

OPC-Fly ash-Slag System의 특성

이재한* · 서형남 · 김창률 · 김남중 · 민경소
 <라파즈한라시멘트 기술연구소>

1. 서 론

전력수요의 증가에 의해 1990년대 초반 이후 석탄화력발전소, 특히 유연탄 화력발전소의 확장이 급격히 이루어짐에 따라 석탄회의 발생량은 기하급수적으로 증가하여 2000년도말 현재 유연탄 석탄회가 321만톤, 무연탄 석탄회가 122만톤에 달하고 있다.

국내의 석탄 사용량에 대한 석탄회 발생율은 유연탄의 경우에는 약 10% 정도이나 무연탄의 경우 30~50%에 이르고 있어 한국전력의 증장기 전력수급에 따른 2005년 석탄회 발생량은 570만톤에 이를 것이라 예상하고 있다.

석탄회 재활용율의 경우, 1996년 이후 석탄회 정제공장이 각각의 유연탄 화력발전소에 건설되면서 급격히 증가하여 유연탄 석탄회의 경우 2000년말 현재 발생량의 53%인 171만톤, 무연탄 석탄회의 경우 발생량의 58%인 71만톤이 재활용되고 있다.

석탄회의 재활용 용도로는 콘크리트 혼화재료 145만톤(59.9%), 시멘트 원료로 83만톤(34.4%)으로 재활용 되는 석탄회의 94%를 이상을 차지하고 있으며 기타 시멘트 2차 제품 및 지반성토재 등에 이용되고 있다.

최근 국내에서도 토목·건축구조물의 대형화로

인한 매스콘크리트의 수화열 발생 억제, 레디믹스트 콘크리트에서의 원가절감 및 산업폐기물의 재활용 등의 측면에서 플라이 애쉬의 사용량이 증가되고 있고, 또 플라이 애쉬를 이용한 국내의 혼합시멘트 경우 범용성 혼합시멘트 뿐만 아니라 저발열·고강도 콘크리트의 모재 및 특수용도로써의 적용성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

따라서 본 연구는 플라이 애쉬를 이용한 OPC-Fly ash계의 2성분계 및 OPC-Fly ash-Slag powder의 3성분계의 혼합시멘트에 대해 혼합재의 배합비율에 따른 물리적인 성능 변화를 검토하여 특수 용도로의 적용 가능성 및 대량 수요처로서의 용도를 모색하고자 기초실험을 실시하였다.

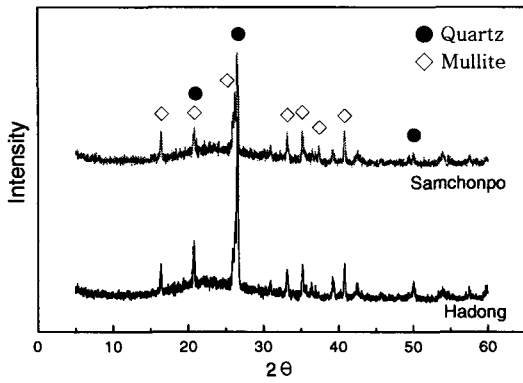
2. 실 험

2.1 출발원료

<표 1>에 실험에 사용된 시멘트, 플라이 애쉬 및 고로슬래그 미분말의 화학성분을 나타내었으며, <그림 1>에는 본 실험에 사용된 플라이 애쉬의 XRD 분석 결과로써 산지가 다른 종류와 비교하여 나타내었다.

<표 1> 출발원료의 화학성분

구 분	Ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
OPC	1.39	21.37	5.38	2.91	63.09	2.37	2.10	-	-
Fly ash	2.91	60.52	25.72	4.31	3.24	0.98	0.15	0.23	1.12
Slag powder	0.59	33.13	15.36	0.36	42.12	4.92	2.94	-	-



〈그림 1〉 플라이 애쉬의 XRD 분석결과

사용된 재료는 L사 보통포틀랜드시멘트, 플라이 애쉬는 하동 화력발전소산으로서 Ig-loss가 연평균 4% 수준인 것을 감안하여 정제공정을 거치지 않은 것을 사용하였으며 Slag powder는 L사

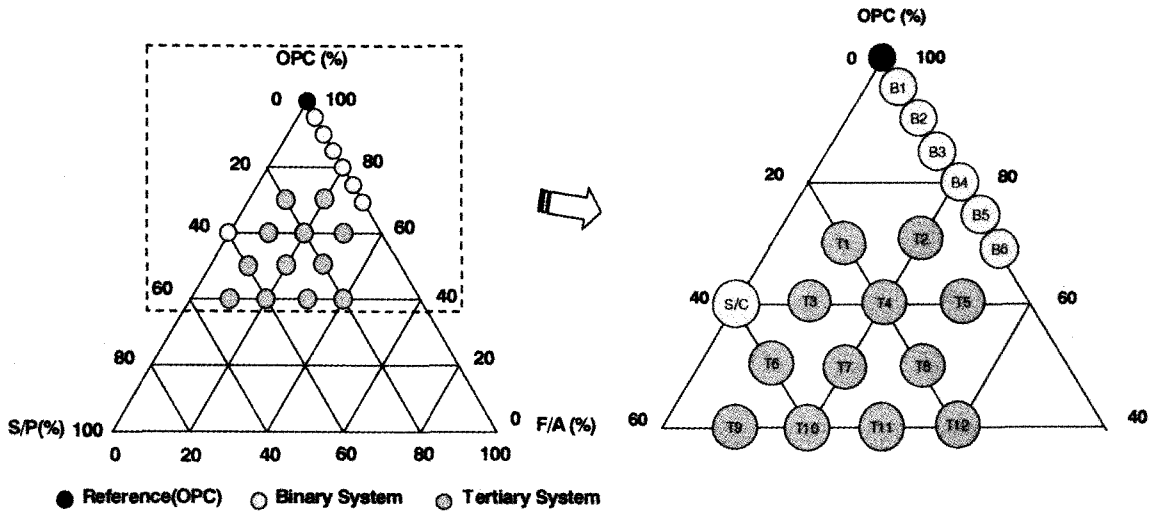
광양 슬래그 공장에서 생산되고 있는 미분말을 사용하였다. 보통포틀랜드시멘트, 플라이 애쉬 및 슬래그 미분말의 분말도는 각각 3,410, 4,710 및 3,630 cm^2/g 이었다.

플라이 애쉬의 화학분석 결과 강열 감량이 2.91인 것으로 미루어 보아 미연소 탄소가 상당히 낮은 양호한 상태일 것으로 판단된다.

또한 〈그림 1〉의 플라이 애쉬의 XRD 비교분석 결과에서 플라이 애쉬의 주성분이며 물리성능에 가장 큰 영향을 미치는 Quartz peak가 타산지 플라이 애쉬에 비해 Intensity가 크게 나타나고 있어 잠재 수경성이나 시멘트 혼합재료로서의 물성 향상이나 활용성이 뛰어나는 것으로 판단된다.

2.2 실험 방법

〈그림 2〉에 2성분계 및 3성분계 혼합시멘트의



〈그림 2〉 2성분계 및 3성분계 혼합시멘트 조성비

〈표 2〉 2성분계 및 3성분계 혼합시멘트의 제조 혼합비

(a) 2성분계

구 분	Ref.	S/C	B1	B2	B3	B4	B5	B6
OPC	100	60	95	90	85	80	75	70
Fly ash	0	40	5	10	15	20	25	30

(b) 3성분계

구 분	Ref.	S/C	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
OPC	100	60	70	70	60	60	60	50	50	50	40	40	40	40
Slag/P	0	40	20	10	30	20	10	40	30	20	50	40	30	20
Fly ash	0	0	10	20	10	20	30	10	20	30	10	20	30	40

혼합범위를, <표 2>에는 혼합비를 나타내었다.

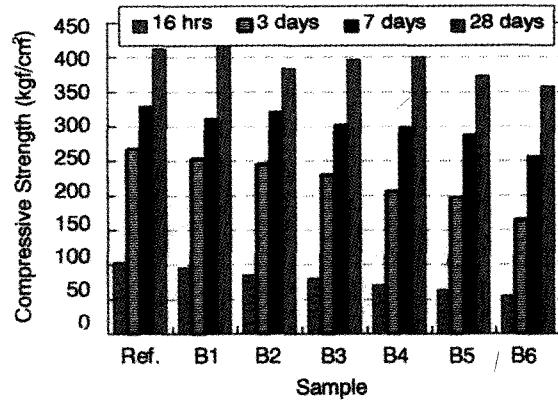
2성분계는 플라이 애쉬 혼합을 5~30%로 치환하여 물성을 관찰하였고 3성분계의 혼합비는 현재 국내 업계에서 생산 판매되고 있는 제품의 통상적인 조성 범위내에서 선택하였으며, 또한 레미콘 업체에서 혼합재로서 가장 일반적으로 사용하고 있는 범위이기도 하다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 2성분계 혼합시멘트

2성분계 혼합시멘트의 물리실험 결과를 <표 3>, <그림 3> 및 <그림 4>에 각각 압축강도, 주도, Flow 및 응결시간을 나타내었다.

플라이 애쉬 첨가량이 증가할수록 16시간 및 3일은 현저한 강도저하를 나타내고 있다. 그러나 7일 이후부터는 소량 치환된 혼합시멘트부터 강



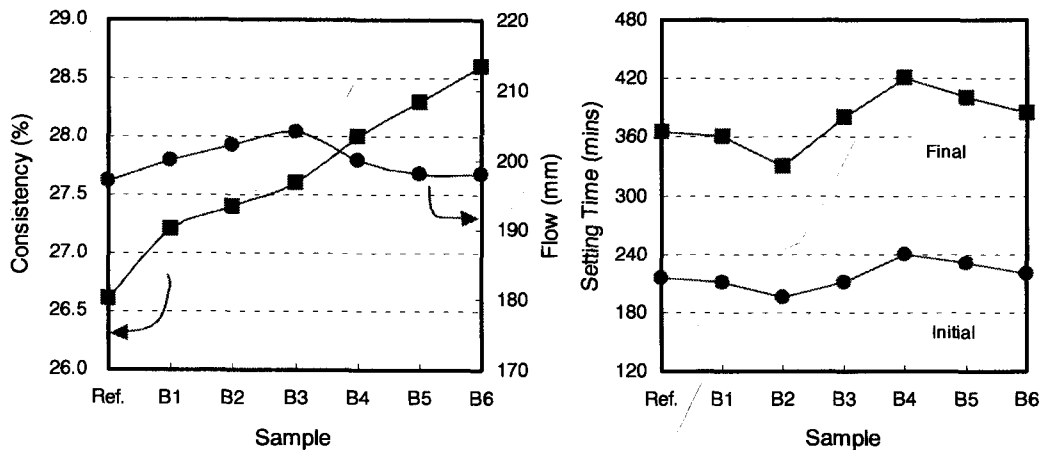
<그림 3> 2성분계 혼합시멘트의 압축강도 시험 결과

도회복을 보이고 있으며, 주목할만한 것은 플라이 애쉬 치환량이 15 및 20%인 시멘트의 경우는 28일 강도발현이 가장 높게 나타나고 있고 OPC의 강도값에 근접한 결과를 얻었다.

시험결과에서 플라이 애쉬의 포졸란 반응에 따

<표 3> 2성분계 혼합시멘트의 물리특성

Sample	주도 (%)	Flow (mm)	응결시간 (hr : min)		압축강도 (kgf/cm²)			
			초 결	종 결	16hrs	3days	7days	28days
Ref.	26.6	197	215	6 : 05	103	267	329	412
B 1	27.2	200	210	6 : 00	95	253	312	418
B 2	27.4	202	195	5 : 30	85	245	321	384
B 3	27.6	204	210	6 : 20	80	230	303	396
B 4	28.0	200	240	7 : 00	70	206	299	400
B 5	28.3	198	230	6 : 40	63	197	288	373
B 6	28.9	198	220	6 : 25	55	165	257	357



<그림 4> 2성분계 혼합시멘트의 주도, Flow 및 응결시간

라 중기 이후의 강도발현율은 혼합율이 증가할수록 크게 나타나고 있다.

또한 가장 널리 사용되고 있는 혼합재 중 Slag powder는 일정량 혼합했을 경우 대략 14일부터 OPC 단독강도를 넘어서는 것이 일반적이지만 플라이 애쉬의 경우는 28일 이후에 OPC의 강도를 넘어서는 특징을 가지고 있다.

따라서 플라이 애쉬 첨가량이 많은 경우는 28일 이후의 장기 강도값은 훨씬 우수하게 나타날 것으로 예상할 수 있다. 주도는 플라이 애쉬의 첨가량이 증가할수록 상승하며 Flow는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

주도의 상승원인은 혼합시멘트 중의 플라이 애쉬량 증가로 인한 미연소 탄소량의 증가와 비표면적의 상승으로 인한 초기 흡착수의 증가에 기인하는 것으로 추정된다.

응결시간은 초결과 종결 공히 동일한 경향을 나타내고 있으며 플라이 애쉬 10% 첨가시 가장 짧고 20% 첨가시 가장 지연되었다.

3.2 3성분계 혼합시멘트

〈표 4〉에 3성분계 혼합시멘트의 물리특성을, 〈그림 5, 6〉 및 〈그림 7〉에 각각 압축강도, 주도, Flow 및 응결시간을 나타내었다.

〈그림 5〉의 압축강도 실험결과에서 플라이 애쉬 첨가량을 20%로 고정시키고 OPC 대신에 Slag powder를 10%씩 대체시켜 시험한 결과(a), 초기(16시간, 3 및 7일)에는 Slag powder의 첨가량이 많을수록 강도치가 낮게 나타나지만, 약 2주(15일) 이후에는 반전되어 28일에서는 Slag powder의 첨가량이 증가할수록 강도값이 높게 나타났다.

OPC를 동일한 양으로 놓고(60%) 플라이 애쉬와 Slag powder를 변화시키면(b), 전반적인 경향은 플라이 애쉬 첨가량의 증가에 따라 강도값은 저하되었다.

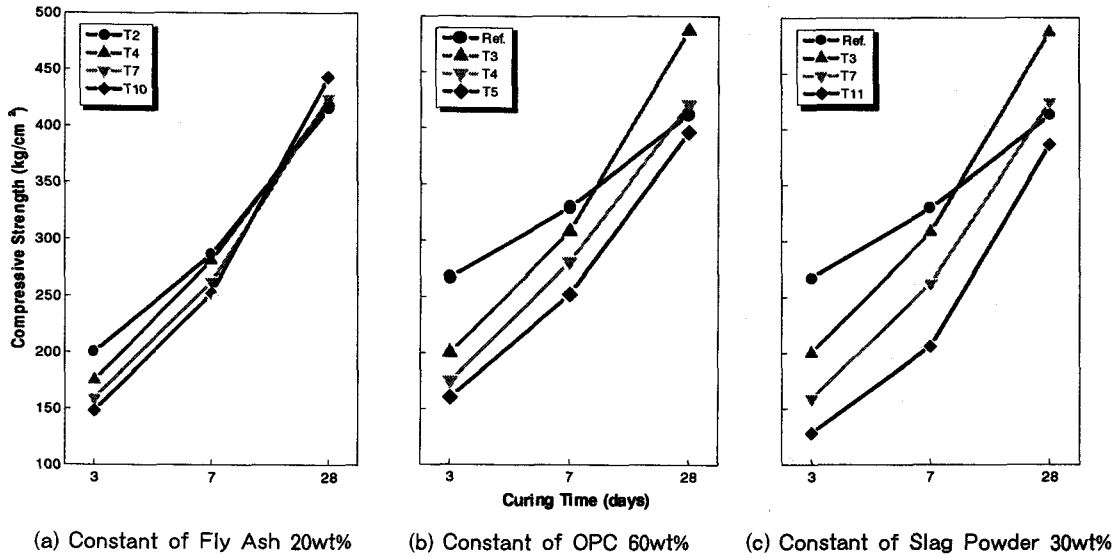
그러나 Slag powder 첨가량이 10%의 경우에는 보통포틀랜드시멘트(Reference)에 비해 초기 강도는 낮게 나타나지만 7일 이후에는 반전되어 28일 강도값은 큰 차이를 보이고 있다.

따라서 플라이 애쉬의 첨가율이 20 및 30%의 경우에는 28일 강도값이 Reference와 비슷하거나 낮게 나타나고 있고 초기재령의 강도값을 감안할 때 OPC 60% 첨가의 경우 플라이 애쉬 첨가량이 10% 일 때가 변곡점인 것으로 생각된다.

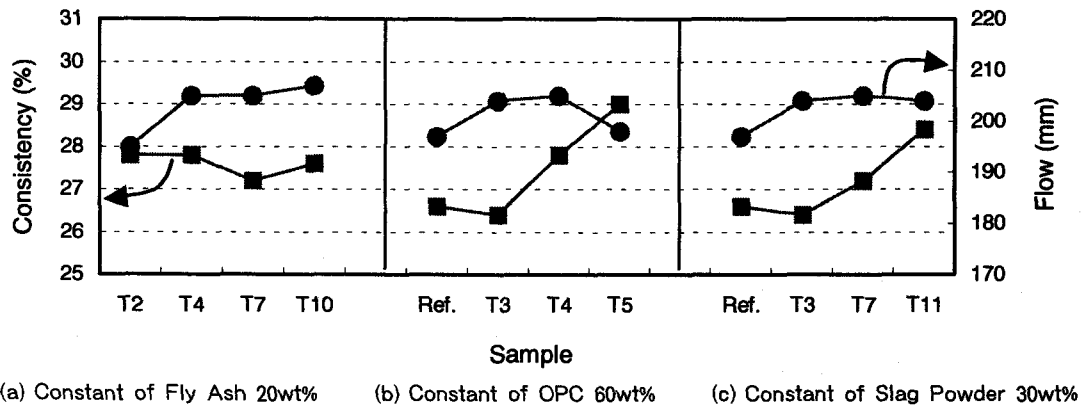
Slag powder를 30%로 고정하고 OPC를 플라이 애쉬로 대체시킨 경우(c), 실험(b)와 동일한 결과를 나타내고 있으며 혼합재 총량이 50% 이상

〈표 4〉 3성분계 혼합시멘트의 물리특성

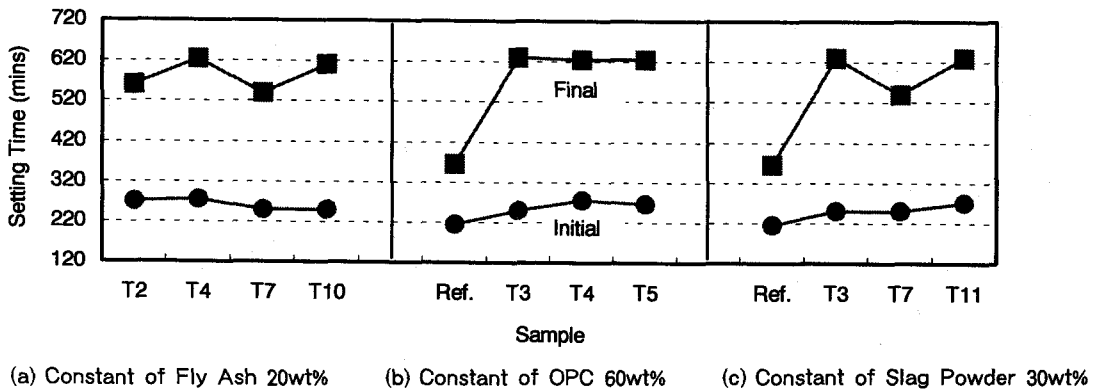
Sample	주도 (%)	Flow (mm)	응결시간 (hr : min)		압축강도 (kgf/cm ²)			
			초결	종결	16hrs	3days	7days	28days
Ref.	26.6	197	215	6 : 05	103	267	329	412
Slag/C	25.8	208	260	8 : 20	55	230	337	508
T 1	27.0	205	230	7 : 40	54	230	319	454
T 2	27.8	195	270	9 : 20	54	219	286	415
T 3	26.4	204	250	10 : 30	42	200	308	487
T 4	27.8	205	275	10 : 25	46	200	281	421
T 5	29.0	198	265	10 : 25	33	175	252	396
T 6	26.4	210	270	9 : 10	34	160	285	451
T 7	27.2	205	250	9 : 00	44	164	262	424
T 8	28.0	204	275	9 : 20	41	159	241	393
T 9	26.4	207	260	10 : 10	34	161	281	468
T 10	27.6	207	250	10 : 10	32	148	252	443
T 11	28.4	204	270	10 : 30	24	128	206	386
T 12	29.4	205	290	11 : 40	24	110	181	339



〈그림 5〉 3성분계 혼합시멘트의 압축강도 실험 결과



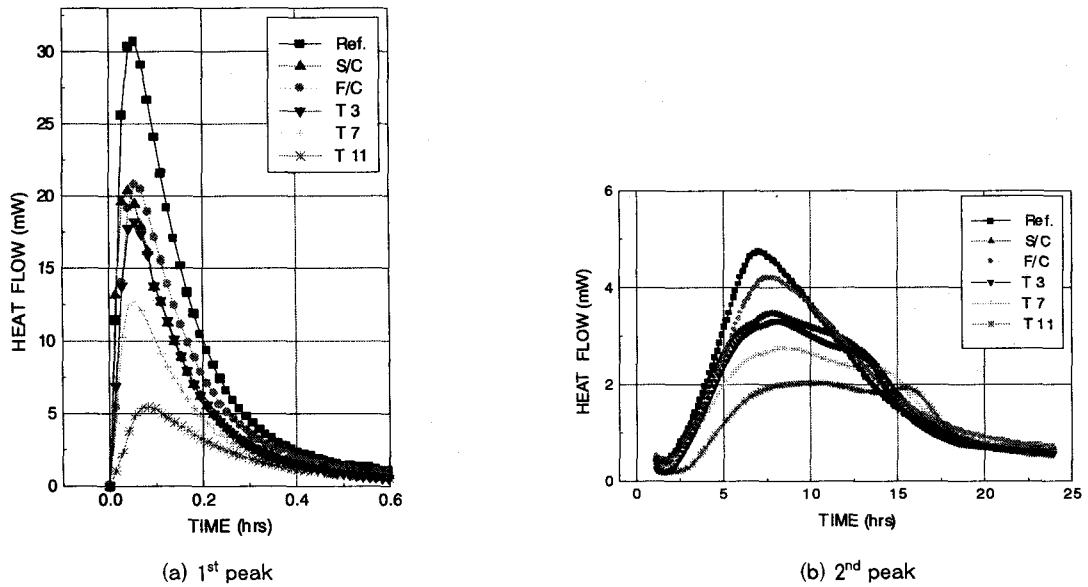
〈그림 6〉 3성분계 혼합시멘트의 주도 및 Flow



〈그림 7〉 3성분계 혼합시멘트의 응결시간

이 되면 3일 강도값이 150kgf/cm 이하로 낮아지고 후기강도(28일)도 낮아 사용상 문제가 야기될

것으로 판단된다. 주도 및 Flow는 실험 결과(〈그림 6〉)에서 Slag powder량의 증가에 따라 분말



〈그림 8〉 혼합시멘트의 미소수화열 실험 결과

도 상승의 영향으로 주도는 상승하지만 Flow는 큰 변화가 없었다(a). Slag powder를 플라이 애쉬로 치환시킨 결과(b), 치환량이 증가될수록 Flow가 증가되었다. 즉, 주도는 플라이 애쉬의 유무와 혼합율에 비례하여 소요의 단위수량이 감소되는 경향을 나타내고 있다. Slag powder를 30%로 고정된 (c)의 경우도 (b)와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

전반적으로 OPC에 비해 혼합재 첨가시 응결이 지연되고 있으며 Slag powder 첨가량 증가에 따른 응결지연 현상은 경향이 없었다(a). Slag powder 첨가량을 고정시키고 OPC를 플라이 애쉬로 대체한 경우(c) 초결은 약간 상승하지만 종결의 영향은 크지 않았다.

위의 〈그림 8〉은 혼합시멘트의 미소수화열 측정 결과이다. 보통포틀랜드시멘트 부분을 플라이 애쉬로 대체함에 따라 1st 수화열 피크는 작아지며 시멘트의 alite의 수화속과 시멘트의 응결과 관계하는 2nd peak도 완만해지고 지연되게 나타났다.

4. 결 론

1) 2성분계 혼합시멘트

플라이 애쉬 치환량 증가에 따라 16시간 및 3일 재령에서의 압축강도는 두드러지게 감소하였지만, 7일 이후 재령에서는 감소폭이 좁아졌다. 또한 플라이 애쉬 치환량이 증가할수록 주도는 상승하였고, Flow와 응결시간은 큰 변화가 없었다. 또 플라이 애쉬를 20% 치환 첨가한 경우, 보통 포틀랜드시멘트와 비슷한 물성수준을 나타내므로 범용성 시멘트로의 사용이 가능한 것으로 판단된다.

2) 3성분계 혼합시멘트

플라이 애쉬 첨가량을 20%로 고정했을 때, 슬래그 첨가량이 증가할수록 압축강도는 초기 재령에서 감소하지만 28일에는 증가하였다. 주도와 응결은 큰 변화가 없었으며 Flow는 약간씩 증가하였다. OPC 함량 60% 및 슬래그 함량 30% 고정시, 플라이 애쉬 첨가량 증가에 따라 압축강도는 하락하였으며 무첨가 조성에 비해 28일 압축강도 값은 동등 또는 그 이상의 값을 나타냈다. 주도는 전반적으로 상승하였고, 종결시간은 무첨가 조성에 비해 다소 길게 나타났다.

본 실험을 통해 나타난 3성분계의 최적 조성은 OPC : Slag powder : Fly ash가 60 : 30 : 10이었으며, 이때의 28일 압축강도는 487kgf/cm², Flow 204mm이었다.

<참 고 문 헌>

1. 한국전력공사 자료.
2. 内川浩, 羽原俊祐, 混合セメントモルタル及びコンクリートの硬化體構造が強度發現性狀に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No. 44, pp. 330~335, 1990.
3. Richard Helmuth, Fly Ash in Cement and Concrete, Portland Cement Association, 1987.
4. Geoffrey Frohnsdorff, Blended cements, ASTM Special Tech. Pub. 798, 1984.
5. 金澤克義, 近松龍一, 高爐スラグ微粉末, フライアッシュが低發熱コンクリートの諸性質に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No. 46, pp. 180~185, 1992.