앙상블 민감도를 이용한 2003년 8월 6일 집중 호우 역학 분석

노남규 · 김신우 · 하지현 · 임규호*

서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부

(접수: 2012년 11월 28일, 게재확정일: 2012년 12월 31일)

Ensemble Sensitivity Analysis of the Heavy Rainfall Event Occurred on 6th August 2003 over the Korean Peninsula

Namkyu Noh, Shin-Woo Kim, Ji-Hyun Ha, and Gyu-Ho Lim*

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received: 28 November 2012, Accepted: 31 December 2012)

Abstract Ensemble sensitivity has been recently proposed as a method to analyze the dynamics of severe weather events. We adopt it to investigate the physical mechanism which caused the heavy rainfall over the Korean Peninsula on 6th August 2003. Two rainfall peaks existed in this severe weather event. The selected response functions are 1 hour accumulated rainfall amount of each rainfall peak. Sensitivity fields were calculated using 36 ensemble members which were generated by WRFDA. The sensitive regions for the first rainfall peak are located over the Shandong Peninsula and the Yellow Sea at 12 hours before the first rainfall peak. However, the 12-h forecast sensitivity for the second rainfall peak is revealed near Typhoon ETAU (0310) and midlatitude trough. These results show that the first rainfall peak was induced by low pressure which located over the northern part of the Korean Peninsula while the second rainfall peak was caused by the interaction between typhoon ETAU and midlatitude trough.

Key words: Ensemble sensitivity, heavy rainfall, response function, typhoon ETAU, midlatitude trough

1. 서 론

태풍은 강풍과 집중 호우를 동반하여 큰 피해를 주는 기상 현상 중 하나이다. 매년 발생하는 30여 개의 태풍 중 2, 3개 정도가 우리 나라에 직간접적인 영향을 주고 있다. 태풍에 의한 손실은 재해 사례에 대한 정확한 분석과 예측 능력 향상을 통해 최소화할 수 있다.

재해 사례의 분석과 예측 능력 향상에는 태풍 주위의 종관 배경에 대한 고려가 필수적이다. 특히 대륙 동안에 위치한 한반도의 경우, 경압 불안정이 강하게

나타나며 저기압의 성장이 두드러지고 이에 따라 태풍과 종관계가 많은 영향을 주고 받는다. 따라서 태풍이 한반도에 미치는 영향을 살펴봄에 있어서 종관계와 태풍 사이에서 나타나는 상호 작용에 관심을 기울일 필요가 있다.

태풍과 종관계 사이의 상호 작용에 대한 연구는 여러 가지 방법을 이용하여 수행되었다. Beak *et al.* (Beak *et al.*, Mid-tropospheric frontogenesis caused by the interaction between a typhoon and midlatitude trough: A case study of Typhoon Rusa (2002), submitted to Tellus A, 2012) 및 Lee and Choi (2010)는 각각 전선 함수 분석과 수치 모의 해상도 조절 실험을 통해 태풍 루사 (0215) 사례에서 발생한 강릉 지역의 기록적인 강수가 태풍과 종관계의 상호 작용에 기인함을 보였다. Hanley *et al.* (2001)은 합성 분석 (Composite

*Corresponding Author: Gyu-Ho Lim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, San 56-1, Sillim-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea.

Phone : +82-2-880-6725, Fax : +82-2-887-4890

E-mail : gyuholim@snu.ac.kr

analysis)을 이용하여 열대 저기압과 상층골이 거리에 따라 주고 받는 영향을 연구하였고 김신우 (2005)는 실제 태풍과 유사한 모조 태풍을 만들어 초기장에 삽입하는 보거싱 (GFDL Bogusing) 기법을 사용하여 태풍의 위치 및 강도가 종관계의 발달과 진행에 미치는 영향을 분석하였다. 최기선 등 (2007)은 태풍 루사 (0215) 및 매미 (0314) 사례에 대해 중위도 상층골이 태풍 강도에 미치는 영향을 연직 바람 시어, 잠재 소용돌이도 분석을 통해 보였다.

기상 현상의 예측성 향상을 위한 방법으로 수치 모형의 초기장을 개선하는 자료 동화에서 관측 자료의 적절한 분포는 예측 오차 성장에 의미 있는 영향을 미칠 수 있다. 최적 관측이란 특정한 일기 현상의 예측 오차를 줄일 수 있는 추가적인 관측 자료의 시공간 분포를 계산하는 분석 전략이다 (Kim *et al.*, 2004). 이러한 최적 관측 전략은 관측망 구성에 이용하는 것이 일반적이나 기상 현상의 역학 과정을 분석하는 데도 유용하게 사용할 수 있다.

대표적인 최적 관측 전략으로는 Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF), 특이 벡터 (Singular Vector), 수반 민감도 (Adjoint Sensitivity), 앙상블 민감도 (Ensemble Sensitivity) 등이 있는데, 그 중 수반 민감도와 앙상블 민감도는 결과의 물리적인 의미가 동일한 특성이 있다.

Ancell and Hakim (2007)은 수반 민감도와 앙상블 민감도의 관계를 수학적으로 제시하고 두 최적 관측 전략을 동일 사례에 적용하여 결과를 비교분석하였다. 수반 민감도의 경우, 풍상 쪽으로 강하게 기울어진 중규모 구조가 하부 대류권에서 나타났고 앙상블 민감도의 경우, 풍상 쪽으로 완만하게 기울어진 중규모 구조가 나타났음을 보였다. 특히 앙상블 민감도는 초기장의 특정 기상 현상과 밀접한 연관이 있었다. 수반 민감도와 앙상블 민감도는 결과의 해석이 비슷한 만큼 계산 안정성 역시 중요하다. Liu and Kalnay (2008)는 수반 민감도 계산에는 수반 모형 (Adjoint Model)이 반드시 필요한 점을 들어 수반 모형이 필요하지 않은 앙상블 민감도의 계산이 용이함을 언급하였다.

Torn and Hakim (2009)은 앙상블 민감도를 기상 현상의 역학 분석에 이용하였다. Tokage (0423) 및 Nabi (0514) 사례에 대해 앙상블 민감도 분석을 시행하여 열대 저기압이 온대 변이 (Extratropical transition, ET) 하는 동안 중심 기압은 500 hPa 기압골과 열대 저기압의 상호 작용 및 열대 저기압의 위치와 상당 수준의 관계가 있음을 보였다.

현재까지의 연구는 최적 관측 전략을 효율적인 관측망 구성에 이용하는 방법을 주로 다루고 있다. 그러나 이 연구에서는 2003년 8월 5-6일, 한반도에서 발생한 집중 호우 사례에 앙상블 민감도를 적용하여 집

중 호우의 원인이 되는 주변 배경장을 살펴보고 실험 결과를 바탕으로 앙상블 민감도가 기상 현상의 역학 연구에 유용하게 사용될 수 있음을 보이려 한다. 2장에서는 앙상블 민감도 및 실험 구성을 설명하였고, 3장에서는 사례의 종관 분석 및 앙상블 민감도의 분석 결과를 제시하였으며, 4장에서는 결론을 요약하였다.

2. 방 법

2.1. 앙상블 민감도

앙상블 민감도는 기상 요소 등의 변수에 대한 반응 함수로 정의되는 특정 기상 현상의 변화율로 기술할 수 있다. 여기서 변수가 정의되는 시각은 반응 함수가 정의되는 시각에 앞선다. 앙상블 민감도 계산을 이용하면 특정 변수가 반응 함수에 미치는 영향을 시공간적으로 분석할 수 있고 분석 결과로부터 관심 기상 현상(반응 함수)의 역학 과정을 시간의 역순으로 추적할 수 있다. 따라서 앙상블 민감도는 악기상 사례의 역학 연구를 위한 좋은 분석 도구가 될 수 있다. 앙상블 민감도의 설명을 위해서 Garcies and Homar (2009)의 기호와 일반적인 설명을 따른다.

앙상블 민감도 연구에서 반응 함수 J 는 태풍의 중심 기압, 상·하층 제트의 크기 등과 같이 관심이 가는 주요 기상 현상으로 정의한다. 본 연구에서는 1시간 누적 강수량을 반응 함수로 설정하였다. 앙상블 민감도는 변수의 변화에 따른 반응 함수의 변화 정도를 통계적으로 추정한 값인데 이러한 측면에서 선형 회귀 분석과 유사한 개념이다. 앙상블 민감도는 다음과 같이 회귀 변수의 형태로 정의된다.

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial J}{\partial x} \right)_{ij} = \frac{\text{cov}(J^k, x_{ij}^k)}{\text{var}(x_{ij}^k)}, \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, n \\ j = 1, \dots, m \\ k = 1, \dots, M \end{matrix} \quad (1)$$

여기서 S 는 앙상블 민감도, J 는 반응 함수, x 는 변수 (기상 요소 등)이고 위치점 k 는 앙상블, 아래첨자 i, j 는 격자 위치를 의미한다. 만약 앙상블 멤버 수가 충분하지 않다면 표본 오차를 고려해야 한다 (Torn and Hakim 2009). 따라서 식 (1)에 따라 회귀 계수 S 를 계산한 후 반응 함수와 변수 사이에는 상관 관계가 없다는 귀무 가설을 기준으로 T 검정 (양측검정, 유의수준: 95%)을 시행하였다 (Wilks, 2008, section 6.2.5).

일반적으로 수치 모형에서 반응 함수와 변수 사이의 관계는 비선형적이지만 앙상블 민감도는 선형적 관계를 이용하여 계산된다. 이 경우 낮은 상관 계수를 가지는 지점의 민감도가 크게 나타나는 것을 방지하기 위해서 상관 계수의 하한을 정하고 하한 상관 계수를 기준으로 가중치를 곱한다.

$$S_{ij} \equiv \left(\frac{\partial J}{\partial x} \right)_{ij} R_{ij}, \quad R_{ij} = \begin{cases} 1 & r_{ij}^2 \geq c^2 \\ \frac{r_{ij}^2}{c^2} & r_{ij}^2 < c^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{\text{cov}(J^k, x_{ij}^k)}{\sqrt{\text{var}(x_{ij}^k)} \sqrt{\text{var}(J^k)}}$$

식 (2)에서 R 은 가중치, r 은 상관 계수, c 는 하한 상관 계수이다. 하한 상관 계수는 Garcies and Homar (2009)와 같이 c^2 이 0.1이 되는 0.32로 설정하였다. 그러나 식 (2)의 결과값은 변수의 종류에 따라 크기가 매우 상이하다. 변수의 종류에 따라 평균과 분산이 차이를 보이기 때문이다. 따라서 변수 종류에 제약을 받지 않고 민감도를 분석하기 위해 변수 x 의 표준 편차를 곱해 정규화한다.

$$S_{ij} \equiv \left(\frac{\partial J}{\partial x} \right)_{ij} R_{ij} \sigma_{ij}, \quad \sigma_{ij} = \sqrt{\text{var}(x_{ij}^k)} \quad (3)$$

여기서 σ 는 각 지점의 앙상블로부터 계산한 표준 편차이다. 본 연구에서는 식 (3)에서 기술한 S 를 앙상블 민감도로 정의하고 실험을 수행하였다.

2.2. 실험 구성

이 연구에서는 Weather Research and Forecasting (WRF)의 Advanced Research (ARW) version 3.4.0을 사용하였다. 앙상블 멤버는 NCEP FNL 자료 및 WRFDA ver. 3.4.0을 이용하여 초기 조건 (Initial Condition)과 경계 조건 (Boundary Condition) 각각 36개로 구성하였다.

수치 실험의 영역은 위도 32.5°N, 경도 127.5°E를 중심으로 30 km 수평 해상도의 150 × 170 (위도 × 경도) 개 격자로 구성하였으며 연직으로 27개의 시그마 층을 사용하였다. 수치 적분은 2003년 8월 5일 0000 UTC부터 8월 7일 0000 UTC까지 총 48시간이며 Kain-Fritsch 적운 모수화 (Kain and Fritsch 1990), YSU 행성 경계층 과정 (Hong *et al.*, 2004), WSM 6-class (Hong and Lim, 2006) 미세물리 모수화 과정은 모든 앙상블 멤버에 동일하게 적용하였다.

3. 결 과

3.1. 사례분석

사례는 2003년 8월 5~6일에 발생한 집중 호우로 당시 10호 태풍 아타우 (ETAU)가 북상하는 중이었다. 8월 6일 0000 UTC의 500 hPa 일기도를 살펴보면 (Fig. 1(a)), 저기압이 한반도 북서쪽에 위치하고 있고 저기압 중심에서부터 한반도 남쪽까지 온도골이 확장되고

있음을 알 수 있다. 하층에서는 상층의 기압 패턴과 유사하게 한반도 북서쪽에 저기압이 위치하고 있고, 한반도 남쪽에서는 제 10호 태풍 아타우 (ETAU)가 발달하고 있다 (Fig. 1(c)). 중국 남부 지방에 보이는 저기압은 제 9호 태풍 모라콧 (MORAKOT)이 열대저압부로 약화된 것이다. 또한 저기압 후면에서 들어오는 북쪽의 차갑고 건조한 공기와 태풍에 의한 따뜻하고 습한 공기가 만나 한반도와 한반도 주변으로는 강한 수평 온도 경도가 나타나고 있으며, 이러한 수평 온도 경도는 경압 불안정을 증가시켜 집중 호우가 발생하기 좋은 조건을 형성한다. Lee and Kim (1995)은 한반도에서 발생한 10개의 집중호우 사례를 통해 집중 호우가 발생하는 종관장 분석을 하였으며, 아열대고기압과 그 주변으로부터의 온난 이류와 중국 북부 혹은 만주 지역에서의 한랭 이류로 인해 한반도와 한반도 부근에서 강한 경압성이 형성된다고 밝혔다. 한

Fig. 1. (a) and (b) show geopotential height (gpm, thick solid), temperature (°C, solid), and wind vectors (m s^{-1}) for the 500 hPa weather chart at 0000 UTC and 1200 UTC 06 August 2003, respectively. (c) and (d) represent geopotential height (gpm, thick solid), equivalent potential temperature (K, solid), moisture divergence ($10^{-4} \text{ kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$, negative areas are shaded), and wind vectors (m s^{-1}) at 0000 UTC and 1200 UTC 06 August 2003, respectively.

Fig. 2. Observed 3-h accumulated rainfall amount (mm) from TRMM data between 1500 UTC 05 August 2003 and 1500 UTC 06 August 2003.

반도 북서쪽에 위치했던 저기압은 동진하여 6일 1200 UTC에는 한반도 북쪽에 위치하고 있으며 지위장과 온도장의 위상차가 감소하여 서서히 쇠퇴할 것으로 보인다. 중국 남부 지방의 열대저압부는 세력이 더욱 약화된 채로 머물러 있으며 태풍 아타우는 아열대 고기압의 가장자리를 따라 북진하고 있다 (Fig. 1(b) and 1(d)). 저기압과 태풍의 이동으로 한반도 중부 지방의 남서풍은 12시간 전에 비해 강화되고, 이렇게 강화된 남서풍으로 인해 수증기 공급이 이루어지면서 중부 지방에 수분 수렴 (moisture convergence)이 나타났다. 수분 수렴이 강하게 보인 시각은 비가 내렸던 시각과도 일치한다 (Fig. 2). 대륙에서 강하게 발달하며 한반도 북쪽으로 접근한 저기압은 8월 5일 1500 UTC부터 북한 지역에 약한 강수를 뿌리기 시작하였고 8월 6일 0000 UTC에는 저기압의 전선면에서 강수의 1차

피크가 나타났다 (Fig. 2). 이후 잠시 소강상태를 거쳐 8월 6일 1200 UTC에는 중부 지방에 많은 강수가 기록되었는데, 이 2차 강수는 1500 UTC에서 피크를 보이며 강한 강수를 뿌린 후, 약간 남하하여 태안반도 부근에서 강하게 발달하였고, 서서히 약화되며 한반도를 빠져나갔다.

3.2. 수치 모의 분석

본 절에서는 2003년 8월 5~6일 한반도 집중 호우 사례를 구체적으로 분석하기 위하여 중규모 수치모형 WRF ver. 3.4.0을 이용하여 기준 실험을 수행하고 그 결과를 분석하고자 한다. 기준 실험 (control experiment) 이 모의한 6일 0000 UTC 및 1200 UTC의 종관장(Fig. 3)을 살펴보면 중국 남부의 열대저압부, 오키나와 남쪽의 태풍 아타우와 북태평양 고기압의 위치 등 전체

Fig. 3. (a) and (b) show geopotential height (gpm, thick solid), temperature ($^{\circ}\text{C}$, dashed), and wind vectors (m s^{-1}) for the 500 hPa model output (control run) at 0000 UTC and 1200 UTC 06 August 2003, respectively. (c) and (d) represent geopotential height (gpm, thick solid), equivalent potential temperature (K, solid), and wind vectors (m s^{-1}) at 0000 UTC and 1200 UTC 06 August 2003, respectively.

적인 지위의 분포는 잘 모의하고 있지만 한반도 북쪽에 위치한 저기압의 경우 분석장 (Fig. 1)에 비해 다소 진행이 늦어 북서쪽에 위치하고 있고 저기압과 태풍의 중심 기압이 약간 높게 모의되었다. 그리고 6일 0000 UTC, 500 hPa에서 지위장과 온도장의 위상차로 인한 경압성은 분석장과 유사하게 나타났으나 (Fig. 3(a)) 1200 UTC 850 hPa에서 서해상의 상당온위선은 그 동쪽 끝이 분석장 (Fig. 1(d))에 비해 북쪽으로 기울어져 있다 (Fig. 3(d)). 이러한 차이점은 저기압의 위치가 다소 북서쪽으로 나타난 것에 기인한다.

강수 모의의 경우 규준 실험의 3시간 누적 강수를

TRMM 위성 관측과 비교하면 1차 강수 (8월 5일 2100 UTC, 8월 6일 0000 UTC)의 패턴과 2차 강수 (8월 6일 1200 UTC, 1500 UTC)의 패턴을 유사하게 모의하고 있다 (Fig. 4). 하지만 수치 모의된 강수 구역은 TRMM 위성 관측에 비해 다소 북쪽으로 치우쳐 위치하였고 TRMM 자료에서 보여진 2차 강수에 비해 수치 모의된 밴드 형태의 2차 강수는 남서-북동 방향으로 기울어져 나타났다. 강수 밴드의 위치와 기울기의 차이는 수치 모의 중관장의 분석에서 보인 바와 같이 모의된 저기압의 위치와 한반도 주변의 상당온위선의 분포에 따른 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 4. Simulated 3-h accumulated rainfall amount (mm) of model output (control run) at 2100 UTC 05 August 2003, 0000 UTC, 1200 UTC, and 1500 UTC 06 August 2003.

3.3. 앙상블 민감도 분석

앙상블 민감도 분석을 위해 기준 실험을 바탕으로 36개의 앙상블을 구성하여 수치 적분하였다. Fig. 5는 3시간 누적 강수의 앙상블 평균으로 전체적인 강수 양상은 기준 실험과 유사하였으나 강수 구역이 넓게 퍼지고 각 격자의 강수량이 약하게 모의되는 앙상블 평균의 일반적인 특징을 보인다. 특히 2차 강수의 경우 기준 실험에 비해 강수 구역이 넓게 퍼지는 정도가 1차 강수에 비해 강한데 이는 2차 강수에 대한 앙상블 퍼짐 정도 (ensemble spread)가 1차 강수에 비해 더 큰 것을 의미한다. 그리고 2차 강수의 강수량이 관측에 비해 크게 감소한 것은 앙상블 멤버 중 일부가 한반도 중북부의 강수 현상을 잘 모의하지 못한 것으로도 해석할 수 있다. 하지만 좁은 밴드 형태로 북한 지역에 최대 강수를 보였던 기준 실험에 비해 한반도의 중북부와 북한 지역에 강수를 모의함으로써 강수 위치를 관측과 유사하게 모의하였다.

기준 실험 및 앙상블 평균의 3시간 누적 강수량 분포를 통해 1차 강수 및 2차 강수가 강하게 나타난 지역을 선별하고 선별된 지역의 1시간 누적 강수량 시계열 분석을 통해 반응 함수를 결정하였다. 1차 강수

Fig. 5. Simulated 3-h accumulated rainfall amount (mm) of model output (ensemble mean) at 2100 UTC 05 August 2003, 0000 UTC, 1200 UTC, and 1500 UTC 06 August 2003.

Fig. 6. Ensemble mean sea level pressure field at 2200 UTC 05 August 2003 (red, solid) and 1500 UTC 06 August 2003 (blue, solid). The area used to define the response function is indicated with dots. (red dots for area 1 and blue dots for area 2).

에 대한 반응 함수는 평안남도 안주 (Area1)의 2003년 8월 5일 2200 UTC 1시간 누적 강수량이고 2차 강수의 반응 함수는 함경남도 신포 (Area2)의 2003년 8월 6일 1500 UTC 1시간 누적 강수량이다 (Fig. 6). 각 반응 함수의 12시간 전 배경장 (background field)에 대한 민감도를 앙상블 민감도로 계산하였는데 선택한 배경장의 변수는 지위 고도 (geopotential height), 상당온위 (equivalent potential temperature), 수증기 혼합비 (water vapor mixing ratio), 그리고 바람 세기 (wind speed)이다. 계산된 앙상블 민감도는 해당 지점의 변수가 표준 편차만큼 변했을 때 변화하는 반응 함수 값으로 본 실험에서는 1시간 누적 강수의 변화량이다.

지위 고도에 대한 앙상블 민감도 (Fig. 7)를 살펴보면 반응 함수가 1차 강수인 경우, 평안남도 안주의 서편인 산동반도 근방에서 음의 민감도를 보인다. 이러한 민감도는 하층에서 크게 나타났다. 산동반도 부근의 지위 고도가 감소하여 상대적으로 기압이 감소하면 북쪽의 차가운 공기와 남쪽의 따뜻한 공기의 유입

을 유발하고 이에 따라 이 지역의 수평 온도 경도가 증가하여 경압 불안정을 강화시킬 수 있다. 반면 2차 강수의 경우 태풍 아타우의 남동쪽과 한반도 북부 저기압 동쪽에서 양의 민감도 지역이 나타났고 하층에서는 한반도 남쪽에서 음의 민감도가 두드러지게 나타났다. 이는 태풍이 북서진하여 태풍 아타우 남동쪽의 지위가 상대적으로 높아지고 한반도 남쪽의 지위가 상대적으로 감소하였을 경우 함경남도 신포의 강수가 더 많이 모의됨을 의미한다.

Fig. 8은 상당온위에 대한 앙상블 민감도 계산 결과이다. 1차 강수의 경우 산동반도와 발해만 부근에서 양의 민감도가 계산되었고 2차 강수의 경우 중층에서는 한반도 북쪽 저기압 중심 근처에서, 하층에서는 요동 반도 북쪽과 상해 부근에서 양의 민감도가 계산되었다. 수증기 혼합비에 대한 앙상블 민감도 (Fig. 9)를 살펴보면 상당온위에 대한 앙상블 민감도 결과와 상당히 유사하다. 이는 산동반도와 발해만의 상당온위와 수증기 혼합비가 증가하게 되면 평안남도 안주의 강수가 증가하고 상해 부근의 상당온위와 수증기 혼

Fig. 7. Sensitivity of the response function (mm, shaded) with respect to geopotential height at -12 h for area 1 (left-hand side column) and area 2 (right-hand side column). The ensemble mean of geopotential height (gpm, solid) and wind vector (m s^{-1} , vectorial field) are also shown.

Fig. 8. Sensitivity of the response function (mm, shaded) with respect to equivalent potential temperature at -12 h for area 1 (left-hand side column) and area 2 (right-hand side column). The ensemble mean of geopotential height (gpm, solid) and wind vector (m s^{-1} , vectorial field) are also shown.

Fig. 9. Sensitivity of the response function (mm, shaded) with respect to water vapor mixing ratio at -12 h for area 1 (left-hand side column) and area 2 (right-hand side column). The ensemble mean of geopotential height (gpm, solid) and wind vector (m s^{-1} , vectorial field) are also shown.

함비가 증가하였을 경우 신포의 강수량이 증가할 수 있음을 의미한다. 이처럼 상당온위와 수증기 혼합비에서 유사한 민감도 결과가 나타나는 것으로 보아 해당 사례의 강수량 모의 결과는 수증기 공급에 크게 영향을 받는 것으로 보이며 1, 2차 강수를 유발하는 수증기의 공급 지역이 서로 다르다는 것을 유추할 수 있다.

Fig. 10은 바람 속력에 대한 민감도 결과로 1차 강수의 경우 산둥반도 및 서해상에서 강한 양의 민감도가 나타났다. 2차 강수에서는 상층 골의 후면에서 양의 민감도가 나타나고 하층에서는 요동반도 부근과 제주도 인근에서 양의 민감도가 보인다. 특히 제주도 인근의 양의 민감도는 남서풍으로 인한 수증기의 공급을 의미한다.

이와 같이 지위 고도, 상당온위, 수증기 혼합비와 바람 속력에 대해 앙상블 민감도 분석을 한 결과, 1차 강수는 한반도 서쪽에서 발달하는 저기압에 의해 강수가 발생하는 반면, 2차 강수는 태풍의 이동과 북태평양 고기압 가장자리를 따른 수증기 및 바람의 영

Fig. 10. Sensitivity of the response function (mm, shaded) with respect to wind speed at -12 h for area 1 (left-hand side column) and area 2 (right-hand side column). The ensemble mean of geopotential height (gpm, solid) and wind vector (m s^{-1} , vectorial field) are also shown.

향을 복합적으로 받았음을 알 수 있다. 또한 앙상블 민감도의 분포와 부호를 바탕으로 반응 함수로 정의되는 강수의 증감이 변수간의 역학적 관계에 의해 잘 설명되어 앙상블 민감도가 악기상 현상의 구조 파악에 유용하게 이용될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

최적 관측이란 관심 지역의 특정한 일기 현상을 반응 함수로 설정하고 기상 요소 등에 대한 반응 함수 민감도의 시공간적 분포를 계산하는 분석 전략이다. 최적 관측 전략은 일반적으로 관측망 구성에 이용되어 왔으나 이 연구에서는 최적 관측 전략 중 하나인 앙상블 민감도 기술을 기상 현상의 원인 분석 도구로 사용하여 2003년 8월 6일에 발생한 집중 호우의 역학 분석을 시행하였다. 한반도에 영향을 주는 집중 호우 사례들 중에는 태풍과 중관 배경 사이에서 긴밀한 상호 작용을 주고 받는 사례가 많은데 8월 6일의 집중 호우 사례 역시 그 중 하나로 원거리에 위치한 태

풍이 집중 호우 형성에 영향을 주었다.

8월 6일의 집중 호우는 두 번의 강수 피크를 보였는데, 기준 실험 및 앙상블 모의 실험을 통해 첫 번째와 두 번째 강수 피크의 반응 함수를 각각 평안남도 안주의 8월 5일 2200 UTC 1시간 누적 강수와 함경남도 신포의 8월 6일 1500 UTC 1시간 누적 강수로 선정하고 12시간 전 초기 조건 (지위 고도, 상당온위, 수증기 혼합비, 바람 속력)에 대한 반응 함수의 앙상블 민감도를 계산하였다. 이 때 변수별 직접 비교를 위해 앙상블로부터 계산한 표준 편차를 이용해 앙상블 민감도 값을 정규화하였다.

1차 반응 함수에 대한 앙상블 민감도의 분포는 수평적으로 산동반도, 발해만 및 서해상에 분포하며 연직으로는 중하층 대기에 집중되어 있다. 지위 고도에 대한 앙상블 민감도는 서해상에 광범위하게 음의 값을 보였는데 그 위치가 한반도 근처에서 상당온위의 경도가 강하게 나타난 지역과 일치하였다. 상당온위와 수증기 혼합비에 대한 민감도는 산동반도 및 발해만 등지에서 양의 값을 보였고 바람 속력에 대한 민감도는 주로 서해상에 분포하였다.

2차 강수는 한반도 중북부를 관통하는 밴드 형태의 강수로 2차 반응 함수에 대한 앙상블 민감도는 상층 기압골과 한반도 북부 저기압, 태풍의 후면과 북태평양 고기압 그리고 한반도 남해상에 분포하였다. 태풍 후면에서 보인 지위 고도에 대한 양의 민감도는 태풍의 전진이 반응 함수의 강화에 영향을 미치는 것으로 해석되며 한반도 남해상에서 계산된 수증기 혼합비 및 바람 속력에 대한 양의 민감도는 수증기의 공급이 태풍에 의한 것임을 의미한다. 또한 한반도 북부에 위치한 저기압 및 상층골의 후면에서도 일정 크기 이상의 민감도가 계산되었는데 이는 2차 강수가 태풍과 저기압의 영향을 복합적으로 받았음을 나타낸다.

이처럼 원거리에 위치한 태풍 등과 같은 종관 배경이 국지적인 집중 호우 등에 영향을 준다고 판단될 경우, 관심 기상 현상을 반응 함수로 하는 앙상블 민감도 분석을 통해서 사례의 발생 원인에 대한 이해를 돕고 악기상 현상의 구조를 분석할 수 있다. 향후에는 앙상블 민감도를 통해 다양한 집중 호우 사례에 대한 태풍의 직간접적인 영향 및 역학 분석 연구를 수행할 예정이다. 그리고 앙상블 민감도가 강하게 나타난 민감 지역에 일정 크기의 섭동을 더한 초기장을 수치 모형을 이용하여 전진시켰을 때, 유의 지역에서 반응 함수가 보이는 반응을 분석하여 앙상블 민감도 결과의 타당성을 검토할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업 (CATER 2012-

6080)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 최기선, 김백조, 박종길, 2007: 태풍-중위도 종관 시스템 상호작용 연구: 루사(0215), 매미(0314) 사례분석. *한국환경과학회지*, **16**, 1051-1061.
- Ancell, B. C. and G. J. Hakim, 2007: Comparing adjoint- and ensemble-sensitivity analysis with applications to observation targeting. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 4117-4134.
- Garcies, L. and Homar, V. 2009: Ensemble sensitivities of the real atmosphere: application to Mediterranean intense cyclones, *Tellus*, **61A**, 394 - 406.
- Hanley, D., J. Molinari, and D. Keyser, 2001: A composite study of the interactions between tropical cyclones and upper-tropospheric troughs. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2570-2584.
- Hong, S.-Y., J. Dudhia, and S.-H. Chen, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 103-120.
- _____ and J.-O. Jade Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129-151
- Kain, J. S. and J. M. Fritsch, 1990: A one-dimensional entraining detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784-2802.
- Kim, H. M., M. C. Morgan, and R. E. Morss, 2004: Evolution of analysis error and adjoint-based sensitivities: Implications for adaptive observations. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 795-812.
- Kim, S.-W., 2005: *A case study on the interaction between synoptic wave and typhoon using GFDL bogusing method*. MA thesis, Seoul National University.
- Lee, D. K. and H. R. Kim, 1995: Numerical simulation of 10 heavy rainfall cases over the Korean Peninsula. *Int. Workshop on Heavy Rainfall in East Asia, Seoul, South Korea*, Atmospheric and Environmental Research Institute/Seoul National University and Korea Science and Engineering Foundation, 114-133.
- _____ and S.-J. Choi, 2010: Observation and numerical prediction of torrential rainfall over Korea caused by Typhoon Rusa (2002). *J. Geophys. Res.*, **115**, D12105, doi:10.1029/2009JD012581.
- Liu, J. and E. Kalnay, 2008: Estimating observation impact

- without adjoint model in an ensemble Kalman filter.
Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **134**, 1327-1335.
- Torn, R. D. and G. J. Hakim, 2009: Initial condition sensitivity of western Pacific extratropical transitions determined using ensemble-based sensitivity analysis.
Mon. Wea. Rev., **137**, 3388-3406.
- Wilks, D. S., 2008: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Elsevier Academic Press, 627 pp.