

## Calculation of Route Doses for Korean-based International Airline Routes using CARI-6 and Estimation of Aircrew Exposure

J. H. Hong · J. W. Kwon · J. H. Jung and J. K. Lee  
Dept. of Nuclear Engineering, Hanyang University

### CARI-6를 이용한 국제선 노선별 선량 및 항공승무원의 피폭선량 평가

홍종호 · 권정완 · 정재호 · 이재기  
한양대학교 원자력공학과

(2004년 2월 6일 접수, 2004년 5월 27일 채택)

**Abstract** - Dose rate characteristics of cosmic radiation field at flight altitudes were analyzed and the route doses to the personnels on board due to cosmic-ray were calculated for Korean-based commercial international airline routes using CARI-6. Annual individual doses to aircrew and the collective effective dose of passengers were estimated by applying the calculated route doses to the flight schedules of aircrew and the air travel statistics of Korea. The result shows that the annual doses to aircrew, around 2.62 mSv, exceed the annual dose limit of public and are comparable to doses of the group of workers occupationally exposed. Therefore it is necessary to consider the frequent flyers as well as the aircrew as the occupational exposure group. The annual collective dose to 11 million Korean passengers in 2001 appeared to be 136 man-Sv. The results should be modified when the dose rates of cosmic radiation at high altitude are revised by taking into account the changes in the radiation weighting factors for protons and neutrons as given in ICRP 92.

**Key words** : cosmic-ray, international flights, CARI-6, aircrew exposure, collective dose

**요약** - 특정 비행노선에서 우주선에 의한 누적선량을 계산하는 프로그램인 CARI-6를 이용하여 비행고도 우주선 방사선장의 선량을 변화 특성을 분석하고, 국적항공사에서 운행하는 전 국제선 노선에 대한 노선별 우주선 피폭선량을 산출하였다. 산출한 노선별 선량을 항공승무원의 비행 스케줄과 국민의 항공여행 통계에 적용하여 우리나라 항공승무원과 일반 여행객의 우주선에 의한 연간 피폭선량과 집단유효선량을 평가하였다. 평가 결과, 항공승무원의 피폭이 일반인의 선량한도인 연간 1 mSv를 초과하여 평균 2.62 mSv로 다른 직업상 피폭을 받는 직군의 선량과 대등한 것으로 평가되었다. 따라서 항공승무원 직군의 우주선 피폭을 일종의 직업상 피폭으로 간주함이 타당함을 확인하였다. 나아가 국민의 해외여행으로 인한 집단선량은 2001년 기준으로 1,100만 명의 출입국자가 총 136 man-Sv를 피폭한 것으로 나타났다. ICRP 92에서 양성자와 중성자의 방사선가중치를 변경한 결과를 반영하여 비행고도에서의 우주선 방사선장 정보가 수정될 경우 위의 평가 결과는 보완되어야 한다.

**중심어** : 우주선, 국제선 비행, CARI-6, 항공승무원 피폭, 집단선

## 서론

국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection; ICRP)의 1990년 권고는 천연 피폭원도 그 피폭의 제어가 합리적으로 가능하다면 방호의 대상으로 포함시켰으며 그 전형적인 사례로 주거 공간 공기 중의 라돈에 의한 피폭과 고공비행으로 인한 우주선 피폭을 들었다 [1]. 이를 전후하여 우주선 선량계측에 대한 연구가 활발히 진행되었으며, 항공승무원에 대한 피폭 관리 대책들이 마련되었다[2,3]. 1996년 5월에 발표된 유럽연합 기본안전지침에서는 연간 1mSv를 초과하여 피폭 할 것으로 예상되는 항공승무원에 대하여 적절한 피폭선량 평가가 이루어져야 하며, 더 나아가 일정 수준 이상을 피폭한 항공승무원에 대하여 추가 피폭을 줄이기 위한 목적으로 비행 스케줄을 조정할 것을 규정하고 있다[4]. 미국 연방항공청(Federal Aviation Administration; FAA)은 항공승무원의 우주선 피폭을 직업상 피폭으로 인정하고, 항공승무원에게 우주선 피폭 및 그에 따른 위해를 알리도록 항공 회사에 권고하고 있다[5]. 또한 캐나다의 Transport Canada는 자발적으로 항공승무원의 연간 피폭선량을 6mSv 이하로 낮출 것을 권고하고 있다[6].

한편 국내에서는 국민 소득의 증가와 함께 해외여행의 빈도가 빠르게 증가해 왔으나 항공여행에 수반되는 우주선 피폭에 대해서는 크게 관심을 두지 않아 왔다. 이에 본 연구에서는 우주선 피폭에 대한 정량적 평가의 필요성을 인식하여 비행간 우주선에 의한 누적선량을 계산하는 프로그램인 CARI-6[7]를 이용하여 국내의 두 국제항공사에서 운행하는 모든 국제선 노선에 대한 노선별 피폭선량을 산출하고, 이를 바탕으로 항공승무원의 연간 피폭선량을 평가하고자 하였다. 나아가 국민의 평균적 방사선 피폭 데이터 확보 차원에서 항공여행으로 인한 국민의 우주선 피폭선량 또한 평가의 대상으로 삼았다.

## 재료 및 방법

### Heliocentric potential

지구 대기권으로 입사하는 우주선은 11년을 주기로 변화하는 태양활동의 영향을 받는다. 태양활동의 세기와 지구에 입사하는 우주선의 세기는 반대의 경향을 보이는데 이는 태양활동에 의해 방출된 하전 입자들이 지구 주변에 자기장을 형

성하여 방어효과를 내기 때문이다[8]. 즉 태양활동의 세기가 강할 때, 우주선은 태양활동에 의해 형성된 자기장에 의해 큰 각도로 편향되기 때문에 대기권으로의 입사량이 줄어들어 태양활동이 약할 때 보다 낮아지게 된다[9].

태양활동의 세기를 나타내는 지표로는 heliocentric potential (HCP)이 사용된다[10]. HCP (MV)는 지상에서 검출되는 중성자의 수와 연관되어 있어서 지상에서 측정된 중성자의 수로부터 유도해 낼 수 있다. 노선별 누적선량 계산 프로그램인 CARI-6\*에는 1958년부터 2002년까지의 월평균 HCP가 입력되어 있으며, 그 분포를 그림 1에 나타내었다. 입력된 월평균 HCP의 변화를 보면 지난 45년간 HCP의 평균은 717 MV, 최고는 1,609 MV (1991/06), 최저는 419 MV (1987/03)이었다. 연간 피폭선량 평가에 적용하기 위해 연평균 HCP 또한 조사하였는데, 연평균 최고 HCP는 1990년의 1,101 MV, 최저는 1965년의 477 MV 그리고 이 연구에서 집단선량 평가 대상인 2001년에는 919 MV였다.

### 선량 평가 프로그램

특정 항로에서의 우주선 선량을 계산하는 프로그램으로는 CARI-6, EPCARD†, PCAIRE‡ 등이 있다. CARI-6는 LUIN 코드[11]에 의한 선량을 데이터를 기본으로 비행노선에 대한 선량을 계산한다[12]. EPCARD (European Program Package

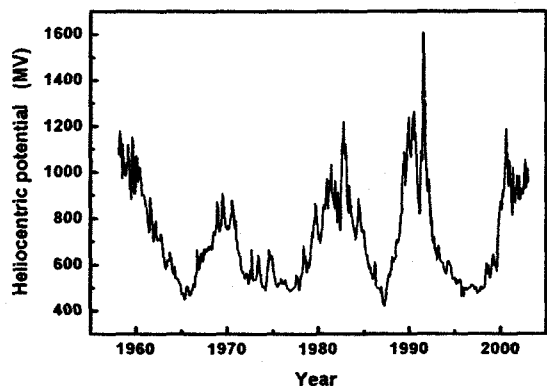


Fig. 1. Plot of the heliocentric potential for the period of time between 1958 and 2002.

\* <http://www.cami.jccbi.gov/AAM-600/radiation /600 radio.html>.

† [http://www.gsf.de/epcard/eng\\_start.php](http://www.gsf.de/epcard/eng_start.php).

‡ <http://www.pcaire.com/home.htm>.

for the Calculation of Aviation Route Doses)는 FLUKA 코드[13]의 계산 결과를 바탕으로 하고 있으며 Schraube 등[14]에 의해 개발되었다. 그리고 PCAIRE (Predictive Code for Aircrew Radiation Exposure)는 조직등가비계수관 및 기타 검출장비를 이용한 비행고도에서의 실측값을 바탕으로 하고 있으며 캐나다의 McCall 등[15]에 의해 개발되었다. 이들 프로그램에는 세계의 주요 국제공항들의 International Civil Aviation Organization (ICAO) 공항 코드가 입력되어 있어 원하는 노선을 선택할 수 있으며, 선택한 노선에 운항정보를 입력함으로써 노선별 탑승자의 유효선량을 계산할 수 있다.

본 연구에 사용할 프로그램을 결정하기 위해 CARI-6, EPCARD 및 PCAIRE를 이용하여 노선별 선량을 산출하고 그 결과를 비교하였다. 그림 2는 태양활동의 세기가 717 MV일 때, 서울-뉴욕, 런던, 방콕, 시드니 4개 노선에 대한 노선별 선량을 나타낸다. 그림 2에 나타난 바와 같이, 세 프로그램에 의한 노선별 선량은 방콕 노선을 제외하고 20%이내에서 일치하는 결과를 보여 계산 결과의 편차가 크지 않음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 가장 널리 사용되는 CARI-6를 노선별 선량 계산 프로그램으로 선정하였다.

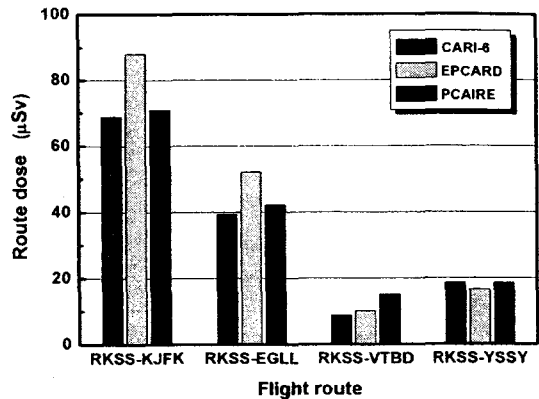


Fig. 2. Comparison of tools for computation of doses due to cosmic-ray during air flight. The ICAO codes denote: RKSS for Seoul, Korea, KJFK for New York, NY, EGLL for London, UK, VTBD for Bangkok, Thailand and YSSY for Sydney, Australia.

노선별 운항정보

CARI-6는 노선별 운항정보, 즉 비행 날짜, 출발 및 도착 공항 그리고 항로정보를 입력함으로써 노선별 선량을 계산할 수 있다. 먼저 한국에서 운행되는 국제선 노선에 대한 노선정보, 즉 출발 및 도착 공항, 비행시간 및 거리는 대한항공과 아

Table 1. Flight profiles of the reference routes.

Route <sup>a</sup> /flight time (hh:mm)	Altitude(H; ft) and duration(T; h:mm)							
	T <sub>ascent</sub>	H <sub>1</sub> /T <sub>1</sub>	H <sub>2</sub> /T <sub>2</sub>	H <sub>3</sub> /T <sub>3</sub>	H <sub>4</sub> /T <sub>4</sub>	H <sub>5</sub> /T <sub>5</sub>	H <sub>6</sub> /T <sub>6</sub>	T <sub>descent</sub>
RKSS-KJFK (13:06)	(24)	33,000 (5:28)	35,000 (1:19)	37,000 (5:32)				(23)
RKSS-KLAX (10:54)	(20)	33,000 (4:00)	35,000 (5:22)	37,000 (5:32)				(23)
RKSS-EGLL (11:30)	(13)	26,000 (0:09)	27,600 (1:44)	28,200 (1:22)	31,500 (5:35)	34,800 (0:21)	35,000 (1:52)	(14)
RKSS-VTBD (05:10)	(15)	31,000 (0:03)	35,000 (0:28)	39,000 (0:13)	39,400 (1:39)	37,400 (0:03)	39,000 (1:46)	(22)
RKSS-YSSY (09:05)	(09)	29,000 (1:31)	30,000 (0:32)	29,000 (0:32)	31,000 (2:05)	33,000 (3:56)		(20)
RKSS-RJAA (01:45)	(14)	33,000 (0:09)	37,000 (1:00)					(22)

a) KLAX and RJAA denote Los Angeles, CA and Tokyo, Japan, respectively. For other airports, refer to caption of Fig.2.

시아나항공의 운행정보를 참조하였다[16, 17]. 두 국적항공사는 2003년 9월 현재 87개 국제선 노선을 운행하고 있으며, 이에 추가하여 연결 항로 28개 노선을 포함한 총 115개 노선에 대한 운행정보를 참조하였다. 비행고도에서의 편서풍 등의 영향으로 왕복 노선의 비행시간은 차이가 있지만, 이번 평가에서는 왕복 평균 비행시간을 기준으로 하였다. CARI-6에 공항 코드가 입력되어 있지 않은 노선에 대한 평가는 인접 공항의 코드를 이용하여 수행하였다.

비행고도 및 고도별 비행시간 등의 기본적인 항로정보는 서울-뉴욕, 로스앤젤레스, 런던, 시드니, 방콕, 도쿄 6개 항로에 대한 정보를 각 지역별 대표 항로정보로 사용하였으며, 이를 표 1에 정리하였다. 즉 미주 노선은 서울-뉴욕, 로스앤젤레스 두 항로정보를 대표 항로정보로 사용하였으며, 일

본, 중국 노선은 서울-도쿄 노선, 오세아니아주 노선은 서울-시드니 노선, 동남아시아 노선은 서울-방콕 노선 그리고 유럽 노선은 서울-런던 항로정보를 대표 항로정보로 사용하였다. 표 1에서  $T_{\text{ascent}}$ 는 활주로를 이륙하여 첫 비행고도에 도달하기까지 소요되는 비행시간,  $H_1 \sim H_6$ 는 비행고도,  $T_1 \sim T_6$ 는 비행고도별 비행시간 그리고  $T_{\text{descent}}$ 는 마지막 비행고도로부터 활주로에 착륙시까지 소요되는 비행시간을 나타낸다[10]. 비행시간은 시간(h) 및 분(m)으로 비행고도는 피트(ft) 단위로 나타냈으며, 모든 노선명은 4자리 ICAO 공항 코드를 사용하여 표기하였다.

**비행스케줄 및 국민 출입국자 통계**

항공승무원의 연간 피폭선량을 평가하기 위하여 국적항공사 조종사와 객실승무원 각 10 명의

Table 2. Yearly individual schedules for the sampled Korean aircrew.

Aircrew	ID	Total flight time (h)	Total frequency of flight	Frequency of flight by continent				
				America	Europe	Asia	Oceania	Others
Pilots	P1	775	98	36	20	31	2	9
	P2	816	97	44	20	26	2	5
	P3	742	95	32	18	24	6	15
	P4	746	92	42	8	28	8	6
	P5	785	99	33	21	29	4	12
	P6	749	78	44	14	12	0	8
	P7	788	96	42	18	22	9	5
	P8	829	113	49	9	39	4	12
	P9	703	90	37	8	29	7	9
	P10	741	96	32	26	26	0	12
Ave.	767	95	39	16	27	4	9	
Flight attendants	F1	817	122	28	16	64	14	0
	F2	739	134	28	4	84	14	4
	F3	835	146	34	12	84	16	0
	F4	526	146	4	10	114	18	0
	F5	787	180	32	4	128	16	0
	F6	703	160	12	12	110	26	0
	F7	807	152	20	14	102	16	0
	F8	721	170	20	10	114	22	4
	F9	803	164	20	20	114	10	0
	F10	745	138	30	12	80	14	2
Ave.	748	151	23	11	99	17	1	

월별 비행스케줄 1년분을 분석하여 각각의 항공승무원별 연간 노선별 운행 횟수와 총 비행시간을 정리하여 표 2에 제시하였다. 주로 국제선 비행이 많은 조종사와 승무원의 비행스케줄을 참조하였으며 비행고도가 낮고 비행시간이 짧아 피폭이 미미할 것으로 예상되는 국내선 운행은 이번 평가에서 제외하였다.

일반 국민의 항공여행으로 인한 우주선 피폭량을 평가하기 위하여 한국공항공사의 항공통계[18]와 법무부의 출입국관리통계연보[19]를 참조하여 2001년도를 기준으로 130개 국제선 노선별 출입국자수를 산출하였다. 항공통계의 '국제선 노선별 수송실적'은 국제선 노선별 내, 외국인을 포함한 여객 및 화물 운송실적을 제공한다. 그러나 여객 수송실적에 있어서 내, 외국인이 구분되지 않기 때문에 이 자료를 국제선 노선별 국민 출입국자 통계자료로 직접 사용할 수가 없었다. 따라서 '국제선 노선별 수송실적'을 노선별 국민 출입국자의 분포로 사용하고 법무부의 출입국자 통계(표 3)를 이 분포에 적용하여 국제선 노선별 국민 출입국자수를 산출하였다. 이렇게 산출한 각 국가 및 도시별, 즉 비행노선별 출입국자 수를 비행으로 인한 집단선량 산출의 국민 통계자료로 사용하였다. 한편 항공기를 통한 내국인 출입국자수는 전체 출입국자수의 1% 미만으로 미미하기 때문에 모든 출입국은 항공기를 이용한 출입국으로 간주하였으며, 출입국자 통계에 있어서 승무원은 제외하였다.

## 결과 및 분석

### 비행고도 방사선장의 특성 분석

우주선에 의한 항공승무원의 피폭을 평가하기에 앞서, 먼저 비행고도 우주선 방사선장의 특성을 분석하였다. 동경 126°, 35,000 ft 고도에서 위도에 따른 우주선 선량률의 변화를 그림 3에 나타내었다. 그림 3을 통해 알 수 있듯이, 비행고도 우주선 방사선장에서는 적도지방에서 극지방으로 이동할수록 선량률이 증가하며 태양활동이 약할수록 높은 선량률을 나타낼 수 있다. 이는 지구자기장의 분포와 관련이 있다. 적도지방에 형성되는 지구자기장은 우주선과 수직으로 분포하기 때문에 대기권에 입사하는 우주선을 차단하는 역할을 한다. 따라서 적도지방의 대기권에서는 우주선의 세기가 약할 뿐만 아니라 태양활동의 변화에 따른 우주선의 변화도 작다. 그러나 극지방의 경우는 우주선의 입사 방향과 지구자기장의 분포 방향이 평행하기 때문에 우주선의 입사량이 많아 대기권에서의 우주선의 세기가 강하고 태양활동의 변화에 따른 우주선의 변화도 크다.

또한 비행고도의 변화에 따른 우주선 선량률의 변화 특성을 분석하기 위하여 서울 상공(37° N 126° E)에서의 고도에 따른 우주선 준위를 산출하여 그림 4에 제시하였다. 그림 4에 나타난 바와 같이, 고도가 높아짐에 따라 우주선의 세기는 증가하며 태양활동이 약할 때 그 증가폭은 좀 더 커짐을 확인할 수 있다. 즉 비행고도 우주선 방사

Table 3. Total number of persons arrived and departed in 2001<sup>a)</sup>.

Category		Arrivals	Departures	Total
Korean	Passengers	5,592,711	5,696,313	11,289,024
	Crew	676,927	682,942	1,359,869
	Subtotal	6,269,638	6,379,255	12,648,893
Foreigners	Passengers	4,275,696	4,205,234	8,480,930
	Landing permits	752,255	761,299	1,513,554
	Subtotal	5,027,951	4,966,533	9,994,484
Total	Passengers	9,868,407	9,901,547	19,769,954
	Crew and others	1,429,182	1,444,241	2,873,423
	Total	11,297,589	11,345,788	22,643,377

a) Taken from reference 19.

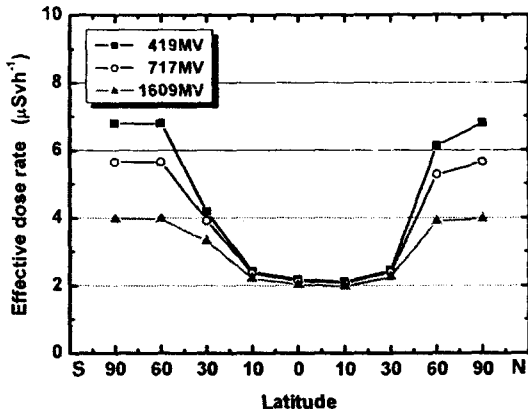


Fig. 3. Effective dose rates according to the latitude at the altitude of 35,000 ft and the longitude of 126° E for different heliocentric potential.

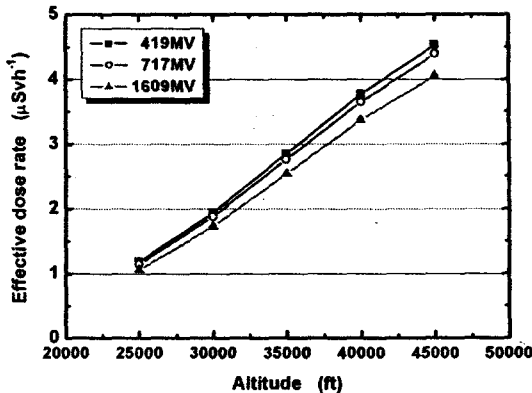


Fig. 4. Effective dose rates according to the altitude at 37° N 126° E for different heliocentric potential.

선장에서는 고도가 증가함에 따라, 적도지방에서 극지방으로 이동할수록 그리고 태양활동이 약할수록 선량률이 증가하는 특성이 있음을 확인하였다.

국제선 노선별 선량

대표적인 20개 국제선 노선에 대한 왕복 평균 비행시간과 거리 및 편도 탑승으로 인한 노선별 유효선량 계산 결과를 표 4에 제시하였다. 표 4에서 알 수 있듯이, 미주 노선이 가장 많은 선량을 나타내었는데, 이는 비행시간이 길 뿐만 아니라 동남아 또는 서아시아 노선, 대양주 노선에 비해 상대적으로 고위도 지역을 운행하기 때문이다. 유

럽 항로도 과거와는 달리 중국 상공을 비행하므로 알래스카와 캐나다 상공을 지나는 북미 항로에 비해 낮은 선량률을 나타낸다. HCP가 717 MV일 때, 중위도 지역을 운행하는 서울-뉴욕 노선(37° N 126° E → 61° N 149° W → 40° N 73° W)의 경우 비행시간당 유효선량률이 5.07 μSv h<sup>-1</sup>에 이르는데 반해, 저위도 지역을 운행하는 서울-방콕 노선(37° N 126° E → 13° N 100° E)의 경우는 1.72 μSv h<sup>-1</sup>로 위도에 따른 선량률의 차이가 큼을 확인할 수 있다.

항공승무원의 연간 피폭선량 평가

산출한 노선별 선량을 항공승무원의 비행스케줄에 적용하여 연간 피폭선량을 평가하였다. 태양활동의 세기가 717 MV일 때, 조종사와 객실승무원 각 10명씩의 연간 피폭선량 분포를 그림 5에 나타내었으며, 표 5에는 태양활동에 따른 조종사와 객실승무원 그룹의 연간 평균 피폭선량을 보였다. 그림 5에서 보듯이 모든 항공승무원의 선량이 일반인의 선량한도인 연간 1 mSv를 초과하며, 조종사는 평균 2.96 mSv를 객실승무원은 2.28 mSv를 피폭하여 항공승무원 평균 연간 2.62 mSv를 피폭하는 것으로 나타났다. 아울러 표 5에 제시한 바와 같이, 태양활동에 따라 조종사는 연간 2.61~3.28 mSv(477~1,101 MV)를 객실승무원은 2.06~2.48 mSv를 피폭하는 것으로 평가되었다. 연간 평균 비행시간이 각각 767 및 748 시간(표 2)으로 비슷함에도 불구하고 객실승무원에 비해 조종사의 피폭이 더 많은 것으로 평가되었는데, 그 이유는 표 2에 제시한 연간 비행스케줄을 분석해 보면 알 수 있다. 객실승무원의 경우 선량률이 낮은 동남아, 일본, 중국 노선을 포함한 아시아 노선을 빈번하게 비행한 반면, 조종사는 미주와 유럽 노선의 운행 빈도가 높기 때문에 상대적으로 많이 피폭한 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 선정된 조종사의 표본이 주로 국제선 비행이 많은 조종사를 바탕으로 하였기 때문에 조종사 그룹이 객실승무원 그룹보다 많이 피폭한다고 일반화시킬 수는 없다. 캐나다 항공승무원에 대한 Lewis[20]의 우주선 선량평가 결과에서는 객실승무원의 연간 비행시간이 조종사의 비행시간보다 많을 뿐만 아니라 피폭선량도 더 높은 것으로 나타났다.

그림 6에 2002년도 우리나라 직업상 피폭 그룹의 연간 평균 개인선량[21]과 본 연구에서 평가한 항공승무원의 평균선량을 비교하였다. 그림 6에서 보듯이 표본 항공승무원의 선량을 직업군별 모든

Table 4. Route doses calculated with CARI-6 for the Korean-based major commercial airline routes.

Origin -Destination <sup>a)</sup>	Air time (hh:mm)	Flight distance (km)	Route dose ( $\mu\text{Sv}$ )				
			Heliocentric potential (MV)				
			717 <sup>b)</sup>	1,609 <sup>c)</sup>	419 <sup>d)</sup>	1,101 <sup>e)</sup>	477 <sup>f)</sup>
RKSS-KJFK	13:35	11,051	68.9	49.8	81.6	58.6	79.0
RKSS-KLAX	11:40	9,581	45.7	37.2	50.3	41.5	49.2
RKSS-CYYZ	13:00	10,600	65.7	47.5	77.8	55.9	75.3
RKSS-PHNL	08:40	7,307	21.8	20.1	22.6	21.1	22.4
RKSS-PANC	07:40	6,062	32.0	24.7	36.5	28.3	35.6
RKSS-EGLL	10:53	8,854	39.3	29.3	45.6	34.0	44.2
RKSS-EDDF	10:18	8,551	36.3	27.6	41.6	31.8	40.5
RKSS-UTTT	07:00	6,589	13.8	12.3	14.5	13.1	14.3
RKSS-UUEE	08:03	6,603	26.9	20.9	30.5	23.9	29.6
RKSS-LTBA	10:23	9,027	29.4	25.0	31.9	27.5	31.1
RKSS-VTBD	05:03	3,718	8.7	8.2	8.9	8.5	8.8
RKSS-VHHH	03:05	2,092	5.3	5.0	5.4	5.1	5.4
RKSS-PGUM	03:58	3,193	6.5	6.1	6.7	6.3	6.6
RKSS-WIIH	06:35	5,283	11.2	10.6	11.4	10.9	11.4
RKSS-YSSY	09:50	8,319	18.6	17.2	19.2	18.0	19.0
RKSS-RJAA	01:50	1,160	4.2	3.9	4.3	4.1	4.3
RKSS-RJCO	02:25	1,362	6.5	5.9	6.7	6.2	6.7
RKSS-RJBB	01:15	825	2.4	2.2	2.5	2.3	2.5
RKSS-ZBAA	01:35	951	3.6	3.3	3.7	3.5	3.7
RKSS-ZSSS	01:13	878	2.2	2.1	2.3	2.2	2.3

a) Seoul, Korea(RKSS), New York, NY(KJFK), Los Angeles, CA(KLAX), Toronto, Canada(CYYZ), Honolulu, Hawaii(PHNL), Anchorage, AK (PANC), London, UK(EGLL), Frankfurt, Germany(EDDF), Tashkent, Uzbekistan(UTTT), Moscow, Russia(UUEE), Istanbul, Turkey(LTBA), Bangkok, Thailand(VTBD), Hong Kong, China(VHHH), Guam Island, Guam(PGUM), Jakarta, Indonesia(WIIH), Sydney, Australia(YSSY), Tokyo, Japan(RJAA), Sapporo, Japan(RJCO), Osaka, Japan(RJBB), Beijing, China(ZBAA), Shanghai, China(ZSSS).

b) Average HCP for 45 years.

c) Maximum monthly HCP.

d) Minimum monthly HCP.

e) Maximum yearly HCP.

f) Minimum yearly HCP.

종사자의 평균선량과 비교할 때 체내검사 핵의학 분야 종사자 다음으로 높다. 그림 6에서 개인선량이 측정되는 종사자의 많은 부분을 차지하는 연간 1.2 mSv 미만을 피폭하는 그룹을 제외하고 평균한 값과 비교하더라도 표본 항공승무원의 우주선에 의한 피폭선량이 다른 직업상 피폭군과 대등함을 알 수 있다. 이러한 결과는 항공승무원 직

군의 피폭에 대해서는 일종의 직업상 피폭으로 간주되어야 하며 적절한 관리가 수행되어야 할 필요성이 있음을 보여주고 있다.

#### 비행으로 인한 국민 집단선량 평가

한국항공공사[18]와 법무부[19]의 자료를 이용하여 2001년도 130개 국제선 노선별 출입국자수

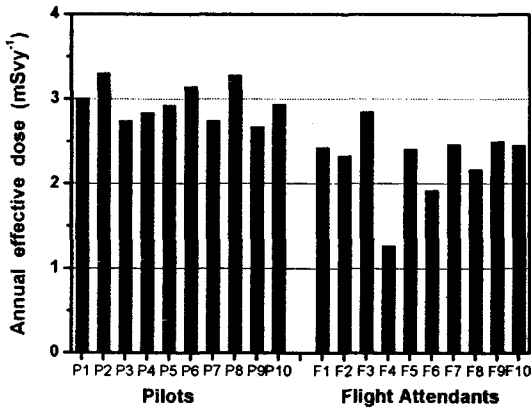


Fig. 5. Annual exposure distribution of aircrew in Korea at the solar activity of 717 MV.

Table 5. Average annual effective dose corresponding to the solar activity for aircrew in Korea.

Aircrew	Annual effective dose (mSvy <sup>-1</sup> )
	717 (1101~477) MV
Pilots	2.96 (2.61~3.28)
Flight attendants	2.28 (2.06~2.48)

를 산출하였으며, 이에 CARI-6를 이용해 계산한 노선별 선량(2001년, 901 MV)을 적용하여 노선별 집단선량을 획득하였다. 이번 평가에서는 국외에서의 여행으로 인한 비행 통계는 추적이 불가능하여 제외하고 한국을 기점으로 한 출입국 과정에서 받는 피폭만을 평가하였다. 국내에서의 국제선 이용 및 평양으로의 출입국 또한 이번 평가에서 제외하였으며, 노선정보를 알 수 없는 노선에 대한 평가는 인접 노선의 선량을 적용하여 수행하였다.

우리나라에서는 2001년 한 해 동안 11,289,024명(표 3)이 130개 도시로 출, 입국하였으며 이로 인한 우주선 피폭 집단유효선량은 136 man-Sv로 평가되었다. 이는 항공여행 승객 당 평균선량이 연간 0.012 mSv에 해당하며, 국민 1인 당으로는 연평균 약 0.003 mSv에 해당된다. 집단유효선량 136 man-Sv는 2002년 기준 의료상피폭에 의한 집단선량 27,440 man-Sv[21]에 비해서는 작은 값이지만 국내 방사선작업 종사자의 직업상 피폭 총 집단선량 66.6 man-Sv의 2배에 해당한다. 이러한 사실은 집단선량의 산출에 있어서 낮은 개인선량까지 합산하는 것이 잘못이라는 지적도 있지만 어떤 피폭원과 관련된 종합적인 확률적 위험의 지표로서 집단선량의 의미가 있다면 항공여행으로 인한 국민의 우주선 피폭도 방사선 방호의 관점에서 고려의 대상이 되어야 함을 시사한다.

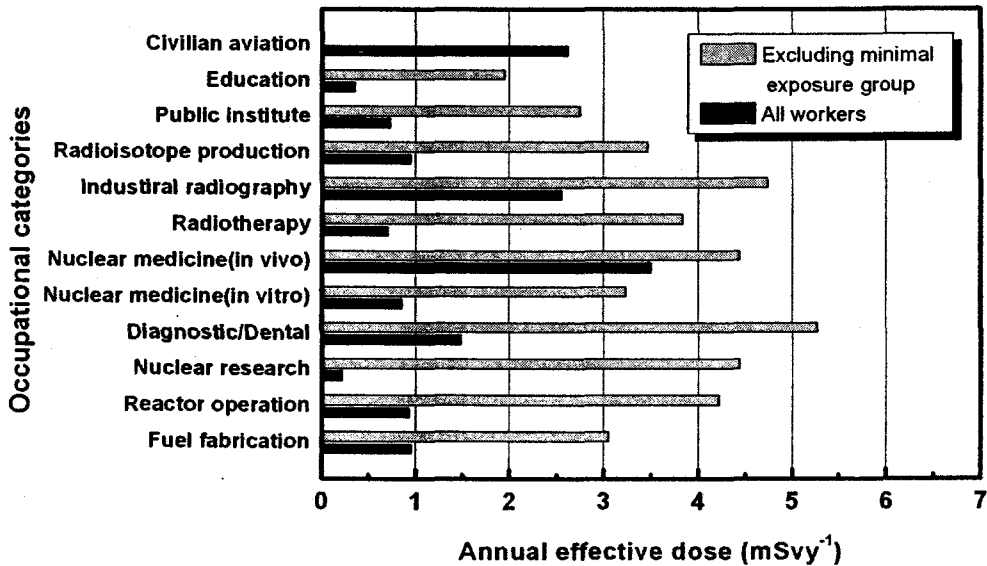


Fig. 6. Comparison of aircrew dose to other occupational group doses in Korea.



## 결론 및 논의

비행간 우주선에 의한 누적선량을 계산하는 프로그램인 CARI-6를 이용하여 비행고도 우주선 방사선장의 선량을 변화 특성을 분석하고, 국제항공사가 운행하는 국제선 노선에 대한 노선별 우주선 피폭선량을 산출하였다. 비행고도 우주선 방사선장에서는 고도가 증가함에 따라, 적도지방에서 극지방으로 이동할수록 그리고 태양활동이 약할수록 선량률이 증가하는 특성이 있음을 확인하였다. 산출된 노선별 선량을 항공승무원의 비행스케줄과 국민의 항공여행 통계에 적용하여 우리나라 항공승무원과 일반 여행객의 우주선에 의한 연간 피폭선량 및 집단유효선량을 평가하였다.

평가 결과, 항공승무원은 일반인의 선량한도인 연간 1mSv를 초과하여 연간 2.62mSv 내외를 피폭하는 것으로 평가되었으며, 이 선량 준위는 다른 직업상 피폭을 받는 그룹과 대등한 것으로 나타났다. 나아가 2001년 기준으로 1,100만 명의 해외여행 국민이 피폭한 집단선량은 136 man-Sv로 나타났다. 이러한 결과는 항공승무원의 피폭을 직업상 피폭으로 간주하여 방사선 피폭에 관한 정보를 제공하고 임신한 승무원에 대해서는 태아의 피폭 관리 대책이 이행되어야 함을 의미한다. 나아가 승무원이 아니라도 직무상 빈번히 탑승하는 여행객에 대해서도 승무원에 준하는 배려가 필요하다. 이들에 대한 피폭관리는 개인선량계의 지급까지 요구하는 것은 아니며 탑승시간을 적절히 관리하는 것으로 충분하다. 그러나 태양활동이 특별히 낮은 기간, 즉 비행고도에서 우주선 강도가 특별히 높은 기간에 대해서는 별도의 고려가 따라야 한다.

ICRP는 간행물 92[22]에서 양성자의 방사선 가중치를 기존의 5에서 2로 하향 조정했으며, 이에 따라 반도 양성자 선량 기여가 있는 중성자의 방사선가중치도 중성자 에너지가 약 1MeV 이하에서는 기존 값에 비해 약 50% 수준으로 조정되었다. 비행고도에서의 우주선 피폭에서 고에너지 양성자와 이에 의해 생성된 2차 중성자에 의한 기여가 크음을 고려하면 ICRP 92의 방사선가중치 조정 결과는 특히 우주선 선량평가에 직접 영향을 미친다. 따라서 이 연구에서 사용한 CARI-6와 같은 계산코드의 내장 선량 정보가 변경되어야 하므로 FLUKA[13] 등 고에너지 방사선 수송코드를 이용한 재평가가 이루어져야 한다. 이러한 재평가 결과가 가용하면 이 연구 결과인 항공승무원 및 여행객의 우주선 선량평가 결과도 수정, 보완되어야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. ICRP, *1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection*, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Oxford: Pergamon Press(1990)
2. European Commission, Exposure of air crew to cosmic radiation, *Radiation Protection 85*, EURADOS report 1996-01(1996)
3. M. Kelly, H. G. Menzel, T. Ryan and K. Schnuer, eds., *Cosmic Radiation and Aircrew Exposure*, Proc. of an Int. Conf., Dublin, Ireland, July 1-3, 1998, *Radiat. Proct. Dosim.*, 86(4), (1999)
4. J.-M. Courades, "European Legislation on Protection Against Cosmic Radiation," *Radiat. Prot. Dosim.*, 86(4), 343-346(1999)
5. Federal Aviation Administration, *Crew-member Training on In-flight Radiation Exposure*, US Department of Transportation, FAA Advisory Circular 120-61 (1994), (<http://www2.faa.gov/regulations/index.cfm>).
6. Transport Canada, *Measures for Managing Exposure to Cosmic Radiation of Employees Working On Board Aircraft*, Commercial and Business Aviation Advisory Circular, Transport Canada, No. 0183, 5 April, 2001 (<http://www.tc.gc.ca/civilAviation/commerce/ACO183.htm>).
7. J. S. Nicholas, K. Copeland, F. E. Duke, W. Friedberg and K. O'Brien III, *Galactic Cosmic Radiation Exposure of Pregnant Aircrew Members II*, US FAA Report DOT/FAA/AM-00/33(2000)
8. G. M. Kendall, "Factors Affecting Cosmic-ray Doses at Aircraft Altitudes," *Health Phys.*, 79(5), 560-562(2000)
9. S. Roesler, W. Heinrich and H. Schraube, "Monte Carlo Calculation of the Radiation Field at Aircraft Altitudes," *Radiat. Prot.*

- Dosim.*, 98(4), 367-388(2002)
10. U. Tveten, T. Haldorsen, J. Reitan, "Cosmic Radiation and Air-line Pilots: Exposure Pattern as a Function of Aircraft Type," *Radiat. Prot. Dosim.*, 87(3), 157-165(2000)
  11. K. O'Brien, *LUIN, A code for the calculation of cosmic ray propagation in the atmosphere (update of HASL-275)*, EML-338(1978)
  12. K. O'Brien, W. Friedberg, F. E. Duke, L. Snyder, E. B. Darden Jr. and H. H. Sauer, "The Exposure of Aircraft Crews to Radiation of Extraterrestrial Origin," *Radiat. Prot. Dosim.*, 45(1-4), 145-162(1992)
  13. A. Fasso, A. Ferrari, J. Ranft and P. R. Sala, "FLUKA: Present Status and Future Developments," In: La Biodola 1993, *Proc. of Calorimetry in High Energy Physics*, A. Menzione and A. Scribano, Eds., pp.493-497, World Scientific, Singapore (1994)
  14. H. Schraube, W. Heinrich, G. Leuthold, V. Mares and S. Roesler, "Aviation Route Dose Calculation and Its Numerical Basis," in: *IRPA report*, T-4-4, P-1a-45(2000)
  15. B. J. Lewis, M. J. McCall, A. R. Green, L. G. I. Bennett, M. Pierre, U. J. Schrewe, K. O'Brien and E. Felsberger, "Aircrew Exposure from Cosmic Radiation on Commercial Airline Routes," *Radiat. Prot. Dosim.*, 93(4), 293-314(2001)
  16. <http://www.koreanair.co.kr/>
  17. <http://www.flyasiana.com/index.htm>
  18. 한국공항공사, *항공통계 2001*, 한국공항공사 (2002)
  19. 법무부, *출입국관리통계연보 2001*, 법무부 출입국관리국(2002)
  20. B. J. Lewis, P. Tume, L. G. I. Bennett, M. Pierre, A. R. Green, T. Cousins, B. E. Hoffarth, T. A. Jones and J. R. Brisson, "Cosmic Radiation Exposure on Canadian-based Commercial Airline Routes," *Radiat. Prot. Dosim.*, 86(1), 7-24(1999)
  21. 이재기, 김현기, 권정완, 홍종호, 고광옥, 김민철, *국민 피폭선량 종합 DB 구축*, 한국원자력안전기술원, KINS/HR-600(2004)
  22. ICRP, *Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor ( $w_R$ )*, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 92, Oxford: Pergamon Press(2003)