

콘크리트 폐기물에서 분리된 페이스트를 활용한 고화재 기술개발 기초연구

Recycling Waste Paste from Concrete for Solidifying Agent

문 영 범¹ 최 현 국¹ 김 재 영¹ 이 재 형¹ 정 철 우^{2*} 김 지 현²

Mun, Young-Bum¹ Choi, Hyun-Kuk¹ Kim, Jae-Young¹ Lee, Jea-Hyung¹ Chung, Chul-Woo^{2*} Kim, Ji-Hyun²
R&D Center, Sungshin Cement, Bugang-Myun, Sejong-si, 30074, Korea ¹
Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Busan, 48513, Korea ²

Abstract

In this work, as a preliminary experimental works, which focuses on utilizing separated pastes from activated (or radioactive) concrete as solidifying agents for radioactive waste immobilization, were performed. It was found that density of hydrated cement paste, which was lower than that of ordinary portland cement, increased as temperature for heat treatment increased. Highest compressive strength was observed with the specimens that was heat treated at 600°C. However, heat treatment over 700°C showed higher CaO content that caused higher heat of hydration after in contact with water, lows of workability, and lower strength. Based on experimental results, it is suggested that 60 0°C heat treatment is more appropriate for waste cement paste to be used as a solidifying agent.

Keywords : dismantling concrete from nuclear power plant, reduction on waste volume, radioactive waste, reutilization of wastes from nuclear power plant

1. 서 론

1.1 연구의 목적 및 배경

원전설비는 해체과정에서 가연성소재, 비가연성소재, 철재 및 콘크리트 등 다양한 형태 및 여러 가지 종류의 폐기물이 발생하게 되는데, 이 중 70% 이상 가장 많은 양을 차지하는 것이 바로 콘크리트 폐기물이다[1,2]. 해체과정에서 발생하는 폐콘크리트는 원전 콘크리트 구조물에서 사용된 위치 및 용도에 따라 방사능 준위가 매우 다양하게 나타날 수 있으나, 반응로(reactor)를 둘러싸고 있는 방호벽(biological

shield)을 제외한 대부분의 경우 방사능 물질에 의한 오염이나 중성자에 의해 방사성 물질로 바뀌게 되는 방사화는 거의 발생하지 않는 것으로 알려져 있다. 그러나 콘크리트는 원전 폐기물 중 가장 큰 부피를 차지하기 때문에 이를 적절하게 처리할 수 있는 기술의 개발을 통해 콘크리트의 폐기물 처리 비용을 절감할 필요성이 있다.

원전 콘크리트 폐기물의 방사화에 대한 기존 연구들에 따르면, 콘크리트가 중성자에 노출되는 경우 방사화된 원소는 콘크리트 내부에 균등하게 분포되어 있지 않고 콘크리트 중 페이스트(시멘트와 물의 경화체)에 대부분 존재하는 것으로 보고되었다[3,4]. 이는 시멘트 내부에 존재하는 미량의 코발트(cobalt) 및 유로피움(europium) 등에 방사화에 의한 것으로[5], 일반적으로 콘크리트에서 굵은 골재와 잔골재가 차지하는 부피가 60%를 상회한다는 점을 고려하면 방사화된 콘크리트에서 페이스트 부분을 선별적으로 분리해 내

Received : March 28, 2017
Revision received : April 21, 2017
Accepted : May 24, 2017

* Corresponding author : Chung, Chul-Woo
[Tel: 82-51-629-6084, E-mail: cwchung@pknu.ac.kr]
©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

는 경우, 방사화 콘크리트 폐기물 부피를 30% 이하 수준으로 크게 감소시킬 수 있게 된다. 또한 이러한 기술의 개발을 통하여 상대적으로 오염도가 매우 낮은 골재 폐기물을 규제 해제 폐기물로서 처리할 수 있어, 환경적 부담을 줄이고 원전 해체처리비용을 크게 감소시킬 수 있다.

방사화 콘크리트가 포함된 폐기물은 제염과 감용처리 등의 과정을 통해 방사화가 진행된 부분을 제거한다. 그리고 제염 및 감용처리 이후에 발생하는 골재의 경우, 비방사성 물질로 판명되면 일반 폐콘크리트 재활용 방법과 동일한 순환골재 활용방법을 적용하여 활용할 수 있다. 그러나 이는 학술적인 증명 이후에 사회적인 동의가 필요한 사항이므로, 다양한 연구결과를 통해 안전성을 입증할 필요가 있다. 프랑스의 CEA는 네덜란드의 KEMA, 영국의 BNFL과 공동으로 연구한 폐콘크리트의 재활용 및 부피감용에 관한 연구는 대표적인 예시로써 공동연구 결과 콘크리트 폐기물을 600°C 이상의 온도에서 고온 열처리하여 방사성 콘크리트 폐기물을 일부 재활용하는 DECO 공정을 개발하였다[6,7,8,9]. 하지만 방사화가 진행된 페이스트의 경우 폐기물로만 처분하여야 하며, 이러한 재료의 재활용에 대한 연구는 아직 전무한 실정이다. 수화반응이 진행된 시멘트 페이스트의 경우에 고온의 열처리가 가해지면 구조가 파괴되고, 다시 물과 접촉하게 되면 일정수준 이상의 반응을 이끌어낼 수 있다는 Ahn et al.[10] 등의 재생시멘트 관련 연구결과를 고려하면 방사화된 시멘트 페이스트를 원전해체시 발생하는 다양한 형태의 폐기물 고화체의 생산에 재활용할 가능성이 발생한다. 여기에서 고화재의 일부 또는 전체를 방사화된 페이스트로 활용할 수 있다면 폐기물로서 처분되어야만 하는 페이스트를 이용하여 폐기물 고화체 제작이 가능하다. 이를 통해 일반 고화재 사용량은 크게 감소시킬 수 있으며 원전콘크리트 폐기물의 부피감용 또한 도모할 수 있다. 열처리와 같은 추가적인 전처리 과정으로 인해 비용 상승이 발생하더라도 이는 원전 폐기물의 감용으로 인한 비용 절감으로 인한 경제적 효과가 매우 크기 때문에 원전 폐콘크리트 중에서 페이스트를 재활용할 수 있는 기술을 개발하게 된다면 환경적인 측면에서나 경제적인 측면에서 원자력 분야의 자원재순환기술로서 잠재적인 기술 경쟁력을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 목적은 방사화가 진행된 원전 콘크리트로부터 분리된 페이스트 미분말을 이용하여 방사성폐기물 처분용 고화재로 활용 가능성을 판단하기 위한 기초적인 데이터를 확보하는 데 있다. 이를 위해 본 연구에서는 일반 콘크리트로부터

터 분리된 페이스트를 1차적으로 탄산화 처리 전/후로 구분하고 이를 다양한 온도로 열처리하였다. 이후 열처리된 시료의 기초물성을 파악하고 이를 활용하여 수화열 및 압축강도 등을 측정하고 고화재로써의 활용성을 검토하고자 하였다.

일반적으로 실제 방사화가 진행된 콘크리트는 일반 실험실로 반출이 불가능하고 제한된 구역 내에서만 실험이 가능하다는 현실적인 어려움을 가지고 있다. 이로 인해 실제 모사 실험을 위해서는 많은 경제적인 부담이 있다. 그러므로 이와 같은 경제적 및 안전적 문제를 감안하여 비방사성 시험체로 먼저 실험 및 연구한 후, 방사성 시험체로 연구의 폭을 확장하여 접근하는 것이 일반적인 형태이다. 따라서 본 연구에 사용된 시험체는 실제 원전에서 채취한 미분이 아닌 일반 콘크리트로부터 선별 분리한 것이며, 이를 고화재로 활용하기 위한 가능성을 평가하는데 그 의의가 있다.

2. 실험방법 및 개요

콘크리트 내부에 존재하는 구성물 중에서 굵은골재 및 잔골재를 제외한 나머지 모든 부분을 페이스트라 볼 수 있다. 페이스트는 미수화반응시멘트와 수화반응한 수화시멘트, 수화물의 표면에 광범위하게 부착되어 있는 겔(gel) 수 그리고 수화반응을 통해 화학적으로 결합된 결합수 및 자유수로 구분할 수 있다.

원전 콘크리트의 폐기물 해체 처리기술은 콘크리트 폐기물 주변 환경으로의 유출을 막기 위한 다양한 장치가 추가된다는 점을 제외하면, 주 공정은 일반 폐콘크리트 처리와 동일할 것으로 예상된다. 대부분 분쇄공정으로 각 단계에서 미분말이 발생되고 이 미분말은 특수 포집장치로 분리된다. 현재 폐콘크리트로부터 굵은골재는 완벽하게 분리가 가능[11,12]한 것으로 알려져 있으나, 잔골재와 페이스트를 완벽히 분리하는 수준까지는 도달하지 못한 것으로 파악되었다. 이는 부피감용 과정에서 일부 모래성분이 충분히 함유될 수 있다는 점을 의미한다. 실제 순환골재의 생산시 발생하는 페이스트의 화학성분 분석결과를 Table 1에 나타내었는데, CaO와 SiO₂ 함량만 보더라도 상당량의 잔골재 성분이 포함되어 있는 것을 알 수 있다[13]. 따라서 페이스트를 고화재로 재활용하기 위해서는 잔골재 성분의 분리가 가장 중요한 것으로 사료된다.

Table 1. Chemical compositions of concrete waste

Specimen	Chemical composition(wt.%)						
	Ig-Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Concrete Waste	9.68	49.10	8.30	2.00	26.20	1.60	1.00

2.1 실험재료

본 연구는 콘크리트에서 분리된 페이스트를 방사성 폐기물 처분용 고화재의 주요 원료로 활용하는 방안을 검토하기 위한 기초실험으로써 Table 2에 나타난 화학적 조성을 가진 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 이용하여, 20×20mm Cube 몰드로 물시멘트비(w/c) 0.4의 순수한 페이스트 시험체를 제작하였다. 제작된 시험체는 28일간 포화수산화칼슘 수용액에서 양생한 후, 노후화된 페이스트 시편을 모사하기 위하여 KS F 2584 “콘크리트의 촉진 탄산화 시험방법”으로 탄산화 처리한 시료와 탄산화를 실시하지 않은 두 가지 시료를 제작하였다.

Table 2. Mixing design of mortar

Specimen	Temperature (°C)	W/B	Binder(%)			Sand (g)
			NP	CP	Gypsum	
01-03	0	0.6	96	-	4	1,350
04-06			72	24	4	
07-09			48	48	4	
10-12	600	0.7	24	72	4	1,350
13			96	-	4	
14			72	24	4	
15	700	0.8	48	48	4	1,350
16			24	72	4	
17-18			96	-	4	
19-20	800	0.8	72	24	4	1,350
21-22			48	48	4	
23-24			24	72	4	

*NP and CP indicate normal paste and carbonated paste, respectively

이들 페이스트를 최종 고화재의 주요 원료로 사용하기 위하여 입자의 크기를 μm 크기로 만들고자 조크러셔로 조분쇄를 실시해 수mm 크기로 분쇄한 후 100°C로 건조하였다. 100°C에서의 건조는 페이스트 내부의 자유수(수화 반응에 참여하지 않은 수분)를 증발시켜 실험용 Ball Mill에 분쇄가 용이하도록 하기 위한 것이다. 이후 일반 시멘트 입자크기와 비슷한 분말도가 되도록 분쇄하였다. 재수화를 회복하기 위

한 온도구간은 기존의 연구 등이 제시한 열분해 메커니즘에 근거하여 0, 500, 600, 700, 800, 900°C로 설정한 다음 소성을 실시하였다[14, 15, 16, 17, 18]. 또한 페이스트의 탄산화가 고화재로서 재활용에 미치는 영향을 확인하기 위해 탄산화를 처리하지 않은 시료에 탄산화된 시료를 0, 25, 50, 75% 혼합하여 탄산화에 의한 물리화학적 성질의 변화를 확인하였다. 최종적으로 고화재로서의 성능을 확보하기 위해 4%의 이수석고를 자극제로서 활용하였다. 본 연구에 사용된 페이스트 시험체를 제조한 절차는 Figure 1과 같다.

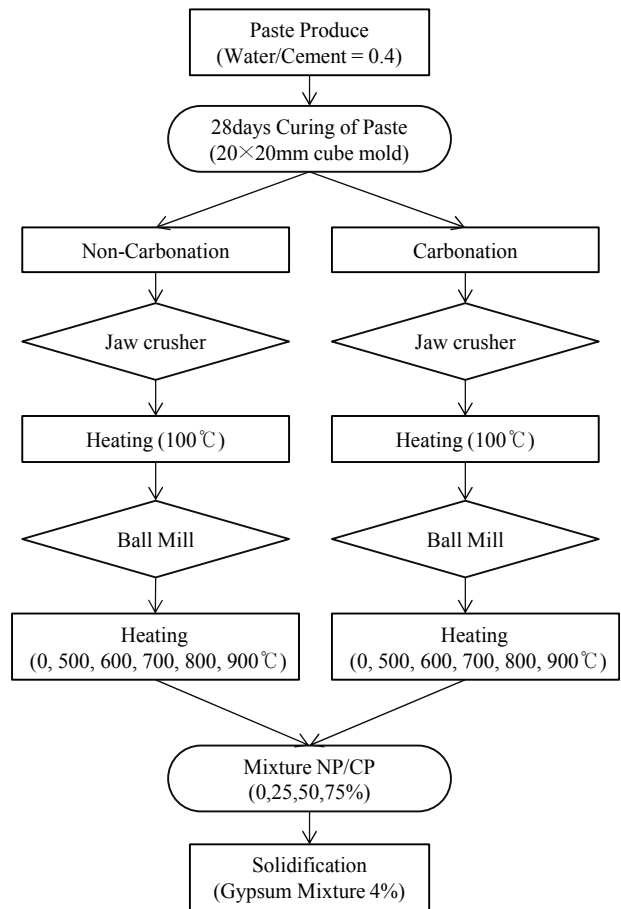


Figure 1. Experimental procedure

2.2 물리화학적 성질

본 연구에서는 본 실험에 사용된 1종 보통포틀랜드 시멘트(Sungshin Cement Co., Ltd., 분말도 3,390cm²/g)를 이용해 제작된 시멘트 페이스트와 탄산화 반응을 겪은 시멘트 페이스트의 화학조성의 차이를 확인하기 위해 KS L 5222 “시멘트의 형광 X선 분석방법”에 따라 분석을 실시하였다. 소성온도의 변화에 따른 수화시멘트 페이스트의 결정상의

변화를 검토하기 위하여 소성온도별 X선 회절분석을 실시하였다. 또한 각 시료별 소성조건에 따른 변화를 확인하기 위하여 비중 및 강열감량 비교를 실시하였다. 페이스트의 비중을 확인하기 위하여 KS L 5110 “포틀랜드 시멘트의 비중 시험”을 활용하였다.

2.3 배합

열처리 하지 않은 페이스트와 500~900℃에서의 열처리를 통해 얻은 페이스트를 이용하여 모르타르 시험체를 제작하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 탄산화를 처리하지 않은 시료에 탄산화된 시료를 각각 0, 25, 50, 75% 혼합하여 각자의 시험체를 제작하였다. 이때 바인더의 4%는 이수석고로 치환하여 자극제로 활용하였다.

본 실험에서 사용된 물결합재비 (W/B)는 ISO 679 규준에서 제시하고 있는 물시멘트비 0.5의 1종 포틀랜드 시멘트 규준 몰탈로부터 얻은 몰탈 플로우 값 145mm를 만족하는 물결합재비이다. 물결합재비(W/B)는 소성온도에 따라 달리 적용하였는데, 우선 소성하지 않은 페이스트와 500, 600℃로 소성한 페이스트를 사용하는 경우에는 0.6으로 적용하였다. 시멘트에 비해 페이스트를 혼입하는 경우 동일 플로우 값을 얻기 위한 단위수량이 증가한 이유는 시멘트에 비해 낮은 비중을 가지는 시멘트 페이스트의 특성 때문으로 사료되며, 동일한 중량의 투입시 시멘트보다 페이스트가 더욱 많은 부피를 차지하므로 입자간의 맞물림 작용이 커져 유동성에 악영향을 미치기 때문이다. 그리고 700℃로 소성한 페이스트를 사용하는 경우에는 물결합재비를 0.7로, 800℃와 900℃로 소성한 페이스트를 사용하는 경우에는 0.8로 달리 적용하였다. 소성온도의 상승으로 인한 작업성의 손실에 대한 자세한 논의는 실험결과 및 고찰을 통해 밝히도록 하겠다. 몰탈 시험체를 제작하기 위한 배합은 기계식 믹서 (HENSCHEL Mixer, 60L, Germany)를 이용하였으며, 1,450rpm으로 10min 동안 진행하였다.

2.4 압축강도

고화재의 주요 성능지표인 압축강도를 평가하기 위하여 KS L ISO 679 “시멘트 강도 시험 방법”의 방법에 따라 모르타르 압축강도 시험체를 제작하여 항온항습기(20±0.1℃)에서 7, 28일간 양생한 후 압축강도 측정장치 (ELE, Auto test 250, England)를 이용하여 압축강도를 측정하였다.

2.5 수화반응

열처리 하지 않은 페이스트와 열처리한 후의 페이스트에 따른 수화반응 특성을 비교 분석하기 위해 Table 3과 같은 조건으로 시멘트 페이스트 샘플을 제작하였다.

각각의 샘플은 미소수화열량계(Tokyo Riko Co., Ltd., Japan, TCC-26/Conduction Calorimeter)를 활용하여 미소수화열을 측정하였다. 배합 상세는 페이스트의 소성온도에 따라 물결합재비를 다양하게 적용했던 모르타르 배합과는 다르게 물결합재비를 모두 0.6으로 동일하게 적용하여 측정하였다. 이는 동일한 배합수량에서 페이스트의 수화반응으로 인해 발생하는 수화열을 정량적으로 측정하기 위한 것이다.

Table 3. Mixing design of hydration heat

Temperature (°C)	W/B	Binder(%)		
		NP	CP	Gypsum
0				
500				
600	0.6	48	48	4
700				
800				
900				

*NP and CP indicate normal paste and carbonated paste, respectively

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 사용재료의 기초적 물성

Table 4는 본 연구에서 사용된 재료의 화학적 성분을 나타낸 것이다. Table 4에 따르면 강열감량(950℃)의 경우, 포틀랜드 시멘트 (OPC) 대비 일반 시멘트 페이스트 (NP)와 중성화된 시멘트 페이스트 (CP)가 매우 높은 것으로 측정되었다. 이는 NP와 CP 시편 내부에 이미 수화반응이 이루어져 다량의 수화물이 존재하며 이들 수화물에서 결합수가 열분해 반응으로 방출되었기 때문이다. 특히 CP의 경우 탄산화된 수화물로부터 탈탄산반응(약 800℃ 이후)이 일어나 NP보다 10% 이상 강열감량이 증가되는 것을 볼 수 있다. 이는 이산화탄소가 수산화칼슘만 탄산칼슘으로 석출시키지 않고 C-S-H 내부의 칼슘과도 반응하여 탄산칼슘을 석출하여 더욱 많은 탈탄산반응을 일으켰기 때문으로 사료된다.

Table 5는 각 재료의 페이스트 비중측정 결과를 나타낸 것이다. 이는 시멘트(비중 3.15g/cm³)와 물(비중 1g/cm³)

을 물시멘트비(w/c) 0.4의 조건으로 반응시켜 28일간 양생 후, 100℃로 건조 및 분쇄한 시료의 비중을 측정하였다. 그 결과 수화 반응한 페이스트(NP) 비중이 2.62g/cm³, 탄산화를 겪은 시멘트 페이스트(CP)의 비중이 2.64g/cm³로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

Table 4. Chemical compositions of specimen

Specimen	Chemical composition(wt.%)						
	lg-Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
OPC	2.9	21.4	4.7	3.5	61.6	2.3	2.1
NP	14.1	17.9	3.8	3.1	56.5	1.9	1.6
CP	25.6	15.6	3.3	2.7	49.2	1.7	1.4

*NP and CP indicate normal paste and carbonated paste, respectively

Table 5. Density of specimen

Properties	Specimen		
	OPC	NP	CP
Density(g/cm ³)	3.15	2.62	2.64

*NP and CP indicate normal paste and carbonated paste, respectively

3.2 열처리에 따른 물성변화

열처리는 방사화된 페이스트를 잔골재로부터 분리시키는 데 매우 중요하게 작용할 수 있다. 또한 고화재의 원료로 사용되기 위해서는 해당 재료가 자체수경성을 가지고 있어야 한다. 따라서 페이스트의 분리를 용이하게 하고, 수화반응을 부분적으로 회복시켜 자체수경성을 확보하기 위한 방법으로 열처리를 적용하였다. 열처리는 수화생성물의 열분해 메커니즘 및 에 근거하여 소성온도를 500, 600, 700, 800, 900℃로 설정한 후, 강열감량을 측정하였으며 그 결과를 Table 6에 나타내었다.

Table 6. Loss ignition of specimen

Specimen	lg-Loss(wt.%)				
	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃
NP	7.8	9.4	9.9	11.4	13.1
CP	8.0	11.1	15.7	19.1	23.9

*NP and CP indicate normal paste and carbonated paste, respectively

Table 6에 따르면, CP의 강열감량이 NP의 강열감량에 비해 전체적으로 높게 나타났다. 또한 탄산칼슘의 분해가 일어나는 시점(약 600–800℃)에서의 강열감량은 더욱 큰 차이를 보이고 있다. 이는 앞서 언급된 바와 마찬가지로 축진탄산화 처리가 C-S-H 내부의 칼슘을 일부 용출시켜 구조적인 불안정을 초래하고, 이로 인하여 다량의 탄산칼슘이 석출되었기 때문으로 사료된다. 그러나 500℃에서 CP의 강열감량이 NP의 강열감량보다 다소간 높게 측정된 것은, C-S-H 내부의 구조 불안정으로 화학적 결합수의 유실과 어느정도 연관성이 있는 것으로 보이나, 이는 추후의 연구를 통해 증명해야 할 것으로 보인다.

Figure 2는 열처리에 따른 각 페이스트의 비중 변화양상을 나타낸 것이다. 소성온도가 높아짐에 따라 수화물의 열분해 반응이 증대되며, 강열감량이 증가하는 것으로 나타났다. 이로 인해 결합수가 제거되면서 수화 상(phase)이 다른 상 구조로 변화하면서 비중이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 동일한 중량에서 비중의 증가는 부피의 감소를 의미한다. 즉 온도처리를 하는 순간부터 방사성 폐기물의 처리 시 다소나마 부피 감소 효과를 기대할 수 있다는 의미이다. 원자력 해체 폐기물의 처분 비용은 처리하는 용기내의 부피에 비례하여 결정되기 때문에 향후 페이스트 분리 및 수화회복에 관한 온도설정이 결정할 때, 부피문제 또한 고려해야 할 것으로 판단된다.

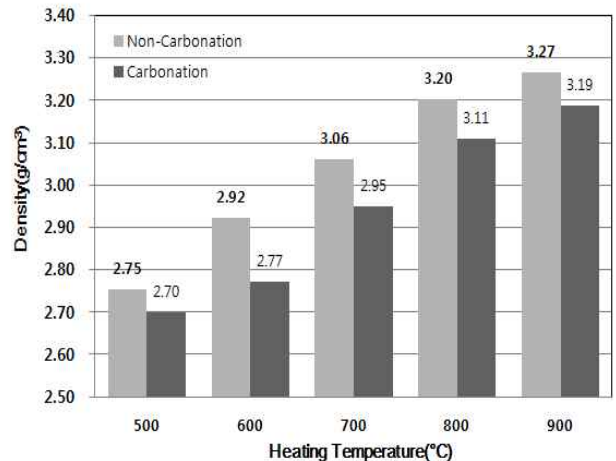
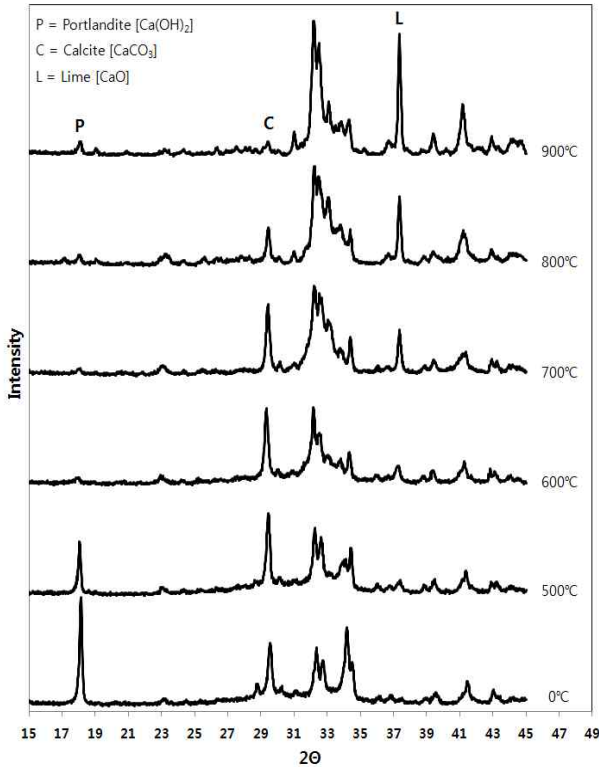


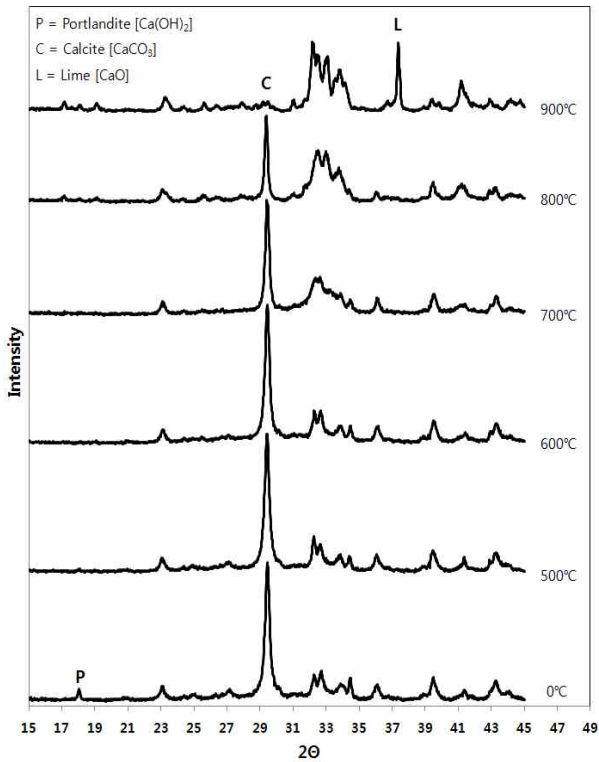
Figure 2. Changes of paste density depending on heat treatment temperature

3.3 XRD 분석

Figure 3은 소성 온도에 따른 페이스트의 XRD(X-ray



(1) NP(Normal paste)



(2) CP(Carbonated paste)

Figure 3. XRD patterns of paste samples depending on heat treatment temperature

diffractometer, Rigaku, Japan, RINT 2200) 분석 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 경화된 시멘트 페이스트에서는 수화반응에서 생성되는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 피크(peak)가 가장 두드러지게 나타나며, 반응물질인 시멘트 광물 상(C_2S , C_3S 등)들은 수화반응을 통하여 소비되기 때문에 피크가 감소하게 된다. 시멘트 경화체 중에서 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 는 CO_2 가 존재하는 환경하에서는 서서히 CaCO_3 로 변화되는데 이를 탄산화(carbonation)라고 한다.

소성하지 않은(Figure 4에서 0°C 시편으로 표기) NP, CP 시편의 X선 회절분석 결과에서는 상기와 같은 이유에 따라 각기 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 피크와 CaCO_3 피크가 뚜렷하게 관찰된다. 우선 소성하지 않은 시편에서는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 피크가 뚜렷하게 나타나고 있으나, 약 450°C에서 일어나는 열분해반응($\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$) 반응을 통하여 500°C 소성한 시편에서는 현저히 감소하고 있다. 다만 일부 피크가 남아 있는 것은 소성온도의 분포와 유지시간 부족 때문으로 판단된다. 또한 600°C 부터는 CaCO_3 의 탈탄산반응을 통하여 서서히 생석회(lime; CaO)를 생성하기 시작하며, 900°C 소성조건에서는 대부분의 calcite(탄산칼슘; 방해석)이 사라지고 CaO 로 변화되는 것으로 확인되었다. 탄산화반응을 겪은 CP시편체의 경우 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 피크는 미세하게 나타나고 있는데, 이는 대부분의 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 변하였기 때문이다. 마찬가지로 900°C 소성시에 대부분이 탈탄산 반응으로 인하여 CaO 로 변화되는 것으로 나타났다. NP, CP 시편 모두 공통적으로 소성온도가 올라감에 따라 2θ 회절각 31~34°의 범위에서 피크가 성장하는 것으로 나타났는데, 이들 피크는 시멘트 수화물이 소성과정에서 탈수반응과 상변화 반응이 일어나기 때문이다. 하지만 생성된 피크의 형태가 일정하지 않으며 완만한 형태를 나타내고 있는 것으로 판단할 때 시멘트 광물상으로 되돌아가는 것이 아니라 결정성이 낮은 준안정상태의 물질로 전환되는 것으로 판단된다.

3.4 모르타르 압축강도

Table 7은 시멘트 무게 기준인 KS L ISO 679 “시멘트의 강도 시험 방법”에 따라 실험한 결과를 나타낸 것이다. 모든 소성 온도조건에서 탄산화된 시료의 함유량이 높을수록 압축강도가 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 탄산화에 의해서 생성된 석회석이 압축강도 증진에 큰 영향을 미치지 못하기 때문으로 판단된다.

Table 7. Test results of mortar compressive strength

Specimen	Temperature (°C)	W/B	Binder(%)			Compressive strength (MPa)	
			NP	CP	Gypsum	7days	28days
1	0	0.6	96		4	6.1	10.8
2			72	24	4	5.5	11.8
3			48	48	4	4.8	11.3
4			24	72	4	4.0	10.4
5	500	0.6	96		4	15.0	22.0
6			72	24	4	12.9	19.1
7			48	48	4	10.3	18.2
8			24	72	4	9.3	16.5
9	600	0.6	96		4	21.3	30.8
10			72	24	4	17.3	27.0
11			48	48	4	13.0	22.1
12			24	72	4	10.0	19.4
13	700	0.7	96		4	14.9	19.9
14			72	24	4	15.4	19.1
15			48	48	4	12.6	16.5
16			24	72	4	10.2	10.8
17	800	0.8	96		4	1.9	20.3
18			72	24	4	1.0	16.3
19			48	48	4	0.5	11.1
20			24	72	4	0.4	8.1
21	900	0.8	96		4	5.9	14.7
22			72	24	4	4.3	11.5
23			48	48	4	3.3	9.0
24			24	72	4	2.0	8.3

실험결과 가장 높은 강도를 나타낸 온도조건은 600°C이었다. 이는 이전의 연구결과인 700°C 조건에서 가장 강도가 높다는 것[10]과는 다른 결과이다. 이는 이전의 연구결과가 700°C 조건에서도 동일한 플로우를 얻기 위하여 분산제를 투입하여 물결합재비를 유지하였고, 그로 인하여 600°C 보다도 높은 강도를 보였을 수 있기 때문에, 최적 강도에 대한 측면은 추가적인 실험을 통해 입증할 필요가 있다. 그러나 이전의 연구결과에서는 동일 물결합재비에서 600°C 조건과 700°C 조건의 28일 압축강도 차이가 약 10~15%정도에 불과하였으며, 본 연구에서는 압축강도 약 10MPa의 차이(약 30~50%의 차이)를 보이는 것으로 볼 때, 강도를 위한 최적 소성조건은 600°C일 확률이 좀 더 높다고 사료된다.

소성조건에 따라 수산화칼슘의 열분해 과정과 CaCO₃의 탈탄산반응에서 생성되는 CaO의 영향으로 600°C가 더 우수한 강도를 나타내는 것으로 판단된다. CaO가 대량으로 생성되기 시작하는 온도인 700°C 이상부터는 몰탈 실험 중 유동성의 저하가 매우 컸으며 이에 따라 단위수량이 증가되고, 특히 800, 900°C의 경우 초기 유동성 저하 및 급격한 로스생성, 강도 또한 낮음을 확인할 수 있었다.

3.5 미소수화열 분석

일반시료와 탄산화시료를 동일한 양으로 혼합한 배합에 대하여 소성 온도조건에 따른 수화열을 분석하기 위하여 미소수화열량계를 사용하여 수화열을 측정한 결과를 Figure 4에 나타내었다.

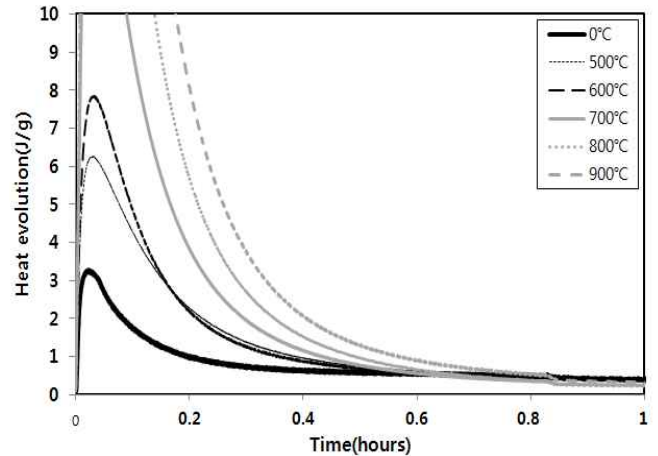


Figure 4. Heat of hydration depending on heat treatment temperature

미소수화열 측 결과 소성온도가 높은 원료일수록 초기 수화속도가 빠르며 높은 수화발열량을 나타내었다. 일반 시멘트와는 다르게 모든 재료에서 1차 발열 이후 2차 수화발열은 나타나지 않았으며 온도가 증가할수록 수화발열은 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 특히 700~900°C 재료는 본 분석기기의 측정범위를 초과하는 결과로 분석되었는데, 이는 XRD 분석결과에서 나타난 것처럼 소성온도가 높아짐에 따라 CaO의 생성량이 증가하고 CaO가 초기에 높은 수화열을 발생시키기 때문이다. CaO의 함량이 너무 높으면 초기에 과팽창이나 부풀음 현상이 발생할 수 있으므로 안정적인 수화반응 관점에서는 700°C 보다는 낮은 온도를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결 론

원전 콘크리트로부터 분리된 페이스트 미분말을 이용하여 방사성폐기물 처분용 고화재로 활용하기 위한 기초연구로서, 본 연구에서는 이를 모사하기 위해 일반 폐콘크리트를 활용하여 사용 재료에 따른 특성, 강열감량 및 비중, XRD 분석, 몰탈 강도발현, 미소수화열 분석 등을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수화회복을 위하여 온도조건에 따라 소성한 재료의 물성은 소성온도가 상승할수록 강열감량 및 비중이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 700℃ 이상부터는 다량의 CaO가 존재하여 유동성 저하가 매우 크고 몰탈 실험을 위한 단위수량이 증가되었다.
- 2) 압축강도 측정결과 600℃ 소성온도에서 강도 측면에서 가장 유리할 수 있는 것으로 나타났다.
- 3) 미소수화열량계를 통한 수화열 측정 결과 700℃ 이상에서는 생성된 CaO의 함량이 크게 증가하여 높은 초기 수화열이 발생하였다.
- 4) 안정적인 고화재로서의 활용을 위해서는 700℃ 이하의 온도에서 열처리를 하는 것이 좋으며, 최적 소성온도는 600℃로 설정하는 것이 고화재로서 활용하기에 가장 적합한 것으로 나타났다.

요 약

본 연구에서는 원전 콘크리트로부터 분리된 페이스트 미분말을 이용 방사성폐기물 처분용 고화재로 활용하기 위하여 기초 특성을 검토하고자 하였다. 실험 결과 수화반응한 페이스트는 시멘트보다 비중이 낮고 수화회복을 위한 소성과정에서 온도증가에 따라 비중이 다르게 나타나 그에 따른 부피도 고려되어야 할 것으로 판단된다. 수화회복을 위한 소성온도에서 압축강도가 가장 우수한 온도조건은 600℃로 나타났으며, 700℃ 이상에서는 CaO의 생성량이 과도하여 높은 수화열, 유동성 저하 및 낮은 강도가 발현되는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구 범위 내에서 고화재로 활용 가능한 적정 수화회복 온도는 600℃로 판단되며 폐콘크리트 페이스트가 적절한 열처리를 거치는 경우 방사성 폐기물 고화재로서 활용될 수 있는 가능성을 보였다는 점에 의의를 둔다.

키워드 : 원전콘크리트해체, 부피감용, 해체폐기물, 원전폐기물 재활용

Acknowledgement

This work was supported by the Energy R&D Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No.20161510300420)

References

1. Sasaki T, Sone T, Koyama H, Yamaguchi H, Steam-assisted pyrolysis system for decontamination and volume reduction of radioactive organic waste. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2009 Mar;46(3):232-38.
2. Sawada K, Uruga K, Koyama T, Shimada T, Mori Y, Enokida Y, Yamamoto I, Stoichiometric relation for extraction of uranium from UO₂ powder using TBP complex with HNO₃ and H₂O in supercritical CO₂. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2005 Mar;42(3):301-4.
3. COX EJ, GARDE R. Decontamination of concrete surfaces at the Los Alamos Scientific Laboratory. In: *Proc. DOE Concrete Decontamination Workshop*; 1980 May 28-29; Battelle Conference Center, Seattle(WA): the Los Alamos Scientific Laboratory; 1980. p. 109-23.
4. Koga Y, Inoue T, Tateyashiki H, Okamoto M, Asano T. A process for separating aggregate from concrete waste during the dismantlement of nuclear power plants. *Journal of Hoshasei Haikibutsu Kenkyu*. 1997;3(2):17-25.
5. Cha GY, Kim SY, Lee JM, Kim YS. The effects of impurity composition and concentration in reactor structure material on neutron activation inventory in pressurized water reactor. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology(JNFCWT)*. 2016 Jun;14(2):91-100.
6. Cornelissen HAW. Test installation for Volume Reduction of Contaminated/Activated Concrete. KEURING VAN ELECTROTECHNISCHE MATERIALEN(KEMA, Nerland);1995. Report 40913-KET/R&B 95-4078.
7. Binkhorst IP. Rebondin intermediate Report part 1 and part 2. KEURING VAN ELECTROTECHNISCHE MATERIALEN (KEMA, Nerland);1997. Report 00332-KST/MAT 97-6632.
8. Min BY, Park JW, Choi WK, Lee KW. Separation of radionuclide

-
- from dismantled concrete waste. *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*. 2009 Jun;7(2):79–86.
9. Binkhorst IP, Cornelissen HAW. Technology for reuse of contaminated concrete constituents. Vienna(Austria): International Atomic Energy Agency(Austria); 1998 Jun, 187 p. Report No.: IAEA-TECDOC-1022.
10. Ahn JC, Lee JH, Kang BH. Properties of recycle cement made of cementitious powder from concrete waste by conditions of burning. *Journal of Architectural Institute of Korea*. 2013 Nov;19(11):109–12.
11. Do JB, Cho HD, Jaung JD. The research for present status of production and utilization of recycled aggregate. *The Regional Association of Architectural Institute of Korea*. 2012 Dec;8(1):487–8.
12. Lee HH. Production Method Review of Recycled Aggregates. *Proceeding of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*; 2015 Apr 2–4; Busan, Korea, Seoul (Korea): Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection; 2015, p. 621–2.
13. Song H, Shin HU, Lee JK, Chu YS, Park DC. Image and phase analysis of low carbon type recycled cement using waste concrete powder. *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*. 2014 Dec;2(4):314–20.
14. Jang JH, Kim YR, Choi SJ, Choi HY, Kim MH, Kim MH. A study on the fundamental properties and application as cementitious admixture by heating temperature of recycled powder. *Proceeding of Korea Concrete Institute*; 2001 May 12; Anseong, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2001, p. 635–40.
15. Cho MC, Park TS, Chu YS, Hwang HZ. A study on the development of recycling cement using the waste concrete powder. *Proceeding of Korea Concrete Institute*; 2002 May 12; Chungju, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2002, p. 137–42.
16. Xinwei M, Zhaoxiang H, Xueying L. Reactivity of dehydrated cement paste from waste concrete subjected to heat treatment. *Coventry University and The University of Wisconsin Milwaukee Centre for By-products Utilization Conference Proceeding Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*; 2010 Jun 28–30; Ancona, Italy, West Midlands (United Kingdom): Sustainable Construction Materials and Technologies; 2010, p. 175–80.
17. Letelier V, Tarela E, Muñoz P, Moriconi G. Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2017 Feb;132:365–75.
18. Hager I. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013 Mar;61(1):145–54.