

고유동/고강도 콘크리트의 물성에 미치는 혼합재의 영향성 검토

전준영·김진욱·유창진*

〈현대시멘트 단양공장〉

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 고성능화, 대형화, 고층화, 경량화 등으로 인하여 건축 및 토목 분야에서 고유동/고강도 콘크리트의 사용량이 증가되고 있다. 콘크리트를 고강도화시키는 방법으로서 혼합재의 첨가 등으로 골재와 결합재의 계면 결합력을 증가, 수화생성물의 증가, 물/시멘트비 저감 등으로 공극율을 감소시켜 고강도성 콘크리트를 제조할 수 있다.

기존에는 Silica fume, Metakaolin 등의 고강도 혼합재가 사용되었으나, 거의 수입에 의존하고 있고 고가이기 때문에 거의 사용되지 않고 있는 실정이다. 최근 들어서는 학계 및 건설현장에서 자원고갈과 환경오염에 대한 관심이 집중되어 산업폐기물이나 산업부산물을 건설재료로서 재활용하는 방안을 다각적으로 검토되고 있다.

그러므로 본 연구에서는 국내에서 산업부산물로 다량 산출되고 있는 고로슬래그, 플라이애쉬 및 시멘트 원료로 사용되는 석회석의 분말도와 혼입율을 변화시켜 혼합재 첨가에 따른 시멘트의 기초물성을 파악한 후 콘크리트의 물성에 미치는 제반 특성을 검토함으로써 궁극적으로 산업부산물로 발생하는 혼합재의 효율적인 활용 및 고유동

콘크리트의 품질향상에 한 참고자료로 제시하고자 한다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

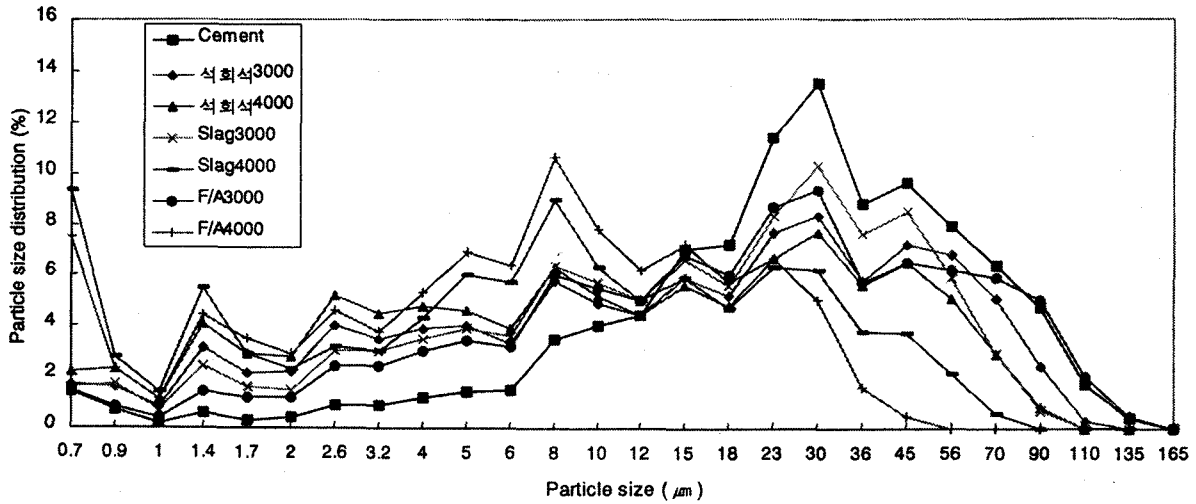
본 실험에 사용된 시멘트는 당공장에서 생산된 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 혼합재로서 고로슬래그(국내 P제철소), 플라이애쉬(국내 B화력발전소), 석회석(당공장)을 사용하였다. 각각의 혼합재는 국내에서 현재 보편적으로 사용되고 있는 Blaine 3,000, 4,000 cm^2/g 으로 하여 10, 20, 30wt% 혼입하였다.

각 혼합재의 혼입에 따른 분체의 특성을 파악하기 위하여 시멘트와 혼합재의 입도분포를 측정(〈그림 1〉)하였으며 시멘트 및 각 혼합재료의 화학성분은 〈표 1〉과 같다.

또한 고유동성 확보를 위하여 화학혼화제는 국내 D사의 나프탈렌계 고성능 AE감수제를 B×1.8wt% 사용하였다. 굵은 골재는 충북 제천산의 부순굵은골재(최대치수 19mm, 비중 2.67, 조립율 6.52)를 사용하였고, 잔골재는 강모래(비중 2.59, 조립율 2.74)를 사용하였다.

〈표 1〉 시멘트의 혼합재의 화학성분

구 분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ig-loss	비 고
시 멘 트	21.58	5.84	3.26	61.92	2.20	2.44	0.77	0.08	1.79	
슬 래 그	32.05	12.06	2.04	44.69	7.76	0.50	0.28	0.12	+0.57	
Fly Ash	56.45	23.75	6.75	3.16	2.84	0.57	-	-	3.80	
석 회 석	9.11	1.42	0.88	47.93	1.45	-	0.35	0.01	38.95	CaCO ₃ =85.56



<그림 1> 각 Sample의 입도분포

2.2 실험 방법

2.2.1 모르터 실험

보통포틀랜드 시멘트와 혼합재를 첨가한 시멘트의 기본적인 물성을 파악하기 위하여 유동성은 KS 5105에 의해서 시멘트 : 표준사 : 물 = 1 : 2.45

: 0.485로 배합하여 모르터를 혼합하고 KS L 5111 “시멘트 시험용 플로우 테이블”을 이용하여 측정하였으며, 압축강도(KS L 5105) 및 응결시간(KS L 5103)을 측정하였다.

또한 혼합재를 사용한 시멘트의 수화특성을 알아보기 위해 W/C = 0.5로 하여 3분간 교반시킨

<표 2> 콘크리트 물성시험 계획

구 분	W / B (%)	S / A (%)	Slump Flow (cm)	단위수량 (kg/m ³)	단위결합재량 (kg/m ³)	혼합재분말도 (cm/g)	혼합재혼입율 (%)
OPC							
S 310						3,000	10
S 320						3,000	20
S 330						3,000	30
S 410						4,000	10
S 420						4,000	20
S 430						4,000	30
F 310						3,000	10
F 320						3,000	20
F 330	30.50	39.80	60	174	570	3,000	30
F 410						4,000	10
F 420						4,000	20
F 430						4,000	30
L 310						3,000	10
L 320						3,000	20
L 330						3,000	30
L 410						4,000	10
L 420						4,000	20
L 430						4,000	30

* OPC : 보통포틀랜드 시멘트, S : 고로슬래그, F : 플라이애쉬, L : 석회석

후 항온항습기(23°C, RH 90%)에서 3일, 28일간 습윤 양생한 후 아세톤으로 수화정지시켜, 45°C에서 24시간 건조시킨 후 XRD, DSC, SEM을 이용하여 수화생성물을 관찰하였다.

2.2.2 콘크리트 실험

혼합재의 종류 및 첨가량에 따른 고유동/고강도 콘크리트의 특성 파악을 위한 본 연구의 실험 계획은 <표 2>와 같다.

Plain 콘크리트의 물-결합재비는 30.50%로 정하고 목표 Slump Flow는 60cm로 하여 배합비를 결정하였다. 단위수량을 일정하게 유지하면서 시멘트 배합량만 각각 슬래그, 플라이애쉬, 석회석 미분말로 10, 20, 30% 치환하였다. 콘크리트 혼합은 강제식 믹서(60ℓ)를 사용하였으며 현장여건을 고려하여 건비빔 없이 2분간 혼합하였다.

콘크리트의 제반 물성은 KS F 2436의 관입 저항침에 의한 응결시험, KS F 2421에 의한 공기량 측정, KS F 2402에 의한 Slump flow를 0, 30, 60분까지 측정하였다. 또한 콘크리트의 강도특성은 수중에서 양생한 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 공시체를 KS F 2405에 의하여 재령 20hrs, 3일, 7일, 28일의 압축강도를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 모르터 특성

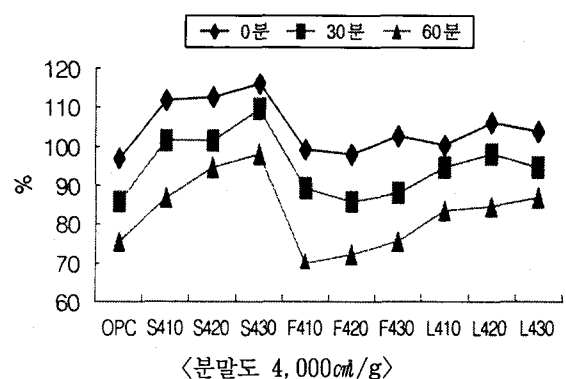
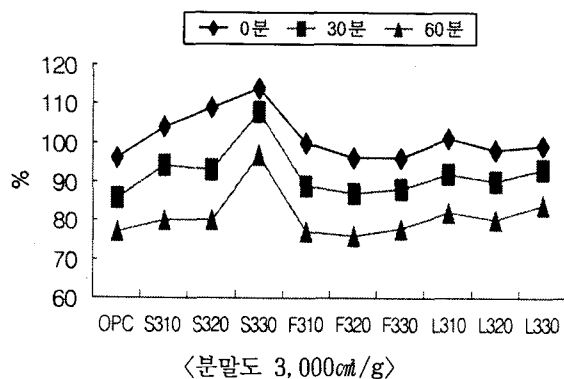
3.1.1 유동성

OPC 단독 및 고로슬래그, 플라이애쉬, 석회석의 분말도(3,000, 4,000 cm^2/g)와 첨가량에 따른 유동성 측정 결과를 <그림 2>에 나타내었다.

첨가된 혼합재 중 고로슬래그의 슬럼프가 가장 좋았으며, 60분 후의 슬럼프 손실율도 가장 적었다. 이는 고로슬래그가 물과 접촉시 시멘트와 같이 초기에 직접적인 수화작용을 하지 않을 뿐만 아니라 유리질의 평활한 입자표면을 가지고 있기 때문이다. 또한 고로슬래그가 시멘트 조성광물 중 초기수화에 관여하는 C_3A , C_4AF 및 알칼리 부분을 감소시켜 시멘트 페이스트의 점성을 저하시키고, 시멘트 입자의 응집을 분산시키는 역할을 하기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 플라이애쉬는 구형입자로서 블베어링 역할에 의해 시멘트 입자 및 골재 사이의 마찰저항을 작게 하므로 유동성 향상에 기여할 수 있으나, 본 실험에 사용된 플라이애쉬는 미연소 탄소분이 3.80%이며 입형이 거친 입자가 많고, 미연소 탄소분의 증가로 인하여 슬럼프가 저하되었다.

석회석은 수경성 또는 잠재수경성을 갖지 않는 non-hydraulic filler이지만 고유동 콘크리트에 적용시 콘크리트 온도상승 억제와 점도증진 및 재료분리 저항성의 개선에 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 석회석은 CaCO_3 의 첨가에 의해 생성된 CO_3^{2-} 를 포함한 gel상 수화물이 C_3A 의 표면에 생성되어 수화를 지연시키기 때문에 양호한 슬럼프를 나타내었다. 따라서 유동성은 <그림 1>에 도시된 것처럼 각 재료들이 matrix(시멘트 및 골재)에 최밀충전되어 모르터의 구속수를 줄임으로 인하여 플라이애쉬를 제외한 고로슬래그 및 석회석은 유동성 향상 및 슬럼프 손실율이 감소되는 것으로 판단된다.

3.1.2 압축강도



<그림 2> 혼합재 혼입에 따른 시멘트 모르터 유동성

시멘트 모르터 압축강도 시험결과를 <그림 3>에 나타내었다.

콘크리트의 고강도 발현에 있어서 가장 취약한 점은 시멘트 페이스트와 골재와의 부착성이 적은 점이다. 즉 양자의 계면에서의 결합력이 적기 때문에 고강도 콘크리트의 강도를 지배하는 주요 요인이 되고 있다. 따라서 시멘트 페이스트와 골재의 부착성을 증진시키기 위해서는 Transition zone에 존재하는 많은 공극을 다른 재료로 충전하는 것이 필요하다. 예를 들어 고로슬래그 등을 사용하면 포졸란성 반응에 의하여 Transition zone에 존재하는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 규산칼슘 수화물 등을 생성하여 공극을 충전하기 때문에 시멘트 페이스트와 골재와의 부착성이 개선되어 고강도성을 얻을 수 있다.

고로슬래그의 경우 분말도 $3,000, 4,000\text{cm}^3/\text{g}$ 에서는 초기재령 1, 3일에서는 첨가량 증가(CX10~30%)에 따라 강도가 저하되나, 재령 28일에서는 OPC보다 약 10~15% 정도 상승되었다. 이는 슬래그 첨가시 포졸란 반응으로 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 량이 줄고 C-S-H 수화물이 증가함과 함께 혼합재가 공극을 충전시켜 수밀성을 높여주기 때문이다.

플라이애쉬는 분말도 $3,000\text{cm}^3/\text{g}$ 에서는 플라이애쉬 자체의 활성 부족으로 포졸란 반응이 지연되므로 재령 28일까지 압축강도가 OPC에 비하여 8~24% 정도 감소하였으나, $4,000\text{cm}^3/\text{g}$ 에서는 재령 28일에서 OPC와 거의 유사한 경향성을 나타내었다.

석회석은 분말도 변화에 따라서 압축강도 상승요인은 미미하였으며, 첨가량 증가에 따라서 비례적으로 감소됨을 알 수 있었다. 석회석을 소량

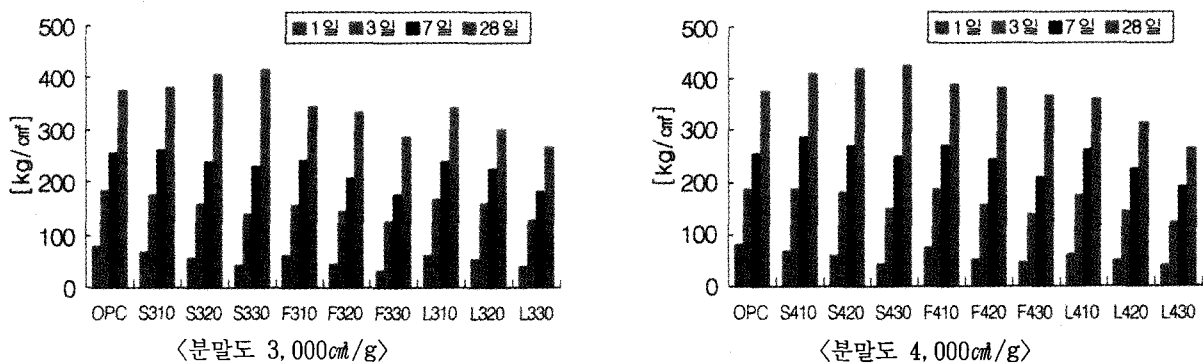
첨가시에는 혼합된 석회석 분말이 시멘트 입자 사이로 들어가 수화물을 석출시킬 수 있는 비표면적을 증가시켜 초기수화 반응을 촉진시키기 때문에 높은 강도를 얻을 수 있으나 다량 첨가시 C_3A 표면에 CO_3^{2-} 를 포함한 gel상 수화물이 치밀하게 생성되며 첨가율이 증가될수록 CO_3^{2-} 량이 증가되어 초기수화를 지연시킨다. 또한 포졸란 반응을 하지 못하고 filler로서 충전재 역할만하므로 석회석 함량 증가에 따라서 모든 재령에서의 압축강도는 감소되었다.

3.1.3 기기분석

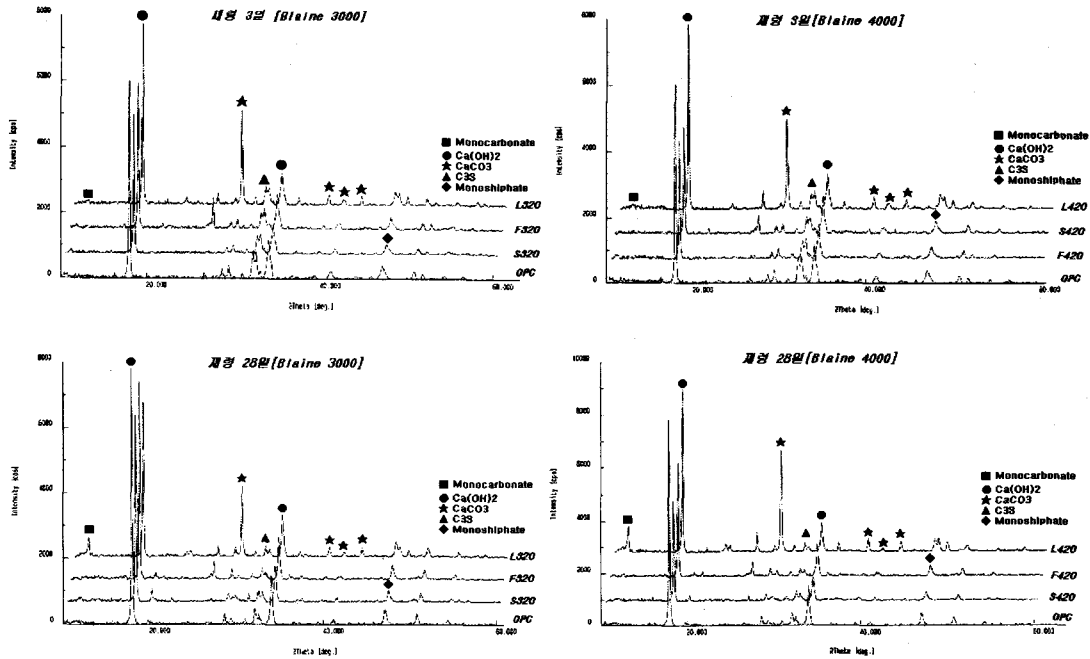
재령별 시편들의 XRD 분석 결과를 <그림 4>에 나타내었다.

고로슬래그 및 플라이애쉬를 CX20wt% 첨가시 재령 3일에서 OPC에 비하여 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 피크가 감소하는 경향이 나타났는데 이는 고로슬래그가 첨가됨에 따라 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 생성시켜 주는 시멘트의 양이 감소되었기 때문이다. 그러나 재령 28일의 경우 고로슬래그 및 플라이애쉬는 포졸란 반응으로 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 피크가 OPC에 비하여 감소됨을 알 수 있다.

석회석은 재령 3일 12° 부근에서 시멘트종의 C_3A 와 CaCO_3 가 반응하여 헤미카보네이트($\text{C}_3\text{A} \cdot 0.5\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 0.5\text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)나 모노카보네이트($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$)가 생성되었으며, 18° 부근의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 도 다른 시편보다 많이 생성되었다. 또한 수화가 진행됨에 따라 $29\sim 30^\circ$ 부근의 CaCO_3 가 감소됨으로써 모노카보네이트 피크의 intensity는 증가되었으며, 분말도가 증가함에 따라서 반응성이 향상되었다.



<그림 3> 혼합재 혼입에 따른 시멘트 모르터 압축강도



〈그림 4〉 혼합재 혼입에 따른 시멘트 경화체의 X선 회절 분석 결과

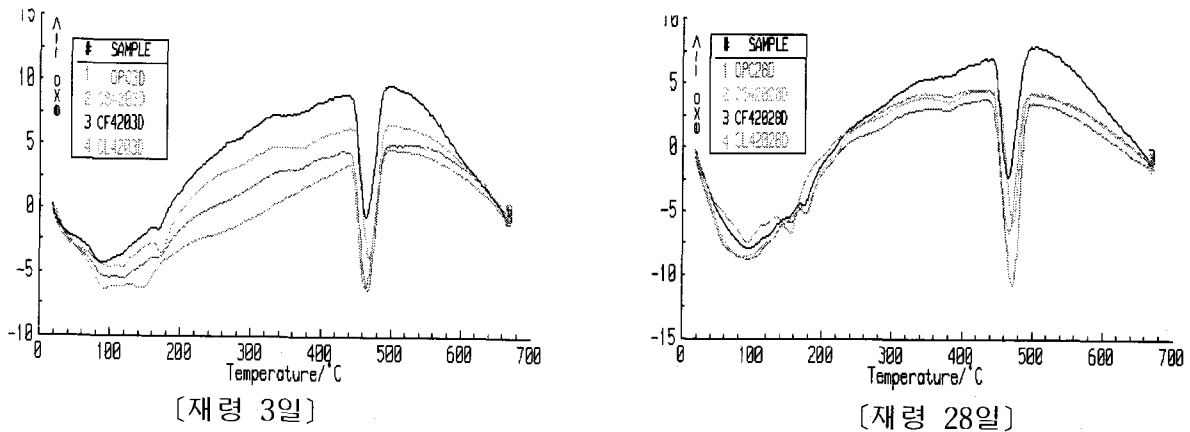
〈그림 5〉에 상온에서 700°C까지 10°C/분의 승온 속도로 측정된 DSC 분석 결과를 나타내었다.

XRD 분석 결과와 마찬가지로 고로슬래그 및 플라이애쉬는 OPC 및 석회석에 비하여 시멘트량 감소 및 포졸란 반응으로 재령 3, 28일에서 Ca(OH)₂의 분해에 해당하는 450°C 피크의 크기 및 면적이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 170°C 부근에서 OPC 및 고로슬래그, 플라이애쉬에서는 모노설페이트의 피크가 발생되었다. 그러나, 석회석의 90~150°C에서 발생한 broad한 피크는

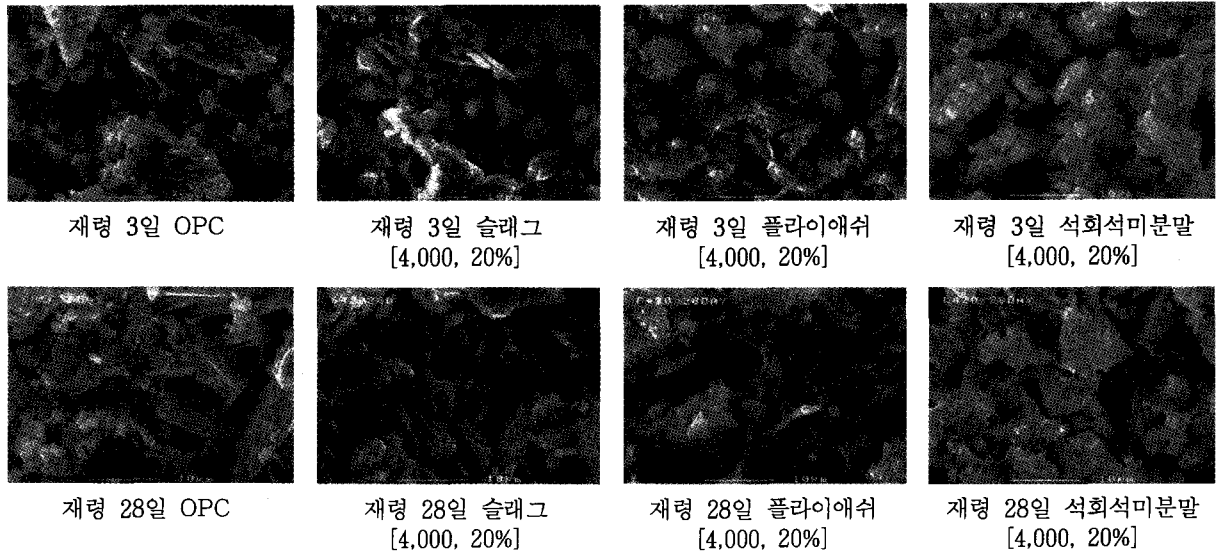
모노설페이트의 생성에 의한 것으로 사료된다.

〈그림 6〉은 경화체 파단면의 SEM 사진 관찰 결과이다.

재령 3일에서는 OPC에 비하여 고로슬래그, 플라이애쉬를 첨가한 경우 수화가 지연되어 수화생성물이 다소 적었으며, 석회석은 미수화 석회석 및 경화체가 치밀하지 않았다. 재령 28일에서는 고로슬래그, 플라이애쉬의 경우 포졸란 반응으로 인하여 치밀한 상들을 관찰할 수 있었으며, 석회석은 미수화 석회석이 감소됨으로서 수화가 향상



〈그림 5〉 혼합재 혼입에 따른 시멘트 경화체의 TG-DSC 분석 결과



〈그림 6〉 혼합재 혼입에 따른 시멘트 경화체의 SEM 관찰 결과

되었다. 이는 앞의 압축강도 및 XRD, DSC 분석 결과와도 일치하였다.

3.2 콘크리트 특성

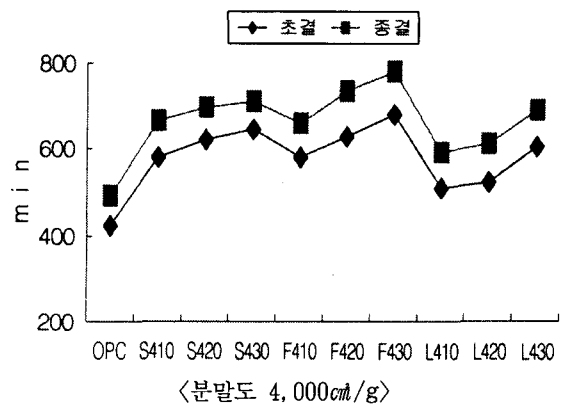
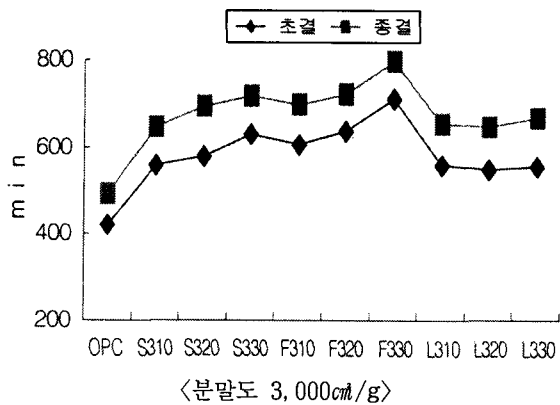
3.2.1 응 결

고유동 콘크리트는 보통 콘크리트의 경우와 비교해서 고유동성을 얻기 위하여 혼합재 및 고성능 AE감수제의 사용량이 많게 되어 응결시간이 다소 지연된다. 〈그림 7〉은 혼합재 종류 및 첨가량에 따른 응결시간을 나타낸 것으로서 혼합재 첨가량이 증가함에 따라서 OPC보다 초결(88~257분) 및 종결(98~305분)이 모두 증가되었다. 이는 혼합재량이 증가할수록 상대적으로 시멘트량

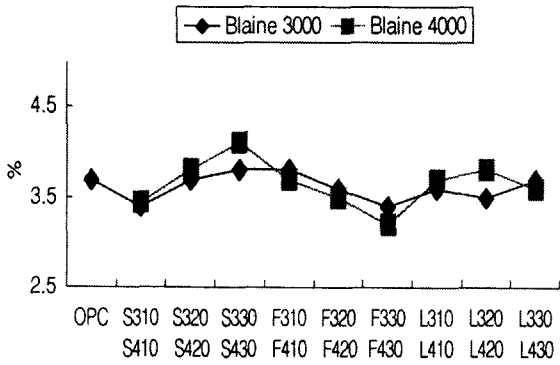
이 절감되므로 콘크리트내의 C₃A, C₃S 및 알칼리 부분의 감소가 응결지연의 주요인으로 작용된다. 특히 플라이애쉬의 경우 응결시간이 가장 많이 지연되었는데 이것은 미연소 탄소량과 관계가 있으며, 그 양이 많을수록 응결시간이 지연되는 것으로 보고되고 있다. 그러나 석회석은 초기수화시 헤미카보네이트(C₃A · 0.5Ca(OH)₂ · 0.5CaCO₃ · 12H₂O)나 모노카보네이트(C₃A · CaCO₃ · 11H₂O)의 생성으로 물을 다량 흡수하므로 자유수의 부족으로 다른 혼합재에 비하여 응결시간이 다소 촉진되었다.

3.2.2 공기량

〈그림 8〉에 혼합재의 첨가량과 공기량과의 관계



〈그림 7〉 혼합재 혼입에 따른 콘크리트의 응결시간



〈그림 8〉 혼합재 혼입에 따른 콘크리트의 공기함량

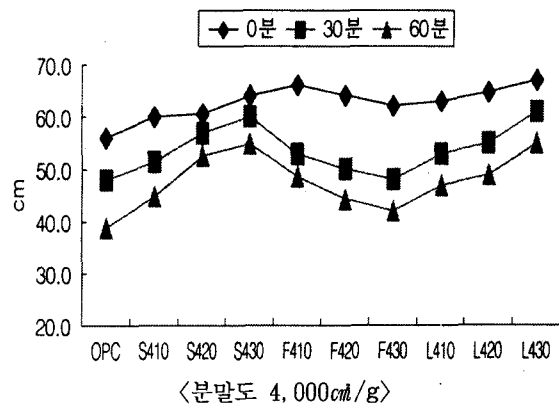
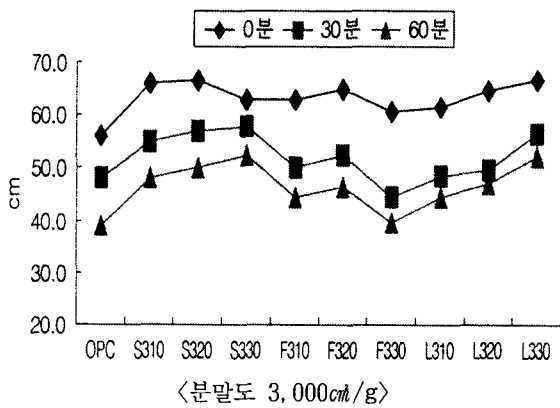
를 나타내었다. 혼합재별 분말도(3,000, 4,000cm/g)에 따른 공기량의 변화는 거의 나타나지 않는 반면, 플라이애쉬의 경우 공기량이 감소되는 경향을 보였는데 이는 플라이애쉬내에 존재하는 미연소 탄소량에 의해 연행공기가 흡착되었기 때문인 것으로 생각된다. 전반적으로 공기량은 혼합재를 첨가함으로써 OPC에 비하여 감소하였는데

이는 혼합재의 사용에 의한 공극충진 효과와 플라이애쉬의 경우 미연소 탄소분의 혼화제 흡착으로 인한 영향으로 사료된다.

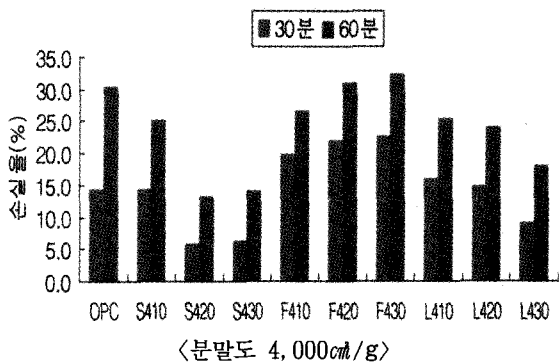
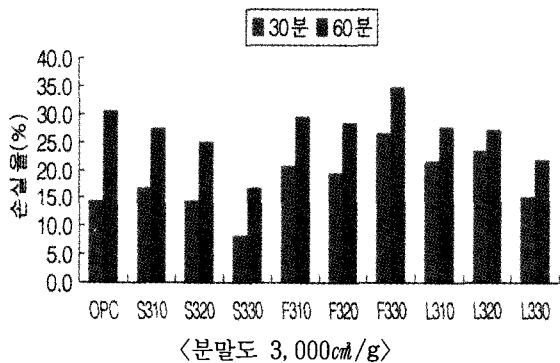
3.2.3 유동성

혼합재에 따른 콘크리트의 유동특성은 〈그림 9〉와 〈그림 10〉에 나타내었다. 혼합재를 첨가함으로써 기존 OPC에 비하여 초기 슬럼프 플로우가 6.7%~12.5% 향상되었으며, 슬럼프 플로우 손실율이 저감되었다. 이는 혼합재 첨가에 따라 초기 수화 반응이 큰 C₃A, C₃S 및 알칼리 함량이 감소하므로써 이들 광물에 흡착되는 고성능 AE감수제의 양이 줄어들고, 혼합재의 첨가에 의하여 Plain 콘크리트에서는 얻을 수 없는 최밀충진 효과를 얻을 수 있어 응집된 입자속에 구속된 물량을 줄임으로서 유동성이 증가된 것으로 생각된다.

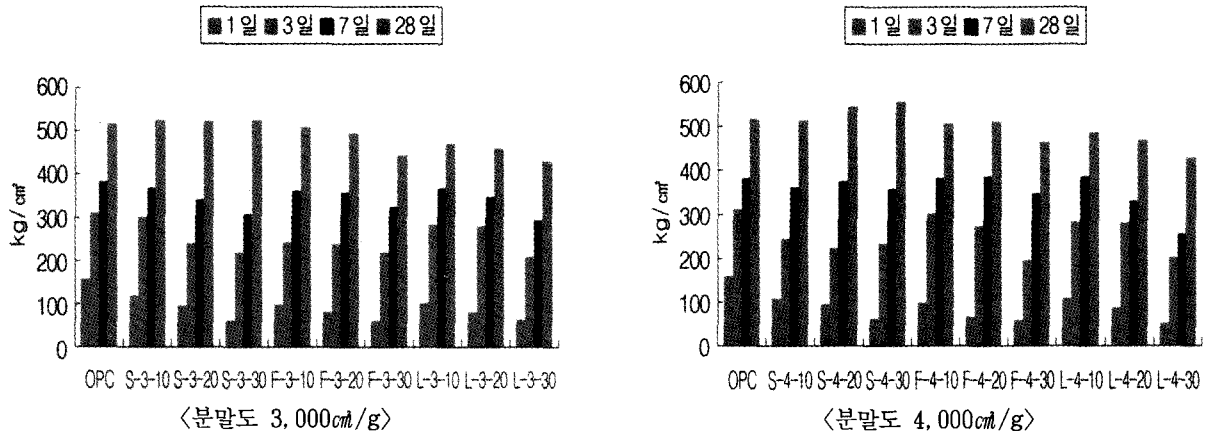
고분말도(4,000cm/g)의 경우 30% 혼합시 재료 분리 현상이 일부 관찰되었는데, 이는 시멘트 함량 감소로 인한 콘크리트의 점성저하가 원인인



〈그림 9〉 혼합재 혼입에 따른 콘크리트의 슬럼프 플로우



〈그림 10〉 혼합재 혼입에 따른 콘크리트의 슬럼프 플로우 손실율



<그림 11> 혼합재 혼입에 따른 콘크리트의 압축강도

것으로 판단되며, 실제 현장 적용시 혼합재 과다 투입으로 인한 재료분리에 대해 대책을 강구해야 할 것으로 판단된다. 콘크리트의 슬럼프 플로우 손실에 대한 평가에서 혼합재를 첨가한 경우 유동성 손실이 현저하게 저하되었다. 이는 슬래그의 경우 glass질로 존재하여 물을 흡수하는 능력이 작으며 OPC에 비하여 고성능 AE감수제의 흡착량이 적으므로 슬럼프 플로우 손실율이 60분에 최대 14% 내외였으나, 플라이애쉬는 미연소 탄소분의 증가로 인하여 고성능 AE감수제가 흡착되어 슬럼프 손실율이 최대 35%까지 증가되었다.

석회석 미분말의 경우 초기에 헤미카보네이트($C_3A \cdot 0.5Ca(OH)_2 \cdot 0.5CaCO_3 \cdot 12H_2O$)나 모노카보네이트($C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$)의 수화생성물로 인하여 물이 소비됨으로 인하여 슬럼프 손실율이 최대 25%로 고로슬래그에 비하여 다소 증가되었다. 따라서 슬럼프 플로우 손실율은 혼합재를 첨가함으로써 Plain 콘크리트에 비하여 현저하게 감소됨을 알 수 있다.

3.2.4 압축강도

<그림 11>에서는 각 재료별 분말도 및 첨가량에 따른 재령별 압축강도를 나타내었다.

고로슬래그의 경우 분말도(3,000, 4,000cm/g)에 관계없이 재령 7일에서는 OPC와 유사하였으나, 재령 28일에서는 OPC(515kg/cm²), 고로슬래그 30% 첨가시(3,000cm/g : 526kg/cm², 4,000cm/g : 557kg/cm²)로 11~42kg/cm² 정도 상승하였다. 이것은 초기재령에서는 시멘트 조성광물의 감소로 수화반응이 지연되어 강도발현이 작았으나, 재령 28일에서

는 미분말 충전효과나 포졸란 반응성 등으로 경화체가 보다 치밀하게 향상되었기 때문이다.

플라이애쉬는 첨가량 20%까지는 재령 7일 및 28일에서 OPC와 유사하였으나 30%에서는 압축강도가 저하되는 것으로 보아 플라이애쉬는 고로슬래그보다 활성이 적으며 비교적 포졸란 반응이 장기에 걸쳐 비교적 완만하게 진행되므로 고유동/고강도 콘크리트에 효율적으로 활용하기 위해서는 플라이애쉬 혼합에 따른 초기 재령에서의 압축강도 저하방지 방안이 필요함을 알 수 있다.

석회석은 고로슬래그나 플라이애쉬와 비교하여 재령 1일에서는 헤미카보네이트($C_3A \cdot 0.5Ca(OH)_2 \cdot 0.5CaCO_3 \cdot 12H_2O$)나 모노카보네이트($C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$)의 생성으로 물을 다량 흡수하므로 압축강도는 증가하나 재령의 경과에 따라 단순히 Filler로서의 역할만 하기 때문에 상대적으로 다른 혼합재에 비하여 강도발현율이 저하되었다.

4. 결 론

산업부산물의 일종인 고로슬래그, 플라이애쉬 및 시멘트 원료인 석회석을 시멘트의 일부로 대체하여 제조한 모르타 및 콘크리트에 대한 물성을 다각적으로 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

▶ 모르타의 경우

- 1) 유동성은 첨가된 혼합재 중 고로슬래그가 가장 우수하였으며, 플라이애쉬는 입형 및 미연소 탄소분의 영향으로 유동성이 감소되었다.
- 2) 압축강도는 고로슬래그를 첨가한 경우 초기에

강도가 저하되나 28일 재령에서는 10~13% 정도 상승하였고, 플라이애쉬는 저분말도에서는 OPC대비 8~24% 정도 하락하였으나, 분말도 4,000 μ m/g에서는 OPC와 유사한 경향성을 나타내었다. 또한 석회석은 non-hydraulic filler로서 함량이 증가함에 따라 모든 재령에서 OPC 및 다른 혼합재에 비하여 압축강도가 하락하였다.

▶ 콘크리트의 경우

- 1) 응결은 혼합재 첨가량이 증가함에 따라 OPC 보다 초결(88~257분), 종결(98~305분) 모두 지연되었다. 이는 혼합재 첨가량이 증가할수록 콘크리트내 시멘트 광물 및 알칼리 부분의 감소가 주요인으로 판단되어지며, 플라이애쉬의 경우 미연소 탄소분에 의하여 응결지연 현상이 현저하게 나타났다.
- 2) 공기량은 혼합재별 분말도의 영향은 미미하였으며, 대체로 혼합재의 첨가에 의해서 OPC에 비하여 감소하였는데 이는 혼합재의 공극충진 효과와 플라이애쉬의 경우 AE제 흡착의 영향으로 판단된다.
- 3) 유동성은 OPC에 비하여 비빔 직후 Slump Flow가 6.7%~12.5%까지 증가하였다. 이는 혼합재 혼입에 따라 초기수화 반응이 큰 C₃A, C₃S 및 알칼리 함량이 감소하므로써 이들 광물에 흡착되는 고성능 AE감수제의 양이 줄어들고, 혼합재의 첨가에 의하여 최밀충진 효과를 얻을 수 있어 응집된 입자속에 구속된 물량을 줄임으로서 유동성이 증가된 것으로 생각된다.
- 4) 압축강도는 고로슬래그의 경우 초기재령에서는 시멘트 조성광물의 감소로 수화반응이 지연되어 강도발현이 작았으나, 재령 28일에서는 미분말 충전효과나 포졸란 반응성 등으로 경화체가 보다 치밀하게 형성되어 OPC 강도를 상회하였다. 플라이애쉬 30%의 경우 재령 3일에서는 압축강도가 저하되었는데 이는 고로슬래그와 달리 비교적 포졸란 반응이 장기에 걸쳐서 비교적 완만하게 진행되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 타혼합재와 비교하여 석회석은 재령 1일에서는 헤미카보네이트(C₃A · 0.5Ca(OH)₂ · 0.5CaCO₃ · 12H₂O), 모노카보네이트(C₃A · CaCO₃ · 11H₂O)의 생성으로 압축강도가 다소 증가되었으나 재령의 경과에 따라서 단순히 Filler로서의 역할만 하기

때문에 상대적으로 다른 혼합재에 비하여 강도발현율이 저하되었다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 산업부산물로 얻어지는 고로슬래그, 플라이애쉬 및 시멘트 원료인 석회석을 그 사용목적에 따라서 첨가량을 조정하면 고유동/고강도 콘크리트 제조시 시멘트 대체재료로서 효과적으로 재활용할 수 있다는 결론을 얻었다. 그러나 본 실험 결과로 미루어 볼 때 현재 콘크리트 혼합재로 다량 사용중인 양질의 플라이애쉬는 포졸란 반응성 등으로 우수한 물성을 발휘하나, 미연소 탄소분이 많은 것은 압축강도 저하, 공기량 저하, 응결지연 등을 초래시킬 수 있으므로 사전에 미연소 탄소분, 분말도, 입형에 관한 세심한 검토가 요망된다.

<참 고 문 헌>

1. 오병환, Fly Ash 콘크리트의 강도 및 역학적 특성과 활용, 석탄회 활용 국제 워크숍, 한국전력공사, pp. 87~112, 1996.
2. 문한영, 문대중, 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 손실저감을 위한 혼화재의 활용, 한국콘크리트학회지 제10권 2호, pp. 155~163, 1998.
3. 권영호, 김무한, 사용재료의 품질변동이 고유동 콘크리트의 특성에 미치는 영향, 한국콘크리트학회 논문집 제12권 2호, pp. 99~106, 2000.
4. 이승헌, 김홍주, 坂井俊郎, 大門正機, 플라이애쉬 혼합시멘트 페이스트의 유동성 평가, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, pp. 1221~1226, 2000.
5. 추용식, 안재찬, 민경소, Clinker 광물과 석회석 미분말의 수화 반응성에 관한 연구, 제25회 시멘트심포지엄, pp. 80~84, 1997.
6. K. Wesche, Fly Ash in Concrete, pp. 24~41, 1991.
7. L. J. Parrott, Modeling of Hydration Reactions and Concrete Properties, Materials Science of Concrete I, pp. 181~196, 1989.
8. M. R. Rixom, N. P. Mailvagnam, Chemical Admixtures for Concrete, pp. 95~137, 1986.
9. Leslie J. Struble, Paul W. Brown, MRS microstructural Development during hydration of cement, pp. 187~200, 1986.
10. 전준영, 김한상, 플라이애쉬의 품질변동이 시멘트 모르타 및 콘크리트에 미치는 영향성, 제26회 시멘트 심포지엄, pp. 35~43, 1999.