



가혹한 조건에서 열화된 콘크리트의 중금속 용출에 대한 환경 안전성 평가

최연왕^{1)*} · 오성록¹⁾ · 박만석¹⁾ · 김상철²⁾ · 정상화³⁾

¹⁾세명대학교 토목공학과 ²⁾한서대학교 토목공학과 ³⁾한국건설생활환경시험연구원

The Environmental Safety Evaluation on Heavy Metal Leaching of Deteriorated Concrete under Severe Conditions

Yun-Wang Choi,^{1)*} Sung-Rok Oh,¹⁾ Man-Seok Park,¹⁾ Sang-Chel Kim,²⁾ and Sang-Hwa Jung³⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Hanseo University, Seosan 356-706, Korea

³⁾Korea Conformity Laboratories, Seoul 137-707, Korea

ABSTRACT Cement industry in 1997 began to use industrial waste in cement factory for purpose of resource recycling. However recently, environmental hazard of the cement in accordance with recycling of industrial waste have been raised a problem by contamination around the cement factory and heavy metal leaching in cement. In particular, the presence of Cr⁶⁺ in cement has become a critical issue, the studies for minimizing of Cr⁶⁺ in cement have been performed. But, in domestic, most of the research on heavy metal leaching was carried out from the perspective of the cement. Environmental safety assessment in terms of concrete is needed because cement is used to the concrete material. Therefore, this paper was evaluated heavy metals leaching of deteriorated concrete by severe conditions. test result showed that Cr⁶⁺ were not detected from all the variables.

Keywords : environmental safety, deteriorated concrete, severe condition, various environment, industrial byproduct

1. 서 론

시멘트 산업은 1997년 정부의 자원순환 정책에 따라 폐타이어 재활용을 목적으로 시멘트 대체연료로써 소성로에 사용하기 시작하였으며, 1999년 “폐기물관리법” 개정에 따라 간단한 신고절차에 의하여 산업폐기물을 시멘트 부원료 및 보조연료로써 법적 사용이 가능하게 되었다.¹⁾

이에 따라 시멘트 산업에서는 폐타이어, 폐고무, 폐유, 폐윤활유, 석탄재, 오니류 및 철강슬래그 등의 각종 산업 폐기물을 시멘트 생산시 다량 사용하게 되었으며, 이를 통하여 에너지 절약, 원가 절감 및 자원 재활용에 기여하는 등 친환경적인 산업으로 변모하기 위하여 노력하고 있다.²⁾

그러나 최근 시멘트 공장 주변 지역의 오염, 발암성 시멘트 등 시멘트에 대한 환경문제가 관련 환경단체 및 언론 등에서 제기되기 시작하였다.^{3,4)} 시멘트 생산시 산업 폐기물이 부원료 및 보조연료로 사용되기 때문에 시멘트

내 유해 중금속이 존재하게 되며, 이를 건설재료로 사용하기 때문에 중금속 용출, 새집 증후군 및 아토피 유발 원인이 되는 등 시멘트 유해성 논란이 현재까지 지속되고 있는 실정이다. 이에 따라 환경부와 민간단체는 시멘트 소성로 민관협의회를 구성하여 시멘트 내 중금속 함유량에 대한 합동조사를 수행하였으며, 그 결과 실제 국내 시멘트에서 다량의 중금속이 검출된 것으로 보고되었다.^{5,6)} 특히 시멘트에서 검출된 Cr⁶⁺의 경우 인체에 유해한 중금속으로 알려져 있기 때문에,⁷⁾ 시멘트의 유해성 논란이 더욱 더 가속화되고 있는 실정이다.

따라서 환경부에서는 시멘트에 포함된 Cr⁶⁺의 함유기준을 2008년 제정하였으며, 현재 시멘트의 Cr⁶⁺ 함유기준을 20 ppm 이하로 관리하도록 하고 있다. 또한 각 시멘트 제조사들은 매년 시멘트의 중금속 분석 결과를 공개하도록 하고 있으며,⁸⁾ 현재 국내 시멘트의 경우 모두 Cr⁶⁺ 함유량을 기준 이하로 관리하고 있는 실정이다.^{9,10)}

그러나 이와 관련된 기 연구 및 검토 사례의 경우 대부분 시멘트 관점에서만 수행되고 있다.¹¹⁻¹⁸⁾ 시멘트는 콘크리트 구성재료 중 하나로써 콘크리트 상태로 환경에 노출되기 때문에 관련 연구 및 검토를 수행하는 경우 콘크리트 관점에서 수행되는 것이 바람직 한 것으로 판단

*Corresponding author E-mail : crete77@semyung.ac.kr

Received April 2, 2013, Revised June 9, 2013,

Accepted June 9, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

된다. 또한 실제 환경에 노출된 콘크리트는 여러 가지 원인에 의하여 열화되기 때문에 이에 따른 영향을 함께 검토하는 것이 바람직 하지만 현재 관련 연구 및 검토 사례의 경우 미흡한 실정이다.

따라서 이 논문에서는 중금속이 용출된 시멘트를 사용하여 콘크리트를 제조하였으며, 콘크리트의 주요열화 인자인 동결융해, 탄산화 및 염해에 대하여 가혹한 조건에서 열화된 콘크리트의 환경안전성을 평가하였다. 또한 산업폐기물이 시멘트용 부원료 및 대체연료로 사용되기 이전 건설된 실제 구조물과 이후 건설된 실제 구조물의 콘크리트를 채취하여 각각의 중금속 용출에 따른 환경안전성을 검토하였으며, 어독성 실험을 통하여 콘크리트가 환경에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 혼화재

실험에 사용된 시멘트는 '07. 12 ~ '08. 04 시멘트 소성로 환경관리개선 민·관협의회와 환경부가 공동으로 실시한 시멘트 중금속 정밀분석 결과⁵⁾를 토대로 생산공장 및 생산지역을 고려하여 국내 3사 시멘트(이하 A, B 및 C로 약함)의 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)를 선정하여 각 출하공장에서 벌크상태의 시멘트를 직접 입수하였다. 또한 콘크리트 배합의 경우 국내 레미콘 공장에서 사용되는 대표적인 보통강도 및 고강도 배합을 선정하였으며, 3성분계 배합의 경우 고로슬래그 미분말(이하 GGBF로 약함) 및 플라이애쉬(이하 FA로 약함)를 사용하였다.

2.1.2 골재

실험에 사용된 잔골재는 낙동강산 강모래(이하 S로 약함)를 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수 20 mm의 화강암질 부순골재(이하 G로 약함)를 사용하였다.

2.1.3 혼화제

콘크리트의 유동성 확보 및 공기량 조절을 위하여 KS 규격에 적합한 국내 H사의 리그닌계 감수제(이하 WRA로 약함)와 양질의 공기연행제(이하 AE제로 약함)를 사용하였다.

2.2 실험 계획

2.2.1 실험변수

Table 1은 콘크리트의 환경안전성을 평가하기 위한 실험변수를 나타낸 것이다. 선정된 3사의 시멘트에 대하여 총 3수준(보통강도, 고강도 및 고강도 3성분계)으로 설정

Table 1 Experimental variables

Cement type	Strength type (f_{ck} , W/B)	Mixing proportion (%)
A	Normal strength (27 MPa, 50%)	OPC
	High strength (40 MPa, 35%)	OPC FA15 + GGBF25
B	Normal strength (27 MPa, 50%)	OPC
	High strength (40 MPa, 35%)	OPC FA15 + GGBF25
C	Normal strength (27 MPa, 50%)	OPC
	High strength (40 MPa, 35%)	OPC FA15 + GGBF25

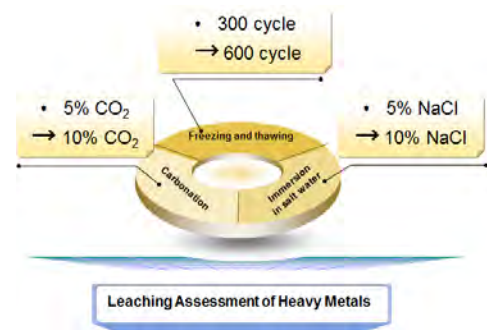


Fig. 1 Severe deterioration conditions

하였으며 목표 슬럼프의 경우 150 ± 20 mm, 목표 공기량의 경우 보통강도는 $4.5 \pm 1.5\%$, 고강도 및 고강도 3성분계는 $3.5 \pm 1.5\%$ 설정하여 콘크리트를 제조하였다. 고강도 3성분계 배합의 경우에는 현장에서 많이 사용되는 혼합 비율을 선정하여 FA 15% 및 GGBF 25%를 혼합한 배합을 사용하였다.

2.2.2 열화조건

Fig. 1은 가혹한 조건에서 열화된 콘크리트를 제조하기 위한 가혹한 열화조건을 나타낸 것이다. 콘크리트의 대표적인 열화요인인 동결융해, 탄산화 및 염해 피해를 받은 콘크리트를 대상으로 하였으며, 각 조건에서 콘크리트 시편이 완전히 열화되도록 하기 위하여 기존 실험 방법에서 각 열화조건을 2배 이상의 가혹한 조건으로 적용하여 콘크리트 시편이 완전히 열화되도록 하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 콘크리트 압축강도

콘크리트 환경안전성을 평가하기 위한 열화된 콘크리트 시편을 제작함에 앞서 강도 발현 여부를 평가하기 위하여 KS F 2405에 준하여 압축강도를 측정하였다. 시험

용 공시체는 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 몰드를 성형하여 24 시간 경과 후 탈형하였으며, 소정의 재령일까지 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 수조에 침지하여 양생을 실시하였다.

2.3.2 동결융해

동결융해 피해를 가혹하게 받은 콘크리트 시편을 제작하기 위하여 KS F 2456에 준하여 실시하였으며, 완전히 열화되도록 하기 위하여 600 사이클까지 진행하였다. 또한 실험이 진행되는 동안 30 사이클마다 상대동탄성계수를 측정하여 열화정도를 평가하였다.

2.3.3 탄산화

탄산화 피해를 가혹하게 받은 콘크리트 시편을 제작하기 위하여 KS F 2584에 준하여 20주 동안 실시하였으며, 완전히 열화되도록 하기 위하여 기존 CO_2 농도 5%에서 2배인 10%로 CO_2 농도를 증가시켜 탄산화를 가속화 하였다. 또한 실험이 진행되는 동안 탄산화 깊이를 측정하여 열화정도를 평가하였다.

2.3.4 염해

염해를 가혹하게 받은 콘크리트 시편을 제작하기 위하여 염수침지 실험을 실시하였으며, 콘크리트 시편의 중앙 부위를 절단하여 전처리를 실시한 후 일반적으로 사용되는 NaCl 수용액을 5% 에서 10% 로 2배 증가시켜 90 일간 침지하였다. 이후 침지 전·후 질량변화 및 표면박리 여부를 관찰하여 콘크리트 시편의 열화정도를 평가하였다.

2.3.5 중금속 용출

콘크리트의 환경안전성을 평가하기 위하여 중금속 용출 특성을 평가하였으며, 각 열화조건에서 얻어진 열화된 콘크리트 시편을 주요 6가지 중금속(Pb, Cu, Cd, As, Hg, Cr6+)에 대하여 고체의 대표적인 용출시험방법인 폐기물공정시험방법¹⁹⁾에 의하여 실험을 실시하였다.

2.3.6 실제 구조물의 콘크리트 채취

산업폐기물이 시멘트용 부원료 및 보조연료로써 사용된 경우('04)와 사용되지 않은 경우('90)의 중금속 용출에 대한 환경 안전성을 검토하기 위한 적합한 지역을 선정하여 각 구조물의 콘크리트를 채취하였다. Fig. 2는 각 조건을 만족하는 강원도 영월소재지의 실제 구조물의 콘크리트 채취 장소를 나타낸 것이다.

2.3.7 이득성 실험

콘크리트가 환경에 미치는 영향을 검토하기 위하여 시멘트 및 강도 수준에 관계없이 탄산화 된 경우와 탄산화 되지 않은 경우의 $\phi 100 \times 200$ mm 콘크리트 시편을 각각 12L 수조에 3마리의 금붕어와 함께 넣은 후 시간에 따라 수조내 pH 및 금붕어의 변화를 육안으로 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 콘크리트 압축강도

Fig. 3은 보통강도, 고강도 및 고강도 3성분계 배합의



Fig. 2 Sampling place of concrete structures

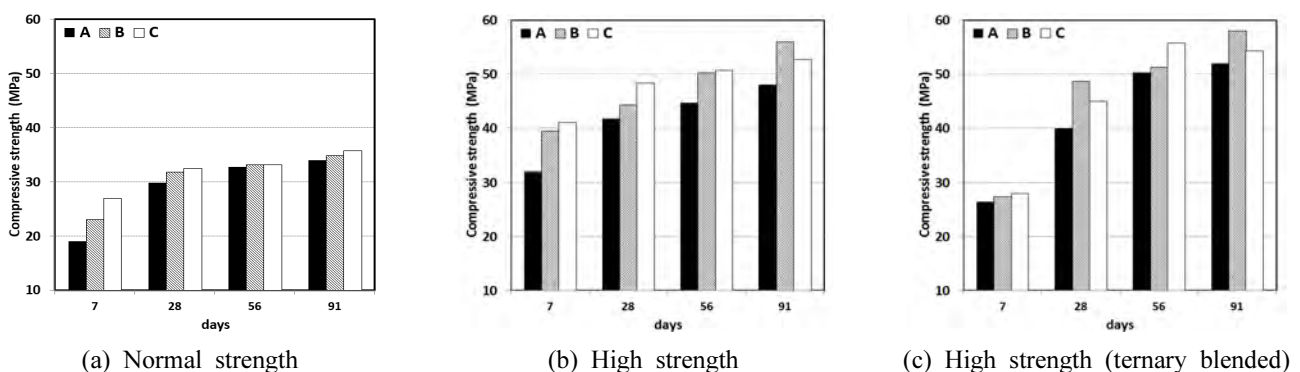


Fig. 3 Compressive strength test results of concrete

압축강도 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3의 결과 보통강도의 경우 시멘트 제조사에 따라 초기 재령의 압축강도가 다소 차이가 발생하였으나 재령 28일 이후 압축강도는 유사한 수준으로 나타났다. 고강도의 경우 초기 및 장기 재령에서 A사의 시멘트 강도가 B 및 C사의 시멘트와 비교하여 약 15~20% 작은 것으로 나타났으나 설계기준강도 이상인 것으로 나타났다. 또한 고강도 3성분계의 경우 고강도와 유사한 경향으로 강도가 나타났으며, 초기 재령의 경우 고강도와 비교하여 강도가 약 15% 작은 것으로 나타났으나 장기 재령의 경우 최대 10% 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 결과를 통하여 시멘트 종류에 따른 보통강도, 고강도 및 고강도 3성분계 배합의 압축강도는 시멘트사에 따라 다소 차이가 발생한 것으로 나타났지만 재령에 따라 모두 설계기준강도 이상으로 나타나 소요의 압축강도가 충분히 발현되고 있음을 알 수 있었다.

3.2 콘크리트 열화정도

3.2.1 동결융해

동결융해를 가혹하게 받은 콘크리트의 열화정도를 평가하기 위하여 30 사이클 마다 상대동탄성계수를 측정하여 동결융해 피해를 받은 콘크리트 시편의 열화정도를 평가하였다. Fig. 4는 보통강도, 고강도 및 고강도 3성분계의 각 동결융해 사이클에 따른 상대동탄성계수 측정 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4의 결과 강도 수준과 관계없이 소요의 공기량이 확보된 경우 300 사이클 이후에도 충분한 동결융해 저항성을 가지는 것으로 나타났으며, 시멘트 종류에 따라 다소 차이는 발생하였지만 모두 유사한 동결융해 저항성을 가지는 것으로 나타났다. 또한 동결융해를 가혹하게 받아 파괴되거나 상대동탄성계수 40% 이상 감소시까지 실험을 진행한 결과 각 A, B 및 C의 경우 보통강도, 고강도 및 고강도 3성분계 배합 모두 600 사이클 경과 이후 모두 상대동탄성계수 40% 이상 감소한 것으로 나타나 동결융해로 인한 열화가 충분히 진행된 것으로 나타났다.

3.2.2 탄산화

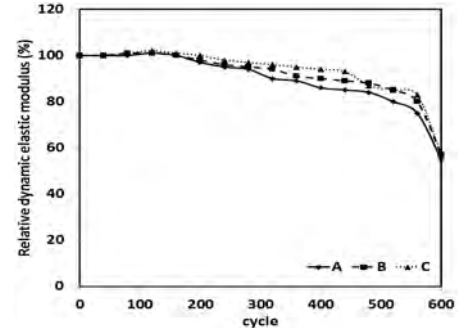
Fig. 5는 보통강도, 고강도 및 고강도 3성분계의 탄산화 깊이 측정 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5의 결과 보통강도의 경우 A, B 및 C사의 시멘트의 탄산화 깊이는 유사한 수준으로 나타났으며, 탄산화 깊이가 약 30 mm로 나타났다. 고강도 및 고강도 3성분계의 경우 보통강도와 동일하게 시멘트 종류와 관계없이 유사한 수준인 것으로 나타났으며, 탄산화 깊이가 약 15~18 mm로 나타났다.

이러한 결과를 통하여 탄산화 20주 경과 후 시멘트 종류에 따라 탄산화 깊이는 동등수준인 것으로 나타났으며, 강도수준에 따라 보통강도 영역의 경우 고강도 영역과 비교하여 탄산화가 더 빠른 것으로 나타나 각 조건에 맞

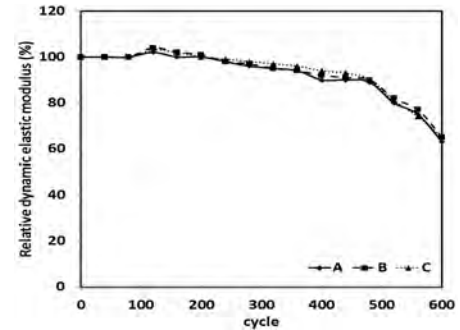
도록 탄산화에 의한 열화가 충분히 진행된 것으로 판단된다.

3.2.3 염수침지

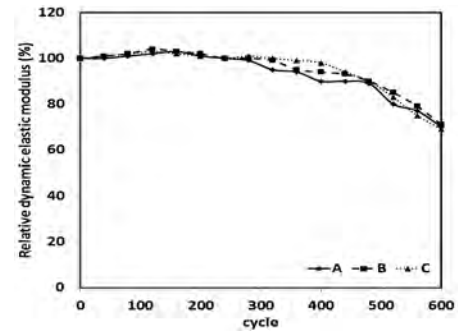
Fig. 6은 보통강도, 고강도 및 고강도 3성분계의 염수



(a) Normal strength



(b) High strength



(c) High strength (ternary blended)

Fig. 4 Test results of concrete by freezing and thawing

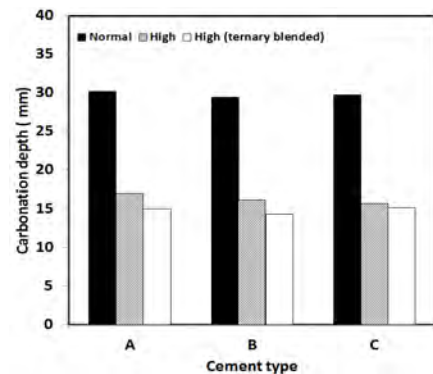


Fig. 5 Test results of concrete by carbonation

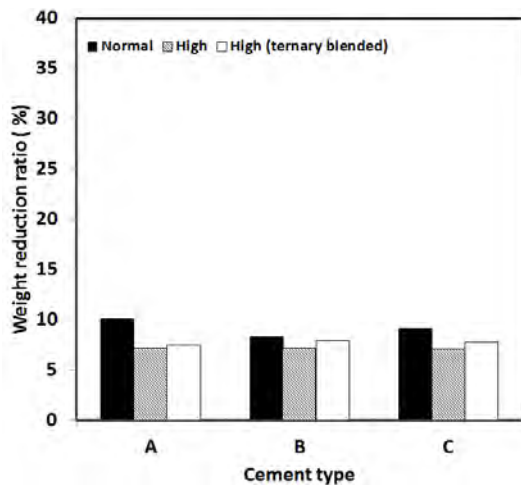


Fig. 6 Test results of concrete by salt water immersion

침지 실험 결과 침지 전·후의 콘크리트 시편의 질량 감소율을 나타낸 것이다. Fig. 6의 결과 시멘트 종류에 따라 다소 차이가 발생하였으나 보통강도의 경우 약 8~10%, 고강도 및 고강도 3성분계의 경우 약 7~8% 질량이 감소한 것으로 나타났으며, 모든 배합의 경우 표면 박리가 발생한 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통하여 모든 배합은 염해에 의한 열화가 충분히 진행된 것으로 판단된다.

3.3 콘크리트의 중금속 용출

3.3.1 시멘트 분말의 중금속 용출 특성

실험에 사용된 시멘트 분말 자체의 중금속 용출 특성을 평가하기 위하여 선정된 A, B 및 C사의 시멘트 분말의 중금속 용출 실험을 실시하였다. Table 2는 사용된 시

Table 2 Leaching result of heavy metals

Type		Leachate concentration (mg/L)						
		Pb	Cd	Cr ⁶⁺	Cu	Hg	As	
Cement powder		A	N.D	N.D	0.45	N.D	N.D	N.D
		B	N.D	N.D	0.46	N.D	N.D	N.D
		C	N.D	N.D	0.34	N.D	N.D	N.D
Freezing and thawing	Normal	A	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		B	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		C	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	High	A	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		B	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		C	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	High (ternary blended)	A	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		B	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		C	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Carbonation	Normal	A	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		B	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		C	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	High	A	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		B	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		C	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	High (ternary blended)	A	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		B	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		C	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Salt damage	Normal	A	N.D	N.D	N.D	0.012	N.D	N.D
		B	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		C	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	High	A	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		B	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		C	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	High (ternary blended)	A	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		B	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
		C	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Actual concrete structures		'90	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D
		'04	N.D	N.D	0.02	N.D	N.D	N.D

*N.D : non detection

멘트 분말 및 가혹한 조건에서 열화된 콘크리트 시편의 중금속 용출 실험 결과를 나타낸 것이다. 시멘트 분말의 중금속 용출 실험 결과 A사, B사 및 C사의 시멘트에서 각각 0.45, 0.46 및 0.34 mg/L의 Cr⁶⁺이 검출된 것으로 나타났다. 따라서 기연구된 사례와 동일하게 이 연구에서 사용된 시멘트에는 3사 시멘트 모두 Cr⁶⁺이 존재하고 있음을 확인 할 수 있었으며, 최근 생산된 시멘트는 Cr⁶⁺이 환경부 관리기준 이내로 상당수 줄어들 것을 확인 할 수 있었다. 또한 이외의 중금속은 검출되지 않은 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 시멘트 생산과정 중 고온의 킬른에서 모두 연소되기 때문인 것으로 판단된다.

그러나 Cr⁶⁺이 시멘트 분말에서 검출된 원인은 소성과정 이후 킬른내 내화벽돌의 노후, 클링커 분쇄매체 및 분쇄를 용이하게 하기 위한 폐유 등의 첨가에 의한 Cr⁶⁺의 유입가능성에 대하여 검토할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3.3.2 콘크리트의 중금속 용출 특성

가혹한 열화조건에서 열화된 콘크리트의 환경안전성을 평가하기 위하여 선정된 A, B 및 C사의 시멘트로 제작된 콘크리트 시편의 중금속 용출실험 결과 가혹한 조건에서 동결융해, 탄산화 및 염해 피해를 받은 경우 모든 항목에서 Cr⁶⁺은 검출되지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Cr⁶⁺이 존재하는 시멘트를 사용하는 경우라도 콘크리트로 제조하는 경우에는 수화과정에서 시멘트 수화생성물에 의하여 Cr⁶⁺ 등과 같은 중금속 들이 콘크리트 내부에 고정화 및 안정화되어 중금속이 용출될 수 없었던 것으로 판단되며, 가혹한 열화조건에서 열화가 된 경우에도 콘크리트로 경화된 경우에는 내부의 수화생성물에 의하여 용출하지 못하는 것으로 판단된다.

3.3.3 실제 콘크리트 구조물의 중금속 용출 특성

산업폐기물을 시멘트 생산시 부원료 및 보조연료로써 사용하기 이전 건설된 콘크리트 구조물('90)과 이후 건설된 콘크리트 구조물('04)에서 채취한 콘크리트 시료의 중금속 용출 실험 결과 '90년 건설된 구조물과 '04년 건설된 구조물에서 Cr⁶⁺이 각각 0.05 및 0.02 mg/L 검출된 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통하여 산업폐기물을 시멘트 부원료 및 보조연료로 재활용하여 제조된 시멘트에서는 Cr⁶⁺이 존재하고 있는 것으로 나타났지만 콘크리트로 경화된 경우에는 시멘트 생산시 산업폐기물의 재활용 유무가 중금속 용출량에 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 또한 각각의 용출된 Cr⁶⁺량은 시멘트 내 Cr⁶⁺ 함유량의 관리가 이뤄지지 않은 당시 함유량과 비교하여 매우 미소한 양이 용출된 것으로 나타났기 때문에 Cr⁶⁺ 검출 원인에 대하여 외부 환경적 요인이 중금속 용출량에 영향을 미칠 수 있는 가능성에 대하여 추가적인 검토가 필요 할 것으로 판단된다. 즉 단시간 내에 실험실에서 열화를 진행하여 얻은 결과와 달리 장기간 외부환경에서 복합적인 열화요인에 의하여 열화된 실제

콘크리트 구조물이므로 콘크리트 시료 채취과정 등에서 확실하게 제거되지 못한 페인트 등의 잔류 유해물질 존재 또는 미수화 시멘트의 존재로 중금속의 충분한 고정화 및 안정화가 이루어지지 못하였을 가능성에 대하여 검토할 필요가 있으며, 또한 실제 환경에서의 Cr⁶⁺은 산화제로 사용되는 화학산업 또는 크롬합금, 전기도금 및 사진촬영 등의 금속산업에서도 발견되는 경우가 있으므로 실제 환경에 노출된 콘크리트의 경우 외부 환경적 요인도 함께 고려하여 검토 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3.4 어독성 실험 결과

Fig. 7은 시간경과에 따른 수조내 pH 변화를 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과 수조내 pH는 탄산화 시료를 투입한 수조의 경우 20시간 경과 후에도 pH 7~8의 중성을 유지하는 것으로 나타났으며, 탄산화 되지 않은 시료를 투입한 수조의 경우 pH가 비례적으로 증가하여 20시간 경과 후 pH 11~12의 강알칼리화 되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 탄산화 되지 않은 시편의 경우 콘크리트 내 수산화칼슘이 용출되었기 때문에 수조내 pH가 강알칼리화 된 것으로 판단된다. Fig. 8은 pH 변화에 따른 금붕어의 관찰 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과 20시간 경과 후 각 수조의 pH는 탄산화 시편의 경우 8.2, 탄산화 되지않은 시편이 2개인 경우 10.8 및 3개인 경우 11.3로 나타났다. 이때 pH 8.2 및 10.8의 수조내 금붕어들은 모두 생존하는 것으로 나타났으며 활동성이 활발한 것으로 나타난 반면 pH 11.3을 초과하는 수조의 금붕어들은 피부조직이 녹아내리는 현상이 발생하였으며, 모두 폐사하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 콘크리트의 중금속이 용출되어 수조 내 수질을 오염시킨 경우라면 모든 수조의 금붕어가 폐사하여야 하지만 실험 결과의 경우 pH가 11 이상인 경우에만 폐사한 것으로 보아 금붕어의 폐사 원인은 콘크리트의 중금속 용출이 아닌 콘크리트 내

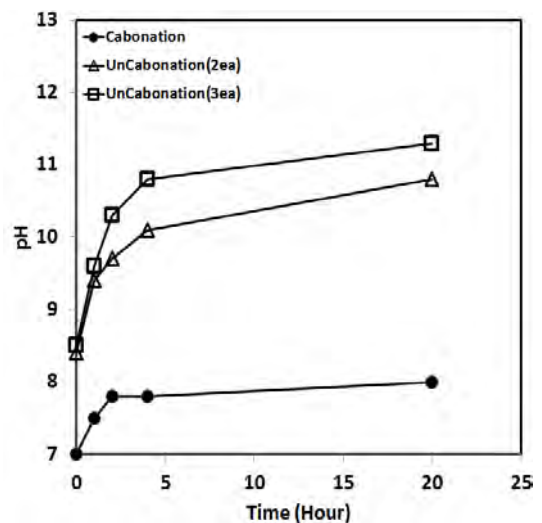


Fig. 7 pH variation in accordance with the time elapsed

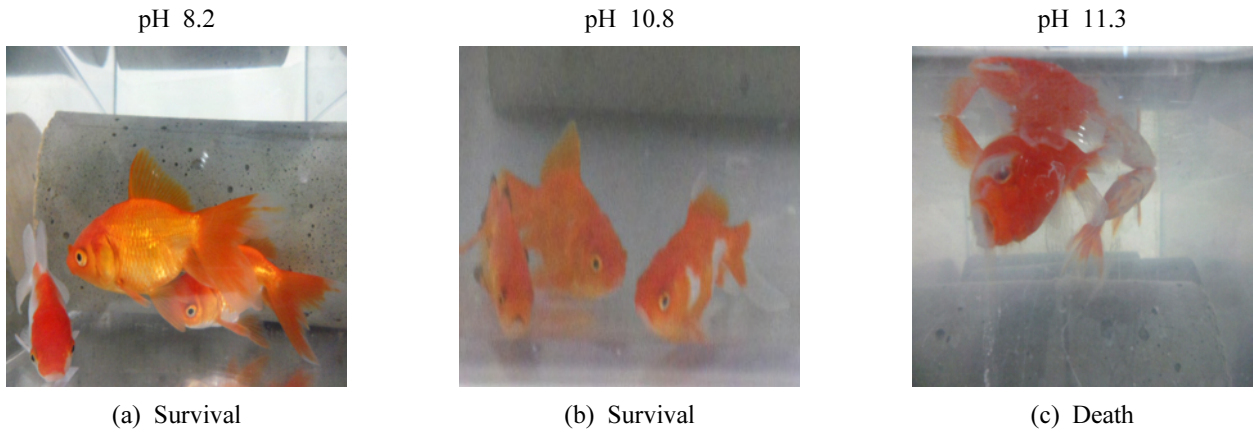


Fig. 8 Result of test

부의 수산화칼슘 용출로 인한 강알칼리화가 원인이 된 것으로 판단된다. 또한 이러한 실험의 경우 콘크리트 시편이 수조내 대부분의 부피를 차지하고 있지만 실제 환경의 경우 콘크리트 구조물이 차지하는 부피가 상대적으로 매우 작으며, 콘크리트 내부에서 용출할 수 있는 수산화칼슘의 절대량이 있기 때문에 콘크리트의 수산화칼슘 용출이 실제 환경에 미치는 영향은 매우 작을 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 논문에서는 가혹한 조건에서 열화된 콘크리트, 시멘트 생산시 산업폐기물의 재활용 유무 및 어독성 실험에 따른 콘크리트의 환경안정성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 국내에서 생산되는 3사의 보통포틀랜드시멘트 분말에 대하여 중금속 용출 실험 결과 기 연구된 사례와 동일하게 시멘트에서 Cr^{6+} 이 검출되었으며, 용출량은 환경부 기준 20 mg/L 이내인 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통하여 국내에서 생산되는 일부 시멘트에서는 Cr^{6+} 용출량이 다소 작지만 시멘트 내에 존재하고 있는 것으로 확인되었다.
- 2) Cr^{6+} 이 용출된 시멘트를 사용하여 제조된 콘크리트는 가혹한 조건에서 열화를 받은 경우라도 콘크리트로 경화된 경우에는 중금속이 용출하지 못하는 것으로 나타났다.
- 3) 시멘트 생산시 산업폐기물의 재활용이 콘크리트의 중금속 용출량에 직접적인 영향은 미치지 않는 것으로 나타났다.
- 4) 어독성 실험에 의한 금붕어 폐사 원인은 콘크리트 내 중금속 용출이 아닌 강알칼리화로 인한 영향인 것으로 나타났다.

이상의 결과를 통하여 산업폐기물의 재활용으로 인하여 시멘트 내 중금속 함유량에 영향을 미치는 경우에도 콘크리트로 경화한 경우에는 중금속 용출량에 영향을 미치지 않으며, 시멘트 내 중금속이 존재하고 있는 경우라

도 콘크리트로 경화한 경우에는 중금속 용출이 되지 않기 때문에 콘크리트는 중금속 용출에 대하여 안전적이며, 환경에 무해한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Ministry of Environment, Waste Management Act of 2007, Ministry of Environment, 2007, pp. 1-1.
2. Kwon, Y. J., "Challenges and the Corresponding Direction of the Cement Industry according to Green Initiatives," *International Symposium on Environment and the Concrete*, 2006, pp. 1-24.
3. Lee, S. H., "Eco-Friendly and in the Future as a Cement-Center of Cement and Hexavalent Chromium," *34th Cement Symposium on Korea Cement Industrial Association*, 2006, pp. 1-8.
4. Korea Concrete Institute, *Concrete and the Environment*, Kimoonang Publishing Company, Seoul, Korea, 2010, pp. 64-76.
5. Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, *Cement Heavy Metals Research Final Report*, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, 2006, pp. 4-50.
6. Yamaguchi, O., "A Method for the Determination of Total Cr(VI) in Cement," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 26, Issues 4-5, 2006, pp. 785-790. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.07.046>)
7. Naver Blog, "Hexavalent Chromium and Its Toxicity" <http://blog.naver.com/ausylee?Redirect=Log&logNo=50004201716>, 2006, pp. 1-1.
8. Ministry of Environment, *Report of Cement kilns Management Improvement*, Ministry of Environment, 2007, pp. 1-1.
9. Ministry of Environment, *Controversy of Cement Heavy Metal Hazards*, Ministry of Environment, 2008, pp. 1-1.
10. Ministry of Environment, *Report of Cement kilns Management Improvement*, Ministry of Environment, 2007, pp. 1-1.
11. Kim, S. J., "Leaching and Total Content Characteristics of Heavy Metals in Cement and Its Materials," *Proceedings of Korea Society of Waste Management*, Vol. 25, No. 5, 2008, pp. 399-408.

12. Joint Research of Wonjin Foundation Working Environment Health Institute and Industrial Health, Catholic University of Daegu, *Chromium, Nickel and Lead Content Evaluation of Construction Materials (Concrete, Cement)*, Wonjin Foundation Working Environment Health Institute and Industrial Health, Catholic University of Daegu, 2006, pp. 1-10.
13. Lee, S. H., "Chromium VI in Cement · Concrete," *Proceedings of Korea Architectural Institute*, Vol. 54, No. 2, 2010, pp. 18-21.
14. Hong, S. S., Lee, T. H., Im, G. K., Oh, H. K., and Lee, B. H., "Research Papers : Effects and Behaviors of Heavy Metals (Cd, Cr, Cu, Pb) in Cement Clinker Reaction," *Proceedings of Korea Society of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 10, No. 5, 1999, pp. 696-700.
15. Nam, S. N., Lee, D. J., Jeon, T. W., Hwang, D. G., Huh, J. H., Lee, E. J., Oh, K. J., and Kim, D. W., "Impact of Input Wastes on Contents of Heavy Metals in Clinker and Cement," *Journal of Korea Waste Resource Recycling Institute*, Vol. 26, No. 8, 2009, pp. 694-702.
16. Min K. S., "The Study of Existing form of Chromium in the Portland Cement Clinker," Department of Materials Science and Engineering Graduate School Kunsan National University, 2009, pp. 3-50.
17. Choi, Y. W., Kim, S. C., Jung, S. H., Kim, K. H., and Oh, S. R., "Leaching Assessment of Heavy Metals in Concrete under Severe Environmental Conditions," *Proceedings of Korea Construction Recycling Resources Institute*, Vol. 11, No. 1, 2011, pp. 1-4.
18. Sato, S., Kuwabara, T., Ashida, H., and Nonaka, T., "Safety Considerations Characterization and Elution of Heavy Metals from the Cement Cured," Agricultural Engineering Society, Agricultural Society of Civil Engineers National Convention Abstracts, 2006, pp. 242-243.
19. Ministry of Environment, *Official Wastes Test Method*, Ministry of Environment, 2007, pp. 281-321.

요 약 1997년 시멘트 산업은 자원 재활용 목적을 위하여 산업폐기물을 시멘트 공장에서 사용하기 시작하였다. 그러나 최근, 산업폐기물의 재활용에 따른 시멘트의 환경유해성이 시멘트 공장주변의 오염과 시멘트 내 중금속 용출로 인하여 문제가 제기되고 있는 실정이다. 특히, 시멘트 내 C^{6+} 의 존재는 중요한 문제가 되고 있으며, 시멘트 내 C^{6+} 최소화를 위한 연구가 수행되고 있다. 그러나 국내에서는 중금속 용출에 관련된 연구는 대부분 시멘트 관점에서 수행되고 있는 실정이다. 시멘트는 콘크리트 재료로 사용되기 때문에 콘크리트 관점에서의 환경안전성 평가가 필요하다. 따라서 이 논문에서는 가혹한 조건에서 열화된 콘크리트의 중금속 용출평가를 실시하였다. 평가 결과 모든 변수에서 C^{6+} 는 검출되지 않았다.

핵심용어 : 환경 안정성, 열화된 콘크리트, 가혹한 조건, 다양한 환경, 산업 부산물