creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266583

2018년 2월
석사학위논문

기후변화와 항공난류의 연관성 연구

조선대학교 대학원

대기과학과

정 욱

2018년 2월 석사학위논문

기후변화와 항공난류의 연관성 연구

정 욱

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기후변화와 항공난류의 연관성 연구

Jet stream associated with Climate Change intensifies Turbulence

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원

대기과학과

정 욱

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기후변화와 항공난류의 연관성 연구

지도교수 : 류 찬 수

이 논문을 이학 석사학위 신청 논문으로 제출함.

2017년 10월

조선대학교 대학원

대기과학과

정 욱

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

정욱의 석사학위 논문을 인준함

위원장 기 상 청 공학박사 이 종 호 (인)

위 원 조선대학교 교 수 박 근 영 (인)

위 원 조선대학교 교 수 류 찬 수 (인)

2017년 11월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

List of Figures iii
ABSTRACT v

Ⅰ. 서 론 1

Ⅱ. 자료 및 연구방법 3

Ⅲ. 본 론 4
A. 기후변화의 실제 4
B. 기후변화의 증거들 5
C. 해들리셀의 확장 14
D. 극강화 15
E. 제트류 16
F. 난류의 원인 16
G. 난류의 종류 17
H. 다양한 수치예보 지수 18
I. 난류 발생 패턴 19
J. 한반도 상공에서 제트류의 속도와 그 배경 22
K. 한반도 상공에서 발생한 난류 검증 24

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅳ. 결 론 28
참고문헌 29

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of figures

Fig. 1. Kyoto Protocol to United Nations Framework Convention on Climate Change to regulates six greenhouse gases, 1997. ····· 5

Fig. 2. Air temperature anomalies over land and over ocean, NASA, Jan to Dec: 1980-2017, Data were obtained from the NCEP/NCAR Reanalysis at http://www.esrl.noaa.gov/psd/. ····· 6

Fig. 3. Arctic Oscillation Anomaly, Dec to Feb: 1950-2017, data were obtained from the NCEP/NCAR reanalysis at http://esrl.noaa.gov/psd/. ····· 7

Fig. 4. 1000hPa air temperature seasonal correlation, 1979-2016: Dec-Jan, NECP/NCAR. Data obtained from the NCEP/NCAR reanalysis at http://esrl.noaa.gov/psd/. ····· 8

Fig. 5. 300hPa zonal wind seasonal correlation, 1979-2016: Dec-Jan, NCEP/NCAR. Data were obtained from the NCEP/NCAR reanalysis at http://www.esrl.noaa.gov/psd/. ····· 9

Fig. 6. 300hPa air temperature(upper) and 300hPa zonal wind(lower), 1980-1990: Dec-Feb, NCEP/NCAR. Data were obtained from the NCEP/NCAR Reanalysis at http://www. esrl.noaa.gov/psd/. ····· 10

Fig. 7. 300hPa air temperature(upper) and 300hpa zonal wind(lower), 1990-2000: Dec-Feb, NCEP/NCAR. Data were obtained from the NCEP/NCAR Reanalysis at http://www. esrl.noaa.gov/psd/. ····· 12

Fig. 8. 300hPa air temperature(upper) and 300hPa zonal wind(lower), 2000-2010: Dec-Feb, NECP/NCAR. Data were obtained from the NCEP/NCAR reanalysis at http://www. esrl.noaa.gov/psd/. ····· 13

Fig. 9. The pattern of Turbulence connected with jet stream, forecasting clear Air Turbulence for Aviation. The COMET Program, 2016. ····· 21

Fig. 10. 300hPa zonal wind over global scale, 2009-2017 Jan, NCAR/NCEP. Data were obtained from the NCEP/NCAR reanalysis at http://www.esrl.noaa.gov/psd/. ····· 23

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 11. The pattern of breaking turbulence over Korea 2012-2013 , Korea Aviation Meteorological Office. ····· 24

Fig. 12. Typical pattern of South Korea breaking turbulence, 2013 Jan. 10.(upper)and Feb. 6, (down) 300hPa chart, Korea Meteorological Administration. ····· 25

Fig. 13. 300 hPa chart(upper). KMA and MTSAT Image(down) over Japan, 2014 Dec. 16. ····· 26

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Jet stream associated with Climate Change intensifies Turbulence

Jung Wuk
Advisor : Prof. Ryu, Chan-Su, Ph.D.
Department of Atmosphere Sciences,
Graduate School of Chosun University

During the cruise flight of civil aircraft, Turbulence is the greatest threat for aircraft safety. In this research paper, we assume that the climate changes could affect mid-latitude jet stream pattern during winter season.

To verify our assumption, we analysis NCEP/NCAR PSD data to evaluate between past and present environmental factors. Focusing two factors such as 1000hPa air temperature and 300hPa zonal wind.

Reduced temperature gradient affect upper lever zonal wind speed during winter season. With NCEP/NCAR data, we understand reduced temperature gradient influencing zonal wind speed.

Jet stream has a feature that weaker zonal wind makes stronger meridional wind. Climate changes influences mid-latitude of Artic amplification and Hadley cell expansion.

These two factors also manipulate general circulation. To understand between meandering jet stream and turbulence, we used PIREP of KMA and 300hPa chart. Through this research, we have a understanding meandering jet stream affected climate change has a strong relation turbulence during winter season over Korea peninsula.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅰ. 서론

기후변화는 가뭄, 홍수, 산불, 극심한 태풍 뿐 만 아니라 10km 상공 위의 대기의 활동에도 많은 영향을 미치고 있다. 최근 발간된 기후변화에 관한 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제5차 영향평가보고서(2014)에 따르면 “인간이 기후 시스템에 영향을 미치고 있다는 점이 확실하며, 그 정도가 점차 심화되고 있을 뿐만 아니라, 지구상 전 대륙과 해양에 걸쳐 관측되고 있다.”고 하였다. 기후변화의 주된 원인은 인구의 증가와 인류의 산업 활동에 있다. 인간의 산업활동에 의해 만들어진 각종 배기가스는 지구대기의 구성 성분에 영향을 주었다. 그 중에서도 대표적인 것이 CO_2이다. GHG(greenhouse gas)로 이름 지어진 이 기체는 일반적으로 자연, 인위적인 지구대기의 구성물질이며, 지구 표면과 대기 및 구름에 의해 우주로 방출되는 특정 파장 범위를 지닌 적외선 복사열 에너지를 흡수하여 열을 저장하고 다시 지구로 방출하는 기체를 말한다.(IPCC, 2008).

가장 큰 영향을 받은 극지방의 경우 다른 지역 보다 기후변화에 더욱 민감하게 반응하여 지구의 다른 지역보다 두 배 빠른 온도의 증가를 보이고 있다. 이는 중위도 지방과 극지방의 온도 경도를 감소시키고, 이러한 원인으로 한대제트의 속도가 작아지는 원인이 되었다(김경익 등, 2011). 제트는 그 자체의 성격이 역학적으로 활발한 대기의 이동이 있는 지역이므로 난류의 위험이 상존한다. 그러나 제트류의 구성 성분의 하나인 동서풍의 속도 감소는 남북풍의 강화(안중배 등, 2016)로 이어지는데, 이러한 이유로 비행 중 난류에 조우(遭遇)하는 경우가 증가하게 된다.(Thompson & Wallace, 2001).

제트류에 인접한 지역에서 발생하는 난류에 대한 연구는 1950년대부터 시작되었다. 제트류의 속도의 원천은 온대지역과 한대지역의 온도 차이이다. 이 온도 차이에 코리올리 효과가 더해져 편서풍의 제트류가 발생한다. 이 기류는 대기 하층의 고기압과 저기압에 영향을 주고, 받으면서 구불거리며 서쪽에서 동쪽으로 진행한다. 이때 제트류의 수렴과 발산이 이루어지고, 능(ridges)와 곡(troughs)이 만들어져 이 주변에 난류가 발생하게 된다.

제트류로 인해 발생되는 난류의 원인을 알기 위해 많은 연구가 이루어졌다. KHI(Kelvin -Helmholtz Instability)와 같은 바람시어 영향을 기본으로 중력파(Elmar. R. Reiter, 1962), 제트의 상부와 하부에서의 쉬어 불안정(M. A. Shapiro,

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1972), 운동학적 난류지수를 이용한 Ellord Index(Ellrod and Knapp, 1992), 강한 고기압성 흐름이 발생하는 난류에 대한 연구(Knox, 2008) 등이 진행 되었다.

가장 널리 사용 되는 방법은 Ellrod index로 조종사가 비행 전에 참고하는 SIGWX (Significant Weather Chart)의 난류예보가 Ellrod index로 계산되었다. 최근에는 난류예보의 정확성을 높이기 위해 여러 가지 수치예보 공식을 동시에 계산하고, 그 결과를 PIREP(Pilot Report)와 비교해 결과를 도출해 내는 GTG(Graphical Turbulence Guidance) 시스템이 미국 해양대기국(National Oceanic Atmospheric Administration, NOAA)에서 만들어졌다. 또한 항공기와 지상의 데이터 링크 기술의 발달로 AMDAR (Aircraft Metrology Data Relay)방식이 적용되고 있으나 아직 기술의 적용이 미약한 상태이다. 우리나라 항공 기상청에서도 아시아나항공과 대한항공의 몇몇 기체에 이 장비를 장착하여 기상자료를 송신하고 있으나 기초적인 기상정보만 송신 할 뿐 난류에 대한 정보는 교류되지 않고 있다.

난류에 대한 대부분의 연구는 난류의 발생원인과 그 결과의 검증에 주로 목표가 맞추어져 있고, 기후변화와 관련하여 난류에 대한 연구는 미비하다. 영국의 Paul William (2013)은 대서양 지역에 기후변화로 인한 난류의 증가에 대해 연구 하였고, 미국의 Jennifer(2015)는 기후변화로 제트류의 동서풍이 풍속이 줄어들어 기상이변이 일어난다는 연구를 실시하였다. 그러나 아직 한반도에서 기후변화로 인해 영향을 받는 제트류에 대한 연구는 미약한 실정이다.

본 연구에서는 기후변화로 인해 한반도 상공에 제트류가 영향을 받았고, 제트류로 인한 난류의 영향에 대해 알아보고자 한다. 먼저 기후변화가 지구의 대기에 어떤 영향을 주었는지와 그 원인 및 제트류의 역학적 특성과 난류가 발생하는 원인을 알아보고자 한다. 마지막으로 2012년부터 2013까지 수집된 PIREP과 300hPa 상층차트와 재분석자료를 이용하여 변형된 제트의 형태와 난류의 발생지역을 알아보고자 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅱ. 자료 및 연구 방법

기후변화의 증거를 객관적으로 알아보기 위해 미국 국립환경연구소/국립기상연구소 물리과학국(National Centers for Environmental Prediction/National Centers for Atmospheric Research, NCEP/NCAR, Physical Science Division, PSD) 연구소에서 작성한 지표면과 해양의 온도 차이를 연구한 데이터와 미국 설빙자료센터(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)의 극지방 해빙의 크기를 조사해 기후변화로 인한 극지방의 빙하 크기를 조사하였고, 미국 국립환경예보센터와 미국 국립기상연구소의 자료로 만든 1000hPa 기온과 300hPa에서의 동·서풍에 대한 이상현상의 재분석자료를 그래픽하여 해석하였다. 이를 통해 기후변화로 인한 고고도 동·서풍의 이상 현상을 알 수 있었다. 로스비파의 형태에서 동·서풍의 약화는 남·북풍의 강화로 이어진다.(Thompson & Wallace, 2001).

약해진 동·서풍의 제트류에서 능과 골이 발달하기 때문에, 제트류 부근에서 발생하는 난류에 대해 2012-2013년 겨울기간 동안 보고된 조종사난류보고를 분석하였고, 2014년 실제 난류로 인해 발생한 사건 때의 고고도 기상차트와 위성사진을 비교해, 기후변화로 인한 제트류에 대한 영향을 분석하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅲ. 본론

A. 기후변화의 실제

왜 지구 온난화에서 기후변화로 표현 방법을 바꾸었을까?

온난화라는 용어는 인류의 산업활동의 부산물로 오염된 대기로 인해 올라간 대기의 온도변화만을 언급하는 용어이지만, 이 온난화로 파급되는 다양한 현상은 온난화만으로 기술하기에는 너무 제한적이어서 기후변화라는 용어를 사용하게 되었다.

그렇다면 기후변화는 실제인가?

과학자들은 아직은 대중에게 감각적으로 확실히 느껴지지 않는 사실에 대하여 과학적인 데이터를 제시하였다. 인류는 주변 환경에 잘 적응하고, 또한 망각의 동물이기도 하다. 변화된 대기의 환경에 대하여 적응하거나, 지역적으로 영향이 덜한 지역에 거주하는 경우 또한 기후변화 협약으로 인해 자신의 이익이 침해 받는 경우 자연의 변화를 무시하거나 외면하기도 한다. 이런 이유로 UN(United Nations)에서 IPCC를 만들게 되었고, 선진국뿐 아니라 개발도상국을 포함하여 모든 국가에게 참여를 독려하고 있다. 대기에는 국경이 없기 때문에 몇몇 국가만 참여하고 나머지 국가는 참여하지 않는 다면 UN에서 하는 논의는 무의미하기 때문이다. 기후협약은 참여 국가에 대해 자발적인 공해물질 감소를 권고하는데 이는 국가 전반적인 산업구조의 개편과 이해 당사자들 간의 협의가 전제 되어야 하기 때문이다.

본 연구에서 논의되는 과학적 증거들로 우리가 몸소 느끼지는 못하지만 지구상에서 벌어지는 사실들을 열거함으로써 기후변화가 실제하고 우리의 삶에 어떤 영향을 미치는지, 더욱이 우리가 관심 있어 하는 대기에서 발생하는 난류의 발생과 어떤 관계를 갖는지 알아보았다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

B. 기후변화의 증거들

지구온난화란 19세기 후반부터 시작된 산업활동, 잉여생산물의 증가 및 인구의 급증 등으로 대기 오염물질의 배출에 의한 지표와 해양의 온도변화를 말한다. 특히, 인류의 산업활동으로 만들어진 배기가스를 교토의정서(1997년 12월 11일)에서는 6개의 대표적온실가스로 규정하고 있다. 88.6%를 차지하는 이산화탄소(CO_2), 4.8%를 차지하는 메탄(CH_4), 3.8%를 차지하는 수소불화탄소(HFC_5)/과불화탄소(PFC_5)/육불화황(SF_6), 2.8%를 차지하는 이산화질소(N_2O)등 으로 구성되어있다. (Fig. 1).

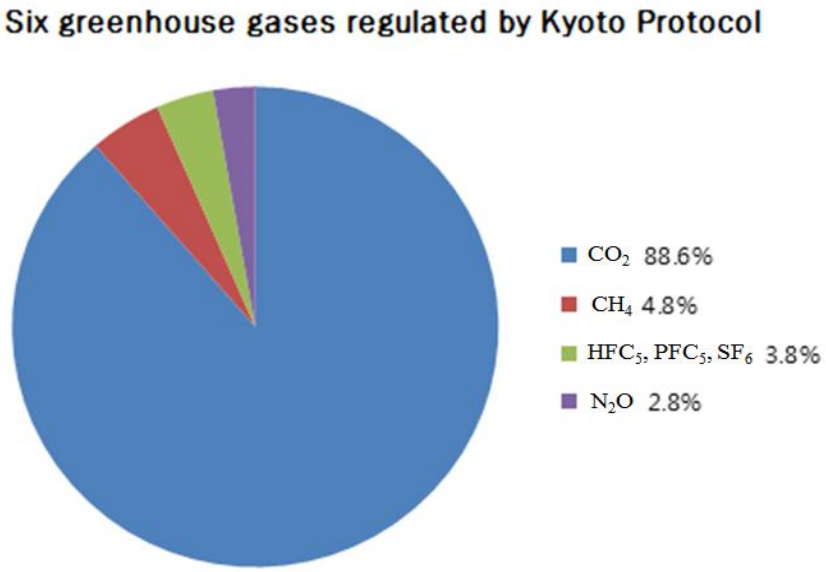


Fig. 1. Kyoto Protocol to United Nations Framework Convention on Climate Change to regulates six greenhouse gases, 1997.

IPCC 5차 평가보고서에 의하면 1880-2012년 기간 동안 0.85(0.65-1.06)℃의 지표면 기온변화가 나타났다. 이중 대기는 기후시스템에서 저장된 에너지는 1%를 차지하고, 해양은 90%를 차지한다. 해양은 기후시스템에 저장된 에너지 증가에 지배적인 영향을 미치고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

전 지구 규모에서 1971-2010년 사이 해양 표면에서 약 75m 깊이까지 약 0.11℃ 기온이 상승하였다. 북극의 연평균해빙은 1979-2012년간, 매 10년마다 3.5-4.1% 범위의 속도로 감소하였다. 또한 1901-2010년 사이 전 지구 평균 해수면은 0.19(0.17-0.21)m 상승하였다. 이산화탄소, 메탄 및 아산화질소는 주로 화석연료에 의한 배기가스의 결과로 1970-2010년 전체 온실가스의 배출량의 75%를 차지하였다. IPCC 보고서에서 "전망하는 미래의 기후는 과거에 인위적 배출로 인해 초래된 온난화뿐 아니라, 미래 인위적 배출량과 기후변동성에 따라 결정된다" 고 하였다. 1986-2005년을 기준으로 2016-2035년 중 평균지표면온도는 0.3~0.7℃의 범위가 될 가능성이 높고, 1850-1900년 기준으로 2081-2100년의 평균지표면온도는 1.5℃를 초과 할 가능성이 높다고 전망하였다. 이 시나리오에서는 만약 현 시점에 사용하는 온실가스를 지속적으로 배출하고, 인구가 증가함에 따라 추가로 증가된 온실가스를 배출한다면 21세기 중반부터 지구의 표면온도는 급속하게 증가된다고 보고하였다 (IPCC, 2014).

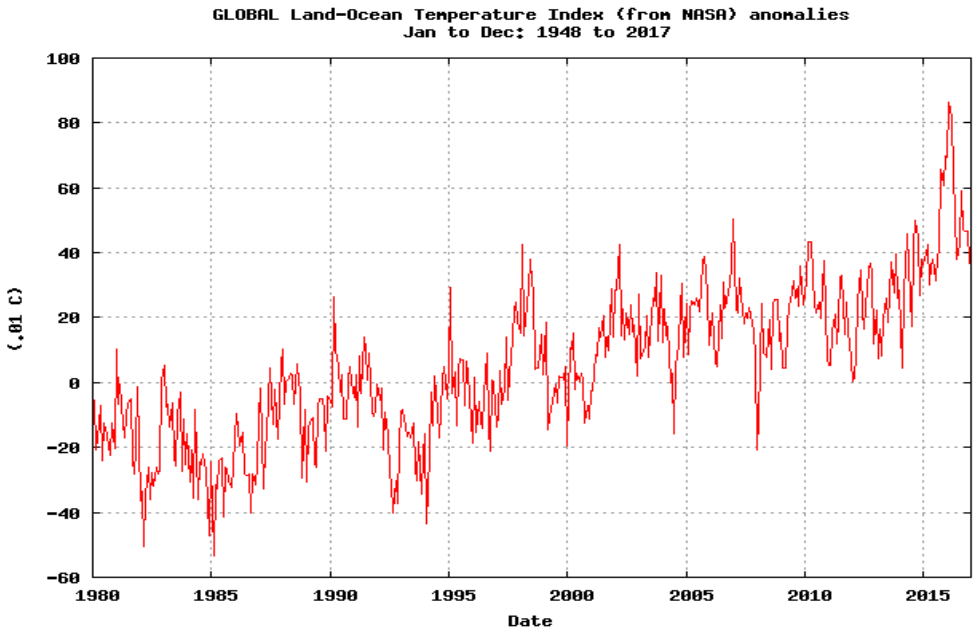


Fig.2. Air temperature anomalies over Land and over Ocean, NASA, Jan to Dec: 1980-2017, Data were obtained from the NCEP/NCAR Reanalysis at http://www.esrl.noaa.gov/psd/.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 2는 NCEP/NACR PSD의 자료로 지표면온도와 해양수면온도의 이상(anomaly)을 나타내고 있다. 이 그래프에 의하면 지표면온도의 이상은 1980년대 중반부터 급격하게 증가하고 있다. 또한 해양은 대륙에 비해 비열이 크기 때문에 증가하는 정도가 완만함을 알 수 있다. 지구온난화의 가장 큰 영향을 받는 곳은 극지방이다. 극지방의 기후변화는 중위도지역의 악기상의 주요한 원인이다. 가장 많이 알려진 현상은 극 확장(arctic amplification)이다. 극 확장이란 온실가스에 의한 순복사 균형의 변화가 극 이외의 지방보다 극지방에 더 큰 온도 변화를 일으키는 현상을 말한다.(이숙영. 2014). 극 확장은 극지방의 눈과 얼음 면적의 감소로 극지방에 설빙이 감소하여 육지가 증가하게 되는 것을 말한다. 육지의 증가는 지구 장파복사 균형에 영향을 주어 그 이전 보다 극지방의 온도가 증가하게 만들고, 온도의 증가는 극지방의 증발을 증가시켰다. 이로 인해 구름의 양이 증가되었고, 추가적인 지구의 장파복사에 영향을 주어 극지방의 평균온도를 높이는 역할을 하였다. (IPCC AR5 2014, Screen and Simmonds, 2010).

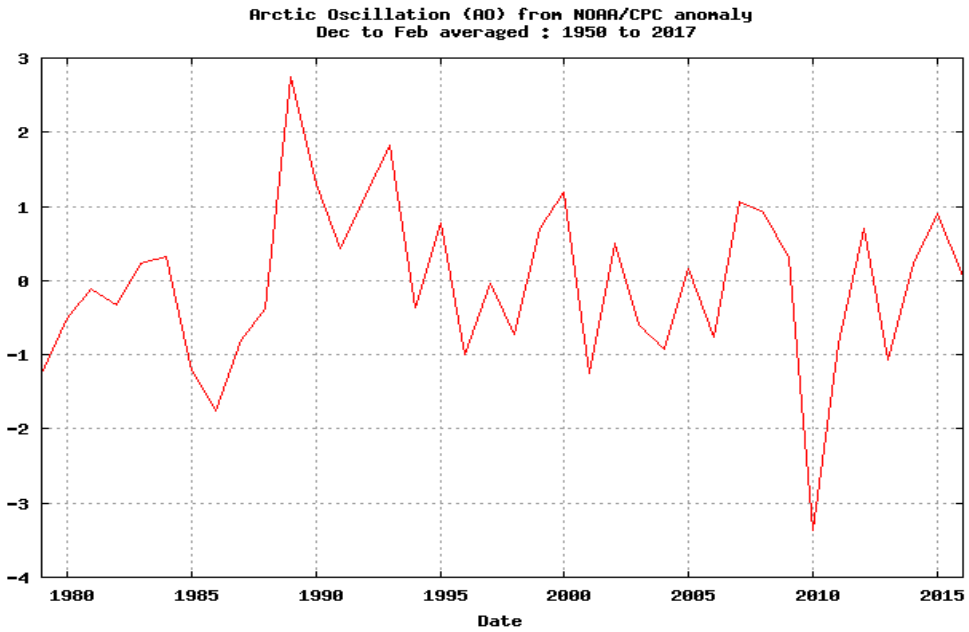


Fig. 3. Arctic Oscillation Anomaly, Dec to Feb: 1950-2017, data were obtained from the NCEP/NCAR reanalysis at http://esrl.noaa.gov/psd/.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 3은 1950년부터 2017년 까지 북극 확장에 따른 북극진동(arctic oscillation)을 나타낸다. 이 자료에 의하면 1990년대 중반부터 음의 값(negative phase)을 보이고 있다. 이는 북극지역의 빙하크기 감소의 영향으로 보이고 북극진동으로 인해 극지방과 아열대지방의 가장자리에 위치한 제트류의 형태에 많은 영향이 있을 것으로 판단된다.

미국 NSIDC(National Snow and Ice Data Center)에서 1970년대 후반부터 2016년 까지 9월 평균해빙의 크기 자료에 의하면 1980년의 북극지역 해빙의 크기는 950만km^2에서 2016년 600만km^2로 약 40%가 감소하였다.

극지방의 해빙은 기후시스템에 중요한 역할을 한다. 여름기간 동안 극지방의 해빙은 외부로부터 태양복사에너지의 약 70% 정도를 반사한다. 만약 해빙이 사라지면 지표면은 외기로부터 오는 태양복사에너지를 흡수하고, 극지방의 잉여에너지는 해양과 극 주변의 온도를 상승시킨다.(Meier and Savoie, 2002).

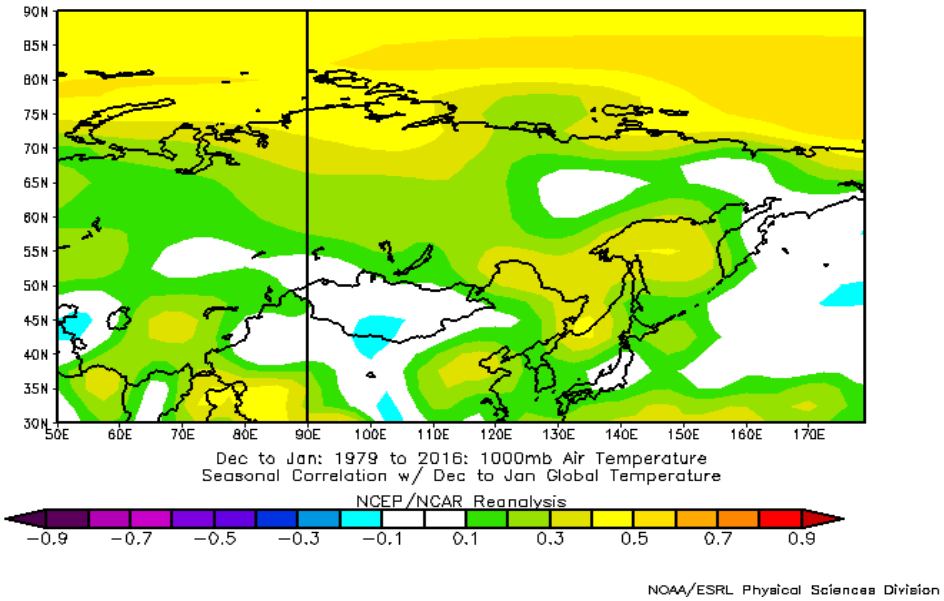


Fig.4. 1000hPa air temperature seasonal correlation, 1979-2016: Dec-Jan, NECP/NCAR. Data obtained from the NCEP/NCAR reanalysis at http://esrl.noaa.gov/psd/.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig.4는 NECP/NCAR의 PSD자료로, 1979-2016년 사이의 겨울철 1000hPa에서 측정한 온도를 재분석한 것이다. 나중에 사용될 PIREP(Pilot Report)와 연동해서 해석하기 위해 측정 범위를 한반도 주변에서부터 극지방까지로 한정하였다. 이 재분석 자료를 보면, 극지방의 온도가 전반적으로 상승한 것을 알 수 있다. 이렇게 상승한 극지방의 온도는 중위도지역과 극지방의 온도경도를 감소시켜 중위도지역과 극지방 사이에 형성된 제트류의 풍속을 감소시킨다.(Jennifer and Stephen, 2015).

Fig. 5의 재분석자료는 1979-2016년 사이 300hPa에서의 동서풍의 이상을 나타낸다. 유라시아대륙 내부에서는 동서풍의 음의 이상(negative anomaly)을 나타내고 있다. 특히 제트류가 존재하는 중위도 부근에 넓은 부분이 zonal wind의 감소를 보라색과 청색 등으로 나타내고 있다. 한반도 부근에서 가속되는 제트류 현상은 이후 논의될 그림에서도 동일 한 현상을 나타낸다.

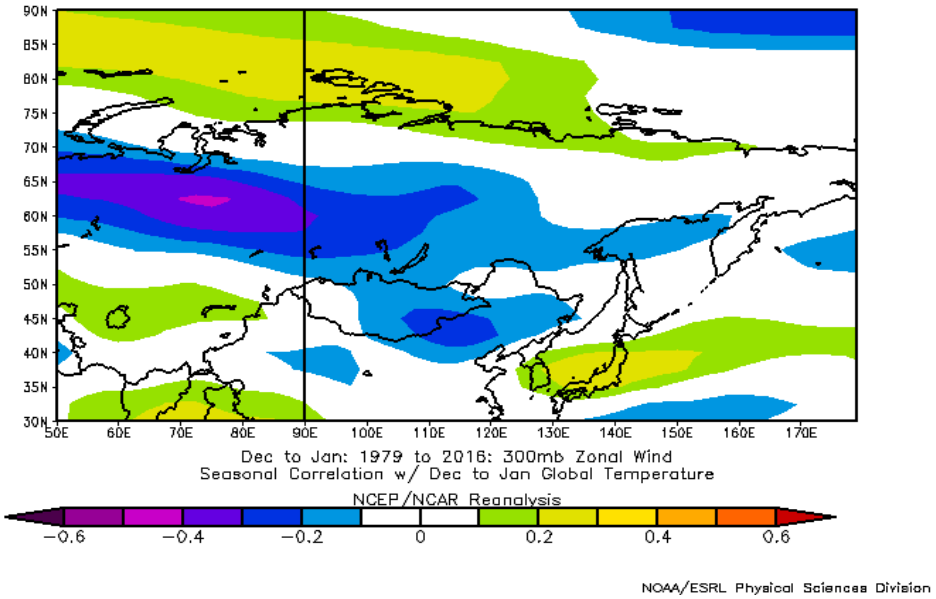
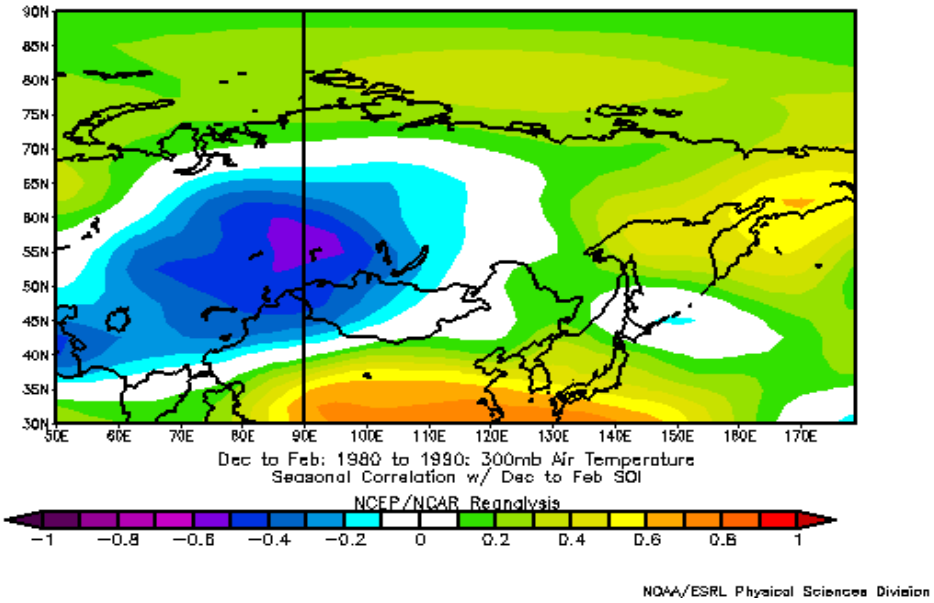


Fig.5. 300hPa zonal wind seasonal correlation, 1979-2016: Dec-Jan, NCEP/NCAR. Data were obtained from the NCEP/NCAR reanalysis at http://www.esrl.noaa.gov/psd/.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



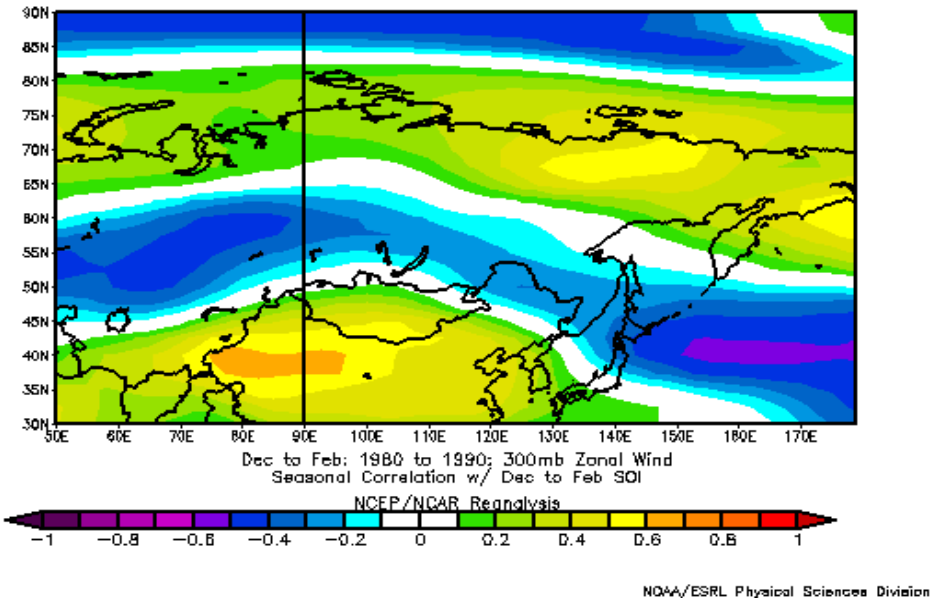


Fig.6. 300hPa air temperature(upper) and 300hPa zonal wind(lower), 1980-1990: Dec-Feb, NCEP/NCAR. Data were obtained from the NCEP/NCAR Reanalysis at http://www.esrl.noaa.gov/psd/.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

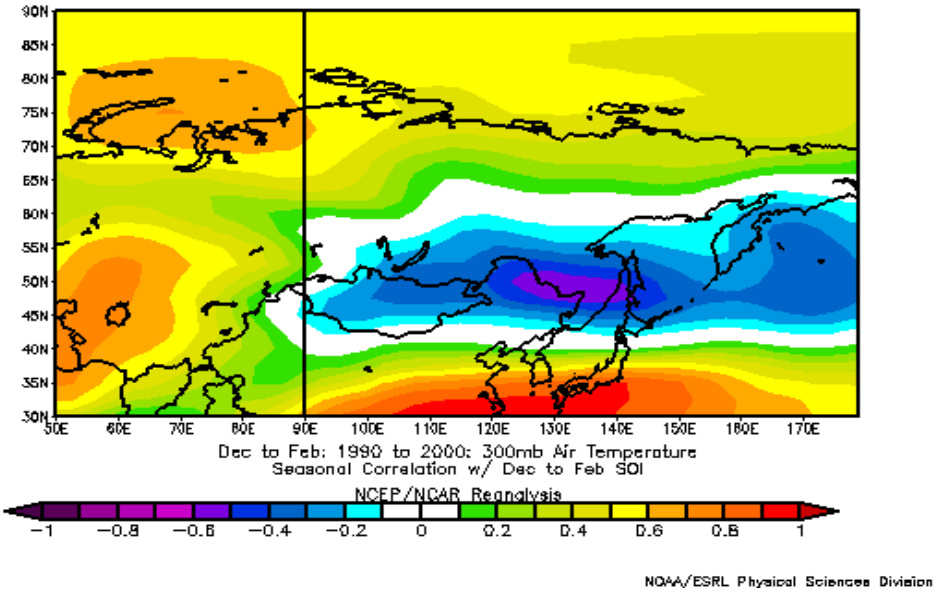
Fig.6은 1980-1990년 300hPa의 기온과 동서풍의 관계를 보여주는 재분석 자료이다. 300hPa의 기온이상분포도를 보면 70N 이상은 기온이 모두 상승하였다. 특히, 한반도와 일본 중부지방 Russia Kamchaka 반도지역 및 중국의 남부지역의 기온이 상승하였고, Mongolia와 Russia 내륙의 기온이 낮음을 알 수 있다. 이때 동서풍은 Russia 내륙부터 일본 상공까지 풍속의 감소한 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 1990-2000년의 기온이상분포도로 70N 이상의 지역이 80년대 보다 더워졌고 특히 50- 80E 지역에서 증가되었다. 45-65N 사이의 Mongolia 지역부터 일본 상공까지는 기온이 낮아졌다.. 특히, Russia Vladivostok 지역의 기온이 낮았다. 이때 동서풍은 한반도와 일본 상공에서 풍속이 증가하나 Vladivostok 상공에서는 상대적으로 느리게 나타났다.

Fig. 8은 2000-2010의 기온이상 분포도로 Mongolia , Russia 대부분의 지역에서 낮은 온도를 보이고, 70N 이상의 지역에서는 온도의 증감을 보이지 않고 있다. 그러나 40N 이남의 지역에서는 기온의 상승이 보인다. 이때의 동서풍은 한반도 남부지역에서는 풍속의 증가를 보이나 Russia 내륙지역에서는 풍속이 느려졌다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



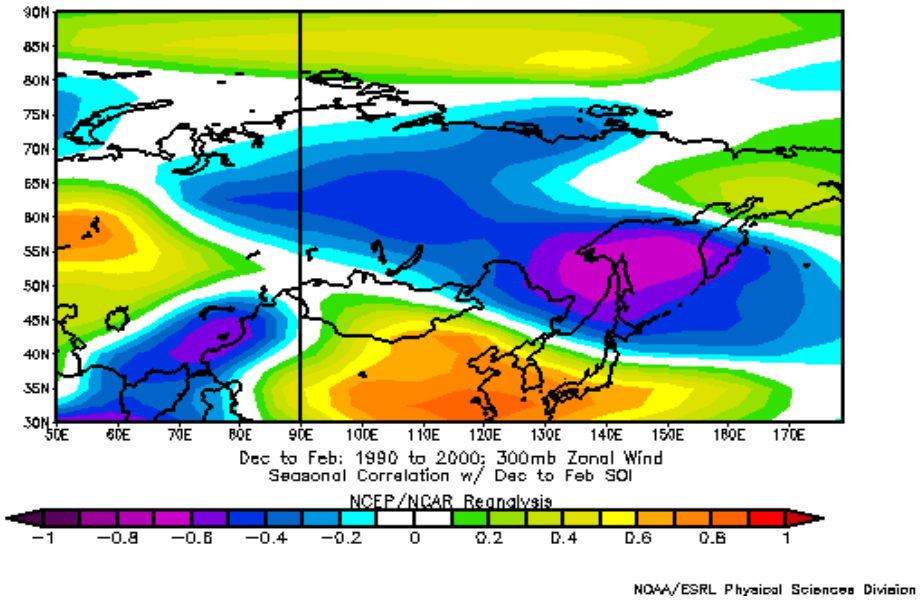
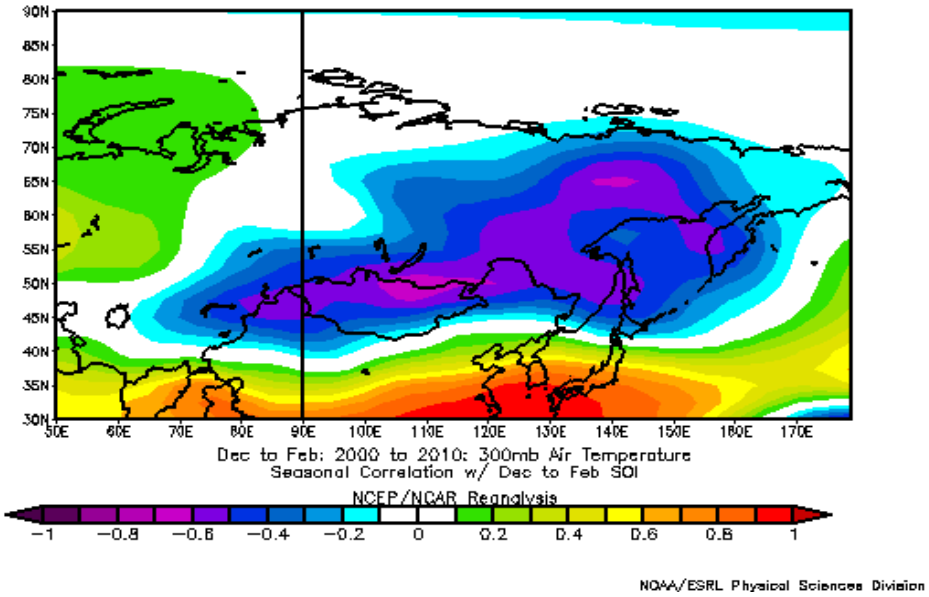


Fig.7. 300hPa air temperature(upper) and 300hpa zonal wind(lower), 1990-2000: Dec-Feb, NCEP/NCAR. Data were obtained from the NCEP/NCAR Reanalysis at http://www.esrl.noaa.gov/psd/.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



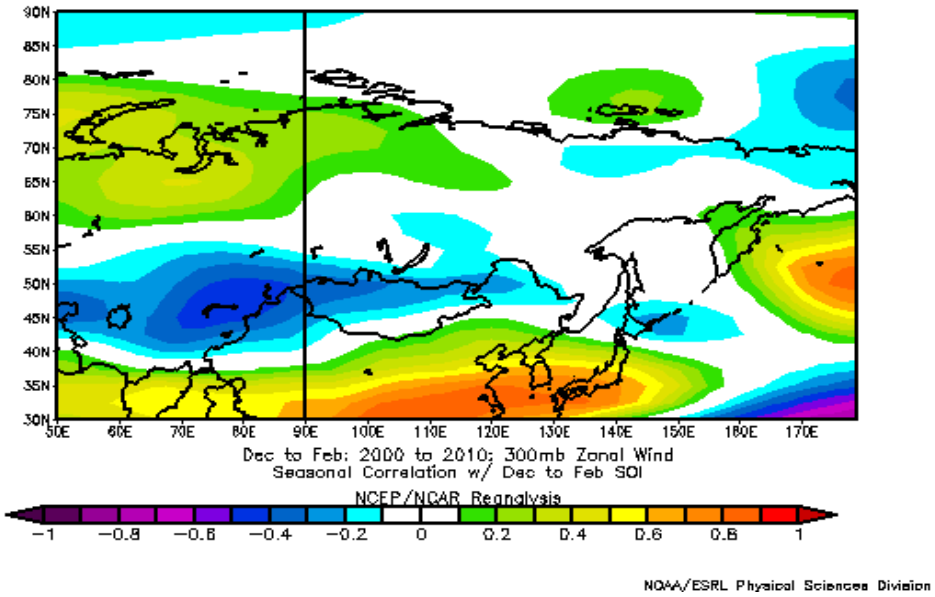


Fig.8. 300hPa air temperature(upper) and 300hPa zonal wind(lower), 2000-2010: Dec-Feb, NECP/NCAR. Data were obtained from the NCEP/NCAR Reanalysis at http://www.esrl.noaa.gov/psd/.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

위의 자료들에 의하면 기후변화에 의한 기온의 증가가 전 지구적으로 관찰 되었고, 특히 극지방의 기온변화가 크게 나타났다. 극지방의 기온증가는 중위도지역의 기상이변에 직접적인 영향을 주었고, 극지방과 중위도 사이에 위치한 제트류의 활동에 영향을 주는 주요 인자로 확인 되었다. 특히 대륙 내부에 위치한 동서풍이 겨울철에 감소하였다. 감소된 동서풍의 성분은 중위도 제트류의 활동에 직접적인 영향을 주는 주요 요소이다. 한편, 1979-2016년 사이에 해빙면적은 약 40% 줄어들었고, 같은 기간 북아메리카의 500hPa의 평균풍속은 10% 감소하는 결과를 가져왔다(Jennifer, 2015).

이상에서, 기후변화로 인한 겨울철 극지방의 온도 상승으로 중위도 지역과의 온도경도가 감소하였다. 이 온도의 변화는 동서풍의 풍속에 영향을 주었고, 제트류의 풍속과 풍향에 영향을 준 것으을 알 수 있다.

C. 해들리셀의 확장

해들리셀(Hadley Cell)은 기온의 차이도 발생하는 대기의 남북순환이다. 열대의 뜨거운 대기가 잠열을 방출하며 상승하고, 이 흐름은 지수의 양의 방향인 극 쪽으로 향한다. 이후 기온이 하강하여 열적에너지가 소실되면 아열대지역으로 하강하며 열대로 돌아오는 대기의 순환을 말한다.

이러한 대기의 순환이 열대지역의 열에너지를 아열대지역으로 이동시키는 역할을 하며, 지구의 기후 형성과 변화에 중요한 역할을 한다(Diaz and Bradley, 2004). 최근 재분석 자료의 연구에 의하면 해들리순환의 겨울철 순환은 과거 수 십 년 동안 그 크기가 확장하는 양상을 보이고 있다(Quan 2002, Hu 2005, Mitas and Clement 2005). 많은 연구들에서 1979년 이후 해들리셀의 확장이 확인되었다. 예를 들면 위성의 microwave sounding unit에 자료에 의하면 중위도 지역의 대류권 활동의 강화가 확인되었다(Fu, 2006). 이러한 대류권의 온도 승온이 열대의 대기를 확장 시켰고 열대 대류권에 귀퉁이에 위치한 아열대 제트의 극지방으로 이동이 확인되었다(fu, 2006). 북반구에서 행해진 오존의 경향성에 대한 연구도 이를 뒷받침하는데 아열대 대류권의 경계가 2.75°가 1979-2003년 사이에 북극 쪽으로 이동된 것을 확인 하였다. Seidel and Randel(2007)이 한 조사에 의하면 열대 지역의 확장이 1979-2005년 사이 4.25° 관찰되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그러나 이와는 다른 생각을 갖고 있는 연구도 있다.(Trenberth, 2003; Held and Soden, 2006).

IPCC의 AR4의 A2시나리오에 의한 모의에 의하면 해들리셀의 확장(0.6°/degree)이 관찰되었다. AR4의 결과에서 보면 해들리셀의 확장이 열대지역의 권계면 높이가 높아져 라기 보다, 아열대지역의 온난화 영향으로 경압대기(기온은 기압뿐만 아니라 공간의 위치적 함수)파의 활동이 약해져서 라고 보고하였다(IPCC AR4, 2014).

이러한 지구온난화에 따른 해들리셀의 확장은 열대에서 아열대 지역에 이르는 대기의 대순환에 영향을 미칠 뿐만 아니라 아열대와 극지방의 순환에도 영향을 미친다. 특히 남북의 줄어든 온도경사는 경압대기의 파장이 약해지는 주요 요인으로 인식되고 있다(Held, 2000).

D. 극 강화(Arctic Amplification)

지구온난화는 열대의 대기 순환 뿐 아니라 극지방의 기후에도 영향을 미친다. 극지방의 온도변화는 지구의 다른 지역보다 2배 빠른 온도 상승을 보인다. 이러한 승온이 가속되는 이유는 극지방 온도 상승으로 인해 얼음과 눈이 사라져 그 아래 감춰져 왔던 대지를 드러내게 되고 이는 지표면의 반사도(albedo)를 줄이는 역할을 한다. 지표면의 변화는 지표의 일사량 흡수율 변화와 눈과 얼음이 사라지는 것에 영향을 미친다. 또한 해빙이 사라지면서 북극해의 증발은 가속되고, 잉여 수증기입자는 포화되어 구름을 형성하기도 한다. 이는 극지방의 온도를 보온하는 역할을 하여 극지방의 온도를 상승시키는 역할을 하기도 한다(Jennifer, 2015). 증가된 극 강화(arctic amplification)로 아열대 지역과 한대지역의 온도경도의 감소로 권계면 근저에 존재하는 동서류의 감소에 중요한 인자가 된다(Wallace and Hobbs, 1977). 온도경도의 약화는 극진동(arctic oscillation/North Annular Mode(AO/NAM)의 음의 현상(negative phase)을 증대하는 역할을 하고, 이는 남북류(meridional wind)의 강화와 연관이 있고, blocking과 아열대지역의 악기상을 동반하기도 한다(Thompson and Wallace, 2001). 제트류 능의 북쪽으로 향하는 성분의 약화 또한 남북류 강화에 영향을 준다.(Jennifer, 2012).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

결과적으로 극지방으로 향하는 기압경도력의 감소는 극 강화를 강하게 하였고, 동서류를 약하게 하여 제트류의 감속으로 이어졌다(Jennifer, 2015).

E. 제트류

제트류(jet stream)는 대류권계면 부근에서 부는 강한 바람으로, 지구 주위를 리본 모양으로 감싸고 있다. 제트류는 지상 대략 30.000-52.000ft에 위치하고, 풍속은 170kts에 이르기도 한다. 또한 제트류는 지상의 기압시스템 즉 고기압과 저기압의 이동과 성장에 중요한 역할을 한다(Met Office, 2017)

제트류는 대류권계면 즉 항공기 순항고도에서 형성되는 난류발생에 중요한 원인으로 알려져 있다. 난류는 승객뿐 아니라 비행기를 운항하는 조종사들에게도 중요한 문제이다. 미국 NTSB (National Transport Safety Board, 2009)의 보고서에 의하면 난류가 민간항공 사고의 원인 중 가장 큰 원인으로 보고하였다.. 비행 중 발생하는 난류로 인한 사고의 대부분은 승객과 승무원의 부상으로 이어지고, 이것으로 인해 비행 중 회항이 발생하기도 한다.

2016년 12월 16일 인천에서 미국 Dallas로 향하던 American Airlines 280편은 일본 상공 약 27000ft 상공에서 만난 심한 난류로 인해 승무원 포함 12명의 부상으로 일본 Narita 공항으로 회항하였다.

F. 난류의 원인

Kelvin-Helmholtz Instability(KHI)로 알려진 현상은 단일 유체의 속도의 변화나, 속도가 다른 두 유체 사이에서 발생하는 유체의 불안정으로 알려져 있다. 이는 대기의 난류를 이해하는데 가장 일반적으로 알려진 개념이다(Lord Kelvin. 1871, Helmholtz. 1868). 또한, 그 다음 세대에서 난류에 원인으로 알려진 것은 상층 전선과 연관된 제트류에서 발생하는 바람시어(wnd shear), unbalanced flow, 중력파, 내부 중력파로 알려졌다(Sharman, 2012).

제트류는 그 자체가 많은 에너지를 가지고 있기 때문에 로스비 파동(Rossby

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

wave)으로 동쪽으로 이동하는 파에는 난류가 발생 할 수 있다. 먼저 제트 입구나 출구에서 만들어지는 비지균운동이 만들어 진다.(기상청). 제트의 입구에서는 오른쪽에 발산과 서쪽에 수렴이 발생한다. 또한 제트의 출구에서는 오른쪽에 수렴이 발생하고, 왼쪽에 발산이 발생한다. 만약 제트류가 파동을 보인다면 소용돌이도(vorticity)를 나타내게 된다. 이때 오른쪽 아래로 진행하는 기류에서는 상대소용돌이도가 증가하여 수렴이 발생하고, 오른쪽 위로 향하는 제트에서는 상대소용돌이도가 감소하여 발산이 이루어진다. 이와 같이 제트류의 비지균운동과 소용돌이도로 인하여 제트류 주변은 항상 난류 발생의 위험이 많다.(기상청, 2015).

G. 난류의 종류

항공기가 운항 중인 고도인 30.000ft이상에서 고려되는 난류는 겨울철 제트류와 연관된 청천난류와 여름철 대류시스템에서 만들어지는 난류, 그리고 산악파로 알려져 있다. 이들 중 항공기에 장착된 기상레이더로 탐측이 가능한 것은 대류시스템에서 만들어진 강수 현상뿐이다. 그 이유는 항공 기상레이더는 강수 현상만을 탐지하도록 만들어 졌고, 습한 우박(wet hail)을 동반한 난류의 경우 도플러효과로 40nm(nautical mile) 이내에서만 탐지가 가능하다. 즉 난류 발생의 주요 원인인 CAT(Clear Air Turbulence), MWT(Mountain Wave Turbulence)는 관측이 불가능하다(Weather Radar Guide Engineering Information Rev. 2016). 이러한 이유로 조종사가 운항 중에 난류를 정확히 회피하는 것은 대단히 어렵다.

겨울철 난류 발생의 대부분을 차지하는 제트류의 물리적 성격과 난류예보지수로 생산되는 차트의 장점과 그 한계점을 정확하게 인식한다면 난류로 인해 발생되는 많은 사고를 줄일 수 있을 것이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

H. 다양한 수치예보 지수(indices)

a. 윈드시어를 예보하기 위한 지수

Ellrod, Richardson Number, Bulk Shear, Turbulence Kinetic Energy Indices.

b. Unbalanced flow를 예보하기 위한 지수

Divergence Flow, Absolute Vorticity

c. 윈드시어와 unbalanced flow를 예보하기 위한 지수들

Graphical Turbulence Guidance(GTG), Ellord-Knox

(1) Ellrod Index

이 지수는 난류를 예보하는데 가장 기본이 되는 식이다.

$$Erod\ Index = VWS \times (DEF + CVG)$$

* VWS(Vertical Wind Shear), DEF(Horizontal Deformation), CVG (Convergence)

이 지수는 난류 유무의 판단에 유용하지만, 대기의 정적안정성을 고려하지 않았다. 특히 building ridge, anticyclonic flow 지역은 계산할 수 없기 때문에 이를 보안할 수 있는 방정식의 개발이 필요하다.

(2) Divergence Tendency, Richardson Number, Absolute Vorticity Values

이 지수는 unbalanced flow로 인한 난류의 예측에 유용하다. Divergence tendency 값이 높은 지역은 수렴이나 발산 또는 비지균흐름이 강화되는 지역이다. 이 지역으로는 제트류의 입구, 골 및 능 등의 지역이다. Richardson number가 높은 지역은 기류의 안전성이 낮아 기류가 난류의 성향을 띨 수 있는 지역이다. Absolute vorticity가 0 이하는 중력파(gravity wave)가 형성된다. 그 원인은 anticyclonic flow 와 inertial instability 이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(3) Turbulence Kinetic Energy(TKE)

이 지수는 VWS로, 경계지역 상공에서 생성 및 소멸되는 값을 말한다. 이 값이 30kts 이상이면 중(moderate) 강도 이상의 난류를 예상 할 수 있다.

(4) Bulk shear

이 지수는 단순히 지정된 고도 사이에 최상부와 최하부의 벡터 차이를 나타낸다. 이 지수는 잠재적인난류를 나타낸다. 50hPa 사이에서 50kts 이상이면 중(moderate) 강도 이상이 난류를 예상할 수 있다. 또한 이 식은 대기의 안정성이나 unbalanced flow를 고려하지 않았기 때문에 같이 사용하면 더욱 효율적인 결과를 얻을 수 있다.

(5) Graphical Turbulence Guidance (GTG)

이 지수는 EDR(Eddy Dissipation Rate)의 측정으로 난류의 생성을 알아내기 위한 여러 공식들을 통합한 지수이다. 미국의 NOAA의 Rapid Refresh Model로부터 생성 되는데, 정기적으로 PIREP과 EDR 자료로 조정된다.

(6) Ellrod-Knox

윈드시어와 unbalanced flow를 측정하기 위한 지수이다. 앞에서 언급한 Ellrod 지수에 divergence 경향성을 삽입하였다. (Forecasting Clear Air Turbulence for Aviation, The COMET Program, 2016).

I. 난류 발생 패턴

Fig. 9는 앞서 설명한 제트류와 난류와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 빨간색 테두리는 난류 발생지역을 표시하고 있고, 파란색 실선은 제트류의 흐름이다..

a. 급격히 변하는 골(sharp troughs)

구부러진 제트에서 발생하는 jet streaks(최대 속도구간)에서 청천난류(CAT)가 발생할 가능성이 높다. 제트하류(downstream)의 jet streaks지역과 골의 입구 부근

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

에서 난류가 발생하고, 난류의 상류지역인 최대속도구간에서 난류가 발생한다. 특히 발산이 일어나는 상류지역 아래에 저기압이 발달해 있다면 난류의 위험성이 높다.

b. 발달한 능(building ridge)

발달하는 능의 jet streaks에서 난류가 발생할 가능성이 있고, 강한 고기압성 흐름(anticyclonic flow)이 unbalanced flow를 만들어 난류를 만들 수 있다. 이 지역은 비지균흐름에서 능의 앞쪽은 수렴이 발생하는 지역이다.

c. Closed upper Low

이 지역에서는 수렴과 발산이 일어나는 하류와 상류의 제트류가 좁은 구역에 위치하고 있어 난류에 발생 가능성이 있다.

d. 두 제트의 합류

겨울철 중위도 지역 특히 한반도 상공에서 겨울에 많이 나타나는 형태로 속도가 다른 두 제트가 다른 고도에서 좁은 구역에 만나게 되어 난류의 위험성이 높다. 이 지역은 수평 및 수직의 바람시어가 심하다. 2014년 AA항공 사고도 이 지역에서 발생 하였다.

e. 속도가 빠른 제트

직선 형태의 제트 중 jet streaks 지역에서 난류가 발생할 가능성이 있다.

f. 제트류와 연관된 상층 전선(upper-level front)

이 지역은 제트류 아래로 성층권이 밀려서 내려오는 형태로, 혀 모양을 하고 있다. 전선과 제트류 주변의 온도경사로 바람시어가 크고, 심한 난기류가 많이 발생하는 지역이다. 또한 권계면 접힘이라는 용어를 사용하기도 한다. (Forecasting Clear Air Turbulence for Aviation, The COMET Program, 2016)

Fig. 9에서 보이는 난류발생 패턴은 제트류의 형태와 밀접한 관계를 갖는다. 이러한 제트류에 의해 발생하는 난류를 예보하기 위해 많은 난류 공식들이 개발되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

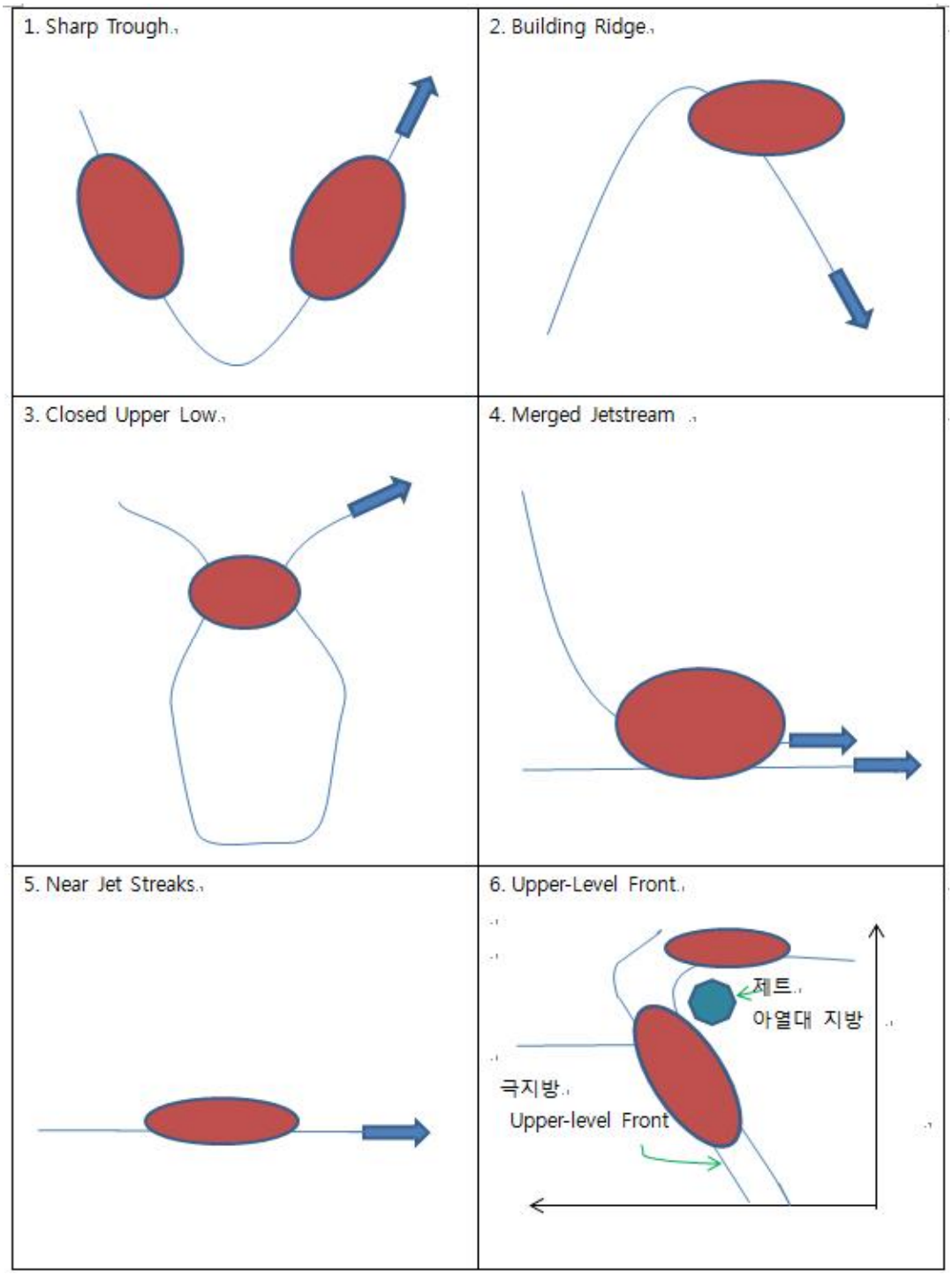


Fig.9. The pattern of Turbulence connected with jet stream, forecasting clear Air Turbulence for Aviation. The COMET Program, 2016.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

초기에는 난류예보를 위해 radiosonde를 사용하였고, 좀 더 정밀한 관측의 필요성이 생겨 항공기로 난류가 있을 것으로 예상되는 지역을 실제 비행기를 이용해 탐측하였다. 이렇게 얻어진 자료를 통해 경험식이 만들어 졌고, 난류의 생성 원인이 다양한 만큼 다양한 난류지수가 개발되었다. 이후 기술의 발전으로 복잡한 방정식을 계산할 수 있는 슈퍼컴퓨터의 개발과 대기의 상층을 3차원으로 관찰 할 수 있는 위성기술의 개발로 난류의 예보기술이 발전해 좀 더 정확한 예보를 가능하게 하였다. 그럼에도 불구하고 예보의 정확성은 높지 않았다. 그래서 이미 만들어진 다양한 난류지수들과 비행기에서 실제 보내진 PIREP을 통해 난류의 정보를 비교분석해 난류예보의 정확성을 높이는 방법이 일부 국가에서 시행되고 있다. 이는 항공기와 지상간의 데이터 송수신 기술 발전과 더불어 해당 국가 기관이 난류 예보에 대한 중요성을 자각하고 있음을 말한다.

J. 한반도 상공에서 제트류의 속도와 그 배경

한반도는 지정학적으로 Eurasia 대륙의 동쪽 끝, 중위도에 위치해 있다. 이 지역에서 발생하는 제트류의 특징은 우선 겨울철 한대제트와 아열대제트의 영향을 받고, 한반도의 서쪽에 위치한 고비사막지역과 남서쪽에 위치한 히말라야산맥의 영향으로 두 제트가 합류하는 경향성을 보이고, 대륙과 해양이 만나는 지역에 위치하여 제트가 가속하는 경향성을 갖는다.(기상청, 2012 ; Georage, 1983) 이 지역에서 겨울기간 제트류로 인하여 난류가 빈발한다. 특히 기후변화로 인한 북극진동과 해들리셀의 확장으로 인해 극 제트와 아열대제트가 만나 난류를 빈번하게 형성하고 있다.

Fig. 10은 2009-2017년 사이 1월 평균동서풍의 재분석자료로, 중위도지역에서 형성된 제트류를 잘 보여주고 있다. 특히 대륙의 동쪽 끝인 한반도와 일본 상공에서 제트류가 가속하는 것을 볼 수 있다. 이는 한반도 부근에 위치한 차가운 시베리아의 대기 덩어리와 태평양의 상대적으로 따뜻한 대기 덩어리가 만나 지역적으로 수평온도경도가 심해져 제트류가 가속되는 현상을 보이고 있다. 또한, 강도는 약하지만 미국의 동부해안에서도 제트류가 가속되는 것을 볼 수 있다. 이 지역에서 상대적으로 속도가 낮은 이유는 한반도 주변과 다르게 지형적으로 완만한 형태로 대서양과 접하고 있기 때문이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

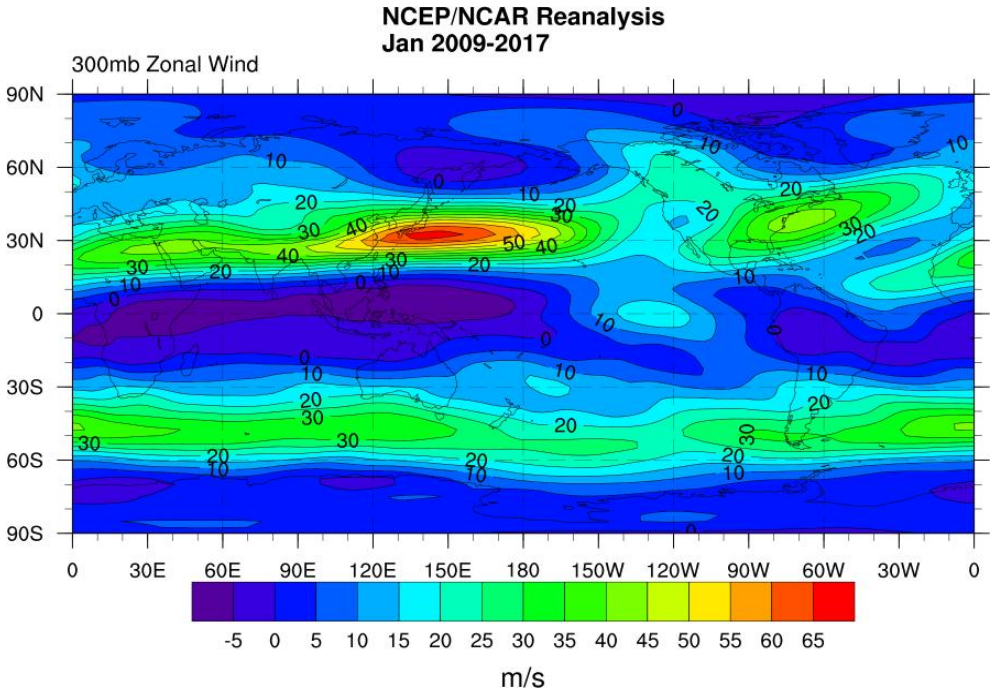


Fig. 10. 300hPa zonal wind over global scale, 2009-2017 Jan, NCAR/NCEP. Data were obtained from the NCEP/NCAR reanalysis at http://www.esrl.noaa.gov/psd/.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

K. 한반도 상공에서 발생한 난류 검증

위에서 언급한 기후변화로 인한 한반도 제트류의 영향을 알아보기 위해 2012-2013년 겨울 동안 수집한 PIREP을 통해 한반도 주변 상공에 발생되는 난류가 제트류의 어떤 부분에서 자주 발생하는지 알아보았다. (Fig. 11).

2012년 겨울기간 동안 수집된 PIREP를 조사·분석한 결과 한반도에서 발생하는 난류의 약 83%는 제트류의 골 주변에서 발생하였다. 한반도에 위치가 대륙의 동쪽 끝에 위치에 제트류가 가속하는 것도 중요한 원인이 되었다. 한반도 공역에서 발생하는 54% 경우를 차지하는 부분은 제트류의 수렴지역에서 발생하였다.

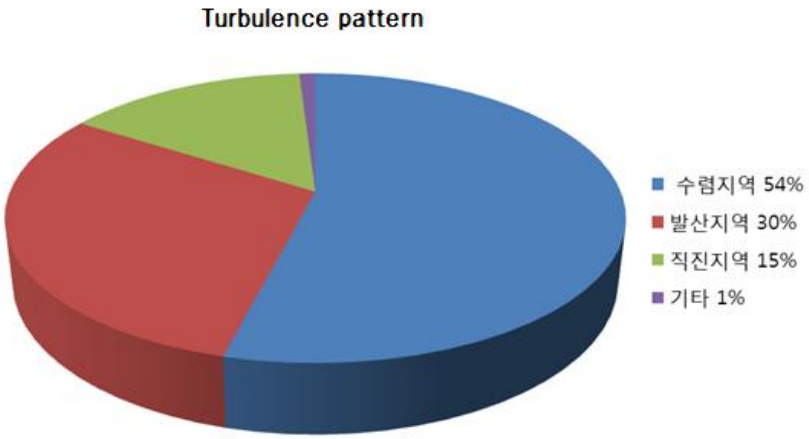
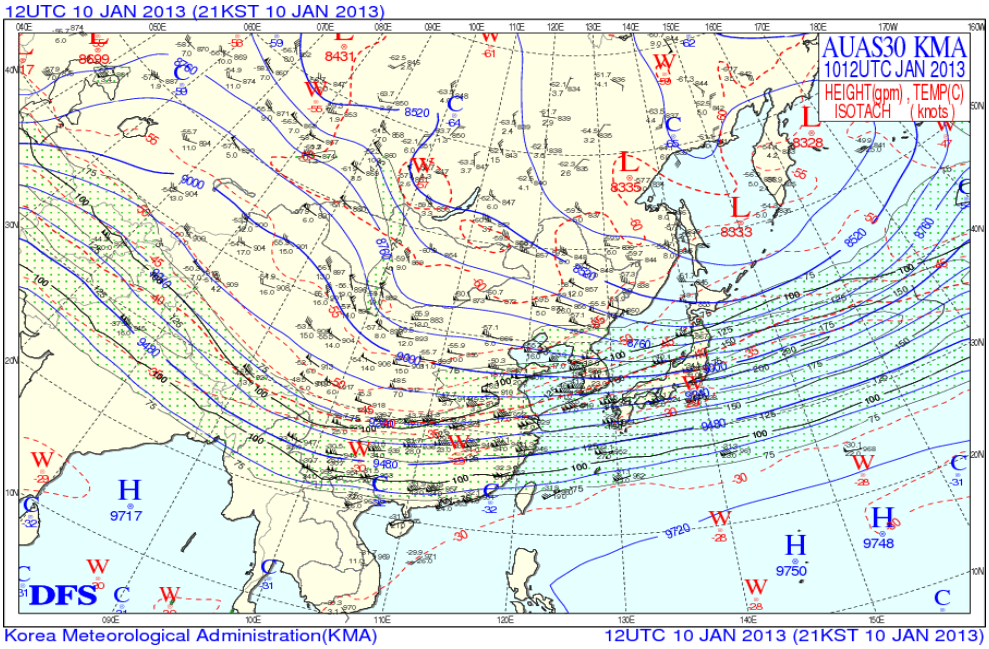


Fig. 11. The pattern of breaking turbulence over Korea 2012-2013 , Korea Aviation Meteorological Office.

발생한 PIREP의 90% 이상이 극제트와 아열대제트가 만나는 지점에서 발생하였고, 70% 이상이 극제트 쪽에 편향되는 지역에서 발생하였다. 한반도에 수렴지역이 형성 되는 때는 Okhotsk sea 쪽에 저기압이 형성될 때 한반도 상공에 수렴지역이 많이 발생하는 경향을 보였다. 한반도 상공에 발산지역이 형성된 때는 만주지역에 저기압이 형성 될 때로, 한반도 상공에 강한 발산장이 형성되어 PIREP이 증가하였다. 발산지역이 한반도 상공에 형성 될 때는 일본 상공의 기류가 더욱 구불거리는 경향을 보였다(Fig. 12).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



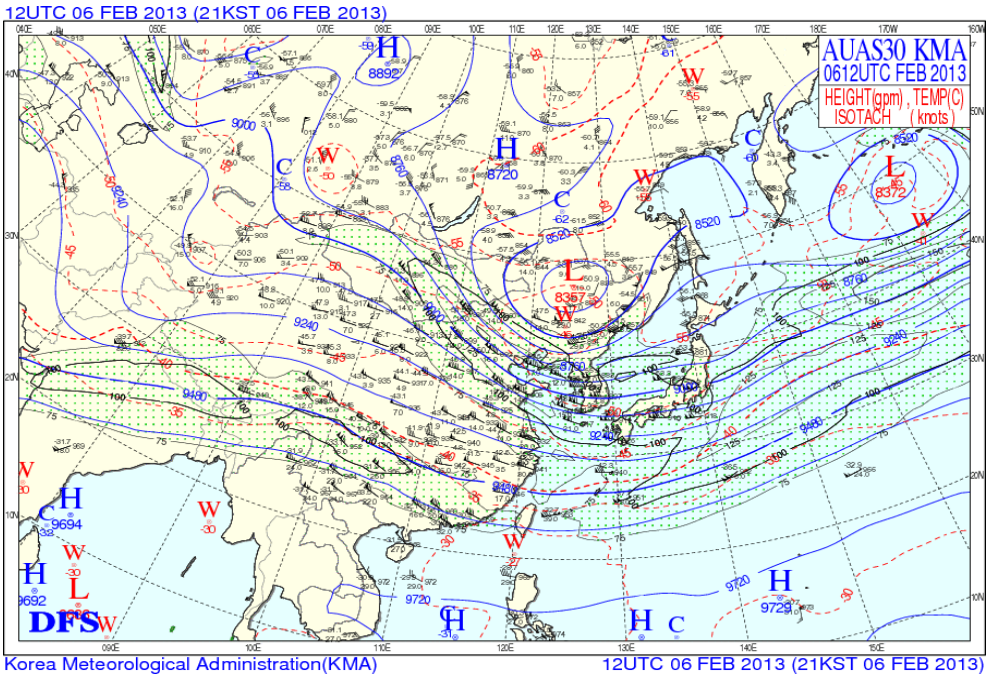
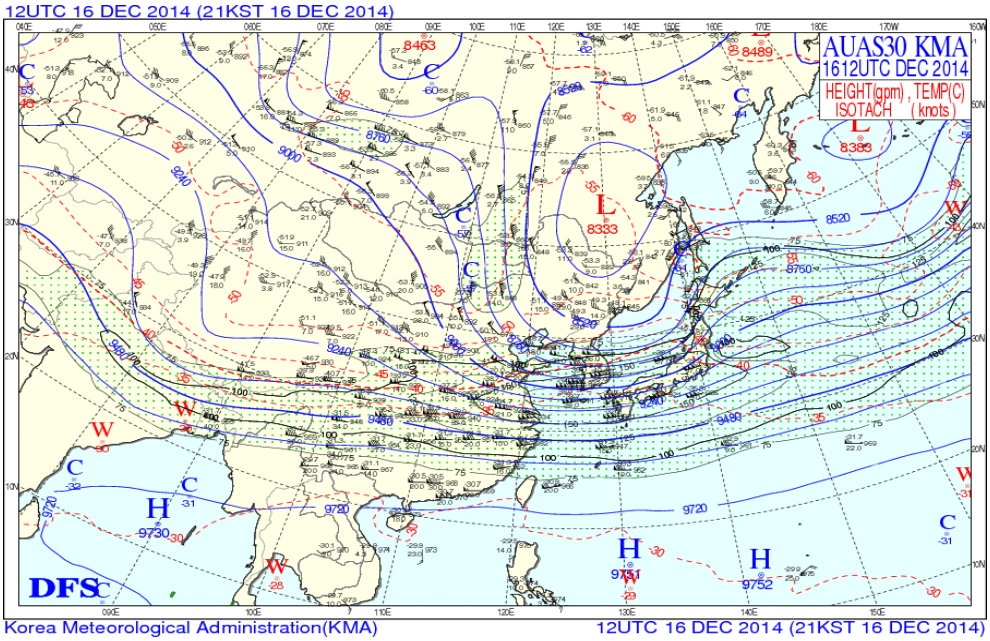


Fig. 12. Typical pattern of South Korea breaking turbulence, 2013 Jan. 10.(upper)and Feb. 6, (down) 300hPa chart, KMA.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



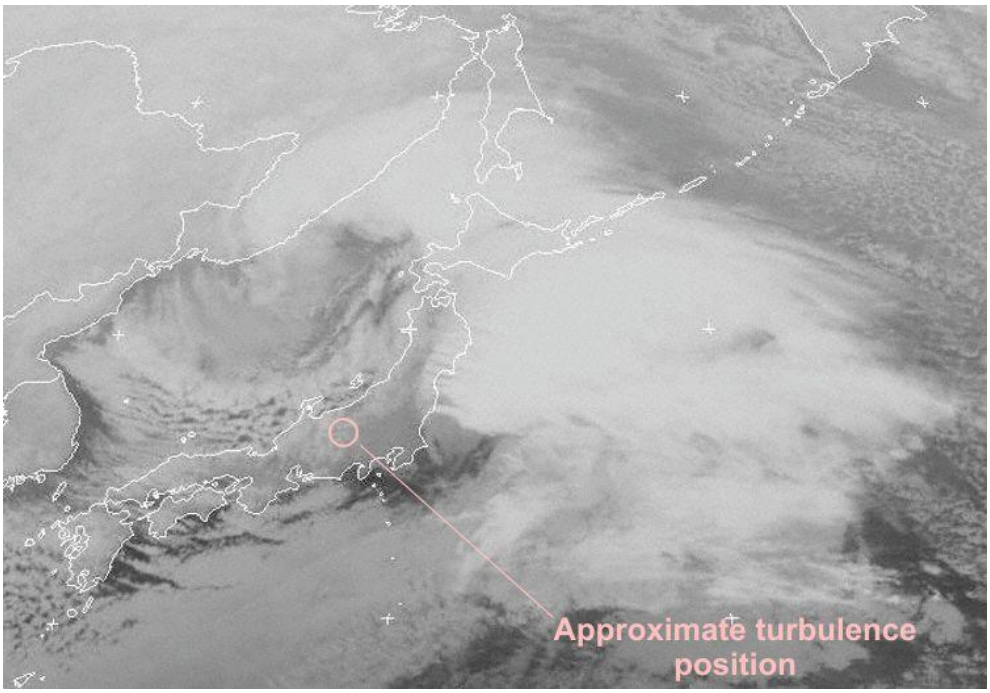


Fig. 13. 300 hPa chart(upper). KMA and MTSAT Image(down) over Japan, 2014 Dec. 16.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 13의 두 그림은 2014년 인천에서 미국 Dallas 향하던 American Airlines 280편이 사고 났을 때의 300hPa 과 MTSAT의 인공위성사진이다. 이날 사고로 승무원을 포함해 12명이 중경상을 입었고, 항공기는 일본 Narata공항으로 회항하였다. 이날의 기상상태는 한반도에 제트류의 수렴지역이 형성 되었고, 일본 서쪽에는 골이 아열대제트와 조우하며, 일본 동쪽해상으로 제트류의 발산장이 형성 되었다. 또한 일본 북부에 위치한 Hokkaido 부근에 강력한 겨울폭풍이 발달하였고, 일본 상공 35000ft 상공에 170-200kts의 제트류가 형성되어 강력한 발산장과 상승기류가 사고지역에 형성되었다. 이는 한반도에서 난류 발생 시 관측되었던 패턴과 유사한 패턴을 보이며, 한대와 아열대 제트의 겹침 현상은 기후변화로 인한 해들리셀의 확장 결과로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅳ. 결론

기후변화의 영향은 지상에서 예상치 못한 다양한 악기상을 만들고 있다. 또한 대기 고층의 기류가 흐르는 역학에도 중대한 영향을 미친다. 고층의 기류 즉 제트류에서 발생되는 난류는 항공기 안전 운항에 중대한 요소로 오래 전부터 인식되어 왔다. 1950년 이후부터 진행된 연구에도 불구하고 아직 난류의 완전한 해석과 예측에는 시간이 걸릴 것으로 본다. 문제는 기후변화로 인해 난류의 발생은 더욱 빈번해진다는 것이다. 기후변화는 중위도지방에 부는 동서풍의 약화를 야기하였고, 이는 제트류의 감속으로 이어졌다. 감속된 제트류는 그대로 흐르지 않고 더욱 구불거리는 형태로 서에서 동으로 흐르게 된다. 특히 이 지역을 지나가야 하는 항공기의 경우 난류와 조우하게 될 가능성은 높아지게 된다. 이러한 현상을 실제 조종사난류보고를 통해 확인할 수 있었다. 2012-13년에 수집된 조종사난류보고를 통해 제트류의 형태를 역으로 조사해 보면 90%이상의 난류가 극제트와 아열대제트가 만나는 형태를 가지고 있었다. 이는 해들리셀의 확장과 극 확장으로 인한 제트류의 속도 감소가 그 중요한 원인으로 파악 되었다.

그러나 제트류로 발생되는 난류를 정확히 파악하기는 현재까지는 어려운 실정이다. 항공기의 항로를 변경하고, 난류가 발생하는 고도가 아닌 다른 고도로 가야 하는 경우라면 확실한 증거가 필요하지만 난류의 강도나 지속시간 발생 범위를 정확히 예측하기는 어렵다.

기후변화로 인한 상층대기의 흐름 변화는 항공기의 안전운항에 중요한 요소이다. 현재까지 개발된 기술에 주어진 자료를 적절하게 해석할 수 있는 조종사의 능력이 더해진다면 현재 난류예보가 가지고 있는 한계를 어느 정도 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

기상청web, 대기분석 및 예보와 대기 물리. 기상청, 예보관훈련용 기술서, pp.118-129.

기상청, 손에 잡히는 예보기술. 기상청.

김경익, 김영섭, 김해룡, 류찬수, 서경환, 서명석, 오재호, 전종갑, 하경자, 2011, 환경대기과학. 동화기술, pp.142-145, pp.162-165.

안중배, 김준, 류찬수, 박선기, 서명석, 이화운, 정일웅, 정형빈, 2016, 대기과학. 시그마프레스, pp.203-205, pp.338-340.

Donald W. McCann, 2001, Gravity wave, unbalanced flow, and aircraft clear-air turbulence. Nat. Weather Digest. Vol. 25, pp.3-6.

Dutton, J., and H. A. Panofsky, 1970, Clear-air turbulence: A mystery may be unfolding. Science. 167, pp.937-994.

Ellrod, G. P. and Knapp, D. L., 1992, An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. Weather Forecasting. 7. pp.150-165.

Forecasting Clear Air Turbulence for Aviation, 2016, The COMET program../ http://comet.uscr.edu/

Francis J. A. and Natasa Skific, 2015, Evidence linking rapid Arctic warming to mid-latitude weather pattern. Math. Physical & Engineering Sci., Vol. 373, issue 2045, p.20140170.

Francis J. A. and Vavrus. S. J., 2012, Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. Geophys. Res. Lett. 39L06801.

Francis J. A. and Vavrus. S. J., 2015, Evidence for a wavier jet-stream in response to rapid arctic warming. Environ. Res. Lett. 10(2). pp.2-9.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Hu, Y., and Q. Fu, Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979, Atmos. Chem. Phys. Disc., 7, pp.9367-9384.

Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth assessment report, 2014, KMA, pp.2-9.

Knox, J. A., 1997, Possible mechanisms of clear-air turbulence in strong anticyclonic flow. Mon. Weath. Rev. 125, pp.1251-1259.

M. A. Shapiro, 1978, Further Evidence of the mesoscale and turbulence structure of upper level jet stream-frontal zone system. Mon. Weather. Rev 106. pp.1100-1111.

National Transportation Safety Board, 2009, U.S. Air Carrier Operation, Calendar 2005. Annual review of aircraft accident data. NTSB/ARC-09/01, Washington, D.C., p.66.

Palmen E. and Newton CW. 1969. Atmospheric circulation system: their structure and physical interpretation, Vol 13, 606pp.

Paul D. Williams and Manoj M. Joshi, 2013, Intensification of winter transatlantic aviation turbulence in response in response to climate change. Nature Climate Change. Vol 3. pp.644-648.

Philip G. Gill, 2011, Objective verification of World area forecast centre clear air turbulence forecast. Meteorol. Appl. 21. pp.3-11.

Reiter, E. R. and Nania, A., 1964, Jet-stream structure and clear-air turbulence(CAT). J. Appl. Meteorol. Vol. 3. pp.237-259.

Sharman, R. D., Trier, S. B., Lane, T. P., and Doyle, J. D., 2012, Sources and dynamics of turbulence in the upper troposphere and lower stratosphere: A review. Geophys. Res. Lett, Vol. 39, p.12.

Collection @ chosun