

# 운항승무원의 우주방사선 피폭 평가에 있어 누적형 개인 중성자 선량계의 적용가능성 예비 연구

김형진\*, 장병욱\*,†, 변종인\*,†, 송명한†, 김정호†

\*과학기술연합대학원대학교, †한국원자력안전기술원, ‡한국표준과학연구원

2013년 2월 27일 접수 / 2013년 3월 14일 1차 수정 / 2013년 3월 16일 채택

상대적으로 높은 항공승무원의 우주방사선 피폭을 고려하여 ICRP는 직무피폭의 일부로 간주하고 방사선 방호 대상으로 권고하였으며 이미 유럽 등 일부 국가에서는 항공 고도에서의 항공승무원에 대한 우주방사선 피폭 관리가 이루어지고 있다. 국내에서도 2012년 7월 26일 생활주변방사선안전관리법의 시행과 더불어 항공승무원에 대한 관리 기준이 마련되었다. 본 연구에서는 항공승무원의 개인 선량 평가에서 휴대가 용이한 누적형 고체비적검출기의 적용가능성을 검토하기 위해 수행되었다. 한국표준과학연구원서 <sup>252</sup>Cf 중성자 표준 선원을 이용해 선량계의 중성자 선량에 대한 반응도의 선형성과 중성자 입사각에 따른 각도의존성을 평가하였고 한국민간항공조종사협회의 협조를 얻어 항공 고도에 선량계를 노출시켰다. 응답 특성 평가 결과, 선형성에서는 각각의 감속체에 대해 모두 상관계수( $r^2$ )가 0.99 이상으로 높았고 큰 각도의존성을 나타내었다. 또한 예측된 운항 승무원의 중성자 선량과 비적 밀도와의 상관성은 각각의 감속체에 대하여  $r=0.486$  (HDPE),  $r=0.241$  (PA)으로 낮게 평가되었다. 누적형 중성자 선량계는 개인 피폭 선량 평가에 활용 가능성이 있을 것으로 판단되나 항공 고도에서의 중성자 에너지 스펙트럼을 고려하여 추가적인 연구가 필요하며 노출 시간을 증가시켜 비적 밀도와의 상관성을 보다 면밀하게 평가할 필요가 있다.

중심어: 우주방사선, 항공승무원, 고체비적검출기, 중성자, RSNS 선량계

## 1. 서론

자연 방사선 중 하나인 우주방사선은 태양계 안팎에서 지구로 입사되는 고에너지 입자군과 함께 대기 입자와의 상호 작용 및 연속 붕괴되는 일련의 과정에서 발생하는 방사선을 통칭한다. 지구 대기권으로 입사되어 반응하기 전의 1차 우주방사선(primary cosmic radiation)과 반응 후의 2차 우주방사선(secondary cosmic radiation)으로 구분될 수 있으며 1차 우주방사선은 기원에 따라서 은하 우주방사선(galactic cosmic radiation), 태양 우주방사선(solar cosmic radiation) 등으로 분류되기도 한다. 1차 우주방사선의 대부분은 양성자로 구성되어 있고 일부 알파 입자, 중성자 및 전자를 포함한다. 에너지 범위는 기원에 따라 차이가 있고 약  $10^{20}$  eV 이상의 에너지를 가진 방사선이 측정되기도 한다. 2차 우주방사선은 대기와의 상호 작용의 결과로 발생한 중성자, 양성자, 파이온, 뮤온, 전자 및 광자 등으로 구성되며 종류별 강도와 에너지 분포는 지자기적 위치(위도, 경도)와 고도 및 태양 활동에 따라 다르게 나타난다. 지상에서 받는 우주방사선 피폭 선량은 대기에 의한 감쇠 및 지구 자기장의 차폐 효과로 연평균 0.39 mSv로 알려져 있다. 그러나 고도가 증가함에

따라 우주방사선 피폭량이 증가하므로 높은 고도에서 자주 머무르는 항공승무원의 경우, 연평균 피폭 선량이 단거리 비행 시 1 mSv-2 mSv, 장거리 비행 시 3 mSv-5 mSv로, 핵연료주기사업 작업자 또는 의료피폭과 비슷한 수준으로 볼 수 있으며 그 중 약 40% - 80%는 중성자에 의한 피폭으로 평가된다[1,2]. ICRP는 민간 제트항공기 탑승과 우주비행 중 우주방사선에 의한 피폭을 직무피폭의 일부로 간주하여 방사선 방호 대상으로 권고하고 있으며 유럽연합을 포함하여 미국, 일본 등 일부 국가에서는 우주방사선 피폭과 관련된 안전관리 체계가 운용되고 있다 [3,4]. 국내에서도 2012년 7월 “생활주변방사선안전관리법”의 시행에 따라 우주방사선에 대한 항공승무원의 안전 관리가 항공운송사업자에게 의무화 되었다. 이에 따라 효과적인 안전 관리를 위한 선량 평가 방법의 검토가 요구된다. 국의 규정에는 대체로 우주방사선 피폭 선량 평가용으로 개발된 CARI-6, EPCARD, PCAIRE, JISCARD, SIVERT 등의 코드를 중심으로 노선별 선량을 평가하고 측정을 통해 코드의 타당성을 검증하거나 지지하는 방식으로 이루어져 있다. 측정은 조직등가비계수기(TEPC)를 비롯한 이온 챔버, 보너구, 고체비적검출기, 열형광 선량계(TLD) 등의 다양한 검출기를 사용할 수 있으며 이들 검출기를 이용한 선량 평가 방법이 연구되어 왔다[5]. 국내에서는 우주방사선 피폭 선량 평가와 관련하여 과거 한

교신저자 : 장병욱, hafadai@kins.re.kr  
대전광역시 유성구 과학로 62 한국원자력안전기술원 방사능분석실

양대학교에서 조직등가비례계수기와 거품형 중성자 검출기를 통해 적용 가능성을 검토하였고 코드를 통해 항공승무원의 연간 피폭 선량 평가를 수행한 바 있다[6]. 한국천문연구원에서는 북극항공로 등 특정노선에 대한 피폭 선량을 코드와 실측을 통해 평가하였고 현재 조직등가비례계수기에 대한 우주방사선 측정기술 개발을 진행하고 있다[7-8]. 그러나 아직까지 항공 고도에 적용할 수 있는 고정된 검출기나 최적화된 선량 평가 방법이 구축되어 있지 않은 상황이며 일부 항공사에서도 실측을 제외한 코드를 통한 평가가 수행되고 있다.

본 연구에서는 개인 누적 선량을 평가하는 방식으로 우주방사선 피폭 선량을 평가하기 위해 중성자 검출용 누적형 고체비적검출기를 선정하고 이에 대한 적용가능성을 알아보기 위해 검출기의 응답 특성을 평가하고 실제 항공 고도에 일정 기간 노출시켰다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 Overview

본 연구를 수행하기 위해 선정된 고체비적검출기는 CR-39<sup>®</sup> (allyl diglycol carbonate)칩이 내장된 경량 소형의 선량계이다. 이동 및 소지가 편리하고 플라스틱 재질의 수동형 검출기라는 점에서 견고하고 환경적인 영향을 덜 받을 뿐 아니라 전자기파나 가연성 가스를 유발하지 않아 항공 탑재에 용이하다. 특히 중성자 검출로써 CR-39 칩은 다른 중성자 검출기에 비해 응답 특성 및 안정성이 비교적 양호하고 판독이 용이한 장점이 있고 우주방사선 피폭 선량 평가 관련 연구에 사용된 사례가 있다[9-14].

항공 고도에서의 중성자 피폭을 평가할 때 중성자의 에너지 중 선속이 높은 50 MeV-500 MeV 사이와 약 1 MeV 에너지대에 대한 평가가 중요한 것으로 알려져 있다.[2] 따라서 선량계 응답 특성 실험에서는 주로 0.7

MeV 이상(평균 2.1 MeV)의 중성자를 방출하는 <sup>252</sup>Cf 중성자 표준 선원을 이용하여 선량계의 중성자 선량에 대한 반응도의 선형성과 중성자 입사각에 따른 각도의존성을 평가를 수행하였고 이를 바탕으로 일정기간 항공 고도에 노출시킨 선량계의 관독값과 선량 코드를 이용해 예측한 피폭 선량 간의 상관관계를 평가하였다.

### 2.2 RSNS 선량계의 구성 및 원리

본 연구에 사용된 선량계는 RSNS 선량계(Radosys Ltd., Hungary)로 선량계 내부에 두 개의 CR-39 칩과 두 종류의 감속재가 있다. 감속재는 고속중성자와 열외중성자 영역의 중성자 반응 효율을 높이기 위해 고안된 것으로 HDPE (High Density Polyethylene)와 PA (Polyamide) 재질의 플라스틱 소자가 사용되었다(그림 1). 입사된 중성자는 선량계의 케이스 및 검출 소자를 구성하는 원자들과 반응하여 대부분의 양성자를 비롯한 탄소, 산소 등의 되튕핵을 생성하고 되튕핵의 에너지와 입사방향에 따라 CR-39 칩에 형성된 비적 수와 입사된 중성자 수와의 비례성을 이용하여 선량을 평가하게 된다.

### 2.3 선량계 판독 절차

비적 판독은 선량계 제조 업체에서 제공한 절차에 따라 수행하였다. CR-39 칩을 이산화탄소 전처리 후, 화학적 에칭을 시행하였고 RSV-6 automatic reader (Radosys Ltd., Hungary)을 사용해 CR-39 칩에 표면에 생긴 비적 수를 판독하여 단위면적당 비적 수(이하 비적 밀도)를 평가하였다(그림 2). 화학적 에칭 절차 이전에 고압의 이산화탄소에 노출시킴으로써 전체 에칭률(bulk etch rate)에 대한 비적 에칭률(track etch rate)을 높여 비적 사이클을 증대시키고 결과적으로 양성자에 의한 비적과 환경 중 라돈과 라돈 자핵중에서 방출된 알파선에 의한 비적을 분별하여 판독하게 된다[15-17].

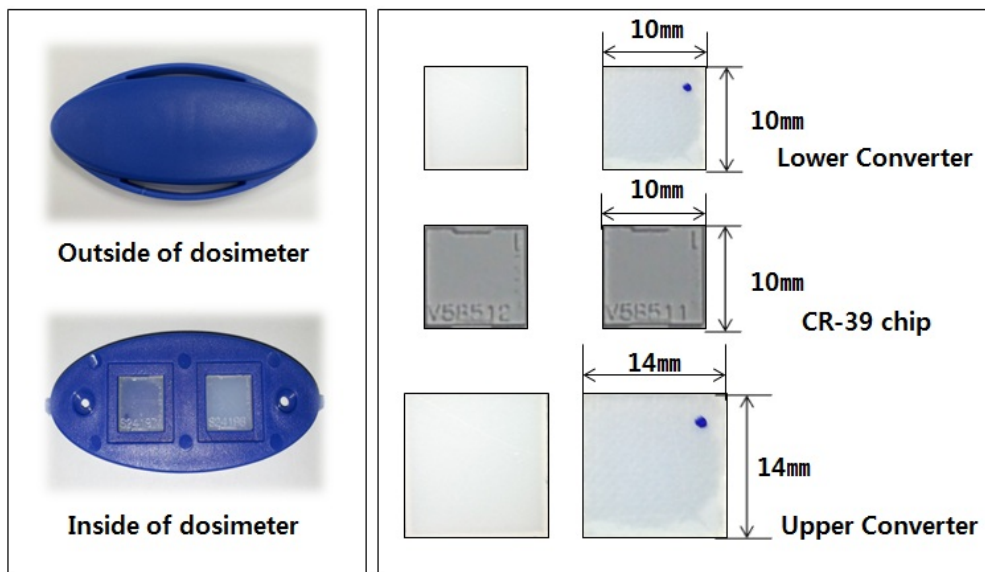


Fig. 1. Structure of RSNS dosimeter (The PA converters in the dosimeter are marked by blue spots and the others are HDPE converters).

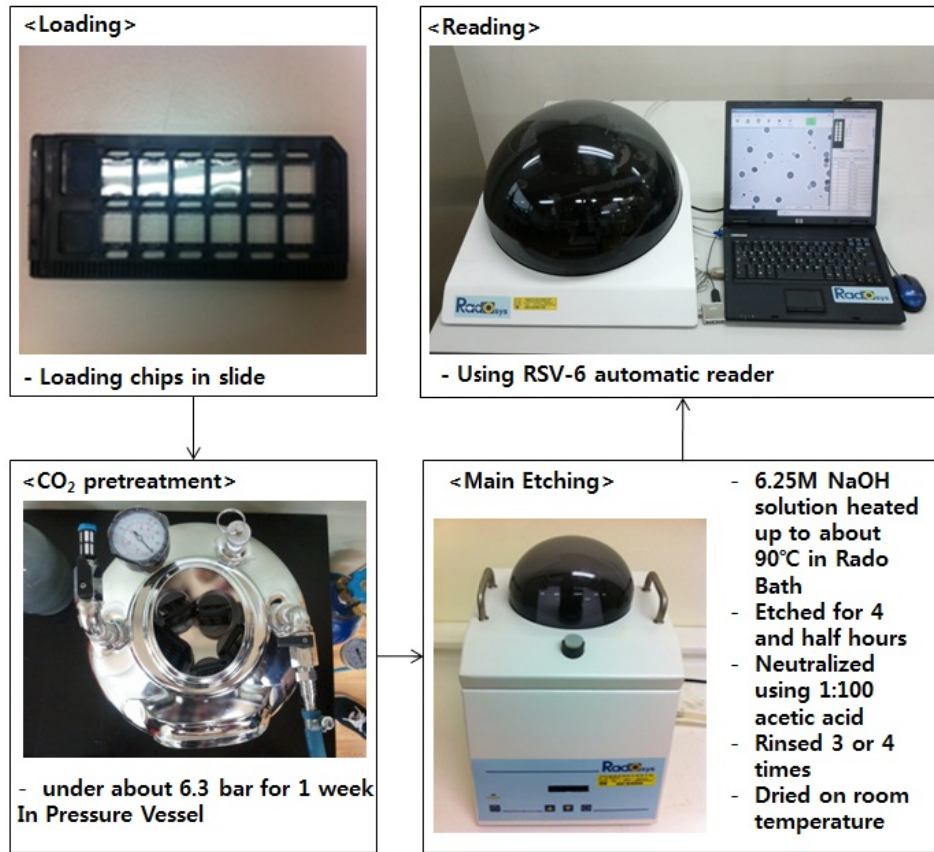


Fig. 2. Reading procedures.

판독의 재현성을 확보하기 위해 실험적으로 최적의 반복 판독 횟수를 결정하였다. RSNS 선량계를 39  $\mu\text{Sv}$ , 74  $\mu\text{Sv}$ , 141  $\mu\text{Sv}$ , 267  $\mu\text{Sv}$ , 504  $\mu\text{Sv}$ , 965  $\mu\text{Sv}$ 의 중성자 선량에 노출시켰으며, 판독 반복 횟수를 1회에서 10회까지 각각 10번씩 판독하여 각각에 대한 상대표준편차를 구하였다. 실험 결과, 높은 선량보다 낮은 선량에서 반복 판독 횟수의 증가에 따라 상대표준편차가 감소하는 경향을 나타냈다. 이에 따라 낮은 선량을 기준으로 판독 반복 횟수를 4회로 결정하였다(그림 3).

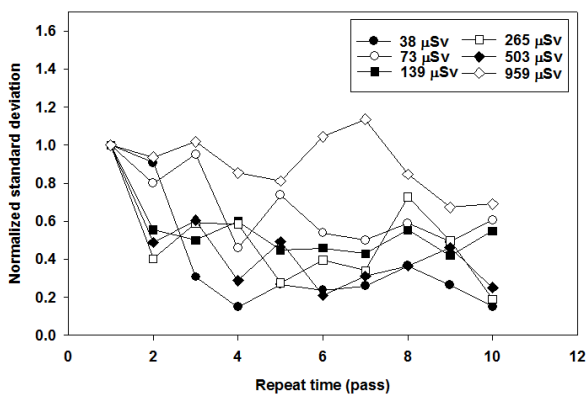


Fig. 3. Optimization of repeat reading counts.

## 2.4 성능 평가 실험

고체비적검출기의 성능 평가 중 선량에 대한 선형성과 각도의존성에 관한 평가를 수행하였으며 한국표준과학연구원 중성자 조사실에서 수행되었다.

약 50 cm (두께 0.5 cm) 지름의 아크릴 원판을 제작하여 선원으로부터 동심원으로 선량계를 배치하였고 시간으로 노출 선량을 조절하였다. 조사한 선량 범위는 승무원이 유럽행 편도 1회 운항으로 받을 수 있는 선량에서 2개월 간 누적 중성자 선량을 추정하여 적정 선량 범위를 적용하였으며 조사할 선량마다 백그라운드 선량계 1개를 포함한 4개의 선량계를 배치하였다. 각도의존성 평가 실험에서는 선량계 케이스를 제외한 방사선 검출부(CR-39 칩과 감속재)만을 이용하였으며 검출부를 0도, 30도, 45도, 60도, 90도 기울여 일정 간격으로 배치하였고 판독 오차의 영향을 최소화시키기 위해 높은 선량을 조사하였다(표 1 및 그림 4).

**Table 1.** Neutron Dose Equivalents Exposed to Dosimeter for Response Experiments.

Experiment type	Dose Linearity							Angle Dependence
	set 1	set 2	set 3	set 4	set 5	set 6	set 7	
Neutron dose equivalent ( $\mu\text{Sv}$ ) <sup>a)</sup>	35	65	122	229	429	802	1500	1336

a) calculated using fluence to dose conversion coefficients[22]

**Table 2.** Results of Dose Linearity Experiments (the values from CR-39 chips between each type of converters).

1) HDPE converters

No.	Planned equivalent dose ( $\mu\text{Sv}$ )	Corrected equivalent dose <sup>a)</sup> ( $\mu\text{Sv}$ )	Track density (track $\text{mm}^{-2}$ )		
			Range	Average	Average <sup>b)</sup>
1	35	34	0.33 - 0.90	0.57	0.12
2	65	62	0.48 - 0.68	0.56	0.11
3	122	117	0.71 - 0.91	0.81	0.36
4	229	220	0.90 - 1.20	1.03	0.58
5	429	411	1.62 - 1.86	1.77	1.32
6	802	769	2.79 - 3.40	3.12	2.67
7	1500	1438	4.34 - 6.23	5.43	4.98

2) PA converters

No.	Planned equivalent dose ( $\mu\text{Sv}$ )	Corrected equivalent dose <sup>a)</sup> ( $\mu\text{Sv}$ )	Track density (track $\text{mm}^{-2}$ )		
			Range	Average	Average <sup>b)</sup>
1	35	33	0.63 - 0.71	0.68	0.13
2	65	62	0.47 - 0.72	0.59	0.04
3	122	116	0.72 - 0.97	0.84	0.30
4	229	218	1.08 - 1.61	1.31	0.76
5	429	408	2.11 - 2.80	2.48	1.94
6	802	763	4.05 - 5.01	4.53	3.99
7	1500	1428	6.93 - 8.06	7.66	7.11

a) considered of distance between source and chips  
 b) subtracted by background (HDPE: 0.45 PA: 0.55)

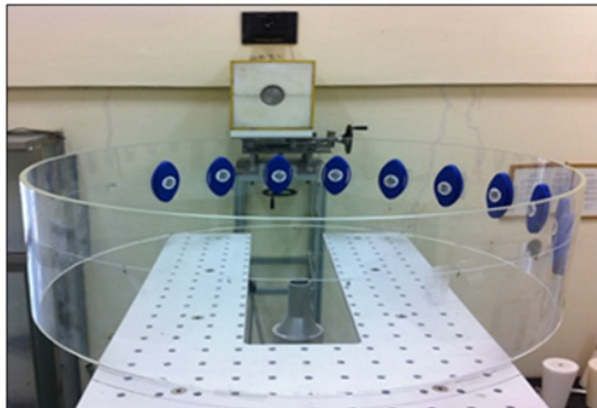


Fig. 4A Dose linearity

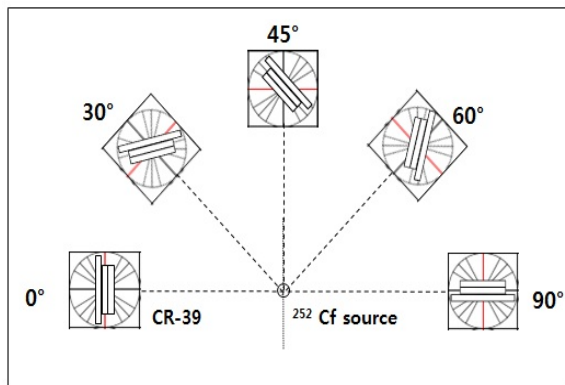


Fig. 4B Angle dependence

**Fig. 4.** Geometry of dosimeter response experiments.

### 2.5 항공 고도 우주방사선장에서의 선량계 조사

한국민간항공조종사협회의 협조 아래 2011년 10월 초부터 12월 중순까지 약 2개월 반 동안 운항승무원 10인에게 선량계를 배포하여 각 승무원의 운항 스케줄에 따라 우주방사선에 선량계를 노출시킨 후 회수하였다. 승무원에게 배포한 선량계는 총 6개로 3개는 운항 중에 소지하게 하였으며 나머지 3개는 자택에 두어 지상에서 각 개인이 받게 되는 중성자 백그라운드를 측정하였다. 운항승무원이 받은 중성자 선량을 예측하기 위해서 선량 평가 코드 중 CARI-6 코드(Federal Aviation Administration, Civil Aerospace Medical Institute)를 사용하여 항공 고도에서 항공기 간 수직 분리 고도를 고려한 평균 유효 선량을 평가하였고 평가 값에 중성자에 의한 선량 기여율을 적용하기 위해 EXPACS (ver 2.21, Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Science and Engineering Directorate)을 이용하여 해수면을 기준으로 고도 8 km - 14 km에서 위도, 경도별 각각 10도 간격으로 중성자 선량을 대비 전체 선량의 평균을 산출하였다.

## 3. 결과 및 논의

### 3.1 선량계 성능 평가 실험 결과 및 논의

표 2, 표 3, 그림 5에 감속재 종류별로 <sup>252</sup>Cf 중성자 선원의 선량 크기에 따른 비적 밀도와 입사각에 따른 비적



Table 3. Results of Angle Dependence Experiments.

No.	Angle of incidence	Corrected equivalent dose <sup>a)</sup> (μSv)	HDPE		PA	
			Track density <sup>b)</sup> (track mm <sup>-2</sup> )	Response <sup>c)</sup>	Track density (track mm <sup>-2</sup> )	Response
1	0	1336	7.35	1.00	6.66	1.00
2	30		3.68	0.50	4.71	0.71
3	45		2.84	0.39	3.75	0.56
4	60		1.39	0.19	2.36	0.35
5	90		0.44	0.06	0.45	0.07

- a) considered of distance between source and chips
- b) subtracting background (HDPE : 1.09 PA : 0.96)
- c) normalized to angle of incidence 0

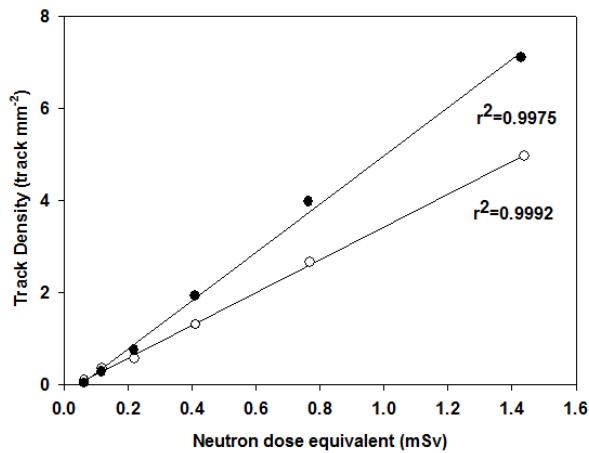


Fig. 5A Dose linearity

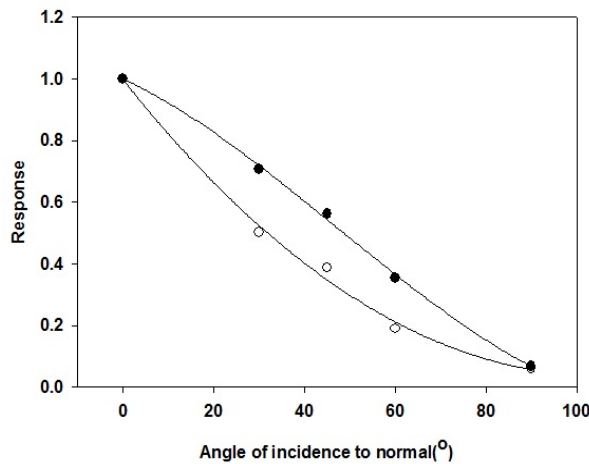


Fig. 5B Angle dependence

Fig. 5. Results of dosimeter's response experiments (○ : HDPE, ● : PA).

밀도를 나타내었다. 선량 크기가 증가함에 따라 비적 밀도도 따라 증가하였고 상관계수( $r^2$ )가 0.99이상으로 높은 상관관계를 보였다. 각도의존성 평가 실험 결과에서는 90도로 입사 시, 정면으로 입사될 때보다 감속재에 따라 약 0.06배(HDPE), 0.07배(PA)로 비적 밀도가 현저하게 감소되었다.

중성자 선량에 따른 비적 밀도의 선형성으로 보아 분

선량계로 우주방사선 피폭 선량을 평가하는데 활용될 가능성이 있을 것으로 판단된다. 큰 각도의존성은 다른 응답 특성 연구와 상응하는 결과로 중성자 입사각도가 증가함에 따라 2차 입자의 진행 방향이 판독 가능한 비적을 형성하는 각도를 넘어가기 때문에 검출 효율이 떨어지는 것으로 볼 수 있다[10,18]. 우주방사선장에서의 선량계와 중성자 간의 방향성과 선량계의 구조를 고려하여 90도 이상으로 조사 각도를 넓혀 다각도에서 입사되는 방사선에 대한 검출 효율을 평가한다면 최소한  $^{252}\text{Cf}$ 의 중성자 에너지 범위에 대한 선량 평가가 가능할 것으로 보인다.

그러나 항공 고도에서의 중성자의 에너지는 중성자 표준 선원 에너지 영역을 포함한 넓은 에너지 스펙트럼을 나타내기 때문에 에너지에 따른 상호 작용 확률로 선량계의 sensitivity 및 각도의존성 등의 검출 효율 차이가 발생한다[19-21]. 국내에는 우주방사선장을 모사할 수 있는 표준 방사선장이 없기 때문에 대안으로 방사선 수송 코드를 이용하여 전 중성자 에너지 영역에 대해 상호 작용을 모사하고 중성자 선원 등을 사용한 일부 에너지 영역에 대해 실험적으로 검증하여 각 감속재에 대한 에너지 검출하한치와 상한치, sensitivity, 각도의존성 등을 평가하고 적절한 선량 평가 알고리즘이 개발·적용되어야 할 것으로 판단된다.

### 3.2 항공 고도 우주방사선장에서의 선량계 조사 결과 및 논의

EXPACS을 통해 산출한 중성자에 의한 선량 기여율은 약 48.94%로 CARI-6로 계산한 운항승무원의 개인 피폭 선량에 적용한 결과 중성자 피폭 선량 범위는  $225.9 \mu\text{Sv}$  -  $444.6 \mu\text{Sv}$ 로 예측되었다. 각각의 운항승무원의 피폭 선량 계산 결과와 회수한 선량계의 판독값을 감속재 종류별로 표 4에 제시하였으며 중성자 피폭 선량과 비적 밀도와 의 관계는 그림 6에 나타내었다. 한 세트를 제외하고 지상에서의 백그라운드의 대부분은 선량계 자체 백그라운드보다 낮거나 비슷한 수준이었으며 항공 고도에 노출된 선량계의 비적 밀도는 두 백그라운드보다 높은 값을 나타내었다. 그러나 선량 크기에 따른 비적 밀도와 상관성은 각각의 감속재에 대하여  $r=0.486$  (HDPE),  $r=0.241$  (PA)으로 낮은 상관성을 보였다.

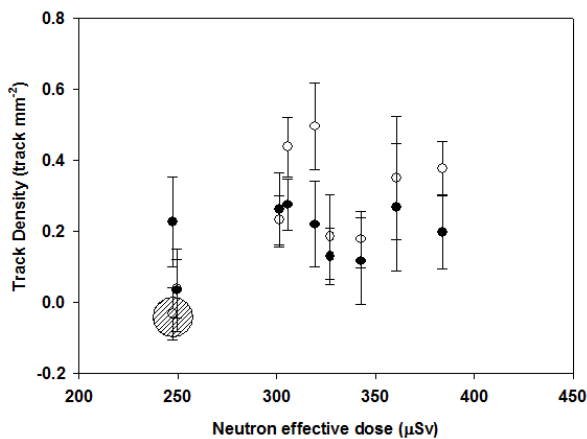
**Table 4.** Results of Application to Aviator (the values from CR-39 chips between each type of converters).

1) HDPE converters					
No.	Calculated dose (μSv)	Average track density (track·mm <sup>-2</sup> )		Net track density <sup>a)</sup> (track mm <sup>-2</sup> )	Uncertainty
		Aircraft altitude <sup>b)</sup>	Ground <sup>c)</sup>		
1	353.4	0.59	0.14	0.18	0.12
2	378.4	0.58	0.31	0.18	0.08
3	444.6	0.78	0.20	0.38	0.08
4	318.8	0.84	0.31	0.44	0.08
5	407.3	0.79	0.44	0.35	0.17
6	312.1	0.64	0.27	0.23	0.07
7	341.2	0.90	0.26	0.50	0.12
8	229.2	0.44	0.30	0.04	0.08
9	225.9	0.37	0.63	-0.03	0.07

2) PA converters					
No.	Calculated dose (μSv)	Average track density (track·mm <sup>-2</sup> )		Net track density <sup>a)</sup> (track mm <sup>-2</sup> )	Uncertainty
		Aircraft altitude <sup>b)</sup>	Ground <sup>c)</sup>		
1	353.4	0.53	0.29	0.13	0.08
2	378.4	0.52	0.12	0.12	0.12
3	444.6	0.60	0.18	0.20	0.10
4	318.8	0.68	0.16	0.28	0.07
5	407.3	0.73	0.46	0.27	0.18
6	312.1	0.67	0.31	0.26	0.10
7	341.2	0.62	0.32	0.22	0.12
8	229.2	0.44	0.36	0.03	0.12
9	225.9	0.29	0.24	0.23	0.13

a) Net track density=( b ) - d )-( c ) - d ), d is own background, 0.40  
 if c)-d is negative, considered as zero



**Fig. 6.** Comparison of track density from dosimeter exposed to cosmic radiation with expected neutron dose using CARI-5 and EXPACS ver. 2.21 (○ : HDPE, ● : PA, ⊘ : under the background track density).

이와 같은 결과는 비행기 내부 구조 및 선량계 위치에 따른 중성자 차폐 요인 등에 의해 항공 고도에 노출된 기간 동안 발생한 비적 밀도가 자체 백그라운드와 비교하여 많지 않은 데 비롯된 것으로 판단되며 향후 항공 고도에

서의 노출시간을 늘려 비적 수 대비 백그라운드를 증가시킴으로써 이 상관성은 높아질 것으로 예상된다. 본 연구에서 선정한 중성자 누적선량계를 항공승무원의 피폭 선량평가에 활용하기 위해서는 항공 고도에서의 최소 6개월 이상의 충분한 노출시간이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

항공 고도에서 RSNS 선량계의 적용 가능성을 평가한 결과, <sup>252</sup>Cf 중성자 선원에 대하여 비교적 좋은 선형성을 보이며 중성자의 입사각에 따른 비적 밀도의 변화 특성을 확인할 수 있었다. 반면, 항공 고도에서 실측된 선량계의 비적 밀도와 선량 평가 코드에 의해 평가된 선량은 낮은 상관성을 보였다. 이것은 선량계의 노출시간을 증가시키거나 보다 낮은 백그라운드의 CR-39 칩의 사용을 통해 향상될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 다양한 에너지의 중성자 조사 또는 모사에 의한 CR-39 칩의 중성자 에너지 및 입사각에 대한 의존성 평가가 보완되고 항공 고도에서의 최소 6개월 이상의 충분한 노출 시간이 확보된다면 본 선량계를 항공 고도에서의 중성자 선량을 평가하기 위한

개인 선량계로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

**감사의 글**

조사 및 연구수행에 적극적으로 협조해 주신 한국민간항공조종사협회 여러분과 선량계 배포/회수 및 관독에 도움을 주신 조윤희 선배님께 깊은 감사를 드립니다. 본 연구는 교육과학기술부 원자력기술개발사업 “생활환경중의 방사선 영향평가” 및 원자력안전규제기술개발사업 세부연구과제 “기존피폭 최적화 이행체계 구축”의 일환으로 수행되었습니다.

**참고문헌**

1. UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2000 REPORT Vol.1, 2008.
2. UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2008 REPORT Vol.1, 2010.
3. ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP 60, 1990.
4. European Commission. Evaluation of implementation of radiation protection measures for aircrew, Radiation Protection 156, 2009.
5. European Commission. Cosmic Radiation Exposure of Aircrew, Radiation Protection 140, 2004.
6. 한양대학교. 우주선 선량 계측 체계 수립과 비행고도 우주선 방사선장 특성 분석 및 피폭 선량 평가. KINS/ GR-300-3, 2005
7. 한국천문연구원. 북극항공로 우주방사선 안전기준 및 관리 정책 개발 연구. 2009
8. 이재진, 남옥원, 박귀중, 표창원. 국제우주정거장에서 우주 방사선을 측정하기 위한 조직등가비례계수기(TEPC) 개발 소개. 대한방사선방어학회 추계학술 발표회 논문요약집. 2011: 154-155
9. Bartlett DT, Hager LG, Irvine D, Bagshaw M. Measurements on concorde of the cosmic radiation field at aviation altitudes. Radiat. Prot. Dosim. 2000;91(4):365-376.
10. Tanner RJ, Bartlett DT, Hager LG. Operational and dosimetric characteristics of etched-track neutron detectors in routine neutron radiation protection dosimetry. Radiat. Meas. 2005;40:549-559.
11. Mitaroff A, Silari M. The CERN-EU high-energy reference field (CERF) facility for dosimetry at com-

- mercial flight altitudes and in space. Radiat. Prot. Dosim. 2002;102(1):7-22.
12. Vukovic B, Radolic V, Miklavcic I, Poje M, Varga M, Planinic J. Cosmic radiation dose in aircraft - a neutron track etch detector. J. Environ. Radioact. 2007;98(3):264-273.
13. Zhou D, O'Sullivan D, Flood E. Radiation field of cosmic rays measured at aviation altitudes by CR-39 detectors. Adv. Space. Res. 2006;37(6):1218-1222.
14. O'Sullivan D, Zhou D, Heinrich W, Roesler S, Donnelly J, Keegan R, Flood E, Tommasino L. Cosmic rays and dosimetry at aviation altitudes. Radiat. Meas. 1999;31: 579-584.
15. Hulber E, Selmeczi D. Counting recoil proton tracks on PADC without a pre-etching step. A novel approach for neutron dosimeter application. Radiat. Meas. 2005;40:616-619.
16. Csige I. Post-irradiation sensitization of CR-39 track detector in carbon dioxide atmosphere. Radiat. Meas. 1997;28:171-176.
17. Tayyeb ZA. Use of CR-39 polymer for radiation dosimetry. JKAU Eng. Sci. 2011;22(1):79-96.
18. Kim JL, Ha C, Yoon Y, Cross WG, Arneja A. Energy and angular response of CR-39 neutron track detector. Journal of the Korean Nuclear Society 1988;20(2):9.
19. Morelli B, Vilela E, Fantuzzi E. Dosimetric performance of the fast neutron dosimeter for ENEA personal dosimetry service. Radiat. Prot. Dosim. 1999;85(1-4): 105-108.
20. Fiechtner A, Wernli C. Individual neutron monitoring with CR-39 detectors at an accelerator centre. Radiat. Prot. Dosim. 1999;85(1-4):35-38.
21. Harvey JR, French AP, Jackson M, Renouf MC, Weeks AR. An automated neutron dosimetry system based on the chemical etch of CR39. Radiat. Prot. Dosim. 1997;70(1-4):149-152.
22. ICRU. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation, ICRU Report 57. 1998.

## Preliminary Study on Applicability of Accumulate Personal Neutron Dosimeter for Cosmic-ray Exposure of Aviators

Hyeong-Jin Kim<sup>\*</sup>, Byung-Uck Chang<sup>†,\*</sup>, Jong-In Byun<sup>†,\*</sup>, Myeong Han Song<sup>‡</sup>, and Jung-Ho Kim<sup>‡</sup>

<sup>\*</sup>University of Science and Technology, <sup>†</sup>Korea Institute of Nuclear Safety, <sup>‡</sup>Korea Research Institute of Standard and Science

**Abstract** - ICRP recommended that cosmic ray exposure to the pilot and cabin crew would be considered as an occupational exposure due to their relatively high exposure. Since 2012 with the Act No. 10908 (Natural radiation management), the guideline of cosmic ray exposure to the pilot was established in Korea. The applicability of the solid-state nuclear track detector for personal dose assessment of pilot and cabin crew was evaluated. Dose linearity and angle dependence of dosimeters to the neutron were evaluated by <sup>252</sup>Cf neutron emitting source. The track density has a good agreement with the dose ( $r^2=0.99$ ) and highly dependent on the degree of an angular of the dosimeter to the neutron source. In addition, the dosimeters (SSNTD) were exposed to cosmic ray in an aircraft during its cruising for more than two months in collaboration with Airline Pilots Association of Korea. Although the correlation between the track density from aircraft cruising altitude and expected neutron dose is low, however RSNS dosimeter could be used for personal neutron dosimeter. For application of RSNS as a personal dosimeter for pilot and cabin crew, additional studies are required.

**Keywords** : Cosmic radiation, Aircrew, Solid state nuclear etched-track detector, Neutron, RSNS dosimeter