

환경시험평가를 위한 한국의 강수입자 분포 모델 연구

문관호^{*1)} · 홍윤기¹⁾ · 오성남²⁾ · 김태민³⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

²⁾ 연세대학교 자연과학연구원 전문연구원

³⁾ 가천대학교 전자계산학과

The Korean Precipitation Particle Distribution Model for Environmental Test & Evaluation

Gwan Ho Mun^{*1)} · Yun Ky Hong¹⁾ · Seong Nam Oh²⁾ · Tae Min Kim³⁾

¹⁾ *The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

²⁾ *Institute of Natural Sciences, Yonsei University, Korea*

³⁾ *School of Computer Engineering, Gachon University, Korea*

(Received 23 December 2015 / Revised 22 March 2016 / Accepted 8 July 2016)

ABSTRACT

The study on the precipitation particle distribution models in Korea for the environmental test and evaluation (T&E) from huge amount of measuring and reanalysis data is presented. Instead of related specifications of MIL-HDBK-310, with these models it can be possible to realize more realistic and efficient design and environmental T&E for the military and civil products especially for the atmospheric flying vehicles using in Korea.

Key Words : Precipitation, Particle Distribution, Environmental Test Specification

1. 서론

대기 중에 분포하는 자연입자는 물방울과 얼음과 같은 강수입자와 에어로졸이 있다. 강수입자는 구름의 생성에서 비나 눈 또는 우박 등의 지상강수 현상이 일어나기까지 매우 복잡한 과정을 거치게 된다.

이 과정에서 발생하는 다양한 직경과 형상을 가진

입자 중에서 직경 0.5 mm 이상으로 비교적 큰 강수입자는 비행체에 충돌할 경우 손상을 입히게 되는데, 이를 입자침식(particle erosion)이라 한다. 입자침식 현상은 비행체의 성능과 생존성에 영향을 줄 수 있기에, 사전에 이를 고려하여 비행체와 부품을 설계하고, 환경시험평가를 통해 성능과 안전성을 보장하여야 한다.

현재 국내에서 군수물자 환경시험의 방법과 절차에 관한 규격은 미국의 MIL-STD-810 규격을 따르고 있으며, 환경시험을 위한 기상조건은 주로 미국의 MIL-HDBK-310을 참고하고 있다. MIL-HDBK-310은 전 세

* Corresponding author, E-mail: dbwuspdla@daum.net
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

계의 지표와 대기에 대한 자연환경(natural environment) 기준을 수록하고 있다. 모든 군수물자가 전 수명주기(total life-cycle)동안 만나게 되는 다양한 운용환경(operation environment) 조건은 이 규격에 제시된 자연환경 조건으로부터, 해당 군수물자에 직접적으로 영향을 주는 유도환경(induced environment)을 산출하여 정하게 되고, 이렇게 산출된 운용환경을 기준으로 설계와 환경시험평가를 수행한다. 여기서, 유도환경은 해당 군수물자가 장착된 플랫폼에 의해 자연환경이 변형되거나, 인공적으로 부가된 환경을 말하며, 설계자나 환경분석가가 계산이나 실험을 통해 구한다¹²⁾.

MIL-HDBK-310에서 제시하고 있는 지상강수 및 강수입자 분포에 관한 조건은 전 세계를 단일권역으로 하여, 3가지(0.01 %, 0.1 %, 0.5 %) 극한강수발생빈도값에 따라 산출된 강수강도 168, 84 및 36 mm/hr에 대하여 각각 제시되어 있다. 여기서 강수강도는 정해진 권역 내에서 가장 가혹한 강수지역에서 가장 가혹한 강수가 관측된 한달 동안 매시간 측정된 강수강도 중에서 해당 극한강수발생빈도 확률값에 해당하는 순위의 강수강도 값을 말한다. 또, 극한강수발생빈도값은 대상 물자가 정해진 권역 내의 임의의 지점에서 임의의 시간에 운용될 때, 극한강수환경에 의해 정상적인 운용이 불가능한 확률을 뜻하며, 운용 위험도(% of risk)라고도 한다. 이 규격에서는 극한 강수가 내리는 지점 상공에 강수입자가 분포하는 강수구름이 존재한다고 가정하고, 강수구름의 운정 고도 20 km까지 고도에 따라 단위 체적당 강수입자의 수를 규정하고 있다. 이때 강수입자의 구성은 지상에서 고도 4.5 km까지는 모두 물입자, 고도 4.5 ~ 6.0 km에서는 얼음이 혼합되어 있으며, 7 km 이상에서는 모두 얼음입자라고 규정하고 있으나, 이에 관한 세부적인 정보는 제시되어 있지 않다. 특히 강수입자를 함유한 강수구름의 강수강도별 직경이나 운저고도가 제시되어 있지 않고, 운정 고도가 20 km 한가지로만 제시되어, 이를 그대로 이용하여 비행체의 입자침식 설계나 시험평가에 필요한 강수 및 강수입자 분포 규격을 만드는 것은 불가능하다.

이러한 문제점을 해결하기 위해, 국내에서 생산, 운용되는 비행체 등 군수물자의 강수 및 입자침식 환경 시험평가를 위한 국내 강수 및 강수입자 분포 모델 개발이 필요한 실정이다. 이를 위해서는 1)국내 권역에서 관측된 강수자료로부터 산출된 운용위험도(극한강수발생빈도값)에 따른 강수강도 기준을 정하고, 2)각

기준 강수강수가 발생한 일시의 기상자료에서 강수구름의 제원을 산출하고, 3)해당 강수구름 내의 고도별 온도에 따라 결빙 시작고도 및 완전 결빙고도를 산출하여 작성한 강수강도별 강수구름 모델을 제시하여야 한다.

본 연구에서는 우리나라 기상청의 각종 국내 기상 관측 및 분석 자료를 활용하여, 1)운용위험도별 극한강수강도, 2)해당 극한 강수강도 발생 시 주변지역의 지상강수강도분포(강수지역 강수강도별 직경), 3)극한강수 시 강수구름의 계절별, 강수강도별 운정 및 운저고도, 4)결빙 시작 및 완전 결빙고도, 그리고 이 사이의 물방울과 얼음 입자의 혼합비 및 5)강수구름 내에서의 고도에 따른 단위부피당 입자수 분포를 산출하였다. 이 과정을 통해, 국내 강수 및 강수입자 분포 모델을 개발하였다.

2. 국내 강수 및 강수 입자분포 모델

2.1 국내 극한강수발생빈도값별 강수강도 산출

본 연구에서는 MIL-HDBK-310에서 정의한 운용위험도에 따른 각각의 극한강수강도를 기준으로 강수 및 강수입자 분포 모델을 정의하였다. 운용위험도는 주로 군수품의 성능 및 수명에 관한 요구조건과 함께 수요자인 군이 정하는 값으로, 해당 군수품의 설계와 환경 시험평가의 기준이 된다. 국내에서는 아직 군이 각 군수품에 대해 이 값을 정한 사례가 없는 바, 본 연구에서는 군의 선택권을 최대한 넓게 제공하기 위해 MIL-HDBK-310에서 정한 운용위험도 0.01 %, 0.1 %, 0.5 % 외에 1.0 %, 5.0 % 및 최대값에 대한 극한강수강도를 추가로 산출하여 제시하였다.

실제 운용위험도에 따른 극한강수강도 산출 방법은 10년 이상의 충분한 기간 동안 운용권역 전 지역에서 매시간 측정된 강수자료를 모두 보유한 경우와 그렇지 못한 경우로 나눌 수 있다. 전자의 경우는 먼저 관측 지점마다 해당 기간 동안 관측한 시간당 강수강도값 전체에 대하여 크기순으로 월별 순위를 매기고, 운용위험도에 해당하는 순위의 시간당 강수강도값을 정해 제시한다. 사용자는 군수품마다 정해진 운용권역 내에서 제시된 각 관측지점의 운용위험도에 해당하는 강수강도 중 최대값을 찾아 이를 극한강수강도로 정하게 된다¹³⁾. 후자의 경우는 좀 더 복잡한 과정을 거치게 되는데, 먼저 운용권역 내에서 가장 가혹한 강수가

관측된 지점을 선정하고, 그 지점에서 가장 강수강도가 높은 한 달을 정한 후, 해당 달의 매시간 측정 강수강도값 중에서 운용위험도에 해당하는 순위의 강수강도값을 극한강수강도로 정하게 된다¹¹⁾. 후자의 경우 실제로 운용권역 내의 가장 가혹한 강수지점과 가장 가혹한 강수가 있는 달을 정하는 방법이 MIL-HDBK-310에 자세히 규정되어 있지 않다. 종전 민군겸용 환경시험 표준을 제정하기 위한 극한강수 설정 연구에서 이관훈 등(2007)은¹⁴⁾ 가장 가혹한 강수지역은 대상기간 중 최대강수기록이 발생한 지역으로, 가혹한 월도 최대강수기록이 발생한 월로 선정하였고, 1 % 운용위험도의 극한강수강도 역시 2002년 8월 31일 강릉관측소의 일 최대강수강도 870.5 mm/day를 24시간으로 나눠 36.27 mm/hr로 정하고, 이를 한반도 권역에서의 극한강수강도 값으로 확대 설정한 바 있으나, 타당한 근거는 제시하지 못하였다.

본 연구에서는 국내 총 91개 기상청 관측소 중 1980년에서 2010년까지 31년간 매시간 강수관측자료를 모두 가진 61개 관측소를 선정하여 전자의 방법으로 각 운용위험도에 해당하는 극한강수강도를 산출하였으며, 그 결과를 MIL-HDBK-310에서 제시한 세계 극한강수강도와 함께 Table 1에 제시하였다.

MIL-HDBK-310의 세계 극한강수강도는 동인도, 버마 및 말레이시아반도 등 세계 최대 강수지역의 관측자료에서 산출하였으므로, 국내 극한강수강도와 차이가 크게 나는 것을 알 수 있다.

Table 1. Extreme rainfall intensities in the world(MIL-HDBK-310) and in korea according to the % of risk

구분	관측 지점	일시	국내 극한 강수강도 (mm/hr)	세계 극한 강수강도 (MIL-HDBK-310)
0.01 %	강화도	1998.8. 7 02시	89.0	168.0
0.1 %	성산포	2007.8.31 17시	40.0	84.0
0.5 %	성산포	2010.8.25 07시	20.5	36.0
1.0 %	양평	1990.7.18 04시	13.0	
5.0 %	대관령	1996.8.26 19시	2.9	
1시간 최대	주암	1998.7.31 23시	128.0	

(자료출처: 기상청 1980-2010 ASOS 관측자료)

2.2 국내 극한강수시 지상 강수강도분포 산출

대기 중 강수입자를 포함한 강수구름의 강수강도별 직경을 구하기 위해, 국내의 2가지 지상강수자료를 바탕으로 극한강수 시 지상 강수강도분포도를 5 mm/hr 간격의 등고선으로 그리고, 각 등고선의 최대 직경을 측정하였다.

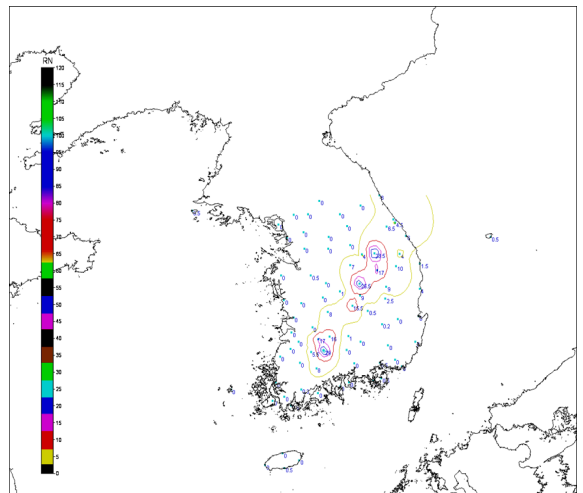
첫 번째 분포도는 앞 절에서 구한 국내 61개 관측지점의 5가지 극한강수강도에 해당하는 일시에 관측된 전국 91개 기상관측소의 지상강수강도 관측값을 역거리가중법(IDW : Inverse Distance Weighted Method)을 이용하여 등고선을 그린 것이다. 이때 사용한 보간식은 아래와 같다.

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \tag{1}$$

여기서, Z_p 은 보간지점의 강수강도 보간값, Z_i 는 관측지점(x_i, y_i)의 강수강도 관측값, 그리고 W_i 는 가중치로서 거리에 반비례하는 값을 나타낸다.

두 번째 분포도는 기상청의 한반도 격자점 강수량 재분석 자료(2005~2013)¹⁵⁾중에서 앞에서 구한 극한강수강도 일시에 해당하는 전국의 지상강수 분포자료를 찾아 사용하였다.

Fig. 1은 위의 두가지 강수강도 분포도의 예를 보여 주고 있다.



(a)

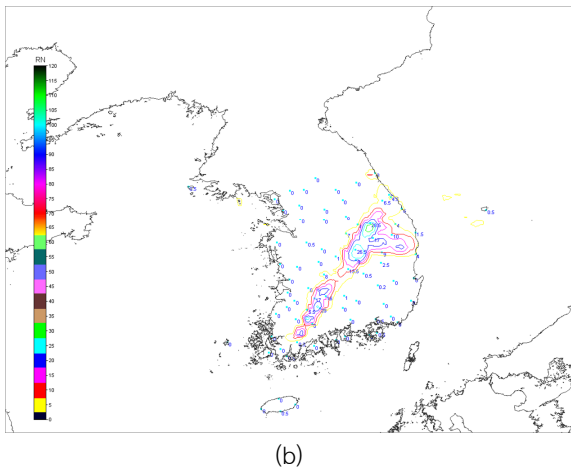


Fig. 1. Ground rainfall intensity distribution map (example) (2008.7.25., 09:00, NamWon, 29.0 mm/hr) from (a) ASOS data and (b) Ground rainfall reanalysis data

위 두가지 지상강수 분포도에서 극한강수 기준 지점을 중심으로 5 mm/hr 간격 각 등고선의 최대 직경을 측정하였다. 이 자료를 가지고 해당 극한강수 기준 지점의 최대강수강도 등고선의 최대직경 평균(최대 강수강도 구역 직경)과 그 이하 주변 강수강도 등고선의 최대직경 평균(강수구역 평균 직경)을 극한강수강도별로 산출하였으며, 그 결과는 아래 Table 2와 Fig. 2에서 보여주고 있다.

Table 2. Average diameter of (left) the core area and (right) it's outskirts area of the maximum rainfall intensity according to the level of extreme rainfall intensity

최대강수강도 (mm/hr)	강수구역 직경(km)	강수강도 (mm/hr)	강수구역 직경(km)
5	120.0	5	480.0
10	50.0	10	170.0
20	21.0	20	70.0
30	13.0	30	36.0
40	9.0	40	24.0
60	5.5	60	13.0
80	3.8	80	8.6
>100	3.0	>100	5.0

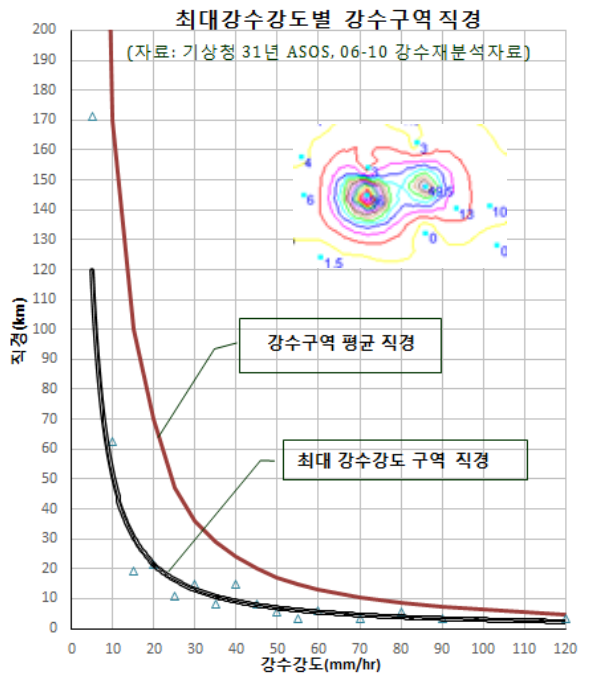


Fig. 2. Average diameter of (left) the core area and (right) it's outskirts area of the maximum rainfall intensity according to the level of extreme rainfall intensity

극한강수 시 최대강수강도 구역 직경 곡선은 ASOS 관측소 관측자료와 지상강수 재분석 자료로부터 만들어진 두 가지 분포도에서 극한강수강도와 가장 근사한 강수강도 등고선의 최대직경을 평균한 값을 통합하여 강수강도에 따라 그리고, 추세선을 잡은 것이다. 이때, 추세선의 관계식은 식 (2)와 같고, 결정계수 R^2 는 0.909이다.

$$D = 879.47 * R^{-1.239} \quad (2)$$

여기서 D는 강수구역 직경(km), R은 강수강도(mm/hr)이다.

강수강도별 강수구역 평균 직경 곡선은 두가지 분포도에서 최대강수강도 주변 등고선의 최대 직경을 강수강도별로 평균한 값을 통합하여 추세선을 그린 것으로 결정계수 R^2 는 0.9732이며, 관계식은 다음 식 (3)과 같다.

$$D = 4947.7 * R^{-1.451} \quad (3)$$

극한강수 시 최대강수강도 구역 직경과 주변 강수강도별 강수구역 평균직경 모두 강수강도가 증가하면 급격히 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 국내에서 극한강수가 있을 때 국지적 호우의 경향을 보이기 때문으로 파악된다. 이러한 경향은 40 mm/hr 이상의 높은 강수강도를 가진 경우 특히 심해져서, 최대 강수강도 구역직경은 10 km 이하가 된다.

강수입자를 함유한 강수구름은 지상강수 구역 상공에 한해 존재한다는 가정 하에, 운용위험도별 극한강수에서 최대강수강도를 보이는 강수구름 기둥의 직경을 식 (2)에서 구한다. 이후 주변의 점차 감소하는 강수강도에 해당하는 강수구름의 직경을 식 (3)에서 차례대로 구하여, 동심원 형태의 강수구름 분포 모델을 고안하였다. 그 결과를 Table 3에서 볼 수 있다.

Table 3. Diameters of rain clouds according to % risk unit(mm/hr)

운용 위험도	0.01 %		0.1 %		0.5 %		1.0 %	
	강수 강도	직경 (km)	강수 강도	직경 (km)	강수 강도	직경 (km)	강수 강도	직경 (km)
1	89	3.0	40	9.0	20.5	21.0	13	33.0
2	80	9.0	20	70.0	10	170.0	10	170.0
3	60	15.0	10	170.0				
4	40	30.0						
5	20	70.0						
6	10	170.0						

2.3 강수구름의 고도 및 결빙 구간

강수구름 내의 과냉각된 물구름(supercooled water clouds)의 결빙시작에서 완전결빙을 위한 주위온도 구간은 강수지역과 강수구름의 형성 및 발달 과정에 따라 큰 차이가 있으나 일반적으로 -4 °C ~ -40 °C 범위이다^[6]. 그러나, Tattelman 등(1985)^[7]은 레이더에 의한 구름관측 분석결과를 기반으로 비행체 환경에서 주목하는 직경이 0.5 mm 이상되는 큰 물방울의 결빙시작과 완전결빙을 위한 주위 온도구간을 0 °C ~ -10 °C (고도 7 km)로 정하여, 이를 현재까지 세계기후규격(MIL-HDBK-310)으로 적용하고 있다.

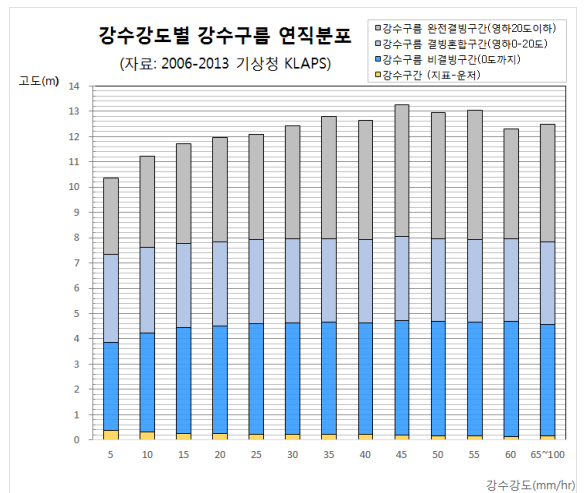
이후 Takahashi(2004)^[8]가 비디오존테를 이용하여 강

수구름 내의 입자들을 직접 관측한 결과로부터, 급격한 상승기류를 동반한 대류구름의 경우 직경 0.5 mm 이상의 물방울이 구름 속에서 결빙되지 않고 최저 -20 °C(8 km)까지 분포하는 것을 보인 바 있다.

이러한 연구결과를 바탕으로 본 연구에서는 국내 강수구름 내 결빙시작 및 완전결빙을 위한 고도를 해당 강수구름의 주위온도가 0 °C ~ -20 °C에 상당하는 고도로 정의하였다.

국내 극한강수 시 강수입자를 함유한 강수구름의 운정, 운저와 결빙 시작 및 완전 결빙고도는 기상청 KLAPS(Korea Local Analysis and Prediction System) 3차원 격자형 기상자료(2006-2010)를 이용하여 산출하였다^[9]. KLAPS는 한반도 주변 권역을 수평으로 약 5×5 km 간격의 234×283 해상도 격자와 수직으로 50 hPa 간격의 23개층으로 구성된 3차원 격자에 매 시간마다 총 46종의 기상자료를 탑재한 재분석자료 데이터베이스이다. 본 연구에서는 국내 91개 관측소의 위치를 KLAPS 격자점을 보간하여 지정하고, 2006년에서 2013년까지의 자료에서 강수구름의 운정, 운저, 결빙시작고도 및 완전결빙고도의 강수강도별, 월별 평균값을 구하였다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 강수구름의 운정, 운저 및 결빙고도 등 연직분포는 강수강도에 따라서 차이가 거의 없었으나, 월별에 따라서는 큰 차이를 보인다. 따라서 강수구름의 연직분포 모델은 겨울형과 여름형 두가지로 나누어 산출하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다.



(a)

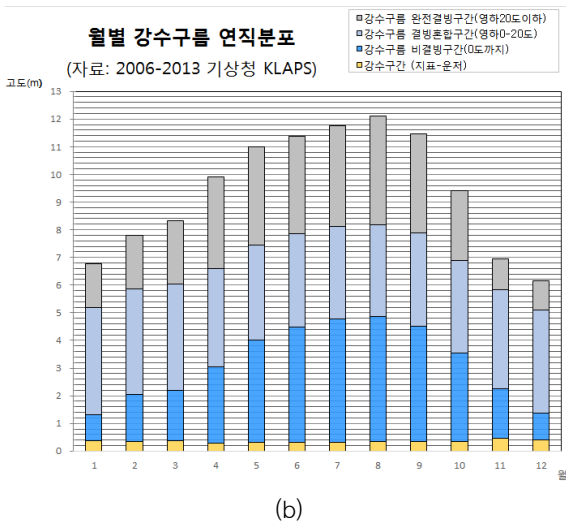


Fig. 3. Rain clouds' vertical distribution of extreme rainfall according to (a) Rainfall intensity and (b) Months

Table 4. Korean extreme rain clouds' vertical distribution model

구분	운저고도 (km)	운정고도 (km)	결빙시작 고도 (km)	완전결빙 고도 (km)
겨울형	0.3	6.2	1.2	5.1
여름형		12.1	4.9	8.2

이 결과를 보면 국내의 극한강수구름의 평균 운저 고도는 계절과 강수강도 구분 없이 약 300 m로 일정하며, 운정 고도의 경우 겨울은 6.2 km, 여름은 12.1 km로 거의 두배 차이가 남을 알 수 있다. 결빙 시작고도와 완전 결빙고도의 경우도 같은 경향을 보여, 겨울에는 낮고 여름에는 높은 값을 보이고 있다. 따라서 환경설계나 시험평가 규격 설정 시 해당 비행체나 물자의 요구조건에 따라 이를 선택적으로 적용할 수 있다.

Takahashi(2004, 2010)^[8,10]는 비디오존데를 이용하여 관측에서, 강수구름 내 결빙 시작고도부터 완전 결빙 고도 사이의 구름층 구간에서 과냉각 물방울과 얼음 입자가 함께 존재하며, 온도가 내려갈수록 과냉각 물방울은 적어지고, 얼음 입자가 많아지는 것을 보인 바 있다. 이러한 결과로부터 물방울과 얼음 입자의 혼합 구간에서는 두 가지 입자가 서로 독립적으로 존재하

며, 대기온도에 따라 두 가지 입자의 구성비가 선형적으로 변화한다고 가정하였다.

식 (4)는 대기온도가 고도에 따라 선형적으로 변화하는 대류권 내에 물방울-얼음 입자 혼합 구간이 속해 있는 점을 고려하여, 물방울-얼음 입자 수 구성비가 고도에 따라 선형적으로 변화하도록 도출한 식이다.

$$RC_i = 1 - RC_w = \frac{z - z_{is}}{z_{if} - z_{is}} \quad (4)$$

여기서 RC_i 와 RC_w 는 얼음 입자와 물방울 입자의 구성비율, z_{is} 와 z_{if} 는 각각 결빙시작 고도와 완전결빙 고도이다.

2.4 강수구름 내 입자분포

지상강수강도와 강수구름 내의 고도별 강수강도의 관계는 지표에서 운저까지는 지상강수강도로 일정하고, 운저와 운정 사이 구간에서는 고도에 따라 감소하여 운정에서 0이 되는 B. C. Scott(1982)^[8]의 모델을 사용하였으며, 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} z \leq z_g, & \quad J(z) = J(g) \\ z_g \leq z \leq z_t, & \quad J(z) = J(g) \left(\frac{z_t - z}{z_t - z_g} \right)^{\frac{1}{0.22}} \\ z_t < z, & \quad J(z) = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, z_g 와 z_t 는 각각 운저와 운정 고도, $J(g)$ 와 $J(z)$ 는 각각 지상과 해당 고도에서의 강수강도이다.

강수구름 내의 각 고도에서 강수강도가 정해지면, 단위부피 당 함유 입자의 직경별 수는 MIL-HDBK-310에서와 같이 Ulbrich(1983)^[9]에 의해 제안되고 Willis와 Tattleman(1989)^[10]에 의해 보완된 Modified Γ 분포를 그대로 이용하였다. 이 모델의 관계식은 아래와 같다.

$$N(D) = N_G D^\alpha \exp(-AD) \quad (6)$$

$$\text{단, } N_G = \frac{512.85 M \times 10^6}{D_0^4} \left(\frac{1}{D_0} \right)^\alpha$$

$$\alpha = 2.160$$

$$A = 5.588/D_0$$

$$D_0 = 0.1571 M^{0.1681}$$

$$M = 0.062 R^{0.913}$$

아래 Table 5는 Table 3에 수록된 여러 가지 지상 극한강수강도 값에서 입자직경별 단위체적 당 입자수 산출 결과를 보여준다.

Table 5. No. of drops per unit volume(1 m³) according to rainfall intensity

입자 직경 (mm)	강수강도(mm/hr)									
	13.0	20.5	40.0	112.0	10.0	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0
0.5-1.4	738	907	1,205	1,786	652	897	1,205	1,415	1,579	1,714
1.5-2.4	101	157	285	645	77	153	285	399	500	593
2.5-3.4	6	12	30	108	4	11	30	51	73	95
3.5-4.4	0	1	2	13	0	1	2	5	8	11
4.5-5.4	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
5.5-6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2.5 국내 강수 및 강수입자 분포 모델

0.01 %, 0.1 %, 0.5 % 및 1.0 % 등 4가지 운용위험도별 극한강수강도 기준값, 동심원형 강수구름의 체원과 결빙고도, 그리고 강수구름 내 고도별 입자분포를 산출하였다. 그 결과를 이용하여, 국내 강수 및 강수입자 분포 모델을 작성하여, 매 2 km 고도마다 강수강도(강수율)와 단위체적당 물방울과 얼음 입자수 분포표를 제시하였다.

Fig. 5와 Table 6은 운용위험도 0.1 %(극한강수강도 40 mm/hr)에서 한국 강수입자 분포 여름형 모델과 강수입자 분포 예를 보여주고 있다. 고도 4.9 ~ 8.2 km 구간은 물방울-얼음 혼합구간으로서 물방울 수는 회색, 얼음입자 수는 흰색으로 표시하였다.

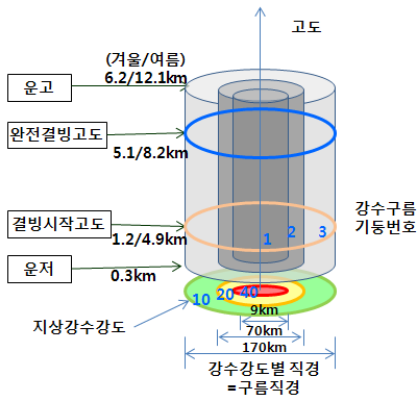


Fig. 4. Korean rain cloud model for the Korean precipitation particle distribution model

Table 6. Example of the Korean precipitation particle distribution model at 0.1% risk, 40 mm/hr maximum extreme ground rainfall intensity in the summer season(gray: rain drop, white: ice particle)

a. 강수구름기둥 1번(강수강도 40 mm/hr, 직경 9 km)

고도 (km)	강수율 (mm/hr)	입자직경별 1m ³ 당 입자수					
		0.5~1.4 mm	1.5~2.4 mm	2.5~3.4 mm	3.5~4.4 mm	4.5~5.4 mm	5.5~6.4 mm
0	40.0	1,205	285	30	2	0	0
2	29.8	1,067	221	20	1	0	0
4	19.7	891	151	11	1	0	0
6	11.5	465	59	3	0	0	0
		233	30	2	0	0	0
8	5.4	29	2	0	0	0	0
		454	38	1	0	0	0
10	1.5	242	8	0	0	0	0
12	0.0	0	0	0	0	0	0

b. 강수구름기둥 2번(강수강도 20 mm/hr, 직경 70 km)

고도 (km)	강수율 (mm/hr)	입자직경별 1m ³ 당 입자수					
		0.5~1.4 mm	1.5~2.4 mm	2.5~3.4 mm	3.5~4.4 mm	4.5~5.4 mm	5.5~6.4 mm
0	20.0	897	153	11	1	0	0
2	14.9	786	115	7	0	0	0
4	9.8	647	76	4	0	0	0
6	5.8	331	28	1	0	0	0
		166	14	1	0	0	0
8	2.7	20	1	0	0	0	0
		314	17	1	0	0	0
10	0.8	159	3	0	0	0	0
12	0.0	0	0	0	0	0	0

c. 강수구름기둥 3번(강수강도 10 mm/hr, 직경 170 km)

고도 (km)	강수율 (mm/hr)	입자직경별 1m ³ 당 입자수					
		0.5~1.4 mm	1.5~2.4 mm	2.5~3.4 mm	3.5~4.4 mm	4.5~5.4 mm	5.5~6.4 mm
0	10.0	652	77	4	0	0	0
2	7.5	566	57	2	0	0	0
4	4.9	458	36	1	0	0	0
6	2.9	230	13	0	0	0	0
		115	6	0	0	0	0
8	1.4	14	0	0	0	0	0
		212	7	0	0	0	0
10	0.4	102	1	0	0	0	0
12	0.0	0	0	0	0	0	0

기존 MIL-HDBK-310의 결과와 비교하기 위해 극한 강수확률 0.1 %(강수강도 84 mm/hr)에서 대기 중 강수입자 수 분포를 산출하여 Table 7에 제시하였다. MIL-HDBK-310에서는 물방울-얼음 혼합구간에서 각각의 입자수를 구분하지 않았으나, 정량적인 비교가 가능하도록 얼음과 물방울의 수를 구분해서 수록했으며, 계산 방법은 국내 모델의 산출방법을 따랐다.

Table 7. Example of the world precipitation particle distribution model(MIL-HDBK-310) at 0.1 % risk, 84 mm/hr maximum extreme ground rainfall intensity(gray: rain drop, white: ice particle)

고도 (km)	강수율 (mm/hr)	입자직경별 1m ³ 당 입자수					
		0.5~1.4 mm	1.5~2.4 mm	2.5~3.4 mm	3.5~4.4 mm	4.5~5.4 mm	5.5~6.4 mm
0	84.0	1,608	520	77	8	1	0
2	84.0	1,608	520	77	8	1	0
4	84.0	1,608	520	77	8	1	0
6	84.0	1,072	346	51	6	1	0
		536	173	26	3	0	0
8	62.8	87	25	3	0	0	0
		1,353	388	51	5	0	0
10	44.5	1,258	312	35	3	0	0
12	29.2	1,058	217	20	1	0	0
14	17.0	834	131	9	0	0	0
16	7.9	582	60	3	0	0	0
18	2.1	292	13	0	0	0	0
20	0.0	0	0	0	0	0	0

본 논문에서 제시한 비행체 등 군수물자의 환경시험 평가를 위한 국내 강수입자분포 모델을 적용할 때는 다음과 같은 제한요인을 고려해야 한다.

첫째, 본 모델의 적용권역은 우리나라의 육지와 인근 연안으로 국한한다. 우리나라 주변국 및 해양에 적용되는 강수입자 분포 모델은 향후 추가적인 연구를 통해 제시될 것이다.

둘째, 본 모델은 비행체 등 군사물자의 입자침식 시험평가에 필요한 직경 0.5 mm 이상 큰 강수입자에 한정된다. 이보다 작은 강수입자나 에어로졸 분포 모델은 별도의 연구를 통해 제시될 것이다.

셋째, 본 모델에서 사용한 MIL-HDBK-310의 Modified Γ 강수입자분포 식 (6)은 허리케인(Hurricane)과 태풍에 의한 극한강수 관측자료를 기반으로 전 세계 공통으로 적용되도록 만들어진 것이다. 태풍 이외에도 우리나라의 극한강수의 발생은 기단의 상호작용이나 지형적 영향 등 대기상태에 크게 영향을 받으므로, 향후 우리나라 극한강수 특성을 고려한 강수입자분포 모델의 보완이 필요하다.

3. 결론

기상청의 각종 기상요소에 대한 관측 및 재분석자료를 이용하여, 국내 강수입자 분포 모델을 개발하였다. 이 모델은 기존 MIL-HDBK-310 규격을 국내에서 실제로 적용하는 데 발생하는 문제점을 해결하고, 이를 대체하여 사용할 수 있도록 하였다.

이 모델을 이용하여 국내를 운용권역으로 하는 군수 및 민수 물자에 대한 강수 및 입자침식 내환경 설계와 환경시험평가를 수행함으로써, 극한 강수환경에서 해당 제품의 성능 및 안전성을 검증할 수 있을 것이다.

References

- [1] DoD. "Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests," Military Standard, MIL-STD-810G, 2008.
- [2] DoD, "Global Climatic Data for Developing Military Products," Military Handbook, MIL-HDBK-310, 1997.
- [3] Sissenwine, N. and Cormier, R. V., "Synopsis of Background Material for MIL-STD-210B, Climatic Extremes for Military Equipment," AFCRL-TR-74-0052, 1974.
- [4] Lee, K., "Study for Environmental Test Standard of Combined Use of Military and Public," DTAQ-07-1374-R, pp. 152-154, KETI, 2007.
- [5] Nam, J., Lee, Y., Ha, J. and Jung, K., "Precipitation Reanalysis Data from the Development of the Technologies for Production of Composite Precipitation on the Korean Peninsula," Proc. of the Spring Meeting, pp. 136-137, KMA., 2012.

- [6] Pruppacher, H. R. and Klett, J. D., *Microphysics of Clouds and Precipitation*, Elsevier Science Inc., pp. 38-40, 2010.
- [7] Tattelman, P. and Willis, P. T., "Model Vertical Profiles of Extreme Rainfall Rate, Liquid Water Content, and Drop-Size Distribution," AFGL-TR-85-0200, p. 23, 1985.
- [8] Takahashi, T., "Hydrometeor Mass, Number, and Space Charge Distribution in a Hector Squall Line," *J. of Geophysical Research*, Vol. 109, pp. 4-10, 2004.
- [9] Ha, J., Lee, J., Lee, Y., Lee, H. and Jang, D., "High Resolution Reanalysis Data on the Korean Peninsula on the base of KLAPS," *Proc. of the Spring Meeting*, pp. 227-228, KMA., 2010.
- [10] Takahashi, T., "The Videosonde System and Its Use in the Study of East Asian Monsoon Rain," *J. of American Meteorological Society*, pp. 1232-1246, 2010.
- [11] Scott, B. C., "Theoretical Estimates of the Scavenging Coefficient for Soluble Aerosol Particles as a Function of Precipitation Type, Rate and Altitude," *Atmos. Environ.*, 16, 1753-1762, 1982.
- [12] Ulbrich, C. W., "Natural Variations in the Analytical Form of the Raindrop Size Distribution," *J. of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 22, pp. 1764-1775, 1983.
- [13] Willis, P. T., and Tattleman, P., "Drop-Size Distributions Associated with Intense Rainfall," *J. of Applied Meteorology*, Vol. 28, pp. 3-15, 1989.