

우주방사선 : 규제(선량한도) 변화와 인체영향



서성원

한국원자력의학원 방사선건강영향평가팀장

- 경희대학교 환경학과 학사
- University of Pittsburgh Biostatistics 석사
- 고려대학교 역학 및 의료정보학 박사
- University of Wisconsin-Madison Research Associate/ Biostatistician
- UNSCEAR Korean Delegation
- 대한방사선방어학회 방사선역학연구회장

선량한도¹⁾의 변화

제20대 대통령 선거가 지난 3월 9일에 있었다. 여러 다양한 대선 공약들이 나왔고, 화두 중의 하나가 여성가족부(이하 여가부) 폐지 여부이다. 관련 쟁점에 대한 여러 의견들이 많이 있지만, 여가부의 존치든 폐지든 양성평등과 같은 기본적인 정책방향은 유지 될 것으로 예상된다. 우주 탐사에서도 양성평등을 위한 기술적, 제도적 노력들은 계속되고 있다. 최근 국제우주정거장에 설치된 여성 우주인의 사용 편의성을 높인 화장실부터 NASA(미국항공우주국) 및 ESA(유럽우주국)의 여성 우주인 참여 확대 등 다방면에 걸쳐 변화하고 있다. 이러한 변화는 우주인들에 대한 방사선 피폭 안전관리 분야에서도 예외는 아니다. 실제로 올해 1월 NASA에서는 우

주인에 대한 선량한도 조정을 우주기술 표준문서(NASA TECHNICAL STANDARD)에 반영했다. 조정된 선량한도는 성별이나 연령에 관계없이 재직기간 동안 동일하게 600 mSv 이다. 단, 선량한도에 대한 면제(waiver) 허용도 함께 명시되었다. 기존 NASA의 선량한도는 피폭에 따른 초과 암 위험의 95% 신뢰구간 상한 3% 기준을 적용하였다. 성별, 연령에 따른 피폭 위험도 차이를 고려하여 해당 기준을 적용 시, 선량한도 범위는 약 180~700 mSv로 성별, 연령에 따라 차이가 있었다. 다시 말해 피폭 영향에 상대적으로 민감하다고 알려진 여성이나 젊은 우주인의 경우 업무 참여 기회가 제한될 수 있음을 의미한다. 하지만 이번 조정된 선량한도를 통해 성별, 연령과 관계없이 우주탐사에 대한 동등한 참여 기회 제공을 기대하고 있다. 반면 이 같은

¹⁾ 방사선 방호 및 피폭 관리 일환으로 정한 유효선량이나 등가선량으로 위험에 대한 기준 선량은 아니다. 국내 방사선 종사자의 유효선량 한도는 연간 50 mSv를 넘지 않는 범위에서 5년간 100 mSv이다

〈표 1〉 국가별 우주인에 대한 선량한도

국가 (Space Agency)	선량한도 기준 (Career Limit)	성별, 연령별 차이 여부
Canadian Space Agency	1,000 mSv	없음
European Space Agency	1,000 mSv	없음
Russian Space Agency	1,000 mSv	없음
Japanese Aerospace Exploration Agency	초과 암 위험도 3% (평균 기준)	있음 (500~1,000 mSv)
National Aeronautics and Space Administration(~2021)	초과 암 위험도 3% (95% 신뢰구간 상한 기준)	있음 (180~700 mSv)
National Aeronautics and Space Administration(new standard, 2022)	600 mSv	없음

(출처: Space Radiation and Astronaut Health (National Academies of Sciences, 2021))

NASA의 새로운 선량한도 기준은 방사선 방호의 기본원칙인 ALARA(As Low AS Reasonably Achievable) 개념이나 과학적, 윤리적 타당성에 반한다는 의견도 있다. 미국과 유사하게 성별, 연령과 상관없이 동일한 선량한도를 적용한 국가로는 캐나다, 유럽, 러시아 등이 있으며, 이들 국가에서 권고하는 선량한도는 1,000 mSv이다. 우리나라는 아직 우주인에 대한 선량한도 기준은 마련되지 않았다.

직무상 우주방사선에 피폭되는 종사자는 우주인 이외 항공승무원도 포함된다. 국제방사선 방호위원회(ICRP)에서는 항공승무원의 우주방사선 피폭을 직무피폭으로 간주하고, 방사선 방호 대상으로 권고하고 있다. 미국, 유럽 등 일부 국가에서는 항공승무원에 대한 피폭 관리가

2000년 이전부터 이루어지고 있다. 국내에서는 2012년 7월 원자력안전위원회의 생활주변방사선 안전관리법(이하 생방법) 시행으로 항공승무원의 우주방사선 안전관리가 법제화되었다. 선량한도 등의 세부사항을 담은 우주방사선 안전관리규정은 국토교통부 고시에 위임하고 있다. 작년 5월 항공승무원 선량한도에 대한 고시 개정이 있었다. 기존 방사선작업종사자와 동일하게 적용했던 선량한도 기준인 연간 50mSv를 연간 6 mSv로 대폭 낮췄다. 이는 조종사, 객실승무원 등의 항공승무원 피폭량 기준을 강화한 것으로 유럽연합 회원국들은 이미 해당 기준을 권고하고 있다. 항공승무원의 선량한도가 방사선 작업종사자의 선량한도 보다 낮게 조정된 이유는 다음과 같은 배경에 기인한다. 우선 피폭선량

〈표 2〉 승무원에 대한 우주방사선 안전관리 규정 주요 개정 사항

구분		개정 전	개정 후
피폭 방사선량	승무원	연간 50 mSv (5년간 100 mSv)	연간 6 mSv
	임신 승무원	임신 → 출산까지 2 mSv	임신 → 출산까지 1 mSv
선량기록 보관기간		5년	승무원 75세 또는 마지막 운항일로부터 30년이 도달된 때 중 늦은 시점

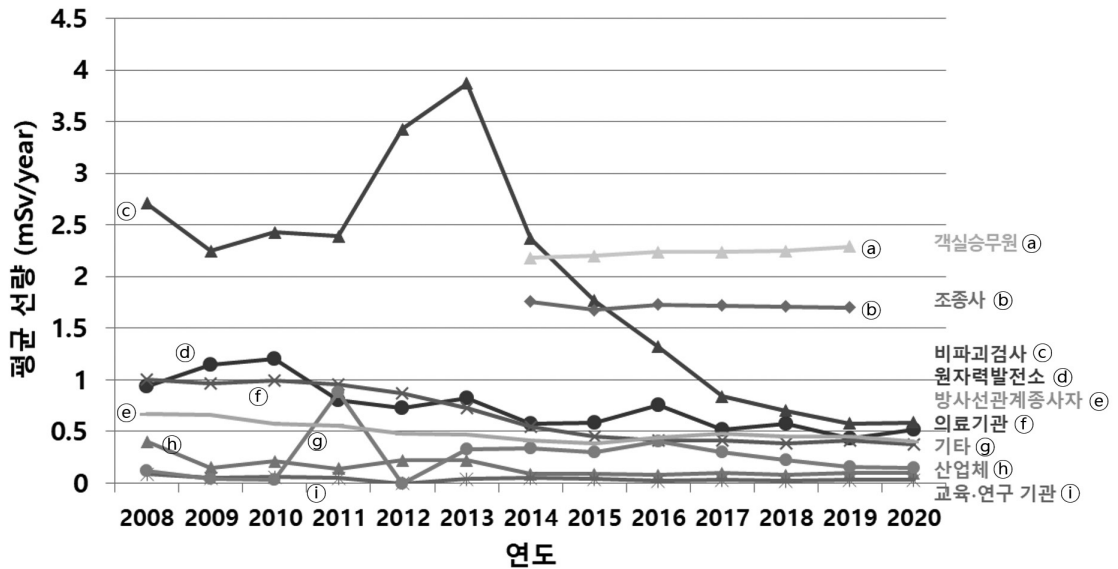
(출처: 국토교통부 보도자료(2021.5.21.), 국토교통부고시 제2021-716호)

의 불확실성이다. 현재 항공승무원의 피폭선량은 비행노선과 횡수에 따른 피폭량 예측 프로그램을 통해 산출하는데, 실제 피폭선량보다 적다는 지적이 제기되기도 한다. 또한 태양활동 등의 기후변화에 따라 피폭선량이 최대 10배까지 증폭될 수 있다는 것이다. 더불어 항공승무원의 비행 가능 횡수 등의 업무환경을 고려할 때, 연간 피폭선량 50 mSv에 도달하기에는 현실적으로 불가능하다. 설령 50 mSv에 근접하더라도 피폭에 의한 위험보다는 과도한 비행 스케줄로 인한 업무상 과로의 위험이 더 클 수 있다. 따라서 최근 선량한도 개정은 항공승무원의 안전강화와 함께 보다 현실적이고 실효성 있는 피폭선량 관리를 위함으로 본다.

이 같은 항공승무원과 우주인에 대한 선량한도는 주로 일본 원폭생존자 및 방사선종사자 대상의 역학연구, 실험적 생물학 연구 데이터에 근거하고 있다. 아직 항공승무원이나 우주인을 대상으로 한 피폭 건강영향 정보가 부족하기 때문이다. 향후 우주방사선 인체영향에 대한 과학적 근거 확충에 따라 선량한도는 조정될 수 있다.

피폭선량과 인체영향

우주방사선은 우주에서 생성되는 고에너지 미립자와 감마선 및 이들이 대기 분자와 충돌하여 이차적으로 발생하는 방사선을 총칭한다. 우주방사선은 양성자, 광자, 중성자, 뮤온, 전자 등으로 구성되어 있다. 항공기 비행고도(8-12 km)에서의 피폭은 중성자가 전체 약 50%를 차지한다. 항공승무원에 대한 우주방사선 노출량은 항공기 항로의 고도나 위도, 태양활동 및 비행시간 등과 밀접한 관련이 있다. 고도가 높을수록, 극지역에서, 그리고 태양활동이 극소기일 때 노출량이 증가한다. 우리나라에서 유럽이나 북미까지 편도 약 10시간을 비행하면 약 0.05~0.09 mSv 노출된다. 업무로 인해 연간 800~1000 시간을 탑승하는 승무원의 경우 국내 피폭선량은 평균 약 2 mSv 수준으로 보고되고 있다. 원전 및 의료분야 등의 방사선 종사자의 피폭선량과 비교했을 때 평균 2~3배가량 높은 수준이다. 하지만 저선량방사선(유엔방사선영향과학위원회 발간 보고서 기준 100 mSv 이하) 영향에 대한 과학적 근거가 부족한 상황에서 단순 피폭선량



[그림 1] 국내 업종별 방사선 종사자 피폭선량

(출처: 원자력안전연감(원자력안전위원회), 의료기관 방사선관계종사자 개인피폭선량 연보(질병관리청), 생활주변방사선 안전관리 실태조사 및 분석 한국원자력안전기술원)

을 토대로 항공승무원의 피폭 건강영향이 방사선 종사자 보다 높다고 단정하기에는 무리가 있다.

종사자 등 피폭 인구집단에서 방사선 건강영향을 평가할 수 있는 가장 직접적인 방법은 역학연구이다. 항공승무원에 대한 역학연구는 과거 약 20년 전부터 북유럽 및 미국을 중심으로 지속적으로 진행해오고 있다. 항공승무원과 일반 인구집단과의 암 발생(혹은 사망) 비교에 대한 일부 연구에서 여성 객실승무원의 유방암 및 피부암, 백혈병 위험 증가가 보고되었다. 남성 조종사 및 객실승무원에서는 피부암, 전립선암, 비호지킨림프종 등이 있다. 하지만 이러한 결과

는 연구들마다 일관성이 크지 않고, 피폭과 질병의 관련성을 설명할 수 있는 선량-반응 평가에서 통계적으로 유의한 결과는 관찰되지 않았다. 대부분의 연구들에서 항공승무원에서 주로 발생하는 피부암은 여가생활 등에 의한 자외선 노출, 전립선암은 검진효과, 유방암은 불규칙한 비행시간으로 인한 생체리듬 혼란이 일정부분 영향을 미쳤을 것으로 해석한다. 단, 이러한 연구 결과가 방사선 피폭에 의한 영향 가능성을 완전히 배제할 수 있는 근거는 아니다.

한편 우주 탐사를 수행하는 우주인들은 지구 자기장의 차폐가 없는 환경에서 고에너지 우주 방사선에 고스란히 노출된다. 항공승무원과 마

찬가지로 피폭량은 탐사에 수반되는 비행거리나 시간, 태양활동 등에 따라 달라진다. 과거 아폴로 14호에 탑승한 우주인의 9일간 달 탐사 임무에서의 피폭선량은 평균 약 11.4 mSv로 보고되었다. 국제우주정거장에서 4개월 임무수행에 따른 피폭선량은 약 100 mSv로 평가된다. 그리고 현재의 우주탐사선, 방사선 차폐 기술 등을 고려할 때, 화성 궤도로 가는 약 600일 비행 기간의 피폭선량은 약 300 mSv(왕복 600 mSv)로 추정된다. 여기에 1년 이상 화성에서의 임무수행을 고려하면 피폭선량은 1 Sv를 초과한다. 우주인에 대한 피폭 건강영향은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 우주 탐사 중 급성 고평폭 의한 급성영향(결정론적 영향)과 탐사 이후 장기적으로 발생할 수 있는 만성영향(확률론적 영향)이다. 화성과 같은 심우주(deep space) 탐사가 본격화 되지 않은 시점에서 현재까지 우주인에 대한 급성영향을 보고한 사례는 없다. 피폭에 의한 대표적인 만성영향은 암이다. NASA에서는 우주인의 건강영향을 추적관찰하기 위해 우주인 코호트를 구축하고, 그들의 건강상태를 계속적으로 모니터링 하고 있다. 작년 발표된 1959~2013년까지 우주인으로 등록된 338명에 대한 암 발생 및 사망 연구에서 우주인이 일반 인구집단보다 전체적인 암 위험이 낮은 것으로 보고됐다. 이는 건강근로자 효과로 해석되며, 항공승무원을 포함한 방사선 종사자 연구에서도 일반적으로 나타난 현상이다. 우주인에서 일반 인구집단보다 높은 암 위험이 관찰된 암종은

전립선암과 피부암으로 항공승무원 대상 연구결과와 유사하다. 피폭선량과 암 위험의 관련성은 제한된 조사대상 수 등의 통계적 검정력 한계로 단기간 입증을 기대하기 어렵다.

과학적 근거 확충의 필요

흔히 우주를 미지의 세계라고 한다. 우주방사선도 현재의 지식으로는 그 영향을 명확히 설명하기 어렵다. 일부에선 항공승무원 및 우주인 대상의 연구에서 건강영향이 증명되지 않았으므로 “이 정도의 피폭에서는 안전하다”라고 단정짓기도 한다. 하지만 이는 통계적인 검정 체계를 오해한 잘못된 해석이다. 피폭 영향의 유무를 확인하기 위해서는 더 많은 과학적 근거들이 확충되어야 한다. 그리고 피폭 영향에 민감할 수 있는 개별 대상에 대한 조사도 필요하다. 우주방사선에 의한 항공승무원의 건강영향을 면밀히 검토하기 위해서는 정확한 피폭선량 평가가 이루어져야 한다. 방사선 종사자의 과거 피폭 선량이 높았던 점을 고려할 때, 생방법 시행 이전의 과거 피폭 선량에 대한 검토도 필요하다. 또한 불규칙한 비행으로 인한 생체리듬의 혼란, 자외선 차폐와 관련된 조종석 및 기내 창문의 재질, 기내 공기의 질, 승무원의 생활습관 등 방사선 이외의 다양한 유해 요인들에 대한 검토가 복합적으로 요구된다. 우주인의 경우는 중력이나 기압의 영향, 극한 환경에서의 심리적 육체적 스트레스 등이 추가적으로 고려되어야 한다.

우주산업이 다방면의 첨단기술 및 과학의 결집인 것처럼 우주방사선의 이해는 방사선 영향에 대한 종합적인 지식의 결집이다. 우리가 현재 알고 있는 대부분의 방사선 영향 지식은 감마선, 엑스선 등과 같은 일부 방사선에 대한 피폭 영향을 토대로 한다. 따라서 우주방사선 인체 영향 연구는 중성자, 양성자 및 다양한 방사선의 복합 피폭 영향에 대한 실증적 데이터를 구축할 수 있는 기회를 제공한다.

올해도 세계적으로 우주시대를 향한 굽직한 도전은 계속된다. 인간을 다시 달로 보내기 위한 NASA의 아르테미스 미션 첫 번째 로켓 발사가 계획 중에 있다. 중국의 우주정거장 완공, 유럽의 화성 탐사 등도 추진된다. 민간 우주경쟁도 치열하다. 미국의 스페이스X는 우주선 ‘스타쉽’의 첫 궤도비행을 계획하고 있고, 보잉은 유인 캡슐 ‘CST-100 스타라이너’의 무인 시험비행에

재도전한다. 우리 정부도 올해가 우리나라 우주 탐사의 원년이 될 것으로 기대한다. ‘누리호’와 ‘한국형 달 궤도선(KPLO)’ 발사 도전을 시작으로 2029년 소행성을 탐사하고, 2030년에는 달 표면을 탐사하는 게 목표다. 항공승무원에 대한 우주방사선 안전관리의 제도적 개선도 지속적으로 이루어진다. 올해 1월에 심의 의결된 제3차 원자력안전종합계획에는 항공승무원의 건강 진단 등 방사선작업종사자에 준하는 승무원의 안전관리 실시 계획을 담고 있다. 우주인 및 항공승무원처럼 업무상 피폭이 수반되는 직업은 누군가는 해야 하는 일이다. 그리고 이들의 건강을 확인하고, 확보하는 것은 국가 정책의 우선순위로 고려돼야 한다. 이를 위해 우주방사선 영향에 대한 과학적 근거 확충은 필수적이며, 지속되어야 한다. **KMIF**

[참고문헌]

- 한국원자력안전재단. 2016. 항공승무원이 알아야 할 우주방사선 이야기
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2021. Space radiation and astronaut health: Managing and communicating cancer risks. Washington, DC: The National Academies Press
- National Aeronautics and Space Administration. 2022. NASA TECHNICAL STANDARD (NASA-STD-3001, Volume 1)
- Reynolds R, et al. Cancer incidence and mortality in the USA Astronaut Corps, 1959–2017. Occup Environ Med. 2021