한국에서 발생한 청천난류 사례들에 대한 수치연구

민재식[†] · 김정훈 · 전해영^{*}

연세대학교 대기과학과

(접수: 2012년 4월 24일, 수정: 2012년 6월 7일, 게재확정일: 2012년 6월 21일)

A Numerical Study on Clear-Air Turbulence Events Occurred over South Korea

Jae-Sik Min[†], Jung-Hoon Kim, and Hye-Yeong Chun^{*}

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, South Korea

(Received: 24 April 2012, Revised: 7 June 2012, Accepted: 21 June 2012)

Abstract Generation mechanisms of the three moderate-or-greater (MOG)-level clear-air turbulence (CAT) encounters over South Korea are investigated using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. The cases are selected among the MOG-level CAT events occurred in Korea during 2002-2008 that are categorized into three different generation mechanisms (upper-level front and jet stream, anticyclonic flow, and mountain waves) in the previous study by Min *et al.* For the case at 0127 UTC 18 Jun 2003, strong vertical wind shear (0.025 s^{-1}) generates shearing instabilities below the enhanced upper-level jet core of the maximum wind speed exceeding 50 m s^{-1} , and it induces turbulence near the observed CAT event over mid Korea. For the case at 2330 UTC 22 Nov 2006, areas of the inertia instability represented by the negative absolute vorticity are formed in the anticyclonically sheared side of the jet stream, and turbulence is activated near the observed CAT event over southwest of Korea. For the case at 0450 UTC 16 Feb 2003, vertically propagating mountain waves locally trigger shearing instability ($Ri < 0.25$) near the area where the background Richardson number is sufficiently small ($0.25 < Ri < 1$), and it induces turbulence near the observed CAT over the Eastern mountainous region of South Korea.

Key words: Clear-air turbulence, Upper-level front and jet stream, Anticyclonic flow, Mountain wave

1. 서 론

청천난류 (clear-air turbulence; CAT)는 대류운이 없는 자유 대기에서 작은 규모 (수십 m에서 수 km)의 수평 크기를 가지는 요란으로 정의되며, 이는 순항 중인 항공기에 직접적으로 영향을 주어 항공기 안전을 위협하는 요소로 널리 알려져 있다 (Ellrod *et al.*, 2003). 미국 NTSB (National Transportation Safety Board)의

2009년 보고서 (NTSB, 2009)에 의하면, 청천난류는 최근 10년간의 항공기 사고에서 가장 큰 비중을 차지하는 기상학적 요인으로 알려져 있다. 국내 항공철도 사고조사위원회의 보고서에 따르면 1957년부터 현재까지 기상 현상과 관련된 항공기 사고사례 중 난류에 의한 사고가 약 24%를 차지하는 것으로 나타났다 (<http://www.araib.go.kr>).

최근 국내에서는 조종사 보고 (pilot report; 이하 PIREP) 관측자료를 이용한 난류 통계 및 유형 분류 (민재식 등, 2011; Kim and Chun, 2011), 고해상도 수치모델링을 통한 청천난류 발생메커니즘 분석 (Kim and Chun, 2010; 2012), 일기예보모델을 이용한 통합난류예측 시스템 등의 연구가 수행되고 있다 (김정훈 등, 2009;

^{*}Corresponding Author: Hye-Yeong Chun, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

Phone : 02-2123-2692, Fax: 02-365-5163

E-mail : chunhy@yonsei.ac.kr

[†]Current affiliation: Jae-Sik Min, K-weather, 152-740, ACE High-End Tower 401, Guro 3-dong, Guro-gu, Seoul, Korea

장욱 등, 2009; 김정훈과 전해영, 2011; Kim *et al.*, 2011). 특히, Kim and Chun (2011)은 2003-2008년 동안 관측된 남한 지역의 PIREP을 이용하여 시·공간적 분포 특징 및 난류 발생 메커니즘 별 유형분석을 수행하였다. 또한, Kim and Chun (2010)에서는 2003-2008년 동안 중강도 이상 (moderate-or-greater; 이하 MOG)의 난류 발생이 하루 중 가장 많이 보고되었던 2007년 4월 2일 사례에 대한 고해상도 수치모델링 실험을 수행하여, 비슷한 시간에 서해안과 제주도 및 동부 산악지역에서 보고된 청천난류들이 서로 다른 메커니즘에 의해 발생되었음을 보였다.

청천난류의 주요 발생 메커니즘은 (i) 제트 상부 및 하부의 상층 전선 지역에서의 시어불안정 (Dutton and Panofsky 1970; Ellrod and Knapp 1992), (ii) 강한 고기압성 흐름이 존재하는 지역에서의 관성불안정 (Kaplan *et al.*, 2005; Knox *et al.*, 2008), 그리고 (iii) 복잡한 산악지역에서 발생한 산악파 (Clark *et al.*, 2000; Doyle *et al.*, 2005)등으로 나눌 수 있다. 민재식 등 (2011)은 2002년 12월부터 2008년 11월까지 5년간 (2005년 자료는 결측으로 제외) 우리나라 상공 PIREP에 나타난 총 240개의 MOG 청천난류를 위의 세가지 난류발생 메커니즘 별로 유형화하였다. 30 km의 해상도를 갖는 기상청 현업지역모델 (Regional Data Analysis and Prediction System; 이하 RDAPS) 재분석장을 이용하여 (i)과 (ii)를 대표하는 난류진단지수 2개씩을 각각 계산하고, 관측된 난류 근처 수평 50 km 및 연직 3,000 ft (약 1 km) 이내에서 계산된 지수 값이 김정훈 등 (2009)에서 제시된 임계값을 만족할 경우, 그 PIREP을 분류된 난류 발생 메커니즘에 속하는 것으로 결정하였다. (iii)의 경우, 고해상도 산악지형자료를 이용한 아격자 산악 분산 값들과 RDAPS의 하층 바람 및 안정도 값들을 산악중력과 모수화 (전해영 등, 1996)에 적용하였다. 그 후, 관측된 난류 위치로부터 수평 50 km, 연직 3,000 ft 이내에서 산악중력과 항력이 존재하면 (iii)의 메커니즘으로 분류하였다 (Kim and Chun 2010; 2011). 그 결과, 제트 상부 또는 하부의 상층 전선에서 시어불안정에 의해 발생한 사례 (이하 M1)가 103개로 가장 많았고, 관성불안정에 의한 사례 (이하 M2)가 73개, 산악파의 파동파괴에 의한 사례 (이하 M3)가 25개로 나타났다. M1과 M2의 조건을 동시에 만족하는 사례는 32개, M1과 M3를 동시에 만족하는 사례는 6개, M2와 M3를 만족하는 사례는 3개, M1, M2, M3를 모두 만족하는 사례는 4개였으며, 위의 세 가지 발생 메커니즘 중 어디에도 속하지 않는 것은 88개였다. 유형화와 방법론과 관련된 자세한 설명은 민재식 등 (2011)과 Kim and Chun (2011)에 기술되어 있다.

본 연구에서는 민재식 등 (2011)에서 유형화한 세

청천난류 발생메커니즘을 대표하는 사례를 각각 하나씩 선택하여 3차원 수치실험을 수행하고, 그 발생 메커니즘을 고해상도 모형에서 보다 정확하게 이해함으로써, 30 km 해상도의 재분석자료를 이용한 청천난류 유형화의 타당성을 조사하고자 하였다. 2장에서는 사용한 중규모 수치모델과 그 수치실험설계에 대해 설명하고, 3장에서는 수행한 3차원 수치실험에 대한 결과들을 설명하며, 요약 및 결론은 4장에 기술하였다.

2. 모델 설계

본 연구에서 사용한 수치모델은 미국립기상연구소 (National Centers for Atmospheric Research; 이하 NCAR)에서 개발한 중규모 수치모델인 Advanced Research Weather Research and Forecasting (WRF-ARW; 이하 WRF) (Skamarock *et al.*, 2008) 모델 3.1 버전이다. 본 연구에서는 민재식 등 (2011)에서 구분한 세 청천난류 발생 메커니즘들 중 2003년 6월 18일 0127 UTC에 평창에서 발생한 M1 사례, 2006년 11월 22일 2330 UTC에 목포에서 발생한 M2 사례, 2003년 2월 16일 0450 UTC에 군위에서 발생한 M3 사례에 대해 각각 수치실험을 실시하였다. M1과 M2 사례에 대한 수치실험은 수평격자 간격이 30 km인 도메인 1 (191 × 171; 이하 D1)에 수평격자 간격이 각각 10 km, 3.3 km, 1.1 km인 세 개의 도메인들 [도메인 2 (145 × 148; 이하 D2), 도메인 3 (154 × 154; 이하 D3), 도메인 4 (166 × 166; 이하 D4)]로 구성하였다. 산악파와 관련된 M3 사례의 경우에는 파동파괴와 관련한 고해상도 수치실험이 추가적으로 필요하여 (Kim and Chun, 2010), M1과 M2 사례들의 수치실험에서와 같은 4개의 도메인에 수평격자 간격이 0.37 km 인 도메인 5 (187 × 187; 이하 D5)를 추가하였다. 모든 도메인에 대한 연직 층은 총 113개의 시그마 층으로 이루어져 있으며 모델 최상단 기압은 20 hPa이다.

본 연구에 사용한 물리과정 중, 미시구름물리 모수화는 WSM 6 (WRF Single Momentum 6-class) scheme (Hong and Lim, 2006), 행성경계층 모수화는 Mellor-Yamada-Janjic scheme (Janjic, 2002), 적운 모수화는 Kain-Fritsch scheme (Kain 2004)을 사용하였다. 적운 모수화는 D1과 D2에만 사용되었으며, 상층경계조건은 중력파가 모델 상층경계에서 반사되는 것을 방지하기 위해 모델 상단에서 5 km 아래로 Rayleigh damping을 이용한 스펙트럼 층을 설정하였고, 모든 실험에 대해 2-way nesting 방식을 택하였다. 모델 초기 입력자료는 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Centers for Atmospheric Research) GDAS (Global Data Assimilation System)에서 제공하는 6시간 간격의 1.0° × 1.0° 수평 해상도를 가지는 재

분석 자료 (Derber *et al.*, 1991)를 사용하였다. 지형자료는 실제지형에 가깝도록 하기 위하여 USGS (U. S. Geological Survey) DEM (Digital Elevation Model) 30초 (약 0.925 km) 전구 자료를 사용하였다.

3. 결 과

3.1. 상층 전선과 제트 (M1 사례)

2003년 6월 18일 0127 UTC에 평창 (위도: 37°42'N, 경도: 128°21'E) 상공 33,000 ft (약 10 km 상공)에서 발달된 제트 하부의 상층 전선 지역에서 중강도 (moderate; 이하 MOD)의 청천난류가 발생하였다. Fig. 1은 청천난류 발생 지점과 수치실험에 사용한 4개의 도메인들을 나타낸다. Fig. 2는 2003년 6월 18일 0000 UTC의 RDAPS 30 km 재분석장 (왼쪽)과 D1에서의 WRF 수치실험 결과 (오른쪽)를 비교한 것이다. (a-b)와 (c-d)는 각각 300 hPa와 500 hPa에서의 지오펜셀고도, 풍속, 수평바람 벡터를 나타내며, (e-f)는 지표면에서의 해면 기압과 수평바람 벡터이다. 청천난류가 발생한 지점은 별표로 표시하였다 (Figs. 2(a)-(f)). 300 hPa (Figs. 2(a)-(b))에서 우리나라는 50 m s⁻¹ 이상의 풍속을 가지는 남서풍 계열 제트 입구 지역에 위치하고 있으며, 요동반도 지역에 위치한 기압골은 서풍 또는 북서풍 계열의 바람을 타고 우리나라로 다가오고 있다. 500 hPa (Figs. 2(c)-(d))도 300 hPa와 비슷한 경향을 보이고 있으며, 상층 기압골은 300 hPa로 가면서 서쪽으로 기울어져 있어 상층 기압골이 발달하고 있음을 유추할 수 있다. 또한, 한반도 지역은 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 흐르는 남풍 또는 남동풍과 요동지역 상층 기압골 풍상측의 북서풍이 만나는 지역에 위치하여, 온도풍 관계에 따라 남북 온도

경도 강화로 인한 제트 및 상층 전선 발달이 용이한 상황이다 (Kim and Chun, 2010). 지상 (Figs. 2(e)-(f))에서 우리나라는 일본 동쪽의 태평양 해상에 중심을 둔 북태평양 고기압의 서쪽 가장자리 영향권에 들어있다.

WRF 모델의 D1 영역 수치적분결과 (Figs. 2(b), (d), and (f))는 RDAPS 재분석장 (Figs. 2(a), (c), and (e))에 나타난 중관 규모의 상층 기압 패턴 및 풍속을 잘 재현하고 있다. 다만, 500 hPa과 지상에서 대만 동쪽에 중심을 둔 6호 태풍 소델로의 중심 기압이 약 3 hPa 정도 높게 모의되었는데, 이는 본 연구의 수치실험 설계에 보거싱 방법 (e.g., Kim *et al.*, 2009)등을 통한 현실적인 태풍 모의가 이루어 지지 않았기 때문으로 사료된다. 하지만, 본 연구의 주요 목적이 대만 동쪽 태풍의 현실적인 재현이 아니며, 청천난류가 발생한 지역의 상층 바람은 이 태풍과 직접적으로 관련되지 않은 것으로 분석된다. 따라서, 본 연구에서 수행된 실험 결과는 관측된 청천난류의 발생메커니즘을 분석하는데 적절함을 확인하였다.

Fig. 3은 D1 영역에서 연직시어, 풍속, 온도 및 대류권계면인 2 PVU (potential vorticity unit; 10⁻⁶ K kg⁻¹ m² s⁻¹)에 대한 남북단면도를 2003년 6월 17일 1630 UTC (Fig. 3(a))부터 18일 0130 UTC (Fig. 3(d))까지 3시간 간격으로 나타낸 것이다. 여기서, 연직단면도는 Fig. 1(a)의 A와 B를 연결한 실선을 따른다. 17일 1630 UTC (Fig. 3(a))에는 온도풍 관계에 따라 남북 온도경도 강화로 인해 발달된 제트 코어 (최대 풍속 = 42 m s⁻¹)가 한반도 중부 (Y = 2400 km)지역의 12 km 상공에 위치하고 있으며, 제트축의 저기압성 시어 쪽을 따라 제트류를 중심으로 발생하는 2차 순환에 따른 대류권계면 접힘 및 상층전선발달이 나타난다. 그 결과 제트 코어 하부인 상층 전선에서의 연직시어

Fig. 1. Model domains used for the M1 simulation with horizontal grid spacings of 30 km (D1), 10 km (D2), 3.3 km (D3), and 1.1 km (D4). Contours are terrain heights with 200 m intervals. Location of the observed CAT near Pyeongchang at 0127 UTC 18 June 2003 is depicted as the asterisk in (a) and (b).

Fig. 2. Geopotential height (contours), horizontal wind vectors, and wind speed (shadings) at 300 (upper) and 500 (mid) hPa and sea-level pressure (SLP; solid line) and horizontal wind vectors at surface (lower) at 00 UTC 18 Jun 2003, obtained from the RDAPS 30-km analysis data (left) and WRF model results in D1 (right). Contour intervals in upper and mid panels are 120 and 60 gpm, respectively.

값이 약 0.013 s^{-1} 정도로 나타났으며, 이는 상층 제트 및 전선의 강도 변화에 따라 1930 UTC (Fig. 3(b))에는 0.010 s^{-1} 로 다소 약해진 뒤, 2230 UTC (Fig. 3(c))에 0.020 s^{-1} 로 강화되었으며, 난류발생이 있었던 18일 0130 UTC (Fig. 3(d))에는 0.025 s^{-1} 까지 증가하였다.

Fig. 4는 D3 영역 ($\Delta x = 3 \text{ km}$)의 33,000 ft (약 10 km) 고도에서 아격자 규모의 난류운동에너지 (subgrid-scale turbulent kinetic energy; 이하 SGS TKE), 온위, 수평 바람 벡터를 17일 1630 UTC부터 18일 0130 UTC까지 3시간 간격으로 나타낸 것이다. 난류발생 9시간 전인 17일 1630 UTC (Fig. 4(a))에 포항 근처 동해상에 위치한 최대풍속 48 m s^{-1} 의 제트 코어는 남북 기온경도 강화로 인한 연직 시어 증가로 더 강화되고 북상하였다. 난류발생시기인 18일 0130 UTC (Fig. 4(d))에는 최대풍속이 55 m s^{-1} 를 초과하였으며, 결과적으

Fig. 3. Y-Z cross-sections of vertical wind shear (VWS; shadings), wind speed (m s^{-1} ; black lines), and potential temperature (K; gray lines), along the line (A-B) shown in Fig. 1, at (a) 1630, (b) 1930, (c) 2230 UTC 17, and (d) 0130 UTC 18 Jun 2003, derived from the WRF model results in D1. Thick black lines represent 2-PVU (potential vorticity unit; $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$). Location of the CAT at 0127 UTC 18 Jun 2003 is depicted as the white asterisk in (a)-(d).

Fig. 4. Subgrid-scale turbulent kinetic energy (SGS TKE; $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$, shadings), potential temperature (K; contours), and horizontal wind vectors at $z = 33,000 \text{ ft}$ (10,100 m) at (a) 1630, (b) 1930, (c) 2230 UTC 17, and (d) 0130 UTC 18 Jun 2003, derived using the WRF model results in D3.

로 연직시어 증가로 인해 발생된 SGS TKE가 관측된

Fig. 5. The same as in Fig. 1 except for the model domains used for the M2 simulation for the CAT case observed at Mokpo at 2330 UTC 22 Nov 2006.

청천난류지점과 일치함을 보인다. 따라서, 2003년 6월 18일 0127 UTC에 평창근처 약 10 km 상공에서 발생한 청천난류는 남북 기온경도 증가로 인해 발달된 상층 제트 코어 하부에서의 연직시어 및 상층 전선 강화로 인한 시어 불안정이 주요 원인임을 알 수 있었다.

3.2. 고기압성 시어 기류 (M2 사례)

2006년 11월 22일 2330 UTC에 목포 (위도: 34°50'N, 경도: 126°28'E) 상공 28,000 ft (약 9.5 km)에서 MOD 강도 청천난류가 발생하였으며, Fig. 5에 청천난류 발생 지점과 수치실험에 사용한 4개의 도메인들을 나타내었다. Fig. 6은 Fig. 2과 동일한 방법으로 2006년 11월 23일 00 UTC 사례에 대해 나타낸 것이다. 23일 00 UTC에 한반도는 북만주 지역에서 내려오는 북서풍의 극 제트와 동중국해 지역으로부터 올라오는 남서풍의 아열대 제트가 만나는 지역에 위치하고 있다. 특히, 난류 발생 지역은 고기압성 회전 곡률을 보이는 아열대 제트의 고기압성 수평 시어 영역에 위치하고 있다. RDAPS에서 분석된 청천난류 발생지점 근처에서의 고기압성 회전의 아열대 제트, 한반도에서의 두 제트의 합류, 북해도 지역의 제트 코어, 알류산 저기압 등의 종관 규모 일기 패턴이 WRF 모델에서도 유사하게 모의되었다.

Fig. 7은 2006년 11월 23일 (0000 UTC) RDAPS 30 km 재분석장을 이용해 (a)에는 28,000 ft (8,500 m) 고도에서의 절대 와도와 풍속을 나타냈고, (b)에는 (a)의 A와 B를 지나는 연직 단면도에서의 절대 와도, 풍속, 온위, 2 PVU의 대류권계면을 나타내었다. $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 이하의 절대와도 값을 음영으로 나타내었다. 두 제트 기류가 서로 합류하는 한반도 영역 중 고기압성 회전 곡률을 보이는 아열대 제트의 고기압성 수평 시어 지역인 남부 지역에서 국지적으로 강한 고기압성 수평 시어가 발생해서, 절대 와도가 음의 값 (최소값

Fig. 6. Same as in Fig. 2 except at 0000 UTC 23 Nov 2006.

$= -7.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)이 되는 지역이 나타나고 있다. 이는 이 시기 관측된 청천난류 지점과 일치한다. Knox (1997) 및 Knox *et al.* (2008)은 고기압성 흐름이 강한 지역에서의 지균 불균형에 의한 관성 불안정은 그 불균형을 해소시키는 과정 (지균 조절)에서 관성 중력파를 발생시키고, 이로 인해 국지적으로 난류가 발생된다고 밝혔다. Kaplan *et al.* (2005)은 지균 불균형

Fig. 7. (a) absolute vorticity (shadings) and wind speed (m s^{-1} ; black lines) at $z = 28,000$ ft (8,500 m) and (b) Y-Z cross-section of absolute vorticity (shadings), wind speed (black lines), potential temperature (gray lines), and 2 PVU (bold black line) along the line (A-B) shown in (a) at 00 UTC 23 Nov 2006, derived using the RDAPS 30-km analysis data.

이 심한 이러한 강한 고기압성 흐름이 있는 지역에서 기압 경도력 방향과 연직 와도 경도의 방향이 직교하고, 이것이 국지적으로 최대가 되는 지역에서 난류가 발생함을 보였다. Kim and Chun (2010)은 2007년 4월 2일 9개 MOG 청천난류 사례들 중 제주도 지역에서 발생한 3개의 사례의 경우, 선행 연구들처럼 한반도 중부지역을 가로지르는 제트의 강한 고기압성 수평시어에서의 국지적인 관성 불안정이 주요 원인을 보였다.

Fig. 8은 D3에서 모의된 22일 2030과 2330 UTC 때의 절대 와도와 SGS TKE를 관측된 난류고도인 28,000 ft (8,500 m)에서 풍속과 함께 나타낸 것이다. 청천난류 발생 3시간 전 (Fig. 8(a))에는 청천난류 발생지역 주변으로 관성불안정 지역이 나타나지 않았지만 난류 발생시각 (Fig. 8(b))이 되면서 고기압성 곡률

Fig. 8. Wind speed (contours) with absolute vorticity (shadings) (upper) and SGS TKE (shadings) (lower) at 2030 UTC (left) and 2330 UTC (right) 22 Nov 2006, derived from the WRF simulation in D3.

을 가지는 아열대 제트류의 고기압성 수평시어지역인 한반도 남서해상 및 남해상에서 기류 불균형에 의한 국지적인 관성불안정이 발생 하였다. 이러한 지역 중 관측된 난류 지점 주변에서 SGS TKE가 나타났다. 따라서, 2006년 11월 22일 2330 UTC에 발생한 청천난류 사례는 고기압성 곡률을 가지는 아열대 제트의 고기압성 수평시어 지역에서 국지적으로 강한 고기압성 시어흐름이 발생하고, 절대 와도가 0보다 작은 관성 불안정 지역에서 청천난류가 발생하였음을 확인하였다.

3.3. 산악파 (M3 사례)

Fig. 9는 2003년 2월 16일 0450 UTC경 소백산맥 근처 군위 지역 (위도: $36^{\circ}13'\text{N}$, 경도: $128^{\circ}34'\text{E}$)에서 발생한 청천난류 사례를 모의하기 위해 설정된 모델 영역을 나타낸다. 총 5개의 도메인으로 구성되어 있으며 D5에서는 수평격자 간격이 0.37 km를 가지도록 설정하였다. 난류가 발생한 지역은 북동쪽에서 남서쪽 또는 서쪽 방향으로 뻗어있는 소백산맥의 남쪽에 위치하고 있어, 북풍 또는 북서풍 계열의 바람이 불 경우 난류 위치는 소백산맥의 풍하측 지역이 된다.

Fig. 10은 Fig. 2와 Fig. 6과 동일한 방법으로 M3 사례인 2003년 2월 16일 00 UTC에 대해 나타낸 그림이다. 300 hPa에서는 40 m s^{-1} 가 넘는 편서풍의 제

Fig. 9. The same as in Fig. 1 except for the model domains used for the M3 simulation for the CAT case observed near the Sobaek mountain at Gunwi at 0450 UTC 16 Feb 2002.

Fig. 10. Same as in Fig. 2 except at 00 UTC 16 Feb 2003.

트류가 한반도를 가로지르고 있으며, 500 hPa에서는 한반도에 장파 기압골이 위치하여 그 풍하측에서는 서풍이, 풍상측에서는 북서풍이 나타난다. 지상에서는 중국 화중지방으로 남하한 시베리아 고기압의 영향으로 한반도에는 북풍 또는 북서풍의 계열의 바람이 지배적임을 알 수 있다. 이를 통해, 동서 방향으로 나란한 소백산맥을 가로지르는 북풍 계열의 하층 바람이

Fig. 11. Y-Z cross-sections of Richardson number (Ri ; shading), meridional wind speed ($m s^{-1}$, black lines), and potential temperature (K , gray lines) along the line (A-B) shown in Fig. 9(a) at (a) 0000 and (b) 0500 UTC 16 Feb 2003, derived using the WRF model results in D1. Contour intervals of wind speed and temperature are $5 m s^{-1}$ and $3 K$, respectively. Zero and negative values of meridional wind speed are depicted as bold and dashed lines, respectively.

산악과 발생을 용이하게 하며, 연직으로 전파되는 이러한 산악파는 고도 증가에 따라 북풍에서 서풍으로

Fig. 12. Y-Z cross-sections of meridional wind speed (m s^{-1} ; black lines) and potential temperature (K; gray lines) superimposed on (a) SGS TKE (shading) and (b) Ri along the line near the CAT event at 0450 UTC 16 Feb 2003, derived using the WRF model results in D5. Contour intervals of wind speed and temperature are 5 m s^{-1} and 3 K, respectively. Zero and negative values of meridional wind speed are depicted as bold and dashed lines, respectively.

90도 이상 풍계가 바뀌는 배경류에 의해 임계 고도를 만날 가능성이 높음을 유추할 수 있다 (e.g., Lane *et al.*, 2009). 이러한 중관 규모 운동의 특성은 WRF 모델에서도 적절히 모의되었다.

Fig. 11에는 리차드슨 수 (이하 Ri), 남북 방향의 바람 풍속, 온위에 대한 Fig. 9(a)의 A와 B를 지나는 선의 Y-Z 연직 단면도를 WRF 모델 결과의 D1에서의 자료를 이용해 2003년 2월 16일 00과 05 UTC 때에 대해 나타내었다. Fig. 10(e)와 10(f)에서 보이는 바와 같이, 00 UTC에는 지표면에서의 시베리아 고기압 확장으로 인한 북풍 계열의 바람이 관측된 난류 지점 근처 ($Y = 2300 \text{ km}$)의 지상에서 약 4 km 상공까지 우세하게 나타나며 (Fig. 11(a)), 05 UTC가 되면서 시베리아 고기압 및 상층 기압골 남하로 인해 북풍 계열의 바람이 약 6 km 상공까지 나타난다 (Fig. 11(b)). 또한, 상층 제트 코어 하부의 연직 시어 증가로 난류 발생지점 근처로 Ri 값이 1보다 작게 나타내고 있으나, 시어 불안정을 발생시킬 만큼 낮은 값 ($\text{Ri} < 0.25$)을 나타내지는 않고 있다 (Fig. 11).

자세한 난류발생 메커니즘을 밝히기 위해, WRF 수치실험의 D5 결과로부터 계산된 SGS TKE, Ri, 남북 바람 속도, 온위에 대한 난류발생 시각 (0450 UTC) 때의 난류발생 지점 근처에서의 Y-Z 연직 단면도를 Fig. 12에 나타내었다. 지표 근처 북풍 계열의 바람이 동서방향의 소백산맥 ($Y = 20 \text{ km}$)을 가로지르면서 연직으로 전파되는 산악파가 발생하고 있다. 이 산악파는 제트코어 하부의 연직시어에 의해 Ri가 상대적으로 낮은 지역 (5~6 km 상공)으로 전파되면서 국지적

으로 시어 불안정을 일으켜 SGS TKE를 발생시켰다 ($x = 10 \sim 20 \text{ km}$, $z = 5 \sim 6 \text{ km}$ in Fig. 12(a)). 따라서, 본 난류 사례는 연직으로 전파되는 산악파가 그 임계 고도로 다가가면서 파동파괴로 인해 발생한 것이 아니라, 하층 북풍의 소백산맥으로의 유입으로 발생한 산악파가 제트코어 하부의 연직시어 강화로 인해 Ri가 충분히 낮은 지역으로 전파되면서 국지적으로 Ri가 0.25보다 작은 시어 불안정을 야기시켜 발생한 것으로 사료된다 (e.g., Lane *et al.*, 2004; Knox *et al.*, 2008; Kim and Chun, 2012).

수치실험에서 모의된 난류 발생 지역과 실제 청천 난류가 발생한 지점에는 약 15 km정도의 거리가 존재하는데, 이는 민재식 등 (2011)에서 언급한 PIREP 자료의 관측 위치에 대한 불명확성을 감안할 때, 민재식 등 (2011)에서 설정한 수평반경 50 km, 연직 $\pm 3,000 \text{ ft}$ 이내에서의 난류지역을 만족하고 있다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 선행연구들에서 제안된 3가지 청천 난류 발생 메커니즘의 특성을 보다 정확하게 이해하기 위하여, 각 메커니즘 별 사례를 하나씩 선정하여 WRF 모델을 이용한 3차원 고해상도 수치실험을 실시하였다. 수치실험 결과를 이용하여 사례별 난류 발생 메커니즘을 조사한 결과는 다음과 같다.

먼저, M1 사례는 2003년 6월 18일 0127 UTC에 평창 지역의 약 10 km 상공에서 발생한 청천난류로써, 이 시기 중관 규모의 상층 대기는 태평양 고기압 가

장자리로부터 유입되는 남서 기류와 요동 반도에서 남동진하는 북서 기류가 한반도에서 만나면서 남북 온도 경도가 강화되고 있었다. 이로 인해 한반도에서 연직 시어가 증가하여 제트가 발달하였으며, 이 제트 코어를 중심으로 한 2차 순환이 제트의 저기압성 회전 지역으로 대류권계면 접합을 야기하여 상층 전선의 발달을 도왔다. 최종적으로, 이렇게 발달된 상층 전선상에서의 시어 불안정이 SGS TKE를 유발시켜 난류가 발생한 것으로 분석되었다. M2 사례는 2006년 11월 22일 2330 UTC때에 목포 지역의 약 8.5 km 상공에서 발생한 사례로써, 이 시기 상층 중관 규모 대기는 만주지역에서 북해도쪽으로 향하는 한대 제트와 동중국해에서 일본 열도로 향하는 아열대 제트 사이에 한반도가 위치하고 있었다. RDAPS 재분석장 및 WRF 모델 실험 결과, 두 개의 대기흐름이 합류하는 지역 중 고기압성 곡률을 가지는 아열대 제트의 고기압성 수평시어 영역에서 국지적으로 고기압성 시어흐름이 강화되어 절대 와도가 0보다 작은 관성 불안정 지역이 나타났으며, 이 지역이 SGS TKE 및 관측된 난류 지점과 일치하였다. M3 사례는 2003년 2월 16일 0450 UTC에 군위 지역 약 6 km 상공에서 발생한 사례로, 한반도에서의 복잡한 산악 지형에 의해 발생하는 산악파를 보다 현실적으로 모의하기 위하여 0.37 km의 수평 해상도를 가지는 D5에서의 수치실험을 추가적으로 수행하였다. 중관규모 일기도에서는 시베리아 고기압의 확장으로 인해 한반도의 지표 근처에서는 북풍 계열의 바람이 우세하였고, 상층에서는 기압골에 의한 서풍 계열의 바람이 지배적이었다. 고해상도 수치 실험 결과, 동서로 놓인 소백산맥으로 유입되는 지표 근처의 북풍이 산악파를 발생시켰으며, 이 산악파가 상층 제트코어 하부의 연직 시어 증가로 인해 상대적으로 Ri 가 낮은 지역으로 연직 전파되면서 국지적 시어 불안정 ($Ri < 0.25$)이 발생되어 난류 (SGS TKE > 0)가 발생 하였다. 모의된 난류지역은 실제 발생지역과는 다소 거리가 존재하는 것으로 나타났다지만, 이는 PIREP 자료의 관측 위치에 대한 불명확성을 감안할 때, 충분히 타당한 것으로 판단되었다.

선행연구에서 유형화된 각기 다른 난류발생 메커니즘에서의 사례들을 선정하고, 이들에 대한 수치실험을 통하여 정확한 메커니즘을 살펴 봄으로써, 선행 연구 유형화에 대한 검증과 자세한 난류발생 시나리오를 확인할 수 있었다. 이러한 고해상도 실험을 통한 다양한 난류 사례에 대한 분석은 더욱 정확하고 개선된 난류발생 메커니즘에 따른 유형화 연구에 도움을 줄 것이며, 일기예보 모델을 통한 통합난류예측시스템 예측자료의 원인 분석 및 사후 분석에 유용할 것이다. 이는 궁극적으로 한국에서의 청천난류 예측성을 향상시켜 청천난류로 인한 다양한 인적, 물적 피

해를 최소화하는데 도움을 줄 것이다.

감사의 글

이 연구는 2007년도 정부 재원 (교육인적자원부 학술연구조성사업비)인 한국학술진흥재단 (KRF-2007-313-C00778)의 지원과 2012년도 기상청 기상지진기술 개발사업 (CATER 2012-2011)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김정훈, 전해영, 장욱, R. Sharman, 2009: 한국의 청천난류 예보 시스템에 대한 연구. Part II: Graphical Turbulence Guidance (GTG) 시스템. *대기*, **19**(3), 269-287.
- 김정훈, 전해영, 2011: 통합지역모델을 이용한 한국형 중상층 항공난류예측시스템 개발. *대기*, **21**(4), 497-506.
- 민재식, 전해영, 김정훈, 2011: 한국에서 발생한 청천난류 사례에서 나타나는 중관규모 대기상태에 대한 연구. *대기*, **21**(1), 69-83.
- 장욱, 전해영, 김정훈, 2009: 한국의 청천난류 예보 시스템에 대한 연구. Part I: 한국형 통합 난류 예측 알고리즘. *대기*, **19**(3), 255-268.
- 전해영, 정준희, 오재호, 김정우, 1996: 대기 대순환에 미치는 중력과 항력의 효과, *한국기상학회지*, **32**(4), 581-592.
- Clark, T. L., W. D. Hall, R. M. Kerr, D. Middleton, L. Radke, F. M. Ralph, P. J. Nieman, and D. Levinson, 2000: Origins of aircraft-damaging clear-air turbulence during the 9 December 1992 Colorado downslope windstorm.: Numerical simulations and comparison with observations. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 1105-1131.
- Derber, J. C., D. F. Parrish, and S. J. Lord, 1991: The new global operational analysis system at the National Meteorological Center. *Wea Forecasting*, **6**, 538-547.
- Doyle, J. D., M. A. Shapiro, Q. Jiang, and D. L. Bartels, 2005: Large-amplitude mountain wave breaking over Greenland. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3106-3126.
- Dutton, J., and H. A. Panofsky, 1970: Clear-air turbulence: A mystery may be unfolding. *Science*, **167**, 937-944.
- Ellrod, G. P., and D. L. Knapp, 1992: An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. *Wea. Forecasting*, **7**, 150-165.
- Ellrod, G. P., P. F. Lester, and L. J. Ehemberger, 2003: *Clear air turbulence*. In *Encyclopedia of Atmospheric*

- Sciences*, vol. 1, edited by J. R. Holton *et al.*, Academic Press, 393-403.
- Hong, S. Y., and J. O. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129-151.
- Janjic, Z. I., 2002: Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model. NCEP (National Centers for Environmental Prediction) Office Note, No. 437, 61 pp.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170-181.
- Kaplan, M. L., A. W. Huffman, K. M. Lux, J. D. Cetola, J. J. Charney, A. J. Riordan, Y. L. Lin, and K. T. Waight III, 2005: Characterizing the severe turbulence environments associated with commercial aviation accidents. Part II: Hydrostatic mesoscale numerical simulations of supergradient wind flow and streamwise ageostrophic frontogenesis. *Meteor. Atmos. Phys.*, **88**, 129-153.
- Kim, J.-H., and H.-Y. Chun, 2010: A numerical study of clear air turbulence (CAT) encounters over South Korea on 2 April 2007. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 2381-2403.
- _____, and _____, 2011: Statistics and possible sources of aviation turbulence over South Korea. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 311-324.
- _____, _____, R. D. Sharman, and T. L. Keller, 2011: Evaluations of upper-level turbulence diagnostics performance using the Graphical Turbulence Guidance (GTG) and pilot reports (PIREPs) over East Asia. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1936-1951.
- _____ and _____, 2012: A numerical simulation of convectively induced turbulence (CIT) above deep convection. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 1180-1200.
- Kim, S.-Y., _____, and D. L. Wu, 2009: A study on stratospheric gravity waves generated by Typhoon Ewiniar: Numerical simulations and satellite observations. *J. Geophys. Res.*, **114**, D22104, doi:10.1029/2009JD011971.
- Knox, J. A., 1997: Possible mechanism of clear-air turbulence in strongly anticyclonic flow. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3808-3824.
- _____, D. W. McCann, and P. D. Williams, 2008: Application of the Lighthill-Ford theory of spontaneous imbalance to clear-air turbulence forecasting. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 3292-3304.
- Lane, T. P., J. D. Doyle, R. Plougonven, M. A. Shapiro, and R. D. Sharman, 2004: Observations and numerical simulations of inertia-gravity waves and shearing instabilities in the vicinity of a jet stream. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 2692-2706.
- _____, _____, R. D. Sharman, M. A. Shapiro, and C. D. Watson, 2009: Statistics and dynamics of aircraft encounters of turbulence over Greenland. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2687-2702.
- National Transportation Safety Board, 2009: U.S. Air Carrier Operations, Calendar 2005. Annual review of aircraft accident data. NTSB/ARC-09/01, Washington, D. C., 66 pp.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-4751STR, 88 pp.