, 실선은 ARGO의 수온분포 (각각 G1, G2, G4 과 G5).

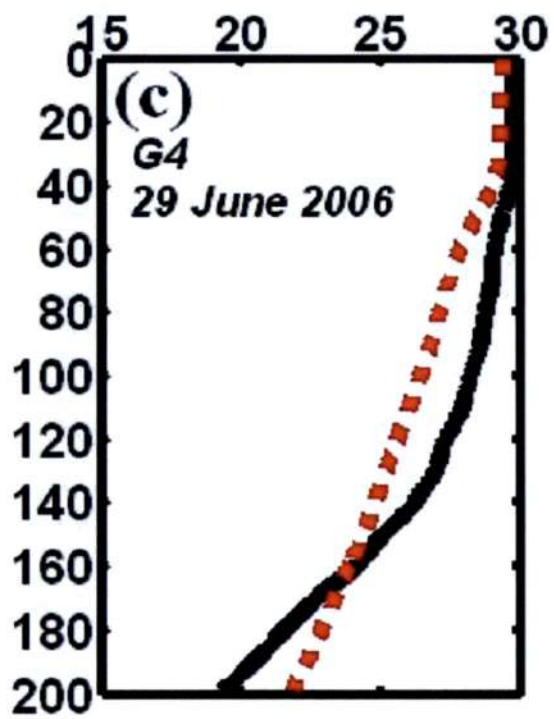
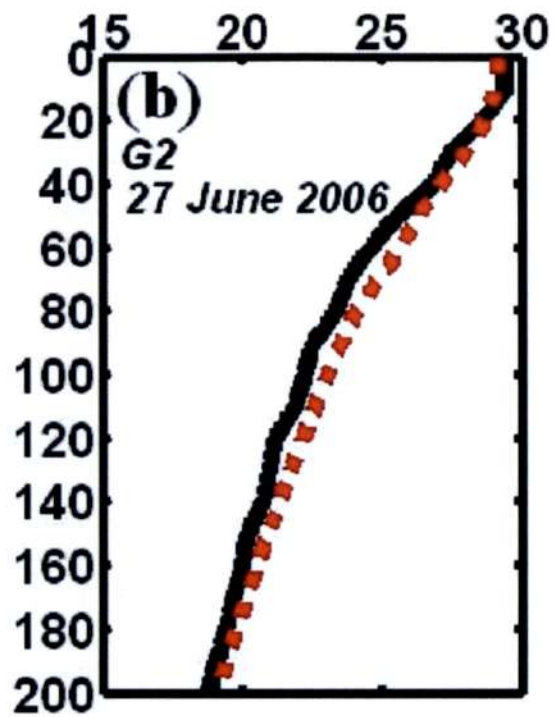


그림 3-3-8. 계속

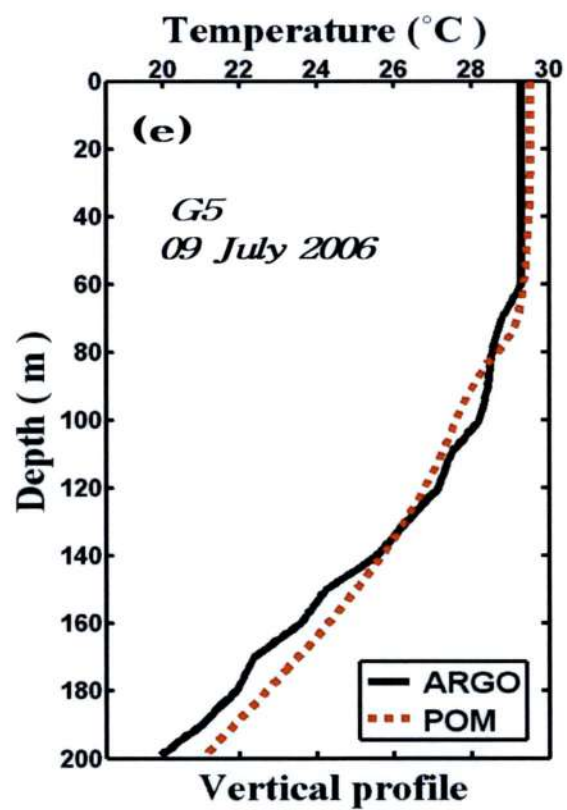
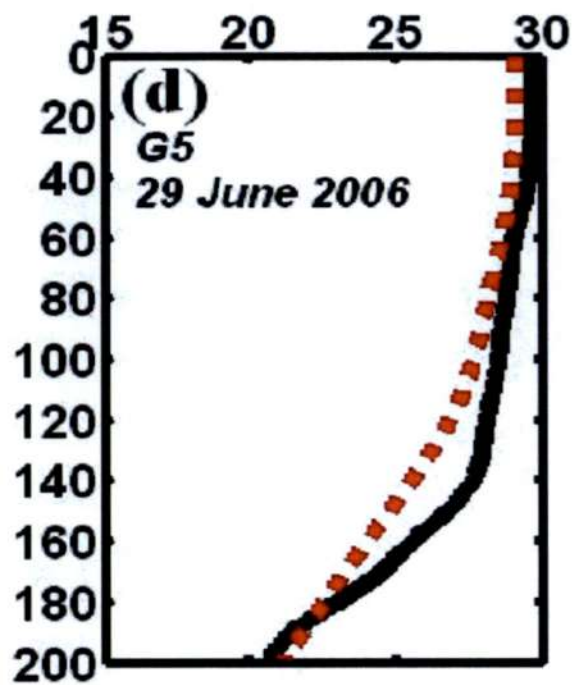


그림 3-3-8. 계속

3) 해양의 수온 변화

수치모델의 초기 해양 수온 분포는 그림 3-3-9에 나타내었다 (a의 color는 수온, contour는 혼합층 깊이, b는 해양 열용량). 해양 열용량은 단위 깊이당 26°C 이상의 수온을 적분한 값으로 Leipper (1972)는 연직열적구조의 분석을 통해 허리케인의 강도와 활동의 영향을 줄 수 있음을 증명하였다.

태풍에 의한 반응을 알아보기 전에 먼저 태풍 통과 전 동중국해역의 해양상태를 확인할 필요가 있다. 해양열용량 (그림 3-3-9b)을 보자면 20°N , 130°E 의 주변 해역은 해양열용량이 낮은 곳이다. 다시 말하면 해수면 아래 차가운 물 층이 가깝게 분포함을 뜻하고, 만약 이 지역을 태풍이 지나간다면 강한 냉각현상이 발생하고 태풍에게 음의 피드백을 줄 수 있을 것이다.

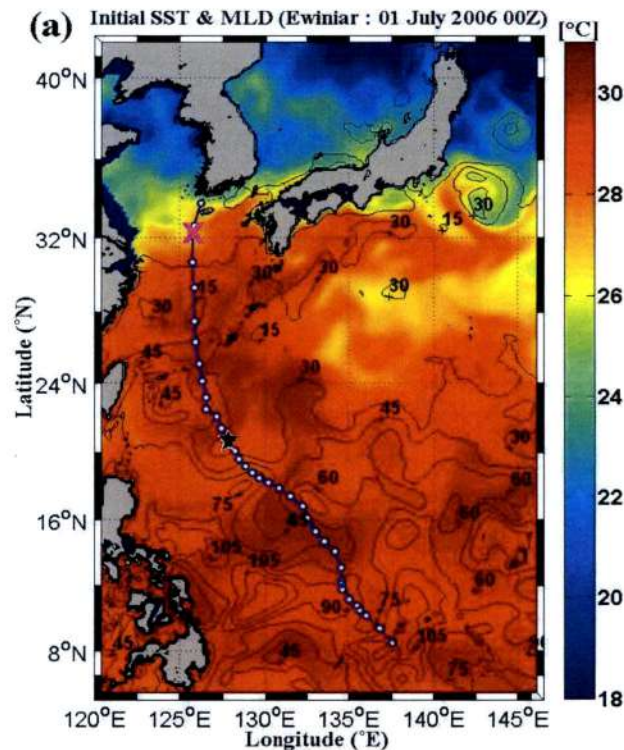


그림 3-3-9. (a) 수치모델에서 얻은 초기 해수면 온도와 등수심선은 혼합층 깊이. (b)는 해양열용량. (c) 태풍 통과 전 Jason-2 satellite의 해수면 고도.

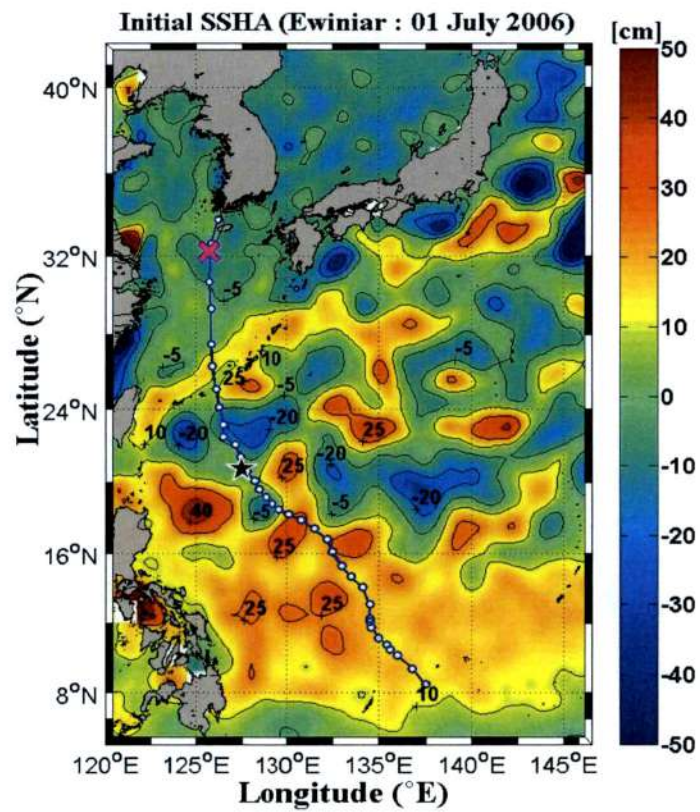
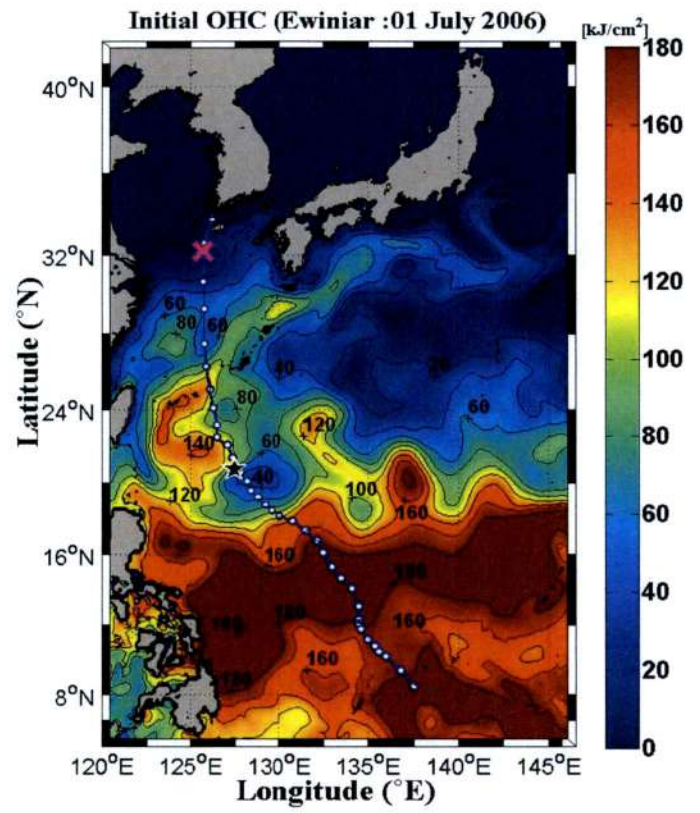


그림 3-3-9. 계속.

최대풍속반경 + 5km 안에 태풍이 유발한 표층 수온 변화를 나타내었다 (그림 3-3-10). 18°N, 131°E (왼쪽 위)를 시작으로 32°N, 126°E (9일 18시)까지 대각선은 태풍을 따라가며 나타낸 표층 수온의 변화이다. 그러므로 대각선을 중심으로 오른쪽은 태풍이 지나가기 전, 왼쪽은 태풍이 지나간 후를 나타낸다. 원의 크기는 태풍의 최대 풍속 반경 + 5km를 나타낸다. 사각형 안의 온도는 최대풍속 반경 + 5km 안에 표층 수온을 평균한 값이다. 일반적으로 태풍이 통과하기 전에 표층 수온은 28 - 30℃를 보이고 태풍 통과 후 25 - 27℃로 수온이 낮아졌다.

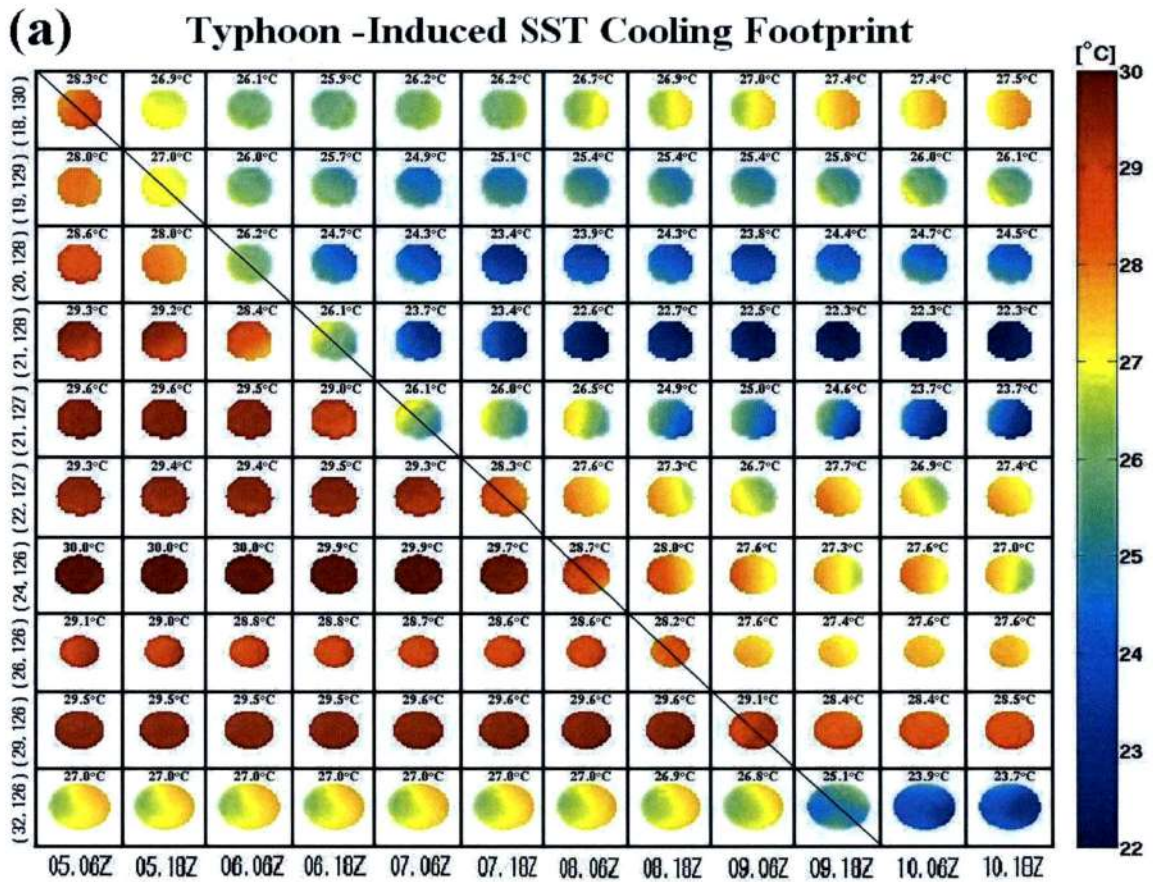


그림 3-3-10. (a) 최대 풍속 반경 + 5km 안에서 태풍에 의해 해수면 온도 변화. 가로축은 7월 5일 6시부터 7월 10일 18시까지 12시간 간격의 시간을 나타내고 세로축은 태풍 중심을 위경도로 나타냄. (b) 에워니아 경로에서 태풍 자취 (footprint)에 선정된 10개 지역을 표현함.

(b)

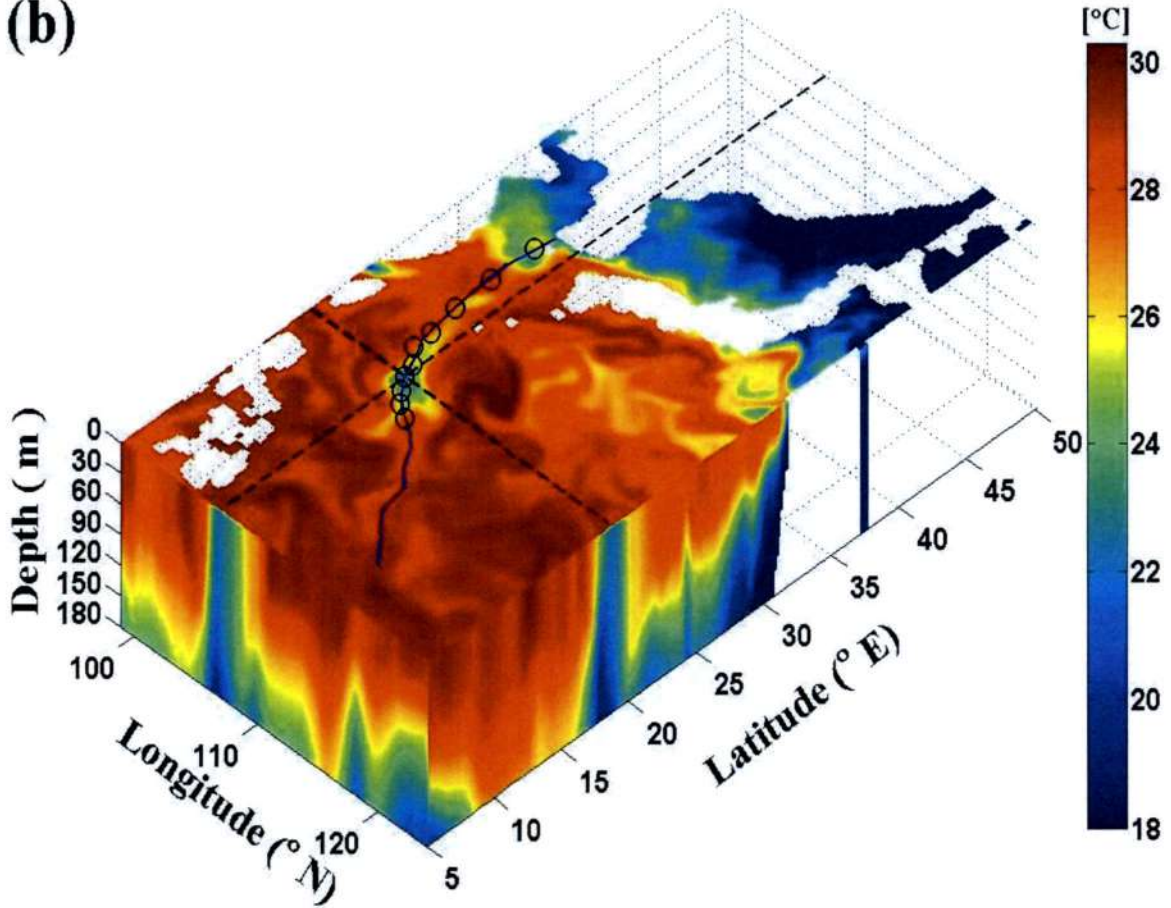


그림 3-3-10. 계속

최대 수온 하강 흔적도 (cooling swath)는 수치모델 정보 중 표층 수온을 활용해서 각 격자에서 태풍 기간 동안 가장 강한 표층 냉각 기록을 표시한 것으로 태풍 바람응력으로 인해 어느 범위까지 냉각영향이 있었는지 그리고 바람 응력이 유발한 해양의 최대 냉각 지역을 찾기 위해서 사용된다 (그림 3-3-11a). 최대 냉각현상이 태풍 통과 후 얼마만에 발생한 것인지는 태풍 통과 후 최대 수온 하강 발생시간 (cooling swath day) (그림 3-3-11b)에 의해 표현되고 이는 각 위도별 태풍 통과 시간과 각 지점의 최대 수온 하강 시간의 차이를 계산한 것이다. 최대 수온 하강 흔적도에서 특징적인 분포가 두 곳에서 나타난다.

첫 번째 지역은 타이완 동쪽 해역으로 태풍 통과 3 - 5일 후 최대 냉각현상이 발생한 곳이고 두 번째 지역은 제주도 남쪽 해역으로 태풍 통과 후 0.5 - 1일 내에 최대 냉각이 발생한 곳이다. 태풍이 통과한 해역 중 타이완 동쪽해역의 A지점 (★표시)과 제주도 남쪽해역의 B지점 (X표시)에서 강한 표층냉각이 발견되었고 이는 관측자료와 모델결과에서 모두 나타났다.

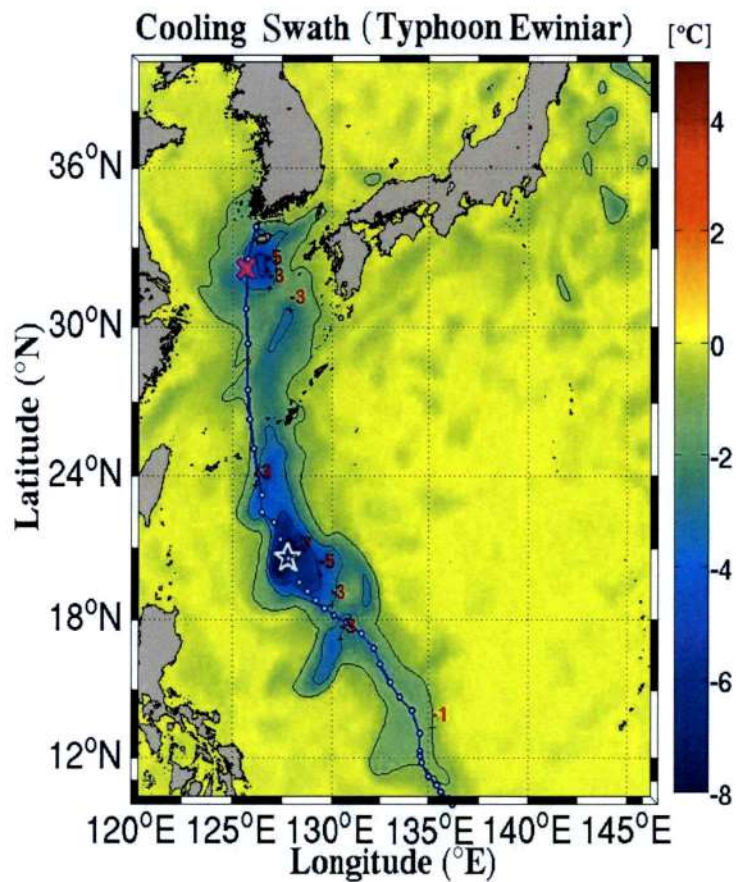


그림 3-3-11. (a) 최대 수온 하강 흔적도 (cooling swath). (b) 태풍 통과 후 최대 수온 하강 발생시간 (Cooling swath day).

Cooling Swath Day (Typhoon Ewiniar)

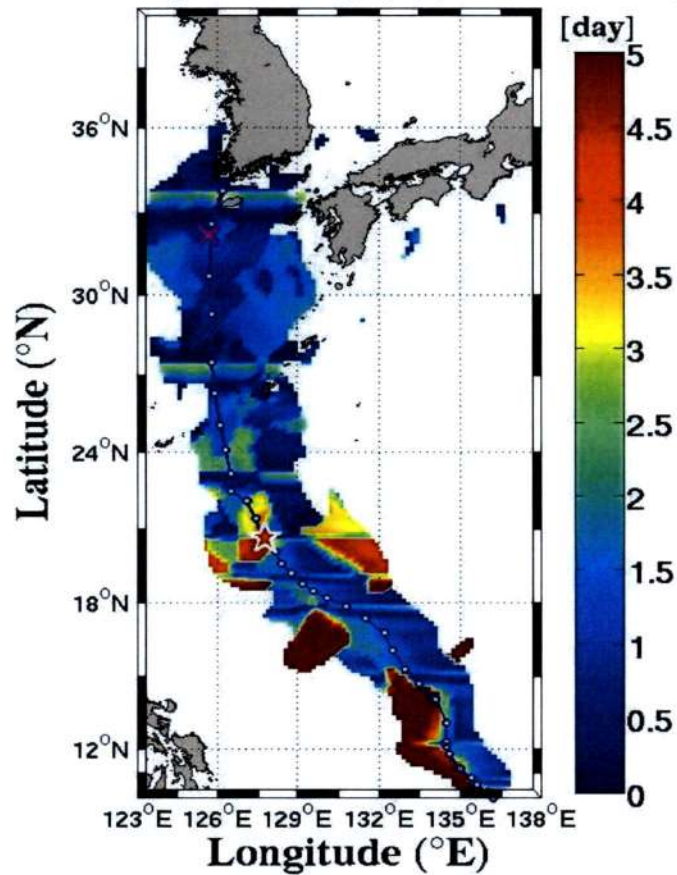


그림 3-3-11. 계속

A지점 (★표시)에서 나타난 강한 표층냉각이 발생한 원인 중 하나는 낮은 해수면고도 (얕은 혼합층)를 가진 환경에서 태풍이 강하고 느리게 이동하면서 표층냉각을 더욱 강화시킬 수 있었다.

B 지점 (X표시)은 태풍이 빠른 이동 속도 (8.5 m/s)를 가지고 통과하였으며 이때, 풍속은 23 m/s로 많이 약화되었다. 따라서 이곳은 다른 환경과 비교하여 강한 표층냉각을 생성될 수 있는 조건을 갖추지 못했음에도 불구하고 관측 결과 (이어도 기지)에서는 태풍 통과 후 최대 6℃의 수온하강이 발견되었다.

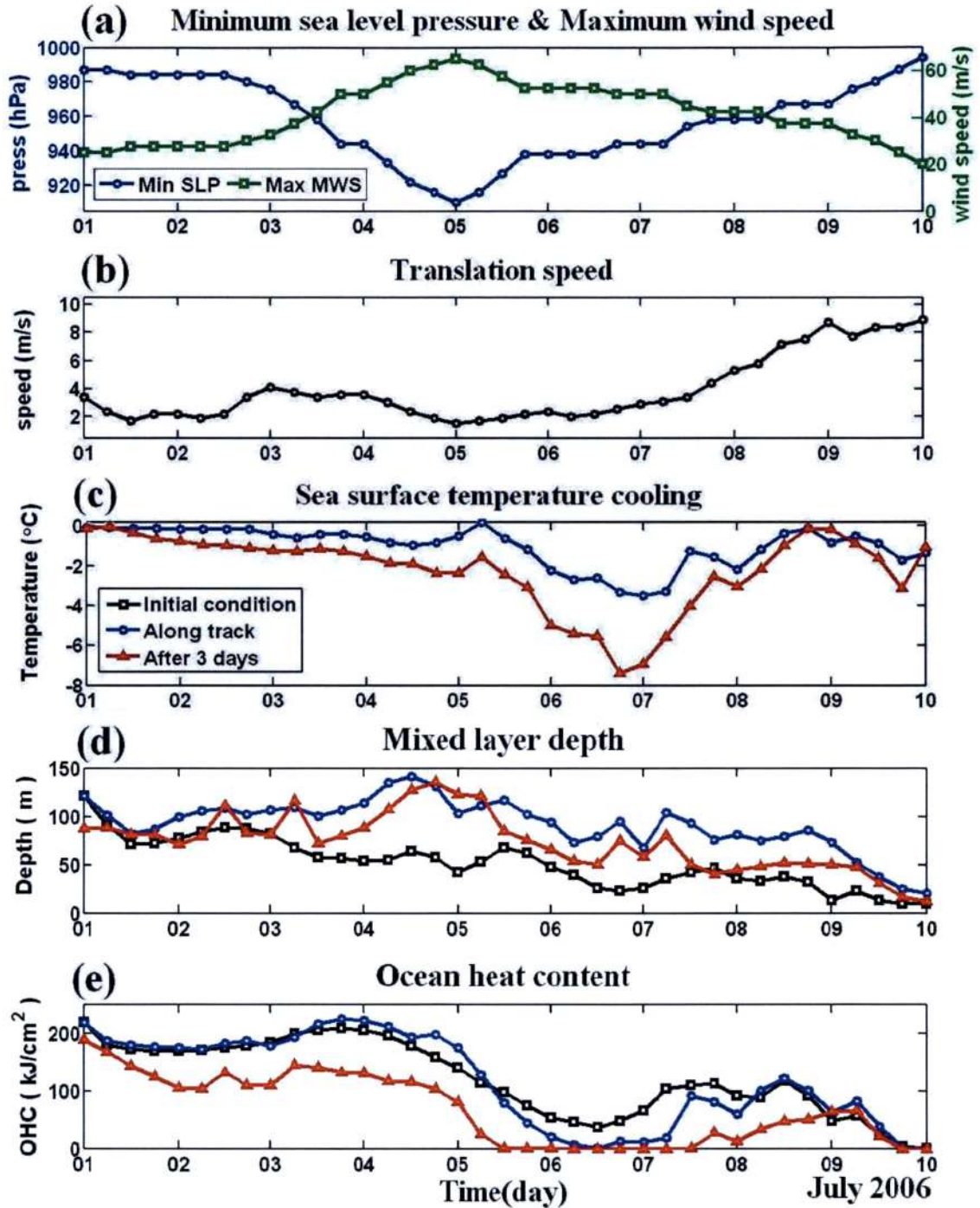


그림 3-3-12. (a) 최소 중심기압, 풍속의 시계열, (b) 이동속도 (c) 태풍 트랙을 따라 최대 풍속반경 + 5km 내의 평균값인 해수면 냉각 (d) 혼합층 깊이 (e) 해양열용량.

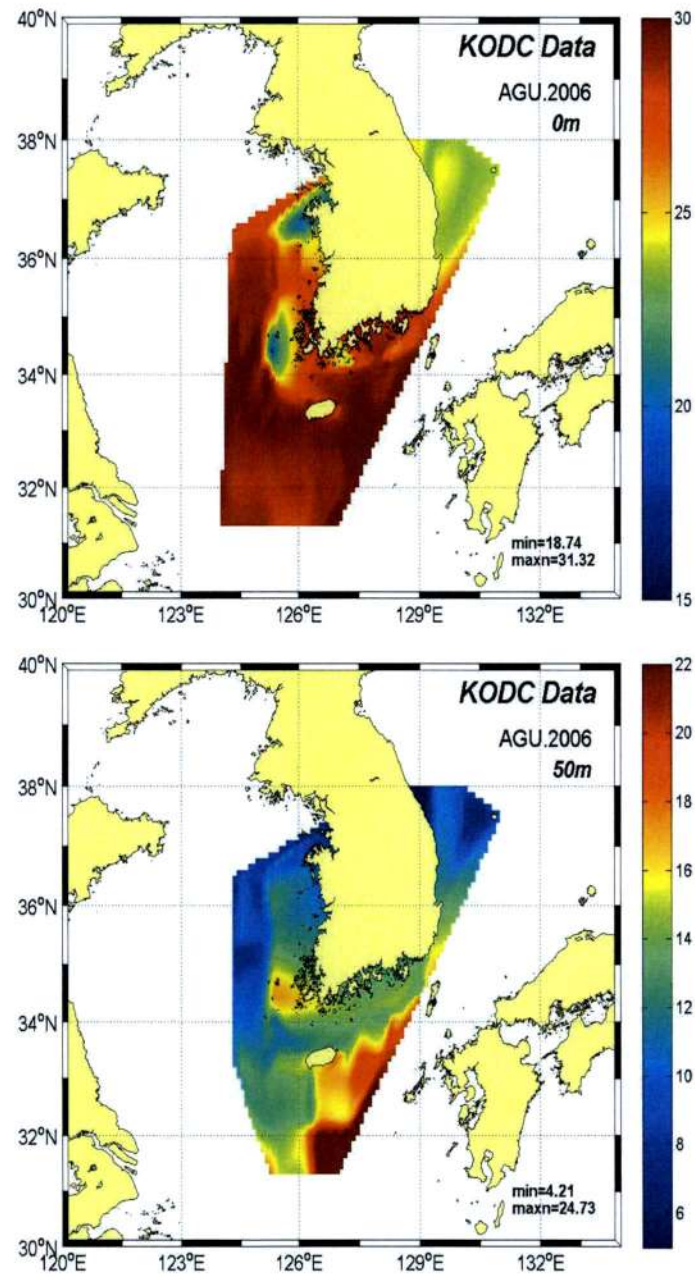


그림 3-3-13. 한국 해양 자료센터의 수심 0m (위 그림), 50m (아래 그림)의 수평 수온 분포

우리나라 황해에는 수심 50m만 내려가도 수온의 차이가 18°C 정도 떨어진 황해저층냉수대가 있다. 이것은 여름철 태양열에 의해 가열된 고온의 표층수와 겨울철에 냉각되어 저층에 자리 잡고 있는 것이다 (그림 3-3-13).

이러한 저층 냉수 위를 통과하는 태풍은 강한 바람에 의한 혼합작용과 저기압에 의한 용승작용으로 쉽게 표층수와 저층냉수가 혼합되어 표층수온이 급격하게 떨어지게 되었다 (Moon, 2006).

(3) 태풍 강도에 영향을 주는 황해저층냉수 조사

황해저층냉수의 강도 변화를 조사하기 위해 미해군 자료동화 자료를 사용하여 7월 층별 수온의 수평분포와 국립수산물과학원 한국해양자료센터 (KODC)에서 제공한 수심 50m의 8월 수온자료를 분석하였다.

1) 미해군 자료동화 자료를 사용한 여름철 층별 수온의 수평 분포

한반도 근해 여름철 (7월) 층별 수온분포를 보면 (그림 3-3-14), 따뜻한 쿠로시오 해류와 황해저층냉수가 만나는 지점이 126°E 선상에 분포한다. 수심이 깊어질수록 이 선을 경계로 두 곳의 온도차가 더욱 커진다.

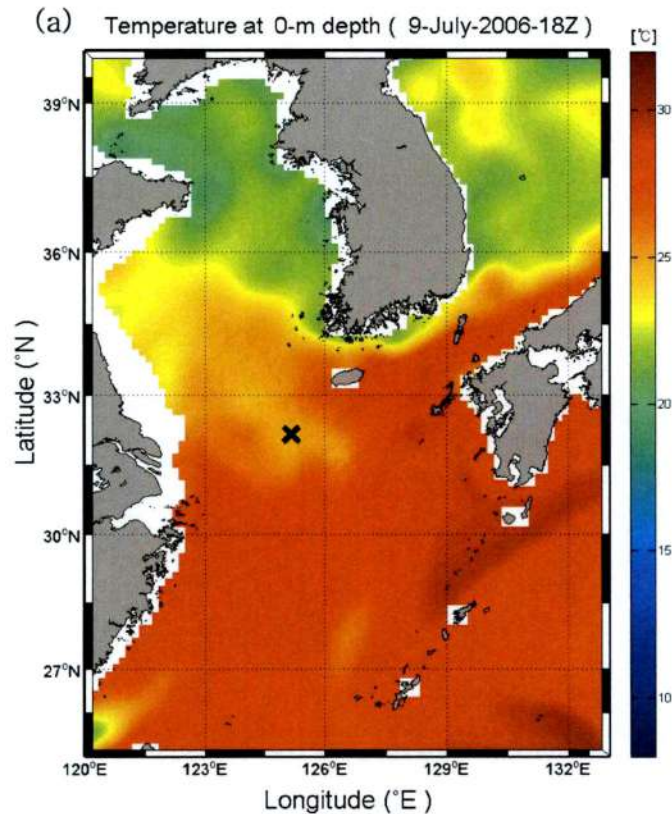


그림 3-3-14. 한반도 근해 7월의 층별 수온의 수평분포. (a) 표층, (b) 24m, (c) 48m, (d) 72m (인용 : 문일주, 2009)

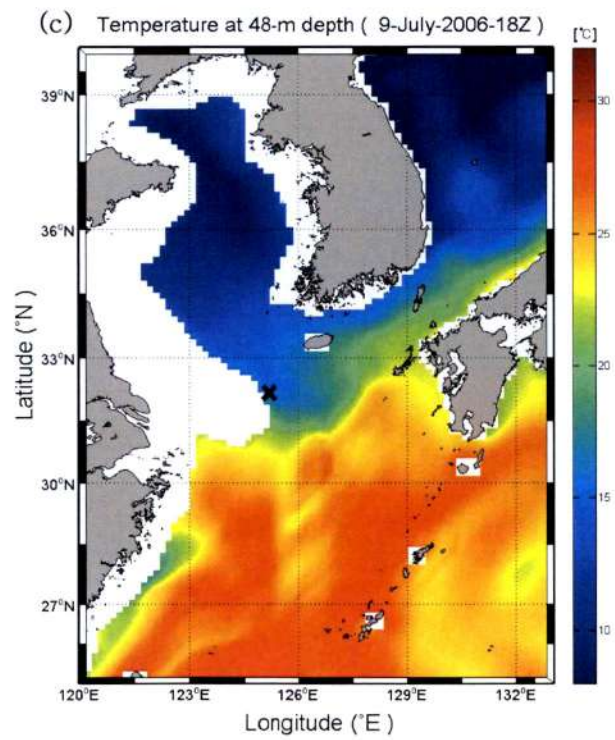
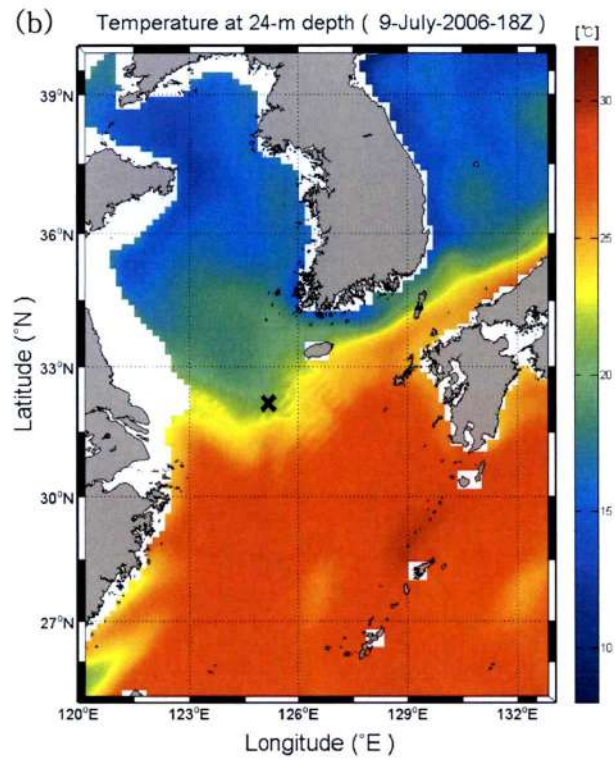


그림 3-3-14. 계속

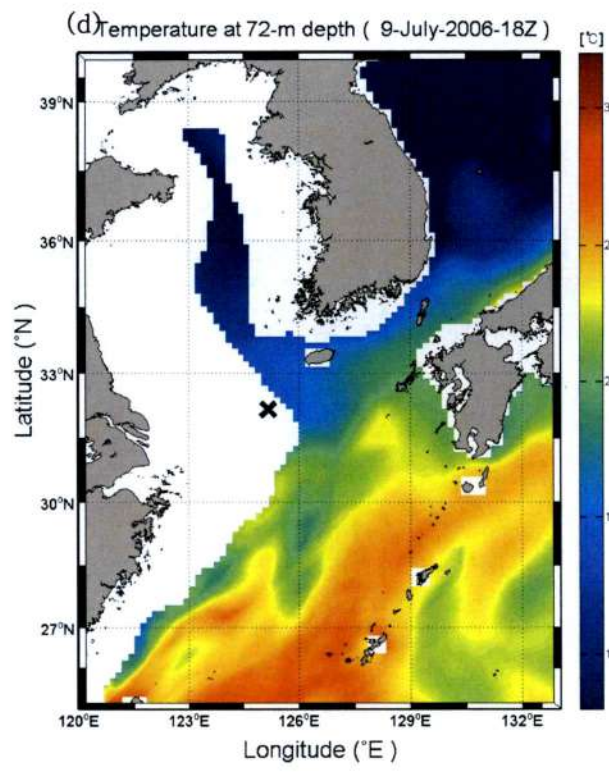


그림 3-3-14. 계속

2) 국립수산물과학원 한국해양자료센터 자료

1980년도부터 2007년까지의 KODC 8월 자료를 사용하여 수심 50m에서 12°C의 등온선을 그려 연도별 황해 저층 냉수 분포를 확인하였다. 각각의 해마다 황해 저층 냉수가 남하하는 정도와 규모가 다르다 (그림 3-3-15).

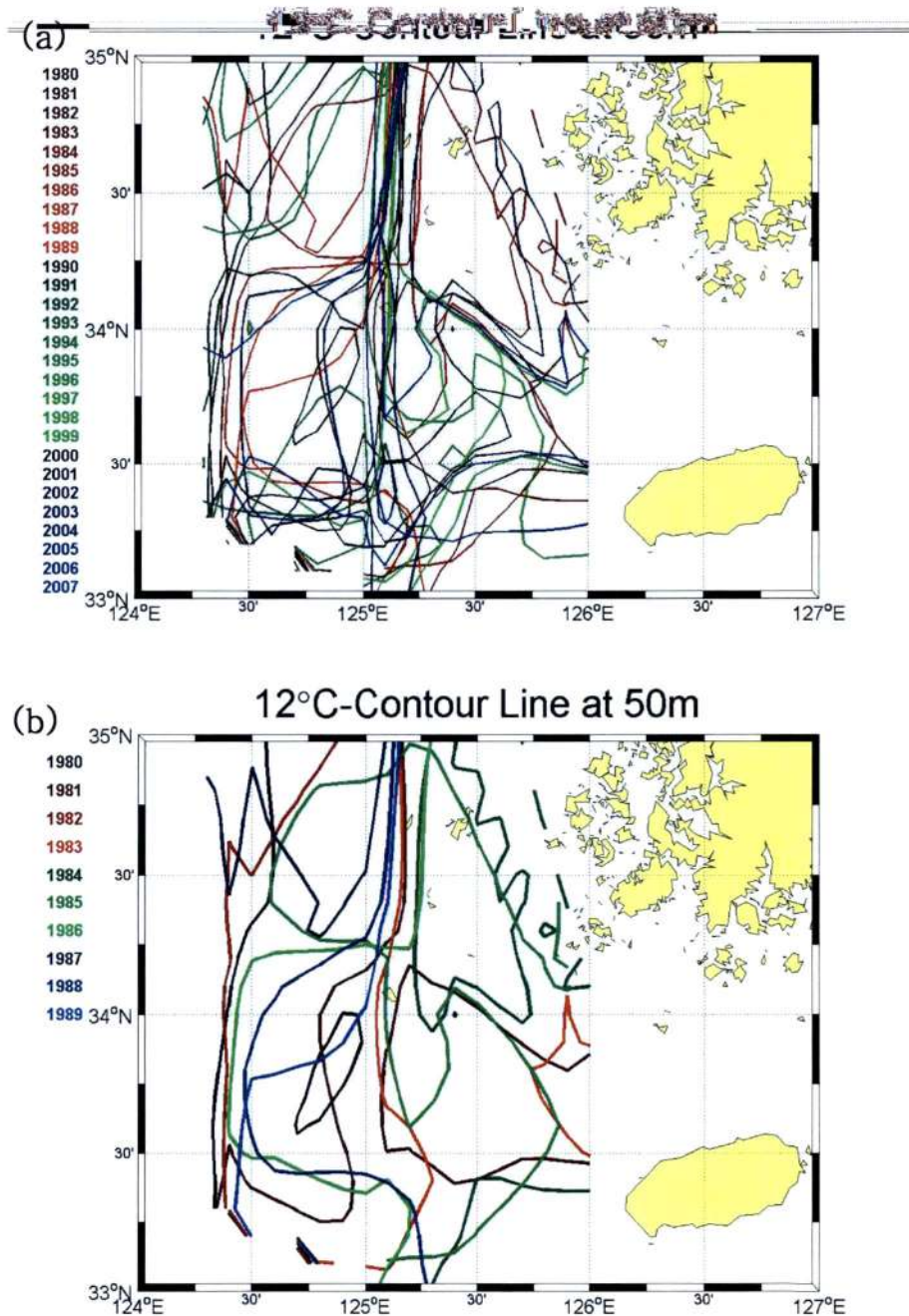


그림 3-3-15. 황해 저층 냉수의 수평분포. (a) 1980년부터 2007년까지 (b) 1980년대 (c) 1990년대 (d) 2000년대 (e) 1994년부터 2007년까지

제주도 남서쪽까지 수온 자료가 확보된 1994년도부터 12°C의 등온선의 분포를 보면 1996년과 2005년도에 제주도 남서쪽까지 황해 저층 냉수가 확장되어있음을 알 수 있다. 그러나 2000년대 초반에는 남해 남서쪽까지만 저층냉수가 분포하고 있었다. 황해 저층 냉수 분포의 장기변동성은 향후 보다 많은 관측자료를 확보하여 연구를 수행할 예정이다.

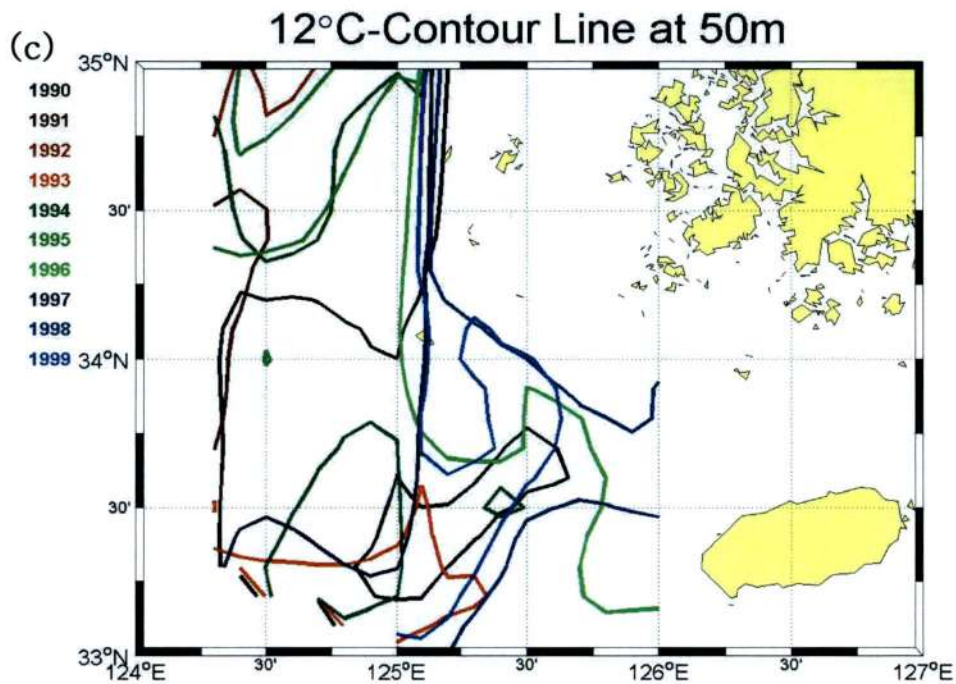


그림 3-3-15. 계속

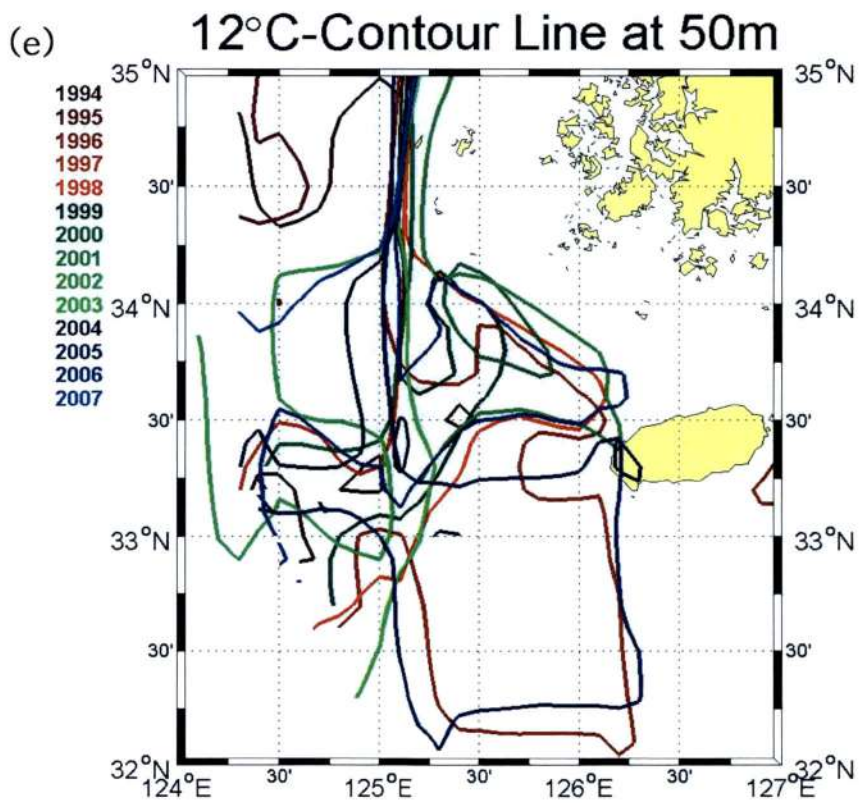
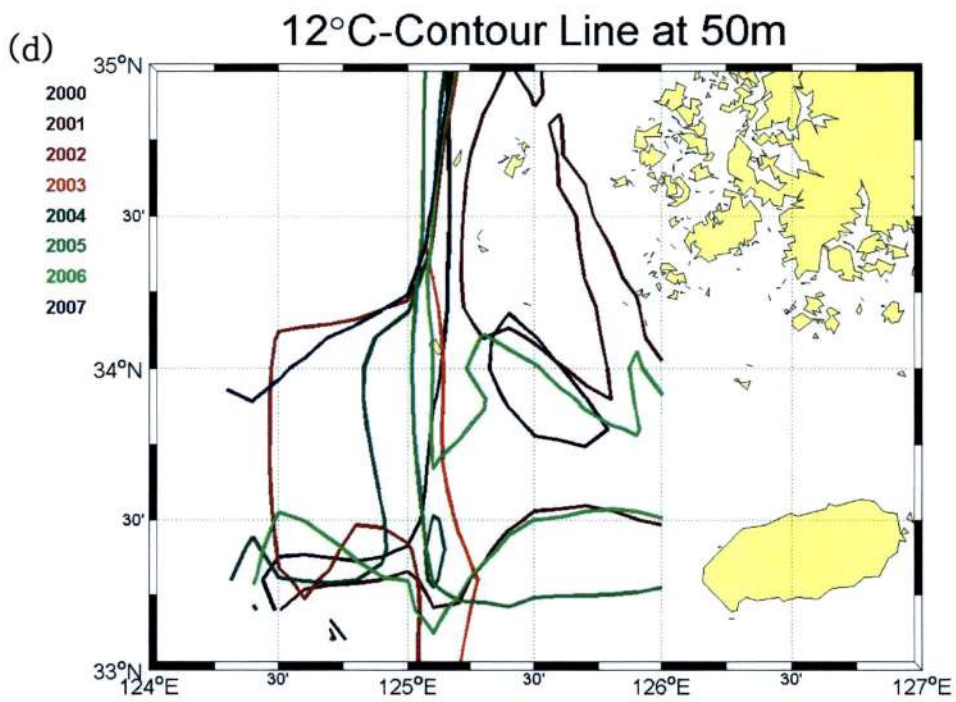


그림 3-3-15. 계속

(4) 이어도 기지의 층별 수온과 염분의 계절변화 특성 조사

한국, 중국 그리고 일본은 공통분모인 동중국해와 접하고 있으며 그 중심에 이어도 기지가 위치하고 있다. 이어도 기지에서는 수온과 염분 자료를 10분 간격으로 관측하고 있다.

이어도기지의 수온 염분 자료는 그림 3-3-16a, b에서 볼 수 있듯이 자료의 보정이 필요하다. 그래서 자료의 오류를 제거하고 그 개수를 히스토그램으로 그림 3-3-16c에 나타내었다. 2월과 3월에는 25m 센서의 오류가 많이 발생했고 특히 12월 이후에 18m 센서의 오류가 대부분이라 분석에서 제거하였다. 그림 3-3-17a, b는 1차 QC (Quality controlled) 후의 수온 염분을 나타낸다.

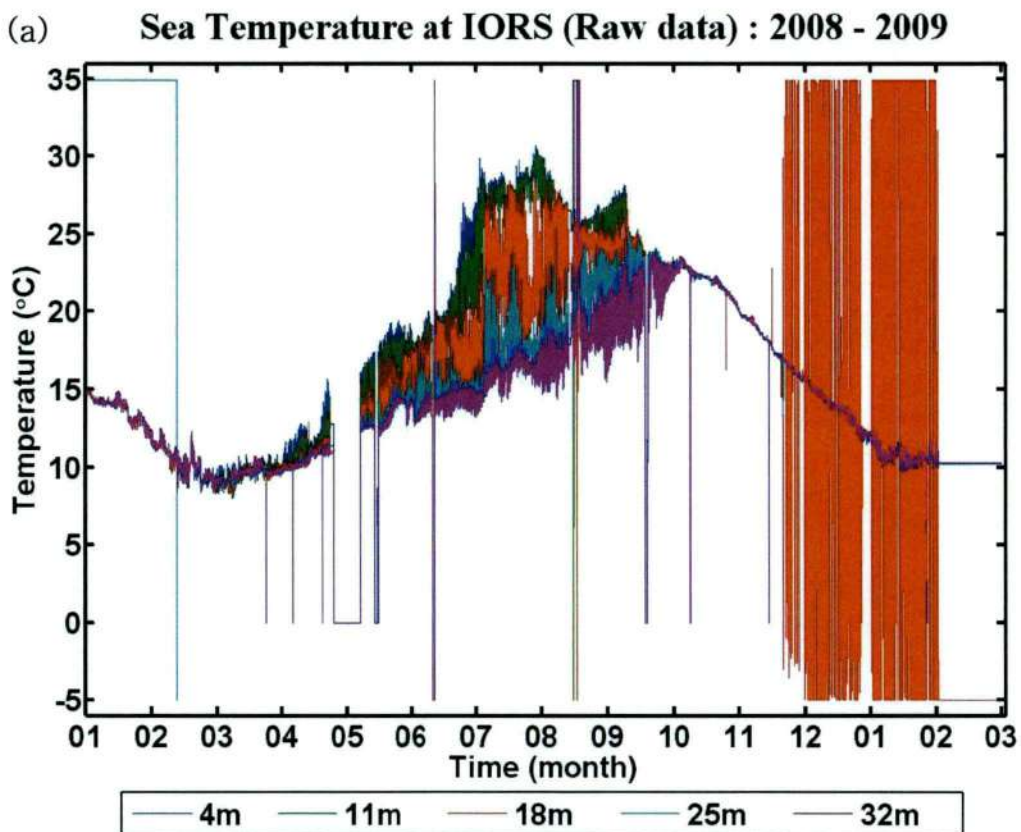


그림 3-3-16. 2008 - 2009년도 이어도기지를 활용한 자료 모음. (a) IORS에서 수온 (Row data) (b) 전기전도도 (Row data) (c) 월별 오류 개수

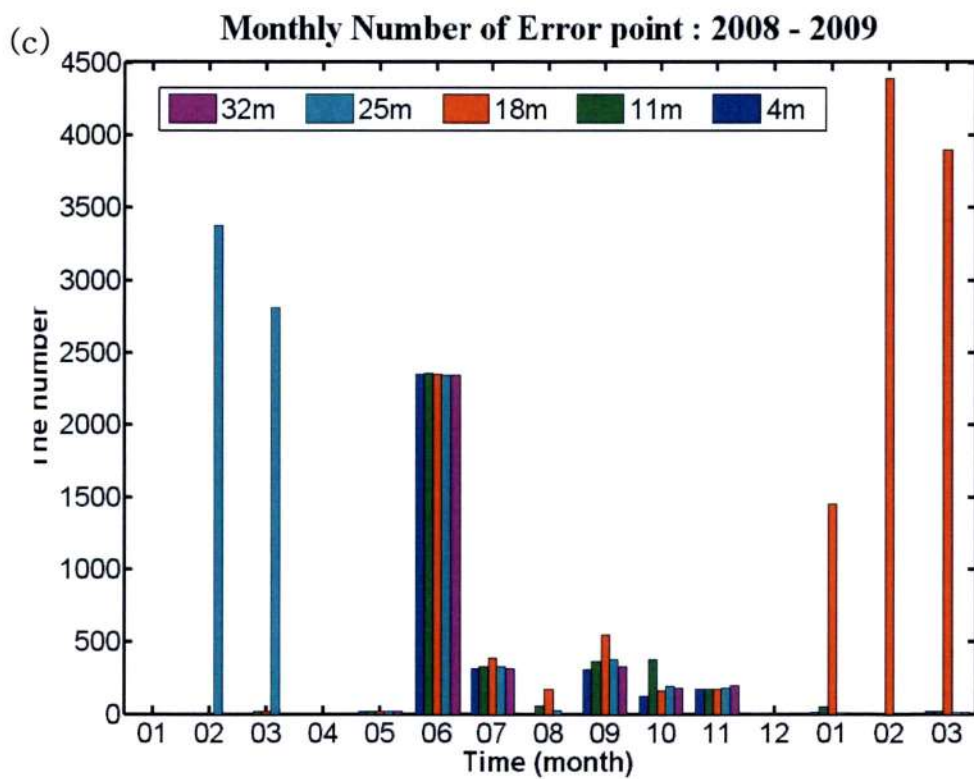
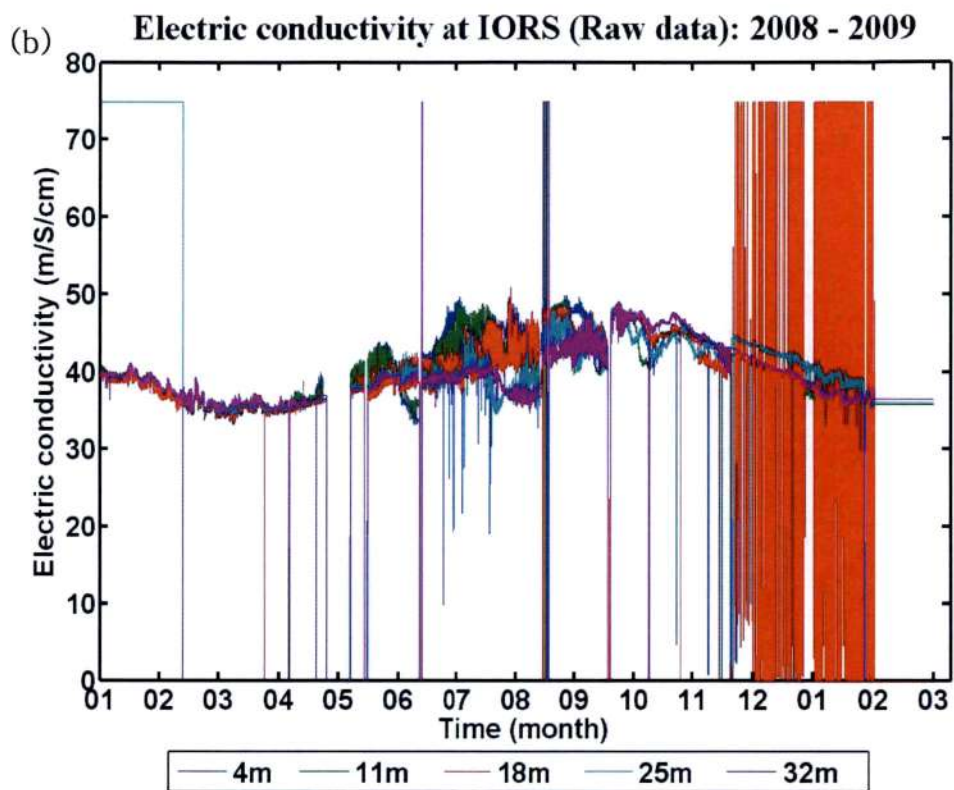


그림 3-3-16. 계속.

1) 수온

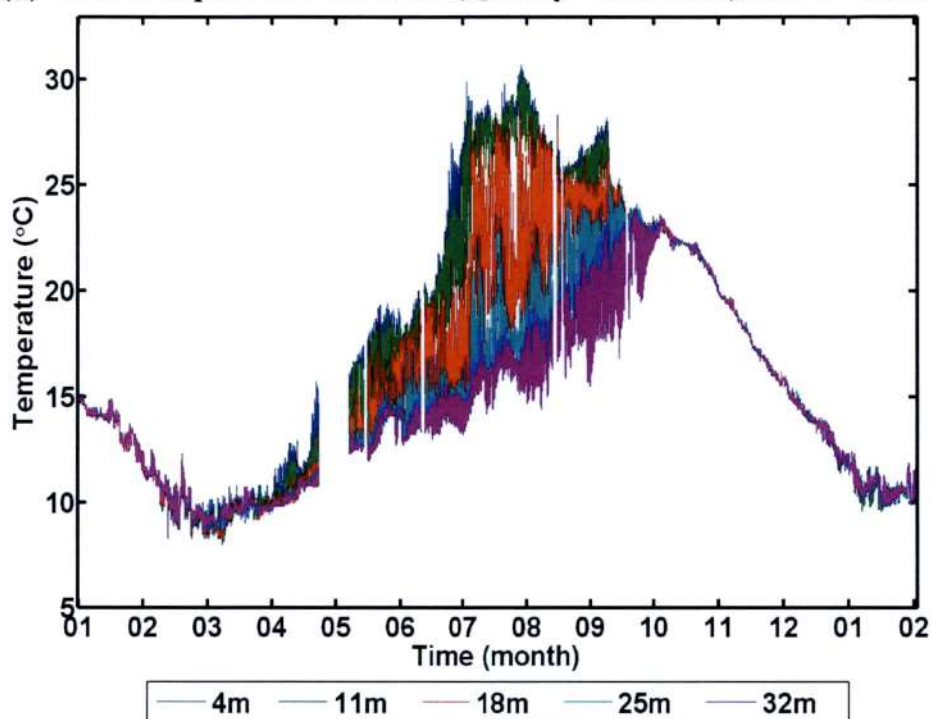
그림 3-3-17a는 2008년 1월부터 2009년 1월까지 1년간 수온자료를 나타낸다. 수온의 변화는 태양 복사에너지 유입량의 변화로 계절별 특징이 나타난다. 겨울은 복사에너지의 유입량이 적으므로 전체적으로 수온이 낮고 성층화가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 반면 여름은 태양의 복사 에너지량이 많으므로 표층이 가열되어 해수면에서 약 4m깊이 수온은 약 30℃에 이른다. 여름의 따뜻한 표층수는 아래에 존재하는 찬물보다 밀도가 낮고 아래로 쉽게 섞이지 않으므로 성층화가 뚜렷하다.

겨울에는 해양 내부는 완전히 혼합되어 성층화가 사라지고 표층 수온이 최저로 떨어져 3월에 최소 표층 수온을 보인다 (그림 3-3-17c). 봄철로 접어들면서 태양열은 표면 가까이에서 주로 흡수되어 수온의 상승은 대부분 비교적 얇은 표층에 국한된다. 일사량의 증가로 인한 표층 수온의 상승으로 8월에 가장 강한 성층화가 발생한다. 9월부터 가열된 해수는 서서히 냉각되어 다시 성층화가 깨지기 시작한다.

2) 염분

염분은 전체 바다에 걸쳐 매우 좁은 범위 내에서 변하며 34.5 - 35.0 psu 사이의 해수가 대부분이다. 일반적으로 수심이 깊어질수록 온도는 하강하며 염분은 증가한다. 이어도 기지의 염분도 일반적인 해양 분포와 마찬가지로 깊이가 깊어질수록 높아지는 경향을 보인다 (그림 3-3-17b). 여름에는 강수가 집중됨으로 대체적으로 염분이 낮게 관측되었다. 6월 중 4m와 11m 깊이 센서에서 정확한 유입경로는 알 수 없으나 양자강 저염수로 추정되는 저염분이 관측되었다.

(a) Sea Temperature at IORS (Quality Controlled) : 2008 - 2009



(b) Sea Salinity at IORS (Quality Controlled) : 2008 - 2009

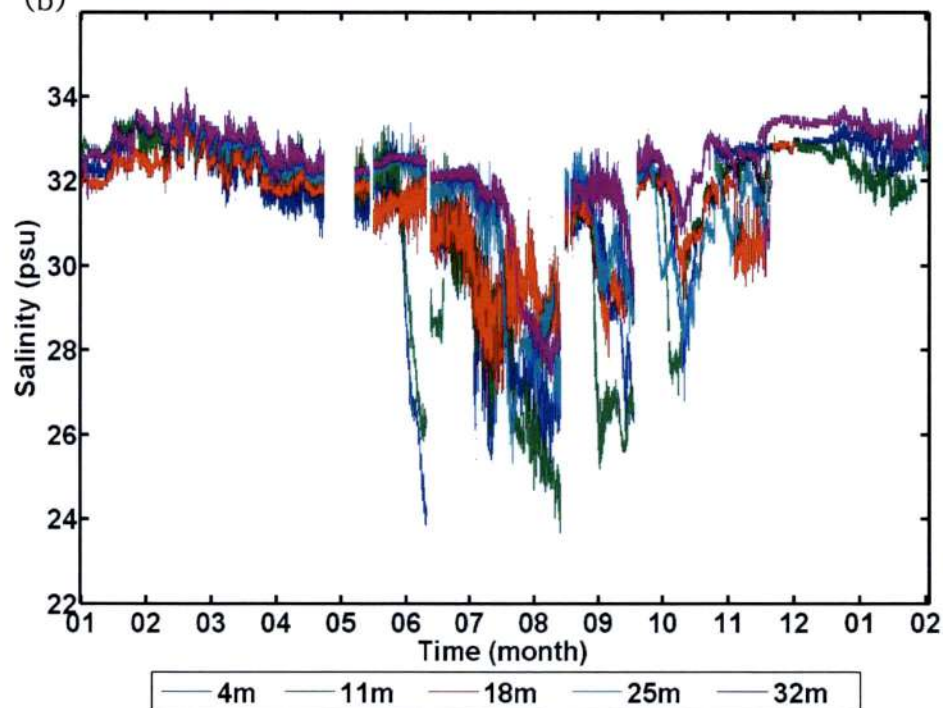


그림 3-3-17. (a) 자료 보정한 수온 (b) 자료 보정한 염분 (c) 수온 프로파일의 변화

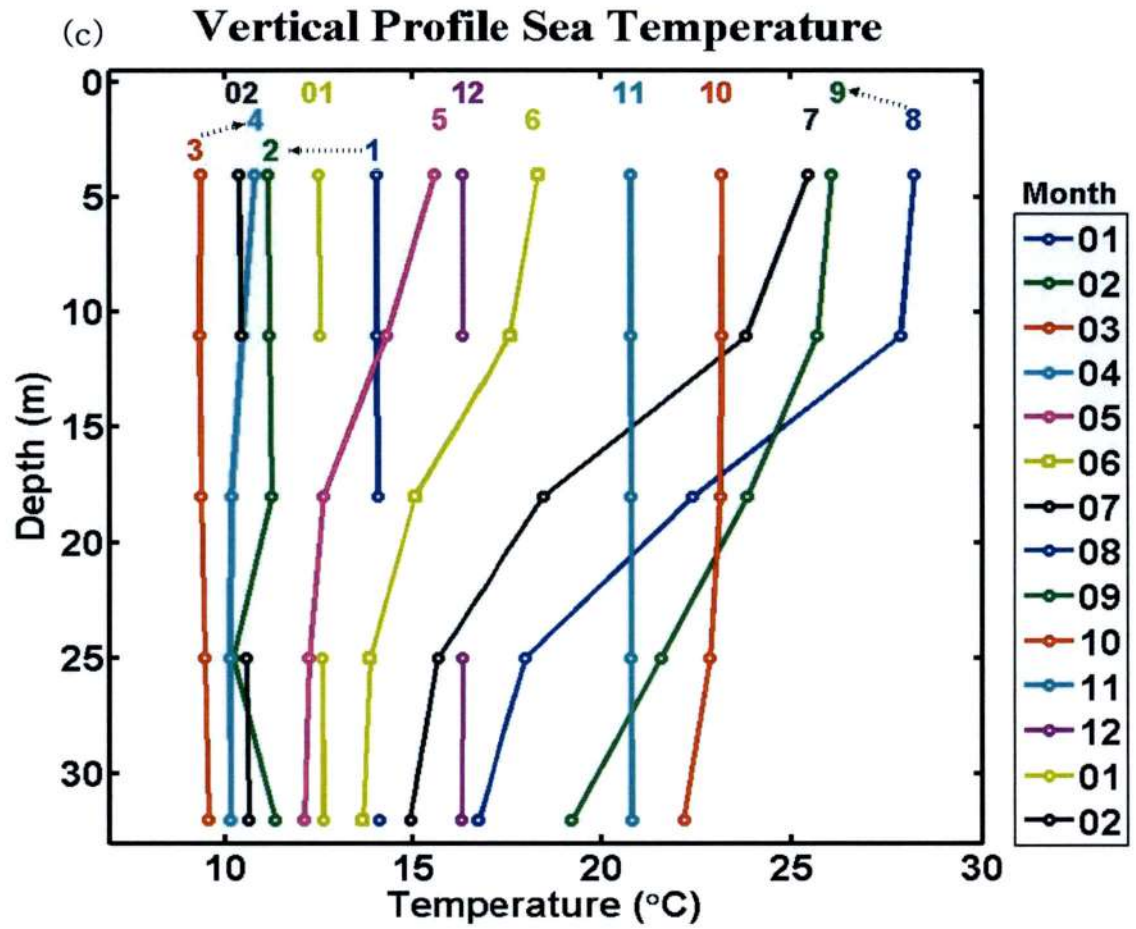


그림 3-3-17. 계속

3) 한국해양자료센터 자료와 비교

본 사례에 사용된 이어도 기지 자료를 검증하기 위하여 KODC 자료와 비교하였다. 그림 3-3-18에서 볼 수 있듯이 KODC 자료는 이어도 기지 주변의 6지점을 선정하였고 각각 2월과 8월 수온(b, c)과 염분(d, e)을 비교하였다 (그림 3-3-19).

대체적으로 이어도 기지의 수온 자료는 KODC의 316-19정선과 거의 비슷한 분포를 보였다. 그러나 이어도 기지의 8월 염분(e)은 KODC 자료와 비교적 경향성 비슷하나 대체적으로 2.5 - 3.5 psu 정도 낮게 측정되었다. 2월(d)의 수온은 KODC와 비슷한 경향을 보였으나 염분은 0.5- 1.5 psu 정도 낮게 나타났다. 향후 염분 자료는 자료 보정이 필요할 것으로 사료된다.

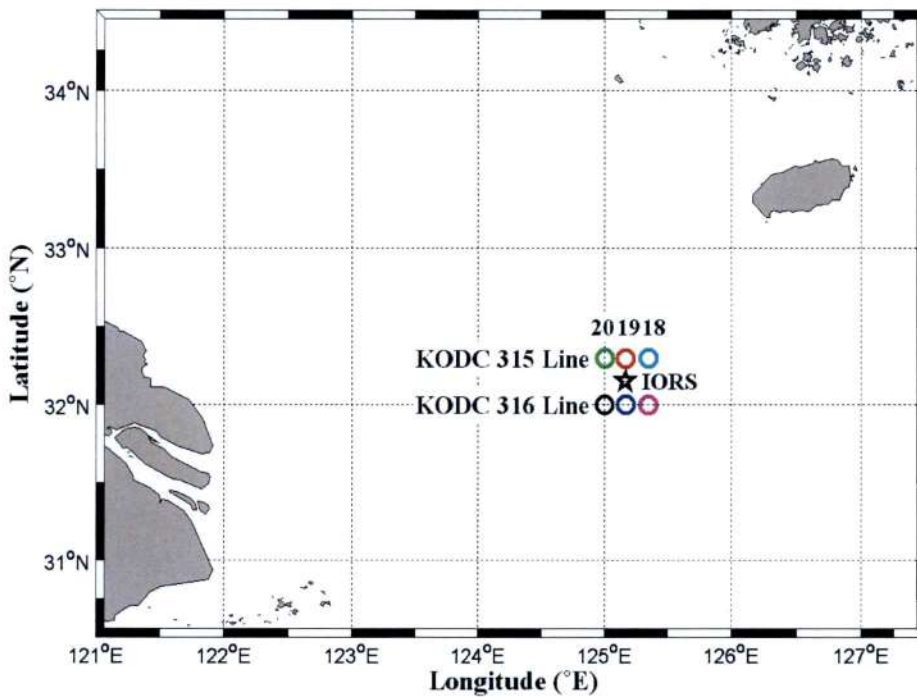
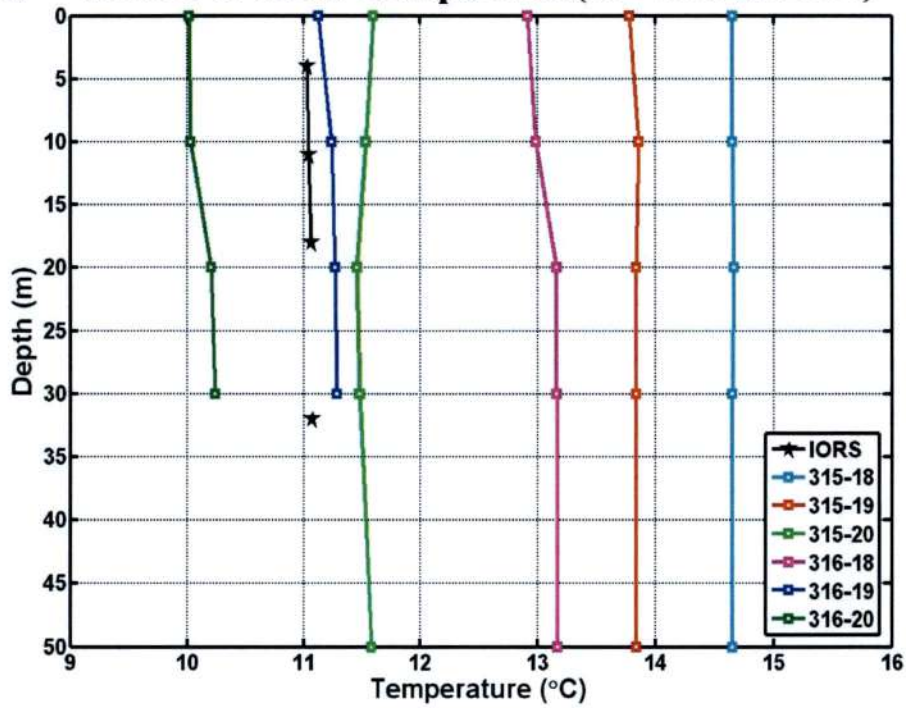


그림 3-3-18. IORS와 분석에 사용된 KODC 관측 위치

(a) **KODC & IORS Comparison (15 - 16 Feb 2008)**



(b) **KODC & IORS Comparison (15 - 16 Feb 2008)**

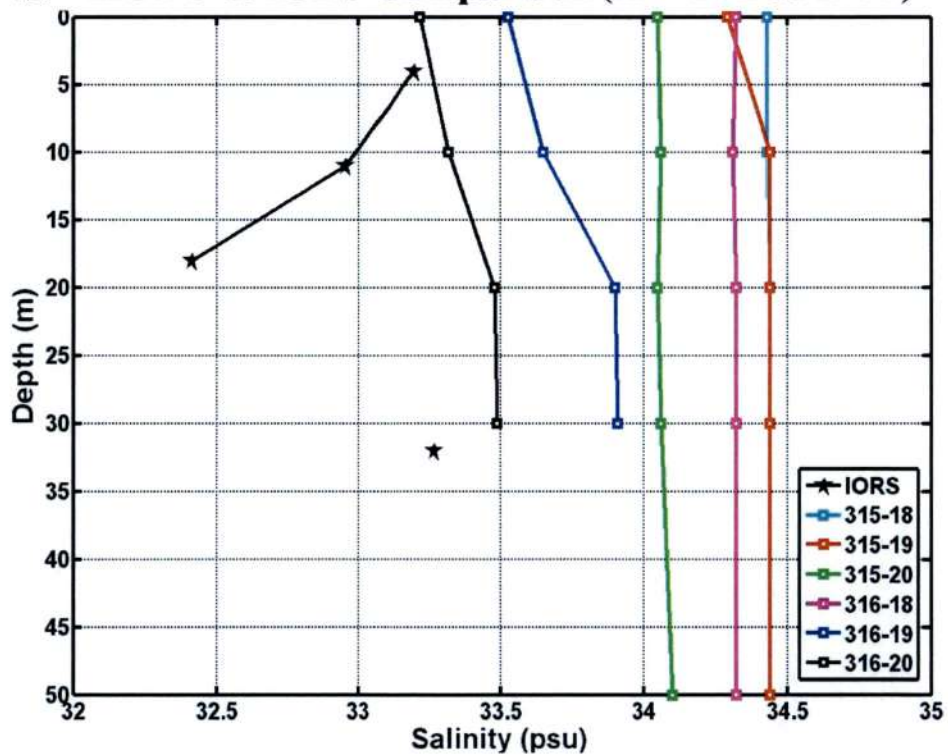


그림 3-3-19. (a) IORS와 KODC의 2월 수온 비교 (b) 2월 염분 비교 (c) 8월 수온 비교 (d) 8월 염분비교

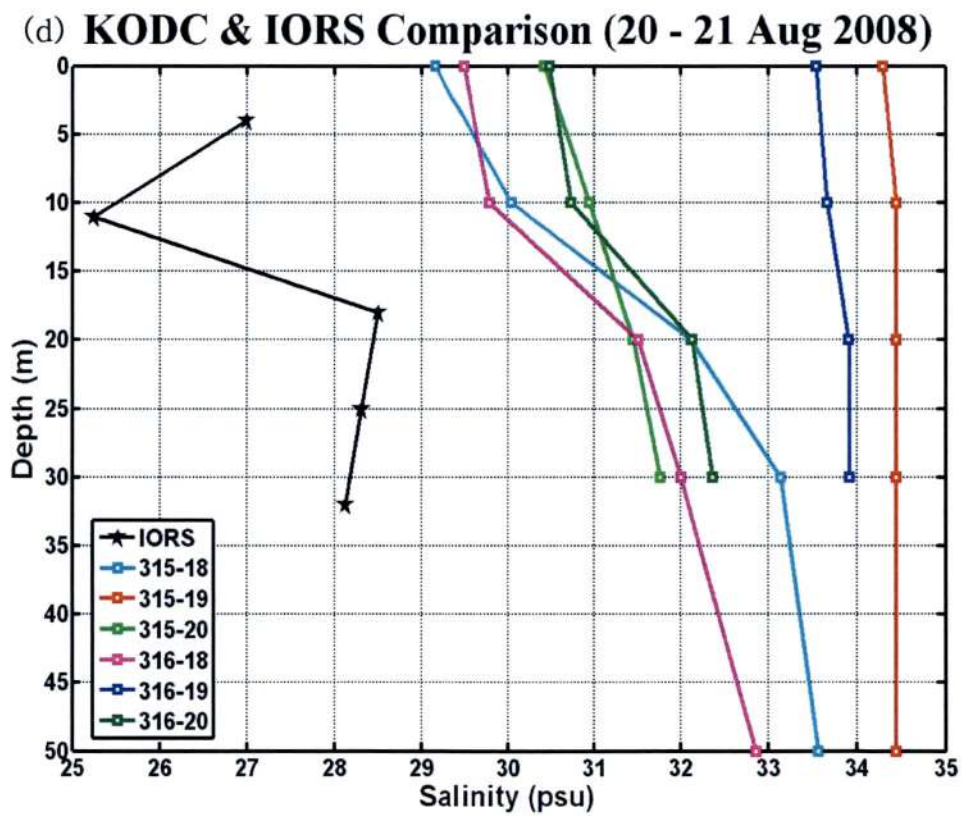
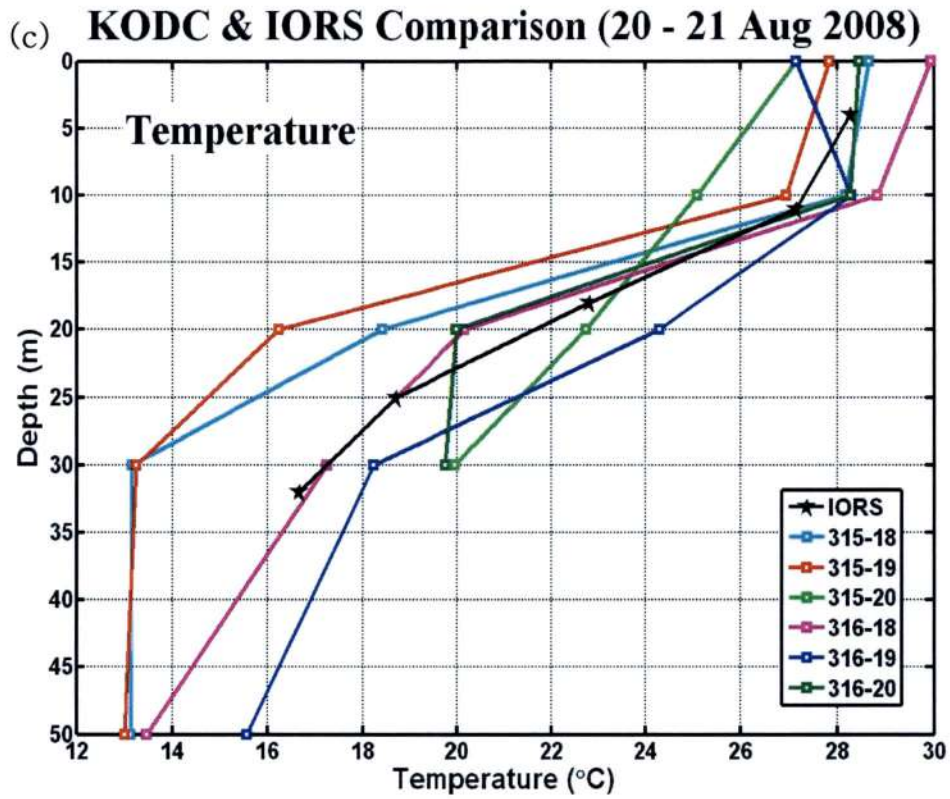


그림 3-3-19. 계속

4. 태풍 예측기술 향상을 위한 이어도 기지 관측 자료를 이용한 해양 및 대기 모델의 검증

(1) ROMS 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍에 대한 해양반응 조사 및 모델검증

1) 태풍 에위니아(2006)시기에 관측된 기록적인 수온하강

태풍 에위니아는 2006년 6월 29일 06시경 필리핀 동남쪽 해상에서 열대저기압 (tropical depression)으로 발달하여 48시간 뒤인 7월 1일 경 열대폭풍(tropical storm)으로 발달하였다. 에위니아는 5일 동안 느리게 북서진하며 점차 세력이 강해졌으며 7월 5일경 최대 강도인 중심기압 930hPa, 최대풍속 약 59m/s 도달하였다. 이후 세력이 점차 약해졌으며 한반도를 향하여 북진하였다. 이어도 관측기지 통과 시점인 7월 9일 18시경 태풍의 중심 기압은 975hPa이었으며 최대풍속은 약 35m/s로 비교적 세력이 많이 약해진 상태였다. 이때 이어도 관측기지에서 약 12℃ 정도의 기록적인 수온냉각이 관측되었다(그림 3-4-1, 그림 3-4-2).

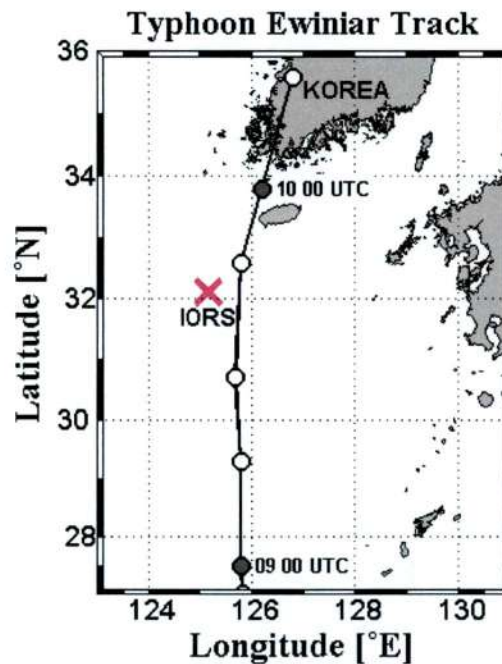


그림 3-4-1. 이어도 관측기지 위치(x표시) 및 태풍 에위니아 진로도(검은 실선). 태풍 에위니아는 7월 9일 18시경 이어도 기지 오른쪽을 통과하였음.

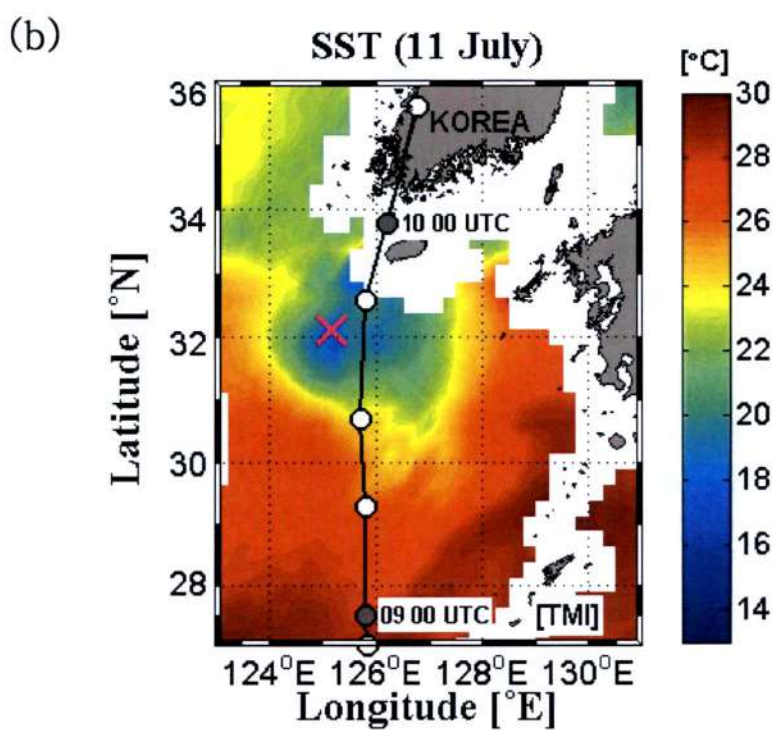
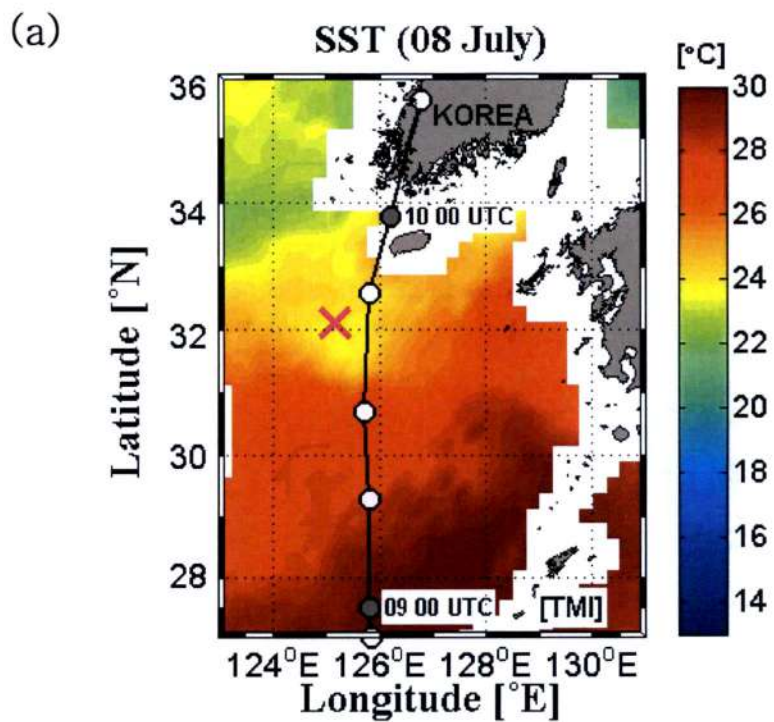


그림 3-4-2. 태풍 에위니아가 이어도 과학기지를 (a)통과 하기 전과 (b)통과한 후의 해수면 온도.

그림 3-4-2는 이어도 과학기지 통과 전(그림 3-4 2a) 통과 후(그림 3 4-2b)의 해수면 온도 자료이다. 이 그림은 TMI(TRMM Microwave Imager) 3일 합성 자료를 사용하여 구해졌다. 그림에서 태풍 에위니아 통과 후에 이어도 관측기지 근처에서 약 5℃ 가량의 해수면 냉각이 관측되었다. 이 시기에 태풍의 강도가 약했고 이동속도가 빨랐다는 점을 고려하면 이 시기에 발생한 표층냉각은 특별한 기작에 의해 일어난 것으로 사료된다. 본 연구에서는 태풍 에위니아 시기에 이어도 관측 기지에서 관측된 기록적인 수온냉각의 원인을 수치모델과 관측 결과를 이용하여 조사하였다.

2) ROMS 모델을 이용한 태풍 통과 시 해양반응조사

본 연구에 사용된 수치모델은 수평, 수직방향의 3차원 ROMS(Regional Ocean Model Systems)로 도메인은 위도 29°N에서 43°N, 경도 118°E에서 130.5°E까지이며 수평해상도는 1/10°, 수직적으로는 20개의 level로 구성되었다. 모델 수심은 Korea bathymetry 30 자료와 ETOPO5자료를 사용하였다. 해양의 초기조건은 WOA2001(World Ocean Atlas, 2001)의 수온, 염분 자료를 10년 동안 적분하여 안정화시킨 값을 사용하였다. 외력으로 사용된 바람은 태풍이 모델 도메인에 들어오기 전까지는 QuikSCAT의 일평균 바람을 사용하였고 태풍이 도메인에 들어오는 시점부터는 RSMC(Regional Specialized Meteorological Center)에서 제공하는 태풍의 위치, 중심기압, 최대풍속의 정보를 이용한 Holland(1980)의 식으로 부터 바람장을 구하여 사용하였다(그림 3-4-3).

그림 3-4-4는 이어도 기지에서 관측한 여러 해양기상 요소들(수온, 바람, 기압, 조위)과 모델 재현 결과(수온, 조위)의 시계열을 비교한 그림이다. 7월 9일과 10일 사이 바람은(그림 3-4-4b) 태풍의 영향으로 최대 33.2m/s 까지 불었으며 방향은 남서풍계열에서 차차 반시계 방향으로 바뀌었다. 또한 이때 관측된 최저기압은 최저 967hPa로 RSMC에서 발표한 975hPa보다 낮은 값 이었다. 모델 검증을 위해 표층수온과 조위 변화를 비교해본 결과(그림 3-4-4a, c) 모델결과가 이어도 관측결과와 비교적 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.

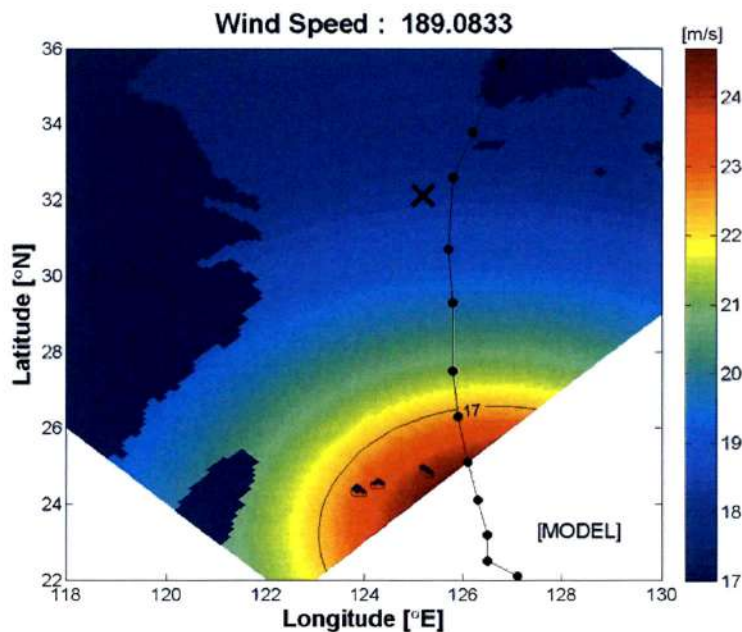


그림 3-4-3. 본 연구에 사용된 수치모델의 도메인 및 모델에 입력된 바람장의 모습.

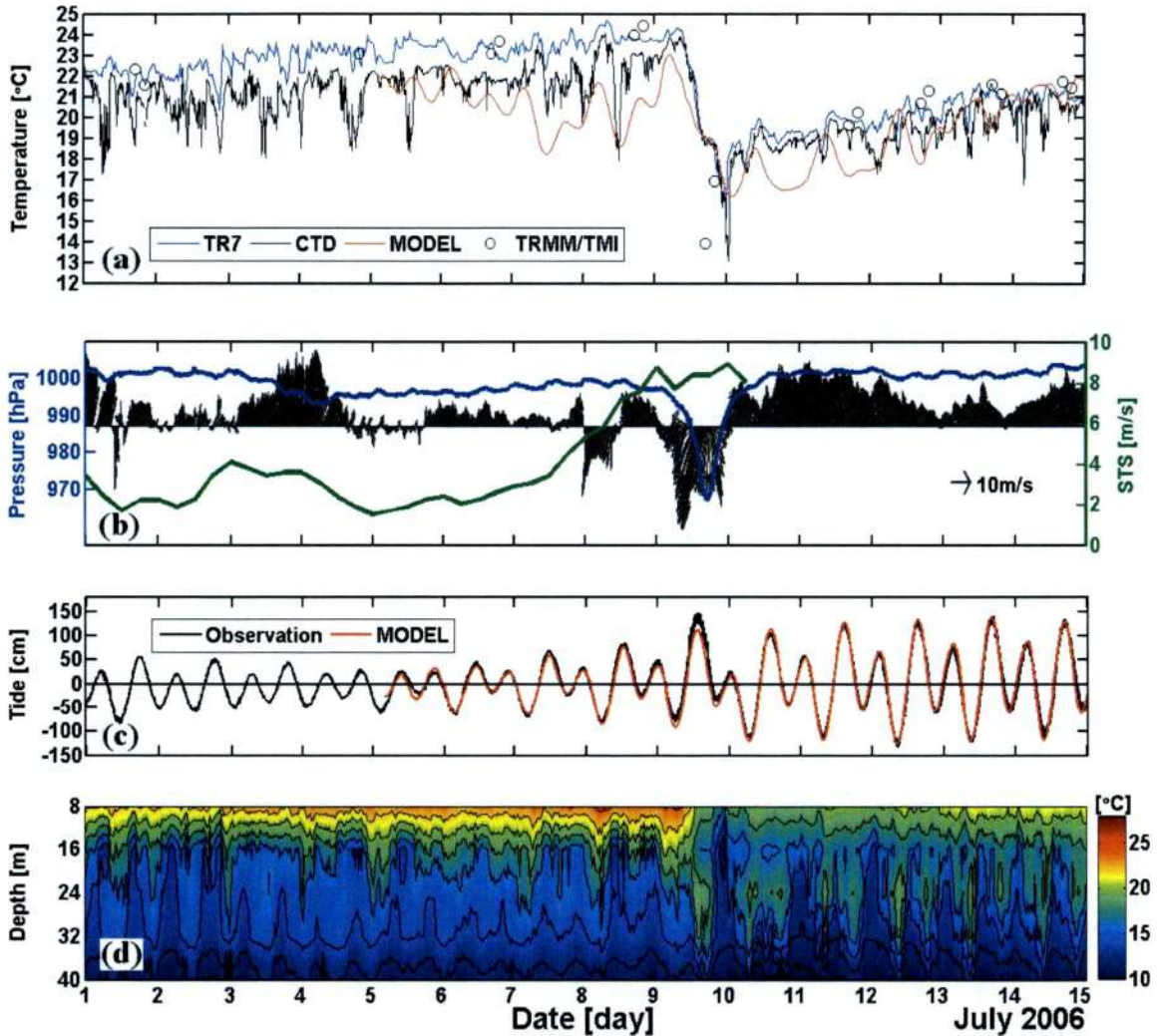


그림 3-4-4. 2006년 7월 1일부터 15일까지 태풍 에위니아의 통과 시기에 관측과 모델로부터 모의된 여러 해양 및 기상 요소들의 시계열 변화. (a) 수온. 여기서 검은 실선은 이어도 기지에서 관측된 수심 8m TR7과 10m CTD자료, 빨간 점선은 4m 수치모델자료 그리고 원표시는 TRMM/TMI의 표층 수온 daily 자료이다. (b) 이어도 기지에서 관측된 바람과 기압 (파란실선), 그리고 초록색 실선은 태풍의 일생동안 RSMC best자료를 기반으로 6시간마다 계산한 이동속도를 표현하였다. (c) 조위. 여기서 검은 실선은 차세대초음파 조위계를 사용하여 관측된 것이고 빨간 실선은 모델 결과이다. (d) 이어도기지에서 관측된 TR7의 깊이별 수온변화.

모델에서 재현한 해수면 냉각의 공간적인 분포(그림 3-4-5d)를 살펴보면 위성관측 결과(그림 3-4-5b)와 비교적 일치하는 모습을 볼 수 있었다. 이어도 기지 주변의 해수면 온도가 주변지역과 비교적 비슷하다는 점을 감안하면(그림 3-4-5a) 이어도 기지 해역은 혼합층의 깊이가 얕으며 수온약층에서의 온도 기울기가 급하다는 것을 추론해볼 수 있다. 이러한 해양구조는 태풍에 의한 해수 혼합 시 표층냉각을 크게 발생 시킬 수 있다.

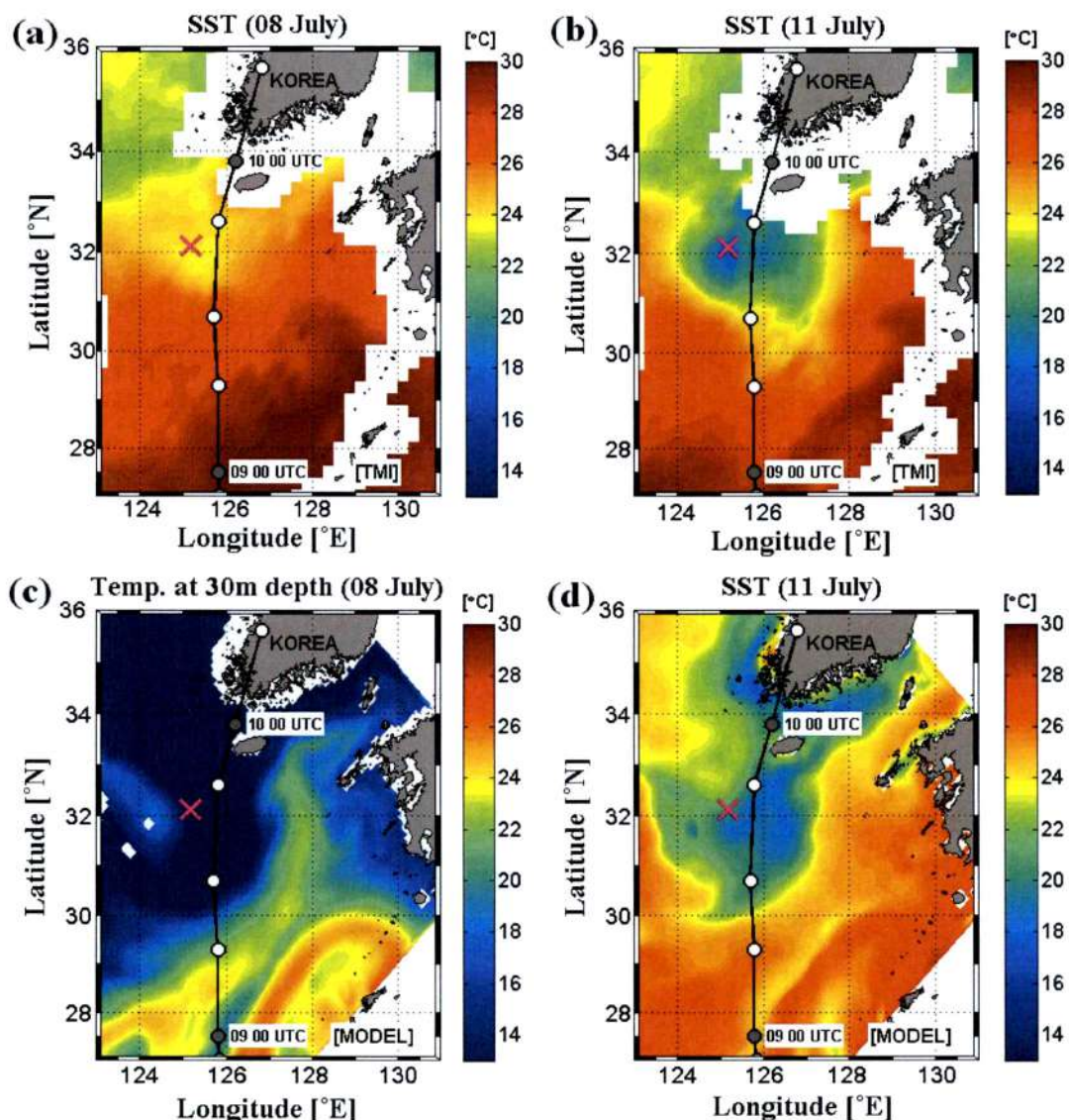


그림 3-4-5. 태풍 에워니아 통과 전후 해수면 온도. (a) 이어도 과학기지 통과 전 7월 8일 해수면 온도 위성 관측자료. (b) 이어도 과학기지 통과 후인 7월 11일 위성관측자료. (c)는 (a)와 같은 시간 수치모델에서 모의된 수심 30m 수온분포도. (d)는 (b)와 같은시간 수치모델에서 모의된 해수면 온도.

조석은 수온의 주기적인 변동을 일으킨다. 그림 3-4-4d를 보면 태풍이 영향을 주기 전에도 상층수온이 주기적으로 등락을 하는 것을 보이며 이는 조석의 영향이라 볼 수 있다. 본 연구에서는 수치실험을 통해 이어도 관측기지에서 관측된 기록적인 해수냉각에 있어 조석이 미친 영향을 분석해 보았다. 수행한 실험은 총 세 가지, 즉 control실험(조석+바람), 조석효과를 넣지 않은 경우(실험1), 태풍바람을 넣지 않은 경우(실험 2)로 나눠서 실험을 진행하였다. 실험 1과 2는 조석과 바람의 유무에만 관련 있는 실험으로 나머지 조건은 모두 동일하다.

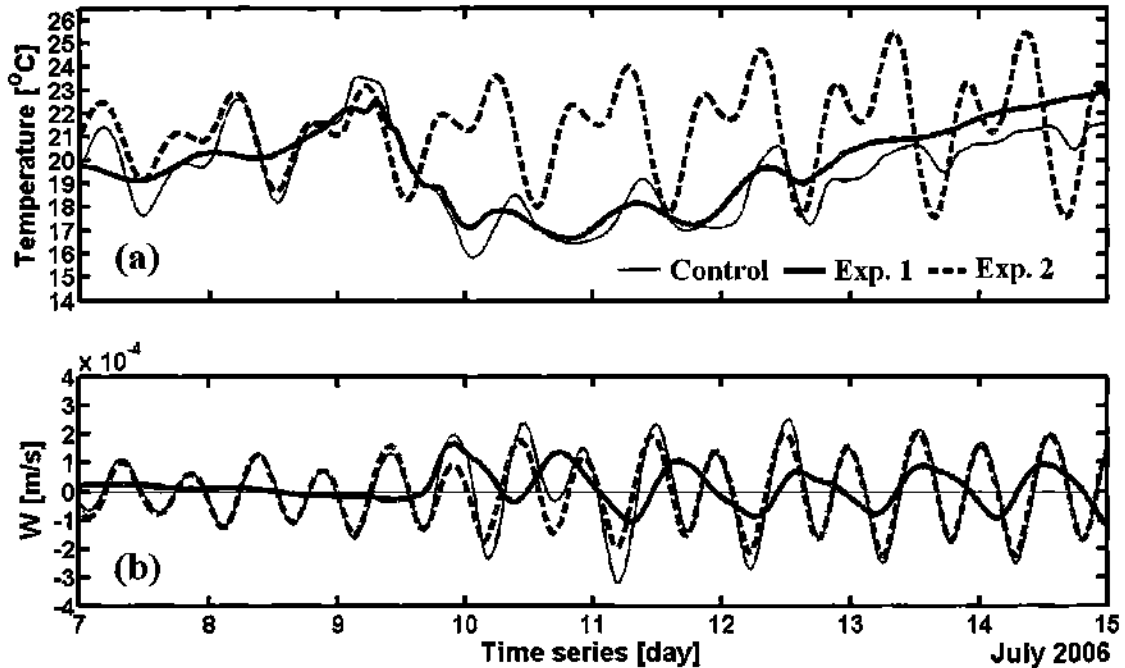


그림 3-4-6. 세 경우의 수치모델결과 비교. (a) 4m에서 수온 냉각 정도 (b) 30.5m에서 모델에서 얻은 W vector. 검은 실선은 control, 회색 실선은 실험 1 그리고 회색 점선은 실험 2를 나타내었다.

그림 3-4-6a는 모델에서 모의된 이어도 기지에서 4m수심 수온의 시계열을 나타낸 것이다. 검은색 실선은 control case, 회색실선은 실험1, 회색 점선은 실험2를 나타낸다. control 실험에서 가장 큰 크기의 해수냉각이 재현되었으며 이 값은 실험1 보다 약 1.4°C 큰 크기의 냉각이다.

수직해류속도는 해수냉각에 있어서 하층의 찬물을 상층에 공급한다는 점에서 아주 중요하다. 따라서 조석에 의한 수직 해류속도변화를 알아 보기위해 이어도 지점에서의 수직 속도(w)를 조사해 보았다(그림 3-4-6b). 실험1과 실험2의 결과를 살펴보면 바람에 의한 용승의 크기보다 조석에 의한 용승의 크기가 크다는 것을 알 수 있었으며 9일 22시 실험1과 실험2의 w값의 위상이 같음을 알 수 있다. 이 시점은 이어도 지점에서 최대해수 냉각이 일어난 시점과 동일하다. 따라서 이어도 기지에서 기록적인 수온냉각은 바람에 의한 효과와 조석에 의한 효과가 겹쳐져 나타난 것으로 사료된다.

그림 3 4 7는 최대 해수냉각이 일어난 시점인 7월 9일 22시경 각 실험에서의 이어도 주변 수평·수직적 수온 분포 및 바닥 해류를 나타낸 것이다. 지형은 이어도 기지 서쪽이 높으며 동쪽으로 갈수록 완만하게 경사가 저 있다. 세 실험에서 바닥해류를 살펴보면 세 실험 모두에서 북서쪽으로 향하는 것을 볼 수 있다. 이는 수심이 얇은 이어도 서쪽방향으로 차가운 바닥 해수가 지형을 타고 오르는 것으로 이 현상에 의해 수직 해류가 강해졌을 것이라 생각된다. 따라서 조석에 의한 효과, 태풍 바람에 의한 효과, 그리고 지형의 효

과가 중첩이 되어 더 강한 하층해수의 용승을 유도하였을 것이라 생각되며 이는 기록적인 해수냉각의 주요원인으로 생각되어진다.

한편, 남중국해 해역에서 발생한 태풍 Kai-Tak 시기에 발생한 강한 표층냉각은, 용승을 유발하는 지형 때문에 태풍에 의해 발생한 해류가 해안을 따라 이동하고 그 후 강한 대기외력에 의해 지형을 따라 바닥흐름이 위쪽으로 향해 발생한 것으로 보고하였다 (Tseng et al., 2010). 그림 3-4-6과 그림 3-4-7에서 볼 수 있듯이 이어도 기지는 경사면에 위치하기 때문에 용승을 유도하는 지형이라 할 수 있으며 따라서 태풍 에워니아 시기에 관측된 기록적인 해수 냉각에도 영향을 충분히 주었으리라 사료된다.

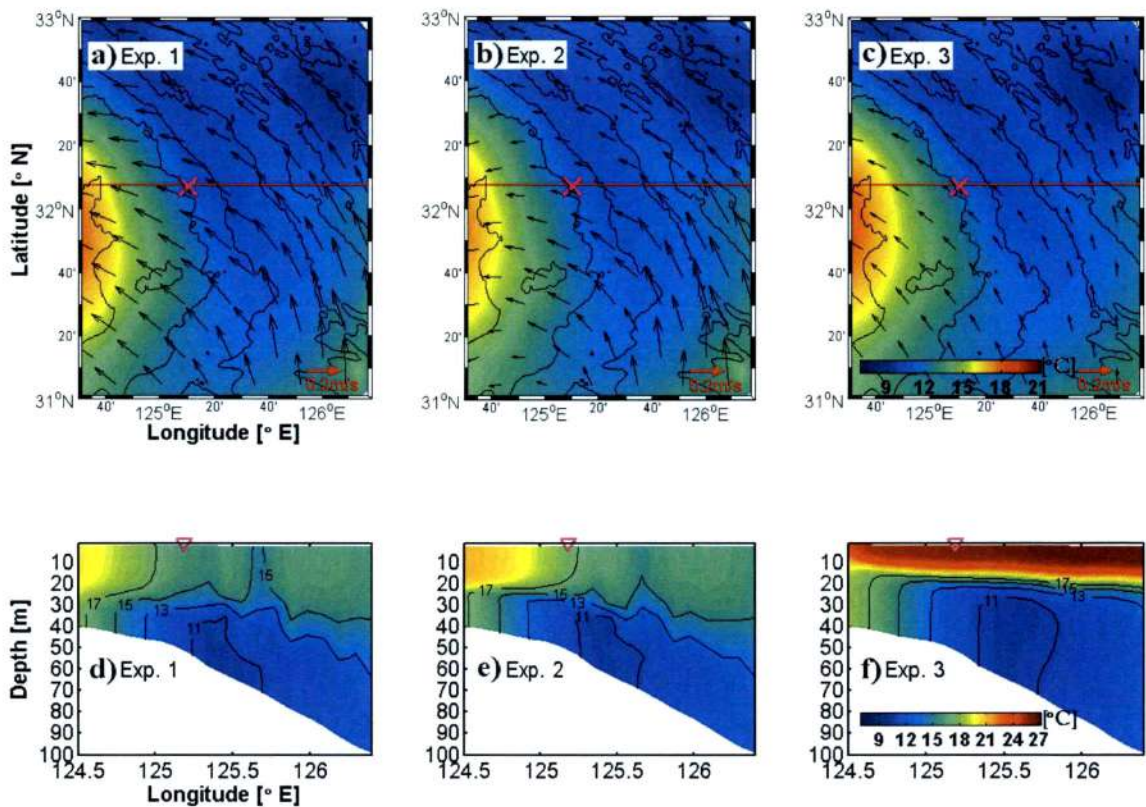


그림 3-4-7. (a-c) 7월 9일 22시의 수치모델에서 얻은 이어도 기지 주변의 바닥 흐름, 수온과 지형(X표시, 역삼각형은 이어도 기지). 등고선은 수심을 나타내고 10m 간격으로 표시되었다. (d-f)는 (a)에서 빨간 선으로 표시한 이어도 지점에서 같은 위도에서의 7월 10일 2시의 수온단면을 나타내었다.

(2) WRF 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍의 해양-대기 상호작용 연구 및 모델 검증

1) WRF 모델에서 보거싱 기법을 이용한 태풍 초기 조건 개선

가. Lanczos filtering (Removal of analyzed vortex)

태풍초기 조건을 개선하기 위해 GFDL hurricane 모델에 사용된 보거싱 기법(Kurihara et al., 1995)을 적용하였다. 우선 모조 태풍이 삽입된 보거싱 필드를 만들기 위한 첫 번째 단계로 초기장에서 잘 못 분석된 태풍성분을 제거하였다. 이때 태풍의 보거싱 영역은 단파 성분의 바람장에서 찾는데 이를 위해서 850hPa의 바람장에 공간 필터링을 적용하여 10° 이하의 단파를 제거하기 위하여 Lanczos filtering(Claude E. D., 1979)을 사용하였다. 공간 필터링은 모델 수행 과정 중에서 ungrib 프로그램 수행이후 degrib된 1°× 1° 데이터에 적용하였으며 Response function R(f)는 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{R_n}(f) = \sum_{k=-n}^n \overline{w_k} \exp(i2\pi f k \Delta) = \overline{w_0} + 2 \sum_{k=1}^n \overline{w_k} \cos 2\pi f k \Delta$$

$$\overline{w_k} = \frac{\sin 2\pi f_c k}{\pi k} \frac{\sin \pi k/n}{jk/n},$$
$$k = \dots, -1, 0, 1, \dots$$

10° 이하의 단파를 제거하기 위하여 경험적인 방법에 의하여 n=35, fc=17로 정하였다 (그림 3-4-8). 위에서 정의한 response function에 의한 공간 필터링 결과를 그림 3-4-10에 나타내었다. 그림 3-4-9는 공간 필터링 하기 전의 중간 도메인 (Domain 2)에서의 850hPa 바람장이며 공간 필터링 이후의 850hPa 바람장(그림 3-4-10)에서는 단파 성분이 거의 제거된 smooth한 모습을 확인 할 수 있다. 그림 3-4-11은 단파성분의 바람장이며, 그림 3-4-10과 그림 3-4-11을 더하게 되면 최종적으로 그림 3-4-12가 생성 된다 .

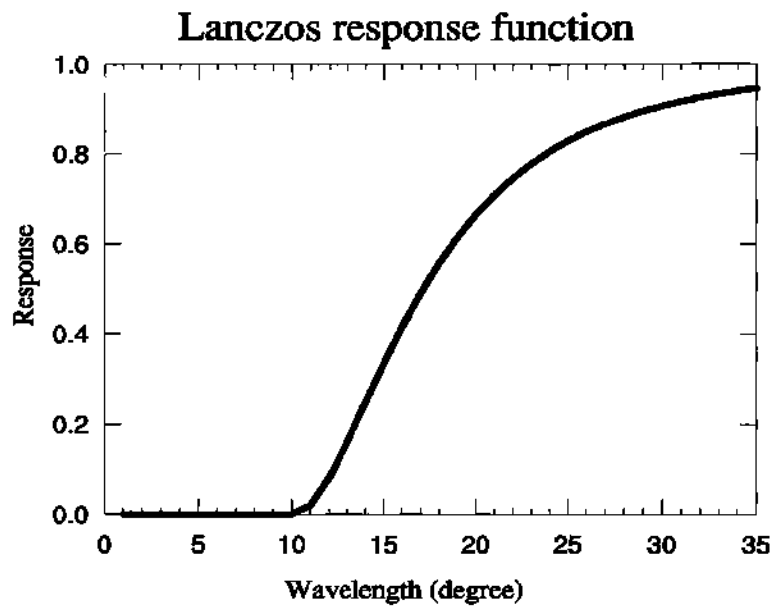


그림 3-4-8. Response function used in this model

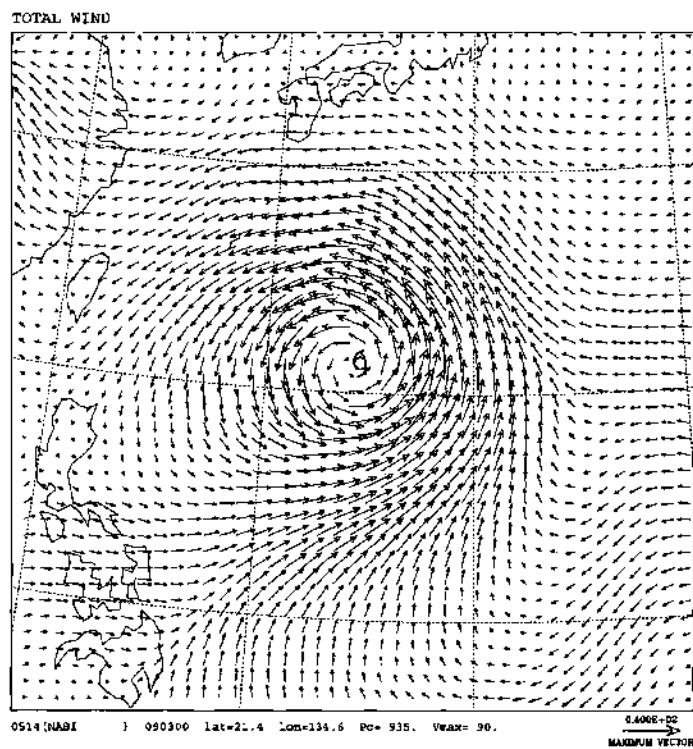


그림 3-4-9. 850hPa total wind field of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 before filtering.

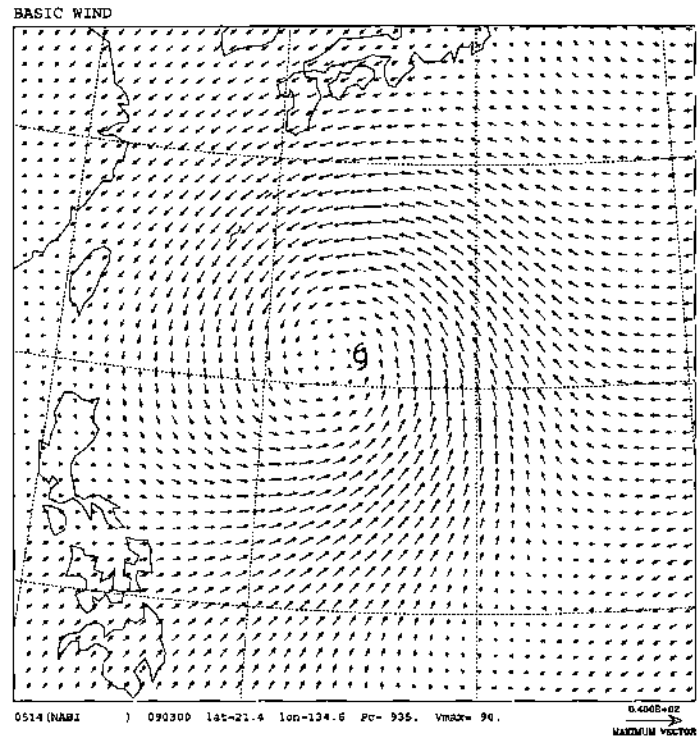


그림 3-4-10. 850hPa basic wind field of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 after filtering.

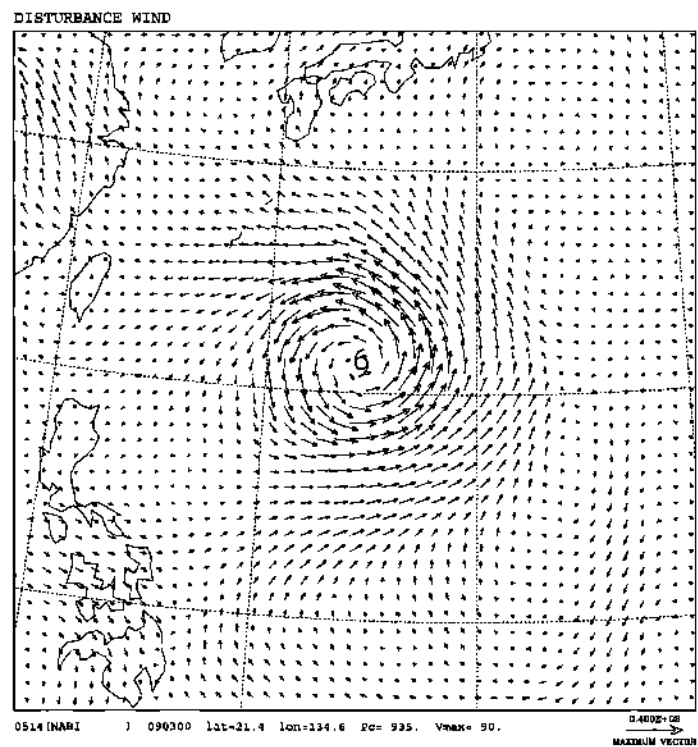


그림 3-4-11. 850hPa disturbance wind field of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 after filtering.

나. 태풍영역 결정 (The filter to remove an analyzed vortex)

ungirb 프로그램 수행이후 생성된 데이터에 lanczos 방식의 공간필터링을 수행하여 10도 이하의 단파성분 바람장을 구하였다(그림 3-4-11). Lanczos 필터링 이후 metgrid 프로그램 수행으로 simulation domain에 맞춰 내삽 하였으며 이중 도메인 2의 데이터에 보거싱을 수행하였다. 새로운 vortex로 바꾸기 위한 태풍영역은 단파 성분의 바람장에서 찾는다. 필터영역을 결정하기 위해서는 먼저 필터 중심을 찾는데 필터중심은 먼저, first guess를 구하고 이 점을 중심으로 다시 재확인해야 한다. 보고된 태풍 중심위치에서 가장 가까운 격자점으로부터 동·서 방향으로 각각 600km, 남·북 방향으로도 각각 600km의 범위 즉 보고된 태풍의 위치를 중심에 두고 1200km×1200km의 영역에

$$\lambda^*_0 = \frac{\sum w_{i,j} V_{D,i,j} \lambda_{i,j}}{\sum w_{i,j} V_{D,i,j}}, \quad \phi^*_0 = \frac{\sum w_{i,j} V_{D,i,j} \phi_{i,j}}{\sum w_{i,j} V_{D,i,j}}$$

를 적용하여 구한다. 여기서 $w_{i,j}$ 는

$$w = \begin{cases} 1 & \text{for } r \leq 200 \text{ km} \\ e^{-(r/D)^2} & r > 200 \text{ km} \end{cases}$$

V_D 은 풍속, λ , ϕ 는 각각 경도와 위도를 말한다. 이렇게 구한 first guess 위치를 중심에 두고 780×780km 영역 내의 모든 격자점에서 동경방향의(radial) 함수로서의 방위각 방향으로(azimuthally) 평균된 접선성분의 바람을 구한다. 동경방향으로는 660km의 범위까지 20km 간격으로 구하였으며 이렇게 하여 동경의 함수로서의 평균 접선성분의 바람장을 조사해보면 분석 바람장에서의 최적 태풍위치에서 평균접선성분 바람이 가장 큰 값을 보였다. 따라서 평균접선바람이 가장 큰 값을 나타내는 격자점을 필터영역의 중심으로 결정하였다. 그 다음은 tangential wind를 사용하여 24 방위 별로 필터반경(r_f)을 결정하는데, 필터영역은 필터중심으로부터 24방위의 각 방향으로 구한 24개의 경계점의 내부로 결정됨. 필터반경을 찾는데 시작반경(starting radius)으로부터 10km 간격으로 찾았다. 시작반경은 다음의 방식으로 결정하게 된다.

- 방위각 평균 $\bar{v}_{\tan}(r)$ 를 구한다.
- $\bar{v}_{\tan}(r)$ 에서 $\bar{r}_{\max}$ 와 $\bar{r}_f$ 를 구한다.
- $r_a = a \bar{r}_{\max}$, $r_b = b \bar{r}_{\max} + (1-b) \bar{r}_f$
 $a = 0.5, b = 0.75$
- 방위각 매 15도 마다 최대풍속 반경 $r_m(\theta)$ 을 찾는다.
- starting radius 는 $1.1 r_m(\theta)$ 을 한다.

다음으로 필터반경을 결정하는 데는 다음의 3가지 요건을 충족하는 $r_f(\theta)$ 를 구한다.

(a) $v_{\tan} < 7.5 \text{ ms}^{-1}$ 그리고 $-\frac{\partial v_{\tan}}{\partial r} < 4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 를 동시에 만족하는 2번째 경우

(b) $v_{\tan} < 3 \text{ ms}^{-1}$

(c) 상기 2 조건을 만족시키는 경우가 1200 km까지 발견되지 않을 때는 $r_f(\theta) = 1200 \text{ km}$.

이렇게 각 방향별 필터반경 $r_o(\theta)$ 이 구해지면 최종 필터반경 $r_f(\theta)$ 는 $r_o(\theta) = 1.25 r_f(\theta)$ 로 하며 혹 $r_f(\theta) < r < 1.25 r_f(\theta)$ 범위에서 접선바람이 음의 값을 보이면 음의 값 바로 직전의 지점을 최종필터영역 $r_o(\theta)$ 으로 한다.

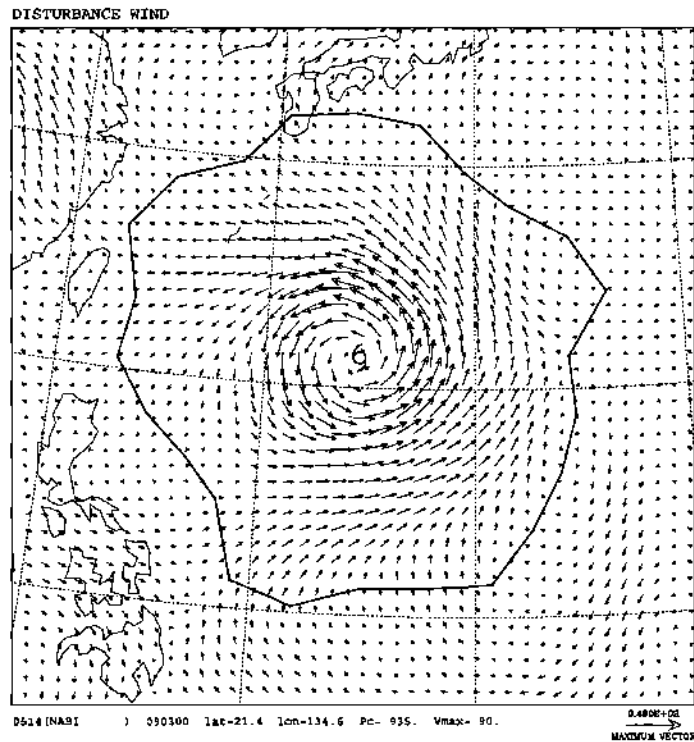


그림 3-4-12. The filter to remove an analyzed vortex in 850hPa disturbance wind field of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 after Lanczos filtering.

다. 태풍 영역 내 비태풍 성분 바람장 재현

태풍영역이 결정되면, 초기 입력장으로 사용되는 전구분석장에서 실제보다 약하게 모의된 태풍 성분을 제거해야한다. Lanczos filtering으로 생성된 disturbance field에서 태풍영역 안의 값들을 제거 하면 태풍영역 안에 있는 다른 성분의 단파들, 즉 태풍과 상관없는 단파들도 함께 제거될 수 있다. 따라서 함께 제거된 비태풍 성분들을 다시 추정해 내야하는데 태풍 영역 안에 있는 단파 성분 중에 태풍과 관련된 부분은 거의 태풍의 눈을 중심으로 형성되어 있을 것이고, 비태풍 성분은 중앙부분보다는 바깥부분의 다른 현상들과 연계되어있으므로 이 값들은 24개의 태풍 필터 영역 경계점에 있는 값들을 가지고 내삽을 통해 추정해 낼 수 있다.

Gandim(1963)의 optimum interpolation 방식을 사용해서 이 값들을 추정해 내는데 이 방법은 거리에 따른 가중함수를 구하여, 24개의 경계 점 값들로 영역 안쪽의 값들을 추정한다. 이렇게 하면 가장 가까운 격자점이 가지고 있는 값들의 영향을 가장 많이 받게 된다. 그림 3-4-13은 850hPa의 교란장에서 태풍영역 안의 단파성분을 제거한 후에 24개의 격자점이 가지고 있는 값들을 이용해서 비태풍 성분을 재생산 한 모습을 나타내고 있다.

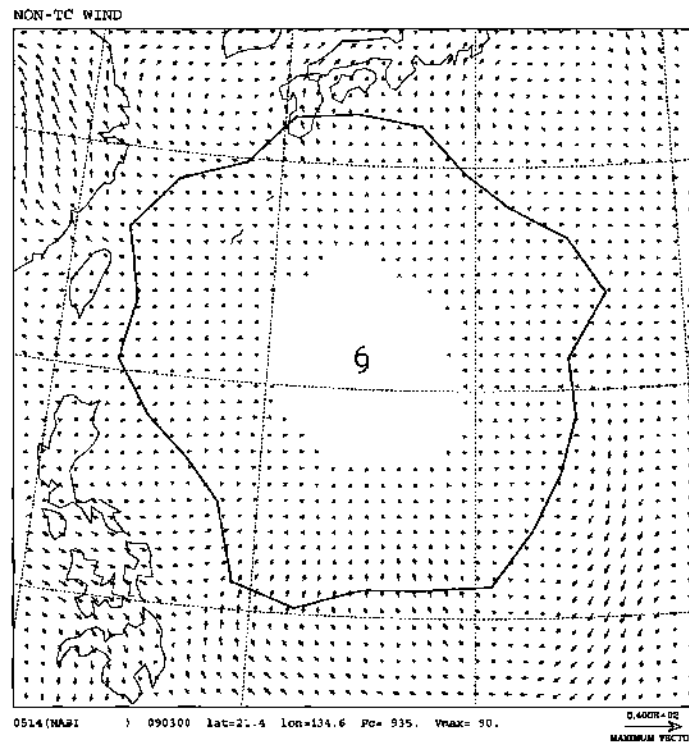


그림 3-4-13. 850hPa disturbance wind field removed TC component on inner filter area of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 after Lanczos filtering.

라. 모조태풍 바람장 생성

태풍성분을 제거한 영역에 새로운 모조태풍을 만들어 넣어야 하는데 여기서는 태풍분석기관인 RSMC Tokyo에서 보고되는 태풍정보를 사용하여 새로 구성된 축대칭 태풍으로 대체하였다. 사용되는 태풍정보로는 최대풍, 중심시도, 50kt 풍속반경, 30kt 풍속반경 등이 있다. 태풍을 구성하려면 최대풍 반경이 필수적인데 태풍분석기관인 RSMC Tokyo나 JTWC Hawaii에서는 최대풍속반경을 보고하지 않는다. 따라서 Holland(1980)의 경험식을 사용하여 최대풍속반경을 추정해 내야한다. Holland에 의하면 태풍주변의 반경에 따른 지상기압의 변화는

$$A = r^B \ln \left(\frac{p_n - p_c}{p - p_c} \right)$$

의 경험식으로 표현할 수 있다. 여기서 A와 B는 태풍의 구조를 결정할 상수다. 태풍의 중심부근에서는 바람과 기압이 선형풍관계에 있다고 볼 수 있으므로

$$V_c = \left(\frac{AB(p_n - p_c) e^{-\frac{A}{r^B}}}{\rho r^B} \right)^{1/2}$$

으로 중심부근의 바람을 가정한다. 여기서 ρ 는 밀도이고, p_c 는 중심시도, p_n 은 외곽의 기압이며 여기서는 1000hPa로 정하였다. 최대풍 반경 r_m 에서 $\frac{dV_c}{dr} = 0$ 으로 간주할 수 있으므로

$$r_m = A^{1/B}$$

의 관계를 얻을 수 있다. 그리고 최대풍은

$$V_m = \left(\frac{B}{\rho e} (p_n - p_c) \right)^{0.5}$$

로 구할 수 있으며, 따라서 태풍구조를 결정하는 인자 중 하나인 B는 최대풍속, 외곽과 태풍중심 간의 기압차로서 결정된다. 실제적용에 있어서 B의 하한값으로서 Holland(1980)는 $B = 1$ 의 값을 제시하였다. 이제 A를 결정하는데 30kt 바람 반경을 사용한다. 30kt 바람은 태풍의 크기를 결정하는 요소로서 대개 중심으로부터 어느 정도의 거리에 떨어져 있다. 외곽에서는 바람과 기압의 관계를 경도풍 관계로 간주할 수 있으므로

$$V_{gr} = \left(\frac{AB(p_n - p_c) e^{-\frac{A}{r^B}}}{\rho r^B} + \frac{r^2 f^2}{4} \right)^{1/2} - \frac{rf}{2}$$

의 바람을 가정한다. 따라서 이미 결정된 B 값과 30kt 반경이 주어진다면 위 식에서 A를 구할 수 있다. 위식은 A에 관해서 명시적으로 구할 수 있는 식이 아니므로 반복법에 의해서 A의 근사해를 구할 수밖에 없으므로 이를 위해서 다음과 같은 Newton-Raphson의 근사해 방법을 사용한다.

$$A^{n+1} = A^n - \frac{f(A^n)}{f'(A^n)}$$

$$f(A) = \left(\frac{AB(p_n - p_c) e^{-\frac{A}{r^B}}}{\rho r^B} + \frac{r^2 f^2}{4} \right)^{1/2} - \frac{rf}{2} - V_{gr}$$

$$f'(A) = 1/2 \left(\frac{AB(p_n - p_c) e^{-\frac{A}{r^B}}}{\rho r^B} + \frac{r^2 f^2}{4} \right)^{-1/2} \frac{B(p_n - p_c)}{\rho r^B} e^{-\frac{A}{r^B}} \left(1 - \frac{A}{r^B} \right)$$

V_{gr} 과 r 은 보고된 30kt와 30kt 반경을 말하며 이렇게 하여 구한 A와 이미 결정된 B를 사용하여 거리의 함수로서의 바람을 구할 수 있다. 선형풍으로 결정된 바람장은 최대풍과 최대풍반경을 나타낼 수 있고, 경도풍 관계식으로 결정된 바람장은 30kt 바람반경을 결정할 수 있다. 중심부근에서는 선형풍 공식을 사용하고 외곽에서는 경도풍 공식을 사용하는데 중간단계는 선형풍과 경도풍에 거리에 따라 차등 가중함수를 주어 외곽으로 갈수록 경도풍에 접근하도록 하였다. 가중함수는 최대풍속반경의 1.2배로부터 2.5배의 거리 사이에 1부터 0까지 선형적으로 감소하는 값으로 주어

$$v_{tan} = v_c w + (1 - w) v_{gr}$$

로 정하였다. 이렇게 해서 중간 영역의 바람장은 기본장 + 태풍성분을 제거한 교란장 + 모조 태풍 바람장으로 새롭게 수정된다. 그림 3-4-14과 그림 3-4-15는 모조태풍 바람성분과 이 바람성분을 태풍성분과 대체한 최종 바람장을 나타내었다.

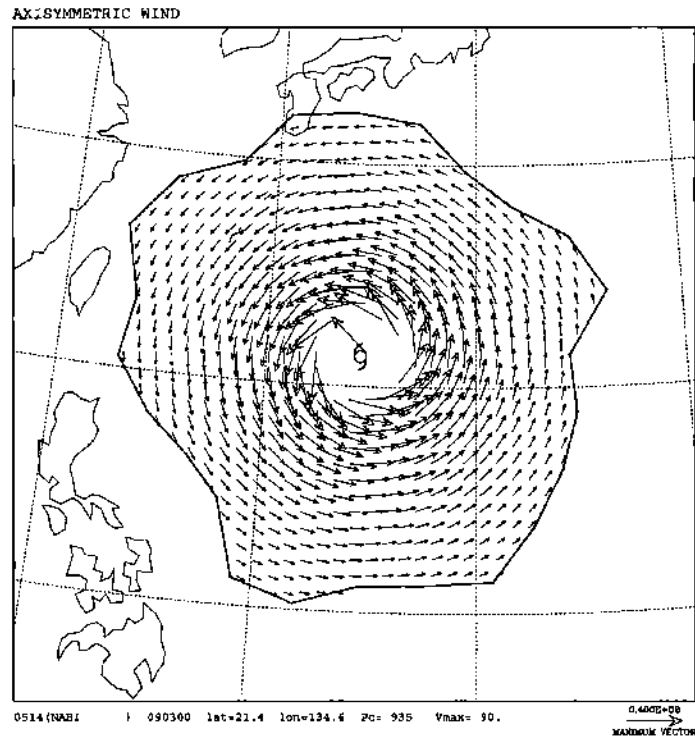


그림 3-4-14. 850hPa axisymmetric wind field in the inner filter area of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 after Lanczos filtering.

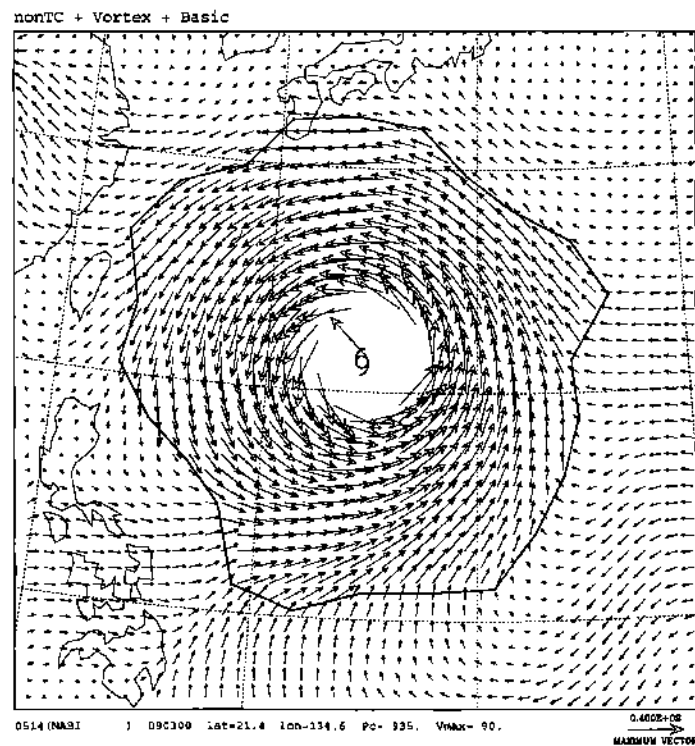


그림 3-4-15. 850hPa artificial vortex wind field of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 after Lanczos filtering.

마. 바람장을 제외한 다른 종관변수의 모조화

바람에 대한 보거싱 작업은 GFDL의 방법을 따라 850hPa에서의 바람장을 가지고 본래 분석되었던 태풍 성분을 제거하고 Holland 방식을 따른 새로운 vortex로 교체하여 이를 3차원으로 구성한다. 이렇게 바람장을 구하고 나면, 샤프하게 태풍을 묘사하는 새로운 바람장과 평활하게 분석된 다른 변수간에 큰 차이가 생기게 된다. 이런 변수들을 바람장의 구조처럼 변화시키는 것이 필요한데, 이때 WRF의 Four Dimensional Data Assimilation(FDDA)을 사용한다. 보거싱된 바람장에만 강제력을 주고 6시간동안 grid nudging을 수행하면, 다른 변수들(sea level pressure, pressure, temperature, water vapor mixing ratio 등)이 바람장의 패턴을 따라가게 된다. 해면기압과 850hPa 바람장(그림 3-4-16)에서 984hPa의 중심기압이 6시간동안의 FDDA 이후에 948hPa로 강해졌다. 그림 3-4-17의 (a),(c),그리고 (e)는 FDDA 이전의 pressure perturbation, temperature perturbation, watervapor mixing ration의 태풍중심에서의 연직구조다. 그림 3-4-17의 (b),(d), 그리고 (f)는 6시간동안의 FDDA를 수행한 이후의 연직구조이며 바람을 제외한 다른 기상요소들도 6시간동안의 grid nudging으로 보거싱 이후의 바람 값(그림 3-4-16b)의 패턴을 따라 변한 것을 확인할 수 있다. 이렇게 함으로써 보거싱 과정은 완료 된다.

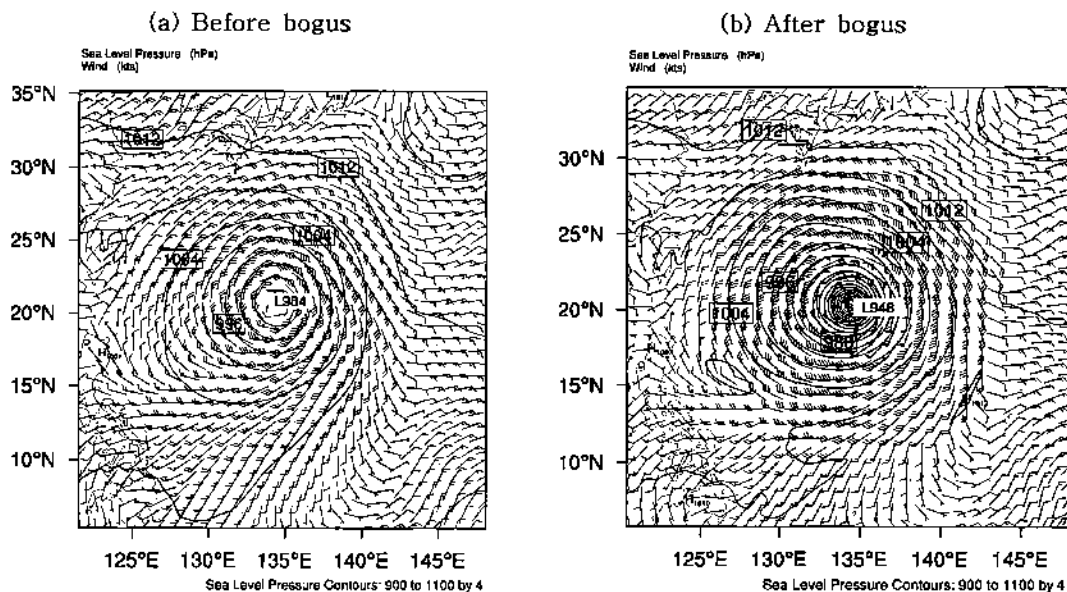


그림 3-4-16. Sea level pressure and wind field of NABI at 00UTC 3 Sep. 2005 in domain 2 (a) before bogus and (b) after bogus

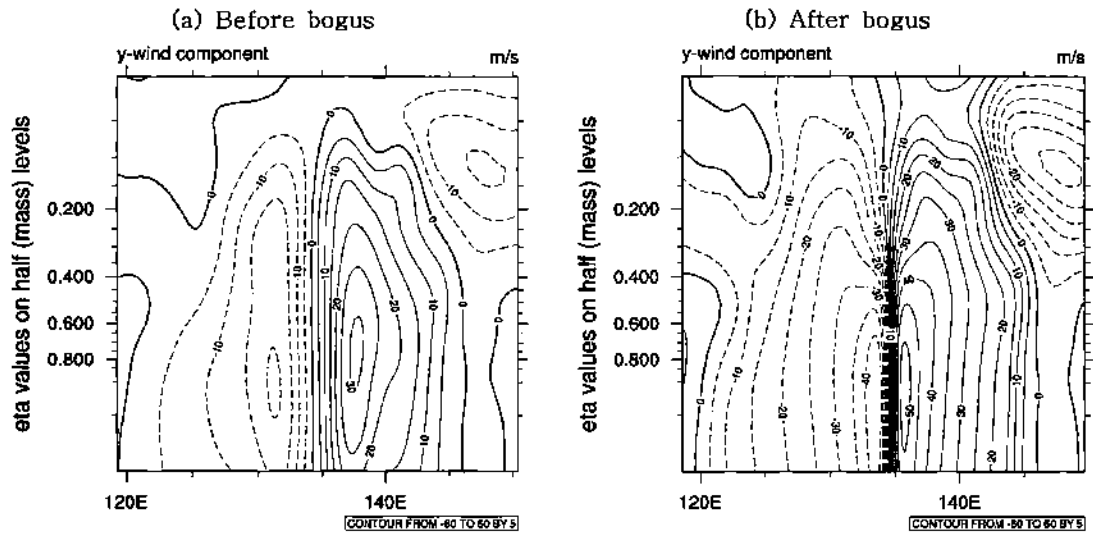


그림 3-4-17. Longitudinal vertical structure of y-wind component near TC center

바. 개선된 초기장을 이용한 과거태풍 재현

본 연구에서는 앞서 소개한 보거싱 기법을 이용하여 만든 개선된 초기장을 사용하여 2003년 14호 태풍 매미를 재현하였다. 모델 초기 시간은 9월 11일 00시로 태풍 매미가 가장 발달한 시점으로 정하였다. 모델 재현 결과, 우리나라에 상륙하기 직전 매미의 강도가 약 962hPa로 실제 관측 결과인 960hPa와 거의 근접한 결과를 얻을 수 있었으며 48시간 진로 오차도 약 70km로 상당히 좋은 결과를 나타내었다.

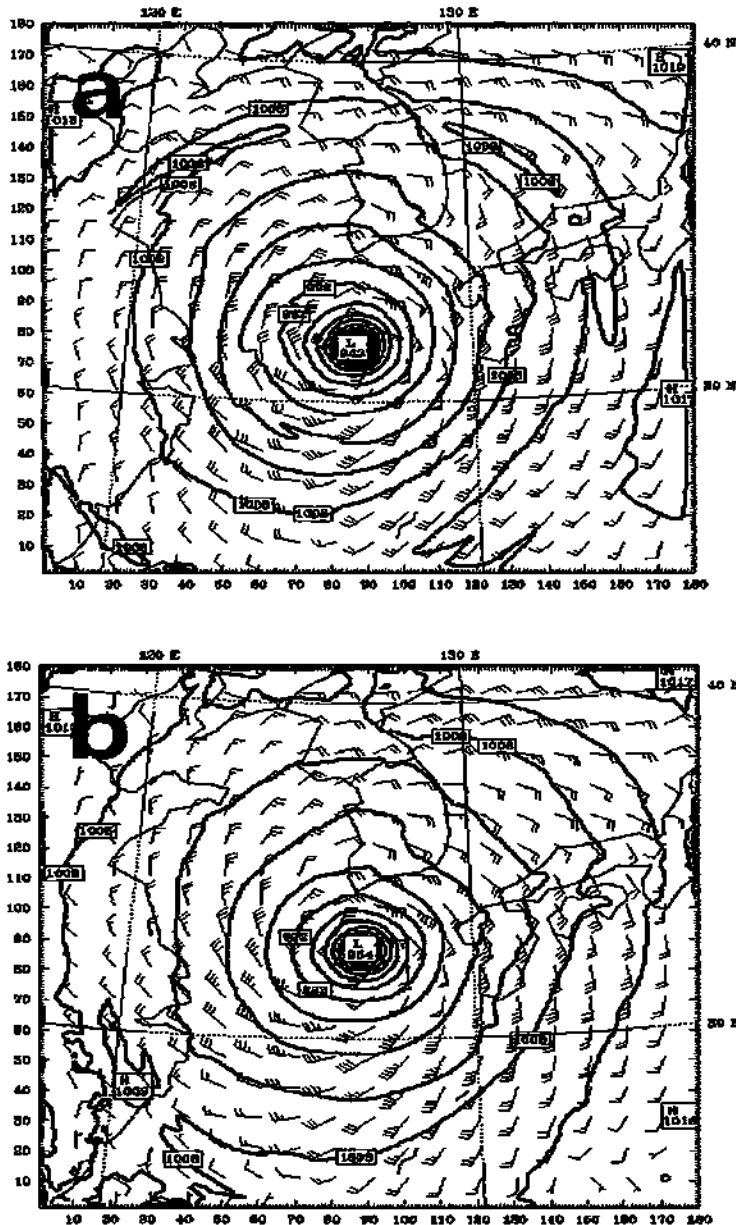


그림 3-4-18. WRF 모델에서 모의된 과거 2003년 9월 태풍 매미. (a)는 2003년 9월 12일 03시, (b)는 06시, (c)는 09시, (d)는 12시, (e)는 15시, (f)는 18시.

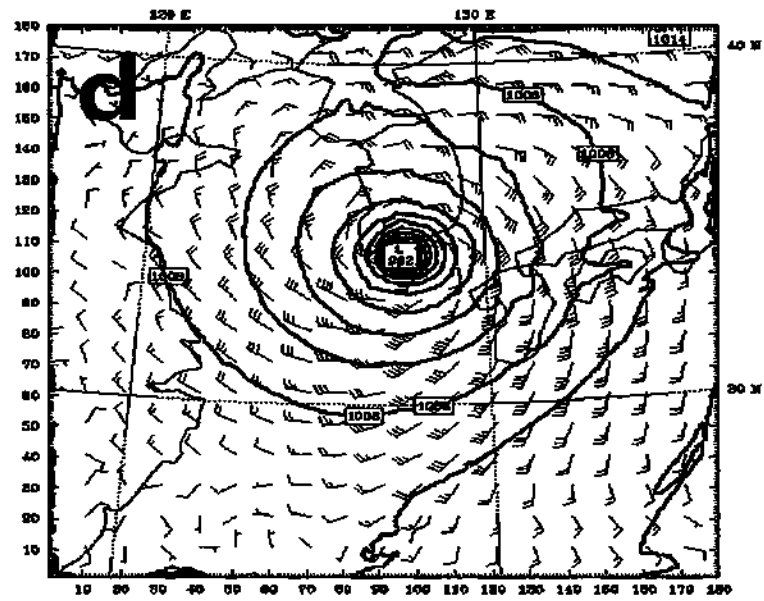
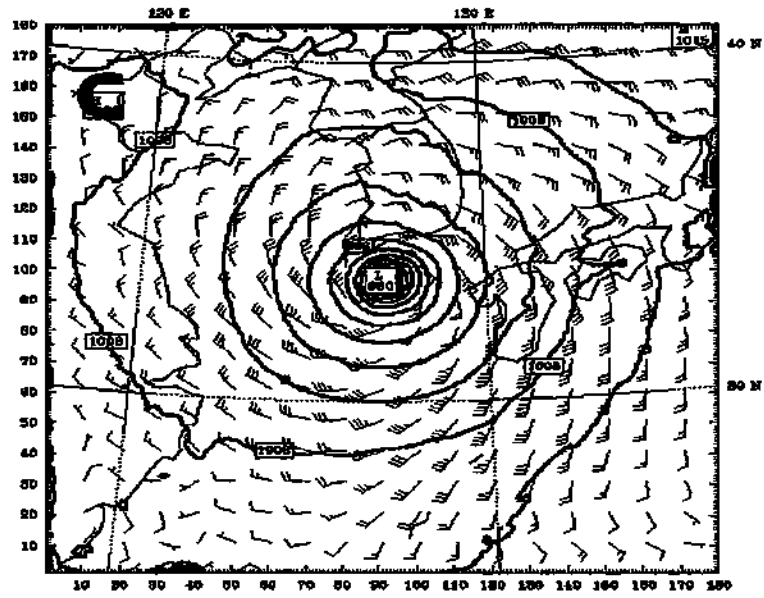


그림 3-4-18. 계속

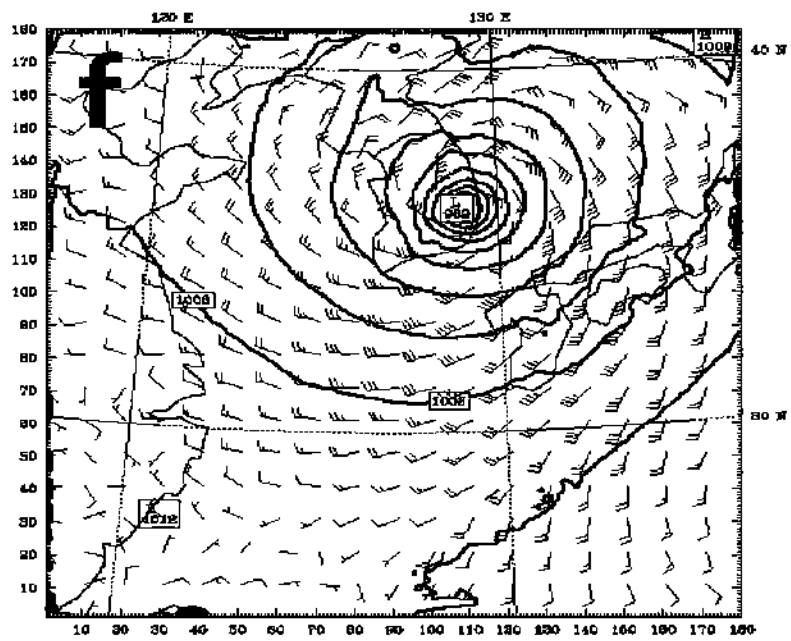
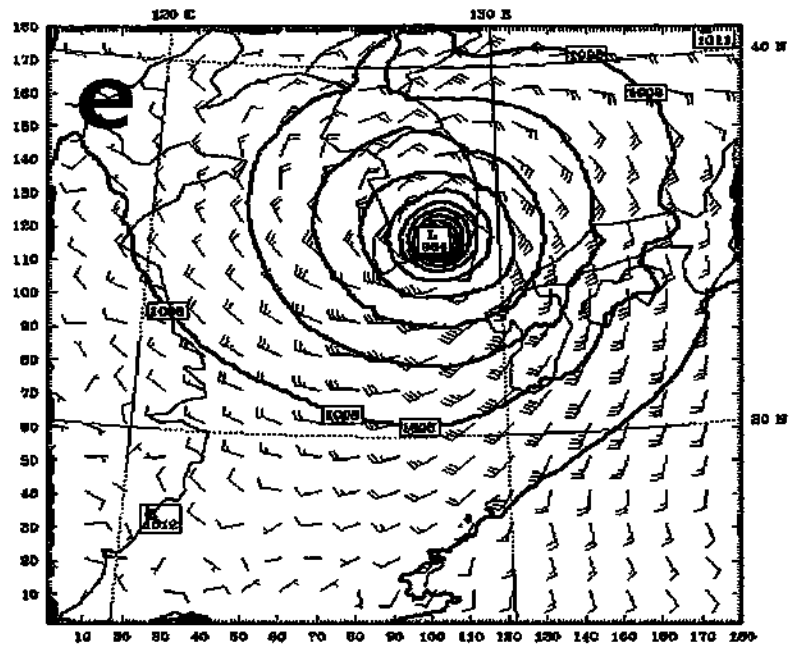


그림 3-4-18. 계속

2) 해수면 온도(SST) 입력자료에 따른 WRF 모델 성능 비교

본 연구에서 사용한 수치모델은 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 중규모 모델인 WRF(Weather Research and Forecasting, Skamarock et al., 2008)이며 버전은 3.2이다. WRF 모델의 초기조건은 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 간격의 NCEP FNL(National Centers for Environmental Prediction Final) 분석자료를 사용하였다. 계산영역은 한반도를 중심으로 27, 9, 3, 1 km 공간 해상도를 갖는 4개의 양방향 둥지격자(two-way nested grid)로 구성하였다. 연직 층은 27개의 층으로 구성하였고, 지형자료는 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 3초 자료, 그리고 지표이용도는 국토해양부에서 생산한 30 m 해상도의 자료를 이용하였다.

본 수치실험에서 대기경계층 모수화는 YSU 방법(Hong and Pan, 1996)과 MYJ(Mellor and Yamada, 1974) 방법을 선택적으로 사용하였고, 지면모델은 Noah(Chen and Dudhia, 2001) 방법을 사용하였다. 아격자 규모 미세물리 모수화 방법은 WSM6(Hong and Lim, 2006) 방법, 적운 모수화는 27 km, 9 km 격자영역에 대해서 New Kain-Fritsch (Kain, 2004) 방법을 이용하였다. 장파복사는 RRTMG 모수화 방법(Mlawer et al., 1997), 단파복사는 Goddard(Chou and Suarez, 1994) 방법을 이용하였다.

표 2. Experimental design for sensitive test using various sea surface temperature in offshore wind simulation.

Name	Type	Resolution [km]
GFS100	The lowest layer of GFS Model	~100 km
RTG50	RTG SST with SST option	~50 km
RTG100	RTG SST with SST option	~9 km
NGSST	New Generation Sea Surface Temperature	~5 km
HYCOM/OML	HYCOM Data Assimilation with Ocean Mixed Layer Model	~9 km

민감도 실험을 위한 사례는 2007년 8월 10일부터 13일이다. 이 시기는 우리나라 동해안의 남쪽 연안을 따라 용승현상이 발생하여 표층에 강한 냉수대가 출현하였다. 또한 한반도 남서해안에서는 강한 조석에 의한 혼합작용으로 연안을 따라 냉수대가 나타났다. 이러한 표층의 냉수대는 여름철 표층 가열로 해수가 매우 안정화(또는 성층화)된 상태에서, 즉 혼합층은 얇고 수온약층의 기울기는 매우 심한 환경에서, 바람 또는 조석에 의한 외력으로 발생한 것이다. 이 기간 동안 온대저기압이 한반도로 접근함에 따라 풍속은 점점 강해져 해양의 수직혼합이 매우 활발하게 일어났다. 따라서 선택된 기간은 해상풍 모의에 있어 해양-대기 상호작용의 영향을 조사하기에 적합한 시기이다.

해상풍 모의에 있어 해수면온도의 민감도를 조사하기 위하여 먼저 다른 공간 해상도를 가지는 4개의 해수면온도 자료를 이용하여 사례 기간 동안 해상풍을 모의하였다(표 1).

그림 3-4-19는 민감도 실험에 사용된 한반도 근해 해수면온도의 공간적인 분포를 나타낸다. 그림에서 위성자료의 내·외삽으로 생성된 GFS, RTG, NGSST 자료는 관측값(AVHRR)에서 나타난 동해안의 용승현상과 서남해안의 조석에 의한 냉수대 등이 재현되지 않았다. 그러나 HYCOM 자료동화 자료에서는 국지적으로 나타나는 뚜렷한 냉수대가 잘 재현되었다.

대부분의 위성자료에서 이렇게 연안 가까이에서 발생하는 국지적인 표층냉각이 잘 재현되지 않는 이유는 연안에서자료의 오염으로 내·외삽을 위한 충분한 자료가 부족하기 때문이다. 이 결과는 NGSST와 같이 자료의 공간 해상도가 높아지더라도 한반도 연안에서 시공간적으로 빠르게 변화하는 해양의 특성을 재현하는 데에는 한계가 있음을 시사한다.

표 1에 제시된 5가지의 경우에 대해 해상풍을 모의해 본 결과, HYCOM을 사용한 경우를 제외하고 모두 비슷한 바람 분포를 보였다. 즉, 본 사례 기간 동안에 해수면온도의 공간적인 해상도 차이는 한반도 연안의 해상풍 모의에 큰 영향을 미치지 못하였다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 WRF 모델에 입력된 해수면온도 자료가 공간적인 해상도의 차이에도 불구하고 분포에 있어 큰 차이를 나타나지 않았기 때문이다. 관측자료와 모델 수행결과를 비교해본 결과, HYCOM 자료동화자료를 사용하여 구해진 해상풍이 전반적으로 관측자료와 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다(그림 3-4-20).

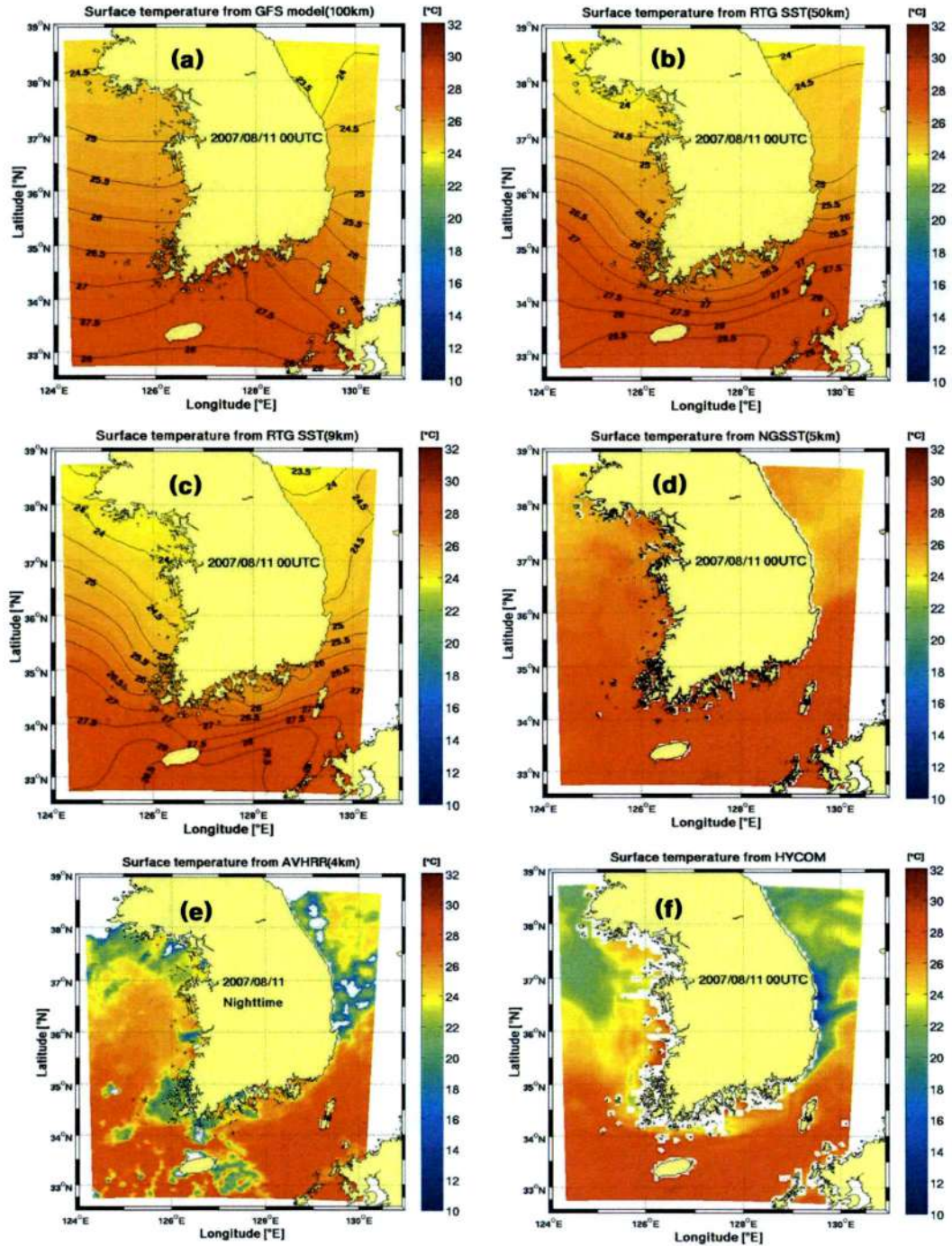


그림 3-4-19. Spatial distributions of various sea surface temperature data used as initial conditions of WRF model: (a) GFS 100 km, (b) RTG 100 km, (c) RTG 50 km, (d) NGSST 5 km, (e) AVHRR 4 km, and (f) HYCOM 9 km.

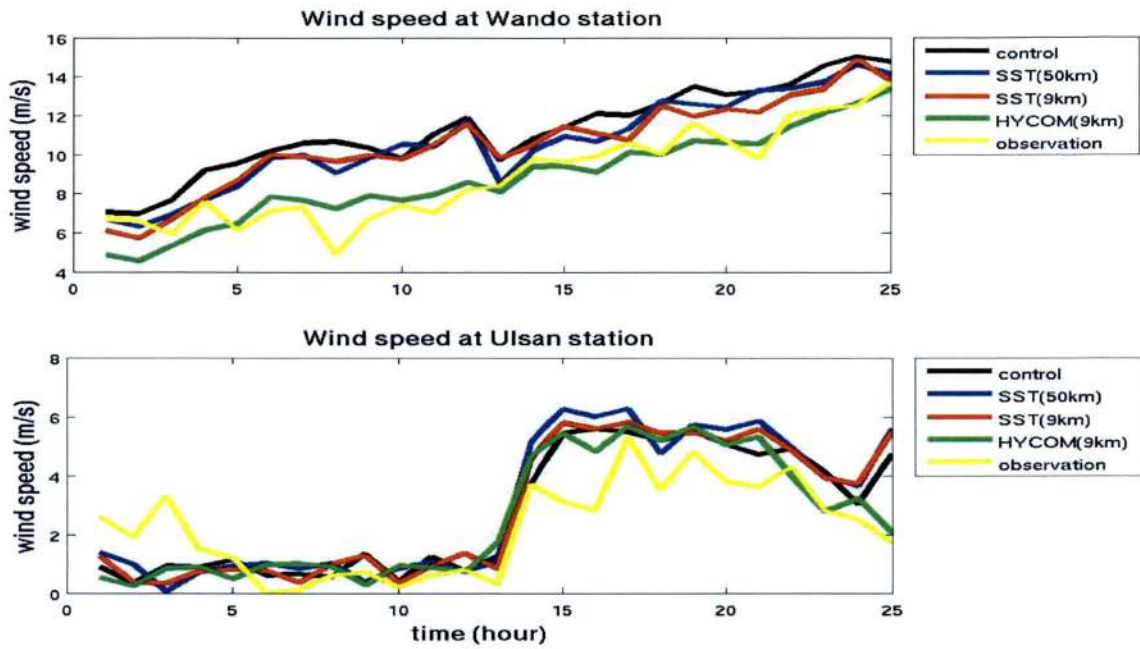


그림 3-4-20. Comparison of simulated wind speed at Wando (upper panel) and Ulsan (lower panel) according to various experiments based on Table 2.

(3) 이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료 분석

1) 2010년 태풍 통과 시기 관측 자료 분석

이어도 과학 기지는 한반도 상륙 태풍의 길목에 위치하고 있으며 여기서 관측된 자료는 태풍예보 및 메커니즘 분석에 매우 유용하게 사용될 수 있다. 과거 2006년 태풍 에위니아를 비롯해서 많은 태풍이 이어도 과학기지를 통과 하였으며 이때 얻어진 자료는 1절에서 연구되어진 태풍에 의한 기록적인 해수 냉각의 원인분석 그리고 태풍 예보 및 연구에 사용되었다.

본 절에서는 올해 2010년 이어도 과학 기지에서 관측되어진 태풍의 사례 분석을 통해 태풍에 의한 해양 반응을 조사하였다. 2010년에는 총 세 개의 태풍이 이어도 과학기지 주변을 통과 하였으며 이 중 2개의 태풍은 한반도에 상륙하였다.

4호 태풍 덴무는 2010년 8월 8일 12시에 대만 동쪽 해상에서 발달하여 이틀 뒤인 10일 18시경 이어도 과학기지 근처를 통과하였다. 이때 중심기압은 985hPa, 최대 풍속은 25m/s로 비교적 약한 강도를 보였다(그림 3-4-21).

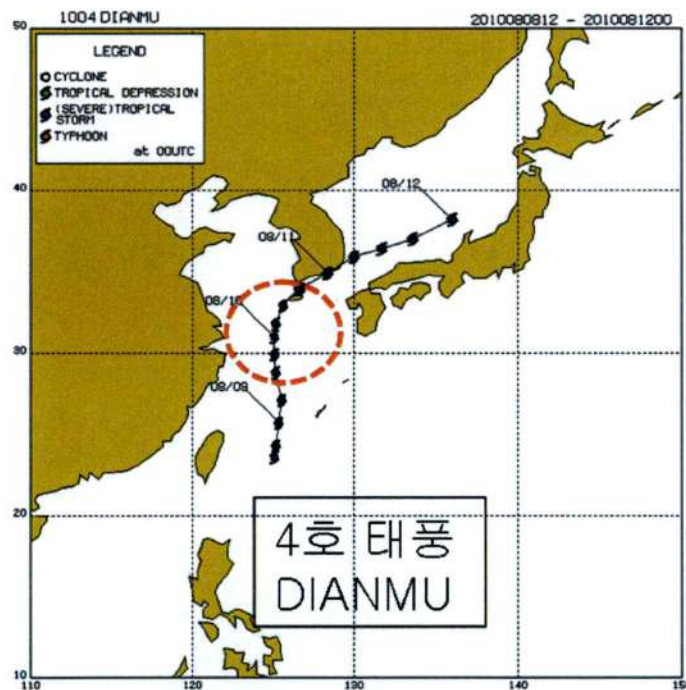


그림 3-4-21. 이어도 과학기지를 통과한 2010년 4호 태풍 덴무(DIANMU)의 진로. 덴무는 8월 10일 18시경 이어도 과학기지를 통과하였으며 이때 중심기압은 985hPa로 비교적 약한 상태였음.

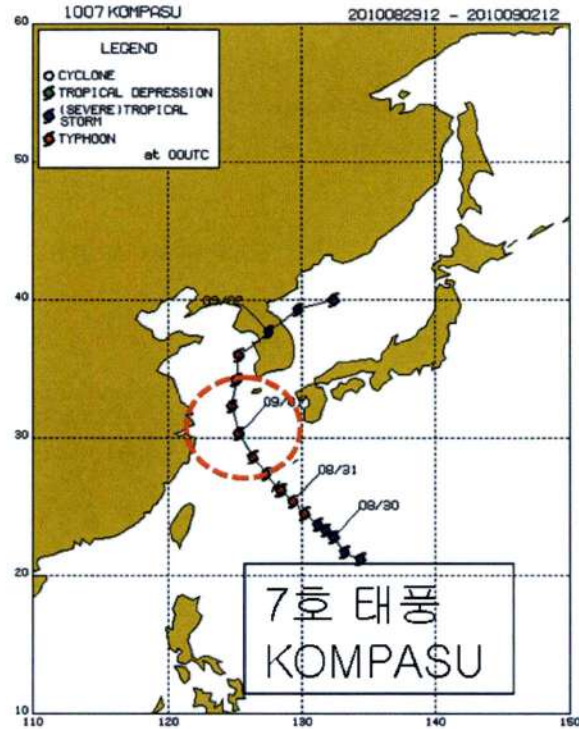


그림 3-4-22. 이어도 과학기지를 통과한 2010년 7호 태풍 곤파스(KOMPASU)의 진로. 곤파스는 9월 1일 6시경 이어도 과학기지를 통과하였으며 이때 중심기압은 965hPa로 비교적 강한 상태였음.

7호 태풍 곤파스는 2010년 8월 29일 12시에 대만 동남쪽 먼 해상에서 발달하여 북서진하여 3일 뒤인 9월 1일 6시경 이어도 과학기지 서쪽 해상을 지나갔다. 이때 중심기압은 965hPa, 최대 풍속은 37m/s로 비교적 강한 강도를 보였으며 태풍 진로 오른쪽에 위치하여 강한 해양반응이 관측되었다(그림 3-4-22).

9호 태풍 말로는 태풍 곤파스가 한반도에 상륙하여 소멸한 하루 뒤인 9월 3일 6시에 대만 동쪽 먼 해상에서 발달하여 태풍 곤파스와 비슷한 진로로 이어도 기지에 접근하였으며 3일 후인 9월 6일 6시경 이어도 기지 동쪽해상을 지나갔다. 이때 태풍의 중심기압은 989hPa, 최대풍속은 22m/s로 약한 강도를 보였다(그림 3-4-23).

위의 세 태풍은 모두 이어도 과학기지 근처를 지나갔으며 이에 따른 대기 및 해양의 반응이 이어도 과학기지에서 관측이 되었다. 그림 3-4-24는 이어도 과학기지에서 관측된 8월-9월 기압, 기온, 유의 파고, 최대 파고의 시계열이다. 각각의 사각형 박스는 태풍의 통과 시점으로 이 구간에서 대기 및 해양에서 큰 반응이 일어났음을 확인해 볼 수 있다.

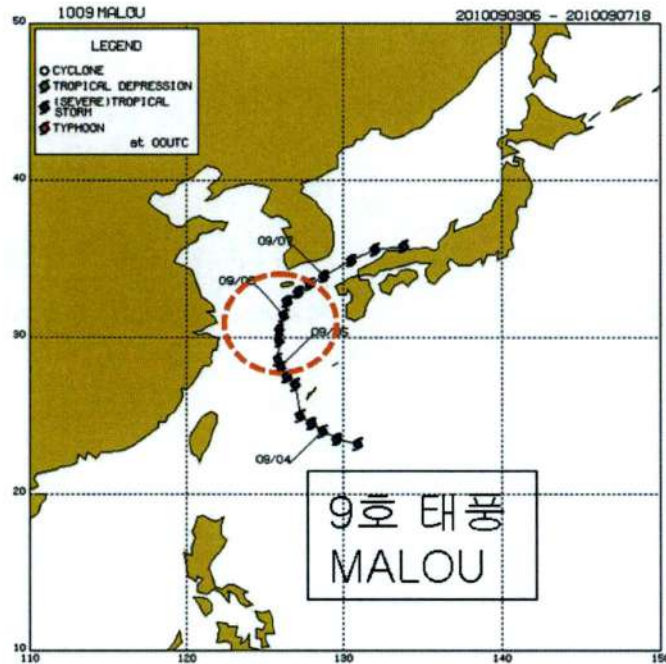


그림 3-4-23. 이어도 과학기지를 통과한 2010년 9호 태풍 말로(MALOU)의 진로. 말로는 9월 6일 6시경 이어도 과학기지 오른쪽을 통과하였으며 이때 중심기압은 989hPa로 비교적 약한 상태였음.

태풍은 강력한 저기압성 회전으로 태풍의 중심에서는 상당히 낮은 기압이 관측이 되며 강한 바람에 의해 강한 파도가 생기게 된다. 관측 결과 이어도 과학기지 통과 시 비교적 강도가 약했던 덴무와 말로의 경우에는 파고가 높지 않았으나 비교적 강한 강도를 보이며 이어도 과학기지를 위험반경에 두고 지나간 곤파스의 경우는 상당히 높은 유의 파고가 관측 되었다.

그림 3-4-25는 이어도 과학기지에서 관측된 8월-9월 바람세기 및 방향의 시계열을 나타낸 것이다. 앞서 살펴본 기압 및 파고에서와 같이 태풍기간 강한 반응을 보였다. 강도가 가장 강했던 곤파스의 경우에 바람이 38m/s까지 관측 되었다. 바람의 방향은 이어도 기지 바로 위를 지나간 덴무의 경우 반시계방향의 회전을 볼 수 있었으며 이어도 과학기지를 오른쪽에 두고 지나간 곤파스의 경우 북풍계열의 바람이 우세했다는 것을 확인할 수 있었다. 반대로 이어도 기지 왼쪽에 두고 지나간 말로의 경우에는 남풍계열의 바람이 우세하였으며 이는 태풍의 진로에 따라 바람의 회전 방향 및 우세 방향이 크게 변할 수 있다는 것을 단적으로 보여준다.

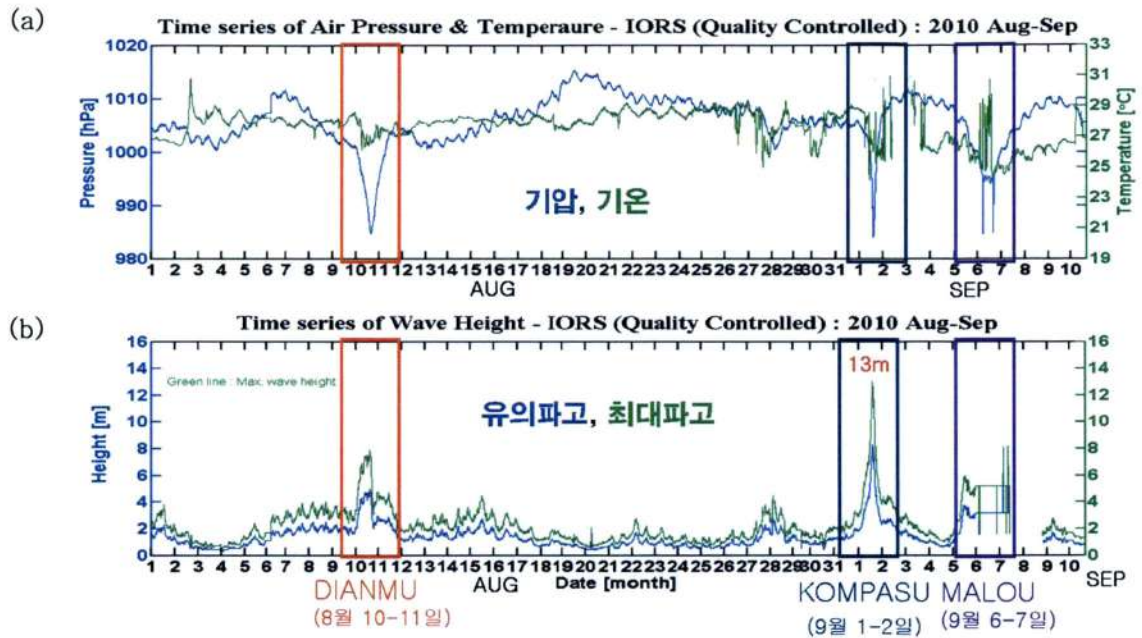


그림 3-4-24. 이어도 과학기지에서 관측된 2010년 8월-9월 (a)기압, 기온, (b)유의파고, 최대파고의 시계열.

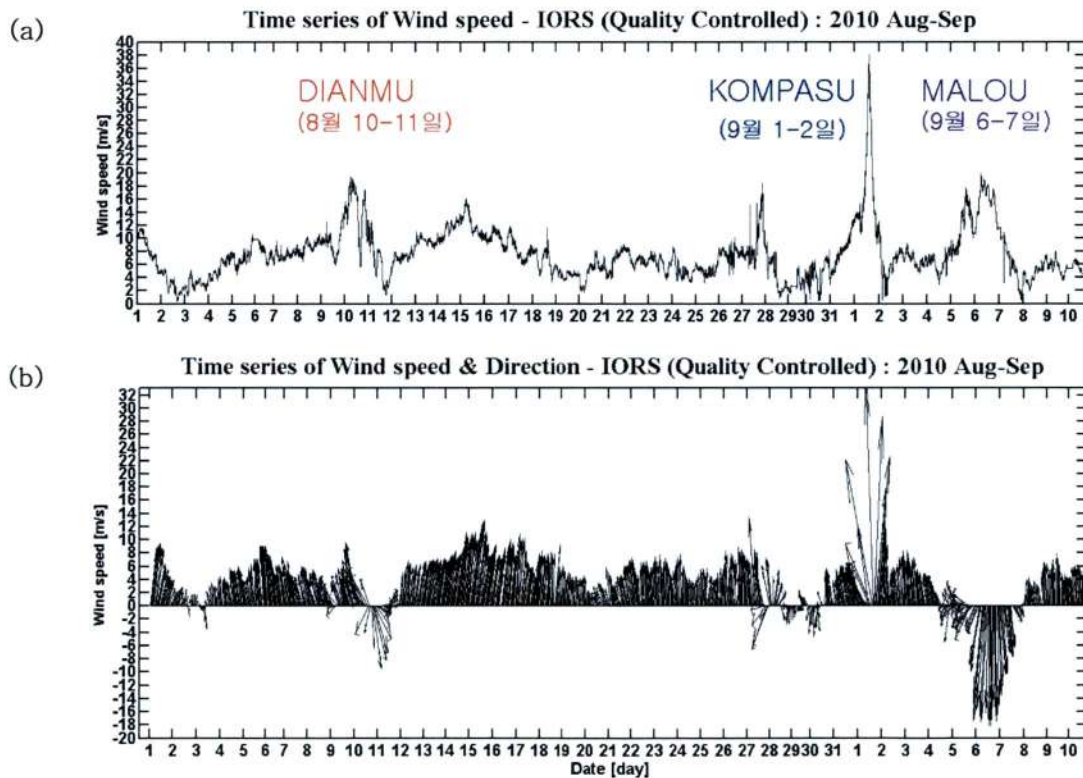


그림 3-4-25. 이어도 과학기지에서 관측된 (a)바람세기, (b)바람세기 및 풍향.

그림 3-4-26과 3-4-27은 이어도 과학기지에서 관측된 8월-9월 층별 수온 및 염분의 시계열로 그림 3-4-26은 자료보정 전의 자료이며 그림 3-4-27은 자료 보정 후의 결과다. 해양센서에 의해서 측정되어지는 수온 및 염분 자료는 센서의 민감도에 따라 에러값이 상당부분 포함이 되기 때문에 통계적인 방법을 통해 이를 보정해야 한다. 특히 전기 전도도를 통해 구해지는 염분의 경우 에러의 빈도도 많고 그 폭도 상당히 크기 때문에 주의가 요구된다.

수온의 관측결과, 태풍 덴무 시기에는 태풍 바람에 의한 혼합에 의해 수심 8m에서 약 2℃의 수온 하강이 관측이 되었으며 약 4psu의 염분 상승이 관측되었다. 이어도 과학기지가 위치한 동중국해는 양자강 저염수가 넓게 퍼져있는 지역으로 여름철에 특히 저염수가 많이 확장되어 있다.

태풍에 의한 혼합작용은 표층에 떠있는 저염수와 하층의 물을 섞어버려 표층의 염분을 크게 올리게 된다. 태풍 곤파스가 오기 전인 8월 말에 약 22psu정도인 저염수가 이어도에서 관측이 되었으나 이후 곤파스와 말로가 지나간 뒤인 9월 5일 경에 31psu정도로 염분이 상승한 것을 알 수 있다. 이는 태풍에 의한 혼합작용의 결과로 생각되어진다.

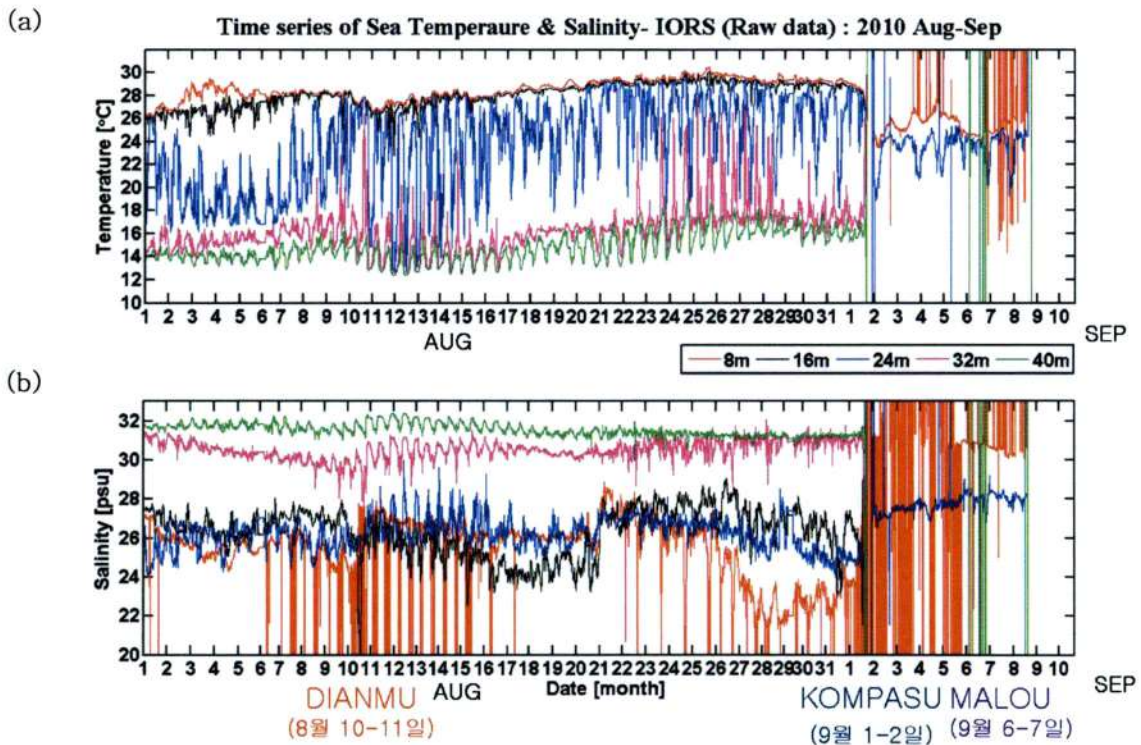


그림 3-4-26. 이어도 과학기지에서 관측된 자료 보정 전 (a)층별 수온, (b)층별 염분.

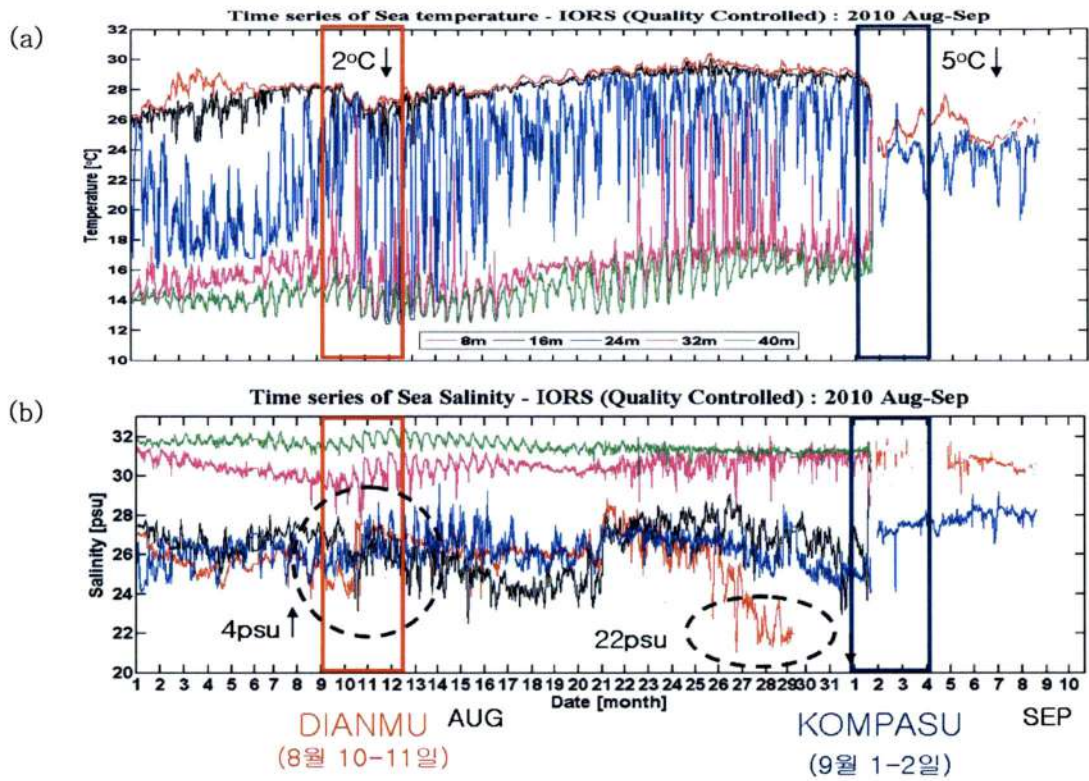


그림 3-4-27. 이어도 과학기지에서 관측된 자료 보정 후 (a)층별 수온, (b)층별 염분.

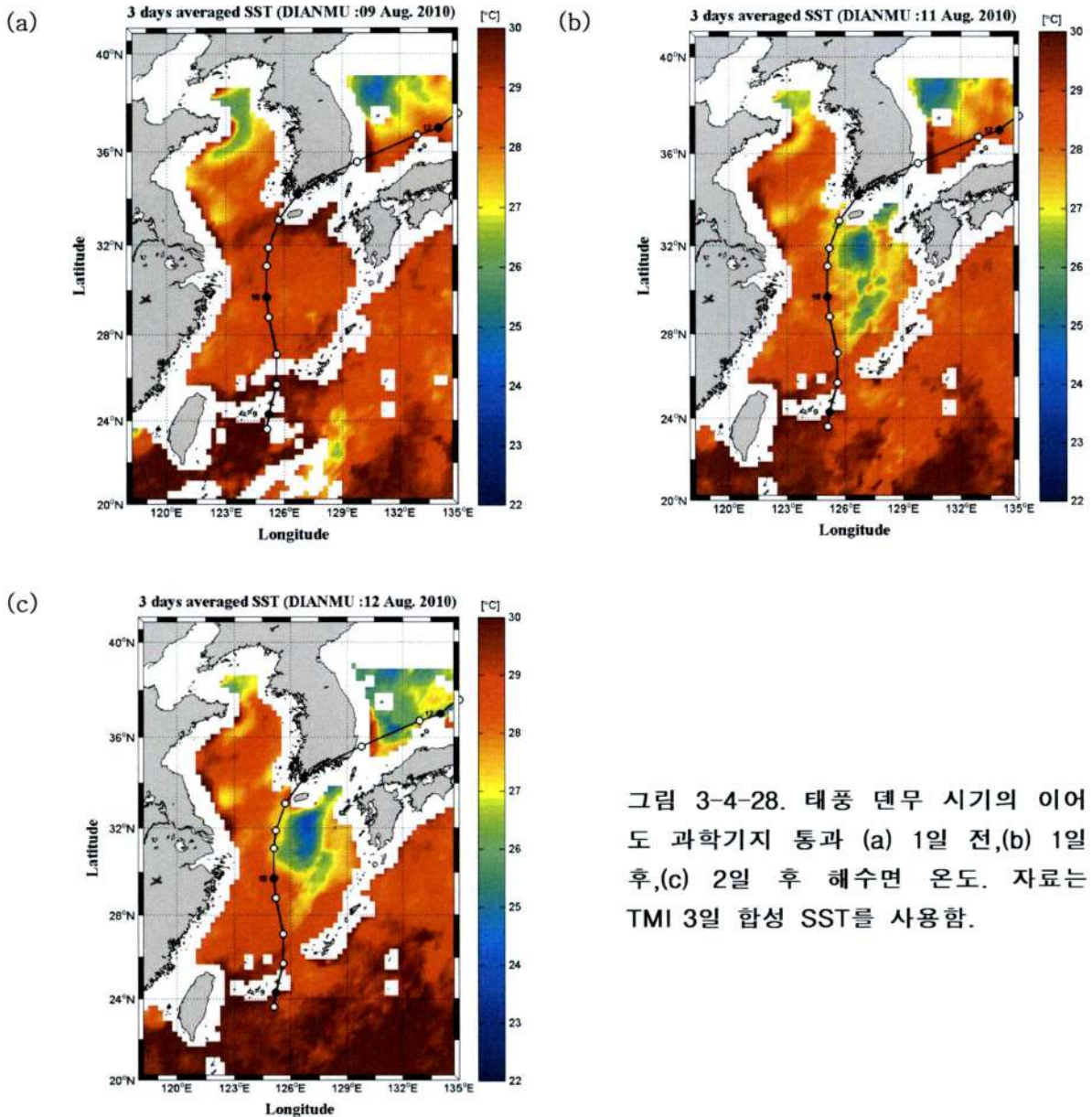


그림 3-4-28. 태풍 덴무 시기의 이어도 과학기지 통과 (a) 1일 전,(b) 1일 후,(c) 2일 후 해수면 온도. 자료는 TMI 3일 합성 SST를 사용함.

그림 3-4-28과 그림 3-4-29는 태풍이 이어도 과학기지를 통과하기 전과 후의 해수면 온도를 나타낸 것으로 태풍의 혼합작용에 의한 해수면 냉각이 명확히 나타난다. 태풍 덴무의 경우 이어도 과학기지 근처를 지나갔지만 강도가 약했기 때문에 이어도 과학기지에서 약 2°C의 해수냉각 만이 관측되었다. 그러나 공간적으로 보았을 때 덴무의 진로 오른쪽 지역에서 상당히 큰 크기의 해수면 냉각이 일어났다는 것을 확인할 수 있다. 반면 강도가 강했던 태풍 곤파스의 경우에는 약 5°C가량의 해수 냉각이 이어도 기지에서 관측이 되었으며 공간적으로 보았을 때 역시 오른쪽 반경에서 강한 냉각이 일어났다. 태풍에 의해 생성된 해수면 냉각 지역은 태풍이 지나가고 난 다음에도 상당기간 유지 되는 것을 볼 수 있는데 이는 태풍에 의해 생성된 해류의 관성운동이 상당기간 남아 하층의 차가운 물을 상층으로 공급하기 때문이다.

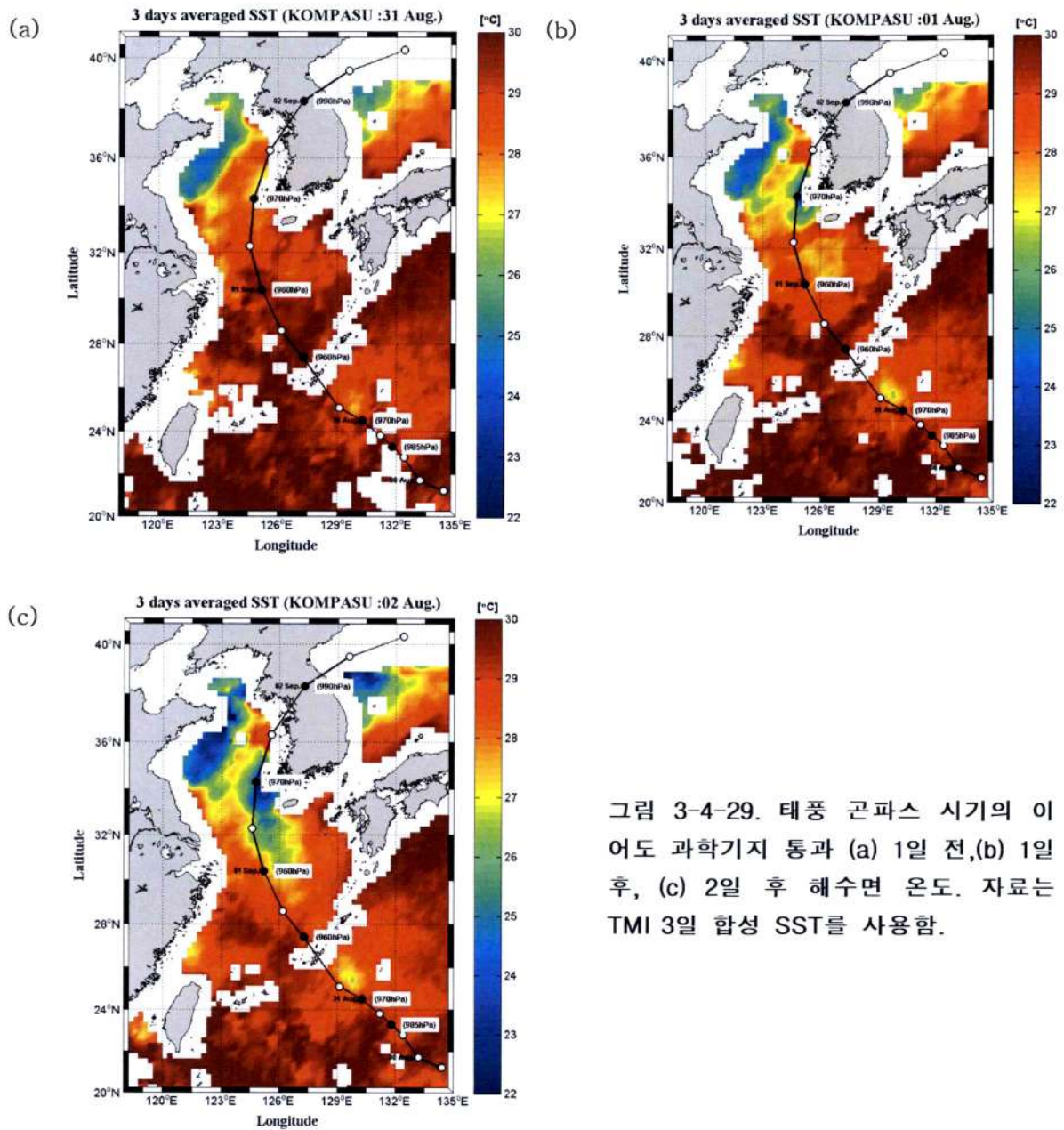


그림 3-4-29. 태풍 곤파스 시기의 이
어도 과학기지 통과 (a) 1일 전,(b) 1일
후, (c) 2일 후 해수면 온도. 자료는
TMI 3일 합성 SST를 사용함.

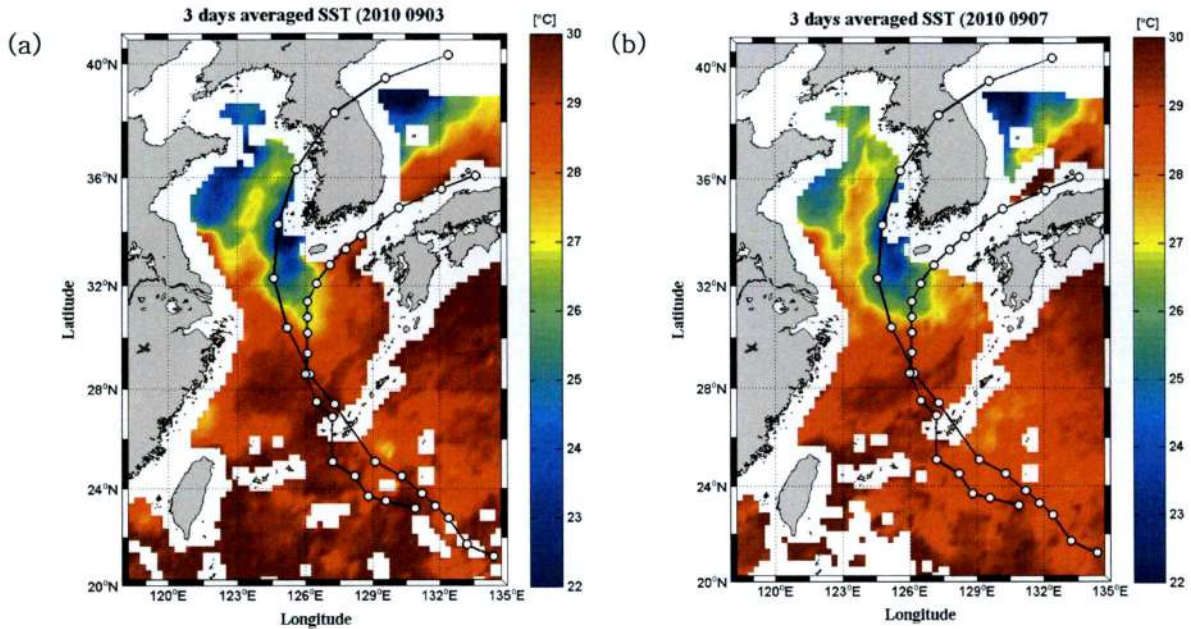


그림 3-4-30. (a) 태풍 곤파스가 이어도 과학기지를 통과하고 난 3일 후의 해수면 온도. (b) 태풍 말로가 이어도 과학기지 통과하기 하루 전의 해수면 온도. 자료는 TMI 3일 합성 SST를 사용함.

태풍 곤파스와 태풍 말로는 약 4일의 시간차이를 두고 거의 비슷한 진로로 한반도에 접근하였다. 따라서 태풍 말로는 태풍 곤파스가 냉각시켜 놓은 뒤 아직 회복되지 못한 차가운 해양 위를 지나왔다. 이것은 따뜻한 해양의 열을 공급받아 발달하는 태풍에게 있어 부정적인 역할을 하게 되어 태풍 말로의 세력을 크게 발달하지 못하게 하는 원인이 되었다. 태풍 말로는 태풍 곤파스와 비슷한 진로로 진행하던 9월 6일까지는 약 990hPa의 강도를 보이다가 이후 제주도 오른쪽 통과 시기인 6일 18시에 985hPa까지 발달하였다. 이는 태풍 곤파스에 의해 냉각된 해양만을 통과하다 그렇지 않은 따뜻한 해양을 만나 어느 정도 에너지를 공급받았기 때문인 것으로 사료된다.

2) 이어도 기지에서 관측된 장기 증발수온염분 자료 분석

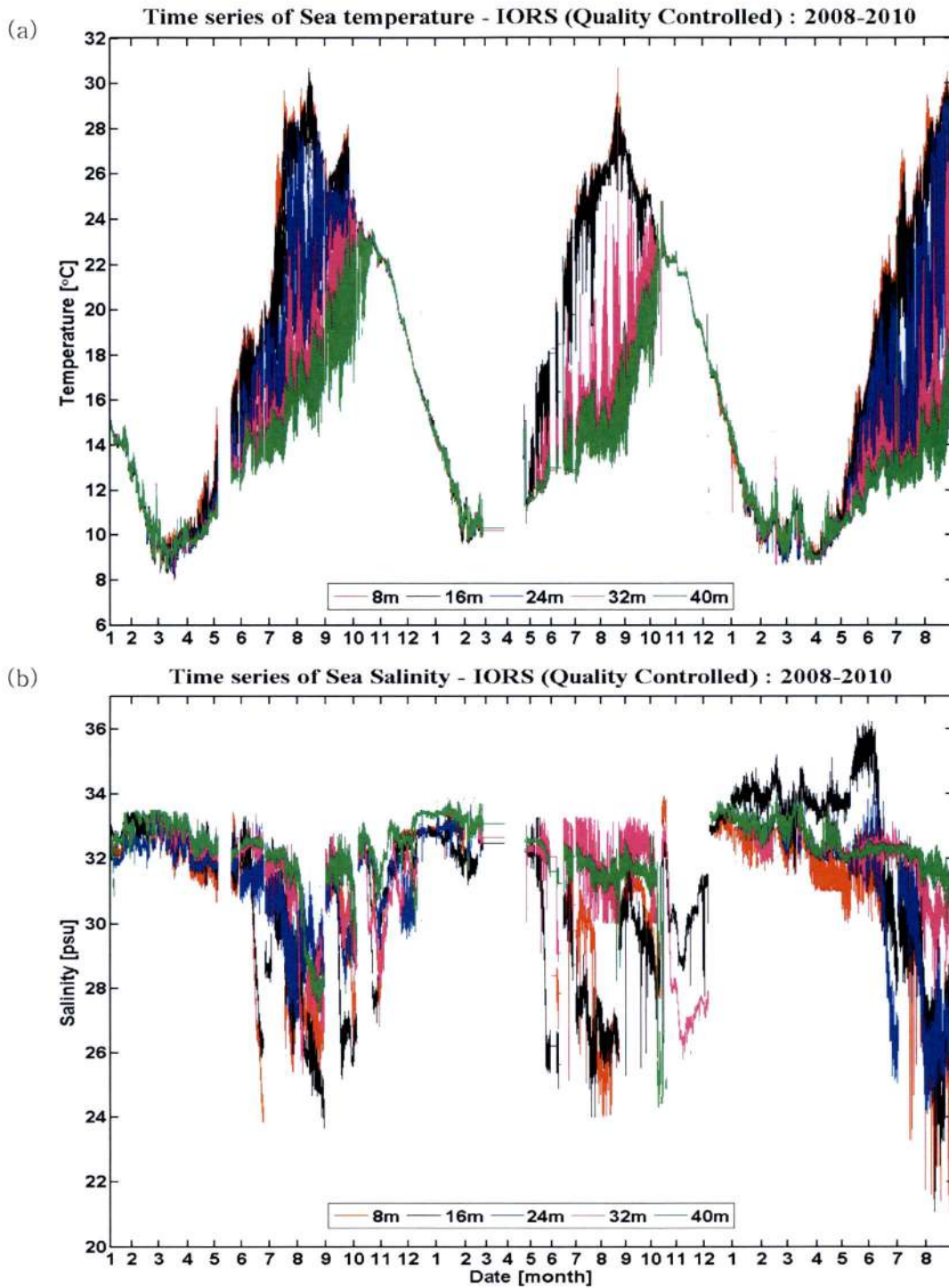


그림 3-4-31. 2008월 1월부터 2010년 8월까지 이어도 과학기지에서 관측된 증발 (a) 수온 및 (b) 염분의 시계열.

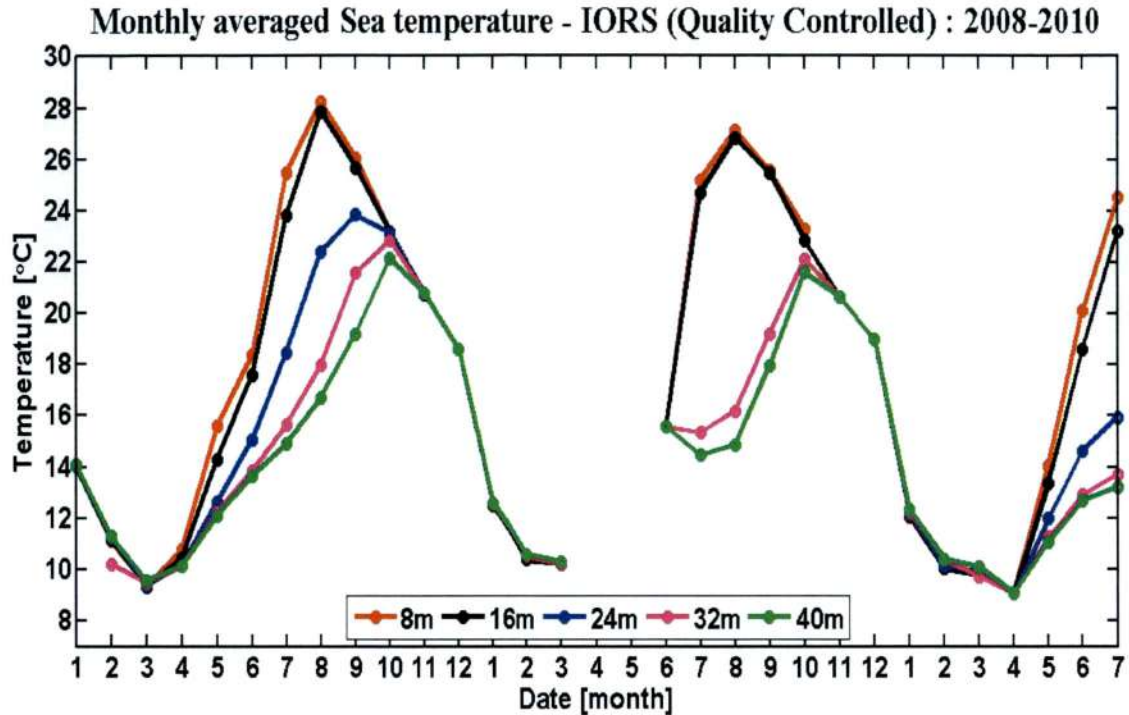


그림 3-4-32. 2008년 1월부터 2010년 7월까지 이어도 과학기지에서 관측된 층별 수온의 월평균 시계열.

가. 층별 수온

그림 3-4-31은 2008년 1월부터 2010년 8월까지 2년 8개월간의 층별 수온 및 염분의 시계열 자료를 나타낸다. 수온의 변화는 태양 복사에너지 유입량의 변화로 계절변화가 뚜렷이 나타난다. 특히, 겨울은 복사에너지의 유입량이 적어 전체적으로 수온이 낮고 성층화가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 반면 여름은 태양의 복사 에너지량이 많아 표층이 가열되어 약 8m 깊이에서 수온은 약 30℃까지 이른다. 여름의 따뜻한 표층수는 아래에 존재하는 찬물보다 밀도가 낮고 아래로 쉽게 섞이지 않으므로 성층화가 뚜렷하다.

겨울에는 해양 내부는 완전히 혼합되어 성층화가 사라지고 표층 수온이 최저로 떨어져 3월에 최소 표층 수온을 보인다(그림 3-4-32). 봄철로 접어들면서 태양열은 표면 가까이에서 주로 흡수되어 수온의 상승은 대부분 비교적 얇은 표층에 국한된다. 일사량의 증가로 인한 표층 수온의 상승으로 8월에 가장 강한 성층화가 발생한다. 9월부터 가열된 해수는 서서히 냉각되어 다시 성층화가 깨지기 시작한다(그림 3-4-33).

나. 층별 염분

염분은 전체 바다에 걸쳐 매우 좁은 범위 내에서 변하며 34.5 - 35.0 psu 사이의 해수가 대부분이다. 일반적으로 수심이 깊어질수록 온도는 하강하며 염분은 증가한다. 이어도 기지의 염분도 일반적인 해양 분포와 마찬가지로 깊이가 깊어질수록 높아지는 경향을 보인다(그림 3-4-31b). 이어도 과학기지가 위치한 동중국해는 양자강 담수의 유입으로 인해 표층에 저염수가 존재한다. 특히 강수가 집중되는 여름철에는 저염수가 넓게 퍼져있어 이어도 과학기지에서도 저염수가 관측이 된다. 2008년과 2009년에는 약 24psu정도의 저염수가 이어도 과학기지에서 관측이 되었으며 이듬해인 2010년에는 21psu정도의 저염수가 관측 되었다.

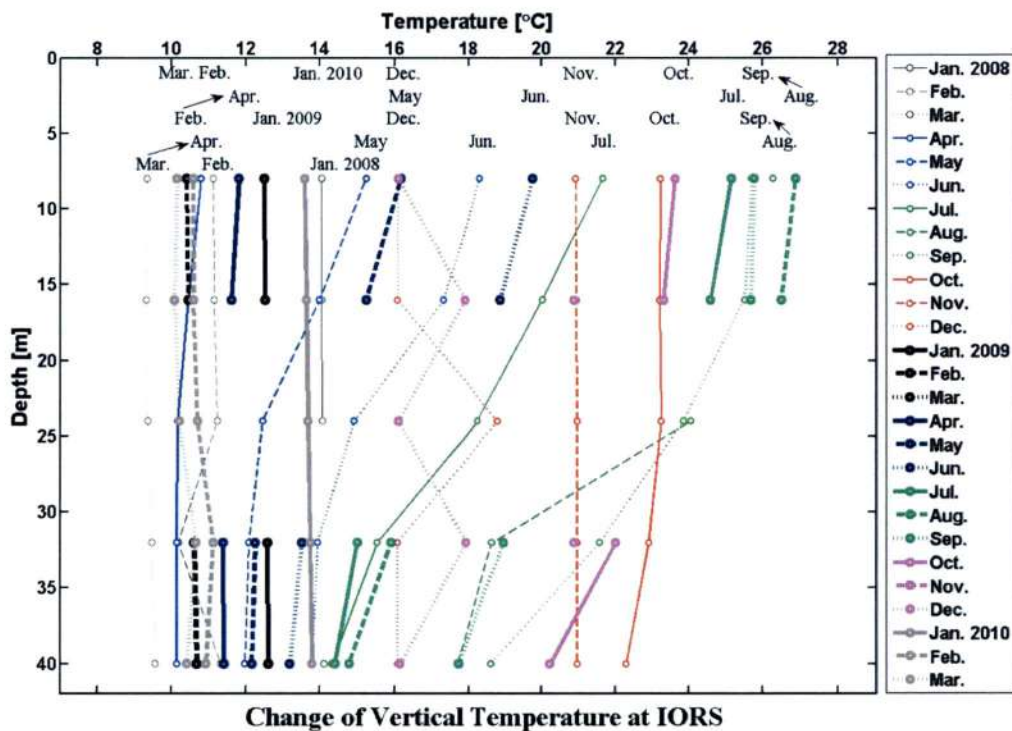


그림 3-4-33. 2008월 1월부터 2010년 3월까지 이어도 과학기지에서 관측된 월평균 수온수직 프로파일.

5. 이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 초기조건 개선 및 예측능력 향상

(1) 이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 초기조건 개선

1) 수온프로파일 차이에 따른 태풍 강도 변화 민감도 실험

해양은 태풍 통과 기지에 강한 바람에 의한 혼합작용과 저기압에 의한 용승작용 등으로 표층뿐 아니라 깊은 수심까지 영향을 받는다. 이러한 태풍에 의한 해양의 변화는 결국 태풍 자신의 강도에 영향을 미친다. 본 연구에서는 태풍-해양 접합모델을 이용하여 태풍 통과 시 나타나는 중요한 해양요소들의 변화와 이에 따른 태풍의 반응을 조사하였다.

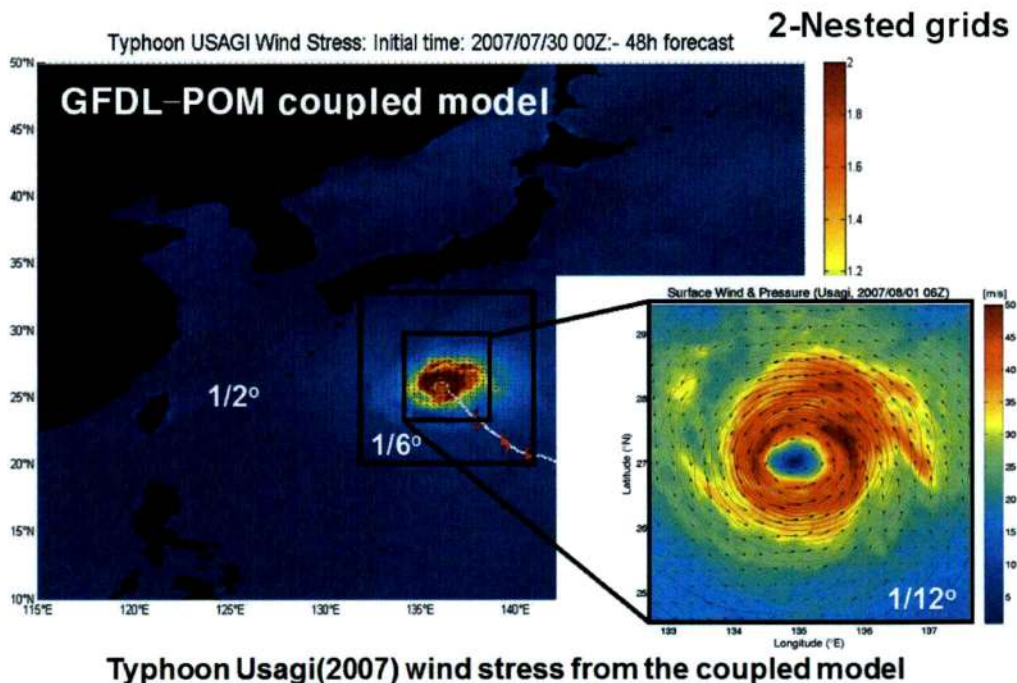


그림 3-5-1. 실험에 사용된 연구 범위와 격자 별 해상도.

사용한 모델은 NCEP에서 현업예보 모델로 사용하고 있는 GFDL-POM hurricane-ocean coupled model로 2-way nesting system과 moving grid system을 사용하였다. 대기 모델의 최종 도메인의 수평 해상도는 1/12°이며 해양모델은 1/6°를 사용하였다. (그림 3-5-1)

본 연구에서는 이어도 기지 관측 자료를 이용한 수직 수온 프로파일을 사용하여 혼합층 두께와 표층 수온 변화에 따른 태풍의 강도 변화확인 하였다.

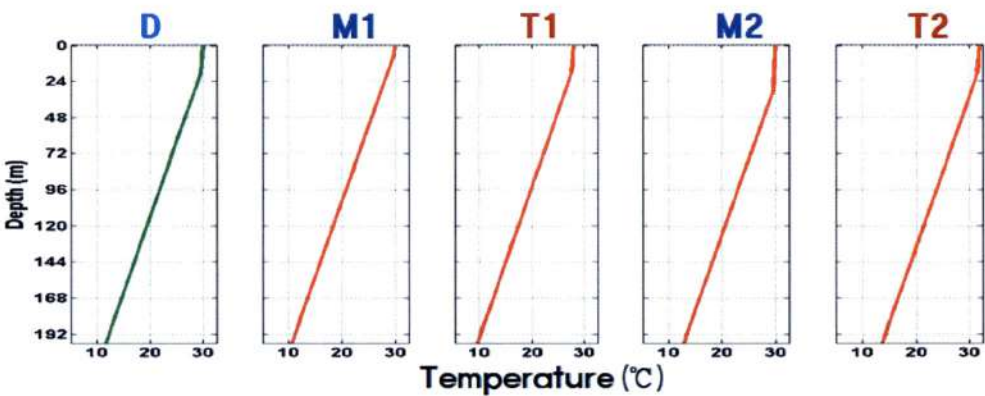


그림 3-5-2. 각 실험별 수온 수직 프로파일. 각각의 프로파일은 이어도 기지의 관측치를 참고하여 작성됨.

그림3-5-2는 실험에 사용된 수직 프로파일을 나타낸 것이다. 'T1', 'T2' 실험에서는 초기 혼합층깊이를 24m로 고정하고 해수면 온도를 각 각 28℃, 32℃로 하여 실험을 진행하였으며 'M1', 'M2' 실험에서는 해수면 온도를 30℃로 고정하고 초기 혼합층 깊이를 각각 12m, 36m로 하여 실험 하였다. 실험 'D'는 각 실험의 비교군으로 각 변수의 중간 값인 해수면 온도 30℃와 초기 혼합층 깊이 24m를 사용하였다.

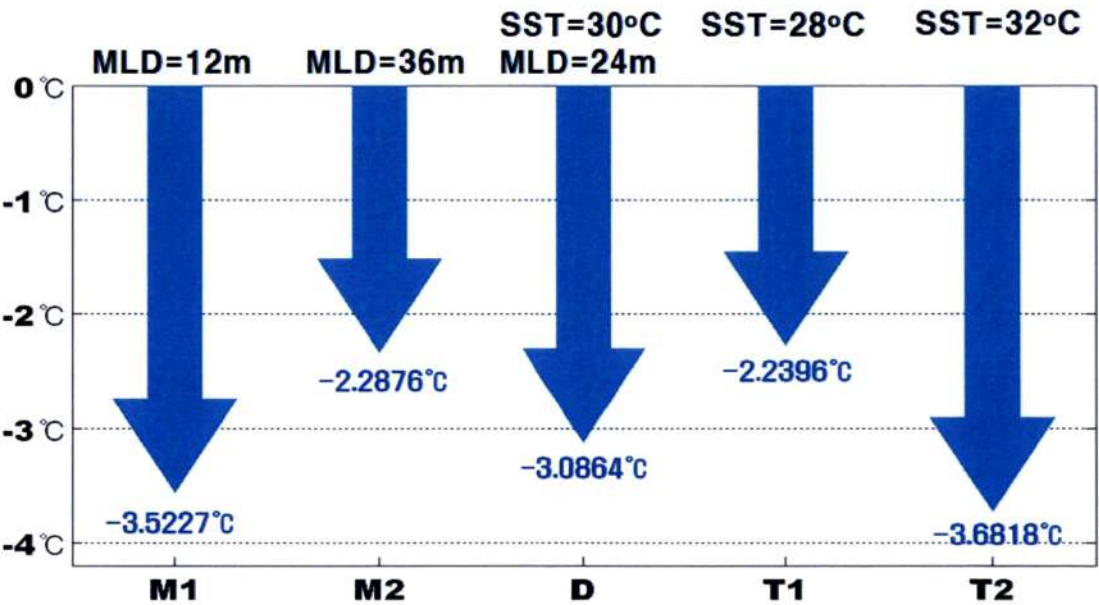


그림 3-5-3. 각 실험별 72시간 뒤 해수면 냉각 결과 치. 각 값들은 태풍 중심 내 평균값임.

그림 3-5-3은 각 실험별 72시간 뒤 태풍 내부의 해수면 냉각 평균을 나타낸 것이다. 초기 혼합층 깊이의 차이에 의한 해수면 냉각차이는 (M1, M2, D) 초기 혼합층이 깊을수록 해수면 냉각이 적게 일어남을 확인하였다. 이는 초기 혼합층이 얇을수록 얕은 수심에 차가운 물이 존재하여 수직혼합이 일어날 경우 보다 차가운 물이 유입되었기 때문인 것으로 사료된다. 초기 해수면 온도 값의 차이에 의한 해수면 냉각 차이는 (T1, T2, D) 초기 해수면 온도가 클수록 해수면 냉각이 크게 일어남을 알 수 있었다. 이것은 초기 해수면 온도가 클수록 태풍의 강도가 증가하기 때문에 보다 강한 바람을 만들어 강하게 혼합을 일으켰기 때문인 것으로 생각된다.

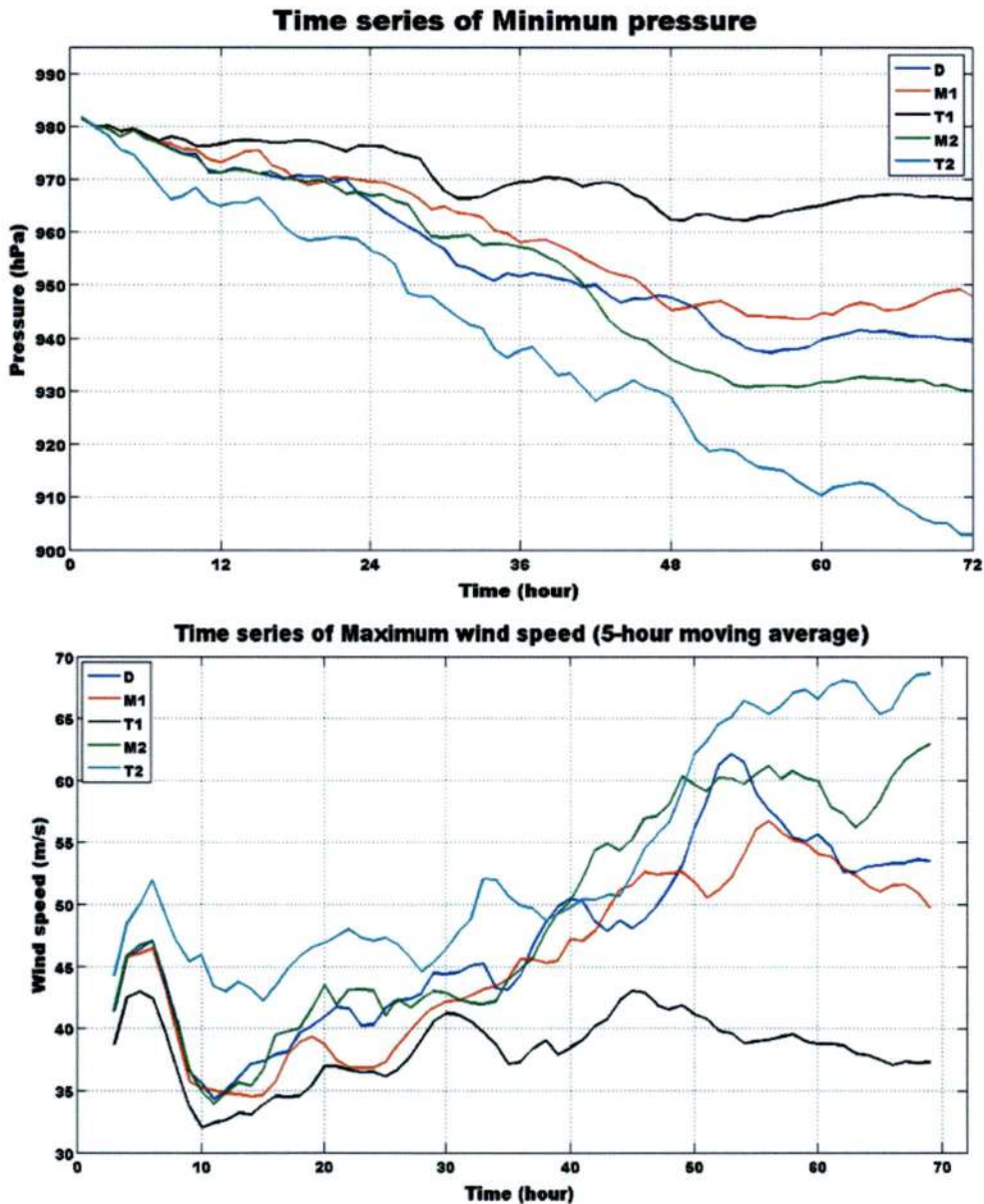


그림 3-5-4. 각 실험 별 최저 중심기압(상단)과 최대풍속(하단)의 시계열.

그림 3-5-4는 각 실험 별 최저 중심기압과 최대풍속의 시계열을 나타낸 것이다. 해수면온도 차이별 결과를 살펴보면 (T1, T2, D) 해수면 온도가 가장 높았던 T2 실험에서 태풍의 강도가 가장 크게 나타났음을 알 수 있다. 다음으로 초기 혼합층 차이별 결과를 살펴보면 (M1, M2, D) 초기 혼합층이 깊을수록 강도가 크게 나타남을 알 수 있다.

본 연구에서는 GFDL-POM coupled model를 이용하여 이어도 주변 해역의 초기 해수면 온도와 혼합층 깊이에 따른 표층해수 냉각과 태풍강도의 민감도를 조사 하였다. 실험 결과 초기 혼합층 깊이가 동일하다면 초기 해수면 온도가 높을수록 태풍의 강도가 강화되어 해수면 냉각이 커짐을 확인 하였으며 같은 해수면 온도를 갖더라도 초기 혼합층 깊이가 깊을수록 표층 냉각이 약화되어 태풍강도가 강해짐을 확인 하였다. 전자의 경우 태풍이 강해지면 강한 해수면 냉각을 일으켜 결국 자신의 강도를 제한하는 되먹임(feedback) 효과를 갖는다는 것을 의미한다.

태풍의 강도는 해수면 온도에 의해 크게 결정 된다. 그러나 태풍에 의한 해수면 냉각은 초기 혼합층 깊이에 의해 크게 바뀌게 되며 결국 태풍 강도에 영향을 미치게 된다. 따라서 태풍의 강도를 보다 정확히 예측하기 위해서는 해수면 온도뿐만 아니라 초기 혼합층 깊이가 같은 상층 해양의 열적 구조를 고려해야만 한다.

2) 염분프로파일 차이에 따른 태풍 강도 변화 민감도 실험

태풍은 강도 발달에 쓰이는 대부분의 에너지를 현열과 잠열의 형태로 해양으로부터 공급 받는다. 따라서 차가운 해면 위를 지나가는 경우나 태풍이 육지에 상륙할 경우 얻을 수 있는 에너지가 작아지기 때문에 태풍의 강도가 약해진다. 또한 태풍이 만들어낸 해류 시어(shear)에 의한 난류혼합과 용승에 의한 해수면 냉각은 해양에서 대기로의 열 흐름을 감소시켜 결국 태풍을 약화 시킨다(Miller, 1958; Evans, 1993; Kafatos et al., 2006). 따라서 태풍 강도에 있어 해수면 냉각의 크기는 상당히 중요하며 이런 해수면 냉각의 크기는 바람의 세기와 상층해양의 구조에 의해 결정된다.

해수면 냉각 크기에 영향을 줄 것으로 여겨지는 해양구조로는 혼합층 깊이, 해양열용량(Ocean Heat Contents: OHC), 수온약층 온도 기울기, 난류성 소용돌이(Warm eddy), 난류 등이 있으며 이들과 태풍에 의한 해수면 냉각 사이의 관계를 알아내는 연구가 활발히 진행 중이다(Emanuel, 1986; Shay et al. 2000; Goni and Trinanes, 2003; Emanuel et al. 2004; Lin et al. 2005).

수직혼합을 일으키는 주요인인 난류혼합은 해류 시어와 해수안정도에 의해 결정된다. 일반적으로 해류시어가 클수록 기계적 혼합이 크게 일어나며 반대로 해수안정도가 클수록 혼합이 억제된다.

해수안정도는 해양의 수직 밀도 기울기에 의해 결정된다. 따라서 수직적으로 밀도 차이가 큰 해양일수록 해수안정도가 크다. 해양의 밀도는 주로 수온에 의해 결정되나 수직적으로 염분변화가 심한 지역에서는 염분에 의해 결정 된다. 따라서 강 하구 같이 담수 유입이 많은 지역에서는 상층에 담수가 부유 하게 되어 큰 크기의 밀도 차이가 생겨 해수안정도가 커지게 된다.

Lin et al.(2009)은 수치모델과 17개의 관측 결과를 가지고 카테고리 5의 강한 태풍의 되기 위한 조건으로 높은 해수면온도, 깊은 혼합층, 빠른 태풍이동 속도 외에 강한 성층을 들었으며 강한 성층 해양의 경우 최소 26℃등온 깊이가 충분히 깊지 않아도 해수면 냉각이 작아 카테고리 5의 강한 태풍으로 발달할 수 있음을 보였다. Amy(2006)는 아마존 강과 오리노코 강에 의한 저염수가 성층을 강하게 만들어 해수면 온도 상승을 야기 시키고 이에 따라 저염수 위를 지나간 허리케인이 카테고리 5이상으로 강해졌다는 것을 통계 분석을 통해 밝혔다.

양자강은 전 세계에서 세 번째로 많은 담수를 방출하는 강으로 방출된 담수는 여름철 동중국해에 넓게 분포한다. 여름철 양자강 주변의 평균 염분 분포를 보면 동경 128도 부근 까지 30 psu 이하의 저염수가 넓게 확장되어 있음을 알 수 있으며(그림 3-5-5) 저염수가 확장된 지역 수심 약 15 m에서 30 m사이에 염분약층이 자리 잡고 있다.

1951년부터 2008년까지 57년간 30 psu이하의 양자강 저염수 위를 지나간 태풍은 총 68개로 평균 매년 1.2개가 이곳을 지나간 것으로 나타났으며 이 중 58개(전체 85.3%)는 한반도에 상륙하였다(RSMC best track 자료 이용). 따라서 한반도 상륙 태풍의 특성을 파악하고 보다 정확한 태풍 강도 예측을 하기 위해서는 양자강 저염수가 태풍의 강도에 끼치는 영향에 대하여 조사할 필요가 있다.

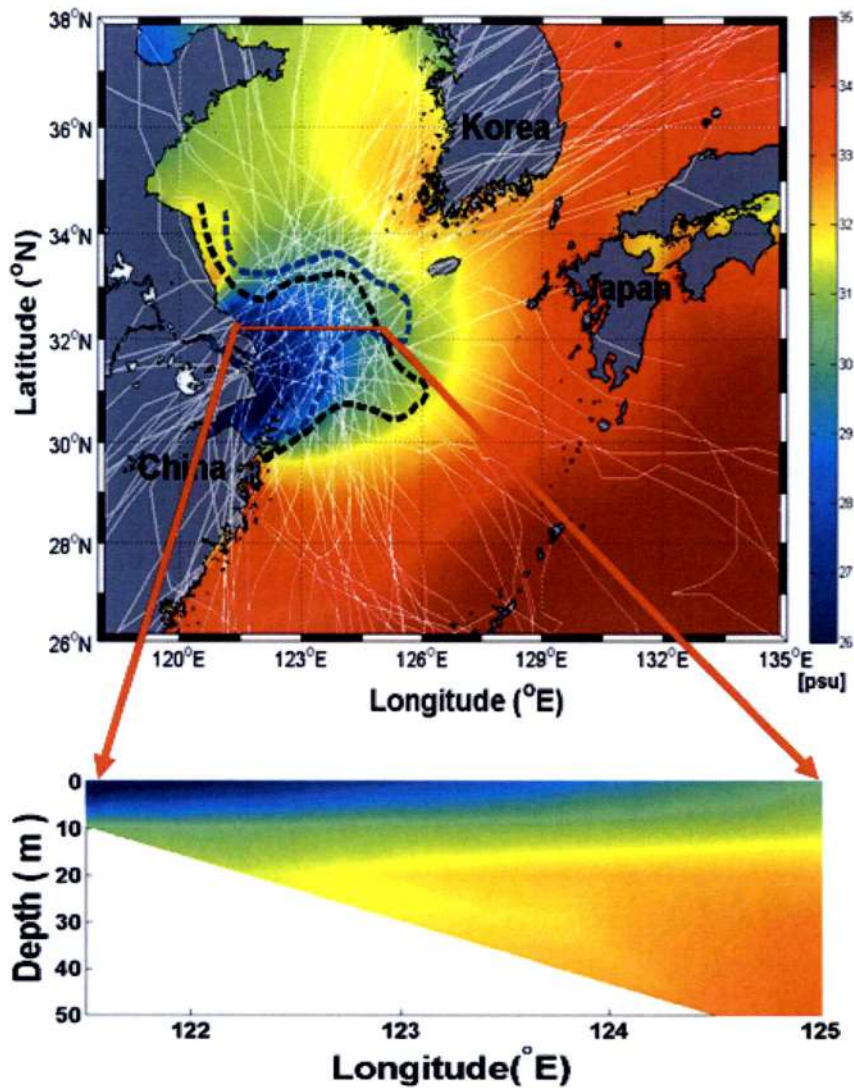


그림 3-5-5. 여름철 동중국해 해수면 염분 분포도. 점선은 7~8월 30psu 염분선을 의미하며 흰 실선은 저염수 위를 지나간 태풍의 진로임. 빨간색 실선 밑은(하단) 상층에 저염수가 존재하여 강한 성층이 생김.

본 연구에서는 이어도 기지에서 관측된 저염수 프로파일을 토대로 이상적인 수치실험을 수행하여 양자강 저염수에 의해 만들어진 강한 성층이 태풍의 강도에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 조사하였다.

사용한 수치모델은 NCEP에서 현업예보 모델로 사용하고 있는 GFDL-POM hurricane-ocean coupled model로 2-way nesting system과 moving grid system을 사용하였다. 대기 모델의 최종 도메인의 수평 해상도는 $1/12^\circ$ 이며 해양모델은 $1/12^\circ$ 를 사용하였다.

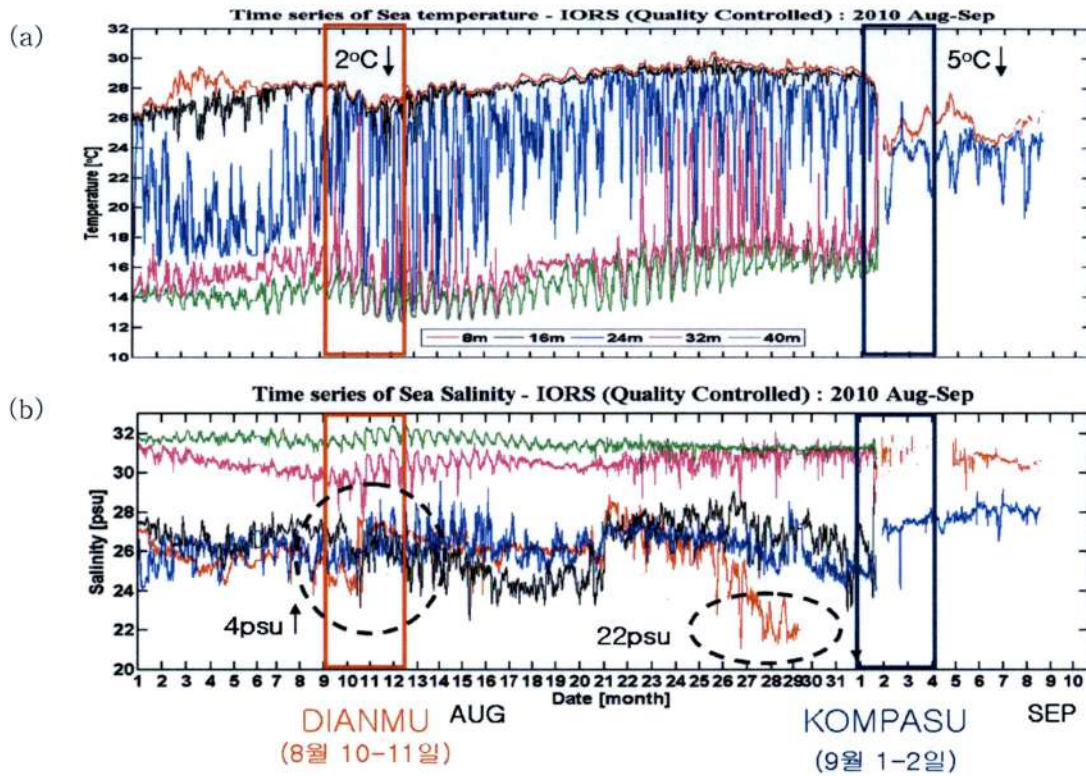


그림 3-5-6. 태풍 내습 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 (a)층별 수온, (b)층별 염분.

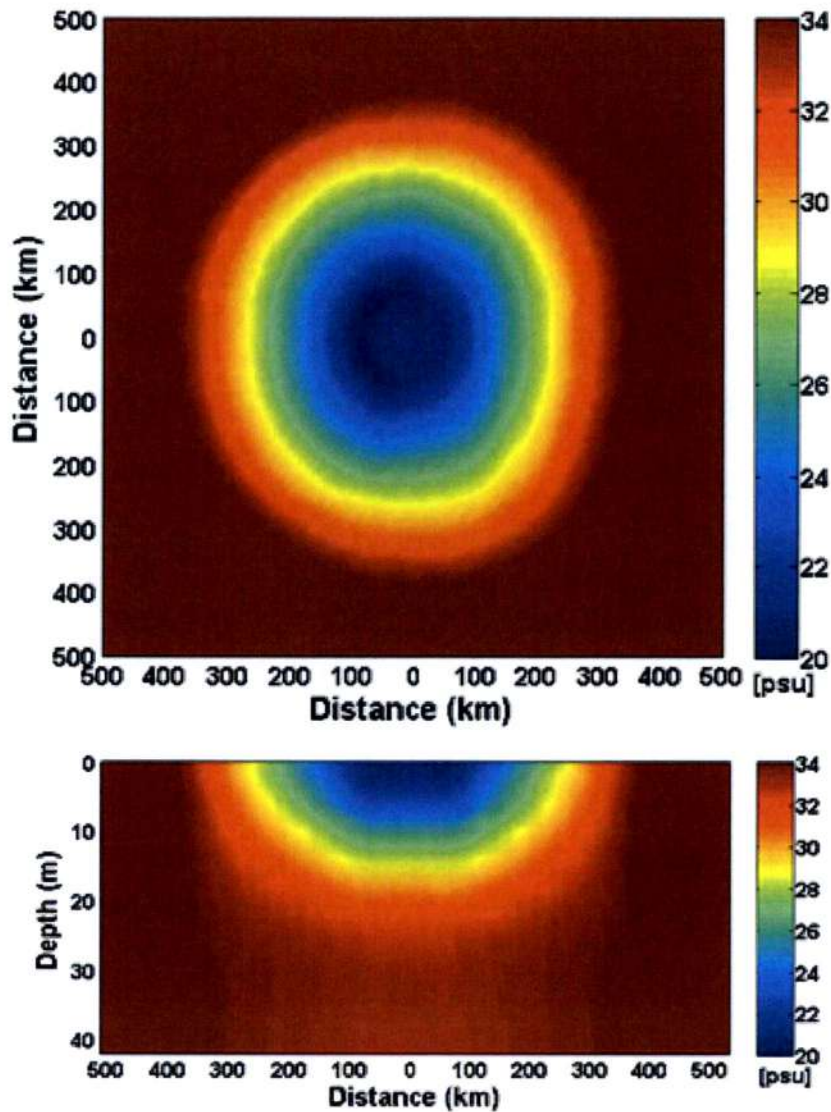


그림 3-5-7. 저염 패치 실험에 사용된 저염수 패치의 수평(상단), 수직(하단) 구조.

이어도 과학기지가 위치한 동중국해는 양자강 담수의 유입으로 인해 표층에 저염수가 존재한다. 특히 강수가 집중되는 여름철에는 계절풍의 영향으로 저염수가 넓게 퍼져있어 이어도 과학기지에서도 저염수가 관측이 되며 태풍 역시 잦은 빈도로 그 위를 지나가게 된다(그림 3-5-6). 본 연구에서는 이어도 기지에서 관측된 수직염분 프로파일을 토대로 그림 3-5-7과 같은 저염 패치를 재현하였으며 태풍을 저염 패치 위를 지나가게 만들어 저염패치가 태풍강도에 미치는 영향을 확인 하였다. 저염의 정도에 따른 태풍 강도의 변화를 확인 해보기 위해 염분 프로파일의 수직 염분 기울기를 각 각 0.72 psu/m, 0.50 psu/m, 0.17psu/m 로 바꿔 실험을 수행 하였다.

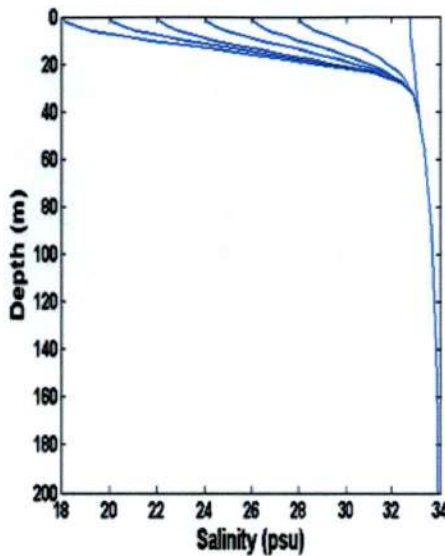


그림 3-5-8. 성층 정도에 따른 태풍 강도 변화 확인 실험에 사용된 염분 수직 프로파일.

실험 결과 태풍이 저염 패치 위를 지나가는 경우 그렇지 않은 경우보다 적은 해수면 냉각이 일어남을 확인 하였다. 저염수에 의한 성층은 수직 점도(viscosity)를 줄여 운동량이 하층으로 전달되는 것을 억제한다. 따라서 해류시어에 의한 혼합이 얇은 수심에서만 일어나게 되며 결국 해수면 냉각이 적게 일어나게 된다. 이러한 해수면 냉각의 저하는 해수면 플럭스의 증가를 불러일으켜 태풍의 강도를 강하게 한다.

태풍이 저염 패치 통과 시작 시점인 48시간부터 CTRL실험(저염패치 없는 실험)과 RP(저염패치 실험)실험 간의 해수면 냉각 차이가 보이기 시작하며 저염패치를 빠져나가기 직전인 약 85시간 부분에서 최대 차이인 1.8°C 를 보인다(그림 3-5-10a). 이후 강해진 강도에 의해 RP실험에서 더 강한 해수면 냉각을 보이며(그림 3-5-10a 파란색 박스) 100시간 경과 후에는 비슷한 크기의 냉각이 보인다. 최저 중심 기압 역시 85시간 경과 후 약 17hPa정도 차이를 보이며 이후 강해진 해수면 냉각에 의해 강도가 급격히 약해짐을 보인다(그림 3-5-10b 파란색 박스). 성층의 정도에 따른 태풍 강도의 변화 확인 실험에서는 상층 염분 기울기가 클수록 태풍의 강도가 강해짐을 확인 하였다(그림 3-5-11).

본 연구에서는 태풍강도와에 있어 저염수의 영향을 태풍-해양 접합모델을 통해 살펴 보았다. 저염수에 의한 상층해양의 성층 강화는 수직혼합을 억제하여 태풍에 의한 해수면 냉각을 저해하며, 그 결과 저염수 위를 지나가는 태풍의 강도를 강하게 할 수 있게 되며 저염 패치 통과 후엔 강해진 강도에 의해 더 큰 크기의 해수면 냉각이 일어나 결국 강도를 약하게 만든다.

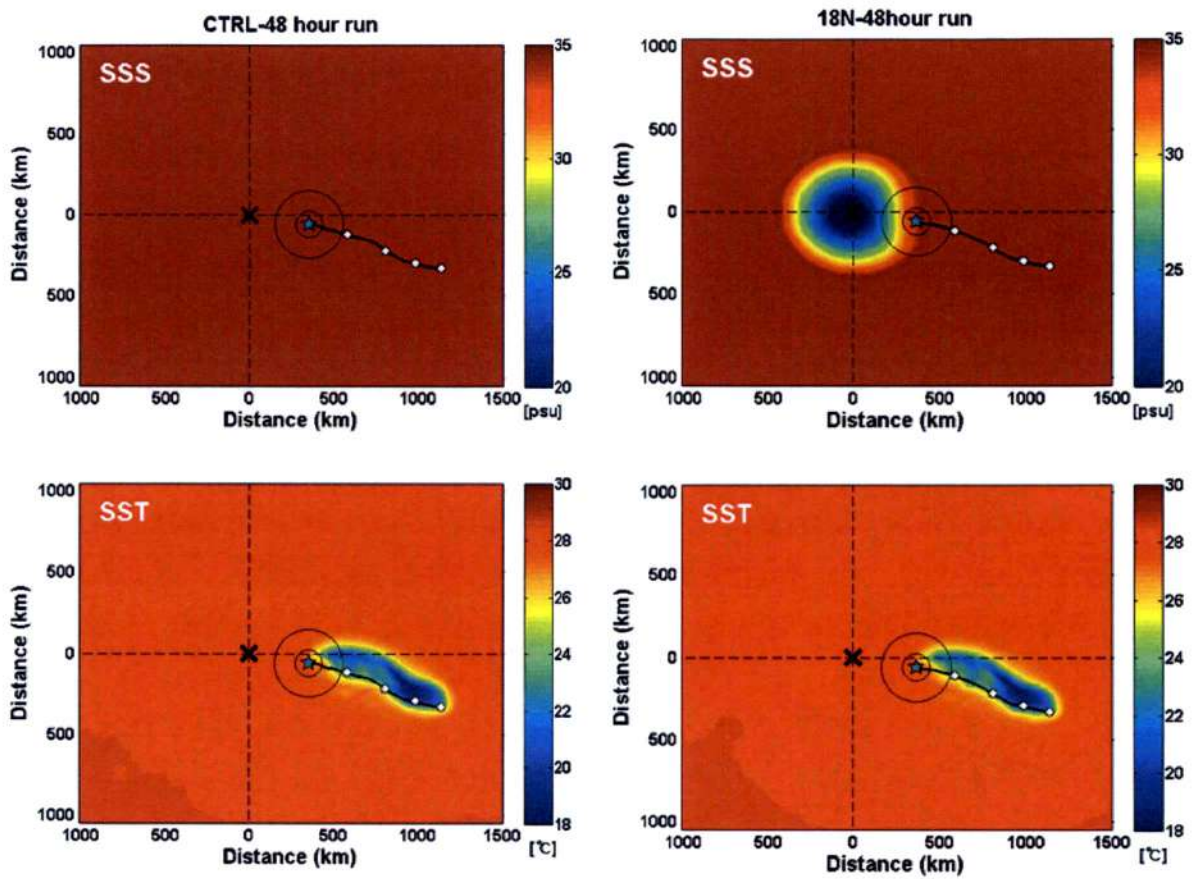


그림 3-5-9. 각 실험별 해수면 염분 분포(상단) 및 해수면 온도 분포(하단). 좌측은 저염 패치가 없는 경우이며 우측은 저염 패치가 있는 경우. x표시는 저염 패치의 중심을 의미함.

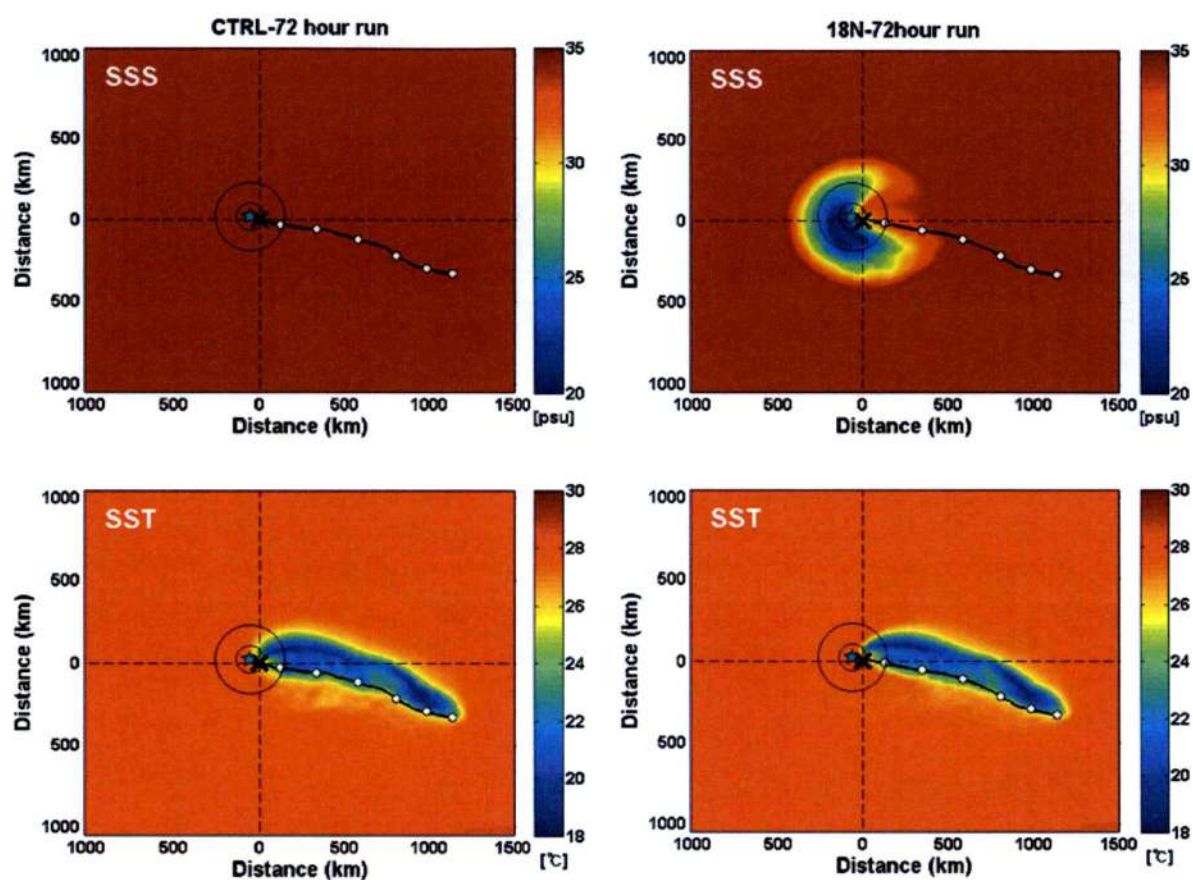


그림 3-5-9. 계속 (72시간 경과)

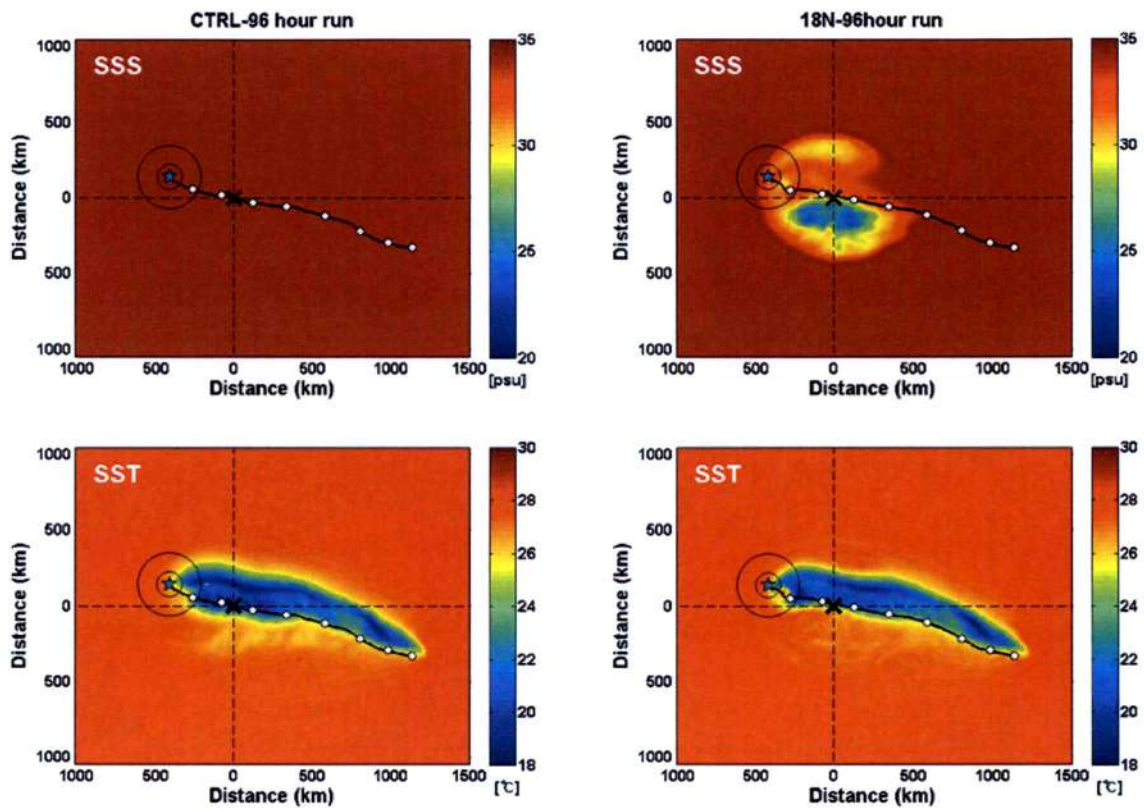


그림 3-5-9. 계속 (96시간 경과)

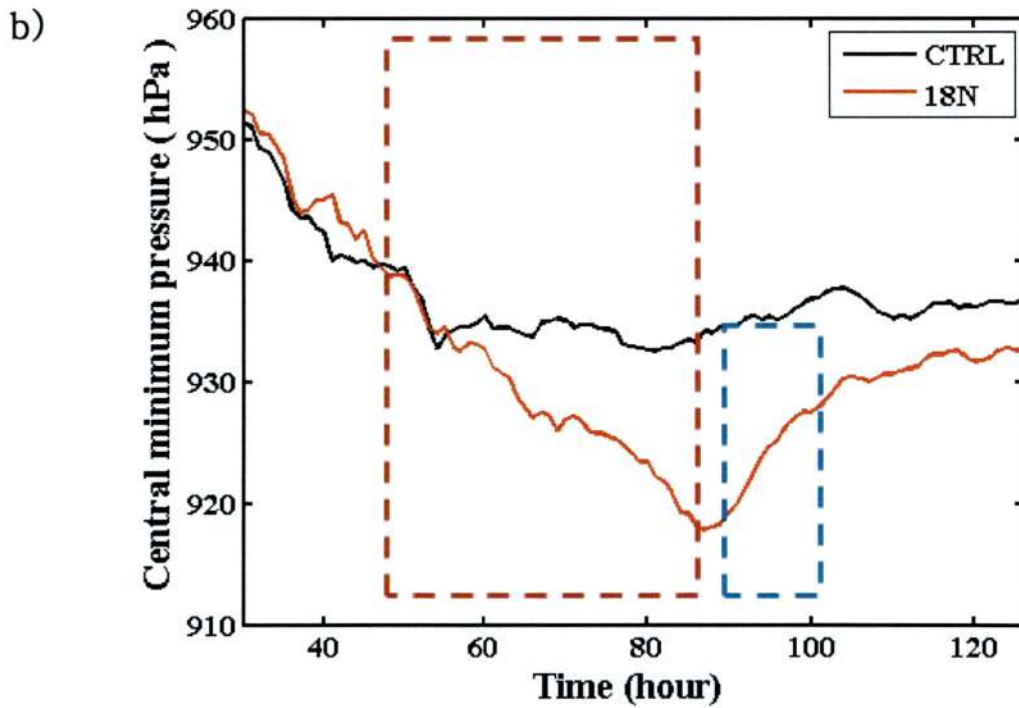
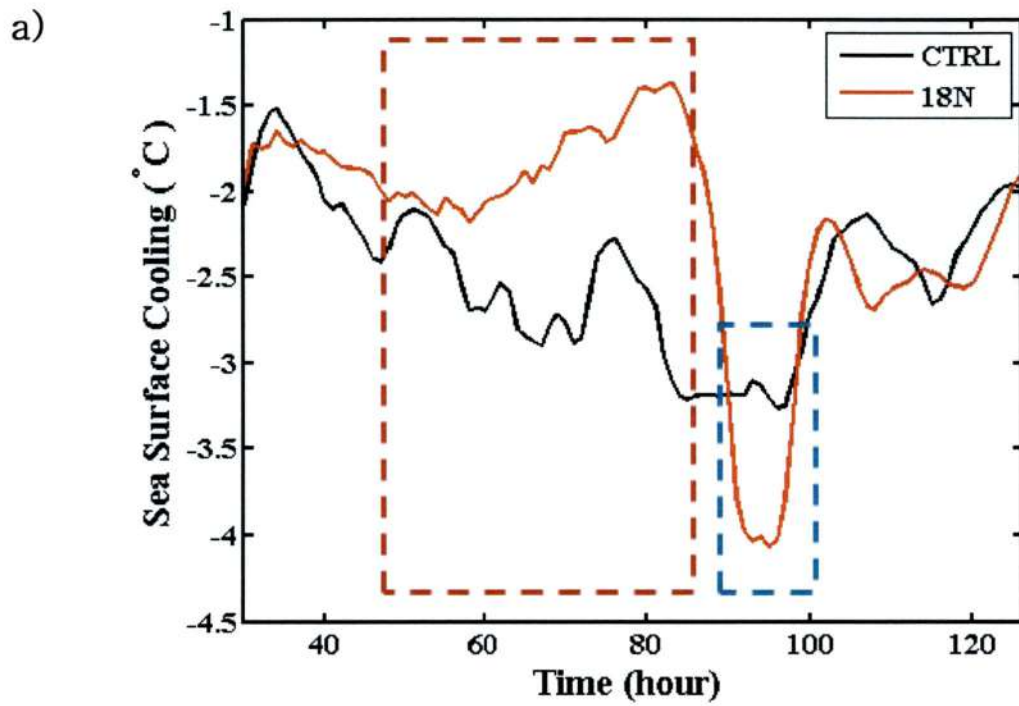


그림 3-5-10. 저염 패치 통과 실험에서 각 실험 별 (a)해수면 냉각, (b)최저 중심 기압의 시계열. 빨간색 박스는 저염 패치 안을 의미하며 파란색 박스는 해수면 온도 되먹임(Sea Surface Temperature Feedback) 효과를 볼 수 있는 부분을 의미함.

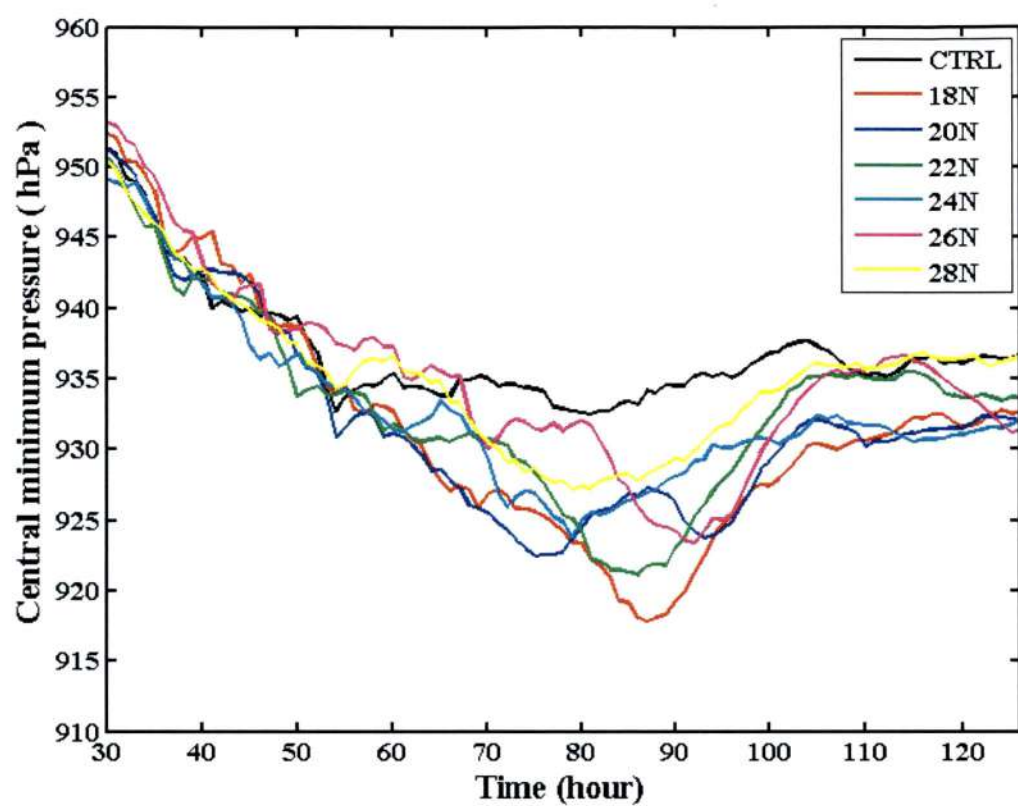


그림 3-5-11. 성층 정도에 따른 태풍 강도 변화 실험의 최저 중심 기압 시계열.

(2) 이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 검증

1) 수치모델 개요 및 접합 과정

NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 중규모 기상모델인 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델은 목적에 따라 현업용인 NMM(Nonhydrostatic Mesoscale Model)과 연구용인 ARW(Advanced Research WRF) 버전으로 나뉜다. 본 실험에서 사용된 ARW 버전은 완전 압축성(fully-compressible), 비정수계(nonhydrostatic) 오일러 지배 방정식으로 구성되고, 지배 방정식은 보존 속성의 변수들을 플럭스(flux) 형태로 계산한다.

WRF 모델은 Arakawa C 수평 격자 체계를 사용하고 있으며, 코리올리 항과 곡률항이 포함되어 있다. 연직 격자 체계는 지형을 따르는 정수압(hydrostatic-pressure) 연직 좌표계를 사용한다(Laprise, 1992). 그림 3-5-12는 대기모델의 연직 좌표를 나타내고, 식(1)에 의해 정의된다. 여기서 식(1)의 p_{hs} , p_{ht} 는 각각 하층 경계와 상층 경계의 기압을 의미한다.

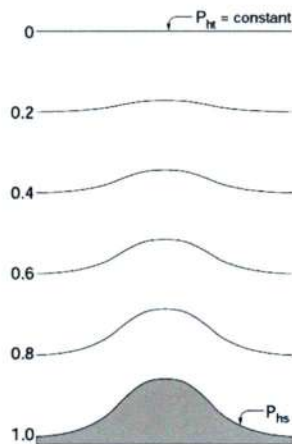


그림 3-5-12. 대기모델의 연직 좌표.

$$(1) \eta = (p_h - p_{ht}) / \mu, \quad \mu = p_{hs} - p_{ht}$$

물리과정은 그림 3-5-13처럼 미세 물리(Microphysics)과정, 적운 모수화(Cumulus parameterization), 표층 물리(Surface physics)과정, 행성 경계층 물리(Planetary boundary layer physics)과정, 대기복사 물리(Atmospheric radiation physics)과정으로 이루어져 상호작용을 한다.

그중에서도 행성경계층(Planetary Boundary Layer, PBL) 물리과정은 표층(Surface Layer) 물리과정과 연동되어 대기의 운동량, 열, 수증기의 플럭스를 교환한다. 표층은 육지와 해양으로 경계를 이루는데, WRF모델의 해양영역은 해양 순환에 대한 역학이 없기 때문에 해수면 온도의 시·공간 변화를 얻기 위해서 해양모델과 접합하였다.

Direct Interactions of Parameterizations

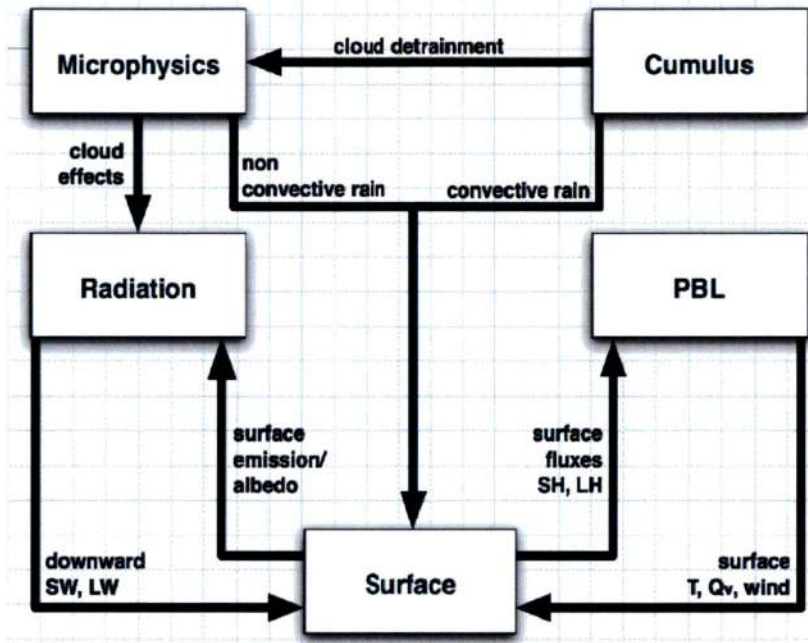


그림 3-5-13. 대기모델의 물리과정 모식도.

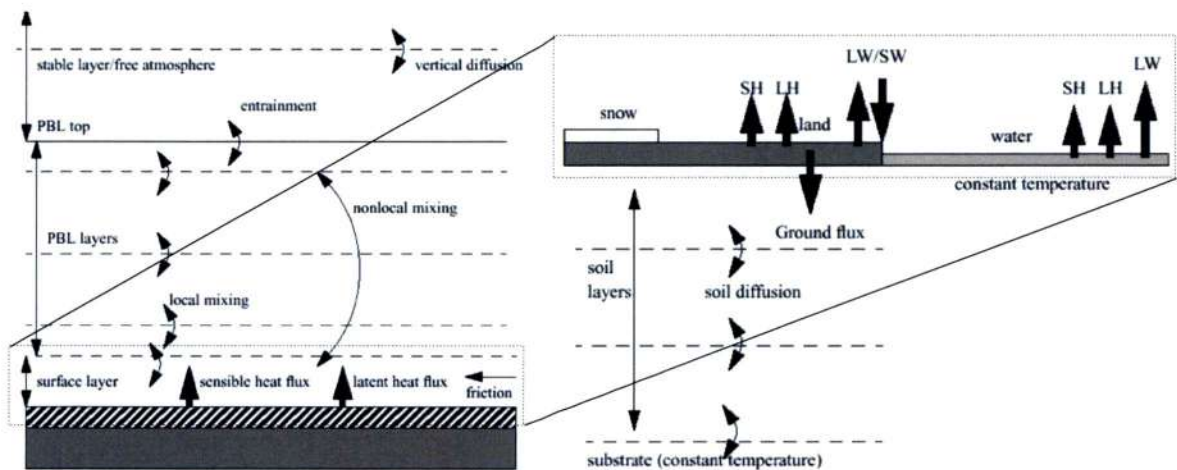


그림 3-5-14. 대기-해양 플럭스 교환 모식도.

해양모델은 Rutgers University에서 개발된 ROMS(Regional Ocean Modeling System) 모델을 사용하였다. ROMS 모델은 3차원의 원시 방정식을 사용한 해양 순환 모델이다. 수평, 연직 격자는 중앙 이차 유한 차분법을 사용해 계산한다. 대기와 해양 사이에서 운동량, 현열, 잠열의 표층 플럭스 계산은 COARE(Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment)의 알고리즘을 적용하였다.

수평격자는 Arakawa C 격자체계를 사용하고 직각좌표 또는 곡선 좌표계를 사용한다. 연직 좌표계는 지형을 따르는 시그마 좌표계(σ -coordinate)를 사용하는데, 연구 영역(혼합층, 수온약층, 바닥 경계층)에 따라 해상도 조절이 가능하다. 그림 3-5-15는 해양모델의 연직 좌표를 나타내고, 식(2)에 의해 정의된다. 여기서 식 (2)의 h 는 수심이고, h_c, σ 는 상층과 하층 사이에 연직 해상도를 제어하는 변수를 의미한다.

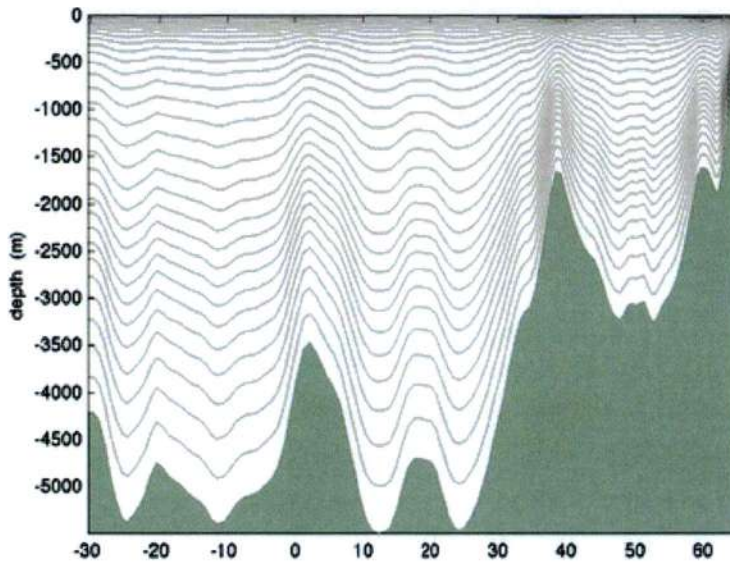


그림 3-5-15. 해양 모델의 연직 좌표.

$$(2) \ S(x,y,\sigma) = \frac{h_c \sigma + h(x,y)C(\sigma)}{h_c + h(x,y)}$$

해양모델은 수평 이류(advection), 연직난류 혼합(vertical turbulent mixing), 용승(upwelling) 물리과정 등으로 이루어져 있다.

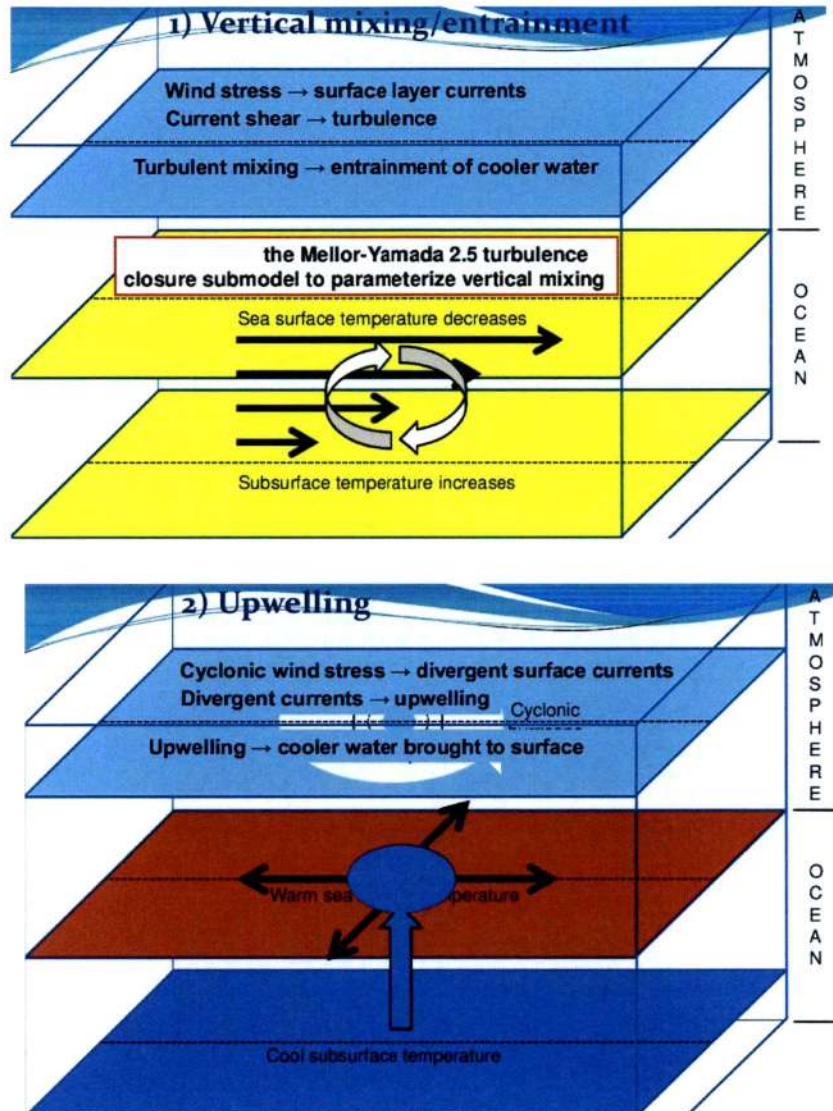


그림 3-5-16. 태풍에 의한 해양 혼합 과정인 수직혼합 과정(상단)과 용승과정(하단) 모식도.

접합 모델은 대기와 해양의 시·공간적 변화를 동시에 연구할 수 있다는 점과 대기-해양의 상호작용 연구에 있어서 중요한 의미를 지닌다. 그래서 접합모델은 WRF 대기 모델과 ROMS 해양 모델을 MPI(Message Passing Interface)라는 병렬 프로그래밍 언어를 이용해 접합하였다.

MPI는 프로세서들 사이의 통신을 위해 코드에서 호출해 사용하는 서브루틴 또는 함수들의 라이브러리를 일컫는다. MPI-2는 MIMD(Multi Instruction, Multiple Data)모델에 따라 다른 내부 통신자에 속한 프로세서도 서로 메시지를 주고 받을 수 있도록 MPI-1의 통신 함수를 광역 통신자를 통해서 기능을 하도록 함수를 확장했다. 그래서 MIMD모델은 마스터의 규칙에 맞으면 새로운 기능의 종속 프로그램을 쉽게 붙일 수 있어 큰 규모의 프로그래밍에 보다 적합하고 확장성도 뛰어난 장점이 있다.

접합 모델의 접합 방식은 두 프로세스중 하나가 연결을 요청해서 상대방이 그 요청을 받아들이면 서로 새로운 광역 통신자를 받으므로 연결하려는 두 프로세스는 서버와 클라이언트의 관계가 된다. 연결이 되면 각각의 모델들이 서로 통신할 수 있도록 그림 3-5-17과 같은 MPI 서브루틴을 기존의 모델 코드에 삽입하였다.

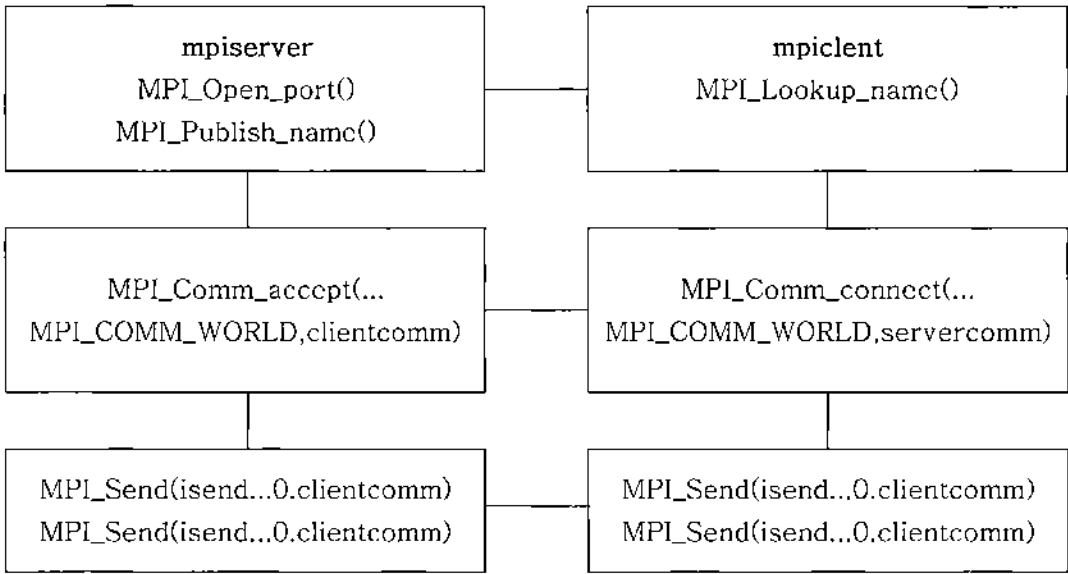


그림 3-5-17. 접합 모델 내 MPI 서브루틴 모식도

WRF 대기모델은 ROMS 해양모델에게 바람응력(wind stress)과 순열속(net heat flux)을 전달하고, 반대로 ROMS 해양모델은 WRF 대기모델에게 해수면 온도(sea surface temperature, SST)를 제공한다. 외력으로 사용되는 바람의 응력(τ), 현열속(H), 잠열속(E)은 Monin-Obukhov 상사 이론(similarity theory)에 의해 각각 식(1.2)과 같이 표현된다.

$$(1) \tau = \rho u_* u_*, (2) H = \rho c_p u_* \theta_*, (3) E = \rho l_e u_* q_* \quad (1.2)$$

여기서 ρ , c_p , l_e 는 각각 공기의 밀도, 정압비열, 증발 잠열을 나타내고, u_* , θ_* , q_* 는 각각 바람, 대기온도, 비습에 대한 척도 매개변수로써 지표층에서는 고도에 관계없이 일정한 값을 갖는다. 위의 식에 의해 계산된 변수들은 시간(time step)마다 교환될 수 있도록 하였다. 단, 이 접합모델에서 대기 모델과 해양 모델의 위·경도 격자구성은 같기 때문에 접합모델 내부에 내삽 과정 코드는 포함되어 있지 않다.

표 3. Summary of WRF and ROMS model configuration

Model	WRF 3.2.1	ROMS revision 519
Horizontal grid size	약 12-15km	
Map projection	Lambert projection	
Vertical layers	28	30
Grid dimension	270 × 270 (center : 128°E, 25°N)	
	320 × 220 (center : 143°E, 27°N)	
Terrain resolution	USGS 2'	Etopo 2'
Initial & Boundary condition	NCEP FNL	HYCOM / JCOPE

2) 실험 방법

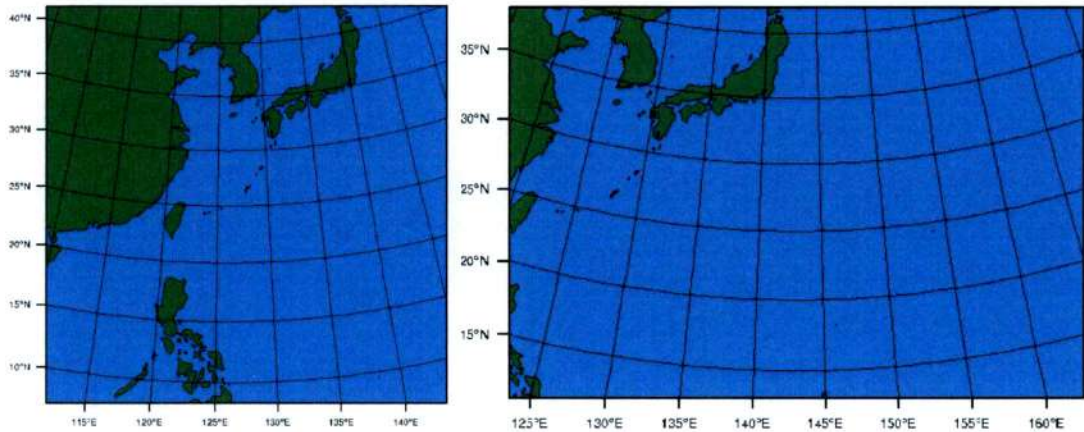


그림 3-5-18. 접합모델 연구 도메인.

본 연구에서는 태풍 초기 위치에 따라 2개의 영역으로 구분해 실험을 하였다. Raju(2011)는 대기모델을 이용한 태풍의 진로와 강도 연구에서 태풍은 주로 행성경계층 모수화(PBL scheme), 적운 모수화(Cumulus scheme), 미세물리 모수화(Microphysics scheme)에 민감함을 보여주었다. 그래서 민감도 실험은 태풍의 진로와 관련하여 대기모델의 행성경계층(PBL) 모수화에 초점을 맞추었고, 해수면 냉각과 관련하여 해양모델의 연직 난류 혼합(vertical turbulent mixing) 모수화에 초점을 맞추어 MYL(MM5-YSU-LMD), MYM(MM5-YSU-MY25), EML(ETA-MYJ-LMD), EMM(ETA-MYJ-MY25)의 4가지 방법으로 구분하였다(Table.). 이외에 단파/장파 복사 물리과정(Shortwave/Longwave radiation physics)은 각각 Dudhia, RRTM 모수화 방법을 사용하고, 지면 표층 물리(Land surface physics)는 Noah land surface model를 사용하였다. 태풍 예위니아를 민감도 실험을 위한 사례로 선정하였다.

표 4. Design of sensitivity experiments

No.	Atmosphere model			Ocean model
	PBL schemes	Cumulus schemes	Microphysics	Vertical mixing schemes
1(MYL)	YSU-MM5	Kain-Fritsch	WSM-6	LMD
2(MYM)	YSU-MM5	Kain-Fritsch	WSM-6	MY25
3(EML)	MYJ-ETA	Kain-Fritsch	WSM-6	LMD
4(EMM)	MYJ-ETA	Kain-Fritsch	WSM-6	MY25

민감도 실험을 통해 태풍의 진로는 EMM방법이 관측자료에 비해 다소 이동속도가 느리기는 하지만, 이동 방향은 다른 실험에 비해 관측값에 비슷하였다(그림 3-5-19). 태풍의 강도는 관측자료와 비교하여 모든 실험에서 비슷하게 나타났다. 예보 초기에 태풍의 최대강도가 제대로 묘사되지 못한 것은 여러 원인이 복합적으로 작용했지만, 태풍 보거싱의 한계로 초기에 관측값과 비슷한 모조 태풍이 형성되지 못한 것으로 사료된다(그림 3-5-20).

EML방법은 EMM과 비교하여 예보 초기에는 비슷한 진로와 강도 패턴을 보였으나, 태풍 전향 이후에 진로 차이가 발생한 것은 접합 모델의 연직 혼합 보수화에 의한 해수면 냉각 차이가 발생하고 이러한 차이가 태풍의 구조에 변화를 일으켜 태풍의 진로와 강도의 차이를 발생시킨 것으로 사료된다.

MYL과 MYM방법은 EMM방법에 비해 태풍의 진로예측에서 큰 오차를 보이는데, 행성경계층(PBL) 보수화가 북서태평양에서 북태평양 고기압을 재현하는 정도에 따라 태풍의 전향시기에 영향을 미친 것으로 사료된다. YSU와 MYJ의 보수화 비교를 통해 행성경계층 보수화 방법이 태풍의 진로 예측에 있어서 매우 민감하다는 것을 알 수 있었다.

민감도 실험을 통해 EMM(ETA-MYJ-MY25) 보수화 방법을 접합 모델의 최적화된 물리과정으로 선정하여 연구를 진행하였다.

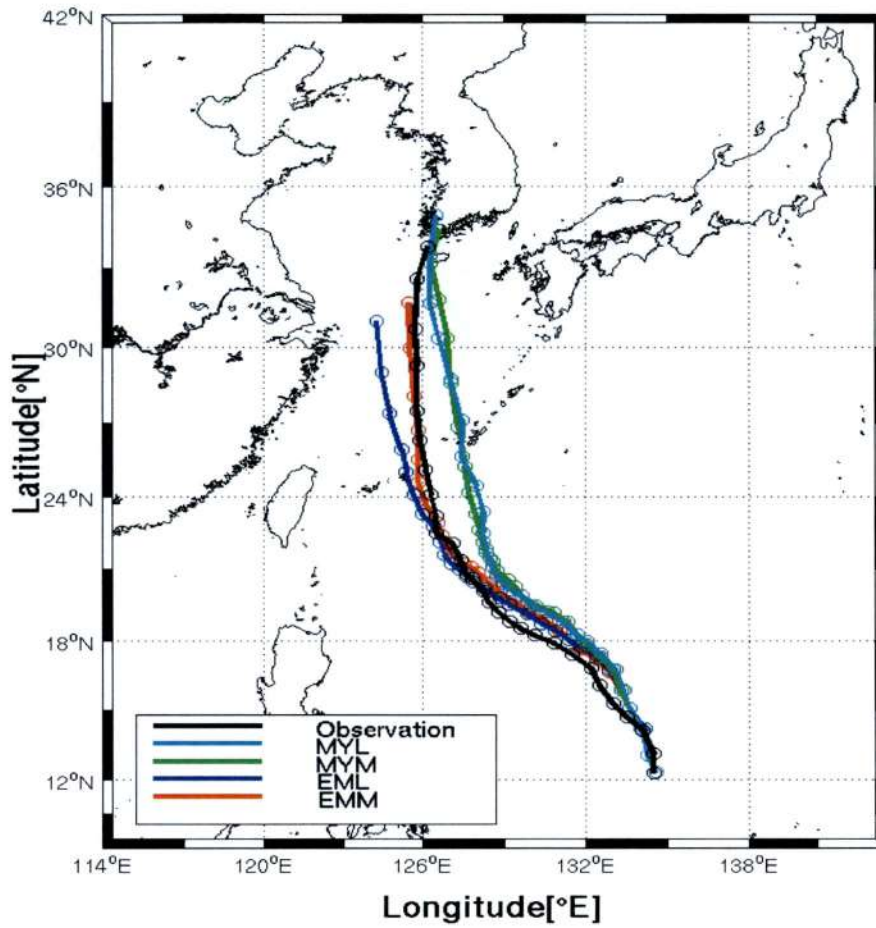


그림 3-5-19. 태풍 에위나아 시기의 각 민감도 실험별 태풍 진로도.

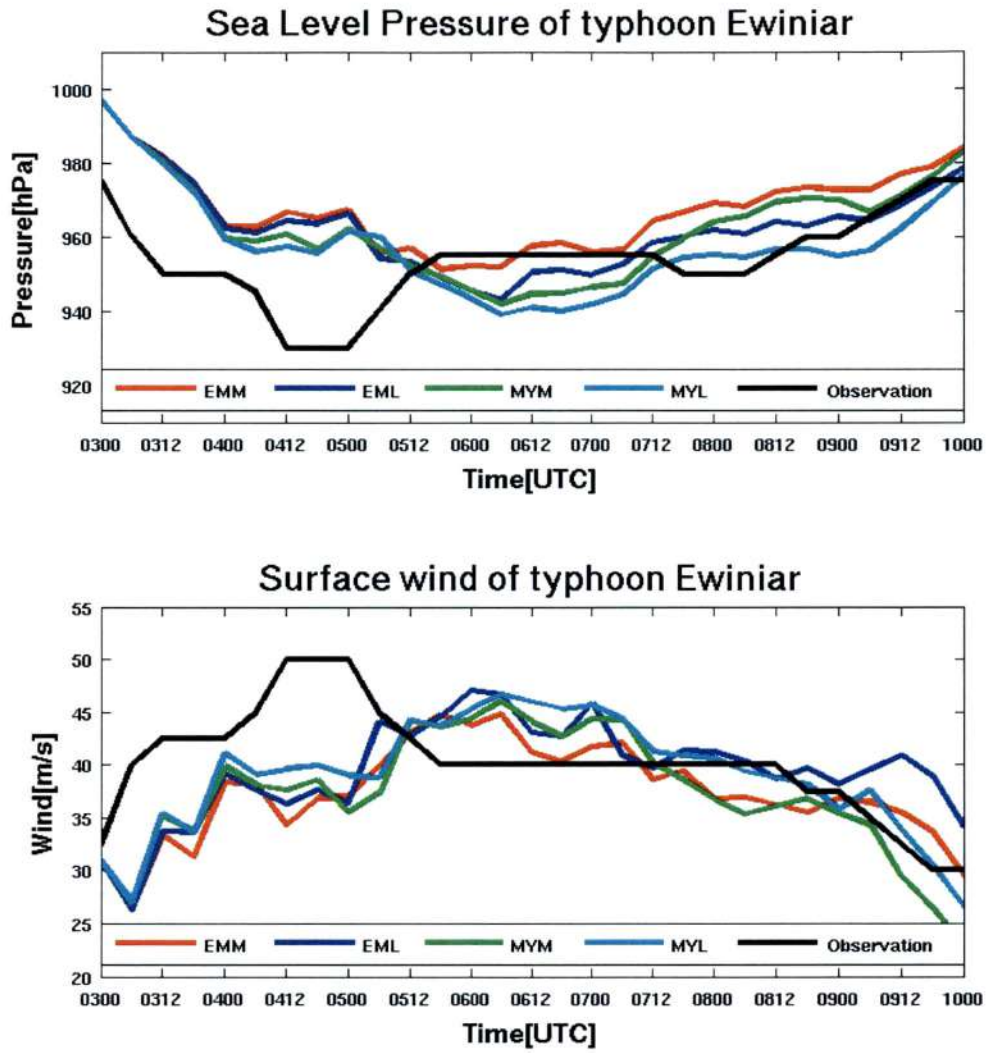


그림 3-5-20. 태풍 에위니아 시기의 각 민감도 실험별 최저중심기압 (상단) 최대 강풍 (하단) 비교 시계열

3) 결과

태풍 에위니아는 7월 10일에 한반도에 상륙하였다. 그림 3-5-21a는 7월 10일의 NCEP FNL 분석장을 이용해 연직시어를 나타낸 것으로 한반도와 일본 전역에서 강한 연직시어가 분포한다. 접합 모델 결과인 그림 3-5-21b를 보면 약 30°N를 중심으로 남쪽은 분석장과 비슷한 분포를 나타내고 있으나, 북쪽의 강한 연직시어 분포를 제대로 재현하지 못해 태풍 에위니아의 진로 및 강도 오차를 발생시킨 원인으로 생각된다.

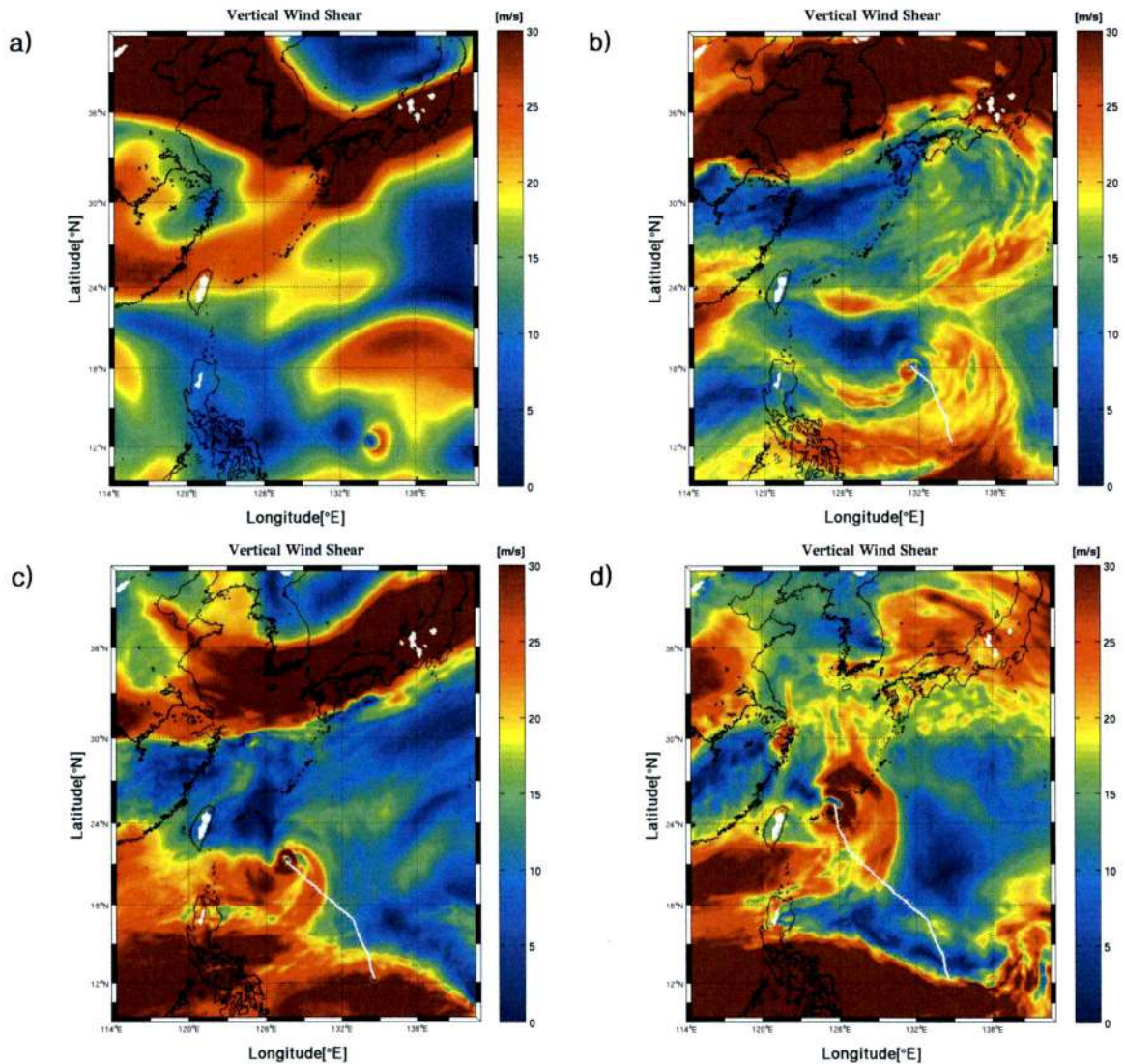


그림 3-5-21. 태풍 에위니아 시기의 연직 시어 분포도. (a)NCEP-FNL 분석장 값. (b)~(d)는 접합 모델 결과로 3일 간격임.

한반도에 태풍 에위니아가 상륙하면서 태풍 빌리스는 북서쪽으로 이동한다. 태풍 빌리스의 진로 전면에는 약한 연직시어가 분포하여 태풍이 발달할 수 있는 우호적인 대기 조건을 갖추었다.

태풍 에위니아의 전향으로 필리핀 동쪽 해상에서는 강한 해수면 냉각이 발생하였다. 강한 해수면 냉각이 발생한 지역(그림 3-5-22의 파란 박스)의 해수면 온도를 평균해 보면 접합 모델은 TMI 관측자료와 비슷하게 약 6℃ 정도의 강한 해수면 냉각과 시간에 따른 해수면 온도 변화도 비슷하게 재현하였다(그림 3-5-23). 모델의 공간적인 분포에서 보면 황해 근처에서는 약한 저기압에 의해 냉각되었던 해수면 온도가 복사에 의해 다시 원상대로 회복되는 것을 재현하였고, 쿠로시오 해류와 쓰시마 난류 등의 해류도 잘 재현하였다.

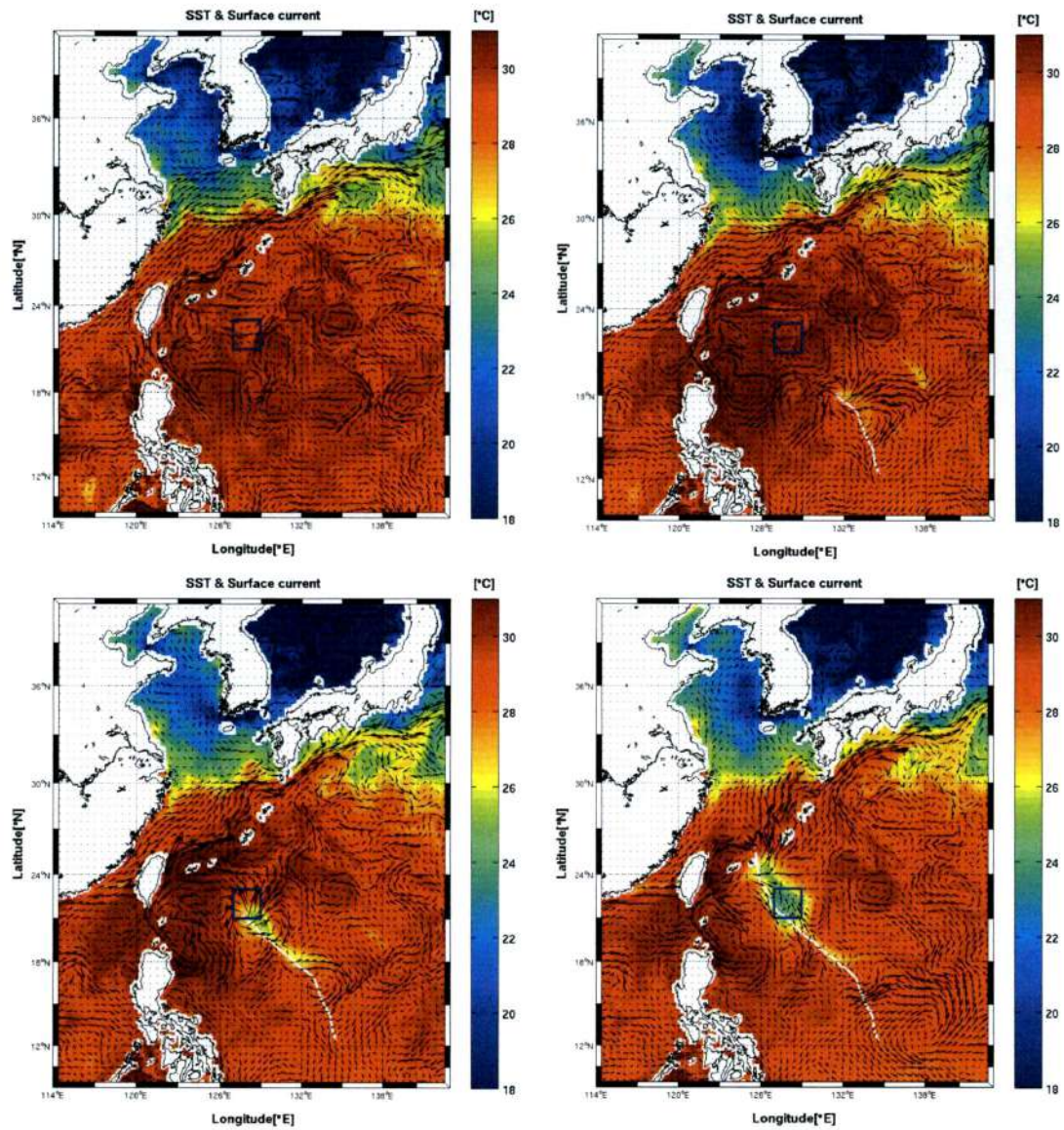


그림 3-5-22. 태풍 에위니아 시기의 해수면 온도 및 해류 분포도. 흰색 실선은 태풍의 진로를 의미하며 파란색 박스는 최대 해수면 냉각이 보인 지점을 의미함.

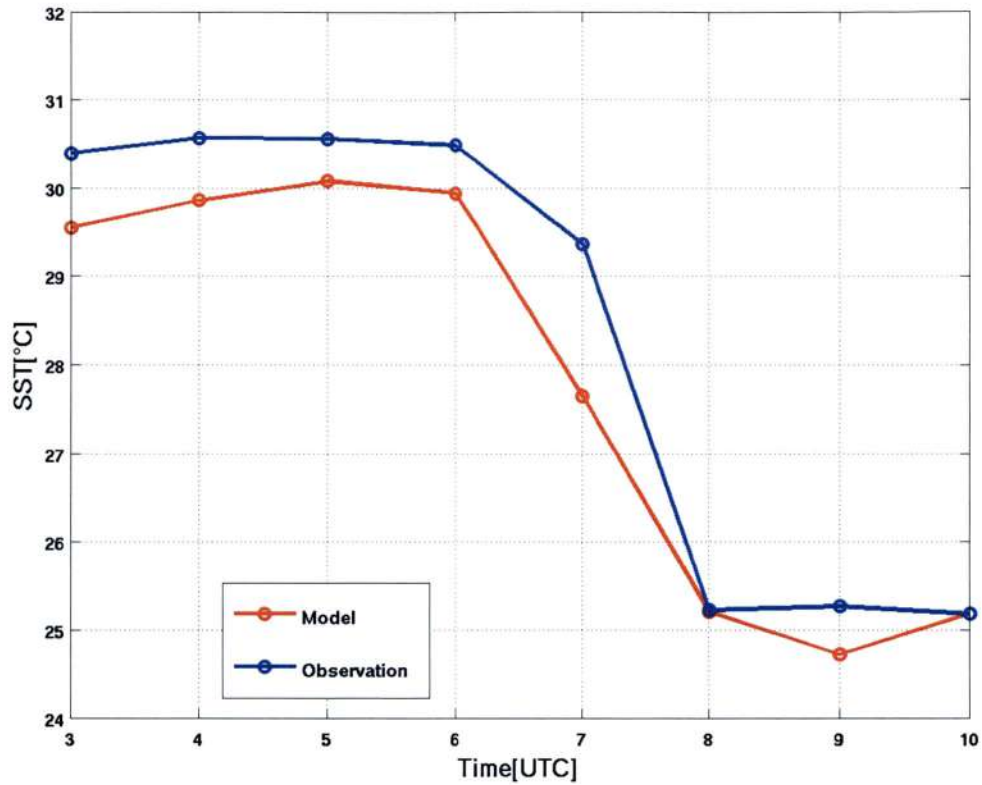


그림 3-5-23. 최대 해수면 냉각을 보인 지점(그림 3-5-18의 파란 박스)의 해수면 온도 평균의 시계열. 빨간색 실선은 모델 결과를 의미하며 파란색 실선은 관측치를 의미함.

동일 지역에서 가장 강한 해수면 냉각이 발생한 지점(127.6°E, 22.0°N)의 해양 상층 구조(0-40m)를 10m간격으로 분석하였다. 시간에 따른 해수면 냉각은 표층일수록 변화가 크고, 하층으로 갈수록 변화는 작은 반면에 냉각의 크기는 가장 작았다.

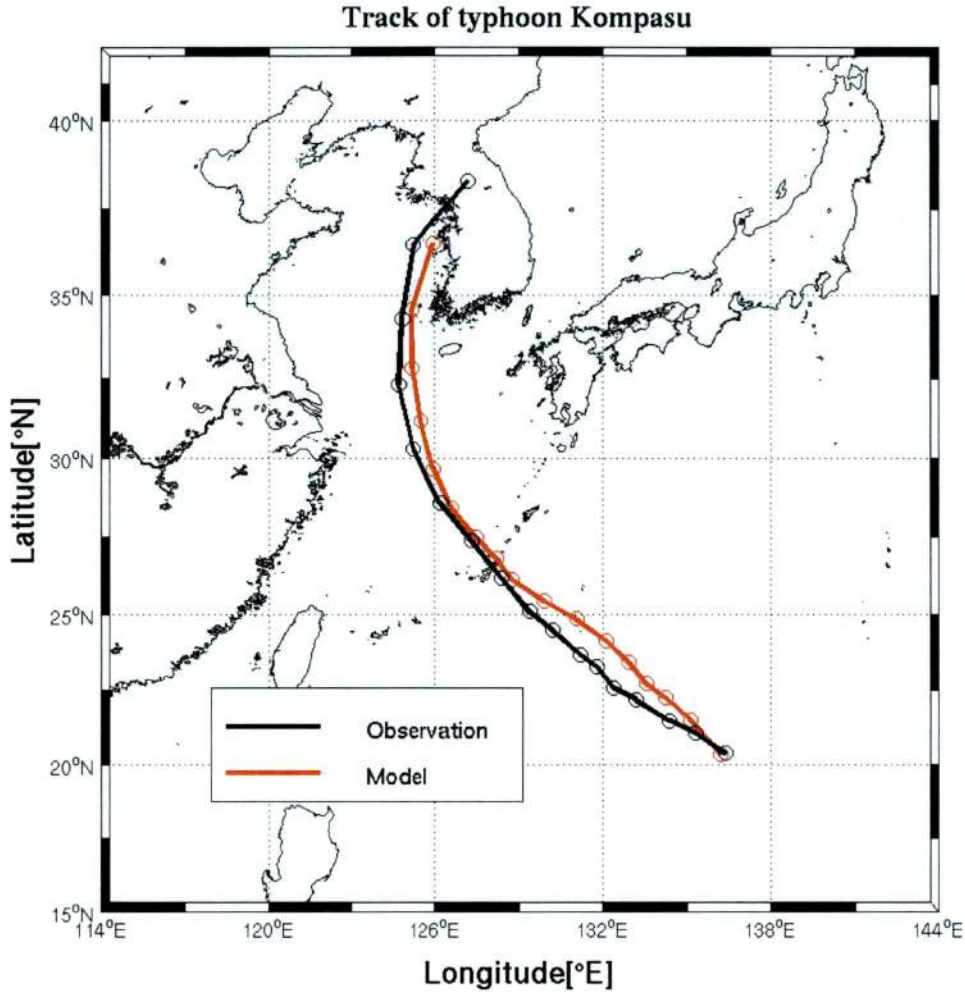


그림 3-5-24. 태풍 곤파스 시기 접합모델의 진로 예측도. 검정실선은 관측치를 의미하며 빨간색 실선은 모델 예측치임.

다음으로 모의해본 사례는 2010년 7호 태풍인 곤파스로 앞선 대기 모수화 민감도 테스트 결과를 바탕으로 재현해 보았다. 곤파스는 2010년 8월 29일 12시에 대만 동남쪽 먼 해상에서 발달하여 북서진하여 3일 뒤인 9월 1일 6시경 이어도 과학기지 서쪽 해상을 지나갔다. 이때 중심기압은 965hPa, 최대 풍속은 37m/s로 비교적 강한 강도를 보였으며 태풍 진로 오른쪽에 위치하여 강한 해양반응이 관측되었다.

곤파스의 경우 진로가 관측치보다 약간 오른쪽으로 편중 되어 있으며 이동속도가 조금 느리나 비교적 정확히 모사 되었다. 특히 5일 예보 진로 오차가 약 190km로 상당히 잘 모사되었음을 확인 하였다(그림 3-5-24). 강도 예위나아와 비슷하게 모델에서 초반 바람을 강하게 모의하는 점을 제외하면 비교적 일치함을 보였다(그림 3-5-25).

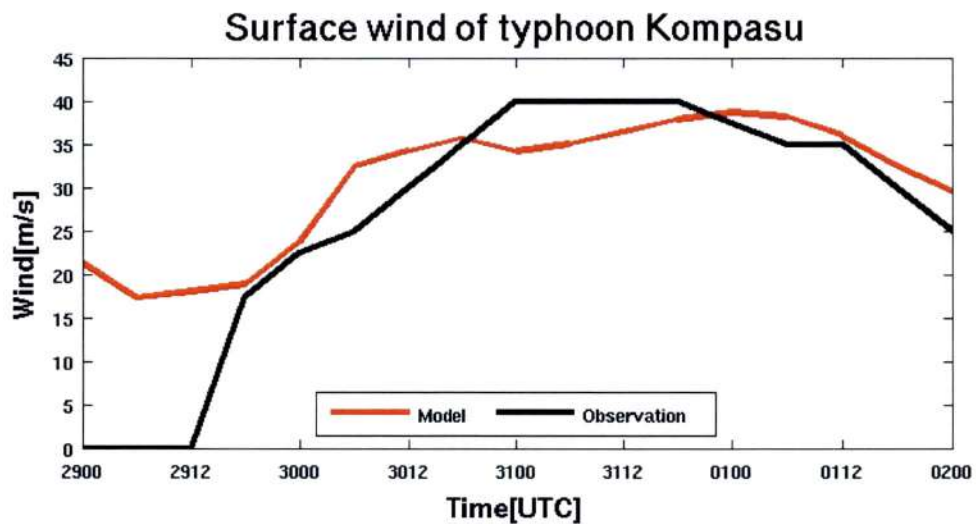
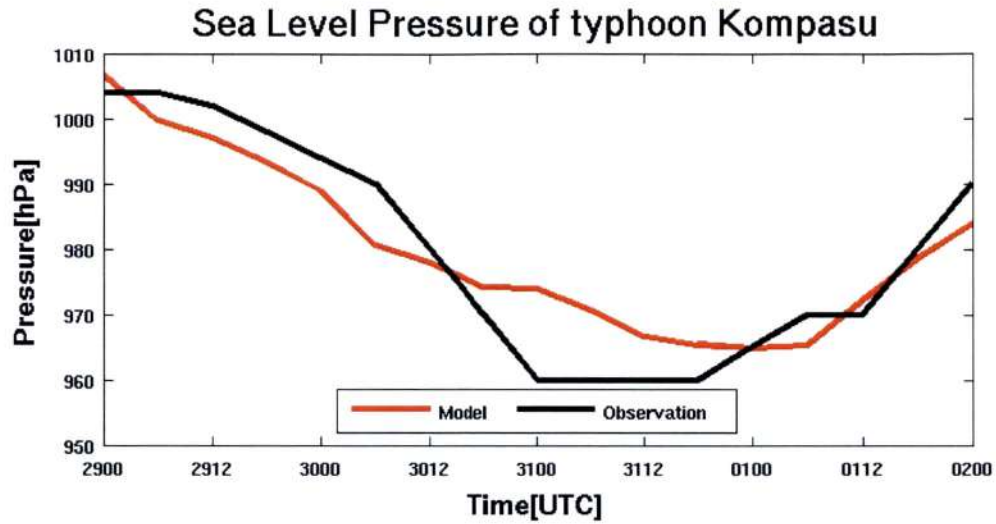


그림 3-5-25. 태풍 곤파스 시기 접합 모델의 최저 중심기압(상단) 및 최대 풍속(하단)의 시계열. 검정실선은 관측치를 의미하며 빨간색 실선은 모델 예측치임.

(3) 이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료 분석

1) 층별 수온

그림 3-5-26은 2008년 1월부터 2011년 8월까지 3년 8개월간의 층별 수온 및 염분의 시계열 자료를 나타낸다. 수온의 변화는 태양 복사에너지 유입량의 변화로 계절변화가 뚜렷이 나타난다. 특히, 겨울은 복사에너지의 유입량이 적어 전체적으로 수온이 낮고 강한 바람으로 인해 혼합층이 깊어져 깊이별 차이가 거의 없다. 반면 여름의 경우 입사량이 많아 표층이 가열되어 약 8m깊이에서 약 30℃가량의 수온이 관측 되었다. 여름의 따뜻한 표층수는 아래에 존재하는 찬물보다 밀도가 낮고 아래로 쉽게 섞이지 않으므로 성층화가 뚜렷하다.

겨울에는 해양 내부는 완전히 혼합되어 성층화가 사라지고 표층 수온이 최저로 떨어져 3월에 최소 표층 수온을 보인다. 봄철로 접어들면서 태양열은 표면 가까이에서 주로 흡수되어 수온의 상승은 대부분 비교적 얇은 표층에 국한된다. 일사량의 증가로 인한 표층 수온의 상승으로 8월에 가장 강한 성층화가 발생한다. 9월부터 가열된 해수는 서서히 냉각되어 다시 성층화가 깨지기 시작한다.

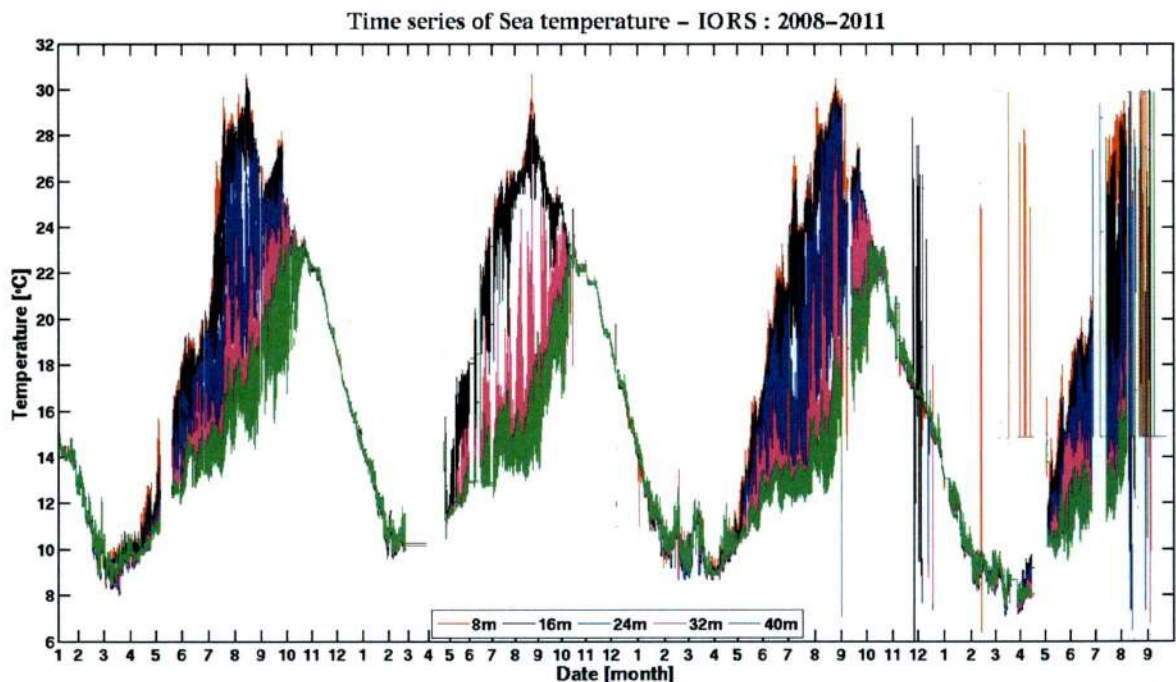


그림 3-5-26. 2008년 1월부터 2011년 8월까지 이어도 과학기지에서 관측된 층별 수온 시계열

2) 층별 염분

염분은 전체 바다에 걸쳐 매우 좁은 범위 내에서 변하며 34.5 - 35.0 psu 사이의 해수가 대부분이다. 일반적으로 수심이 깊어질수록 온도는 하강하며 염분은 증가한다. 이어도 기지의 염분도 일반적인 해양 분포와 마찬가지로 깊이가 깊어질수록 높아지는 경향을 보인다(그림 3-5-27). 이어도 과학기지가 위치한 동중국해는 양자강 담수의 유입으로 인해 표층에 저염수가 존재한다. 특히 강수가 집중되는 여름철에는 계절풍의 영향으로 저염수가 넓게 퍼져있어 이어도 과학기지에서도 저염수가 관측이 된다. 2008년과 2009년에는 약 24psu 정도의 저염수가 이어도 과학기지에서 관측이 되었으며 이듬해인 2010년에는 21psu 정도의 저염수가 관측 되었으며 2011년 역시 비슷한 정도의 저염수가 관측 되었다.

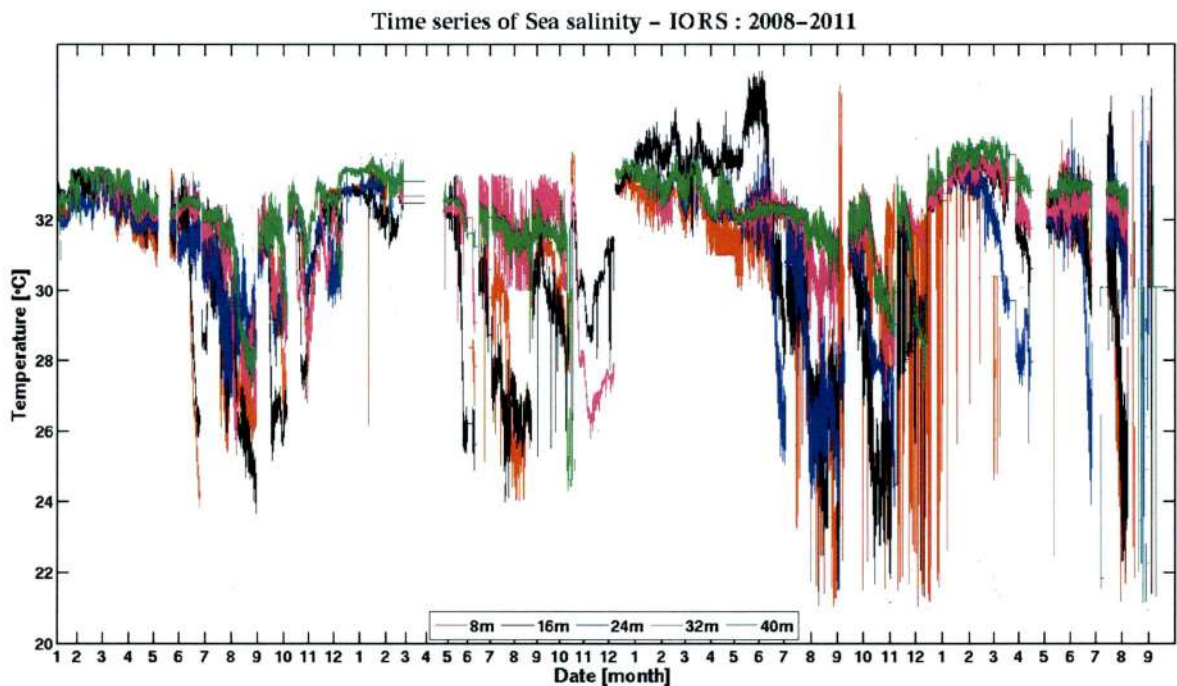


그림 3-5-27. 2008월 1월부터 2011년 8월까지 이어도 과학기지에서 관측된 층별 염분 시계열

6. 결과 및 고찰

그동안 태풍 피해를 저감하기 위한 많은 노력에도 불구하고 갈수록 우리나라에서 태풍의 피해가 커지고 있다. 국토가 좁은 우리나라로서는 내륙을 통한 연안개발은 지속적으로 이루어질 것이며, 특히 지구온난화로 인해 더 강력해진 태풍이 한반도에 상륙할 확률은 더욱 높아지고 있어 미래에는 태풍에 의한 피해가 더욱 커질 것으로 예상된다.

우리나라에서는 아직까지 태풍관측을 위한 체계적인 시스템을 갖추지 못하고 있는 실정에서 2003년 이어도 종합해양과학기지의 구축은 기존의 지상 관측망이나 위성 자료로는 얻기 힘든 남부 해상의 기상 및 해양 관측 자료의 획득을 가능하게 하여 한반도 남쪽에서 내습하는 태풍에 대한 중요한 정보를 얻을 수 있게 되었다.

이어도 과학기지는 1950부터 2004년까지 55년간 한반도에 상륙한 태풍의 63%가 지나가는 길목에 위치하고 있으며, 매년 평균 한 개의 태풍이 기지 근처를 통과하는 것으로 나타났다. 또한 이어도 과학기지는 한반도 북상하는 태풍이 서귀포에 도달하기 평균 4-6시간 전, 한반도 내륙에 도달하기 평균 8-10 시간 전의 귀중한 태풍자료를 관측하는 것으로 나타났다. 특히, 이어도 과학기지는 쿠로시오 난류와 황해저층냉수가 만나는 경계에 위치하고 있어 태풍강도를 결정하는 해양의 수온변동을 모니터링하기에 가장 좋은 장소로 밝혀졌다. 이상의 결과를 종합해보면 이어도 과학기지는 한반도로 북상하는 태풍을 예측하고 연구하는데 매우 유용하게 활용될 수 있음을 시사한다.

이어도 기지에서는 기본적인 해양 및 기상 자료 외에도 해양-대기 플럭스 자료가 관측된다. 해양의 잠열과 모멘텀 플럭스는 태풍의 강도를 변화시키는 중요한 요소로 알려져 있다(Moon et al., 2004a, 2004b, 2004c, 2007a, 2007b). 태풍의 길목에 위치하며 플럭스 자료를 포함한 다양한 해양 및 대기 관측자료를 얻을 수 있는 이어도 기지는 세계에서 유일한 “강한 풍속 하에서 해양 대기 상호작용을 연구할 수 있는 곳”이기도 하다. 이어도 기지를 이용한 이러한 연구들은 한반도에 상륙하는 태풍을 정확하게 예측하는 데 크게 기여할 수 있을 것이다.

태풍 시기에 이어도 기지에서 관측된 자료가 태풍의 강도 예측에 매우 유용하게 사용될 수 있음에도 불구하고 아직까지 우리나라 현업 태풍예보에서 그 활용성이 높지 않다. 이것은 실시간으로 이어도 관측 자료를 활용하여 태풍모델에 적용하는 기술이 부족하기 때문이다. 앞으로 이어도 자료를 활용하여 태풍예측기술 향상에 기여하기 위해서는 이어도 자료의 실시간 자료동화기법 개발, 그리고 태풍 시기에 해양의 변화를 적절하게 고려하기 위한 태풍-해양 접합 모델의 개발 등이 절실하다.

1950부터 2004년까지 한반도에 상륙한 태풍의 경로와 강도를 조사한 결과, 제주도 우측을 통과해 우리나라 남해안으로 상륙한 태풍들은 제주도 좌측을 통과해 우리나라 서해안으로 상륙한 태풍들에 비해 평균적으로 높은 강도를 유지하였던 것으로 나타났다. 이것은 제주도 우측을 흐르는 따뜻한 쿠로시오 해류가 태풍에 에너지를 공급하여 그 강도를 유지 시키는 것에 반해 제주도 좌측에 위치한 황해저층냉수는 Cold Wake에 의해 태풍의 강도를 약화시키는 요인으로 작용하기 때문이다.

실제로 World Ocean Atlas 2005과 미해군 자료동화 자료를 이용하여 우리나라로 향하는 태풍의 이동 경로 상의 수평 및 수직적인 수온 분포를 조사한 결과, 제주도를 경계로 왼쪽 지역은 수심 50-60m 부근에서 12-15°C의 수온을 가지는 황해저층 냉수가 분포하며, 일본 연안 쪽은 25°C 이상의 고온의 쿠로시오 지류가 표층에서 수심 70m 이상까지 분포하는 것으로 나타났다. 황해저층 냉수는 바닥을 따라 위도 28°N까지 확장되어 있다.

황해 저층 냉수의 연도별 분포 정도를 KODC 정선 8월 수온 자료를 사용하여 조사해 본 결과 황해 저층 냉수가 남하하는 정도와 규모가 각각의 해마다 다르게 나타났으며 12°C의 등온선의 분포에서 1996년과 2005년도에 제주도 남서쪽까지 황해 저층 냉수가 확장한 것과 2000년대 초반에는 남해 남서쪽까지만 냉수가 확장된 것을 알 수 있었다. 향후 황해 저층 냉수 분포의 장기 변화 경향을 파악하기 위해서는 보다 긴 기간의 관측자료를 이용한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 이어도 기지에서 관측된 2006년 태풍 에위니아에 의한 해양의 반응을 수치모델을 사용하여 확인하였다. 관측된 층별 수온 분포에서 16m 수심에서 태풍 통과 12시간 후 최대 12°C까지 수온 감소가 발생하였다. 이 시기에 관측된 TMI 위성자료에서도 역시 비슷하게 큰 크기의 해수면 냉각이 관측되었다. 이어도 과학기지 통과 시 태풍의 강도가 약했던 점과 이동속도가 빨랐다는 점으로 미루어 볼 때 이때 발생한 해수면 냉각은 특별한 기작에 의해 일어난 현상임을 생각해 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 태풍 에위니아 시기에 이어도 관측 기지에서 관측된 기록적인 수온냉각의 원인을 수치모델과 관측 결과를 통해 확인해보았다.

3차원 해양수치모델을 사용하여 태풍 에위니아에 의한 북서태평양의 해양반응을 재현한 결과, 비교적 이어도 과학기지에서 관측한 결과와 유사한 결과를 얻어 낼 수 있었으며 2006년 태풍 에위니아 시기에 이어도 과학기지에서 관측된 기록적인 수온 하강의 원인을 아래와 같이 찾아내었다.

- i) 이어도 과학기지 주변 해역의 특이성 : 얇은 혼합층, 큰 수직 수온 구배
- ii) 조류와 태풍에 의한 해류의 상호작용에 의한 용승 강화
- iii) 용승을 강화 시키는 해저 지형

결과적으로 이러한 이어도 주변해역의 특징적인 해양환경은 태풍이 발생시킨 해수면 냉각에 의해 태풍의 강도를 약화시키는 요인으로 작용하며 한반도로 향하는 태풍의 강도를 결정하는 중요한 변수로 작용한다 (문 등, 2007; 문일주 2006; 문일주, 2007).

WRF 모델을 이용한 태풍-해양 상호작용 연구에서는 저해상도의 초기 대기 입력장의 한계를 극복하기 위하여 GFDL 타입의 태풍 보거싱을 통해 태풍 초기 조건개선을 위한 연구를 진행하였다. 이후 개선된 초기장을 이용하여 2003년 태풍 매미를 재현해본 결과 강도 및 진로에서 관측치와 상당히 일치함을 확인하였다.

현재 제공되고 있는 위성 해수면 온도 자료와 모델과의 민감도 테스트를 진행하였으나 현재 제공되고 있는 위성자료들이 상당부분 연안지역을 모사를 하지 못하였으며 해상도가 높은 자료와 낮은 자료의 수온 분포차이가 크지 않아 한반도 연안에서 시공간적으로 빠르게 변화하는 해양의 특성을 재현하는 데에는 한계가 있음을 시사했다.

본 연구에서는 GFDL-POM coupled model를 이용하여 이어도 주변 해역의 초기 해수

면 온도와 혼합층 깊이 그리고 해수면 염분 분포에 따른 표층해수 냉각과 태풍강도의 민감도를 조사 하였다. 그 결과 초기 혼합층 깊이가 얇을수록 표층 냉각이 강화되어 결국 태풍강도를 약화시킴을 확인 하였으며 초기 해수면 온도가 높을수록 태풍의 강도가 강화되어 해수면 냉각이 커짐을 확인 하였다. 후자의 경우 태풍의 강도가 결국 자신의 강도를 제한하는 되먹임 효과를 갖는다는 것을 의미한다. 염분 패치 통과 실험에서는 태풍이 저염 패치 위를 지나가는 경우 그렇지 않은 경우보다 적은 해수면 냉각이 일어남을 확인 하였다. 저염수에 의한 성층은 수직 점도(viscosity)를 줄여 운동량이 하층으로 전달되는 것을 억제한다. 따라서 해류시어에 의한 혼합이 얇은 수심에서만 일어나게 되며 결국 해수면 냉각이 적게 일어나게 된다. 이러한 해수면 냉각의 저하는 해수면 플릭스의 증가를 불러일으켜 태풍의 강도를 강하게 한다. 결과적으로 저염수에 의한 상층해양의 성층 강화는 수직혼합을 억제하여 태풍에 의한 해수면 냉각을 저해하며, 그 결과 저염수 위를 지나가는 태풍의 강도를 강하게 할 수 있게 된다.

이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델의 검증 연구에서는 WRF-ROMs접합 모델을 사용하여 이어도 기지 근처를 지나간 에위니아(2006)와 콤파스(2010) 두 태풍 사례를 재현하여 관측 치와 비교 하였다. 우선 에위니아의 경우 대기모델의 대기모수화 과정의 민감도를 테스트 하였으며 이후 본 모델과 동중국해에 가장 적합한 과정을 통해 차후 실험을 진행 하였다. 검증 결과 두 사례 태풍 모두 재현이 잘되었음을 확인 하였다. 이어도 과학기지의 층별 수온 염분 관측자료 분석연구에서는 우선 2010년 이어도 과학기지를 통과한 3개의 태풍에 대한 분석을 진행하였다. 태풍의 강한 바람은 상층에 강한 해류를 일으키며 이는 강한 혼합을 유발한다. 이에 따른 결과로 해수면 냉각과 저염수 지역에서의 염분 상승을 볼 수 있다. 태풍 곤파스의 경우 약 5℃의 해수냉각과 약 10psu 정도의 염분 상승이 관측되었다. 태풍 곤파스와 태풍 말로는 약 4일의 시간차이를 두고 거의 비슷한 진로로 한반도에 접근하였다. 따라서 태풍 말로의 경우는 태풍 곤파스가 냉각시켜놓은 뒤 아직 회복되지 못한 차가운 해양 위를 지나온 것으로 따뜻한 해양의 열을 공급받아 발달하는 태풍에게 있어 부정적인 역할을 하게 되어 세력이 크게 발달하지 못하였다.

이어도 근해의 시기별 해양 특성을 파악하기 위하여 2008년 1월부터 2010년 8월까지 약 3년 7개월간 이어도 기지에서 층별 관측된 수온 염분 자료를 분석하였다. 수온 염분 자료는 10분 간격으로 관측되었으며 자료 보정 작업을 거쳐 사용되었다. 자료 분석 결과, 대체적으로 겨울의 해양 내부는 수직적으로 완전히 혼합되어 수온에 따른 성층이 사라지고 3월에 최소 표층 수온을 보였다. 반면, 일사량의 증가로 인한 표층 수온의 상승으로 8월에 가장 강한 성층화가 발생한다. 이는 태양열이 표면 가까이에서 주로 흡수되기 때문에 수온의 계절 변화는 대부분 비교적 얇은 표층에 국한되기 때문이다. 염분 분포는 일반적인 해양과 비슷하게 깊이가 깊어질수록 그 값이 높아지는 경향을 보였다. 여름에는 강수와 양자강 저염수의 영향으로 전반적으로 염분이 낮게 관측되었다. 그러나 관측결과 중 상당 부분이 에러 값을 포함하거나 유실된 부분이 많아 보다 신뢰도 높은 자료획득을 위해 지속적인 센서 보완, 보수 및 검증이 필요한 것으로 사료된다.

제 4 장 연구개발 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1. 연구개발 목표 및 내용

구 분	목 표	내 용 및 범 위
1 차년도 (2007)	- 이어도 기지에서 관측된 과거 태풍 자료 분석하여 한반도에 상륙한 태풍의 특성 조사	- 이어도 기지를 통과한 태풍에 대한 기상 관측자료(바람, 기온, 기압 등)와 해양 관측자료(수온, 해수면, 해류 등) 분석 - 이어도 해양/기상 자료와 한반도 상륙 태풍강도 변화의 연관성 분석
2 차년도 (2008)	- 한반도 상륙 태풍 강도를 결정하는 해양/기상 요인 조사 및 이어도 태풍 관측자료 검증.	- 지난 55년간 RSMC, JTWC 태풍자료 및 전구재 분석자료를 이용한 한반도 상륙 태풍 강도/진로 분석 및 해양/기상 환경과의 연관성 조사 - 이어도 주변 여름철 태풍 경로 상의 해양환경 조사: 연안관측 수온 및 염분 자료 분석 - 기후변화에 따른 한반도 상륙 태풍특성 분석 - 이어도 기지 해양대기 관측 자료의 검증 및 수치모델 결과와 비교
3 차년도 (2009)	- 이어도 기지를 이용한 태풍-해양 상호작용 연구 및 한반도 상륙 태풍 강도 예측	- 이어도 기지에서 관측된 태풍 통과 시 해양의 반응을 조사하여 TMI 위성자료와 ARGO float의 연직 수온 자료와 비교 - 수치모델을 이용한 태풍 에워니아 통과 시 해양의 수온 변화 조사 - 태풍 강도에 영향을 주는 황해 저층 냉수 조사 : 미해군 자료동화 자료와 한국 해양자료 센터 자료 분석 - 이어도 기지의 층별 수온과 염분의 계절 변화 특성 조사
4 차년도 (2010)	- 태풍예측기술 향상을 위한 이어도 기지 관측자료를 이용한 해양 및 대기 모델의 검증	- ROMS 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍에 대한 해양반응 조사 및 모델검증 - WRF 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍의 해양-대기 상호작용 연구 및 모델검증 - 이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료 분석
5 차년도 (2011)	- 이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 초기조건 개선 및 예측능력 향상	- 이어도 기지에서 관측된 풍속, 풍향, 기압, 온도, 수온, 조위, 자료를 분석하여 태풍-해양 접합모델의 초기 값 및 모델검증에 활용. - 실시간 수온자료는 해양모델의 초기화과정에 사용되고 바람자료는 태풍모델 초기화과정에 활용. - 이어도 관측자료를 사용하여 검증모델의 검증에 활용

2. 연구평가의 착안점 및 척도

	세부연구개발 목표	가중치	평가의 착안점 및 기준
1차 연도 (2007)	- 이어도 기지를 통과한 태풍에 대한 기상 및 해양 관측자료 분석	40%	이어도 기지를 통과한 태풍에 대한 기상 및 해양 관측자료를 분석하여 중요한 결과를 얻었는가?
	- 한반도에 상륙한 태풍의 특성 조사	40%	한반도에 상륙한 태풍의 특성은 잘 조사되었는가?
	- 이어도 해양/기상 자료와 태풍강도 변화의 연관성 분석	20%	이어도 해양/기상 자료와 태풍강도 변화의 연관성은 잘 분석이 되었는가?
2차 연도 (2008)	- 한반도 상륙 태풍 강도를 결정하는 해양과 기상 요인 조사	40%	여름철 태풍 경로 상의 해양과 대기의 환경이 한반도 상륙 태풍의 강도와 진로에 어떤 영향을 미치는지 잘 조사 되었는가?
	- 기후변화에 따른 한반도 상륙 태풍 특성 변화 조사	30%	지구온난화에 따른 수온 및 기온 상승이 한반도에 상륙하는 태풍의 강도에 어떤 영향을 미쳤는지 잘 조사 되었는가?
	- 이어도 기지 태풍 관측자료의 검보증 및 수치모델 결과와 비교	30%	이어도 기지에서 관측되는 해양/대기 자료는 다른 자료와 비교 분석을 통해 검보증 되었으며, 그 결과는 수치모델 검증에 잘 활용되었는가?
3차 연도 (2009)	- 이어도 기지에서 관측된 태풍 통과시 해양의 반응을 조사하여 TMI 위성자료와 ARGO float의 연직 수온 자료와 비교	30%	특정 태풍이 이어도 기지를 통과하여 한반도를 상륙할 당시에 냉각현상이 발생된 것의 분석이 잘 되었는가?
	- 수치모델을 이용한 태풍 에워니아 통과시 해양의 수온 변화 조사	30%	수치모델을 사용하여 태풍 에워니아의 재현을 잘하였으며 냉각현상 및 수직적 수온의 혼합과정의 역학적 메커니즘 분석이 잘 되었는가?
	- 태풍 강도에 영향을 주는 황해 저층 냉수 조사 : 미해군 자료동화 자료와 한국 해양자료 센터 자료 분석	20%	한반도를 향하는 태풍의 길목에 자리 잡고 있는 황해저층냉수의 분포를 해마다 조사 되었는가?
	- 이어도 기지의 층별 수온과 염분의 계절 변화 특성 조사	20%	이어도 기지에서 관측되는 해양 자료를 분석하고 다른 자료와 비교 분석을 통해 검보정 되었는가?
4차 연도 (2010)	- ROMS 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍에 대한 해양반응 조사	40%	ROMS 모델을 이용하여 이어도 기지 통과 태풍에 대한 해양반응이 잘 재현되었으며, 이어도 기지의 관측자료와 잘 일치하는가?
	- WRF 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍의 해양-대기 상호작용 연구	40%	WRF 모델을 이용하여 이어도 기지 통과 태풍에 대해 해양-대기 상호작용이 잘 조사되었는가?
	- 이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료 분석	20%	이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료를 검정하고 수온 염분의 계절변화 특징을 잘 조사하였는가?
5차 연도 (2011)	- 이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 초기조건 개선	50%	이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델의 초기조건이 개선되었는가?
	이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 검증	50%	이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델의 검증이 잘 이루어졌는가?

3. 연구개발 목표달성도

연구목표	목표대비 결과	목표달성도 (%)	비고
이어도 기지를 통과한 태풍에 대한 기상 및 해양 관측자료 분석	-이어도 기지가 관측을 시작한 2003년 이후부터 2006년까지 기지를 가까이 통과한 태풍 매미(2003), 민들레(2004), 메기(2004), 에위니아(2006)에 대해 기상 및 해양 관측자료를 분석함. -태풍이 외해에서부터 육지에 상륙하기까지 연속적인 변화특성을 모니터링하기 위하여 이어도 기지와 육지 기상청 관측소를 연계하여 자료를 분석함.	100%	
한반도에 상륙한 태풍의 특성 조사	-태풍 매미(2003), 민들레(2004), 메기(2004), 에위니아(2006)에 대해 이어도 기지에서 관측된 결과들을 가지고 특성을 분석함. - 이어도 기지 근처 해역 별 특성에 의해 태풍강도 변화를 확인함.	100%	
이어도 해양/기상 자료와 태풍강도 변화의 연관성 분석	- 이어도 과학기지는 쿠로시오 난류와 황해저층냉수가 만나는 경계에 위치하고 있어 태풍강도를 결정하는 해양의 수온변동을 모니터링하기에 좋은 장소임. - 2006년 태풍 에위니아 시기에 이어도 기지에서 관측된 총별수온 관측자료에서 최대 12°C의 수온 하강이 기록되었음. 이러한 수온하강은 한반도에 상륙한 태풍의 강도약화에 크게 기여한 것으로 사료됨.	100%	

연구목표	목표대비 결과	목표달성도 (%)	비고
한반도 상륙 태풍 강도를 결정하는 해양과 기상 요인 조사	- 황해에서부터 뻗어져 내려온 저층냉수가 한반도 상륙태풍 강도를 어떻게 영향을 주는지에 대해 조사하였음. 조사한 결과 저층냉수 위를 지나가는 태풍과 쿠루시오 난류 위를 지나가는 태풍간의 강도 차이가 확연히 들어남.	100%	
기후변화에 따른 한반도 상륙 태풍 특성 변화 조사	- 지구온난화가 국지적으로 한반도 주변에 더 심화되고 있음을 확인하고 그에 따른 해수면 온도증가로 인해 태풍의 강도가 강해질 것이라 여겨짐. - 대기 요소로 수직바람시어를 구하여 한반도 주변의 대기환경이 태풍발달에 긍정적인 쪽으로 변화되고 있음을 확인함.	100%	
이어도 기지 태풍 관측 자료의 검 보증 및 수치모델 결과와 비교	- 태풍 에위니아의 실제 관측된 이어도 기지의 자료와 수치모델 결과와 비교를 함. 수치모델의 결과 해수면냉각 현상 및 수직적 수온 분포 등이 잘 묘사 되었다.	100%	

연구목표	목표대비 결과	목표달성도 (%)	비고
이어도 기지에서 관측된 태풍 통과 시 해양의 반응 조사	- 태풍 에위니아가 이어도 기지를 통과하여 한반도를 상륙할 당시에 냉각현상이 발생된 것이 분석되었으며 이와 같은 위성자료나 ARGO float 자료에서도 태풍에 의한 해양반응이 조사되었음.	100%	
수치모델을 이용한 태풍 통과 시 해양의 수온 변화 조사	- 태풍 에위니아의 실제 관측된 이어도 기지의 자료를 토대로 수치모델을 재현하고 해양의 수온 변화를 조사함. 수치모델의 결과, 해수면 냉각현상 및 수직적 수온의 혼합과정의 역학적 메커니즘이 규명됨.	100%	
태풍 강도에 영향을 주는 황해저층냉수 조사	- 황해저층냉수의 분포를 미해군 자료동화자료와 한국해양자료센터자료를 사용하여 분석함. 황해저층냉수는 해마다 분포정도가 다르게 분포함을 조사함.	100%	
이어도 기지의 층별 수온과 염분의 계절변화 특성 조사	- 일 년 동안 이어도 기지에서 관측된 층별 수온과 염분의 자료를 분석한 결과 계절변화가 확연히 나타남. 이 자료는 한반도 상륙 태풍의 강도 연구 및 예측에 중요한 역할을 할 것으로 기대됨.	100%	

연구목표	목표대비 결과	목표달성도 (%)	비고
ROMS 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍에 대한 해양반응 조사	- ROMS 모델을 이용하여 이어도 기지 통과 태풍에 대한 해양 반응은 비교적 잘 재현되었으 며, 이어도 기지의 관측자료와 상당부분 일치하였음. 또한 이 어도 기지에서 관측된 기록적인 해수 냉각에 대한 원인을 찾았 음.	100%	
WRF 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍의 해양-대기 상호작용 연구	- WRF 모델을 이용하여 이어 도 기지 통과 태풍에 대해 해양 -대기 상호작용연구의 초반 단 계로 태풍·해양 초기 조건 개선 연구를 진행하였으며 수치모델 재현결과 관측결과와 상당부분 유사한 결과를 얻음.	100%	
이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료 분석	- 이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료를 보강하였으며 2010년 관측된 3개의 태풍사례 에서의 해양반응을 살펴봄. 또 한 계절적 수온·염분 변화를 확 인해 보았음.	100%	

연구목표	목표대비 결과	목표달성도 (%)	비고
이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 초기조건 개선	- GFDL-POM 접합모델을 이용하여 이어도 기지에서 관측된 수직수온 프로파일과 저염수를 토대로 태풍 강도에 영향을 주는 상층 열적 구조와 저염수에 의한 성층을 연구함. 연구결과 해수면 온도 뿐만 아니라 혼합층 깊이와 저염수에 의한 성층 역시 태풍강도에 큰 영향을 주는 것을 확인함.	100%	
이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 검증	- WRF-ROMs접합 모델을 이용하여 이어도 기지 근처를 지나간 에위니아(2006)와 콤파스(2010) 두 태풍 사례를 재현하여 관측 치와 비교함. 우선 대기모델의 대기보수화 과정의 민감도를 테스트 하였으며 이후 본 모델과 동중국해에 가장 적합한 과정을 통해 차후 실험을 진행함. 검증 결과 두 사례 태풍 모두 재현이 잘되었음을 확인함.	100%	
이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료 분석	- 이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료를 보정하였으며 계절적 수온·염분 변화를 확인해 보았음.	100%	

4. 관련분야에 의 기여도

- 한반도에 상륙하기 전의 태풍의 특성을 이어도 기지의 관측 자료로부터 파악함으로써 준비로 태풍피해 경감 기대.
- 한반도 상륙 태풍강도를 결정하는 요인을 분석함으로써 태풍예측기술 향상에 기여
- 과거 한반도 상륙한 태풍들을 분석하여 연안방재 효율적 대책 수립.
- 태풍 강도에 대한 예측기술 향상으로 태풍에 의한 인명과 재산 피해를 줄이는데 기여.
- 태풍피해 저감으로 안전하고 쾌적한 복지사회 실현.
- 전 세계적으로 태풍의 강도가 점점 커질 것으로 예상되어 향상된 태풍강도 예측기술은 우리나라의 경제 및 산업에 크게 기여.
- 태풍 통과 시 이어도 기지에서 강한 풍속 하에 관측된 해양-대기 플렉스 자료는 태풍, 파랑, 해일과 같은 악기상 예측모델에 활용되어 모델 정확도 향상에 기여.
- 이어도 기지의 층별 수온 및 염분 분포의 모니터링은 한반도 상륙 태풍의 강도 연구 및 예측하는데 기여.

5. 연구성과

(1) 학술논문 발표(SCI 2편, 국내논문 4편)

- Moon, Il-Ju, et al. (2011). Impact of upper-ocean thermal structure on the intensity of Korean peninsular landfall typhoons, Progress in Oceanography, accepted.
- Moon, Il-Ju, et al. (2011). Impact of typhoons on the Changjiang plume extension in the Yellow and East China Seas, Journal of Geophysical Research, under review.
- 문일주 등 (2010), 이어도 종합해양과학기지를 활용한 태풍연구: Part I. 태풍관측의 중요성 및 현황, 대기지, 20(3), 247-260
- 문일주 등 (2010), 태풍 예측 및 연구에 있어 이어도 과학기지의 중요성, Ieodo Journal, 1, 210-225
- 문일주 등 (2011), 이어도 기지를 활용한 한반도 상륙 태풍강도 변화 연구, Ieodo Journal, 2, 191-201
- 문일주 등 (2011), Importance of the Ieodo Ocean Research Station in Oceanic and Atmospheric Sciences, Ieodo Journal, 2, 101-114

(2) 국제 학술회의 발표 (총 19편)

- Moon, I.-J. Effect of salinity on tropical cyclone intensity, The Fifth Joint Conference on Meteorology, 2011, October 24-26, Busan
- Kim S.H. and I.-J. Moon, Interaction of typhoons with the Changjiang diluted water, The Fifth Joint Conference on Meteorology, 2011, October 24-26, Busan
- Kim, M. Y. and I.-J. Moon, Enhancement of air-sea interactions during tropical cyclone recurvature, The Fifth Joint Conference on Meteorology, 2011, October 24-26, Busan
- Moon, I.-J. and S.H. Kim, Impact of Typhoons on the Changjiang Plume Extension in the Yellow and East China sea, 2011 Annual Meeting AOGS, 2011, August 8-10, Taiwan
- Moon, I.-J. and S.H. Kim, Impact of River Plumes on Tropical Cyclone Intensity, 2011 Annual Meeting AOGS, 2011, August 8-10, Taiwan
- Moon, I.-J., et al., 2010. "Roles of typhoons in the extension of the Changjiang diluted water in the East China Sea", The 4th China-Japan-Korea GLOBEC/IMBER Symposium, May 18-20, Jeju.
- Jeong, Y. Y. and I.-J. Moon. 2010. "Observations and modeling of the

- record-breaking sea surface cooling induced by typhoon Ewiniar (2006)", The 4th China-Japan-Korea GLOBEC/IMBER Symposium, May 18-20, Jeju.
- Moon, I. J. and S. H. Kim, 2010. "Impact of river plumes on tropical cyclone intensity", 2010 Ocean Sciences Meeting, 26 February, Portland.
 - Moon, I.-J. and S. H., 2010. "Impact of the Changjiang river plume on typhoons in the East China Sea", The 3rd THORPEX-ASIA Science Workshop, 3-5 June, 2010, Jeju.
 - Moon, I.-J., S. H. Kim, M.-Y. Kim, and Y.-Y. Jung, 2009. "On ocean environmental factors affecting typhoon intensity: Results from the coupled typhoon-ocean model", Forth Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology Tsukuba, Japan, November, 2009.
 - Moon, I.-J. and S.-H. Kim "Interactions between the Changjiang Diluted Water and typhoons in the East China Sea", , Workshop on Marine Environment in the East China Sea Cooperative Research Meeting, HyARC Nagoya University, Japan, June, 2009.
 - Moon, I.-J. "Increasing intensity of typhoons made landfall over the Korean Peninsula", International Symposium on the Oceanic Effect due to Climate Change, Busan, Korea, May, 2009.
 - Moon, I.-J., S. H. Kim, M.-Y. Kim, Y.-Y. Jung, and I. Ginis. "Numerical experiments on typhoon-ocean interaction in the Northwestern pacific", International Workshop on Tropical Cyclone-Ocean Interaction in the Northwest Pacific, Jeju, Korea, April, 2009.
 - Moon, I.-J., S. H. Kim, M.-Y. Kim, and Y.-Y. Jung. "Numerical experiments on ocean environmental factors affecting typhoon Intensity", The 15th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting, Busan, Korea, April, 2009.
 - Moon, I.-J. "Importance of Air-sea Interactions on the Coupled Typhoon-wave-ocean Modeling", 2010 Ocean Sciences Meeting, 26 February, Portland.
 - Moon, I.-J. ", Impact of SST feedback on the coupled typhoon-ocean prediction", The 1st Korea-China Joint Workshop On the Tropical Cyclones, Jeju, Korea, December, 2008.
 - Moon, I.-J., S. K. Kang, J.-S. Shim, and S. J. Kwon. "Growing Typhoon Intensity and Storm Surge Along the Korean Coasts", 5th Annual Meeting AOGS 2008, Busan, Korea, June, 2008.
 - Moon, I.-J., S. J. Kwon, and S. K. Kang "Growing intensification of landfalling typhoon at higher latitude ", Effects of Climate Change on the World's Oceans, Gijon, Spain, May, 2008.
 - Moon, I.-J., E. S. Choi, and S. K. Kang. "Increasing Intensity of Typhoons made landfall over the Korean peninsula ", Third Korea-Japan-China Joint Conference on Meteorology, Beijing, China, November, 2007.

(3) 특허 출원 (총 2편)

- 한반도 근접, 상륙, 영향 태풍 분류 시스템 및 이를 이용한 태풍 통계 산출방법, 2011, 5월 23, 특허청, 10-1037601
- 한반도 해역의 태풍, 폭풍해일의 강도변화 예측 시스템 및 그 방법, 2011년 7월 16일, 특허청, 10 2010 0069204

(4) 소프트웨어 등록 (총 14편)

성 과	일 자	발 행 기 관	제 목	저 자
프 로 그 램	2008.10.21	한국저작권위원회	Tropical Cyclone Wind Field Computation I	문일주
	2008.11.11	한국저작권위원회	Tropical Cyclone Wind Field Computation II	문일주
	2009.01.21	한국저작권위원회	Moving-Interpolation of Hurricane Wind	문일주
	2009.09.05	한국저작권위원회	Momentum Flux Calculation I	문일주
	2009.11.23	한국저작권위원회	Typhoon-induced sea surface cooling footprint	문일주
	2009.12.10	한국저작권위원회	Typhoon-induced sea surface cooling swath	문일주
	2009.12.11	한국저작권위원회	3-dimensional temperature sections along the typhoon's track	문일주
	2009.12.30	한국저작권위원회	A method calculating upward transport of deeper cold water	문일주
	2009.12.30	한국저작권위원회	Calculation of ocean environments during typhoon recurvature	문일주
	2010.12.10	한국저작권위원회	Time calculation of the maximum sea surface cooling after the passage of typhoons	문일주
	2010.12.24	한국저작권위원회	Ocean heat content calculation using WOA 2005	문일주, 김민영
	2010.12.24	한국저작권위원회	Distribution of typhoon maximum intensity location during TC lifetime	문일주, 김민영
	2010.12.24	한국저작권위원회	Typhoon activity calculation using ACE and PDI	문일주, 김성훈
	2010.12.24	한국저작권위원회	Plot of ocean response to typhoon	문일주, 김성훈

(5) 인력양성(총 석사 6명)

- 김성훈, 오상명, 김민영, 정영윤, 김광석, 고철민

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 태풍의 진로와 강도 예측에 있어 해양의 영향을 조사하는 데 활용.
- 과거 우리나라에 큰 피해를 입힌 태풍의 특성을 파악하여 미래의 방재대책 수립에 활용
- 우리나라로 접근하는 태풍의 진로 및 강도 예측에 활용
- 태풍 때나 강한 풍속 하에서의 대기해양 모멘텀 교환에서 파랑의 역할을 조사하는 데 활용
- 실시간 관측자료의 사용으로 태풍, 해양, 파랑 모델의 초기화 개선에 활용
- 개발된 모델의 검증에 활용
- 태풍의 역학을 파악하는 연구에 활용
- 바람응력과 파의 나이의 상관관계 연구에 활용
- 실시간 관측자료를 기상 및 날씨 예보에 활용
- 수피의 이동경로 파악에 활용

< 참 고 문 헌 >

1. 김도우, 변희룡 “한반도 바람자원의 시공간적 분포”, 대기, 18, 171-182.
2. 김현구, 장분석, 이화운, 김동혁, 최현정 “수치바람모의에 의한 저해상도 국가 바람지도의 구축”, 한국태양에너지학회지, 26, 31-38.
3. 문일주, 오임상 (2003), 파랑-해양순환 접합모형을 이용한 폭풍해일에 대한 파랑과 조석의 영향 연구, 한국기상학회지, 39(5), 563-574.
4. 문일주, (2006), 지구온난화와 슈퍼태풍, 제4차 기후변화학술대회 논문집, 제주도 서귀포, 11월 23-24일.
5. 문일주, 심재설, 민인기, 최의수, (2007a), 이어도 과학기지의 해양·기상학적 중요성, 이어도 연구회 학술세미나 논문집, 제주도, 3월 9일.
6. 문일주, 최의수, 심재설, 박광순, (2007b), 기후변화에 따른 한반도상륙 태풍강도 변화, 춘계 한국기상학회 발표집, 계룡대, 5월 27일.
7. 문일주, 최의수, 강석구, 오상명, 임명순, (2007c), 한반도상륙 태풍강도를 결정하는 해양의 요소, 춘계 한국기상학회 발표집, 계룡대, 5월 27일.
8. 오미현, 하경자 (2005), 2003-2004년도 이어도 기지 해상기상 특성분석, 한국기상학회지, 41(5), 671-680.
9. 이순환, 이화운, 김동혁, 김민정, 김현구 “한반도 풍력자원 지도의 공간 해상도가 풍력자원 예측 정확도에 미치는 영향에 관한 수치연구”, 한국환경과학회지, 18, 885-897.
10. 한국해양연구원 (1999). 1999 이어도 종합해양과학기지구축사업보고서, 해양수산부 연구보고서.
11. 한국해양연구원 (2000), 2000 이어도 종합해양과학기지구축사업보고서, 해양수산부 연구보고서.
12. 한국해양연구원 (2001). 2001 이어도 종합해양과학기지구축사업보고서, 해양수산부 연구보고서.
13. 허철운, 이용섭, 이은정 “기상정보를 활용한 한반도 풍력자원지도 공간적 분포 특성”, 대기, 20, 63-71.
14. 해양수산부 (1997). '97 이어도 종합해양과학기지 구축사업 보고서.
15. 해양수산부 (1999). '99 이어도 종합해양과학기지 구축사업 보고서.
16. Emanuel (2005), Increasing destructiveness of tropical cyclone over the past 30 years, Nature, 436, 686-688.
17. Holland, G. J. (1980), An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes, Mon. Wea. Rev., 108, 1212-1218.

18. Moon, I.-J., I.S. Oh, T. Murty, and Y.H. Yoon (2003a), A study on the cause of the unusual coastal flooding generated by typhoon Winnie along the western coast of Korea, *Natural Hazards*, 29(3), 485-500.
19. Moon, I.-J., I. Ginis, T. Hara, H. Tolman, C. W. Wright, and E. J. Walsh (2003b), Numerical simulation of sea-surface directional wave spectra under hurricane wind forcing, *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 1680-1706.
20. Moon, I.-J., T. Hara, I. Ginis, S. E. Belcher, and H. Tolman (2004a), Effect of surface waves on air-sea momentum exchange. Part I: Effect of mature and growing seas, *J. Atmos. Sci.*, 61, 2321-2333.
21. Moon, I.-J., I. Ginis, and T. Hara (2004b), Effect of surface waves on air-sea momentum exchange. II: Behavior of drag coefficient under tropical cyclones, *J. Atmos. Sci.*, 61, 2334-2348.
22. Moon, I.-J., I. Ginis, and T. Hara (2004c), Effect of surface waves on Charnock coefficient under tropical cyclones, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L20302.
23. Moon, I.-J. (2005), Impact of a coupled ocean wave- tide-circulation system on coastal modeling, *Ocean Modeling*, 8(3), 203-236.
24. Moon, I.-J., I. Ginis, T. Hara, and B. Thomas (2007a), Physics-based parameterization of air-sea momentum flux at high wind speeds and its impact on hurricane intensity predictions. *Mon. Wea. Rev.* In press.
25. Moon, I.-J., I. Ginis, and T. Hara (2007b), Impact of reduced drag coefficient on ocean wave modeling under hurricane conditions, *Mon. Wea. Rev.* In revision.
26. Price, J., T. B. Sanford, and G. Z. Forristall, 1994, Forced stage response to a moving hurricane, *J. Phys. Oceanogr.*, 24, 233-260.
27. Schade, L. and K. Emanuel, 1999, the ocean's effect on the intensity of tropical cyclones: Results from a simple coupled atmosphere-ocean model, 56, *J. Atmos. Sci.*, 642-651
28. Shim, J.S., Chun, I.S. and Min I.K. (2004). Construction of Jeodo Ocean Research Station and its Operation. *ISOPE*, 13(1), 140-157.
29. Tolman, H. L., 2002: Validation of WAVEWATCH III version 1.15 for a global domain. NOAA/NWS/NCEP/ OMB Technical Note, No. 213, 33 pp.
30. Wada, A., 2005, Numerical simulations of sea surface cooling by a mixed layer model during the passage of typhoon Rex, *J. Oceanogr.*, 61, 41-57

별첨

자체평가의견서

연구목표	평가지표	연구수행 내용	목표 달성도 (%)	비고
한반도 상륙 태풍 강도를 결정하는 해양과 기상 요인 조사	- 여름철 태풍 경로 상의 해양과 대기의 환경이 한반도 상륙 태풍의 강도와 진로에 어떤 영향을 미치는지 잘 조사 되었는가?	황해에서부터 뻗어져 내려온 저층냉수가 한반도 상륙태풍 강도를 어떻게 영향을 주는지 에 대해 조사하였음. - 조사한 결과 저층냉수 위를 지나가는 태풍과 쿠루시오 난 류 위를 지나가는 태풍간의 강 도 차이가 확연히 들어남.	100%	
기후변화에 따른 한반도 상륙 태풍 특성 변화 조사	- 지구온난화에 따른 수온 및 기온 상승이 한반도에 상륙하는 태 풍의 강도에 어떤 영 향을 미쳤는지 잘 조 사 되었는가?	- 지구온난화가 국지적으로 한 반도 주변에 더 심화되고 있음 을 확인하고 그에 따른 SST증 가로 인해 태풍의 강도가 강해 질 것이라 여겨짐. - 대기 요소로 수직바람시어를 구하여 한반도 주변의 대기환 경이 태풍발달에 긍정적인 쪽 으로 변화되고 있음을 확인함.	100%	
이어도 기지 태풍 관측 자료의 검·보증 및 수치모델 결과와 비교	- 이어도 기지에서 관측되는 해양/대기 자료는 다른 자료와 비교 분석을 통해 검 보증 되었으며, 그 결 과는 수치모델 검증에 잘 활용되었는가?	- 태풍 에위니아의 실제 관측된 이어도 기지의 자료와 수치모 델 결과와 비교를 함. - 수치모델의 결과 해수면의 cooling 현상 및 수직적 수온 분포 등이 잘 묘사 되었음.	100%	

연구목표	평가지표	연구수행 내용	목표 달성도 (%)	비고
이어도 기지에서 관측된 태풍 통과시 해양의 반응 조사	- 특정 태풍이 이어도 기지를 통과하여 한반도를 상륙할 당시에 냉각현상이 발생된 것의 분석이 잘 되었는가?	- 태풍 에위니아가 이어도 기지를 통과하여 한반도를 상륙할 당시에 냉각현상이 발생된 것이 분석되었으며 이와 같은 위성자료나 ARGO float 자료에서도 태풍에 의한 해양반응이 조사되었음.	100%	
수치모델을 이용한 태풍 통과시 해양의 수온 변화 조사	- 수치모델을 사용하여 특정 태풍의 재현을 잘하였으며 냉각현상 및 수직적 수온의 혼합과정의 역학적 메커니즘 분석이 잘 되었는가?	- 태풍 에위니아의 실제 관측된 이어도 기지의 자료를 토대로 수치모델을 재현하고 해양의 수온 변화를 조사함. 수치모델의 결과, 해수면 냉각현상 및 수직적 수온의 혼합과정의 역학적 메커니즘 분석이 잘 됨.	100%	
태풍 강도에 영향을 주는 황해저층냉수 조사	- 한반도를 향하는 태풍의 길목에 자리 잡고 있는 황해저층냉수의 분포를 해마다 조사 되었는가?	- 황해저층냉수의 분포를 미해군자료동화자료와 한국해양자료센터자료를 사용하여 분석한 결과 황해저층냉수는 해마다 분포정도가 다르게 분포함을 조사함.	100%	
이어도 기지의 총별 수온과 염분의 계절변화 특성 조사	- 이어도 기지에서 관측되는 해양 자료를 분석하고 다른 자료와 비교 분석을 통해 검증 되었는가?	- 일 년 동안 이어도 기지에서 관측된 총별 수온과 염분의 자료를 분석한 결과 계절변화가 확연히 나타났고 KODC 정선 관측자료와 비교하여 수온자료에 비해 염분자료는 신뢰성이 높지 않았음.	100%	

연구목표	평가지표	연구수행 내용	목표 달성도 (%)	비고
ROMS 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍에 대한 해양반응 조사 및 모델 검증	- 수치 모델이 실제 관측결과를 잘 모의 하였는가? - 이어도 기지 통과 태풍에 대한 해양 반응 분석이 제대로 이루어 졌는가?	- 태풍 에위니아 시기에 관측된 큰 크기의 해수면 냉각을 수치모델을 통하여 재현하였으며 재현 결과 냉각크기와 범위에서 비슷한 결과를 얻었음. - 이어도 기지에서 보인 특이한 해양반응에 대하여 수치모델로 분석한 결과 이어도 기지 근역 해수 및 지형의 특이성과 조석에 의한 현상임을 확인함.	100%	
WRF 모델을 이용한 이어도 기지 통과 태풍의 해양-대기 상호작용 연구 및 모델 검증	- 수치모델이 실제 관측결과를 잘 모의 하였는가? - 해양-대기 상호작용에 대한 연구 및 모델검증이 제대로 이루어 졌는가?	- 저해상도의 대기 초기장에 의한 태풍모의의 한계를 극복하기 위해 보거싱기법을 이용하여 대기 초기장을 개선하였음. - 개선된 초기장을 이용하여 2003년 태풍 매미를 재현한 결과 초기장 개선 전과 비교하여 강도 및 진로예측에서 상당부분 개선되었음. - 해양 초기조건의 개선을 위해 여러 위성 해수면온도 초기장을 이용하여 민감도 테스트를 진행하였으며 해양조건에 따라 바람장이 상당부분 바뀜을 확인함.	100%	
이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료 분석	- 이어도 기지에서 관측된 자료의 검증이 충분히 이루어졌는가? - 이어도 기지에서 관측된 층별 해양자료 분석이 잘 되었는가?	2010년 이어도 기지를 통과한 3개의 태풍에 의한 해양반응을 분석함. 자료보정을 한 뒤 분석결과 태풍 통과 시 나타나는 해수냉각과 염분상승 등 기존연구에 부합되는 결과를 얻음. - 2년 7개월간 이어도 기지에서 관측된 층별 수온과 염분의 자료를 보정하여 분석한 결과 계절변화가 확연히 나타났음.	100%	

연구목표	평가지표	연구수행 내용	목표 달성도 (%)	비고
이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 초기조건 개선	- 이어도 기지 자료를 활용하여 접합모델 초기조 건이 개선되었는 가?	- GFDL-POM 태풍-해양 접합 모델을 통해 이어도 기지에서 관 측된 해양 특성을 반영하여 태풍 통과 시 초기 혼합층 깊이와 저 염수에 의한 성층이 태풍 강도에 영향을 미칠 수 있다는 사실을 확인함.	100%	
이어도 기지 자료를 활용한 태풍-해양 접합모델 검증	. 수치모델이 실제 관측결과를 잘 모의 하였는 가? - 해양-대기 상 호작용에 대한 연 구 및 모델검증이 제대로 이루어 졌 는가?	- WRF-ROMS 태풍-해양 접합 모델을 통해 한반도 영역의 최적 대기 모수화 기법을 민감도 실험 을 통해 확인함. - 개선된 초기장과 대기모수화 기법을 통해 태풍 에워니아와 곤 파스에 대해 모의한 결과 관측치 와 비교적 일치함을 확인하였음.	100%	
이어도 기지의 층별 수온 및 염분 관측자료 분석	- 이어도 기지 에서 관측된 자료 의 검증이 충분히 이루어졌는가? - 이어도 기지 에서 관측된 층별 해양자료 분석이 잘 되었는가?	- 3년 7개월간 이어도 기지에서 관측된 층별 수온과 염분의 자료 를 보정하여 분석한 결과 계절변 화가 확연히 나타났음.	100%	

주 의 사 항

1. 본 보고서는 국토해양부 국립해양조사원의 수탁을 받아 제주대학교에서 수행한 연구보고서입니다
2. 본 내용을 대외적으로 게재, 인용할 때에는 반드시 국토해양부 국립해양조사원의 사전 허락을 받기 바라며, 무단 복제를 금합니다

이어도 기지를 활용한 한반도 상륙 태풍 특성조사 및 예측 연구

발간등록번호 · 11-1611000-001951-01

발행일 · 2011년 11월 16일

발행처 · 국토해양부 국립해양조사원
인천시 중구 서해로 195번지(400-800)
TEL · 032-885-3825
FAX · 032-885-3088
