

나노 소재 혼입 시멘트 복합체의 급성경구독성시험 및 급성경피독성시험을 통한 유해성 평가

Safety Assessments through Acute Oral Toxicity Test and Acute Dermal Toxicity Test of Cement Composite Containing Nano Materials

성재혁¹ · 송경석² · 정연웅³ · 정상화⁴ · 김주형^{3*}

Jae Hyuck Sung¹ · Kyung Seuk Song² · Yeonung Jeong³ · Sanghwa Jung⁴ · Joo Hyung Kim^{3*}

(Received November 2, 2022 / Revised November 8, 2022 / Accepted November 9, 2022)

This study conducted acute oral toxicity test and acute dermal toxicity test to evaluate the toxicity of lightweight and high-strength cement composite containing carbon nanotube. It was compared with the toxicity of ordinary concrete that did not contain carbon nanotube. Both lightweight and high-strength cement composite and ordinary concrete were categorized in GHS category 5 as a result of acute oral toxicity test. In addition, no toxic symptoms were observed during the acute dermal toxicity test in all specimens, concluding that those were judged to correspond to GHS category 5/unclassified.

키워드 : 나노 소재, 탄소나노튜브, 급성경구독성, 급성경피독성, 시멘트 복합체

Keywords : Nano material, Carbon nanotube, Acute oral toxicity, Acute dermal toxicity, Cement composite

1. 서론

나노 소재 분야 기술 발전에 따라 다양한 분야에서 나노소재가 사용되고 있으며, 콘크리트에도 탄소나노튜브를 포함하는 탄소계 나노소재가 다양하게 활용되고 있다(Sikora et al. 2018; Singh and Saini 2021). Kim et al.(2020)은 다중벽 탄소나노튜브를 혼입한 시멘트 페이스트의 유변학적 특성이 혼입률 증가에 따라 소성점도 및 항복응력이 증가하는 방향으로 변화되는 것을 보고하였으며, 물/시멘트 비가 낮은 시멘트 페이스트에서 이러한 경향이 더욱 뚜렷해 진다고 주장하였다. 또한, 적정 혼입량의 선정을 통해 시멘트 페이스트의 역학적 성능을 향상할 수 있음을 보고하였다. Im et al.(2022)은 그래핀 옥사이드를 모르타르에 첨가하는 경우 잔골재와 시멘트

페이스트의 계면(interfacial transition zone, ITZ)의 미세 균열이 감소하고 압축강도 및 휨인장강도가 증가하는 것을 보고하였다.

다양한 나노 소재가 건설용 재료에 사용되고 있으나, 나노 소재를 콘크리트 등의 건설재료에 혼합하는 경우 콘크리트의 제조, 사용, 및 폐기 등의 전 주기에서 첨가된 나노소재의 인체 노출을 배제할 수 없다. 나노소재의 인체 노출은 흡입, 경구, 피부, 및 점막 노출 경로로 노출될 수 있으며 흡입 노출이 가장 유해성이 높은 경로로 제시되고 있다. 나노소재의 흡입은 매우 작은 크기($5 \mu m$ 이하)로 인해서 폐장의 폐포에 침착되게 되며, 폐포의 매우 느린 배출 기작으로 인해서 매우 느린 배출 속도를 보인다(Lee et al. 2020). 따라서 초기 세입자 크기($< 100 nm$)의 입자상 물질의 흡입노출은 다양한 급성/만성 염증질환과 암을 유발할 수 있다(Donaldson et al. 2013).

* Corresponding author E-mail: kjhmole@kcl.re.kr

¹한국건설생활환경시험연구원 환경독성센터 책임연구원 (Environmental Toxicity Center, Korea Conformity Laboratories, Incheon, 21999, Korea)

²한국건설생활환경시험연구원 바이오본부 본부장 (Bio Division, Korea Conformity Laboratories Incheon, 21999, Korea)

³한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터 책임연구원 (Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 08503, Korea)

⁴한국건설생활환경시험연구원 건설본부 본부장 (Construction Division, Korea Conformity Laboratories, Cheongju, Chungcheongbuk-do, 28115, Korea)

나노소재에 의한 인체 위해성(risk)은 나노소재 고유의 독성 유발 정도(유해성; hazard)와 노출량(exposure)에 의해서 결정된다. 비록 탄소나노튜브가 발암성이 일부 인정되고 있더라도 (Fukushima et al. 2018; Kasai et al. 2015; Kobayashi et al. 2017), 콘크리트와 같은 단단한 복합체를 형성하고 있어서 인체에 노출되지 않거나 입자의 크기가 흡입되지 않는 크기($> 5 \mu m$)이거나 섬유상 형태가 뭉쳐져 있는 형태(tangled or agglomerated)로 존재하는 등의 다양한 상황에 따라서 탄소나노튜브는 흡입독성이 없을 수 있다. 즉, 나노소재의 독성은 물리화학적 특성에 기반하고 있기 때문에(Braakhuis et al. 2014), 동일한 물질이더라도 나노소재가 인체에 노출되는 상황의 다양한 요인들에 의해서 독성이 달라질 수 있다. 또한, 나노소재의 물리·화학적 특성의 변화는 인체 노출량에도 크게 영향을 미치기 때문에 결국 인체 위해성이 달라지게 된다. 이러한 이유로 인해서 일반적으로 유해하다고 보고되는 나노소재들도 안전하게 사용할 수 있는 방법을 고안해 낼 수 있다. 또한, 기존의 선행연구들은 각 소재 단위에서의 유해성 평가가 수행되어왔으며, 이에 석면(asbestos), 석영(quartz) 등 건설 소재로 활용 가능한 소재들의 유해성은 충분히 인식되어왔다. 하지만, 이러한 소재를 포함한 제품군(석고 보드, 콘크리트 등)에 대한 유해성 평가는 아직 수행되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구는 경량·고강도 시멘트 복합체에 탄소나노튜브를 혼입하여 시험체를 제작하고 급성경구독성시험 및 급성경피독성시험을 통해 나노 소재를 혼입한 건설재료의 유해성을 평가하였다. 또한, 나노 소재를 혼입하지 않은 재령 28일 압축강도 50 MPa 수준의 일반 콘크리트와 그 유해성을 비교하여 나노 소재 혼입 시멘트 복합체의 유해성을 검토하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 A사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 사용한 시멘트의 물리적 특성 및 광물 조성은 Jeong et al.(2020)의 것과 동일하다. 일반 콘크리트 시편 제조에는 KS 규격을 만족하는

굵은 골재와 잔골재를 사용하였으며(KS F 2527 2020), 단위중량은 각각 2,573 kg/m³ 및 2,642 kg/m³ 이다. 굵은 골재 최대치수는 13 mm 이며, 굵은 골재와 잔골재 모두 표면건조포화상태의 것을 사용하였다.

나노 소재를 혼입한 경량·고강도 시멘트 복합체 제조에는 보통 포틀랜드 시멘트, 실리카 폼, 실리카 분말, 규사, 중공마이크로입자, 경량 잔골재 및 액상 탄소나노튜브를 사용하였다. 사용한 시멘트 실리카 폼, 실리카 분말, 규사, 중공마이크로입자, 경량 잔골재의 물리·화학적 특성은 선행연구(Jeong et al. 2020) 것과 동일하며, 본 연구에서 사용한 중공마이크로입자는 선행연구의 SB3를 사용하였다. 액상 탄소나노튜브는 직경 10Å의 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotube, MWCNT)를 폴리카르본산계 분산제로 물에 분산한 제품으로 탄소나노튜브:분산제:물의 비율이 1:1:98인 제품을 사용하였다.

2.2 콘크리트 시편 제조

일반 콘크리트 시편(Normal)과 나노 소재를 혼입한 경량·고강도 시멘트 복합체(Nano)의 배합조건을 Table 1에 나타내었다. 일반 콘크리트는 물-시멘트 비(w/c) 0.354, 잔골재율(S/a) 40 % 배합으로 배합표상 단위용적중량이 2,372 kg/m³이다. 액상 탄소나노튜브를 혼입한 경량·고강도 시멘트 복합체는 물-결합재(시멘트+실리카 폼) 비(w/B) 0.20이며, 배합표상 단위용적중량은 약 2,000 kg/m³이다. Table 1에 표기한 화학혼화제(PCE) 함량은 고품분양을 기준으로 나타내었으며, 실제 배합시 화학혼화제에 포함된 물은 배합수에서 보정하여 배합을 실시하였다. 액상 탄소나노튜브 역시 분말 탄소나노튜브의 함량을 기준으로 표기하였으며, 배합시 이를 보정하여 투입량을 산정하였다. 탄소나노튜브의 혼입량은 고품분 기준 결합재의 2 %로 선정하였다.

일반 콘크리트 시편은 잔골재(FA), 굵은 골재(CA) 및 시멘트(OPC)를 강제식 믹서에 투입하고 건비빔을 실시한 후 배합수와 화학 혼화제를 투입하여 배합을 실시하였다. 나노 소재를 혼입한 경량·고강도 시멘트 복합체의 경우 시멘트, 실리카 폼(SF), 실리카 분말(SP), 규사(SS)를 호바트 믹서에 투입 후 10분간 건비빔을

Table 1. Mix design for concrete specimen

(unit: kg/m³)

Label	Water	OPC	SF	SP	SS	CA	FA	HMS	LWAC	LWAF	PCE	CNT	S/a	w/B
Normal	183	517	0	0	0	1042	669	0	0	0	2.1	0	40 %	0.354
Nano	175	700	175	140	237	0	0	15.4	58.7	528.3	9.6	17.5	-	0.200

OPC=ordinary Portland cement, SF=silica fume, SP=silica powder, SS=silica sand, CA=Coarse aggregate, FA=fine aggregate, HMS=hollow microsphere, LWAC=light weight aggregate 2~5 mm, LWAF=light weight aggregate under 2 mm, PCE=polycarboxylate superplasticizer, w/B=water/(OPC+SF).

실시하였다. 이후 화학 혼화제와 액상 탄소나노튜브를 투입하고 2분간 추가 배합을 실시하였다. 중공 마이크로입자와 경량 잔골재(LWAC, LWAF)를 투입하고 고속에서 2분, 저속에서 1분간 추가 배합 후 $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 원주형 공시체 몰드에 타설하였다.

일반콘크리트는 온도 60 °C, 상대습도 99 %의 항온항습기에서 24시간 양생 후 탈형하여 온도 21 °C, 상대습도 65 %의 항온항습실에서 목표 재령일(7일, 28일) 도달시까지 추가 양생을 실시하였다. 나노 소재를 혼입한 경량·고강도 시멘트 복합체는 타설 후 온도 21 °C, 상대습도 65 %의 항온항습실에서 24시간 양생 후 탈형을 실시하였다. 이후 온도 90 °C, 상대습도 99 %의 항온항습기에서 48시간 양생을 실시하고 온도 21 °C, 상대습도 65 %의 항온항습실에서 목표 재령일(7일, 28일) 도달시까지 추가 양생을 실시하였다. 재령 7일, 28일에 준비한 시편의 압축강도를 측정하였다.

인체유해성 평가를 위한 시편은 재령 28일 경화체를 아게이드 몰탈 및 패슬을 이용하여 조분쇄하고 D50이 약 2 μm 수준에 도달할 때까지 볼밀을 이용하여 미분쇄하였다. Fig. 1은 분쇄를 마친 일반 콘크리트 및 경량·고강도 시멘트 복합체의 누적 입도 분포를 나타낸다. 분쇄한 일반 콘크리트 분말의 D50은 2,216 μm 이고, 나노 소재를 혼입한 경량·고강도 시멘트 복합체 분말의 D50은 2,546 μm 이다.

2.3 인체 유해성 평가 방법

시험물질 콘크리트 미분말 및 나노소재 함유 나노콘크리트 복합재료에 대한 인체 유해성 평가를 위해 급성경구독성시험 및 급성경피독성시험을 실시하였으며, 각 시험은 GLP (good laboratory practice) 기반으로 진행하였다(Ministry of Environment 2018).

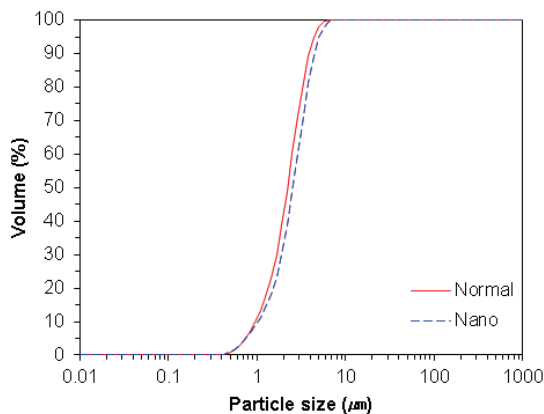


Fig. 1. Cumulative particle distribution of ground specimens

2.3.1 급성경구독성시험

시험물질 콘크리트 미분말 및 나노소재 함유 시멘트 복합체 미분말의 독성증상 및 반수치사량(Lethal dose 50, LD₅₀)을 조사하기 위하여 국립환경과학원 고시 제2020-28호(2020년 08월 19일) 및 제2020-46호(2020년 11월 03일), OECD Guideline for the Testing of Chemicals No. 423 'Acute Toxic Class Method' (Adopted: 17th December 2001)의 방법으로 시험을 실시하였다.

2.3.2 급성경피독성시험

시험물질 콘크리트 미분말 및 나노소재 함유 시멘트 복합체 미분말의 독성증상 및 GHS (globally harmonized classification system for chemical substances and mixtures) 분류를 실시하기 위하여 국립환경과학원 고시 제2020-28호(2020년 08월 19일) 및 제2020-46호(2020년 11월 03일), OECD Guideline for the Testing of Chemicals No. 402 'Acute Dermal Toxicity: Fixed Dose Procedure'(Adopted: 9 October 2017)의 방법으로 시험을 실시하였다.

2.3.3 실험동물 및 사육환경

7주령의 특정병원균 부재(SPF) Sprague-Dawley 암컷 랫드(NSam:SD)를 (주)샘타코(경기도 오산시)에서 구입하였으며, 암컷은 과거에 새끼를 낳은 적이 없고 현재 임신 중이지 않은 것을 사용하였다. 입수 당일 미생물 검사성적서와 동물의 외관을 검사하였다. 예비시험은 입수 후 6일간, 본 시험은 13일간의 순화기간을 두었으며, 순화기간 중 일반증상을 관찰하여 건강한 동물만을 시험에 사용하였다. 순화기간 및 실험기간 동안 12시간의 명암 사이클 주기로 온도(23 °C ± 2 °C) 및 습도(50 % ± 20 %)를 유지하였다. 사육상자는 급성경구독성시험인 경우, 검역, 순화, 투여 및 관찰기간 중 스테인레스제 망사육상자(250 W × 350 L × 180 H mm)에 3 마리 이하로 수용하였으며, 급성경피독성시험인 경우, 검역, 순화, 투여 및 관찰기간 중 스테인레스제 망사육상자(250 W × 350 L × 180 H mm)에 검역 및 순화기간은 3 마리 이하, 투여 및 관찰기간은 1 마리씩 수용하였다. 사료(Teklad Certified Irradiated Global 18 % Protein Rodent Diet, Envigo, USA)는 급이기에 넣고 자유섭취시켰다. 물은 음용 상수도수를 정수시킨 후 폴리카보네이트제 물병에 넣고 자유섭취시켰다.

2.3.4 시험방법

(1) 급성경구독성시험

투여 전에 하룻밤을 절식시켜 위 내용물을 비운 후 2,000

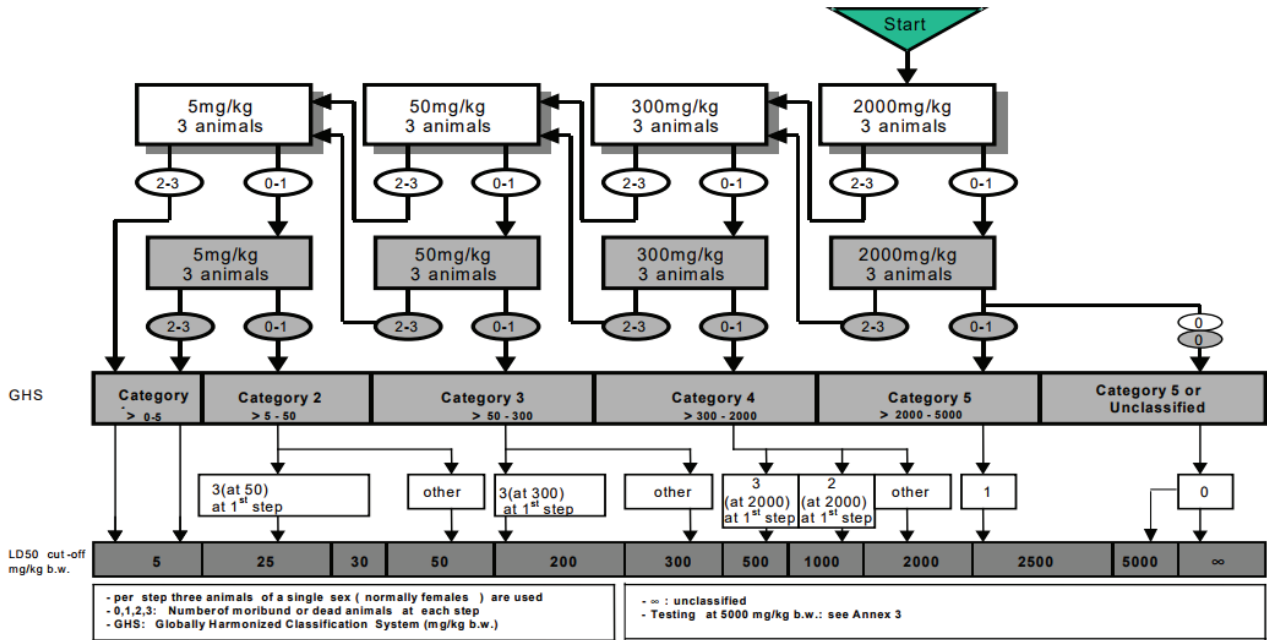


Fig. 2. Test Procedure with a starting dose of 2000 mg/kg body weight (OECD 2001)

mg/kg의 투여용량으로 10 ml/kg 투여액을 경구투여용 존대를 이용하여 강제 경구투여 하였다. 투여 후 3~4 시간 절식한 후에 사료를 재공급하였으며 절식 중이라도 물은 공급하였다. 투여용량은 시험물질과 유사한 물질(concrete)의 독성정보를 참고하여 2,000 mg/kg의 투여용량을 개시용량으로 설정하였다. 각 단계별로 투여 후 6 일 이상 사망률을 관찰한 후에 단계별 흐름도(Fig. 2)에 따라 각 단계의 용량을 결정하였다.

(2) 급성경피독성시험

투여 하루 전에 구간배부를 중심으로 체표면적의 10 % 이상을 제모하였다. 투여 당일 체표면적의 약 10 % 범위에 해당할 수 있도록 첩포용 거즈(7 × 5 cm)에 2,000 mg/kg의 투여용량으로 투여 당일 측정된 체중을 기준으로 3 mg/kg의 투여액량의 시험물질을 균일하게 도포하고 멸균증류수로 습윤시켰다. 이를 피부에 밀착시킨 후, 비자극성 비닐(Opsite Flexifix, Smith & Nephew Medical Ltd., UK)을 이용하여 덮은 다음 비자극성 테이프(Micropore, 3M)와 탄력붕대(Coban, 3M)로 고정시켰다. 24 시간 이상이 지난 후에 첩포를 제거하고 투여부위를 미온수로 닦아주었다. 시험물질과 유사한 물질(concrete)의 독성정보를 참고하여 2,000 mg/kg의 투여용량을 개시용량으로 예비시험을 실시하였다. 예비시험 투여 후 6 일 이상 사망률을 관찰한 결과를 바탕으로 본시험의 개시용량을 2,000 mg/kg으로 설정하여 시험을 수행하였다(Fig. 3(a) 및 (b)).

(3) 검사항목

1) 일반증상관찰

모든 동물에 대하여 일반증상관찰을 실시하였다. 투여 당일에는 투여 후 30 분 이내에 1 회 관찰하였고 4 시간까지 매시간 마다 관찰하였다. 이후 투여 후 14 일까지 매일 1 회 일반증상관찰을 실시하였다.

2) 체중측정

모든 시험동물에 대하여 입수 시, 군분리 시, 투여 전(투여일), 투여 후 1, 7 및 14 일째(부검 전)에 측정하였다.

3) 부검

투여 후 14 일째에 모든 생존동물을 CO₂ 가스를 이용하여 마취시킨 후 회복하여 복대동맥과 후대정맥을 절단하는 방법으로 방혈 치사시켜 육안적으로 모든 장기를 검사하였다.

4) 자료의 평가

각 시험단계별 시험동물의 체중을 평균 및 표준편차로 정리하고 국립환경과학원 고시 및 OECD 시험절차를 위한 흐름도를 참고하여 분류하였다.

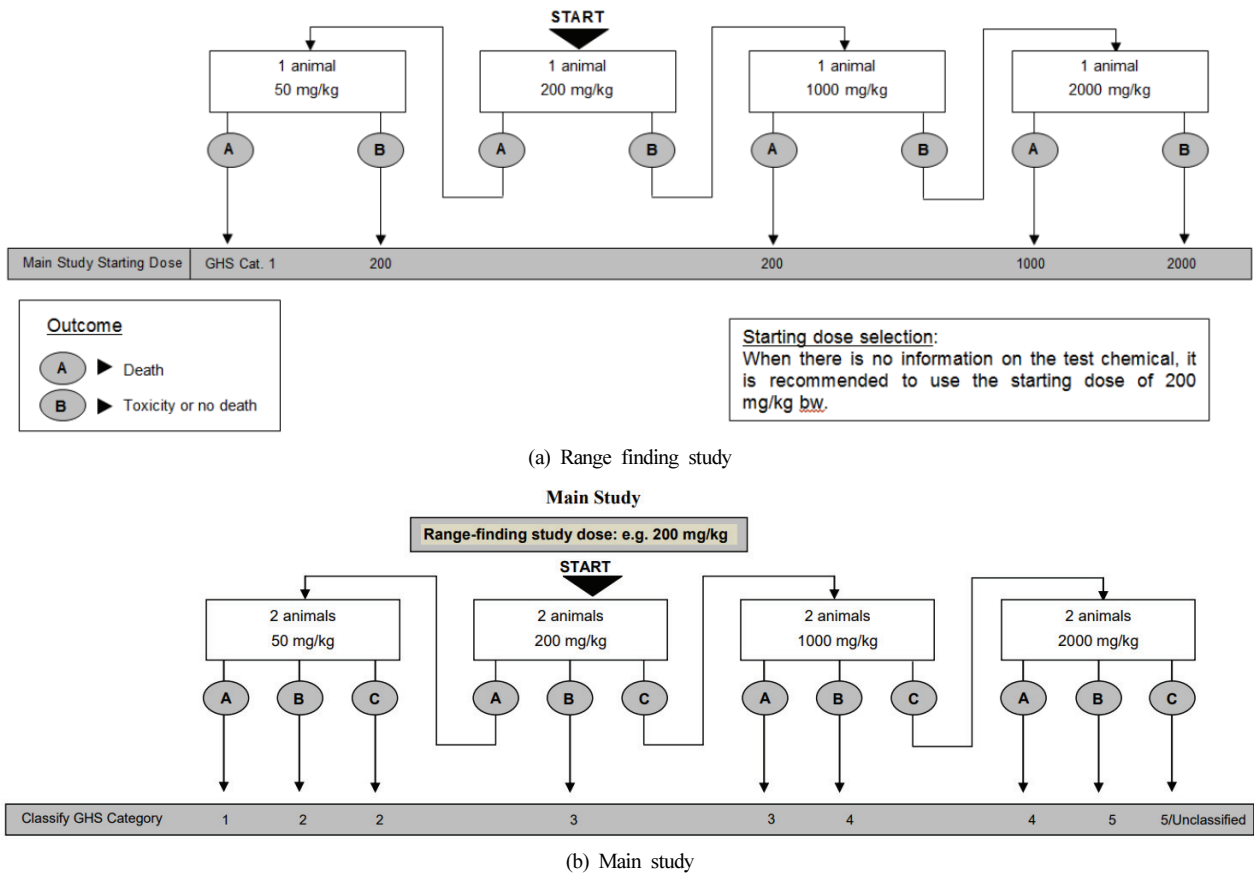


Fig. 3. Flowchart for the testing procedure (OECD 2017)

3. 연구결과

3.1 압축강도 시험 결과

재령 7일 및 28일에 측정한 압축강도 시험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 일반 콘크리트의 재령 7일 압축강도는 45.11 ± 0.90 MPa, 재령 28일 압축강도는 49.84 ± 1.54 MPa로 나타났다. 나노 소재를 혼입한 경량·고강도 시멘트 복합체의 재령 7일 압축강도는 118.20 ± 1.77 MPa, 재령 28일 압축강도는 126.01 ± 4.59 MPa로 나타났다. 재령일 증가에 따라 압축강도가 소폭 상승하는 것으로 나타났으나, 일반 콘크리트와 경량·고강도 시멘트 복합체 모두 재령 초기 고온 양생으로 인해 압축강도 증가폭은 크지 않은 것으로 나타났다.

3.2 일반 콘크리트 미분말

3.2.1 급성경구독성시험

(1) 1 단계 2,000 mg/kg 시험군

실험기간 동안 사망동물 및 특이한 일반증상은 관찰되지 않았다. 체중측정결과, 1 레에서 시험물질 투여 7 일째 체중이 투여 1 일째 체중에 비하여 감소하였다. 그 외 기간 및 시험동물에서는 정상적인 체중증가가 관찰되었다(Fig. 5(a)). 실험종료 시 부검결과, 2 레에서 선위의 적화(red, glandular stomach) 소견이 확인되었다. 그 외 특이한 육안소견이 관찰되지 않았다.

(2) 2 단계 2,000 mg/kg 시험군

실험기간 동안 사망동물 및 특이한 일반증상은 관찰되지 않았다. 체중측정결과, 모든 시험동물에서 정상적인 체중증가가 관찰되었다(Fig. 5(b)). 실험종료 시 부검결과, 특이한 육안소견은 관찰되지 않았다.

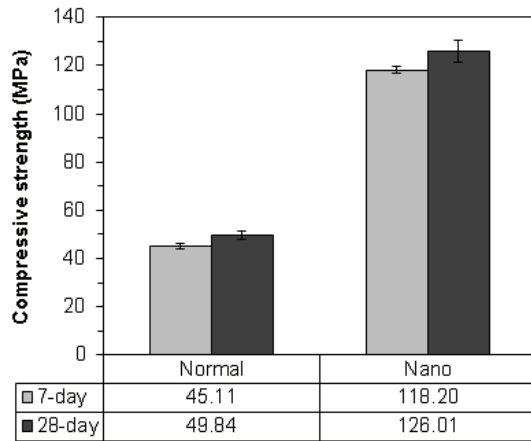
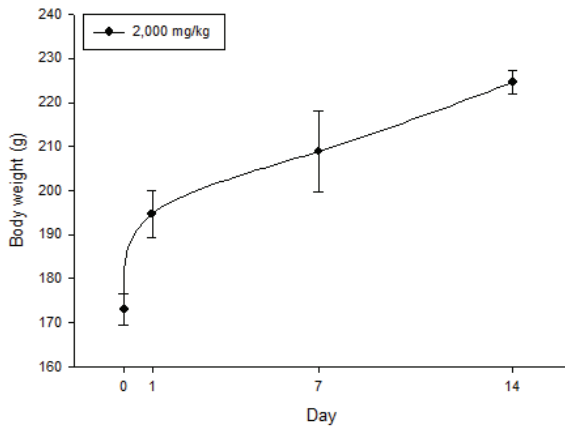
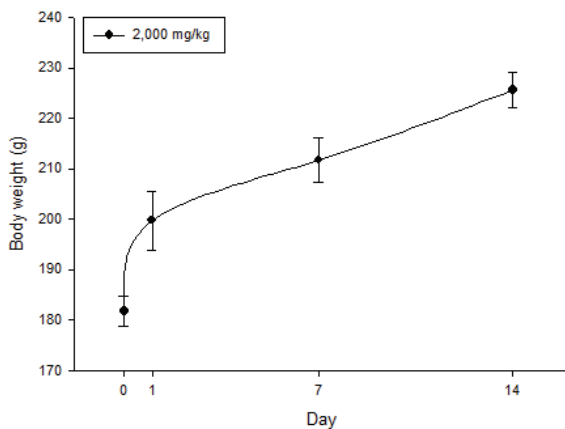


Fig. 4. Result of compressive strength test at 7 days and 28 days

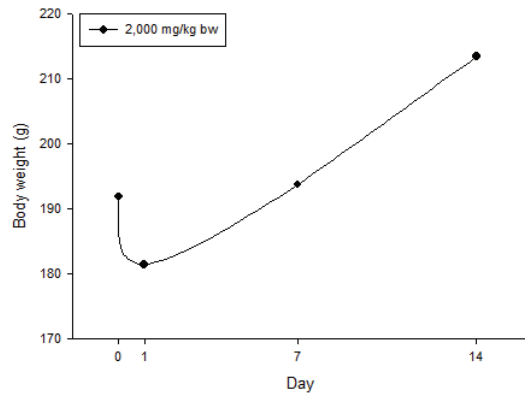


(a) 1st step; 2,000 mg/kg

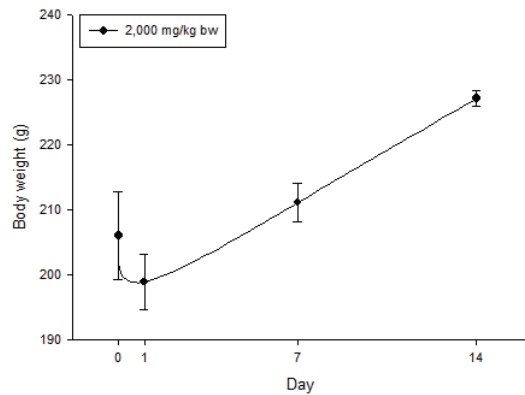


(b) 2nd step; 2,000 mg/kg

Fig. 5. Body weight of female rats of concrete powder in acute oral toxicity study



(a) 1st step(preliminary study); 2,000 mg/kg



(b) 1st step(main study); 2,000 mg/kg

Fig. 6. Body weights of female rats of concrete powder in acute dermal toxicity study

3.2.2 급성경피독성시험

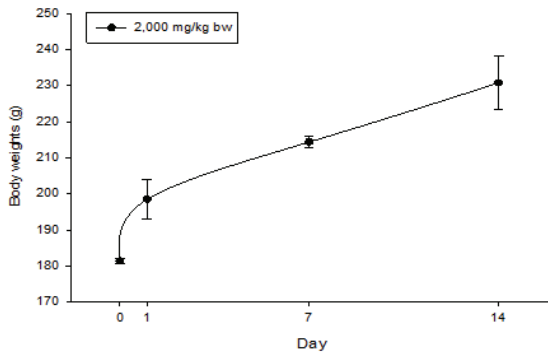
(1) 예비 1 단계 2,000 mg/kg 시험군

실험기간 동안 사망동물은 관찰되지 않았으나, 1 레에서 시험물질 투여 3~7 일째에 투여부위(등배 피부)에 각질화(keratinization)가 관찰되었다가 이후 정상으로 회복하였다.

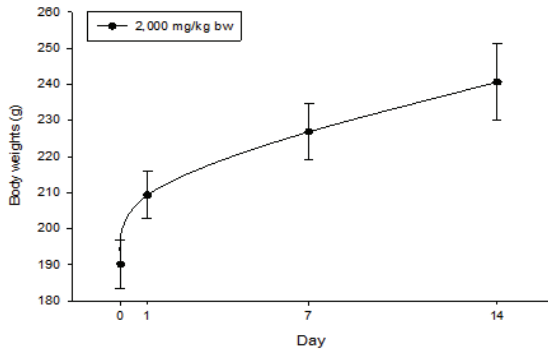
체중측정 결과, 1 레에서 시험물질 투여 1 일째 체중이 투여 전에 비하여 감소하였다. 그 외 기간에는 정상적인 체중증가가 관찰되었다(Fig. 6(a)). 실험종료 시 부검결과, 특이한 육안소견은 관찰되지 않았다.

(2) 본 1 단계 2,000 mg/kg 시험군

실험기간 동안 사망동물은 관찰되지 않았으나, 2 레에서 시험물질 투여 1~4 일째에 투여부위에 발적(erythema), 투여 3~9 일째에 각질화가 관찰되었으며 1 레에서는 투여 5~12 일째에 가피(crust formation)가 나타났다. 상기 소견은 모두 정상으로 회복하였다. 체중측정 결과, 2 레에서 시험물질 투여 1 일째 체중이 투여



(a) 1st step; 2,000 mg/kg



(b) 2nd step; 2,000 mg/kg

Fig. 7. Body weights of female rats of nano-concrete composite material containing nanomaterials in acute oral toxicity study

전에 비하여 감소하였다. 그 외 기간에는 정상적인 체중증가가 관찰되었다(Fig. 6(b)). 실험종료 시 부검 결과, 특이한 육안소견은 관찰되지 않았다.

3.3 나노소재 함유 경량·고강도 시멘트 복합체 미분말

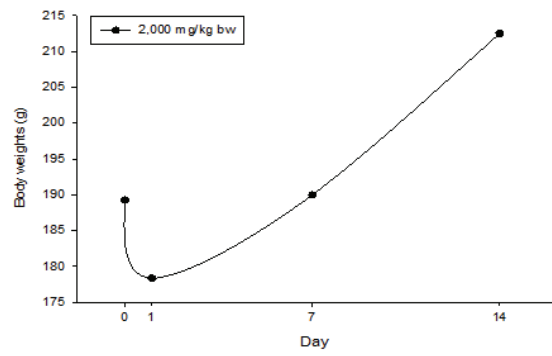
3.3.1 급성경구독성시험

(1) 1 단계 2,000 mg/kg 시험군

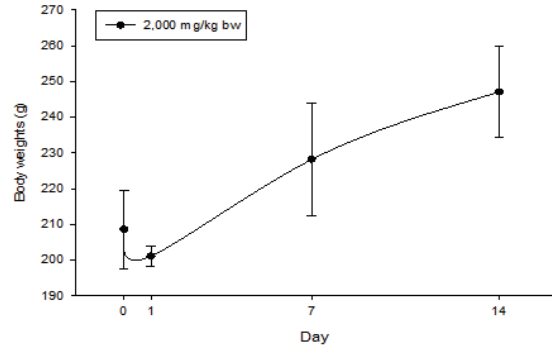
실험기간 동안 사망동물 및 특이한 일반증상은 관찰되지 않았다. 체중측정결과, 모든 시험동물에서 정상적인 체중증가가 관찰되었으며(Fig. 7(a)), 실험종료 시 부검결과 특이한 육안소견은 관찰되지 않았다.

(2) 2 단계 2,000 mg/kg 시험군

실험기간 동안 사망동물 및 특이한 일반증상은 관찰되지 않았다. 체중측정결과, 모든 시험동물에서 정상적인 체중증가가 관찰되었으며(Fig. 7(b)) 실험종료 시 부검결과 특이한 육안소견은 관찰되지 않았다.



(a) 1st step(preliminary study); 2,000 mg/kg



(b) 1st step(main study); 2,000 mg/kg

Fig. 8. Body weights of female rats of nano-concrete composite material containing nanomaterials in acute dermal toxicity study

3.3.2 급성경피독성시험

(1) 예비 1 단계 2,000 mg/kg 시험군

실험기간 동안 사망동물 및 특이한 일반증상은 관찰되지 않았다. 체중측정 결과, 1 레에서 시험물질 투여 1 일째 체중이 투여 전에 비하여 감소하였다. 일반증상이나 부검소견에서 특이사항이 없었기 때문에 폐쇄 첩포에 의한 일시적인 현상으로 판단된다. 그 외 정상적인 체중증가가 관찰되었다(Fig. 8(a)). 실험종료 시 부검 결과, 특이한 육안소견은 관찰되지 않았다.

(2) 본 1 단계 2,000 mg/kg 시험군

실험기간 동안 사망동물 및 특이한 일반증상은 관찰되지 않았다. 체중측정 결과, 2 레에서 시험물질 투여 1 일째 체중이 투여 전에 비하여 감소하였다. 일반증상이나 부검소견에서 특이사항이 없었기 때문에 폐쇄 첩포에 의한 일시적인 현상으로 판단된다. 그 외 정상적인 체중증가가 관찰되었다(Fig. 8(b)). 실험종료 시 부검 결과, 특이한 육안소견은 관찰되지 않았다.

4. 결론

급성경구독성시험 및 급성경피독성시험을 통해 나노 소재를 함유한 경량·고강도 시멘트 복합체의 유해성을 평가하고 일반 콘크리트의 유해성과 비교한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 급성경구독성시험 결과, 콘크리트 미분말 및 나노소재 함유 나노콘크리트 복합재료를 SD 암컷 랫드에 단회 투여하였을 때, 반수치사량은 > 2,000 mg/kg bw으로 GHS category 5로 판단된다.
2. 급성경피독성시험 결과, 콘크리트 미분말 및 나노소재 함유 나노콘크리트 복합재료에 의한 독성증상은 관찰되지 않았으며, GHS category 5/미분류(unclassified)에 해당하는 것으로 판단된다.
3. 급성경구독성시험 및 급성경피독성시험을 통해 나노 소재를 함유한 경량·고강도 시멘트 복합체의 유해성을 평가한 결과 일반 콘크리트의 시험 결과와 비교하여 주목할 만한 유해성은 식별되지 않았다. 하지만, 본 논문의 결과가 나노 소재를 활용한 건설재료의 인체 무해성을 담보하는 것은 아니며, 장기간에 걸친 시험을 통해 유해성 검토가 필요하다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2022년 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원(22NANO-C156177-03)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Braakhuis, H.M., Park, M.V., Gosens, I., De Jong, W.H., Cassee, F.R. (2014). Physicochemical characteristics of nanomaterials that affect pulmonary inflammation, *Particle and Fibre Toxicology*, **11**, 18.

Donaldson K, Schinwald A, Murphy, F., Cho, W.S., Duffin, R., Tran, L., Poland, C. (2013). The biologically effective dose in inhalation nanotoxicology, *Accounts of Chemical Research*, **46**(3),

723–732.

Fukushima, S., Kasai, T., Umeda, Y., Shnishi, M., Sasaki, T., Matsumoto, M. (2018). Carcinogenicity of multi-walled carbon nanotubes: challenging issue on hazard assessment, *Journal of Occupational Health*, **60**(1), 10–30.

Im, S.M., Cho, S.M., Liu, J.X., Lim, S., Bae, S.C. (2022). Investigation on the characteristics of interfacial transition zone(ITZ) of high-strength cement mortar incorporating graphene oxide, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **10**(3), 343–350 [in Korean].

Jeong, Y., Lim, G.H., Kang, Y.H., Jung, S.H., Kim, J.H. (2020). Preliminary study on development of high strength cement composites at 2,000 kg/m³ of specific weight, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8**(4), 562–570 [in Korean].

Kasai, T., Umeda, Y., Ohnishi, M., Mine, T., Kondo, H., Takeuchi, T., Matsumoto, M., Fukushima, S. (2015). Lung carcinogenicity of inhaled multi-walled carbon nanotube in rats, *Particle and Fibre Toxicology*, **13**(1), 1–19.

Kim, J.H., Kim, W.W., Moon, J.H., Chung, C.W. (2020). Effect of multi-walled carbon nanotube on rheological behavior and compressive strength of cement paste, *Journal of the Korea Recycled Construction Resources Institute*, **8**(4), 467–474 [in Korean].

Kobayashi, N., Izumi, H., Morimoto, Y. (2017). Review of toxicity studies of carbon nanotubes, *Journal of Occupational Health*, **59**, 394–407.

KS F 2527. (2020). Concrete Aggregate, Korean Standards Association, Republic of Korea [in Korean].

Lee, D.K., Jeon, S., Jeong, J., Song, K.S., Cho, W.S. (2020). Carbon nanomaterial-derived lung burden analysis using UV-Vis spectrophotometry and proteinase K digestion, *Particle and Fibre Toxicology*, **17**(1), 1–11.

Ministry of Environment Notice No. 2018–23. (2018). Regulations on Designation Standards and Management Standards of Chemical Testing Institutions(adopted: 09 Feb. 2018), Ministry of Environment, Republic of Korea [in Korean].

National Institute of Environmental Research Notice No. 2020–28. (2020). Regulations on Testing Methods for Chemicals(adopted: 19 Aug. 2020), National Institute of Environmental Research, Republic of Korea [in Korean].

National Institute of Environmental Research Notice No. 2020–46. (2020). Regulations on Testing Methods for Chemicals(adopted: 03 Nov. 2020), National Institute of Environmental Research,

Republic of Korea [in Korean].
OECD Guideline for the Testing of Chemicals No. 402, (2017). Acute Dermal Toxicity: Fixed Dose Procedure (adopted: 9 Oct, 2017), Organisation for Economic Co-operation and Development, France.
OECD Guideline for the Testing of Chemicals No. 423, (2001). Acute Toxic Class Method(adopted: 17 Dec, 2001), Organisation for

Economic Co-operation and Development, France.
Sikora P., Abd Elrahman M., Stephan D. (2018). The influence of nanomaterials on the thermal resistance of cement-based composites – a review, *Nanomaterials*, **8(7)**, 465.
Singh G., Saini B., (2021). Nanomaterial in cement industry: a brief review, *Innovative Infrastructure Solutions*, **7(1)**, 1–13.

나노 소재 혼입 시멘트 복합체의 급성경구독성시험 및 급성경피독성시험을 통한 유해성 평가

본 연구에서는 탄소나노튜브를 혼입한 경량·고강도 시멘트 복합체의 유해성을 평가하기 위해 급성경구독성시험 및 급성경피독성시험을 실시하고, 이를 재령 28일 압축강도 50 MPa 수준의 탄소나노튜브를 혼입하지 않은 일반 콘크리트의 유해성과 비교하였다. 일반 콘크리트 및 탄소나노튜브를 혼입한 경량·고강도 시멘트 복합체 모두 급성경구독성시험결과 GHS category 5인 것으로 조사되었다. 또한, 모든 시편에서 급성경피독성시험에서 독성증상은 관찰되지 않았으며, GHS category 5/미분류(unclassified)에 해당하는 것으로 판단된다.