

# 극항로 우주방사선 예보 모델 개발을 위한 사전 연구

황정아\*, 신대윤\*\*

## Pre-study for Polar Routes Space Radiation Forecast Model Development

Junga Hwang\* and Daeyun Shin\*\*

### 요 약

본 연구는 “극항로 우주방사선 예보 모델 개발을 위한 사전연구”로서 2013년부터 본격적으로 개발하게 될 기상청의 극항로 우주방사선 예보 모델의 개발 방안 마련을 위한 사전 조사에 초점을 맞추고 있다. 자료 조사는 주로 항공기 운항과 우주기상 관련 문헌 및 법령 조사, 국내 항공사들의 우주기상 관련 운영지침 및 실태 조사를 통해서 이루어졌다. 또한 주요 선진국들이 현재 사용하고 있는 우주 방사선 계산 프로그램들의 장단점을 파악하고 개선할 수 있는 가능성을 찾는 데 주력하였다. 조사 결과 국내에서는 아직 극항로 우주방사선을 예보하는 독자적인 모델이 전무한 상황으로 극항로 우주방사선 예보 모델의 국내 개발의 필요성이 절실함을 파악하였다. 현재 주요 선진국에서 사용하고 있는 대부분의 우주방사선 계산 프로그램들이 태양활동 및 우주기상의 변화를 제대로 반영하지 못하고 있다는 사실도 파악하였다. 본 연구에서는 현재 일반적으로 널리 사용되고 있는 우주방사선 계산 프로그램들의 장단점을 비교 분석하였다. 최종적으로 현재의 우주방사선 계산 모델들이 반영하지 못한 실시간 우주기상 효과를 반영하고, 보다 정밀한 우주방사선 예보 모델을 개발하고자 하는 목적으로 다음의 4가지 방안을 최종 제시하였다. (1) 우주방사선 예보 모델의 기반이 될 지상 방사선량 계산 프로그램의 후보 선정, (2) 항공기 고도에서 적용 가능한 정밀한 대기 모델 개선 및 결정, (3) 지상 방사선량 계산 프로그램과 항공기 고도에서의 대기 모델과 결합, (4) 최종적으로 결합된 우주방사선 모델에 우주기상 예보 정보 반영

### ABSTRACT

In this study, we summarized the results of “Pre-study for the development of Polar route space radiation forecast model”, funded by National Meteorological Satellite Center, Korea Meteorological Administration. We investigated the aviation space weather-related literature and the airline companies’s operation manual associated with the space weather. We also identify the strengths and weaknesses of many pre-existing space radiation calculation programs, and find the potential to be improved. Until now, we don’t have our own space radiation calculation program, so we need more improved space radiation calculation program which will be developed by ourselves. Currently most space radiation calculation programs cannot reflect temporary variations in the solar activities and the space weather. Here we analyzed the strengths and weaknesses of those programs, which are widely used in typical space radiation calculations. Finally to reflect the real-time space weather effects in the forecast model, we need to develop more precise forecast model. For that purpose, we suggest the following four steps: (1) at first, we have to choose the ground-based radiation dose calculation program, (2) we have to select a proper atmospheric model in aircraft altitude, (3) we combine the selected ground cosmic radiation dose calculation program and the selected atmospheric model, and finally (4) we have to reflect the real time space weather information and space weather forecast into the newly combined model.

**Key Words** : space radiation, polar route, space weather

## 1. 서 론

본 연구는 2012년에 진행된 기상청 국가기상위성센터의

우주기상 예보 시스템 개발을 위한 극항로 우주방사선 예보 모델 개발을 위한 사전 연구의 결과이다. 본 사전 연구에서는 우주기상이 항공에 미치는 영향을 항공기 통신과 항행,

※ 본 논문은 기상청 국가기상위성센터의 우주기상 예보 시스템 개발을 위한 “극항로 우주방사선 예보 모델 개발을 위한 사전 연구”의 지원으로 수행되었음.

\*한국천문연구원 태양우주환경연구그룹 (jahwang@kasi.re.kr), \*\*국가기상위성센터

접수일자 : 2013년 1월 28일, 수정완료일자 : 2013년 2월 18일, 최종게재확정일자 : 2013년 2월 25일

항공기 운항에 대해서 분야별로 나누어서 정밀하게 분석하였다. 또한 항공기 고도에서 우주방사선 연구에 대한 국내외 동향을 파악하였다. 국내에서는 최초로 민간 항공기에서 우주방사선을 실측하여 얻은 실제방사선량, 모델을 통한 계산 값과의 편차가 그다지 크지 않게 측정된 예가 있다. (Hwang et al. 2010) 이와 유사한 선행 연구로서 CARI-6를 이용한 국제선 노선별 선량을 평가하여 비행고도 우주선 방사선량이 고도가 증가함에 따라, 적도지방에서 극지방으로 이동할수록, 그리고 태양활동이 약할수록 선량이 증가하는 특성을 확인한 예가 있다. (Hong et al. 2004)

본 연구에서는 현재 국제적으로 널리 사용되고 있는 대표적인 우주방사선 계산 프로그램인 CARI-6M을 사용하여 2008년 한 해 동안의 국내 민간 항공사들의 운항 승무원과 객실 승무원 전체에 대한 우주 방사선 피폭량을 계산하였다. CARI-6M은 미연방항공청(Federal Aviation Administration; FAA)이 제공하는 우주방사선 계산 프로그램이다. 우주방사선 노출량을 계산하기 위해서 각 나라별로 자체 개발한 계산 프로그램들을 운영하고 있는데, 같은 항공 노선이라 할지라도 국가별 우주방사선 프로그램에 따라서 연간 평균 우주방사선 피폭량이 크게는 1.7배까지 차이가 나는 것을 확인하였다. 임의로 선택한 운항 승무원과 객실 승무원 5명씩에 대해서 실제 1년간 운항 자료를 바탕으로 비교해 본 결과 태양활동 극소기 때 극대기 때보다 평균 1.5배 정도 더 방사선에 피폭되는 것을 확인하였다. 이처럼 우주방사선 피폭선량이 계산 프로그램에 따라서 매우 달라진다는 것을 알 수 있다. 또한 가지 중요한 사실은 이들 프로그램 대부분이 일시적으로 변화하는 태양활동 및 우주기상의 영향을 제대로 반영하지 못하고 있다는 것이다. 본 사전 연구에서는 우주방사선량 계산 프로그램이 시시각각 변화하는 우주기상 정보를 반영할 수 있도록 개선하는 것을 목적으로 극향로 우주방사선 예보 모델 개발의 방안을 최종적으로 제시하였다.

## 2. 우주기상이 항공에 미치는 영향

### 2.1 우주기상이 항공기 통신(Communication)에 미치는 영향

항공기 통신은 우리가 안전하고 효율적인 비행을 하기 위한 필수적인 요소이다. 항공기 통신에는 단파(HF) 통신과 초단파(VHF) 통신, 위성 통신(SATCOM)이 주로 사용된다. 많은 통신 시스템들은 전파신호를 먼 거리까지 반사하기 위해 전리층을 이용한다. 하지만 전리층 폭풍이 발생하면, HF 나 VHF 통신은 영향을 받을 수 있다. 일부 전파 파장들은 흡수되고 일부는 반사되어 신호가 변하고 진행 경로를 예측하기 어렵게 된다. 태양 플레어로 인해 방출되는 X선, 원자외선 복사, 고속양성자, 고속 플라즈마 흐름 등이 전리층 폭풍을 발생시킬 수 있다.

HF 통신은 전리층의 반사를 이용하는 원거리 통신수단으로 국제통신, 선박통신, 항공기 통신 및 국제방송에 널리 쓰인다. HF 통신은 위도 82° 이상 되는 지역에서는 필수적인 통신 수단이다. HF 통신은 태양 플레어 발생 시 전리층의 전자밀도가 급격히 증가하여 전파가 흡수되고 fading, noise, blackout을 일으키게 된다. 통신 장애 현상은 중저위도 지역에서는 보통 수십 분~수 시간 정도 지속되지만 극지방이나 고위도 지역에서는 수 일 까지 지속되는 경우도 있다. SATCOM은 전파가 대기권의 대부분을 통과할 만큼 충분히 높은 주파수를 이용하는 위성통신이다. 하지만 전리층이 turbulent 하거나 불균일할 때 scintillation 현상이 발생하여 신호의 진폭과 위상을 변화시켜 통신에 장애를 일으키게 된다.

### 2.2 우주기상이 항공기 항행(GPS, Navigation)에 미치는 영향

우리 실생활에서 널리 이용되고 있는 GPS는 1970년대 초 미국에서 군사 목적의 시스템으로 시작하였으며 현재는 전 세계 곳곳에서 운영 중이다. 1982년에는 구소련이 GLONASS 위성 발사에 성공하였으며 중국과 유럽은 1993년과 2005년에 각각 글로벌 항법위성 COMPASS와 GALILEO를, 일본은 지역독자항법시스템인 QZSS를 발사하였다. 이러한 각국의 위성측위시스템을 통칭하여 GNSS(Global Navigation Satellite System)라고 한다. 또한 GPS의 정확도를 높이기 위해 GNSS 위성, 위성신호, 또는 사용자들에 의해 수신된 신호에 영향을 줄 수 있는 다른 환경적인 인자를 측정해 보정하는 SBAS(Satellite Based Augmentation System)를 개발하여 현재 위치 오차를 1m 이내로 할 수 있도록 하고 있다. 항공기 분야에서는 지상에서 GPS에 대한 위치보정 정보와 무결성 정보를 제공하여 공항 주변 항공기의 정밀 이착륙을 돕는 GBAS(Ground Based Augmentation System)를 운영하고 있다.

GPS는 인공위성과의 통신을 이용하는 시스템이기 때문에 태양 활동에 많은 영향을 받게 된다. 태양활동은 크게 세 가지로 GPS 시스템에 영향을 미치게 되는데, 첫 번째는 pointing error, 두 번째는 loss-of-lock, 세 번째는 solar radio에 의한 noise 이다. pointing error는 TEC(Total Electron Contents)의 증가 또는 감소함에 따라 신호의 굴절이나 지연이 발생하여 실제 거리보다 수 십 미터까지 오차가 생기는 것으로 전리층 폭풍기간에 자주 발생한다. loss-of-lock은 강력한 scintillation 발생 시 나타나게 되는데, 신호의 지속적인 추적을 불가능하게 만든다. 태양에서 방출되는 전파에 의해서도 GPS는 많은 영향을 받게 된다. 태양 활동 시 방출되는 전파가 GPS 위성으로부터 수신되는 전파보다 상대적으로 강할 경우 지상의 수신기는 GPS 신호 추적이 불가하거나 잘못된 정보를 전달하게 된다.

### 2.3 우주방사선이 항공기 운항에 미치는 영향

지난 몇 년 동안 러시아와 중국을 지나는 북미와 아시아 간의 북극 항로가 상업적 교통로로 이용되었으며 2005년 이후 급격히 증가하였다. 우리나라도 대한항공이 2006년부터 북극항로를 이용하고 있다. 북극 항로는 비행시간과 비용을 절감시켜주는 유용한 비행경로이다. 하지만 극지방으로 갈수록 우주방사선 노출 위험성이 커진다. 북극항로를 이용하는 항공기는 비행 중 흑점 폭발이 있을 경우 일시적으로 엄청난 우주방사선에 피폭될 수 있으며 비행기에 탑승한 조종사, 승무원, 승객까지 방사선 노출의 위험에 처할 수 있다. 비행 중 가장 강한 X등급의 태양 흑점 폭발 시에는 30분에서 1시간 만에 평소의 수만 배 이상의 우주 방사선이 지구 대기권으로 들어올 수 있다. 1년 허용치를 순식간에 넘어서 우주방사선에 피폭당할 수 있다는 것이다. 이 때문에 1990년대 이후부터 전 세계에서 우주 방사선에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있으며 주요 선진국들은 각국의 실정에 맞게 방사선 관련 규정과 가이드라인을 제정하여 시행중에 있다.

## 3. 우주방사선 피폭선량 계산

### 3.1 CARI-6M을 이용한 연평균 우주방사선 피폭선량 (2008년 기준)

국내 승무원을 대상으로 2008년 한 해 동안 노출된 우주방사선 피폭선량을 CARI-6M을 사용하여 계산하여 그림1에 나타내었다. 운항 승무원과 객실 승무원은 근무 조건(탑승 시간 및 노선)이 서로 다르기 때문에 이들을 따로 분류하여 분석하였다. 이들 승무원에 대한 평균 방사선 노출량을 계산하여 보면 객실승무원의 경우 2.6 mSv/yr이고 운항승무원의 경우 2.17 mSv/yr로 객실 승무원이 더 높게 나타났다. 이것은 일반적으로 객실 승무원의 비행시간이 운항승무원에 비해 더 길기 때문인 것으로 해석된다. 운항승무원의 경우를 보면 연간 방사선 노출량이 3~4 mSv에 해당하는 구간에 많은 승무원이 분포하고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 국제선에 탑승하는 승무원과 국내선 및 가까운 국제노선을 운항하는 승무원이 구별되어 있기 때문인데, 결국 승무원의 방사선 노출량은 방사선 노출량이 많은 장거리 국제선 항공기 탑승 횟수에 따라 결정된다고 할 수 있다. 그림 1의 운항승무원의 방사선량 경우에 두 개의 peaks 가 나타내는 것은 연간 1mSv 이하의 방사선량에 노출되는 국내선 및 가까운 국제선 승무원과 연간 3~4mSv의 방사선량에 노출되는 장거리 국제선 승무원, 이렇게 두 개의 그룹을 나타내고 있다. 일반인의 연간 방사선 허용한도가 1 mSv 라는 것을 생각해 보면 항공기 승무원의 방사선 노출량은 결코 적은 양이 아님을 알 수 있다. 더욱이 핵발전소에서 일하는 근로자의 연평균 피폭량이 4.73 mSv 이고 방사선의료에 종사하는 근무자의 연평

균 피폭량이 1.44 mSv인 것을 감안해 보았을 때, 장거리 국제노선에 주로 탑승하는 항공기 승무원들의 경우에는 체계적인 방사선 관리가 절실히 요구된다고 할 수 있다.

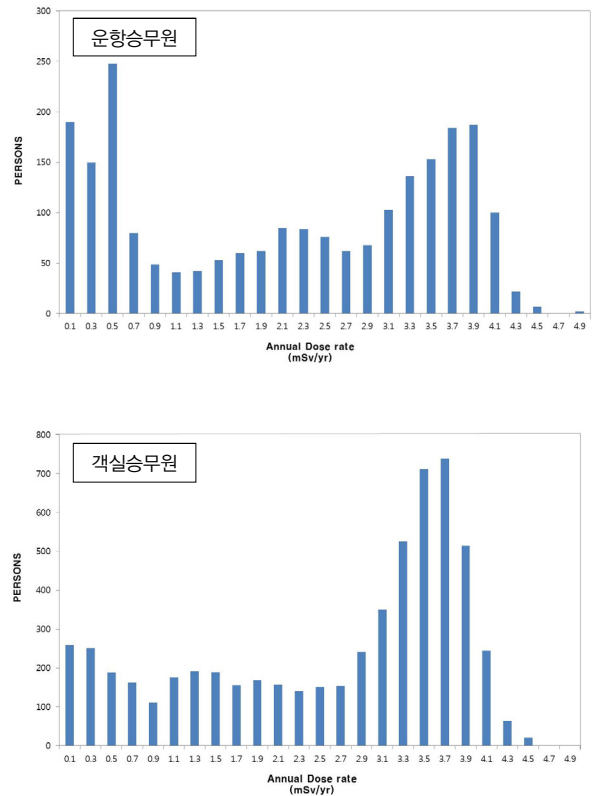


그림 1. 국내 A 항공사의 운항승무원(위)과 객실승무원(아래)의 연간 방사선 피폭량 계산 (CARI-6M 사용, 2008년 기준)

### 3.2 다양한 우주방사선 프로그램을 통한 노선별 선량 산출

국제적으로 사용되고 있는 다양한 우주방사선 계산 프로그램들의 신뢰도를 검증해 보기 위해서, 같은 항공 노선에 대해서 다양한 프로그램들의 우주방사선 피폭선량 산출 값을 비교해 보았다. 대표적인 우주방사선 계산 프로그램인 JISCARD, CARI-6, CARI-6M, EPCARD, PCAIRE, SIVERT를 이용해서 인천공항에서 출발하는 장거리 국제노선 6개에 대한 우주방사선량을 비교해 본 것이 표 1이다. 태양주기 23 (1998년-2008년) 동안 월평균 HCP 값이 가장 큰 날인 2003년 11월과 가장 작은 2008년 12월에 대하여 각각 계산을 수행하였다. HCP는 태양활동의 세기를 나타내는 지표로써 널리 쓰인다. 이 값은 지상에서 검출되는 중성자의 수로부터 유도한 것이다. 월별 평균 HCP 값은 미국 FAA 사이트에서 제공되고 있다. 전반적으로 HCP 값이 큰 때인 태양활동 극대기에 노선별 피폭선량(route dose) 값이 작은 경향을 그림 2에서 확인해볼 수 있다. 이는 극대기에 우주방사선을 만드는 고에너지 우주선의 유입이 감소하기 때문인 것

표 1. 한국에서 출항하는 항공노선에 대한 여러 선량 계산 프로그램들의 route dose 계산 결과 (단위 : mSv)

출발 - 도착	비행시간	Route Dose (mSv) :: 1233 (266) MV					
		JISCARD	CARI-6	CARI-6M	EPCARD	PCAIRE	SIVERT
Seoul - NewYork	13:06	4.25E-02 (6.80E-02)	5.38E-02 (8.83E-02)	4.76E-02 (6.43E-02)	7.00E-02 (1.02E-01)	7.20E-02 (1.02E-01)	5.90E-02 (1.10E-01)
Seoul - LosAngeles	15:37	2.93E-02 (4.10E-02)	5.81E-02 (7.72E-02)	4.53E-02 (6.10E-02)	6.80E-02 (8.70E-02)	5.40E-02 (7.60E-02)	6.20E-02 (9.12E-02)
Seoul - London	11:30	2.63E-02 (4.05E-02)	3.48E-02 (5.43E-02)	3.12E-02 (4.97E-02)	4.60E-02 (6.50E-02)	4.30E-02 (6.10E-02)	5.01E-02 (8.99E-02)
Seoul - Bangkok	04:49	7.34E-03 (8.36E-03)	1.19E-02 (1.27E-02)	9.30E-03 (1.12E-02)	9.00E-03 (1.00E-02)	1.20E-02 (1.60E-02)	9.70E-03 (8.40E-03)
Seoul - Sydney	09:05	9.59E-03 (1.12E-02)	1.63E-02 (1.80E-02)	1.37E-02 (1.56E-02)	1.50E-02 (1.60E-02)	1.90E-02 (2.60E-02)	2.06E-02 (1.86E-02)
Seoul - Tokyo	01:45	2.49E-03 (2.91E-03)	3.80E-03 (4.20E-03)	2.90E-03 (3.40E-03)	3.00E-03 (4.00E-03)	4.00E-03 (5.00E-03)	2.70E-03 (2.60E-03)

으로 설명할 수 있다. 또한 비행시간이 길고 상대적으로 고위도인 지역을 비행하는 노선일수록 HCP 값에 상관없이 모든 프로그램 상에서 피폭선량이 많음을 다시 한 번 확인할 수 있었다. 한편 전반적으로 EPCARD나 SIVERT의 계산 결과 값이 다른 프로그램에 비해 큰 것을 볼 수 있다. 이처럼 같은 항공운항 정보와 HCP 정보를 입력하여도 사용한 계산 프로그램에 따라 추정되는 route dose 값이 크게 달라진다. 비행횟수가 적을 때는 이것이 많은 차이를 만들지 않지만, 매일 비행하는 승무원과 같이 비행횟수가 많은 사람에게는 사용한 계산 프로그램에 따라 피폭 위험을 경고하고 관리하는 정도가 달라질 수 있기 때문에 좀 더 정확한 dose 추정 값을 얻을 수 있는 프로그램을 개발할 필요가 있다.

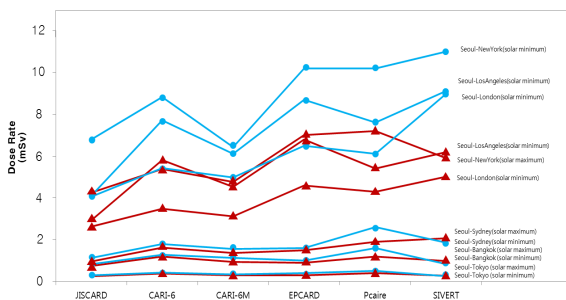


그림 2. 한국에서 출발하는 국제노선들의 우주방사선량 계산

### 3.3 우주방사선 계산 프로그램에 따라 달라지는 연간 방사선량

위에서 살펴본 바와 같이 같은 노선에 대해서도 계산 프로그램에 따라서 우주방사선 노출량이 다르게 얻어질 수 있다. 실제로 국내 항공사의 승무원의 연평균 유효선량을 계산해 보면 이 같은 차이를 더욱 확실하게 알 수 있다. 표 2는 국내 A 항공사의 국제선 운항 승무원과 객실 승무원 각 5명씩을 임의로 추출하여 실제 비행 자료를 근거로 계산한 우주방사선 피폭선량을 정리한 것이다. 이때는 비교를 위하여 CARI-6, SIEVERT, EPCARD, JISCARD, PCAIRE, 4개의

프로그램을 사용하였으며, 각 승무원의 비행 정보는 항공사로부터 직접 제공받은 것이다. 이들 프로그램은 비행 날짜, 공황위치, 비행시간 및 고도정보 등의 노선별 운항 정보를 바탕으로 선량을 계산하여주는 프로그램이다. 전반적으로 극대기일 때보다 극소기일 때의 연간 유효선량이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 태양활동 극소기일 때 운항 승무원 5명의 평균값을 비교해보면, PCAIRE가 상대적으로 가장 큰 연간 유효선량(2.16 mSv/yr)을 주고, JISCARD가 상대적으로 가장 적은 연간유효선량(1.47 mSv/yr)을 제시해 주고 있다. 객실승무원의 극소기 때의 평균값을 살펴보면, EPCARD가 가장 큰 연간유효선량(4.75 mSv/yr)을, JISCARD가 가장 적은 연간유효선량(3.32 mSv/yr)을 제공하고 있다.

이와 유사한 계산을 국내 B 항공사로부터 비행 정보를 받아서 계산해 본 결과는 표 3과 같다. 국내 A 항공사의 계산 결과와 유사하게 극소기 때가 극대기 때보다 더 많은 연간유효방사선량을 보여주고 있다. 평균값을 비교해 보면, 운항승무원과 객실승무원 둘 다에서 PCAIRE가 가장 크게 나타났고, JISCARD가 가장 적은 값을 나타내고 있다. 극소기일 때 운항승무원의 연간유효방사선량의 최댓값과 최솟값의 차이는 약 1.73배였고, 객실승무원의 경우에는 1.67배로 나타났다. 이처럼 우주방사선량 계산 값이 프로그램별로 크게 다르게 나타난다는 것은 보다 정확한 우주방사선량 계산 프로그램의 필요성이 더욱 절실히 대두되는 부분이다. 표 2, 3의 국내 A 항공사와 B 항공사의 연평균 우주방사선 피폭선량의 평균값을 정리한 것이 그림 3이다. 그림 3에서 보면 객실승무원이 운항승무원보다 방사선에 더욱 많이 노출되고 있고, 태양활동 극소기일때에 극대기보다 더욱 많은 방사선에 피폭되고 있음을 알 수 있다. 연간 방사선량이 가장 높게 계산된 경우에는 국내 B 항공사의 객실승무원의 경우이고 5 mSv를 넘기고 있다. 일본의 승무원 연간방사선 허용한도가 5 mSv, 유럽의 경우 6 mSv 인 것은 감안한다면, 우리나라 승무원의 방사선 피폭선량은 결코 간과할 수 없는 양임에 분명하다.

표 2. 국내 A 항공사의 승무원의 연평균 유효선량 (mSv/yr)

Aircrew		Average annual effective dose (mSv) 1233 MV(극대기) / 266 MV(극소기)				
		JISCARD	CARI-6	EPCARD	PCAIRE	
운항승무원 (pilot)	P1	1.52E-01	2.48E-01	2.08E-01	2.43E-01	
		1.74E-01	2.71E-01	2.29E-01	3.37E-01	
	P2	8.58E-01	1.39E+00	1.26E+00	1.51E+00	
		1.14E+00	1.59E+00	1.45E+00	2.05E+00	
	P3	4.15E-01	6.75E-01	5.71E-01	6.64E-01	
		4.77E-01	7.37E-01	6.20E-01	9.26E-01	
	P4	1.79E+00	2.45E+00	2.94E+00	2.72E+00	
		2.65E+00	3.56E+00	4.01E+00	3.88E+00	
	P5	1.98E+00	2.83E+00	3.16E+00	2.55E+00	
		2.93E+00	3.86E+00	4.14E+00	3.60E+00	
	Ave	1.04E+00	1.52E+00	1.63E+00	1.54E+00	
		1.47E+00	2.00E+00	2.09E+00	2.16E+00	
	객실승무원 (flight attendants)	F1	2.59E+00	3.71E+00	4.14E+00	3.93E+00
			3.70E+00	5.15E+00	5.49E+00	5.54E+00
F2		2.92E+00	4.02E+00	4.67E+00	1.13E+00	
		4.07E+00	5.35E+00	5.98E+00	1.61E+00	
F3		2.13E+00	3.07E+00	3.34E+00	3.40E+00	
		3.17E+00	4.12E+00	4.34E+00	4.78E+00	
F4		2.12E+00	3.07E+00	3.25E+00	3.74E+00	
		3.08E+00	4.12E+00	4.20E+00	5.26E+00	
F5		1.85E+00	2.81E+00	2.88E+00	2.75E+00	
		2.56E+00	3.76E+00	3.72E+00	3.82E+00	
Ave		2.32E+00	3.34E+00	3.66E+00	2.99E+00	
		3.32E+00	4.50E+00	4.75E+00	4.20E+00	

표 3. 국내 B항공사의 승무원 연평균 유효선량 (mSv/yr)

Aircrew		Average annual effective dose (mSv) 1233 MV / 266 MV					
		JISCARD	CARI-6	EPCARD	PCAIRE	Sivert	
운항승무원 (pilot)	P1	3.36E-01	5.62E-01	4.74E-01	6.56E-01	5.14E-01	
		4.11E-01	6.47E-01	5.30E-01	8.87E-01	5.48E-01	
	P2	2.26E-01	3.77E-01	3.20E-01	3.93E-01	3.54E-01	
		2.66E-01	4.15E-01	3.41E-01	5.29E-01	4.25E-01	
	P3	4.33E-01	6.62E-01	7.04E-01	7.58E-01	7.12E-01	
		6.11E-01	9.21E-01	9.19E-01	1.05E+00	1.04E+00	
	P4	7.25E-01	9.94E-01	1.18E+00	1.21E+00	1.34E+00	
		8.17E-01	1.10E+00	1.28E+00	1.35E+00	1.65E+00	
	P5	1.08E+00	1.47E+00	1.73E+00	1.78E+00	1.82E+00	
		9.44E-01	1.27E+00	1.47E+00	1.55E+00	1.62E+00	
	Ave	5.59E-01	8.12E-01	8.81E-01	9.59E-01	9.47E-01	
		6.10E-01	8.72E-01	9.08E-01	1.07E+00	1.06E+00	
	객실승무원 (flight attendants)	F1	2.43E+00	3.66E+00	3.80E+00	4.11E+00	4.01E+00
			2.85E+00	4.26E+00	4.21E+00	5.02E+00	4.65E+00
F2		3.32E+00	4.72E+00	5.26E+00	5.51E+00	5.59E+00	
		3.62E+00	5.11E+00	5.51E+00	6.14E+00	6.14E+00	
F3		2.96E+00	4.23E+00	4.63E+00	4.91E+00	4.99E+00	
		3.28E+00	4.58E+00	4.90E+00	5.63E+00	5.56E+00	
F4		2.33E+00	3.47E+00	3.64E+00	3.98E+00	3.86E+00	
		2.82E+00	4.09E+00	4.15E+00	5.01E+00	4.73E+00	
F5		2.29E+00	3.37E+00	3.57E+00	3.91E+00	3.73E+00	
		2.81E+00	4.03E+00	4.13E+00	4.93E+00	4.67E+00	
Ave		2.66E+00	3.89E+00	4.18E+00	4.48E+00	4.44E+00	
		3.08E+00	4.41E+00	4.58E+00	5.35E+00	5.15E+00	

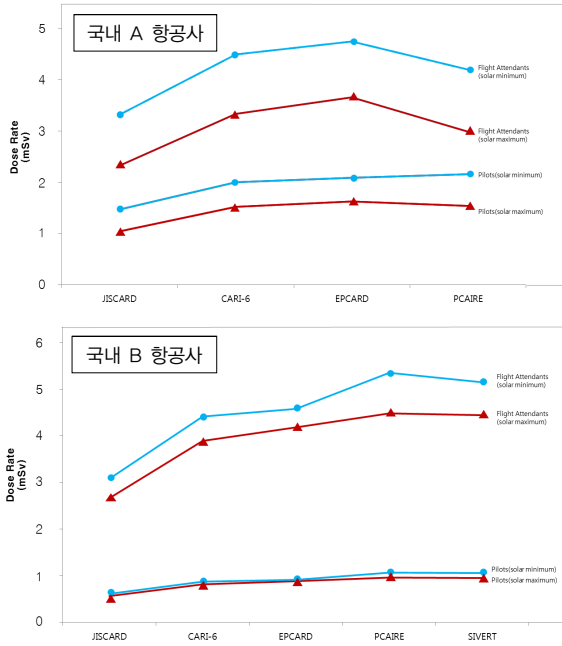


그림 3. 국내 A 항공사(위)와 국내 B 항공사의 객실승무원과 운항승무원의 연간 방사선량

## 4. 극항로 우주방사선 예보 모델 개발 방안 제시

### 4.1 지상에서 방사선량을 계산하는 프로그램

지구 대기에서의 우주복사환경은 우주선(Cosmic Ray) 입자와 대기와의 상호작용에 의해서 파생된 중성자, 양성자, 광자, 전자, 양전자, 파이온, 뮤온, 무거운 이온들로 구성된 매우 복잡한 구조를 보이고 있으며 이러한 입자들의 에너지 대역은 최소 수십 keV에서 최대 수백 GeV에 이른다. 이러한 우주선 입자로부터 파생되는 중성자의 연속적인 검출 및 항공기 탑승객에게 누적되는 피폭량을 측정하기 위해 대기에서 우주선로부터 파생되는 입자의 이동에 대한 추적이 필요하다. 이러한 목적으로 GEANT4, FLUKA, MCNPX 와 같은 3가지 입자 이동 추적 코드가 널리 사용된다. 이 코드들은 모두 몬테카를로 기술에 기반을 둔 물질과 입자와의 상호작용을 확인하기 위한 것으로 과거에는 FLUKA 코드가 대기와의 충돌에 의해 파생되는 입자들의 이동을 추적하기 위해서 많이 사용되었지만 최근에는 GEANT4 코드가 해수면에서부터 대기 80km 상공까지의 다른 영역들에서의 파생되는 입자의 spectral particle fluence를 계산하기 위해서 사용되고 있다. 그림 4는 일반적인 비행고도에서 GEANT4 시뮬레이션에 의해 계산된 대기에서의 중성자 스펙트럼을 보여준다. 그림 4에서 살펴보면 항공기 고도의 중성자의 에너지 대역은 주로 수백 keV~수 MeV 대역에 가장 많이 분포되어 있고 그 외의 에너지 대역에도 고르게 분포되어 있다. 따라서 항공기 고도에서 중성자를 측정하려면 광대역 에너지를

측정할 수 있는 기기가 필요하다는 것을 알 수 있다.

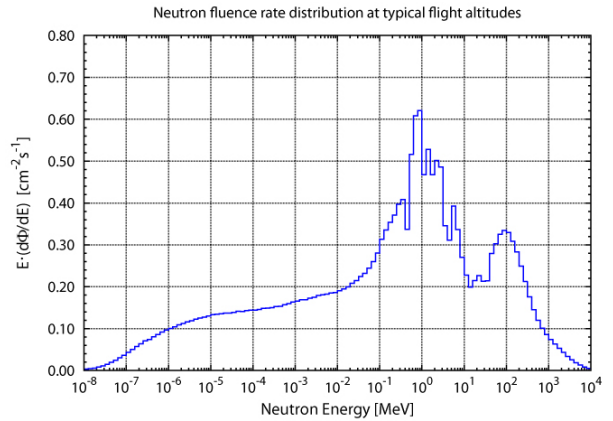


그림 4. 비행고도에서의 중성자 스펙트럼 분포

### 4.2 우주기상에 따라 변화하는 대기 모델

지구 대기는 온도, 구성 성분, 원자와 분자간의 충돌에 의해 다른 영역들로 구분된다. 균질권(homosphere)은 0~100km까지 영역으로 대류권(troposphere, 표면으로부터 8~15km), 성층권(stratosphere, ~10-12km부터 50km), 중간권(mesosphere, ~50km부터 90km), 열권(thermosphere)의 일부로 구성되어 있다. 열권(thermosphere)은 중간권계면(~90km)에서 온도가 최소가 되는 지점부터 수직방향의 변화척도가 평균이동거리(mean free path)와 일치하는 영역인 400km에서 600km까지이다. 하지만 이 또한 태양 및 자기권 활동에 의해 달라진다. 한편 외기권(exosphere)은 열권의 상층부부터 바깥 우주까지의 영역이고 이러한 영역들의 경계면은 급격한 온도변화에 의해서 구분된다(단, 외기권의 시작 부분은 제외). 균질권의 구성물을 혼합하는 바람과 난기류에 의해서 대기는 78.1%의 N<sub>2</sub>, 20.9%의 O<sub>2</sub>, 0.9%의 Ar으로 균일하게 구성되어 있고 열권에서의 온도 분포는 중간권계면에서 최솟값의 온도로부터 급격히 증가하기 시작하고 ~200km 이상에서 완만히 증가하는 경향을 보인다. 현재 가장 흔히 알려진 표준 및 참조 대기 모델은 NRLMSISE-00, CIRA-86, WACCM 등이 있다. 이 중에서 WACCM은 지구 표면부터 열권까지(0~140km)의 서로 다른 대기 영역들의 물리, 화학적 과정 결합을 위해 NCAR(The National Center for Atmospheric Research) 내에 있는 3개부서의 공동연구에 의해 개발된 수치모델이다. WACCM은 HAO(High Altitude Observatory)의 고층대기 모델, ACD(Atmospheric Chemistry Division)의 중간권 모델, CGD(Climate and Global Dynamics)의 대류권 모델이 결합되어 있다. 이는 대류권에서의 물질 이동이 중간권 및 고층 대기에 영향을 미치고 성층권에서의 변화가 대류권에서의 기후 변화에 중요한 역할을 할 수 있음이 알려짐에 따라 모델 간 결합이 요구되었기 때문이다. 따라서 WACCM은 지구 표면부터 열권 사이의 공간에서 일어나는 다양한 물리, 화학적 과정을 대부분

포함하고 있는 현존하는 가장 개선된 대기 모델이라고 할 수 있다.

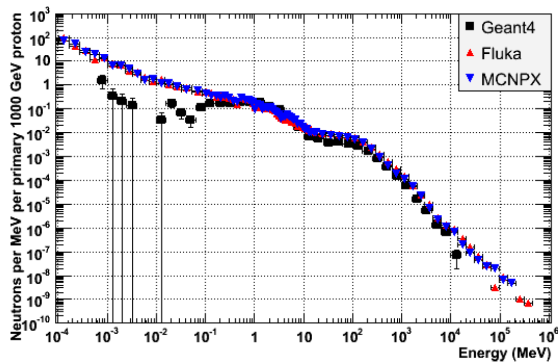


그림 5. GEANT4, FLUKA, MCNPX 3가지 코드로 계산된 해수면에서의 중성자 스펙트럼

#### 4.3 극향로 우주방사선 예보 모델 개발 방안 제시

GEANT4, FLUKA, MCNPX 코드간의 상호 검증을 위해서 똑같은 대기 조건에서 실험을 실시하여 개선 및 보완해야 할 방법을 알아낼 필요가 있다. 그림 5는 그러한 실험을 진행했을 때의 결과로 1TeV의 양성자를 우주에서 대기로 입사시켰을 때 해수면에서의 중성자 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그 결과 FLUKA와 MCNPX, GEANT4 모두 전반적으로는 비슷한 경향을 보인다. 하지만, GEANT4의 경우는 저에너지에서 상대적으로 낮은 플럭스 값을 보이고 있다. 이러한 실험을 통해서 각 코드간의 특성을 파악하고 상호 검증을 진행할 수 있다. 실제로 이렇게 계산된 우주선 입자들의 대기에서의 스펙트럼은 실제 관측 값과 비교를 통해서 신뢰도가 검증되어야 한다. 극향로 우주방사선 예보모델 본 연구에서는 실제로 측정된 값과의 비교 검증을 통해, 최선의 입자 이동 추적 코드를 찾아낼 예정이다.

우주기상이 기상에 미치는 대표적인 영향 중 하나로 볼 수 있는 것이 바로, 태양 및 우주에서 오는 우주방사선이 지표 바로 근처인 항공기 고도에서의 우주방사선을 변화시킨다는 것이다. 태양흑점 폭발이 발생하여 태양에서 고에너지 양성자들이 다량 지구로 유입되면 지구 근처의 대기에서도 우주방사선이 일시적으로 증폭하는 현상이 발생한다. 이렇게 급변하는 우주기상에 따라 변화하는 극향로 우주방사선 예보 모델을 개발하기 위해서 먼저 선행되어야 할 것은 적절한 지상 방사선량 계산 프로그램을 선택해서 그 기반으로 우주 방사선량 계산 프로그램을 개발하는 것이다. 지상에서의 방사선량 계산 프로그램들은 입자들 상호간의 물질 전달 과정을 잘 기술하고 있는 몬테카를로 기법을 따르고 있다. 이러한 물리적인 기작을 구현하고 있는 대표적인 코드가 바로 앞에서 언급한 GEANT4, FLUKA, MCNPX 등이다. 이 코드들의 장단점이 각기 다르기에 이들 중 어떤 프로그램을 최종 선택해서 개발을 할 것인지는 좀 더 심도 깊은 논의가 필요하다. 본 연구에서 주안점으로 생각한 것은 이들 지상 방사

선량 계산 프로그램의 비교와 항공기 고도에 해당하는 10~14km에서의 입자들의 고도에 따른 밀도 분포를 계산해주는 대기 모델과의 접목이다. 이를 위해서 먼저 현재 나와 있는 다양한 대기 모델들의 장단점과 한계점들을 극복해 나가는 방법을 찾아서 최선의 대안을 찾는 것이 중요하다. 본 연구에서 조사 결과, 다양한 대기 모델들 중 NRLMSISE-00, CIRA-86, WACCM의 경우가 우리가 찾는 목적에 부합하는 모델들이다. 이들 대기 모델들이 사후 분석이 아니라, 실시간 우주기상 예보 정보와 결합할 수 있는지 여부도 중요한 변수이다.

극향로 우주방사선 예보 모델 개발을 위해서 먼저 (1) 기반이 될 지상 방사선량 계산 프로그램을 결정하고, (2) 항공기 고도에서 적용 가능한 정밀한 대기 모델을 결정해야 한다. (3) 지상 방사선량 계산 프로그램의 입력 값으로 대기 모델에서 계산한 입자 밀도를 적용한다. 이후에 이 결합 모델에 (4) 우주기상 예보 정보를 반영하게 된다. 이렇게 하면 한반도 상공의 국지적인 영역부터 전 지구적인 영역까지 각 위도, 경도, 고도별로 작은 셀당 우주방사선량을 계산할 수 있게 되고, 전 세계의 우주방사선 지도를 작성할 수 있게 될 것이다. 현재 미국항공우주국에서 이러한 프로그램을 개발하려는 시도를 하고 있으나 아직 실용화되고 있지는 않은 형편이다.

## 5. 결론

본 연구는 2013년에 본격적으로 수행하게 될 기상청 국가 기상위성센터의 “극향로 우주방사선 예보 모델 개발”의 사전연구로써 진행되었다. 본 연구에서 최종적으로 제시하고자 하는 것은 국내에서 독자적으로 수행하게 될 극향로 우주방사선 예보 모델 개발의 구체적인 방안이다. 그 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- 가. 우주방사선 예보 모델의 기반이 될 지상 방사선량 계산 프로그램의 후보 선정
- 나. 항공기 고도에서 적용 가능한 정밀한 대기 모델의 개선 및 결정
- 다. 지상 방사선량 계산 프로그램과 항공기 고도에서의 대기 모델과 결합
- 라. 최종적으로 결합된 우주방사선 모델에 실시간 우주기상 예보 정보 반영

실제로 정밀한 우주기상 예보 정보를 제대로 반영하고 있는 우주방사선 노출량 계산 프로그램이 전 세계적으로 전무한 상황에서 국내에서 제대로 된 우주방사선 노출량을 계산할 수 있는 프로그램을 독자적으로 자체 개발하는 일은, 우주기상 전반에 있어서 매우 고무적이고 중요한 일이라고 할

수 있다. 이를 위해서 여기에서 제시된 개발 방안을 체계적이고 안정적으로 진행해 나가는 일이 시급하고 또 중요하다.

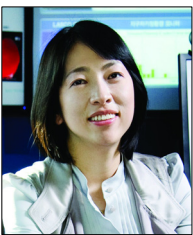
### 참 고 문 헌

[1] Hwang, J. Lee, J. Cho, K. Choi, H. and Rho, S. "Space radiation measurement on the polar route onboard the Korean commercial flights", Journal of Astronomy and Space Science, vol. 27, pp. 43-54, 2010.  
<http://dx.doi.org/10.5140/JASS.2010.27.1.043>

[2] Hong, J. Kwon, J. Jung, J. and Lee, J. "Calculation of Route Doses for Korean-based International Airline Routes using CARI-6 and Estimation of Aircrew Exposure", Journal of Korea Association of Radiation Protection, vol. 29, no.2, pp. 141-150, 2004

### 저자

#### 황 정 아(Junga Hwang)



- 1999년 : KAIST 물리학과 (이학사)
- 2001년 : KAIST 물리학과 (이학석사)
- 2000년 ~ 2003년 : 인공위성연구센터  
위촉연구원
- 2006년 : KAIST 물리학과 (이학박사)
- 2006년 ~ 2006년 : 자연과학연구소 박사  
사후연수연구원

- 2006년 ~ 2007년 : 한국천문연구원 박사후연수연구원
  - 2007년 ~ 현재 : 한국천문연구원 선임연구원
  - 2008년 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 부교수
- <관심분야> : 우주기상, 위성탐재체, 우주방사선

#### 신 대 윤(Daeyun Shin)

#### 정회원



- 2005년 : 아주대학교 우주계측정보공  
학과 (공학석사)
  - 2011년 : University of Tokyo, Japan  
(환경학 박사)
  - 1992년 ~ 현재 : 기상청
- <관심분야> : GNSS Remote Sensing,  
Space Weather