

폐콘크리트 미분말을 이용한 재생시멘트 모르타의 중성화 특성

Carbonation Properties of Recycled Cement Mortar made of Cementitious Powder from Concrete Waste

박 차 원* 안 재 철** 강 병 희***
 PARK, Cha-Won AHN, Jae-Cheol KANG, Byeung-Hee

Abstract

Recently, there have been many studies about recycling cementitious powder from concrete waste(hereinafter referred to as waste powder), generated after recycle aggregate production. Previous studies showed that when the heating process of waste powder at 700°C, Ca(OH)₂ in paste is dehydrated making possible the restoration of hydraulic properties. Recycled cement with hydraulic properties restored is thought to be re-hydrated through the mechanism of hydration, which is almost similar in Portland cement. This clearly suggests that the hydrate of recycled cement is alkali in type. Like in general concrete, if recycled cement is used as a structural material, resistance performance against carbonation or neutralization by CaCO₃ in air probably would be most influential to the life of steel-reinforced concrete structure. Thus the purpose of this study is to make an experimental review on chemical properties of recycled cement, manufactured with concrete waste as base material, and investigate the durability of concrete using recycled cement through evaluating the cement's performance of resistance to carbonation in accordance with its accelerating age. Based on its results, further, the study seeks to provide basic information about ways of utilizing recycled cement.

키 워 드 : 폐콘크리트계 미분말, 재생시멘트, 중성화, 내구성

Keywords : Cementitious Powder from Concrete Waste, Recycled Cement, Carbonation, Durability

1. 서 론

최근 폐콘크리트를 재활용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 재생골재의 고품질화를 위한 부착 모르타 제거기술과 재생 잔골재의 개발기술도 활발히 이루어지고 있다. 그리고, 이와 함께 재생골재 생산 후 발생하는 폐콘크리트 부산 미분말(이하, 폐미분말)을 재활용하기 위한 연구도 다양하게 진행되고 있다.

특히, 폐미분말을 수경성을 가진 재생시멘트(이하, 재생시멘트)로서 활용하고자 하는 연구가 저자 등을 위주로 활발히 이루어지고 있으며, 현재 모델단계의 실험을 통하여 수화성 회복의 최적 제조프로세스가 도출된 단계이다.

그러나, 이러한 재생시멘트를 실제 구조물에 적용하기 위해서는 폐미분말을 이용한 재생시멘트의 화학적 분석에 대한 연구가 면밀히 이루어져야 하며, 다양한 내·외부 환경조건에 따른 내구성능도 필수적으로 검토되어야만 한다. 그리고 이러한 연구결과를 바탕으로 재생시멘트의 용도가 결정되고 이에 적합한 요구성능에 대한 최적 배합이 이루어질 것으로 판단된다.

저자 등에 의한 선행된 연구결과¹⁾⁻⁵⁾에서는 폐미분말을 650~700°C로 소성·가공한 경우, 페이스트 내부의 수산화칼슘의 탈수반응으로 인하여 수화성 회복이 가능한 것으로 나타났으며, 잔골재성분과의 계면분리가 용이하게 이루어질 경우 압축강도가 크게 높아지는 것으로 나타났다.

이러한 경우, 수화성을 회복한 재생시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트와 거의 유사한 수화기구에 의해서 재수화하는 것으로 판단되기 때문에 재생시멘트 수화물 또한 알칼리성을 나타낼 것으로 보인다. 그리고, 재생시멘트가 구조재료로서 사용될 경우, 보통 콘크리트와 마찬가지로 공기 중의 이산화탄소에 의한 탄산화 또는 중성화에 의한 저항성능이 철근콘크리트 구조물의 수명에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 폐미분말의 모델로서 페이스트와 모르타 등을 이용한 선행된 모델연구의 결과를 토대로, 배합과 재령을 알 수 없는 실제 폐콘크리트를 모재로서 제조한 재생시멘트의 화학적 특성을 실험을 통해 고찰하고, 각 촉진재령에 따른 중성화 저항성능을 고찰하여 재생시멘트를 이용한 콘크리트 제품의 내구성능을 평가하고자 한다. 그리고 이러한 결과를 바탕으로 향후 재생시멘트의 활용방안을 위한 기초 자료를 제시하는데 목적이 있다.

* 동서대학교 건축토목시스템공학부 겸임교수, 공학박사, 정희원

** 東京大學 工學系 建築學專攻 研究員, 공학박사, 정희원

*** 동아대학교 건축학부 교수, 공학박사, 정희원

2. 실험

2.1 실험인자 및 수준

본 연구에서는 모델단계의 연구결과를 토대로 배합과 재령을 알 수 없는 실제 폐콘크리트를 모재로서 제조한 재생시멘트의 화학적 특성과 미세구조를 분석하고 재생시멘트의 중성화에 의한 저항성을 검토하고자 하였다.

따라서, 보통시멘트(OPC)와의 중성화 저항성을 비교하기 위하여 재생시멘트(RC)를 치환하여 사용하였으며, 모르타는 콘크리트 배합을 고려하여 잔골재 혼합율(S/M, 용적비)을 45%로 고정하였다. 그리고, 내구성에 영향을 미치는 물결합재비(W/B)는 50, 60% 두개의 수준으로 하였다. 본 연구의 실험인자는 표 1과 같다.

표 1. 실험인자 및 수준

인자	재생시멘트 모르타				축진중성화 재령(주) (CO ₂ 10%)
	재생시멘트 (RC)	재생시멘트 치환율 (RC%)	W/B (%)	S/M (%)	
수준	650℃ 소성 0.15mm screen	0 (RC0)	50	45	1주
		20 (RC20)			2주
		40 (RC40)			4주
		100 (RC100)			6주
					8주
수준수	1	4	2	1	5

2.2 사용재료

본 실험에서 사용한 각 재료의 물성은 표 2와 같으며, 재생시멘트의 제조과정은 그림 1과 같다.

재생시멘트의 모재는 부산경남지역의 폐콘크리트를 재활용하여 재생골재를 제조하는 S사의 폐콘크리트를 사용하였으며, 페미분말의 열분석 결과는 그림 2와 같다. 기존의 모델단계의 연구에서는 페미분말의 수화성 회복을 위한 최적 소성온도를 700℃로 보고하고 있으나, 저자 등이 실제 폐콘크리트 미분말을 이용한 최근의 연구결과 650℃의 경우가 강도성상이 우수한 것으로 나타나 본 연구에서는 재생시멘트의 제조온도를 650℃로 하였다. 그림 3은 재생시멘트의 X선 회절분석 결과를 나타낸 것으로 중성화와 잔골재 혼입으로 인한 CaCO₃ 및 SiO₂의 피크가 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

표 2. 사용재료의 물성

사용 재료	물 성	기호
재생시멘트	비중: 2.67 0.15mm screen	RC
보통포틀랜드시멘트	비중: 3.15 blaine : 3,200(cmf/g)	C
잔골재	비중: 2.56, 흡수율: 2.29%, F.M: 2.48	S
고성능AE감수제	폴리카르본산계 SP-8K 비중: 1.07	SP

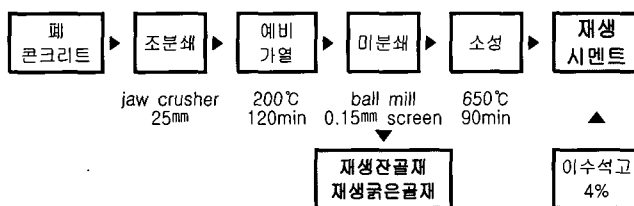


그림 1. 재생시멘트의 제조

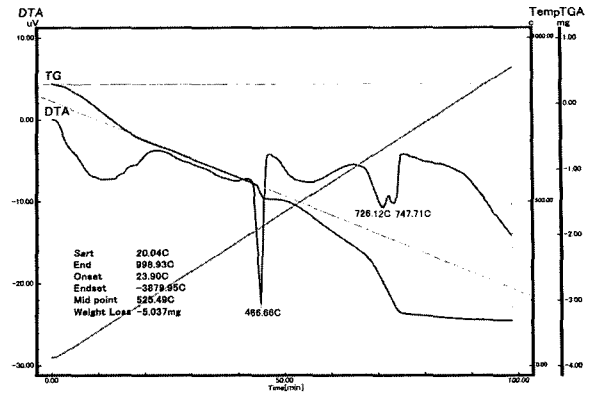


그림 2. 폐콘크리트 미분말(가공전)의 열분석(TG-DTA)

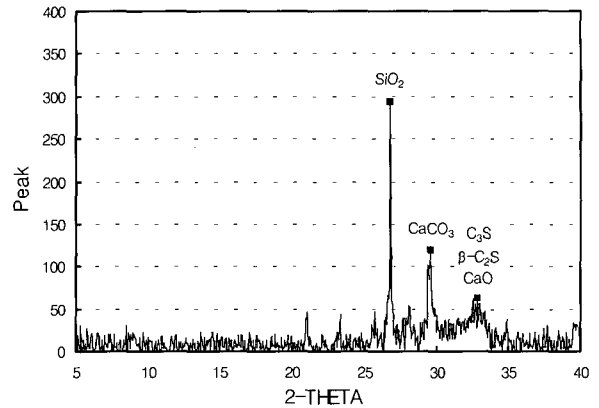


그림 3. 페미분말을 이용한 재생시멘트(650℃)의 X선 회절

2.3 축진 중성화 시험

2.3.1 시험체 제작 및 축진 양생

시험체는 Ø5×10cm의 공시체를 각 배합별, 축진중성화 재령별로 제작하였다. 시험체는 4주간 수중양생을 실시하였으며, 이후 상대습도 60±5%, 온도 20±2℃의 항온항습실에서 4주간 정치하였다. 축진 중성화의 양생조건은 현재 국내에는 관련 규준이 없는 실정이며, 일본의 JIS A 1153 「콘크리트의 축진중성화 시험방법」에서는 온도 20±2℃, 상대습도 60±5%, 이산화탄소 농도 5±0.2%로 규정하고 있다.

본 연구에서는 전양생 8주 후, 온도 20±2℃, 상대습도 60±5%, 이산화탄소 농도 10±0.2%의 조건으로 축진중성화 실험을 행하였으며, 시험체 주변의 환경조건을 균일하게 하기 위하여 시험체의 간격을 2cm 이상 간격을 두었다.

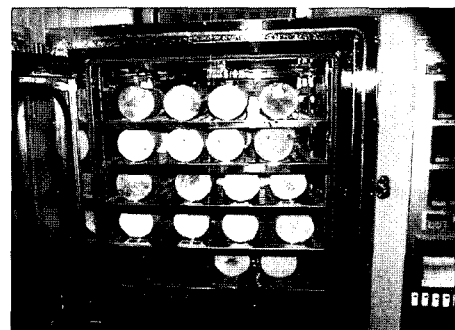


그림 4. 축진 중성화 양생

2.3.2 실험

본 연구의 실험항목은 표 3과 같다. 수소이온농도는 KS F 2103(혹의 pH값 측정방법)에 준하여 pH meter를 이용하였으며, 보정은 pH 7.00과 10.01 2개의 버퍼용액을 이용하였다. 또한, 재생시멘트 및 재생시멘트 수화물의 화학성분의 정량분석을 위한 열분석은 복합형 열분석 장치(TG/DTA)를 이용하여 승온속도 20℃/min로 행하였다.

표 3. 실험 항목

측정 항목	비고
중성화깊이	1% 페놀프탈레인 시험
수소이온농도(이하, pH)측정	KS F 2103, pH meter
열분석	KS M 0130
X선 회절 분석	KS M 0043

3. 실험결과 및 분석

3.1 재생시멘트 치환율에 따른 중성화 깊이

그림 5에서 그림 11은 재생시멘트 모르터의 촉진재령과 재생시멘트 치환율에 따른 중성화 깊이를 나타낸 것이다.

실험결과, 재령 28일 후 재생시멘트 모르터를 할열과과하여 페놀프탈레인 용액을 분무한 결과 치환율 0%에서 100%의 모든 조건에서 붉게 착색되는 것으로 나타났으며, 육안으로 볼 때 치환율에 따른 착색의 차이를 다소 나타내었다.

따라서, 재생시멘트는 보통시멘트에 비하여 알칼리성이 크게 낮은 것으로 나타났으며, 이에 따라 재생시멘트를 치환함에 따라 중성화 진행속도가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 재생시멘트 모르터의 경우에서도 물결합재비가 감소함에 따라 재생시멘트 수화물 조직이 치밀해져 상대적인 중성화 저항성능이 우수한 것으로 나타났다.

촉진재령에 따른 재생시멘트의 중성화 저항성능은 먼저, 촉진재령 1주 경과 후, 재생시멘트를 100% 사용한 모르터의 경우 뚜렷한 중성화 진행의 경계는 나타나지 않았으나 전체적으로 착색부의 색이 연해지는 것으로 나타났다. 그리고 촉진재령 2주 경과 후부터 촉진재령이 증가함에 따라 착색부의 경계는 다소 나타나고 있으나, 점차 색이 연해지는 것으로 나타나 이미 pH가 크게 낮아진 것으로 판단된다. 그리고 4주후에는 거의 모두 중성화가 이루어진 것으로 나타났다.

3.2 재생시멘트 모르터의 촉진재령에 따른 pH

본 실험에서 사용한 페놀프탈레인법은 pH8.9를 기준으로 중성화 유무를 파악하는 개략적인 방법으로서 재생시멘트 수화물과 같이 알칼리성이 낮은 경우 중성화 저항성능의 정량화에 다소 어려움이 있다. 따라서, 보통시멘트 모르터와 재생시멘트 100% 모르터의 촉진재령에 따른 pH를 측정하였으며, 그 결과는 그림 12와 같다.

그림과 같이 재생시멘트를 100% 치환한 모르터의 경우에서도 보통 모르터의 pH(12.5 이상)에 비하여 다소 낮은 값(12.0)을 나타내었으나, 철근부식을 방지할 수 있는 안전한 값을 나

타내었다. 특히, 일반적으로 재알칼리화 공법에 의한 알칼리성이 pH가 10 인 점을 고려하면 재생시멘트 수화물의 알칼리도는 높은 수준인 것으로 판단된다.

그러나, 촉진재령이 증가함에 따라 pH는 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 촉진재령 4주에 이미 pH가 8.5 정도로서 거의 중성화되는 것으로 나타났다. 이는 일반적인 콘크리트의 경우, pH≥12이면 철강이 완전히 부동태역에 있고, pH≤10이면 중성화에 의하여 부동태역에서 활성역으로 변하는 것을 고려한다면, 재생시멘트의 경우 구조용 재료로서의 적용은 어려울 것으로 판단된다.

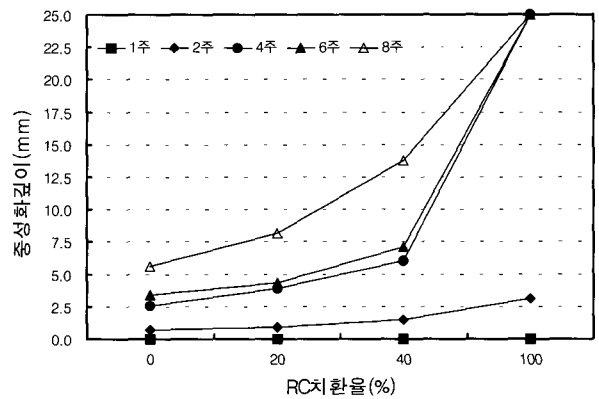


그림 5. 재생시멘트 치환율에 따른 중성화깊이(W/B=50%)

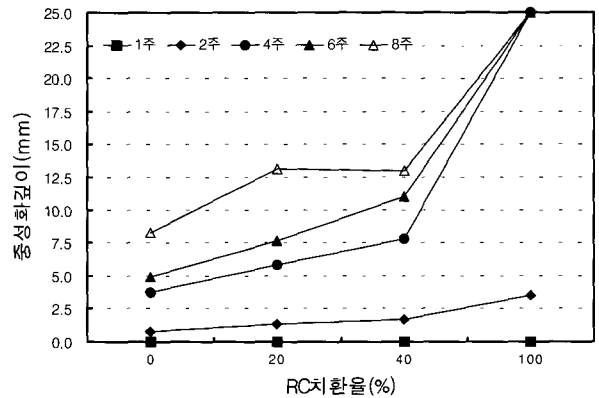


그림 6. 재생시멘트 치환율에 따른 중성화깊이(W/B=60%)

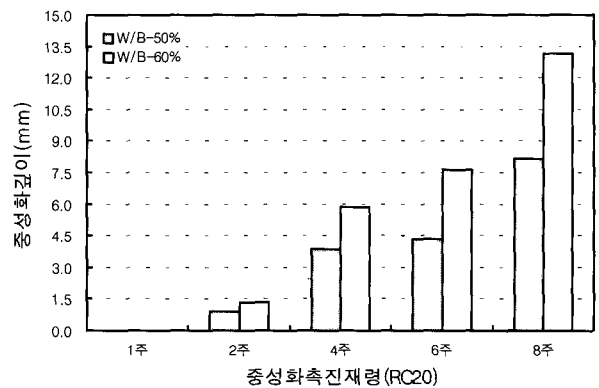
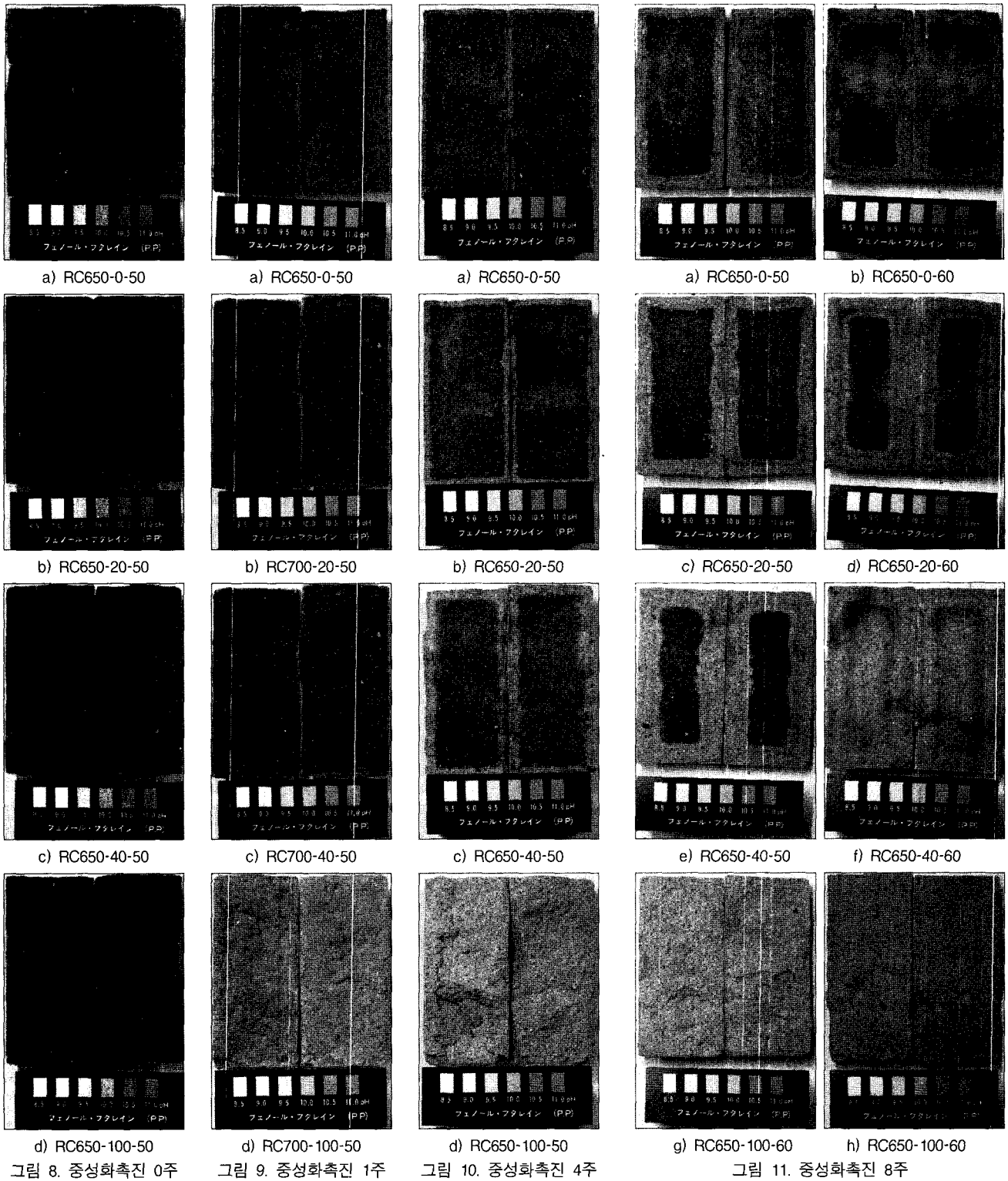


그림 7. 중성화촉진재령에 따른 중성화깊이(RC20)



이상과 같은 실험결과, 재생시멘트의 경우 재수화에 의해 미량의 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)과 함께 나트륨(NaOH), 칼슘(KOH) 등의 다량의 알칼리 물질을 생성하는 것으로 예상되나, 쉽게 중성화되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 일반적으로 알칼리 성분이 가용성으로서 쉽게 탄산화되는 경우⁶⁾와 수화물 내

6) 중성화된 시멘트 수화물을 재알칼리화 하기 위한 연구로서, 실험적인 알칼리성 부여를 위하여 수산화칼슘, 수산화리튬 등의 알칼

부 투기성이 높음으로 인하여 중성화 저항능성이 떨어지는 경우로 그 원인을 분석할 수 있다.

리성의 수용액을 콘크리트에 도포하였으나, 실제로 도포하여 확인한 경우 이러한 약제는 도포직후에는 알칼리성을 부여하나 1-2일 경과하게 되면 쉽게 탄산화되어 알칼리성을 소실하므로 실용성이 없다. 김무한 외, "침투성 알칼리성부여제의 개요와 활용기술", 콘크리트학회지 vol.8 no.5, 1996. 10., pp.54

특히, 본 실험에서의 물결합재비는 50, 60%의 범위였으나, 재생시멘트 내부의 40%가량의 잔골재 혼입량으로 인하여 실제 물결합재비는 80~100%로 크게 증가되었을 것으로 판단된다. 따라서 수화조직이 치밀하지 못한 재생시멘트 수화물 내부 공극으로 CO₂의 침투확산이 크게 빨랐던 것이 급격한 중성화의 원인으로 판단된다.

그리고, 실험결과에서도 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 모르터의 경우 표면에서부터 서서히 중성화가 진행되어 가는 특성을 나타내었으나, 재생시멘트를 사용한 경우 촉진재령 초기에 시험체 전체로 침투된 CO₂의 영향으로 전체적으로 서서히 중성화가 진행되는 특성을 나타내었다.

이상과 같은 결과와 기존 연구결과를 토대로 고찰할 경우 재생시멘트 내부의 잔골재 성분 제거가 재생시멘트의 강도와 내구성의 품질관리에 있어 가장 중요한 연구과제인 것으로 판단된다.

3.3 재생시멘트 모르터의 열분석

그림 13에서 16은 재령 28일 재생시멘트 모르터내 재생시멘트 수화물의 열분석 결과를 나타낸 것이며, 이를 토대로 재생시멘트 수화물 내 Ca(OH)₂와 CaCO₃의 양을 정량화한 결과는 그림 17과 같다.

그림과 같이 재생시멘트 치환율이 증가함에 따라 Ca(OH)₂의 양은 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 치환율 100%인 재생시멘트 수화물 내에는 DTA상으로 약한 피크로 나타나 거의 미량 존재하는 것으로 분석된다. 그러나, 모재 페콘크리트의 중성화로 인한 CaCO₃성분이 재생시멘트 제조시 재수화되지 못한 채 재생시멘트 내부에 포함된 것으로 나타나 치환율에 따라 점차 증가하는 것으로 나타났다.

이는 소성온도 650°C의 제조프로세스는 시멘트 수화물 내부 Ca(OH)₂의 탈수반응은 가능하나, 중성화로 인하여 다량 생성된 CaCO₃성분의 탈탄산 반응이 일어나지 않았기 때문이며, 또한 재생시멘트 내부에 다량 혼입된 잔골재 미립분의 영향인 것으로 분석된다. 또한, 재생시멘트의 소성온도 차이로 인한 화학적 특성 및 수화특성이 보통시멘트와 상이한 부분이 있기 때문에 재생시멘트 수화물의 미세구조에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

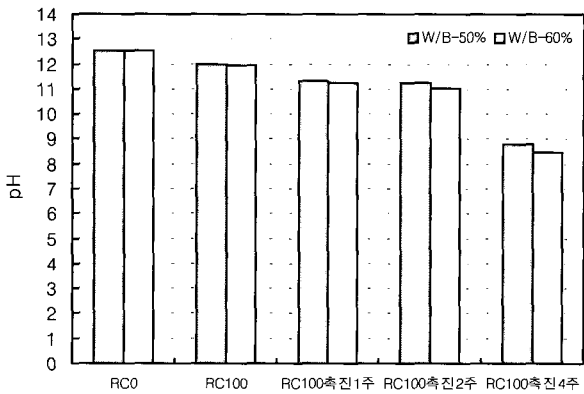


그림 12. 재생시멘트 모르터의 촉진재령에 따른 pH

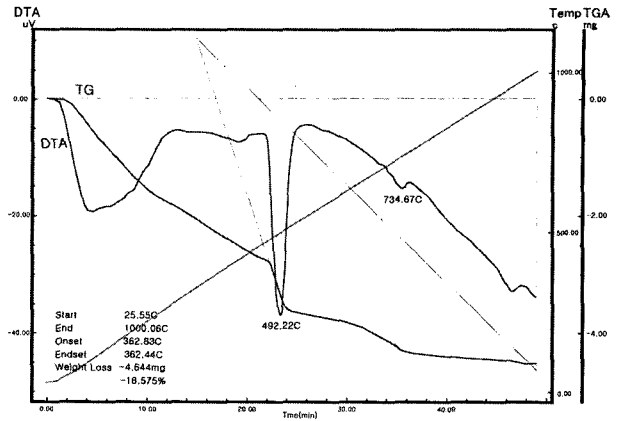


그림 13. RC650-0-60의 열분석

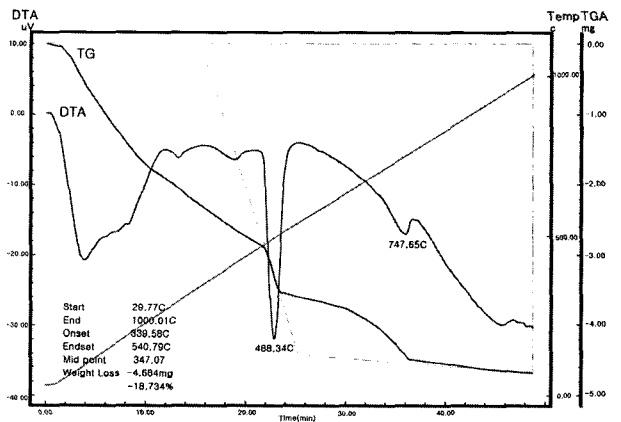


그림 14. RC650-20-60의 열분석

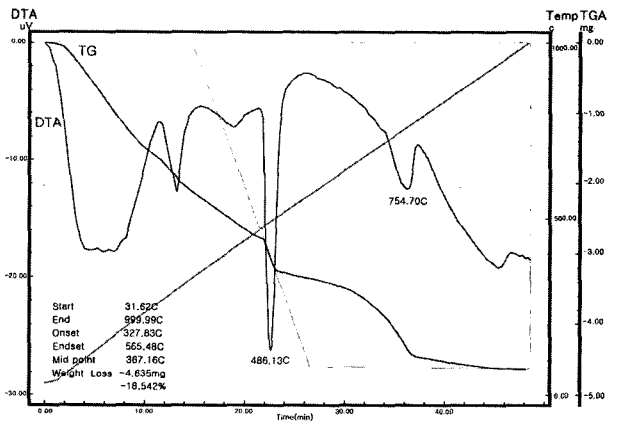


그림 15. RC650-40-60의 열분석

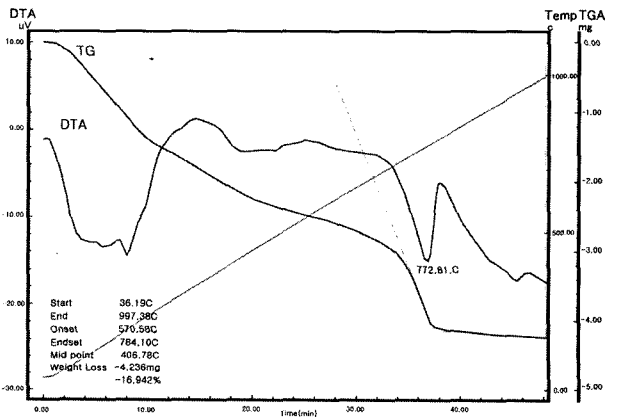


그림 16. RC650-100-60의 열분석

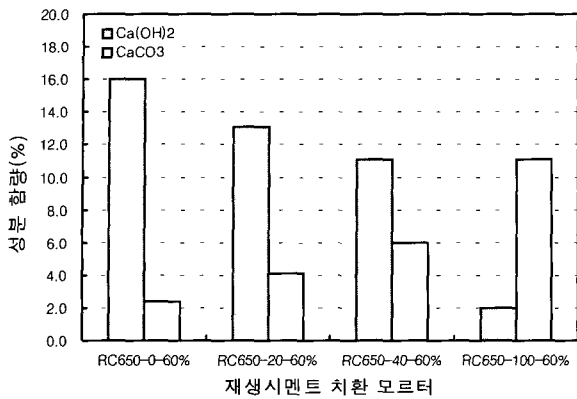


그림 17. 재생시멘트 수화물의 열분석 측정 결과

3.4 재생시멘트 모르터의 X선 회절분석

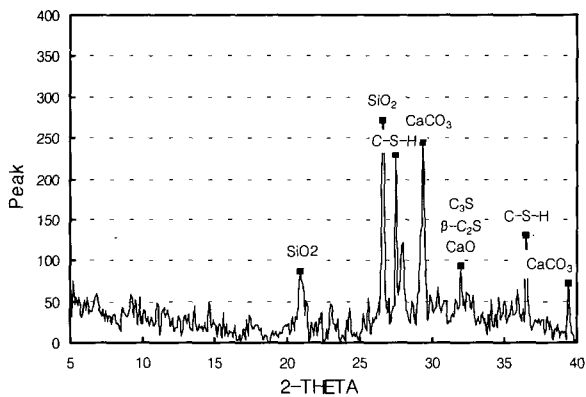
XRD 분석은 동(Cu) $k\alpha$ 를 사용하고, 관전압 40kV, 관전류 20mA, scanning속도 $6^\circ/\text{min}$, scanning각도(2θ)를 5° 에서 40° 까지 조사하여 결과를 JCPDS card와 비교, 분석하였다.

그림 18에서 그림 21은 재령 28일과 촉진 중성화 1주, 2주, 8주 경과한 재생시멘트 모르터의 XRD분석 결과이다. 본 논문에서는 지면관계상 중성화가 진행되지 않은 재령 28일과 중성화 1주, 그리고 중성화가 완전히 이루어진 촉진 8주는 물결합

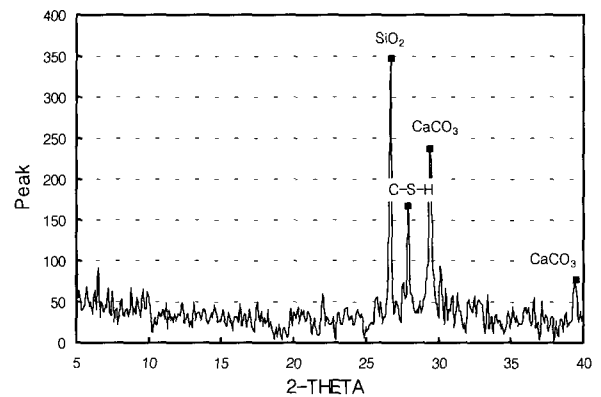
재비별로 나타내었으며, 중성화 2주는 표면과 외부를 비교한 결과를 나타내었다.

재생시멘트 모르터의 경우에도 전반적으로 재생시멘트와 유사한 피크를 나타내었으며, 재생시멘트 내부의 잔골재 성분으로 인한 SiO_2 와 수화생성물의 중성화로 인한 CaCO_3 의 피크가 크게 나타난 것을 알 수 있다. 특히, CaCO_3 의 경우는 원콘크리트의 모재성분과 재수화후의 재생시멘트 수화물의 재중성화로 인하여 다량 존재하는 것으로 분석된다. 또한 대부분이 수산화칼슘의 중성화로 인하여 나타나는 칼사이트(29.4°)의 피크이며, C-S-H상(규산칼슘수화물)의 탄산화로 인한 파테라이트는 거의 발견하기 어려웠다. 그리고, 부분적으로는 규산칼슘수화물로 생각되는 피크도 나타나 있었다. 그러나, 시멘트 수화물의 강도 및 내구성에 가장 큰 영향을 미치는 C-S-H상은 저결정성이기 때문에 X선 회절분석법으로는 그 구조를 정확히 알 수 없는 것이 기존 연구의 결과이므로, 향후 이에 대한 추가된 연구가 필요하다.

또한, XRD분석은 열분석에 비하여 정성적인 분석이므로 화학성분의 변화에 대한 정량분석은 다소 어려웠으나, 전술한 바와 같이 내부 투기성이 높은 재생시멘트 모르터의 경우 조기에 중성화가 이루어지고 시험체의 중앙부와 표면부의 중성화 정도도 거의 유사한 것으로 나타나 XRD 결과상의 큰 변화는 나타나지 않았다.

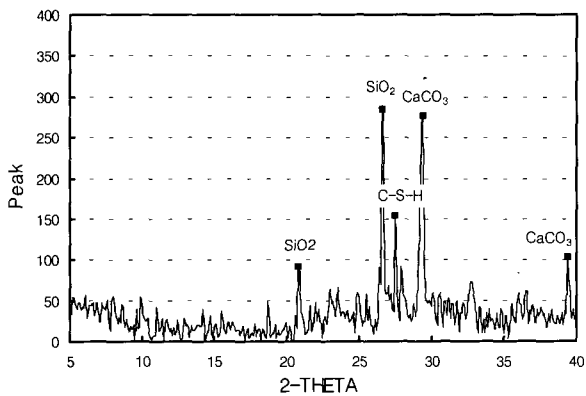


a) RC650-100-50(중앙부)

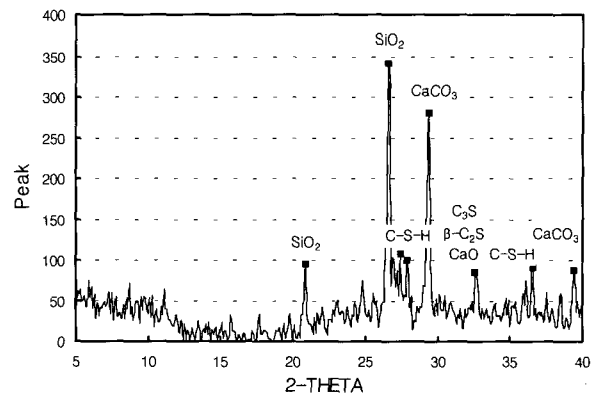


b) RC650-100-60(중앙부)

그림 18. 재생시멘트 모르터의 X선 회절(재령 28일)

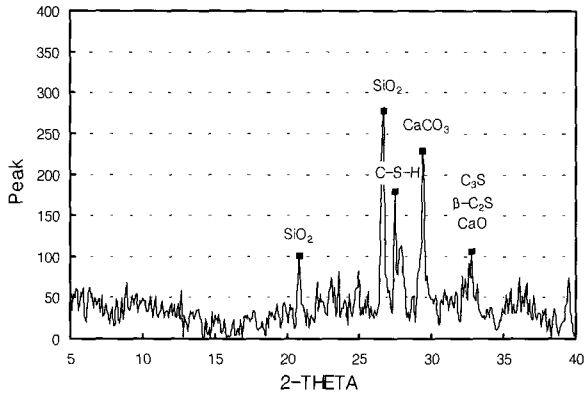


a) RC650-100-50(중앙부)

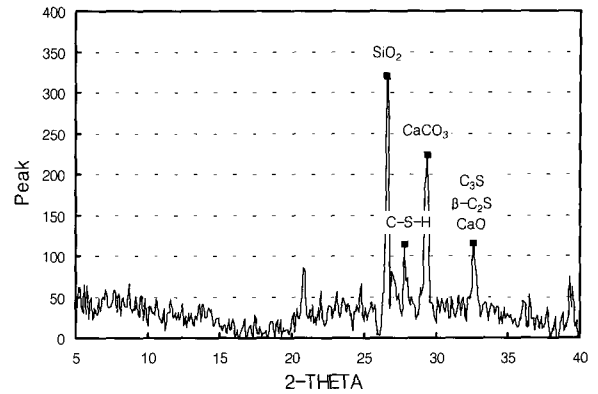


b) RC650-100-60(중앙부)

그림 19. 재생시멘트 모르터의 X선 회절(촉진 중성화 1주)

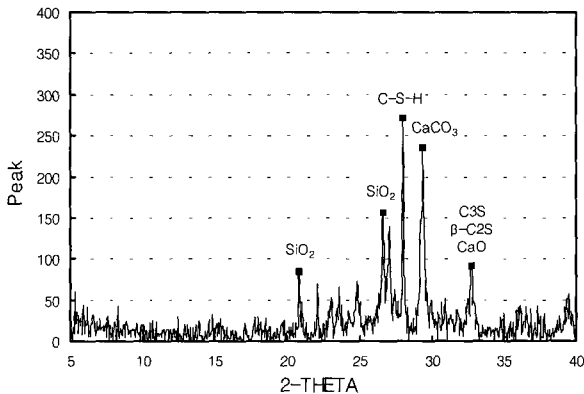


a) RC650-100-60(중양부)

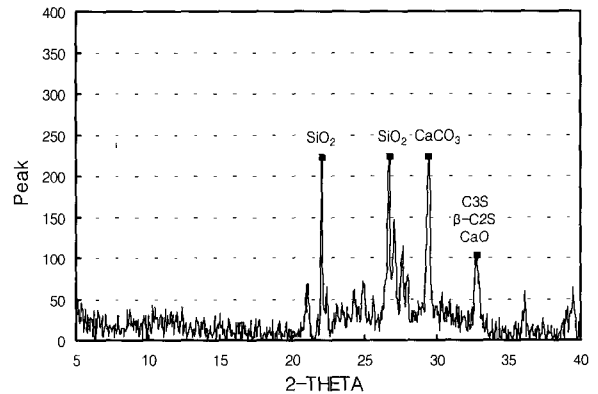


b) RC650-100-60(외측부)

그림 20. 재생시멘트 모르터의 X선 회절(촉진 중성화 2주)



a) RC650-100-50(표면부)



b) RC650-100-60(표면부)

그림 21. 재생시멘트 모르터의 X선 회절(촉진 중성화 8주)

4. 결 론

재생시멘트의 중성화 및 내구성에 관한 연구는 재생시멘트의 구조재료에의 적용 및 구조물의 수명예측의 측면뿐만 아니라, 보통시멘트와는 다른 수화온도로 생성된 재생시멘트 내부의 각 화합물의 수화메커니즘 및 생성된 수화물의 제반 물성의 분석측면에서도 필수적인 연구이다.

본 연구에서는 재생시멘트를 치환한 모르터의 중성화 저항 성능 및 이에 수반한 제반 화학적 특성을 실험을 통해 고찰하고자 하였으며, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 재생시멘트는 페콘크리트의 중성화와 내부 잔골재 미분말의 혼입에 따른 영향으로 보통시멘트에 비하여 다소 알칼리성이 약한 것으로 나타났으며, 이에 따라 재생시멘트를 치환함에 따라 중성화 진행속도가 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 재생시멘트 모르터의 pH측정 결과, 재령 28일에서는 pH12의 안정된 값을 나타내었으나, 잔골재 미분말로 인한 실제 물결합재비의 증가로 인하여 촉진재령이 증가함에 따라 pH는 크게 감소하는 것으로 나타났다.

- 3) 재생시멘트 모르터의 경우에서도 물결합재비가 감소함에 따라 재생시멘트 수화물 조직이 치밀해져 상대적인 중성화 저항성능이 우수한 것으로 나타났다.

- 4) 열분석과 X선 회절분석을 통하여 재생시멘트 수화물 내부의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 CaCO_3 의 양을 정량화한 결과, 모재 콘크리트의 중성화 영향으로 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 는 극히 미량 존재하는 것으로 나타났으며, 이에 반해 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 탄산화로 인한 칼사이트(CaCO_3)는 다량 함유된 것으로 나타났다.

이상과 같은 연구결과, 재생시멘트 모르터는 재생시멘트 내부의 잔골재 미분의 다량 혼입으로 인하여 상대적인 물결합재비가 크게 증가하였으며, 이 결과 내부 미세공극의 증가 및 이산화탄소의 침투로 인하여 중성화 저항성이 낮은 것으로 판단된다. 이러한 결과와 기존 연구에서의 재생시멘트 강도특성을 토대로 고찰할 때, 재생시멘트 내부의 잔골재 성분 제거 및 모재내부 중성화 성분의 활성화가 재생시멘트의 강도와 내구성의 품질관리에 있어 가장 중요한 연구과제인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 吳相均·安宰徹 外, セメントモルタルの加熱粉碎による再生セメントへの再利用, 日本建築學會大會學術講演便概集, 2002年8月, pp.993-994
2. 오상균, 폐콘크리트 미분말을 이용한 재생시멘트의 수화성 회복에 관한 연구, 대한건축학회논문집(구조계) 18권 10호, 2002.10, pp.53-60
3. 안재철 외, 폐콘크리트계 미분말의 소성조건에 따른 재생시멘트의 물성, 대한건축학회논문집(구조계) 19권,11호, 2003.11. pp.109-116
4. 안재철, 중성화가 진행된 폐콘크리트계 미분말의 재생시멘트 활용을 위한 수화성 회복, 대한건축학회논문집(구조계) 20권 11호, 2004.11. pp.91-98
5. 안재철 외, 실제 폐콘크리트 부산 미분말을 이용한 재생시멘트의 수화특성, 대한건축학회논문집(구조계) 21권 9호, 2005. 09, pp.121-128
6. JIS A 1153 「コンクリートの促進中性化試験方法」
7. 김무한 외, "침투성 알칼리성부여제의 개요와 활용기술", 콘크리트 학회지 vol.8 no.5, 1996. 10., pp.54
8. 김무한, 건설폐기물 및 재생골재 콘크리트, 콘크리트학회지, 제10권 6호, 1998. 12, pp.52-60.
9. 김효구 외, 폐콘크리트의 품질이 재생골재 및 재생모르터의 특성에 미치는 영향, 대한건축학회 학술발표논문집, 제18권 제2호, 1998. 10, pp.551-556.
10. 오상균 외, 재생골재 콘크리트의 내구성에 미치는 미세분말의 영향, 대한건축학회 학술발표논문집, 제16권 제1호, 1996. 4, pp.563-566.
11. 윤재환, 포틀랜드 시멘트 및 콘크리트, 세진사, 1990.
12. 한국표준협회, KS(한국산업규격).
13. 小林一輔, 콘크리트 구조물의 조기열화 내구성진단, 일광, 1996
14. 小林一輔, 코어 채취 열화 진단법, 하남출판사, 1999
15. 原田 有, 建築耐火構法, 工業調査會, 1973.
16. F.Tomosawa and T.Noguchi, Towards completely recyclable concrete ; Concrete Technology the century of environment, Proceeding of internation workshop Hakodate, Intergrated design and environment issues in concrete technology, E&FN SPON, 1996
17. S.L Sarkar and D.N. Little, Microstructural Investigation of Severe Distress in a Crushed Concrete Base, Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 3, pp. 401 410, 1998
18. Buck, A.D., Recycled Concrete as a Source of Aggregate, ACI Journal, Vol. 74, No.5, 1977, pp.212-219.
19. Geradu, J.K.A., and Hendriks, C.F., Recycling of road pavement materials in the Netherlands, Rijkswaterstaat Communication No. 38, the Hague, 1985.
20. Hansen, T.C., Recycling of Demolished Concrete and Masonry, RILEM Report6, E&FN SPON, 1992.
21. Hasaba, S., Kawamura, M., Toriik, K., Drying Shrinkage and Durability of Concrete Aggregate, Translation of the Japan Concrete Institute, No. 3, 1981, pp.55-60.
22. Itoh, T. and Frondistou-Yannas,S., Ec-onomic Feasibility of Concrete Recycling, Asce Journal of the Structural Division, Vol.103, April, 1977.
23. Proposed Standard for the Use of Recycled Aggregate Concrete, Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste, 1977.
24. W. H. Taylor, Concrete technology and Practice, McGraw-Hill Book Company.