廢콘크리트系 微粉末의 燒成條件에따른 水化性 回復

Recovering Hydration Performance of Cementitious Powder by Concret Waste according to Burning Temperature

강 태 훈* 정 민 수** 안 재 철*** 강 병 희****
Kang, Tae-Hun Jung, Min-Soo Ahn, Jae-Cheol Kang, Byeung-He

Abstract

The purpose of this study is the development of a recycling process to recover the hydrated ability of cement hydrate which accounts for a large proportion of cementitious powder by concrete waste in order to recycle cementitious powder by concrete waste as recycle cement. Therefore, after having theoretical consideration based on the properties of high-heated concrete, we consider the properties of hydration of cementitious powder in hardened mortar under various temperature conditions.

As a result of experiment, it is revealed that an effective development of recycling cement is possible since the cementitious powder by concrete waste recovers a hydraulic property during burning at 600℃ or 700℃. And it is shown that the fluidity of mortar decreases rapidly as the burning temperature of recycle cement increases. however, the improved effect of fluidity is predominant if adding the additive such as fly-ash or blast furnace slag.

키워드 : 완전순환형 콘크리트, 폐콘크리트계 미분말, 재생시멘트, 수화성
Keywords : completely recyclable concrete, cementitious powder by concrete waste, recycle cement, hydrated ability

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근의 건축물량 증가와 재건축 활성화로 인하여 년간 2,000만톤 이상의 건설폐기물이 발생하고 있으며, 이중 약 50% 이상을 폐콘크리트가 차지하고 있다. 따라서 건설폐기물에 의한 환경문제와 부존자원의 부족 문제, 그리고 폐기물 처리비용 및 야적지 부족 문제 등 많은 사회·경제적 문제가 대두되고 있다.

이러한 배경에 의하여 최근 국내외를 중심으로 콘크리트를 재활용하기 위한 많은 연구[1), 2)]가 진행되고 있으며, 국내에서도 폐콘크리트를 이용한 재생골재가 실용화 단계에 있다.

그러나 폐콘크리트의 20% 이상을 차지하는 콘크리트계 미분말(0.15㎜)의 재활용에 관한 연구는 전무한 실정이다. 또한, 일본 등을 중심으로 폐콘크리트의 재생시 시멘트의 원료로 활용 가능한 석회석을 골재로 이용한 재생 시멘트에 관한 연구가 일부 진행되고 있으나, 국내의 경우에는 일본에 비해 석회석 자원의 부족과 수화성 회복을 위해 요구되는 1,400℃ 이상의 소성온도로 인한 경제적 문제, 탈탄산반응으로 인한 온실가스 증가문제로 인하여 기술적용에 어려움이 있다.

* 정회원, 동아대 대학원 석사과정
** 정회원, 동아대 대학원 박사과정
*** 정회원, 동아대 건설기술연구소 특별연구원, 공학박사
**** 정회원, 동아대 건축학부 교수, 공학박사

따라서, 본 연구는 완전 순환형 콘크리트 개발을 목적으로, 콘크리트계 미분말을 재생시멘트로서 재활용하기 위한 기술개발을 목적으로 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 폐콘크리트계 미분말을 재생시멘트로 재활용하기 위하여 미분말내 많은 비율을 차지하고 있는 시멘트 수화물의 수화성 회복을 위한 재생 프로세스의 개발을 목적으로 한다. 따라서, 콘크리트의 열적특성을 토대로 이론적 고찰을 행한 후, 모르터 단계의 실험을 통하여 경화 모르터내 콘크리트계 미분말을 대상으로 다양한 소성조건하에서의 수화반응 특성을 고찰하였다. 그리고 각 배합조건에서의 재생시멘트 모르터의 유동특성과 강도성상을 고찰하여, 완전 순환형 콘크리트의 연구 및 개발을 위한 기초자료를 제안하는 것을 본 연구의 범위로 한다.

2. 이론적 고찰

콘크리트는 표 1과 같이 일반적으로 열을 받을 경우, 변태적인 열반응으로 인한 분해반응을 일으키게 된다. 이와 같은 현상이 저온에서는 주로 탈수와 수분증발에서 비롯되나, 고온에서는 구성요소의 변태나 분해를 일으키게 한다.

열을 받는 콘크리트의 반응을 시차열분석(DSC-TG)에 의해

나타내면 그림 1과 같으며, 기존 연구[3]에서는 온도 400~600℃ 범위에서 콘크리트 중 Ca(OH)2가 CaO와 H2O로 분해되는 것으로 보고 있다.

표 1. 가열 콘크리트의 각 온도별 특성변화

Classification / Heating / Temperature(℃)	DSC-TG	Characteristic variation
Room ~ 100	·수분증발.	·흡착수, 겔수, 모세관수 등 증발가능 한 자유수의 증발 ·화학적으로 안정
100 ~ 400	·겔 및 시멘트 수화물의 붕괴	·Al2O3,Fe2O3 및 Tobermoriter 계의 수화물 탈수 ·(CaO)3SiO2.CaSO4.nH2O → (CaO)3SiO4+nH20 ↑
400 ~ 600	·481.7℃에서 수산화칼슘의 분해(흡열반응)	·Ca(OH)2의 분해 Ca(OH)2→ CaO+H2O ↑
600 ~ 900	·760.3℃에서탈탄산반응 ·중량변화는거의없음	·CaCO3의 분해 CaCO3 → CaO+CO2 ↑

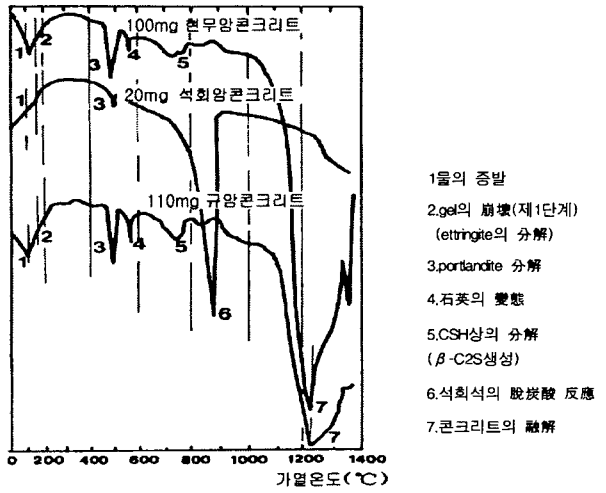

그림 1. 각종 콘크리트의 시차열분석

3. 실 험

3.1 실험인자 및 수준

본 연구의 실험인자 및 수준은 표 2와 같다. 콘크리트계 미분말은 콘크리트의 모르터 부분에서 발생되므로 S/M=45%, W/C=60%의 모르터를 분쇄하여 이용하였으며,

모르터를 구성하고 있는 페이스트와 잔골재 부분의 효율적인 분리를 위하여 예비가열 처리를 하였다.

콘크리트계 미분말의 수화성 회복을 위한 소성온도는 콘크리트의 열적성질과 기존의 연구[2]를 토대로 600℃, 700℃, 800℃의 3수준으로 하였으며, 소성시간을 60분, 90분, 120분으로 달리 하여 재생시멘트 제조를 위한 최적조건을 도출하고자 하였다. 또한, 재생시멘트 모르터의 혼화재 치환에 따른 영향을 고찰하기 위하여 고로슬래그와 플라이애쉬를 분체로 이용하였다.

표 2. 실험인자 및 수준

母材 모르터 (OM)	재생시멘트의 제조					재생시멘트 모르터		
	예비 가열	소성 온도 (℃)	소성 시간 (min)	냉각 방법	이수 석고 (%)	분체	고성능 감수제 (%)	배합
S/M 45% W/C 60%	200℃ 120분	600 700 800	60 90 120	상온 냉각	4	RC FA20% FA40% BS20% BS40%	1	RM 배합은 OM 배합과 동일
1	1	3	3	1	1	5	1	45

3.2 배합설계

재생시멘트의 모재인 모르터의 배합은 표 3과 같다.

표 3. 모재 모르터의 배합

조 건	기호	W/C (%)	S/M (%)	단위용적중량 (g/ℓ)		
				W	C	S
母材모르터	OM	60	45	360	600	1152

3.3 사용재료

본 실험에서 사용한 각 재료의 물성은 표 4와 같다.

표 4. 사용재료의 물성

사 용 재 료	물 성	기호
보통포틀랜드시멘트	비중: 3.15 비표면적(blaine) : 3,200(cm2/g)	OP
고로슬래그 (광양산)	비중: 2.92 비표면적(blaine) : 4,400(cm2/g)	BS
플라이애쉬 (보령산)	비중: 2.21 비표면적(blaine) : 3,400(cm2/g)	FA
고성능AE감수제	폴리카르본산계 SP-8K 비중: 1.07	SP
잔골재	하동산 강모래 표건비중:2.56 절건비중:2.51 흡수율 : 2.29% F.M : 2.48	S

3.4 실험방법 및 측정

1) 재생시멘트 및 재생시멘트 모르터의 제조

재생시멘트 및 재생시멘트 모르터의 제조과정은 그림 2, 3과 같다.

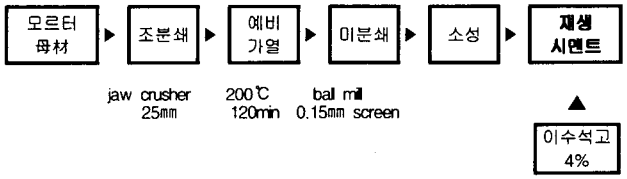

그림 2. 재생시멘트의 제조

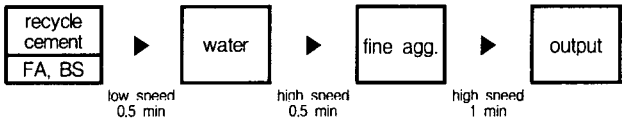

그림 3. 재생시멘트 모르터의 배합

2) 측정

본 연구를 위한 실험항목은 표 5와 같다.

표 5. 실험 항목

측 정 항 목	비 고
화학분석	KS L 5201
플로우시험	KS L 5111
압축강도시험	KS L 5105
재생시멘트 경화체의 미시구조	SEM(주사형 전자 현미경)

4. 실험결과 및 고찰

4.1 재생 시멘트의 화학성분 및 비중

표 6은 재생시멘트의 화학성분으로, 재생시멘트의 원료인 미세분말은 주로 시멘트 성분으로부터 나오기 때문에 CaO와 SiO2가 주성분인 것으로 나타났으나, CaO의 량이 크게 감소하여 보통 포틀랜드시멘트와는 다른 수화반응특성을 나타낼 것으로 판단된다.

그리고, 보통 포틀랜드시멘트에 비하여 강열감량 비율은 높게 나타났으나, 시멘트 수화에 의해 증가된 가공전 단계의 강열감량에 비하여 크게 낮아진 것으로 나타났다.

소성조건에 따른 비중은 그림 4와 같으며, 소성온도와 시간에 비례해서 비중은 증가하는 것으로 나타났다.

표 6. 재생 시멘트의 화학 성분

	ig. loss	CaO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	SO3
OPC	1.0	62.0	21.3	5.4	3.5	3.3	1.64
가공전	11.2	30.0	40.3	9.02	2.83	1.6	0.7
RM600T120	2.3	30.2	47.5	9.27	2.93	1.7	0.9
RM700T120	4.9	32.7	42.2	9.52	3.03	1.8	0.8
RM800T120	5.8	30.4	43.4	9.02	2.66	1.7	0.7

표 7. 재생시멘트의 소성조건에 따른 비중

	가공전	RM600T60	RM600T90	RM600T120	RM700T60	RM700T90	RM700T120	RM800T60	RM800T90	RM800T120
비중	2.38	2.57	2.68	2.79	2.58	2.71	2.77	2.6	2.72	2.82

표 8. 재생시멘트 모르터 실험결과

온도 (℃)	시간 (min)	치환률 (%)	재생시멘트 비중	플로우 (%)	압축강도 (kgf/cm2) 7일 (kgf/cm2)	28일 (kgf/cm2)
600	60	0	2.57	280	33	56
		BS20	-	310	24	46
		BS40	-	360	6	16
		FA20	-	310	22	47
		FA40	-	320	14	31
	90	0	2.68	295	36	60
		BS20	-	325	30	43
		BS40	-	330	8	21
		FA20	-	305	35	49
		FA40	-	310	16	40
	120	0	2.79	260	44	56
		BS20	-	300	36	83
		BS40	-	340	11	37
		FA20	-	255	32	54
		FA40	-	310	20	37
700	60	0	2.58	275	48	61
		BS20	-	310	30	66
		BS40	-	330	12	36
		FA20	-	300	44	56
		FA40	-	300	19	45
	90	0	2.71	240	43	79
		BS20	-	320	33	80
		BS40	-	330	12	38
		FA20	-	290	34	61
		FA40	-	330	18	45
	120	0	2.77	215	45	79
		BS20	-	300	26	80
		BS40	-	340	3	40
		FA20	-	280	33	74
		FA40	-	305	20	53
800	60	0	2.6	245	21	67
		BS20	-	290	2	59
		BS40	-	320	1	16
		FA20	-	290	16	61
		FA40	-	310	3	34
	90	0	2.72	225	11	52
		BS20	-	285	1	33
		BS40	-	310	2	3
		FA20	-	265	5	38
		FA40	-	275	1	13
	120	0	2.82	140	4	53
		BS20	-	235	2	9
		BS40	-	290	2	3
		FA20	-	190	0	26
		FA40	-	245	0	4

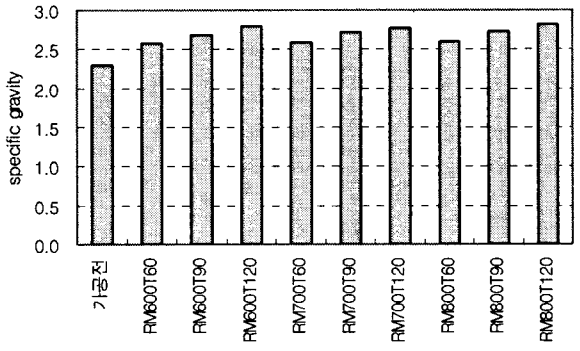

그림 4. 재생시멘트의 소성조건에 따른 비중

4.2 재생시멘트 모르터의 물성

재생시멘트의 소성조건과 배합에 따른 모르터의 물성실험 결과는 표 8과 같다.

1) 재생시멘트 모르터의 플로우

그림 5는 재생시멘트의 소성조건에 따른 재생시멘트 모르터의 플로우를 나타낸 것이며, 그림 6, 7, 8은 혼화재 첨가에 따른 재생시멘트 모르터의 유동성을 나타낸 것이다. 기존 연구와 예비실험 결과 재생시멘트를 이용한 모르터의 유동성이 다소 불량한 것으로 나타나, 본 연구에서는 재생시멘트 모르터에 고성능 감수제를 분체기준 1% 혼합하여 사용하였다.

(1) 소성조건에 따른 재생시멘트 모르터의 플로우

그림 5와 같이 재생시멘트 모르터의 플로우는 소성조건에 따라 큰 차이를 나타내었다. 소성온도 600℃의 경우 진동조건하에서의 플로우는 평균 278%로 나타났으나, 소성온도가 증가할수록 유동성은 급격히 떨어지는 것으로 나타났다. 특히, 소성온도 800℃ 소성시간 120분의 경우 배합이 불가능할 정도의 급결현상을 나타내었다.

따라서, 재생시멘트를 이용한 모르터는 고성능 감수제를 첨가하였음에도 불구하고 유동성이 나쁜 것으로 나타났다. 이는 혼화제를 혼합하지 않은 동일한 배합의 모재모르터의 플로우가 평균 330%인데 비하여 크게 낮은 결과이며, 향후 재생시멘트의 물성에 따른 레올로지 특성에 관한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

(2) 분체 종류에 따른 재생시멘트 모르터의 플로우

그림 6, 7, 8은 각 소성온도 조건에서 혼화재 치환율에 따른 플로우를 나타낸 것이다.

실험결과, 플라이애쉬와 고로슬래그는 보통콘크리트에 사용한 경우와 마찬가지로 재생시멘트를 이용한 모르터의 유동성 개선에도 큰 효과가 있는 것으로 나타났다.

고로슬래그의 경우 치환율 20% 증가에 따라 평균 16%의 플로우 증가효과를 나타내었으며, 플라이애쉬의 경우 평균 14% 플로우가 증가하였다. 특히, 무진동에 의한 플로우 실험결과에 의하면 고로슬래그를 40% 치환한 경우, 혼화재를 치환하지 않은 경우에 비하여 106% 플로우가 증가하여 재생시멘트 모르터의 유동성을 크게 개선하는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 구형입자 등에 따른 물리적 기능이 혼화재의 유동성 개선효과의 원인이기 때문인 것으로 판단된다.

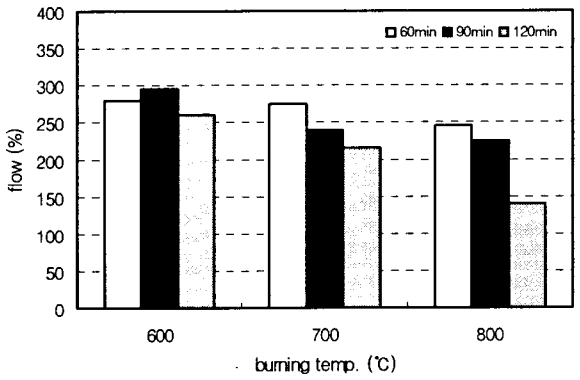

그림 5. 재생시멘트의 소성조건에 따른 모르터의 플로우

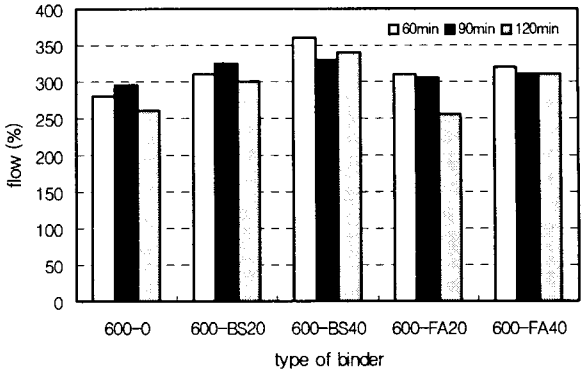

그림 6. 분체종류에 따른 모르터의 플로우(RM600)

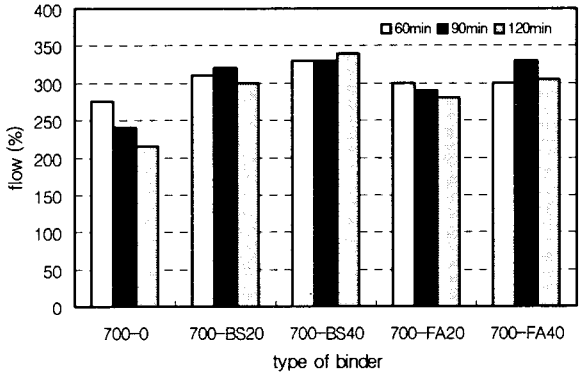

그림 7. 분체종류에 따른 모르터의 플로우(RM700)

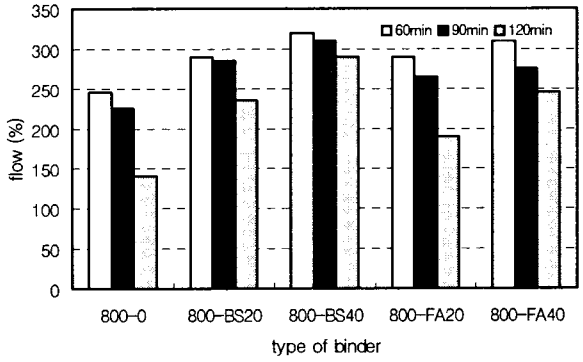

그림 8. 분체종류에 따른 모르터의 플로우(RM800)

2) 재생시멘트 모르터의 압축강도

그림 9는 재생시멘트의 소성조건에 따른 재생시멘트 모르터의 압축강도를 나타낸 것이며, 그림 10, 11, 12는 재생시멘트 모르터의 혼화재 첨가에 따른 압축강도의 영향을 나타낸 것이다.

(1) 소성조건에 따른 압축강도

그림 9는 재생시멘트를 이용한 모르터의 재령 28일 압축강도를 나타낸 것으로, 소성온도 600℃의 경우, 평균 57kgf/㎠, 700℃ 평균 73kgf/㎠, 800℃ 평균 57kgf/㎠로 나타나, 콘크리트계 미분말은 600℃, 700℃, 800℃ 소성시 수화성을 회복하

는 것으로 나타났다. 특히 소성조건 700℃의 경우, 평균 압축강도가 73kgf/㎠으로서 가장 높았으며, 재령7일, 28일 모두 소성시간에 관계없이 균일한 강도를 나타내어 재생시멘트의 수경성 회복에 있어 최적 조건으로 판단된다. 그러나, 소성온도 600℃의 경우, 이론적으로는 Ca(OH)2가 CaO로 분해되는 온도인 500℃ 이상인 조건이었으나, 재령 7일인 경우 소성시간에 따른 강도편차가 크고, 28일 강도가 낮아 품질관리에 있어 문제가 있을 것으로 판단된다.

실험결과, 재생시멘트는 재령 28일을 기준으로 보통 포틀랜드 시멘트에 비하여 강도가 낮은 것으로 나타났으며, 이는 모재모르터와 재생모르터의 높은 물시멘트비와 모재 모르터에 45% 가량 혼합된 잔골재 중 일부가 재생시멘트에 혼합되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

특히, 기존 연구에 따르면 재생시멘트의 제조시 모재모르터 내 잔골재가 완전히 제거된다면, 200kgf/㎠ 이상의 강도발현도 가능한 것으로 판단된다. 따라서, 향후 재활용이 가능한 완전 순환형 콘크리트의 개발을 위해서는 콘크리트계 미분말 내 잔골재 미분말의 혼입율을 감소시키는 기술의 개발이 필수적이다.

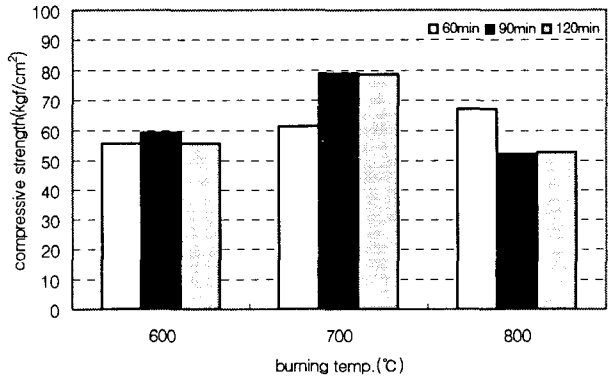

그림 9. 재생시멘트의 소성조건에 따른 모르터의 압축강도

(2) 분체종류에 따른 압축강도

그림 10, 11, 12는 분체 종류에 따른 재생시멘트 모르터의 압축강도를 나타낸 것이다.

실험결과, 소성온도 600℃, 700℃인 경우, 혼화재 20% 치환시의 평균 압축강도는 혼화재를 사용하지 않은 재생시멘트 모르터에 비하여 비슷하거나 우수한 것으로 나타났다.

특히, 소성조건 600℃ 120분, BS 20% 치환시 치환하지 않은 경우에 비하여 46% 증가하는 것으로 나타나, 유동성과 강도 측면에서 가장 우수한 것으로 판단된다.

그러나, 600℃, 700℃ 모든 조건에서 혼화재를 40% 치환시, BS의 경우 49%, FA의 경우 약 36% 가량 강도가 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 800℃의 경우에는 거의 강도발현을 하지 않았다.

이상과 같은 실험결과, 혼화재를 치환한 재생시멘트 모르터의 강도성상은 우수한 것으로 나타났으며, 소성온도 700℃의 경우는 거의 오차가 나타나지 않는 균일한 압축강도를 발현하여 재생시멘트의 제조를 위한 최적조건으로 사료된다. 그러나, 고로슬래그, 플라이애쉬와 같이 포졸란 반응 또는 잠재수경성에 의한 화학반응기구를 갖는 혼화재의 경우, 콘크리트 장기강도 증진에 유효한 작용을 하기 때문에 향후 91일 강도를 비롯한 장기재령하에서의 강도발현 성상을 고찰해야 할 것으로 보인다.

또한, 재생시멘트의 경우 보통포틀랜드 시멘트와 화학적 성분이 크게 상이하므로, 혼화재료를 이용한 고성능화된 재생시멘트 및 콘크리트 기술의 유효개발을 위해서는 재생시멘트 수화물 내 Ca(OH)2 등의 량을 고려하여 구성 혼화재의 전량을 활성화할 수 있는 최적 치환율과 배합설계에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

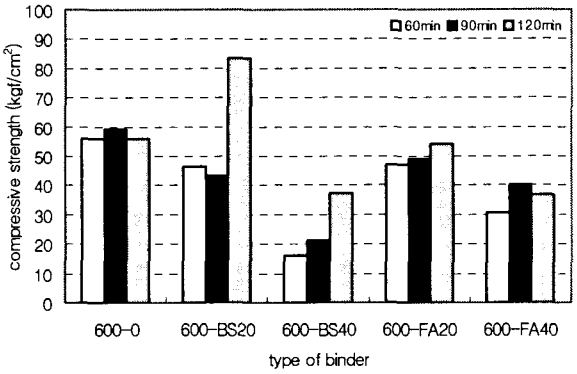

그림 10. 분체의 종류에 따른 재생시멘트 모르터의 압축강도 (RM600)

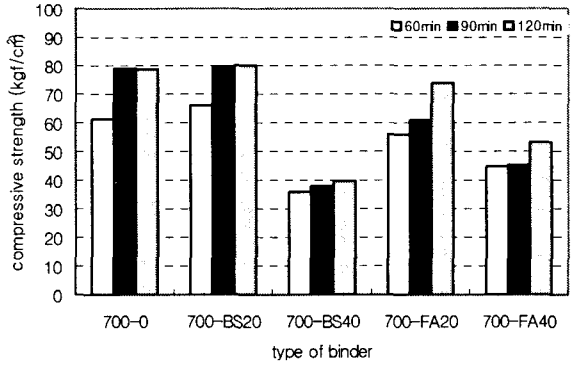

그림 11. 분체의 종류에 따른 재생시멘트 모르터의 압축강도 (RM700)

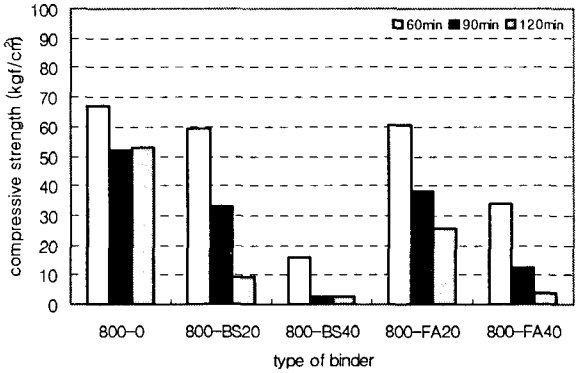

그림 12. 분체의 종류에 따른 재생시멘트 모르터의 압축강도 (RM800)

(3) 재령에 따른 압축강도

재령에 따른 압축강도는 그림 13, 14와 같다.

재생시멘트의 경우 7일 강도가 28일 강도의 약 55~60% 발현하는 것으로 나타났으며, 이는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우 일반적으로 65% 이상 강도발현을 하는 것과 비교할 때 다소 낮은 값이다.

재생시멘트에 혼화재를 치환한 경우는 강도발현이 우수한 700℃ 소성조건을 비교할 때, FA와 BS 20% 치환시 재생시멘트만을 사용한 경우에 비하여 7일 강도는 각각 34%, 24% 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 28일 강도의 경우 혼화재를 치환하지 않은 경우와 거의 비슷한 것으로 나타났으며, BS를 치환한 경우는 오히려 2% 가량 강도가 증가하였다.

이러한 결과는 혼화재를 치환한 경우 초기강도 발현은 늦으나, 장기강도에서 우수한 강도성상을 나타내는 것으로, 재생시멘트의 화학성분은 다소 상이하나 보통포틀랜드 시멘트와 유사한 물성을 나타내었다.

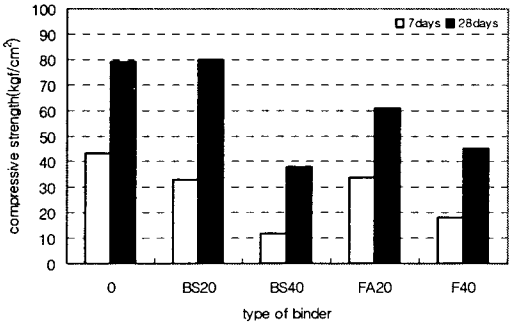

그림 13. 재령에 따른 재생시멘트 모르터의 압축강도 (RM700T90)

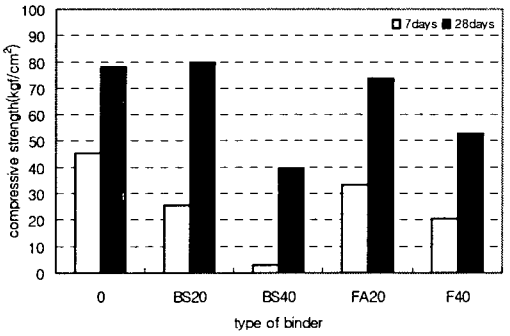

그림 14. 재령에 따른 재생시멘트 모르터의 압축강도 (RM700T120)

3) 재생시멘트의 SEM

그림 15는 재생시멘트와 재령 7일, 28일의 재생시멘트 모르터 경화체의 미시구조를 주사형전자현미경(SEM)으로 관찰한 것이다.

사진 a)는 재생시멘트 분말을 나타낸 것으로서 골재계면의 분리가 용이하지 않아 많은 량의 잔골재 미분말이 혼입되어 있었다. 사진 c)는 재령 7일의 재생시멘트 수화조직으로 수산화칼슘으로 추정되는 육각판상(六角板狀)의 조직의 모습이다. 그러나, 이러한 수산화칼슘이 소성가공 전 모재 모르터 내 존재한 것인지, 재생시멘트의 수화과정 속에서 생성된 것인지는 추후 연구가 필요하다.

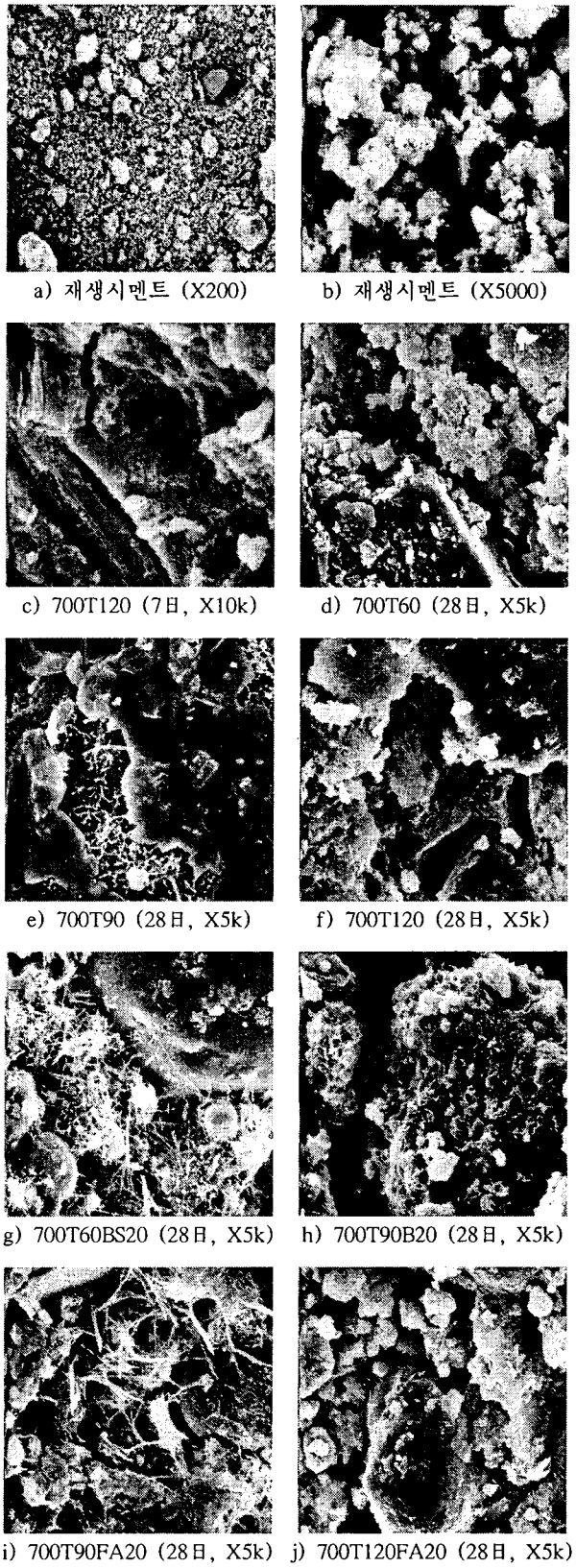

그림 15. 재생시멘트 경화체의 미시구조

사진 e), g)와 h) 등의 경우, 재령 28일의 재생시멘트 수화조직내 에트링가이트와 같은 침상조직으로 재생시멘트의 높은 압축강도를 감안할 때, 경화체내 많은 조직에서 활발한 수화반응이 나타남을 알 수 있다.

그러나, 재생시멘트는 보통포틀랜드 시멘트와 상이한 화학성분을 가지고 있고, 아직 그 수화조직에 관한 연구가 이루어져 있지 않기 때문에 수화시 미시구조에 관한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

폐 콘크리트계 미분말의 재생시멘트 활용방안에 관한 기초적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 재생시멘트의 화학분석 결과 CaO와 SiO2가 주성분인 것으로 나타났으나, 보통시멘트에 비하여 CaO의 량이 크게 감소한 것으로 나타났다.

2) 재생시멘트의 소성온도가 증가할수록 모르터의 유동성은 급격히 떨어지는 것으로 나타났으나, 혼화재료를 첨가할 경우 유동성 개선효과가 우수하였다.

3) 콘크리트계 미분말은 600℃, 700℃ 소성시 수경성을 회복하는 것으로 나타났으며, 700℃ 120분이 가장 우수하였다. 또한, 모재인 폐콘크리트 중 잔골재 미분말의 효율적인 분리를 통해서 재생시멘트의 품질관리가 가능할 것으로 판단된다.

4) 고로슬래그와 플라이애쉬를 치환한 결과, 초기재령에서의 강도 발현율은 낮았으나, 장기강도는 매우 우수한 것으로 나타났으며, 이는 보통포틀랜드 시멘트에 적용한 경우와 유사한 수화반응을 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

이상과 같은 연구결과, 콘크리트계 미분말의 재가공을 통하여 재생시멘트로서의 활용이 가능한 것으로 나타났다. 그러나, 보통시멘트와 수화반응 특성에 있어 많은 차이가 있으므로, 향후 관련연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 吳相均·安宰徹 外, 韓國での建設廢棄物の發生量とリサイクルに關する考察, 日本建築學會大會學術講演便概集, 2002年8月, pp.991-992
2. 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
3. 강병희, 초음파에 의한 고온수열콘크리트의 강도추정에 관한 실험적 연구, 한양대학교 박사학위논문, 1989, pp.8-10
4. 박승범, 건설폐기물의 국내외 재활용기술의 현황 그리고 처리 및 재활용 실태, 콘크리트학회, 2000. pp.46-53
5. 김광우 외 3명, 콘크리트 재활용 실태 및 연구동향, 콘크리트학회지, 6권 6호, 1994. 12. pp.51-65
6. 태순호, 고온에 노출된 콘크리트 미세조직의 특성, 한국화재·소방학회지 Vol. 12 NO.4 1998. 12. pp.31-40