

Cover Story

지구온난화에 따라 태풍은 어떤 모습으로 우리에게 다가올 것인가?



오재호

부경대학교 환경대기과학과 교수

1. 머리말

열대저기압은, 그 이름이 의미하는 바와 같이, 열대의 위도 5도와 20도 사이 해양 위에 공기가 수렴하는 곳에는 형성되는데, 이 때 많은 수증기를 동반한다. 수렴된 공기는 저기압권 안에서 상승하고, 이 과정에서 수증기는 응결하여 구름입자가 되고, 이것이 모여 빗방울이 된다. 이렇게 수증기가 응결할 때에는 많은 열량을 내어놓게 되어 구름은 주변 공기보다 더더욱 따뜻해진다. 그 결과 더욱 더 많은 공기가 이곳으로 몰려들게 하는 수렴이 강화된다. 아울러 수렴하는 공기는 새로운 에너지가 되는 수증기를 가지고 온다. 이렇게 하여 열대 저기압은 한번 형성이 되고 주변 조건이 만족되면 빠른 시간 내에 막강한 힘을 갖는 태풍으로 발달한다. 태풍의 발생초기에는 약한 열대저기압으로서 얼마동안은 적도 부근의 동풍에 밀려서쪽으로 진행하다가, 점차 북쪽으로 올라오면서 열대폭풍으로 발달하고, 그 열대폭풍이 더욱 커져 태풍으로 발달하여 북쪽으로 향하게 되며, 말기에는 전향하여 북동쪽으로 진행하여 중위도의 육상이나 해상에서 소멸된다.

세계기상기구(WMO)에서는 중심 부근의 최대풍속에 따라 태풍 강도를 표 1과 같이 4계급으로 분류하며, 우리나라와 일본에서는 열대폭풍(TS) 이상을 태풍이라고 부른다. 17 ~ 24 m/s를 약한 태풍, 25 ~ 32 m/s를 중간 태풍, 33 ~ 43m/s를 강한 태풍, 44 m/s 이상을 매우 강한 태풍이라 한다. 또 크기로도 태풍

표 1. 태풍의 강도 구분

중심부근 최대 풍속		17% (34Kts) 미만	17~24% (34~47Kts)	25~32% (48~63Kts)	33~43% (64~84Kts)	44% (85Kts) 이상
구분	세계기상기구	약한 열대저기압 Tropical Depression (TD)	열대폭풍 Tropical Storm (TS)	강한 열대폭풍 Severe Tropical Storm (STS)	태풍 Typhoon (TY)	
	한국 일본	약한 열대저기압	약	중	태 강	풍 매우 강

표 2. 태풍의 크기 구분

풍속 15m/s 이상 반경	300 km 미만	300~500 km	500~800 km	800 km 이상
	소형	중형	대형	초대형

을 구분하는데, 표 2에 제시된 것과 같이, 풍속 15m/s 이상의 반경을 기준으로 300 km 미만이면 소형 태풍, 300 ~ 500 km 사이이면 중형 태풍, 500 ~ 800 km 사이이면 대형태풍, 그리고 800 km 이상은 초대형 태풍으로 구분한다.

2007년에 발표된 IPCC 4차보고서에서는 21세기 동안 평균기온이 최대 6.3°C 상승할 것이라고 전망하였으며 (IPCC, 2007), 이와 같은 지구온난화는 지표기온에서 뿐만 아니라 바다에서도 나타날 것이라 한다. 1955년부터 2010년 까지 세계 해양의 0~700 m와 0~2000 m 층에서 해양열축적량을 조사한 결과 0~700 m 층에서는 대략 0.18°C, 그리고 0~2000 m 층에서는 대략 0.09°C 증가하였다고 보고하였다 (Levitus et al, 2012). 이와 같은 온도 상승은 전체 해양의 93%에서 나타났다.

이러한 지구환경 변화에 따라 태풍관련 의문은 다음 2가지로 압축될 수 있다:

- 지난 태풍자료에서 인간에 의한 지구온난화 흔적을 찾을 수 있을까?
- IPCC의 21세기 지구온난화 전망에 따라 태풍은 어떤 모습으로 우리에게 다가올 것인가?

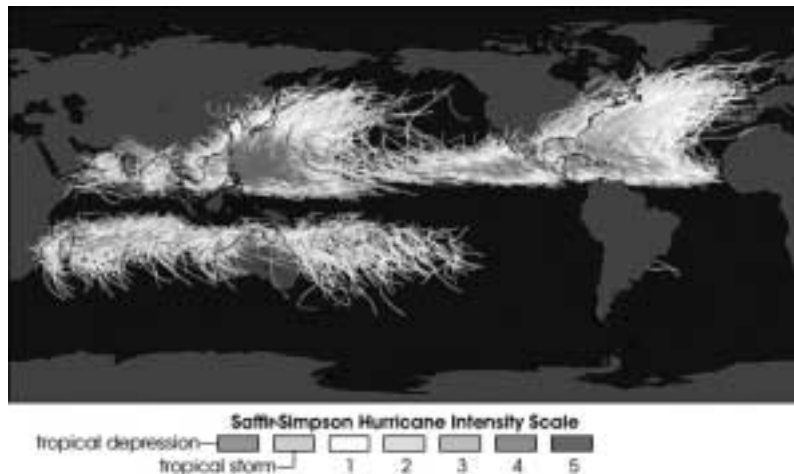


그림 1. 2006년 9월까지 미국 국가허리케인센터(National Hurricane Center)와 합동태풍경보센터(Joint Typhoon Warning Center)에서 지난 150년 동안 수집된 태풍경로
<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=7079>

열대저기압은 「지구상 여러 곳에서 연간 평균 80개 정도가 발생하고 있다. 열대 저기압은 열대 해상에서 주로 발생하여 서쪽으로 이동하여 열대 육상에서 소멸되거나, 극쪽으로 이동하여 중위도의 육상이나 해상

기획특집

에서 소멸된다. 남태평양에서는 종종 열대 저기압이 동쪽으로 이동하기도 한다. 그림 1은 2006년 9월까지 미국 국가허리케인센터 (National Hurricane Center)와 합동태풍경보센터 (JTWC, Joint Typhoon Warning Center)에서 지난 150년 동안 수집된 태풍경로를 중첩하여 그려 놓은 것이다. 필리핀 부근의 서태평양이 멕시코만과 캐리비안해와 더불어 강한 태풍이 가장 많이 지나가는 곳으로 나타나고 있다.

여기에서는 2012년 12월에 발간된 태풍위원회의 두 번째 태풍에 대한 기후변화 영향평가 보고서를 중심으로 정리하였다 (ESCAP/WMO Typhoon Committee, 2012).

2. 기록 속에 나타난 태풍 발생빈도와 강도의 변동

따뜻한 열대해상에서 발생하여 성장하는 태풍은 우리 사회에 가장 위협적인 기상현상으로 꼽을 수 있다. 서태평양에서는 1년에 30개 정도 발생된다. 이 숫자는 전 세계 태풍 발생 수의 1/3 정도에 해당되며, 에너지로는 전체 태풍에너지의 40% 정도가 열대 서태평양에서 발생한다 (Maue, 2011; Wu et al., 2005). 따라서 열대 서태평양에서 발생하는 태풍은 강도나 크기 면에서 다른 지역 보다 더 강하고 큰 태풍으로 성장한다. 그림 2에 제시된 것과 같이, 이곳에서 발생한 태풍은 주로 3개의 진로로 이동한다. 진로I은 서진하여 중국 남부나 동남아시아로 진행하는 것이다, 두 번째로는 동중국해로 북상하여 한반도나 일본으로 진출하는 진로II, 그리고 나머지는 북태평양고기압 가장자리를 휘감아 돌면서 일본 동쪽 태평양으로 북상하여 소멸하는 진로III으로 정리될 수 있다.

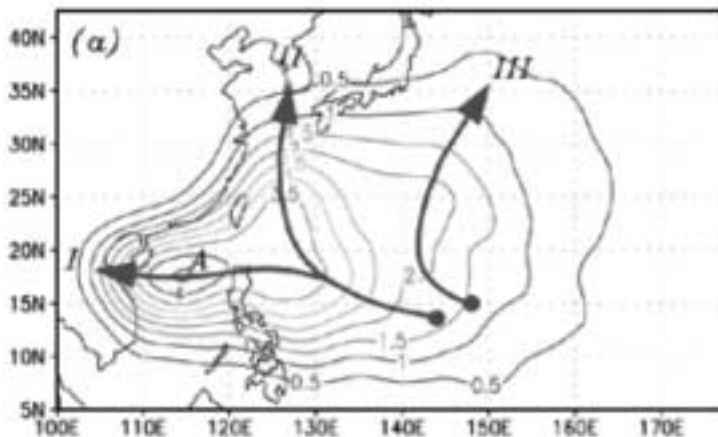


그림 2. JTWC의 1963년부터 2003년 까지 자료에 나타난 서태평양에서 여름철 (6월~10월 사이) 발생하는 태풍의 빈도와 세 개의 주요 진로 (Wu et al., 2005).

계속되는 대기 중 이산화탄소 증가에 따라 지구온난화가 나타날 가능성은 명백하지만 이 지구온난화에 따른 태풍 활동의 변화는 여전히 분명하지 않다. 이는 태풍활동의 자연적 변동이 매우 커서 그 가운데 지난

20세기 동안 지구온난화가 진행되었음에도 불구하고 태풍활동 신호를 찾는 것은 쉽지 않다 (Knutson et al., 2010). 그럼에도 불구하고 21세기에는 전 세계적으로 태풍의 발생 숫자는 줄어들며, 태풍의 평균강도는 강해질 것으로 정리하고 있다. 그렇다고 이것이 곧 바로 서태평양에서 초대형 태풍이 증가한다고는 볼 수 없다. 이는 서태평양과 남중국해에서는 해수면 온도뿐만 아니라 열대 태평양에서 나타나는 엘니뇨/남방진동(ENSO)과 태평양십년변동(PDO, Pacific Decadal Oscillation) 또 동인도양에서 나타나는 해수면 온도 변화가 복합적으로 태풍활동에 영향을 미치기 때문이다.

2.1 태풍발생빈도

1945년에서 2007년까지 JTWC 자료에 의하면 서태평양에서 태풍의 발생빈도는 다소 낮아졌고, 수명은 약간 길어졌다. 하지만 이 수치가 통계적 의미를 갖고 있는지는 불확실하다. 이런 불확실성은 각 관련 기관마다 다른 기준의 정의와 관측 수단이 세월에 따라 달라져서 자료의 균질성이 떨어졌기 때문이다. 이와 같은 결과는 그림 3에서 찾아 볼 수 있다.

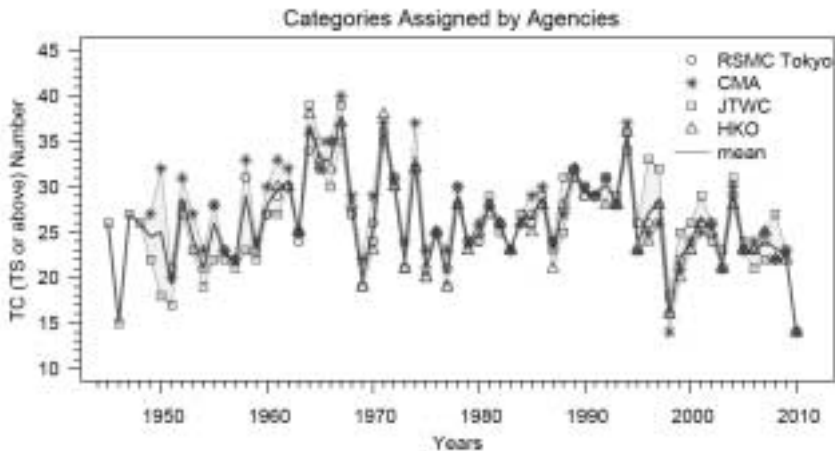


그림 3. 연차별 태풍발생 수

* 기상 관련 기관마다 조금씩 다른 기준에 따라 조금씩 다르게 나타난다.(ESCAP/WMO Typhoon Committee, 2012)

* RSMC 일본기상청 태풍센터, CMA 중국기상청, JTWC 미국 태풍경보센터, HKO 홍콩기상대

지난 1970년부터 2006년까지 태풍진로를 조사한 결과 (Tu et al., 2009), 타이완을 지나가는 태풍의 숫자는 2000년을 기점으로 크게 증가하였다 (그림 4a). 이와는 반대로, 그림 4b에서 제시된 것과 같이, 남중국해에서 태풍 발생은 감소되는 경향을 보였다 (Wu et al., 2005). 이러한 변화는 그림 2의 진로I의 경우는 줄어드는 반면에 한반도와 일본으로 진출하는 진로II의 경우가 증가하는 것을 말하고 있다.

그림 5는 1951년부터 2004년까지 RSMC 태풍센터 자료에 나타나 한반도에 상륙하는 태풍 숫자를 보여

기획특집

주고 있다. 한반도에 상륙하는 태풍 수는 0에서 4개 범위 안에서 해마다 크게 변동하고 있다. 장기간 변동은 증가 경향을 보이지만 큰 연변동 때문에 통계적으로 의미를 갖지는 못하고 있다 (Choi et al., 2010).

2.2 태풍의 최대 강도

태풍의 최대 강도는 태풍의 발생에서 소멸까지 최대 성숙기를 감시할 수 있는 능력에 따라 다소 왜곡되어 나타날 수 있다. 특히 최근 각광을 받고 있는 위성을 통한 감시의 경우, 위성감시가 시작된 것이 1980년 초로 비교적 자료 축적이 빈약하고, 위성 수명이 수년에 불과하고 조금씩 다른 센서를 장착한 후속 위성들로 인해 자료의 불균질성을 여전히 극복하지 못하고 있는 실정이다. 그럼에도 불구하고, 위성자료 분석을 통한 결과로는 태풍의 강도의 변화가 자연적인 변동 폭을 넘지 못하고 있어 어떤 태풍 강도 변화 경향을 이야기하기에는 충분하지 않은 실정이다.

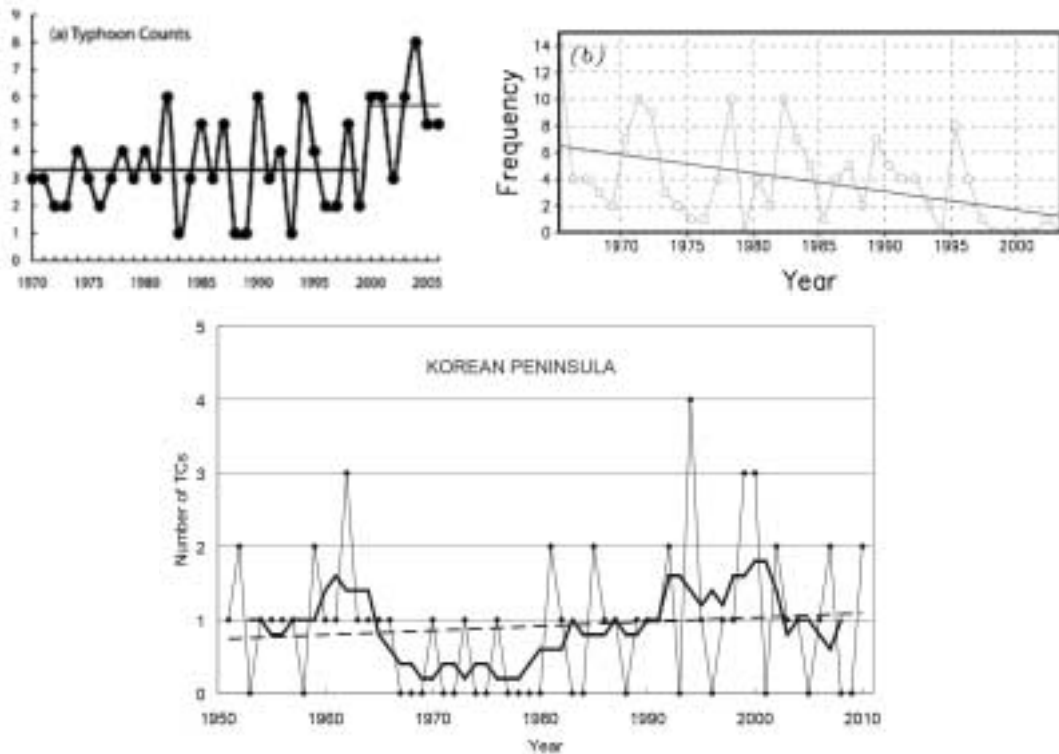


그림 4. 1951년부터 2004년까지 한반도에 상륙한 태풍의 숫자 (자료: 기상청)

2.3 태풍에 동반된 강수량

태풍은 서태평양 지역 총강수량의 11%를 가져온다. 특히 타이완에서는 총강수량의 35~40%가 태풍과 관련 되어 있다. 물론 태풍에 동반된 강수는 곧 바로 홍수재해로 직결되는 경우가 많다. 따라서 태풍에 동

반된 강수의 변동은 바람과 더불어 늘 관심의 중앙에 있어 왔다.

지구온난화로 대류권 기온이 올라가면 공기가 수증기를 포함할 수 있는 능력이 증기된다. 이렇게 많은 수증기를 머금은 열대의 하층대기가 수렴할 때 더 많은 잠열을 발생하여 구름의 대류 운동을 강화시킬 뿐만 아니라 더 많은 수증기가 구름 속에서 응결됨에 따라 국지성 소나기도 강화된다는 것이 일반적인 물리적 해석이다. 하지만 일부 관측 보고와 물리적 해석을 통한 기대에도 불구하고 과거자료에서 어떤 특성을 이야기하기에는 더 많은 연구를 필요로 하고 있다.

3. 21세기 전망

2007년 2월에 발표된 기후변화에 관한 정부간협의체(IPCC) 제2실무그룹의 제4차 평가보고서에 의하면, 화석연료에 의존한 대량소비형의 사회가 계속된다면, 1980~1999년에 비하여 금세기말(2090~2099년)의 지구 평균기온은 최대 6.4℃, 해수면은 59cm 상승한다고 전망하였다. 이에 따른 영향은 수권, 생물권, 해양 등에서 다양하게 나타날 것이다. IPCC (2007)에 소개된 년대별 대표적인 영향은 표 3에 소개되었다.

전지구 평균온도가 1℃ 정도 상승하는 2020년대에는 대략 4~17억 명이 물부족의 영향을 받을 것이며, 2~3℃ 정도의 기온 상승이 예상되는 2050년대에는 10~20 억 명이, 전지구 평균온도가 3℃ 이상 상승되는 2080년대에는 11~32 억 명이 물부족에 시달릴 것이다. 전세계 인구의 1/5 이상이 홍수의 영향을 받을 것이다. 전지구 평균온도가 1℃ 상승하는 2020년대에는 양서류가 지구상에서 사라지고, 산호의 백화 현상이 만연할 것이다. 전지구 평균온도가 2~3℃ 증가하는 2050년에는 전 세계의 동물과 식물의 20~30%는 멸종 위기에 처할 것이다.

전지구 평균온도가 3℃ 이상 증가하는 2080년대에는 전 지구 생물의 대부분이 멸종되거나 지리적 분포에 큰 변화를 예상하고 있다. 따라서 지구온난화는 생태계 구조와 역할, 종의 상호 연계와 관련하여 물, 식량공급, 생물다양성에 대해 부정적인 영향을 미칠 것으로 보고 있다. 기후변화와 해수면 상승으로 전세계 해안의 30%가 침수 위험에 처할 것이다. 해수면온도가 1~3℃ 상승하면 산호 백화현상 증가하고, 2080년대에는 해수면 상승으로 수백만 명이 홍수 위험에 노출될 것으로 전망하고 있다.

태풍활동의 변화를 전망하기 위해서는 해수면 온도 분포, 대기연직기온감율의 변화 등 미래 열대의 환경변화를 파악하여야 한다. 이들 요소들의 미래 상황이 다르게 해석되면 이에 따라 태풍의 활동 변화도 왜곡되어 나타나기 때문이다. 만약 미래 환경이 완벽하게 파악되었다고 해도 미래 태풍활동 변화는 이를 구현하는 대기순환모델(GCM)의 성능에 크게 의존하고 있다. 2010년에 발표된 ESCAP/WMO 1차 평가보고서에서는 태풍의 발생빈도는 줄어들고, 강한 태풍의 출현은 많아질 것이라고 결론짓고 있다 (Lee et al., 2010).

기획특집

표 3.년대별 지구온난화 피해 전망

피해 분야	2020년대 (1°C 상승)	2050년대 (2~3°C)	2080년대 (3°C 이상 상승)
수자원	• 4~17억 명의 물 부족 영향	• 10~20억 명의 물 부족 영향	• 11~32억 명의 물 부족 영향 • 전 세계 인구의 1/5 이상 홍수 영향
생태계	• 양서류의 멸종 • 산호의 백화현상 • 생물 종의 다양성 변화	• 20~30% 멸종위기	• 전 지구 생물의 대부분 멸종 • CO ₂ 배출에 의해 지리적 생물권 분포 변화
농업	• 대체로 전 지구적 농작물 수확 잠재력 증가 • 1~3천만명의 기근 위협		• 저위도 지역의 적응잠재력 증가 • 중·고위도 지역의 수확량 감소 • 3~12천만명의 기근 위협
홍수	• 홍수와 폭우 위험 증가	• 3백만명의 홍수 위협	• 해안가의 30%이상 유실 • 15백만명 이상 홍수 위협
질병	• 알러지 및 전염성 질병 확산	• 영양 부족, 과다출혈, 심장관련 질병 증가 • 열파, 홍수 가뭄으로 사망증가	

비교적 분해능이 우수한 최근 기후모델들의 전망에 의하면 21세기 동안 서태평양지역에서 태풍의 발생 빈도는 현재보다 -70% ~ +60% 사이의 변화를 나타내었으나, 높아진다고 모의한 모델들 보다는 대부분 모델들이 서태평양에서 태풍발생 빈도가 줄어들 것으로 전망하고 있다. 강도 면에서는 태풍에 동반된 최대 풍속이 -3% ~ +18% 사이에서 변한다고 모의하고 있으나 대부분 고해상도 모델들의 결과는 강도가 강해질 것으로 보고 있다. 이와 함께 태풍에 동반된 강수도 +5% ~ +30% 범위에서 증가할 것으로 분석되었다.

더욱 중요한 것은 태풍의 진로 변화인데 모델들의 예측결과 분석에 의하면 현재보보다 진로가 더 북쪽으로 또 더 동쪽으로 치우치는 경향을 보였다. 이는 한반도나 일본으로 접근하는 태풍빈도가 높아진다는 것을 의미하고 있다. 이에 따라 중국, 한국, 일본을 비롯한 동아시아 연안지역에서는 지구온난화에 따른 해수면상승과 더불어 태풍에 의한 폭풍해일 피해가 증가될 것이다.

4. 향후 태풍연구 방향

일반적으로 분해능이 높은 대기모델이 태풍의 강도뿐만 아니라 동반된 강풍, 호우 등을 극한적인 요소를 상대적으로 더 잘 모의한다고 알려져 있다 (Murakami and Sugi, 2010). 2009년 부경대학교 환경대기과학과 오재호 교수 연구팀은 한국과학기술정보연구원(KIST)의 국가슈퍼컴퓨팅 공동활용체계 구축 사업의 일환으로 초고속 전산자원과 계산체제를 지원을 받아 지구 전역을 10km 격자간격 해상도로 2007년 7월 9일 00UTC에 미국 서남서쪽 (위도 7.5oN, 경도 144.3oE)에서 발생한 제4호 태풍 “MAN-YI” 경우를 택해 모의실험을 수행하였다. 그림 6에서 전지구를 240km, 40km, 20km, 10km 격자 간격으로 비교하여 보여주는 것처럼 240km 격자로는 거의 태풍이 모의되지 않고 있으며, 해상도가 40km에서 10km로 높아질수록 태풍의 중심과 주변의 강수 띠가 뚜렷하게 모의됨을 알 수 있다. 또한 태풍 “MAN-YI”가 일본

쪽으로 접근 시에 우리나라의 남해안 지역과 강원도 산악 지역에 강수가 나타나는데, 태풍이 모의되는 40km나 20km 격자의 모의 결과에 비교하여서도 10km 격자의 모의에서 더욱 상세하고 조밀하게 강수를 모의하는 것을 보였다.

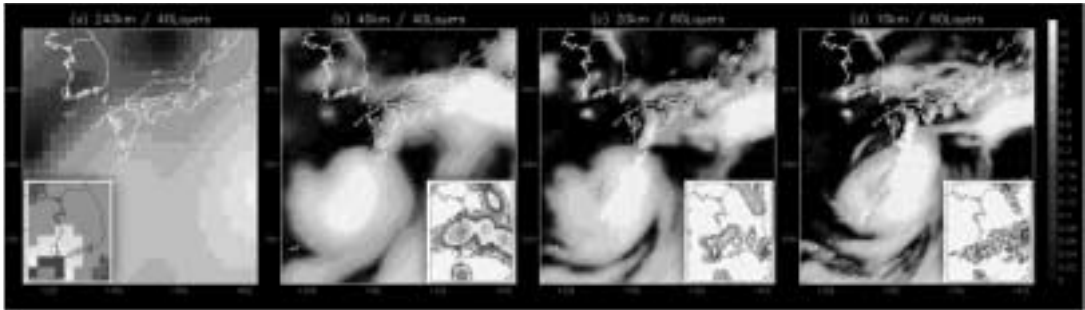


그림 5. 2007년 제4호 태풍 “MAN-YI”의 해상도별 시뮬레이션 결과 (왼쪽부터 240km, 40km, 20km, 10km 격자 간격의 강수량 모의)

현재의 기후모델에 의한 기후변화 예측의 신뢰도는 기후 시스템을 구성하고 있는 대기권, 수권, 설빙권, 생물권 및 지권의 5개 영역 속의 중요한 물리적 과정들을 충분히 반영하지 못한 점과 현재의 컴퓨터 성능 때문에 다소 제한적이다. 기후 모델의 신뢰도를 높이기 위해서는 각 영역간의 상호작용이 충분히 모델 속에서 반영되어야 한다. 이를 위한 가장 중요한 분야로서 구름 과정, 기후에 대한 해양과 식생의 역할, 그리고 컴퓨터의 계산 능력 향상을 꼽을 수 있다. 기후 시스템의 물리과정 이해 향상과 모델 개선을 통하여 보다 더 신뢰성이 있고 상세한 기후변화 예측이 가능할 것이다. 앞으로 고해상도 모델이 IPCC의 정밀한 해양과 대기의 환경변화에 대한 정보와 더불어 활용될 때 보다 더 현실적인 신뢰도 높은 태풍예보뿐만 아니라 미래 전망을 제시할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Choi, K. -S., B. -J. Kim, D. -W. Kim, and H. R. Byun (2010) Interdecadal variation of tropical cyclone making landfall over the Korean Peninsula. *Int. J. Climatol.*, 30, 1472-1483. doi:10.1002/joc.1986
2. ESCAP/WMO Typhoon Committee (2012). The second assessment report on the influence of climate change on tropical cyclones in the typhoon committee region. TC/TD-No. 0004. 72pp.
3. IPCC (2007). *Climate change 2007: The Physical Science Basis*, Eds. Solomon, S. et al. Cambridge Univ. Press.
4. Knutson, T. R., J. L. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J. P. Kossin, A. K. Srivastava, and M. Sugi, (2010) Tropical cyclones and climate change. *Nature*

- Geoscience, 3, 157–163. doi: 10.1038/ngeo779.
5. Lee, T.-C., W.-J. Lee, T. Nakazawa, J. C. Weyman, and M. Ying (2010) Assessment report on impacts of climate change on tropical cyclone frequency and intensity in the Typhoon Committee region. ESCAP/WMO Typhoon Committee: Macao, China, TC/TDNo. 0001, 27 pp.
 6. Levitus¹, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer¹, O. K. Baranova¹, H. E. Garcia¹, R. A. Locarnini¹, A. V. Mishonov¹, J. R. Reagan¹, D. Seidov¹, E. S. Yarosh¹, and M. M. Zweng (2012). World ocean heat content and thermosteric sea level change (0?2000 m), 1955?2010. Geophysical Research Letters, Volume 39, Issue 10, May 2012. DOI: 10.1029/2012GL051106.
 7. Maue, R. N. (2011) Recent historically low global tropical cyclone activity, Geophys. Res. Lett., 38, L14803, doi:10.1029/2011GL047711.
 8. Murakami, H. and M. Sugi (2010) Effect of model resolution on tropical cyclone climate projections. SOLA, 6, 73–76. doi:10.2151/sola.2010–019.
 9. Tu, J.-Y., C. Chou, and P.-S. Chu (2009) The Abrupt Shift of Typhoon Activity in the Vicinity of Taiwan and Its Association with Western North Pacific East Asian Climate Change. J. Climate, 22, 3617–3628. doi:10.1175/2009JCLI2411.1
 10. Wu, L., B. Wang, and S. Geng (2005) Growing typhoon influence on east Asia. Geophys. Res. Lett., 32, L18703, doi:10.1029/2005GL022937.