

論文

PIREP과 KWRP를 활용한 한반도 난류, 착빙 지수의 임계값 설정 및 검증

김영철*

A Verification of threshold of the aircraft turbulence index and icing index using PIREPs and KWRP on Korean peninsula

Young-Chul Kim*

ABSTRACT

The purpose of this study is verification of threshold of the aircraft turbulence index and icing index using PIREPs and KWRP on Korean peninsula, to operational weather support.

There is improvement in new threshold value made of the pilot weather report data and the turbulence and icing index from KWRP model result, using the ROC Diagram method. the accuracy is up to 0.6 compared with the precedent study result 0.5.

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

Key Words : aircraft turbulence(항공기 난류), aircraft icing(항공기 착빙)
PIREPs(조종사 기상보고), threshold value(임계값),
KWRP(기상청 차세대지역예보모델), numerical weather prediction(수치예보)

1. 서 론

대기 속을 운항하는 항공기는 경제성, 안전성, 정규성, 효율성을 그 특징으로 하며, 특히 항공기 안전(Aircraft Safety)은 가장 중요하다고 할 수 있다. 항공기 안전에 영향을 미치는 요인은 다양하나, Human Factor, Runway Incursion, Weather,

Mid-Air Collision, Mechanical & Maintenance의 5개 분야가 주요한 요인으로 볼 수 있다. 이중 기상은 가장 중요한 요인 중의 하나로, 2003년~2007년 사이 미국에서 발생한 전체 항공기 사고의 20.1%를 차지한다. 특히 난류와 착빙은 비행에 장애를 줄 뿐만 아니라 심한 경우 치명적인 항공기 사고를 유발하기도 하여 대형 여객기 사고의 73.7%가 난류에 의한 것으로, 기상 요인 중에서도 가장 중요한 요소라고 할 수 있다(FAA ASIAs [1]).

항공기 난류(aircraft turbulence)는 대기 상태의 급변으로 인해 항공기가 비행 중에 나타나는 불규칙적인 운동을 말한다. 항공기 난류가 생기는 원인은 역학적인 것, 열적인 것, 바람 시어(wind shear)에 의한 것, 항공기의 항적(wake)에 의한 것

2011년 8월 22일 접수 ~ 2011년 9월 22일 심사완료

* 한서대학교 항공운항학과

E-Mail : yckim@hanseo.ac.kr

충남 태안 남면 신온리 산105 한서대학교 태안비행장

등 다양한 원인에 의해 발생될 수 있으나, Lester[2]는 난류가 발생하는 곳, 나타나는 대기 순환의 규모, 무엇이 난류를 발생시키는가에 따라 LLT(low level turbulence), CAT(clear air turbulence), MWT(mountain wave turbulence), TNT(turbulence in and near thunderstorms)의 4개의 영역으로 구분하였다. 항공기 난류는 관측 자료가 많이 부족하여 각종 예보 법칙도 경험적이며 주관적인 경향이 강하고, 수치 예보의 경우에도 아직은 개발 단계에 있는 실정이다.

한편, 착빙(Icing)은 결빙 온도 이하의 상태에서 대기에 노출된 항공기 표면에 과냉각 수적 혹은 구름 입자가 충돌하여 얼음의 피막이 형성되는 현상을 의미한다. 항공기 날개에 착빙이 일어나면, Lester[2], Landkford[3], 이승재와 김영철[4]에서 제시한 것처럼 유선이 호트러짐으로 인해 항력이 증가되고 양력은 감소시키며 항공기의 조종을 방해할 수 있다.

국내에서 항공기 착빙과 난류 연구는 대단히 미미한 실정으로, 이승재와 김영철[4,5]이 과거 기상청 현업 수치 예보 모델인 MM5 모델에서 몇 가지 착빙과 난류 지수를 계산하여 공군에서 수집된 PIREP 자료와 비교 분석하여 착빙과 난류의 예보 가능성을 시도한 연구가 거의 유일한 사례이다.

최근 들어 김영철[6,7]은 기상청 예보 모델인 KWRF(KMA Weather Research and Forecast Model) 결과를 기반으로 다양한 난류 지수와 착빙 지수를 계산하고, 이를 조종사 기상 보고(pilot weather reports, PIREPs) 자료와 비교한 연구를 수행하여 한반도 지역의 난류와 착빙 지수 특성을 분석하고, 가장 적합한 난류 지수와 착빙 지수의 선정을 시도하였다.

이에 본 연구에서는 한반도 지역에서 발생하는 착빙과 난류 강도를 등급으로 구분하기 위한 임계값을 설정하고 이를 검증함으로써, 효과적인 현업 예보 생산 및 지원과 사용자 측면에서의 활용성 증대를 도모하고자 한다.

2. 조종사 기상 보고(PIREPs)

대기 중에서 발생하는 착빙과 난류에 대한 관측 자료는 국내에서는 거의 전무한 실정이다. 현재 활용 가능한 자료 중에서는 직접적인 방법으로 조종사 기상 보고(PIREP) 자료가 있으며, 간접적인 방법으로는 radiosonde와 같은 고층 관측 자료가 있다. 본 연구에서는 직접적인 관측 자료

인 조종사 기상 보고 자료를 활용했다. 항공기상청에서 확보한 PIREP은 대부분 민항기 운항에서 수신된 자료를 이용하였고, 항공기의 운항고도, 위치(위도, 경도), 기온, 풍향, 풍속, 구름양, 일기 상태, 착빙의 강도에 대한 정보를 담고 있다. 2007년 6월부터 2008년 10월까지 자료 수는 2,784개였으며 한반도 공역에서 10km×10km의 격자에 대해 빈도수를 조사한 결과는 Fig. 1과 같다.

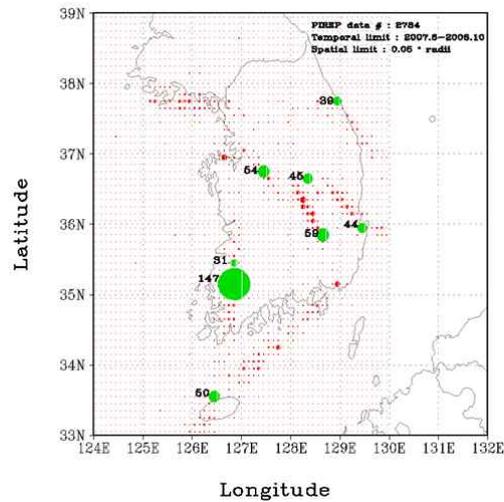


Fig. 1 The spatial frequency for PIREP data

3. KWRF 모델

난류 및 착빙에 대한 발생 및 발달, 소멸에 대한 연구가 아직 부족하며 실시간 한반도 전 지역에 대한 관측도 부족하기 때문에, 난류와 착빙을 예측하는 모델은 아직 개발되지 못하고 있는 실정이다. 또한 난류와 착빙 계산식들은 현재 대기 상태에 대하여 기상 변수를 이용하여 발생 가능성에 대해 진단하는 식들이 대부분이다. 이러한 상황에서 난류와 착빙 예보는 수치모델의 예측값들을 이용하여 모든 예보 시간대에 대하여 진단하는 방법을 사용한다. 즉 수치예보 모델의 정확성은 난류와 착빙의 예보 정확도와 직접적인 관계가 있음을 의미한다. 따라서 이 연구에서는 현재 기상청에서 현업 운용 중인 수치 모델인 KWRF를 활용하였다. KWRF 모델은 기상청에서 현업 예보를 위하여 수행되는 수치 예보 모델로서 중규모 기상 현상 예측에 대하여 탁월한 능력을 발휘한다. 현재 기상청에서 수행되고 있는 KWRF의 특징은 아래 Table 3과 같으며, 계산

도메인 영역은 Fig. 2와 같다.

Table 3 The specification for KWRf 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) |

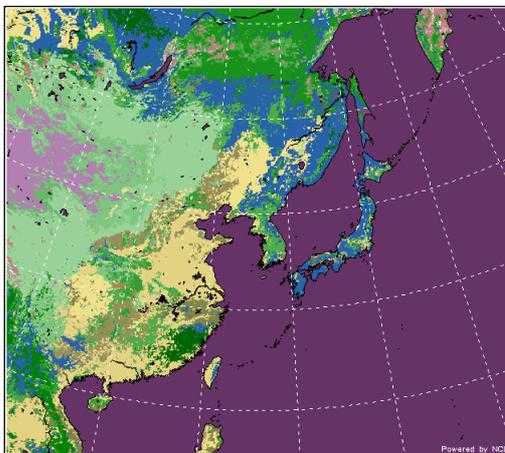


Fig. 2 The KWRf Domain region

4. 난류 및 착빙 지수의 임계값 설정

정시마다 생산되는 예보자료와 PIREP의 시간 일치는 아주 중요한 부분이다. Fig. 3과 같이 KWRf 예보는 매 3시간 간격으로 이루어지며, PIREP 자료는 비행기의 일정에 의존된다. 이때 시간의 일치는 06UTC와 같이 동일한 시간일 때 가장 정확한 시간일치가 이루어지며 좋은 검증자료가 될 것이다. 그러나 사례기간인 2007년 6월

부터 2008년 10월까지 정확히 일치되는 자료 수는 극히 제한적이다. 따라서 이 연구에서는 PIREP 보고 시간이 KWRf 예보시간을 기준으로 전후 30분과 1시간 30분 내에 들어오면 일치하는 것으로 간주하여 계산을 수행하였다.

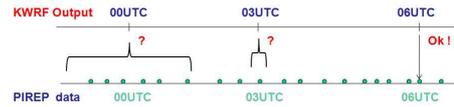


Fig. 3 The coincident between KWRf forecast and PIREP report time

4.1 ROC Diagram

착빙 및 난류지수의 계산은 연속적인 수치로 계산되기 때문에 실제 대기에서 관측된 PIREP을 난류, 착빙과 같은 등급으로 구분하여 지수하는 것이 예보되었을 때 사용자들이 이해하기 수월하고 한 번에 공간적인 분포를 파악하기 쉽다. 이러한 지수의 등급을 나누기 위해 ROC(Receiver Operating Characteristics) Diagram을 이용하여 임계값을 설정하였다. ROC Diagram을 나타내는 방법은 Contingency 테이블을 이용하여 PODY (Probability of Detection of observed yes event)와 PODN(Probability of Detection of observed null event)을 계산하여 두 값이 최대가 되는 점을 임계값으로 정하는 것이다. 여기서 관측은 PIREP이고 예측은 KWRf 예보 값이다.

| 관측 \ 예측 | YES | NO | TOTAL |
|---------|-------|-------|-------------|
| YES | YY | YN | YY+YN |
| NO | NY | NN | NY+NN |
| TOTAL | YY+NY | YN+NN | YY+YN+NY+NN |

Fig. 4 Contingency Table between Observation and Forecast

PODY와 PODN은 Fig 4의 테이블을 이용하여 아래의 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$PODY = \frac{YY}{YY + YN} \tag{1}$$

$$PODN = \frac{NN}{NY + NN} \tag{2}$$

먼저 ROC 곡선을 만들기 위한 자료는 PIREP

의 시간과 지점 그리고 고도에 해당되는 KWRP 난류 및 착빙 지수 값들을 쌍으로 만든다. 그리고 지수 값의 최소부터 최대까지 일정한 간격으로 지수의 임계값을 조절하면서 식 (1)과 (2)의 PODY와 PODN을 계산하여 그 값이 최대가 되는 점을 임계값으로 정한다.

4.2 난류 지수의 임계값

난류지수에 대하여 시간 간격을 1시간 30분, 30분을 적용하였고, PIREP에서 나타난 LGT(약함)과 MOD(중간)을 기준으로 각각에 대하여 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

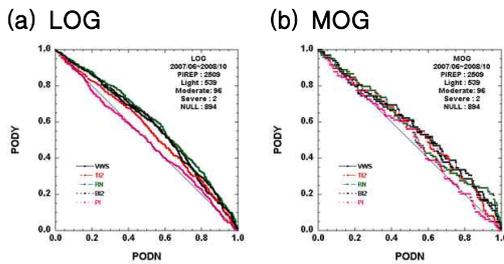


Fig. 5 The ROC diagram for turbulence index by temporal limit 1 hour 30 minutes

Table 4 The threshold values and statistics for turbulence index

| Index | Light | | | Moderate | | | Severe | | |
|-------|-------------------------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|-------------------------|------|-------|
| | Threshold | PODY | PODN | Threshold | PODY | PODN | Threshold | PODY | PODN |
| WWS | 0.4072×10^{-2} | 0.598 | 0.540 | 1.4212×10^{-2} | 0.612 | 0.510 | 2.4262×10^{-2} | 1.0 | 0.512 |
| TI2 | 0.111×10^{-6} | 0.564 | 0.515 | 0.559×10^{-6} | 0.551 | 0.579 | 1.0630×10^{-6} | 1.0 | 0.710 |
| RN | 0.1338 | 0.592 | 0.575 | 0.4359 | 0.571 | 0.517 | 1.2734 | 0.5 | 0.950 |
| BI2 | 0.393×10^{-10} | 0.592 | 0.575 | 0.562×10^{-10} | 0.571 | 0.517 | 0.973×10^{-10} | 0.5 | 0.950 |
| PI | 12.4 | 0.520 | 0.491 | 768.80 | 0.602 | 0.492 | 1803.5 | 0.5 | 0.586 |

Table 5 The threshold values for icing index

| Index | light | moderate | severe | extreme |
|-------|-------|----------|---------|---------|
| SCLW | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 0.9 |
| AFGWC | 1 | 2, 3, 4 | 5, 6, 7 | |

Table 6 The threshold value for RAP icing index

| Index | general | stratiform | freezing | Convection (unstable) |
|-------|---------|------------|----------|-----------------------|
| RAP | 1 | 2 | 4 | 8 |

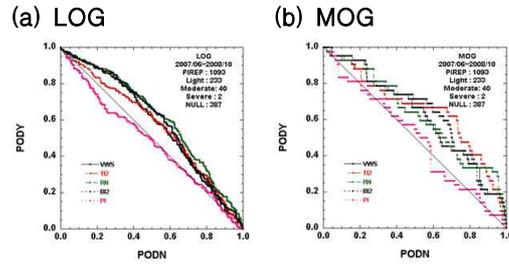


Fig. 6 Same as Fig. 5 except for temporal limit 30 minutes

Fig. 5와 Fig. 6의 (a)는 약함 이상의 난류에 대한 ROC 곡선이며 (b)는 중간이상의 난류에 대한 것으로 중간 이상의 난류 보고 자료가 적고 계산 간격은 짧기 때문에 (b)에서는 계단 현상이 나타난다. 자료수를 보면 시간제한에 따라 약함 난류의 자료수가 2,509개에서 1,093개로 약 1/3로 감소되고 중간 이상의 난류는 96개에서 40개로 급격히 감소되는 것을 볼 수 있다. ROC diagram은 시간제한이 적을 때 더 크게 나타나지만 그 차이는 그리 크지 않은 것으로 분석되었다.

결국 관측 시간과 예보 시간이 잘 일치될수록 정확도 높은 임계값을 얻을 수 있으나 중간이상의 난류에 대해서는 자료수가 상대적으로 적어지기 때문에 부정확한 결과를 얻을 가능성을 배제하기 힘들다. 이 연구에서는 1년 4개월의 사례 기간과 자료 수 그리고 정확성을 고려하여 1시간 30분의 시간제한을 고려하여 임계값을 선정하였고, 그 결과는 Table 4와 같이 정리된다. 여기에서 사용된 난류 지수는 VWS, TI2, RN, BI2, PI로, 김영철[6]에서 연구된 한반도 지역에 적합한 난류 지수들이다.

각 난류지수들의 임계값들은 KWRF 예보시간에서 계산되는 각각의 난류 지수들의 등급 구분에 적용할 수 있다. 그리고 PODY와 PODN의 결과를 통하여 각 지수들의 난류 예보의 정확도를 가늠할 수 있다.

4.3 착빙 지수의 임계값

착빙지수에 대해서도 난류지수와 마찬가지로의 방법을 적용하여 임계값을 결정하였다. 여기서 사용한 착빙 지수는 김영철[7]에서 연구된 한반도 지역에 적합한 지수로 SCLW, RAP, AFGWC, ICI2 이고, 시간에 따른 ROC 곡선은 Fig. 7과 같다. 착빙의 경우 단계를 구분하여 보고는 하고 있으나 중간(MOD) 강도의 보고가 1개였기 때문에 제외하였다.

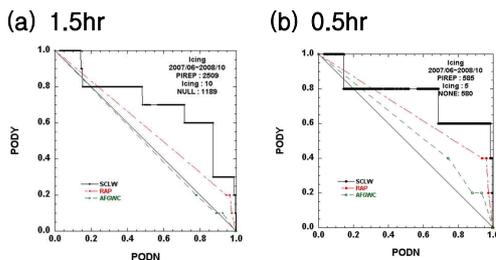


Fig. 7 The ROC diagram for icing index by temporal limit (a)1 hour 30 minutes and (b) 30minutes

17개월 동안 시간 및 공간 일치된 자료 수는 많았으나 착빙이 있다고 보고된 자료는 각각 10개, 5개였고 대부분 착빙이 없었다. RAP지수와 AFGWC 지수는 착빙의 강도나 형태에 대한 지수법이기에 때문에 따로 설정할 필요는 없으나 기존 연구에 대한 착빙의 임계값을 확인하기 위하여 적용하였으며, 착빙에 대한 임계값은 Table 5

와 Table 6에 각각 나타내었다. Table 5와 Table 6에서 SCLW와 AFGWC 착빙지수는 착빙의 강도를 이용한 분류이며, RAP 착빙 지수는 강수 또는 구름의 형태에 의한 분류이다.

5. 난류 및 착빙 지수의 검증

선택된 난류 및 착빙 지수의 임계값을 KWRF 모델에 의해 예측된 지수의 범위 설정과 강도 구분에 적용하였다.

5.1 난류 지수의 검증

2007년 6월에서 2008년 10월까지 PIREP 보고 자료를 이용하여 ROC diagram 방법을 사용하여 검증을 수행했다. 검증에 활용된 지수는 VWS, TI2, RN, PI로 사용했으며, 그 결과는 Fig. 8에 나타내었다.

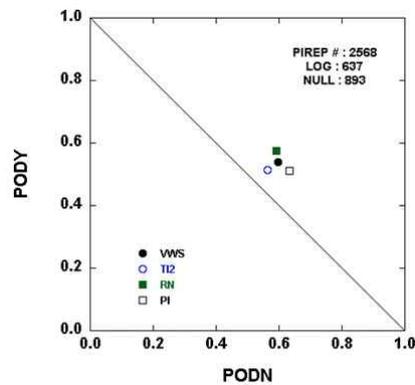


Fig. 8 The ROC diagram for turbulence index from Jun 2007 to Oct. 2008

전체 사례 2,568중 LGT강도 이상의 난류 보고는 637회였고 난류 없음은 1,083회였다. 대체로 PODY와 PODN은 0.6 이상이었고 TI가 다소 낮은 값을 보였고 VWS, RN, PI 난류 지수는 그리 높지는 않으나 비슷한 정확도를 보였다.

조사된 PIREP보고가 많은 8개 지점에 대하여 PIREP 빈도가 높은 위치에 따라 Fig. 9에 나타내었고, 난류 지수에 따른 검증결과는 Fig. 10에 나타내었다.

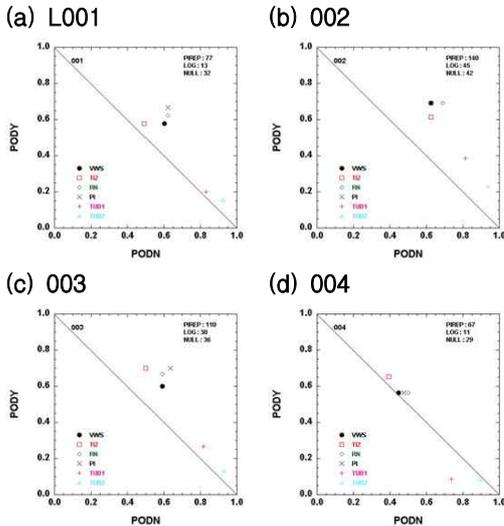


Fig. 9 Same as Fig. 8 except for PIREP site

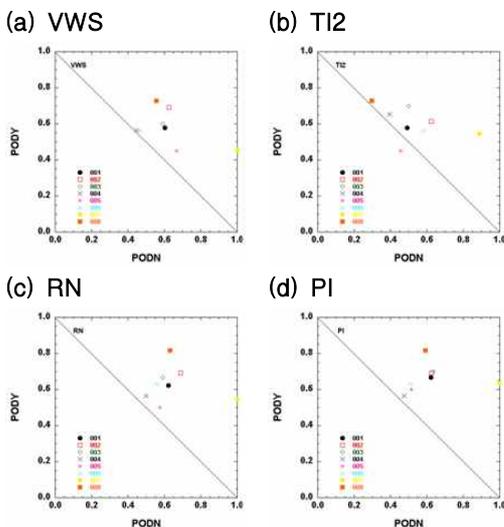


Fig. 10 Same as Fig. 9 except for turbulence index

여기서 TUB1과 TUB2는 VWS와 TI2 난류지수의 선행 연구의 임계값을 적용한 결과이며, 새로 계산된 임계값이 적용된 VWS, TI2 지수에 비하여 영역 면에서 과소 진단하는 것을 알 수 있다. TUB1과 TUB2의 PODY는 낮고 PODN이 높은 것은, 난류 보고된 지역은 진단하지 못하였으나 난류 없음이 보고된 지역은 진단을 잘한 것으로 새로 임계값을 선택한 VWS와 TI2의 임계값이 상대적으로 낮게 선택되어진 것으로 분석된다. 지역적으로 보았을 때 네 지역 모두에서 새로 수

정된 임계값이 기존 연구의 결과보다 좋게 나타나는 것으로 보아 임계값 선정은 타당했음을 의미한다.

선정된 네 가지 난류지수 사이에 차이는 비교적 적었으나 RN이나 PI 난류지수의 정확도가 VWS와 TI2에 보다 지역에 따라 변동성이 컸으나 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 검증에 이용된 PIREP자료가 대부분 민항기에 의하여 보고된 자료로 보고된 자료의 고도가 20,000부터 35,000ft의 고고도 자료인 것으로 볼 때 고고도 난류의 진단은 VWS나 TI2 지수가 타당하나 RN이나 PI도 활용 가능할 것으로 분석된다.

5.2 착빙 지수의 검증

착빙지수에 대해서도 난류지수와 마찬가지로 방법을 적용하여 PIREP 보고 자료와 검증을 하였다. 검증에 활용된 지수는 SCLW, RAP, AFGWC, ICI2 이며, 그 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다.

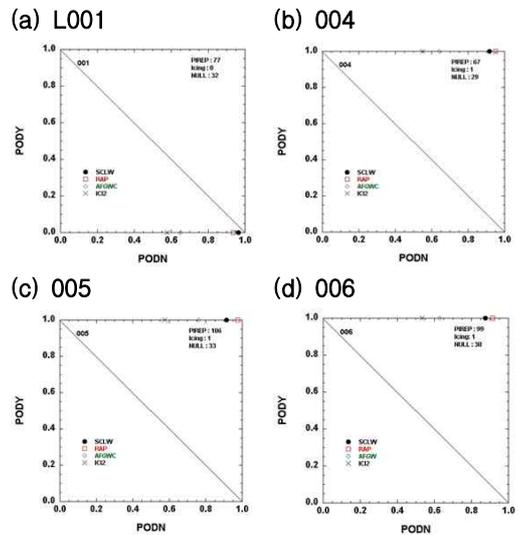


Fig. 11 Same as Fig. 9 except for icing index

PIREP 보고 자료에서 착빙이 있는 보고는 아주 적어 사례 기간 중 10회였고, 이 연구의 PIREP 지역 구분에서 나타난 자료는 5회였으며, Fig. 11의 004, 005, 006 3개의 그림에 각각 1회씩 LGT 강도의 착빙이 있었다. 모든 방법에서 착빙 사례는 모두 정확하게 진단한 것을 볼 수 있으나 착빙이 없는 곳에 과대하게 착빙을 진단

한 지수들이 있는 것으로 분석된다. 특히 기존 사용되던 ICI2 지수는 모든 지점에서 가장 낮은 PODN을 나타냈고 RAP이 가장 높은 PODN을 나타낸 것을 볼 수 있다. 임계값을 수정한 SCLW는 RAP과 거의 같은 정확도로 착빙에 대하여 진단하였다.

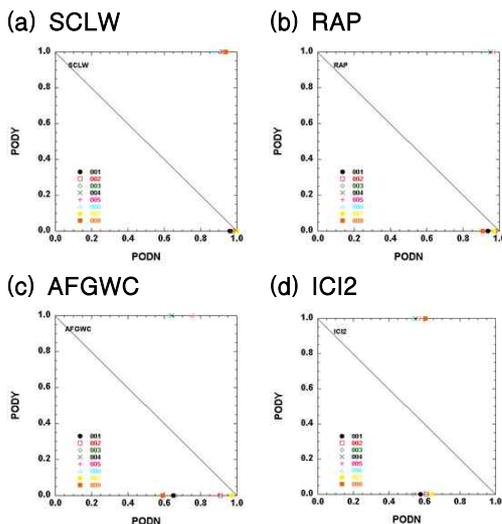


Fig. 12 Same as Fig. 10 except for icing index

PIREP 보고 자료가 부족한 문제는 있으나 결과를 분석하면 SCLW와 RAP 착빙지수 방법의 정확도가 아주 높게 나타났으며 AFGWC와 ICI2는 상대적으로 낮은 것으로 분석된다. 따라서 이러한 결과를 KWRF 모델 예측자료에 적용하여 착빙예보를 한다면, AFGWC와 ICI2는 착빙 없는 지역에 대하여 SCLW와 RAP 방법과 비교하여 과대하게 착빙을 예보할 것으로 판단된다.

6. 결론

이 연구는 한반도 지역에서 발생하는 착빙과 난류 강도를 등급으로 구분하여 현업 지원하기 위해서, 등급의 기준이 되는 임계값을 설정하고 검증하는 것이다. 난류 지수는 VWS, TI2, RN, BI2, PI를, 착빙 지수는 SCLW, RAP, AFGWC, ICI2를 사용했으며, 이는 김영철[6,7]에 의해 연구된 한반도 지역에 가장 적합한 지수들이다. 검증을 위해 PIREP 자료와 KWRF 모델 결과가 사용되었으며, 검증 방법은 ROC Diagram을 이용하였다.

난류와 착빙 지수의 강도 구분을 위하여 PIREP 자료와의 ROC 곡선을 이용하여 임계값을 설정하였고, 기존 연구에서 사용된 임계값과 비교하여 성능 향상이 나타났다. 난류의 경우 PIREP 보고 자료를 이용하여 개선한 VWS와 TI2 등의 난류 지수는 TUB1(VWS)과 TUB2(TI2) 지수의 임계값을 적용한 결과와 비교하여 향상된 진단 결과를 보였다. 즉 사례 기간(2007년 6월~2008년 10월)에 대해 PIREP 자료를 이용한 ROC 곡선 검증 결과 VWS, TI2 난류 지수의 경우 0.5였던 정확성이 0.6이상으로 향상되었다.

그리고 착빙지수로 선정된 SCLW, RAP, AFGWC 지수는 IC2 지수와 비교하여 착빙 영역 및 착빙 없는 영역의 판별에 대해서도 정확성이 향상되었다. PIREP 착빙 보고 자료 및 위성 자료를 이용한 착빙 검증에서 착빙 지수의 경우 0.5이하였던 정확성이 0.6이상으로 향상되었다. 그러나 이러한 결과는 PIREP 보고 자료에 상당 부분 의존적인 결과이며 선정된 사례 기간이 1년 5개월로 비교적 짧은 기간에 대하여 수행되었기 때문에 장기간의 사례 분석이 필요한 것으로 분석된다. 또한 제안된 지수들의 정확성을 높이기 위해서는 무엇보다도 정확성 높고 정량화된 관측 자료의 수집이 필요한 것으로 분석된다.

참고문헌

- [1] http://www.asias.faa.gov/portal/page/portal/asias_pages/asias_studies/pdfs/2003-2007_weatherrelatedaviationaccidentstudy.pdf
- [2] Lester, P. F., 1995: Aviation Weather, Jeppesen Sanderson Inc.
- [3] Lankford, T. T., 2001: Aviation Weather Handbook, McGraw-Hill Inc.
- [4] 이승재, 김영철, 2005 : 남한지역 상공에서의 항공기 착빙 발생과 예측에 관한 연구, 한국기상학회지, 41(4), 615-624.
- [5] 이승재, 김영철, 2002 : 남한지역 상공에서 관측된 항공기 난류(亂流)예보의 수치예보와 검증, 한국기상학회지, 38(5), 493-507.
- [6] 김영철, 2010 : KWRF를 활용한 한반도 항공기 난류 지수 특성 분석, 한국항공운항학회지, 18(1), 91-101.
- [7] 김영철, 2010 : KWRF를 활용한 한반도 착빙 지수 특성 분석, 한국항공운항학회지, 18(3), 42-54.