

論文

KWRF를 활용한 한반도 착빙 지수 특성 분석

김영철*

The Analysis of the characteristics of Korean peninsula
Aircraft Icing Index using KWRF

Young-Chul Kim*

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the aircraft icing index of Korean peninsula using the numerical weather prediction model, KWRF and pilot weather report data.

As comparing the pilot weather report data with the calculated icing index using the KWRF model result, SCLW, RAP, and AFGWC index are more useful than any other index, and IC2, NAWAU, and RSID index are different case by case. But IC1, SID1 and SID2 index show that these overestimated severe icing in every vertical level.

Through this icing study, it is expected that this study will help to develop the proper icing index of Korean peninsula.

Key Words : aircraft icing(항공기 착빙), icing index(착빙지수), PIREPs(조종사 기상보고), KWRF(기상청 차세대지역예보모델), numerical weather prediction(수치예보)

1. 서 론

착빙(Icing)은 결빙 온도 이하의 상태에서 대기에 노출된 물체에 과냉각 수적 혹은 구름 입자가 충돌하여 얼음의 피막이 형성되는 현상이다. 항공기 날개에 착빙이 일어나면, Lester[1], Landkford[2], 이승재와 김영철[3]에서 제시한 것처럼 유선이 흐트러짐으로 인해 항력이 증가되고 양력은 감소시키며 항공기의 조종을 방해할 수 있다.

항공기 착빙 현상은 과냉각 물방울이 존재하는 대기를 비행하는 항공기에서, 항공기 표면의 자유대기온도가 0°C 미만일 때 발생한다. 청명한 대기 속에서는 심한 착빙이 생기지 않으나, 상대

습도가 높고 영하의 기온일 때는 프로펠러나 날개 위를 통과하는 공기의 팽창으로 약간의 수분이 응결하여 착빙이 생기기도 한다. 과냉각 물방울은 -20 ~ 0°C 에서 가장 자주 관측되므로, 이 온도 범위 내에 있는 구름은 착빙의 가능성이 있다고 보아야 하며, 심한 착빙은 보통 -10 ~ 0°C 에서 발생한다. 드물게 -40°C 인 저온에서도 착빙이 나타날 수 있다. 그러나 운중 온도가 -20°C 미만이 되면, 물방울이 이미 결정 형태로 빙결되어 있기 때문에 착빙은 잘 일어나지 않는다. 항공기 착빙은 보통 비행 중이거나 주기 중에 날개 끝, 프로펠러, 방향타, 안테나 등 기체의 노출면에 생기는 구조착빙(기체착빙)과 기관 내부에 발생하는 유도착빙(기관착빙)으로 나누어지며, 구조착빙은 그 생성 원인 및 특성에 따라 4가지로 구분되어진다(Table 1).

20010년 07월 25일 접수~20010년 09월 01일 심사완료

* 한서대학교 항공운항학과

E-Mail : yckim@hanseo.ac.kr

충남 태안군 남면 신운리 산105 한서대학교 태안비행장

Table 1. The classification of icing

	색 조	강도	생성원인/특성
서리 착빙 (frost)	백 색	얇고 부드럽다	•수증기의 승화 •주로 지상 주기 시 발생
거친 착빙 (rime)	백색 우유빛 불투명	부서지기 쉽다	•비교적 작은 과냉각 수적 충돌 •주로 -20 ~ -10°C 에서 발생
맑은 착빙 (clear)	비교적 투명	견고	•비교적 큰 과냉각 수적 충돌 •주로 -10 ~ 0°C 에서 발생
혼합 착빙 (mixed)	맑은 착빙과 거친 착빙의 혼합		•비교적 큰 과냉각 수적 충돌 •주로 -15 ~ -5°C 에서 발생

또한, 항공기 조종사 보고에 의해 보고될 수 있는 착빙의 강도는 통상 TRACE(Trace, 흔적), LGT (light, 약함), MDT(moderate, 보통), SEV(severe, 강함)의 4가지로 구분한다.

착빙은 비행기 조종을 어렵게 하여 비행기의 추락 또는 기체의 부품 등을 파손시켜 대형 참사의 원인이 되기도 한다. 이러한 착빙의 위험을 피하는 방법으로는 착빙을 방지 또는 해소할 수 있는 장비를 기체에 설치하는 방법이 있으나 많은 비용이 소요되며, 착빙 예보를 활용하여 발생 예상 지역을 우회하는 방법도 있을 수 있다. 착빙 예보는 최근 들어 위성 등 실시간 관측 자료를 이용하여 현재 착빙 예상지역을 경고하거나 수치 모델의 예측 결과를 이용하여 착빙 예상지역을 예측하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 그러나, 현재까지는 각종 관측 및 예보 기법도 미국 등 선진국의 자국 위주의 경험적이며 주관적인 경향이 강하며, 수치 예보의 경우에도 그 정확도는 아직은 실용화 단계보다는 개발 단계에 있는 실정이라고 할 수 있다.

한편 국내에서 항공기 착빙 연구는 대단히 미미한 실정이다. 이승재와 김영철[3]이 과거 기상청 현업 수치 예보 모델인 MM5 모델에서 몇 가지 착빙 지수를 계산하여 공군에서 수집된 PIREP 자료와 비교 분석하여 착빙의 예보 가능성을 시도한 연구가 거의 유일한 사례이다.

이에 본 연구에서는 한반도 지역에서 발생하는 착빙 현상에 대해서 기상청 차세대 지역예보

모델인 KWRF(KMA Weather Research and Forecast Model) 결과를 기반으로 다양한 착빙 지수들을 계산하고, 이를 조종사 기상 보고(pilot weather reports, PIREPs) 자료 중 항공기 착빙 발생 현황과 비교하여 우리나라에 적합한 효과적인 항공기 착빙 예보 지수의 개발과 활용 가능성을 분석하였다.

2. 조종사 기상 보고(PIREPs)

대기 중에서 발생하는 착빙에 대한 관측 자료는 국내에서는 거의 전무한 실정이다. 현재 활용 가능한 자료 중에서는 직접적인 방법으로 조종사 기상 보고 자료가 있으며, 간접적인 방법으로는 와 radiosonde와 같은 고층 관측 자료, 위성영상 관측 자료가 있다. 착빙 지수 검증이라는 이 논문의 목적에 부합하는 자료로 조종사 기상 보고 자료를 활용했다. 항공기상청에서 확보한 조종사의 보고 자료(PIREP)는 대부분 민항기 운항에서 수신된 자료를 이용하였다. PIREP 자료는 항공기의 운항고도, 위치(위도, 경도), 기온, 풍향, 풍속, 구름량, 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.

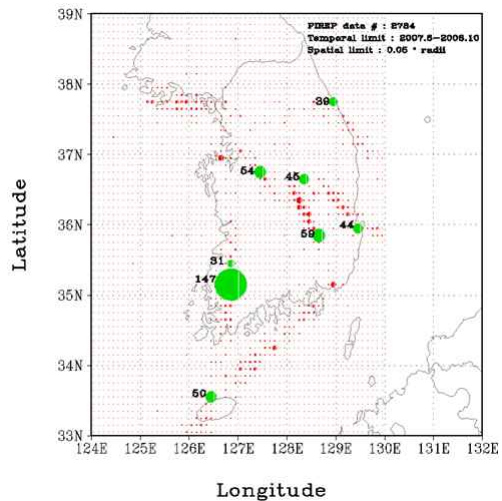


Fig. 1 The spatial frequency for PIREP data.

Fig. 1에서 녹색 원은 자료수가 많은 8지점에 대한 것이며 가장 많은 자료가 보고된 지점은 광주 주변으로 147회 보고 되었다.

3. 착빙 진단 지수

착빙 예보에 있어 착빙지수의 계산은 온도 값만을 이용하는 간단한 방법부터 고도에 따른 온도 변화와 습도 그리고 복잡한 구름 관련 변수들을 이용하는 방법까지 다양하게 연구되고 있다. 최근 들어 현업에 이용되는 수치예보 모델 결과 자료를 활용하여 착빙 예측을 수행하고 있다. 이들 지수들은 대부분 이론적, 경험적 근거에 바탕으로 개발된 것으로, 예측성을 향상시키기 위해 많은 검증이 필요한 실정이다.

3.1 착빙 지수법

기온(T)과 노점온도(Td)의 편차를 이용하여 착빙의 가능성을 예보하는 방법으로 공군 기상대 등 많은 현업 항공 관련 부서에서 쓰이던 방법으로 착빙지수 또는 -8D방법이라 한다.

$$-8(T - Td) - T > 0 \quad (1)$$

이 방법은 과거에는 고층 관측 자료 중 연직 사운딩(sounding) 자료를 이용하여 계산하였으나 최근에는 수치모델의 발달로 모델의 결과 자료에 적용하여 객관적인 착빙예보에 이용하고 있다. 그러나 이를 통해 착빙예보의 객관화는 이루어지지만 모델의 구름물리 변수를 활용하지 못하는 한계를 가지고 있다. Tremblay 등[4]은 연직속도가 양이고 습수가 2°C 미만인 조건을 사용하였다.

$$T - Td < 2^\circ C, \quad w > 0 \quad (2)$$

3.2 SCLW 착빙 지수법

SCLW법은 착빙의 원인이 되는 과냉각 수적의 양을 모델 예측 결과에서 직접 계산하여 착빙을 예보하는 방법이다. 구름 내 과냉각 수적의 양은 습윤 단열과정을 통해 과포화된 수증기의 양(wG)와 구름 내에 존재하는 얼음상 입자

표면으로 승화하는 수증기의 양(SDEP)로 결정되며, 이 둘의 차이로부터 과냉각 수적의 양을 알 수 있다고 하여 아래와 같은 착빙 예보식을 제안하였다.

$$wG - SDEP > 0 \quad (3)$$

여기서 wG는 공기가 연직 운동할 때 수증기가 단열 냉각되어서 과포화되는 율이다. Zawadzki 등[5]에 의하면 수증기의 생성율은

$$G = \rho r_s \left(\frac{L_v}{R_v T^2} \Gamma_w - \frac{g}{R_d T} \right) \quad (4)$$

이고, 눈 결정으로의 승화율은

$$SDEP = \frac{2\pi(S_i - 1)}{\left(\frac{L_s^2}{KR_v T^2} \right) - \left(\frac{R_v T}{e_{si} D} \right)} f_v M_s \quad (5)$$

$$S_i = \frac{e_s}{e_{si}} = \exp \left[\frac{L_f}{R_v T_0} \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

$$M_s = 55.6 \left(\frac{6q_s}{\pi \rho_s} \right)^{0.58} \quad (7)$$

로 주어진다. 위에서 Γ_w 는 습윤 단열 감율, L_v 는 증발 잠열, R_v 는 수증기의 기체 상수, r_s 는 포화 혼합비, S_i 는 Rogers and Yau[6]가 제시한 물에 대한 포화 혼합비와 얼음에 대한 포화 혼합비의 비, L_s 는 수증기의 승화 잠열, K는 공기의 열전달 계수, D는 수증기의 공기 중 확산 계수, e_{si} 는 얼음에 대한 수증기의 포화 수증기압, f_v 는 환기 계수, M_s 는 눈 입자 분포의 1차 적률(moment), q_s 는 눈 입자의 양으로 모델 내에서 얼음 수액과 눈 수액의 합, ρ_s 는 눈의 밀도($0.1g/cm^3$), T_0 는 273.15K이다.

3.3 RAP 착빙 지수법

RAP 법은 미국의 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 RAP(Research Application Program)의 하나로 개발되어 Forbes 등[7]에 의해 더욱 개선된 방법으로, 기온과 습도를 기준으로 범주(category)를 나눈 것이다(Table 2).

Table 2. RAP algorithm for icing category

범 주	온도 범위	습도 범위
Freezing rain	$T \leq 0$	$RH \geq 80\%$
Stratiform	$-12 \leq T \leq 0$	$RH \geq 85\%$ ($T \geq 0$ 이면, $RH \geq 80\%$)
Unstable	$-20 \leq T \leq 0$	$RH \geq 56\%$
General	$-16 \leq T \leq 0$	$RH \geq 63\%$

3.4 AFGWC RAOB 착빙법

AFGWC RAOB 법은 미국 AFGWC(Air Force Global Weather Central)에 의해 개발된 방법으로 초기 라윈존데(Rawinsonde) 자료를 이용하여 개발되었다. 이 방법의 알고리즘은 착빙의 형태 및 강도는 기온(T)과 노점온도의 감소율(ddd), 안정도를 이용하여 이루어진다(Table 3).

Table 3. AFGWC RAOB Icing classification

기온	$-8 < T \leq 0$		$-16 < T \leq -8$		$T \leq -16$				
노점온도 감소율	≤ 1	1~2	≤ 1	1~3	≤ 4				
감율 (T)	≤ 2 > 2	≤ 2 > 2	≤ 2 > 2	≤ 2 > 2	N/A				
Icing	LGT	MDT	TRC	LGT	MDT	MDT	LGT	LGT	LGT
	RIM	CLR	RIM	CLR	TTY	MXD	RIM	MXD	RIM

3.5 NAWAU 지수법

NAWAU(Nation Wether Advisory Unit) 법은 AIRMET를 운용 준비를 위한 지침서로, Schultz and Politovich[8]에 의하여 개발되었다. 이 방법은 착빙가능성을 판별하기 위하여 두 가지 범주를 포함하며, 기온과 습도 자료를 사용하며, PIREPs 자료를 이용하여, 임계값이 결정되었다(Table 4). 첫 번째 범주는 두 번째 범주보다 착빙의 가능성이 더 적다는 것을 염두에 두어야한다.

Table 4. NAWAU algorithm for icing category

범 주	온 도(°C)	습도(%)	Layer
범주 3	$-14 \leq T \leq -1$	$RH \geq 75$	above boundary
범주 2	$-20 \leq T \leq 0$	$RH \geq 86$	layer (900m AGL)
범주 1	$-19 \leq T \leq 0$	$RH \geq 60$	within

3.6 SCEM 착빙 지수법

SCEM(Sevices Central d'Exploitation de Meteorologie)법의 알고리즘은, Carrière 등[9]에 의해 제시된 것으로, $-15 \leq T \leq 0^\circ\text{C}$ 와 $RH \geq 80\%$ 상태에서 착빙이 발생하며, 등압좌표의 연직 속도를 고려하여, 연직 속도가 큰 영역에서 물방울 입자가 그대로 유지되고 더 크게 성장하기 때문에 착빙지역에서 제외된다는 점을 추가했다.

3.7 Swedish 착빙 지수법

Olofsson 등[10]이 제시한 방법으로, 스웨덴 기상수문청에서 1990년대 말 개발되어 온도와 구름속의 구름물량을 이용하여 착빙을 계산하는 지수법이다.

$$Index A = 5 + \ln cw \tag{8}$$

여기서 cw는 모델로부터 얻을 수 있는 구름물의 총량(g/kg)이다. 착빙 발생의 기온은 -15°C 에서 0°C 로 제한된다. 계산된 Index A의 값은 크기에 따라 착빙의 강도가 된다. Index A에 대하여 연직속도를 고려하여 수정된 착빙 지수(Index B)를 계산할 수 있다(Table 5).

Table 5. Index B modified to Index A

w(m/s)	<0	0~10	10~20	20~30	30~40
Index B	A-1	A+1	A+2	A+3	A+4

또한 $-15 \sim -40^\circ\text{C}$ 사이에서 선형적으로 과냉각 수적의 양이 선형적으로 감소되는 것을 적용하는 공식은 식 (8)과 같고 개선된 착빙 지수의 범주는 Table 6과 같다.

Table 6 Index B modified to Index A

ICAO	No Icing	LGT	LGT ~MDT	MDT	MDT ~SVR	SVR
Index C	0~1	2~3	4	5~6	7	8~9

4. KWRF를 이용한 착빙 지수 분석

착빙에 대한 발생 및 발달, 소멸에 대한 연구가 아직 부족하며 실시간 한반도 전 지역에 대한 관측이 부족하기 때문에, 착빙을 예측하는 모델은 아직 개발되지 못하고 있는 실정이다. 또한 착빙 계산식들은 현재 대기 상태에 대하여 기상 변수를 이용하여 착빙 발생 가능성에 대해 진단하는 식들이 대부분이다. 이러한 상황에서 착빙 예보는 수치모델의 예측 값들을 이용하여 모든 예보 시간대에 대하여 진단하는 방법을 사용한다. 즉 수치예보 모델의 정확성은 착빙의 예보 정확도와 직접적인 관계가 있음을 의미한다. 따라서 이 연구에서는 현재 기상청에서 현업 운용 중인 수치 모델인 KWRF를 활용하여 앞 절에서 소개된 다양한 착빙 지수를 계산하였다.

4.1 KWRF 모델

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 7과 같으며, 계산 도메인 영역은 Fig. 2와 같다.

Table 7. 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)

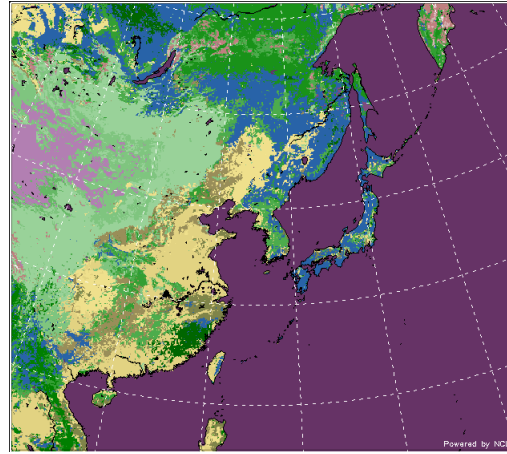


Fig.2. The KWRF Domain region

4.2 KWRF를 활용한 착빙 지수 계산

각 착빙 지수는 KWRF 모델 예측장 자료를 이용하여 예측 시간별로 계산하였고 사용한 지수는 앞에서 언급한 SCLW 착빙지수법(이하 SCLW), 착빙지수법 중 식 (1)을 이용한 방법(이하 IC1), 착빙지수법 중 식 (2)를 이용한 방법(이하 IC2), RAP 착빙지수법(이하 RAP), AFGWC RAOB 착빙법(이하 AFGWC), NAWAU 지수법(이하 NAWAU), SCEM 착빙지수법(이하 SCEM), Swedish 착빙지수법 중 식 (8)을 이용한 방법(이하 SID1), Swedish 착빙지수법 중 Table 5와 같이 연직속도가 고려된 방법(이하 SID2), Swedish 착빙지수법 중 Table 6과 같이 개선된 방법(이하 RSID)을 사용했다.

2007년 6월부터 2008년 10월까지 PIREPs 자료에서 착빙을 보고한 사례는 모두 3 사례로 각각 2008년 1월 22일 21UTC, 18,000ft 해남 인근 지역, 2008년 4월 9일 06UTC, 15,000ft 대구와 포항 인근 지역, 2008년 6월 3일 06UTC, 10,000ft 서해상공 지역이었다.

2008년 1월 22일 21UTC에 해남 부근 상공 18,000ft에 1회의 PIREP 보고가 있었던 사례를 KWRF 모델 결과 자료를 사용하여 각 착빙 지수의 결과를 보인 것이 Fig. 3이다.

PIREP 착빙 보고가 있었던 해남의 착빙이 계산된 지수는 IC1, IC2, AFGWC, SCEM, SID1, SID2, RSID 지수였으나 IC1, SID1 지수의 경우는 한반도 전 영역에 대해 착빙을 나타내는 문제가 발생되었다. 연직의 착빙 계산을 분석하기 위하여 Fig. 4에 고도별 시간 변화를 나타내었다.

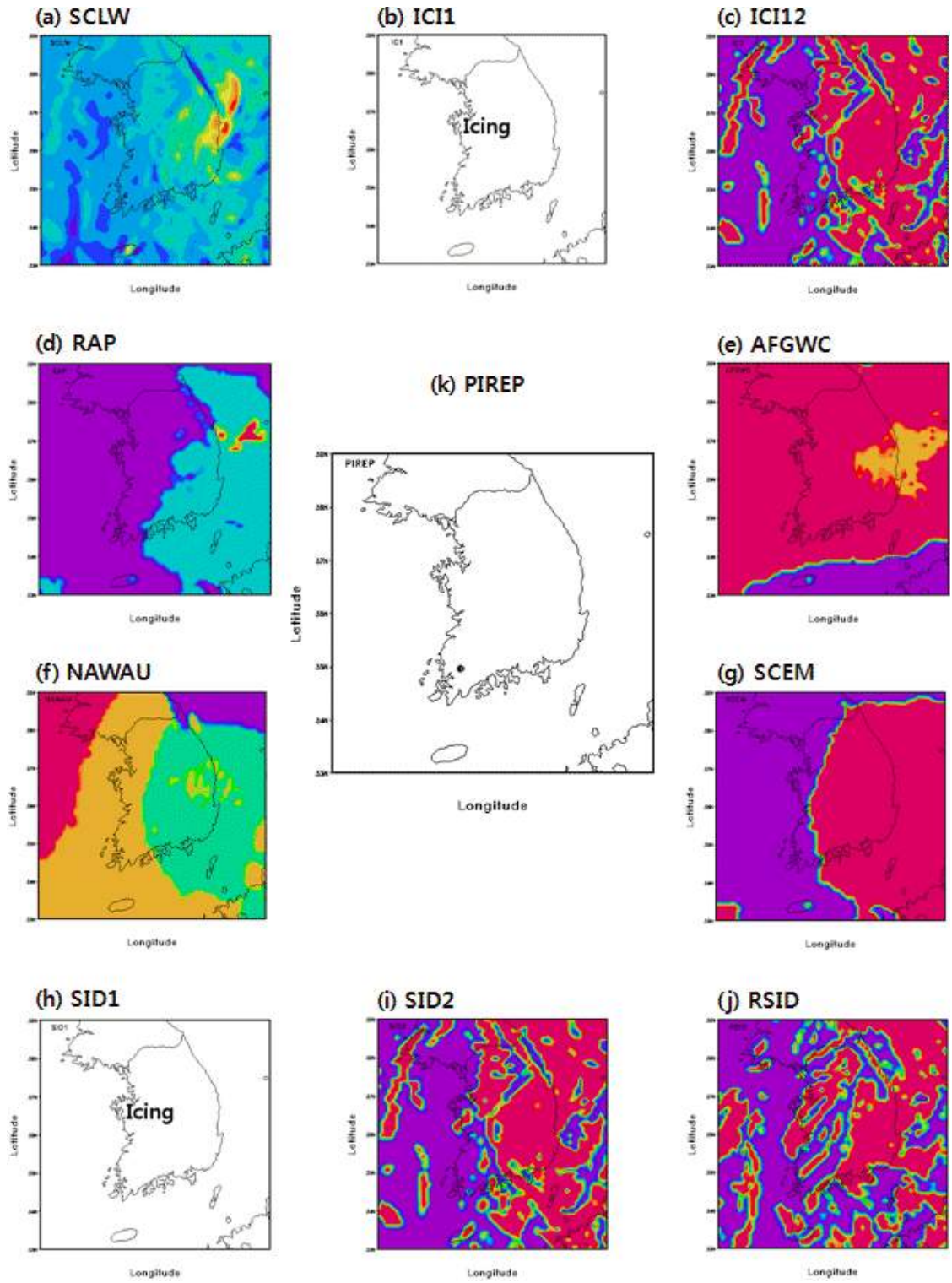


Fig. 3 The spatial distribution for icing diagnostics calculations using by KWRP output on 21UTC January 22, 2008.

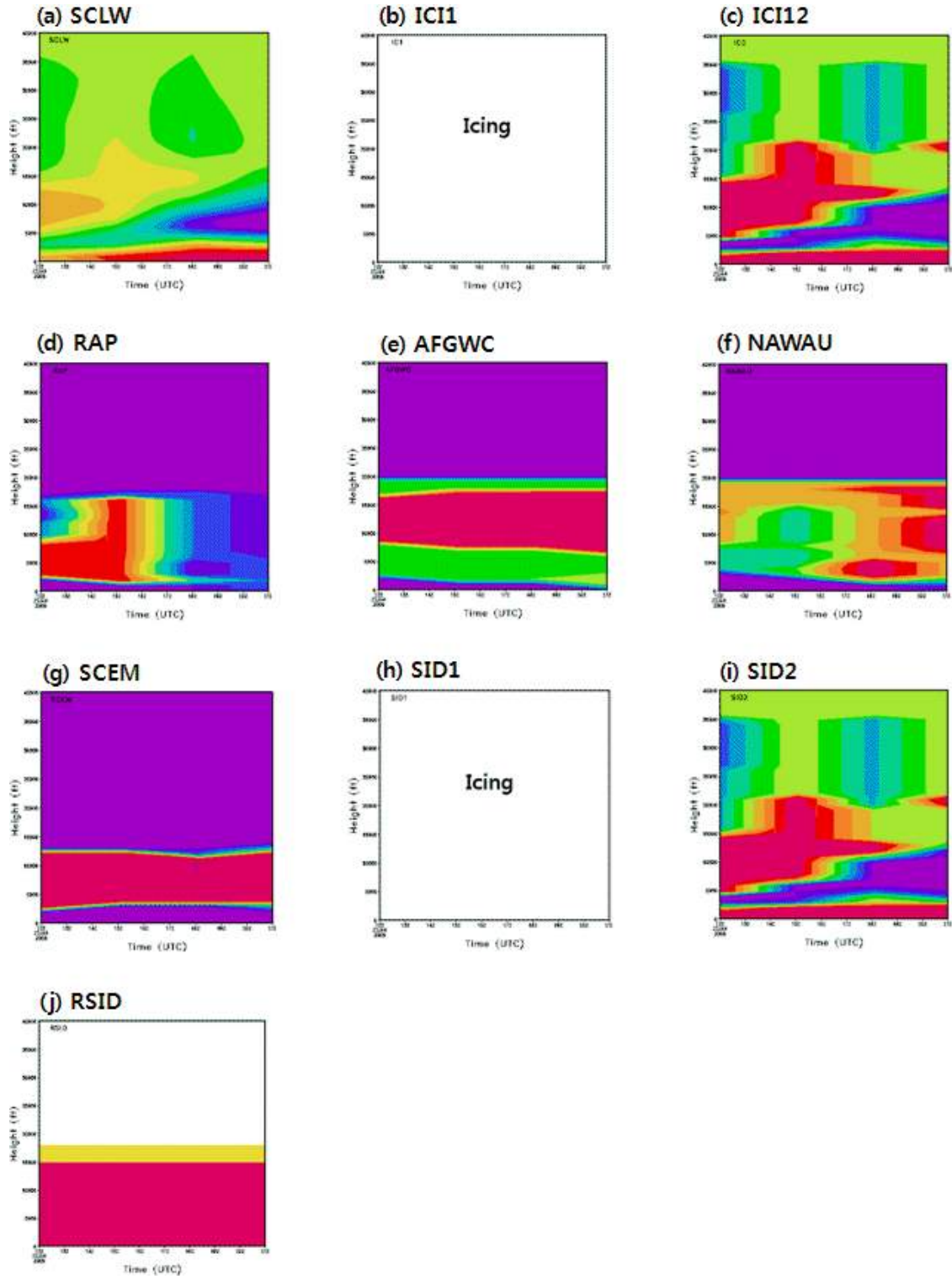


Fig. 4 The vertical distribution for icing diagnostics calculations using by KWRP output from 21UTC January 22, 2008.

PIREP 착빙과 일치했던 착빙 지수 외에 다른 지수들에서도 착빙들이 있었으나 대체로 고도가 낮은 300~15,000ft에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 RSID의 경우에는 18,000ft 이상 고도에서 계산 불능이 나타났으며 이것은 온도에 의한 구름량의 보정 때문에 나타나는 현상으로 보여진다. SCLW, ICI2, RAP, AFGWC, NAWAU, SCEM, SID2가 상대적으로 좋은 결과를 보였으나, SCLW, NAWAU 지수의 경우는 다른 지수와 달리 후반부에 착빙이 강화되는 현상이 나타났다. 그러나, ICI1과 SID1에서는 전체 고도에 대해 착빙이 나타나 모델의 결과를 이용하여 착빙을 예보하기에는 어려울 것으로 분석된다. 착빙의 고도는 대체적으로 10,000 ~ 25,000ft에서 나타나는 것을 볼 수 있었으며, 수평적인 분포에서 나타났던 것과 유사하게 ICI1과 SID1은 전 고도 대부분에서 착빙이 계산되었다. 그리고 수평 분포가 유사하게 나타났던 ICI2와 SID2 지수범에서는 25,000ft 이상의 모든 고도에서 착빙이 나타났다.

두번째 사례는 2008년 4월 9일 06UTC에 대구, 포항 부근 상공 15,000ft에 2회의 PIREP 보고가 있었던 사례로, KWRf 모델 결과 자료를 사용하여 각 착빙 지수의 결과를 보인 것이 Fig. 5이다.

PIREP 착빙 보고가 있었던 대구, 포항 지역으로 착빙이 나타난 지수(비록 영역의 차이는 있으나) SCLW, ICI1, ICI2, RAP, SCEM, SID1, SID2, RSID였으며, 이와 달리 ICI1, SID1의 경우 전 영역에서 착빙이 나타나고 있었다.

착빙의 연직의 구조를 분석하기 위하여 포항 인근 지역의 0~40,000ft에서 계산된 착빙 지수의 시간 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

착빙의 고도는 대체적으로 10,000 ~ 25,000ft에서 나타나는 것을 볼 수 있었으며, 수평적인 분포에서 나타났던 것과 유사하게 ICI1과 SID1은 전 고도 대부분에서 착빙이 계산되었다. SCLW, RAP, AFGWC, NAWAU, SCEM, SID2가 상대적으로 좋은 결과를 보였으며, 수평 분포가 유사하게 나타났던 ICI2와 SID2 지수 범에서는 25,000ft 이상의 모든 고도에서 착빙이 나타났다.

마지막 사례는 2008년 6월 3일 06UTC에 서해 상공 10,000ft에 1회의 PIREP 보고가 있었던 사례로, KWRf 모델 결과 자료를 사용하여 각 착빙 지수의 결과를 보인 것이 Fig. 7이다.

PIREP 착빙 보고가 있었던 서해 지점에서 착빙이 계산된 지수는 SCLW, ICI1, ICI2, RAP, AFGWC, SCEM, SID1, SID2, RSID 지수였고 나머지 지수에서는 착빙이 계산되지 않았다. 이 사례에서도 ICI1, SID1 지수의 경우는 앞의 사례와 동

일하게 전 영역에서 착빙을 계산하는 문제가 발생되었다. 연직의 착빙 계산 분포를 분석하기 위하여 착빙 계산 결과를 Fig. 8에 고도별 시간 변화로 나타내었다.

PIREP 착빙과 일치했던 착빙 지수 외에 다른 지수들에서도 착빙들이 시간과 고도에 따라 다르게 있었으나 대체로 고도가 높은 10,000ft 이상의 고도에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 KWRf 모델 결과에서 기온에 대한 고도 편차에 의한 것이라 볼 수 있으며 약간의 고도 편차를 감안하여 고려한다면 SCLW, RAP, AFGWC, NAWAU 지수도 비교적 정확한 예측이라고 분석된다. ICI1 지수의 경우는 다른 방법과 반대의 경향을 보였고 SCEM의 경우는 전혀 착빙을 진단하지 못하였다. SID1의 경우는 전 고도에 대해 착빙을 계산하였고, RSID 지수의 경우에는 20,000ft 이상 고도에서 계산 불능이 나타났다.

5. 결론

본 연구는 다양한 착빙 지수들을 수치예보 모델인 KWRf 모델에 의해 예측하고, 이를 조종사 기상 보고 자료 중 착빙 발생 현황과 비교한 것이다.

PIREPs 자료 중 착빙을 보고했던 2008년 1월 22일과 4월 9일, 6월 3일 3일 간의 KWRf 모델 예측 결과를 활용하여 10개의 착빙 지수식을 계산했다. 이를 조종사 기상 보고와 비교 시, 대부분의 지수에서 비슷한 공간적 분포를 보였으나, 수평 및 연직 분포 등을 고려하면, 특히 SCLW, RAP, AFGWC 지수가 한반도 착빙 예보에 가장 효과적인 것으로 분석되었다. IC2, NAWAU, RSID은 대체적으로 양호한 결과를 보였으며, ICI1과 SID1은 전 고도에서, SID2는 25,000ft 이상의 고도에서 착빙이 발생하는 문제를 보였다.

이상의 착빙 사례 분석에서 공간 또는 연직 분포 분석에서 PIREP 착빙 보고와 많은 일치점을 보이는 SCLW, RAP, AFGWC 지수가 한반도 착빙 예보에 유용할 것으로 분석된다. RAP과 AFGWC 지수는 현재 NCAR와 미 공군에서 현업 운영되고 있으며 착빙뿐 아니라 구름의 특성에 따라서 분석되는 지수이기 때문에 위성 자료를 이용한 착빙 예보에도 유용할 것으로 분석된다. 또한 SCLW는 KWRf 모형의 결과를 충분히 적용할 수 있는 지수로 구름 변수와 미세물리과정에 의한 결과는 착빙 예보에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

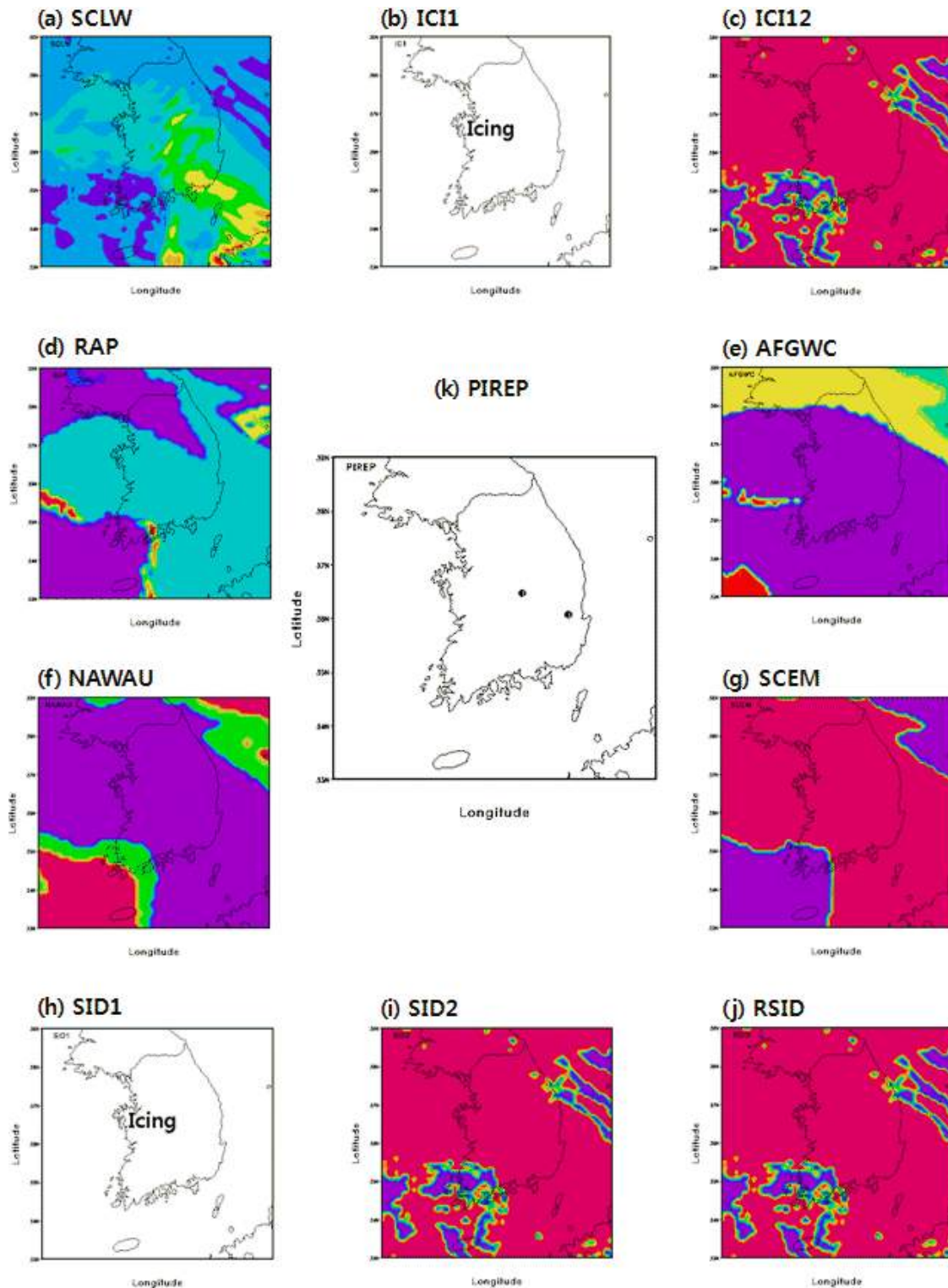


Fig. 5 The spatial distribution for icing diagnostics calculations using by KWRP output on 06UTC April 6, 2008.

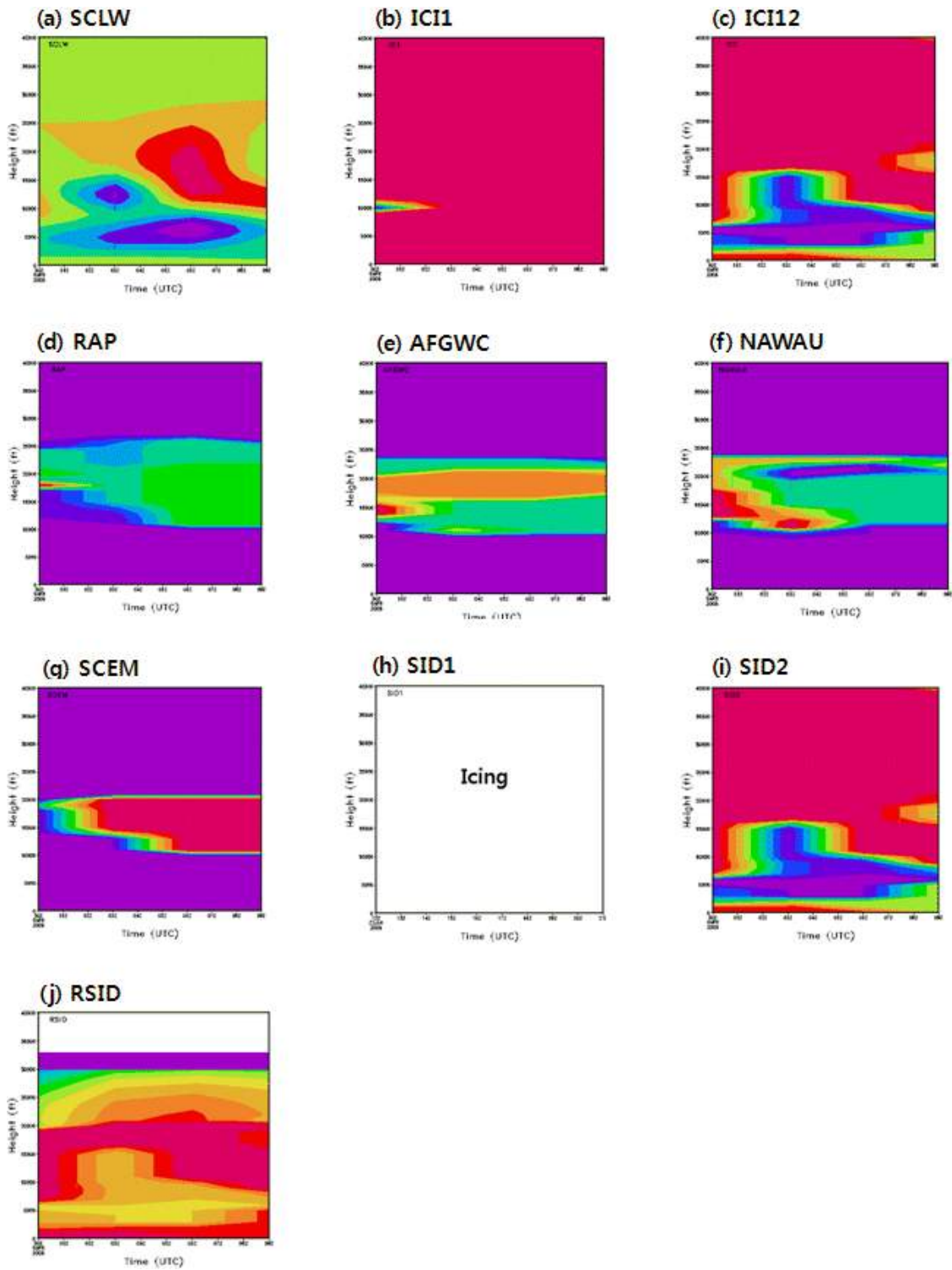


Fig. 6 The vertical distribution for icing diagnostics calculations using by KWRf output from 06UTC April 6, 2008.

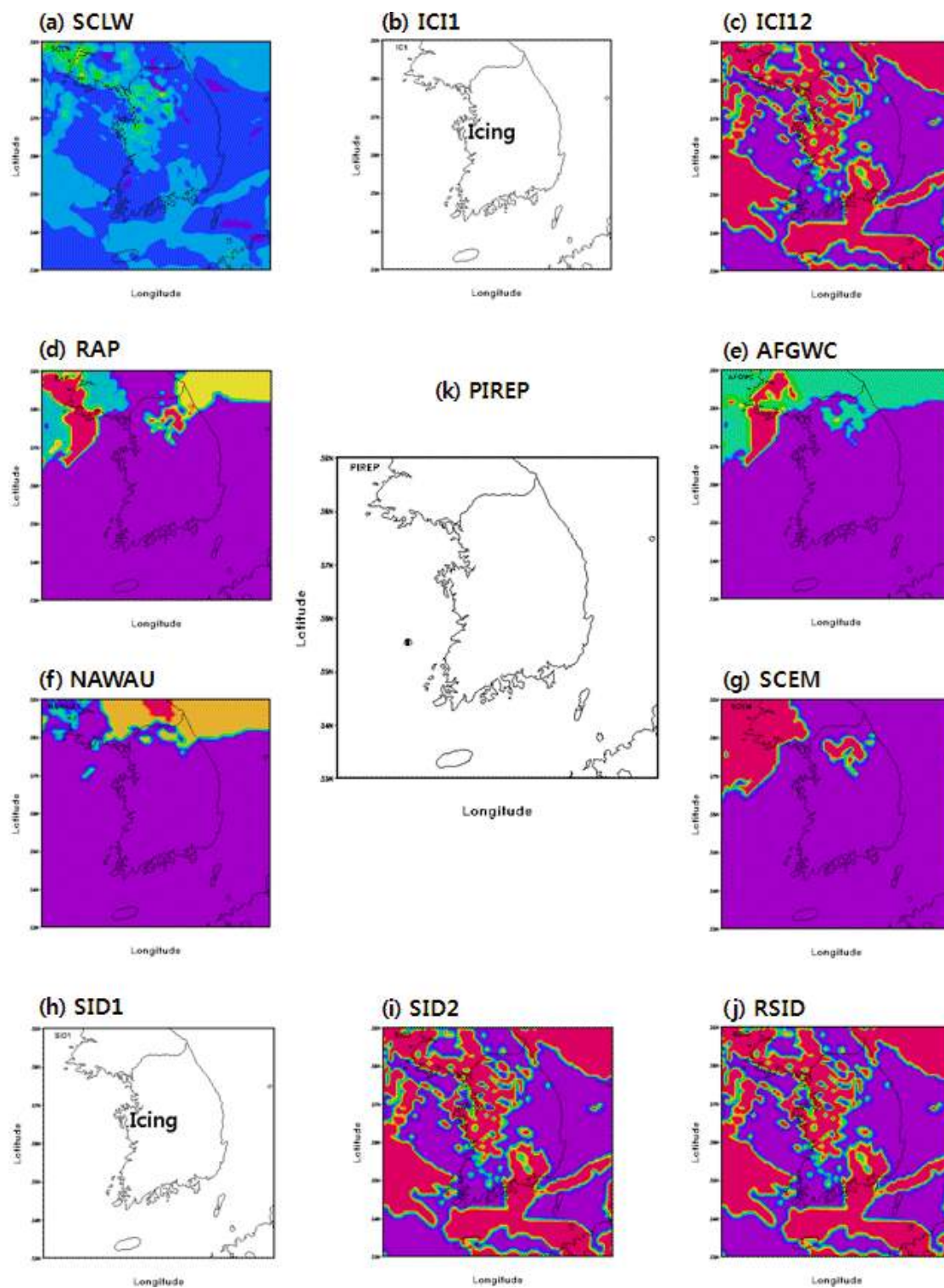


Fig. 7 The spatial distribution for icing diagnostics calculations using by KWRP output on 06UTC June 3, 2008.

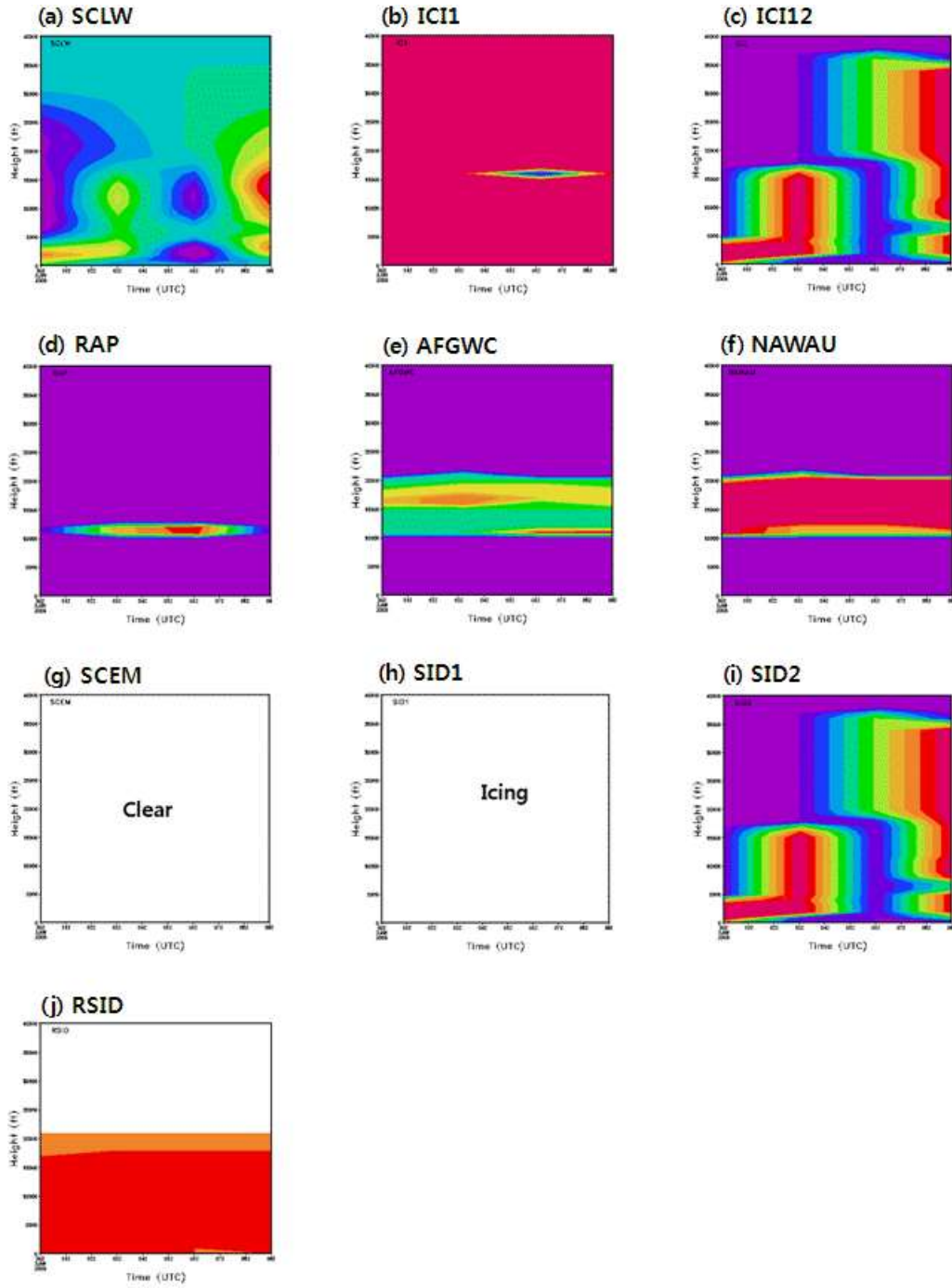


Fig. 8 The vertical distribution for icing diagnostics calculations using by KWRF output from 06UTC June 3, 2008.

그러나 검증을 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 착빙 지수 계산 및 PIREP 자료와의 비교를 통한 사례 실험을 통해, 항공기 운항에 필수적인 착빙의 수평·연직 분포와 특성을 분석할 수 있었다. 이를 활용하면, 우리나라 착빙의 연구 및 개발에 많은 도움을 줄 것이라 기대된다.

특히 많은 착빙 예측 지수중에서 한반도 환경에 가장 적합한 착빙 지수를 설정할 수 있어, 항공기 운항에 많은 도움을 줄 것이라 생각되며, 이를 바탕으로 한국형 착빙 예측 지수 개발에도 기여를 할 수 있을 것이다.

후기

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

참고문헌

- 1) Lester, P. F., 1995: Aviation Weather, Jeppesen Sanderson Inc.
- 2) Lankford, T. T., 2001: Aviation Weather Handbook, McGraw-Hill Inc.
- 3) 이승재, 김영철, 2005 : 남한지역 상공에서의 항공기착빙 발생과 예측에 관한 연구, 한국기상학회지, 41(4), 615-624.
- 4) Tremblay, A., A. Glazer, W. Szyrmer, G. Isaac, and I. Zawadzki, 1995: Forecasting of Supercooled Clouds. Mon. Wea. Rev. 123, 2098-2113.
- 5) Zawadzki, I., L. Ostiguy, and R. Laprise, 1993: Retrieval of the microphysical properties in a CASP storm integration of a numerical kinematical model. Atmos.-Ocean, 31, 201-233.
- 6) Rogers, R. R., and M. K. Yau, 1989: A short course in cloud physics, 3rd Ed., Pergamon press, 193 pp.
- 7) Forbes, G. S., Y. Hu, B. G. Brown, B. C. Bernstein, and M. K. Politovich, 1993: Examination of conditions in the proximity of pilot reports of icing during STORM-FEST. Preprints, Fifth Int. Conf. on Aviation Weather Systems, Vienna, VA, Amer. Meteor. Soc., 282-286.
- 8) Schultz, P., and M. K. Politovich, 1992: Toward the improvement of aircraft icing forecasts for the continental United States, Wea. Forecasting, 7, 491-500.
- 9) Jean-Marie Carrière, Samuel Alquier, Christine Le Bot, Eric Moulin, 1997: Statistical verification of forecast icing risk indices, Meteorological Applications, 4, 115-130.
- 10) Bernt Olofsson, Esbjörn Olsson, Sven Andersson, Thomas Mårtensson, Ebba Mårtensson, 2003 : A new algorithm to estimate aircraft icing in the HIRLAM model, Meteorological Applications, 10, 111-114.