

이산화탄소 지중 격리용 인산염 혼입 시멘트 페이스트에 관한 기초물성 평가

Evaluation on the Basic Properties of Phosphate Modified Portland Cement Paste for Potential Application of Geologic CO₂ Sequestration

윤 주 한 김 성 근 김 지 현 이 재 용 정 철 우*

Yoon, Ju-Han Kim, Seong-Geun Kim, Ji-Hyun Lee, Jae-Yong Chung, Chul-Woo*
Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Nam-Gu, Busan, 48513

Abstract

As global warming became a worldwide issue, a significant effort has been made on the development of technology related to CO₂ capture and storage. Geologic sequestration of CO₂ is one of those technologies for safe disposal of CO₂. Geologic sequestration stores CO₂ in the form of supercritical fluid into the underground site surrounded by solid rock, and concrete is used for prevention of CO₂ leakage into the atmosphere. In such case, concrete may experience severe damage by attack of supercritical CO₂, and especially in contact with underground water, very aggressive form of carbonation can occur. In this work, to prevent such deterioration in concrete, calcium phosphates were added to the portland cement to produce hydroxyapatite, one of the most stable mineral in the world. Temperature rise, viscosity, set and stiffening, and strength development of cement paste incorporating three different types of calcium phosphates were investigated. According to the results, it was found that the addition of calcium phosphate increased apparent viscosity, but decreased maximum temperature rise and 28 day compressive strength. It was found that monocalcium phosphate was found to be inappropriate for portland cement based material. Applicability of dicalcium and tricalcium phosphates for portland cement needs to be evaluated with further investigation, including the long term compressive strength development.

Keywords : global warming, Geologic Sequestration, carbon capture, calcium phosphates, hydroxyapatite, supercritical CO₂

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 세계적인 산업화로 인해 대기 중 CO₂가 급격히 증가하여 지구 온난화 현상이 가속화되고 있으며 이로 인해 빙하의 해빙 및 해수면 상승과 같은 여러 가지 환경문제가 발생하고 있다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental

Panel on Climate Change)의 제5차 종합보고서에 의하면 2050년 전 지구적으로 기온이 2.3℃, 강수량이 3.2%, 해수면은 33.7cm이 상승 할 것이라고 보고되었으며, 이에 대한 주요원인으로 인위적인 온실가스 배출을 지목하고 있다[1]. 제 5차 IPCC 종합보고서에 따르면 온실가스 배출량은 2000년 ~2010년까지 10년간 연평균 2.2% 증가 한 것으로 보고되었으며, 배출량 증가의 78%가 이산화탄소(CO₂)의 배출과 연관된 것으로 나타났다[1,2]. 따라서 지속가능한 환경을 유지하기 위해서는 대기 중 이산화탄소 배출량을 줄이기 위한 노력에 동참해야 하며 이를 위해 에너지 절약, 폐기물 재활용, 신재생 에너지 기술개발 등 다양한 방법을 모색하고 있다. 특히 이산화탄소 배출량이 많은 화력발전소, 철강산업 및 시멘트 산업 분야의 동참이 필요하나, 이는 현실적으로

Received : February 2, 2017

Revision received : March 14, 2017

Accepted : March 23, 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.

많은 한계를 가지고 있다[3].

대기 중 이산화탄소 배출 문제에 대한 가장 직접적이고 실질적인 대책은 대기 중으로 배출되는 이산화탄소를 포집하여 선별한 후, 안정적으로 저장하여 환경으로 유출 되는 것을 억제하는 것이다. 이러한 일련의 과정은 대기 중 대량의 이산화탄소를 포집한 후 압축, 수송 과정을 거쳐 육상 또는 해양지중에 안전하게 저장하는 기술을 통칭하며, 이를 CCS(carbon capture & storage)로 명명하고 있다. CCS는 대량의 이산화탄소를 감축할 수 있는 신기술로서 주목받고 있으나, 현재 대부분의 연구개발은 포집기술 향상과 관련된 분야로 한정되어 있다. 반면 이산화탄소 포집 후 2차적으로 요구되는 이산화탄소 수송 및 저장관련 기술에 대한 연구는 상대적으로 미약한 실정[4]이므로 이를 위한 재료 및 기술 개발할 필요성이 있다.

이산화탄소를 수송하거나 저장하기 위한 방법 중에서 이산화탄소 지중저장(Geological Sequestration of CO₂)은 육상이나 해저에 존재하는 적합한 지질구조(채굴이 끝나거나 생산중인 유전 및 가스전, 석탄층, 심부 대염수층, 지하 공동) 내부로 이산화탄소를 주입하고 입구를 콘크리트로 봉쇄하는 기술이다[5,6,7]. 포집된 이산화탄소는 초임계상(온도=31.1℃, 압력=7.4MPa)의 형태로 지중구조 내부에 주입되게 된다[5]. 초임계 상태의 이산화탄소는 액체 상태와 유사한 밀도를 가지며 기체와 비슷한 점성을 가지고 있고, 임계점이 물보다 매우 낮아서 다루기 용이하다. 하지만 지하 공동이 초임계 상태의 이산화탄소로 가득 차게 되면 입구를 봉쇄하는데 사용된 콘크리트는 초임계 상태의 이산화탄소에 직접적으로 노출되게 되는데, 노출된 콘크리트는 이산화탄소와 반응하여 중성화($\text{CaOH}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$)가 진행되게 된다. 특히 지반에 존재하는 지하수와 접촉할 경우, 탄산의 형태로 인해 급격한 열화반응을 초래하여 콘크리트의 강도가 저하되고 균열이 발생하는 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 중성화와 같은 문제점에 효과적으로 대응할 수 있는 콘크리트가 개발될 필요가 있다[8,9].

1.2 연구의 방법 및 범위

콘크리트가 초임계 상태의 이산화탄소에 노출되면 탄산화 반응이 급격히 촉진되고 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 변형되게 된다. 이로 인해 시멘트 매트릭스에서 칼슘이온(Ca^{2+})의 용출이 가속화되고 공극률이 증가된다. 이러한 연속반응은 수화생성물 C-S-H(calcium silicate hydrate)의 안정성

을 저하시키며, 생성된 C-S-H로 부터 칼슘성분의 분리(decalcification)를 촉진시켜 hydrous silica를 형성하게 된다. 이로 인해 콘크리트의 강도 및 내구성이 저하되게 된다. 이와 같은 열화반응이 지속적으로 가속화되면 콘크리트의 역학적 성능이 저하되어 내구성을 발현할 수 없는 상태가 될 수도 있다[10]. 이를 보완하기 위한 방법으로 본 연구에서는 콘크리트 매트릭스 내부에 hydroxyapatite(방해석보다 용해도가 낮은 물질임)의 생성을 통해 이산화탄소 환경에 노출된 콘크리트의 내구성을 증진시켜 급속 중성화 반응으로부터 C-S-H를 보호하고자 한다. 본 연구의 선행연구에서는 인산칼슘(calcium phosphates, CP) 3가지 형태가 혼입된 포틀랜드 시멘트 페이스트의 XRD 패턴을 분석한 결과 hydroxyapatite($\text{Ca}_5 \cdot (\text{PO}_4)_3 \cdot \text{OH}$)가 형성된 것으로 나타났다[10].

따라서 본 연구에서는 이산화탄소를 지중에 저장하고자 하는 경우, 주입구에 타설될 콘크리트가 초임계 이산화탄소에 효과적으로 대응할 수 있도록 인산칼슘혼입에 따른 페이스트의 수화온도, 점성, 압축강도, 응결 및 경화특성, 미세구조 형태를 파악하여 기초적인 물성을 평가하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료 및 배합

본 연구에 사용된 시멘트는 (주)○○양회의 1종 보통포틀랜드 시멘트이며, 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical compositions of type I portland cement

Chemical Analysis	Content(wt%)
CaO	53.42
SiO ₂	19.48
Al ₂ O ₃	4.69
SO ₃	4.08
MgO	3.11
Fe ₂ O ₃	3.04
K ₂ O	1.32
TiO ₂	0.38
P ₂ O ₅	0.20
MnO	0.13
ZnO	0.11

실험에 사용된 인산칼슘은 Duksan사의 인산이수소칼슘($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$; Monocalcium phosphate 이하 CP1), 인산수소칼슘($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Dicalcium phosphate or

의 수화반응시 발생하는 수화열을 측정하였다. 시험체 각각의 시간에 따른 최대 수화열을 비교 하였을 경우, CP를 혼입하지 않은 Plain 시험체의 최고 수화 온도는 55.78℃ (at 9.55hr)로 측정 되었다. Figure 1에 따르면 최대 수화열 온도가 측정되는 시간대는 다소 차이가 있으나, CP를 혼입한 모든 시험체는 Plain 대비 최대 수화온도가 낮아진 것으로 측정되었다. 반응시간과 관계없이 최대 수화열이 발생한 온도만 살펴보면 CP1 39.95℃, CP2 48.58℃, CP3 49.43℃, CP1* 42.87℃, CP2* 50.2℃로 Plain과 비교하였을 때, 작게는 10%에서 크게는 28% 정도 수화열이 감소된 것으로 나타났다. 하지만 각각의 시험체에 따라 반응의 형태는 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다.

최대 수화온도까지 도달 하는 시간은 CP1*(42.87℃ at 3.67hr)이 가장 빠르고 CP1(39.95℃ at 8.45hr), CP3 (49.43℃ at 8.86hr), Plain(55.78℃ at 9.55hr) 순서로 측정되었다. 최대 수화온도는 Plain이 가장 높고 CP3, CP2, CP2*는 유사하며 CP1과 CP1*이 낮게 측정되었다.

배합직후 CP1*과 CP1의 초기 수화열 온도는 35℃ 이상으로 반응이 급격하게 진행되는 것으로 측정되었다. 이를 통해 볼 때 CP1 자체의 초기 반응은 매우 빠른 것을 알 수 있으며, CP2의 경우 전체적으로 반응이 다소 지연되는 것을 확인할 수 있다. CP3의 최대 수화열이 발생하는 온도는 다소 낮게 측정되었으나 Plain과 가장 유사한 형태의 수화온도 상승곡선을 보였다.

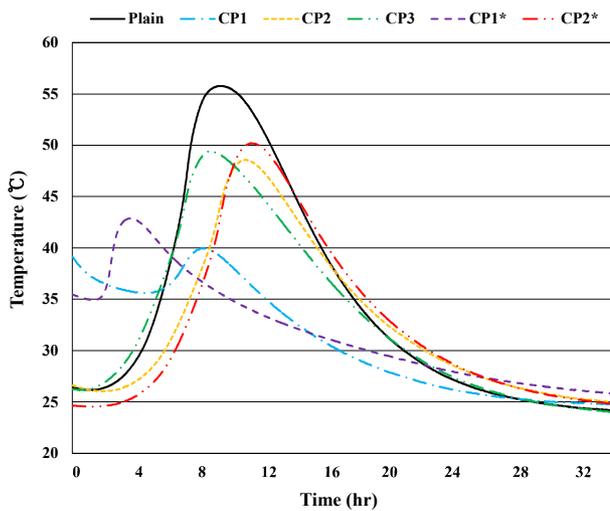


Figure 1. The temperature rise in the cement paste with calcium phosphates

3.2 인산칼슘 혼입 시멘트 페이스트의 점도 특성

Figure 2는 CP를 혼입한 시험체들을 디지털점도계를 이용하여 시험체의 전단속도에 따른 전단응력을 측정하였다. Plain을 포함한 모든 샘플의 전단응력 및 전단속도 관계가 선형에 가깝게 분포하여 Bingham 모델을 적용하기에 적합하였다. 전단속도에 따른 인산칼슘이 혼입된 시멘트 페이스트의 전단응력은 plain보다 모두 큰 것으로 측정되었다.

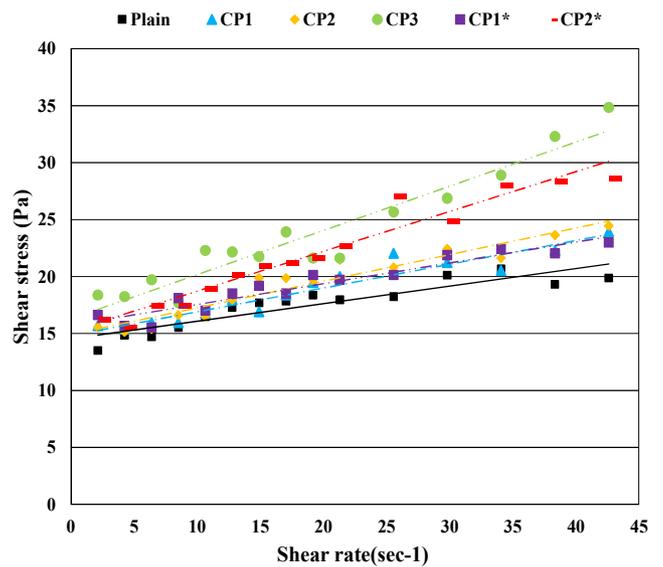


Figure 2. Shear stress vs shear strain relation of cement paste containing calcium phosphates

Figure 3은 인산칼슘이 혼입된 시멘트 페이스트의 레올로지 시험을 통해 측정된 전단속도와 전단응력 그래프를 Bingham 모델로 가정할 경우 얻을 수 있는 소성점도(전단속도-전단응력 그래프의 기울기로 표현)와 항복응력(전단응력 축의 절편으로 표현)을 나타낸 것이다. Figure 3에 따르면 Plain 대비 CP 샘플의 항복응력은 큰 변화 없이 유사하게 나타났으며, 소성 점도는 대부분 증가하는 것으로 측정되었다. 각각의 인산칼슘이 혼입된 시멘트 페이스트는 모두 Plain 보다 소성점도가 큰 것으로 측정되었으며, CP3)CP2*)CP2)CP1)CP1* 순서로 측정되었다. 그 중에서도 CP3의 소성점도는 0.3877Pa·s로 Plain(0.1543 Pa·s)의 소성점도 보다 2.5배 정도 큰 측정값을 갖는 것으로 나타났다.

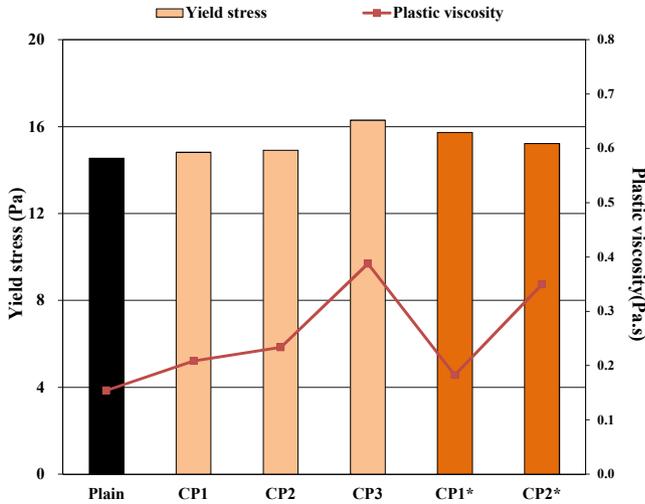


Figure 3. Yield stress and plastic viscosity of cement paste containing calcium phosphates

3.3 응결 및 경화

Figure 4는 인산칼슘이 혼입된 시멘트 페이스트 시험체의 응결 및 경화특성을 측정된 결과를 나타낸 것이다. ASTM C 403의 규준에 따라 표시된 데이터는 지수 함수로 회귀분석한 것이다. 데이터에 따른 지수함수를 이용하여 각각 초결(2MPa) 및 종결(14MPa)에 해당되는 시간을 구하였다. Figure 3에 따르면 CP3는 Plain보다 응결 및 경화가 촉진되는 것으로 나타났고 나머지 CP의 경우 Plain보다 응결 경화시간이 지연되는 양상을 보였다. 그 중에서도 CP1과 CP1*은 Plain 대비 응결 및 경화가 상당히 지연되는 것으로 나타났다. 특히 CP1*의 경우 최대 수화온도 Peak에 도달한 시간이 가장 빨랐음에도 불구하고(Figure 1의 인산칼슘 혼입 시멘트 페이스트의 수화온도 데이터 참조) 응결 경화시간은 Plain에 비해 4배가량 지연되는 것으로 측정되었다.

3.4 압축강도

Plain 및 CP를 혼입한 시멘트 페이스트의 양생 3일, 7일, 28일 압축강도 평균값을 비교하여 Figure 5에 나타내었다. 압축강도를 측정된 결과, 양생기간에 크게 관계없이 CP를 혼입한 시멘트 페이스트 시험체는 Plain 보다 압축강도가 낮은 것으로 측정되었다. Plain의 경우 28일 압축강도가 48.12MPa로 나타났으며, CP1, CP2, CP3의 압축강도는 각각 24.88MPa, 34.04MPa, 41.64MPa로 나타났다. 또한 CP1*, CP2*의 28일 압축강도 값은 각각 27.88MPa, 47.40MPa로 측정되었다. CP3의 경우, 3일 및 7일 압축강

도는 Plain과 유사한 수준으로 발현되었으나 28일 압축강도가 13.5% 낮게 측정되었다. 반면 CP2*는 3일 압축강도는 상대적으로 낮게 측정되었으나, 7일 및 28일 압축강도는 Plain과 유사한 수준으로 발현되었다. 그리고 H₂O 양을 보정한 CP1*, CP2*의 28일 압축강도 값은 CP1과 CP2 보다 압축강도가 다소 상승한 것으로 나타났다. 이는 배합수량이 보정(수량 감소)되고 시멘트 페이스트에 혼입된 CP의 양이 증가함에 따른 물결합재비 상승효과로 판단된다. 이로 인해 기존의 CP(H₂O 양을 보정하지 않은 CP 시험체) 보다 압축강도 결과 값이 크게 측정된 것으로 판단된다.

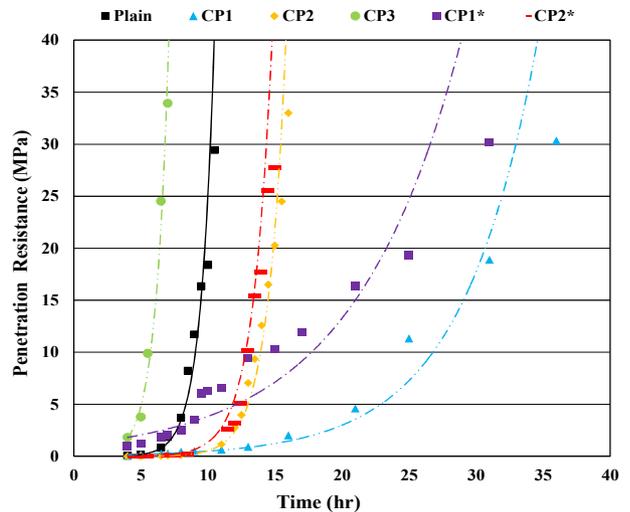


Figure 4. Penetration resistance of cement paste made from type I portland cement and calcium phosphates

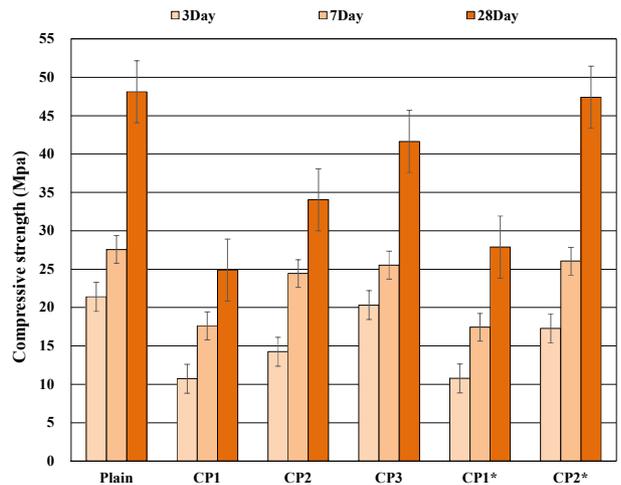
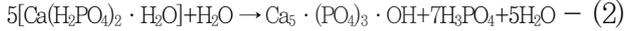


Figure 5. The 3, 7, 28 days compressive strength of cement paste containing calcium phosphates

4. 고찰

본 연구에서 사용된 CP1, CP2, CP3의 반응이 최종적으로 반드시 hydroxyapatite를 생성한다고 가정하면 아래와 같은 화학식을 성립 시킬 수 있다.



식 (2), (3), (4)에 따르면 CP1의 경우 가장 많은 양의 인산을 배출하는 것으로 나타났다. 이로 인해 포틀랜드 시멘트에 CP1을 혼입하게 되면 산·염기의 중화반응이 우선적으로 발생하게 될 가능성이 매우 높으며 이로 인해 응결 및 경화가 지연되고 강도발현에 악영향을 미칠 수 있다. 인산칼슘에서 Ca/P비율이 높아질수록 인산의 생성량은 줄어들게 되는 것을 확인 할 수 있는데 이는 이러한 재료를 혼입하는 경우 포틀랜드 시멘트의 수화반응에 상대적으로 적은 영향을 미치게 됨을 예상할 수 있다.

본 연구에서 제시된 수화온도 상승곡선의 결과에 따르면, CP를 혼입한 시험체의 수화온도는 CP1 시험체만 급격한 초기반응을 보인 것을 확인할 수 있었다. CP2의 수화반응은 다소간 지연되었으며, 인산의 생성량이 가장 적은 CP3 시험체의 경우 초기 수화반응속도는 일반 포틀랜드 시멘트를 혼입한 시험체와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 관찰되었다. 일반적으로 인산염 계열의 재료가 포틀랜드 시멘트에 투입되면 인산염 계열 재료의 반응이 우선적으로 일어나게 되고 이로 인해 발생된 수화생성물이 포틀랜드 시멘트 입자의 주위를 둘러싸 포틀랜드 시멘트의 수화반응이 지연되는 것으로 알려져 있다[12]. 따라서 인산의 생성량이 많은 CP1 시험체의 경우에는 상당량의 인산으로 인한 산·염기 중화반응이 우선적으로 발생하여 최대온도에 일찍 도달하고(Figure 1의 온도 상승 그래프 참조) 이후 발생하는 포틀랜드 시멘트의 반응을 심각하게 지연시키는 것으로 판단된다. 초기반응으로 생성되는 반응물질의 존재로 인한 점도 상승은 관찰되었으나(Figure 3 참조), 포틀랜드 시멘트의 수화가 방해받지 않아 전반적인 응결 및 경화 과정은 상당히 지연되는 것을

확인할 수 있으며(Figure 4 참조), 압축강도의 발현 또한 다른 시험체에 비해 낮게 나타나는 것으로(Figure 5 참조) 사료된다. CP 시험체의 소성점도가 상승한 이유는 1) 인산칼슘이 물과 먼저 반응하여 수화생성물을 생성시킴으로써 입자간의 interlocking 현상을 일으키게 된 것 및 2) 인산칼슘이 시멘트 보다 먼저 물과 반응하게 됨으로써 시멘트 페이스트의 유동성을 유지할 수 있는 배합수의 양이 줄어드는 점과 관련이 있다고 사료된다.

CP2를 혼입한 시험체의 경우, 기존 문헌에서 언급된 바와 같이[12] 전형적인 지연제로서 작용하는 것으로 보인다. 초기 반응으로 인한 생성물질로 점도의 상승이 동반되지만, 전체적인 수화온도 상승곡선과 응결 및 경화곡선을 확인하면 포틀랜드 시멘트의 반응을 지연 시키는 것을 알 수 있다. 또한 28일 압축강도가 Plain 시험체에 비해 낮아 28일 이후의 장기강도 발현 성상을 확인할 필요성이 있는 것으로 사료된다. 또한 CP3 시험체를 혼입하는 경우에는 최대 수화온도가 낮아지는 하였으나 상대적으로 많은 양의 hydroxyapatite를 형성할 수 있기 때문에(식 4 참조) 점도의 상승폭이 매우 높은 것을 알 수 있다. 이로 인해 응결 및 경화 또한 급격하게 진행됨을 알 수 있었다. 그러나 수화온도 상승곡선에서 나타난 바와 같이 포틀랜드 시멘트의 수화반응 자체는 다소 억제하는 것으로 보이며, 이로 인해 3일, 7일 및 28일 압축강도 발현 성상이 Plain 시험체에 비해 다소 저하되는 것을 확인하였다.

요약하면 CP를 포틀랜드 시멘트에 혼입하기 위해서는 인산의 생성량이 많은 CP1의 사용은 고려하지 않는 것이 바람직하다고 판단되며, CP2 및 CP3를 활용하는 경우에는 장기강도 성상을 확인하여 그 활용성을 추가적으로 평가할 필요가 있다고 사료된다.

CP 내부의 H₂O가 배합수로서 기능을 한다고 가정하여 제작한 시험체(CP1* 및 CP2*)의 경우, 전체적으로 배합수 양이 감소되고 투입된 CP 양의 증가로 인해 고체량이 증가하여 공극률이 감소한 것으로 본다. 이로 인해 점도 및 압축강도가 일반 시험체(CP1 및 CP2)에 비해서 높게 나타난 것으로 사료된다. 그러나 CP 내부의 H₂O가 배합수로서 기능을 하는지의 여부는 명확히 확인할 수 없었다.

5. 결론

본 연구에서는 초임계 이산화탄소의 지중 격리를 위한 인

산업 혼입 시멘트 복합체의 개발에 관한 기초연구로서, CP를 혼입한 시멘트 페이스트의 기초적인 물성을 평가하였다. 본 연구에서 수행된 실험들은 이산화탄소 지중저장을 위한 기초연구 중에서도 극히 일부분을 시작한데 불과하며, 시멘트와 각종 phosphate의 상호 반응(수화반응성, pH 변화, 공극내 Ca^{2+} 변화 등) 및 이산화탄소와의 반응에 따른 변화 등에 관한 추가 연구가 반드시 필요하다고 판단된다. 또한, 본 연구에서는 쌍용양회에서 생산된 1종 보통 포틀랜드 시멘트에 한해 실험한 결과이므로 국내에서 사용되고 있는 다양한 시멘트에 대한 추가 실험도 병행되어야 할 것으로 판단된다. 연구결과를 본 연구에서는 다양한 인산염 계열의 재료 중 포틀랜드 시멘트와 가장 물성이 잘 맞을 것으로 예상되는 3종류의 인산칼슘을 선정하여 실험을 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 포틀랜드 시멘트에 인산염을 혼입하였을 경우 인산염 계열 재료의 반응이 시멘트 보다 우선시되며, 생성된 반응물질의 존재로 인해(입자간의 interlocking 현상 및 배합수의 감소 등) 점도가 상승하는 것으로 나타났다. CP의 종류에 따라 다소 차이는 있으나, 모든 시험체의 수화온도는 인산염을 혼입하지 않은 경우 보다 10~28% 정도 낮아지는 것으로 측정되었다. 또한 CP의 혼입으로 인해 시멘트의 수화반응이 다소 억제 되면서 압축강도도 전체적으로 저하되는 것으로 나타났다.
- 2) 반면, 응결 및 경화 특성을 분석한 결과 대부분의 CP 시험체는 응결 및 경화가 지연되는 것으로 나타났으나, CP3는 일반 Plain 보다 응결 및 경화가 촉진되는 것으로 나타났다. 인산을 많이 배출하여 산·염기중화반응으로 인해 응결 및 경화가 지연되는 CP1과 CP2와는 달리 CP3는 상대적으로 많은 hydroxyapatite 생성이 가능하여 점도 상승폭 또한 크고 이로 인해 응결 및 경화 또한 급격히 진행된 것으로 사료된다.
- 3) 인산염계열 재료를 포틀랜드 시멘트에 혼입하여 사용하기 위해 수화온도, 소성점도, 응결 및 경화 특성의 변화, 압축강도의 성상을 종합적으로 고려할 때 CP1의 사용은 다소 어려울 것으로 판단된다. CP2와 CP3를 활용하기 위해서는 추후 장기재령에 따른 압축강도의 변화를 관찰하여 추가적으로 CP가 시멘트 페이스트의 물성에 미치는 영향을 종합적으로 평가할 필요가 있을 것으로 판단된다.

요 약

지구온난화가 세계적으로 이슈가 되면서 이산화탄소 포집 및 저장기술의 개발에 관한 많은 노력이 집중되고 있다. 이중 이산화탄소 지중저장은 포집된 이산화탄소를 초임계 상태로 지하의 암반층에 안정적으로 저장하여 대기로의 유출을 방지하는 기술이다. 이와 같이 저장된 이산화탄소의 유출을 막기 위해 콘크리트를 사용하는데, 이 때 콘크리트는 매우 공격적인 형태의 중성화로 인해 내구성이 열화될 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 이에 대한 안정성을 높이기 위해 포틀랜드 시멘트에 인산칼슘을 혼입하여 지구상에서 가장 안정적인 물질중 하나인 수산화인회석을 생성시키고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 인산칼슘을 혼입한 포틀랜드 시멘트 페이스트의 수화온도, 점성, 응결 및 경화, 압축강도 변화를 분석하였다. 그 결과, 인산칼슘이 혼입되면 페이스트의 점도를 증가되나 최대수화온도는 낮아지고, 28일 압축강도 또한 저하되는 것으로 나타났다. 특히 인산이소소칼슘은 포틀랜드 시멘트와 함께 사용하기는 어려운 것으로 나타났으며, 인산수소칼슘 및 인산삼칼슘을 혼입한 경우에는 장기강도 성상을 확인한 후 활용가능성을 타진할 필요가 있는 것으로 나타났다.

키워드 : 지구온난화, 이산화탄소 지중저장, 이산화탄소 포집, 인산칼슘, 수산화인회석, 초임계 이산화탄소

Acknowledgement

This research was supported by a grant (16CTAP-C115166-01) from Technology Advancement Research Program(TARP) funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

References

1. Kwon WT, Current status and perspectives of climate change sciences, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2005 May;41(2-1)325-36.
2. Team RK, Pachauri and Meyer LA, (eds.), Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2014, IPCC, 2014 Geneva, Switzerland, 151 p.

3. Huh C, Kang SG, Ju HH, Consideration of carbon dioxide capture and geological storage(CCS) as clean development mechanism (CDM) project activities: Key issues related with geological storage and response strategies, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 2011 Feb;14(1):51–64.
4. Shin KH, CCS Related foreign environmental management system and research trend analysis, Korea Environment Institute, 2010 Dec 25;Single volume:1–93.
5. Lee HK, Kim KD, Kim TH, Kim GW, Permeability and strength of cements exposed to supercritical CO₂ for varying periods, *The Journal of Engineering Geology*, 2016 Mar;26(1):117–28.
6. Wang SK, A proposal for regulating the geological sequestration of carbon dioxide, *Journal of the Geological Society of Korea*, 2009 Oct;45(5):569–77.
7. Huh DG, Park YC, Status of otway CO₂ storage project in australia, *Journal of the Geological Society of Korea*, 2009 Oct;45(5):517–25.
8. Ko MJ, Kang HM, Wang SK, Lee MH, The weathering process of olivine and chlorite reacted with the supercritical CO₂ on the sequestration condition, *Journal of the Geological Society of Korea*, 2011 Dec;47(6):635–45.
9. Jung HB, Um WY, Experimental study of potential wellbore cement carbonation by various phases of carbon dioxide during geologic carbon sequestration, *Applied Geochemistry*, 2012 Oct;35:4–7.
10. Chung CW, Lee JY, Kim JH, Formation of hydroxyapatite in portland cement paste, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2013 Oct;14(1):68–75.
11. Chung CW, Mroczek M, Park IY, Struble LJ, On the evaluation of setting time of cement paste based on ASTM C403 penetration resistance test, *Journal of Testing and Evaluation*, 2010 Sep;38(5):1–7.
12. Taylor HFW, *Cement chemistry*, 2nd ed, London: Thomas Telford; 1990, Chapter 11.5.4 Precipitation effects; inorganic retarders and setting accelerator; p. 338–39.