

항공기 우주방사선 예측 모델 (KREAM) 개발



황정아
한국천문연구원 책임연구원

- 한국과학기술원 물리 학사
- 한국과학기술원 플라즈마물리 석사
- 한국과학기술원 우주과학 박사
- 국가우주위원회 위원
- 한국과학창의재단 이사
- 과학기술연합대학원대학교 교수
- 한국우주과학회 이사

2020년 5월, 비행으로 인한 방사선 피폭으로 급성골수성백혈병에 걸렸으며 산업재해를 신청한 대한항공 전직 승무원이 끝내 숨을 거뒀다. 국내에서 우주방사선으로 산업재해를 신청한 첫 번째 경우였다. 그는 2009년 입사 후 주로 북극항로를 오가며 근무했던 것으로 알려졌다. 그 뒤로도 3명이 추가로 우주방사선을 원인으로 산재신청을 했다. 직업병 전문 의사들은 ‘승무원의 방사선 노출과 혈액암 사이에 업무 관련성이 존재한다’라고 말하고 있다. 우리나라는 2006년부터 북극항로 운항을 시작했다. 북극항로란 북극해 상공을 지나가는 비행기의 항로로, 극적기의 경우 미국 동부 노선의 귀국 편에 주로 북극항로를 이용한다. 북극항로를 이용하면 비행시간을 단축할 수 있어서 비행기의 연료인 기름을 줄일 수 있고, 그 무게만큼 승객과 화물을 추가로 실을 수 있어서, 경제적으로는 분명히 이득이다. 이윤을 추구해야 할 항공

사 입장에서는 뚜렷한 문제가 없는 한 사용하지 않을 이유가 없는 것이다. 하지만 실제로는 반드시 고려해야 할 문제가 있다. 바로 ‘우주 날씨’다.

우주 날씨와 우주방사선

그렇다면 북극을 지날 때 왜 반드시 우주 날씨를 고려해야 할까? 왜냐하면, 지구가 하나의 커다란 자석이기 때문이다. 우리 눈에 보이지는 않지만, 자기력선들이 지구 주위 공간을 빼곡하게 채우고 있다. 막대자석 주위의 철가루가 빼곡하게 배열되는 모습을 상상하면 된다. 자기력선은 남극에서 나와서 북극으로 들어가는 방향으로 배열되어 있다. 사실 이 지구자기장은 인류의 생존에 결정적인 역할을 한다. 지구자기장은 태양풍으로부터 지구를 보호해 주는 방패 역할을 하고 있다. 태양풍은 지금 이 순간에도 태양에서 끊임없이 지구를 향해서 불어오고 있다. 지구자

기장이 영향을 미치는 공간을 지구 자기권이라고 한다. 한편 극 지역은 태양풍 입자들이 지구 대기로 들어오는 통로가 되기도 한다. 태양풍 입자들이 지구 대기의 질소, 산소 분자들과 반응해서 내어놓는 빛이 바로 오로라다. 아름다운 오로라는 사실, 태양풍을 만난 지구 자기력선의 역동적인 춤사위였다.

우주 날씨의 원인은 태양이다. 태양에서 나오는 빛은 태양계에 존재하는 모든 생명과 에너지의 근원이지만, 태양풍과 지자기폭풍은 지구에 큰 피해를 줄 수도 있다. 태양에서 나오는 영향을 크게 3개의 물리적인 구분을 통해 태양방사선폭풍(S), 지자기폭풍(G), 전파폭풍(R)으로 설명한다. 이들은 각각 세 가지 종류의 물리적인 인자들인 고에너지 양성자, 자기장, 전파에 기인한다. 태양 표면에서 자기장이 강하고 온도가 주변보다 상대적으로 낮아서 까맣게 보이는 지역이 있는데, 이를 ‘흑점’이라고 한다. 흑점에서 폭발이 일어나면서 태양 플레어나 코로나 물질 방출이라는 거대한 우주 날씨 이벤트를 만들게 된다.

태양방사선폭풍은 태양에서 뿔어져 나오는, 에너지가 높은 양성자들이 일시적으로 증가하는 현상이다. 이 태양방사선폭풍이 우주 방사선 증가의 직접적인 원인이다. 방사선 이벤트가 발생하면, 우주에 상주하는 인공위성과 우주인이 방사선 피폭을 입을 수도 있다. 지자기폭풍은 지상의 자기장 측정 장비에 교란을 일으킨다. 강력한 지자기폭풍이 발생하면 지상에 있는 전력망까지 영향을 받을 수 있다. 실제로 1989년 3

월에 발생한 강력한 지자기폭풍 기간에, 캐나다 퀘벡주 전역의 송전시설이 고장을 일으켜 약 2만 MW의 전력 손실이 일어났다. 이때 600만 명의 주민이 9시간 동안 전력을 공급받지 못했다. 태양전파폭풍은 지구의 전리권을 교란한다. 전리권의 교란은 전파통신에 심각한 피해를 일으킬 수 있다. 1989년 3월 이벤트 동안 방송에 심한 간섭현상이 나타났는가 하면 전 세계적으로 단파 통신이 거의 불가능했다는 기록이 남아 있다. 2022년 2월에 발사한 스타링크 위성 49기 중 40기가 지자기폭풍으로 인해서 발생한 대기 밀도 증가 현상으로 제 궤도에 안착하지 못하고 지구로 다시 떨어지는 사고가 발생하기도 했다.

대한항공 승무원의 방사선 피폭에 의한 백혈병 발생은 실제로 우주 날씨가 우리의 삶과 매우 밀접하게 연결되어 있다는 직접적인 증거가 될 수 있다. 우리는 중요한 일정을 계획하면서 항상 기상청의 날씨 예보를 확인한다. 인류의 삶이 더 문명화되고 인공위성이 보내오는 자료에 의존하게 될수록 우주 날씨 정보는 더 중요해진다. 우리는 우리를 둘러싸고 있는 주변 환경에 대해서 알아야 하고, 우주는 지구의 중요한 환경이다. 지구에 사는 우리는 이미 우주 날씨 정보가 필수인 “우주인의 삶”을 살고 있다.

항공승무원 우주방사선 안전관리 필요성

우리나라에서 국적 항공기가 북극 항공로를 운항하기 시작한 2006년 8월 17일 이후로 항공기

〈표 1〉 세계 여러 나라에서 사용하고 있는 우주방사선 계산 모델

코드명	개발국	방사선 코드	Dose Conversion	GCR model
AVIDOS 1.0	오스트리아	FLUKA	ICRP 60, Pelliccioni	Gaisser et al (1990)
CARI-6/6M	미국	LUIN99/LUIN2000	ICRP 60, Pelliccioni	below 10 GeV (Garcia-Munoz, 1975), above 10 GeV (Peters, 1958) normalized to 10.6 GeV (Gaisser, 1998)
EPCARD	독일	FLUKA	ICRP 60, Pelliccioni	(Badhwar, 2000)
IASON-FREE	오스트리아	PLOTINUS (LUIN)	ICRP 60, Pelliccioni	below 10 GeV (Garcia-Munoz, 1975), above 10 GeV (Peters, 1958) normalized to 10.6 GeV (Gaisser, 1998)
JISCARD EX	일본	PHITS	ICRP 60, Pelliccioni	(Nymmik, 1992)
PANDOCA	독일	PLANETOCOSMICS; GEANT4	ICRP 60, Pelliccioni	(Gleeson, 1968) (Usoskin, 2005)
PCAIRE	캐나다	Experimental data	Not applied	Not applied
PLANETOCO SMICS 2.0	러시아	GEANT4	ICRP 60, Pelliccioni	(Gleeson, 1968; Garcia-Munoz, 1975)
QARM 1.0	영국	MCNPX	ICRP 60, Pelliccioni	(Badhwar, 2000)
SIEVERT 1.0	프랑스	EPCARD version	ICRP 60, Pelliccioni	(Badhwar, 2000)
KREAM	대한민국	GEANT4	ICRP 60, Pelliccioni	(Badhwar, 2010)

승무원의 우주방사선 안전관리의 필요성이 꾸준히 제기되었다. 극지방에서의 우주방사선은 적도 지역에서의 우주방사선 노출량보다 평균 2-5 배 더 높은 것으로 나타났다. 생활주변방사선 안전 관리법의 시행령 안에도 항공 승무원의 우주방사선 안전관리의 필요성을 명시하고 있다. 항공기 승무원 및 승객을 우주방사선으로부터 보호하기 위한 적절한 안전관리 방향을 연구하여 국가 기준을 수립하고 적절한 운영방안을 마련해야 할 필요성이 있다. 이를 위해서 미국 연방항공

공청(FAA, Federal Aviation Administration)은 우주방사선 계산을 위해서 CARI-6, CARI-6M을 자체적으로 개발해서 배포했고, 최근에 CARI-7/7A로 업데이트했다. 미국, 유럽, 일본 등 대부분의 선진국들이 자국의 항공 승무원의 안전 관리를 위해서 자체적으로 개발한 우주방사선 피폭량 계산 프로그램을 갖고 있다(〈표 1〉 참고).

방사선 관련 직업 종사자의 연간 방사선 노출량은 다음과 같이 보고되고 있다. 즉, 항공 승무원의 연간 방사선 노출량은 원자력 산업 종사자

나 방사선 의료 분야 종사자보다도 높다. 국제 방사선방어위원회(ICRP), 세계보건기구(WHO) 등에서도 항공기 승무원을 방사선 작업 종사자로 간주하여 방사선 안전 관리를 할 것을 요구하고 있다.

원자력 산업 관련 작업 종사자: 연 1.87 mSv
방사선 의료 분야 종사자: 연 0.75 mSv
항공기 승무원의 방사선 노출량: 연 3.07 mSv

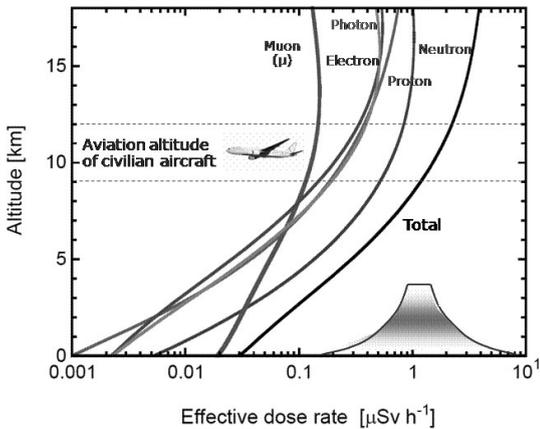
(출처: 2009 Space Weather Workshop 발표 자료)

우리나라도 자국의 승무원 및 승객의 방사선 안전 관리를 위해서 한국형 우주방사선 예측 모델 개발과 우주방사선 실측 실험의 필요성이 대두되었다. 이에 한국천문연구원과 기상청이 함께 우주방사선 예측 모델을 개발하였고, 국토부의 협조를 얻어서 우주방사선 실측실험을 국내 민간 항공기에서 실제로 수행하였다.

항공기 고도에서 항공 승무원 및 승객들이 노출되는 우주방사선 노출량을 정확히 알기 위해서 방사선 실측 실험은 꼭 필요하고, 장기간에 걸친 데이터베이스 구축이 절실하다. 항공기 고도에서 우주방사선은 우주에서 입사하는 방사선원들과 지구 대기와의 상호 작용의 부산물에 의한 것이다. 우주방사선이란 우주에서 지구로 쏟아지는 고에너지 미립자와 감마선 및 이들이 대기의 분자와 충돌하여 2차적으로 발생하는 고에너지 미립자와 감마선의 총칭이다. 우주방사선은 대기권의 공기 입자들과 충돌하기 전의 우주선인 1차 우주선과 이 1차 우주선이 대기권과 충돌 후 발생한 2차 입자로 구성된 2차

우주선에 의한 방사선으로 구분할 수 있다. 1차 우주선은 다시 태양계 밖에서 기인하는 은하 우주방사선(GCR, Galactic Cosmic Radiation)과 태양의 흑점 활동에 기인하는 태양 우주방사선(SCR, Solar Cosmic Radiation)으로 구분된다. 은하 우주방사선(GCR)은 코로나질량 방출(Coronal Mass Ejection), 초신성 폭발(Supernova Explosion), 펄서 가속(Pulsar Acceleration), 은하 핵폭발(Galactic Nuclei Explosion) 등의 결과로 생성되며 95%의 양성자, 3.5%의 알파 입자, 나머지는 탄소와 철 같은 무거운 핵종(heavy ions)으로 구성된다. 은하 우주방사선은 생성 후 고에너지 입자로 가속되어 지구 대기권에 도달하게 된다. 한편 태양 우주방사선(SCR)은 태양의 흑점 활동에 기인하여 발생하는 우주 방사선으로 뮤온, 전자, 양성자, 광자, 중성자 등으로 구성되어 있다. 항공기 고도에서는 중성자가 가장 많이 존재하고 전자, 양성자, 광자의 비율은 비슷하며 뮤온이 상대적으로 적은 것으로 알려져 있다.

비행 고도에서의 우주방사선은 [그림 1]에서 알 수 있듯이 지상에서와의 분포와는 다른 양상을 띠고 있다. 지표면에서 연간 노출되는 우주방사선량은 0.27 mSv로 비교적 낮지만, 이 노출량은 고도가 높아질수록, 위도가 높아질수록 증가하게 된다. 방사선 노출량이 고도의 함수가 되는 이유는 지구 대기가 보호막 역할을 해주기 때문이다. 우주에서 지구로 들어오는 많은 입자들은 지표면에 도달하기 전에 대기에 부딪혀서 대부분

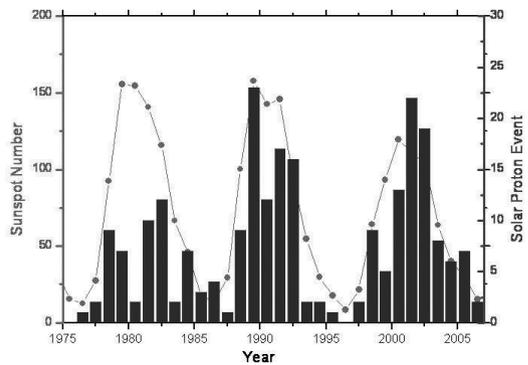


[그림 1] 고도에 따른 우주 방사선원들의 유효선량

분 소실된다. 우주방사선이 위도의 함수가 되는 원인은 지구자기장 때문이다. 지구 자기력선이 양쪽 극지방으로 들어가면서 주변의 입자들을 같이 끌어당기기 때문에 고위도로 갈수록 고에너지 입자들의 유입이 용이해지는 것이다. 따라서 극 지역에 가까울수록 방사선 노출량이 높아지는 것이다. 실제로 북위 70도 지역에서의 노출량은 북위 25도 지역에서의 노출량의 3배 이상인 것으로 보고되었다. 이렇게 평상시의 우주방사선은 고도와 위도의 함수가 된다.

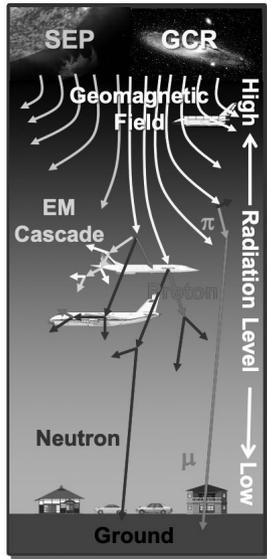
태양활동과 직결되는 우주방사선인 태양 우주방사선(SCR)은 태양에서 나오는 고에너지 입자들의 비정상적인 증가 현상인 태양 고에너지 양성자 이벤트(SPE, Solar Proton Events)에 의해서 직접적으로 영향을 받는다. 태양 고에너지 양성자 이벤트가 앞에서 말했던 우주날씨의 3요소 중 태양방사선폭풍 지수인 S 지수와 연결되어 있다. 태양이 대부분 수소 원자로 구성되어 있기 때문에 태양에서 방출되어 나오는 입자들

의 대부분은 양성자(proton)이다. 이러한 태양 고에너지 양성자 이벤트는 대부분은 태양 플레어(Solar Flare) 또는 코로나 물질 방출(CME)과 동반해서 발생한다. 이러한 태양 플레어 및 태양 고에너지 양성자 이벤트는 주기적으로 증가하거나 감소하는데, 약 11년 주기인 태양 흑점수의 변화와 비슷한 경향을 보인다(그림 2). 즉, 태양 활동극대에 태양방사선폭풍이 일어나는 빈도가 높아진다. 이와는 반대로 은하우주방사선은 태양활동주기와 반대의 경향성을 보인다. 즉, 태양활동극대에 은하우주방사선은 감소한다.

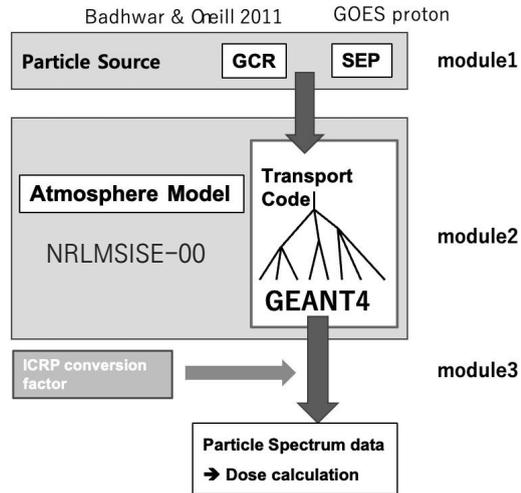


[그림 2] 태양 흑점 개수와 태양 고에너지 양성자 이벤트의 빈도수 비교

우주방사선을 예측하기 위해서는 태양우주방사선과 은하우주방사선을 모두 예측해야 한다. 거의 변하지 않는 은하우주방사선을 예측하는 것은 비교적 간단한 일이지만, 태양우주방사선을 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 태양 플레어나 태양물질방출이 언제 발생할지 예측하는 것은 현재에도 매우 힘든 기술이다. 따라서 이들과 연관된 태양 고에너지 양성자 이벤트



Motion of cosmic-ray in the Atmosphere



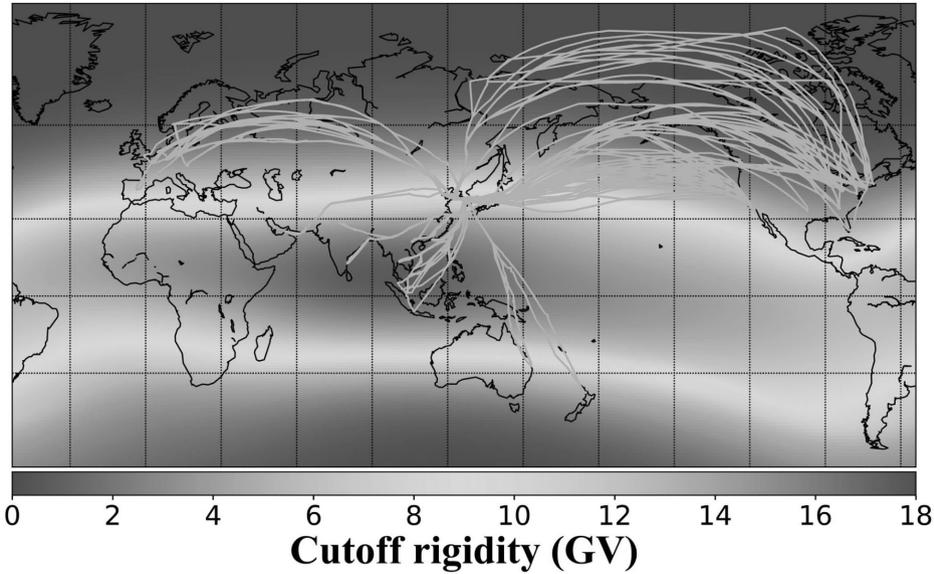
[그림 3] 한국형 우주방사선 예측모델 KREAM의 구성

(SPE)의 발생을 미리 예상하는 일도 매우 어려운 일이다. 하지만, 근래에 와서는 태양 플레어와 태양 코로나 물질 방출 이후에 고에너지 양성자들이 지구에 도달하는 시간을 연구한 논문들이 속속 발표되면서 이러한 우주환경 예보의 가능성이 점차 커지고 있다.

한국형 우주방사선 예측 모델 KREAM 개발

자국의 항공기 승무원과 승객의 우주방사선 안전관리를 위해서 자체 개발한 우주방사선 예측 모델은 Korean Radiation Exposure Assessment Model for aviation route dose(KREAM)이다. 본 연구에서는 입자 수송 코드로 Monte-Carlo 코드인 GEANT4를 사

용했다. GEANT4는 물질을 통과할 때 입자가 겪을 수 있는 거의 모든 물리적 과정을 처리할 수 있도록 설계되었다. 항공기 고도에서 가장 많은 입자는 중성자이며, 입사 입자와 대기 분자 사이의 상호작용의 2차 입자로 생성된 중성자는 GEANT4 코드로 구현되었다. GEANT4를 전 지구적으로 실시간으로 실행하는 것은 시간이 많이 소요되기 때문에 사전 시뮬레이션을 통해서 가능한 모든 양성자 입사 상황을 가정해서 Look-Up-Table을 만들어 두었다. 모델의 실시간 작동을 위해서 KREAM의 내부 구조는 모듈로 구성하였다. 첫째 입사하는 입자들의 에너지 스펙트럼을 구하는 과정, 둘째, 대기를 통과하는 입자들의 이동을 추적하는 과정, 대기의 층별로 생성된 입자들의 에너지 스펙트



[그림 4] 2020-2021 동안 우주방사선 실측실험을 수행한 항공로의 cutoff rigidity

럼을 유효선량으로 환산하는 과정으로 구성된다(그림 3).

입자 선원의 에너지 스펙트럼을 구하는 과정에서 은하우주방사선은 Badhwar & O'Neill 2011 모델을 사용하였고, 양성자는 정지궤도 인공위성에서 측정된 양성자의 에너지 스펙트럼을 실시간으로 자료 동화하여 사용하였다. 대기모델로는 NRLMSISE-00 모델을 사용하였고, 양성자, 전자, 광자, 중성자의 에너지 스펙트럼을 유효선량으로 전환하는 인자는 Pelliccioni et al. (2000)의 값들을 사용하였다.

우주방사선 실측 실험

자체 개발한 우주방사선 예측 모델 KREAM을 검증하기 위해서 항공기 고도에서 실측 실험을 수행하였다. 실측에 사용된 장비는 Liulin-6K LET spectrometer와 TEPC이다. Liulin-6K spectrometer는 항공기 고도에서의 우주방사선 실측을 위해서 간편한 목적으로 가장 많이, 오랫동안 사용된 장비이다. TEPC(Tissue Equivalent Proportional Counter)는 기존에 인공위성의 탑재체 장비로 개발했던 장비를 항공기용으로 개량하기 위한 연구를 수행하였다. TEPC는 방사선이 피부 등가 물질에 전달되는 LET 스펙트럼을 측정하는 장비로, 등가선량을

측정할 수 있는 능동형 방사선 계측기이다. 이 장비는 초기에는 국제우주정거장에서 우주인의 방사선 피폭량을 정밀하게 감시할 목적으로 개발되었었다.

Liulin-6K spectrometer를 활용한 실측시험은 2020-2021 동안 총 210개의 국제선 항공로에서 이루어졌다. TEPC와 Liulin-6K spectrometer를 동시에 탑재한 실험으로는 총 33회의 국제선에서 실측실험을 수행했다. 그림 4는 2020-2021 동안 Liulin-6K 장비로 실측한 국제선 항공편의 항공로 지도와 전 지구 cutoff rigidity map이다. 인천에서 출발하는 대부분의 국제선 항공로에 대해서 실측 실험을 수행하였다. 실측 실험 결과 KREAM 모델값은 Liulin-6K 실측값과 0.97 정도의 상관관계를 보이면서 일치하였고, 평균적으로 Liulin-6K 관측값보다 KREAM 모델값이 10% 정도 낮게 나타났다.

맺는 말

항공기 고도의 우주방사선은 저선량이긴 하지만, 분명히 존재한다. 방사선에 대한 막연한 불안감을 야기하기 보다는 정확한 정보를 공개하는 일이 필요하다. 개인이 장기적으로 피폭을 받게 되었을 때 방사선 피해에 관해서는 지속적인 추적 연구가 필요한 만큼, 승무원의 은퇴 이후에도 방사선 기록을 보관하는 일이 필요하다. 우주 방사선 안전관리를 위해서 정확한 방사선 예측 모델과 장기적인 실측 실험 자료 확보가 필요하다. 이를 위한 장기적인 연구가 필연적이다. 최소한 태양활동 극대기와 극소기를 포함하는 태양활동 주기 11년 이상의 장기 실측 실험 연구가 필요한 이유이다. **KAIF**

[참고문헌]

- 이재기, “우주선 선량 계측 체계 수립과 비행고도 우주선 방사선장 특성 분석 및 노출선량평가”, KINS/HR-673-2 (2005)
- Hwang J, Lee JJ, Cho KS, Choi HS, Rho SR, Cho IH, Space Radiation Measurement on the Polar Route onboard the Korean Commercial Flights, JASS, 27(1), 1-12 (2010).
- Hwang J, Shin DY, Pre-study for Polar Routes Space Radiation Forecast Model Development, Satellite Communications and Space Industry, 8(1), 23-30, 2012
- Lewis, B. J., P. Tume, L. G. I. Bennett, M. Pierre, A. R. Green, T. Cousins, B. E. Hoffarth, T. A. Jones and J. R. Brisson, 1999, Radiation Protection Dosimetry, 86(1), 7-24
- Pelliccioni M, Overview of fluence to effective dose and fluence to ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the FLUKA code”, Rad. Prot. Dos., 88(4), 279-297 (2000).