

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2018.26.2.091>

ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

비행고도 상에서의 우주방사선 관측 및 모델 비교

이원형*, 김지영**, 장근일***

Radiation Dose Measurement and Model Comparison at the Flight Level

Wonhyeong Yi*, Jiyoung Kim**, Kun-Il Jang***

ABSTRACT

High-energy charged particles are comprised of galactic cosmic rays and solar energetic particles which are mainly originated from the supernova explosion, active galactic nuclei, and the Sun. These primary charged particles which have sufficient energy to penetrate the Earth's magnetic field collide with the Earth's upper atmosphere, that is N_2 and O_2 , and create secondary particles and ionizing radiation. The ionizing radiation can be measured at commercial flight altitude. So it is recommended to manage radiation dose of aircrew as workers under radiation environment to protect their health and safety. However, it is hard to deploy radiation measurement instrument to commercial aircrafts and monitor radiation dose continuously. So the numerical model calculation is performed to assess radiation exposure at flight altitude. In this paper, we present comparison result between measurement data recorded on several flights and estimation data calculated using model and examine the characteristics of the radiation environment in the atmosphere.

Key Words : Space Radiation(우주방사선), Aircrew(항공기승무원), Galactic Cosmic Rays(은하우주선), Solar Energetic Particles(태양고에너지입자), Effective Dose(유효선량)

1. 서 론

지구로 유입되는 고에너지 하전입자들의 기원은 크게 태양계 밖과 태양계 내부로 나누어진다. 태양계 밖에서는 초신성 폭발현상이나, 활동은하핵 등으로부터 1~20GeV 에너지 범위를 갖는 고에너지 하전입자들이 생성되며, 이들 입자들을 은하우주선(Galactic Cosmic Rays, 이

하 GCR)이라고 부른다(Chronis, 2009). 태양계 내부에서는 플레어와 같은 태양의 급격한 변화로 인해 수 keV ~ 수 GeV 에너지 범위를 갖는 입자들이 생성되며, 이 입자들을 태양 고에너지 입자(Solar Energetic Particles, 이하 SEP)라고 부른다.

GCR과 SEP는 하전입자이므로 지구로 유입할 때 지구자기장과 상호작용을 한다. 이로 인해 지자기위도에 따라 대기로 진입가능한 입자의 최소에너지 세기가 달라지며, 입자가 대기로 진입하기 위해 지구자기장을 통과할 수 있는 최소 에너지 세기를 임계세기(Cutoff rigidity)라 한다. 일반적으로 임계세기는 지자기위도가 낮을수록 크게 나타나며 임계세기보다 약한 에너지

Received : 18. May. 2018. Revised : 15. Jun. 2018.

Accepted : 27. Jun. 2018.

* 기상청 국가기상위성센터 연구원

** 기상청 국가기상위성센터 기상연구관

** 기상청 기상레이더센터 기술서기관

연락처자 E-mail : aceasia@korea.kr

(27803) 충청북도 진천군 광혜원면 구암길 64-18

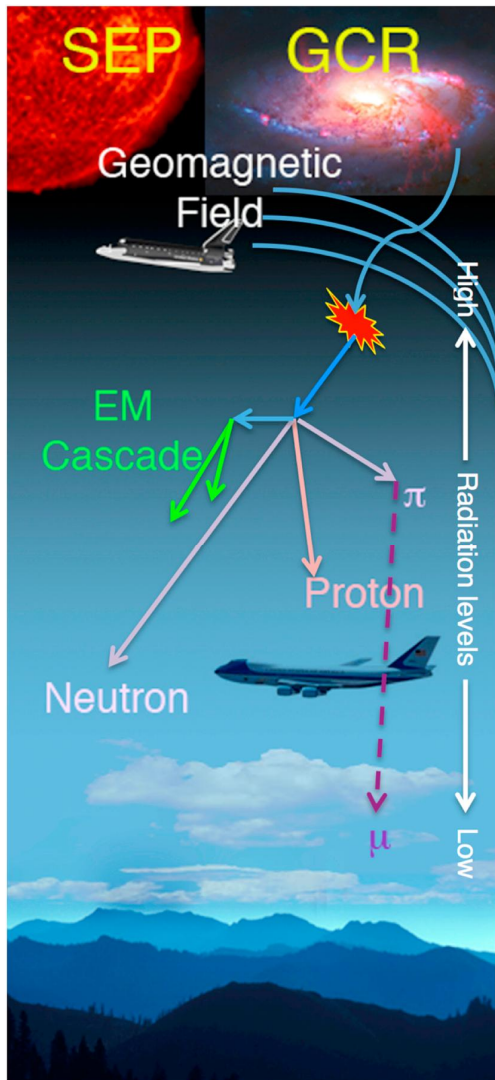


Fig 1. The complex radiation environment at and above commercial aviation altitudes due to GCRs and SEPs(Tobiska, 2016).

를 갖는 하전입자들은 지구자기장을 따라 극지역으로 유입된다. 결과적으로 방사선을 유발하는 대부분의 입자들은 고위도 상공을 통해 대기로 유입된다.

대기로 유입된 입자들은 중성대기와 충돌하여 X-선, γ -선을 포함한 2차입자들을 생성한다(Fig. 1; Tobiska et al., 2016). 이러한 충돌현상은 대기밀도가 높을수록 활발하게 나타나며 이로 인한 방사선 세기가 고도 15km에서 20km 사이에

서 최대로 나타난다(Regener & Pfozter 1935; Carlson, 2014). 일반적인 비행고도인 약 11km 고도에서도 그 영향이 나타날 수 있으며, 특히 비행경로 상에서 나타날 때 항공기에 탑승한 승객 및 승무원들은 이 방사선에 노출될 수 있다. 일반적으로 고위도, 고고도를 비행하는 상업용 여객기 비행고도 상에서의 방사선 피폭률은 2~10 μ Sv/h 으로 알려져 있다.

장시간 비행하는 승무원들을 위해 방사선 피폭량 관리가 필요하다. 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, 이하 ICRP)는 항공승무원들을 방사선환경에 종사하는 직업군으로 분류한 바 있으며, 이러한 직업군은 방사선 피폭량이 연간 50mSv이내 및 5년간 100mSv이내 수준으로 유지될 수 있도록 해야 한다고 권고하고 있다(ICRP, 2007). 우리나라도 생활주변방사선 안전관리법에 따라 '승무원에 대한 우주방사선 안전관리 규정'을 통해 승무원의 선량한도를 ICRP의 권고사항과 동일하게 적용하고 있다. 특히 임신한 여성승무원의 경우 임신사실이 확인된 날부터 출산 시까지 2mSv 이내로 관리되도록 하고 있다. 따라서 본 연구에서 수행하고자 하는 승무원의 방사선 피폭에 대한 실측과 모델 간 비교연구는 항공운항 측면에서도 우주방사선이 승무원의 건강에 미치는 영향과 관련된 연구에 기여할 수 있을 것으로 생각한다.

비행고도에서의 방사선량을 파악하고 관리하기 위해 지금까지 다양한 관측과 모델 개발이 이루어져 왔다. 비행고도 상의 방사선 노출량과 관련 있는 입자들은 지난 반세기동안 지상 기반의 중성자 감시기(Neutron Monitor) 장비로 측정되어왔고, 1970년대 이후부터 GOES위성을 이용한 위성기반의 입자측정이 이루어지고 있다. 뿐만 아니라 고도 약 40km 근처에서는 사운딩 로켓을 이용한 입자측정이 이루어지고 있고, 고도 약 17~40km에서는 풍선을 이용한 입자측정이 이루어지고 있다(Mertens et al., 2016; Tobiska et al., 2016). 그러나 최근까지도 비행고도 상에서의 방사선 측정은 지속적으로 이루어지지 못하였으며, 특히 실시간적이고 전 지구적인 측정은 매우 드물었다. ARMAS(Automated Radiation Measurements for

Aviation Safety) 프로젝트는 실시간으로 비행고도 상의 방사선 측정과 이를 이용한 모델 검증체계를 구축하는 연구를 2013년부터 지속해오고 있다 (Tobiska et al., 2016). 대기 중 방사선량을 추정하는 NAIRAS(Nowcast of Atmospheric Ionizing Radiation System) (Mertens et al., 2013), CARI-7 (Copeland, 2017), AVIDOS(Aviation Dosimetry) (Latocha et al., 2009), WASAVIES(Warning System for Aviation Exposure to Solar Energetic Particles)(Kataoka et al., 2014), KREAM(Korean Radiation Exposure Assessment Model for Aviation Route Dose) (Hwang et al., 2014) 등의 다양한 모델들이 개발되어왔다. 이들 모델들은 비행고도상의 방사선량을 실시간으로 추정하거나 사후평가 하는데 사용된다.

본 연구는 ARMAS프로젝트를 통한 비행고도 상에서의 방사선 실측자료와 모델 추정결과를 몇 가지 사례연구를 중심으로 비교하였다.

II. 자료 및 분석방법

본 연구에서 사용한 자료들은 ARMAS프로젝트를 통해 공개되는 파일로부터 비행경로 상에서의 방사선 측정량과 동일경로 상에서 NAIRAS모델이 추정한 방사선 추정량이다. 또한 CARI-7모델과 KREAM모델을 이용해 동일한 비행경로 상에서의 방사선 추정량을 산출하여 비교하였다.

2.1 자료

2.1.1 AMRAS

백악관의 “우주기상 전략 및 계획”과 “우주기상 이벤트에 대한 국가의 공동준비 시행령”이 요구하는 실시간 측정, 보고, 그리고 예측을 위하여 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, 이하 NASA)의 지원 하에 Space Environment Technology(社)에서 진행한 ARMAS프로젝트는 실시간으로 비행고도 상의 방사선량을 측정하고 처리할 수 있는 시스템을 구축, 시연 및 배치하는 것을 목표로 한다 (Tobiska et al., 2016).

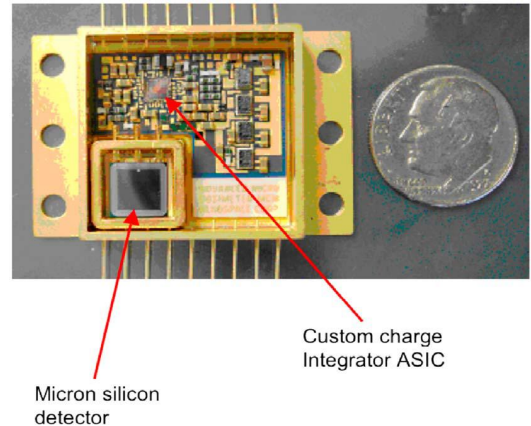


Fig 2. Teledyne micro dosimeter chip used in ARMAS (Tobiska, 2016).

이 프로젝트를 위해 Flight Module (FM) 방사선 관측장비 제작 및 항공기 탑재가 이루어졌다. FM은 항공기에서 실시간 방사선 측정을 하는 부분과 측정자료를 지상으로 전송하는 부분으로 구성된다. 방사선 측정 부분은 Teledyne 마이크로 방사선 측정기, GPS장치, 그리고 통신 박스로 구성되어 있으며 Teledyne 마이크로 방사선 측정기는 무게 20gram, 가로 3.56cm, 세로 2.54cm, 높이 0.10cm의 초소형 방사선 측정기로 측정범위는 14 μ rads부터 40 krads까지이다(Fig 2.). ARMAS프로젝트에서는 FM내 Teledyne 마이크로 방사선 측정기와 GPS장치에서의 자료들을 지상으로 전송하여 방사선 정보로 변환 후 NAIRAS모델과 비교하게 된다.

2.1.2 NAIRAS

NASA의 랭글리 연구센터(Langley Research Center)에서 개발한 NAIRAS 모델은 지표에서 상공 100km까지 대기 중 방사선 노출량에 대한 실시간 추정을 하는 물리기반 모델로 태양권, 자기권 그리고 대기권을 모의하는 개별 모델들을 결합한 모델이다(Mertens et al., 2013). GCR과 SEP를 모두 고려하는 모델이며, 입자수송모델로서 HZETRN과 대기모델로서 NRLMSIS00을 사용한다. 본 연구에서 ARMAS 프로젝트에서 배포하는 파일에서의 NAIRAS모델 추정결과를 사용하였다.

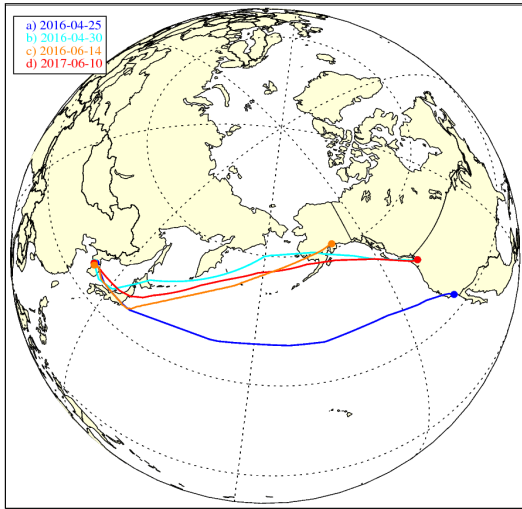


Fig 3. The geographical coordinate of the selected four flight routes.

2.1.3 CARI-7

미연방항공청(Federal Aviation Administration, 이하 FAA)의 민간항공우주의학연구소(Civil Aerospace Medical Institute)에서 개발한 CARI-7 모델은 고도 100km까지의 대기 중 방사선량을 비행 경로 또는 특정위치에 대해 계산하는 모델이다 (Copeland, 2017). GCR을 기본으로 고려하며, 입자 수송모델로서 MCNPX 2.7.0과 대기모델로서 US표준대기를 사용한다. 본 연구는 FAA로부터 제공된 CARI-7모델의 실행파일을 이용하여 ARMAS프로젝트에서 제공하는 비행경로에서의 방사선량을 계산하였다.

2.1.4 KREAM

기상청과 한국천문연구원에서 개발한 KREAM 모델은 고도 80 km까지 대기 중 방사선량을 특정위치에 대해 계산하는 모델이다(Hwang et al., 2014). GCR과 SEP를 모두 고려하는 물리기반 모델이며, 입자수송모델로서 GEANT4와 대기모델로서 NRLMSIS00을 사용한다. 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration)로부터의 태양흑점 수 및 GOES위성에서의 양성자 플럭스를 이용하여 전지구 상에서의 방사선 피폭률을 산출한다. KREAM모델 방사선 추정결과는 ARMAS 프로젝트에서 제공하는 비행경로를 이용하여 계산하였다.

2.2 분석 방법

본 연구는 한국과 미국을 오가는 비행항로 4편을 선정하고 이들 항로에서의 방사선량에 대한 분석을 진행했다(Fig. 3). 항로는 인천-로스앤젤레스, 시애틀-인천, 오산-앵커리지, 그리고 시애틀-인천을 이동하는 경로이며 이들 중 2편은 서로 다른 날짜에 시애틀에서 인천으로 향하는 비행편이다.

선택한 항로의 방사선량 분석은 누적방사선량 및 방사선 피폭률에 대해 진행했다. 누적방사선량은 비행시간 동안 방사선 피폭률의 누적된 결과로서 연간 방사선 선량한도에 대한 비교가 가능하다. 방사선 추정모델인 NAIRAS, CARI-7, KREAM도 ARMAS 프로젝트에서 제공하는 자료와 같이 동일 비행경로에서의 방사선 피폭률을

Table 1. Total effective dose of measurements and the comparison with model results. In the table, deviation in percent was calculated by $(Model - ARMAS) / ARMAS \times 100$.

	Date	Flight Destination	Duration Time (hour)	ARMAS	NAIRAS		CARI-7		KREAM	
				Effective Dose (μ Sv)	Effective Dose (μ Sv)	Deviation (%)	Effective Dose (μ Sv)	Deviation (%)	Effective Dose (μ Sv)	Deviation (%)
a)	April 25, 2016	Incheon - Los Angeles	10.0	60.16	47.16	-21.69	34.89	-42.00	38.59	-35.85
b)	April 30, 2016	Seattle - Incheon	11.1	80.47	92.28	14.67	48.95	-39.16	57.80	-28.17
c)	June 14, 2016	Osan - Anchorage	9.2	43.35	46.69	7.70	28.01	-35.38	34.24	-21.01
d)	June 10, 2017	Seattle - Incheon	10.3	68.23	70.23	2.93	44.79	-34.35	55.62	-18.48

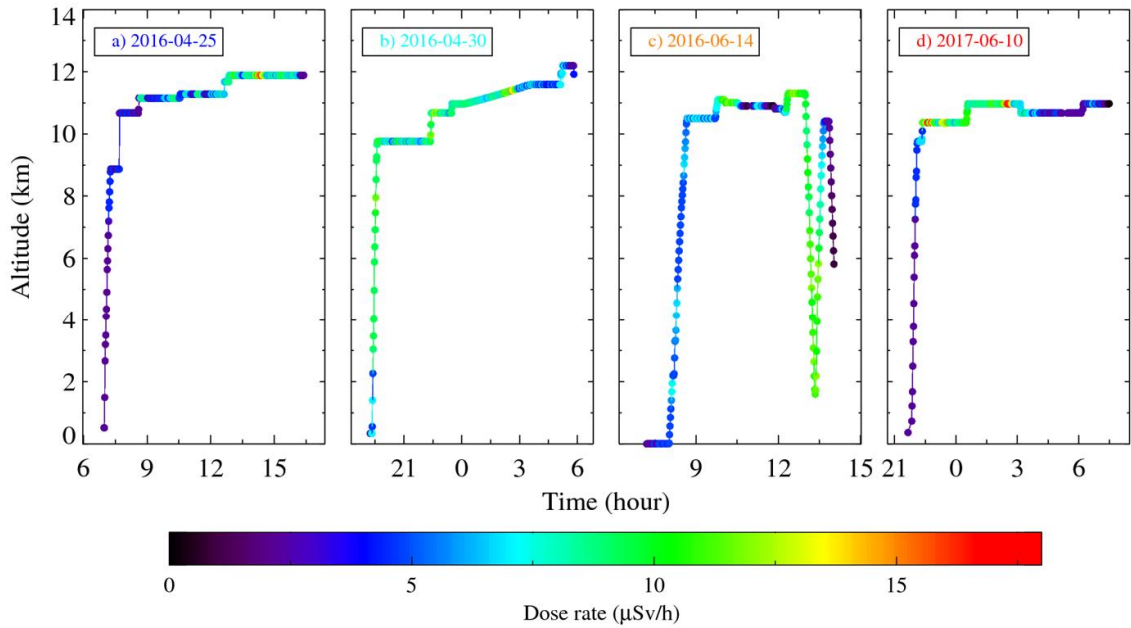


Fig 4. The altitude with dose rate during flight time of the selected four flight routes.

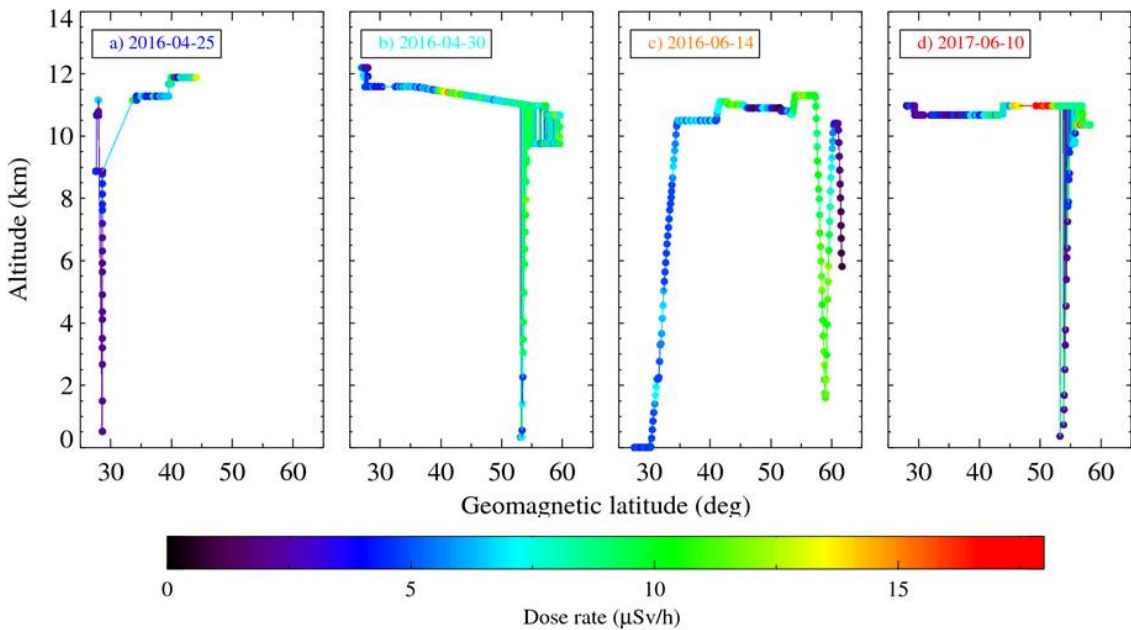


Fig 5. The altitude with dose rate along geomagnetic latitude of the selected four flight route.

계산하기 때문에 누적방사선량을 산출하기 위해 시간당 방사선 피폭량을 분당 방사선 피폭량으로 변환 후 누적방사선량을 산출했다. 실측과 모델로부터의 누적방사선량은 그 차이와 실측

대비 모델의 편차율을 비교하였다 (Table 1). 방사선 피폭률에 대한 분석은 시간, 고도, 지자기 위도에 따른 방사선 피폭률의 변화에 대해 진행하였다.

III. 결 과

3.1 실측 대비 모델의 추정률 비교

Table 1.은 각 비행항로에 대한 출발지점, 도착지점, 누적된 유효방사선량, 각 모델들의 추정치 그리고 실측치로부터 추정치의 편차율을 나타낸다. 4개 항로들의 누적유효방사선량은 항로 a, b, c, d에서 각각 $60.16\mu\text{Sv}$, $80.47\mu\text{Sv}$, $43.35\mu\text{Sv}$, $68.23\mu\text{Sv}$ 이며 항로 b에서 가장 높고, 항로 c에서 가장 낮았다.

이러한 방사선 피폭량은 항공기의 운항시간, 비행고도, 그리고 지자기 위도 상 경로에 따라 달라진다. 특히 비행고도는 Fig. 4.의 항로 a와 항로 d에서 보듯이 고도가 높아질수록 방사선 피폭률이 증가한다. 또한 Fig. 5.에서 보듯이 고도 10~12km 사이에서 지자기위도의 변화에 따라 방사선 피폭률이 변함을 볼 수 있다.

3.2 비행항로 및 방사선 피폭률 비교

NAIRAS모델은 항로 a에서만 과소추정하고, 나머지 항로 b, c, d 에서는 과대추정하는 경향을 보였으며, 실측 대비 편차율은 -21.69~14.67%를 나타냈다. 항로 d의 경우 실측치와 $2\mu\text{Sv}$ 의 차이를 보이며 실측치를 가장 잘 모의했고, 항로 a의 경우 실측치와 $-13\mu\text{Sv}$ 의 차이를 보이며 오차가 가장 크게 나타났다.

CARI-7모델은 모든 항로에서 실측 대비 과소추정하는 경향을 보였으며, 실측 대비 편차율의 범위는 -34.35~42%를 나타냈다. NAIRAS의 경우와 마찬가지로 항로 d의 경우에 실측치와의 차이가 $23.44\mu\text{Sv}$ 로 가장 작았으며, 항로 a의 경우에 실측치와의 차이가 $33.34\mu\text{Sv}$ 로 가장 크게 나타났다. 항로 b의 경우 실측치와의 차이는 $-31.52\mu\text{Sv}$ 로 가장 컸으나 편차율은 항로 a보다 작았다.

KREAM모델은 CARI-7모델과 같이 모든 경우에서 실측 대비 과소추정하는 경향을 보였으며, 실측 대비 편차율의 범위는 -18.48~35.85%를 나타냈다. 앞선 두 모델들과 같이 KREAM모델의 추정결과 중 오차가 가장 작았던 항로는 실측값과의 차이가 $-12.61\mu\text{Sv}$ 인 항로 d이며, 오차가 가장 크게 나타난 항로는 실측값과의 차이가 -

$21.57\mu\text{Sv}$ 인 항로 a이다. CARI-7모델의 추정결과와 마찬가지로 항로 b에서 실측값과의 차이는 $-22.67\mu\text{Sv}$ 로 가장 컸으나 편차율은 항로 a보다 작았다.

NAIRAS, CARI-7, 그리고 KREAM모델들 중 실측값과 가장 차이가 적었던 모델은 NAIRAS 모델이었으며, 그 뒤로 KREAM, CARI-7 순서이다. 세 가지 모델들의 공통적인 현상으로는 항로 d에서 실측값과 가장 잘 일치하는 현상을 보이고 항로 a에서 실측값과의 차이가 가장 큰 것으로 나타난다.

IV. 결 론

본 연구는 비행고도에서 측정된 방사선 피폭량 자료와 대기 중 방사선 피폭량 추정모델을 이용하여 실측과 모델결과를 비교했다. ARMAS 프로젝트로부터 비행고도에서의 방사선 실측자료 및 NAIRAS모델의 결과를 이용하고, CARI-7 및 KREAM모델의 결과는 동일 비행경로를 이용하여 산출했다.

그 결과 항로의 누적방사선량은 비행고도 및 지자기위도에 따라 크게 변하였으며(Fig. 4, 5), 실측치와 근접한 추정치를 보이는 모델의 순서는 NAIRAS, KREAM, CARI-7순서로 나타남을 확인했다(Table 1).

추후 본 연구는 다수의 사례들에 대하여 비행고도, 지자기위도 등 여러 요소들에 따른 방사선 피폭량 변화 연구를 수행할 예정이며, 이러한 연구는 대기 중 방사선 피폭량 연구 및 추정모델 개선에 도움을 줄 것이다. 또한, 항공운항 측면에서도 우주방사선에 의한 승무원의 방사선 피폭량이 그들의 건강에 미치는 영향을 이해하는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 연구는 2018 한국항공운항학회 춘계학술대회에서 발표된 논문을 수정보완한 결과이며, 기상청 국가기상위성센터 R&D 과제(NMSC-2016-3137)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- [1] Chronis, T. G., "Investigating possible links between incoming cosmic ray fluxes and lightning activity over the United States", *Journal of Climate*, 22(21), American Meteorological Society, 2009, 5748-5754
- [2] Tobiska, W. K., et al., "Global real-time dose measurements using the Automated Radiation Measurements for Aerospace Safety (ARMAS) system", *Space Weather*, 14, American Geophysical Union, 2016, 1053-1080.
- [3] Regener, E. & Pfozter, G., "Vertical Intensity of Cosmic Rays by Threefold Coincidences in the Stratosphere", *Nature*, 136(3444), 1935, 718
- [4] Calson, P. & Watson, A. A., "Erich Regener and the ionisation maximum of the atmosphere", *History of Geo- and Space Sciences*, 5(2), Copernicus, 2014, 175
- [5] ICRP, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP, 2007
- [6] Mertens, C. J. et al., "Overview of the Radiation Dosimeter Experiment (RaD-X) flight mission", *Space Weather*, (14), American Geophysical Union, 2016, 921-934
- [7] Mertens, C. J. et al., "NAIRAS aircraft radiatio model development, dose climatology, and initial validation", *Space Weather*, 11, American Geophysical Union, 2013, 603-635
- [8] Copeland, K., "CARI-7A: DEVELOPMENT AND VALIDATION", *Radiation Protection Dosimetry*, 175(4), Oxford University Press, 2017, 419-431
- [9] Latocha, "AVIDOS-A SOFTWARE PACKAGE FOR EUROPEAN ACCREDITED AVIATION DOSIMETRY", *Radiation Protection Dosimetry*, 136(4), Oxford University Press, 2009, 286-290
- [10] Kataoka, "Radiation dose forecast of WASAVIES during ground-level enhancement", *Space Weather*, 12, American Geophysical Union, 2014, 380-386
- [11] Hwang, J. et al., "Korean Radiation Exposure Assessment Model for aviation route dose: KREAM", KSS Fall meeting, Korea Space Science Society, Jeju, 2014