

C급 플라이애쉬 재활용을 위한 KS기준 제안

朴 沘 林

〈(株) 大宇建設 技術研究所 所長, 工博〉

權 寧 鎬

〈(株) 大宇建設 技術研究所 前任研究員〉

李 相 洙

〈(株) 大宇建設 技術研究所 主任研究員〉

1. 序言

최근, 정부에서는 에너지 공급원의 다변화 및 효율화 촉진정책을 추진하면서 기존의 화력발전소 외에 공업단지 및 인구밀집 주거단지 내에 열병합발전소를 신설 또는 증설하고 있으며, 이에 따라 산업부산물로 막대한 양의 플라이애쉬가 발생되고 있다. 이러한 산업부산물은 환경적인 측면뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 큰 문제를 안고 있기 때문에, 자원의 재활용이라는 측면에서 해결해야 할 당면과제로 대두되고 있다.

또한, 화력발전소에서 생성되는 플라이애쉬와 마찬가지로 열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬의 처리문제도 발전소의 운영 및 신규 증설에 큰 영향을 미치기 때문에, 플라이애쉬를 활용할 수 있는 방안을 적극적으로 모색하지 않으면 안된다.

특히, 통상산업부에서 제정한 “자원절약과

재활용 촉진에 관한 법률(제9조)”에 따르면, 산업부산물의 연도별 재활용율을 증대하도록 明文化하여 이를 정책적으로 권장하고 있기 때문에, 산업부산물의 배출과 관련된 산업분야에서는 이에 대한 처리 및 재활용 방안이 필요하다.

현재 국내의 화력발전소에서 생성되는 플라이애쉬를 ASTM 기준에 따라 분류하면⁽¹⁾ F급에 속하며, KS기준도 F급 플라이애쉬의 품질성능을 규정하고 있다. 울산 열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬의 경우에는 화학적 성분이 ASTM 기준에서 C급으로 분류하는 플라이애쉬의 특성을 갖고 있으며, 이러한 C급 플라이애쉬를 건설산업의 콘크리트 분야에 사용할 경우 매우 우수한 특성을 갖는다는 것은 여러 가지 시험을 통해 입증된 바 있다.^{(2),(3),(4)}

그러나, 국내의 KS기준은 F급 플라이애쉬에 관한 품질만을 규정하고 있기 때문에, 국

내에서 생성되는 C급 플라이애쉬를 건설산업에 再活用하기 위해서는 KS기준에 C급 플라이애쉬 규준을 도입하는 제도적 장치가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 KS기준에 규정되지 않은 C급 플라이애쉬의 규준을 도입하기 위한 방안으로 울산 열병합발전소에서 생성되는 C급 플라이애쉬에 대해 ASTM 기준에 따라 화학성분 및 물리적 성질 등을 검토·분석하였으며, 결과를 통해 규준도입을 위한 자료로 제안하고자 한다.

2. 각국의 플라이애쉬 규준 비교

2.1 ASTM 규준

1994년에 개정된 ASTM C 618은 [표 1]에서 나타난 바와 같이 플라이애쉬의 화학성분 및 물리적 특성에 따라 N급, C급, F급 플라이애쉬로 분류하고 있다.

[표 1] 플라이애쉬 품질규준 (ASTM C 618)

품질항목	구분(%)		
	F급 규준	N급 규준	C급 규준
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO ₃	≤ 5.0	≤ 4.0	≤ 5.0
강열감량	≤ 6.0	≤ 10.0	≤ 6.0
습분	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 3.0
알칼리 Na ₂ O	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5
분말도(45μm 잔류)	≤ 34	≤ 34	≤ 34
단위수량비	≤ 105	≤ 115	≤ 105
강도활성지수	≥ 75	≥ 75	≥ 75
7일(28일)	≥ (75)	≥ (75)	≥ (75)

여기서, N급은 Natural Pozzolan 재료로 화산재와 같은 광물에서 제조된 것이며, F급은 시멘트 수화생성물과 실리케이트 및 알루미늄이네이트가 2차반응을 하는 포졸란 특성을 갖는 재료이다. 이에 비해 C급 플라이애쉬는

포졸란 특성 외에도 시멘트와 같은 수경성을 갖는 재료이기 때문에 水和度 및 반응메카니즘이 매우 다르다.

특히, 이를 SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃와 같은 산화물의 함유량으로 분류하면, 산화물의 함유량이 70%이상이고 CaO함량이 10%미만인 경우에는 F급 플라이애쉬, 산화물 함유량이 50%이상이고 CaO함량이 10%이상인 경우 C급 플라이애쉬로 규정되어 있다.

따라서, C급 플라이애쉬는 CaO함량이 상대적으로 높기 때문에 포졸란 특성 및 水硬性을 기대할 수 있으며, 일반적으로 외국의 경우에는 C급 플라이애쉬를 건설재료로 많이 사용하고 있다.

2.2 JIS 규준

JIS규준도 개정전에는 ASTM C 618의 F급에 가까웠으나, 1996년에 개정된 플라이애쉬 규준은 [표 2]와 같이 대폭적으로 수정되었다.

[표 2] 플라이애쉬의 품질규준(JIS A 6201)

항 목		JIS A 6201
이산화규소(%)		≥ 45
습 분(%)		≤ 1.0
강열감량(%)		≤ 5.0
비 중		≥ 1.95
분말도	45μm 잔류(%)	≤ 40
	比表面積(cm ² /g)	≥ 2,400
플로우비(%)		≥ 92
활성도지수(%) / 28일(91일)		≥ 80(≥ 90)

특히, 개정전에는 산화물의 총함유량을 규정하였지만, 개정을 통해 이산화규소(SiO₂)의 총량만을 규정하였다.

또한, 분말도의 평가는 체가름시험 및 블레인법에 의한 비표면적을 검용하도록 하였으

며, 단위수량비도 플로우 시험으로 평가하도록 개정하였다.

그러나, JIS A 6201은 F급 플라이애쉬에 관한 규정만을 도입하고 있기 때문에²⁾, C급 플라이애쉬의 경우에는 JIS규준을 준용하기 어렵다.

2.3 KS 규준

현재 국내의 플라이애쉬에 대한 규준은 [표 3]과 같이 KS L 5405에 규정되고 있다.

[표 2] 플라이애쉬의 품질규준 JIS A 6201

항 목	KS L 5405
아산화규소(%)	≥ 45
습 분(%)	≤ 1.0
강열감량(%)	≤ 5.0
비 중	≥ 1.95
比表面積(cm ² /g)	≥ 2,400
단위수량비(%)	≤ 102
압축강도비(%) 28일(91일)	≥ 60 ≥ (270)

KS규준에 규정된 플라이애쉬 규준의 개정과정을 보면, 1987년도에 개정판에서는 ASTM C 618규준의 F급으로 분류된 규격을 준용하였다. 그러나, 최근에 개정된 1992년 규준의 경우에는 JIS A 6201규준을 준용하는 것으로 나타났다.

따라서, 현행 KS규준도 JIS규준과 마찬가지로 C급 플라이애쉬에 대한 규준이 정립되어 있지 않기 때문에, 향후 열병합발전소에서 생성되는 C급 플라이애쉬를 재활용하기 위해서는 새로운 규준도입이 필요한 실정이다.

3. 플라이애쉬의 특성 분석

본 연구는 열병합발전소의 플라이애쉬를

건설산업의 콘크리트 재료로 재활용하기 위한 일환으로 반월, 울산 등의 공업단지내 열병합발전소에서 시료를 채취하여 성분분석을 실시하였다.

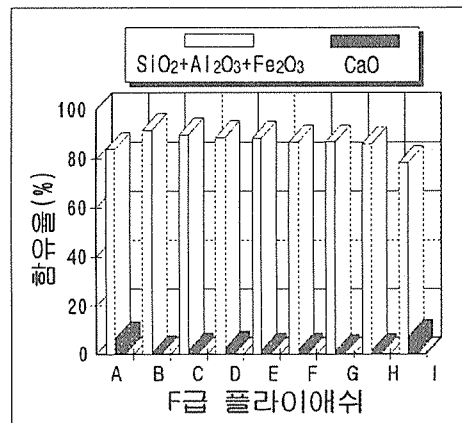
분석결과, 비교적 우수한 것으로 판명된 울산석유화학 공업단지내 열병합발전소의 플라이애쉬를 본 연구의 재활용 시료로 선정하였으며, 분석결과는 다음과 같다.

3.1 화학적 성분

3.1.1 SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ 함유량

ASTM C 618에 규정된 플라이애쉬에 대한 차이점으로 가장 두드러지는 성분은 산화물의 함유량이다. F급 플라이애쉬의 경우에는 산화물의 함유량이 70%이상으로 규정되어 있으며, 국내산 화력발전소의 플라이애쉬는 대부분 산화물의 함유량이 90%를 넘는 것으로 조사되었다.

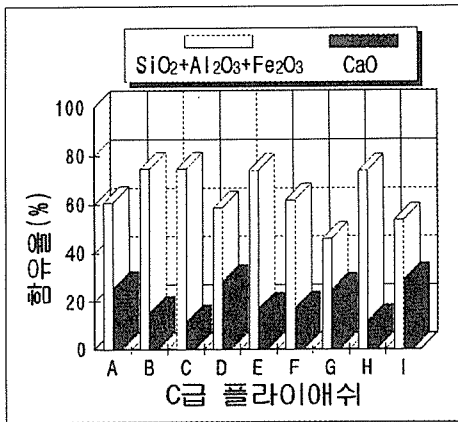
[그림 1]은 국내 및 해외에서 연구된 F급 플라이애쉬의 성분중에서 (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃)함유량 및 CaO함량을 나타낸 것이다. 대부분의 F급 플라이애쉬에서 산화물의 함유량이 80%이상인 것으로 나타난 반면에, CaO함량은 거의 5%이하인 것으로 나타났다.



[그림 1] F급 플라이애쉬의 산화물 함유량

그러나, C급 플라이애쉬의 경우에는 산화물의 함유량이 45~70%범위로 F급보다 작은 반면에 CaO함량은 10~30%정도로 크게 나타났다.

울산 열병합발전소의 플라이애쉬도 CaO 함량이 약 25%정도를 나타내고 있는 것으로 분석되었다.



(그림 2) C급 플라이애쉬의 산화물 함유량

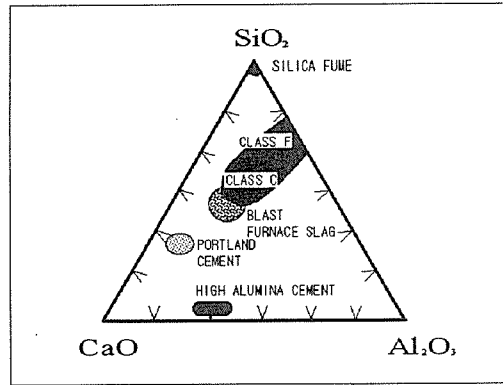
이러한 차이는 원탄의 종류에 따라 구분하는 것이 일반적이지만, 유연탄을 동일하게 사용하고 있는 화력발전소와 열병합발전소의 현상을 고려할 때 발전소의 연소온도 및 연소시스템, 그리고 연소시의 처리단계에 따라 구분하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

울산 열병합발전소의 경우에는 대기에 방출되는 SO_x를 줄이기 위한 탈황시스템이 설치되어 있으며, 탈황반응을 위해 연소시에 Limestone을 첨가하기 때문에 CaO함량이 높은 편이다.

그러나, Limestone의 함량이 매우 적기 때문에 인위적인 CaO주입으로 볼 수는 없으며, 낮은 연소온도와 함께 평가해야 할 것이다.

울산 열병합발전소에서 생성되는 C급 플라이애쉬의 화학조성은 [그림 3]과 같이 삼각좌

표를 이용하여 분석할 때, 고로슬래그 미분말 및 포틀랜드 시멘트의 化學組成과 유사한 것으로 나타났다.



(그림 3) 삼각좌표에 따른 포졸란의 화학조성

따라서, 울산 열병합발전소의 C급 플라이애쉬는 CaO함량이 높기 때문에, 초기재령의 수화반응 및 장기재령의 포졸란 반응을 동시에 기대할 수 있으며, 강도확보에 유리할 것으로 사료된다.

3.1.2 습분

울산 열병합발전소에서 생성되는 C급 플라이애쉬의 습분함량은 약 1%정도로 나타났는데, 이는 플라이애쉬를 저장 또는 운반하는 과정에서 함유된 것으로 평가된다. 그러나, 플라이애쉬의 습분에 관한 각국의 규준은 1~3%범위로 규정되어 있기 때문에, 열병합발전소 플라이애쉬의 습분함량에 따른 문제는 없을 것으로 평가된다.

3.1.3 강열감량

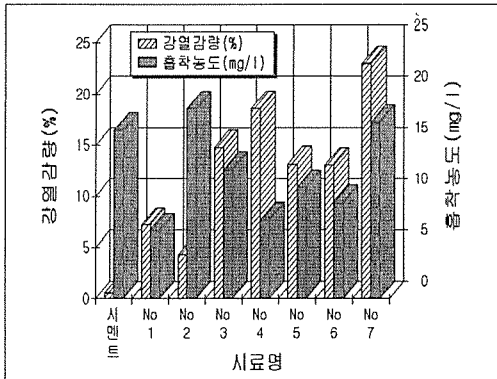
일반적으로 강열감량이 높다는 것은 플라이애쉬 성분중에 미연탄소 함량이 높은 것으로 알려져 있다. 따라서, 미연탄소 함량이 높은 플라이애쉬를 콘크리트에 사용하게 되면, 미연탄소 성분이 굳지않은 콘크리트내의 AE

제를 흡착하기 때문에 공기연행이 어려울 뿐만 아니라, 콘크리트의 내구성 확보하기 어렵다고 한다.

그러나, 울산 열병합발전소의 경우, 연소온도가 850~950℃ 정도로 화력발전소에 비해 매우 낮기 때문에, 강열감량 시험에서 연소되는 성분의 전량을 미연탄소로 간주하기는 어렵다.

지금까지 제안된 미연탄소 함량을 측정하는 방법은 흡광도 검량선에 의한 메틸렌블루 흡착량 시험¹⁰⁾이 있는데, 흡착농도를 비교하여 미연탄소 함량을 추정할 수 있다.

[그림 4]는 보통 포트랜드 시멘트와 열병합발전소의 C급 플라이애쉬에 대한 메틸렌블루 흡착량을 측정한 결과를 나타낸 것이다.



[그림 4] 강열감량과 메틸렌블루 흡착농도

강열감량이 거의 1% 정도로 낮은 보통 포트랜드 시멘트의 경우는 메틸렌블루 흡착농도가 15mg/l 이상인 반면에, 강열감량이 평균 7% 정도로 높은 C급 플라이애쉬의 흡착농도는 오히려 시멘트보다 낮게 측정되었다.

이는 플라이애쉬의 강열감량을 미연탄소 성분으로 동등하게 취급하기 어렵다는 것을 의미하며, 향후 메틸렌블루 흡착농도로 콘크리트의 공기량 흡착관계를 규명하는 것이 바람직하다. 또한, 규준에도 흡착시험으로 판정

하는 방안이 필요할 것으로 사료된다.

이상과 같은 화학적 성분에 대해 국내에서 생성되는 대표적인 C급 및 F급 플라이애쉬의 화학적 성분을 정리하면 [표 4]와 같다.

[표 4] 플라이애쉬의 화학적 성분

구분 성분(%)	울산 열병합 발전소	보령화력 발전소	KS 기준 (F급)	ASTM 기준 (C급)
SiO ₂	32.9	56.4	45이상	50이상
Al ₂ O ₃	13.8	23.7	-	
Fe ₂ O ₃	11.8	9.0	-	
CaO	27.8	2.50	-	-
MgO	1.32	1.34	-	-
Na ₂ O	0.61	0.25	-	1.5이하
K ₂ O	0.62	0.80	-	-
SO ₃	5.88	1.12	-	5.0이하
강열감량	4.67	3.57	5.0이하	6.0이하

울산 열병합발전소의 C급 플라이애쉬도 보일러 가동 초기에 비해 강열감량이 안정화되어 계속 감소되는 추세를 나타내고 있으며, 화학적 성분은 ASTM 규준을 만족하는 것으로 나타났다.

3.2 물리적 특성

3.2.1 비중 및 분말도

플라이애쉬의 비중은 철분의 함량이 클수록 증가하며, 탄소량이 증가하면 감소한다. 또한, C급 플라이애쉬의 구형율은 F급보다 낮기 때문에, 비중이 높은 편이다. 열병합발전소 C급 플라이애쉬의 비중은 약 2.4~2.8 정도로 F급 플라이애쉬에 비해 높은 편이다.

또한, F급 플라이애쉬의 분말도는 2,360~6,430cm²/g 범위로 광범위한 반면에, 울산 열병합발전소 C급 플라이애쉬의 분말도는 평균 2,680cm²/g으로 약간 낮은 값을 나타내고 있

다. 이는 발전소의 연소온도 및 연소 시스템의 영향이며, 분말도가 콘크리트의 시공성 및 수밀성, 강도 등에 영향을 주기 때문에 KS규준에서는 2,400cm²/g 이상으로 규제하고 있다.

3.2.2 단위수량비 및 압축강도비

울산 열병합발전소의 연소온도는 850℃ 정도로 화력발전소의 연소온도(약 1,100℃)보다 낮기 때문에, 생성되는 플라이애쉬의 입형이 불규칙하며 구형율이 낮아 단위수량비가 증가한다. 따라서, 콘크리트에 사용할 때, 단위수량을 조정하는 것이 필요하다.

또한, 열병합발전소의 C급 플라이애쉬에는 수경성 물질인 CaO 함량이 높기 때문에, 초기 수화생성물이 증가되어 강도발현이 F급 플라이애쉬에 비해 높게 나타났다. 따라서, 단위수량비 및 압축강도비를 적절히 조절하여 시멘트 대체재로 다량 혼입할 수 있기 때문에, High Volume Fly Ash로 사용할 수 있을 것이다.

[표 5]는 국내에서 생성되는 대표적인 C급 및 F급 플라이애쉬의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

[표 5] 플라이애쉬의 물리적 특성

구분 \ 특성	울산 열병합 발전소	보령화력 발전소	KS 규준 (F급)	ASTM 규준 (C급)
단위수량비(%)	103	99	102이하	105이하
압축강도비(%)	113	95	60이상	75이상
비중	2.69	2.21	1.95이상	1.95이상
분말도(cm ² /g)	2,470	3,158	2,400이상	2,400이상
습분(%)	0.10	0.19	1.0이하	3.0이하
구속수비	1.10	1.03	초유동 콘크리트	

울산 열병합발전소의 C급 플라이애쉬에 대한 물리적 특성시험 결과, 대부분 ASTM C 618규준을 만족하는 것으로 나타났다. 특

히, 초유동 콘크리트에서 결합재로 사용할 경우에 유동성을 평가하는 구속수비 시험결과를 고려하여 단위수량 또는 고성능 감수제 첨가량을 증대시켜야 할 것이다.

4. C급 플라이애쉬 콘크리트의 특성

4.1 시공성

울산 열병합발전소의 C급 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 施工性은 단위수량과 高性能 減水劑의 첨가량을 조절하여 우수한 성능을 확보할 수 있었다. 특히, 운반시간에 따른 경시변화 특성이 매우 우수하여 슬럼프 손실을 대폭 줄일 수 있었다.

또한, 콘크리트의 粘性增大와 더불어 재료 분리 저항성을 크게 향상시킬 수 있기 때문에, 우수한 流動性·充塡性·材料分離 抵抗性 등이 요구되는 高性能 콘크리트의 開發에도 活用될 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 최적배합조건

열병합발전소의 플라이애쉬는 고강도 콘크리트보다 일반강도 콘크리트 범위에 사용하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

따라서, 일반적으로 가장 많이 사용되는 설계기준강도 240~270kg/cm² 범위의 콘크리트를 제조하기 위한 최적배합은 물/결합재비 45%, 단위수량 185kg/m³ 및 잔골재율 45~47% 정도이며, 이때 플라이애쉬의 치환율은 시공성 및 강도발현 등을 고려하여 30% 정도로 정하는 것이 가장 합리적인 것으로 나타났다.

초유동 콘크리트의 경우에는 점성이 우수하기 때문에, 流動性, 充塡性 및 材料分離 抵抗性을 확보하는데 효과적인 것으로 나타났다. 특히, 압축강도 중심으로 배합설계하는

일반 콘크리트와는 달리, 초유동 콘크리트에서는 유동성을 중심으로 배합설계를 실시한 결과, 초유동 콘크리트에 적합한 성능을 나타내었다. 따라서, 기존의 배합설계 개념을 탈피하여 초유동 콘크리트의 배합특성을 평가할 수 있는 플라이애쉬의 구속수비(β_f), 물/결합재 용적비(W/B), 잔골재 용적비(S_r) 및 굵은골재 용적비(G_v) 등으로 최적배합 조건을 평가하였다.

다짐이 필요없는 초유동 콘크리트에서 배합강도를 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 하였을 때, 플라이애쉬 치환율은 30%, 물/결합재비는 42%, 잔골재 용적비는 $45\pm 1\%$, 굵은골재 용적비는 $51\pm 1\%$ 에서 최적배합 조건을 도출하였다. 또한, 공기량 4%를 확보하기 위해 AE제를 결합재량의 0.1% 범위로 첨가하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다.

4.3 내구성

열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬의 치환율에 따른 내구성을 평가하기 위하여 0~50%까지 치환율을 변동시켰다.

시험결과, 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 동결융해 저항성은 감소하게 되는데, 이는 공기량이 확보되지 않은 상태에서 치환율이 증대함에 따라 강도도 함께 저하되었기 때문에 내구성이 감소된 것으로 평가된다.

공기량을 확보한 후에 실시한 동결융해 저항성 시험결과, 300사이클에서도 내구성 지수가 거의 저하되지 않았기 때문에, 우수한 동결융해 저항성을 확보할 수 있었다.

따라서, 耐久性이 요구되는 구조물에 열병합발전소의 C급 플라이애쉬를 사용한 콘크리트를 타설할 경우에는 공기연행제를 첨가하여 소정의 공기량을 확보하게 되면, 내구적인 콘크리트를 생산할 수 있을 것이다.

내약품성 試驗結果, 열병합발전소의 C급 플라이애쉬를 치환한 콘크리트의 내약품성은 치환율에 관계없이 우수한 것으로 나타났다.

4.4 장기특성

4.4.1 강도특성

콘크리트의 압축강도에 대한 인장강도 및 휨강도는 일반적인 강도범위에 비례하여, 만족하는 것으로 나타났다. 결국, 이러한 力學的 特性은 콘크리트의 압축강도와 관계되는 것이기 때문에 強度特性으로 평가하는 것이 바람직할 것이다. 마찬가지로 탄성계수는 大韓建築學會 規準式에 만족하는 값을 나타내었으며, 포아송비도 일반적인 0.2 범위였다.

4.4.2 응력-변형도 관계

열병합발전소의 C급 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 응력-변형도 곡선은 강도범위에 따라 차이가 있으나, 최대응력에서 변형도가 0.002~0.003의 범위를 만족하였다.

4.4.3 건조수축 특성

콘크리트의 건조수축 시험결과, 플라이애쉬의 치환율에 따라 약간의 차이는 있으나 플라이애쉬의 치환율이 30%이하에서는 거의 동일한 것으로 나타났다. 특히, 물/결합재비가 50%일 경우에는 플라이애쉬를 치환하지 않은 콘크리트에 비해 플라이애쉬를 30%치환한 콘크리트가 오히려 건조수축율이 낮은 것으로 나타났다.

따라서, 열병합발전소의 플라이애쉬를 30% 이하로 사용할 경우에는 건조수축에 큰 문제가 없는 것으로 판명되었다.

4.4.4 크리프 특성

초고층 건물의 Column Shortening은

콘크리트의 크리프에 영향을 많이 받기 때문에, 울산 열병합발전소의 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 크리프 변형은 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 물/결합재비 40%에서 플라이애쉬를 사용하지 않은 콘크리트와 플라이애쉬를 30% 치환한 콘크리트의 크리프 특성을 측정하여 비교하였다.

실험결과, 플라이애쉬를 30% 치환한 콘크리트의 재령별 크리프 변형이 낮게 측정되었기 때문에, 플라이애쉬의 사용으로 인한 콘크리트의 크리프 변형에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

4.4.5 수화열 특성

단열온도 상승시험에 따른 수화열 특성을 보면, 플라이애쉬의 치환율이 증가할 수록 온도상승이 감소되며, 상승율도 감소되었다. 따라서, 매스구조물 및 온도균열의 가능성이 있는 콘크리트에 활용하는 것이 효과적일 것으로 사료된다. 수화열 특성은 물/결합재비가 낮을 수록 뚜렷한 경향을 나타내었는데, 이는 단위결합재량이 가장 큰 영향을 미치기 때문이다.

4.5 현장적용 결과분석

울산 열병합발전소의 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 현장적용에서 가장 중요한 사항은 현장에 있어서의 품질관리이다. 특히, 플라이애쉬를 사용한 콘크리트를 제조해 본 경험이 없는 레디믹스트 콘크리트 공장을 대상으로 제조 및 품질관리를 수행한다는 것이 어려울 것이라는 예상을 쉽게 할 수 있다.

이는 실제로 배척플랜트에서 열병합발전소의 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 생산을 해 본 경험이 전혀 없기 때문이며, 많은 시행

착오가 예견되었다.

그러나, 레디믹스트 콘크리트의 제조 및 운반관리에 있어서 열병합발전소 플라이애쉬의 우수한 품질을 입증할 수 있는 계기가 되었다.

물론, 현장적용을 위한 실내의 시험배합을 사전에 실시하여 최적배합 조건을 도출하였다는 원인도 작용하였지만, 플라이애쉬가 콘크리트의 품질에 미치는 품질변동을 최소화할 수 있었으며 두번의 시험배합으로 현장 최적배합비를 도출할 수 있었다.

특히, 운반시간에 따른 경시변화 특성을 보면, 90분이 경과하여도 슬럼프 손실이 거의 나타나지 않을 정도로 슬럼프 유지성능이 우수하였으며, 높은 슬럼프에서도 재료분리 저항성이 우수하기 때문에 전혀 재료분리가 일어나지 않았다. 따라서, 에지테이터 트럭의 운반시간 및 현장 대기시간에 따른 콘크리트의 품질변동을 최소화할 수 있었다.

또한, 콘크리트의 펌핑에 있어서 열병합발전소 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 펌프 압송압은 일반 콘크리트의 압송압(80~100 kg/cm²)에 비해 약간 증가된 100~120kg/cm² 정도가 소요되었다. 이는 열병합발전소 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 점성이 증대되었기 때문이다. 그러나, 현재 사용하고 있는 펌프카의 압송압이 500kg/cm²이상이기 때문에 압송에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

다짐, 양생 등은 일반 콘크리트에 비해 수월한 것으로 나타났으며, 재령별 강도발현도 매우 양호한 것으로 나타났다. 강도발현은 배합설계에 따른 것이기 때문에 제외하더라도 플라이애쉬를 30% 치환하여 현장 품질관리를 한 경우는 화력발전소의 F급 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 사례에도 거의 찾아볼 수 없다.

열병합발전소의 C급 플라이애쉬를 콘크리

트에 시멘트의 30%까지 치환하여 사용할 수 있는 요인으로는 첫째 강도발현을 들 수 있다. F급 플라이애쉬의 경우에는 30% 치환할 경우 초기강도 발현 및 응결지연으로 품질확보가 어렵다.

두번째로 열병합발전소 C급 플라이애쉬의 비중이 F급 플라이애쉬(비중 2.20)에 비해 2.62로 높기 때문에, 재료분리 및 플라이애쉬 입자가 떠오르는 현상이 없어 품질관리가 수월하다.

마지막으로 열병합발전소의 플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 슬럼프 유지성능이 우수할 뿐 아니라 점성이 크기 때문에, 재료분리 및 블리딩 현상을 방지할 수 있다.

현장적용을 통해 현장에서의 품질관리가 수월하고 플라이애쉬 30%까지 치환함으로써 콘크리트의 성능개선은 물론 플라이애쉬의 재활용율을 높일 수 있었다.

따라서, 일반적인 콘크리트의 특성규명에 이어 현장 품질관리를 확보할 수 있었으며, 이를 통해 “열병합 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 시공지침(案)”을 작성하는 계기가 되었다.

5. C급 플라이애쉬 기준의 필요성

울산 열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬는 분류상 C급에 속하며, 이를 사용한 콘크리트 실험결과³⁾, 콘크리트의 유동성, 충전성, 재료분리 저항성이 우수하며, 슬럼프 유지성능, 수화열 저감, 건조수축, 크리프, 동결융해 저항성 및 강도발현에 우수한 것으로 나타났기 때문에 이를 활용할 수 있는 제도적 장치가 필요하다.

특히, 건설시장 개방에 따른 국제 경쟁력 확보 및 신재료의 활용을 위해 C급 플라이애쉬에 관한 규정을 도입하고 산업부산물물을 재활용할 수 있도록 하는 적극적인 대응 자세가

필요하다.

또한, 동남아, 유럽, 미주 등지에서 포괄적으로 사용되는 ASTM규준을 근거로 C급 플라이애쉬의 규준을 도입하는 방안이 현재로서 가장 합리적일 것으로 사료된다.

따라서, 국내에서 생성되는 플라이애쉬의 활용범위를 넓히고 재활용 기술을 촉진시키기 위하여 C급 플라이애쉬에 관한 규준을 도입해야 할 것으로 본다. 특히, 정부에서 정책적으로 자원 재활용을 권장하고 있는 상황과 Green Round체계의 출범을 앞두고 있는 국제적인 흐름을 고려할 때, KS규준에 반영하는 것이 절실한 실정이다.

6. C급 플라이애쉬에 대한 KS 규준(안)

향후, 공업단지 및 주거단지에 열병합발전소의 지속적인 신축 및 증축이 예정되어 있으며, 이로 인하여 막대한 양의 C급 플라이애쉬가 발생될 것으로 예상된다. 물론, 발생되는 플라이애쉬가 건설산업의 콘크리트 분야에 재활용되기 위해서는 품질확보 및 품질변동을 최소화시키는 방안이 필요하지만, 이는 기술적으로 해결해야 할 과제이며, 품질이 양호한 C급 플라이애쉬를 활용할 수 있는 방안이 필요하다.

특히, 콘크리트 분야에 재활용할 경우, 비교적 우수한 성능을 갖는 C급 플라이애쉬가 국내 규준이 없어서 재활용하기 어렵다는 것은 바람직하지 못하다.

따라서, 현재 KS에 규정되어 있는 F급 플라이애쉬의 규준은 현행대로 사용하고, KS 규준에 없는 C급 플라이애쉬의 규준을 ASTM의 C급 플라이애쉬 규준에 준하여 도입하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 2년간의 C급 플라이애쉬에 대한 연구결과를 근거로 [표 6]과 같이 F급 및 C급

플라이애쉬를 모두 포함하는 플라이애쉬 기준(안)을 제시하고자 한다.⁽⁶⁾

(표 6) 새로운 플라이애쉬의 기준(안)

항목	기준(안)		플라이애쉬 구분	
			F급	C급
화학적 성분	SiO ₂ (%)		45이상	-
	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)		-	50이상
	Na ₂ O(%)		-	1.5이하
	습분(%)		1.0이하	3.0이하
	강열감량(%)		5.0이하	6.0이하
물리적 성질	비 중		1.95이하	1.95이상
	분말도(cm ² /g)		2,400이상	2,400이상
	단위수량비(%)		102이하	105이하
	압축강도비(%)	7일	-	75이상
28일		60이상	75이상	

7. 결론 및 향후과제

C급 플라이애쉬의 활용도가 높은 선진국에 비하여, 국내에서는 최초로 열병합발전소에서 생성되는 C급 플라이애쉬의 연구를 수행하게 된 것은 자원재활용 측면은 물론 콘크리트의 새로운 재료개발 및 기술력 향상을 기할 수 있는 계기가 되었다.

특히, 본 연구를 통해 국내에서 생산한 C급 플라이애쉬의 우수한 특성 및 활용가능성을 콘크리트 관련자 및 학계에 알릴 수 있는 계기가 되었다. 이러한 연구결과를 공유할 수 있고, 또한 재료로서의 객관적인 평가를 통해 상용화시킬 수 있는 발판을 만들 수 있다는 것도 본 연구에서 중요한 부분이라 사료된다.

그러나, 이러한 재료를 건설산업에 상용화시키기 위해서는 해결해야 할 과제가 많이 있으며, 지속적인 실용화 연구와 KS기준 반영을 통한 활용범위의 확대, 이미 작성된 시공 지침의 활용 등으로 지속적인 현장적용을 이어나가야 할 것이다.

本 研究를 통해 울산 열병합발전소의 C급 플라이애쉬가 建設産業의 콘크리트 분야에 적극적으로 再活用될 수 있는 계기가 되기를 바라며, 이러한 연구성과를 바탕으로 建設産業의 新材料 및 再活用 技術이 개선되기를 바란다.

또한, 정부에서 정책적으로 추진하는 “資源節約과 再活用 促進에 관한 法律(제9조)”에 부응하여 본 연구의 성과가 구체적으로 活用될 수 있도록 이에 대한 정책적인 배려도 아울러 기대하는 바이다.

참고 문헌

- (1) ASTM C 618, Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.
- (2) EPRI CS-5116, “Classification of Fly Ash for Use in Cement and Concrete,” Project 2422-10, Final Report., April, 1987
- (3) 울산석유화학지원(주), “열병합발전소의 플라이애쉬 활용방안에 관한 연구”, 1차-2차년도 연구보고서(1995, 1996.) (주)대우건설기술 연구소
- (4) Majko, Richard M., Pistilli, Michael F., “Optimizing the Amount of Class C Fly Ash in Concrete Mixtures”, Cement, Concrete and Aggregates, Vol.6, No.2, Winter, 1984, pp.105~119
- (5) 建設省建築研究所, “廢棄物の建設事業への再利用率に技術關する研究-メチレンブルー-吸着量の試験方法-”, 1986. 3, pp.177~178
- (6) 朴泮林, 金武漢, 安宰鉉, 權寧鎬, 李相洙., “C급 플라이애쉬에 대한 KS기준 도입방안”, 한국콘크리트학회 봄학술발표논문집 제9권1호, 1997.5, pp.129~135