

論文

KWRP를 활용한 한반도 항공기 난류 지수 특성 분석

김영철*

The Analysis of the the characteristics of Korean peninsula
Aircraft Turbulence Index using KWRP

Young-Chul Kim*

ABSTRACT

The purpose of this study is analysis of Korean peninsula aircraft turbulence using the numerical weather prediction model, KWRP with the various turbulence index and pilot weather report data.

Compared with the pilot weather report data and Calculated the turbulence index using the KWRP model result, many turbulence index show the similar horizontal distribution, except for the TUB2 and VWS. The analysis of vertical structure of turbulence, there are some difference each turbulence index respectively, but severe turbulence turn up in 15,000ft almost turbulence index. above 20,000ft height, intensity of turbulence vary each turbulence index.

Through this turbulence study, It is founded on the research and development of the Korean peninsula aircraft turbulence

Key Words : aircraft turbulence(항공기 난류), turbulence index(난류 지수), KWRP, PIREPs(조종사 기상보고), numerical weather prediction(수치예보)

1. 서 론

항공기 난류(aircraft turbulence)는 대기 상태의 급변으로 인해 항공기가 비행 중(특히, 급격한 상승 및 하강 운동 시)에 나타나는 불규칙적인 운동을 말하는 것으로, 대기의 상태보다 항공기의 반응에 기초를 둔 정의이다.

이는 항공기 난류가 불규칙적이고 무질서한 대기의 난동에 의해서 뿐만 아니라 조직적인 소규모

도 순환에 의해서도 발생할 수 있음을 의미한다.

항공기 난류가 생기는 원인은 역학적인 것, 열적인 것, 바람 시어(wind shear)에 의한 것, 항공기의 항적(wake)에 의한 것 등 다양한 원인에 의해 발생될 수 있다. 그러나 Lester[1]는 난류가 발생하는 곳, 나타나는 대기 순환의 규모, 무엇이 난류를 발생시키는가에 따라 4개의 영역으로 구분하였다(Table. 1). 특히 강한 상승 기류와 하강 기류가 공존하는 적란운과 산악 지형에 의해 생성되는 대기의 파동, 제트 기류 주변에서 주로 발생하는 청천 난류(clear air turbulence, CAT)는 항공기 난류의 대표적인 것으로, 조종사가 가장 경계해야 하는 대상이다. 항공기 난류는 승객에게 불편감을 줄 뿐만 아니라 기체의 구조를 손상시키고, 조종 불능 등 치명적인 항공기 사고의 원인이 되기도 하므로 매우 중요하다고 할 수 있다.

† 2010년 2월 3일 접수~2010년 3월 26일 심사완료

* 한서대학교 항공운항학과

E-Mail : yckim@hanseo.ac.kr

충남 태안군 남면 신온리 산105 한서대학교 태안비행장

인천 국제 공항과 같은 곳에는 저층 난류 경보 장치(low level windshear alert system, LLAWS)와 같은 장비가 설치되어 항공기 이·착륙 시에 발생하는 공항 주변의 난류에 대한 정보를 제공하고 있으며, 미국 항공우주국(NASA)의 난류 경보 시스템(항공기 탑재 레이더 성능 향상 소프트웨어) 등이 개발되어 난류 예측 환경과 기술이 개발되고 있지만, 현업 항공기 난류 예보 및 지원과 관련하여 정확한 정보를 제공하기가 매우 어려운 것도 또한 현실이다.

항공기 난류는 대기 상태뿐만 아니라 각 항공기마다 난류의 강도가 다르게 느껴지는 주관적 측면이 강하고, 관측 자료 또한 많이 부족하여 각종 예보 방법도 경험적이며 주관적인 경향이 강하며, 수치 예보의 경우에도 그 정확도는 아직은 개발 단계에 있는 실정이다.

Table 1. The intensity of turbulence

	성 격	원 인	종 류
LLT (low level turbulence)	하층난류, 경계층 난류	대기 경계층	역학적, 열적,전선, 항적 난류
CAT (clear air turbulence)	상층 난류, 자유대기 난류	제트 기류	청천난류
MWT (mountain wave turbulence)	산악파 난류	지형	풍하파, 저고도난류
TNT (turbulence in and near thunderstorms)	뇌우 난류	대류	뇌우 내/외부

이에 본 연구에서는 난류에 대한 다양한 수치들을 차세대 수치 예보 모델인 KWRF 모형에 의해 예측하고, 이를 조종사 기상 보고(pilot weather reports, PIREPs) 자료의 항공기 난류의 발생 현황과 비교했다. 이 결과는 우리나라에 적합한 최적의 난류 예보 지수의 개발에 활용 가능할 것이다.

2. 난류 진단 지수

1950년대 이후 미국 및 영국 등 선진국에서는 대기 중 상층에서 흐름이 불안정해지는 요인들을 분석하여 준경험적 난류 예측 지수들을 개발하고 최근 현업에 이용되는 수치예보 모델 결과 자료를 활용하여 난류 예측을 수행하고 있다. 이들 지수들은 대부분 선행 연구자들에 의해 이론적, 경험적 근거에 바탕으로 개발된 것으로 일부는 아직 예측성에 논란이 있는 실정이다. 대표적인

난류 진단 지수는 Ellord Index를 포함하여 다수의 Index가 있다.

2.1 Ellord Index

1980년대 중반 인공 위성 자료를 이용한 난류 분석 연구에서 강한 난류가 “변형 지역”으로 알려진 특정 구름 경계에 따라 매우 빈번함을 알 수 있었다. 변형 지역은 제트류가 존재하는 지역 및 기압골과 관련된 쌍곡선 흐름과 관련이 있다. 따라서 관측된 구름 가장자리의 기류축 팽창, 수축에 의한 변형이 난류 발생에 중요한 요소 중 하나이다. 이러한 동역학적 특성을 지닌 대기 흐름의 변형이 정량화 할 수 있음을 착안하여, Ellord[2]는 수평 변형과 연직 바람 시어를 기초로 한 객관적 난류 예측 지수를 고안하였다.

$$DEF = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

$$= \sqrt{(DST^2 + DSH^2)}$$

여기서 DST는 늘림 변형, DSH는 시어항, u, v 는 각각 바람의 동서 그리고 남북 방향 성분이다. DSH 항이 난류와 매우 관련이 깊지만 난류 발생 가능 지역을 너무 넓게 예측하고, DST의 양과 음의 최대값이 존재하여 해석이 어렵다는 단점을 보완하기 위하여 시어링 변형(DSH)을 함께 고려한 변형(DEF)을 표현하였다. 그러나 위의 변형은 음의 부호를 제거하고 등치선 면적을 다소 완화하지만 난류를 설명하기 위해서는 변형과 함께 연직 바람 시어를 고려하여야 한다는 점을 감안하여 두 요소의 벡터 곱으로 나타난 난류 지수(TI1) 또는 Ellrod Index-1을 유도하였다.

$$TI1 = VWS \times DEF \quad (2)$$

여기서 VWS는 연직 바람시어로 아래와 같이 정의 된다.

$$VWS = \Delta V / \Delta z = \sqrt{(\Delta u^2 + \Delta v^2)} / \Delta z \quad (3)$$

VWS는 상하층의 바람의 차에 의해 생성되는 시어로서 VWS 자체만으로도 상층의 청천난류의 진단에는 비교적 정확한 결과를 보인다.

위의 식 (2)은 전선 발생 강도와 관련된 Petterssen의 방정식에서 유도된 것이다.

$$A_T = 0.5 \left(\frac{fT}{g} \right) VWS [DEF + CVG] \quad (4)$$

A_T (또는 I_f)는 등압면에서의 온도경도에 대한 시간 변화율이며, CVG는 수렴이다. 미 공군 전 구기상본부(Air Force Global Weather Central, AFGWC)에서는 TI1식에 위의 Petterssen의 방정식과 같이 수렴을 고려한 지수, Ellrod Index-2를 이용하였다.

$$TI2 = VWS \times [DEF + CVG] \quad (5)$$

실제 수렴항의 값은 다른 두 항에 비해 매우 작은 값을 가지지만 어떤 경우에 있어서는 난류 발생에 큰 영향을 미칠 수 있다.

Ellrod[2]의 연구에 의하면 식 (3)과 (5)의 강도 구분은 아래의 표로 나타낼 수 있다.

Table 2. TI2 and VWS threshold values for turbulence intensity

난류 지수	Light	Moderate	Severe
TI2	$4 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$	$8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$	$12 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$
VWS	$10 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	$17 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	$24 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

2.2 Richardson number

대기 중 난류의 발생 가능성은 수평 온도 경도가 강한 지역에서 바람의 연직 변화율이 최대가 되기 때문에 강한 수평 온도 경도와 연직 바람 시어가 존재하는 지역인 경압 지역 EH는 내부 전선에서 최대가 된다.

$$Rn = \left(\frac{g}{\theta_m} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) / \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (6)$$

여기서 θ_m 는 연직 평균 온위이다. 리차드슨 수가 작은 지역에서 난류 발생 가능성이 높음을 설명할 수 있다. Kronebach[3]는 연직 바람 시어와 리차드슨 수에 대한 계산 결과를 난류 관측 자료와 비교한 결과 리차드슨 수가 난류를 분석하는데 더 나은 결과를 나타내었으며, 리차드슨 수가 1이하인 등치선 내에 난류 관측 결과의 40%를 포함한다고 제시하였다.

2.3 Brown Index

대기의 내부 마찰은 다른 물리 항들에 비해 중요하게 간주되지 않았으나, 일부 항공 관측에서 Moderate부터 Severe 강도의 난류 구역의 난류 소산율이 강한 종관적 흐름의 발달 지역에서 기압 경도력에 의한 동역학 에너지 생성율과 거의 비슷한 크기를 가지는 것으로 나타났다.

Roach[4]는 빠른 종관 패턴의 발달 및 이동과 난류 발생과의 연관성을 이론적으로 해석하기 위하여 리차드슨수 경향 방정식을 유도하였고 Brown[5]은 연직 바람 시어 벡터의 대한 간섭효과를 제거하여 수정된 Brown Index-1을 유도하였다.

$$\Phi_m = - \frac{D}{Dt} \ln Ri = (0.3\zeta_a^2 + D_{SH}^2 + D_{ST}^2)^{1/2} (s^{-1}) \quad (7)$$

여기서 ζ_a 는 절대 와도의 연직성분이고, f는 행성와도이며 D_{SH} 는 수평 늘림 변형항, D_{ST} 는 시어 변형항을 각각 나타낸다.

식 (7)과 함께 종관 규모 변형 과정이 어떤 층에 걸쳐 Rn 을 임의 임계값 이하로 감소시킬 경우 결과적으로 난류는 그 층에서 Rn 을 증가시킨다는 개념에 바탕을 둔 난류의 에너지론에 대해 연구하였다. 이것은 Rn 이 변형과정에 의해 임계값 이하로 유지되지 않을 경우 난류가 소멸됨을 나타낸다. 따라서 난류와 변형과정의 역상관 가정으로부터 에너지 소산을 계산할 수 있는 식을 개발하였으며 Brown Index-2라고 한다.

$$\epsilon = \Phi_m \frac{(\Delta \vec{V})^2}{24}, \quad \Phi_m > 0 \quad (8)$$

여기서 $\Delta \vec{V}$ 는 난류층에 대한 속도차이다.

2.4 Colson-Panofsky Index

일반적으로 대기 중 난류가 강한 연직 시어와 낮은 리차드슨 수와 관련이 있는 것은 분명하지만 해양보다는 육지에서, 평지보다는 산악지역에서 발생가능성과 강도가 더 큰 것으로 나타났다. 이것은 리차드슨 수가 정성적인 난류의 구분은 가능하나 자체로 난류의 강도를 계산하지 못하는 한계가 있음을 반증한다. 따라서 보다 정량적인

난류 지수를 계산하기 위하여 Colson and Panfsky[6]는 연직 에너지 생성 함수(식 (9))를 이용하여 연직 에너지, $E(\sim(\lambda P)^{2/3})$ 을 계산할 수 있는 식을 유도하였다.

$$P = K_m \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right)^2 + a K_h \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (9)$$

$$E = \lambda^2 \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right)^2 [1 - \beta Ri] \quad (10)$$

여기서 K_m , K_h 는 동에디 점성과 열수송에 대한 동확산 계수이고 a 는 1보다 약간 큰 임의 상수, λ 는 연직 에디 크기, \vec{V} 는 수평 바람 벡터 그리고 β 는 $a \left(\frac{K_h}{K_m} \right)$ 이다. 식 (10)에서 임계 리차드슨 수 Ri_{crit} 가 난류가 없는 경우 큰 값을 가진다고 정의하여 난류의 강도에 비례하는 정량적인 지수로 나타낼 수 있다.

$$PI = (\Delta \vec{V})^2 \left(1 - \frac{Ri}{Ri_{crit}} \right) \quad (11)$$

여기서 $Ri_{crit} = 1/\beta$ 이다. 일반적으로 Ri 가 과대 평가되기 때문에 일반적인 기상 자료를 사용할 경우 Ri_{crit} 을 0.75 정도의 높은 값으로 정의하는 것이 더 나은 결과를 나타낼 것이라고 추정하였으며, 위 식을 계산하는데 임계 리차드슨 수를 0.75로 고정했다.

유사한 방법으로 난류층의 풍속을 이용하여 PI를 계산하는 지수식을 개발하였다.

$$PI = (windspeed)^2 \left(1 - \frac{Ri}{Ri_{crit}} \right) \quad (12)$$

Ri_{crit} 는 경험적인 방법으로 10을 가정하였다.

2.5 Dutton Index

1976년 봄에 북대서양 및 북서 유럽 지역을 순항하는 민간항공기의 난류 관측 자료와 아래의 11개 난류 예측 지수를 100km 격자의 현업 예보 모델로부터 계산하여 비교한 결과를 활용하여, Dutton[7]은 난류와 가장 선형 상관을 잘 나타내는 지수에 대해 다중 선형 회귀분석을 수행하여 경험적 지수를 유도하였으며 관측 자료와의 비교 분석에서도 매우 잘 일치함을 보였다.

$$E = 1.25 S_H + 0.25 S_V^2 + 10.5 \quad (13)$$

$$S_H = \frac{1}{V^2} \left(uv \frac{\partial u}{\partial v} - u^2 \frac{\partial u}{\partial y} + v^2 \frac{\partial v}{\partial x} - uv \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (14)$$

$$S_V = \frac{\partial V}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (15)$$

3. KWRP를 이용한 난류 지수 분석

난류에 대한 생성 및 소멸에 대한 연구가 아직 부족하며 실시간 한반도 전 지역에 대한 관측이 부족하기 때문에, 난류를 예측하는 모형은 아직 개발되지 못하고 있는 실정이다. 또한 난류 계산식들은 현재 대기 상태에 대하여 기상 변수를 이용하여 난류 가능성에 대해 진단하는 식들이 대부분이다. 이러한 상황에서 난류의 예보는 수치 모형의 예측 값들을 이용하여 모든 예보 시간대에 대하여 악기상을 진단하는 방법을 사용한다. 즉 수치 예보 모형의 정확성은 난류의 예보 정확도와 직접적인 관계가 있음을 말한다. 따라서 이 연구에서는 현재 기상청에서 현업 운용 중인 수치 모형인 KWRP를 활용하여 다양한 난류 지수를 계산한다.

3.1 KWRP 모델

KWRP 모델은 기상청에서 현업 예보를 위하여 수행되는 수치 예보 모델로서 중규모 기상 현상 예측에 대하여 탁월한 능력을 발휘한다. 현재 기상청에서 수행되고 있는 KWRP의 특징은 Table 3과 같다.

3.2 KWRP를 활용한 난류 지수 계산

난류 지수는 KWRP 모델 예측장 자료를 이용하여 예측 시간별로 계산하였고 사용한 지수는 위에서 언급한 TI1, TI2, VWS, RN(리차드슨 수), BI1(브라운 지수1), BI2(브라운 지수2), PI(페노프스키 지수), DI(듀튼 지수), TUB1(VWS의 참고문헌의 경계값(Table 1)을 적용한 지수), TUB2(TI2 지수의 참고 문헌 경계값(Table 1)을 적용한 지수)를 사용하였다.

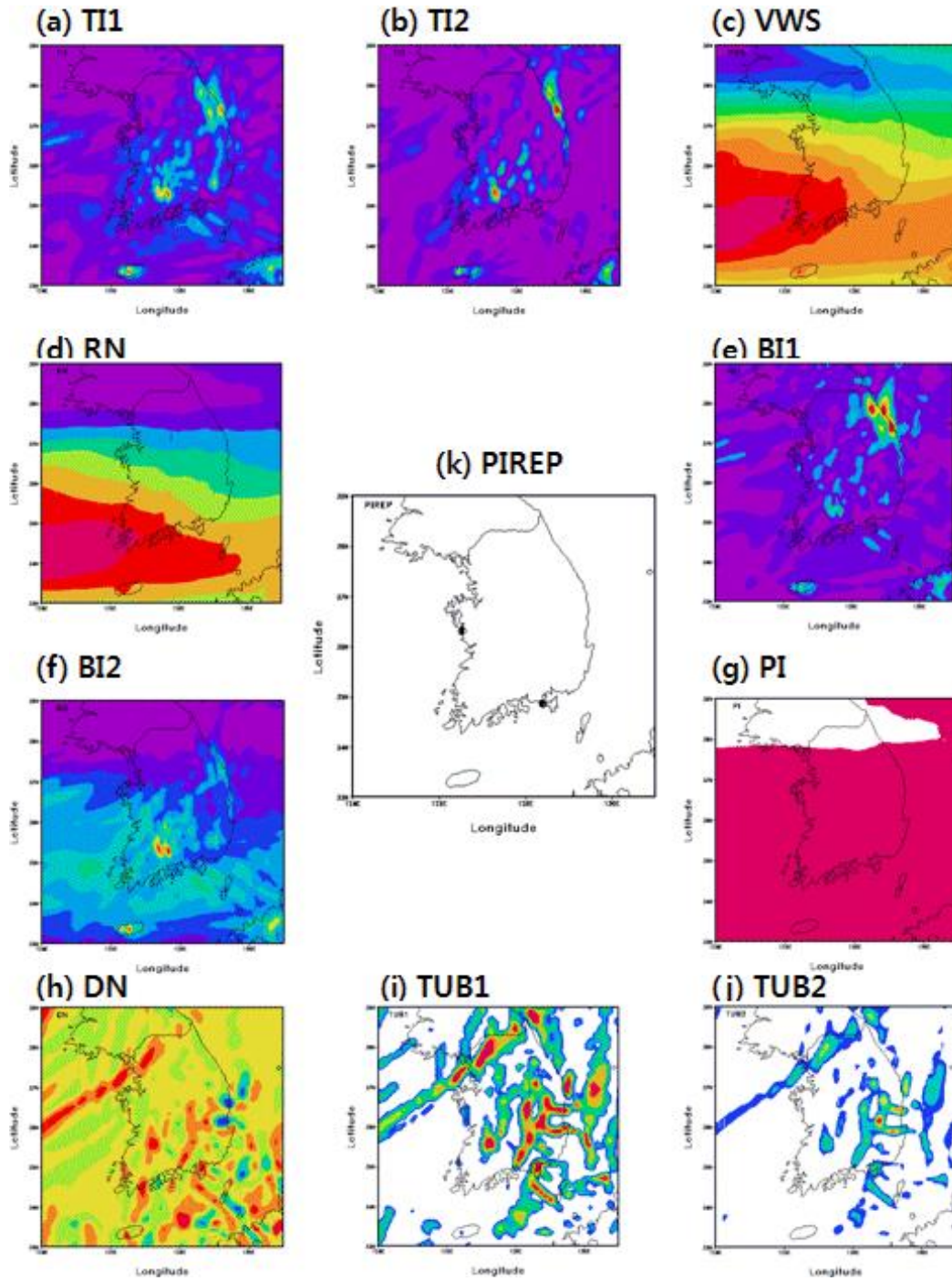


Fig. 1. The spatial distribution for turbulence diagnostics calculations using by KWRF output on 09UTC February 11, 2008.

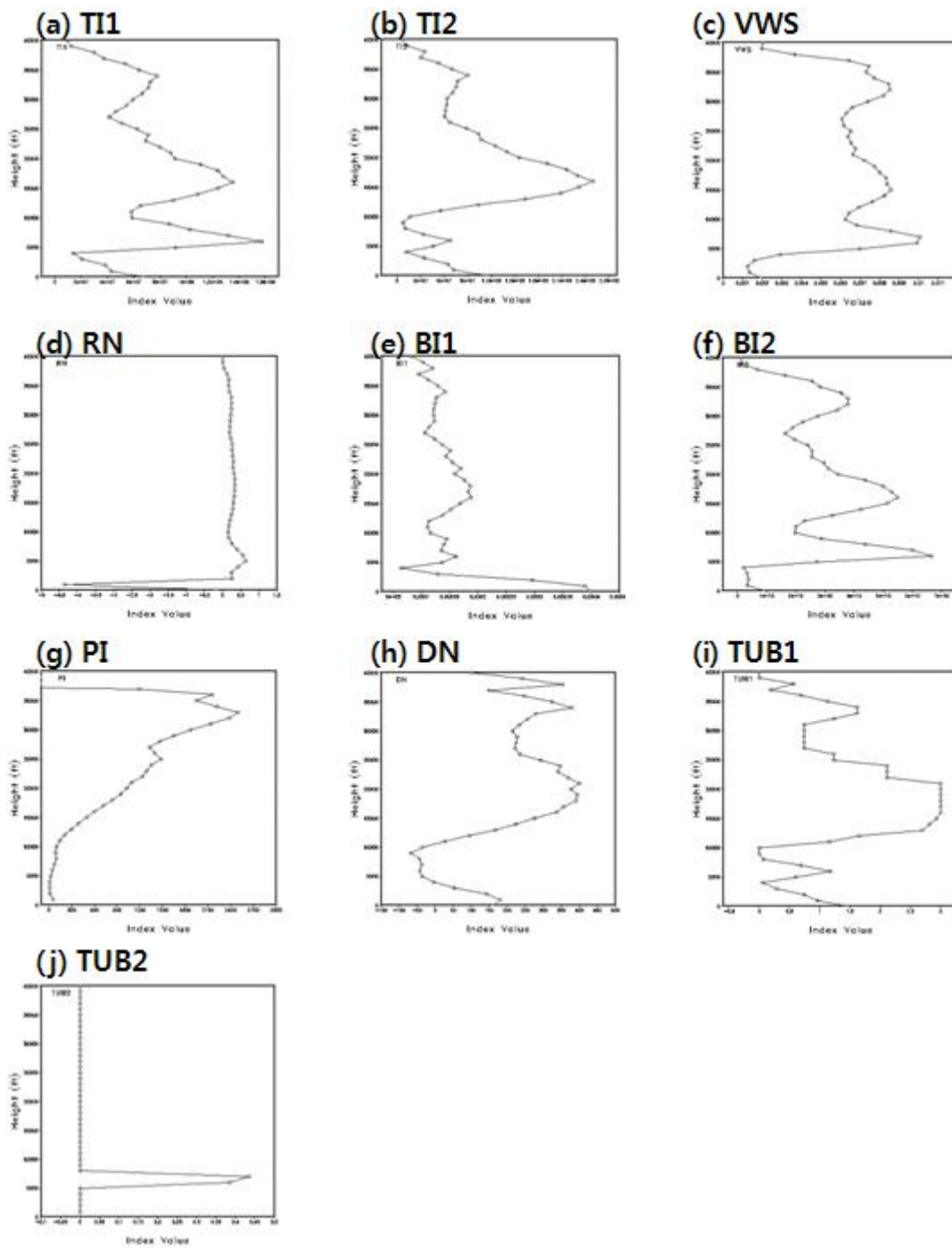


Fig. 2. The vertical distribution for turbulence diagnostics calculations at Anmyeondo using by KWRP output on 09UTC February 11, 2008.

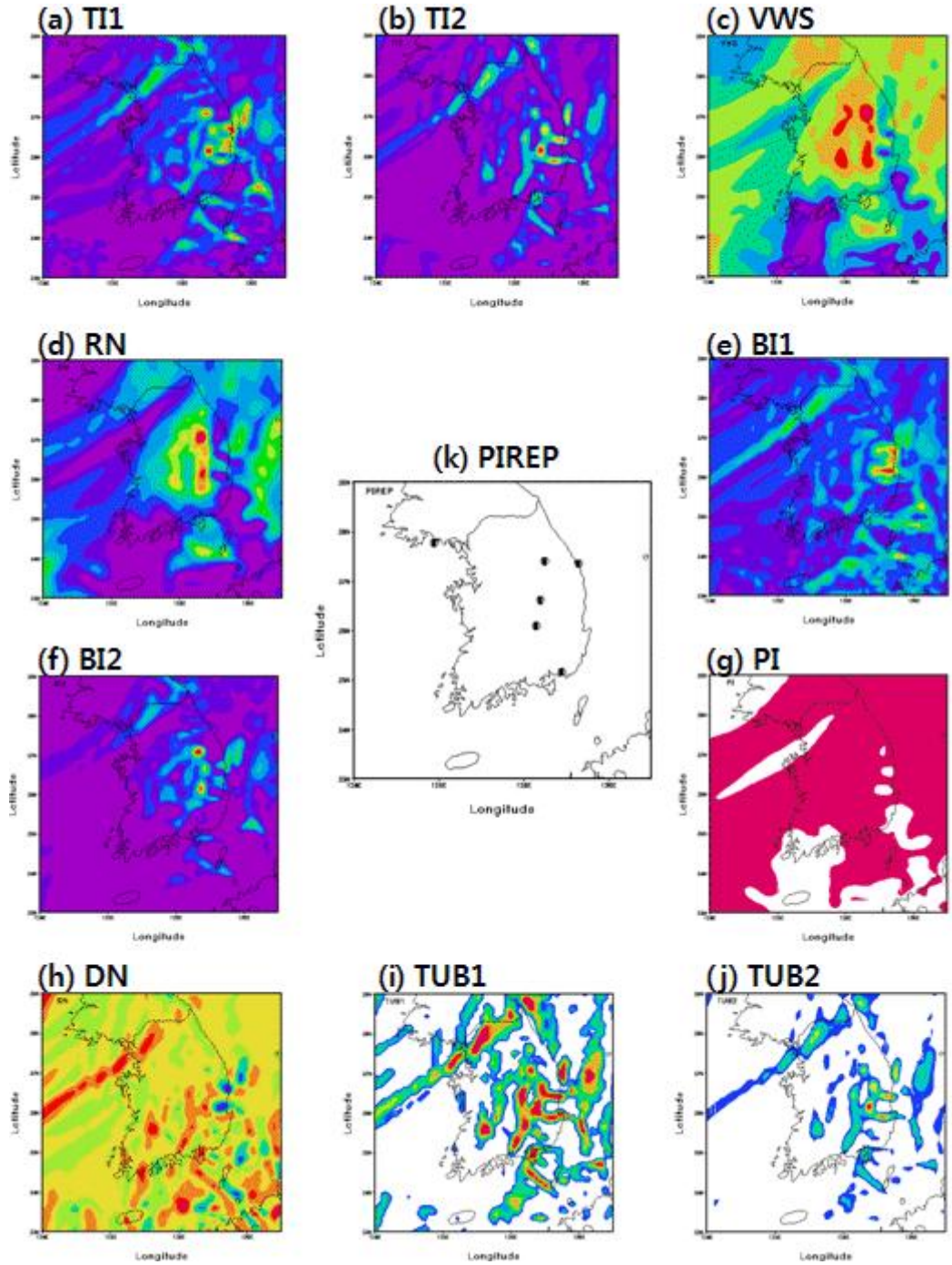


Fig. 3. The spatial distribution for turbulence diagnostics calculations using by KWRF output on 09UTC May. 4. 2008

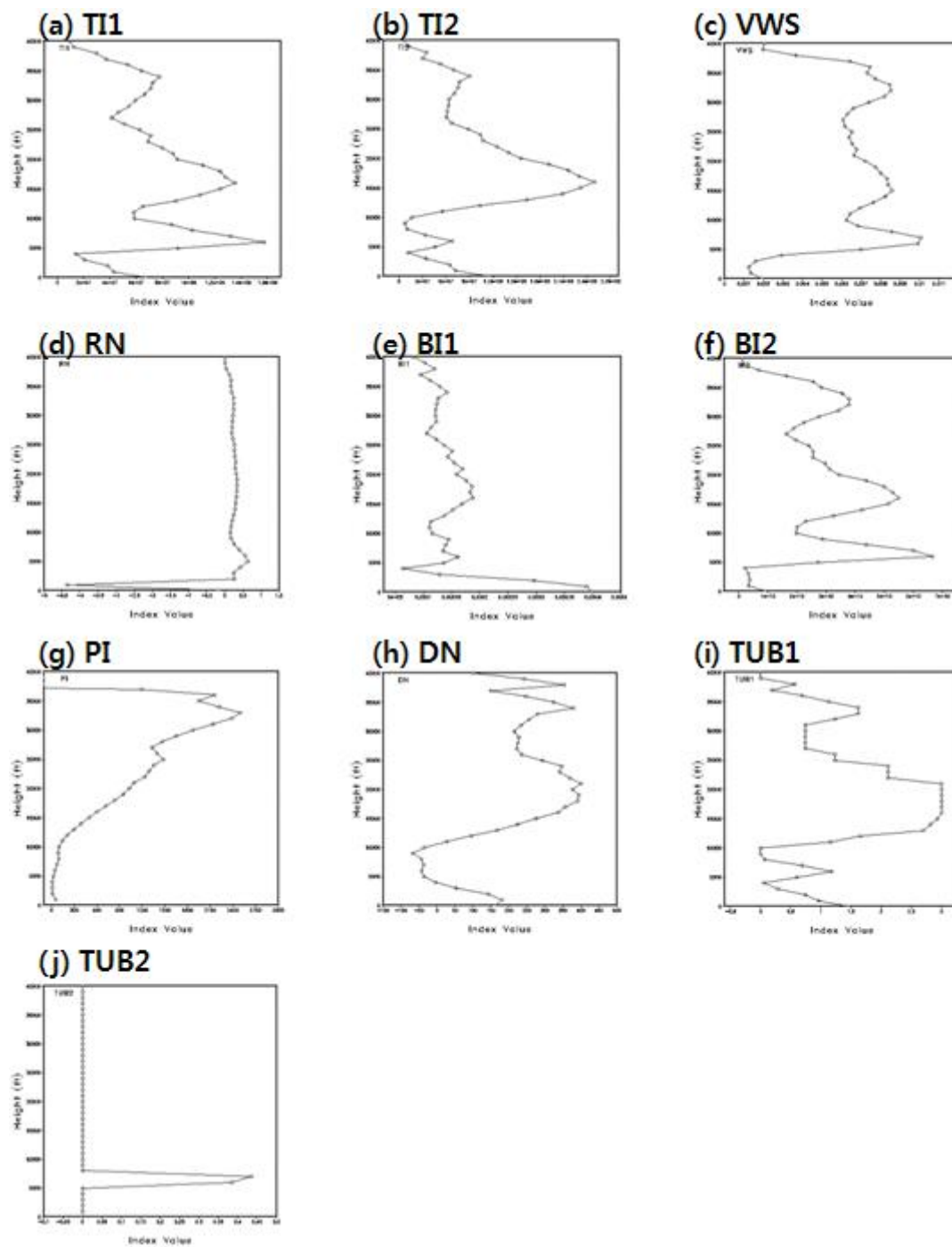


Fig. 4. The vertical distribution for turbulence diagnostics calculations at Gangneung AP using by KWRP output on 09UTC May. 4. 2008

Table 3. The specification for KWRP model

	Specification
수평 좌표계	574x514 (10 km)
연직 좌표계	40 eta level
Grid Staggering	Arakawa B
시간 적분	Leapfrog (60 sec)
Cumulus	New Kain-Frisch
Microphysics	WSM6
Radiation	Shortwave : MM5 scheme
	Longwave : RRTM
PBL	YSU PBL
Soil &Vegetation	Noah LSM (4 layer)

PIREP 자료에서 난류가 있었던 2008년 2월 11일 09UTC에 대하여 Fig 1에 나타내었다.

이 시간에 보고된 PIREP은 2개였으며 김해와 안면도 부근 상공에서 보고되었으며 10,000~30,000 ft에서 강도는 LGT가 2회 있었다. 각 난류 지수마다 결과에서는 많은 차이를 보였으나, 대체로 TI1, TI2, DN, TUB1, TUB2은 유사한 분포를 보였으며, VWS, RN은 위도대에 평행한 형태를 보여, 세밀한 공간적 차이를 표현하지 못하였고, PI는 거의 남한 지역으로 균일한 값을 모사했다. TI2와 TUB2는 김해 부근의 난류는 나타내었으나, 안면도 부근의 난류는 나타내지 못하였고 나머지 방법들에서는 두 지점의 보고에 대하여 난류를 모두 예측된 것을 볼 수 있다. 난류의 연직의 구조를 분석하기 위하여 PIREP의 난류 보고가 있었던 안면도 부근의 지점에 대해 0~40,000ft의 계산된 난류 지수를 Fig 2에 나타내었다.

난류는 대체적으로 15,000에서 20,000ft에서 강하게 계산되었으며 나머지 고도에서도 약한 난류들이 나타나고 있으며 BI와 DN지수의 경우 지면 근처에 계산이 크게 되고 있다. 그러나 Fig 1에서 난류를 나타내지 못했던 TI2의 경우에 30,000ft의 고도에서 난류가 약하게 계산되는 것을 알 수 있다. TI2계산 값을 이용하여 기존 참고 문헌의 임계값을 적용한 TUB2 지수에서는 다른 지수에서 나타나고 있는 20000ft 이상의 난류를 전혀 나타내지 못하고 있다. 그러므로 한반도의 난류 지수 선정 시 임계값의 조절이 반드시 필요한 것으로 분석된다.

2008년 5월 4일 09UTC의 KWRP 예측장을 이용하여 15,000ft 고도에서 난류 지수들을 Fig. 3에 나타내었다.

이 시간에 보고된 PIREP(k)은 6개였으며 대부분 강원도와 경상도 지역의 상공에서 보고가 되

었으며 10,000~30,000ft에서 강도는 LGT(5개)와 MOD(1개)가 있었다.

대부분의 지수에서 비슷한 공간적 분포를 보였으나 TUB2(j)의 경우 난류 지수가 0으로 난류를 나타내지 못하였고, VWS지수(c)의 분포는 다른 방법과는 반대의 분포가 보이거나 참고문헌을 이용한 TUB1(i)지수로 나타내었을 때는 뚜렷이 일치하는 것을 볼 수 있다.

난류의 연직의 구조를 분석하기위하여 PIREP의 난류 보고가 있었던 강릉 비행장 근처 지점에 대해 0~40,000ft의 계산된 난류 지수를 Fig 4에 나타내었다.

난류 지수 별로 차이는 있으나 15,000 ft에서 지수들 모두에서 난류가 강하게 계산되고 있다. 20,000 ft 이상의 고도에서 난류 지수에 따라 강도의 차가 심하게 나타는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구는 다양한 난류 지수들을 차세대 수치 예보 모델인 KWRP 모델에 의해 예측하고, 이를 조종사 기상 보고 자료의 항공기 난류의 발생 현황과 비교한 것이다.

KWRP 모델의 2008년 2월 11일과 2008년 5월 4일 예측 결과를 활용하여 10개의 난류 지수 식을 계산했다.

이를 조종사 기상 보고와 비교 시, 대부분의 지수에서 비슷한 공간적 분포를 보였으나 TUB2의 경우 난류를 나타내지 못하였고 VWS는 다른 방법과는 반대의 분포가 보이거나 보정된 TUB1 Index로 나타내었을 때는 뚜렷이 일치하는 것을 볼 수 있다.

또한, 난류의 연직 구조를 분석 결과, 난류 지수 별로 차이는 있으나 15,000 ft에서 지수들 모두에서 난류가 강하게 계산되고 있다. 20,000ft 이상의 고도에서 난류 지수에 따라 강도의 차가 심하게 나타는 것을 볼 수 있었다.

특히 고고도 상층의 난류는 TI2 지수가 유리하며 하층의 저고도 난류는 RN과 PI를 참조하는 것이 효율적이라 분석되었으며 VWS 지수는 바람 성분의 시어에 의한 진단식이기 때문에 모든 고도에서 활용가능하다. 그러나 검증에 위한 PIREP 등 관측 자료 부족과 수치 예보 모델 결과의 활용이라는 측면은, 앞으로 더욱 많은 연구가 이루어져야함을 보여주고 있다.

수치 예보 모델 결과 자료에 근거한 난류 지수와 PIREP 자료와의 비교를 통한 사례 실험을 통해, 항공기 운항에 필수적인 항공기 난류의 수

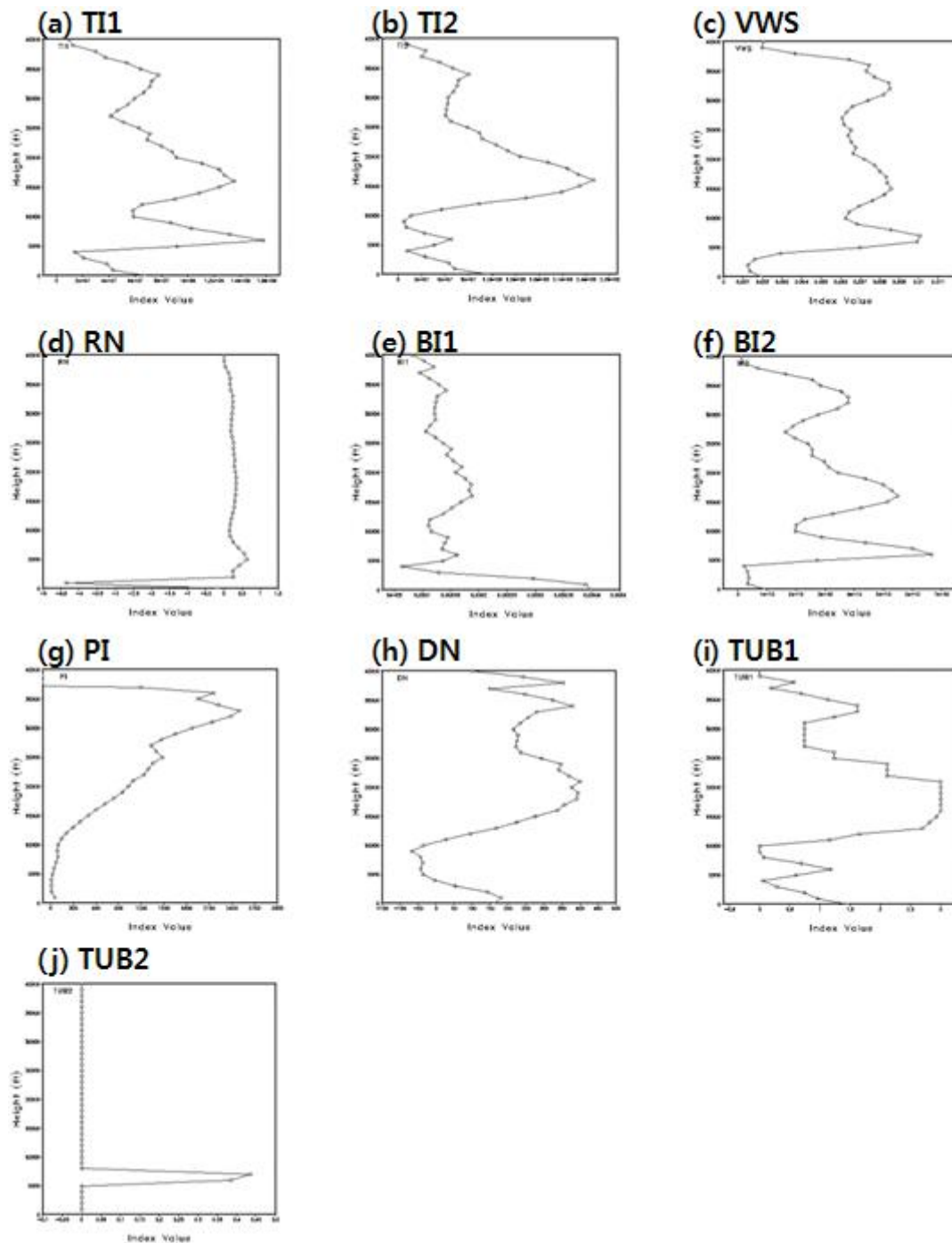


Fig. 4. The vertical distribution for turbulence diagnostics calculations at Gangneung AP using by KWRP output on 09UTC May. 4. 2008

평·연직 분포와 특성을 분석할 수 있었다. 이를 활용하면, 우리나라 항공기 난류의 연구 및 개발에 많은 도움을 줄 것이라 기대된다.

특히 많은 난류 예측 지수중에서 우리나라 환경에 가장 적합한 난류 지수를 설정할 수 있어, 항공기 운항에 많은 도움을 줄 것 이라 생각되며, 이를 바탕으로 한국형 난류 예측 지수 개발에도 기여를 할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 항공기상청의 “공역 항공로 실시간 악기상 예측시스템 개발에 관한 정보화용역”의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- 1) Lester, P.F., 2004: Aviation Weather, second edition, Jeppesen Sanderson Inc.
- 2) Ellrod, G. P. and D. I. Knapp, 1992: An objective clear-air turbulence forecasting technique: verification and operational use, *Wea. Forecasting*, **7**, 150,165.
- 3) Kronebach, G. W., 1964: An Automated Procedure for Forecasting Clear-Air Turbulence, *J. Appl. Met.*, **3**, 119-125.
- 4) Roach, W. T., 1970 : On the influence of synoptic development on the production of high level turbulence, *Quart. J. R. Met. Soc.*, **96**, 413-429.
- 5) Brown, R., 1973 : New indices to local clear-air turbulence, *Meteorol. Mag.*, **102**, 347-361.
- 6) Colson, D., and H. A. Panofsky, 1965: An index of clear-air turbulence. *Quart. J. Roy. Meteor Soc.*, **91**, 507-513.
- 7) Dutton, M. J. O., 1980 : Probability forecasts of clear-air turbulence based on numerical model output, *Meteorol. Mag.*, **109**, 293-311.