



ICRP 간행물 132

비행에서 우주방사선 방호

Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation



대한방사선방어학회
방사선안전문화연구소



이 번역본 발간은 원자력안전위원회 원자력안전연구사업(과제번호: 2016년-26호)의 일환으로 이루어졌습니다.

표지 그림: 장거리 순항고도(해수면으로부터 10~12 km)를 운항하는 상용여객기
(사진자료: 대한항공)

ICRP 간행물 132

비행에서 우주방사선 방호

Radiological Protection from Cosmic Radiation in
Aviation

편집장

C.H. Clement

부편집장

N. Hamada

ICRP를 대신한 저자

L. Lochard, D.T. Barlett, W.Rühm, H. Yasuda J-F Bottollier-Depois

역주: 이재기

이 ICRP 간행물의 우리말 번역본은 ICRP의
허락(2016년 3월)을 받았으며 ICRP 정신에
따라 무료로 배포합니다.

국제방사선방호위원회

역자 서문

“동풍이 불어도 우리나라는 안전하다.”

2011년 3월 후쿠시마 원전 사고 당시 방송사 인터뷰에서 역자가 단언한 말이다. 당시 바람은 대개 서풍이어서 후쿠시마 원전에서 방출된 방사능의 대부분은 태평양으로 날아가 확산되고 침적했지만, 불운하게 동풍이 불어 방사능을 함유한 기류가 우리나라 쪽으로 직접 향하더라도 문제 없다는 발언이었다. 그렇게 말할 수 있었던 것은 1986년 체르노빌 원전사고 당시 주로 방사능이 날아간 방향에 있는 스웨덴 국민이 그해에 받은 선량을 평가한 결과가 0.2 mSv로 보고되어 있기 때문이었다. 체르노빌 원전에서 스웨덴까지 거리는 약 1000 km로서 후쿠시마 원전에서 우리나라까지 거리와 비슷하다. 당시 역자는 후쿠시마 원전에서 대기로 방출된 방사능의 총량이 원자로가 완전히 폭발한 체르노빌 원전보다는 작을 것이라고 보았다(후쿠시마에서는 원자로 3기가 사고를 일으켰지만 후일 평가된 방출량은 체르노빌 방출량의 1/7 정도로 보고되고 있다). 그래서 동풍이 불어도 우리 국민이 받을 방사선량은 체르노빌 사고 당시 스웨덴 국민이 받았던 선량보다 낮은 0.1 mSv 수준일 것으로 보았다.

실제로는 주로 서풍이 불었고, 2주 쯤 지나서야 북극권을 돌아온 기류가 우리나라에 도달했다. 이때 공기나 빗물을 정밀 측정했을 때 방사능을 검출할 수는 있는 수준이었지만 그로 인한 선량은 일상적으로 받고 있는 자연방사선 선량과도 비교되지 않을 정도로 작아 무시할 수준이었다.

국내에서 후쿠시마 원전에서 나온 방사능이 검출되었다는 보고가 있자마자 사회적으로 큰 혼란이 있었다. 생수를 다량으로 구매하는 사람이 있었는데, 방사능 피해를 줄여 준다고 잘못 알려진 미역과 다시마, 심지어는 천일염까지 품귀현상이 벌어졌다. 비가 내린 날 경기도 초등학교는 휴교하기도 있다. 이어서 수산물의 방사능 오염 우려 때문에 오랫동안 수산시장이 타격을 받았다. 동풍이 불어도 안전하다는 필자의 말은 사회 동요를 막는데 별 힘이 되지 못했던 것 같다.

방사능에 대한 두려움은 본능처럼 우리 마음에 각인되어 있는 것으로 보인다. 그래서 사소한 방사선 사건에도 사회적 과민반응이 일어난다. 후쿠시마 사고로 우리나라에 날아온 방사능은 미미했던 덕분에 한 차례 소동처럼 지나갔지만, 더 가까운 국내 원전이나 중국 원전에서 사고가 발생해 우리나라가 후쿠시마 당시보다 100배 정도 높은 방사능으로 영향을 받는다고 가정할 때 일어날 혼란은 불보듯하다. 후쿠시마 사고 당시국민 일본에서도 방사능 피폭으로 인한 직접 영향으로 사망한 사람은 없음을 고려하면 이런 혼란의 주된 원인은 방사선 위험에 대한 오해이다.

이러한 불필요한 혼란을 줄이기 위해서는 우리가 평소 받고 있는 방사선 실태를 이

해하는 것이 중요하다고 본다. 원자력이나 X선 같은 인공방사선이 아니더라도 우리는 자연계에서 상당한 방사선을 지속적으로 피폭하고 있다. 그 중 하나가 이 간행물에서 다루는 비행에서 우주방사선 피폭이다.

우주방사선은 지구 밖에서 오는 것이어서 대기권 공기가 차폐 역할을 한다. 그래서 지표에서 공중으로 올라갈수록 차폐 공기층이 얇아져 우주방사선 강도가 높아진다. 우주방사선은 본래 존재하는 것이지만 우리가 빠른 여행을 위해 고공으로 올라가기 때문에 추가 피폭을 받는 것이다. 즉, 우리의 의도된 행위로 인해 방사선을 피폭하는 것이므로 개념적으로 계획피폭상황이다(이 간행물에서는 기존피폭상황으로 다루지만 이 차이에 대한 논의는 본문의 역주에서 설명한다).

이 글을 쓰는 날(2017년 2월 15일)에 Sievert 프로그램으로 서울에서 프랑스 파리 왕복여행을 가정할 때 받을 것으로 보는 우주방사선 선량은 약 0.11 mSv로 나왔다. 후쿠시마 사고 당시 바람이 우리나라로 불었다고 가정할 때 예상되는 선량과 비슷하다. 이 사실은 당시 우리가 얼마나 공연한 걱정을 했는가를 보여준다. 비행기 안에서 받는 우주방사선 피폭이 싫어서 기회가 주어진 유럽 여행을 포기하는 사람은 없을 것이기 때문이다.

가끔씩 항공여행을 하는 일반승객(가령: 1년에 2회의 장거리 여행) 수준에서는 비행에서 받을 우주방사선 선량은 0.2 mSv 정도이고 이는 우리가 평균적으로 받는 연간 자연방사선 피폭량 4 mSv의 5%에 지나지 않으므로 우려할 대상이 아니다. 그러나 비행시간이 많은 항공승무원이나 빈번히 여행하는 상용승객이라면 연간 3 mSv를 넘어 피폭할 수 있다. 우리나라 원전에서 실질 방사선작업종사자(등록만 되어 있고 실제로 피폭이 거의 없는 직원을 제외한)의 연 평균 선량이 3 mSv 수준임을 상기하면 비행에서 우주방사선 피폭이 전혀 무시할 대상은 아님이 분명하다. 따라서 사실상 방사선작업종사자인 이런 그룹에 속하는 사람은 자신의 우주방사선 피폭에 대해 알고 필요에 따라 적절한 방호조치를 요구할 수 있는 권리가 있음을 이해할 필요가 있다.

일반승객이라면 항공여행에서 받는 방사선을 우려할 정도는 아니지만 정부나 항공사의 입장에서는 국민보건 차원에서 이를 알릴 필요는 있다. 일반승객이 임신한 여성이라면 태아의 방사선피폭은 걱정할 수도 있기에 이러한 정보의 파급이 더 중요하다. 이 간행물의 목적 중 하나도 바로 국민의 알 권리를 존중하는 것이다.

2017년 2월

역주자 이 재 기

대한방사선방어학회 부설 방사선안전문화연구소장

ICRP 위원

서문

“드디어, 내가 해냈다!”

비행사 찰스 린드버그가 *Spirit of St. Louis* 호로 미국 롱아일랜드부터 5800 km를 비행한 후 프랑스 Le Bourget 공항에 착륙했을 때 처음으로 한 말이다(The New York Times 1924). 당시 구경꾼들은 추위와 피로, 그리고 기상조건을 이겨낸 선구자의 용기를 찬양했다. 누구도 방사선피폭에 대해서 얘기하지 않았다. 그럴 만한 이유가 있었는데, 당시에는 우주방사선에 대해 알던 사람은 극소수 과학자들뿐이었다. 린드버그의 선구적인 업적은 대서양 횡단비행의 길을 열었다. 린드버그 비행 이후에 항공기 성능과 용량의 증가, 저가 항공사 출현, 그리고 관광산업 확대에 의해 항공승객 숫자는 엄청나게 증가했다. 2014년에 대략 32억 명의 항공표가 팔렸고, 그 수는 2030년까지 2배 증가할 것으로 예상된다(ICAO 2015). 상용 제트기 시장도 매년 대략 4% 성장을 이어가서 2032년에는 항공기 수도 2배로 증가할 것으로 예상된다. 그리하여 항공승무원과 승객 개인 또는 집단의 우주방사선 피폭이 크게 증가할 공산이 높다.

이런 맥락에서 ICRP는 2010년 10월 남아공 케이프타운에서 개최한 회의에서 비행에서 우주방사선 피폭에 대한 방호지침을 개발하여 제4분과위로 보고할 작업그룹 83 설치를 승인했다.

작업그룹 83의 업무는, 항공승무원과 승객, 특히 상용승객을 우주방사선으로부터 방호하는 데 ICRP 2007년 권고(ICRP 2007)를 적용함에 대해 설명하고 명확히하는 보고서를 마련하는 것이다. 비행에서 방사선피폭 관리를 위해 해당 피폭상황의 유형과 이행할 방사선 방호원칙을 보고서에서 논의하도록 했다. ICRP가 권고한 방사선방호체계의 초석인 최적화원칙의 이행에 특별히 주목하도록 요청했다.

작업그룹 83의 위원은 다음과 같다.

J. Lochard (위원장)
D.T. Bartlett

J-F. Bottollier-Depois
R. Hunter

W. Rühm
H. Yasuda

객원위원은 다음과 같다.

S. Mundigl

제4분과위 심층검토위원은 다음과 같다.

D.A. Cool

M. Kai

목 차

역자 서문	iii
서문	v
사용약어	viii
논설	ix
요지	1
요점	3
용어집	6
제1장 서론	12
제2장 비행에서 우주방사선 피폭의 특성	15
2.1. 역사적 배경	15
2.2. 선원과 피폭경로	16
2.3. 태양 플레어	19
2.4. 항공기에서 개인피폭 평가	20
2.5. 항공승무원 피폭	22
2.6. 항공승무원에 대한 역학연구	25
제3장 승객과 항공승무원을 위한 ICRP 방호체계	27
3.1. 피폭상황 유형과 피폭범주	27
3.2. 방호전략 정당화	29
3.3. 방호최적화	30
제4장 ICRP 방호체계의 이행	33
4.1. 방호조치	33
4.2. 차등접근	34
4.3. 배태아 방호	37

4.4. 홍보 및 이해당사자 참여.....	39
결론	41
참고문헌	43
부록 A. 몇몇 항로에 따른 우주방사선 피폭	47

<역주> 사용 약어

ALARA as low as reasonably achievable	합리적 범위에서 낮게
CME coronal mass ejection	코로나 질량방출
EDT Eastern Daylight Time	북미동부시간대
EURATOM European Atomic Energy Community	유럽원자력공동체
EURADOS European Radiation dosimetry Group	유럽방사선량계측그룹
FAA Federal Aviation Administration	미국 연방항공청
GCR galactic cosmic radiation	은하 우주방사선
GLE ground-level enhancement	지면준위 상승
ICAO International Civil Aviation Organization	국제민간항공기구
ICRP International Commission on Radiological Protection	국제방사선방호위원회
ICRU International Commission on Radiation Units and Measurement	국제방사선단위측정위원회
ISO International Standardization Organization	국제표준화기구
LET linear energy transfer	에너지전달선밀도
NASA National Aeronautic and Space Administration	미국 항공우주국
RBE relative biological effectiveness	생물학적효과비
SCR solar cosmic radiation	태양 우주방사선
SPE solar particle/proton event	태양입자사건
TGF terrestrial gamma-ray flash	지상 섬광감마선
UNSCEAR UN Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation	유엔방사선영향과학위원회

우주방사선 바다에서 비행하기

전리방사선은 자연계 어디나 존재한다. 지구가 형성되기 훨씬 이전 태양의 중심에서 생성된 천연 방사성원소인 토륨, 우라늄, 칼륨과 그 붕괴 생성물은 생물 탄생 이전부터 지구상에 존재해 왔고 앞으로 수십억 년은 더 지구에 존재할 것이다. 천연 방사성핵종은 바위, 토양, 물, 공기, 동식물, 사람에게서 다양한 수준으로 발견된다. 지각방사선에 더해, 우리는 태양과 우주에서 오는 우주방사선을 피폭한다. 우주방사선은 우주 형성의 혼돈이나 별을 태우는 거대한 과정에서 생성된다. 지구 생명체는 이러한 ‘방사선 바다’에서 진화해왔고, 미래 세대 또한 우리처럼 이렇게 살아 갈 것이다.

전리방사선은 직접 감지되지 않아서, 빌헬름 뢰트겐이 X선을 발견하고 나서야 그 존재가 밝혀졌다(Röntgen 1895). 그 이듬해 앙리 베크렐은 방사선이 자연환경의 일부임을 발견했다(Becquerel 1896a,b). 우주방사선은 16년 후에 Victor Hess가 고고도 열기구 비행을 사용한 실험을 통해 발견하였다(Hess 1912).

오랫동안 방사선방호는 원자로나 입자가속기에서 생산된 방사성동위원소나 X선처럼 사람이 농축하거나 만들어낸 방사선원에 초점을 맞춰왔다. 그러나 최근에는 특히 라돈과 같은 특정 천연방사선원이 주목을 받기 시작했다. 라돈은 전세계적으로 자연방사선 평균 피폭량의 절반을 차지한다(UNSCEAR 2010). 국제방사선방호위원회(ICRP)는 최근 ICRP 126(ICRP 2014)에서 라돈 피폭과 관련된 방사선방호를 다뤘다.

일상적 우주방사선 피폭은 우리가 사는 환경의 자연적 일부이다. 지구의 자기장과 대기가 우주방사선에 대해 보호막을 제공하기에, 최근까지도 우주방사선은 중요한 문제로 간주되지 않았다. 그러나 지금은 500명 이상의 우주비행사가 이 보호막 너머로 나아가 크게 높은 우주방사선 선량률에 접했고, 미래에 그 숫자는 더욱 증가할 것이다. 이런 특정 여건은 ‘우주에서 우주비행사의 방사선피폭 평가’라는 제목의 ICRP 123(2013)에서 다루었다.

여기에 더해, 상용 항공여행 증가 때문에 이제 우주방사선 피폭 문제는 항공승무원과 승객에게 중요해지고 있다. 높은 고도로 비행할 때 지상에서보다 더 높은 수준의 우주방사선을 피폭한다. 위도와 고도, 그리고 태양활동 정도에 따라 다르지만, 전형적인 상용 운항고도에서 방사선량률은 일반적으로 2~10 $\mu\text{Sv/h}$ 범위에 있다(ICRU 2010). 이런 선량 값이 여타 자연방사선 피폭으로 인한 연간 선량과 견주어 유의미하려면 연간 수백 시간을 비행해야 한다. 자연방사선 피폭의 세계 평균치는 2400 μSv 이고, 전형적 범위는 1000~13000 μSv 이다(UNSCEAR 2010). 그래서 이 간행물은 매년 수백 시간을 하늘에서 보내기도 하는 항공승무원과 상용승객에게 초점을 맞춘다.

대기 중 우주방사선은 입자 조성과 에너지가 복잡한 1차장(primary field)과 2차장을 형성한다. 그러한 방사선장 전역을 모두 감시할 수 있는 기기는 대개 부피도 크고 견고하지 않기에 항공승무원이나 승객의 선량을 직접 측정하는 일은 쉽지 않다. 그래서 지난 20여년간 연구는 소프트웨어 프로그램 코드에 근거한 선량 평가에 치중해 왔다. 방사선장이 비교적 안정적인데다 특정 지역에서 변동은 태양활동이 유발하는 지면준위 상승(ground-level enhancement(GLE))과 관련해 가끔씩만 발생하기 때문에 이러한 코드의 사용이 가능하다. 이런 코드는 보통 비행계획에 제시되는 비행 항로의 위도, 경도 및 기압고도(barometric altitude) 정보에 의존한다.

측정된 중앙값에서 $\pm 20\%$ 이내의 오차로 승무원이나 승객의 선량을 구할 수 있게 해주는 검증된 코드나 모델이 국제적으로 11종 이상 있다. 코드는 대개 보수적 평가를 제공하기에, 이 정도면 과학계에서 수용할 수 있는 것으로 간주된다.

8~12 km의 전형적 비행고도에서 근무하는 유럽연합 항공승무원은 1996년부터 직무 피폭 종사자로 인정되어 왔다. 그래서 유럽의 모든 항공사는 승무원의 방사선피폭 기록을 보존하도록 요구된다. 2006년부터 유럽위원회령 EURATOM/96/29(EURATOM 2006)이 시행되어 모든 회원국이 준수하고 있다. 캐나다는 1990년대에 ICRP 60(1991) 권고를 채택해서 항공승무원의 방사선 감시를 요구했고, 이를 위해 PCAIRE 프로그램이 개발되었다. 일본 방사선심의회는 2006년 항공승무원 선량의 감시와 관리에 관한 지침을 발행하여, 국제선과 국내선 항공사 모두에게 자발적으로 관련 기록을 보관하도록 강력히 촉구했다.

미국은 방사선피폭에 관한 교육자료와 연방항공청(Federal Aviation Administration(FAA)) 민간항공우주의료원(Civil Aerospace Medical Institute)이 권고한 한도를 통해 항공승무원 안전을 조정하고 있다. 또한 FAA는 위에서 논의한 것과 동일한 비행계획 변수를 이용하는 컴퓨터 프로그램을 내놓았고, 개인의 피폭과 근무시간에 대한 자가감시와 조치를 권장하고 있다. 그러나 항공사의 공식적 방사선감시 프로그램을 의무화하지는 않고 있다.

이들 코드로 비교적 쉽게 선량을 평가할 수 있는데, 선량평가는 방사선방호에서 결정적 단계이다. 다음 단계는 방호방안을 검토하고 용인할 수 없는 피폭과 불평등한 선량 분포를 피하기 위해 개인선량 기준을 활용해서 방호최적화를 도모하는 것이다.

ICRP 103(2007)에서, ICRP는 세 종류 피폭상황, 즉 계획피폭, 기존피폭, 비상피폭 상황을 도입했다. 이러한 피폭상황은 피폭범주(일반인피폭, 직무피폭, 의료피폭)와 함께 어떤 특정 상황에서 방사선방호를 위한 적절한 접근법을 명확히 함을 돕는다.

이 간행물은 우주방사선 피폭이 어떠한 방호를 결정하기 전에 그 선원이 존재하므로 기존피폭상황이라고 확인한다. 나아가 항공승무원의 우주방사선 피폭이 직무피폭이며 그래서 이 경우 방호방안이 제한적이라 할지라도 고용주는 방사선방호에 역할을 담당해야 한다고 말한다. 여기에는 어떠한 모순도 없다. 기존피폭상황에서도 직무피폭은 발생할 수 있고, 기존피폭이라 해서 방호조치가 계획될 수 없음을 의미하는 것은 아니다.

개인선량 제한과 함께 방호최적화에 일반적 접근은 모든 여건에 적용된다. 피폭범주와 피폭상황 유형은 어떻게 이를 달성할지에 영향을 줄 것이다. 나아가 상황의 특수성이 어떤 수단이 현실적이고 효과적이며 가치가 있을지를 결정하게 된다. 이 간행물은 비행에서 우주방사선 방호에 고유한 권고를 제공한다.

Ian Getley

Christopher Clement(ICRP 과학서기 겸 ICRP연보 편집장)

참고문헌

- Becquerel, H., 1896a. Sur les radiations émises par phosphorescence. Comptes Rendus 122, 420-421.
- Becquerel, H., 1896b. Sur les radiations émises par phosphorescence. Comptes Rendus 122, 501-503.
- EURATOM, 2006. Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 Laying Down Basic Safety Standards for the Protection of the Health of Workers and the General Public Against the Dangers Arising from Ionizing Radiation. Off. J. Eur. Commun. No L 159/1. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:01996L0029-20000513&from=EN> (last accessed 14 May 2016).
- Hess, V.F., 1912. Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. Physikalische Zeitschrift 13, 1084-1091.
- ICRP, 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3).
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4).
- ICRP, 2013. Assessment of radiation exposure of astronauts in space. ICRP Publication 123. Ann. ICRP 42(4).
- ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3).
- ICRU, 2010. Reference data for the validation of doses from cosmic-radiation exposure of aircraft crew. Report 84. J. ICRU 10(2).
- Röntgen, W., 1895. Über eine neue Art von Strahlen. Sitzungsberichte der Würzburger Physik-med. Gesellschaft 22, 153-157.
- UNSCEAR, 2010. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly. United Nations Scientific Committee on

the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York.

비행에서 우주방사선 방호

ICRP 간행물 132

2016년 3월 ICRP 승인

요지— 이 간행물에서 국제방사선방호위원회(ICRP)는 현행 ICRP 방사선방호체계, 비행에서 방사선피폭에 관한 최신 자료 및 비행에서 피폭관리에 세계적으로 확보된 경험을 고려하여 비행에서 우주방사선 방호에 관해 갱신된 지침을 제공한다. 이 간행물은 우주방사선의 기원, 항공승무원과 승객이 우주방사선을 피폭하는 방식, 이런 기존피폭상황에 적용되는 기본 방사선방호원칙, 그리고 가용한 방호조치를 설명한다. 최적화원칙 이행을 위해, ICRP는 개인이 받을 수 있는 피폭 수준에 상응하는 차등접근을 권고한다. 목적은 가장 많이 피폭하는 사람의 피폭을 합리적 수준으로 유지하는 것이다. 또한 ICRP는, 우주방사선에 대한 인식을 높이고 이해당사자의 유익한 결정을 뒷받침하도록 정보를 배포할 것을 권고한다.

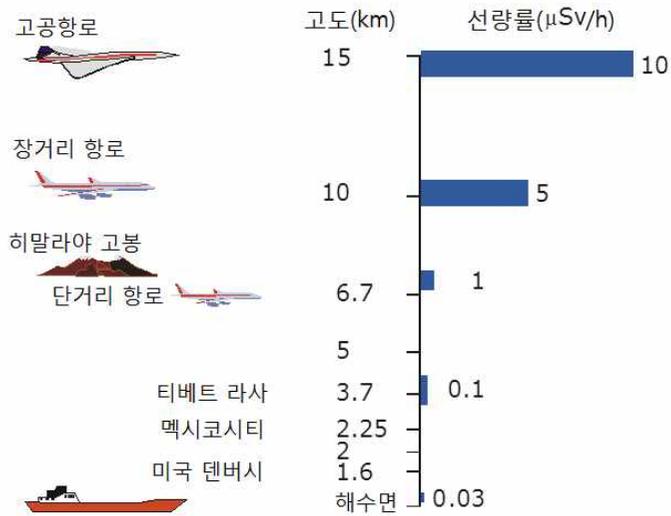
중심어: 우주방사선, 비행, 항공승무원, 상용승객, 차등접근

ICRP를 대신한 저자

L. Lochard, D.T. Barlett, W. Rühm,

H. Yasuda, J-F Bottollier-Depois

고도에 따른 전형적 우주방사선량률



<역주> 고도에 따른 우주방사선 선량률 변화(중위도, 전형적 태양활동 기준). 보편적 장거리 항로인 지상 10~12 km에서는 시간 당 $5 \mu\text{Sv}$ 정도를 피폭한다. 고도가 낮은(7 km 내외) 단거리 비행은 선량률도 현저히 낮고 비행시간도 짧아 우주방사선 피폭이 관심사가 아니다.

요점

- 우주방사선은 우주와 태양에서 기원하는 고에너지 입자로 구성된다. 기본적으로 고도와 위도가 높아질수록 선량률이 증가한다. 태양 플레어로 인해 선량률의 급속한 증가가 발생할 수 있는데, 이 때 항공기로 비행하면 우주방사선 피폭이 증가한다.
- 항공승객 수는 계속해서 증가하고, 항공기 기술의 발전으로 더 높은 고도에서 더 오래 비행할 것이라는 사실을 고려할 때 항공승무원과 승객의 우주방사선 누적 피폭도 증가할 것이다. 따라서 ICRP는 방호전략을 마련하고 이행하는 것이 중요하다고 본다.
- ICRP는 우주방사선 피폭을 기존피폭상황으로 보며,¹⁾ 여기에는 태양 플레어에 의한 것도 포함한다.²⁾
- 계속해서 ICRP는 개인적인 이유나 직무로 탑승하는 보통승객(occasional passenger)이나 상용(常用)승객(frequent flyer) 모두의 피폭을 일반인피폭으로 간주해야 하고,³⁾ 항공승

1) <역주> 역자는 이에 동의하지 않는다. 이 간행물에서 논리는 우주방사선이 본래 존재하기 때문에 이로부터 피폭이 기존피폭상황이라는 것인데 옳지 않다고 본다. 우주방사선이 시원적으로 존재하는 것은 분명하지만 피폭을 유발하는 원인은 사람의 행위인 고공비행 때문이다. 즉, 이미 피폭이 진행되고 있는 것이 아니라 사람의 행위(비행)로 인해 피폭이 도입되는 것이므로 계획피폭상황으로 보는 것이 합리적이다.

다른 각도에서, 항공승무원 피폭에 개인선량한도를 적용할 것인가 아닌가를 생각해보면 더욱 분명해진다. 물론, 현재 우주방사선 강도와 승무원의 비행시간 수준에서는 승무원이 기껏 연간 8mSv 이내로 피폭하기 때문에 직무피폭 선량한도를 무조건 만족하므로 선량한도 적용 여부 자체가 무의미하다. 그러나 가령 태양활동의 항상적 변화로 우주방사선 강도가 3배 정도 높아졌다고 가정하면 같은 근무조건일 때 연간 20 mSv를 넘어 피폭하는 승무원도 발생할 것이다. 이때 계획피폭상황에 대한 직무피폭 선량한도인 20 mSv를 준수하기 위해 비행시간을 단축할 것인가 아닌가를 묻는다면 비행시간을 단축해야 한다는 답을 예상할 수 있다. 다시 말해서 '기존피폭상황'에서 '기존'이란 선원이 존재하는 것이 아니라 피폭상황이 이미 존재할 때 적용하는 개념으로 이해하는 것이 적절하다.

2) <역주> 태양 플레어가 발생하면 지면에 도달하는 우주방사선 강도가 수~수십 배 증가할 수 있다. 그러나 불행히도 아직은 언제 얼마나 강하게 태양 플레어가 발생할지 잘 예측할 수 없다. 그래서 적어도 현재로서는 이렇게 예측할 수 없는 사건으로 인한 피폭은 우발적 피폭(또는 사고피폭)으로 보는 것이 합리적이다. 우발적 피폭 위험은 잠재피폭으로서 피폭상황과는 달리 보는 것이 옳다.

미래에 태양 플레어를 잘 예측할 수 있게 된다면 우주방사선 증가를 예상하면서 비행하는 것이므로(심각한 정도라면 그 시간 동안 항공사가 비행을 자제하겠지만) 계획피폭상황으로 간주하게 될 것이다.

3) <역주> 현행 ICRP 권고에서는 직무피폭이나 의료피폭이 아니면 일반인피폭으로 분류하고 있어 적어도 개인적 이유로 탑승하는 승객의 피폭은 일반인피폭이 된다. 그런데 모든 항공승객은 자신의 상당한 이유로 탑승하고 이으로써 우주방사선을 피폭한다. 따라서 방사선방호 입장에서 볼 때 자신의 의지와 무관하게 피폭하는 사람(예: 원자력시설 주변 주민)과는 입장이 다르다. 역자는 방사선 방호에서 자신의 의지와 무관하게 동의없이 피폭하는 사람의 피폭을 '일반인피폭'으로 보는 것이

무원의 방사선피폭은 직무피폭으로 다루어야 한다고 본다.

- ICRP는, 이 특별한 여건에 고유한 관심을 기울여 마땅한 최대 피폭자의 피폭 수준을 고려하기 위해, 전형적으로 5~10 mSv/년 범위에서 선량 참조준위를 선정해서 피폭을 합리적으로 달성할 수 있는 낮은 수준으로 유지할 것을 권고한다.
- 방호전략의 현실적 이행을 위해, ICRP는 개인의 비행빈도에 근거한 차등접근을 권고한다.
 - 대부분 항공승객은 가끔 비행기를 이용하는 보통승객으로서 이들의 우주방사선 피폭은 총 방사선피폭의 맥락에서 무시할만한 것으로 간주된다. 그렇더라도 ICRP는 모든 승객에게 우주방사선 일반정보가 가용하도록 할 것을 권고한다.
 - 개인적 이유나 직무 때문인 상용승객에 대해서는, 일반정보 제공 권고에 더해 개인이 필요하다고 볼 때 비행빈도 조정을 고려하도록 사람들이 선량 자가평가를 할 수 있게 하기를 ICRP는 장려한다.
 - 피폭량이 항공승무원과 견줄 정도가 되는 일부 상용승객에 대해서는, 지배적 여건에 따라 본인과 고용주의 협의를 통해 사안별로 요건을 정할 것을 ICRP는 권고한다.
 - 항공승무원에 대해서는 항공사 경영관리자는 다음을 이행하기를 ICRP는 권고한다.
 - i) 교육 프로그램을 통해 승무원 각자에게 우주방사선에 대해 알림
 - ii) 승무원의 방사선량을 평가함
 - iii) 승무원 개인 선량과 누적 선량을 기록함. 이 자료는 당사자에게 알리고, 적정 기간, 최소한 당사자의 기대수명 정도 동안은 보존해야 한다.

적절하다고 본다. 순전히 피동적으로 피폭하기 때문에 이를 용인하는 수준이 낮아지고, 그래서 선량한도도 매우 낮게 설정된다. 만약 일반인피폭의 개념을 이렇게 이해한다면 항공승객의 피폭은 일반인피폭이 아니다. 개인적 이유(예: 가족여행)라도 분명하고 이득이 있는 동인이 있으므로 동인 없는 일반인피폭과는 구분되어 마땅하다. 이 경우 개인 승객은 일종의 자기고용 종사자와 유사하여 직무로 여행하는 승객과 다름없다고 볼 수 있으며, 그 피폭은 계획피폭상황이 된다(비행에서 우주방사선 피폭에 대해 이해한다는 전제에서). 즉, 원론적으로 개인 목적의 승객도 동의피폭자(아직 필자의 용어)이므로 일반인 선량한도보다는 높은 선량도 인정할 수 있다. 동의피폭의 조건이 성립하기 위해서는 승객이 우주방사선 피폭에 대해 이해해야 하므로 정부와 항공사가 비행에서 우주방사선 피폭에 대해 포괄적 정보를 제공하는 것이 필요하다.

그러나 개인적 이유 또는 직무로 인한 여행이라도 보통승객 수준에서 그러한 동의피폭에 대해 어떤 규제관리(예: 개인선량 평가, 선량기록 보존 등)를 고려하는 것은 현재의 우주방사선 피폭 수준에서는 합리적이지 않다. 즉, 보통승객에 대해서는 항공사나 정부에게 비행에서 우주방사선 피폭에 대해 일반적 정보를 제공할 책무를 부과하는 것 외에는 피폭자에 대한 모든 규제관리를 면제하는 것이 적절하다. 선량이 한정적으로 낮아 면제하더라도 유의한 위험에 노출되지 않기 때문이다. 상용승객도 개인마다 탑승빈도가 다르지만 항공승무원 못지않게 탑승하는 경우도 있다. 따라서 상용승객의 고용주(개인적 이유라면 자기고용주인 승객 본인)에게 항공승무원 또는 보편적 개념의 방사선직업자에 준하는 관리를 요구하는 것이 일관된 접근이다. 그러면 선량의 평가나 탑승빈도 조절, 피폭기록 유지 등은 고용주의 책임이 된다.

iv) 선정된 선량 참조준위를 고려하고 해당 승무원과 협의에 따라 필요한 경우에는 비행근무표를 조정함.

- 대부분의 목적을 위해서, 적절히 검증된 계산 프로그램⁴⁾ 사용은 승무원이나 승객의 선량 평가에 충분하다고 본다.
- 개인적 이유나 직무 때문인 임신한 상용승객은 피폭 자가평가에 근거해 배태아의 우주방사선 피폭을 줄이기 위해 비행빈도를 조정하기를 바랄 수도 있다. 임신한 승무원에 대해서는, ICRP의 권고에 부합해 임신을 통보받으면 항공사는 나머지 임신기간 동안 승무원 근무를 조정할 수 있는 대책을 마련해 두어야 한다.
- ICRP는 정부 당국이나 항공사가 우주방사선에 대한 인식을 고취하는 정보를 배포하여 관련된 모든 이해당사자의 유익한 결정을 지원하며, 직무피폭을 받는 사람의 방사선방호문화를 진작시킬 것을 권고한다.

4) <역주> 이 목적으로 개발된 프로그램(우주방사선 계산기)은 온라인 또는 오프라인으로 가용하다. 예를 들어 Sievert(<https://www.sievert-system.org/?locale=en>)나 PCAIRE(<http://flyer.pcaire.com/>)는 온라인으로 가용하며, FAA의 Cari-6는 오프라인(https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari6/)으로 가용하다. 상용 코드로 판매하는 프로그램(예: Epcard)도 있다.

용어집⁵⁾

피폭범주^{category of exposure}

ICRP는 방사선 피폭의 범주를 직무피폭, 일반인피폭, 그리고 의료피폭의 세 범주로 구분한다.

우주방사선^{cosmic radiation}

우주방사선은 외계에서 기원한 주로 원자핵인 고에너지 입자와 그것이 대기나 기타 물질과 상호작용으로 생성시킨 입자로 구성된 전리방사선이다.

1차 우주방사선은 우주와 태양으로부터 지구 궤도로 입사하는 우주방사선이다.

2차 우주방사선은 1차 우주방사선이 대기나 기타 물질과 상호작용으로부터 직접 또는 폭포반응^{cascade reaction}으로 생성된 입자로 구성된다. 항공기에서 방사선 측정이나 방사선방호와 관련해 중요한 입자는 중성자, 양성자, 광자, 전자, 양전자 및 뮤온이, 그리고 덜 중요하게는 파이온 및 양성자보다 무거운 핵 이온이 있다.

은하 우주방사선^{galactic cosmic radiation(GCR)}은 태양계 밖에서 기원한 우주방사선이다. 태양 우주방사선^{solar cosmic radiation(SCR)}은 태양에서 오는 우주방사선이다.

선량기준^{dose criteria}

불평등을 겨누고 적절한 방호를 보장하려는 방호최적화를 위해 경계조건을 제공할 목적으로 방사선 방호프로그램의 일환으로 수립하는 어떤 개인선량 기준의 일반적 호칭. ICRP가 쓰는 용어인 ‘참조준위’, ‘선량제약치’, ‘선량한도’는 모두 특정 여건에서 선량기준의 예이다.

배아^{embryo}

자궁에서 발달 초기 단계(태령 3개월 이내)에 있는 태내 사람.⁶⁾

5) 이 간행물 발간 시점에서 ICRP는 일부 부정확성과 비밀관성 때문에 ICRP 103(2007)에 포함된 용어집을 수정 중이다. 이 간행물의 용어 정의는 ICRP 103의 용어집 내용보다는 그 본문 내용을 참조했다.

6) <역주> 수태 후 언제까지를 배아로 보는지, 또는 배아가 ‘사람’인지에 대해서는 분명한 합의가 없다. 수정 후 2주 이내에 착상하고 8주가 지나야 모든 기관이 형성되므로 이 기간까지 수태물을 배아로 보는 경향이다. 사람으로 보는 것은 윤리문제와 연계되어 의견이 다양한데 국내에도 착상되어 원시선^{primitive streak}이 형성된 때부터는 ‘사람’으로 봐야 한다는 판례도 있지만 배아 단계를 넘어야 사람이라는 판례도 있다. 배아와 태아의 구분이 정확하지 않기에 이 번역본에서도 이전 번역물과 같이 배아와 태아를 묶어 ‘배태아’라는 용어를 사용한다.

비상피폭상황emergency exposure situation

비상피폭상황은 계획된 선원의 관리 상실이나 관리 밖 선원(예: 악의적 사건)과 관련된 예상치 못한 사건으로 발생하는 피폭상황이다. 비상피폭상황은 피폭을 피하거나 완화시키기 위해 긴급한 적시 대응을 요구한다.⁷⁾

고용주employer

상호합의 관계에 따라 고용한 상태에 있는 종사자에 대해서 인정된 책임, 헌신, 의무를 지는 기관, 기업, 합자회사, 회사, 연합, 기업합동, 공공 혹은 사립 기관, 집단, 정치나 행정 실체, 또는 기타 국가 법률이 규정하는 사람.⁸⁾

기존피폭상황existing exposure situation

기존피폭상황은 피폭을 관리하려는 결정을 내릴 때 이미 존재하는 방사선원⁹⁾으로부터 비롯된 피폭상황이다. 선원은 천연선원(우주방사선, 라돈, 기타 천연방사성물질)과 인공선원(과거 행위로부터 장기적 피폭, 사고 및 방사선 사태)을 포함한다. 피폭을 특성화하는 것은 피폭관리의 전제조건이다.

피폭상황exposure situation

천연 혹은 인공 방사선원이 다양한 경로를 통해 파급되어 사람이거나 기타 생물군이 방사선을 피폭하는 상황.¹⁰⁾

피폭경로exposure pathway

방사선이나 방사성핵종이 사람에게 도달하여 피폭을 야기하는 경로.

7) <역주> 잘못 해석하기 쉬운 정의이다. 가령 사고피폭은 관리를 벗어난 선원으로 인해 발생할 수 있지만 이미 피폭이 종료되어 버렸다면 피폭상황이 아니고 따라서 비상피폭상황도 아니다. 단순한 숙명적 사고피폭일 뿐이다. 원전에서 사고가 발생했다(선원이 관리를 벗어남)고 해서 그로 인한 모든 피폭이 비상피폭상황은 아니다. 사고진압을 위해 긴급작업자가 매우 선량률이 높은 구역에 투입된다면 그 피폭상은 비상피폭상황이 옳다. 그러나 선량률이나 오염이 낮은 주변에서 일하는 작업자는 정규 선량한도 적용을 받아야 하는 계획피폭상황에서 일하는 것이다. 방사능 방출로 주민이 높은 선량률에 노출된다면 이는 비상피폭상황이 아니라 이미 피폭이 진행되고 있는 기존피폭 상황으로 보는 것이 더 합리적이다.

“비상피폭상황이 긴급대응을 요구한다.”는 생각도 의문이다. 사실은 긴급대응이 비상피폭상황을 요구하는 것이다.

8) <역주> 지나치게 법률적인 정의이다. 방사선방호 목적에서는 보다 단순히 “계약이나 상호합의에 따라 어떤 사람에게 통상적 백그라운드를 넘는 방사선을 피폭하는 일을 수행하게 하는 사람. 이때 사람은 법인을 포함하며, 일을 수행하는 사람이 고용주 자신일 때는 자기고용주가 된다.” 정도로 설명할 수 있을 것으로 역자는 생각한다.

9) <역주> 전술한 바와 같이 이미 존재할 것은 선원이 아니라 피폭상황이어야 합리적이다.

10) <역주> 역자는 “선원, 피폭경로 및 대상(사람 혹은 생물체)으로 구성되는 피폭 요소 모두가 존재하고 연계되어 대상이 방사선을 피폭하는 상태”로 설명하고 싶다.

태아fetus

자궁에서 충분히 발달한(태령 3개월 이후) 태내 사람.

플루언스fluence

플루언스는 관심 위치에 중심을 둔 작은 단면적을 가진 구면에 입사한 입자 수를 그 구의 단면적으로 나눈 몫이다.¹¹⁾ 플루언스의 단위는 m^{-2} 이다.

상용(常用)승객frequent flyer

개인적 이유나 직무 때문에 일상적으로 항공기로 여행하는 사람.¹²⁾ 상용승객 중에는 연간 비행시간이 전형적인 항공승무원 수준(예: 연간 500시간)에 이르는 경우도 있다.

지면준위 상승ground-level enhancement(GLE)

태양 플레어가 충분한 에너지와 강도의 태양 우주방사선을 방출해서 지표의 중성자 감시기에 쉽게 검출될 정도로 지면에서 방사선 준위를 증가시킬 때 그런 현상을 '지면준위 상승 혹은 사건event'(GLE)이라 부른다.

차등접근graded approach

차등접근은 여건을 고려하여 어떤 개인 그룹에 대한 ICRP 권고나 수칙이 그 그룹의 피폭과 비례하고 상응하게 하는 것을 목표로 한다.

정당화justification

(i) 방사선과 관련된 계획된 활동이 전체적으로 혜택을 주는지(즉, 그 활동을 도입하거나 유지함으로써 발생하는 개인이나 사회의 이득이 그 활동으로부터 비롯하는 해로움보다 많은지) 또는 (ii) 비상피폭상황이나 기존피폭상황에서 피폭을 관리하려는 결정이 전체적으로 이로운지(즉, 개인이나 사회의 이득이 그 활동이 야기하는 비용이나 손상 혹은 해로움보다 많은지) 여부를 결정하는 과정.

보통승객occasional flyer

때때로 항공기로 여행하는 사람으로서, 연간 비행시간이 전형적 항공승무원보다 확연히 적은 승객.

11) <역주> 원문 표현에 탈락이 있어 일부 수정했다.

12) <역주> 원문은 상용승객이 상용승객 프로그램에 등록했을 수 있다는 부연 설명이 있지만 이 간행물은 항공사 매뉴얼이 아니므로 삭제했다. 항공사 프로그램은 탑승 빈도가 그렇게 많지 않더라도(예: 연간 5만 km 정도, 즉 서울에서 북미나 유럽을 수회 왕복) 상용승객으로 등록되므로 이 간행물에서 관심을 두는 상용승객과는 거리가 있다. 명시적 경계가 있지는 않지만 우주방사선 피폭 관점에서 상용승객 수준은 연간 10만 km는 넘어야 할 것 같다. 그 미만은 보통승객 수준이다.

직무피폭occupational exposure

직무피폭은 직무의 결과로 발생하는 모든 피폭을 지칭한다. 그러나 방사선의 만연 때문에 ICRP는 직무피폭이라는 용어의 사용을 경영진 책임으로 보는 것이 합당한 상황의 결과로 야기된 방사선피폭으로 한정한다.¹³⁾

경영관리자operating management

어떤 조직을 운영, 관리, 평가하는 최고위층의 사람이나 그룹. 최고경영자, 기관장, 경영관리자, 집행그룹 등 여러 다른 용어도 사용된다.

방호최적화optimisation of protection

방사선방호 최적화는, 개인선량의 크기, 피폭자 수 그리고 잠재피폭 가능성을 경제사회적 인자를 고려하여 적절한 선량기준(제약치나 참조준위) 아래에서 합리적으로 달성 가능한 한 낮게 유지함을 목표로 하는 선원중심 과정이다.

계획피폭상황planned exposure situation

계획피폭상황은 방사선원을 의도적으로 도입하여 운영함으로써 비롯되는 피폭상황이다. 계획피폭상황은 예상되어 충분히 잘 관리될 수 있다.¹⁴⁾

방호원칙principles of protection

세 기본원칙이 방사선방호체계를 구성하는데, 모든 관리 가능한 피폭상황에 적용되는 정당화원칙과 최적화원칙, 그리고 계획피폭상황에만 적용되는 선량한도 적용 원칙이다.

방호조치protective action

전리방사선의 해로움으로부터 사람을 방호하기 위해 설정한 조치. 방호조치는 일반적으로 방사선원과 거리, 피폭시간 및 차폐에 작용한다.¹⁵⁾

13) <역주> 결국 보편적 백그라운드 방사선처럼 배제된 방사선피폭을 제외하고 직무 과정에서 받는 피폭이 직무피폭에 해당하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 승무원이 지상에서 받는 우주방사선 피폭(배제 대상)은 직무피폭이 아니지만 비행 중 우주방사선 피폭은 직무피폭이 된다.

14) <역주> 오해 소지가 많은 설명이다. 후쿠시마 원전은 의도적으로 도입한 선원이지만 계획피폭상황은 물론 비상피폭상황도 초래했고 기존피폭상황도 초래했다. 관점을 피폭상황이 아니라 선원에 맞춰서 발생하는 오류이다. 선원에 초점을 맞추니까 승무원의 우주방사선피폭이 기존피폭이라는 잘못된 길로 인도한다.

15) <역주> 이 간행물은 우주방사선 방호를 다루므로 소위 외부피폭 방호 3 원칙만 제시하고 있다.

참조준위reference level

비상피폭상황과 기존피폭상황에서 선량이나 위험이 이 준위를 넘어 피폭하도록 허용하는 것은 적절치 못하다고 판단되며 그 아래에서 방호최적화가 이행되어야 하는 선량기준을 나타낸다. 참조준위로 선정하는 값은 고려하는 피폭 여건에 의존한다.

알 권리right to know

환자, 종사자 및 일반대중이 자율성, 정의, 신중함이라는 윤리적 가치에 부합하도록 자신이 노출되는 위험과 스스로를 방호할 수 있는 방법에 대해 정보를 받을 권리를 갖게 하는 원칙.¹⁶⁾

위험risk

위험은 어떤 결과(예: 암)가 발생할 수 있는 가능성과 관련된다. '위험'이 조합된 용어로 다음과 같은 것도 있다.

초과상대위험excess relative risk: 피폭집단의 질환율을 피폭하지 않은 집단의 질환율로 나눈 값에서 1을 뺀 값. 종종 Sv 당 초과상대위험으로 표현된다.

상대위험relative risk: 피폭집단의 질환율을 피폭하지 않은 집단의 질환율로 나눈 값이다.¹⁷⁾

태양 플레어solar flare

태양 플레어는 태양이 우주공간으로 높은 에너지 입자를 내뿜는 거대한 방출현상이다. 이런 현상의 빈도는 태양활동에 따라 달라서 1주일에 1회 미만에서 하루에 몇 번씩 일어나기도 한다. 규모가 큰 태양 플레어는 작은 플레어보다 빈도가 낮다. 이런 현상은 태양풍에 '태양 양성자 사건solar proton event'으로 알려진 고에너지 입자의 흐름을 만들 수도 있다. 이런 입자가 지상에 위치한 우주방사선 감시기에 의해 관측되는 때가 '지면준위 상승' 현상이다.

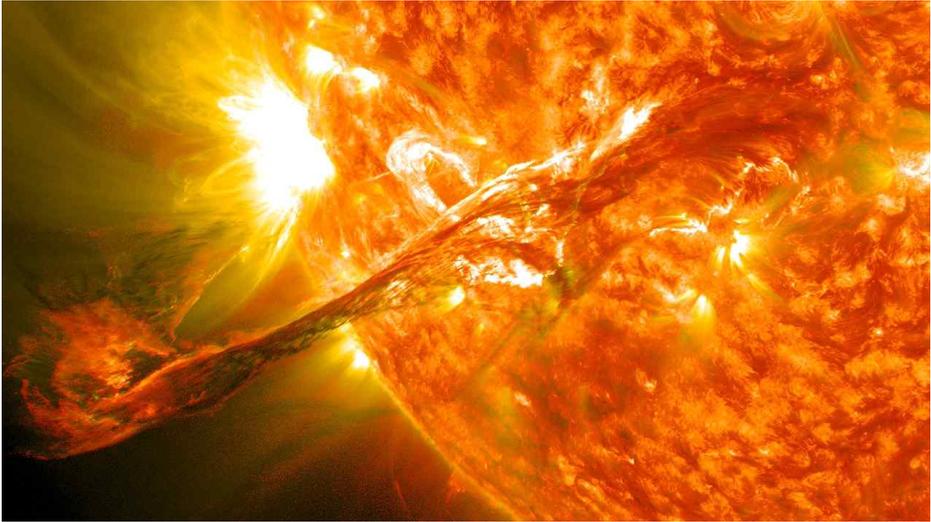
태양풍solar wind

태양풍은 태양 코로나에서 끌어올라 방출되는 전자, 양성자 및 알파입자의 플라즈마로서 태양 자기장 때문에 태양으로부터 평균 400 km/s 속도로 방사형으로 확산된다. 태양풍은 비교적 강하고 회전상인 자기장을 동반하므로 은하 우주방사선 플루언스에

16) <역주> 알 권리에 방호 방법까지 포함되는지는 의문이다. 타인에 의해 위해요소에 노출되는 사람은 그 원인 행위자에 대해 '알 권리'를 가짐은 분명하지만 기본적으로 그러한 위해는 방호를 따로 고려하지 않아도 될 수준이어야 하기에 방호에 대해서까지 알 권리를 거론할 이유가 없어 보인다. 종사자처럼 상당한 위험에 노출된다면 위험에 대해 알 권리에 추가하여 방호 방법도 알아야 하지만 그것은 피폭자의 알 권리보다는 그 원인 행위자의 '알릴 의무'에 속하는 것으로 볼 수 있다.

17) <역주> 초과상대위험(ERR) = 상대위험(RR)-1.

영향을 미친다. 태양풍은 북극과 남극의 오로라(북극광과 남극광)을 발생시키는 원인이다.



<역주> 2012.8.31.(EDT) 발생한 태양 플레어.(사진자료: Wikipedia)

제1장 서론

(1) 비행기의 자기 자리까지 가는 것은 때때로 상당한 여행일 수도 있다. 승객은 탑승수속과 출국절차를 거친 후 공항 보안절차를 통과해야 한다. 방사선은 이 과정에서도 역할을 하는데, 수하물은 물론 때로는 승객을 검색하는 데도 사용되고 있다. 최근 ICRP는 보안 검색에서 방사선방호에 대한 권고를 출간한 바 있다(ICRP 2014).

(2) 이륙 후 비행기가 순항고도에 진입하면 우주방사선 피폭이 증가한다. 일반적 순항고도(1만 m 이상)에서 선량률은 $7\mu\text{Sv/h}$ (해수면에서 우주방사선 선량률의 150배 이상)에 이르기도 한다. 이보다 더 높은 고도로 더 긴 시간 비행할 미래의 새로운 초장거리 제트기의 경우 현재 항공기 운항 관행에 비해 선량을 30%~50% 증가시킬 것으로 추정된다.[독일 *Vereinigung Cockpit*에 의한 평가, Frasch 등(2012) 인용]

(3) ICRP는 이전에 임신 항공승무원에게 각별한 주의를 기울이면서 특히 항공승무원에 초점을 맞춰 방사선방호에 관한 한 세트 권고를 발전시켰다(ICRP 1984,1991). 이 간행물에서는 그 권고를 검토하면서, 항공승객, 특히 개인적 이유나 직무 때문에 여행하는 상용(常用)승객frequent flyer의 방사선피폭 문제에 대해서도 고려할 것이다.

1.1. 배경

(4) ICRP는 ICRP 9(1965)에서 높은 고도 비행에서 발생하는 방사선피폭에 대해서 최초로 언급했다. ICRP 26(1997) 제83항에서, ICRP는 ‘고고도 비행’이 자연방사선 피폭을 증가시킬 수 있다고 밝혔다. ICRP 39(1984) 제10항에서는 ‘현재와 같은 방식으로 비행’을 기존피폭상황의 예로 제시했다.¹⁸⁾

18) <역주> ICRP 39에서 비행에서 우주방사선 피폭이나 기존 주택에서 라돈 피폭을 ‘기존피폭상황’으로 분류했다. 그러나 당시는 ICRP 26 권고 체계 아래 행위와 개입으로 구분하는 접근이었고 당시 기존피폭상황이란 개념이 ICRP 103에서 정의한 기존피폭상황과 동일하지는 않다. 주택 라돈이라도 새 주택을 건설하거나 공기조화계통을 새로 설치할 때는 지금 개념으로 계획피폭상황(당시는 행위의 개념)으로 보았기 때문이다. 항공여행을 보더라도 1980년대 초와 지금은 상황이 많이 변했다. 항공운항 빈도와 승객 상황이 크게 달라졌다. 그래서 당시 ‘기존피폭상황’으로 분류했다고 지금도 비행에서 우주방사선 피폭을 기존피폭상황으로 주장하는 것은 의문이다.

(5) ICRP 60(1991)에서 ICRP는 우주방사선의 방호에 관한 첫 권고를 내놓았다. ICRP는 상용 제트기의 운항에 참여하는 사람을 직무피폭자로 다룰 것을 권고했다. 비행시간의 제약 때문에 선량이 당시 규정된 값을 넘지 않기에, 개인감시를 위한 선량계 사용은 필요할 것으로 보지 않았다. 나아가 ICRP는 일반 승객보다 자주 항공기를 이용하는 상용 승객과 배달원(courier)과 같은 그룹에게 관심을 둘 것을 지적했다. 일반승객에 대한 언급은 없었다.

(6) ICRP는 이어서 ICRP 75(1997)에서 이전의 권고를 명확히 했다. ICRP는 업무로 인한 승객은 연간 유효선량이 1 mSv 범위 내(약 $5\sim 6\mu\text{Sv}/\text{h}$ 에서 200 시간 탑승을 고려할 때)이기 때문에, 증가한 수준의 우주방사선에 노출되는 직무피폭 그룹은 항공승무원이 유일하다고 보았다. 또한 ICRP는 항공승무원의 연간 유효선량은 비행시간과 해당 항로의 전형적 유효선량률로부터 도출되며, 피폭관리는 주로 비행시간 제한과 항로 선택으로 이루어지기 때문에 항공기 내에 지정구역을 도입할 필요가 없음을 재확인했다. 최근 국제방사선단위측정위원회(ICRU)와 ICRP의 공동 간행물은 비행 고도에서 우주방사선장을 설명했고, 항공사와 규제기관의 항공승무원 선량평가에서 국제적 조화를 조장하도록 항공승무원의 우주방사선 선량 검증을 위한 기준자료를 제공했다(ICRU 2010).

(7) 이 간행물은 비행에서 우주방사선방호와 관련된 ICRP의 이전 권고를 대체한다.

1.2. 범위

(8) ICRP는 최근 ICRP 123(2013)을 통해 우주에서 우주방사선 피폭을 관리하는 문제에 관한 권고를 냈다. 이번 간행물의 목적은 비행에서 우주방사선 피폭관리에 관한 ICRP 권고를 갱신하고 명확히 하는 것이다. 이 간행물은 항공승무원 방호를 위해 ICRP 103(2007)의 일반 권고의 진화를 고려한다. 이 간행물은 항공승객, 특히 개인적인 이유나 직 무로 인한 상용승객의 피폭을 고려함으로써 항공승무원 너머로 논의 범위를 넓히려 한다. 또한 임신여성 피폭 주제도 다룰 것이다.

1.3. 간행물의 구성

(9) 제2장은 비행에서 우주방사선 피폭의 특성을 제시한다. 또한 태양 플레어에 대한 개 관과 더불어 선원과 피폭경로에 대한 간략한 설명, 선량 수준의 일상적 평가, 그리고 개 인 및 집단의 선량자료를 제공한다. 제3장은 비행에서 우주방사선 피폭에 대한 ICRP 방 호체계를 설명하는데, 여기에는 고려되는 피폭의 피폭상황 유형과 피폭범주 및 적용할

기본원칙이 포함된다. 제4장은 방사선을 피폭하는 보통승객, 상용승객, 그리고 항공승무원과 같은 다양한 사람을 위해 차등접근 사용을 통한 ICRP 방사선방호체계 이행에 관한 지침을 제공한다. 제4장의 한 소절에서는 임신한 승객이나 항공승무원의 피폭이라는 특별한 상황을 다룬다.

제2장

비행에서 우주방사선 피폭의 특성

2.1. 역사적 배경

(10) 1859년 12월 영국의 아마추어 천문학자인 R.C. Carrington은 거대한 질량 분출을 동반하는 태양 플레어가 일어나 지구를 향해 날아오는 것을 관측했다. 유럽과 미국 전역에서 전신계통이 급격히 고장을 일으켰고, 카리브해 같은 남쪽 지역 하늘까지 오로라가 펼쳐졌다. 이제 1859년에 발생한 것과 같은 태양입자사건(solar particle event) 혹은 태양양성자사건(solar proton event)(SPE)이 상대적으로 높은 에너지의 입자를 방출함으로써 지자기폭풍(geomagnetic storm)을 일으킬 수 있음이 알려져 있다.

(11) 1912년 V. Hess는 전리함 3 개를 싣고 고도 5300 m까지 올라간, 역사적인 열기구 여행을 했다. 그는 고도가 높아질수록 방사선 준위가 증가하는 것을 발견했고, 이런 현상의 원인을 전리방사선에서 찾았다. 지상과 비교할 때 최고 고도에서 방사선이 4배나 높았다. Hess는 일식 기간 1회를 포함해 밤에도 여러 차례 열기구 실험을 통한 관측으로부터 태양을 그 방사선원 후보에서 배제했다. 그는 “내 관찰의 결과는 굉장히 강한 투과력을 가진 방사선이 밖으로부터 대기권으로 들어온다는 가설로 가장 잘 설명된다.”고 결론지었다(Hess 1912).

(12) 1925년 R.A. Millikan은 이 방사선의 출처가 우주임을 증명했고, ‘우주선 cosmic-ray’과 ‘우주방사선 cosmic radiation’이라는 용어를 도입했다. 같은 해에 A. Compton은 우주방사선이 주로 하전입자라고 제안했다.

(13) 1960년대에 상용 초음속 비행기가 개발되었다. 1968년 원형 Tupolev-144의 첫 비행이 이루어졌고, 1969년에는 콩코드 원형이 첫 비행을 했다(약 19000 m 고도). 초음속기가 비행하는 높은 순항고도는 승무원과 승객의 우주방사선 피폭에 대한 우려를 높였다. 방사선량을 감시하기 위해 일부 승무원은 개인선량계를 휴대했고, 콩코드기에는 방사선측정기가 설치되었다. Tupolev-144 승무원을 위해서는 특수 선량계가 개발되었다. 운항 중 방사선 준위가 상당히 증가하면(예: Tupolev-144에서 $300\mu\text{Sv h}^{-1}$) 항공

기 비행고도를 낮췄다. 이것이 항공기에서 우주방사선 일상감시의 시작이 되었다. 지금은 비행에서 우주방사선 선량은 일반적으로 이런 관측으로 검증된 컴퓨터 코드를 사용해 평가한다.

2.2. 선원과 피폭경로

(14) 지구는 태양계 외부에서 오는 고에너지 입자[은하 우주방사선(GCR)]와 태양에서 오는 고에너지 입자[태양 우주방사선(SCR)]을 계속 피폭한다. 또한 지구는 종종 태양의 고에너지 입자 폭발(SPE)에도 노출된다. GCR은 주로 에너지 플루언스 분포가 10^{20} 전자볼트(eV) 이상까지 미치는 양성자(85%)로 구성된다. 이러한 고에너지 입자는 우주방사선의 한 두드러진 특징이며, 방사선량에 크게 기여한다. 일반적으로 10^6 eV 미만 에너지를 가진 양성자가 SCR의 99%를 차지한다. GCR과 SCR을 흔히 '1차 우주방사선(primary cosmic radiation)'으로 부른다(UNSCEAR 2008, ICRU 2010).

(15) GCR은 대기의 구성 원자들과 상호작용하여 상호작용 폭포와 2차 반응산물을 내는데, 이 또한 우주방사선 피폭에 기여한다(그림2.1 참조). 비행고도로부터 지상까지 대기가 깊어지면 그 강도는 감소한다. 감소양상은 고도 16 km에서 8 km까지 $-1.5\mu\text{Sv h}^{-1}$

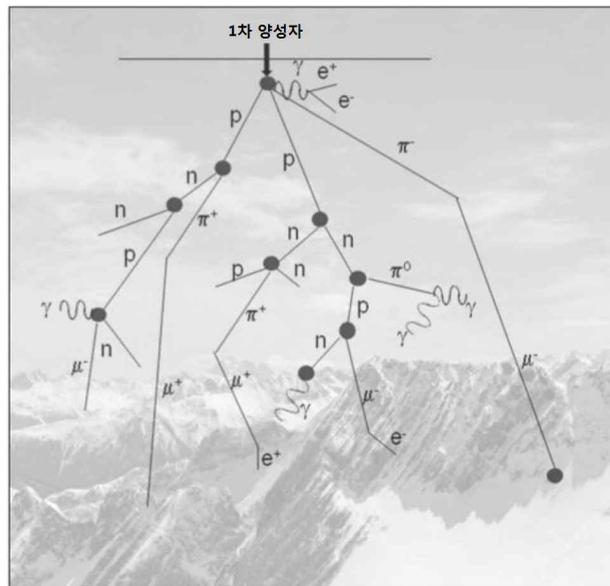


그림2.1. 2차 우주방사선 폭포 모식도. μ 뮤입자, e^- 전자, e^+ 양전자, γ 감마선, n 중성자, p 양성자, π 파이 중간자 (그림: Rühm)

km⁻¹의 비율로 거의 선형으로 유지된다(EC 2004).

(16) GCR을 구성하는 입자는 대전하고 있기 때문에 태양풍(예: 태양 코로나에서 나오는 양성자와 전자 플라즈마로서 태양계 전역에 걸쳐 자기장을 생성함)의 자기장 영향을 받을 수 있다. 자기장은 낮은 에너지 GCR을 굴절시키는데, 이런 작용이 없다면 지구 대기로 진입할 것이다. 태양풍은 태양의 11년 주기에 따라 변동하며 자기장 변동을 야기한다. 지구 궤도에 가까운 곳에서는 태양 극소기 solar minimum일 때 GCR은 극대가 된다. 태양활동이 흑점, 플레어, 코로나 질량방출 coronal mass ejection(CME) 등으로 활발해지면 강한 태양풍으로 인해 GCR은 극소상태가 된다(그림2.2 참조).

(17) 하전입자에 대해 부분적으로 방어막 노릇을 하는 지구 자기장을 지나하면서 우주방사선 입자의 경로는 휘다. 지자기장이 거의 지면과 평행인 적도에 가까워질수록 더 적은 수 입자가 낮은 고도까지 도달한다. 자기장의 방어막 효과가 적도에서 더 큰 탓이다. 지자기장이 거의 지표와 수직을 이루는 자극점에 가까워질수록 1차 우주방사선 입자가 최대로 대기에 도달해서 2차 방사선을 발생시키고 이들이 비행고도까지 침투한다. 그리하여 우주방사선 선량률은 극권에서 커지고, 적도에 가까워질수록 낮아진다(그림2.3 참조).

(18) 요약하자면 비행기 안에서 우주방사선장은 고도, 지자기적 위도, 그리고 태양주기

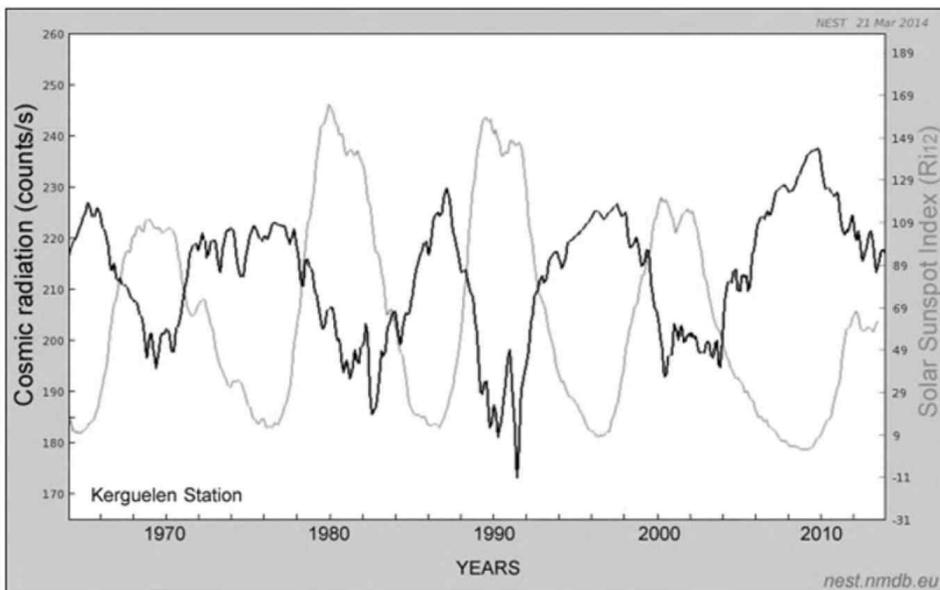


그림2.2. 1964년에서 2014년까지 태양활동(월별 평단화한 흑점 숫자로 표현; 회색선)과 우주방사선 피폭(Kerguelen 관측소에서 측정된 월별 평균 중성자 계수율로 표현; 검정선)의 반비례 관계(IRS, 2016).

에 따라 달라진다. 일반적 비행고도로 적도를 비행할 때는 전자/양전자 및 중성자가 선량의 주된 방사선 성분이고 그 뒤를 양성자가 따른다. 반면 더 높은 위도에서는 선량은 주로 중성자로부터 온다(표2.1 참조). 또한 고도가 더 높아지면 양성자보다 무거운 원자핵(예: 알파입자)이 선량에 기여하기 시작한다.

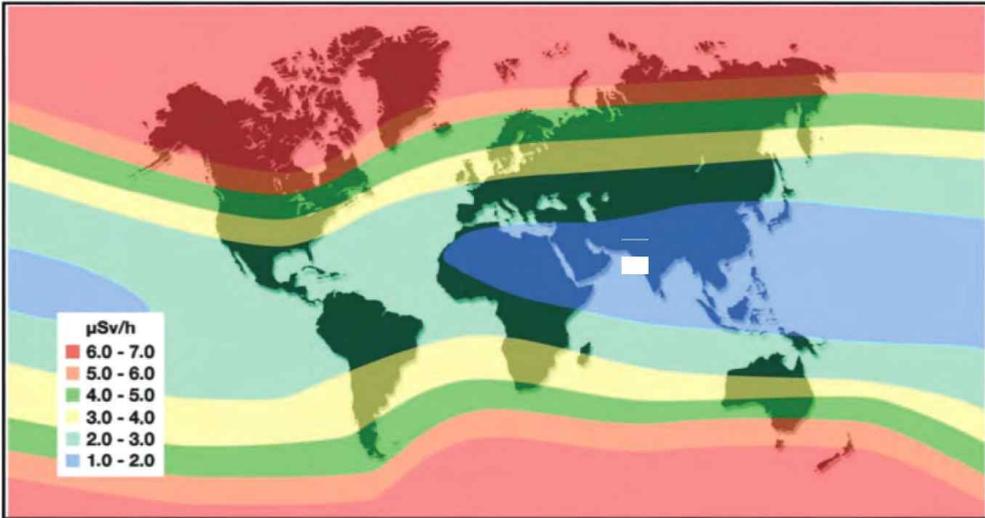


그림2.3. 지자기의 우주방사선 방어막 역할: 2002년 12월 11 km 고도에서 측정한 위, 경도에 따른 주위선량률. Frasch 등(2011)에서 수정함.

표2.1. 위도에 따른 우주방사선 성분별 주위선량당량 기여(태양 극소기일 때 12000 m 고도에서)

성분	적도	극 위도
뮤온	5%	3%
전자/양전자	38%	14%
중성자*	37%	64%
양성자	12%	14%
광자	8%	5%

* 방사선량 계산에 사용한 중성자 방사선가중치는 중성자 에너지의 연속함수로서 변한다(ICRP 2007). 중성자 에너지 분포는 $10^{-10} \sim 10^1$ GeV 범위에 있으며, 최대치는 10^{-3} 과 10^{-1} GeV일 때이다(ICRU 2010).

2.3. 태양 플레어

(19) 예외적으로 높은 수준의 방사선이 태양 플레어로부터 발생할 수 있으나, 상당한 에너지를 가져 지면에서 중성자 측정기로 관측할 수 있는 경우는 드문데(대략 1년에 한 번 정도) 이를 ‘지면준위 증가 혹은 현상ground-level enhancement/event’(GLE)이라고 부른다. GLE는 비행고도에서도 선량률 상승을 야기할 수 있다.¹⁹⁾ 그림2.4는 1989년 10월 인공위성에서 관측된 일일 양성자 플루언스를 보이는데 태양 플레어를 쉽게 확인할 수 있다.

(20) 현재로서는 상당한 불확실성을 전제하지 않고는 SPE GLE 때 선량을 예측하는 것은 불가능하다(Desmaris 2006). SPE GLE 발생시 항공승무원의 증가된 유효선량률을 계산하는 것은 보통 지면에서 중성자 관측, 또는 가용하다면 기내 측정을 통해 소급적으로 이루어진다. 계산된 선량률은 매우 높을 수도 있으나 EURADOS 작업그룹 11이 얻은 결과에 따르면 5배를 넘는 큰 불확실성을 갖는 것도 특징이다(EC 2004, Beck 등 2008). Lantos와 Fuller(2003)에 따르면 1942년부터 64회 GLE가 관측되었지만 그중

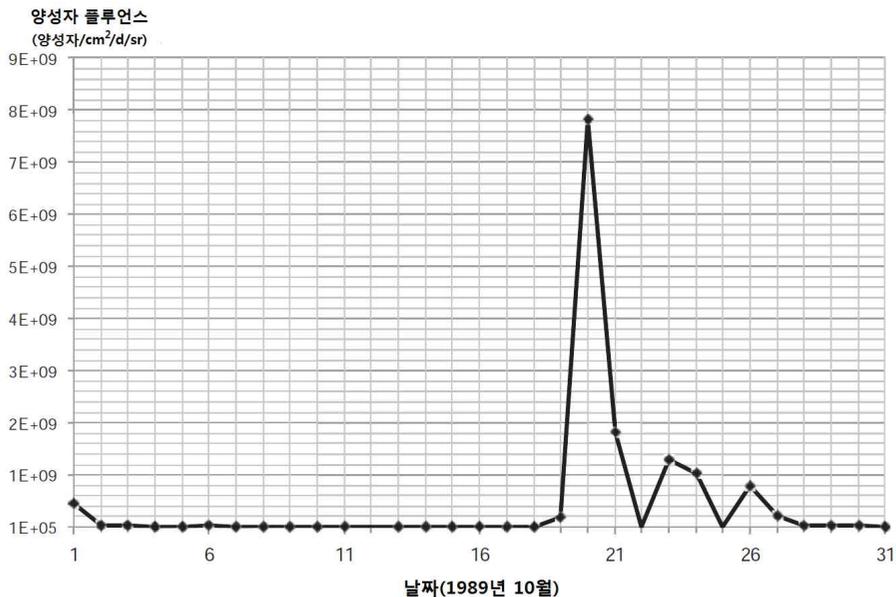


그림2.4. 1989년 10월 일일 양성자 플루언스 변화(데이터는 미국 National Atmospheric and Astronautics Administration/National Geophysical Data Center에서 얻음).

19) <역주> GLE로 인해 태양에서 지구로 향하는 입자량이 10배 증가한다고 비행고도에서 우주방사선 강도가 비례해 증가하지는 않는다. 태양 우주방사선이 강해지면 그 전자기장의 영향으로 은하 우주방사선이 굴절되어 감소하는 현상이 있는데 이를 ‘Forbush 감소’라한다.

오직 18회만 12000 m 상공의 항공승무원에게 $30\mu\text{Sv}$ 이상의 유효선량 증가를 가져왔을 상당한 가능성이 있다. 이 값은 태양활동 극대기에 비슷한 조건의 비행에서 GCR에 의한 선량의 2/3 정도이다. Lanto와 Fuller(2003)는 오직 4회의 GLE만 12000m 고도에서 1mSv 이상의 선량을 증가시킨 것으로 평가했다. Beck 등(2008)도 비행 당 수백 μSv 이상의 선량을 초래하는 GLE는 드물다고 결론을 내렸다.

(21) ICRP는 최근 천동철 때 대기 중에 발생하는 섬광감마선에 승무원과 승객의 피폭 가능성에 대한 우려가 제기되고 있음을 알고 있다. 우주방사선과 관련이 없는 이런 현상은 1991년 미국 항공우주국(NASA)에 의해 최초로 관측되었다. '지상 섬광감마선 terrestrial gamma-ray flash'이라고 명명된 이 방사선은 전통적 비행고도에서 발생하는 것처럼 보이며, 수 ms(1/1000초) 동안 지속되고 에너지는 20 MeV까지 이르기도 한다. 이 방사선이 생성되는 자세한 메커니즘에 대해서는 계속 연구할 필요가 있지만 번개로 인해 광속에 가깝게 가속된 전자가 대기 원자와 충돌하여 감마선을 내는 것으로 추정된다(Dwyer 등 2012). 아직은 지상 섬광감마선으로 항공승무원과 승객의 피폭을 평가하는 검증되거나 확실한 절차는 없다. 다만 안전절차에 따라 항공기 조종사는 거대한 열대구름을 피하도록 항로를 변경하되 구름을 타고 넘으려 하지 말기를 요구하고 있음에 유의한다(Desmaris 2016).²⁰⁾ 그러나 매년 항공기 낙뢰가 발생하므로 그와 연관된 일시적 현상에 대한 관측은 앞으로도 계속될 것이다. 따라서 ICRP는 합리적이고 가용한 기회가 되면 최적화 원칙에 부응하여 조사와 조치를 이어나갈 것을 장려한다.

2.4. 항공기에서 개인피폭 평가

(22) 항공기에서 개인피폭은 컴퓨터 프로그램을 이용하여 비교적 쉽게 추정할 수 있다. 사실 항공기에서 우주방사선장은 상당히 균일해서 특정 비행에서는 사람들의 방사선 피폭은 비슷하다(Battistoni 등 2005). 대부분 컴퓨터 프로그램은 항공기가 통과하는 대기를 정육면체로 구획한다. 각 육면체의 평균 유효선량률은 고도, 지자기 위도 및 태양변조에 따르게 된다. 하나의 정육면체를 지날 때 방사선량은 선량률과 항공기가 그 정육면체를 통과하는 데 걸린 시간의 곱인데(그림2.5 참조) 비행시간은 표준 비행운곽flight profile을 따른다. 두 공항을 잇는 실제 비행운곽은 주로 기상조건 때문에 표준 비행운곽과 다를 수 있지만, 그 차이가 선량에 미치는 영향은 중요하다고 보지 않는다(Van Dijk

20) <역주> 아직 지상 섬광감마선 발생 과정이 정확하지는 않지만 대체로 번개가 치거나 낙뢰가 발생하면 주변에 지면을 향하면 강한 전기장이 짧은 시간 형성된다. 이때 우주선이 방아쇠를 당겨 생긴 전자가 상방으로 가속되면서 전자사태를 일으키고 많은 수 전자가 다른 원자와 상호작용으로 제동복사선을 내는 것으로 본다. 제동복사선이 주로 상방으로 진행하기 때문에 열대구름을 타고 넘는 비행을 지양할 것이 권고된다.

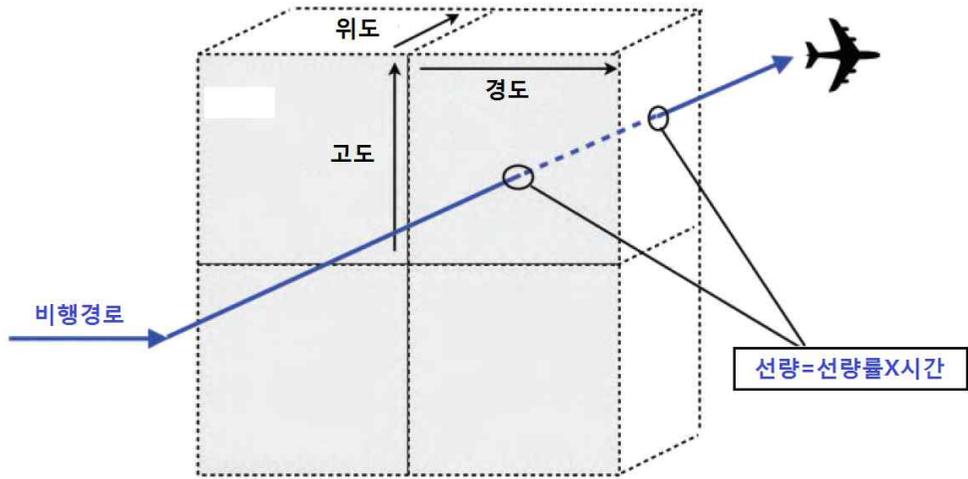


그림2.5. 컴퓨터 코드에서 우주방사선 선량 계산 예(Bottollier-Depois 등 2007).

2003).

(23) 항공기 내 선량을 평가하는 컴퓨터 코드는 비행기에서 주위선량당량ambient dose equivalent rate을 측정함으로써 검증되고 확고해 질 수 있다. 예컨대, 독일에서는 공식적 선량계산에 사용될 전산 프로그램을 검증하기 위해서 여객기 2대에 4년간 주위선량당량 측정기를 배치하였다(Frasch 등 2014). 주위선량당량을 구하는 구체적 과정은 유럽연합(EC 2004), 국제표준화기구(ISO)의 ISO 20785 제1~3부(ISO 2011,2012,2013) 등과 같은 여러 합의기준에서 논의하고 있다.

(24) EC(2004)는 1993~2003년 기간에 걸쳐 주위선량당량률의 측정치와 계산치 자료 모음집을 출간했다. 이 데이터는 ICRP와 ICRU의 공동 간행물(ICRU 2010)에 담긴 주위선량당량 기준값 명세를 얻은 분석의 주된 근거였다. 이런 기준값은 항공승무원 선량평가를 위한 일상절차의 적합성을 점검하는 준거로 사용될 수 있다.

(25) ICRP는 비행기에서 직무피폭을 받는 사람에 대한 감시를 권고한 바 있다(ICRP 1997,2007). 개인선량이 소급적으로 추정될 수 있으므로 ICRP는 비행에서 개인선량을 감시하기 위해 측정기기(선량계나 기타 기기)를 사용하는 대신 검증된 컴퓨터 코드의 사용으로 충분하다고 계속해 권고한다. 이런 코드는 해당 당국의 요건을 충족해야 한다. 그런 코드들을 비교한 자료가 근년에 출간되었다(EURADOS 2012).

표2.2. 상이한 노선에 대해 계산한 유효선량의 예(2013년 3월 15일 운항)

비행 유형	총 유효선량(μSv)	평균 선량률($\mu\text{Sv/h}$)
대서양 횡단비행: 파리-뉴욕	60	6.8
적도 횡단비행: 콜롬보-자카르타	9.7	2
극권 경유비행: 베이징-시카고	82	6.8

(26) 예를 들어 한 전문 코드로 추정된 세 항로의 유효선량을 표2.2에서 볼 수 있다. 선량 값은 적도횡단 노선에서 가장 낮다. 기타 비행노선의 선량 예는 부록A에서 찾아볼 수 있다.

2.5. 항공승무원 피폭

(27) 유엔 방사선영향과학위원회(UNSCEAR)가 제시한 데이터(UNSCEAR 2008)를 보면 항공승무원의 연평균 유효선량 범위는 2~3 mSv(한 국가의 어떤 항공사가 운영하는 노선에 따라 1.2~5 mSv) 정도이고 최댓값은 6~7 mSv 정도이다. 연평균 유효선량은 평균 비행시간에 강하에 의존하는데, 미국에서는 900 시간 정도, 유럽에서는 600 시간 정도이다. 이러한 선량 값이나 이 간행물에 제시된 평가치는 ICRP 60(1991)에 근거하고 있음에 유의해야 한다. 방사선가중치처럼 ICRP 103(2007)에 도입된 선량계산 변경으로 말미암아 결과 선량이 약 30% 정도 낮아지게 되리라는 것을 ICRP는 알고 있다.²¹⁾

(28) 유럽 항공승무원의 방사선 피폭에 대한 검토(Andresz와 Crouail 2015)는 연평균 유효선량이 체코 항공사의 1 mSv에서 핀란드나 스웨덴 항공사의 2.5 mSv까지 범위에 있음을 보여준다. 연간 최대 유효선량은 덴마크, 독일, 핀란드 항공사에서 6~7 mSv 정도이다(그림2.6 참조). 미국 항공승무원의 평균 유효선량도 비슷해서 2006년 3.1 mSv였다(NCRP 2009). 2007년 일본 승무원의 연평균 선량은 기장의 경우 평균 1.7 mSv, 최대 3.8 mSv였고, 객실승무원의 경우 평균 2.2 mSv, 최대 4.2 mSv였다(Yasuda 등 2011). 예외적인 경우를 제외하면, 항공승무원은 연간 10 mSv 미만을 피폭한다.

(29) 항공승무원의 방사선 피폭은 전체 직무피폭의 중요한 성분이다.²²⁾

21) <역주> 특히 1 MeV 미만과 10 MeV 이상인 중성자의 방사선가중치가 약 1/2로 감소했다.

22) <역주> 두 가지 이유가 있다. 첫째는 항공승무원 수가 상당히 많다는 것이다. 2016년 현재 국내 항공사의 항공승무원은 2만 명을 넘는다. 이 수는 진단X선 취급자를 제외한 국내 방사선작업종사자(원전 포함)수와 비슷하다. 둘째로 항공승무원의 개인평균선량이 다른 직군 방사선작업종사자에

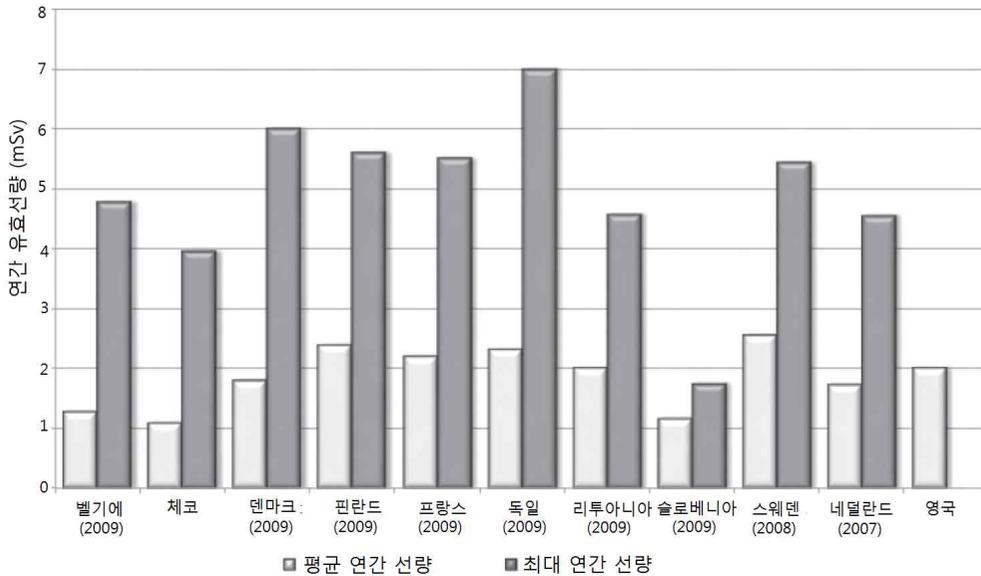


그림2.6. 유럽국가 항공승무원의 연 평균 및 최대 유효선량(Andresz와 Crouail 2015).

UNSCEAR(2008)에 따르면 전세계 항공승무원의 연간 총 집단유효선량은 800 man-Sv로서, 이는 모든 기록된 직무피폭 선량의 70~80% 정도이다. 국가별 집단유효선량은 대체로 그 국가의 항공사 규모와 연간 비행시간에 의존한다. 어떤 나라에서는 연간 집단유효선량이 50 man-Sv를 넘기도 한다(예: 2012년 독일 78.5 man-Sv). 그런 집단선량 값은 직무피폭 집단선량에 주요한 기여자가 된다. 표2.3은 몇몇 국가 소속 항공승무원의 직무피폭 집단선량을 보인다.

(30) 항공승무원의 개인선량 분포는 정규분포 양상을 보인다(그림2.7 참조)(사실 이 그림은 두 개의 정규분포가 혼합된 결과를 보여준다. 하나는 조종실 승무원 것이고, 다른 하나는 객실승무원 것이다).²³⁾ 이러한 피폭 양상은 관리가 정당화되지 않을 정도로 충분히

비해 많다. 제28항에서 보듯이 항공승무원의 연 평균선량은 약 3 mSv인데 2014년 국내 방사선작업종사자의 연 평균선량은 0.72 mSv이다. 즉, 항공승무원의 집단선량은 20000×3=60000 man-mSv(=60 man-Sv)임에 비해 원자력 분야 방사선작업종사자 집단선량은 40000×0.72=29000 man-mSv에 지나지 않는다. 2013년 기준 진단X선 분야 종사자 약 65000명의 평균선량 0.47 mSv의 집단선량 30000 man-mSv를 합하더라도 총 60000 man-mSv = 60 man-Sv 밖에 되지 않아 항공승무원 집단선량 수준이다. 달리 말하면 우리나라 직무피폭의 1/2 정도를 항공승무원이 피폭하는 셈이다(주의: 이 예시는 어림셈이며 정확한 데이터는 아니다).

23) <역주> 그림2.7의 항공승무원 선량분포에 꼭짓점 둘이 보이는 것이 두 근사적 정규분포가 혼합된 것임으로 내보이는 것이다.

표2.3. 항공승무원 집단선량(UNSCEAR 2008)

국가	감시대상 수	집단선량(man-Sv)
덴마크	3 990	6.8
핀란드	2 520	4.2
독일	31 000	60
리투아니아	160	0.2
네덜란드	12 500	17
영국	40 000	80
미국	173 000	531

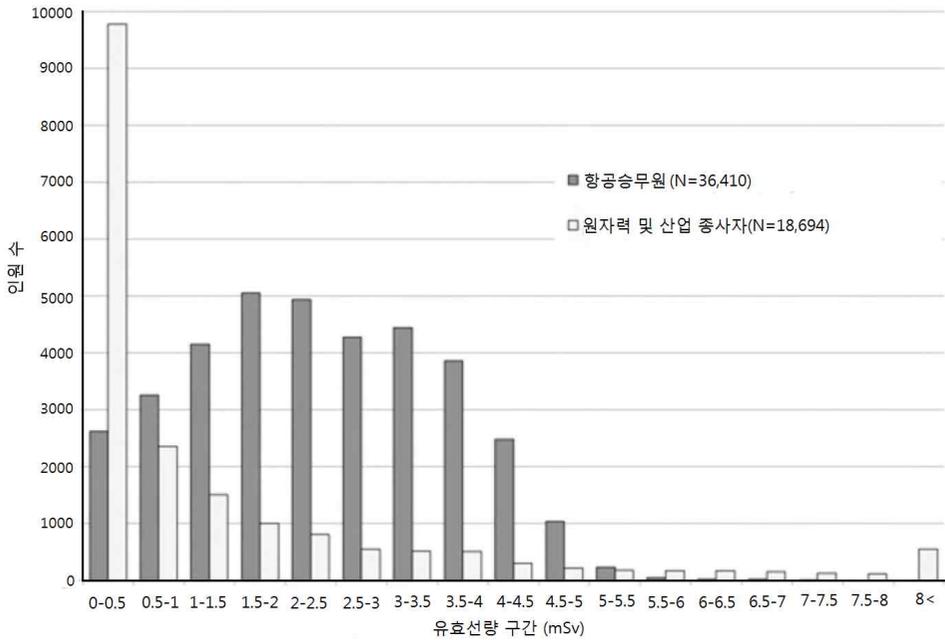


그림2.7. 2009년 독일의 원자력 및 산업 종사자와 비교한 항공승무원의 연간선량 분포(Frasch 등 2011에서 수정).

낮은 수준에서 비교적 균일한 피폭을 보이는 집단에 전형적이다. 이에 비해 원자력산업 저변의 피폭조건은 항공운항보다 훨씬 더 편차가 큰 것이 전형적이다. 이런 사실과 방호 최적화 원칙의 적용이 훨씬 더 치우친 선량분포(즉, 대수정규분포에 가까운)를 낳는다.24)

2.6. 항공승무원에 대한 역학연구

(31) 지난 25년간 항공승무원에 대한 몇몇 역학연구가 진행되어왔다(Zeeb 등 2012)에서 검토됨. 초기 연구는 캐나다, 영국 및 일본의 조종사를 대상으로 이루어졌다. 암과 관련해서는 조종사(역사적으로 조종사는 거의 전부 남성이었다)는 전체 인구와 비교해서 암사망률이 낮았는데 이러한 감소는 건강종사자 효과(healthy worker effect)로서 종사자 코호트에서 자주 발견된다. 그러나 흑색종이나 뇌종양 같은 특정 유형의 암은 항공승무원에게서 증가한 것처럼 나타났다(Zeeb 등 2012).

(32) 1990년대에 수행된 제2세대 조사는 유럽과 미국의 방대한 연구를 포함한다. 앞서서도 그랬듯이 조종사의 암 사망률은 전체인구보다 낮고 일부 암(흑색종과 뇌종양 같은)은 ‘아주 작은 초과위험’을 보였다(Reynolds 등 2002). 한 연구는 전체인구와 비교할 때 여성 객실승무원(객실승무원의 80%를 여성이 차지하고, 특히 미출산 여성으로 대표된다.)에게서 백내장 위험이 조금 증가했고 유방암 사망률도 ‘매우 경미한 증가’를 보였다(Rafnsson 2005).

(33) UNSCEAR(2006)은 흑색종과 비흑색종 피부암 및 유방암이 일관적 초과위험을 보이는 증거가 발견된다고 밝혔다. 그러나 근무기간과 연관성은 찾을 수 없었고, 개인선량 정보가 없는 관찰된 초과위험을 전리방사선 피폭이나 태양 자외선 피폭과 연계하기는 어렵다고 했다. 최근의 한 연구는 유방암 발생은 우주방사선의 피폭과 관련성이 없다는 것을 밝혀냈는데, 발견된 증가는 낮은 출산경험 비율과 늦은 초산연령으로 설명될 것 같다(Schubauer-Berigan 등 2015).

(34) 상용항공기 승무원 사망률에 대한 한 연구는 94000명의 유럽인과 미국인을 평균 22년 동안 추적했다(Hammer 등 2014). 이 연구는 일반집단과 비교할 때 암과 심혈관 질환 사망률이 전반적으로 낮음을 보여주었다. 피부 흑색종으로 인한 높은 사망률이 조종실 승무원에게서 발견되었지만, 이는 직무피폭과 직접적으로 연관되지는 않고 약한 피부와 일광욕 탓으로 보았다. 다른 연구와는 상반되게 여성 승무원에게서 유방암 사망률이 증가하지 않았지만, 남성 승무원에게서 전립선암으로 인한 사망률이 높게 나타났다.

24) <역주> 방호체계 적용이 개인선량분포를 치우치게 만든다는 해석에는 동의하기 어렵다. 선량한도나 선량제약과 같은 제한수단은 개인선량 편차를 좁히는 쪽으로 작용해야 옳다. 원자력 산업에서 대수정규분포에 가깝게 편향된 분포는 종사자의 직무가 다양하기 때문으로 해석하는 것이 적절하다. 이에 비해 항공승무원은 항로별 선량률은 주어지므로 항로배정을 균형있게 한다면 선량 결정은 주로 탑승시간에 따른다. 탑승시간 분포의 개인차이는 크지 않고 안정적이므로 정규분포 양상에 가깝게 된다.

일반적으로 방사선과 연관된 암으로 인한 사망률은 이전의 분석에서 보고된 것보다 낮았다. 저자들은 항공승무원에 전리방사선뿐만 아니라 스트레스, 생체주기의 교란, 제트 연료 노출 등을 포함하는 여러 잠재적 위험요인들에 피폭되어 있기에 추가 분석을 권고했다.

(35) 결론적으로 ICRP는 가용한 역학 데이터가 항공승무원 근무기간 또는 상응하는 우주방사선 선량과 방사선 유관암의 초과위험 사이에 명확한 상관관계가 없다고 본다. 전리방사선을 포함해 다양한 잠재적인 위험인자를 고려하는 추가 평가가 요구된다.

제3장

승객과 항공승무원을 위한 ICRP 방호체계

(36) 사람의 방사선방호를 위한 ICRP 방호체계는 ICRP 103(2007)에 설명되어 있다. 제 44항에 따르면, 방호체계는 “선원의 기원이나 크기에 관계없이 모든 선원으로부터의 모든 방사선피폭에 적용된다.” 특히 ICRP 103 제45항에 따르면 ICRP 권고는 자연방사선과 인공방사선 모두에 해당된다.

(37) ICRP 103(2007)의 철학은 모든 유형 피폭상황에 일관된 접근을 권고하는 것인데, 그 핵심 고려는 적절한 제한(선량기준) 아래에서 최적화 과정을 유지하는 것이다.

3.1. 피폭상황 유형과 피폭범주

3.1.1. 피폭상황 유형

(38) ICRP는 피폭상황을 천연 또는 인공 방사선원으로부터 시작하여 방사선이나 방사성 물질이 다양한 경로를 통해 파급되고, 그 결과 사람이 피폭하는 네트워크로 규정한다 [ICRP 103(2007) 제169항]. 방호조치는 방사선원이나 피폭경로의 어떤 점에 조치를 취하거나, 때로는 피폭자의 위치나 피폭시간을 바꿔 피폭자를 방호함으로써 달성되기도 한다. 편의상 환경경로는 대개 방사선원과 피폭자를 잇는 연계에 포함하는 것으로 본다.

(39) ICRP 103(2007) 제176항에 따르면 ICRP는 그 권고를 모든 있을법한 여건을 다루는 다음의 세 피폭상황에 있는 모든 선원에 적용하려 한다. 세 피폭상황은 다음과 같다.

- 기존피폭상황: 피폭을 관리하려는 결정을 내릴 때 이미 존재하는 선원으로부터 비롯하는 피폭상황이다.
- 계획피폭상황: 선원의 의도적인 도입과 운영으로부터 발생하는 피폭상황이다. 피폭이 예상되어 충분히 관리될 수 있다.
- 비상피폭상황: 계획상황의 운영 중 선원에 대한 관리 상실이나 관리되지 않은 선원으로 인한 예상치 못한 사건으로 인해 발생할 수 있는 상황이다. 바람직하지 않은 피폭을 줄이거나 피하기 위해 긴급조치가 필요하다.

피폭의 성격을 규명하는 것이 관리의 전제조건이다.

(40) ICRP는 비행에서 우주방사선에 사람이 피폭하는 것을 기존피폭상황으로 간주한다. 선원이 이미 존재하고 관리결정이 피폭을 관리하려는 맥락에서 이루어지는 것이다. 방사선원으로부터 피폭경로는 외계의 우주, 대기, 항공기 구조물과 내용물이며 피폭자는 항공승무원과 승객이다. 피폭을 관리하려는 조치는 오직 피폭자의 피폭조건을 바꿈으로서만 이루어질 수 있다. ICRP는 심지어 주요 GLE까지 포함한 GLE에 의한 피폭도 기존피폭상황에 포함된다고 간주하는데 비행 환경에서 GLE가 자주 발생하지 않고 항공승무원과 승객의 피폭에 작은 영향만 미치기 때문이다(제19, 20항 참조).²⁵⁾

(41) ICRP는 방호체계 관점에서 중요한 것은 방호를 최적화하고 특정 피폭 여건에서 사람을 위해 합리적이고 효과적인 방호조치를 취할 수 있는 기회임에 유의한다. ICRP는 많은 인자가 비행안전에 영향을 미치며, 승무원은 끊임없이 지배적인 여건에 적응하고 있음을 인식한다. 만약 미래의 어떤 시점에서 사건을 예측하고, 항공승무원에 대한 정보대책을 개선하고, 적절한 방호조치를 취하는 것이 합리적이고 가능해진다면, ICRP는 당국과 항공사가 반복적인 최적화 과정의 일환으로서 그에 부합하여 반응할 것으로 기대한다.

3.1.2. 피폭범주

(42) ICRP는 세 가지 피폭의 범주를 구분하는데, 직무피폭, 일반인피폭, 의료피폭이다. 직무피폭은 직무의 결과로 일어나는 방사선 피폭이다. 그러나 방사선의 만연성 탓에 ICRP는 전통적으로 '직무피폭'의 정의를 직장에서 경영관리자 책임으로 보는 것이 합리적인 상황의 결과로서 발생하는 방사선피폭으로 한정지어 왔다. 의료피폭은 진료 과정에서 환자가 받는 피폭이다. 일반인피폭은 직무피폭이나 환자의 의료피폭 이외의 모든 피폭을 포괄한다.²⁶⁾

25) <역주> GLE에 대해서도 역사는 의견을 달리한다. 강력한 GLE처럼 상시로 있지도 않고 언제 있을지도 모르는 피폭을 '기존'피폭으로 분류하는 것은 개념을 크게 손상시킨다. GLE가 언제 어떤 강도로 있을지 예측하기 어렵다면 전술한 바와 같이 이는 단순한 사고피폭으로 분류하는 것이 적절하다. 피폭상황을 나누는 것은 방호 접근을 차등화하려는 것인데 현재로서는 GLE에 대한 방호방안이 없기 때문에 피폭상황을 나누는 것이 무의미하다. 수십 년 간격으로 오는 규모의 GLE까지는 그로 인한 비행에서 피폭이 기껏 1mSv 수준이므로 이를 현실적 방호가 어려운 배제대상 피폭으로 간주하는 것이 더 적절할 수도 있다.

26) <역주> 피폭범주나 피폭자 유형을 분류하는 이유도 차등접근을 위한 것이다. 피폭자 또는 피폭범주 분류에서 가장 중요한 인자는 피폭자의 '이해동의(informed consent)'이다. 의료피폭이나 직무피폭은 피폭자에게 상당한 이득이 관련되기에 이해동의 과정을 통해 어느 정도까지는 증가된 위험을 감수하게 된다. 이에 비해 원자력시설 주변 주민은 이해동의가 없는 집단이며 이러한 사람이 방사

(43) 비행에서 우주방사선을 피폭하는 집단에는 보통승객(occasional passenger, 개인적인 이유나 직무로 인한 상용(常用)승객(frequent flyer, 그리고 항공승무원이 포함된다. ICRP는 보통승객이나 상용승객의 피폭은 일반인피폭이며, 항공승무원의 피폭은 직무피폭이라는 견해를 고수한다(ICRP 1991,1997,2007). 그러나 이제 ICRP는 각 그룹별로 예상되는 피폭의 정도와 고려해야 할 책임을 염두에 두면서 이 세 그룹의 방호를 위한 차등접근을 제안한다(제4.2절의 내용).

3.2. 방호전략 정당화

(44) 정당화원칙은 모든 피폭상황에 적용되는 선원중심 두 기본원칙 중 하나이다. ICRP 103(2007) 제203항 권고는 정당화원칙을 통해 방사선 피폭상황을 변화시키는 모든 결정은 해로움보다 이로움이 커야 한다고 요구한다. 기존피폭상황과 관련해서 ICRP는 피폭을 줄이거나 이후 추가 피폭을 회피하기 위한 조치를 취할지 여부를 결정할 때도 정당화원칙이 적용된다고 강조한다. 어떠한 결정도 불리한 측면이 있기 마련이므로 해로움보다는 이로움이 크다는 것으로 정당화되어야 한다. 이런 여건에서 ICRP 103 제207항에서 설명한 것처럼 정당화원칙은 우주방사선 피폭에 대한 방호전략을 이행할지 여부를 결정할 때도 적용된다.

(45) 상황의 특성을 규정한 후 정당성 여부를 판정하는 결정은 대개 정부나 기타 당국의 몫이 되는데, 개인 차원이라기보다는 매우 광범한 관점에서 전반적으로 사회에 이익이 됨을 보장해야 한다. 그러나 정당화 결정의 입력은 많은 측면을 포함할 수 있으며, 그 입력은 방사선 사용자나 여러 기관, 그리고 정부나 기타 당국 외부 사람들에 의해서도 제시될 수 있다. 이런 맥락에서 방사선방호 고려는 그러한 광범한 결정과정을 위한 하나의 입력이 된다.

(46) 항공기에서 방사선피폭을 관리할 수 있는 가능성은 제한적임에도 불구하고(제4.1절 참조), ICRP는 방호전략의 시행이, 항공승무원에 대해서는 특히, 정당화되어야 한다고

선방호 맥락에서 '일반인'이다. 본문에서는 직무피폭이나 의료피폭이 아니면 모두 일반인피폭으로 간주한다고 표현하고 있는데 이 때문에 많은 혼란이 있다. 방사선을 피폭하는 이유에는 직업이나 질병 진료 외에도 다양하고 어느 정도 수준의 이해동의가 가능한 경우가 많다. 항공기 승객이 그 전형적 예이다. 항공승객은 우주방사선 피폭이라는 위험요소 외에도 추락, 납치 등 더 큰 위험도 있음을 알면서 빠르다는 이득을 위해 항공여행을 선택한다. 이렇게 큰 이득이 있다면 수반되는 위험은 어느 정도 용인할 수 있다. 즉, 항공승객은 일반인이 아니라 이해동의(명시적이든 묵시적이든)가 가능한 경우여서 일종의 자기고용주의 직무피폭으로 간주할 수도 있다. 적어도 일반인과는 다른 '동의피폭자'로 보아야 한다.

본다. 승무원은 평균적 개인 유효선량이나 집단유효선량 모두의 관점에서 가장 큰 직무 피폭 집단이기에 더욱 그렇다.

3.3. 방호최적화

(47) 방호전략 이행이 정당하다는 결정이 내려지면 방호최적화가 피폭자를 방호하기 위한 가장 효과적인 조치를 선택하는 데 주도적 원칙이 된다.

(48) 최적화는 모든 피폭상황에 적용되는 둘째 원칙이고, ICRP 방사선방호체계의 핵심이다. ICRP는 최적화원칙을, 개인선량의 크기와 피폭자 수 그리고 피폭이 발생할 가능성을 경제사회적 인자를 고려하여 적절한 선량기준 아래에서 합리적으로 달성 가능한 낮게 유지하는 것으로 정의한다. 이는 방호수준이 여건에서 최선이 되어야 함을 뜻한다. 개인선량의 심각한 불평등을 피하기 위해, ICRP는 최적화 과정에서 개인선량 기준을 적용할 것을 권고한다(ICRP 103(2007) 제226항).

3.3.1. 참조준위

(49) 기존피폭상황에서 참조준위는, 그 이상의 선량 피폭을 허용하도록 계획하는 것이 부적절하다고 판단되는 선량준위를 뜻한다. 따라서 기존피폭상황에 대해 방호조치를 계획해서 최적화해야 한다. 참조준위는 경제사회적 인자를 고려하여 개인선량을 합리적으로 달성할만한 수준에서 낮게 유지하려는 최적화 과정에서 개인선량의 불평등을 예방하거나 감축하기 위한 방호조치를 선정하는 지침이다. 그래서 참조준위는 소급적으로 방호 조치를 판단할 수 있는 기준점benchmark이 되기도 하다.

(50) 기존피폭상황에 대해서, ICRP는 ICRP 103(2007)의 표5에 제시한 것처럼 참조준위를 1~20 mSv/y 밴드 내에 설정하기를 권고한다. 이 밴드는 선원이나 피폭경로가 대체로 관리될 수 있고 개인이 피폭상황과 연관된 활동으로부터, 반드시 피폭 자체는 아니더라도, 직접적 이득을 받을 수 있는 상황에 적용된다.²⁷⁾ 비행에서 승객은 비행으로부터 직접적 이득(즉, 안전과 보안 아래 빨리 여행)을 받는다. 전리방사선을 피폭하는 다른 직무피폭 상황과 마찬가지로 항공승무원은 취업으로부터 직접적 이득을 받는다.

(51) 특정한 피폭상황에 대해서, ICRP는 여건에 근거해 참조준위 값을 선정할 것을 권

27) <역주> 원문은 '이 밴드 내에서는 개인이 이익을 받을 수 있다.'는 뜻으로 표현하고 있지만 ICRP 103 표5의 뜻과 뉘앙스가 달라 약간 수정했다.

고한다(ICRP 103(2007) 제234항). 그 선정에는 특별한 관심을 두어 마땅하고, 최적화 과정에 유의하게 기여하는 피폭을 파악하기 위한 목적으로 개인선량의 분포를 고려해야 한다. ICRP는 비행에서 우주방사선 방호를 위해서 일반적 참조준위를 5~10 mSv/y 범위에서 선정할 것을 권고한다.

(52) 선정된 참조준위는 선량한도가 아니라 피폭을 그 아래에서 경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 가능한 범위에서 낮게 감축하고 유지해야 하는 선량준위를 나타낸다. 개인선량한도 적용 원칙은 계획피폭상황에서만 적용된다(ICRP 103(2007) 제203항). 그럼에도 불구하고 규제기관에 따라 법적으로 구속력 있는 값을 부과하기 위한 절차로서 항공승무원에 대해 직무피폭 선량한도 도입을 결정할 수도 있다.²⁸⁾

3.3.2. 최적화 과정

(53) 실제로 기존피폭상황에서 방호최적화는 (i) 피폭상황의 평가, (ii) 가용한 방호방안의 파악, (iii) 여건에서 경제사회적 인자를 고려하여 피폭을 합리적으로 가능한 범위에서 낮게 감축하거나 유지하기 위한 가장 적절한 방호방안의 선택과 이행.²⁹⁾ (iv) 시정조치가 필요한지 혹은 방호조치를 향상시키는 새로운 기회가 있는지를 평가하기 위해 피폭상황의 주기적인 검토로 이어지는 반복적 과정으로 이행된다. 이런 반복적인 과정에서, 개인선량 분포의 평등 추구(즉, 비슷한 여건에서 피폭한 그룹 중에서 어떤 사람이 평균보다 훨씬 많이 피폭할 가능성을 제한한다는 목표)와 방사선 방호문화의 발전이 중요한 측면이라고 ICRP는 본다(ICRP 2006). 최적화 과정에서 ICRP는 또한 '이해당사자의 관심과 관점을 고려할 필요'가 있음을 권고한다(ICRP 2007).

(54) 실제에서 최적화원칙을 적용하는 방법에 대한 ICRP의 자세한 조언은 앞서 제공한 바 있으며(ICRP 1984,1991,2006) 여전히 유효하다.

28) <역주> 이러한 이중 잣대를 용인해야 하는 문제가 '비행에서 우주방사선 피폭은 기존피폭상황이라.'라는 확실하지 않은 명제를 둔 때문이다.

29) <역주> 원문은 조건 수식어 "경제사회적 인자를 고려하여 피폭을 합리적으로 가능한 범위에서 낮게 감축하거나 유지(ALARA)"를 단계(ii)에 포함하고 있으나 이는 잘못이다. 단계(ii)에서는 가용한 모든 방안을 식별하고 단계(iii)에서 ALARA 개념에 따라 최선 방안을 선정하는 것이 옳다. 따라서 ALARA 조건을 단계(iii)으로 옮겼다.

제4장

ICRP 방호체계의 이행

4.1. 방호조치

(55) 비행에서 방사선피폭을 관리함에 가능한 방호조치에 대한 검토는 그런 조치를 이행할 여지가 별로 없음을 보여주었다. ICRP 75(1977)에서 ICRP는 “[우주방사선] 피폭의 관리는 주로 비행시간과 항로 선정의 제한을 통해 보장된다.”고 밝혔다. 실제로 항공기(동체)의 차폐는 실현 가능한 방안이 아니다. 예컨대 12000 m 고도에서 선량을 20% 줄이기 위해서는 30 g cm^{-2} 차폐가 필요하다. 비행시간의 제한과 항로선정 제한조차도 시행하기 어려운 조치이다.

- 비행시간 제한: 피폭량이 비행시간에 의존하므로 항공승무원의 근무계획은 그들이 하늘에서 보내는 시간을 제한하는 수단이다. 그러나 항공승무원의 비행시간 제한은 방사선을 피폭하는 사람 수를 늘이므로 이런 조치의 대규모 시행은 사회적, 경제적 문제를 초래할 수 있다.
- 항로선정: 비행항로를 선정하고 비행 고도나 위도를 조정함으로써 선량을 제한하는 것은 생각해볼만하다.
 - 고도: 제2.2절에서 설명한 것처럼 지구 대기층은 전형적인 비행고도일 때 우주방사선에 대한 상당한 보호막 노릇을 한다. 비행고도의 최적화는 기상조건과 항공교통 상황은 물론 비용과 같은 요소도 고려해야 하는 섬세한 조정 문제이다. 예를 들면, 비행고도를 1300 m 낮추면 선량을 30% 감축한다고 평가된다. 그러나 이런 비행고도의 변화는 사고 위험을 높일 뿐만 아니라 연료소비와 비용의 5% 증가를 가져온다(Blettner 등 2014).
 - 위도: 역시 제2.2절에서 설명한 것처럼 지구 자기장은 다량의 우주방사선 입자를 굴절시키는데, 그렇지 않으면 그 입자들이 지면까지 도달할 수 있다. 이런 현상의 효과는 적도에서 가장 효과가 두드러지고, 위도가 높아질수록 감소한다. 그러나 위도의 최적화도, 특히 극권 비행항로를 변경할 때, 비행거리와 시간 및 비용을 증가시킨다.

(56) GLE 동안 방사선피폭과 관련해서는 비행고도를 낮추고 항공기 이륙을 연기하는 것을 생각할 수 있다. 이런 조치의 시행은 현재 기술이나 조직 형편을 고려할 때 지금으로서는

개발하기가 어려운 정교한 정보시스템 활용을 필요로 한다. 이런 조치는 이미 일정이 뻑뻑한 항공교통을 교란할 수 있으며, 그래서 사고위험을 높인다.

(57) 비행에서 방사선피폭을 관리하기 위한 현재 가용한 방안의 관점에서, ICRP는 비행에서 방사선피폭을 관리하는 주된 조치는 비행시간과 항로선정을 고려해서 가장 많이 피폭하는 사람의 비행일정을 조정하는 것임을 계속 강조한다. 이제 ICRP는 비행에서 방사선방호를 위해 개인의 비행 빈도에 따라 사람들이 받게 될 피폭 수준에 근거한 차등 접근을 제안한다.

4.2. 차등접근

(58) 비행에서 우주방사선 방호에 중요한 고려사항은 어떤 사람이 항공여행을 필요로 하는 여건과 그 피폭 빈도, 그리고 관련 책임이다. 이 점에서 개인적 이유로 비행하는 사람과 경영관리자의 요구에 따라 업무 맥락에서 비행하는 사람을 구분하는 것이 중요하다.³⁰⁾

(59) 대다수 사람에게 항공교통의 이용은 가끔씩 있는 일이고, 그로 인한 우주방사선 선량은 매우 낮다(보통승객). 개인적으로 혹은 직무 과정에서 비행기를 자주 이용하는 소수 승객의 경우 선량이 높아진다(상용승객). 이 소수 승객에게는 간단한 접근으로 자신의 피폭을 이해하고 선량을 평가할 기회를 갖게 할 수 있다. 일반적으로 훨씬 더 유의한 선량을 받는 항공승무원에게는 모든 개인선량의 주기적인 감시에 근거해서 선량이 경영관리자가 채택한 참조준위에 근접하는 사람의 비행근무표를 조정하는 등 적절한 방호관리가 요구된다.

4.2.1. 보통승객

(60) ICRP는 보통승객의 우주방사선 선량은 충분히 낮아서 방호수단 도입이 반드시 필요하지는 않다고 본다.

(61) 그러나 투명성과 ‘알 권리’ 원칙 적용을 위해, ICRP는 우주방사선에 대한 일반적

30) <역주> 사실 개인적인 이유로 항공여행을 하는 사람도 업무 못지않은 이유가 있다. 차이는 책임이 제3자인 고용주에게 있는지 아니면 자신의 책임인지가 다를 뿐이다. 자신의 책임인 경우 일종의 자기고용자라고 보면 개인적 이유인 승객이나 직무를 위한 승객이나 같은 맥락으로 볼 수도 있다. 다만, 규제 관점에서 상당한 조직체계를 갖춘 기관의 고용주를 규제하는 것과 임의의 개인을 대상으로 규제하는 것은 현실적 어려움 측면에서 차이는 있다.

정보를 모든 승객에게 가용하도록 할 것을 권고하며, 정부 당국과 항공사, 소비자 단체와 여행사가 비행과 관련된 우주방사선에 대한 정보를 확산시킬 것을 권장한다. 예컨대, 이런 정보를 항공사 홈페이지에 공지할 수 있다.³¹⁾ 그런 웹사이트는 사람들에게 비행에서 방사선량을 적절하게 추정하는 검증된 무료 계산기가 있음을 알게 해 준다. 부록A에는 여러 전형적 국제항로별로 평가된 유효선량을 제시한다.

4.2.2. 개인적 이유나 직무를 위한 상용승객

(62) 어떤 그룹 사람들은 개인적 이유나 편의 때문에 항공기를 자주 이용할 수 있다. 경영관리자의 요구로 자주 비행해야 하는 사람도 있다. 대부분 상용승객은 항공승무원과는 다른 여건(예: 선량, 비행 빈도 및 선택 자유도 측면에서)에서 우주방사선을 피폭한다. 따라서 ICRP는 상용승객의 피폭을 일반인피폭으로 간주하고(제43항 참조), 피폭자를 보통승객과 같은 방식으로 다룰 것을 권고한다.³²⁾ ICRP는 우주방사선에 대한 일반정보가 상용승객에게 가용하도록 할 것을 권고한다.

(63) 나아가 ICRP는 우주방사선 피폭을 우려할 수도 있는 상용승객에 대해서는 자신의 피폭에 대해 유념하고 필요하다면 탑승 빈도를 조정하도록 무료로 가용한 선량 계산기를 사용해 자신의 피폭을 평가할 것을 장려한다.

(64) 직무로 인한 상용승객 중에는 항공승무원 피폭과 견줄 정도로 방사선을 피폭하는

31) <역주> 홈페이지 게시만으로는 매우 소극적 정보제공이다. 항공표에 주의사항을 추가하는 방안도 고려할 수 있다.

정보제공에 대한 1차적 책임이 항공사에 있는지는 의문이다. 전염병이 있는 지역으로 가는 항로에 대해 항공사가 어떤 책임을 지는가? 아마도 1차적 책임은 국민 보건안전에 관한 정부의 일반적 책임이 먼저일 것으로 본다. 정부가 정보를 제공하는 유효한 수단으로 항공사나 여행사를 이용할 수는 있다고 본다.

32) <역주> 현재 이 간행물에서 취하고 있는 입장에서는 이러한 접근이 불가피하다. 항공승객이 일반인이고 비행에서 우주방사선 피폭이 계획피폭상황이라면 당장 선량한도를 위협하는 상황에 직면하기 때문이다(예를 들어 우리나라에서 미주나 유럽을 1회 왕복하면 약 0.1 mSv를 피폭한다. 어떤 단일 행위로 인한 일반인 선량은 선량한도[연간 1 mSv]의 작은 분율만 인정되므로 우주방사선 피폭 때문에 미주나 유럽 여행은 3회 정도로 제한된다는 부적절한 결론에 이른다). 이를 회피하기 위해 승객의 우주방사선피폭을 기존피폭상황으로 하고 1~10 mSv/y 범위에서 선정한 참조준위를 적용한다는 의도이다. 그러자니 항공승무원 피폭도 기존피폭으로 끌어들여야 했다.

그러나 전술한 바와 같이 항공승객이나 항공승무원 피폭은 성격상 계획피폭상황이다. 중요한 것은 승객이 '일반인'이 아니어야 한다는 점이다. 자신의 의지와 무관하게 피폭해야 하는 원전 주변지역 주민과 자신의 필요 때문에 항공여행을 하는 승객은 입장이 분명히 다르다. 따라서 원론적으로는 승무원은 물론 승객의 피폭도 계획피폭상황에서 일종의 '직무피폭'에 해당한다고 보는 것이 논리적이다. 물론 일반 승객을 직무피폭자로 관리한다는 생각은 지나치다. 이를 위해서는 배제나 면제 개념(특히 일반 보통승객에 대해)을 운용하는 것이 현실적 접근으로 본다.

사람도 소수 존재한다. 예컨대, 서류나 물품을 배달하는 배달원(courier)이나 항공보안요원 air marshal이 그럴 것이다. ICRP는 이런 상용승객의 피폭은 항공승무원에 적용되는 요건과 비슷하게 관리할 것을 권고한다. ICRP가 우주방사선을 피폭하는 직종 목록을 빠짐 없이 열거하려는 것은 아니지만, 그러한 상용승객을 직무피폭자로 간주하는 결정은 여건에 따라 사안별로 이루어져야 할 것이다. 그리하여 개인이 자신의 선량을 평가하고 필요하면 그 정보를 이용해서 고용주와 논의할 수도 있다. 결정은 모든 이해당사자를 고려하는 과정을 통해 이루어져야 한다.

4.2.3. 항공승무원

(65) ICRP는 항공사가 특별 교육프로그램이나 훈련모임을 통해 우주방사선과 그 피폭에 대해 관심 항공승무원에게 알릴 것을 권고한다. 그런 정보는 안전회의(safety meeting)에서 승무원에게 전달되고, 다른 안전사안과 연관하여 강조되어야 한다.

(66) 직무로 피폭하는 모든 종사자와 마찬가지로, 모든 항공승무원 개인의 연간 유효선량을 평가할 것을 ICRP는 권고한다. 연간 유효선량은 전형적인 유효선량과 승무원 근무표로부터 컴퓨터 코드를 이용해 산출할 수 있다. ICRP는 선량 계산의 검증과 확인을 위해 합의표준을 따라 가끔씩 기내 주위선량당량을 감시할 것을 권고한다(ICRU 2010).³⁴⁾ ICRP는 개인 누적선량이라는 맥락에서 GLE 기여가 실시간 경보시스템 같은 특수감시계통을 정당화한다고 생각하지 않는다. 그러나 ICRP는 합리적으로 가능하다면 GLE로 인한 선량을 소급적으로 평가하여 해당 항공기 승무원의 연간 선량에 추가할 것을 권고한다. 또한 ICRP는 국제규정(ICA0 2010)에 15 000 m 이상의 고도에서 비행하는 항공기를 위한 감시기 규격이 포함되어 있음을 적시한다.³⁵⁾

33) <역주> 국가나 조직에 따라 모임의 명칭은 다를 수 있으나 그 의미는 항공안전을 위해 승무원이나 지상 요원이 정기적으로 모여 안전현안에 대한 논의를 하는 모임이다. 미국의 경우는 법령으로 안전회의를 정기적으로 가지도록 요구한다.

34) <역주> 우주방사선장에 특별한 변화가 없는 상황에서는 기존의 선량평가 코드를 적용할 수 있고 이런 코드는 이미 여러 프로그램(예: EURADOS)을 통해 검증되어 있으므로 실측에 의한 일상감시는 요구되지 않는다. 그러나 이러한 코드는 선원이 가변적인 GLE와 같은 특별한 상황을 고려하지는 않으므로 이러한 특수 상황이 예상되면 실측을 통한 검증 필요성이 발생한다. 기내 사용 안전성이 입증된 상용 감시기들이 있으므로 항공사가 활용할 수 있다. 본문에서 '가끔씩' 측정을 권고하는 이유의 하나는 그러한 감시장비가 있더라도 평소 사용하지 않으면 필경 긴급시에 사용하지 못할 우려가 크기 때문이다(장비 고장이나 사용법 미숙 등).

35) <역주> 오존층 파괴 등 여러 이유로 콩코드를 퇴역시킨 후 현재로서는 15 km 이상 고고도를 운항하는 민간항공기는 없다. 그러나 고고도 또는 초고고도 항공기는 항상 개발 관심 대상이며 머지않은 장래에 상용화될 가능성은 열려있다.

(67) 또한 ICRP는 항공승무원의 선량을 기록할 것과, 해당 승무원이 요구하면 개인별 연간 및 누적 선량을 제공할 것을 권고한다. 추후에 있을지도 모르는 역학(疫學)연구를 돕기 위해 이 정보는 합당한 기간, 최소한 해당 개인의 기대수명 정도, 동안은 보존해야 한다(ICRP 1997).³⁶⁾

(68) 항공승무원은 방사선 안전이 아니더라도 주기적으로 건강검진을 받는다. ICRP는 우주방사선 피폭이 추가적인 건강검진을 요구한다고 보지 않는다. 일반적으로 주기적인 건강검진은 우주방사선 피폭 문제에 대해 종사자와 의사가 대화를 나눌 기회를 제공할 것이다.

(69) 그런 조치가 합당하다고 판단될 때 선정된 선량 참조준위를 존중하기 위해서 경영 관리자는 우려하는 개인의 근무표(횡수나 행선지)를 조정할 수도 있다.

4.2.4. 요약

(70) 표4.1에 우주방사선의 피폭 문제와 관련된 ICRP를 권고를 요약하여 보인다.

표4.1. 비행에서 우주방사선을 피폭하는 사람을 위한 ICRP 권고

피폭자	권고 사항	피폭범주
5~10 mSv/년 범 위에서 참조준위 설정	보통승객	● 일반정보 일반인피폭
	상용승객	● 일반정보 ● 자가 선량측정 ● 필요에 따라 개인 솔선 여행빈도 조정 일반인피폭*
승무원	● 종사자 정보 ● 개인선량 평가 ● 개인선량 기록 ● 추가 특별 검진 없음 ● 필요에 따라 비행 근무계획 조정	직무피폭

*상용승객 중 일부 그룹은 직무로 피폭하는 사람과 비슷한 방식으로 관리될 수 있는데, 이는 여건에 따라 경우별로 결정해야 한다.

36) <역주> 피폭기록 보존 기한은 국가 규정에 따른다. 국제적 권고는 해당 종사자가 75세에 이르거나 방사선작업을 종료한 후 30년까지 중 낮은 쪽으로 하고 있다.

4.3. 배태아 보호

(71) ICRP 82(1999)에서 ICRP는 기존피폭상황에서 일반 집단을 보호하는 조치 외 보호 조치는 필요하지 않다는 결론을 내렸다.³⁷⁾ 따라서 ICRP는 임신여성의 비행근무표를 조정하는 조치가 필요할 것으로 보지는 않는다. 상용승객으로서 임신했거나 그럴 수 있는 여성도 마찬가지이다. 그러나 승무원이든 상용승객이든 임신여성에 대해서는 유익한 결정을 할 수 있도록 충분한 정보가 제공되어야 한다.³⁸⁾

(72) 직무로 피폭하는 항공승무원에 대해, ICRP 권고는 임신여성에 대해 직장에서 보호 방법이 일반인을 위해 제공되는 수준과 대략 비슷한 정도로 배태아를 전리방사선으로부터 보호할 것이라는 것이다. ICRP 103(2007) 제186항에서 ICRP는 “일단 고용주가 임신 사실을 통보받으면 배태아를 위한 추가 보호조치를 고려해야 한다. 임신 선언 후, 임신한 종사자의 작업조건은 출산까지 배태아의 추가 선량이 1 mSv를 넘지 않도록 보장해야 한다.”고 권고했다.

(73) 일반적으로 여성 종사자는 가능하면 빨리 임신 사실을 고용주에게 통보하기를 권장한다. 어떤 국가에서는 통보 결정이 개인의 자발적 선택인 경우도 있다.³⁹⁾ 이런 차이에 관계없이 임신한 항공승무원이 임신 통보 이전에 1 mSv를 초과하여 피폭할 수도 있다. 임신 사실의 적시 통보를 위해, ICRP는 여성인 항공승무원이나 상용승객에게 우주방사선 피폭이 배태아에게 미치는 위험⁴⁰⁾을 알릴 것을 권고한다. 임신이 선언되면 출산까지

37) <역주> 일반적인 기존피폭상황에서는 선량 수준이 높지 않으므로 이 결론이 옳다. 항공여행 뿐만 아니라 사고 후 오염지역에서도 기존피폭상황으로 주민이 거주하는 상황이라면 태아가 태내에서 피폭하는 기간(8개월 정도)에 피폭할 수 있는 선량은 수 mSv 수준일 것이다. 이 선량은 계획피폭 상황에서 태아에 대한 한도(임신 고지 후 출산까지 1 mSv)를 넘는 수준이지만 태내 또는 출생 후 방사선 보건영향을 우려할 수준은 아니므로 특별한 조치(예: 탑승정지, 이주, 극단적인 경우는 임신중절)를 권고할 대상은 아니다.

38) <역주> 원문에서 승무원과 승객에 대한 권고가 혼합되어 역자가 일부 수정했다.

39) <역주> 대부분 국가가 어머니의 선택으로 본다. 만약 태내 피폭이 실질적으로 배태아에게 우려할 수준의 위험을 부과한다면 선택이 아니라 의무로 규정해 마땅하다. 이 때문에 우발적으로 단기간에 태아의 보건을 위협할 수도 있는 수준까지 피폭할 수 있는 잠재성이 있는 작업조건에는 가임여성을 배정하지 못하도록 규정한다. 그러나 항공승무원 경우는 피폭이 본질적으로 제한적이며, GLE 상황을 고려하더라도 배태아 보건에 실질적 위협이 될 수준에 이를 것으로 보기는 어렵다. 이러한 상황에서 사생활 침해 성격이 있는 임신 고지를 의무로 규정하기는 어렵다.

40) <역주> 오해 소지가 있는 표현이다. 비행에서 받는 우주방사선 피폭으로 인해 배태아에게 참으로 ‘위험’이 있을 것으로 보기는 어렵다. 태내 피폭으로 인한 결정론적 위험의 문턱선량은 100 mSv 수준으로 높으며, 확률론적 영향의 위험도 성인에 비해 3배 안팎에 지나지 않으므로 임신 기간 중 받을 수 있는 우주방사선 피폭 수 mSv가 우려할 ‘위험’을 수반하지는 않는다. 역자는 위험 자체가 아니라 배태아에 대해 설정한 선량한도를 초과하는 법률적 책임이 문제라고 본다. 즉, 배태아의 위험 때문이라기보다는 고용주의 책임을 다하기 위해서는 피고용인인 승무원에게 이를 고지하

관리대책이 마련되어야 한다.

4.4. 홍보 및 이해당사자 참여

(74) 경험 많은 과학자나 전문가 혹은 방사선방호 훈련을 받은 전문가를 제외하면 대개 일반 시민은 전리방사선과 그 잠재적 보건영향에 대해서 잘 모른다. 지상에서 일상생활 중에 매일 지속적으로 우주방사선을 피폭하고 있고 항공여행을 할 때는 더 높은 피폭을 받으면서도, 대다수 항공승무원을 제외하면 일반 대중 중에는 우주방사선 피폭이라는 문제를 인식하는 사람은 거의 없다. 그러나 근년에는 우주항공기관이나 기상기관을 통해 우주의 현상, 특히 태양 플레어에 관한 정보가 알려져 대중매체가 파급하고 있고, 가끔씩은 항공사에 경보도 울린다. 이런 정보는 일부 승객에게 우주방사선에 대한 관심을 일깨우기도 하지만 동시에 일부 상용승객이나 항공승무원에게 우주방사선 피폭으로 인한 위험에 대해 의문과 우려를 불러일으키기도 했다.

(75) 사람들이 일상생활에서 노출될 수도 있는 잠재적 위험에 대한 정보를 얻을 권리를 가진다고 말하는 ‘알 권리’ 원칙과, 그리고 그 저변에 깔린 자율성, 정의, 신중함 같은 윤리적 가치에 부합하도록, ICRP는 정부 당국, 항공사, 소비자 단체, 및 여행사가 비행에 따르는 우주방사선에 관한 일반정보를 파급하기를 장려한다. 이런 정보는 반드시 쉽게 접근 가능하고, 우주방사선의 기원, 고도와 위도 및 태양계주기의 영향을 설명하고, 보편적 항로 세트에 대해 전형적 선량은 물론 드물지만 강렬한 GLE 때 받을 수 있는 예기치 않은 피폭 가능성을 적시해야 한다.

(76) 제2.4절과 제4.2절에서 설명했듯이 최근 사용하기 쉬운 평가도구 몇몇이 인터넷에서 가용하다. 이런 도구로 모든 비행을 대상으로 선량을 계산할 수 있다.

(77) ICRP는 우주방사선에 대한 일반정보는 그 메시지가 정확하고 유용하며, 상황에 따른 방사선방호 측면에서 우려와 도전의 본질에 응답하는 것이어야 한다. ICRP는 모든 위험에 대한 포괄적 시각이 진작되어 사람들의 유식한 판단을 조장하도록 사람들이 우주방사선을 다른 위험이나 고려사항과 균형 있게 보기를 제안한다.

(78) 이런 관점에서 다른 자연적 또는 인공적 선원으로 인한 피폭상황과 비교(예: 런던-뉴욕 노선의 경우 고산지역에서 10일간 휴가를 보낸 것과 같은 유효선량을 기록한다.)가 유용할 것이고, 우주방사선에 대한 일반정보의 일부로서 접근 가능해야 한다. 그러나 이런 비교는 신중하게 이루어져야 하는데, 위험의 인식과 수용은 상황의 특성, 특히 그 상황이 개인의 선택으로 여겨지는 정도와 그런 피폭을 야기한 활동이 개인에게 주는 혜택

도록 해야 하기 때문이다.

에 크게 의존하기 때문이다.

(79) 비행에서 우주방사선 방호에 관해서, ICRP는 직무가 아닌 이유로 피폭하는 승객은 자신의 선택에 책임이 있지만 그런 선택은 편견 없는 합당한 정보에 근거해 의식적으로 이루어져야 한다고 본다. 우주방사선 피폭은 여러 다양한 위험 중 하나일 뿐이기 때문에, 비행 빈도를 줄이려는 개인의 선택은 개인적인 고려에 근거해야 할 것이다. 마지막으로, 정확한 정보에 근거해서 위험 용인성을 판단하고 스스로를 방호하기 위한 결정을 내리는 것은 위험을 감수하는 각 개인의 몫이다.

제5장 결론

(80) 지구에는 태양과 먼 우주공간에서 발생하는 입자가 계속해서 쏟아져 들어온다. 지구의 대기와 지자기장이 그 입자들에 대한 충분한 차폐를 제공함으로써 지상에서 우주방사선 피폭은 특별히 신경 쓸 문제는 아니다. 그러나 고도가 높아지면 우주방사선 피폭이 증가한다. 이런 기존피폭상황은 수백만 명 여행자들, 즉 개인적 용무나 경영관리자의 요구에 따른 승객과 방사선을 가장 많이 피폭하는 직업군에 속하는 항공승무원이 경험한다.

(81) ICRP는 보통수준 비행은 지면에서 자연 백그라운드에 의한 연간 선량의 작은 증분 정도만 기여하고, 따라서 방호수단의 도입을 정당화하지 않는다고 적시했다. 그러나 어떤 승객은 개인적이고 매우 다른 이유로 우주방사선 피폭에 대해 우려할 수 있다는 점이 인정된다. 그래서 ICRP는 그런 사람들이 유익한 결정을 할 수 있도록 적절한 정보의 배포를 권고한다.

(82) 개인적 이유나 직업적 업무 때문인 상용승객에 대해서도 걱정 정보의 배포와 더불어 필요에 따라 개인이 비행 빈도를 조정할 수 있도록 피폭을 자가평가 할 수 있는 기회를 갖도록 할 것을 권고한다. 직무 때문에 누적 비행시간이 항공승무원과 비슷할 정도로 특별한 상용승객 그룹에 대해서는 자신의 피폭을 관리하기 위해 항공승무원과 비슷한 요건에 따라 소속사와 의논하기를 ICRP는 권고한다.

(83) 항공승무원 방호를 위해서, ICRP는 이전 권고를 유지하면서 경영관리자가 선정할 참조준위 사용을 도입한다. 참조준위로는 연간 5~10 mSv 범위의 값이 일반적으로 적정하다. 채택된 특정 값은 그것이 최적화 과정에 의미 있게 기여할 수 있도록 여건을 고려해야 한다. 우주방사선 피폭을 줄이는 가용한 방안은 매우 제한적이다. 가장 효과적인 방법은 방사선량이 선정된 참조준위에 근접할 때 비행근무표를 조정하는 것이다.

(84) 위의 권고를 통해서 많이 피폭하는 사람들—항공승무원과 일부 상용승객—의 방사선량을 선정된 참조준위 아래에서 합리적으로 달성 가능한 수준에서 낮게 유지할 수 있기를 ICRP는 기대한다. 또한 ICRP는 비행에서 우주방사선 피폭에 대한 일반적 인식을 고취함으로써, 이해당사자 사이에 더 유익한 대화가 이루어지리라 예상한다. 보통승객, 상용승객 또는 항공승무원과 같은 이해당사자는 비행이 주는 모든 이득을 고려함과 동시에, 비행에 따르는 방사선 피폭에 대해 유익한 결정을 내리기를 독려한다.

참고문헌

- Andresz, S., Crouail, P., 2015. Results of the EAN request on the radiological protection of aircrew. European ALARA Newsletter n36. Available at: www.eu-alara.net (last accessed 14 May 2016).
- Battistoni, G., Ferrari, M., Pelliccioni, M., Villari, R., 2005. Evaluation of the dose to aircrew members taking into consideration aircraft structure. *Adv. Space Res.* 36, 1645-1652.
- Beck, P., Bartlett, D.T., Bilski, P., et al., 2008. Validation of modelling the radiation exposure due to solar particle events at aircraft altitudes. *Radiat. Prot. Dosim.* 131, 51-58.
- Blettner, M., Boehm, T., Bottollier-Depois, J-F., et al., 2014a. Strahlenexposition beim Fliegen - Ein Fall für den Strahlenschutz, *Strahlenschutz Praxis*, Heft 2, 3-30. TÜV Media GmbH, Köln.
- Bottollier-Depois, J.F., Blanchard, P., Clairand, I., et al., 2007. An operational approach for aircraft crew dosimetry: the SIEVERT system. *Radiat. Prot. Dosim.* 125, 421-424.
- Desmaris, G., 2006. Is space weather forecast worthwhile for an airline in terms of radiation protection? Proceedings of the 54th International Congress of the International Academy of Aviation and Space Medicine, 2006, Bangalore, India.
- Desmaris, G., 2016. Cosmic radiation in aviation: radiological protection of Air France aircraft crew. *Ann. ICRP* 45(1S), 64-74.
- Dwyer, J., Smith, D., Cummer, S., 2012. High energy atmospheric physics: terrestrial gamma-ray flashes and related phenomena. *Space Sci. Rev.* 133, 133-196.
- EC, 2004. Radiation Protection 140, Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew - Compilation of Measured and Calculated Data. European Radiation Dosimetry Group(EURADOS), Braunschweig.
- EURADOS, 2012. EURADOS Report 2012-03. Comparison of Codes Assessing Radiation Exposure of Aircraft Crew due to Galactic Cosmic Radiation. European Radiation Dosimetry Group, Braunschweig. Available at: http://www.eurados.org//media/Files/Eurados/documents/EURADOS_Report_201203.pdf (last accessed 14 May 2016).
- Frasch, G., Kammerer, L., Karofsky, R., Schlosser, A., Spiesl, J., Stegemann, R., 2011. Die berufliche Strahlenexposition des fliegenden Personals in

- Deutschland 2004 - 2009. BfS-SG-15/11. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, p. 42. Available at: https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-201108016029/3/Bf_2011_BfS-SG-15-11-ExpositionFlugPersonal.pdf (last accessed 14 May 2016).
- Frasch, G., Kammerer, L., Karofsky, R., Schlosser, A., Stegemann, R., 2014. Radiation exposure of German aircraft crews under the impact of solar cycle 23 and airline business factors. *Health Phys.* 107, 542-554.
- Hammer, G.P., Auvinen, A., De Stravola, B.L., et al., 2014. Mortality from cancer and other causes in commercial airlines crews: a joint analysis of cohorts from 10 countries. *Occup. Environ. Med.* 71, 313-322.
- Hess, V.F., 1912. Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. *Physikalische Zeitschrift* 13, 1084-1091.
- ICAO, 2010. Annex 6, Operation of Aircraft, Part I, International Commercial Air Transport - Aeroplanes, ninth edition. International Civil Aviation Organization, Montreal.
- ICAO, 2015. Air Navigation Report, International Civil Aviation Organization, 2015 Edition, Montreal.
- ICRP, 1965. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 9. Pergamon Press, Oxford.
- ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. *Ann. ICRP* 1(3).
- ICRP, 1984. Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation. ICRP Publication 39. *Ann. ICRP* 14(1).
- ICRP, 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* 21(1-3).
- ICRP, 1997. General principles for the radiation protection of workers. ICRP Publication 75. *Ann. ICRP* 27(1).
- ICRP, 1999. Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. ICRP Publication 82. *Ann. ICRP* 29(1/2).
- ICRP, 2006. The optimisation of radiological protection: broadening the process. ICRP Publication 101b. *Ann. ICRP* 36(3).
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* 37(2-4).
- ICRP, 2013. Assessment of radiation exposure of astronauts in space. ICRP Publication 123. *Ann. ICRP* 42(4).
- ICRP, 2014. Radiological protection in security screening. ICRP Publication 125.

- Ann. ICRP 43(2).
- ICRU, 2010. Reference data for the validation of doses from cosmic-radiation exposure of aircraft crew. Report 84. J. ICRU 10(2).
- IRSN, 2016. SIEVERT version 2.2.4. Fontenay-aux-Roses, France. Available at: <https://www.sievert-system.org/?locale=en#Rayonnement> (last accessed 14 May 2016).
- ISO, 2011. ISO 20785. Dosimetry for Exposures to Cosmic Radiation in Civilian Aircraft -Part 2: Characterization of Instrument Response. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO, 2012. ISO 20785. Dosimetry for Exposures to Cosmic Radiation in Civilian Aircraft -Part 1: Conceptual Basis for Measurements. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO, 2013. ISO 20785. Dosimetry for Exposures to Cosmic Radiation in Civilian Aircraft -Part 3: Measurements at Aviation Altitude. International Organization for Standardization, Geneva.
- Lantos, P., Fuller, N., 2003. History of the solar particle event radiation doses on-board aeroplanes using semi-empirical model and Concorde measurements. *Radiat. Prot. Dosim.* 104, 199-210.
- NCRP, 2009. Ionising Radiation Exposure of the Population of the United States. NCRP Report 160. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Rafnsson, V., 2005. Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots. *Arch. Ophthalmol.* 123, 1102-1105.
- Reynolds, P., Cone, J., Layefsky, M., et al., 2002. Cancer incidence in Californian flight attendants. *Cancer Causes Control.* 13, 317-324.
- Schubauer-Berigan, M.K., Anderson, J.L., Hein, M.J., et al., 2015. Breast cancer incidence in a cohort of U.S. flight attendants. *Am. J. Ind. Med.* 58, 252-266.
- The New York Times, 1924. Lindbergh Does It! To Paris in 33 1/2 Hours: Flies 1,000 Miles Through Snow and Sleet: Cheering French Carry Him Off Field. 21 May 1924. The New York Times, New York. Available at: <http://www.nytimes.com/learning/general/onthisday/big/0521.html> (last accessed 14 May 2016).
- UNSCEAR 2006. Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, Volume 1, Annex A: Epidemiological Studies of Radiation and Cancer. United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the

General Assembly with Scientific Annexes, Volume I, Annex B: Exposures from Natural Radiation Source. United Nations, New York.

Van Dijk, J.W., 2003. Dose assessment of aircraft crew in the Netherlands. *Radiat. Prot. Dosim.* 106, 25-31.

Yasuda, H., Sato, T., Yonehara, H., et al., 2011. Management of cosmic radiation exposure for aircrew in Japan. *Radiat. Prot. Dosim.* 146, 123-125.

Zeeb, H., Hammer, G.P., Blettner, M., 2012. Epidemiological investigations of aircrew: an occupational group with low-level cosmic radiation exposure. *J. Radiol. Prot.* 32, 15-19.

부록 A. 몇몇 항로에 따른 우주방사선 피폭

표A.1. 선정 항로별 우주방사선 피폭

	아부다비	요하네스버그	쿠알라룸푸르	리마	런던	멕시코시티	모스크바	뉴욕	리오데자네이로	도쿄	샌프란시스코	시드니
아부다비		0.016	0.012	0.052	0.04	0.03	0.012	0.077	0.031	0.07	0.109	0.058
요하네스버그(남아공)	0.016		0.049	0.048	0.015	0.036	0.058	0.005	0.015	0.016	0.024	0.028
쿠알라룸푸르	0.012	0.049		0.029	0.072	0.016	0.019	0.124	0.031	0.012	0.057	0.042
리마(페루)	0.052	0.048	0.029		0.052	0.013	0.065	0.019	0.014	0.058	0.022	0.072
런던	0.04	0.015	0.072	0.052		0.079	0.058	0.004	0.011	0.08	0.08	0.075
멕시코시티	0.03	0.036	0.016	0.013	0.079		0.032	0.045	0.023	0.062	0.005	0.078
모스크바	0.012	0.058	0.019	0.065	0.058	0.032		0.064	0.02	0.014	0.134	0.039
뉴욕	0.077	0.005	0.124	0.019	0.004	0.045	0.064		0.025	0.095	0.03	0.058
리오데자네이로	0.031	0.015	0.031	0.014	0.011	0.023	0.02	0.025		0.126	0.02	0.102
도쿄	0.07	0.016	0.012	0.058	0.08	0.062	0.014	0.095	0.126		0.043	0.07
샌프란시스코	0.109	0.024	0.057	0.022	0.08	0.005	0.134	0.03	0.02	0.043		0.06
시드니	0.058	0.028	0.042	0.072	0.075	0.078	0.039	0.058	0.102	0.07	0.06	

2016년 3월에 대해 SIEVERT코드(<http://www.sievert-system.org/index.html>) 코드를 사용해 계산한 유효선량.