

우레탄 트랙 납 오염 현황과 위해성평가에 관한 제언

박민규¹ · 손희식² · 손지영¹ · 이호영¹ · 조인규¹ · 최성득^{1,2,†}

¹울산과학기술원 도시환경공학부, ²울산과학기술원 환경분석센터

Contamination Characteristics of Lead in Urethane Tracks and Suggestions for Human Health Risk Assessment

Min-Kyu Park¹, Hee-Sik Son², Ji-Young Son¹, Ho-Young Lee¹,
In-Gyu Cho¹, and Sung-Deuk Choi^{1,2,†}

¹*School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, 44919, Korea*

²*UNIST Environmental Analysis Center (UEAC), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, 44919, Korea*

Received February 24, 2017/Revised March 14, 2017/Accepted March 31, 2017

In this study, the contamination of urethane track samples with lead (Pb) was investigated, and the previous results of human health risk assessment for Pb in urethane track samples were critically reviewed. Two extraction methods (i.e., acid digestion and ultrasonication) were applied. An acid digested urethane track sample from an elementary school showed the highest Pb concentration of 1,526 mg/kg, which exceeded the guideline of 90 mg/kg. The same sample was ultrasonicated, and the concentration was 1.51 mg/kg. This level is lower than a mean concentration of Pb in soils, suggesting that the exposure of Pb by urethane tracks could not be serious. Since Pb is classified into a non-carcinogen, a Hazard Quotient (HQ) can be calculated based on an Average Daily Dose (ADD) and a Reference Dose (RfD). It was found that the total exposure of Pb could be overestimated by the estimation of hand-to-mouth exposure. Furthermore, a RfD of Pb was not established by the US EPA, and the WHO withdrew a previously established Provisional Tolerable Weekly Intake (PTWI). Therefore, the results of health risk assessment using previous RfD values are quite uncertain to be used for the management of urethane tracks exceeding the concentration guideline. In conclusion, a more systematic approach should be developed to deal with this issue.

Key words: Urethane track, Heavy metal, Lead, Health risk assessment

1. 서 론

납(Pb)은 대표적인 유해 중금속으로서 주요 환경매체, 식품, 공산품 등에 기준치가 설정되어 있을 정도로 위해성 관리 차원에서 매우 중요하다. 미국 환경청(United States Environmental Protection Agency: US EPA)은 납을 B2 등급(probable human carcinogen)으로 분류하며, 세계보건기구(World Health Organization: WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on

Cancer: IARC)는 2A 등급(probably carcinogenic to humans)으로 분류한다. 미국 독성물질 질병등록국(Agency for Toxic Substances and Disease Registry: ATSDR)은 실험동물에서 납의 발암성을 확인했지만, 인체 발암성에 대한 확실한 증거가 없다고 밝혔다.¹⁾ 납이 명확한 인체 발암물질은 아니지만, 신체 대부분 기관에 영향을 미칠 수 있다. 어린이에게는 행동 및 학습장애, 지능 저하, 성장 둔화를 유발하며, 임산부에 축적된 납이 태반을 통해 태아에게 노출되어 태아의 성장을 저해하

[†]To whom correspondence should be addressed.

고 조산을 유발하고, 일반 성인에게는 심혈관계질환, 고혈압, 신장기능 저하, 생식기능 저하 등의 원인이 된다.²⁾

납은 지각구성 원소로서 일반적으로 50~400 ppm 수준이지만, 광산과 제련소 근처에서는 고농도로 검출된다.²⁾ 해당 지역에서는 토양을 포함한 모든 매체(대기, 하천수, 지하수, 식생 등)가 심각하게 오염될 수 있다.³⁾ 광공업지역이 아니더라도 일반 생활환경에서도 유연 휘발유, 납 함유 페인트, 배관, 건전지, 화장품 사용으로 납이 노출될 수 있다.²⁾ 최근에는 무연 휘발유 사용과 각종 환경규제를 통해, 일반적인 대도시와 주거환경에서 납이 심각한 환경 문제가 되는 사례는 드물다. 그러나 환경농도가 우려할 수준이 아니더라도, 영유아와 어린이는 장난감과 먼지 묻은 손을 입에 넣기 때문에 납에 많이 노출될 수 있다. 실제로 납 기준치를 초과한 장난감과 문구류에 대한 보도를 자주 접할 수 있다.

2016년 3월, 환경부는 수도권 초등학교 우레탄 트랙 상당수(조사대상 25개 중 13개)가 한국산업표준(KS) 납 기준치(90 mg/kg)를 초과한 사실을 발표하였다.⁴⁾ 인체 위해성평가 결과, 납의 위해성이 우려되는 수준이었다. 이후, 많은 지자체와 교육기관에서 우레탄 트랙의 중금속 분석을 실시하였으며, 납 기준치를 초과한 다수 시설을 적발하였다. 예를 들어, 2016년 상반기 울산광역시교육청에서 초·중·고교 79개소를 조사한 결과, 73개소에서 기준치를 초과하였고, 2016년 하반기 울산시가 조사한 공공체육시설 52개 시설 중 44개 시설도 기준치를 초과하였다. 한편, 본 기관(UNIST)의 자체 분석 결과에서도 2010년 완공된 원내 우레탄 트랙은 납 기준치를 초과했으나, 2011년 이후 설치된 시설에서는 기준치 이하로 검출되었다. 지금까지 기준치를 초과한 대부분 시설은 2011년 실외체육시설-탄성포장재에 관한 국가기준(KS F 3888-2)⁵⁾이 제정되기 전에 완공되었다. 해당 표준은 운동장 부대시설로 설치하는 탄성 포장재, 탄성 고무 롤 시트 등에 대한 요구사항을 규정하는데, 중금속, 다환방향족탄화수소, 프탈레이트계 가소제 함량기준을 제시한다.

납 농도가 기준치를 초과하더라도 인체 위해성이 우려된다고 단정할 수 없으므로, 기준치 초과 여부가 아닌 위해성평가에 근거한 합리적인 의사결정(예: 시설별 트랙 교체 우선순위)이 필요하다. 현행 기준에서는 중금속 추출방법으로 함량법을 사용하는데, 이 방법은 시료 전체에 함유된 중금속을 강산을 이용하여 전량 추출하는 방법으로서, 실제로 노출되는 농도 수준보다 상당히 높은 결과를 산출한다. 우레탄 트랙의 중금속 농도가 높더라도 인체에 노출되는 정도(노출량)가 약하다면 위해성은 우려 수준 이하일 것이다. 그러므로 신뢰성 있는 노출량 산정과 이에 기반한 인체 위해성평가가 필요하다. 환경부는 2016년 10월 교육부, 국토교통부, 문화체육관광부와 공동으로 ‘우레탄 트랙 위해성 관리 가이드라인 마련을 위한 연구’ 용역을 발주하였다. 이 결과를 기반으로 우레탄 트랙 교체 순위를 선정하고 학교, 공공체육시설 순으로 교체를 시행할 예정이다.

본 연구에서는 울산시 일부 초등학교와 공공체육시설의 인조잔디와 우레탄 트랙의 납 오염 현황을 파악하고, 추출법에 따른 중금속 농도를 비교하였다. 문헌조사를 통해 인체 위해성평가 결과를 고찰하여 문제점을 파악하고, 최종적으로 우레탄 트랙 교체 시 고려할 사항에 대해 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취

2016년 6월, 울산시 주요 지점에서 인조잔디(농서초등학교, 학성초등학교)와 우레탄 트랙(울산체육공원, 태화강변, 농서초등학교) 시료를 채취하였다. 노출 영향이 많을 것으로 추정되는 초등학교와 운동시설 이용자가 많은 체육공원과 태화강변을 선정하였다. 토양오염공정시험방법의 토양시료 채취법을 따라 한 지점에서 지그재그형으로 10개 세부 지점을 선정하였고, 현장 상황이 부득이한 지점에서는 5개 세부 지점에서 시료를 채취하여 혼합하였다. 위생장갑(poly glove)을 착용 후, 인

Table 1. Information on sample types and sampling locations in Ulsan

Name	Type	Location
G-1	Artificial turf 1	Nongseo elementary school (Dalcheon-dong Buk gu)
G-2	Artificial turf 2	Hakseong elementary school (Bangu 2-dong Jung gu)
G-2I	Artificial turf (infill rubber chip)	Hakseong elementary school
U-1	Urethane 1	Ulsan sports park (Ok-dong Nam-gu)
U-2	Urethane 2	Beside the Taehwa river (Taehwa-dong Jung gu)
U-3	Urethane 3	Nongseo elementary school

조잔디(내부 고무칩 포함)와 우레탄 시료 약 10 g을 소독 가위와 칼을 이용하여 자른 후 지퍼백(폴리에틸렌 재질)에 담아 냉장 보관(4°C 이하)하였다.

2.2. 전처리와 기기분석

2.2.1. 습식분해

한국산업표준(KS M 6956)⁶⁾과 US EPA 3052 방법⁷⁾에 준하여 인조잔디와 우레탄 시료를 습식분해하였다. 시료(0.1 g)를 테플론(PTFE) 추출 용기에 넣고, 질산(15 mL)과 과염소산(4 mL)을 넣은 후, 흑연블록 분해 장치를 이용하여 가열 분해하였다(24시간, 200°C). 시료의 습식분해가 완료되면 추출 용기를 PVC 흡후드에 서 30분간 실온으로 방냉하였다. 이후, 추출 시료를 여과지(5C filter, Advantec, Japan)에 통과시키고 코니칼 튜브(50 mL, Falcon, USA)에 넣었다. 마지막으로, 추출 용기를 1% 질산(5 mL)으로 세 번 헹구고 이를 여과하여 코니칼 튜브에 추가하고, 시료 총량이 20 mL가 되도록 1% 질산을 첨가하였다.

2.2.2. 초음파 추출

습식 분해에 사용한 동일한 테플론 용기에 우레탄 시료(1 g)와 정제수(20 mL)를 넣은 후, 1시간 동안 기구 세척용 초음파 장치(Power sonic 520, Hwasin tec., Korea)로 추출하였다. 추출한 시료액을 여과지에 통과시키고 정제수를 첨가하여 총량을 20 mL로 맞추었다.

2.2.3. 기기분석과 정도관리

유도결합플라즈마 분광분석기(Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer: ICP-OES, Varian, 720-ES, USA)를 이용하여 중금속을 분석하고, 국립환경과학원에서 발행한 ‘환경시험·검사 QA/QC 핸드북(2011)’을 바탕으로 정도관리를 수행하였다.⁸⁾ 모든 전처리와 기기분석 과정에서 중금속 방해물질이 없는 고순도 시약을 사용하였다. 바탕시료를 분석하여 실험과정 중의 오염을 확인하고, 필요한 경우에는 농도 결과 보정에 사용하였다. 검정곡선 작성용 표준물질(Multi-element Calibration Standard 3, PerkinElmer, USA)을 사용하여 외부검정곡선법으로 정량하였으며, 검정곡선의 직선성 결정계수(R²)는 0.999 이상을 만족하였다.

2.3. 비발암물질 위해성평가

손을 입에 가져가는 행동(hand to mouth)에 의한 비발암물질의 위해성평가를 위해서는 식(1)과 같이 일일

평균노출량(Average Daily Dose: ADD)을 산정한다.⁹⁾ 이후, 위해도 산정을 위해 ADD와 경구독성참고치(Reference Dose: RfD) 비율인 유해지수(Hazard Quotient: HQ)를 계산한다. HQ가 1.0을 초과하면 위해성이 있다고 판단한다. ADD는 시료분석과 노출 대상 관찰을 통해 비교적 정확하게 산출할 수 있으며, HQ를 계산하기 위해서는 용량-반응평가를 통해 알려진 RfD를 주로 사용한다. 따라서 특정 오염물질에 대한 RfD가 설정되었다면, ADD만 계산하면 위해도를 산정할 수 있다.

$$ADD = \frac{C \times HT \times ED \times EF \times ET \times BA}{BW \times AT \times 24} \quad (1)$$

- ADD: average daily dose (mg/kg bw/day)
- C: concentration of pollutant (mg/100 cm² hand load)
- HT: daily hand load transfers to mouth (e.g., 0.43/day)¹⁰⁾
- ED: exposure duration (year)
- EF: exposure frequency (event/year)
- ET: exposure time (hr/event)
- BA: bioavailability (e.g., 0.6)¹¹⁾
- BW: body weight (kg)
- AT: averaging time (day)

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} \quad (2)$$

- HQ: hazard quotient (constant)
- ADD: average daily dose (mg/kg bw/day)
- RfD: reference dose (mg/kg bw/day)

3. 결과 및 고찰

3.1. 중금속 모니터링

3.1.1. 울산시 인조잔디와 우레탄 트랙의 중금속 오염
울산시 일부 지점에서 채취한 인조잔디(G)와 우레탄 트랙(U) 시료를 함량법으로 추출하여 분석한 결과에 의하면(Fig. 1), 비소(평균 1.8 mg/kg)와 크롬(평균 6.7 mg/kg)이 비교적 저농도로 검출되었으며, 구리(평균 94 mg/kg)와 망간(평균 58 mg/kg)이 중간 수준으로 검출되었고, 납(평균 228 mg/kg)이 가장 고농도로 검출되었다. 이러한 분석결과와 울산시 토양측정망 자료¹²⁾는 비슷한 수준으로서(납 제외), 기존에 알려진 대로 우레탄 트랙에서 문제가 되는 중금속은 납이었다.

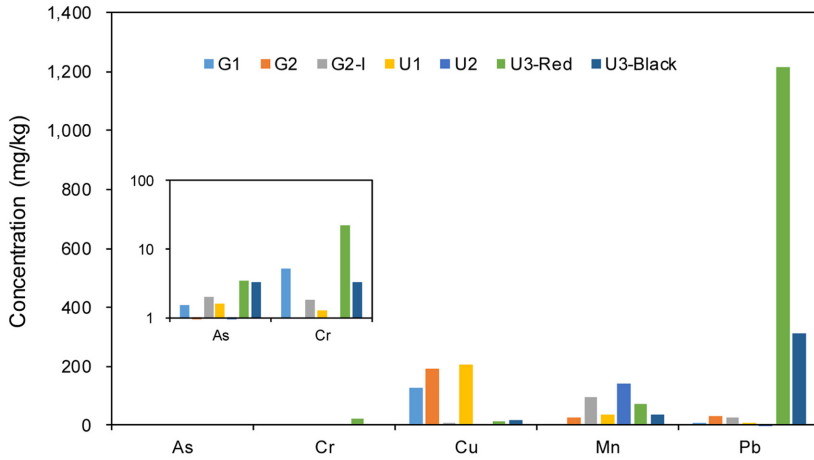


Fig. 1. Concentrations of selected heavy metals in artificial turf (G) and urethane track (U) samples collected in Ulsan.

시료별 납 농도를 구체적으로 살펴본 결과, 특정 지점(U3)에서 채취한 우레탄 트랙 시료의 납 농도(1,526 mg/kg, 붉은색과 검은색 시료량이 동일하다고 가정함)가 월등히 높았다(Fig. 2a). 이러한 농도 수준은 기존에 울산광역시교육청에서 동일 지점에서 채취하여 분석한 결과(U3-E, 1,693 mg/kg)와 유사한 수준으로서 KS 기준치(90 mg/kg)를 크게 초과한다. 검은색 탄성층 시료(U3-Black, 312 mg/kg)에 비해 붉은색 경질 우레탄 시료(U3-Red, 1,214 mg/kg)의 납 농도가 4배 정도 높은 수준이므로(Fig. 2b), 경질 우레탄 제조 과정에서 다량의 납이 첨가된 것으로 추정된다. 실제로 우레탄 트랙 제조과정에서는 액체 우레탄을 고체로 전환하기 위

해 경화제를 사용하며, 납을 촉매로 사용해 왔다. 2009년 환경부 보고서에서는 우레탄 시공에 사용되는 고무 칩, 우레탄 양생 시 인위적인 납 사용, 안료 등을 납 오염원으로 추정하였다.¹³⁾

3.1.2. 추출방법별 납 분석결과

추출방법에 따라 중금속 농도가 상당히 달라질 수 있으므로, 적절한 추출방법을 선택하는 것이 중요하다. 실외체육시설-탄성포장재에 관한 국가기준(KS F 3888-2)⁵⁾에 의하면, 중금속 중에서 4종(Pb, Cd, Cr⁶⁺, Hg)은 함량법으로 분석하고, 나머지 14종(Al, Sb, As, Ba, B, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Se, Sr, Sn, Zn)은 용출법을

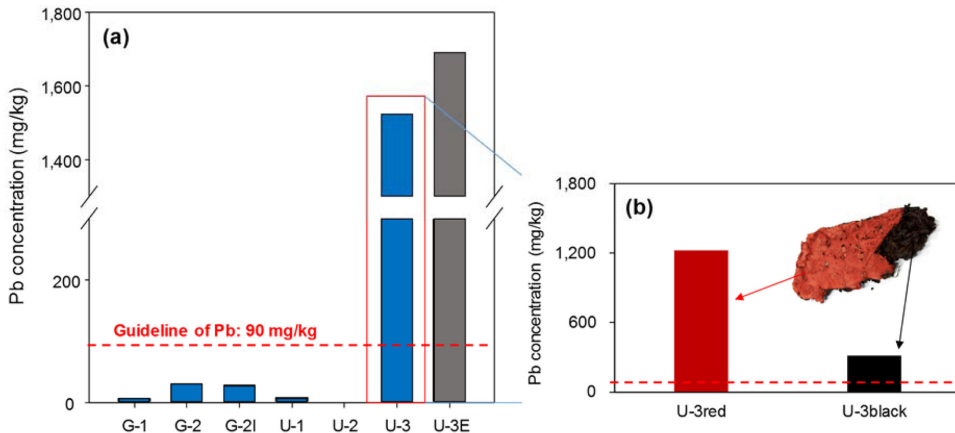


Fig. 2. Concentrations of lead (Pb) in artificial turf and urethane track samples.

사용해야 한다. 납은 용출법을 적용받았으나, 2012년 12월 1일 이후에는 함량법을 적용받는다. 따라서 새로운 기준이 적용되기 전에 생산·시공된 우레탄 트랙에서 납 기준치를 초과하는 사례가 빈번하다.

용출법이 적용되는 중금속의 경우에는 유럽 표준(EN 71-3)¹⁴⁾을 따라 추출한다. 실온(20°C)에서 염산 용액(0.07 mol/L)에 시료를 넣고 최소한 1분 동안 혼합한다. pH를 측정하여 1.3 이상이면 고농도 염산 용액(2 mol/L)을 첨가하여 pH가 1.2가 되도록 한다. 이 혼합물을 37°C (체온 고려)에서 1시간 정도 교반하고, 1시간 정치한 후 0.45 µm 또는 0.22 µm 필터로 여과한다. 이 절차는 경구섭취 평가에 사용하는 방법으로서 인공 위액을 모사한다. 우레탄 트랙에 함유된 중금속 농도를 정확히 분석하는 것이 목적이 아니라, 경구 섭취로 노출될 수 있는 환경을 모사하여 개별 물질에 대한 현실적인 노출량을 추정하는 것이 목적이다.

함량법은 시료에 있는 개별 중금속 총량을 분석하기 위해 강산을 이용하여 시료를 전량 녹이는 방법으로서 환경매체에 축적된 중금속 농도를 분석하는 일반적인 방법이다. 탄성포장재에 관한 기준(KS F 3888-2)⁵⁾에서는 재활용 고무 분말의 유해물질 측정방법(KS M 6956)⁶⁾을 적용한다. 이 측정방법에 제시된 함량법은 습식 분해법과 마이크로파 분해법으로 나뉜다. 습식 분해법에서는 황산, 질산, 질산 및 과염소산, 염산, 아이오딘화 수소산, 질산의 순서로 다단계로 시료를 분해한다. 마이크로파 분해법에서는 시료와 질산, 플루오린화 붕소산 용액, 과산화수소산, 물을 혼합하고 마이크로파 분해장치

를 이용한다.

본 연구에서는 기존 마이크로파 분해장치와 동등한 추출 결과를 산출하는 흑연블록 분해장치와 ICP-OES를 이용하여 중금속을 분석하였다. 또한, 우레탄 트랙에 관한 물리적 충격(운동장 사용, 빗물 접촉 등)을 모사하기 위해서 시료를 정제수에 넣고 초음파 추출하여 표면 추출을 시도하였다. 이 조건은 실제 우레탄 트랙 사용 중에 중금속이 용출되는 조건보다 강한 물리적 충격을 준 것으로 판단된다. 예상대로 초음파 추출한 시료의 납 농도가 매우 낮았다(1.51 mg/kg). 울산지역 토양 중 평균 농도(2009년 용출법: 8.92 mg/kg, 2010~2012년 함량법: 35.9 mg/kg)¹²⁾와 비교해도 상당히 낮은 수준이다. 우레탄 트랙의 상태가 정상적이라면(심한 마모와 파괴로 인한 분진 제외), 우레탄 트랙의 납 노출 기여도는 토양의 기여도(비산 먼지 호흡, 피부접촉, 섭취)보다 낮을 가능성이 있다. 그러므로 총 노출량 측면에서 납 기준치 초과 우레탄 트랙의 기여가 유의미한 수준인지 파악해야 한다.

3.2. 인체 위해성평가

화학물질 안전 차원에서 기준치를 설정하고 이에 대해 엄격하게 관리·감독하는 것은 유해물질 노출 최소화를 위해 바람직하다. 그러나 기준치 설정 이전에 설치한 시설에 대해서는 현행 기준치를 초과했다라도 인체 위해성평가를 통해 우려할 수준이 아니라면, 시설 노후화에 따라 단계적으로 교체하는 것을 고려할 필요가 있다. 예를 들어, 납은 비발암물질로 간주되므로 위해지수

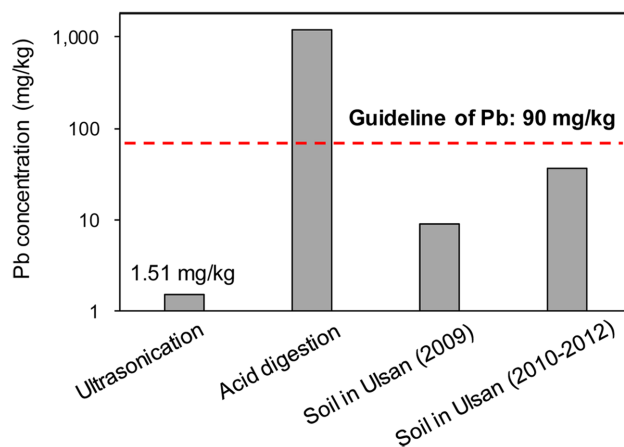


Fig. 3. Difference in concentrations of lead (Pb) derived from two extraction methods. Mean concentrations of Pb in soils collected from Ulsan were also plotted.¹²⁾

(HQ)가 1.0을 초과하는지 우선 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 기존에 수행된 우레탄 트랙에 대한 위해성 평가 과정을 검토하였다.

3.2.1. 납 노출량 산정

우레탄 트랙에 함유된 중금속은 흡입, 섭취(고무분말, 손), 피부접촉을 통해 체내에 유입될 수 있다. 이러한 유입량을 산정하기 위해서 기본적으로 다매체 시료채취와 기기분석이 진행된다. 이전 환경부 연구에서는 대기시료, 표면시료(Texwipe 1009 와이퍼), 제품함량 시료, 손 표면시료를 채취하여 기기분석하였다.¹³⁾ 대상 연령을 초등학생, 중고등학생, 일반인으로 나누고 현장관찰과 비디오 판독을 통해 노출 형태를 조사하여 다경로 노출 시나리오를 정립하였다. 이후, 국내의 위해성 평가 방법론을 검토하여 노출 시나리오별 이용자 위해도를 산정하였다.¹⁵⁾ 해당 연구에서는 연령별 자료 수집과 관찰을 통해 상당수 노출인자를 직접 설정하여 신뢰성을 향상하였다.

2016년 3월 환경부 발표자료⁴⁾에서 납의 비발암 위해도가 1.0을 초과한 이유는 손을 입으로 가져가는 행동(hand to mouth) 때문이다(Table 2). 이 행동은 우레탄 트랙 표면에 있던 납이 직접 접촉을 통해 손으로 이동하고 경구 섭취되는 것을 의미한다. 2010년 환경부 보고서¹⁵⁾에 의하면, 초등 저학년은 시간당 평균 1.8회, 초등 고학년은 2.7회, 중학생은 0.9회, 고등학생은 1.3회로 나타났다(비디오 판독 결과). 이 노출 경로는 19세 이상 성인에게는 해당하지 않는 것으로 간주하였다. 손에 묻어 있던 인조잔디와 탄성포장재 표면 잔류물이 입에 들어가서 제거되는 비율은 78%를 사용하였다. 그러나 이 조사결과가 해당 연령대를 대표할 수 있는지 추가 검증이 필요하다. 예를 들어, 연령대에 따라 우레탄 트랙에서 운동할 때 트랙 표면에 어느 정도 횡수와 압력으로 손이 접촉하는지 파악하고, 운동 후 손을 씻지 않는 비율 등을 확인해야 한다. 트랙 표면을 와이퍼로 닦아서 분석한 결과를 노출량 산정에 사용할 경우, 손 접촉으로 노출되는 정도와 많은 차이가 날 수 있다. 또한, 운동 후 씻지 않은 손으로 입술이나 치아에 순간적으로 접촉한 것인지, 손가락을 입에 깊이 넣어 손에 묻은 잔류물을 상당량 섭취했는지 구체적으로 조사해야 한다. 정상적인 어린이와 청소년이 무의식적으로 손가락을 입에 가져갈 수 있으나(손가락이나 손톱을 치아로 뜯는 행동 등 포함), 손가락을 입에 넣고 장시간 빨거나 손바닥을 혀로 핥지 않는다면 손에 묻은 오염물질이 효과적으

로 경구 섭취될 가능성은 작을 수 있다(영유아와 이식증 환자 제외).

3.2.2. 독성참고치

US EPA 통합위해도정보시스템(Integrated Risk Information System: IRIS)에 의하면, 납은 확실한 인체 발암물질로 분류되지 않았으므로 비발암물질로 분류하여 위해성평가를 수행해야 한다.¹⁶⁾ 이를 위해서는 경구 독성참고치(Reference Dose: RfD)가 필요한데, US EPA에서 이 값을 설정하는 것이 논의되었으나 최종적으로 값을 정할 수 없었다. 납의 용량-반응 실험결과가 부족하고 극히 낮은 농도에서도 어린이의 신경행동 발달에 영향을 미치므로 역치(threshold)가 없는 것처럼 보이기 때문이다.¹⁶⁾ 한편, 흡입독성참고치(Reference Concentration: RfC)는 US-EPA에서 전혀 평가되지 않았다. WHO는 잠정주간허용섭취량(Provisional Tolerable Weekly Intake: PTWI)을 0.025 mg/kg bw/week (= 0.0035 mg/kg bw/day)로 제시하였으나, 용량-반응평가로부터 역치가 존재한다는 증거가 없다는 이유로 2010년에 해당 PTWI를 철회하였다.¹⁷⁾ 이처럼 전 세계적으로 공신력 있는 두 기관에서 납의 독성참고치를 제시하지 않거나 철회한 상황이므로, 기존 RfD를 이용한 위해성 평가 결과를 어디까지 신뢰할 수 있는지 불확실하다. 뉴질랜드 환경부는 이러한 문제를 고려하여 JECFA의 용량-반응 모델링에 근거하여 별도의 RfD (0.0019 mg/kg bw/day)를 설정하였다.¹⁸⁾ 그럼에도 불구하고, 최근에 게재된 국내의 논문에서도 기존 수치(0.0035 mg/kg bw/day)를 사용하고 있다.^{3,19)}

한편, 환경부는 환경보건법에 따른 '환경유해인자의 위해성 평가를 위한 절차와 방법 등에 관한 지침(환경부 예규 제585호, 2016.7.25 일부 개정)'을 통해 어린이용품 함유 환경유해인자 위해성평가에 관한 절차와 방법을 제시하였다.²⁰⁾ 그러나 RfD를 포함한 구체적인 입력자료 수치를 제공하지 않았다. 2006년에는 토양환경보전법에 따른 '토양오염 위해성평가지침(환경부 고시 제2015-64호, 2015.5.1 일부 개정)'을 제정하였으며, 2015년 일부 개정하였다.²¹⁾ 이 개정 지침은 납의 RfD를 0.0005 mg/kg bw/day로 표기했으나, 그 근거로 US EPA IRIS¹⁶⁾와 수퍼펀드사이트 관련 안내서²²⁾를 제시하는 오류를 범하였다. 위에서 언급한 바와 같이 해당 시스템과 안내서에 납의 RfD는 제시되지 않았다. 한편, 2006년 지침에는 납의 RfD에 관한 참고문헌이 제시되지 않았으나, 이 지침을 마련한 환경부 보고서²³⁾에는 해당 참고문헌으로

Table 2. Mean concentrations, daily exposure, and risk of lead (Pb) in playgrounds of elementary schools in the capital region of Korea⁴⁾

		Exposure routes	Data
Concentration		Ambient air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.000
		Surface of artificial turf (pile) (mg/kg)	3.048
		Surface of rubber chip (mg/kg)	1.860
		Surface of urethane (mg/kg)	1088.726
		Surface of hand ($\mu\text{g}/\text{hand}$)	0.518
Average Daily Dose (ADD)	Inhalation	Ambient air	NA
		Direct ingestion	3.33E-08
	Ingestion	Surface of hand	8.61E-09
		Hand to mouth	6.18E-04
Total LADD (mg/kg bw/day)			6.19E-04
HQ (Hazard quotient)			1.2370

국립환경과학원 보고서²⁴⁾가 제시되었다. 이 보고서에 제시된 표 I-3-9에는 WHO RfD (0.0035 mg/kg bw/day), 미국 식약청(US FDA) RfD (0.0005 mg/kg bw/day), 미국 독성물질 질병등록국(ATSDR) RfD (0.0005 mg/kg bw/day)가 제시되었다. 그러나 US FDA 참고문헌이 구체적으로 제시되지 않았고, ATSDR은 명확한 증거가 없는 한 RfD와 같은 최소위해수준(Minimal Risk Levels: MRLs)을 정하지 않는 것을 방침으로 하고 있다.¹⁾ 이를 정리하면, 현행 토양오염 위해성평가지침에는 납의 RfD를 선정한 명확한 기준이 제시되지 않았으며, US EPA와 WHO의 결정이 반영되지 않았고, 참고문헌 원문 확인에도 오류가 있다.

인조잔디와 탄성포장재(우레탄 트랙)로 인한 인체 위해성에 대한 국내 연구결과로는 위에서 언급한 환경부 보고서¹⁵⁾와 이를 정리한 논문²⁵⁾이 있다(2016년 환경부 발표 관련 보고서는 미공개 상태임). 이 문헌자료에서는 납의 RfD로 성인(0.001 mg/kg bw/day)과 어린이(0.0006 mg/kg bw/day 또는 0.0035 mg/kg bw/day) 각각 다른 수치를 제시했으나, 이에 관한 구체적인 참고문헌을 제시하지 않았다. 노출량 산정뿐만 아니라 RfD 선택으로 위해성평가 결과가 뒤바뀔 수 있다. 2016년 3월 환경부 보도자료(Table 2)에 제시된 ADD와 HQ를 고려할 때(식 2: $\text{HQ} = \text{ADD} / \text{RfD}$), 해당 연구에서 사용한 RfD는 0.0005 (= 6.19E-04 / 1.2370) mg/kg bw/day이다. 만약, 철회된 WHO 기준인 0.0035 mg/kg bw/day를 사용하면 HQ는 0.177로서 우려되지 않는 수준이다. 뉴질랜드 환경부 독성참고치(0.0019 mg/kg bw/day)를 적용하면 0.326으로서 역시 위해성이 우려되지 않는다. 이처럼 어떤 RfD를 사용하느냐에 따라 위해성평가 결과가 달라지므로, 하나

의 독성참고치와 산출평균 자료에 기반을 둔 위해성평가 결과를 해석하는 데 주의가 필요하다. 원론적으로는 US EPA와 WHO에서 납의 RfD를 설정하지 않거나 철회한 상황에 대한 근본적인 고찰이 필요하다.

3.3. 기준치 초과 우레탄 트랙 관리방안

환경부는 ‘우레탄 트랙 위해성 관리 가이드라인 마련을 위한 연구’ 결과에 따라 위해도가 높은 시설 순으로 트랙을 교체할 예정이다. 이에 따라 울산시는 해당 가이드라인이 마련되는 대로 문제가 되는 우레탄 트랙을 전면 교체하고자 한다. 지금까지 논의한 내용을 종합할 때, 이미 철회되었거나 공신력 있는 기관에서 사용하지 않는 RfD를 이용한 인체 위해성평가 결과에 의존하여 의사결정을 하는 것은 부적절하다.

특정 시설이 납 농도 기준치를 크게 상회하고 위해도가 높게 산출되더라도 사용 인원과 빈도가 낮다면 서둘러 교체할 필요가 없다. 사용이 많은 시설이라도 성인 대상의 시설이라면 위해성이 크게 우려되는 상황이 아니다. 노후화 시설이 아닌 한(예: 심한 마모 등으로 납을 함유한 입자가 다량 비산 되거나 쉽게 접촉되는 경우), 단기간에 전수 교체를 하는 것 보다는 중장기적인 대응이 필요할 것이다. 성인이 사용하는 시설에 관해서는 현 상황에서 굳이 시설 교체(재시공)를 하지 말고 적정 사용기한을 제시할 필요가 있다. 단, 유아나 어린이의 사용빈도가 높은 시설에서는 사전대응 차원에서 우레탄 트랙을 교체하는 것을 제안한다.

4. 결 론

초·중·고교 운동장에 설치된 우레탄 트랙이 납으로 오

염되었다는 사실이 언론에 보도됨으로써 학부모들의 불안이 증가하고 일선 학교에서는 우레탄 트랙의 안전성을 확보하기 위해 트랙 사용 금지와 교체를 추진하고 있다. 이후, 대학교와 공공체육시설 등에 대한 검사 등으로 이어져서 우레탄 트랙을 사용하는 모든 체육시설로 문제가 확대되었다. 본 연구에서 함량법으로 추출하여 납을 분석한 결과, 일부 우레탄 시료가 현행 기준 (90 mg/kg)을 초과한 것으로 나타났다. 초음파를 이용하여 표면 추출한 결과, 함량법으로 추출한 것보다 상당히 낮은 농도로 검출되었다. 이러한 농도는 일반 토양 중 농도보다 낮은 수준이다. 우레탄 트랙에 기준치를 초과한 납이 함유되어 있으나, 다량으로 용출되어 주변 환경과 학교 구성원 체내에 축적될 가능성은 크지 않다. 그러므로 우레탄 트랙 표면에서 인체에 노출될 수 있는 납의 농도(단위면적당)와 실질적인 위해성은 우려할 수준이 아닐 가능성이 있다.

우레탄 트랙 관련 선행 연구를 검토한 결과, 위해성 평가에 사용한 납의 독성참고치(RfD)를 정할 수 없거나 기존 참고치도 철회된 것을 확인하였다. 환경부 위해성평가 지침도 부서에 따라 RfD에 대한 자료가 다르거나 참고문헌이 부정확한 사례를 확인하였다. 또한, 노출량 산정을 위해 사용한 입력자료가 실제 상황(손을 입으로 가져가는 행동)을 제대로 반영하는지 추가 확인할 필요가 있다. 향후, 노출평가와 RfD에서 유발되는 불확도를 고려하여 위해성평가의 신뢰성을 확보해야 하며, 우레탄 트랙 영향을 직접적으로 평가하기 위해서는 혈중 납 농도를 분석할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 ‘생화학 및 화학재난 감시 긴급대응 기술 및 장비개발’ 과제(1.170013.01)와 울산 MBC의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), "Toxicological profile for lead", 2007, US Department of Health and Human Services.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA), "Lead", <https://www.epa.gov/lead>, March 2017.
- D. Song, D. Zhuang, D. Jiang, J. Fu, and Q. Wang, "Integrated health risk assessment of heavy metals in Suxian county, South China", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12, 7100-7117.
- 환경부, "초등학교 우레탄트랙 유해물질 주의", 2016, 환경보건정책과 보도자료(2016년 3월 21일).
- 산업표준심의회, "실의 체육 시설-탄성 포장재(KS F 3888-2)", 2016.
- 국가기술표준원, "재활용 고무 분말의 유해물질 측정방법(KS M 6956)", 2010.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA), "Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices (EPA 3052)", 1996.
- 국립환경과학원, "환경시험-검사 QA/QC 핸드북", 2011.
- J. K. Gress, J. T. Lessl, X. Dong, and L. Q. Ma, "Assessment of children's exposure to arsenic from CCA-wood staircases at apartment complexes in Florida", *Science of the Total Environment*, 2014, 476-477, 440-446.
- United States Consumer Products Safety Commission (US CPSC), "Petition to ban chromated copper arsenate (CCA)-treated wood in playground equipment (Petition HP01-3)", 2003.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA), "Evaluation of the effectiveness of coatings in reducing dislodgeable arsenic, chromium, and copper from CCA treated wood", 2008.
- 최임조, 김대영, 이성우, 김지현, 전현덕, 윤기섭, 박선호, 함유식, "GIS를 이용한 울산지역 토양오염도 현황 연구", *울산광역시보건환경연구원보*, 2015, 167-220.
- 환경부, "인조잔디와 충전재의 유해물질 실태조사 및 위해성 평가(I)", 2009.
- European Committee for Standardization (CEN), "Safety of toys - Part 3: Migration of certain elements (EN 71-3)", 2013.
- 환경부, "인조잔디와 탄성포장재의 유해물질 위해성 평가 및 관리대책 마련", 2010.
- Integrated Risk Information System (IRIS), "Lead and compounds (inorganic)", <https://www.epa.gov/iris>, March 2017.
- World Health Organization (WHO), "Exposure to lead: A major public health concern", 2010.
- New Zealand Ministry for the Environment, "Toxicological intake values for priority contaminants in soil", 2011.
- 김호현, 임영욱, 이청수, 박주희, 홍승한, 이진우, 이윤규, 신동천, 양지연, "초등학교와 학원 실내 공간의 금속 원소류 다경로 노출에 의한 건강 위해성 평가", *한국실내환경학회지*, 2012, 9, 213-228.
- 환경부, "환경유해인자의 위해성 평가를 위한 절차와 방법 등에 관한 지침", 2016.
- 환경부, "토양오염물질 위해성평가 지침", 2015.

22. United States Environmental Protection Agency (US EPA), "Supplemental guidance for developing soil screening levels for Superfund sites", **2002**.
23. 환경부, "토양오염기준과 연계한 위해성평가 실무지침 작성 연구", **2006**.
24. 국립환경연구원, "납, 카드뮴 및 수은 오염에 대한 위
해성평가 기법 연구", **2005**.
25. H.-H. Kim, Y.-W. Lim, S.-D. Kim, I.-Y. Yeo, D.-C. Shin, and J.-Y. Yang, "Health risk assessment for artificial turf playgrounds in school athletic facilities: multi-route exposure estimation for use patterns", *Asian Journal of Atmospheric Environment*, **2012**, 6, 206-221.