



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

韓半島 颱風影響 前·中·後 時期동안
大氣質에 影響을 주는 氣象特性
分析

濟州大學校 大學院

海洋氣象學 協同課程

申 賢 鎮

2017年 2月

석사학위논문

한반도 태풍영향 전·중·후 시기동안
대기질에 영향을 주는 기상특성
분석

제주대학교 대학원

해양기상학 협동과정

신 현 진

2017년 2월



한반도 태풍영향 전·중·후 시기동안 대기질에 영향을 주는 기상특성 분석

지도교수 송 상 근

신 현 진

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2016年 12月

신현진의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 _____ (印)

위 원 _____ (印)

위 원 _____ (印)

제주대학교 대학원

2016年 12月

Influence of Meteorological Conditions on Air quality before, during, and after Typhoon periods in the Korea Peninsula

Hyeonjin Shin
(Supervised by professor Sang-Keun Song)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree
of Master of Science

2017. 2.

This thesis has been examined and approved.

Graduate Program in Marine Meteorology

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 재료 및 방법	4
2.1. 연구기간 및 방법	4
2.2. 모델 구성 및 입력자료	7
2.2.1. 기상모델(WRF)	7
2.2.2. 대기질모델(CMAQ)	10
2.3. O ₃ 의 광화학 생성·소멸기작에 대한 이론적 배경	14
제 3 장 결과 및 고찰	16
3.1. 태풍영향 전·중·후 시기동안 종관기상 특성	16
3.2. 기상모델의 태풍 탈라스 예측성능 및 기상요소 예측수준 평가	23
3.3. 연구사례일의 기상요소와 대기질(O ₃ 및 NO ₂) 변화 분석	31
3.4. 연구사례일의 기상요소와 O ₃ , NO ₂ 와의 상관성	42
3.5. 연구사례일의 기상특성이 O ₃ 과 NO _x 에 미치는 영향 수치모의	46
제 4 장 요약 및 결론	62
참 고 문 헌	65
Abstract	71

List of Tables

Table 1. Daily accumulated rainfall (mm) and daily maximum O ₃ concentration (ppb) in Daejeon, Daegu, and Busan before, during, and after typhoon Talas (1112).	6
Table 2. Summary of the WRF model configuration.	8
Table 3. CMAQ model configuration.	11
Table 4. Statistical evaluation of temperature and wind speed between observations and model-simulated values at the representative sites in Daejeon, Daegu, and Busan before, during, and after typhoon Talas (1112). (simulation period: 09 LST 28 August ~ 00 LST 8 September).	30
Table 5. Statistical evaluation of O ₃ and NO ₂ concentration between observations and model-simulated values at several monitoring sites in Daegu before, during, and after typhoon Talas (1112). (simulation period: 09 LST 1 September ~ 00 LST 7 September)	57
Table 6. Summary of the indicators and their rate at (a) the representative site(G) and (b) the site I of Daegu in CMAQ before, during, and after typhoon Talas (1112).	60

List of Figures

- Fig. 1.** The nested model domains for the WRF simulation and the location of three target region (Daejeon, Daegu, Busan) including topography features. 9
- Fig. 2.** Overview of CMAQ modeling system. 10
- Fig. 3.** The domains for the WRF and CMAQ modeling with topography features. And the geographical locations of the monitoring sites for air pollutants in Daegu. Site G is the representative site. 13
- Fig. 4.** Synoptic weather maps at surface at 9, 12, 18 LST before, during, and after typhoon Talas (1112). 18
- Fig. 5.** Simulated wind vectors at 10 m above ground at 9, 12, 18 LST before, during, and after typhoon Talas (1112). A, B, and C indicate the representative sites in Daejeon, Daegu and Busan region, respectively. 20
- Fig. 6.** (a) Synoptic patterns at lower atmosphere for ozone episode days and (b) cross-section of a mature tropical cyclone and its associated circulation (Lam, 2014). 22
- Fig. 7.** Observation and WRF-simulated value of (a) track and (b) intensity (maximum wind speed) for typhoon Talas (1112). 24
- Fig. 8.** Time series (at Local Standard Time) of observation and WRF-simulated value for meteorological variables(temperature, wind speed and direction) at the representative sites in Daejeon, Daegu, and Busan before, during, and after typhoon Talas (1112). The vertical dash lines on the figure divide the periods before, during, and after typhoon Talas (1112). 27
- Fig. 9.** Time series of (a) hourly average O₃ and NO₂ concentration, (b) temperature and solar radiation, (c) cloud cover and precipitation, (d) wind speed and direction, and (e) pressure and relative humidity at

	the representative site in Daejeon before, during, and after typhoon Talas (1112). The vertical dash lines on the figure divide the periods before, during, and after typhoon Talas (1112).	37
Fig. 10.	Time series of (a) hourly average O ₃ and NO ₂ concentration, (b) temperature and solar radiation, (c) cloud cover and precipitation, (d) wind speed and direction, and (e) pressure and relative humidity at the representative site in Daegu before, during, and after typhoon Talas (1112). The vertical dash lines on the figure divide the periods before, during, and after typhoon Talas (1112).	38
Fig. 11.	Time series of (a) hourly average O ₃ and NO ₂ concentration, (b) temperature and solar radiation, (c) cloud cover and precipitation, (d) wind speed and direction, and (e) pressure and relative humidity at the representative site in Busan before, during, and after typhoon Talas (1112). The vertical dash lines on the figure divide the periods before, during, and after typhoon Talas (1112).	39
Fig. 12.	Simulated wind vectors at 10 m above ground on 31 Aug 2011. The dot indicates the representative site in Daegu.	40
Fig. 13.	Distribution of horizontal wind vectors at (a) 03 LST on 30 Aug and at (b) 00 LST on 7 Sep in Daegu and at (c) 00 LST on 30 Aug and at (d) 03 LST on 6 Sep in Busan. The numbers on the map are O ₃ concentrations (ppb) at monitoring sites. The circle indicates the representative site in Daegu and Busan region.	41
Fig. 14.	Correlation between O ₃ and (a) NO ₂ , (b) temperature, (c) solar radiation, and (d) relative humidity before, during, and after typhoon Talas (1112). The circle, triangle, and square represent the value of Daejeon, Daegu, and Busan, respectively.	44
Fig. 15.	Spatial distribution of emissions in the study domain on 1 september : (a) VOCs and (b) NO _x in kg/day. The dots indicate the locations of the monitoring sites in Daegu.	47

- Fig. 16.** Spatial distribution of O_3 concentration (ppb) and wind vectors at 10 m above ground with terrain height simulated by model before, during, and after typhoon Talas (1112). The value of O_3 concentration at left bottom on the figure is those of the representative site. Contour from 150 m to 600 m by 150 m. 49
- Fig. 17.** Spatial distribution of NO_x concentration (ppb) with terrain height simulated by model before, during and after typhoon Talas (1112). The value of NO_x concentration at left bottom on the figure is those of the representative site. Contour from 150 m to 600 m by 150 m. 50
- Fig. 18.** Hourly time series (at Local Standard Time) of observation and CMAQ-simulated value for O_3 at several monitoring sites in Daegu before, during, and after typhoon Talas (1112). The (a) ~ (i) of this figure correspond to the capital alphabets representing location of monitoring sites on the map of Fig. 3. The representative site is G. 53
- Fig. 19.** Hourly time series (at Local Standard Time) of observation and CMAQ-simulated value for NO_2 at several monitoring sites in Daegu before, during, and after typhoon Talas (1112). The (a) ~ (i) of this figure correspond to the capital alphabets representing location of monitoring sites on the map of Fig. 3. The representative site is G. 55
- Fig. 20.** Spatial distribution of O_3/HNO_3 rate with terrain height simulated by model before, during and after typhoon Talas (1112). The value of O_3/HNO_3 rate at left bottom on the figure is those of the representative site. Contour from 150 m to 600 m by 150 m. 61

1. 서론

일반적으로 대류권 오존(O_3)의 농도 변화는 O_3 과 전구물질의 광화학 반응에 의한 생성 및 수송, 대상지역의 지리·지형적 특성과 기상조건(종관 기압배치, 기온, 풍향, 풍속, 강수 등), 성층권으로부터의 유입 및 대류권 공기와의 혼합, 그리고 습성 및 건성 침착 등에 의해 복합적으로 나타난다(김철희와 박순웅, 1998; Mayer, 1999). 특히, 종관규모 기상조건(예, 정체 또는 서행하는 고기압 시스템)은 지역 및 국지 규모의 수송을 결정하는 중요한 인자로 작용하여 O_3 의 시·공간적 농도 분포에 크게 영향을 미친다(NRC, 1991; Vukovich, 1994; NARSTO, 2000; 오인보, 2003; 송상근 등, 2014).

고기압 시스템 및 이와 관련된 큰 규모의 대기정체는 상층 역전에 의한 연직적인 대기확산능력을 저하시켜 약한 풍속과 강한 일사가 존재하는 환경을 만든다. 이러한 환경은 O_3 의 생성과 축적에 적합한 대기조건을 제공한다(오인보, 2003). 뿐만 아니라 고기압 정체부분 가장자리의 강한 기압경도는 축적된 O_3 의 장거리 수송을 유도하며, 고기압 시스템과 함께 형성되는 하층제트 역시 수송효과를 통해 특정지역의 고농도 O_3 현상에 영향을 준다(NARSTO, 2000). 이와 관련하여 중국의 대도시 등지에서 축적된 O_3 이 이동성 고기압의 가장자리를 따라 우리나라(서울)로 장거리 수송되어 야간에 O_3 농도 상승을 유발한 사례가 있다(오인보, 2003). 한편, 종관장의 영향이 약한 경우에 연안지역에서는 대표적 중규모 국지순환계인 해륙풍계가 주로 형성되고, 내륙지역에서는 지형의 굴곡과 경사에 의한 산곡풍계가 형성될 수 있다. 이러한 하루주기의 해륙풍과 산곡풍은 O_3 농도의 일변화와 밀접한 관련이 있다(Chang et al., 1989).

앞서 언급한 고기압 등의 종관 기압배치나 국지순환계 외에 저기압 시스템도 O_3 농도 변화에 영향을 미친다. 오인보(2003)는 O_3 농도가 대상지역 고유의 지리적 위치에 따라 저기압 시스템과도 관련을 가지며, 열대저기압의 이동과 관련한 기류순환 역시 O_3 농도 상승에 영향을 미칠 수 있음을 밝혔다. Fu et al. (2013)은 태풍의 연직와도를 동반한 깊은 대류가 상부 대류권과 하부 성층권에서의 O_3

농도 변화에 중요한 영향을 미친다는 사실을 밝혔다. Lam (2014)은 홍콩에서의 고농도 O₃ 현상이 홍콩의 동쪽 또는 남동쪽 바다(필리핀의 루손 섬과 대만 근처)에 강한 열대저기압이 존재하고, 홍콩 영토가 기단의 넓은 침강구역에 속하는 종관패턴일 때 발생하는 경향이 있음을 밝혔다. 이는 기단의 넓은 침강구역이 구름의 소산을 증진시켜 구름이 적고 기온이 높은 환경, 즉 광화학 반응이 활발한 환경을 유도하기 때문이며, 또한 이때 북서쪽 혹은 남서쪽의 풍상측에서 불어오는 바람이 O₃ 전구물질을 수송하여 고농도 O₃ 오염에 영향을 미쳤다고 보고하였다.

구름과 강우는 태풍시기의 주요 기상조건으로서 여름철 광화학 O₃ 농도를 결정하는 중요한 변수이다(김영성 등, 1999). 구름은 햇빛을 차단하여 자외선 양(일사량)을 줄임으로써 기온 감소는 물론 대기의 연직혼합을 제한하여 결국 대기경계층 고도를 낮아지게 하고, O₃ 생성에 중요한 대기 중 라디칼(radical)의 생성을 억제한다(Spirig et al., 2002). 또한 구름 속 액상 반응은 O₃ 생성에 필요한 라디칼을 소모하여 광화학 반응에 불리한 조건을 제공하는 것으로 알려져 있다(Niatthijssen et al., 1997; Walcek et al., 1997). 그러나 낮게 위치한 구름은 지표로부터의 복사에너지 방출을 차단하여 기온을 상승시킬 수 있다(김영성 등, 1999). 한편, 수 km 씩 수직 발달하는 적운은 지표층과 대류권 상층의 수직 혼합을 촉진시켜 지표층의 오염물질을 상부로 이동시킬 수 있고, 동시에 대류권 상부의 오염물질(예, O₃과 전구물질)을 지표 부근으로 이동시켜 지표 O₃ 농도를 높일 수 있다(Liu et al., 1997; Nicholls et al., 1995; 김유근 등, 2002a; Kim et al., 2002).

강우는 주로 세정효과에 의해 대기 중 오염물질을 제거, 예를 들어 O₃ 전구물질을 제거함으로써 O₃ 농도의 감소에 기여한다(김철희와 박순웅, 1998; 안숙희 등, 2014). 그러나 O₃은 물에 잘 녹지 않는 성질을 가지고 있어 강수에 의한 뚜렷한 세정효과를 볼 수 없었다는 연구결과가 보고된 바 있다(홍승규, 2013). 또한 야간에 많은 비를 동반하는 강한 바람과 난기류 상황에서 상승기류와 하강기류의 움직임이 상층(upper troposphere, lower stratosphere)에 존재하는 풍부한 O₃을 지면으로 이동시켜(Martin, 1984; Jain et al., 2005; Yoo et al., 2014), 강수 시에 지표 부근의 O₃ 농도 상승에 기여했다는 연구결과도 있다(오수민, 2012; 윤소연, 2014).

일반적으로 태풍은 강수에 의한 세정효과와 강한 증관장이 나타나는 특징으로 인해 O_3 을 비롯한 대기오염물질과 관련한 많은 연구사례에서 제외되어 왔다. 그리고 태풍영향 전 시기에 태풍의 간접적인 영향으로 O_3 농도가 증가했던 사례에 대한 연구는 있었지만(오현선과 김영성, 1999; Lam, 2014), 태풍영향 이전부터 이 후까지 강한 증관장에 의한 연속적인 기상조건 변화를 대기오염물질(O_3 및 전구물질) 농도와 연관시켜 살펴본 연구는 없었다. 따라서 이를 살펴보는 것은 또 다른 의미에서 서로간의 관계를 명확하게 규명하는데 필요하다고 사료된다. 이에 기초 연구로서 고농도 O_3 시기와 이어지는 우리나라 태풍사례를 선정하여 증관 기상 특성을 분석하고, 관측자료 분석과 수치모델링 수행을 통해 태풍영향 전·중·후 시기에 따른 기상인자 변화가 O_3 및 전구물질 농도에 미치는 영향을 살펴 보았다. 또한 각 시기별로 기상인자와 오염물질간의 상호 관련성을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구기간 및 방법

본 연구에서는 태풍시기의 기상조건이 대기질에 미치는 영향을 분석하기 위해, 다음의 4가지 조건 - 1) 최근 4년간(2011~2014년) 한반도에 직·간접적 영향 또는 상륙한 태풍, 2) 태풍영향 전 시기에 일 최고 O_3 농도의 예보등급이 '나쁨(90 ppb/h 이상)'에 해당, 3) 태풍영향 기간이 장마기간과 겹치지 않음, 4) 태풍영향 전 시기와 영향 시기에 강수가 없음 - 을 적용하여 연구사례일을 선정하였다. 조건 1과 2를 통해 우리나라에 발생한 고농도 O_3 현상 중 태풍이 직·간접적으로 영향을 주었던 시기를 선별하고, 강수에 의한 세정효과로 농도가 감소하는 것을 배제하기 위하여 조건 3과 4를 적용하였다. 태풍영향 기간은 기상청이 태풍 특보 및 경보를 발표한 시기부터 해제한 시기까지로 정의하였다. 일 최고 O_3 농도는 한국환경공단이 운영하는 전국 실시간 대기오염도 공개홈페이지인 '에어코리아(www.airkorea.or.kr)'에서 제공하는 시도별 확정자료를 이용하였고, 강수유무는 기상청 자동종관관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)에서 관측된 일 누적 강수량을 이용하여 판단하였다. ASOS는 자동기상관측장비(Automatic Weather System)와 달리 기상청이나 유인 기상대에 설치되어 여러 기상요소(기온, 강수 등 14개 자료)를 관측하므로 주로 대상지역 대표 자료로 활용된다.

최근 4년 간(2011~2014년) 6~9월에 한반도에 영향을 주었거나 상륙했던 13개 태풍에 대하여 서울과 6개 광역시(부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산), 제주지역의 일 누적 강수량과 일 최고 O_3 농도 값을 비교한 결과, 2011년 12호 태풍 탈라스(1112)가 위의 4가지 조건을 만족하였으며, 8개 지역 중 대전, 대구, 부산지역이 조건을 만족하였다(Table 1). 대구지역은 2011년 9월 5일 22시와 23시에 강수가 있었지만 강수량이 적고 지속시간이 짧았으며, 또한 야간의 강수는 O_3 광화학

반응과 무관하다고 판단하여 연구사례기간에 포함시켰다. 태풍 탈라스는 최대강도가 중심기압 965 hPa, 중심부근 최대풍속 38 m/s인 중형크기 태풍으로, 2011년 8월 25일 00시(UTC)에 미국 괌 부근 해상(17.8 °N, 141.4 °E)에서 발생하여 북태평양 고기압 남서쪽 연변을 따라 북서진하였다. 9월 3일 새벽에 일본 시코쿠 남쪽 해안(33.0 °N, 133.8 °E)을 지나 9월 3일 7시(LST)부터 한반도에 영향을 미치기 시작하여 독도 부근 해상에서 온대저기압으로 변질될 때 까지(9월 5일 3시(LST)) 그 영향이 지속되었다(기상청, 2011). 따라서 이후의 설명에서 '태풍영향 전 시기'는 8월 30일부터 9월 2일까지를 지칭하고, '태풍영향 시기'는 9월 3일과 4일을 지칭하며, '태풍영향 후 시기'는 9월 5일부터 9월 7일 까지를 지칭한다.

태풍 탈라스 영향 시 종관기상 특성에 따른 기상인자와 O₃ 농도와의 관계 및 영향을 분석하기 위하여, 먼저 기상청의 지상 일기도를 이용하여 종관기상 특성을 살펴보았다. 그리고 O₃ 농도와 NO₂ 농도 및 기상인자들(기온, 풍향, 풍속 등)의 변화를 분석하기 위해 변화경향, 일 최고값, 일 최저값 등을 조사하였다. 그리고 운량에 있어서는 김영성 등(1999)에서 운량을 분석했던 방법을 따라 일사량 값이 있는 일출 이후의 시간부터 최고농도 시기까지의 평균 운량을 분석하였다. O₃ 농도의 공간분포는 화학과정 뿐만 아니라 바람에 의한 수송과 확산과정이 매우 중요하다(김철희 등, 1999). 따라서 관측 자료에서 얻을 수 없는 자세한 바람장을 수치모의하여 분석에 이용하였다. 또한 O₃, 질소산화물(NO_x)과 관련한 대기화학 수송과정을 수치모의하여 기상인자의 변화에 따른 대기오염물질 간 상호작용을 분석하였다.

연구 대상도시인 대전, 대구, 부산지역의 기상자료는 기상청 ASOS 자료(기온, 풍향, 풍속, 강수, 상대습도, 기압, 전운량, 일사량)를 사용하였으며, 대기오염자료는 '에어코리아'의 O₃과 NO₂에 대한 최종확정자료를 사용하였다. 기온, 습도, 기압, 전운량은 정시에 측정된 값이고, 풍향과 풍속은 정시 10분 평균 값이며, 강수와 일사량은 1시간 누적 값이다. 그리고 O₃과 NO₂는 한 시간 평균 농도 값이다. 기상자료가 관측되는 ASOS 지점은 도시 내에 한 군데인 반면 O₃과 NO₂가 측정되는 도시대기측정소는 도시 내에서도 여러 군데이다. 따라서 O₃과 NO₂자료의 지점 대푯값은 ASOS 지점과 가장 가까운 위치의 대기질 측정소(대전 유성구 구성동, 대구 동구 신암동, 부산 중구 광복동) 자료를 사용하였다(Fig. 1).

Table 1. Daily accumulated rainfall (mm) and daily maximum O₃ concentration (ppb) in Daejeon, Daegu, and Busan before, during, and after typhoon Talas (1112).

Daily accumulated rainfall (Unit: mm/day)			Before typhoon				During typhoon		After typhoon		
	08/28	08/29	08/30	08/31	09/01	09/02	09/03	09/04	09/05	09/06	09/07
Daejeon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Daegu	0	0	0	0	0	0	0	0	7.5	0	0
Busan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Daily maximum O ₃ concentration (Unit: ppb/h)	08/28	08/29	08/30	08/31	09/01	09/02	09/03	09/04	09/05	09/06	09/07
	Daejeon	62	66	97	99	92	78	49	54	73	65
Daegu	63	121	115	105	97	42	44	53	76	78	99
Busan	61	60	64	84	100	36	43	50	66	77	87

* The bold face represents the value of daily maximum O₃ concentration above 90 ppb.

기상모델과 대기질모델 수행결과가 실제 대기현상을 얼마나 합리적으로 근사했는지 평가하기 위해서 세 가지 통계방법을 사용하였다. 첫 번째는 모델 모의값과 관측값이 일치하는 정도를 나타내는 일치도(Index of Agreement, IOA), 두 번째는 모델의 전반적인 과소·과대모의 경향을 나타내는 평균편차(Mean Bias, MB), 세 번째는 관측값에 대한 모델 모의값의 평균적인 오차를 나타내는 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)이다. 세 방법의 수식은 다음과 같다.

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (1)$$

$$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (3)$$

2.2. 모델 구성 및 입력자료

2.2.1. 기상모델(WRF)

태풍에 의한 바람의 시·공간적 변화를 상세히 분석하기 위하여 기상장 수치모의를 수행하였다. 본 연구에 이용된 모델은 WRF (Weather Research and Forecasting model) version 3.7.1이다. WRF 모델은 압축성 비정수계(Fully compressible, Euler nonhydrostatic) 모델로, 수평격자는 Arakawa C 격자체계를 사용하고 연직좌표계는 지형을 따르는 dry hydrostatic-pressure 연직 격자를 사용한다. 수치계는 2차 혹은 3차 Runge-Kutta 차분법을 사용하는 시간적분과, 수평과 연직 이류항에 대해 최대 6차까지의 옵션을 사용하는 공간차분으로 이루어져 있다. 그리고 대기복사, 난류 혼합, 구름 물리, 지표-대기 상호작용, 중력과 항력 등 대기 물리과정들에 대한 다양한 모수화 방안을 포함하고 있다(Skamarock et al., 2008). WRF 모델의 도메인은 부산, 대구, 대전을 포함하는 영역을 가장 작은 도메인으로 하는 4개의 등지격자로 구성하였으며, 수치적으로 해석이 용이한 단방향 등지격자(One-way nested grid)를 선택하였다. 각 도메인의 수평해상도(격자개수)는 D1 (Domain 1)의 경우에 27 km (145 × 121), D2는 9 km (232 × 181), D3은 3 km (247 × 235), D4는 1 km (469 × 349) 이며(Fig. 1), 적분시간 간격은 D1이 81초, D2는 27초, D3은 9초, D4는 3초이다. 연직층은 지형을 따르는 시그마 면상에서 30층으로 정의하였고, 연직 최상단 기압은 50 hPa이다.

WRF 모델 수행을 위한 초기 및 경계 자료는 1.0 ° × 1.0 °의 수평해상도를 갖는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)/NCAR (National Centers for Atmospheric Research)의 6시간 간격 재분석 자료(Final (FNL) Operational Global Analysis data)를 사용하였다. 지형자료와 토지이용자료는 USGS (United States Geological Survey)의 지형자료와 24 - category 토지이용자료를 이용하였으며, 각 영역에 따라 D1은 5 min, D2는 2 min, D3은 30 sec, D4는 3 sec 자료를 사용하였다. 모델 수행기간은 48시간의 선행실행기간(spin up time)을 포함하여 2011년 8월 26일 00시(UTC)부터 2011년 9월 8일 00시(UTC)까

지로 하였다.

WRF 모델의 주요 물리과정에서 구름 미세 물리 모수화는 WSM (WRF Single-Momentum) 6-class 기법(Hong and Lim, 2006)을 사용하였고, 장파 복사 과정과 단파 복사과정은 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) 기법(Mlawer et al., 1997)과 Dudhia 기법(Dudhia, 1989)을 각각 사용하였다. 지표모델은 Noah Land Surface Model을 사용하였으며, 행성경계층(Planetary Boundary Layer)은 YSU (Yonsei University) 기법(Hong et al., 2006)을 사용하였다. 적운 모수화 과정은 D1과 D2에 대해서만 Kain-Fritsch 기법(Kain, 2004)을 적용하고, D3과 D4에는 적용하지 않았다(Table 2).

Table 2. Summary of the WRF model configuration.

WRF V3.7.1				
Domains	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Horizontal resolution	27 km	9 km	3 km	1 km
Dimension	145×121×30	232×181×30	247×235×30	469×349×30
Time step for integration	81 s	27 s	9 s	3 s
Vertical layers/ Model top	28 layers/ 50 hPa			
Grid nesting	One-way			
Microphysics	WSM 6 scheme			
Planetary boundary layer	YSU scheme			
Longwave radiation	RRTM scheme			
Shortwave radiation	Dudhia scheme			
Land surface model	Noah Land Surface Model			
Cumulus parameterization	Kain-Fritsch scheme (applied to only D1, D2)			
Initial and boundary condition	NCEP/NCAR Final (FNL) Operational Global Analysis data (6-hourly 1.0°×1.0°)			

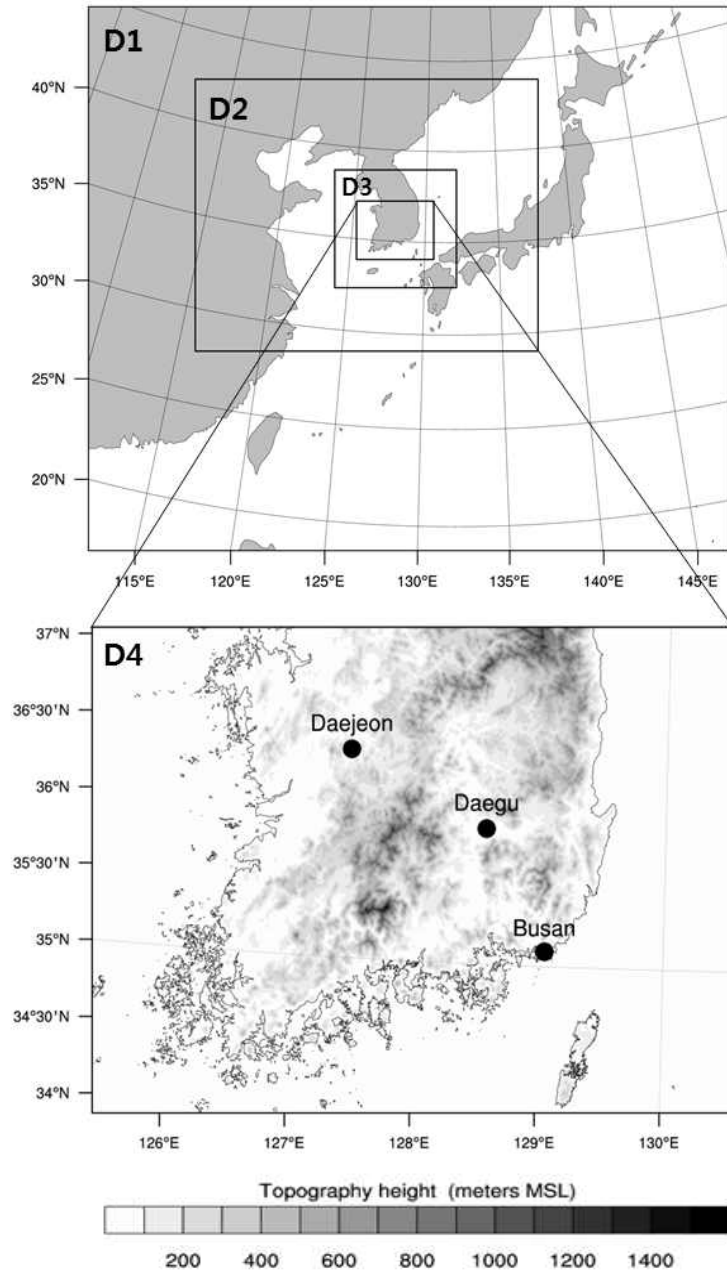


Fig. 1. The nested model domains for the WRF simulation and the location of three target region (Daejeon, Daegu, Busan) including topography features.

2.2.2. 대기질모델(CMAQ)

대기질 수치모의를 위해 사용한 모델은 미국 환경보호국(US Environmental Protection Agency, EPA)에서 개발한 CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System) version 5.0.1이다. CMAQ은 대기의 복잡한 화학·물리 과정의 상호작용을 이해하기 위해 만들어졌으며, 여러 오염물질(O₃, 입자상물질, 유독성 공기매개 오염물질 등)의 배출, 이류, 확산, 침적 등을 모의하는 3차원 대기 화학·수송 모델링 시스템이다. CMAQ은 4개의 주요 전처리 과정과 1개의 화학·수송 모델(CMAQ Chemistry-Transport Model, CCTM)로 구성되어 있다(Fig. 2). 4개의 전처리 과정은 기상장을 처리하는 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor), 광해리율을 산출하는 JPROC (Photolysis Rate Processor), 초기농도조건을 생성하는 ICON (Initial Conditions processor), 경계농도조건을 생성하는 BCON (Boundary Conditions processor)이다. CCTM은 이러한 4가지 전처리 자료와 함께 배출량 자료를 입력자료로 하여 오염물질의 농도에 대한 3차원 광화학 및 이류확산 방정식을 수치적으로 계산한다(CMAS, 2012).

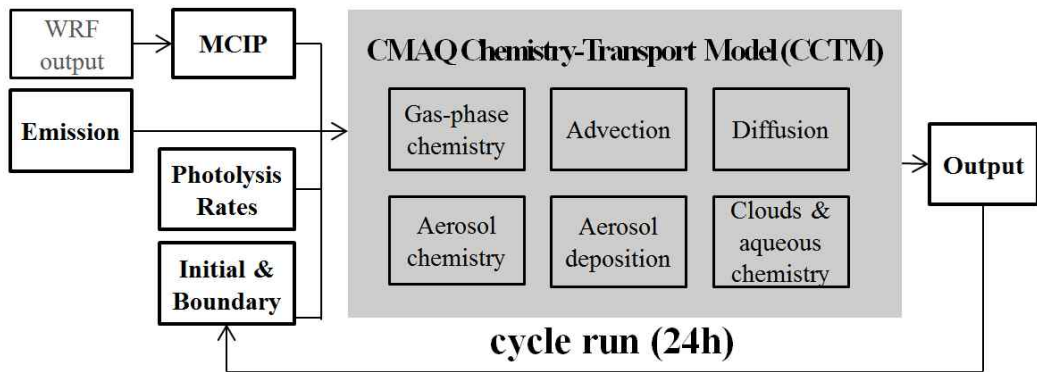


Fig. 2. Overview of CMAQ modeling system.

CMAQ의 주요 화학·수송 과정 중에 광화학 메커니즘은 SAPRC-99 기법 (Carter, 1990, 2000), 이류 메커니즘은 PPM (Piecewise Parabolic Method) 기법

(Colella and Woodward, 1984), 수평 및 연직확산 메커니즘은 각각 Single eddy diffusion algorithm과 ACM2 (Asymmetric Convective Method 2) 기법(Pleim, 2007), 에어로솔 메커니즘은 AERO-05 기법을 사용하였다. 배출량 자료는 국립환경과학원의 대기정책 지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)에 의해 산정된 2009년 자료를 이용하였다(Table 3). CAPSS는 점, 선, 면 오염원별 배출원 분류코드(Source Classification Codes, SCC)에 따라 산정되며(kg/year), 공간적으로는 전국이 1 km × 1 km 격자단위이다. 본 연구에서는 국내 배출량 자료를 효과적으로 처리하기 위해 자체 전처리 프로그램을 이용하여 CCTM의 배출량 입력자료를 생성하였다.

Table 3. CMAQ model configuration.

CMAQ V5.0.1	
Horizontal resolution	3 km
Dimension	20 × 20
Time step for integration	60 s
Chemical mechanism	SAPRC-99
Advection scheme	Piecewise Parabolic Method (PPM)
Horizontal diffusion	Single eddy diffusion algorithm
Vertical diffusion	Asymmetric Convective Method 2 (ACM2)
Aerosol mechanism	AERO-05
MCIP data	WRF output
Emission inventory	CAPSS 2009

대기질 모델링의 대상지역은 태풍영향 전·중·후 시기의 농도변화가 가장 뚜렷한 대구로 선정하였다(Table 1). 대기질모델은 기상모델에 비해 상대적으로 입력 자료(예, 풍속, 배출량)에 민감하고, 공간적 불연속성이 큰 편이다. 따라서 풍속이 센 태풍시기를 포함하는 연구기간에 대해 안정적으로 대기질 수치모의를 수행하기 위해 대구지역을 대상으로 3 km 수평해상도를 선택하였다. 대기질모델링을 위한 WRF와 CMAQ의 도메인 영역은 Fig. 3과 같다. CMAQ의 도메인 격자개수는 20 × 20개 이며, 적분 간격은 60초이다. 3.3절에 따르면, 대구지역의 고농도

O₃은 외부로부터의 수송영향이라기 보다는 오히려 국지배출에 의한 광화학 생성의 기여가 더 큰 것으로 사료된다. 따라서 대기질 모의에 있어 외부의 영향이 없는 것으로 가정하고 수치모의를 수행하였다. 즉, D1의 CCTM 결과를 이용하여 D2의 초기·경계 자료를 만드는 방식의 내림수행을 실시하지 않고, D3에 대해서 독립적으로 모델링을 수행하였다. 따라서 경계조건은 모든 수행에 대해 EPA에서 제공하는 연직 농도분포 자료를 이용하였으며, 초기조건은, 첫 수행에서는 EPA에서 제공하는 연직 농도분포 자료, 두 번째 수행부터는 앞 시간의 CCTM 출력 자료를 이용하여 입력하였다. 그리고 예측시간에 따른 오차를 줄이기 위하여 24시간 간격의 cycle run을 수행하였다. 모델 수행기간은 48시간의 spin up time을 포함하여 2011년 8월 30일 00시(UTC)부터 2011년 9월 6일 15시(UTC)까지로 하였다.

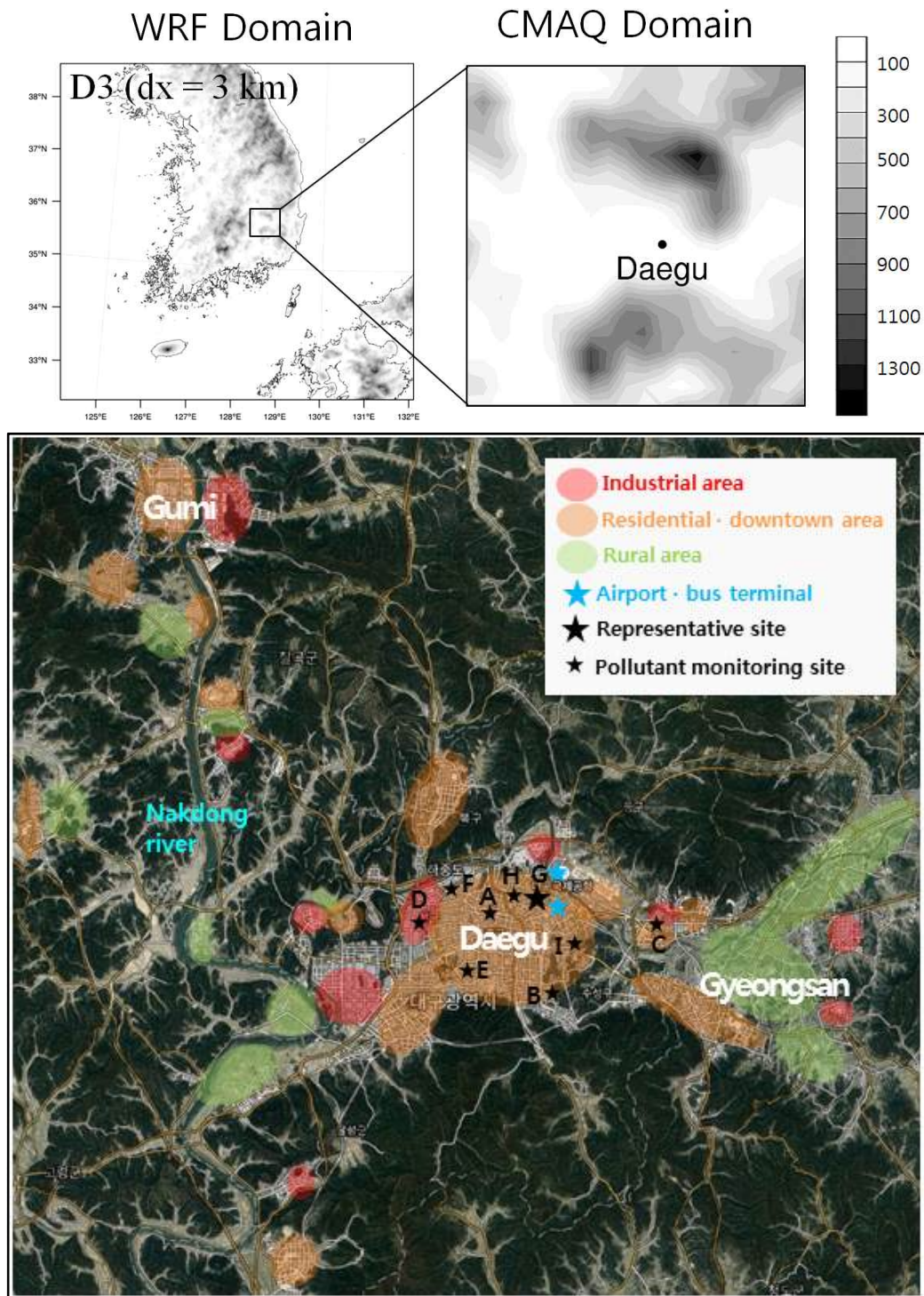
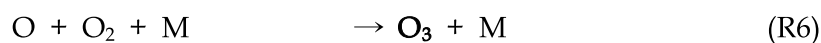
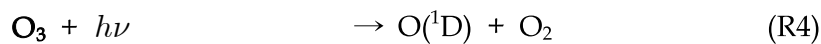
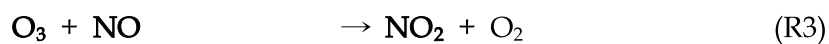
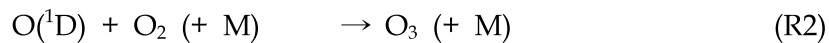


Fig. 3. The domains for the WRF and CMAQ modeling with topography features. And the geographical locations of the monitoring sites for air pollutants in Daegu. Site G is the representative site.

2.3. O₃의 광화학 생성·소멸 기작에 대한 이론적 배경

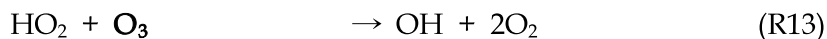
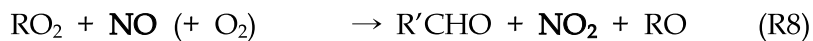
기본적으로 대기 중의 O₃은 오염원으로부터 배출되는 NO₂의 광분해 산물인 (들뜬 상태의 불안정한)산소원자(O(¹D))가 산소분자(O₂)와 결합하면서 생성된다. 이때 생성된 O₃은 NO₂의 또 다른 광분해 산물인 일산화질소(NO)에 의해 다시 분해되어 NO₂를 생성하며, 이러한 반응은 매우 짧은 시간규모를 가진다. 이 두 화학반응은 상호평형을 이루기 때문에 O₃을 일정농도로 유지시킨다(null cycle, R1~R3). 그리고 O₃은 광분해 되었다가 다시 결합하는 과정을 겪는데, 이 과정 또한 null cycle로써 O₃을 일정농도로 유지시킨다(R4~R6). 그러나 NO_x 배출이 많은 대도시 지역에서는 NO_x 배출의 대부분을 차지하는 NO의 O₃ 제거 과정에 의해 야간에 O₃ 농도가 감소하기도 한다(적정효과, R3).



(M: other O₂ or N₂)

오염물질 배출이 풍부한 도시 지역에서는 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs) 또는 비메탄탄화수소(Non-Methane Hydro-Carbons, NMHCs)에 의해 O₃ 수지가 변하게 된다. 일반적으로 O₃의 농도 증가에 직접 영향을 주는 반응은 VOCs에 의해 생성된 페록시 라디칼(RO₂, HO₂, CH₃O₂ 등)과 NO와의 반응이며(R7~R10), 이 반응의 결과로 생산된 추가적인 NO₂가 광분해 순환함으로써 O₃ 농도가 증가하게 된다. 그리고 O₃의 광화학적 소멸에 영향을 미치는 반응은 대기 중의 수증기(H₂O)와 O(¹D)와의 반응, 수산화기(OH)와 O₃과의 반응, 이산화수소(HO₂)와 O₃과의 반응이 있다(Seinfeld and Pandis, 1998; 손

장호 등, 2010; R11~R13). 또한 NO_x와 VOCs의 배출량이 많은 곳에서는 NO_x의 농도 혹은 NO_x와 VOCs의 농도 비에 따라 O₃ 농도의 변동성이 크다. Klemm et al. (1994), Sillman (1999), 김유근 등(2002b)에 의하면, 지역별 특성에 따라 O₃ 생성이 NO_x 농도 증가에 민감하거나(NO_x-sensitive), VOCs 농도 증가에 민감하게 나타나기도 한다(VOC-sensitive). 또한 Kanaya et al. (2008), Wood et al. (2009), Song et al. (2012)에 따르면, NO_x 농도가 높은 조건에서는 NO₂가 OH와 반응하여 질산(HNO₃)을 생성하는 반응(R14, NO_x의 종말반응)의 속도가 NO₂가 광해리를 일으켜 O₃을 생성하는 반응(R1, R2)의 속도보다 빨라서 O₃을 생성하는 광화학 반응이 지연될 수 있다. 또한 Seinfeld and Pandis (1998)에 의하면, NO_x 농도가 낮은 조건에서는 VOCs와 OH의 반응이 NO₂와 OH의 반응보다 우세하여, 이에 따라 생성되는 페록시 라디칼이 NO를 NO₂로 변환시킴으로써 O₃ 생성에 기여하게 된다. 이처럼 NO_x는 광해리를 하여 O₃의 생성에 기여하는 역할과 더불어 OH와 반응하여 HNO₃을 생성함으로써 NO_x의 광분해 순환을 종료시키는 두 가지 역할을 조건적으로 수행하여 O₃ 농도 변화에 기여한다.



3. 결과 및 고찰

3.1. 태풍영향 전·중·후 시기동안 종관기상 특성

Figs. 4~5는 태풍영향 전 시기이면서 고농도 O_3 이 나타난 시기인 2011년 9월 1일(Figs. 4(a)~4(c), 5(a)~5(c)), 태풍영향이 시작되는 2011년 9월 3일(Figs. 4(d)~4(f), 5(d)~5(f)), 태풍영향 후 시기인 2011년 9월 6일(Figs. 4(g)~4(i), 5(g)~5(i))의 9, 12, 18시(LST)에 해당하는 동아시아 영역 지상 일기도와 남한의 수치모의 바람장 결과를 각각 나타낸다. 이후의 분석에서 태풍영향 전·중·후 시기를 대표하는 날은 9월 1일, 3일, 6일로 한다. 태풍영향 전 한반도 주변으로는 북쪽과 서쪽의 이동성 고기압과, 북태평양 고기압의 남서쪽 연변을 따라 남동쪽에서 북상하는 태풍이 거리를 두고 대치하고 있다. 한반도 북동쪽에 있는 저기압의 존재와 함께, 고기압이 동서로 마주보고 저기압이 남북으로 마주보는 이러한 종관패턴은 Lam (2014)에서 분석한 고농도 O_3 과 관련 있는 종관패턴 중 하나와 일치한다(Fig. 6(a)). 이러한 종관상황 하에 있는 한반도는 이동성 고기압의 영향과 함께 등고선 간격이 넓고 풍속이 약한 고압대가 형성되어 기온이 높고 구름이 거의 없는 맑은 날씨를 보이고 있다(Figs. 4(a)~4(c)). 이동성 고기압의 영향 하의 안정한 대기는 국지순환계(예, 해륙풍과 산곡풍)와 함께 고농도 O_3 발생에 깊이 관여한다(김유근 등, 2002b; 이화운 등, 2001; Liu et al., 1994). 따라서 이 시기의 한반도는 Lam (2014)에서 분석한 종관패턴과 고기압의 영향에 의해 광화학적 O_3 생성에 호조건이었을 것으로 사료된다. 고기압 영향에 의해 나타나는 특징들은 Lam (2014)에 의하면 태풍 순환의 바깥쪽 침강구역과도 관련이 있는 것으로 여겨진다(Fig. 6(b)). 또한 태풍영향 전 시기의 오전에 동해와 서해에서 나타나던 북풍은 태풍의 북상으로 인하여 한반도가 간접적인 영향을 받음으로써 점차 북서풍으로 바뀌는 것으로 나타난다(Figs. 5(a)~5(c)). 이로 인해 12시에 대전 근처에서 나타나는 서해상의 북서풍 흐름과 내륙 바람(북동풍)의 방향 수렴은 대기를

서서히 정체하게 만들어 O_3 의 광화학적 생성에 호조건을 제공하고, 또한 생성된 O_3 을 외부로 빠져나가지 못하게 함으로써 고농도 O_3 에 기여했을 가능성이 있다 (Fig. 5(b)).

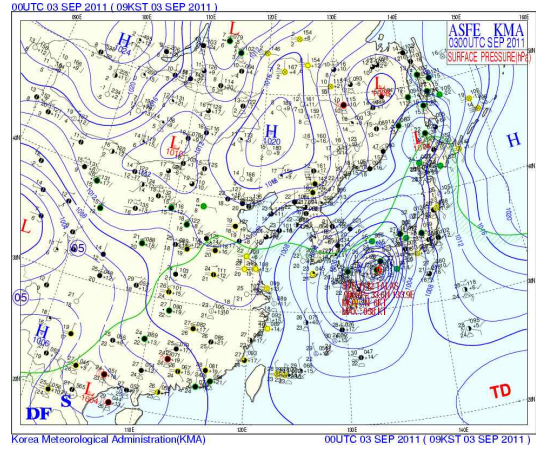
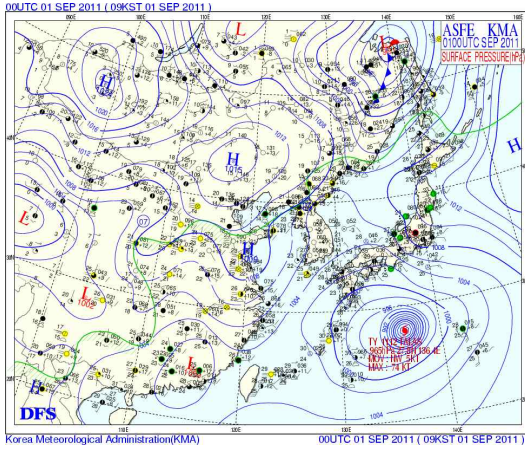
태풍의 영향을 받기 시작한 9월 3에는 이동성 고기압이 한반도의 북쪽에 위치하고, 태풍이 일본의 시코쿠 남쪽해상(33.0 °N, 133.8 °E)에 상륙하여 성질이 다른 두 기단이 가까이 대치하고 있다. 그 경계면에 위치한 한반도는 태풍의 영향으로 기압이 낮고, 등고선 간격이 좁아 풍속이 강하며, 구름이 많은 날씨를 보이고 있다. 또한 북풍과 동풍계열의 바람이 불고 있으며, 동풍유입으로 인해 동해안에서는 강수가 나타나고 있다(Figs. 4(d)~4(f)). 태풍영향 시기에는 태풍의 영향으로 한반도에 동풍이 지배적이다(Figs. 5(d)~5(f)). 9월 6일에 한반도는 동해상으로 진출하여 강도가 약화된(992 hPa) 태풍 탈라스와 북서쪽과 서쪽에 위치한 이동성 고기압의 영향으로 다시 기온이 높고 구름이 적은 맑은 날씨를 보이고 있다(Figs. 4(g)~4(i)). 이와 더불어 낮 동안 동해상에 나타나는 고기압 순환은 광화학적 O_3 생성에 호조건으로 여겨진다(Figs. 5(g)~5(i)).

Before typhoon

During typhoon

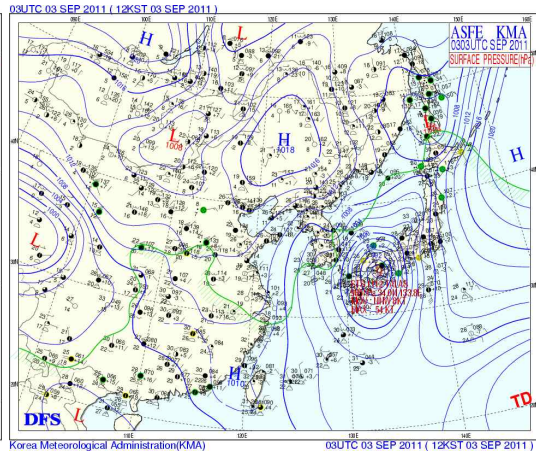
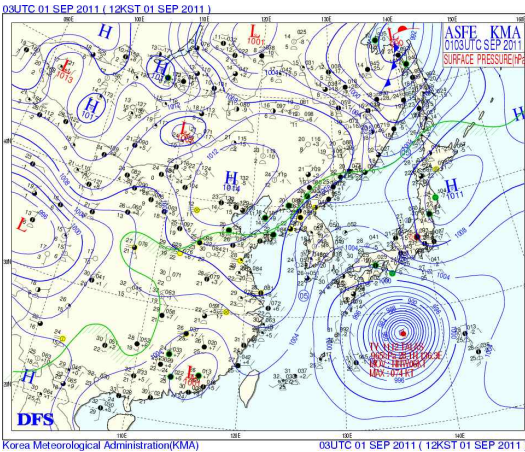
(a) 2011/09/01 09 LST

(d) 2011/09/03 09 LST



(b) 2011/09/01 12 LST

(e) 2011/09/03 12 LST



(c) 2011/09/01 18 LST

(f) 2011/09/03 18 LST

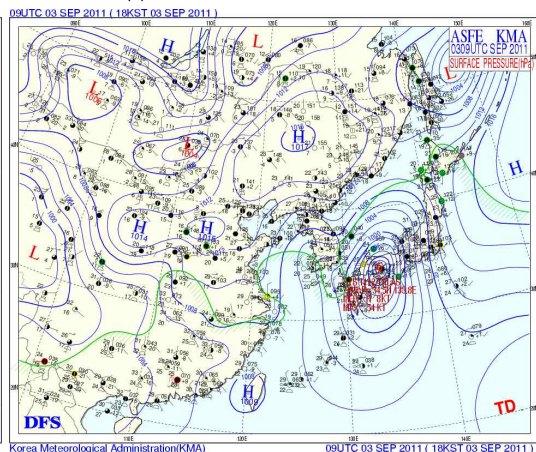
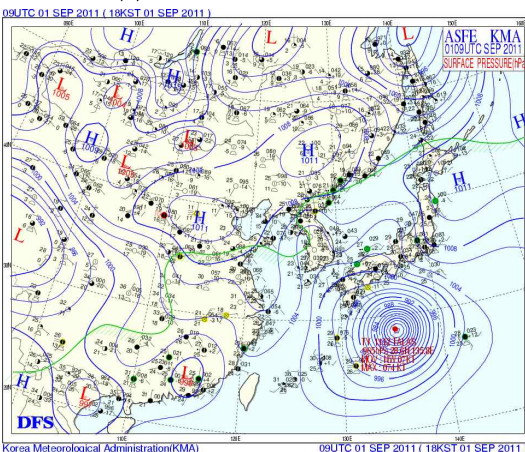
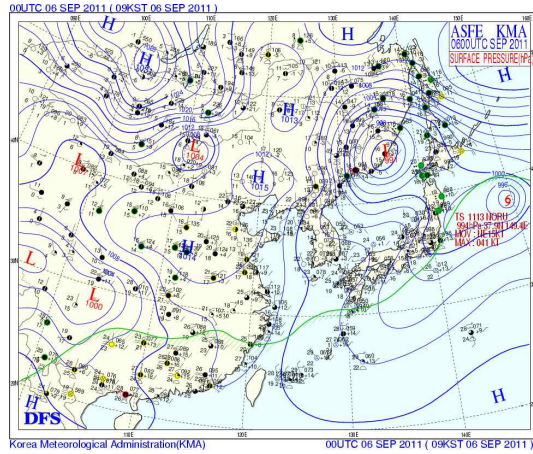


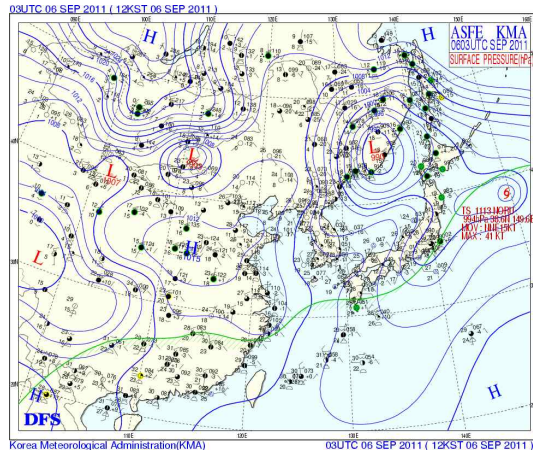
Fig. 4. Synoptic weather maps at surface at 9, 12, 18 LST before, during, and after typhoon Talas (1112).

After typhoon

(g) 2011/09/06 09 LST



(h) 2011/09/06 12 LST



(i) 2011/09/06 18 LST

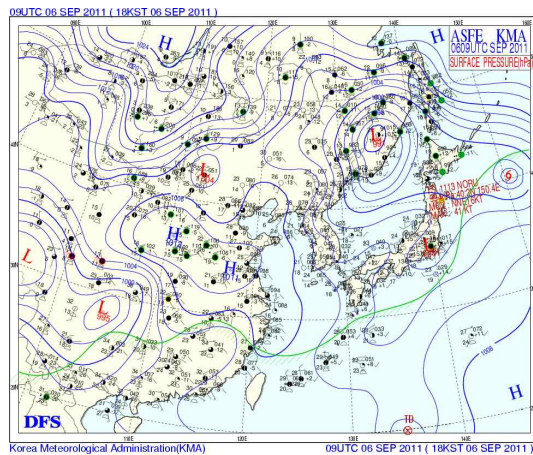
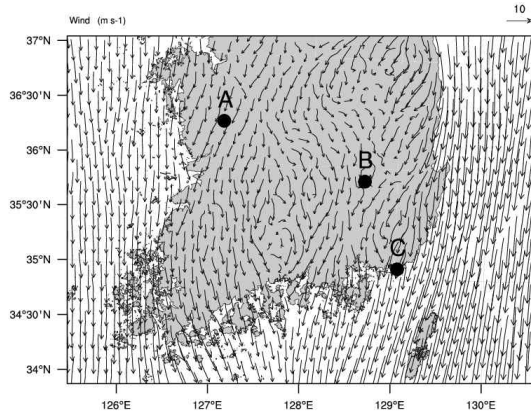


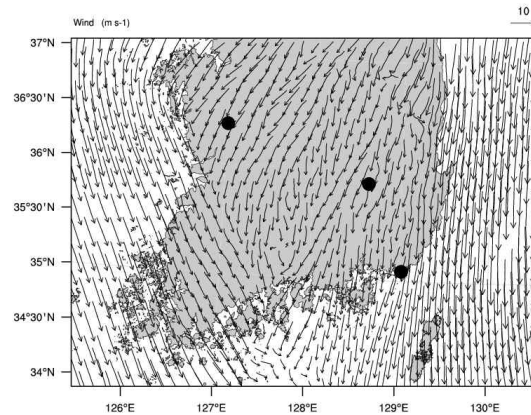
Fig. 4. Continued.

Before typhoon

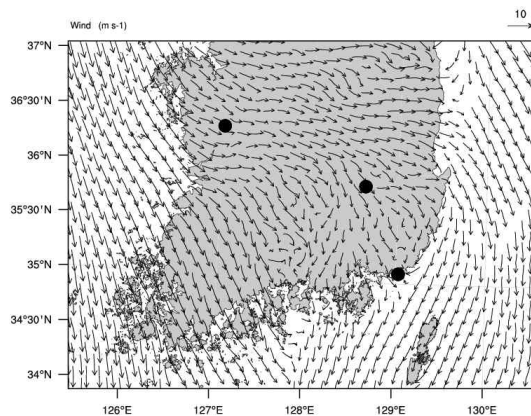
(a) 2011/09/01 09 LST



(b) 2011/09/01 12 LST

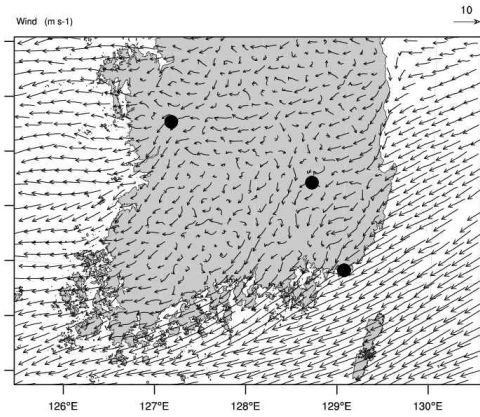


(c) 2011/09/01 18 LST

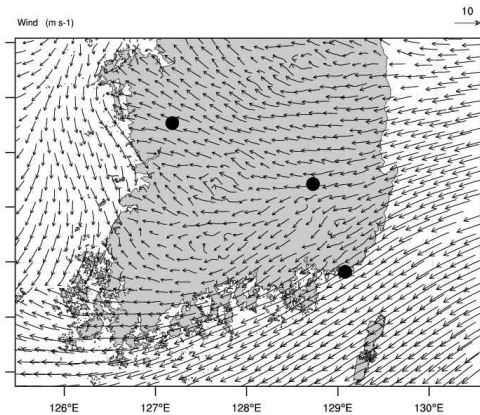


During typhoon

(d) 2011/09/03 09 LST



(e) 2011/09/03 12 LST



(f) 2011/09/03 18 LST

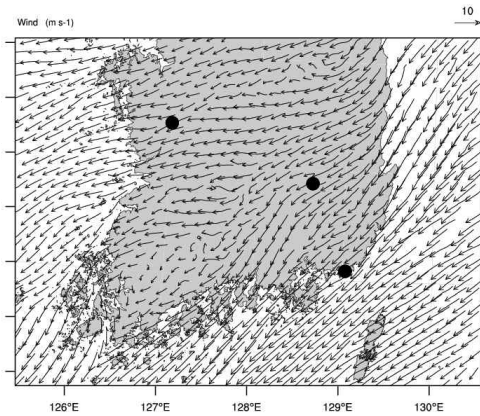
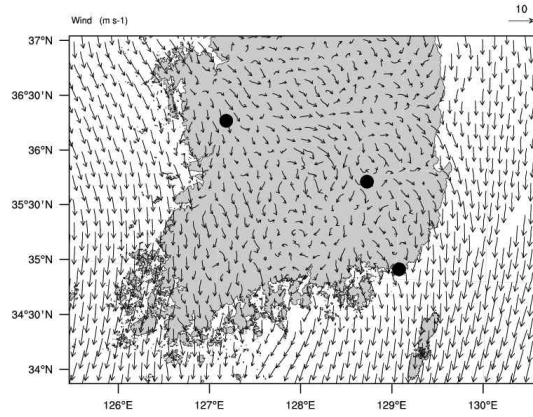


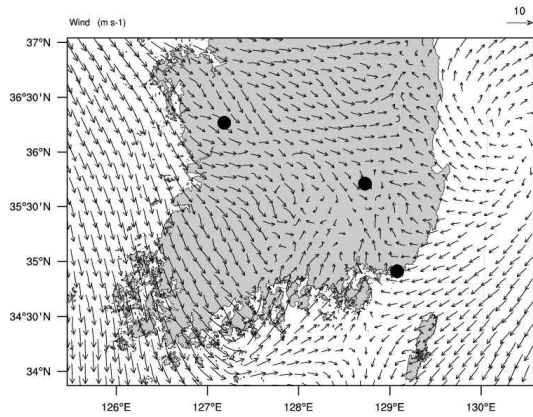
Fig. 5. Simulated wind vectors at 10 m above ground at 9, 12, 18 LST before, during, and after typhoon Talas (1112). A, B, and C indicate the representative sites in Daejeon, Daegu, and Busan region, respectively.

After typhoon

(g) 2011/09/06 09 LST



(h) 2011/09/06 12 LST



(i) 2011/09/06 18 LST

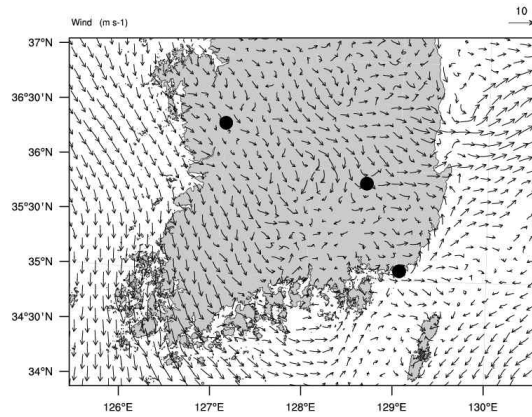


Fig. 5. Continued.

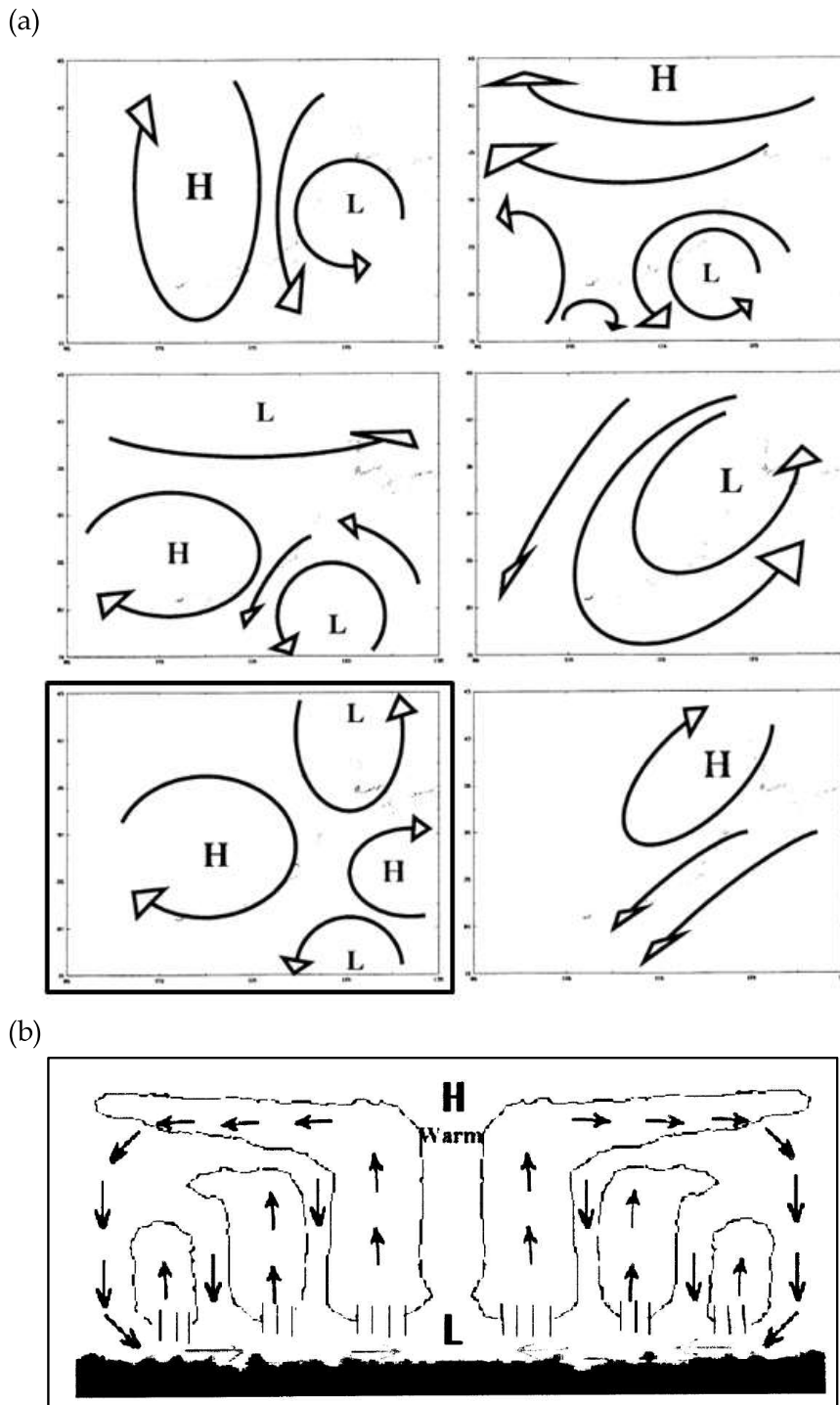


Fig. 6. (a) Synoptic patterns at lower atmosphere for ozone episode days and (b) cross-section of a mature tropical cyclone and its associated circulation (Lam, 2014).

3.2. 기상모델의 태풍 탈라스 예측성능 및 기상요소 예측수준 평가

먼저 기상모델 WRF의 태풍 예측성능을 확인하기 위해 태풍의 진로와 강도 모의 결과를 관측값(기상청 분석값)과 비교하였다(Fig. 7). 대기질에 영향을 미치는 기상요소는 근본적으로 강한 종관장인 태풍의 영향을 받고, 또한 모델이 모의한 태풍의 위치와 강도에 따라 한반도의 영향 범위나 정도가 달라질 수 있기 때문에, 수치모의 결과를 분석하기 전에 WRF의 태풍 예측성능을 확인할 필요가 있다. WRF는 한반도 영향 시기인 9월 3일과 4일의 태풍 진로를 관측에 비해 동쪽으로 치우치는 것으로 모의하였고, 9월 2일까지는 관측보다 느리게 이동하는 것으로 모의하였으며, 9월 2일 이후로는 관측보다 빨리 이동하는 것으로 모의하였다. 강도는 관측 강도에 비해 과대모의 하는 경향이 있었고, 특히 태풍영향 시기인 9월 3일과 4일에 과대모의 경향이 두드러졌으며, 태풍이 약화되는 정도를 잘 모의하지 못하였다. 관측에 비해 동쪽으로 치우친 모델의 진로는 모델이 모의한 한반도의 태풍영향 범위와 정도를 실제보다 축소시켰을 가능성이 있지만, 태풍영향 시기에 관측보다 강도를 강하게 모의한 것은 이를 다소 상쇄시켰을 가능성도 있다. 또한 모델이 9월 3일과 4일에 태풍의 이동속도를 관측보다 빠르게 모의한 것은 태풍의 한반도 영향 지속시간을 단축시켰을 가능성이 있다.

본 연구에서 WRF가 모의한 태풍 진로의 평균오차는 315.6 km, 강도의 평균 절대값 오차는 5.3 m/s로 나타났다. WRF의 48시간 오차(204.2 km)는 태풍 탈라스를 모의한 다른 수치모델들(기상청에서 이용하는 수치모델 중 8개 모델(JGSM, NOGAPS, GFS, ECMWF, TEPS, GDAPS, TWRF, KWRF) 자료의 48시간 평균오차(200.5 km)와 유사한 수준이었고, 또한 WRF의 오차는 가장 작은 오차를 갖는 모델과 약 40 km 정도 차이가 났다(기상청, 2011).

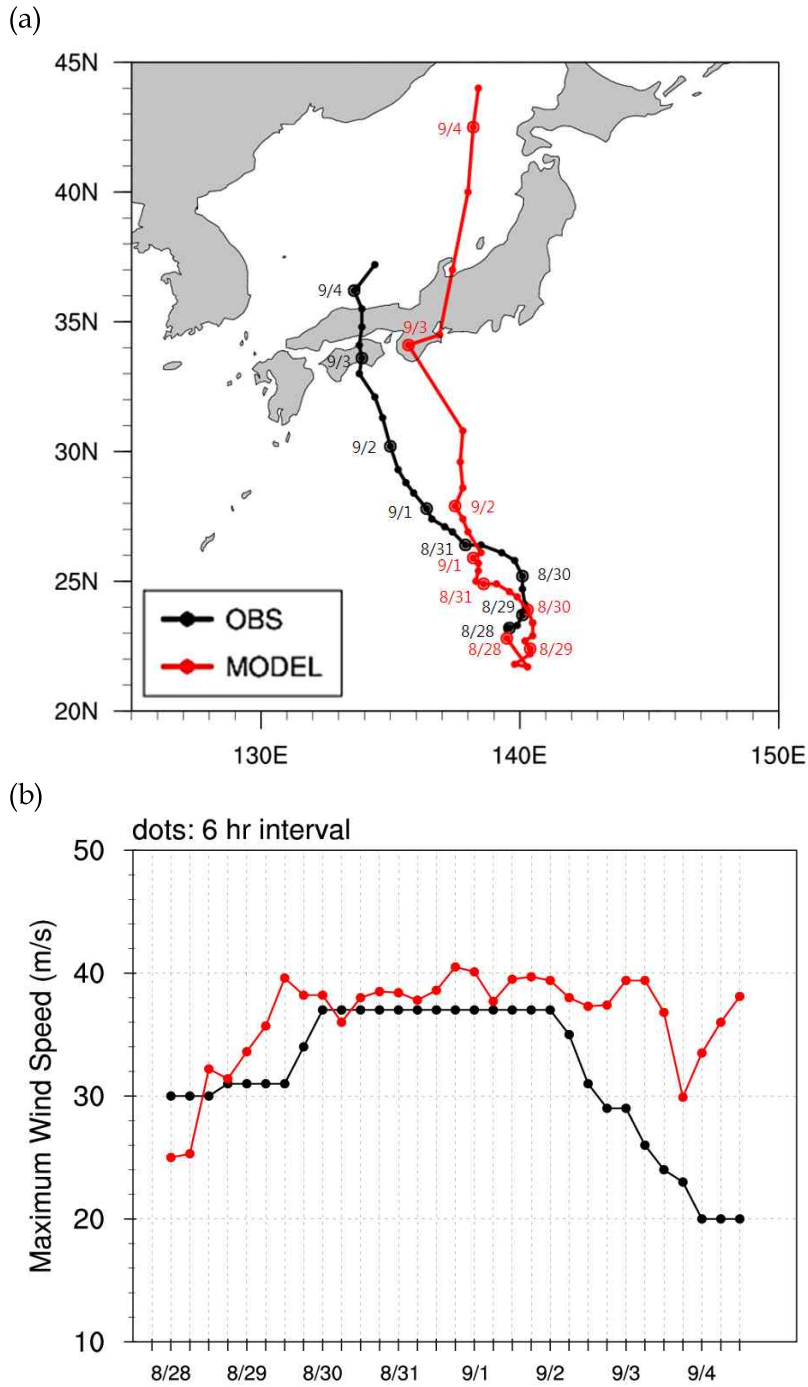


Fig. 7. Observation and WRF-simulated value of (a) track and (b) intensity (maximum wind speed) for typhoon Talas (1112).

기상요소에 대한 WRF의 모의 경향과 수준을 파악하기 위해 태풍영향 전·중·후 시기에 대전, 대구, 부산지역의 기상 관측값과 모델 모의값을 비교하였다(Fig. 8). 기상요소 중에서 O₃ 농도와 높은 상관관계를 가질 것으로 예상되는 기온과 바람(풍속, 풍향)에 대해서 대표적으로 평가하였다. 전반적으로 일변화 경향은 기온이 풍속에 비해 관측과 더 유사하였으며, 기온은 과소모의 경향, 풍속은 과대모의 경향이 나타났다. 기온의 과소모의 경향은 주간보다 야간에 뚜렷하게 나타났다. 또한 태풍영향 전·후 시기보다 태풍영향 시기에 뚜렷하게 나타났다. 풍속의 과대모의 경향은 대체로 풍속이 증가하는 시기에 두드러졌고, 9월 1일에 두드러졌으며, 세 지역 중에서는 풍속이 세게 나타났던 부산에서 그 정도가 가장 크게 나타났다. 풍향은 전반적으로 관측과 유사하게 모의하였으나, 태풍영향 시기에 부산은 북풍이 우세하게 나타난 관측을 잘 모의한 반면, 대전과 대구는 동풍이 우세한 것으로 모의한 경향이 있었다. 그리고 모델이 9월 2일까지 태풍의 이동속도를 느리게 예측한 것으로 인하여(Fig. 7(a)), 부산지역에서 나타난 태풍으로 인한 태풍영향 시기의 풍속 증가가 관측(9월 1일)보다 하루 정도 늦게(9월 2일) 나타났다. 또한 세 지역 모두 태풍으로 인한 풍향 변화 시점이 관측에 비해 하루 정도 늦게 나타났다.

수치모의 결과의 신뢰성 평가를 위해 태풍영향 전·중·후 시기로 나누어 대상지역의 기온과 풍속에 대한 통계 검증(IOA, MB, RMSE)을 실시하였다(Table 4). 먼저 기온은 세 지역 모두 대체로 풍속에 비해 높은 IOA를 가지고, 태풍영향 전·후 시기의 IOA(0.77~0.93)가 태풍영향 시기의 IOA(0.57~0.74)보다 높게 나타났다. 그리고 MB는 음의 값을 가져 모델의 과소모의 경향을 나타내었고, 태풍영향 전·후 시기의 MB(-0.33~-3.32)는 태풍영향 시기의 MB(-1.52~-4.22)보다 작게 나타났다. 태풍영향 전·후 시기의 RMSE(1.10~3.76)는 태풍영향 시기의 RMSE(1.76~4.78)보다 작게 나타났다. 그러나 풍속은 세 지역의 IOA가 태풍영향 전·중·후 시기 모두 비슷하였으며, RMSE는 지역별로 가장 작은 오차를 갖는 시기가 다르게 나타났다.

모델이 모의한 부산의 기온은 세 지역 중에서 평균오차가 가장 작고, 일치도가 제일 높아 관측과 아주 유사하였지만, 풍속은 관측과 다소 차이를 보여 변수 간 모의수준에 차이가 존재하는 것으로 나타났다. 세 지역의 통계 검증은 대체로 모

델결과의 신뢰성을 뒷받침해주고 있지만, 풍속보다 기온의 신뢰도가 더 높은 점과 부산의 풍속은 일치도가 높은 수준이 아닌 점을 고려할 필요가 있다. 부산지역에서 나타나는 풍속의 낮은 일치도와 상대적으로 큰 오차는 바다와 인접해 있는 부산 지역의 지리적 특징으로 인해서 모델이 모의한 태풍(이동속도를 관측과 다르게 모의한)의 영향을 대전, 대구지역보다 더 많이 받았기 때문인 것으로 사료된다.

기상모델의 수치모의 결과는 모델이 갖는 기본적인 오차와, 입력자료가 갖는 오차를 반영하고 있으며, 태풍의 진로와 강도예측 오차, 그리고 이로 인한 한반도 영향 범위와 영향 정도에 대한 오차가 초래하는 기상요소의 오차 등을 포함하고 있으나, 전반적으로 대상지역에 대한 대기질(O₃, NO₂ 등) 수치모의 영향을 평가하기에 합리적이라고 사료된다.

(a) Daejeon

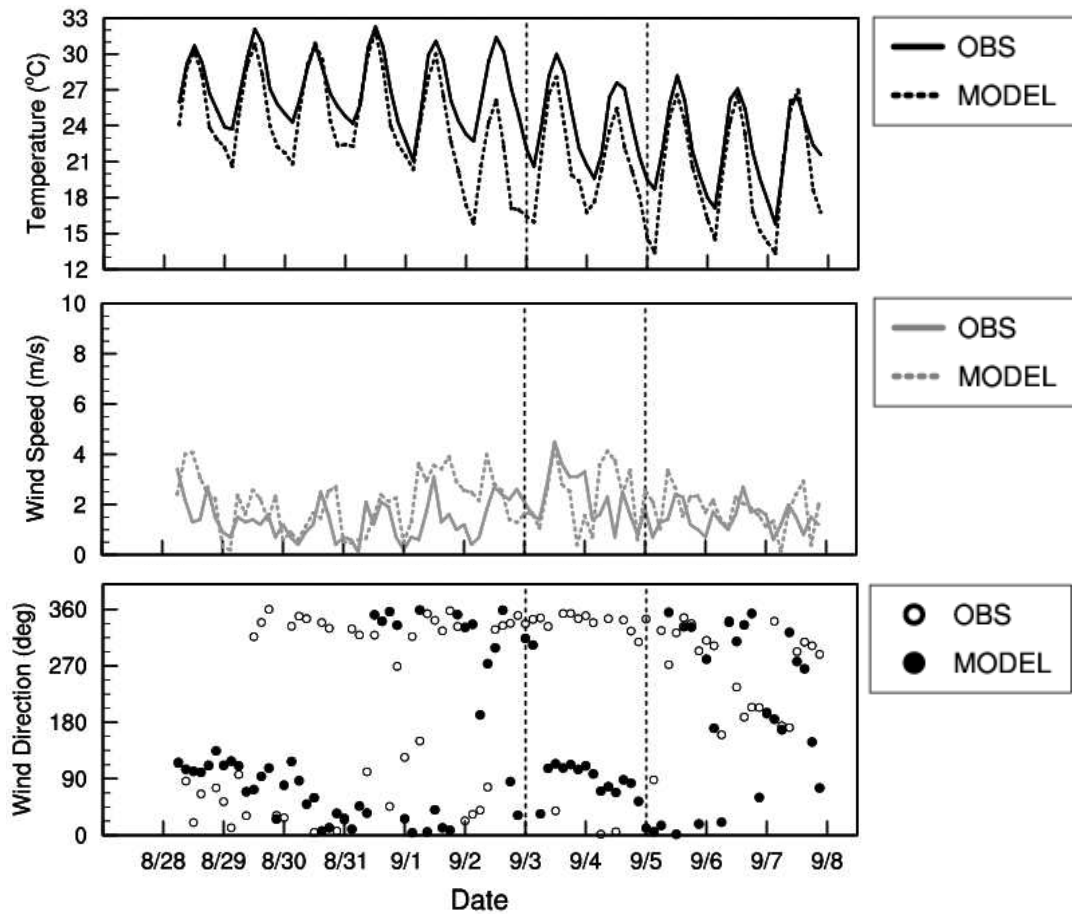


Fig. 8. Time series (at Local Standard Time) of observation and WRF-simulated value for meteorological variables (temperature, wind speed and direction) at the representative sites in Daejeon, Daegu, and Busan before, during, and after typhoon Talas (1112). The vertical dash lines on the figure divide the periods before, during, and after typhoon Talas (1112).

(b) Daegu

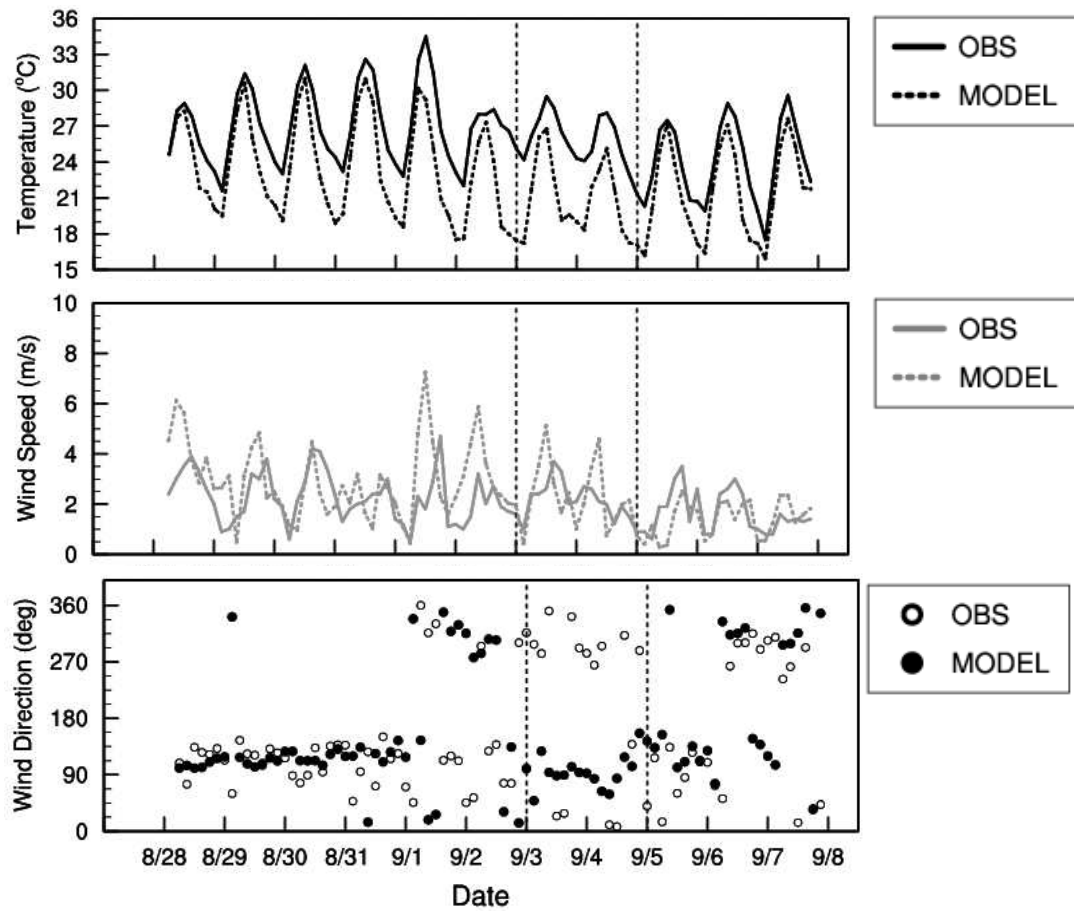


Fig. 8. Continued.

(c) Busan

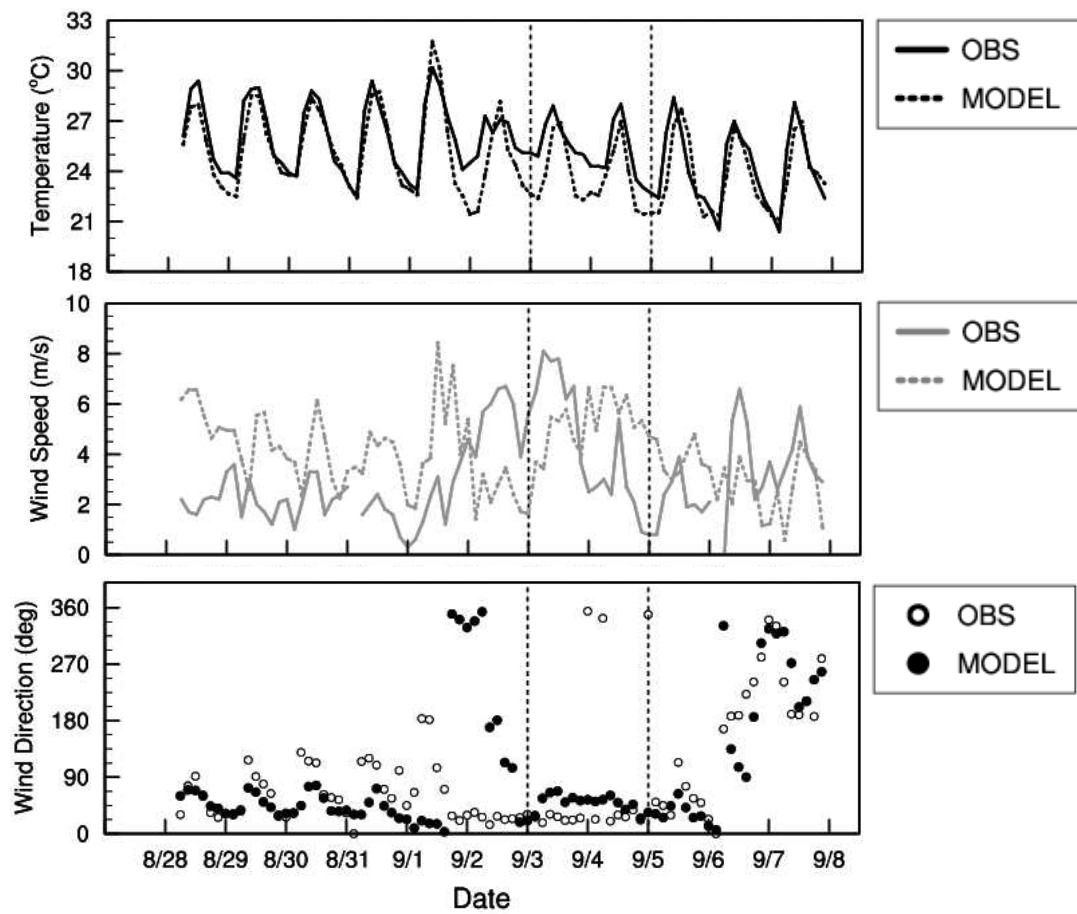


Fig. 8. Continued.

Table 4. Statistical evaluation of temperature and wind speed between observations and model-simulated values at the representative sites in Daejeon, Daegu, and Busan before, during, and after typhoon Talas (1112). (simulation period: 09 LST 28 August ~ 00 LST 8 September).

		Daejeon			Daegu		
		Before typhoon	During typhoon	After typhoon	Before typhoon	During typhoon	After typhoon
Temperature (°C)	IOA ^a	0.82	0.73	0.88	0.77	0.57	0.84
	MB ^b	-2.28	-3.57	-2.26	-3.32	-4.22	-2.68
	RMSE ^c	2.99	3.97	2.8	3.76	4.78	3.02
Wind speed (m/s)	IOA	0.65	0.64	0.65	0.63	0.68	0.68
	MB	0.57	-0.21	0.19	0.56	-0.03	-0.21
	RMSE	1.12	1.23	0.73	1.42	0.99	0.81

		Busan		
		Before typhoon	During typhoon	After typhoon
Temperature (°C)	IOA	0.91	0.74	0.93
	MB	-0.70	-1.52	-0.33
	RMSE	1.28	1.76	1.10
Wind speed (m/s)	IOA	0.58	0.52	0.53
	MB	0.94	-0.19	-0.28
	RMSE	2.07	2.30	1.77

^a IOA: Index of agreement.

^b MB: Mean bias.

^c RMSE: Root mean square error.

3.3. 연구사례일의 기상요소와 대기질(O₃ 및 NO₂) 변화 분석

Figs. 9, 10, 11은 2011년 8월 28일 00시(LST)부터 9월 8일 00시(LST)까지 대전, 대구, 부산지역에 대한 시간별 O₃ 및 NO₂ 농도와 기상요소(기온, 일사, 운량, 강수, 풍속, 풍향, 기압, 상대습도)를 나타낸다. 태풍영향 전 시기이면서 고농도 O₃ 시기가 시작되는 것은 8월 30일이지만, 태풍의 영향을 받지 않으면서 고농도 O₃ 시기도 아닌 보통의 시기와도 비교하기 위하여 8월 28일부터 자료를 표출하였다.

Figs. 9(a), 10(a), 11(a)에서 O₃ 농도는 대전, 대구, 부산 모두에서 일반적으로 오전에 일사가 시작되면서 증가하기 시작하여 낮에 최고치를 기록하고 오후에 점점 감소하여 밤에 최저치를 기록하는 일변화 패턴을 보였다. 이와 관련하여 태풍영향 전·후 시기에 NO₂의 오전 최고농도가 나타나는 시간은 O₃의 최고농도가 나타나는 시간보다 앞서 있고, O₃이 최고농도를 기록하는 시기에 NO₂는 최저농도를 기록하였다. 또한 오후에 O₃ 농도가 감소추세로 접어들면 NO₂ 농도는 다시 증가하고, 특히 야간에는 2.3절의 반응식 R3에 의해 NO₂ 농도가 더욱 증가하는 것으로 보였다. 이와 같이 O₃ 농도는 광화학 반응에 의해 어느 정도 좌우된다고 유추할 수 있지만, 화학작용 이외에 기상효과에 의해서도 크게 영향을 받으므로(손장호 등, 2010) 보다 자세한 분석이 필요하다.

태풍영향 전 시기에 높았던 O₃의 시간별 일 최고 농도는 태풍영향 시기에 절반 수준으로 떨어졌다가 태풍영향 시기가 지나자 다시 상승하였다. 예를 들어, 대전, 대구, 부산지역에서 O₃의 시간별 일 최고농도는 태풍영향 전 시기에 13시와 19시 사이에 63~91 ppb, 태풍영향 시기에 13시와 23시 사이에 16~46 ppb, 태풍영향 후 시기에 13시와 17시 사이에 43~84 ppb로 나타났다. 태풍영향 전 시기(고농도 O₃ 시기)에 최고기온은 태풍영향 시기와 태풍영향 후 시기에 비해 높게(대전은 30 °C 이상, 대구는 32 °C 이상, 부산은 29 °C 이상) 나타나고, 30 °C 이상의 높은 기온이 지속되는 시간 또한 길게(하루 동안 적게는 3시간부터 많게는 8시간까지) 나타나 O₃ 광화학 반응에 호조건을 제공하였음을 확인하였다(Figs. 9(b), 10(b), 11(b)).

태풍영향 전 시기 오전에 세 지역 모두 동풍과 북풍계열의 바람이 번갈아가며

나타나고, 고농도 O₃ 시기에는 세 지역 모두 풍향이 조금 바뀌어 대전은 북풍, 대구는 북풍과 서풍, 부산은 북풍과 남풍이 나타났다(Figs. 9(d), 10(d), 11(d)). 이는 한반도 남쪽의 먼 바다에서 북상하는 태풍의 영향으로 해석되며, 태풍의 저기압성 순환으로 인한 풍향변화는 바람의 방향 수렴과 대기정체로 이어져 O₃ 생성에 호조건을 제공하고, 생성된 O₃의 축적을 야기했을 가능성이 있다. 이는 앞서 언급했던 태풍영향 전 시기의 대전지역 종관특성(Fig. 5(b))에 부합한다. 이는 오후에 풍향 반전이 존재하는 기류수렴이 O₃ 농도 상승에 중요한 원인으로 제시된 Wang et al. (2001)의 연구결과와도 유사하였다. 이렇듯 태풍 탈라스 사례에서 태풍영향 전 시기에 고농도 O₃의 발생 원인은 광화학 O₃ 생성에 영향을 미치는 주요한 기상인자 중 하나인 '높은 기온(30 °C 이상)'(김영성, 1997; NRC, 1991)과, '대기정체(태풍으로 인한 기류변화가 바람의 수렴을 유도하여 대기의 흐름이 정체됨)'인 것으로 사료된다. 그 외에는 태풍영향 전 시기에 기온이 높은 날 일사량 값도 높게 나타나는 편이지만, 고농도 O₃ 시기에 낮은 일사량이 나타나기도 하는 점으로 미루어 보아 일사량이 고농도 O₃에 미치는 영향은 다소 작은 것으로 사료된다.

태풍영향 시기에 감소한 O₃ 농도는 기본적으로 많은 양의 구름(평균 운량 3~9)이 주간에 일사(복사열, 기온)를 감소시켜 광화학 반응을 부진하게 했기 때문인 것으로 사료된다(Niatthijsen et al., 1997; Walcek et al., 1997). 태풍영향 전·후 시기처럼 서로 다른 운량 조건에서도 고농도 O₃이 발생한 것은 운량이 8이상 많아도 기온이 높거나 대기가 정체되는 등 광화학 반응에 유리한 조건이 조성되면 O₃ 농도가 상승할 수 있다는 김영성 등(1999)의 연구결과에 의해 설명될 수 있다. 그리고 태풍영향 시기의 낮은 상대습도는 Jain et al. (2005)에 의하면 O₃의 광화학 반응에 호조건이지만, 낮은 기온에 의한 O₃의 광화학 반응 부진이 태풍영향 시기의 O₃ 농도 감소에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 그러나 태풍영향 시기의 O₃ 농도는 광화학 반응에 불리한 조건을 감안하면 상대적으로 높은 편이다.

태풍영향 시기에 O₃의 시간별 일 최저농도는 태풍영향 전 시기에 비해 약 4배, 태풍영향 후 시기에 비해 약 2배가량 높게 나타났다. 구체적으로, 대전, 대구, 부산지역에서 O₃의 시간별 일 최저농도는 태풍영향 전 시기에 자정 전부터 아침 7

시 전에 1~6 ppb, 태풍영향 시기에 23시부터 아침 8시 사이에 8~27 ppb, 태풍영향 후 시기에 자정에서 아침 8시 사이에 1~13 ppb로 나타났다. 태풍영향 시기에 야간의 농도가 높아 O₃ 농도의 증감(최고농도와 최저농도의 차이)이 작고 일변화 양상이 뚜렷하지 않은 특징은, 태풍으로 인한 강한 야간 풍속이 야기된 수송과 확산의 영향인 것으로 추정된다(Wishinski and Poirot, 1998). 이는 김영성 등(1999)과 오현선과 김영성(1999)의 내용을 근거로 하여 구름이 덮인 날 새벽에 O₃ 농도가 높아진 가능성을 제시할 수 있으나 단정하기는 어렵다.

주간에 광화학 반응에 불리한 조건에도 불구하고 상대적으로 높게 나타나는 O₃ 농도는 태풍영향 전·후 시기보다 확연히 낮게 나타난 NO₂ 농도(30 ppb 미만) 때문인 것으로 사료된다. 태풍영향 시기에 강수가 없었음에도 불구하고 NO₂ 농도가 낮게 나타나는 것은 태풍으로 인해 증가한 풍속(주로 대전과 부산)이 야기된 대기확산, 사전 태풍예보에 따른 교통량 감소와 산업 활동의 제약으로 인한 대기오염물질 발생량 감소가 원인일 수 있다(안숙희 등, 2014). NO_x의 농도가 낮은 조건에서는 OH가 NO₂와 결합하여 HNO₃이 되는 반응보다 OH가 VOCs와 결합하여 또 다른 NO₂를 생성하는 반응이 우선적으로 이루어지기 때문에 O₃의 생성이 상대적으로 빠르게 이루어질 수 있다(Song et al., 2012). 또한 대기 중의 수증기는 들뜬상태의 산소원자(O(¹D))와 반응하여 OH를 만듦으로써 O₃의 소멸 과정에 기여하게 되는데(손장호 등, 2010; 송상근 등, 2010), 태풍영향 시기에는 상대습도(대기 중의 상대적인 수증기량)가 낮아서 O₃의 소멸양도 적은 것으로 추정된다. 따라서 태풍영향 시기에는 주간 NO_x 농도가 낮은 조건으로 인해 HNO₃을 생성하는 반응보다 O₃을 생성하는 반응이 상대적으로 우세했고, 낮은 상대습도와 NO 농도로 인해 O₃ 소멸량이 적었기 때문에 광화학 반응에 불리한 조건임에도 불구하고 상대적으로 높은 O₃ 농도를 유지한 것으로 사료된다. 또한 야간에 강한 풍속에 의한 수송·확산 효과와 구름의 존재가 O₃ 농도 감소를 제한한 것이 원인으로 작용하여 일변화 양상이 뚜렷하지 않았던 것으로 추정된다. 이는 새벽의 고농도 O₃이 풍속이 강한 경우에 잘 나타나고, 이때 NO₂ 농도가 낮고 공기가 상대적으로 더 건조하다고 밝힌 김진영(1995)의 결과와도 유사하였다. 하지만 농도 분석만으로는 완전한 광화학적 해석이 어려우므로 추후 3차원 광화학 수송모델을 이용한 수치모의연구가 필요하다고 판단된다.

태풍영향 후 시기에는 이동성 고기압의 영향으로 기온이 높고 구름이 적은 날씨를 보여 광화학적 O_3 생성에 호조건이었다(Figs. 4(g)~4(i)). 이로 인해 기온이 높았던 대구지역에서는 고농도 O_3 이 다시 나타났고, 태풍영향 전 시기에 비해 상대적으로 기온이 낮고 풍속이 강했던 대전과 부산지역에서는 고농도 O_3 이 나타나지 않았다.

오전에 바람을 따라 유입된 전구물질은 일사량 증가와 함께 광화학 반응을 통하여 O_3 을 생성할 수 있으므로(McDonald et al., 2001; Liu et al., 1994), 아침풍속은 광화학 오염의 원인을 진단하는데 사용된다. 미국 EPA 지침서에서 정체와 이동을 구분하는 기준 풍속 1.5 m/s는 풍향이 일정한 경우에 오염물질을 하루 동안 약 130 km 가량 이동시킬 수 있으므로 전형적인 도시 규모 이동에 상응하는 풍속이다. 따라서 고농도가 오전 풍속 1.5 m/s 미만 조건에서 발생했다면 도시 규모 광화학 오염에 의하여 O_3 농도가 상승한 것, 1.5 m/s 이상 조건에서 발생했다면 대상지역 바깥에 위치한 다른 지역으로부터 오염물질이 이동하여 O_3 농도가 상승한 것임을 암시한다(김영성과 오현선, 1999). 세 지역의 고농도 O_3 시기에 아침(9시) 풍속은 대체로 1.5 m/s 미만으로 나타나, 도시규모 광화학 오염에 의하여 O_3 농도가 상승한 것으로 판단된다. 그러나 8월 31일에 대구지역은 아침풍속이 1.5 m/s 이상으로 나타나, 대상지역 바깥에 위치한 다른 지역으로부터 오염물질이 이동하여 O_3 농도가 상승했을 가능성이 있다. 이를 검토하기 위해 WRF 모델을 이용하여 모의한 대구 주변지역의 바람장을 표출해보았다. Fig. 12는 8월 31일 9시, 12시, 15시를 모의한 바람장이다. 대구 주변지역은 약한 국지풍 혹은 동풍, 북서풍이 나타난다. 20~30 km 이내에 대구의 북서쪽에는 산업단지가 있는 구미시, 동쪽에는 산업단지와 농업지역을 포함하는 경산시가 있지만(Fig. 3), 아침풍속이 2.0 m/s 미만으로 약한 편이었고 또한 대구지역은 주변이 높은 산으로 둘러싸인 분지지형이기 때문에 장거리 수송에 의한 영향이라기보다 국지 배출의 영향을 받은 것으로 추정된다. 국지배출은 대구 도심지와 주거지역을 비롯하여 이 주변에 분포하고 있는 북쪽과 동서쪽의 산업지역을 중심으로 이루어지는 것으로 여겨진다(Fig. 15). 따라서 대구지역의 8월 31일 고농도 O_3 은 대구지역 내 배출의 영향을 받은 도시규모 광화학 오염일 가능성이 높다.

대전, 대구지역과 달리 태풍영향 전 시기(9월 1일)에 부산의 높은 NO_x 농도 조

건은(Fig. 11(a)), NO₂가 HNO₃을 생성하는 반응에 소모되어 O₃을 생성하는 광화학 반응을 지연시킨 결과, 상대적으로 낮은 O₃ 농도 수준(63 ppb)을 야기한 것으로 사료된다(Song et al., 2012). 그러나 이것만이 절대적인 이유일 수는 없고, 대전과 대구지역에 비해 상대적으로 낮은 기온과(Fig. 11(b)), 태풍의 영향으로 나타난 연안의 북풍(Fig. 5(b))이 생성된 O₃을 바다 쪽으로 빠르게 수송하여 국지적 축적을 어렵게 한 것 등이 복합적으로 작용했을 것으로 사료된다. 부산의 NO₂ 농도가 높은 것은 항구와 공항이 있는 지역산업의 특성상 NO₂ 배출량이 많기 때문인 것으로 추정된다.

태풍영향 전·후 시기에 대구와 부산지역은 새벽에 일변화의 일환으로 감소추세이던 O₃ 농도가 자정을 전후로 다소 급격히 감소하였다가 증가하고, 다시 감소하는 형태가 관찰된다. 이는 부산지역에서 보다 뚜렷하게 나타나며, 야간에 나타나는 O₃의 2차 피크로 판단된다. 일반적으로 야간의 경우에는 주간과 달리 광화학 반응에 의한 O₃ 생성이 제한되기 때문에 O₃ 농도의 수평분포는 바람에 의존하게 된다(전원배 등, 2011). 그리고 김진영(1995)에 의하면 새벽의 2차 피크는 강한 풍속과 낮은 NO₂ 농도, 낮은 상대습도 조건 하에 잘 나타나는데, 연구기간 내에 실제로 2차 피크가 나타나는 시점의 풍속은 그렇지 않은 날 보다 상대적으로 강하게 나타나고, NO₂ 농도는 낮게 나타난다(Figs. 9(a)와 9(d), 10(a)와 10(d), 11(a)와 11(d)).

대구와 부산지역에서 태풍영향 기간을 제외한 연구기간 동안 야간의 O₃ 2차 피크가 반복적으로 나타나는 점으로 미루어보면, 이는 바람의 영향과 더불어 대전지역과 구별되는 대상지역의 고유한 특징에 의한 것으로 추정할 수 있다. 따라서 대구와 부산지역에서 야간의 O₃ 2차 피크가 비교적 뚜렷하게 나타난 날을 태풍영향 전·후 시기에서 하루씩 선정하여 지형과 수평 바람장, O₃ 농도 값을 표출해 보았다(Fig. 13). 대구는 분지 지형으로, 야간에 높은 지형에서 바람이 불어 나오는 부분과 바람이 수렴하는 부분의 O₃ 농도가 높게 나타났다(Figs. 13(a)와 13(b)). 부산은 연안에 남북으로 길게 형성된 높은 지형이 있고 야간에 육풍이 나타나고 있으며, 높은 지형으로부터 바람이 불어 나오는 방향에 있는 지점들과, 두 지형 사이에 있어 O₃이 축적되기에 용이한 지점들의 O₃ 농도가 높게 나타났다(Figs. 13(c)와 13(d)). 이로부터 대구와 부산지역에서 나타난 야간의 O₃ 2차 피

크는 지형적인 영향으로 국지적인 풍계인 산풍이 발달하여 그 전날 계곡 위쪽에 잔류하고 있던 O_3 이 계곡 아래쪽으로 이동하거나, 지형에 의한 바람 수렴으로 인해 O_3 이 축적되었기 때문인 것으로 보인다(송상근 등, 2009). 태풍영향 시기에는 이러한 야간의 O_3 2차 피크가 나타나지 않는데, 이는 태풍영향 시기에는 강한 중관장이 국지순환계의 발달을 저지하기 때문인 것으로 사료된다.

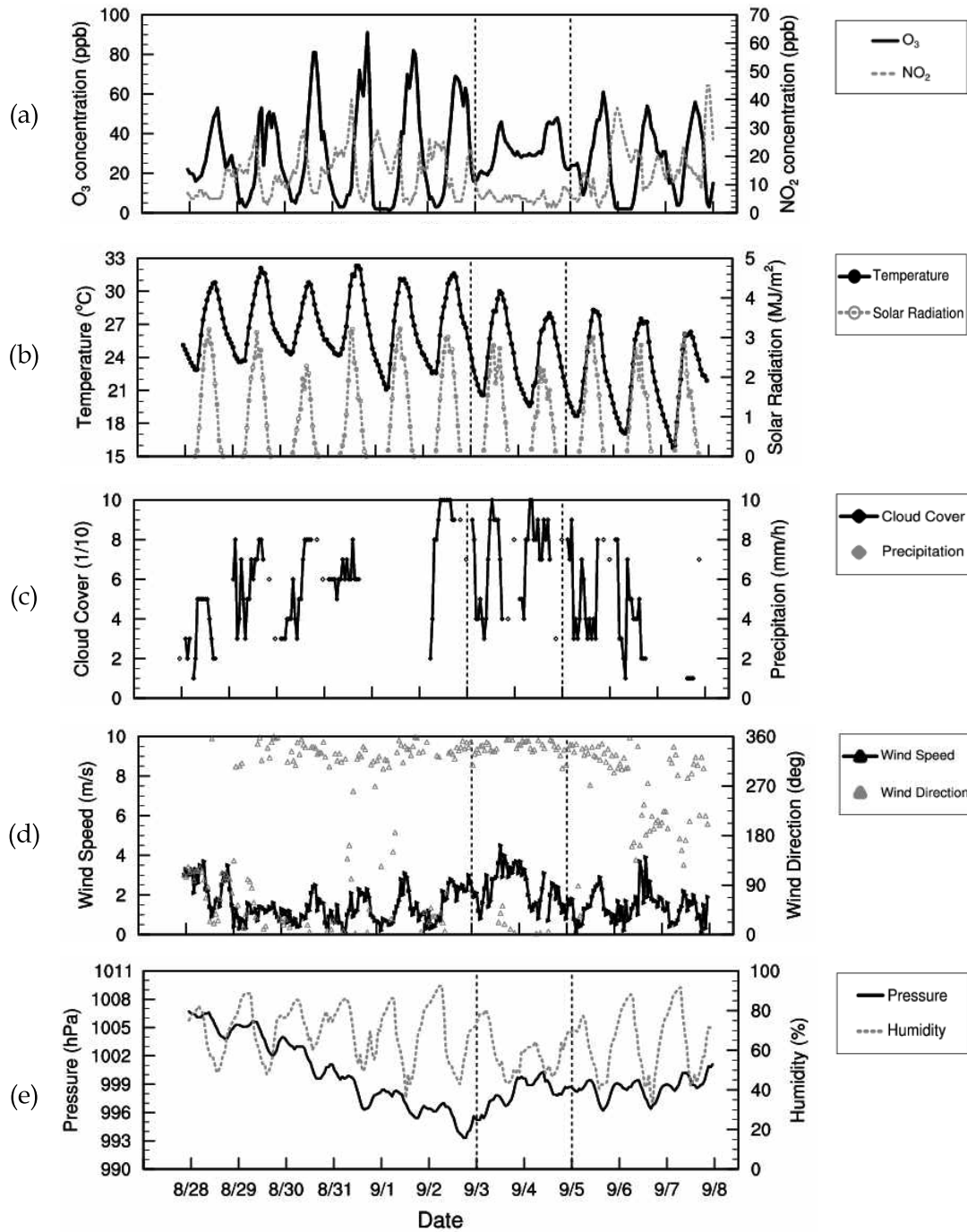


Fig. 9. Time series of (a) hourly average O_3 and NO_2 concentration, (b) temperature and solar radiation, (c) cloud cover and precipitation, (d) wind speed and direction, and (e) pressure and relative humidity at the representative site in Daejeon before, during, and after typhoon Talas (1112). The vertical dash lines on the figure divide the periods before, during, and after the typhoon.

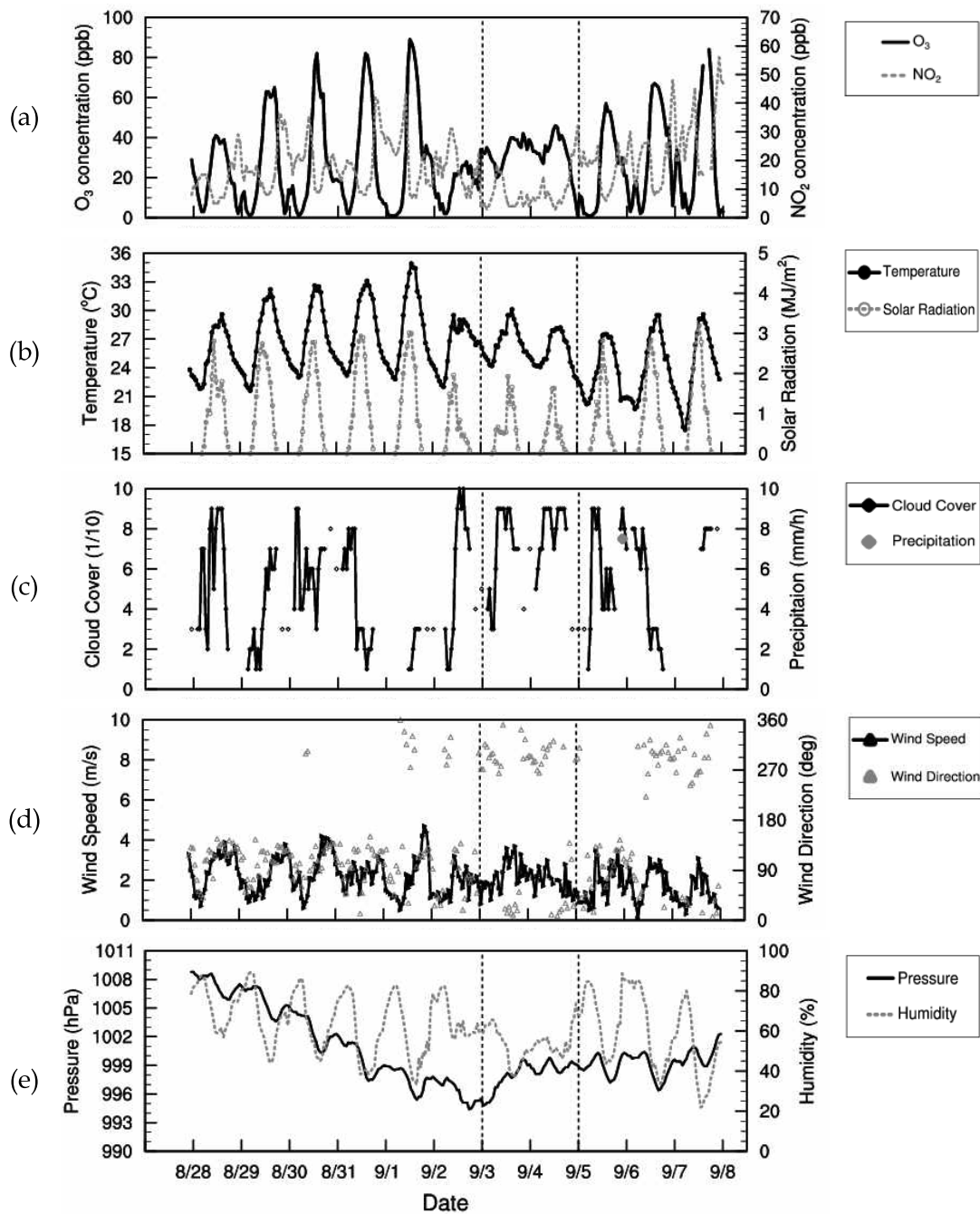


Fig. 10. Time series of (a) hourly average O_3 and NO_2 concentration, (b) temperature and solar radiation, (c) cloud cover and precipitation, (d) wind speed and direction, and (e) pressure and relative humidity at the representative site in Daegu before, during, and after typhoon Talas (1112). The vertical dash lines on the figure divide the periods before, during, and after the typhoon.

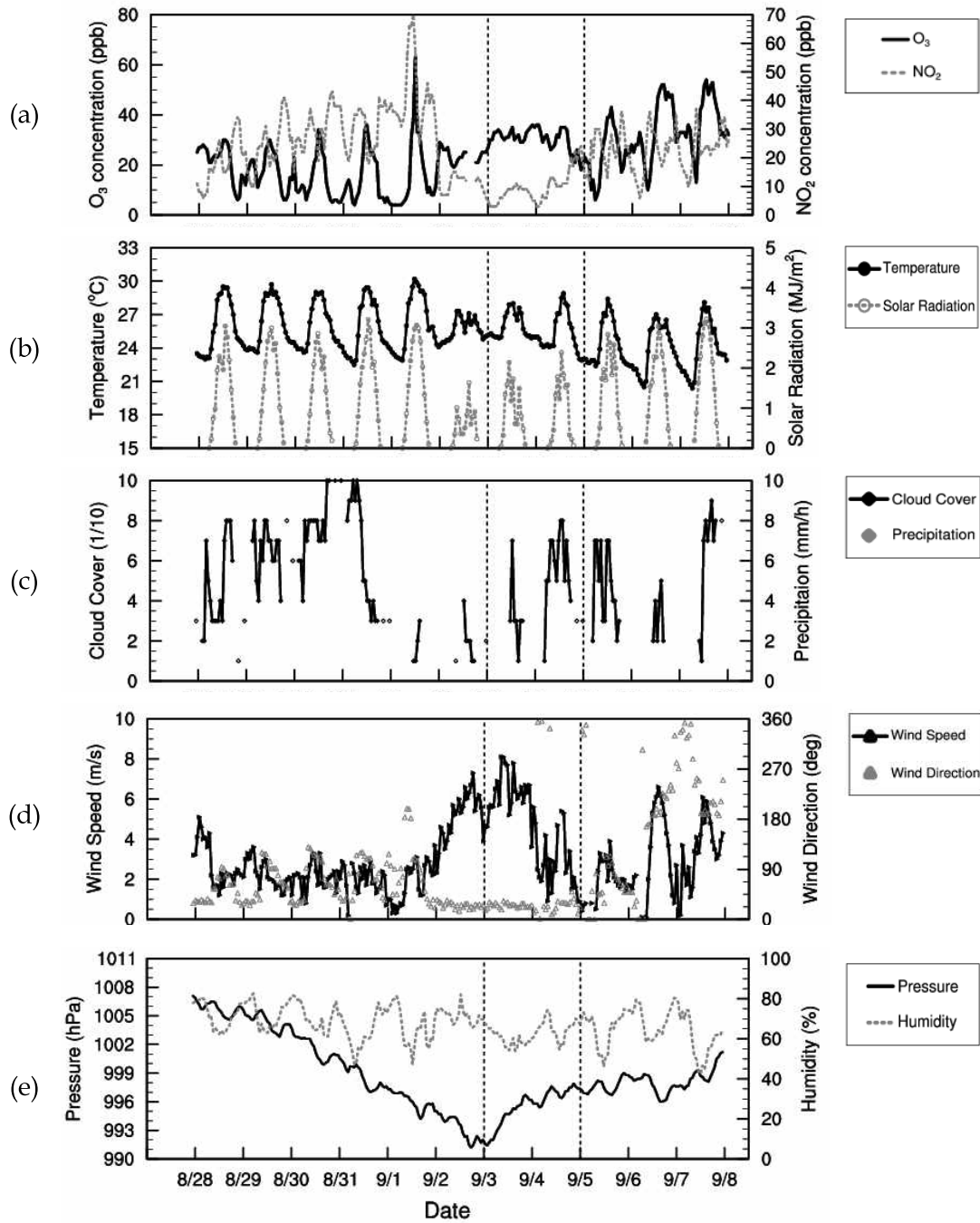


Fig. 11. Time series of (a) hourly average O_3 and NO_2 concentration, (b) temperature and solar radiation, (c) cloud cover and precipitation, (d) wind speed and direction, and (e) pressure and relative humidity at the representative site in Busan before, during, and after typhoon Talas (1112). The vertical dash lines on the figure divide the periods before, during, and after the typhoon.

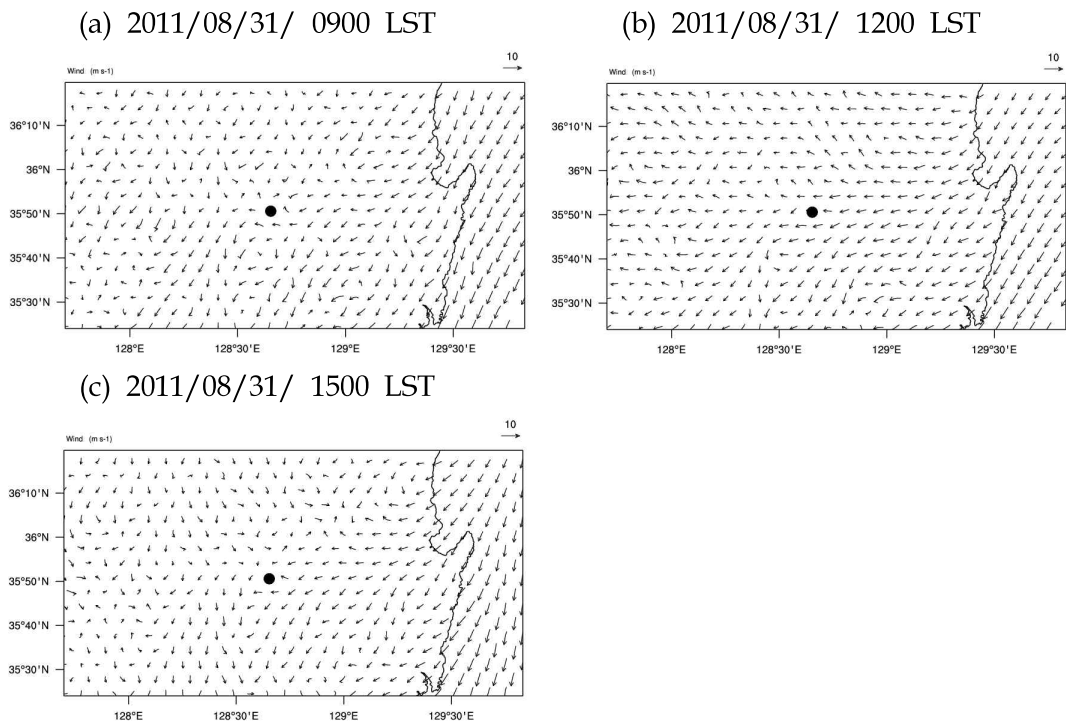


Fig. 12. Simulated wind vectors at 10 m above ground on 31 Aug 2011. The dot indicates the representative site in Daegu.

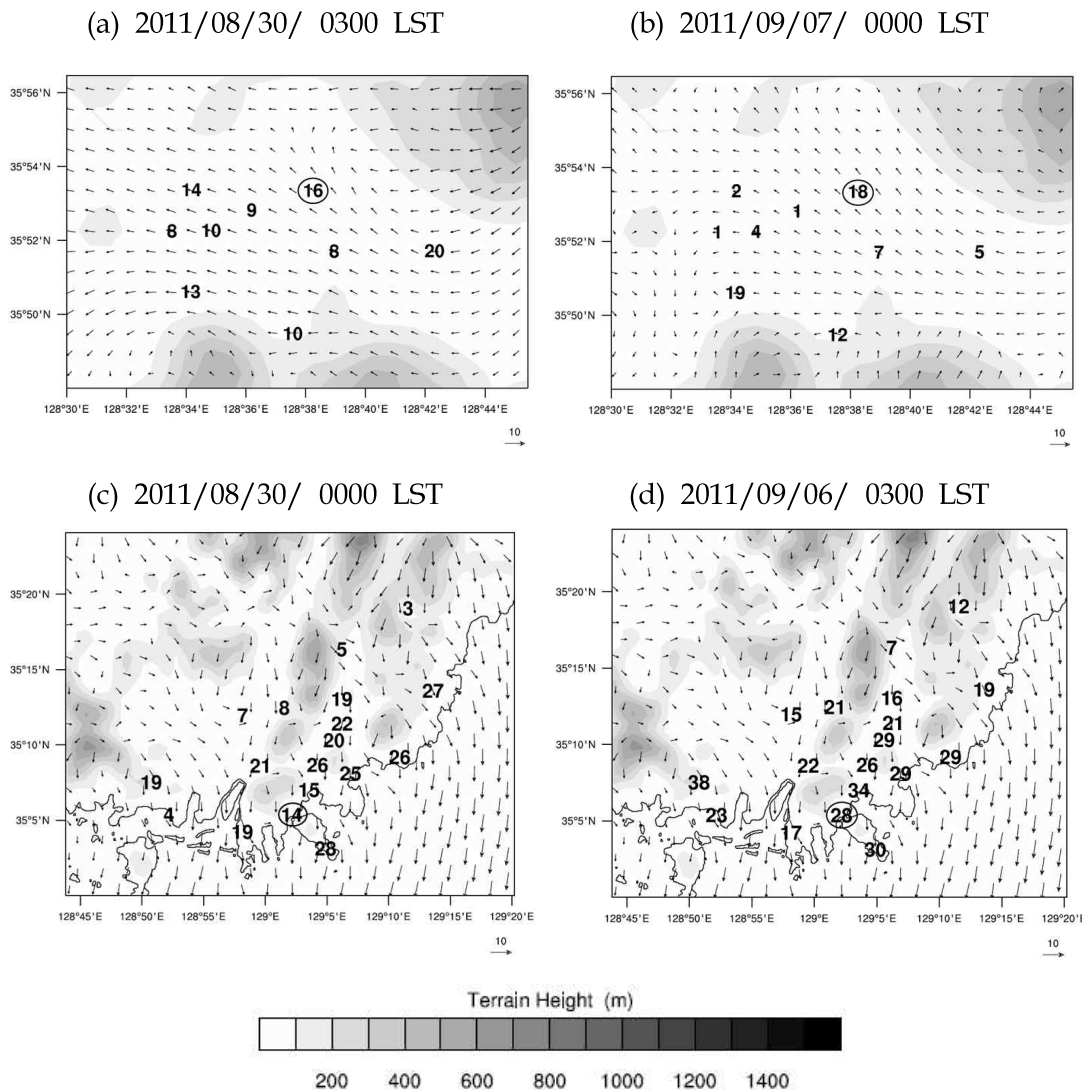


Fig. 13. Distribution of horizontal wind vectors at (a) 03 LST on 30 Aug and at (b) 00 LST on 7 Sep in Daegu and at (c) 00 LST on 30 Aug and at (d) 03 LST on 6 Sep in Busan. The numbers on the map are O₃ concentrations (ppb) at monitoring sites. The circle indicates the representative site in Daegu and Busan region.

3.4. 연구사례일의 기상요소와 O₃, NO₂와의 상관성

Fig. 14는 태풍영향 전·중·후 시기에 O₃ 농도가 NO₂ 농도 및 기상변수와 갖는 상관관계를 나타낸다. 전체적으로 태풍영향 전·중·후 시기에 O₃ 농도와 NO₂ 농도는 반비례 관계를, O₃ 농도와 기온은 정비례 관계를, O₃ 농도와 상대습도는 반비례 관계를 갖는다. 이는 Figs. 9(a)(b)(e), 10(a)(b)(e), 11(a)(b)(e)에서 나타난 특징과도 일치한다.

O₃ 농도가 NO₂ 농도와 갖는 상관도는 태풍영향 시기에 가장 높게($r^2=0.48$) 나타났다. 이는 광화학 반응에 유리한 조건에서는 NO₂ 농도가 O₃ 농도에 미치는 영향이 조건적이지만, 광화학 반응에 불리한 조건을 가진 태풍영향 시기에는 앞서 언급한 것처럼 낮은 상대습도(Figs. 9(e), 10(e), 11(e))에 의한 O₃의 소멸량 감소과 더불어 낮은 NO_x 조건(Figs. 9(a), 10(a), 11(a))에 의한 O₃의 생성이 O₃ 농도에 결정적인 영향을 미치기 때문인 것으로 사료된다. O₃ 농도가 기온과 갖는 상관도는 고농도 O₃이 나타났던 태풍영향 전 시기에 가장 높게($r^2=0.69$) 나타났으며, 태풍영향 시기에 가장 낮게($r^2=0.37$) 나타났다. 이는 널리 알려져 있듯이 기온이 광화학 O₃ 생성에 영향을 미치는 가장 중요한 기상인자 중 하나임을 입증한다.

O₃ 농도가 상대습도와 갖는 역상관은 대기 중의 수증기가 들뜬상태의 산소원자(O(¹D))와 반응하여 OH를 만듦으로써 O₃의 소멸과정에 기여하는 것으로 풀이될 수 있다(손장호 등, 2010; 송상근 등, 2010). O₃ 농도가 상대습도와 갖는 상관도는 태풍영향 전·중·후 시기에 걸쳐 유사하지만, 태풍영향 전·중·후 시기를 지나면서 조금씩 높아져 태풍영향 후 시기에 가장 높은 역상관을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 태풍영향 전 시기에 O₃ 농도가 상대습도와 갖는 상관도($r^2=0.44$)는 NO₂ 농도와의 상관도($r^2=0.24$) 보다 높게 나타나, 기온만큼 결정적이지는 않지만 태풍영향 전 시기에 상대습도가 O₃ 농도에 미치는 영향이 비교적 큰 편이라는 것을 알 수 있다. 또한 태풍영향 시기에 O₃ 농도가 상대습도와 갖는 상관도($r^2=0.49$)는 NO₂ 농도와 갖는 상관도($r^2=0.48$)와 유사하고 기온과 갖는 상관도($r^2=0.37$)보다 높게 나타났다. 따라서 태풍영향 시기에 상대습도는 NO₂와 함께

O₃ 농도와 높은 상관성을 갖는 인자로서 O₃ 농도에 중요한 역할을 하는 것으로 사료된다. 이는 광화학 반응에 불리한 조건인 태풍영향 시기에는 낮은 상대습도에 의한 O₃의 소멸량 감소가 O₃ 농도에 큰 영향을 미치기 때문이라고 여겨진다. 나아가 태풍영향 후 시기에도 상대습도(대기 중의 수증기)는 O₃의 소멸과정에 기여하는 방식으로 O₃ 농도에 중요한 역할을 하는 것으로 사료된다. 표본개수에 따른 최소 상관계수에 의하면, O₃ 농도와 기상요소와의 상관관계의 신뢰수준은 태풍영향 전·중·후 시기 모두에서 일사량을 제외한 인자들에 대해 99% 유의하게 나타났다. 반면 NO₂ 농도와 기상인자들 간의 상관관계는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다.

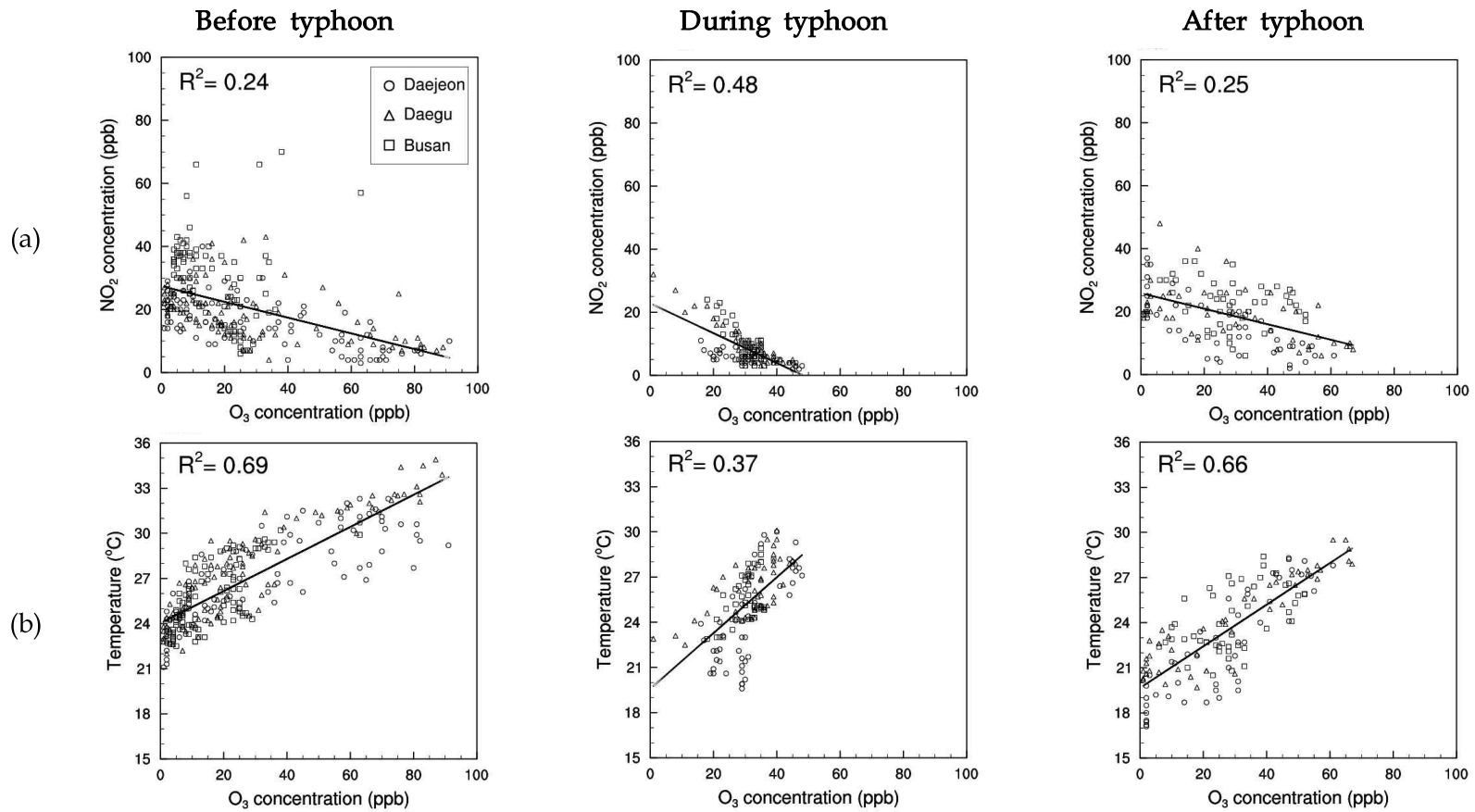


Fig. 14. Correlation between O₃ and (a) NO₂, (b) temperature, (c) solar radiation, and (d) relative humidity before, during, and after typhoon Talas (1112). The circle, triangle, and square represent the value of Daejeon, Daegu, and Busan, respectively.

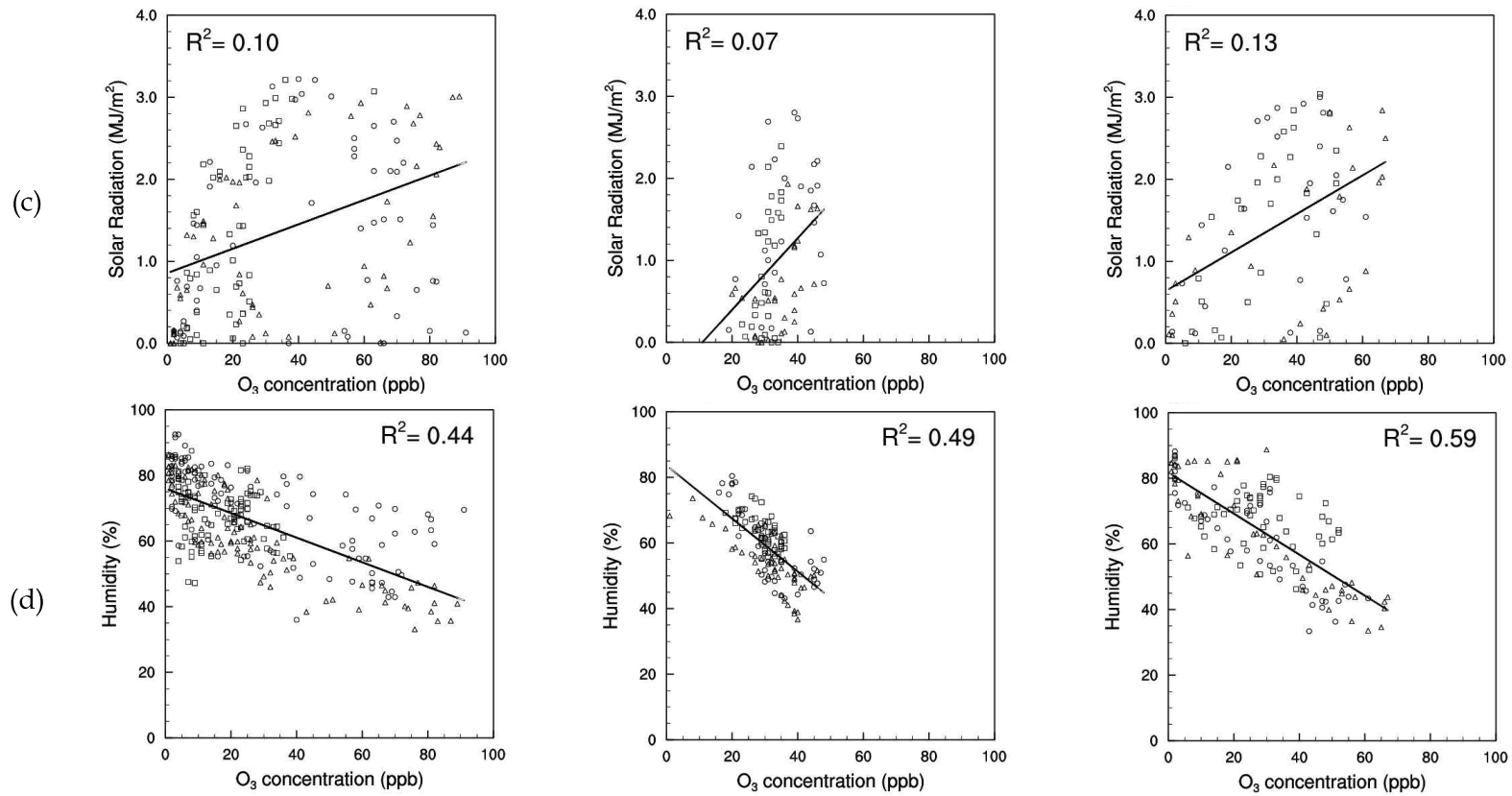


Fig. 14. Continued.

3.5. 연구사례일의 기상특성이 O₃과 NO_x에 미치는 영향 수치모의

O₃ 농도와 관련한 분석은 관측값으로 하는 것이 가장 정확하나, 관측값의 공간 분포가 조밀하지 않고 관측되지 않는 물질들도 존재하므로 수치모의 결과를 이용하여 현상을 이해하고자 한다. 먼저 대기질 수치모의에 영향을 주는 O₃의 주요 전구물질인 VOCs와 NO_x의 대구지역 배출량 수평분포를 Fig. 15에 나타내었다. 대기질모델의 입력자료로 사용하기 위해 자체적으로 처리한 배출량은 CAPSS 자료(kg/year)에 통계적으로 산출된 계수를 곱하여 생산하였으므로, 이어지는 며칠에 대해서는 배출량이 유사한 수준이다. 따라서 Fig. 15에는 태풍영향 전 시기를 대표하는 날인 9월 1일의 하루 배출량을 표출하였다.

주요 배출원이 있는 산업지역, 도심지, 주거지역에서 전구물질의 배출이 많으며(Figs. 3, 15), 특히 VOCs는 산업지역이 있는 곳(구미의 동쪽, 대구 도심의 서쪽,과 남서쪽; Figs. 3, 15(a))에서 배출이 많이 되는 것으로 나타난다. NO_x는 VOCs와 유사한 공간분포를 보이지만 고농도 배출원의 위치가 VOCs와 다소 차이가 있다. 이러한 배출원의 위치에 따른 농도분포 특징과 더불어 대구지역의 지형적 특성(분지지형)은 국지적으로 배출된 오염물질이 대구지역 밖으로 활발히 수송되지 못하게 하고, 외부에서 배출된 오염물질의 유입을 어렵게 하여 대구지역의 도시규모 광화학 오염에 기여하는 것으로 사료된다.

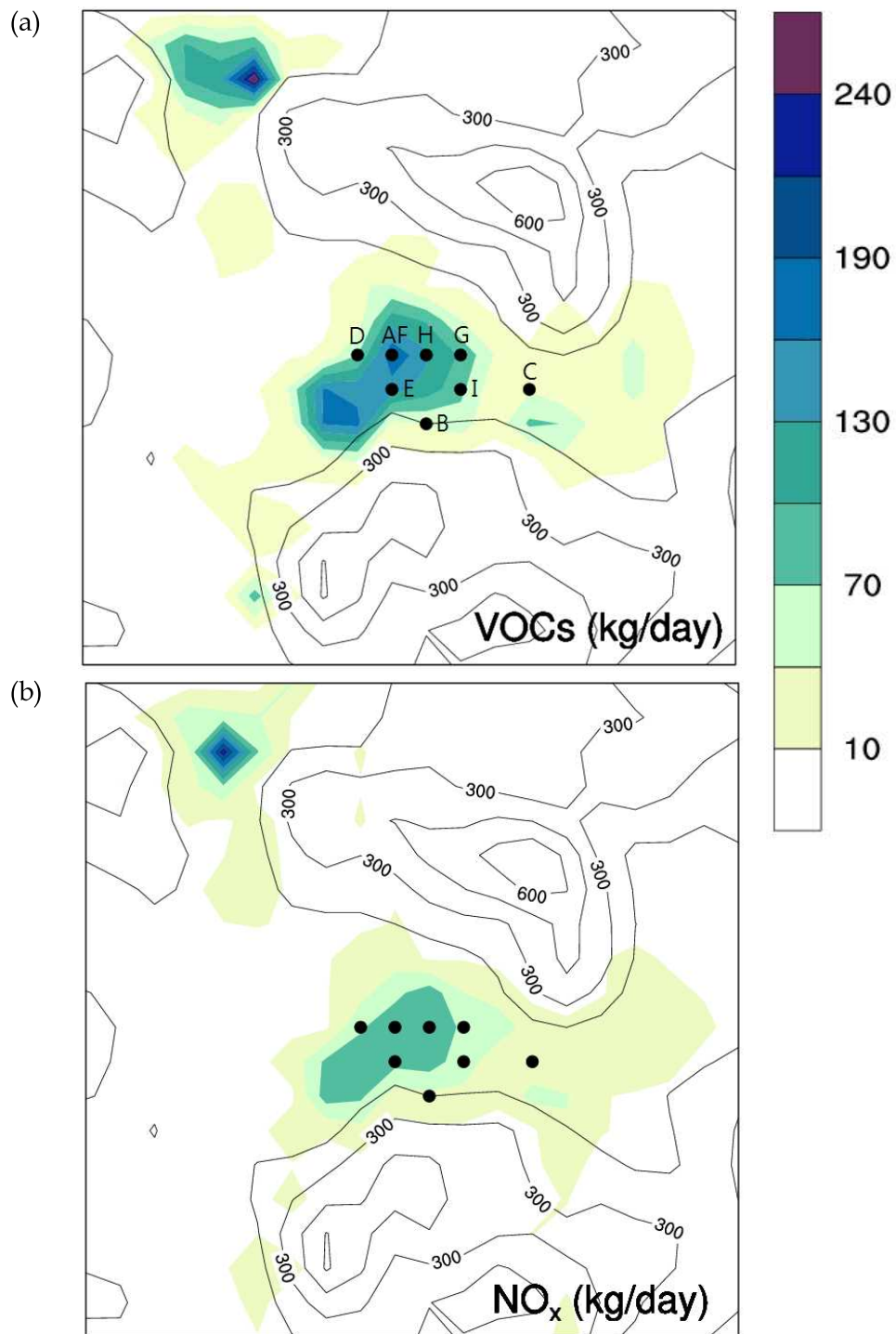


Fig. 15. Spatial distribution of emissions in the study domain on 1 september : (a) VOCs and (b) NO_x in kg/day. The dots indicate the locations of the monitoring sites in Daegu.

Fig. 16은 태풍영향 전·중·후 시기를 대표하는 날의 오전, 낮, 저녁, 밤(9, 14, 19, 24시(LST))에 대한 O₃ 농도의 수평분포와 바람장을 지형과 함께 표출한 것이다. 그리고 Fig. 17은 같은 시점에 대한 NO_x 농도의 수평분포를 지형과 함께 나타낸 것이다. O₃의 일변화 경향은 대구의 도시지역을 중심으로 오전에 농도가 증가하여 낮에 가장 농도가 높고, 저녁과 밤에 다시 농도가 감소하는 형태로 나타난다. 그리고 태풍영향 시기에는 상대적으로 O₃ 농도가 높게 나타나고, 태풍영향 전·후 시기보다 저녁과 밤의 O₃ 농도가 높아 하루 중 농도의 증감이 작은 특징이 나타난다.

오전의 O₃ 농도는 야간에 감소했던 O₃ 농도가 일사의 시작과 함께 다시 증가하는 과정의 일환으로, 야간에 농도분포 패턴이 남아있는 것으로 사료된다. Fig. 17의 같은 시점에 NO_x 농도가 높은 부분은 O₃ 농도 분포에서 농도가 낮은 부분과 일치하며, 이는 마찬가지로 일사가 시작됨으로써 광화학 반응에 NO_x가 소모되어 농도가 감소되는 과정의 일환으로, 야간의 농도분포 패턴이 남아있는 것으로 여겨진다. 하루 중 O₃ 농도가 가장 높게 나타나는 낮에는 풍하측, 즉 태풍영향 전 시기에 남쪽, 태풍영향 시기에 북서쪽, 태풍영향 후 시기에 남쪽과 남서쪽의 O₃ 농도가 높게 나타난다. 또한, O₃ 농도가 가장 높게 나타난 태풍영향 전 시기의 낮에는 대표지점 근처로 동풍과 북풍이 수렴하는데, 이는 바람의 수렴이 O₃ 농도 증가에 기여했을 가능성을 보여준다.

저녁과 밤의 O₃ 농도 감소는 대구지역 중에서도 주로 인구와 산업이 밀집한 도시지역과 서쪽에 강이 흐르는 골짜기를 중심으로 이루어짐을 확인할 수 있다. 바람에 의한 수송과 확산이 원인으로 추정되는 골짜기의 농도 감소는 북풍 기류가 우세한 경우에 활발하다(Fig. 16의 태풍영향 전 시기 19시와 24시, 태풍영향 시기 24시). 그리고 NO_x의 적정효과가 원인으로 추정되는 도시지역의 농도 감소는 바람이 수렴하는 곳 혹은 풍하측에서 NO_x 농도가 높게 나타나는 시간에 활발하다(Fig. 16의 태풍영향 전 19시, 태풍영향 후 19시와 24시). 저녁의 O₃ 농도 감소 또한 같은 시점에 해당하는 NO_x 농도 분포와 반대로 매치된다(Figs. 16~17). 이렇듯 O₃ 농도는 지형, 기류의 방향과 풍속, 인구와 산업 밀집지역의 오염물질 배출 등에 영향을 받으며, 또한 NO_x와의 상호작용을 통해 조절됨을 알 수 있다.

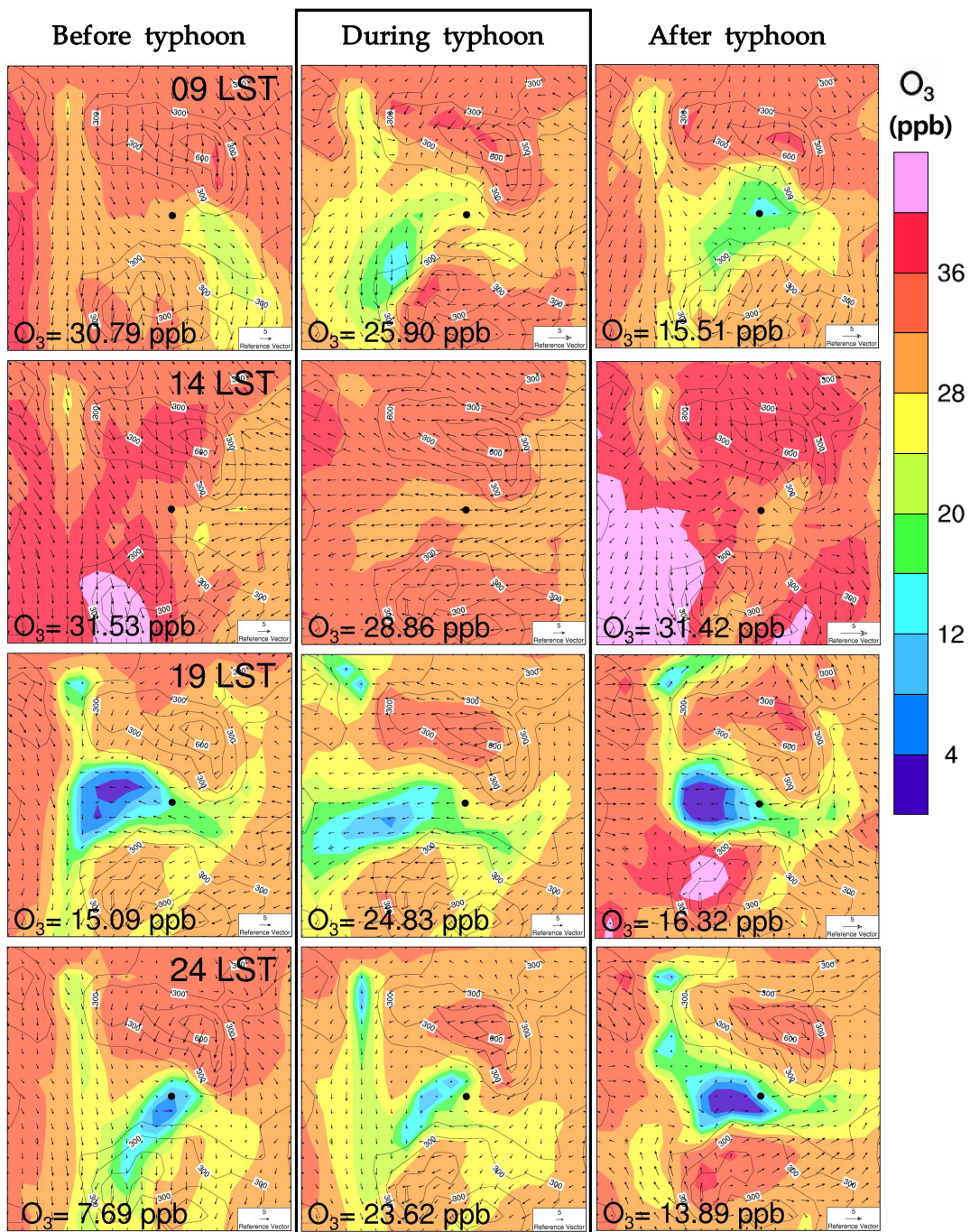


Fig. 16. Spatial distribution of O_3 concentration (ppb) and wind vectors at 10 m above ground with terrain height simulated by model before, during, and after typhoon Talas (1112). The value of O_3 concentration at left bottom on the figure is those of the representative site. Contour from 150 m to 600 m by 150 m.

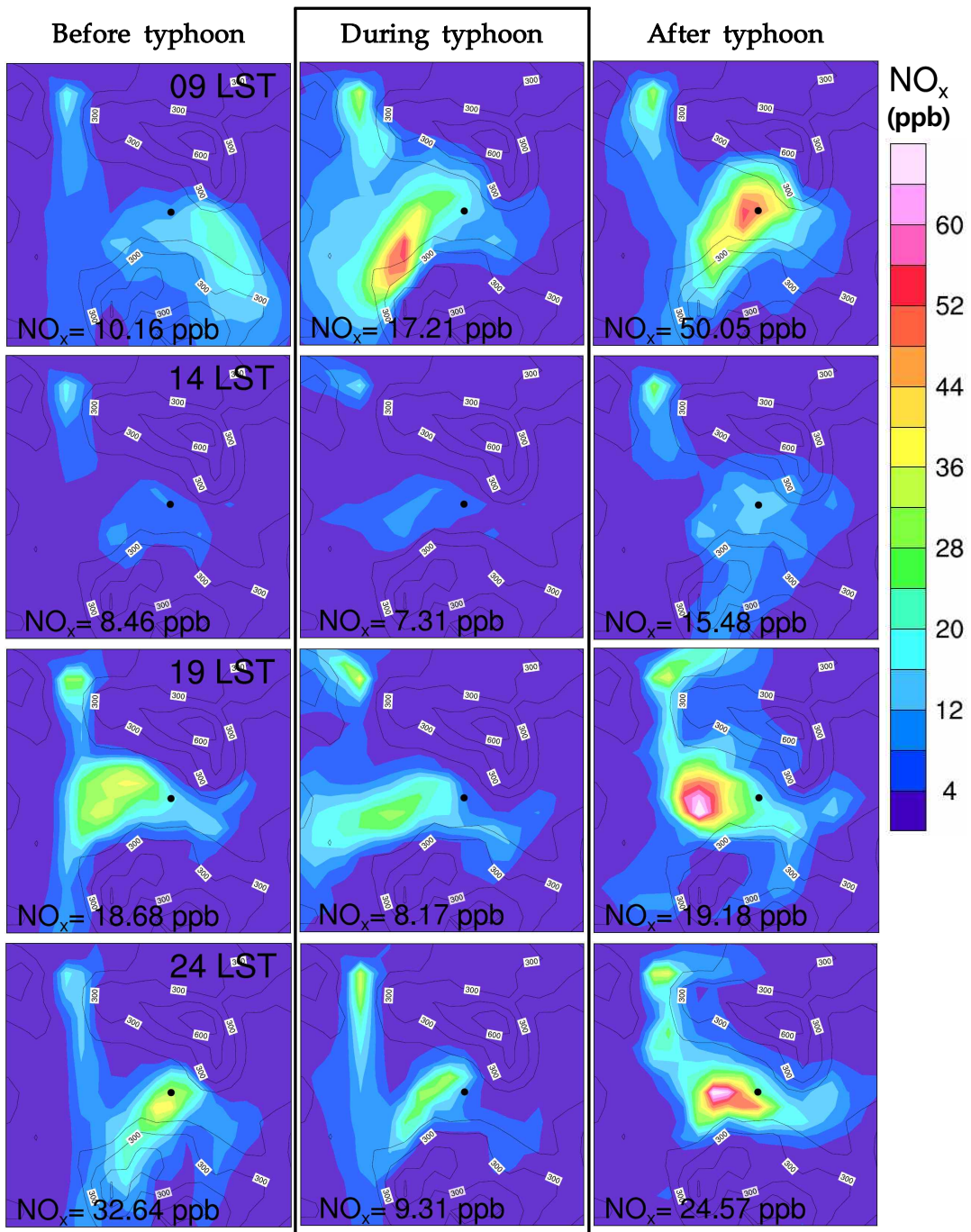


Fig. 17. Spatial distribution of NO_x concentration (ppb) with terrain height simulated by model before, during and after typhoon Talas (1112). The value of NO_x concentration at left bottom on the figure is those of the representative site. Contour from 150 m to 600 m by 150 m.

대기질모델 CMAQ의 수행 검증을 위해 태풍영향 전·중·후 시기에 대구지역의 O₃과 NO₂ 농도에 대한 관측값과 모델 모의값을 비교하였다. 충분한 자료가 확보된 대구지역 내 대기질 측정소 9곳에 대하여 평가를 실시하였으며, Fig. 3에 나타난 측정소 중에서 대표지점으로 선택된 측정소는 G 지점이다.

전반적으로 O₃의 모델값은 증가하고 감소하는 변화양상이 관측값과 비슷하였으며, 야간에 O₃의 2차 피크도 표현되고 있다. 또한 B, C, D, G, I 지점에서는 관측에서와 마찬가지로 태풍영향 시기에 상대적으로 농도가 높고 하루 중 농도 증감이 작은 특징도 나타나고 있다. 그러나 대체로 과소모의 경향이 나타나며, 특히 모델이 모의한 태풍영향 전 시기의 O₃ 농도는 모든 지점에 대해서 관측값에 훨씬 미치지 못하였다(Fig. 18). 9월 1일에 대구지역 O₃ 농도를 과소모의 한 것은 대기질모델의 상대적으로 성긴 수평 해상도(3 km)와, 기상모델이 기온을 과소모의 하고 풍속을 과대모의 한 것이 주요 원인인 것으로 판단된다(Fig. 8(b)). 한편, NO₂ 농도는 야간에 과대모의 경향이 나타나고, 주간에 과소모의 경향이 나타난다. 각 지점별로 편차가 큰 편이지만, 주간의 과소모의 정도보다 야간의 과대모의 정도가 더 크다(Fig. 19).

수치모의 결과의 신뢰성 평가를 위해 태풍영향 전·중·후 시기의 O₃과 NO₂ 농도에 대한 통계 검증(IOA, MB, RMSE)을 실시하였다(Table 5). O₃의 IOA는 평균적으로 (최대/최소) 태풍영향 전·중·후 시기에 0.58 (0.65/0.53), 0.58 (0.66/0.46), 0.68 (0.82/0.62)로 나타나, 태풍영향 전과 태풍영향 시기는 유사한 일치도를 보이고 태풍영향 후 시기에 가장 높은 일치도를 보였다. MB는 태풍영향 전·중·후 시기에 대체로 음의 값을 가져 모델의 과소모의 경향을 나타내고 있다. RMSE는 태풍영향 전·중·후 시기에 각각 20.7, 13.3, 19.2 ppb로 나타나 태풍영향 시기에 오차가 가장 작게 나타났다. 지점 중에서는 I 지점이 일치도가 가장 높고 오차가 가장 작아서, 신뢰도가 가장 높았다. NO₂의 IOA는 평균적으로 (최대/최소) 태풍영향 전·중·후 시기에 0.48 (0.60/0.39), 0.65 (0.81/0.47), 0.68 (0.77/0.61)로 나타나, 태풍영향 전 시기의 일치도가 가장 낮고, 태풍영향 시기와 태풍영향 후 시기는 유사한 일치도를 보였다. RMSE는 태풍영향 전·중·후 시기에 각각 13.3, 11.4, 12.5 ppb로 나타나 태풍영향 전 시기의 오차가 가장 크고, 태풍영향 시기의 오차가 가장 작게 나타났다. 지점 중에서는 B 지점과 I 지점이 일치도가 대체로 가장

높고 오차가 가장 작아서, 신뢰도가 가장 높았다.

대표지점(G)의 일치도는 O₃의 경우에 태풍영향 전·후 시기(0.60, 0.69)에 상대적으로 높은 편이었지만, 태풍영향 시기(0.53)에는 상대적으로 낮은 편이었다. 그리고 평균오차는 태풍영향 시기(14.45 ppb)에 가장 작게 나타났다. NO₂의 경우에는 일치도가 태풍영향 시기와 태풍영향 후 시기에는 평균값(0.65, 0.68)과 같았고, 태풍영향 전 시기(0.39)에는 평균(0.48) 보다 낮았다. 그리고 평균오차는 태풍영향 시기에 가장 작게 나타났다.

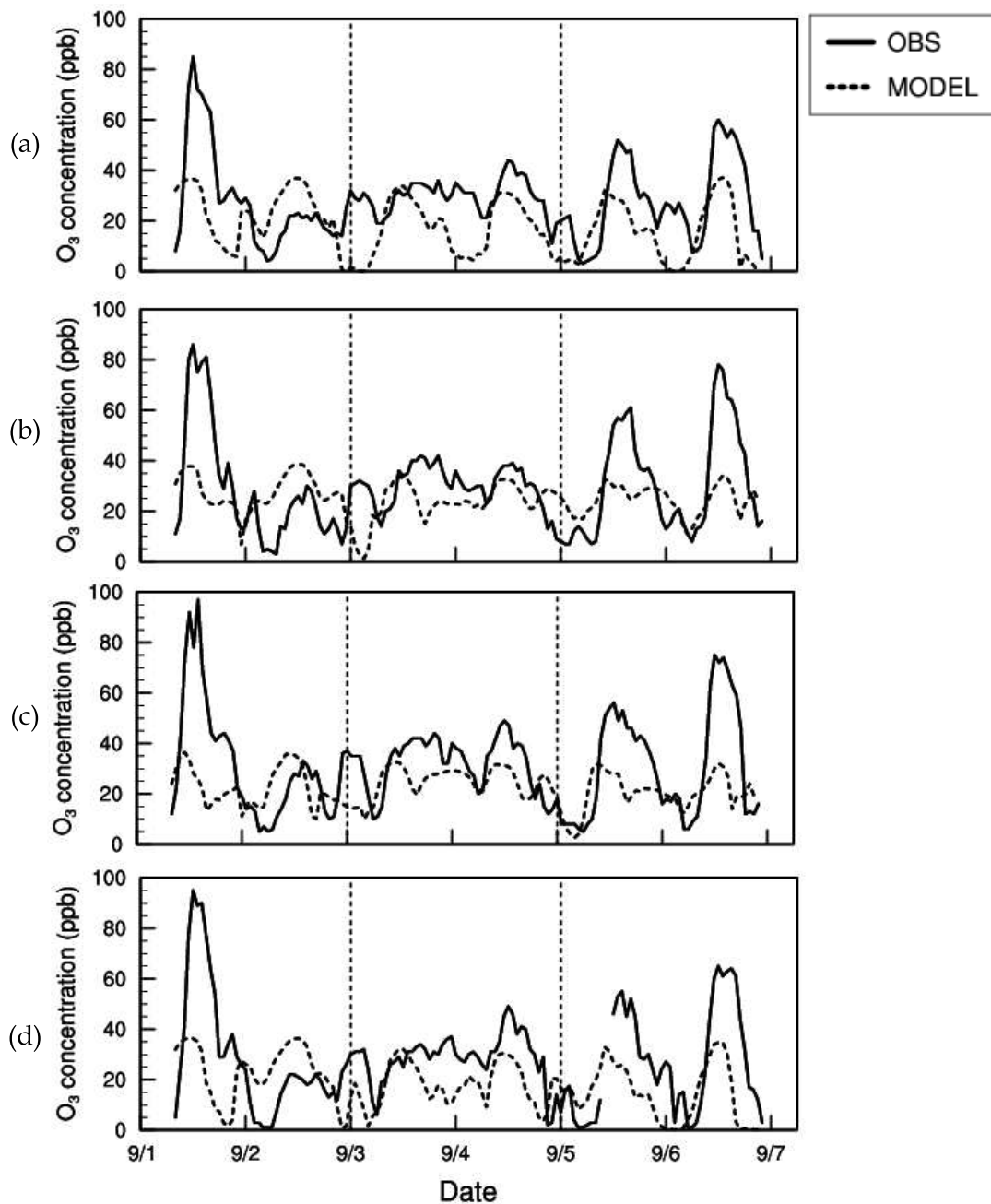


Fig. 18. Hourly time series (at Local Standard Time) of observation and CMAQ-simulated value for O₃ at several monitoring sites in Daegu before, during, and after typhoon Talas (1112). The (a) ~ (i) of this figure correspond to the capital alphabets representing location of monitoring sites on the map of Fig. 3. The representative site is G.

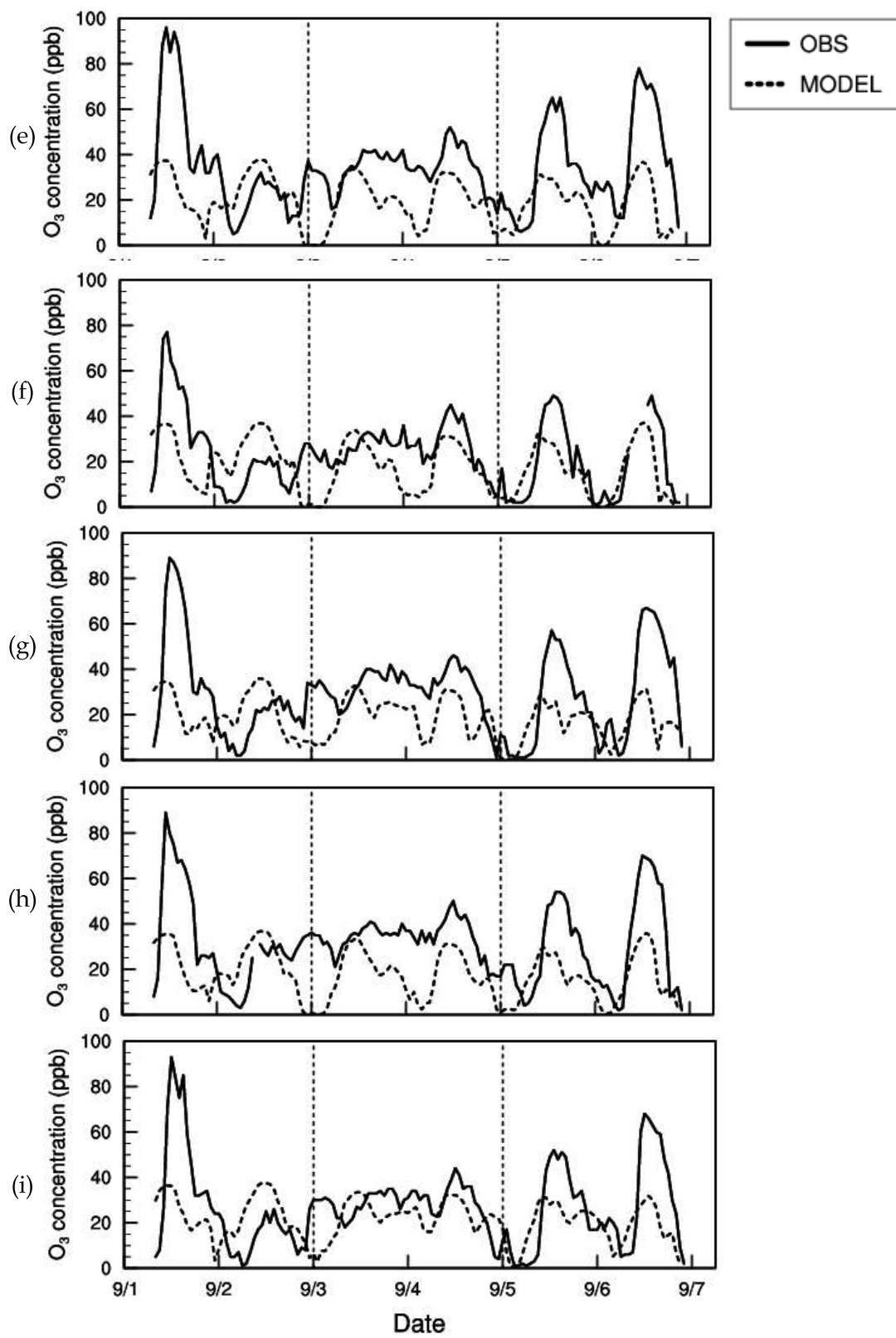


Fig. 18. Continued.

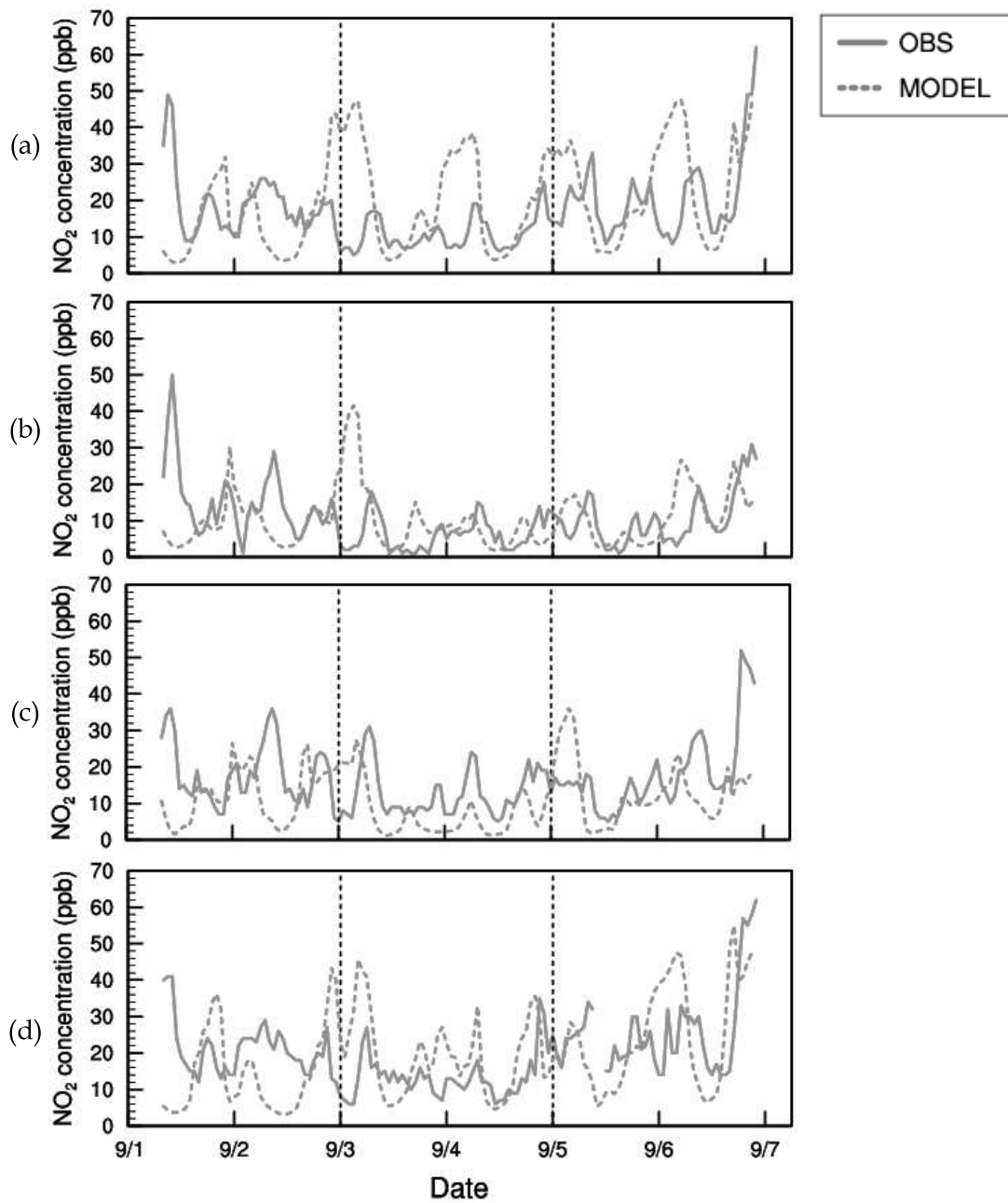


Fig. 19. Hourly time series (at Local Standard Time) of observation and CMAQ-simulated value for NO₂ at several monitoring sites in Daegu before, during, and after typhoon Talas (1112). The (a) ~ (i) of this figure correspond to the capital alphabets representing location of monitoring sites on the map of Fig. 3. The representative site is G.

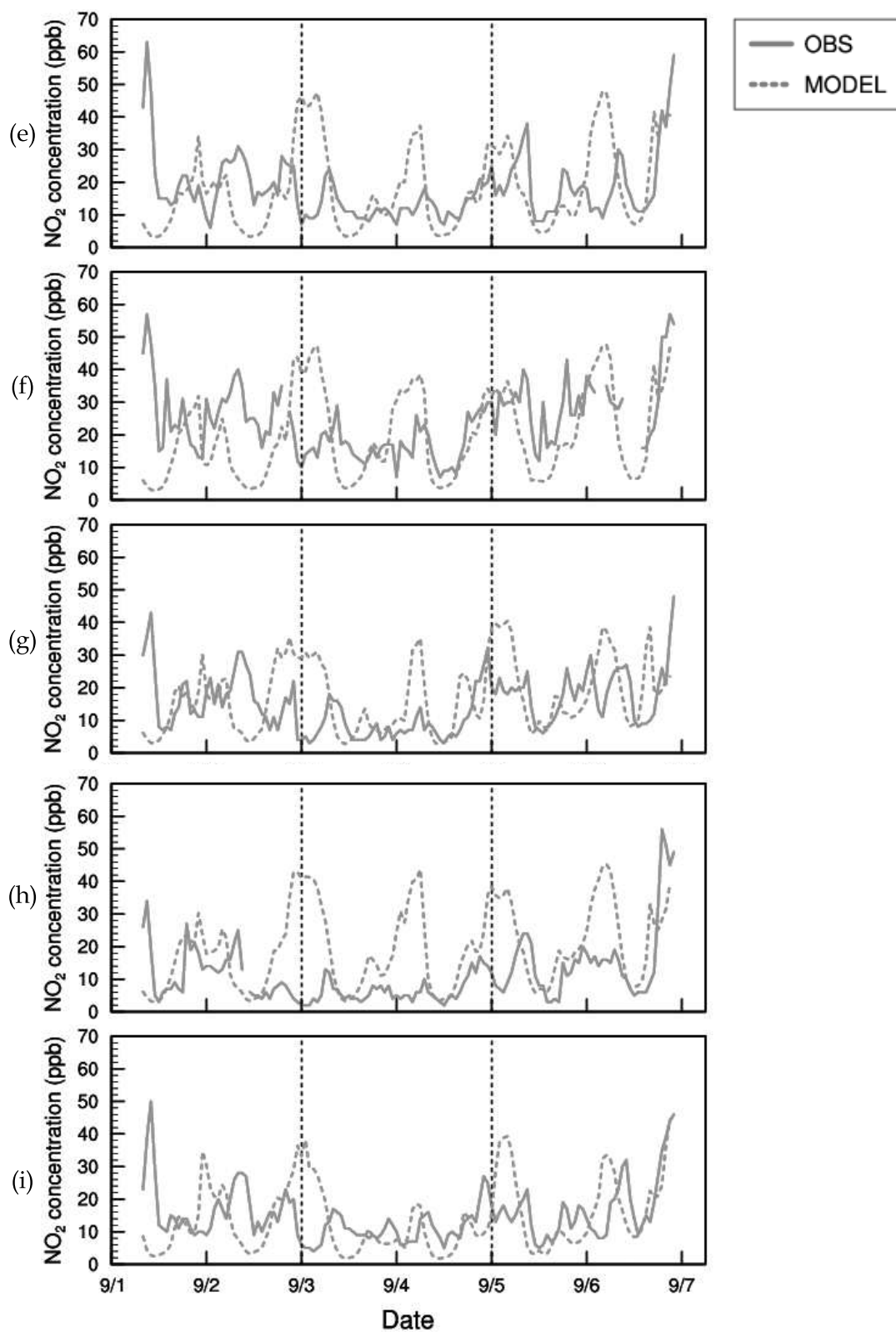


Fig. 19. Continued.

Table 5. Statistical evaluation of O₃ and NO₂ concentration between observations and model-simulated values at several monitoring sites in Daegu before, during, and after typhoon Talas (1112). (simulation period: 09 LST 1 September ~ 00 LST 7 September)

O₃ concentration									
Site	IOA			MB (ppb)			RMSE (ppb)		
	Before typhoon	During typhoon	After typhoon	Before typhoon	During typhoon	After typhoon	Before typhoon	During typhoon	After typhoon
A	0.58	0.46	0.64	-2.88	-12.18	-13.14	19.21	15.34	19.07
B*	0.57	0.65	0.65	2.13	-4.07	-4.90	19.45	9.53	16.87
C	0.63	0.65	0.64	-5.61	-6.26	-10.48	19.88	11.15	20.51
D	0.57	0.64	0.68	-1.7	-9.06	-11.79	22.47	12.68	20.45
E	0.57	0.54	0.62	-7.88	-14.93	-18.07	23.47	17.46	24.07
F	0.53	0.61	0.82	0.28	-8.46	-5.21	19.46	12.24	13.11
G	0.60	0.53	0.69	-4.05	-10.92	-11.60	21.04	14.45	20.85
H	0.54	0.46	0.70	-8.05	-15.66	-14.35	22.35	17.64	20.93
I*	0.65	0.66	0.71	0.98	-4.74	-7.11	19.02	9.08	16.88
total	0.58	0.58	0.68	-2.98	-9.59	-10.74	20.71	13.29	19.19

NO₂ concentration									
Site	IOA			MB (ppb)			RMSE (ppb)		
	Before typhoon	During typhoon	After typhoon	Before typhoon	During typhoon	After typhoon	Before typhoon	During typhoon	After typhoon
A	0.51	0.56	0.61	-2.32	7.88	4.18	12.93	14.45	15.57
B*	0.54	0.72	0.77	-4.26	1.72	0.01	10.37	8.06	6.63
C	0.42	0.81	0.63	-4.96	-4.43	-2.95	12.48	8.35	10.72
D	0.47	0.71	0.73	-4.26	4.40	0.38	14.15	9.91	13.95
E	0.51	0.59	0.63	-5.71	4.00	2.66	13.75	12.93	14.42
F	0.39	0.68	0.75	-10.60	3.07	-4.88	18.78	13.28	12.09
G	0.39	0.65	0.68	-0.21	4.37	1.97	13.78	10.91	11.34
H	0.60	0.47	0.64	2.20	10.58	8.13	11.40	15.46	16.05
I*	0.51	0.69	0.68	-1.86	-2.15	0.95	12.21	8.98	11.34
total	0.48	0.65	0.68	-3.55	3.27	1.16	13.32	11.37	12.46

* The bold faces represent the three highest IOA and the three lowest RMSE.

관측과 수치모의 결과에서 동일하게 나타나는 태풍영향 시기의 O_3 농도 특징 (Figs. 10(a), 16, 18) - 태풍영향 시기 주간에 광화학 반응이 불리한 조건임에도 불구하고 상대적으로 O_3 농도가 높게 나타나고, 태풍영향 전·후 시기보다 저녁과 밤의 O_3 농도가 높아 하루 중 농도의 증감이 작은 특징 - 을 대기화학적 관점에서 O_3 의 생성과 소멸을 고려하여 설명하고자 한다. 대기질모델의 결과는 입력자료 중 하나인 기상장이 갖는 오차를 비롯하여 또 다른 입력자료인 배출량이 갖는 오차와 대기질모델 자체가 갖는 오차 등을 포함하고 있다. 따라서 수치모의 결과가 실제의 대기현상과 어느 정도 오차를 가진다는 전제 하에, 앞서 확인한 대기질모델의 신뢰도를 고려하여 연구사례일의 기상특성이 대기질에 미치는 영향을 분석하였다. 지시종(Indicator species)을 이용한 분석 방법(Sillman, 1995)은 주로 관측 자료에 적용하지만, 분석에 필요한 관측자료의 부재를 이유로 수치모의 결과값에 대한 지시종 분석을 수행하였다.

대구지역의 O_3 의 생성과 소멸을 분석하기 위하여 태풍영향 전·중·후 시기에 대표지점(G)과 I 지점에 대한 O_3 관련 주요 지시종 농도와 각각의 비를 비교하였다 (Table 6). I 지점은 앞서 분석한 대기질모델 평가 결과에서 O_3 과 NO_2 모두에서 신뢰도가 높게 나타난 지점이다(Table 5).

두 지점에서 공통적으로 태풍영향 시기의 저녁 이후로 O_3 농도가 상대적으로 높게 나타나고, NO_x , NO , NO_2 농도는 상대적으로 낮게 나타난다. 그리고 O_3 과 HNO_3 농도 비는 태풍영향 시기 저녁 이후로 수치가 급격히 증가하였다. 전구물질인 NO_2 는 주변의 환경조건에 따라 광해리 되어 O_3 이 되기도 하고(2.3절의 식 R1~R3), OH 와 결합하여 HNO_3 이 되기도 한다(2.3절의 식 R14). 따라서 O_3 과 HNO_3 농도 비를 분석하여 전구물질 NO_2 가 어떤 반응에 소모되어 O_3 농도에 영향을 미쳤는지 파악하고자 하였다. O_3 과 HNO_3 의 농도 비의 값이 크다면 HNO_3 이 되는 종말반응보다 O_3 생성 반응에 NO_2 가 더 많이 소모되었고, O_3 과 HNO_3 농도 비의 값이 작다면 O_3 생성 반응보다 HNO_3 이 되는 종말반응에 NO_2 가 더 많이 소모되었음을 추정할 수 있다. Fig. 20은 O_3 과 HNO_3 농도 비의 수평분포이다. 태풍영향 시기에는 대구지역의 대표지역 주변에 낮 이후로 O_3 과 HNO_3 의 농도 비가 높게 나타나 O_3 생성 반응이 HNO_3 이 되는 종말반응보다 우세했음을 알 수 있다. O_3 생성 반응이 우세했던 것은 Table 6의 O_3 , NO_x , NO , NO_2 농도에서

나타나듯이 태풍영향 전·후 시기보다 낮은 NO_x 농도가 원인으로 여겨진다. NO_x 의 농도가 낮은 조건에서는 OH가 NO_2 와 결합하여 HNO_3 이 되는 반응(NO_x 의 종말반응)보다 OH가 VOCs와 결합하여 또 다른 NO_2 를 생성하는 반응이 우선적으로 이루어지므로 O_3 의 생성이 상대적으로 빠르게 이루어질 수 있다(Song et al., 2012). 또한 NO는 O_3 을 NO_2 와 O_2 로 분해하여 O_3 농도 감소에 기여하므로 (2.3절의 식 R3), 낮은 NO 농도는 O_3 의 분해를 제한했을 것이다. 따라서 태풍영향 시기에 상대적으로 높은 O_3 농도와 적은 농도 증감은 앞서 관측자료를 분석하여 추정된 것처럼 NO_x 농도가 낮은 조건으로 인해 HNO_3 을 생성하는 반응보다 O_3 을 생성하는 반응이 상대적으로 우세했고, 또한 낮은 NO 농도로 인해 O_3 소멸량도 적었기 때문임을 대기질 수치모의 결과에서 확인할 수 있다.

Table 6. Summary of the indicators and their rate at (a) the representative site(G) and (b) the site I of Daegu in CMAQ before, during, and after typhoon Talas (1112).

(a) site G	O ₃			NO _x			NO ₂		
	Before typhoon	During typhoon	After typhoon	Before typhoon	During typhoon	After typhoon	Before typhoon	During typhoon	After typhoon
9 LST	30.79	25.90	15.51	10.16	17.21	50.05	6.11	9.97	24.23
14 LST	31.53	28.86	13.42	8.46	7.31	15.48	5.69	4.67	10.18
19 LST	15.09	24.83⁺	16.32	18.68	8.17⁻	19.18	17.35	7.33⁻	17.92
24 LST	7.69	23.62⁺	13.89	32.64	9.31⁻	24.57	30.22	8.67⁻	23.50

	NO			O ₃ /HNO ₃		
	Before typhoon	During typhoon	After typhoon	Before typhoon	During typhoon	After typhoon
9 LST	4.05	7.24	25.81	41.96	19.87	22.44
14 LST	2.77	2.64	5.30	114.48	172.22	12.77
19 LST	1.33	0.85⁻	1.26	286.79	642.39⁺	28.35
24 LST	2.42	0.64⁻	1.07	89.52	605.71⁺	11.85

(b) site I	O ₃			NO _x			NO ₂		
	Before typhoon	During typhoon	After typhoon	Before typhoon	During typhoon	After typhoon	Before typhoon	During typhoon	After typhoon
9 LST	29.85	29.13	18.28	14.02	11.44	37.58	8.55	6.98	20.22
14 LST	33.83	32.15	31.79	5.01	3.43	12.74	3.39	2.25	8.59
19 LST	17.99	22.30⁺	14.61	14.49	9.06⁻	22.03	13.75	8.41⁻	21.03
24 LST	3.42	24.78⁺	1.72	38.72	7.06⁻	49.77	34.64	6.61⁻	44.43

	NO			O ₃ /HNO ₃		
	Before typhoon	During typhoon	After typhoon	Before typhoon	During typhoon	After typhoon
9 LST	5.47	4.46	17.36	31.04	21.45	29.18
14 LST	1.62	1.18	4.16	111.46	159.65	12.77
19 LST	0.74	0.65⁻	1.00	326.35	612.09⁺	18.48
24 LST	4.07	0.45⁻	5.34	45.04	683.45⁺	2.32

* The upper plus (minus) represents the value that is higher (lower) than those of the day before and after typhoon period.

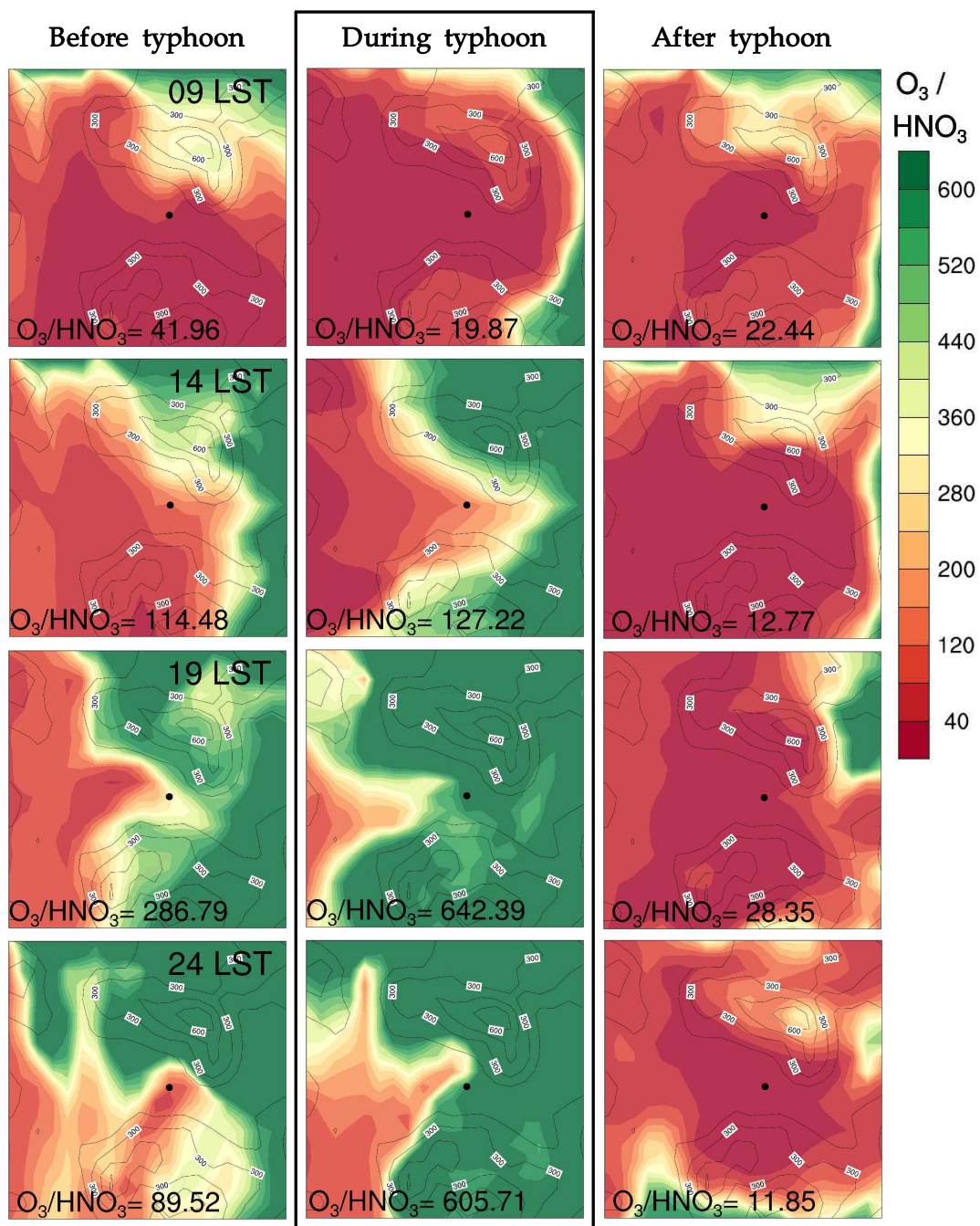


Fig. 20. Spatial distribution of O_3/HNO_3 rate with terrain height simulated by model before, during and after typhoon Talas (1112). The value of O_3/HNO_3 rate at left bottom on the figure is those of the representative site. Contour from 150 m to 600 m by 150 m.

4. 요약 및 결론

일반적으로 태풍은 강수에 의한 세정효과와 강한 종관장이 나타나는 특징으로 인해 O₃을 비롯한 대기오염물질과 관련한 많은 연구사례에서 제외되어 왔다. 그리고 태풍영향 전 시기에 태풍의 간접적인 영향으로 O₃ 농도가 증가했던 사례에 대한 연구는 있었지만, 태풍영향 이전부터 이후까지 강한 종관장에 의한 연속적인 기상조건 변화를 대기오염물질(O₃ 및 전구물질) 농도와 연관시켜 살펴본 연구는 없었다. 따라서 본 연구에서는 태풍시기의 기상조건이 대기질(예, O₃과 NO₂)에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 먼저 최근 4년간(2011~2014년) 우리나라에 발생한 고농도 대기오염(예, O₃) 사례 중 태풍이 직·간접적으로 영향을 주었던 시기를 선별하였다. 그리고 강수에 의한 세정효과로 농도가 감소하는 것을 배제하기 위하여, 태풍영향 기간이 장마기간과 겹치지 않고 강수가 없었던 시기를 사례일로 선택하였다. 이러한 조건하에 2011년 9월 초에 한반도에 영향을 준 12호 태풍 탈라스(1112)를 고농도 O₃ 현상과 이어지는 태풍 사례로 선정하였다. 선정된 사례를 대상으로 종관기상 특성을 분석하고, 태풍영향 전·중·후 시기동안 기상요소와 대기질과의 상관성, 기상요소 변화가 O₃ 및 전구물질 농도에 미치는 영향을 분석하였다.

태풍영향 전 시기에 높았던 O₃ 농도는 태풍영향 시기에 절반 수준으로 떨어졌다가 태풍영향 후 시기에 다시 상승하였다. 태풍영향 전 시기에 고농도 O₃이 발생한 것은 도시규모 광화학 오염에 의한 것으로, 높은 기온(30 ℃ 이상)과, 고기압의 영향으로 인한 안정한 대기, 그리고 태풍으로 인한 기류변화가 바람의 방향 수렴을 유도하여 O₃의 생성환경과 축적에 기여한 것이 주요 원인으로 추정된다. 태풍영향 전 시기에 O₃은 기온과 높은 상관관계($r^2=0.69$)를 가지며, 이 시기에는 30 ℃ 이상의 높은 기온이 지속되는 시간 또한 길게 나타났다. 또한 이 시기에 나타난 고기압과 태풍을 포함하는 종관패턴은 선행연구에서 분석된 고농도 O₃과 관련 있는 종관패턴 중 하나이며, 고기압 영향에 의해 나타나는 특징들은 태풍 순환의 바깥쪽 침강구역과도 관계가 있는 것으로 사료된다.

태풍영향 전 시기에 부산에서는 상대적으로 낮은 기온과 지역산업의 특성으로 인한 높은 NO_x 농도 조건이 O_3 을 생성하는 광화학 반응을 제한하고, 태풍의 영향으로 나타난 연안의 북풍이 국지적 축적을 어렵게 한 결과로써 상대적으로 낮은 수준의 고농도 O_3 이 나타난 것으로 사료된다.

태풍영향 후 시기에는 태풍영향 전 시기와 유사하게 이동성 고기압의 영향으로 기온이 높고 구름이 없는 맑고 안정한 대기상태로, 광화학 반응에 유리한 조건을 가졌다. 기온이 높았던 대구지역에서는 고농도 O_3 이 다시 나타났고, 태풍영향 전 시기에 비해 상대적으로 기온이 낮고 풍속이 강했던 대전과 부산지역에서는 고농도 O_3 이 나타나지 않았다.

태풍영향 전·후 시기에 대구와 부산지역에서 나타나는 야간의 O_3 2차 피크는 상대적으로 강한 풍속에 의한 수송·확산효과로 사료되며, 특히 지형적 영향으로 산풍이 발달하여 그 전날 계곡 위쪽에 잔류하고 있던 O_3 이 계곡 아래쪽으로 이동하거나, 바람의 수렴으로 인해 O_3 이 축적되었기 때문인 것으로 판단된다. 태풍영향 시기에는 이러한 야간의 O_3 2차 피크가 나타나지 않는데, 이는 태풍영향 시기에는 강한 종관장이 국지순환계의 발달을 저지하기 때문인 것으로 여겨진다. 또한 상대습도는 태풍영향 전·후 시기에 O_3 의 소멸과정에 기여하는 방식으로 O_3 농도에 중요한 역할을 하는 것으로 사료된다.

태풍영향 시기에 낮은 O_3 농도는 기본적으로 많은 양의 구름(평균 운량 3~9)이 주간(일사(기온))을 감소시켜 광화학 반응을 부진하게 했기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 광화학 반응에 불리한 조건에서도 O_3 의 농도가 상대적으로 높고, 야간에 농도가 높게 나타나 증감정도가 작고 일변화 양상이 뚜렷하지 않은 특징이 나타난다. 이는 주간(일사(기온))이 낮아 NO_x 농도가 낮은 조건으로 인해 HNO_3 을 생성하는 반응보다 O_3 을 생성하는 반응이 상대적으로 우세했고, 낮은 상대습도와 NO 농도로 인해 O_3 소멸량도 적었기 때문임을 관측자료와 대기질 수치모의 결과에서 확인하였다. 또한 태풍으로 인한 강한 야간 풍속이 야간 수송·확산효과와 구름의 존재가 야간의 O_3 농도 감소를 제한한 것이 원인으로 추정된다. 강수가

없었음에도 불구하고 NO_2 농도가 낮게 나타나는 것은 태풍의 영향을 받아 증가한 풍속으로 인한 대기확산, 사전 태풍예보에 따른 교통량 감소와 산업 활동의 제약으로 인한 대기오염물질 발생량 감소가 원인인 것으로 추정된다.

수치모의 결과는 대기질모델의 입력자료 중에 하나인 기상장이 갖는 오차, 즉 기상 모델이 갖는 기본적인 오차와, 기상모델의 입력자료가 갖는 오차, 태풍 모의 오차, 그리고 이로 인한 한반도 영향 범위, 영향 정도에 대한 오차가 초래하는 기상요소의 오차를 반영하고 있으며, 또 다른 입력자료인 배출량이 갖는 오차와 대기질모델 자체가 갖는 오차 등을 포함하고 있다.

본 연구는 강수를 제외하고 태풍(강한 종관장)에 의한 연속적인 기상조건 변화가 O_3 농도에 미치는 영향에 초점을 맞춰 기상인자와 O_3 농도 간 상호연관성을 분석하였다는 데 의의가 있다. 태풍 내습 시에는 많은 구름에 의한 광화학 반응 부진과 강수로 인한 오염물질들의 세정효과가 일반적으로 기대된다. 하지만 본 연구의 결과와 더불어 선행연구들에서 언급된 구름과 강수의 조건적인 역할을 고려해 봤을 때, 태풍에 의한 기상조건이 O_3 농도에 미치는 영향에 대한 기존인식에 전환이 필요하다고 사료된다. 향후 태풍영향과 관련된 다양한 사례에 대한 관측자료 분석과 기상 및 화학 수송작용이 모두 고려된 대기질 수치모의가 병행된다면, 태풍영향 시기의 기상학적 특성과 대기질 변화를 이해하는데 일조할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 기상청, 2011: 2011 태풍분석보고서. 기상청, 218 pp.
- 김영성, 1997: 1990~1995 서울·수도권 지역의 광화학 오염현상. 한국대기보전학회지, 13, 41-49.
- 김영성, 오현선, 1999: 1990~1997 기간 중 서울·수도권 지역의 고농도 오존 사례 연구. 한국대기환경학회지, 15, 267-280.
- 김영성, 김영진, 윤순창, 1999: 고농도 오존일의 강우와 운량. 한국대기환경학회지, 15, 747-755.
- 김유근, 문운섭, 송상근, 오인보, 2002a: 대류권오존의 연직 수송과 관련한 부산지역 고농도 오존 사례 분석. 한국기상학회지, 38, 307-317.
- 김유근, 문운섭, 오인보, 황미경, 2002b: 서울 및 부산지역에서 기온과 국지풍이 지표 고농도 오존 발생에 미치는 영향. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 38, 319-331.
- 김진영, 1995: 여천 동광양 지역 지상 오존 농도와 기상인자와의 상관성 분석. 석사학위, 서울대학교, 55 pp.
- 김철희, 박순웅, 1998: 경인 지역에서 관측된 지상 오존(O₃) 농도의 계절 변화 특성. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 34, 560-569.
- 김철희, 송창근, 박순웅, 1999: 종관 바람장에 따른 경인지역에서의 지상 오존(O₃) 농도 분포 모의. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 35, 441-456.
- 손장호, 송상근, 이강웅, 2010: 2009년 봄, 여름철 광양만 지역 오존의 광화학적 특성 분석. 한국대기환경학회지, 26(2), 161-176.
- 송상근, 김유근, 강재은, 2009: 2006년 봄, 여름철 대기오염물질 집중측정을 통한 도시 계곡지역의 오존농도 특성 분석. 한국대기환경학회지, 25(4), 289-303.
- 송상근, 손장호, 김유근, 2010: 항공관측자료를 이용한 2006년 멕시코시티 주변 기류의 물리-화학적 성질에 따른 오존의 광화학적 특성 연구. 한국대기환

- 경학회지, 26(2), 118-136.
- 송상근, 한승범, 김석우, 2014: 최근(2010~2012년) 제주지역 대기환경 변화에 관한 기상특성 분석. 한국환경과학회지, 23(11), 1889-1907.
- 안숙희, 박소연, 김정윤, 김백조, 2014: 태풍 내습 시 강수에 의한 대기오염물질 (PM_{10} , NO_2 , CO , SO_2)의 농도 변화 분석. 한국대기환경학회지, 30, 128-138.
- 오수민, 2012: 남한 지역의 대기오염물질(O_3 , CO , NO_2 , SO_2 , PM_{10})에 대한 여름철 강수의 세정효과. 석사학위, 이화여자대학교, 45 pp.
- 오인보, 2003: 대도시지역 고농도 오존발생의 기상학적 메카니즘: 관측자료 분석과 수치모델링 연구. 박사학위, 부산대학교, 247 pp.
- 오인보, 김유근, 황미경, 2004: 연안도시지역 해풍지연이 오존분포에 미치는 영향. 한국대기환경학회지, 20(3), 345-360.
- 오현선, 김영성, 1999: 서울·수도권 지역 고농도 오존사례의 지상 및 중관기상 특성. 한국대기환경학회지, 15, 441-455.
- 윤소연, 2014: 대기오염물질(O_3 , CO , NO_2 , SO_2 , PM_{10})에 대한 강수 세정효과; 여름 및 겨울철 간에 비교. 석사학위, 이화여자대학교, 62 pp.
- 이화운, 김유근, 김해동, 정우식, 현명숙, 2001: 대기오염물질의 장거리 수송과 열적 저기압의 관계. 한국환경과학회지, 10(2), 143-151.
- 전원배, 이화운, 이순환, 최현정, 김동혁, 박순영, 2011: 기상 입력 자료가 연안지역 고농도 오존 수치모의에 미치는 영향. 한국대기환경학회지, 27, 30-40.
- 홍승규, 2013: 동아시아 건식 침적이 지표 오존 농도에 미치는 영향. 석사학위, 서울대학교, 57 pp.
- Carter, W. P. L., 1990: A detailed mechanism for the gas-phase atmospheric reactions of organic compounds. Atmos. Environ., 24, 481-518.
- Carter, W. P. L., 2000: Implementation of the SAPRC99 chemical mechanism into the Models3 Framework. Report to the U.S. Environmental Protection Agency, 29 January 2000. [Available online at <http://pah.cert.ucr.edu/~carter/reactdat.htm>.]
- Chang, Y. S., G. R. Carmichael, H. Kurita, and H. Ueda, 1989: The transport

- and formation of photochemical oxidants in central Japan. *Atmos. Environ.*, 23, 363-393.
- CMAS, 2012: Operational guidance for the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system version 5.0. University of North Carolina, Online at: [http://www.airqualitymodeling.org/cmaqwiki/index.php?title=CMAQ_version_5.0_\(February_2010_release\)_OGD](http://www.airqualitymodeling.org/cmaqwiki/index.php?title=CMAQ_version_5.0_(February_2010_release)_OGD)
- Colella, P., and P. L. Woodward, 1984: The piecewise parabolic method (PPM) for gas-dynamical simulations. *J. Comput. Phys.*, 54, 174-201.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077 - 3107.
- Fu, Y. F., T. Xian, D. R. Lu, G. S. Liu, Z. W. Heng, L. Sun, Q. Liu, Y. Wang, and Y. J. Yang, 2013: Ozone vertical variations during a typhoon derived from the OMI observations and reanalysis data. *Chinese Science Bulletin*, 58, 3890-3894.
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129 - 151.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318 - 2341.
- Jain, S. L., B. C. Arya, A. Kumar, S. D. Ghude, and P. S. Kulkarni, 2005: Observational study of surface ozone ant New Delhi, India. *International Journal of Remote Sensing*, 26(16), 3515-3524.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170 - 181.
- Kanaya, Y., M. Fukuda, H. Akimoto, N. Takegawa, Y. Komazaki, Y. Yokouchi, M. Koike, and Y. Kondo, 2008: Urban photochemistry in central Tokyo: 2. Rates and regimes of oxidant (O_3+NO_2) production. *Journal*

- of Geophysical Research, 113, 2156-2202.
- Kim, Y.-K., Y.-S. Moon, and S.-K. Song, 2002: Stratosphere-troposphere Exchange of Ozone Associated with the Upper Level Jet Stream. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 38, 531-545.
- Klemm, O., A.A. Bachmeier, R.W. Talbot, K.I. Klemm, 1994: Fog chemistry at the New England coast : influence of air mass history. *Atmospheric Environment*, 28, 1181-1188.
- Lam H. Y., 2014: Analysis of Meteorological Criteria Leading to Tropical Cyclone Related Ozone Episodes in Hongkong. Doctor's Degree, Hong Kong University of Science and Technology, Hongkong.
- Liu, C. M., C. Y. Huang, S. L. Shieh, and C. C. Wu, 1994: Important meteorological parameters for ozone episodes experienced in the Taipei basin. *Atmos. Environ.*, 28, 159-173.
- Liu, X., G. Mauersberger, D. Moeller, 1997: The effects of cloud processes on the tropospheric photochemistry: and improvement of the EURAD model with a coupled gaseous and aqueous chemical mechanism. *Atmospheric Environment*, 31, 3119-3135.
- Martin, A., 1984: Estimated washout coefficients for sulphur dioxide, nitric oxide, nitrogendioxide and ozone. *Atmos. Environ*, 18, 1955-1961.
- Mayer, H., 1999: Air pollution in cities. *Atmos. Environ.*, 33, 4029-4037.
- MacDonald, C. P., P.P. Roberts, H.H. Main, T.S. Dye, D.L. Coe, and J. Yarbrough, 2001: The 1996 Paso del Narte Ozone Study: analysis of meteorological and air quality data that influence local ozone concentrations. *Sci. Total Environ.*, 276, 93-109.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102, 16663 - 16682.
- National Research Council (NRC), 1991: Rethinking the ozone problem in

- urban and regional air pollution. National Academy Press, Washington, D.C., 524 pp.
- Niatthijsen, J., P. J. Builtjes, E. W. Meijer, and G. Boersen, 1997: Modelling cloud effects on ozone on a regional scale: a case study. *Atmospheric Environment*, 31, 3227-3238.
- Nicholls, M. E., R. A. Pielke, J. L. Eastman, C. A. Finley, W. A. Lyons, C. J. Tremback, R. L. Walko, and W. R. Cotton, 1995: Applications of the RAMS numerical model to dispersion over urban areas, in *Wind Climate in Cities*. Kluwer Academic Publ. Dordrechl, Netherlands. 703-732.
- North American Research Strategy for Tropospheric Ozone (NARSTO) Synthesis Team, 2000: an assessment of tropospheric ozone pollution - a North American perspective.
- Pleim, J, 2007: A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: model description and testing. *J. of Appl Met. and Climatology*, 46, 1383-1395
- Seinfeld, J.H. and S. Pandis, 1998: In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, Wiely Intescience, New York.
- Sillman, S., 1995: The use of NO_y , HCHO, H_2O_2 and HNO_3 as indicators for ozone- NO_x -hydrocarbon sensitivity in urban locations. *Journal of Geophysical Research*, 100, 14175-14188.
- Sillman, S., 1999: The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmos. Environ.*, 33, 1821-1845.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. Barker, M. G. Duda, X. -Y. Huang, J. G. Powers, and W. Wang, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, 125 pp.
- Song, S.-K., Y.-K. Kim, Z.-H. Shon, and J.Y. Ryu, 2012: Photochemical analyses

- of ozone and related compounds under various environmental conditions. *Atmos. Environ.*, 47, 446-458.
- Spirig, C., A. Neftel, L.I. Kleinman, and J. Hjorth, 2002: NO₂ versus VOC limitation of O₃ production in the Po valley: Local and integrated view based on observations. *Journal of Geophysical Research*, 107(D22), 8191.
- Vukovich, F. M., 1994: Boundary layer ozone variations in the eastern United States and their association with meteorological variations: Long-term variations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99, 16839-16850.
- Walcek, C. J., H. H. Yuan, and W. R. Stockwell, 1997: The influence of aqueous-phase chemical reactions on ozone formation in polluted and nonpolluted clouds. *Atmospheric Environment*, 31, 1221-1237.
- Wang, T., Y. Y. Wu, T. F. Cheung, and K. S. Lam, 2001: A study of surface ozone and the relation to complex wind flow in Hong Kong. *Atmos. Environ.*, 35, 3203-3215.
- Wishinski, P.R., and R.L. Poirot, 1998; Long-term ozone trajectory climatology for the Eastern US Part I Methods. A&WMA's 91st Annual Meeting & Exhibition, June 14~18, San Diego CA. Paper No.98-TP43.05.
- Wood, E.C., S.C. Herndon, T.B. Onasch, J.H. Kroll, M.R. Canagaratna, C.E. Kolb, D.R. Worsnop, J.A. Neuman, R. Seila, M. Zavala, W.B. Knighton, 2009: A case study of ozone production, nitrogen oxides, and the radical budget in Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 2499-2517.
- Yoo, J. M., Y. R. Lee, D. Kim, M. J. Jeong, W. R. Stockwell, P. K. Kundn, S. M. Oh, D. B. Shin, and S. J. Lee, 2014: New indices for wet scavenging of air pollutants (O₃, CO, NO₂, SO₂ and PM₁₀) by summertime rain. *Atmos. Environ.*, 82, 226-237.

Influence of Meteorological Conditions on Ozone Concentration before, during, and after Typhoon periods in the Korea Peninsula

Hyeonjin Shin

Graduate Program in Marine Meteorology,
Jeju National University, Jeju, Korea

Abstract

The influence of meteorological conditions on air quality (O_3 and NO_2) before, during, and after the typhoon Talas (1112) was analyzed using observation data and a numerical modeling approach. The typhoon case was chosen to meet criteria regarding ozone episodes and without rainfall. The results show that high temperature (above $30\text{ }^\circ\text{C}$) and stable atmosphere under a migratory anticyclone condition, and the convergence of wind from changed air current by the typhoon were the main meteorological factors that favoured photochemical reactions in Daejeon, Daegu, and Busan before the typhoon. And these conditions are likely to be caused by subsiding air outside the typhoon circulation. Also the synoptic pattern including anticyclone and the typhoon is one of the classified synoptic patterns

associated with ozone episodes in the precedent study. During typhoon period, ozone concentration decreased because increased cloud cover inactivated photochemical reactions. However, there exists relatively high ozone concentration in adverse conditions for photochemical reactions and unclear diurnal variations of ozone concentration. These were mainly driven by dominant reactions of ozone production under low NO_x condition, and constraints of ozone reduction due to low relative humidity and NO concentration in daytime. Also it is estimated that relatively high ozone concentration in night time was affected by meteorological conditions with typhoon, such as increased cloud cover and strong wind speed.