혼화재료에 의한 재생시멘트의 레올로지 및 강도특성 개선

Rheology and Strength Properties Improvement of Recycle Cement by Admixture

○ 오 상 균* 임 승 준** 김 정 길***
Oh, Sang-Gyun Im, Seung-Jun Kim, Jung-Kil

Abstract

Recently, the study to reduce and recycle industrial waste is underway vigorously in the various fields of industry according to the conservation of environment and resources. In construction work, the disposal problem of its waste and environmental disruption have already been serious all over the world. However the recycle of waste concrete is still at an early stage, recycled aggregate from waste concrete have only used those as subsidiary road fillers. The research institute and the company make the study that it is about the properties of recycled aggregate and those structural capacity since 1990. Through the experimentation last year, we know that strength and fluidity of recycle cement are inferior to normal cement, and admixing aggregate powder deteriorates its strength.

The purpose of this study is to search for appropriate heating time and to improve performance of the recycle cement while heating hardened cement which is crushed, we investigate separating aggregate from hardened cement by preheating and improvement of strength and fluidity in recycle cement which contains admixture.

키워드 : 재생시멘트, 폐콘크리트, 압축강도, 응결, 레올로지 특성
Keywords : Recycle cement, Waste concrete, Compressive strength, Setting, Rheological properties

1. 서 론

최근, 환경보전과 자원고갈 등의 문제로 각 산업분야에서는 산업폐기물을 감량하고 재활용하려는 노력이 활발히 진행되고 있다. 건설업에 있어서도 건축물의 폐기시 발생되는 폐건설자재의 처리문제, 환경파괴문제는 국내 뿐 아니라 전 세계적으로 이미 심각한 상태에 와 있다.

국내의 경우, 건설폐기물 가운데 약 66%는 폐콘크리트가 차지하고 있으며, 향후 건설폐기물의 발생량 예측에 의하면 2005년도에 14,953천톤의 폐콘크리트가 발생되고, 2020에는 이보다 6.8배가 많은 101,293천톤의 폐콘크리트가 발생할 것으로 예상하고 있다.[1] 그러나 국내에서의 폐콘크리트 재활용은 아직 초기단계이며, 폐콘크리트에서 재생된 골재를 도로 보조 기층재 등으로 사용하고 있다. 연구소와 기업체 등에서도 1990년대 중반부터 재생골재의 물성에 관한 연구와 재생골재를 사용한 콘크리트의 구조적 성능 등에 관한 연구를 진행하고 있다.[2)-13)] 그러나 선진 여러 각국들은 몇 십년 전부터 건설폐기물 처리문제를 국가적인 연구과제로 다루어 왔으며 특히, 일본, 독일, 네덜란드, 프랑스, 미국 등에서 연구가 활발히 진행되고 있다.[14)-17)]

이에 저자 등도 재생콘크리트 개발이라는 목표 아래 2000년부터 골재는 물론 시멘트 경화체 부분까지의 재생을 목적으로 분쇄한 시멘트 경화체와 골재 미분을 포함한 폐콘크리트 미분말의 수화성 회복 가능성을 실험[18)-21)]을 통하여 확인하고, 적정소성온도 등 재생시멘트의 대략적인 제조방법을 정립할 수 있었다. 폐콘크리트 미분말을 이용한 재생시멘트는 原시멘트에 비해 강도와 유동성이 저하되며, 그 정도는 原콘크리트의 배합과 제조방법에 영향을 받는다.

본 연구에서는 폐콘크리트 미분말을 이용한 재생시멘트의 레올로지와 강도발현 특성의 개선을 목적으로 소성시간과 방법에 초점을 맞추어 실험적으로 고찰함으로써 보다 합리적인 재생시멘트의 제조방법을 구축하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

본 실험에서 사용한 각 재료와 물리적인 특성은 표 1과 같다. 결합재로는 보통포틀랜드시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애쉬를 사용하였으며, 비표면적은 보통포틀랜드시멘트가 3,200㎠/g, 고로슬래그와 플라이애쉬는 각각 4,400㎠/g, 4,200㎠/g이다. 혼화제로는 폴리카르본산계 고성능AE감수제인 SP-8K를 소정의 플로우를 얻기 위해 적정량 사용하였고, 잔골재로는 하동산 육사를 사용하였다.

* 동의대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사
** 동의대학교 건축공학과 대학원
*** 동의대학교 건축공학과 교수, 공학박사

표 1. 사용재료의 물성 및 기호

사용재료	물 성	기호
보통포틀랜드 시멘트	비중: 3.15 비표면적(blaine): 3,200(㎠/g)	OP
고로슬래그 미분말 (광양산)	비중: 2.92 비표면적(blaine): 4,400(㎠/g)	BS
플라이애쉬 (삼천포화력발전소)	비중: 2.24 비표면적(blaine): 4,200(㎠/g)	FA
혼화제 (고성능AE감수제)	폴리카르본산계 SP-8K 비중: 1.07 ± 0.02	SP
잔골재 (하동산, 육사)	최대치수 : 5㎜ 표건비중: 2.59 절건비중: 2.56 흡수율: 1.17% F.M: 2.94	S

2.2 실험인자 및 배합

본 연구의 실험인자 및 수준은 표 2와 같고, (재생)페이스트 및 모르터 배합은 표 3과 같다. 原시멘트 페이스트(Original Paste)와 原모르터(Original Mortar) 및 재생페이스트와 재생모르터의 물결합재중량비는 60%로 1수준으로 하였고, 혼화재인 고로슬래그와 플라이애쉬를 시멘트 중량의 20, 40% 치환함으로써 각기 다른 유동특성과 강도 변화를 비교 고찰하였다. 잔골재 혼입율은 30%, 소성시간은 700℃에서 30, 60, 90분의 3수준이며, 예비소성(200℃, 180분)의 유무에 따라 2수준으로 구분하였다.

표 2. 실험인자 및 수준

실험인자	수준	기호
분체의 종류	1성분계 : OP 2성분계 : BS, FA	OP BS, FA
치환율 (%)	BS : 20, 40 FA : 20, 40	20, 40
잔골재혼입율 (%)	30	-
W/B(%)	60	
소성시간 (분)	30 60 90	T30 T60 T90
소성온도(℃)	700	-
예비소성의 유무 (200℃, 180분)	有 無	PH -

표 3의 기호에 있어서 Original은 보통포틀랜드시멘트에 물과 잔골재를 혼합한 原시멘트 페이스트(OP)와 모르터(OM)를 의미하고, Recycle은 1차 파쇄, 2차 미분쇄, 3차 소성화학처리한 재생시멘트에 물과 잔골재를 혼합한 재생페이스트(RP) 및 재생모르터(RM)를 의미한다. 그리고 PH는 예비소성의 유무를 나타낸다.

표 3. (재생) 페이스트 및 모르터 배합표

Sample	Symbol	W/B (%)	W (g)	S/M (%)	Unit Weight(g/ℓ)			
					C	BS	FA	S
Original	OP	60	654	-	1090	-	-	-
	OM		458	30	762	-	-	777
Recycle	RP	60	602	-	1003	-	-	-
	RPBS20				802	201	-	
	RPBS40				602	401	-	
	RPFA20				802	-	201	
	RPFA40				602	-	401	
	RMPH	60	421	30	703	-	-	777
	RMBS20PH				562	141	-	777
	RMBS40PH				422	281	-	777
	RMFA20PH				562	-	141	777
	RMFA40PH				422	-	281	777
	RM				703	-	-	777
	RMBS20				562	141	-	777
	RMFA20				562	-	141	777

2.3 실험 방법

본 연구의 실험항목으로는 페이스트 및 모르터의 플로우, 시멘트 응결시간, 페이스트의 레올로지 특성(소성점도 및 항복치), 7일, 28일, 91일의 압축강도 등이다. 각 시료별로 플로우시험은 KS L 5111, 응결시험은 KS L 5108, 압축강도시험은 KS L 5105에 의해 행하였으며, 레올로지 시험은 그림 1과 같은 내원통 회전점도계를 사용하여 유동곡선을 구하였다.

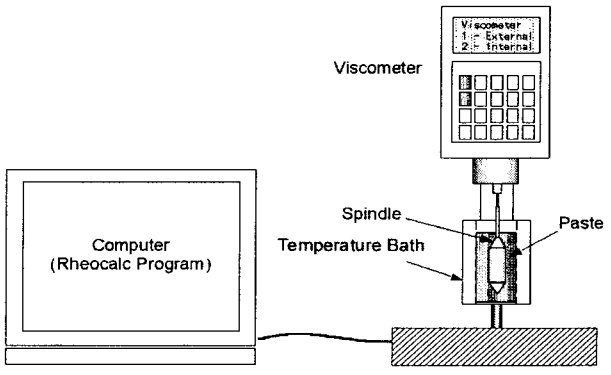

그림 2. 내원통 회전점도계

내원통 회전점도계를 이용한 측정방법은 회전속도를 15, 20, 25, 30 rpm순으로 변화시켜 가면서 각각의 속도에서 60초간 토오크(Torque)를 측정하고, 측정된 토오크(Torque)와 회전속도로부터 산출된 전단응력(Shear Stress)과 전단변형속도(Shear Rate)는 시멘트 페이스트를 빙함유체로 가정하여 회귀함으로써 레올로지 정수인 소성점도와 항복치를 산출하였다.

그림 2는 재생시멘트 제조과정을 나타낸다. 먼저, 原페이스트 및 原모르터를 제조하고 재생시멘트의 물성과 비교를 위해 플로우 시험과 레올로지 시험을 한 후 압축강도 시험을 위한 시험체를 제작하고 7일, 28일, 91일 경과 후 각각 압축강도 시험을 하였다. 그리고 이 시험체들을 조크러셔로 1차파쇄(최소 5㎜크기)를 한 후 200℃로 180분간 예비소성을 하고 볼밀 등을 이용하여 2차 미분쇄를 한 후 분급기 및 세퍼레이터를 통해 0.15㎜ 이하의 미분을 걸러 700℃에서 30, 60, 90분별로 전기로에 투입하여 소성처리하였다. 마지막으로 소성과정이 끝난 후 냉각시켜 이수석고를 적당량 첨가함으로써 재생시멘트(Recycle Cement)를 제조하였다. 또한, 이렇게 만들어진 재생시멘트를 사용하여 페이스트와 모르터를 제조하고 같은 조건과 방법으로 플로우 시험과 레올로지 시험, 압축강도 시험 등을 함으로써 原시멘트 페이스트 및 모르터와 재생시멘트 페이스트 및 모르터를 비교 분석하였다.

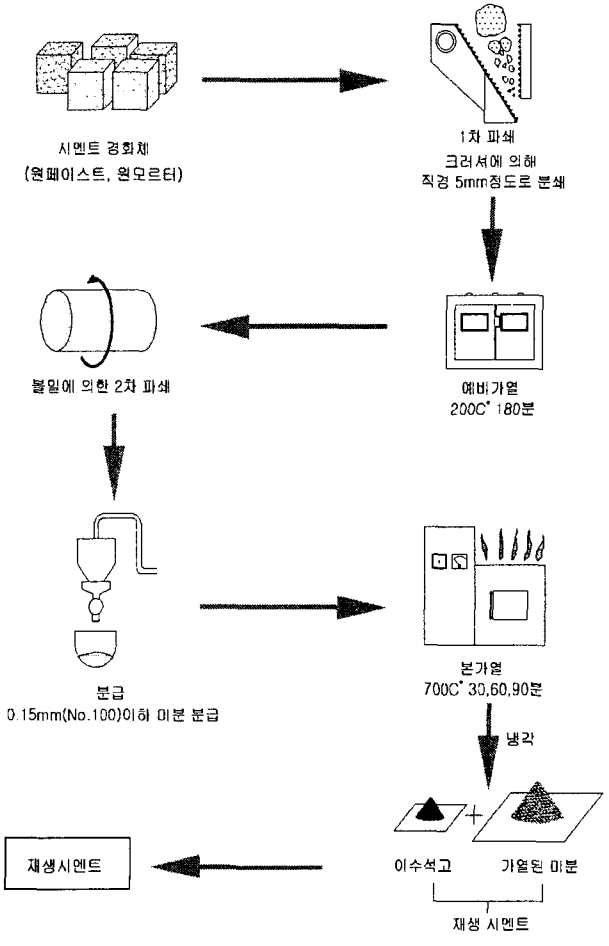

그림 2. 재생시멘트의 제조과정

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지 않은 페이스트의 성질

1) 유동곡선

그림 3과 그림 4는 내원통 회전점도계를 이용하여 얻은 시멘트 페이스트의 유동곡선을 나타낸다. 전단변형속도에 대한 전단응력과의 관계를 빙함유동모델로 해석한 결과, 각 분체는 높은 상관관계를 나타내었다. 그림에서 RP는 골재미분이 포함되지 않은 페이스트이고 RP′는 골재미분이 일부 포함된 페이스트를 의미하며 모든 재생시멘트 제조시소성시간은 60분이다. 두 그래프를 비교해보면 RP가 RP′보다 항복치는 높고 점성은 비슷한 것을 알 수 있고 혼화재 치환율이 높을수록 항복치가 작아지는 것을 알 수 있다. 즉, RP′가 RP보다 유동성이 좋으며, 혼화재 치환율이 높을수록 유동성이 개선됨을 알 수 있다.

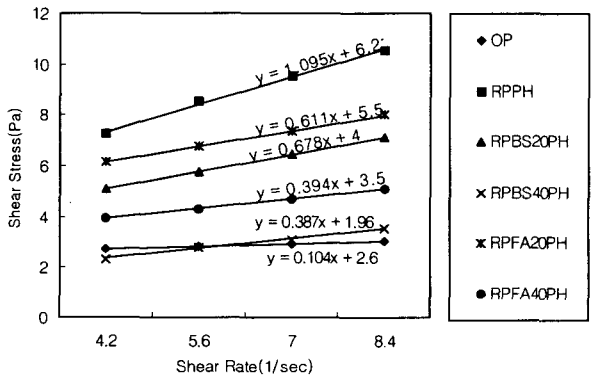

그림 3. 분체종류에 따른 유동곡선(RP)

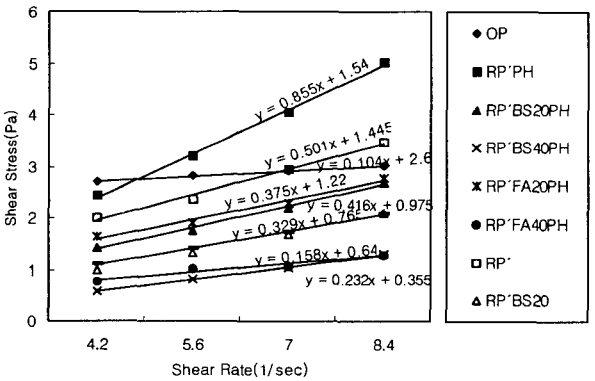

그림 4. 분체종류에 따른 유동곡선(RP′)

2) 레올로지 특성

그림 5~그림 7은 原시멘트 페이스트와 재생시멘트 페이스트(RP, RP′)의 레올로지 정수를 비교한 것이다. 레올로지 실험결과, 재생시멘트 페이스트의 점성과 항복치는 原시멘트에 비해 모두 크게 변화하였다. 原시멘트보다 같은 배합조건에서 재생시멘트 페이스트의 점성은 크게 증가하였다. 한편,

항복치의 경우는 RP에서만 증가하는 경향이 뚜렷하였으며, 또, RP의 항복치와 소성점도(일점쇄선)는 RP´(점선)보다도 모두 높았다. 이것은 RP´에 혼입되어 있는 골재미분이 많아 질수록 수화반응에 참여하지 못하는 물의 양이 증가함에 따라 절대페이스트량이 감소하여 전체적인 점착력이 감소하였기 때문으로 사료된다. 혼화재의 치환율은 높을수록 소성점도 및 항복치가 감소하였으며, 예비소성을 한 RP´가 예비소성을 하지 않은 RP´보다 모두 높아진 것을 그림에서 알 수 있다.

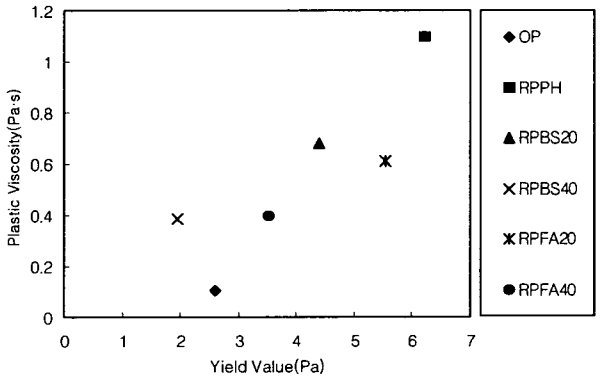

그림 5. 분체종류에 따른 항복치와 소성점도의 관계(RP)

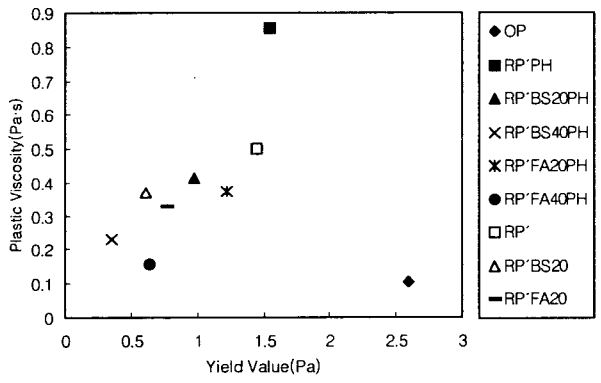

그림 6. 분체종류에 따른 항복치와 소성점도의 관계(RP')

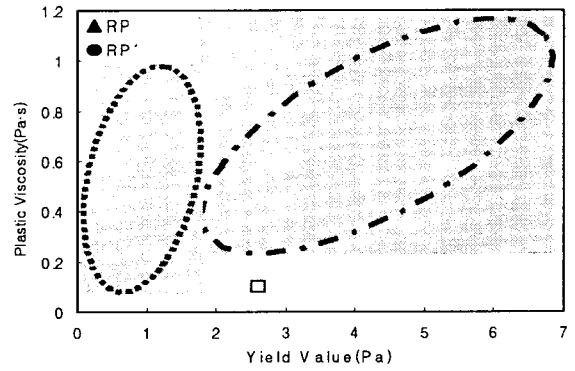

그림 7. RP와 RP' 의 항복치와 소성점도 범위

3) 응결시간

그림 8은 비카트침 장치에 의한 응결시험(KS L 5201)의 결과를 나타낸 것으로 재생시멘트를 이용한 페이스트와 原페이스트 모두 KS 기준을 만족했다. 한편, 소성시간이 길수록 응결시간이 짧아지고, RMPHT60과 RMT60을 비교해볼 때 예비소성을 한 시료가 예비소성을 하지 않은 시료보다 응결시간이 짧은 것으로 나타났다.

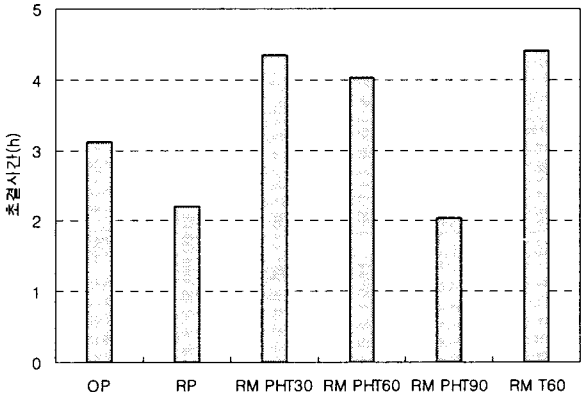

그림 8. 原시멘트와 재생시멘트의 응결(초결)시간

3.2 경화 페이스트의 성질

1) 압축강도

그림 9는 재생모르터의 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 예비소성 및 소성온도, 혼화재의 치환율에 따라 약간의 차이는 있으나 재령 7일에서는 플라이애쉬를 치환한 모르터의 압축강도가 가장 낮게 나타났고, 예비소성을 하고 60분 이상을 소성한 모르터의 압축강도가 120kgf/㎠으로 비교적 높았지만 28일, 91일 압축강도에서는 혼화재를 치환한 모르터보다 강도 증진율이 높지 않았다. 고로슬래그를 40% 치환한 모르터의 91일 압축강도가 350kgf/㎠로 높은 강도발현율을 보여 앞으로의 재생콘크리트 제조에는 혼화재의 사용이 필요할 것으로 사료되어진다.

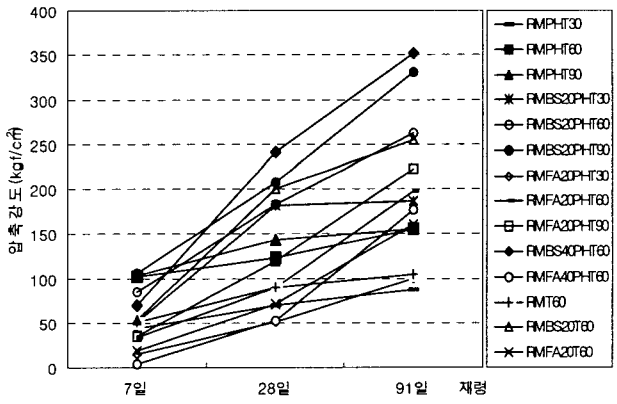

그림 9. 재생모르터의 재령별 압축강도

저자 등은 실험을 통하여 재생시멘트 제조에 필요한 최적 소성온도가 700℃라는 것을 확인한 바 있다.[18)-21)] 재생시멘트

제조방법에 있어서 소성온도와 더불어 소성시간 또한 시멘트 제조에 소요되는 에너지량과 직접 관련이 있으므로 본 연구에서 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 소성시간을 30, 60, 90분 3수준으로 설정하여 재생시멘트를 제조하였다. 그림 10은 각 재령에 있어 소성시간별 압축강도를 나타낸 것으로, 그림에서와 같이 90분에서 가장 높은 강도발현율을 보인 것으로 보아, 재생시멘트 제조에 있어서 적어도 90분 이상의 소성과정이 필요할 것으로 생각된다. 또, 30분과 60분간보다도 60분과 90분 사이에서 압축강도의 증가율이 현저히 작아지므로 90분 이상의 소성은 금후 추가 실험을 통하여 관찰해볼 필요가 있으며, 시멘트 생산코스트를 고려해 적정소성시간을 결정해야 할 것으로 사료되어진다.

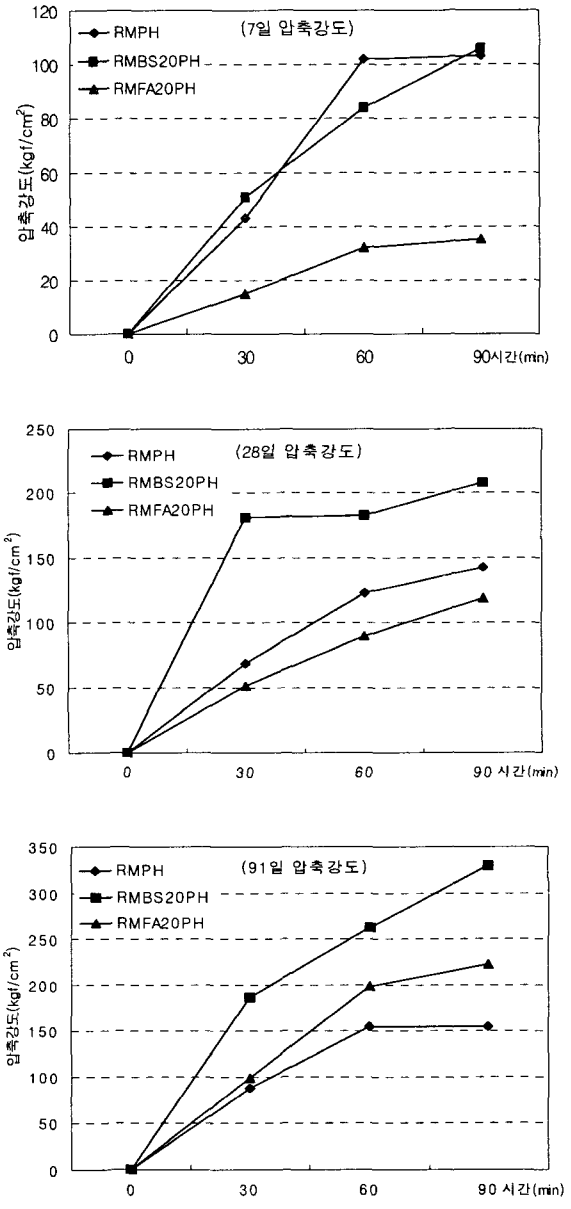

그림 10. 소성시간별 압축강도

2) 예비소성 유무에 따른 압축강도 비교

그림 11은 재생모르터의 예비소성 유무에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 재생모르터가 原모르터에 비해 강도가 저감되는 현상은 시멘트 경화체 미분쇄 후 미세골재부분이 체에 걸러지지 않고 혼입됨으로써 강도를 저하시킨 것으로 사료되어지며, 따라서 본 연구에서는 골재와 시멘트 경화체와의 원활한 분리를 위해서 예비소성이라는 단계를 설정해 200℃에서 180분간 1차 파쇄한 시멘트 경화체를 예비소성하였다. 골재와 시멘트 경화체 부분은 열팽창계수가 서로 상이하므로 이렇게 예비소성을 함으로써 골재와 시멘트 경화체 부분의 경계에서 균열이 발생되어 보다 더 쉽게 분리될 것으로 기대하였다. 실험 결과, 그림 11에서와 같이 예비소성을 한 재생모르터의 압축강도가 예비소성을 하지 않은 모르터에 비해 높은 강도 발현율을 나타내고 있다. 이것으로 예비소성이 골재와 시멘트 경화체와의 분리를 촉진시킨 것으로 사료되며, 기존의 내열콘크리트에 관한 연구[22]에서 열을 반복적으로 콘크리트에 가함으로써 골재와 시멘트 경화체 부분의 분리가 용이하다는 결과를 바탕으로 금후, 예비소성에 대한 온도와 소성시간, 소성 횟수 등에 관한 연구가 더욱 더 필요할 것으로 사료되어진다.

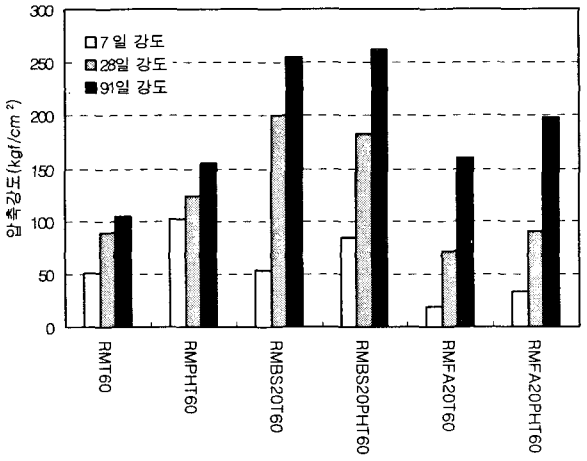

그림 11. 예비소성 유무에 따른 압축강도 비교

3) 혼화재를 치환한 재생모르터의 강도 발현

재생모르터의 강도저감현상을 보완하기 위해서 예비소성과 더불어 고로슬래그와 플라이애쉬를 각각 20, 40%씩 치환함으로써 압축강도의 변화를 고찰하였다. 그림 12에서 고로슬래그를 40%치환한 재생모르터의 91일 압축강도가 350kgf/ cm2로서 혼화재를 사용하지 않은 모르터에 비해 높은 강도 발현율을 보이고 있으며, 플라이애쉬를 치환했을 경우에는 7, 28일 압축강도는 낮았으나 91일 강도는 높아진 것으로 나타났다. 이것으로 산업폐기물인 고로슬래그와 플라이애쉬의 사용이 재생콘크리트에 필요할 것으로 판단되며, 또, 다른 혼화재료의 사용에 대한 연구도 필요할 것으로 사료되어진다.

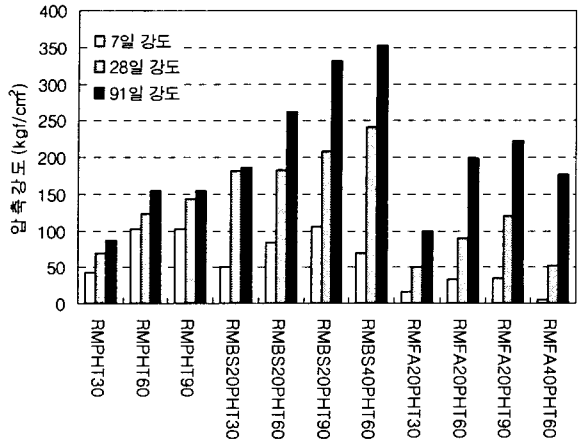

그림 12. 혼화재 첨가 유무에 따른 재생모르터의 압축강도

4. 결 론

본 연구에서는 미분쇄한 시멘트 경화체를 소성처리함에있어 적정소성시간과 재생시멘트의 성능개선을 위한 방안으로 예비소성에 의한 골재와 시멘트 경화체와의 분리와 혼화재료를 이용한 재생시멘트의 유동성과 강도개선에 관해서 고찰하였다. 본 연구에서는 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 재생시멘트는 原시멘트에 비해 유동성이 다소 떨어지는 경향이 있으나, 고로슬래그, 플라이애쉬, 고성능AE감수제와 같은 혼화재료를 적절히 사용한다면 저하되는 재생 시멘트의 유동성을 향상시킬 것으로 사료되어진다.

2) 레올로지에 있어 재생시멘트 페이스트는 原시멘트보다 같은 배합조건에서 점성은 크게 증가한 반면, 항복치의 경우는 RP에서만 증가하는 경향이 뚜렷하였다. 또, RP가 RP´보다도 항복치와 소성점도가 모두 증가하는 경향을 보였다.

3) 재생시멘트의 소성시간별 압축강도는 30, 60, 90분 중90분에서 가장 높은 강도발현율을 보였다.

4) 예비소성을 한 재생모르터의 압축강도가 예비소성을 하지 않은 모르터에 비해 높은 강도 발현율을 나타내므로 예비소성이 골재와 시멘트 경화체와의 분리를 촉진시킨 것으로 사료된다.

5) 재생모르터에 고로슬래그와 플라이애쉬를 각각 20, 40%씩 치환함으로써 原모르터에 비해 높은 강도 발현율을 보이므로 산업폐기물인 고로슬래그와 플라이애쉬의 사용이 재생콘크리트에 필요할 것으로 판단된다.

이러한 방법으로 폐콘크리트 미분말을 이용한 재생시멘트는 실용화가 가능할 것으로 예측되며, 금후 재생시멘트의 보다 적절한 물성개선과 합리적인 생산방법을 모색하여 콘크리트산업에 적극 도입함으로써 건설분야의 필수과제인 건설폐기물의 합리적인 재활용에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 이세현, 건설폐기물의 재활용 기술과 정책, 한국건설기술인협회지, 2002년 5·6월호(통권50호), pp. 38-41
2. 하주형 외 2인, 폐콘크리트로부터 재생된 골재의 합리적 평가에 관한연구, 콘트리트학회논문집, 12권 5호, 2000. 10.
3. 김무한, 재생골재의 현황 및 재활용방안, 콘크리트학회지, 9권 6호, 1997. 12.
4. 배성용 외 3인, 재생콘크리트의 강도발현 및 동결융해 저항성 특성, 콘크리트학회지, 10권 4호, 1998. 8.
5. 한천구 외 4명, 재생골재의 품질에 따른 재생콘크리트의 특성에 관한실험적 연구, 대한건축학회학술발표논문집, 18권 1호, 1998. 4.
6. 이정율 외 3인, 재생골재 콘크리트의 화학안정성에 관한 실험적 연구, 콘크리트학회논문집, 11권 4호, 1998. 8.
7. 김무한, 건설폐기물 및 재생골재 콘크리트, 콘크리트학회지, 10권 6호, 1998. 12.
8. 박승범, 건설폐기물의 국내외 재활용기술의 현황 그리고 처리 및 재활용실태, 가을 학술발표회 논문집, 2000.
9. 김병균 외 3명, 양생조건에 따른 재생골재 콘크리트의 강도 특성에 관한 실험적 연구, 가을 학술발표회 논문집, 1996.
10. 소양섭, 유기물(고분자제)건설 재료의 처리 및 재활용 RILEM 학술회의,콘크리트학회지, 7권 2호, 1995. 4.
11. 이현석 외 3명, 플라이애쉬와 실리카흄을 사용한 재생골재 콘크리트의공학적 특성, 가을학술발표 논문집, 1999.
12. 윤건호 외 1명, 재생골재 치환률에 따른 콘크리트의 역학적 특성, 가을학술발표회 논문집, 1999.
13. 김진영 외 3명, 재생폐콘크리트의 성능향상에 관한 연구, 콘크리트학회논문집, 7권 2호, 1995. 4.
14. F.Tomosawa and T.Noguchi, Towards Completely Recyclable Concrete, Concrete Technology Towards the Century of nvironment, Proceeding of International Workshop Hakodate, Intergrated Design and Environmental Issues in Concrete Technology, E & FN SPON, 1996.
15. 友澤史紀 外 4人, 完全リサイクルコンクリート(エココンクリート)の研 究, 日本建築學會大會學術講演梗概集 A-1, pp.341-342, 1994.
16. 友澤史紀 外 3人, 完全リサイクルコンクリートの實用化にかんする研究 (その1 : 全体計劃および各種完全リサイクルコンクリート), 日本建築學會 大會學術講演梗概集A-1, pp.393-394, 1996.
17. 友澤史紀, 完全リサイクルコンクリート登場, 日経アーキテクチヤー, pp. 144-145, 1994.
18. 김정길 외 3명, 건설폐기물의 재활용과 리사이클 콘크리트의 개발을 위한 고찰, 대한건축학회학술발표논문집, 22권 1호, 2002. 4.
19. 오상균 외 3명, 시멘트 경화체를 이용한 재생시멘트의 강도발현, 대한건축학회학술발표논문집, 22권 1호, 2002. 4.
20. 吳相均 外 2人, セメントモルタルの加熱粉砕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梗概集A-1,pp.993-994, 2002.
21. 金政吉 外 2人, 韓國での建設廢棄物の發生量とリサイクルに關する一考察, 日本建築學會大會學術講演梗概集A-1, pp.991-992, 2002.
22. 原田 有 外 1人, 耐熱コンクリート, コンクリートジーナル, Vol.8, No.2, pp.45-49, 1970.