군용헬기 결빙 감항인증을 위한 국내 기상환경에 관한 연구

허장욱^{*,1)} · 신백천²⁾

¹⁾ 금오공과대학교 지능기계공학과

²⁾ 금오공과대학교 학부학생

A Study on the Korea Weather Environment for Icing Airworthiness of Military Helicopter

Jangwook Hur^{*,1)} · Baekcheon Shin²⁾

¹⁾ Department of Intelligent Mechanical Engineering, National Kumoh Institute of Technology, Korea

²⁾ Graduate Student, National Kumoh Institute of Technology, Korea

(Received 4 March 2014 / Revised 30 April 2014 / Accepted 16 May 2014)

ABSTRACT

Based on atmosphere weather data by balloon in Osan and Gwangju area, if icing condition occurs in weather environment of altitude range where helicopter is operated was analyzed in quantitative way. Yearly icing occurrence frequency for daytime during recent three years was average 102 days in Osan, average 91 days in Gwangju. Icing weather environment to highly affect operation of helicopter varies a little according to analysis methods but icing intensity at MDT level was calculated in all the methods, and 14.5~38 times was suggested in Osan; 2.5~30 times in Gwangju. Icing at MDT level was calculated in common in all the analysis methods through wide periods such as Jan., Feb., Mar., and Nov. in Osan. In Gwangju, icing at MDT level was suggested focusing on Jan. only. Therefore, military helicopter developed in Korea is required to strive obtaining certificate of airworthiness about icing condition at MDT level for implementation of perfect operational mission and safe operation.

Key Words : Liquid Water Content, Dew Point Depression, Lapse Rate, Icing Intensity, Icing Frequency, Icing Airworthiness, Depletion Factor

1. 서 론

2012년 6월 기동헬기인 수리온을 국내개발함으로써

우리나라는 세계에서 11번째로 헬기를 개발한 국가가 되었으며, 2014년에는 공격헬기인 소형무장헬기의 개발을 착수하였다. 이러한 헬기 개발에 있어 가장 어려운 부분이 헬기의 안전성에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 결빙에 대한 감항인증이라고 할 수 있다.

특히, 우리나라의 대기는 늦은 가을부터 이른 봄까

* Corresponding author, E-mail: hhjw88@kumoh.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

지 영하의 날씨가 많고, 3면이 바다로 이루어진 특성에 기인하여 헬기운용 중 결빙조건에 노출될 확률이 높으며, 헬기가 결빙조건에 노출되면 메인로터 등에 과냉각 수적 혹은 구름 입자의 충돌로 인한 착빙이 발생할 수 있다.

이러한 착빙현상은 메인로터 등의 공기흐름을 흐트러뜨리며, 항력 증가 및 양력 감소로 헬기의 균형을 무너트려 심한 떨림을 발생시키고, 헬기의 조작을 방해하여 치명적인 결과를 불러 올 수 있다^[1,2].

헬기운용 간 착빙을 경험한 조종사는 국내개발 헬기의 결빙에 대한 감항인증이 필수라고 생각하고 있으나, 이에 반해 결빙환경에 노출된 경험이 없는 조종사의 경우 많은 비용과 기간이 요구되는 결빙시험에 대한 필요성에 의문을 제기하고 있다.

이는 우리나라 결빙 기상환경에 대한 연구가 고정익 항공기의 운용고도 범위에 대해서는 다수 연구되고 있으나^[3~5], 10,000 ft 이하의 헬기 운용고도 범위에 대해서는 거의 전무하고, 헬기 조종사들의 결빙에 대한 pilot comment가 체계적으로 유지 및 관리가 되지 않은 이유로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 공군이 풍선에 의한 대기 기상자료를 확보하고 있는 경기도 오산과 전라남도 광주 지역을 바탕으로, 헬기가 운용하는 고도범위의 기상환경에 결빙조건이 발생하는지 정량적으로 분석하고, 이를 이용하여 국내개발 군용헬기의 결빙에 대한 감항인증 필요성 여부를 제시하고자 한다.

2. 결빙조건 분석 방법

2.1 AFGWC 결빙 추정방법

미공군의 AFGWC(Air Force Global Weather Center)에서 대기 기상자료를 이용하여 결빙 예보를 위해 개발한 방법으로, Table 1에 나타난 바와 같이 대기온도, 노점편차 및 기온감률을 이용하여 결빙강도를 분류한다^[6].

여기서 결빙강도는 주관적인 측면이 강하고 국제표준으로 정해진 값은 없으나, 군사표준과 미군 규정에 의하면^[6,7], LWC(Liquid Water Contents)에 따라 0.15 g/m³미만은 TRC(trace, 미세), 0.15~0.49 g/m³는 LGT(light, 약함), 0.5~1.0 g/m³는 MDT(moderate, 보통) 그리고 1.0 g/m³ 초과는 SVR(severe, 강함)의 4가지로 구분한다.

Table 1. AFGWC algorithm for icing intensity

air temp. (T, °C)	dew point depr. (DDP, °C)	lapse rate (Γ , °C/1000 ft)	icing intensity
$-8 < T \leq 0$	$DDP \leq 1$	$\Gamma \leq 2$	LGT
		$\Gamma > 2$	MDT
	$1 < DDP \leq 2$	$\Gamma \leq 2$	TRC
		$\Gamma > 2$	LGT
$-16 < T \leq -8$	$DDP \leq 1$	$\Gamma \leq 2$	MDT
		$\Gamma > 2$	MDT
	$1 < DDP \leq 3$	$\Gamma \leq 2$	MDT
		$\Gamma > 2$	LGT
$-22 < T \leq -16$	$DDP \leq 4$	N/A	LGT

2.2 단일 포화 수증기 혼합비에 의한 방법

Fig. 1에 나타난 바와 같이 구름의 base와 top의 고도를 대기온도(T)와 이슬점 온도(T_d)의 연직구조를 통해 확인한 뒤, base에서의 압력과 온도, top에서의 압력을 대기 기상자료를 통해 산출하는 방법이며, 이때 base에서부터 top까지 구름의 속은 포화 및 단일 과정을 가정한다.

즉, base에서의 온도에 따른 포화 수증기 혼합비를 구한 후, 단일과정으로 top의 압력에 도달할 때의 온도와 포화 수증기 혼합비를 계산함으로써, 그 차이로 단일 수증기 혼합비를 산출할 수 있다.

Fig. 1. Air temperature and dew point temperature according to altitude

정확한 계산을 위해서는 식 (1)과 같이 대기온도(T)와 포화 수증기 혼합비(r_c)에 따라 달라지는 정압비열(C_p), 기체상수(R) 및 잠열(l_v)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$C_p \times d(\ln T) - R \times d(\ln P) = -\frac{l_v}{Tdr_c} \quad (1)$$

일반적으로 실제 구름이 갖는 수증기 혼합비는 구름이 주변 공기와 혼합하여 희석된 정도에 따라 이론값의 10~90 %에 이르는 큰 차이를 보일 수 있다.

2.3 Icing flowchart에 의한 방법

공군 기상단에서 사용하고 있는 방법으로, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 기온, 노점 온도차, 구름의 이류형태, 구름의 종류 및 전선과 구름의 관계 등을 종합적으로 고려하여 판단한다.

이 방법의 특징은 제반 고려요소를 반영하여 최종적으로 예보관에 의해 결빙 발생여부 및 결빙강도를 판단하게 되며, 예보관의 주관적인 판단을 최소화 하도록 그림에 표시된 바와 같이 고려요소들을 step by step 형식으로 단계화하여 진행하고 있다^[6].

Fig. 2. Icing intensity by icing flowchart

2.4 경험에 의한 시뮬레이션 방법

기온이 0~-20 °C 이고, 상대습도가 90 % 이상인 영역에서 결빙 발생이 용이하기 때문에^[8] 이러한 기상조

건의 시뮬레이션과 경험인자를 고려한 방법이다.

이때 과포화 수증기는 단열상태를 가정하여 구름의 base와 해당 고도에서의 포화 수증기 혼합비 차이를 이용하여 계산할 수 있다.

이와 같이 단열을 가정한 LWC는 앞서 언급한 ‘단열포화 수증기 혼합비’에 의한 방법과 유사하나, 이들은 일반적으로 구름이 수직으로 잘 혼합되어 있고, 결빙 결정이 없이 액체 수분이 많으며, 강수현상이 없다는 전제조건이 충족되어야 한다.

따라서 본 방법에서는 앞의 전제조건을 반영한 결빙발생을 예측하기 위해 Table 2와 같은 LWC 보정인자를 고려하였으며, 보정인자는 과거 경험 데이터와 시뮬레이션 결과의 비교를 통해 산출하였다^[9].

Table 2. LWC correction factors

precipitation	LWC factor	sky cover	LWC factor
snow/rain(light)	0.8	overcast	1.0
snow/rain(moderate)	0.4	obscured	1.0
snow/rain(heavy)	0.2	broken	0.7
drizzle	0.9	clear	0.0

3. 결빙빈도 분석

결빙빈도는 오산과 광주를 대상으로 1일 4회(03:00, 09:00, 15:00, 21:00) 측정한 연직대기 기상자료를 공군 기상단으로 부터 협조 받아 분석하였다.

분석대상은 Fig. 3에 나타낸 최근 3년(2010~2012년)의 단열선도 자료로써, 헬기의 운용을 고려하여 결빙고도(icing height)가 10,000 ft 이하인 경우를 검토하였다.

이때 결빙이 예측되는 악기상시 헬기의 야간 운용은 매우 극단적인 경우가 될 수 있으므로, 주간(09:00, 15:00)을 대상으로 검토를 하였으며, 1회라도 결빙이 예보된 날짜를 Table 3과 Fig. 4에 나타내었다. 오산이 광주보다 결빙빈도가 다소 많으며, 광주의 경우 결빙빈도가 매년 점점 감소하고 있음을 표시하고 있다.

또한, 연평균 결빙 발생일수는 오산이 102일, 광주가 91일로 오산이 다소 결빙 발생빈도가 크다. 그리고 3년 평균 월별 결빙 발생일 수는 1월에는 광주가 오산보다 결빙빈도가 다소 높으나, 1월을 제외한 모든 월에서 오산이 광주보다 결빙빈도가 높음을 알 수 있다.

Fig. 3. Skew T-logP diagram

Table 3. Icing frequency of daytime(2010~2012)

year	area	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Oct.	Nov.	Dec.	sum
2010	Osan	23	20	14	11	3	4	8	21	104
	Gwangju	25	15	17	9	1	2	11	22	102
2011	Osan	22	20	15	11	0	3	8	20	99
	Gwangju	27	12	7	7	2	2	11	24	92
2012	Osan	20	15	21	6	1	2	18	21	104
	Gwangju	25	22	16	3	0	0	5	8	79
mean	Osan	21.6	18.3	16.6	9.3	1.3	3.0	11.3	20.6	102
	Gwangju	25.8	16.3	13.3	6.3	1.0	1.3	9.0	18.0	91

Fig. 4. The average annual icing frequency

4. 결빙강도 분석

결빙강도 분석은 헬기의 운용제함에 크게 영향을 미치는 MDT 수준 이상의 결빙강도 현상이 헬기 운용고도 범위내에서 얼마나 발생하는지 정량적으로 확인하기 위한 목적으로 수행하였으며, 2012년 광주와 오산지역을 대상으로 하였다.

일반적으로 군용헬기의 결빙에 대한 능력은 MDT 수준의 결빙강도에서 안전한 임무수행이 가능토록 요구하고 있기 때문에 MDT 수준의 결빙강도에 대한 국내 기상환경을 분석하였다^[10].

또한 Table 3에 의하면 2012년 주간 결빙빈도는 오산이 104회, 광주가 79회 발생하였으며, 이중 결빙깊이가 5000 ft 이상으로 식별된 오산 54회와 광주 53회의 결빙 발생일자에 대해 결빙강도를 상세 분석하여 비교하였다.

4.1 AFGWC 결빙 추정방법

오산지역의 월별 결빙강도를 Fig. 5에 나타내었다. MDT 수준 이상의 결빙은 1월, 2월, 3월, 10월, 11월 및 12월에 나타나고 있으며, 총 38회가 산출되었다.

한편, 광주지역의 월별 결빙강도 분석결과를 Fig. 6에 나타내었다. MDT 수준 이상의 결빙은 1월, 2월 및 12월에 집중되어 나타나고 있으며, 총 30회가 산출되었다.

연간 MDT 수준 이상의 결빙빈도는 오산지역이 광주지역보다 다소 많이 발생하고 있으나, 광주지역은 1월과 2월에 집중하고 있고, 같은 기간에는 오산지역보다 발생빈도가 더 많음을 알 수 있다.

Fig. 5. Monthly icing intensity by AFGWC estimation method in Osan

Fig. 6. Monthly icing intensity by AFGWC estimation method in Gwangju

4.2 단열 수증기 혼합비에 의한 방법

LWC의 계산은 앞에서 설명한 바와 같이 단열과정을 가정하였기 때문에 이론적 계산결과인 LWC_{th} 는 실제 발생 가능한 LWC를 과대평가하는 원인이 될 수 있다.

따라서 실제 발생 가능한 LWC_{real} 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 이에 대한 평균값 LWC_{mean} 은 식 (3)과 같이 표시할 수 있다.

$$LWC_{real} = (0.1 \sim 0.9) LWC_{th} \quad (2)$$

$$LWC_{mean} = 0.45 LWC_{th} \quad (3)$$

Fig. 7. Monthly theoretical maximum icing intensity by adiabatic water vapor mixing ratio method in Osan

Fig. 8. Monthly theoretical mean icing intensity by adiabatic water vapor mixing ratio method in Osan

오산지역을 대상으로 LWC_{th} 에 대한 월별 결빙강도를 Fig. 7에 나타내었다. MDT 수준 이상의 결빙은 1월, 2월, 3월, 4월, 5월, 11월 및 12월에 분포되어 있으며, 총 44회가 계산되었다.

오산지역의 LWC_{mean} 에 대한 월별 결빙강도를 Fig. 8에 나타내었다. MDT 수준 이상의 결빙빈도는 Fig. 7과 유사하며, 총 40회가 산출되었다.

4.3 Icing flowchart에 의한 방법

공군 기상단의 icing flowchart를 이용한 결빙강도 분석결과, 오산에서 발생한 MDT 수준 이상의 결빙은 Fig. 9와 같이 1월, 2월, 3월, 4월, 5월, 10월 및 11월에 광범위하게 분포되어 있으며, 총 24회 산출되었다.

반면에, 광주에서 발생한 MDT 수준 이상의 결빙은 Fig. 10과 같이 1월, 2월, 4월 및 12월에 분포하고 있으며, 총 29회 제시되었다.

4.4 경험에 의한 시뮬레이션 방법

최근 3년간의 데이터에 근거하여 경험에 의한 시뮬레이션 방법으로 결빙강도를 분석한 결과, 오산에서 발생한 MDT 수준 이상의 결빙은 Fig. 11과 같이 1월, 2월, 3월, 4월, 5월, 10월, 11월 및 12월에 광범위하게 분포되어 있으며, 총 14.5회 산출되었다.

반면에, 광주에서 발생한 MDT 수준 이상의 결빙은 Fig. 12와 같이 1월과 3월에 분포하고 있으며, 총 2.5회 제시되었다.

Fig. 9. Monthly icing intensity by icing flowchart method in Osan

Fig. 11. Monthly icing intensity by empirical simulation method in Osan

Fig. 10. Monthly icing intensity by icing flowchart method in Gwangju

Fig. 12. Monthly icing intensity by empirical simulation method in Gwangju

4.5 결빙강도 결과 비교 및 검토

오산과 광주를 대상으로 분석방법별 MDT 수준의 결빙강도 발생 빈도를 Table 4에 나타내었다. 표에 의하면 분석방법에 따라 약간 차이가 있으나, 모든 방법에서 MDT 수준의 결빙강도가 산출되었으며, 오산이 14.5~38회, 광주가 2.5~30회 제시되었다.

특히, 경험적 시뮬레이션에 의한 방법을 제외한 3가지 방법은 대기 기상자료를 가지고 시뮬레이션하는 방법만 약간 차이가 있기 때문에 MDT 수준의 결빙강도 발생 빈도가 유사하게 도출되었다.

그러나 경험적 시뮬레이션에 의한 방법은 다른 방법에 비해 MDT 수준의 결빙강도 발생 빈도가 낮게 제시되었는데, 이는 정확도 향상을 위해 Table 2에 나타난 보정인자를 반영하였기 때문으로 판단된다.

또한, MDT 수준의 결빙이 모든 분석방법에서 공통적으로 산출된 시기는 오산이 1월, 2월, 3월 및 11월의 넓은 기간에 걸쳐 발생하고 있으나, 광주는 1월에만 집중하여 표시되었다.

미래 지상전은 기동비닉을 유지한 상태에서 전천후 신속한 기동으로 결정적 전투의 승리가 매우 중요하게 될 것이므로, 이를 위해 헬기의 전천후 작전준비태세 유지가 매우 강조되고 있다.

이와 같이 헬기의 전천후 작전개념과 한반도 기상환경을 고려하였을 때, 국내개발 헬기의 제빙 및 방빙장치 설치가 필요하며, 이와 함께 결빙 환경에서의 비행시험을 통한 체계 수준의 감항인증 확보를 위한 노력이 요구됨을 알 수 있다.

Table 4. Comparison of the calculated results on the icing intensity of MDT level

calculation method	Osan		Gwangju	
	times	month	times	month
AFGWC estimation	38	<u>Jan.</u> , <u>Feb.</u> , <u>Mar.</u> , Oct., <u>Nov.</u> , Dec.	30	<u>Jan.</u> , Feb., Dec.
adiabatic water vapor mixing ratio (LWC_{mean})	40	<u>Jan.</u> , <u>Feb.</u> , <u>Mar.</u> , Apr., May., <u>Nov.</u> , Dec.	-	-
icing flowchart	23	<u>Jan.</u> , <u>Feb.</u> , <u>Mar.</u> , Apr., May., Oct., <u>Nov.</u>	29	<u>Jan.</u> , Feb., Apr., Dec.
empirical simulation	14.5	<u>Jan.</u> , <u>Feb.</u> , <u>Mar.</u> , Apr., May., Oct., <u>Nov.</u> , Dec.	2.5	<u>Jan.</u> , Apr.,

5. 결 론

오산과 광주 지역의 대기 기상자료를 바탕으로 헬기가 운용되는 고도범위의 기상환경에 대해 정량적으로 분석하고, 국내개발 군용헬기의 결빙에 대한 감항인증 필요성 여부를 검토하였으며, 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 최근 3년간 주간을 대상으로 연간 결빙발생 빈도는 오산이 평균 102일, 광주가 평균 91일 발생하였다.
- (2) 헬기 운용에 영향을 크게 미치는 결빙 기상환경은 분석방법에 따라 약간 차이가 있으나, 모든 방법에서 MDT 수준의 결빙강도가 산출되었으며, 오산이 14.5~38회, 광주가 2.5~30회 제시되었다.
- (3) MDT 수준의 결빙이 모든 분석방법에서 공통적으로 산출된 시기는 오산이 1월, 2월, 3월 및 11월의 넓은 기간에 걸쳐 발생하고 있으나, 광주는 1월에만 집중하여 제시되었다.
- (4) 국내개발 군용헬기는 완벽한 작전임무 수행과 안전한 운용을 위해 MDT 결빙강도 수준의 비행시험을 통한 감항인증 노력이 요구된다.

후 기

본 연구를 위한 오산과 광주 지역의 풍선에 의한 대기 기상자료는 공군 기상단의 협조로 제공된 자료를 활용하였으며, 관계자 여러분께 감사를 드리며, 아울러 본 논문은 2013년도 금오공과대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구 결과이다.

References

- [1] Lee S. J. and Kim Y. C., "A Study on the Occurrence and Prediction of Aircraft Icing over South Korea," Journal of the Korean Meteorological Society, Vol. 41, No. 4, pp. 615-624, 2005.
- [2] <http://www.hansfamily.kr/1228>
- [3] Lee S. J. and Kim Y. C., "A Numerical Forecast and Verification of the Aircraft Turbulence Observed over South Korea," Journal of the Korean Meteorological Society, Vol. 38, No. 5, pp. 493-507, 2002.
- [4] Kim Y. C., "A Verification of threshold of the Aircraft turbulence index and Icing Index Using PIREPs and KWRF on Korean Peninsula," The Korean Society for Aviation and Aeronautics, Vol. 19, No. 3, pp. 54-60, 2011.
- [5] Kim Y. C., "The Analysis of the Characteristics of Korean Peninsula aircraft Icing Index Using KWRF," The Korean Society for Aviation and Aeronautics, Vol. 18, No. 3, pp. 42-54, 2010.
- [6] Mark R. M., Kirth L. P. and Charles H. E., "Meteorological Techniques-Aircraft Icing," Air Force Weather Agency, AFWA/TN-98/002 Revised, 2006.
- [7] "Design & Airworthiness Requirements for Service Aircraft," Defense Standard 00-970, Vol. 2, Leaflet 711/2, pp. 1-11, 1984.
- [8] "Aircraft Natural/Artificial Icing," TOP 7-3-537, US Army Aviation Technical Test Center, pp. 2-35, 2009.
- [9] Bernstein, B. C., "Icing Frequencies at select Sites in South Korea," Leading Edge Atmospherics, LLC, pp. 1-27, 2013.
- [10] "KUH System Development Specification," DAPA, 2012.