



미분쇄플라이애쉬를 사용한 몰탈의 강도특성에 관한 실험적 연구

정 재 동(대구대학교 건축공학과 교수)

1. 서 론

가. 연구의 목적

최근 급속한 산업기술의 발달로 산업부산물인 대량 발생함에 따라 폐자원의 재활용 및 고급자원으로 환원하는 연구가 활발히 진행되어 왔다.

화력발전소에서 대량으로 발생하는 플라이애쉬는 대부분이 매립처리 되고 있으며, 최근에는 환경문제 등의 유발 및 매립지의 부족으로 처리에 고심하고 있다. 그리고 플라이애쉬의 일부는 시멘트 및 콘크리트의 혼합재로서 사용되고 있으나 대량 첨가시 콘크리트 강도의 부족 및 AE제 사용량증가 등의 문제로 이용이 제한되고 있다.

기존의 국내외 연구에서는 일반적인 플라이애쉬를 콘크리트에 첨가하여 강도 및 기타 물성에의 기여정도를 밝힌 연구결과는 많이 있으나 입도를 조정하여 수화활성을 대폭 증진시킨 플라이애쉬를 대상으로 한 연구는 거의 없었다.

본 연구에서는 산업폐기물인 플라이애쉬의 고부가가치적 이용을 목표로, 플라이애쉬의 물성을 개량, 수화활성을 높게 하여 고강도를 달성함으로써 각종 시멘트계 전자재로 확대 사용하여 이용률을 높이는 것을 그 목적으로 한다.

나. 연구의 방법

본 연구에서는 분말도 $3500\text{cm}^2/\text{g}$ 정도의 일반적인 플라이애쉬를 특수한 방법으로 미분화하여 분말도를 $6000\sim 8000\text{cm}^2/\text{g}$ 정도로 높이고 이렇게 높아진 분말도(비표면적)에 의해 수화활성도의 향상을 기대한다.

실험에서는 몰탈 공시체를 이용하여 강도증진 및 플로우에 미치는 영향을 실험하고, 각종의 양생방법에 따른 강도변화를 실험하여 공장제품으로의 이용가능성을 타진하도록 한다.

2. 실험개요

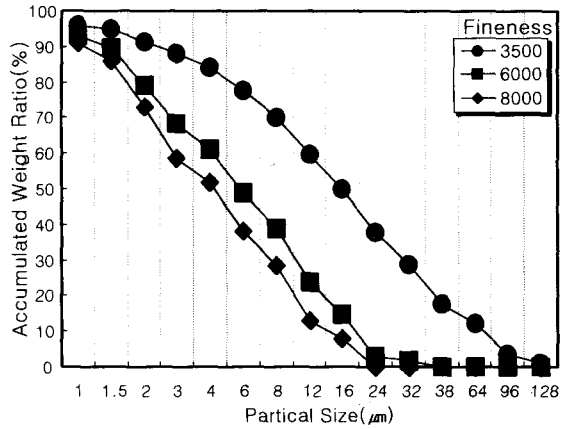
가. 실험계획

기존의 플라이애쉬의 분말도 $3500\text{cm}^2/\text{g}$ 를 사용 분쇄한 후, 분말도를 $6000\text{cm}^2/\text{g}$, $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 으로 분급하여 시멘트중량의 10, 20, 30, 40, 50%까지 치환하여 시멘트몰탈의 플로우 실험, 수중양생 및 증기양생으로 나누어 압축강도를 측정하였다.

나. 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 국내 H사의 1종 보통

포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 골재는 주문진산 표준사를 사용하였다. 혼화재로서 사용한 플라이애쉬는 보령산 F급으로 시멘트의 성질을 <표-1>, 플라이애쉬의 물리적·화학적 성질을 <표-2>, <그림-1>, 그리고 사용된 각 플라이애쉬의 전자현미경 사진을 <사진-1>, <사진-2>, <사진-3>에 나타내었다. <사진-1>은 일반적으로 통용되는 분말도 3500cm²/g의 플라이애쉬로 크고, 작은 입자가 대략 1~128μm의 범위에 있으며, 각각의 입자는 잘 유지하고 있다. <사진-2>는 분쇄하여 분말도 6000cm²/g 부근에서



<그림-1> Particle Size Distribution

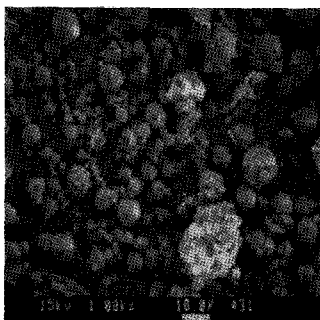
<표-1> Properties of Cement

Specific gravity (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	I. g. loss (%)	setting time (min.)		Compressive strength (kg/cm ²)		
			initial	final	σ ₃	σ ₇	σ ₂₈
3.15	3371	1.35	216	376	220	258	352

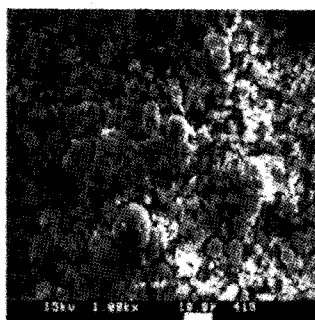
채취된 플라이애쉬로 입자가 1~32μm의 범위에 분포되며, 구형이 많이 깨져 있어서 입자가 작아지고 있음을 알 수 있다. <사진-3>은 분쇄후 분말도 8000cm²/g 부근에서 채취된 플라이애쉬 입자가 1~16μm의 범위에 분포되며, 구형이 완전히 깨져서

<표-2> Properties of Physical and Chemical of Fly-Ash

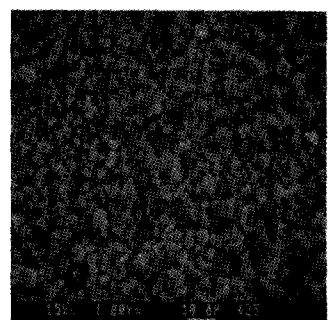
No	Specific gravity (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Chemical Composition (%)									
			I. g. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	P ₂ O ₅
3500	2.16	3552	3.66	56.47	23.56	5.26	0.94	0.35	0.63	2.00	0.15	0.53
6000		6047	3.96	55.80	22.49	5.97	1.06	0.34	0.64	1.97	0.16	0.52
8000		7852	4.10	55.82	22.79	5.54	1.02	0.28	0.65	1.99	0.16	0.52



<사진-1> Fineness 3500cm²/g



<사진-2> Fineness 6000cm²/g



<사진-3> Fineness 8000cm²/g



〈표-3〉 Mortar Mix Design

Rep. Ratio	Cement	F/A	Sand	Water
0	760	0	1862	368.6
10%	684	76	1862	368.6
20%	608	152	1862	368.6
30%	532	228	1862	368.6
40%	456	304	1862	368.6
50%	380	380	1862	368.6

작은 입자들로 구성되어 있음을 알 수 있다.

다. 몰탈배합

실험에 사용된 배합은 KSL 5015에 의거하여 시멘트 : 모래 : 물의 비율은 1 : 2.45 : 0.485로 하여 시멘트에 대한 플라이애쉬를 중량비로써 10, 20, 30, 40, 50%로 치환하였다. 사용된 배합표는 〈표-3〉과 같다.

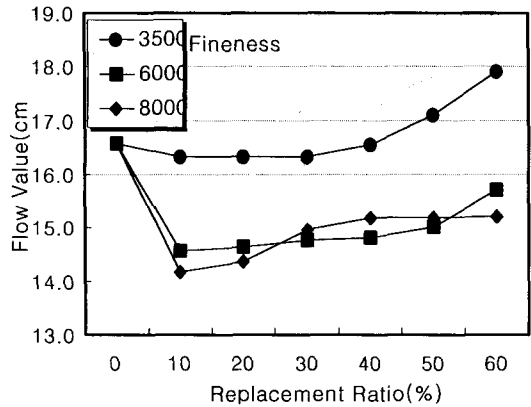
라. 실험방법과 양생방법

플로우실험은 물의 양을 일정하게 하고, 25회 낙하시킨 후의 4방향 평균값으로서 플로우값을 측정하였으며 공시체 제작은 50.8mm의 입방체 금속몰드를 사용하여 제작하였다.

또, 양생방법은 20±3°C의 수조에서 한 수중양생과 공시체 제작 후 1일의 전치기간을 두고 3시간동안 70°C에서 증기양생을 하였다. 그 후 20±3°C의 수조에서 각 재령일까지 양생하여 압축강도실험을 하였다. 수중양생의 경우에서는 3, 7, 14, 28, 56일을 측정하였으며, 증기양생의 경우 1, 3, 7, 14, 28일을 측정하였다.

3. 실험결과의 분석 및 고찰

가. 플로우 실험



〈그림-2〉 Result of Flow Test

플라이애쉬 분말도가 3500cm²/g인 플로우값은 플레인과 비교하여 시멘트에 대한 치환율이 10, 20, 30, 40%까지는 거의 동등하거나 조금 낮고, 치환율 50, 60%에서는 높아지고 있다.

플라이애쉬 분말도 6000cm²/g, 8000cm²/g에서는 플라이애쉬 분말도 3500cm²/g과 비교하여 플로우값이 2cm 정도 범위의 낮은 값을 나타내고 있다.

이는 미분쇄 플라이애쉬의 경우 비표면적의 증가로 증가된 표면적을 습윤시키기 위한 필요수분량의 증가로 플로우값이 감소되는 것으로 생각할 수 있다.

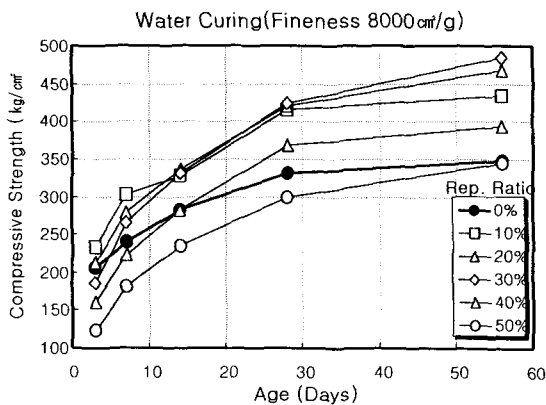
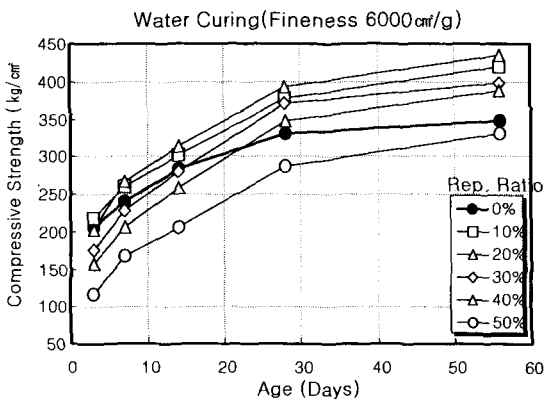
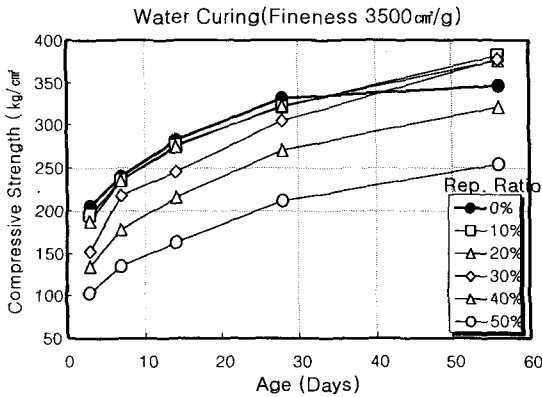
나. 수중양생 실험결과

(1) 재령별 강도발현 경향

〈그림-3〉은 분말도에 의한 재령별 압축강도를 나타내었다. 플라이애쉬의 분말도가 3500cm²/g에서는 치환율이 증가할수록 초기의 압축강도는 현저하게 낮아지는 경향을 보이고 있다. 치환율 10, 20, 30%에서는 재령 28일 부근에서 플레인과 비슷하거나 조금 낮았고, 재령 56일에는 플레인 보다 높은 강도를 보이고 있다. 이는 플라이애쉬의 포졸란 반응으로 장기재령에서 강도에 기여하고 있는 것을 나

타내고 있다.

플라이애쉬 분말도 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 에서 첨가량 10,



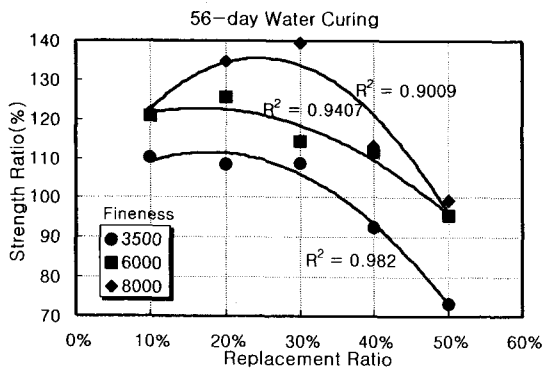
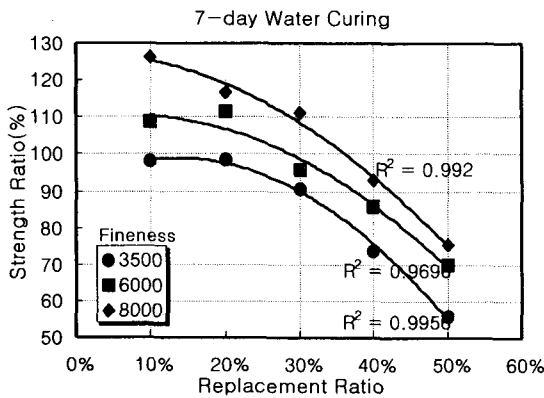
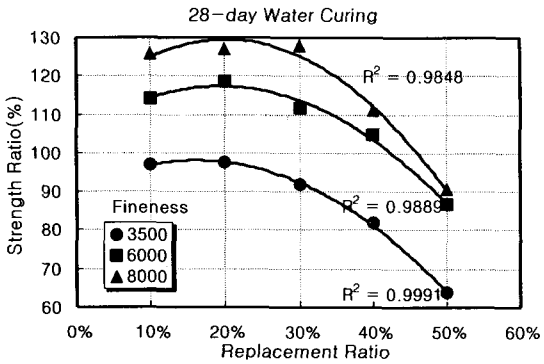
〈그림-3〉 Compressive Strength with Age (Water Curing)

20%의 경우, 전 재령에서 플레인보다 높은 강도를 나타낸다. 첨가량 30, 40%에서는 재령 14일 이후부터 플레인보다 높은 강도를 나타낸다. 첨가량 50%로 플라이애쉬가 대량 첨가된 공시체는 플레인보다 강도가 낮았다. 그리고 28일 재령에서는 플레인보다 치환율 10, 20, 30, 40%까지는 각각 45.6, 62.0, 39.1, 15.5 kg/cm^2 의 강도가 증가된 값을 나타내고 있다.

분말도 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 경우, 분말도 3500, $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 에 비해 강도가 전반적으로 증가되었으며, 분말도 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 강도발현 성상과 유사한 경향의 결과를 나타내었다. 이러한 결과로부터 플라이애쉬 분말도가 높아질수록 초기 재령에서의 강도발현율이 높아지며, 분말도 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 경우 40%이상까지 치환하여도 플레인보다 상당히 높은 강도를 나타낼 수 있으며, 분말도 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 경우, 56일의 재령에서 강도가 플레인과 거의 같아지고 있다. 이것은 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 경우 사용 시멘트양이 반으로 줄었음에도 불구하고 재령 56일에서 플레인과 동등한 강도를 나타내어 분말도 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 을 대량 사용하여도 실용상에 문제가 없음을 나타내고 있다.

(2) 플레인을 기준으로 한 강도비

〈그림-4〉는 수중양생 플레인 몰탈의 각 재령별 강도를 100으로 한 분말도별 압축강도비를 나타내었다. 각 재령에 있어서 분말도별로 3500, 6000, $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 을 첨가한 경우 플라이애쉬의 첨가량이 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 7일 재령에서 분말도 $3500\text{cm}^2/\text{g}$ 의 경우 모든 치환율에서 강도가 플레인보다 낮으나 분말도 6000, $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 경우 30%까지의 강도가 증가한다. 28일 역시 7일과 비슷한 강도발현의 곡선을 나타내고 있고, 분말도 $3500\text{cm}^2/\text{g}$ 의 경우 치환율 10%, 20%는 플레인 몰탈의 약 97%의 강도발현을



〈그림-4〉 Compressive Strength with Replacement Ratio

하고 있으며, 분말도 6000, 8000cm²/g의 경우 40% 까지 플레인 몰탈보다 우수한 강도발현을 나타내고 있다.

56일 재령에 있어서 3500cm²/g의 경우 치환율

30%까지 플레인보다 우수한 강도의 결과를 나타내고 있으며, 분말도 6000, 8000cm²/g에서는 치환율 10~40%까지 플레인에 비해 110~140%의 강도증진을 나타내고 있으며, 치환율 50%에서도 플레인 몰탈과 비슷한 강도를 나타내고 있다. 따라서, 분말도가 높을수록 플라이애쉬의 치환율을 증가시켜 다량을 사용하여도 강도상에 큰 지장이 없음을 알 수 있다.

다. 증기양생 실험결과

(1) 분말도별 플라이애쉬와 재령과의 관계

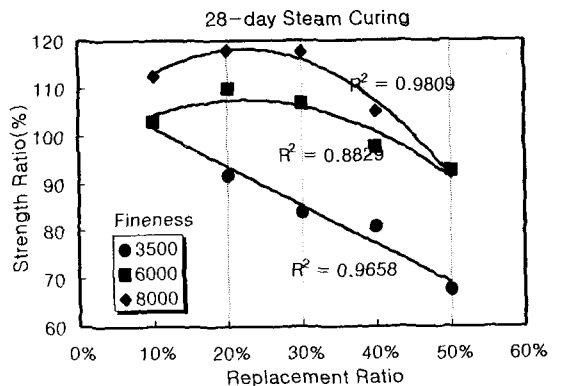
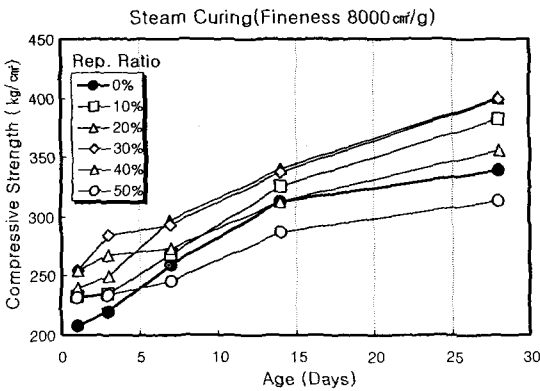
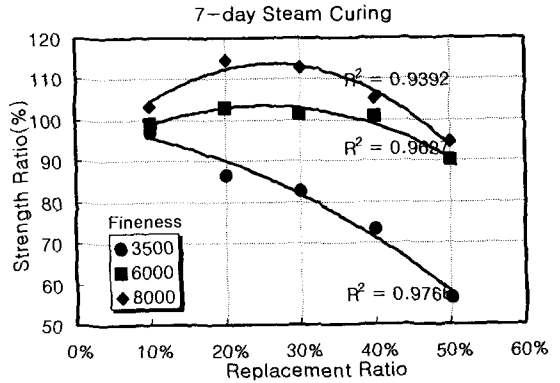
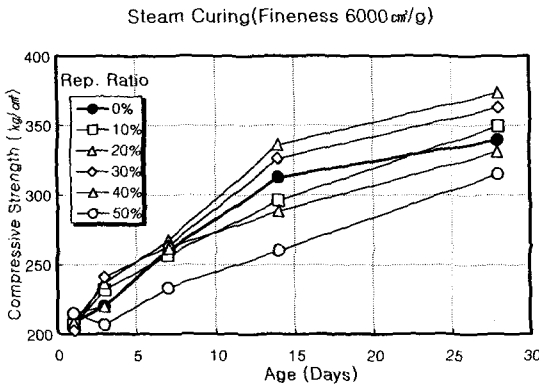
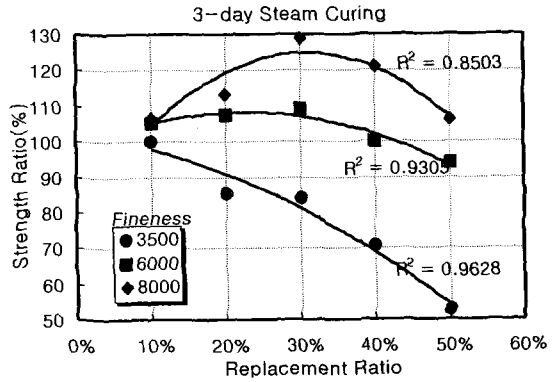
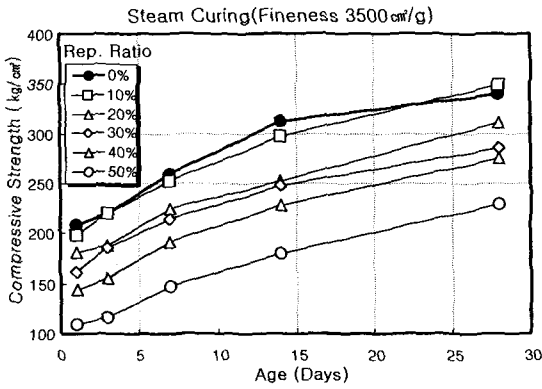
증기양생 결과, 분말도 3500cm²/g에서 치환율이 증가할수록 압축강도는 감소하고 있으며 플레인과 비교하였을 때 재령 28일일때 치환율 10%에서 플레인과 거의 동등한 강도를 나타내었다.

분말도 6000cm²/g에서는 재령 1일의 플라이애쉬를 첨가하지 않은 상태보다도 치환율 10% 보다 높은 강도를 나타내고 있으며 재령이 경과함에 따라서 치환율 30%까지 플레인 몰탈보다 높은 강도를 나타내고 있다. 이는 미분쇄 플라이애쉬의 강도기여 효과에 의한 것으로 생각되어진다. 분말도 8000cm²/g에서는 치환율이 증가함에 따라, 40%까지 플레인보다 높은 강도를 나타내고 있고, 재령이 경과함에 따라서 치환율이 30%에서 가장 높은 강도를 나타내고 있다.

또한 치환율이 50%일 때, 압축강도는 플레인과 비교하여 약간 낮은 90%로 나타내고, 지속적인 강도의 증진을 나타내었다.

(2) 플레인을 기준으로 한 강도비

증기양생을 한 플레인(치환율 0%)의 강도를 100으로 하였을 때의 분말도별 강도비를 〈그림-6〉에 나타내었다.



〈그림-5〉 Compressive Strength with Age (Steam Curing)

〈그림-6〉 증기양생을 한 플레인의 분말도별 강도비

증기양생 3일 재령에서는 분말도 3500cm²/g은 치환율이 10%를 제외하고 모두 플레인보다 강도가 낮았다. 분말도 6000cm²/g에서는 치환율 40%까지

플레인보다 우수한 강도발현을 나타내고, 8000cm²/g서는 모든 치환율에서 플레인보다 우수한 강도발현



을 나타내고 있다.

7일의 재령에서는 분말도 3500cm²/g의 경우 모든 치환율에서 플레인보다 낮은 강도발현을 나타내고, 또한 치환율이 증가할수록 강도는 감소하였다. 분말도 6000cm²/g은 첨가율 40%까지 플레인보다 우수한 강도발현을 나타내고 있고, 또한 분말도 8000cm²/g도 첨가율 40%까지 플레인보다 높은 강도를 나타내었다.

증기양생 28일의 경우 분말도 3500cm²/g에서 10%를 제외한 모든 치환율에서 플레인보다 낮은 강도를 나타내었고, 분말도 6000, 8000cm²/g의 경우 각각 치환율 30, 40%까지 플레인보다 높은 강도발현을 나타내었다.

4. 결 론

이상의 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

- 가. 플라이애쉬의 치환율이 증가할수록 압축강도의 저하의 결과를 나타내며, 치환된 플라이애쉬의 분말도가 높아질수록 압축강도는 증가하였다.
- 나. 플로우 실험의 결과 치환된 플라이애쉬의 분말도가 높아질수록 플로우값은 감소하는 경향을 나타내고 있으며 치환율이 증가할수록 플로우값은 증가됨을 나타내었다.
- 다. 미분쇄된 플라이애쉬의 몰탈의 압축강도는 28일을 기준으로 하여 치환율 40%까지 강도의 플레인 몰탈보다 우수하였으며 분말도 6000cm²/g에서는 20%의 치환율과 분말도 8000cm²/g에서는 30%의 치환율에서 최고강도를 발휘하였다.
- 라. 분말도 8000cm²/g은 치환율 50%의 경우, 시멘트양이 반으로 줄었음에도 불구하고 재령 56일

에서는 플레인과 강도가 같아지며 이는 대량으로 사용하여도 실용상에 큰 문제가 없음을 나타내었다.

- 마. 수중양생과 증기양생의 강도의 비교는 치환율이 초기에서는 증기양생의 강도발현이 우수하였으며 장기재령에서는 수중양생이 우수하였다.
- 바. 따라서 분말도가 높을수록 플라이애쉬 치환율을 증가시켜 대량 사용하여도 강도상의 큰 지장이 없음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 田代忠一, 飯塚信之, 西 武志, “微粉碎 フライアッシュの可能性”, セメント・コンクリート No. 598, Dec. 1996.
2. 原田志津男, 松藤泰典 “フライアッシュフォームを用いた超高強度モルタルの細孔構造”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, 1994.
3. Toshihide Toyofuku, “粒徑の異なるフライアッシュを使用したモルタルの強度特性”, セメント・コン크리트論文集 No. 44, 1990.
4. N. Nakamura, M. Sakai, and R. N. Swamy “Effect of Slag Fineness on the Development of Concrete Strength and Microstructure” SP132-72, 1992 Istanbul Conference.
5. 정재동, “콘크리트 재료공학” pp151~169, 1998.
6. 김영수, 김정환, “시멘트 모르타르 경화체의 고강도화에 미치는 플라이애쉬 입자 크기의 영향”, 콘크리트학회지, Vol. 6, No. 5, 1994.