

F급 플라이애쉬를 사용한 超流動 콘크리트의 유동특성

The Flowing Properties of the Super Flowing Concrete using Class F Fly Ash

원 철* 이상수* 권영호** 안재현*** 박칠립****
Won, Cheol Lee, Sang Soo Kwon, Yeong Ho Ahn, Jae Hyun Park, Chil Lim

Abstract

This study dealt with the flowing properties of the super flowing concrete for class F fly ash produced thermal power plant and the application for concrete industry. For this purpose, fly ash is analyzed for confined water ratio(β_f) and the super flowing concrete is tested the flowing properties including flowing velocity, funneling time, height difference of box test and compressive strength.

As the result, in order to satisfy the flowing properties of the super flowing concrete using class F fly ash, the optimum mixing conditions are determined water-binder ratio $37\pm 2\%$, volume ratio of fine aggregates(Sr) $47\pm 2\%$ and coarse aggregates(Gv) $51\pm 1\%$.

1. 서 언

최근들어 건설환경의 급격한 변화, 즉 건설시장 개방에 따른 건설분야의 경쟁력 및 기술력 강화의 필요성, 부실공사 추방, 건설인력의 부족현상 등으로 콘크리트 분야에도 고품질·고성능·기계화 시공 등과 같은 새로운 단계의 品質 및 性能改善이 요구되고 있다. 콘크리트 구조물의 信賴性 向上, 施工의 合理化 및 施工環境의 改善을 위한 방안의 하나로 고성능 콘크리트의 開發이 제시되었다.⁽¹⁾

본 연구에서는 이러한 콘크리트의 개발을 위하여 F급 플라이애쉬를 사용한 초유동 콘크리트의 유동 특성에 대한 연구결과를 분석하고자 한다. 특히, 초유동 콘크리트의 재료로 사용된 화력발전소의 F급

* 정희원, (주)대우건설기술연구소 주임연구원

** 정희원, (주)대우건설기술연구소 선임연구원

*** 정희원, (주)대우건설기술연구소 책임연구원

**** 정희원, (주)대우건설기술연구소 소장

플라이애쉬는 구형상의 Ball Bearing 작용으로 유동성 확보뿐만 아니라, 우수한 점성으로 재료분리 저항성을 증대시키는 역할을 하기 때문에 초유동 콘크리트의 재료로 각광을 받고 있다.(2) 이러한 산업 부산물을 콘크리트의 재료로 재활용함으로써 신재료 개발은 물론 자원재활용, 환경보존 및 경제성 추구에도 효과적인 것으로 나타났다.

따라서, 초유동 콘크리트의 배합설계법에 따라 선정된 배합변수에 대해 유동성, 충전성 및 재료분리 저항성을 갖는 최적배합을 도출한 후, 이에 대한 특성을 정량적으로 평가하며, 이를 통해 향후 계획중인 현장적용에 필요한 자료축적은 물론 초유동 콘크리트의 유동특성에 대한 관련규준의 정립을 위한 기초자료로 활용할 계획이다.

2. 실험개요 및 평가방법

2.1 실험개요

F급 플라이애쉬를 사용한 초유동 콘크리트의 유동특성 및 이에 따른 최적배합 조건을 도출하기 위하여 기존의 배합설계 개념과 달리 초유동 콘크리트의 배합변수 개념을 도입하였다. 또한, 유동성, 충전성, 재료분리 저항성을 평가하기 위한 시험장치 및 배합변수 범위는 표 1과 같다.

표 1 초유동 콘크리트의 배합변수 범위 및 평가시험 장치

W/B (%)	Sr (%)	GV (%)	FA (%)	단 위 재 료 량 (kg/m ³)					평가시험 장치		
				C+FA	W	S	G	S.P(%)	유동성	충전성	재료분리 저항성
33~39	43~53	49~55	30	432~525	160~194	764~930	720~808	0.68~1.60	슬럼프 플로우 L형 플로우	과밀배근 충전성	BOX간극통과성 체가름 시험

여기서, 잔골재 용적비(Sr)는 모르타르에서 차지하는 잔골재 용적을 의미하며, 굵은골재 용적비(GV)는 콘크리트에서 굵은골재가 차지하는 용적을 나타낸다.

2.2 사용재료

본 연구에 사용된 시멘트는 T사의 보통 포틀랜드 시멘트이며, 굵은골재는 용원석산의 25mm 쇄석, 잔골재는 세척모래를 사용하였다. 또한, 플라이애쉬는 화력발전소의 F급을 사용하였으며, 사용재료의 품질시험 결과는 표 2와 같다.

표 2 사용재료의 품질시험 결과

항목 종류	비중	흡수율 (%)	용적 중량 (kg/m ³)	조립율 (F.M)	염화물 (%)	실적율 (%)	플라이애쉬의 화학적·물리적 특성								
							산화물	MgO	CaO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	Ig. Loss	비중	분말도
잔골재	2.62	0.85	1,595	2.91	0.004	60.4	89.1	1.34	2.50	0.25	1.12	0.80	3.57	2.21	3,158
굵은골재	2.63	0.73	1,500	6.67	-	57.0									

(주) 산화물은 SO₃+Al₂O₃+Fe₂O₃

특히, 잔골재는 결합재 특성을 갖는 0.06mm이하를 제거한 후 사용하도록 하였으며, 고성능감수제는 J社의 Phoenix-R을 사용하였다. 또한, 목표 공기량을 확보하기 위하여 AE계로 조절하였다.

2.3 초유동 콘크리트의 성능평가 및 배합방법

초유동 콘크리트의 품질관리를 위한 성능평가 항목 및 목표값은 표 3과 같다.

표 3 초유동 콘크리트의 성능평가 항목 및 배합방법

관리항목	슬럼프 플로우	깔대기 유하시간	간극통과성 BOX 시험	L형 플로우	과밀배근 충전성	배합방법	배합시간
목표성능	65±3cm	10±5초	5cm이하	-	육안관찰	선-모르타르	3분

초유동 콘크리트의 배합은 100 l 용량의 강제식 믹서를 사용하였으며, 高性能 減水劑의 첨가량은 페이스트의 구속수비, 모르타르의 상대플로우 면적비 등을 고려하여 목표 슬럼프 플로우(65±3cm)를 확보할 수 있는 범위에서 조정하였다.

3. 초유동 콘크리트의 시험배합 및 결과분석

화력발전소 F급 플라이애쉬를 사용한 초유동 콘크리트의 배합설계를 위해 拘束水比 試驗 및 이에 따른 물/결합재비(W/B), 굵은골재 용적비(G_v), 그리고 잔골재 용적비(S_r)의 특성시험을 실시하였다. 시험배합의 플라이애쉬 치환율은 시멘트의 重量比로 30%이며, 결과는 다음과 같다.

3.1 플라이애쉬의 구속수비 시험결과

플라이애쉬를 30% 치환한 결합재의 拘束水比 시험결과, 구속수비는 0.96으로 순수 시멘트(1.1~1.11)에 비해 0.4~0.5정도가 감소되었다. 이는 플라이애쉬를 사용할 경우 유동화에 기여하지 못하고 흡수되는 단위수량이 감소된다는 것을 의미한다. 그러나, 변형계수는 플라이애쉬 치환한 경우가 순수 시멘트(0.05~0.06)보다 높은 0.08~0.17로 나타났는데, 이는 플라이애쉬의 사용으로 점성이 대폭 증가되는 것을 의미한다. 따라서, 플라이애쉬를 사용하면 단위수량을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 필요한 점성도 부여할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 물/결합재비(W/B)에 따른 시험결과

물/결합재비에 따른 영향을 평가하기 위하여, 물/결합재비를 33, 35, 37 및 39%로 선정하였으며, 이에 따른 단위수량은 170~185kg/m³ 범위에서 4단계로 구분하였다. 그리고, 잔골재 용적비 및 굵은골재 용적비는 각각 47%, 52%로 일정하게 하였다. 유동특성 평가는 주로 슬럼프 플로우 50cm 도달속도, 최종도달속도, L형 플로우 속도 및 깔대기 유하시간을 측정하였으며, 결과는 그림 1 및 그림 2와 같다.

시험결과, 물/결합재비가 증대할수록 슬럼프 플로우의 50cm 도달속도 및 L형 플로우 속도는 증대하는 것으로 나타났다. 이는 물/결합재비가 증대할수록 동일한 유동성에서 점도가 감소하기 때문에 초기 변형량이 증대되는 것으로 사료된다. 그러나, 최종속도는 물/결합재비에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 특히, L형 플로우 속도를 Bingham의 유체이론으로 평가할 때, 동일한 콘크리트의 전단응력에서 물/결합재비가 감소할수록 점도가 증가하였다.

깔대기 유하시간은 ○형 및 □형에 따라 차이가 있지만, 물/결합재비가 증대할수록 유하시간이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 流動性이 우수할수록 유하시간이 감소되는 것으로 해석되지만, 점성이 지나치게 낮을 경우에는 굵은골재의 마찰 및 맞물림에 의해 막힘현상이 발생하게 된다. 또한, 점성 측

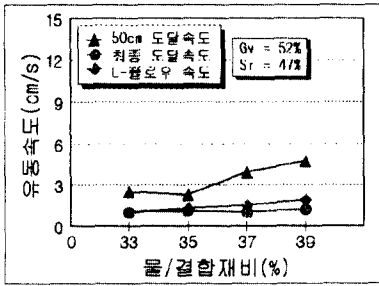


그림 1 물/결합재비에 따른 유동속도

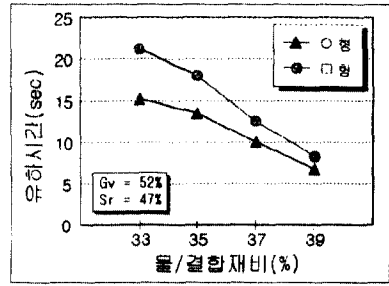


그림 2 물/결합재비에 따른 유하시간

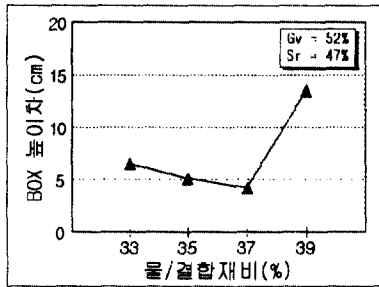


그림 3 물/결합재비에 따른 간극통과성

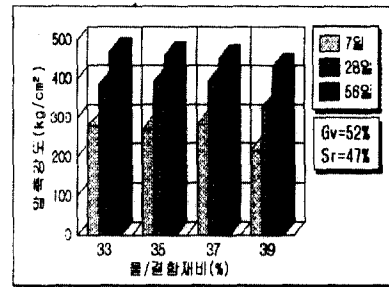


그림 4 물/결합재비에 따른 강도특성

면에서 물/결합재비가 낮을수록 점성이 증대되기 때문에, 위치에너지가 운동에너지 및 마찰에너지로 소비될 때에 마찰에너지와 剪斷抵抗이 증대되어 상대적인 운동에너지가 감소된다. 따라서, 점성이 증대할수록 유하시간은 증대하는 것을 알 수 있다.

또한, 물/결합재비에 따른 BOX 간극통과성 및 압축강도는 그림 3 및 그림 4와 같다.

물/결합재비에 따른 BOX 간극통과성 시험결과, 물/결합재비가 39%인 경우를 제외하면 대부분 유사한 값을 나타내었는데, 이는 점도 및 충전성의 영향으로 평가해야 할 것으로 사료된다.

일반 콘크리트의 배합설계는 물/시멘트비-강도관계를 물/시멘트比 理論으로 평가하지만, 초유동 콘크리트의 배합설계는 물/시멘트 용적비-유동성 관계로 정한 것이기 때문에 물/시멘트比 理論으로 해석하기는 어렵다. 압축강도 실험결과, 초기재령(3, 7, 28일)의 강도는 물/결합재비가 증대할수록 약간 저하되는 경향은 있지만, 물/시멘트비 이론과는 매우 다른 양상을 나타내었다. 따라서, 배합설계 개념을 강도와 점도 및 결합재와의 관계로 해석하는 방안이 필요할 것으로 사료되며, 설계기준강도 350kg/cm²정도이고 유동특성을 만족하는 초유동 콘크리트의 물/결합재비는 37±2% 범위가 가장 적합한 것으로 나타났다.

3.3 잔골재 용적비(Sr)에 따른 시험결과

잔골재 용적비를 43~53%까지 6단계로 나누고 물/결합재비 37%, 굵은골재 용적비 52%인 배합조건에서 유동특성 및 강도특성을 측정하였다. 그림 5 및 그림 6은 유동속도 및 유하시간을 측정된 결과를 나타낸 것이다.

잔골재 용적비에 따른 슬럼프 플로우의 50cm 도달속도는 최종속도 및 L형 플로우의 유동속도에 비해 매우 빠른 것으로 나타났다. 이는 초기의 자중에 의한 변형성이 점성에 비해 크기 때문으로 사료된

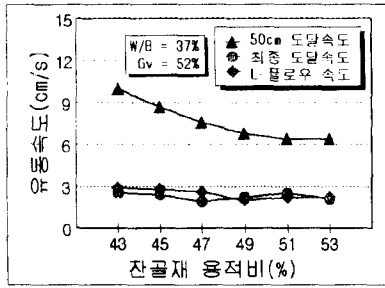


그림 5 잔골재 용적비에 따른 유동속도

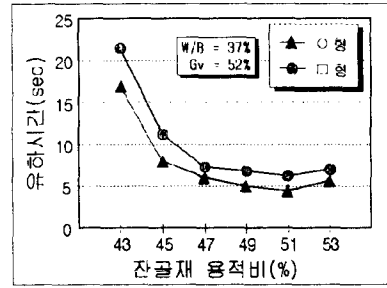


그림 6 잔골재 용적비에 따른 유하시간

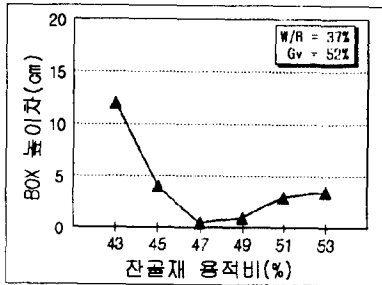


그림 7 잔골재 용적비에 따른 간극통과성

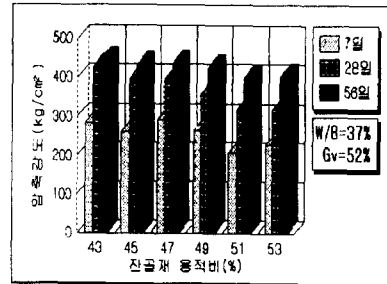


그림 8 잔골재 용적비에 따른 강도특성

다. 또한, 50cm 도달속도는 잔골재 용적비가 낮을수록 증대하는 것으로 나타났으나, 슬럼프 플로우의 최종속도 및 L형 플로우 유동속도는 잔골재 용적비의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 깔대기 유하시간은 잔골재 용적비가 43%인 시험체를 제외하면 대부분 10 ± 5 초 범위를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 대체로 잔골재 용적비가 감소할수록 유하시간이 증대되고 있는데, 이는 점성의 증대로 마찰력과 입자간의 전단저항이 증대되었기 때문으로 사료된다. 잔골재 용적비에 따른 간극통과성 및 강도특성은 그림 7 및 그림 8과 같다.

일반적으로 BOX 간극통과성은 굵은골재 용적비의 영향을 가장 많이 받지만, 실험결과 잔골재 용적비의 영향도 큰 것으로 나타났다. 즉, 잔골재 용적비 47%를 변곡점으로 하여 간극통과성 높이차가 증대하는 것으로 나타났다. 이는 골재 입자간의 거리 외에 입자간의 모르타르 또는 페이스트의 점성 및 유동성의 영향에 따라 마찰 및 접촉빈도가 다르기 때문으로 사료된다.

또한, 잔골재 용적비에 따른 강도특성의 차이는 별로 크지 않지만, 대체로 잔골재 용적비가 낮을수록 강도가 약간 증대하는 것으로 나타났다. 잔골재 용적비는 $47 \pm 2\%$ 가 가장 적합한 범위로 사료된다.

3.4 굵은골재 용적비(Gv)에 따른 시험결과

굵은골재 용적비에 따른 특성을 평가하기 위해 물/결합재비 37%, 잔골재 용적비 47%로 일정하게 두고 굵은골재 용적비를 49~55%의 5단계로 나누어 유동특성 및 강도특성을 측정하였다. 그림 9 및 그림 10은 유동속도와 유하시간을 나타낸 것이다.

굵은골재 용적비가 증가할수록 슬럼프 플로우의 50cm 도달속도는 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 동일한 배합조건에서 굵은골재 용적비가 증가할수록 초기변형에 따른 골재입자간의 접촉과 마찰에 의한 변형저항성이 감소되기 때문이다. 그러나, 슬럼프 플로우의 최종속도 및 L형 플로우 유동속도는

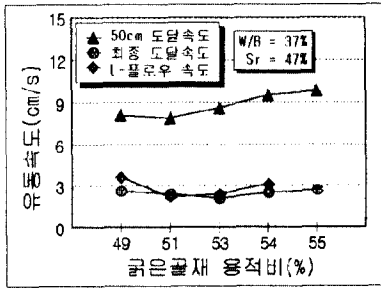


그림 9 굵은골재 용적비에 따른 유동속도

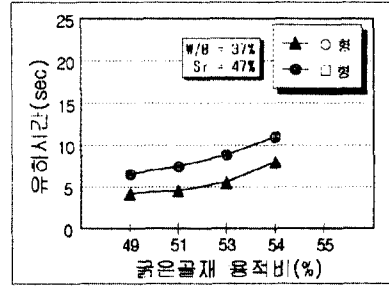


그림 10 굵은골재 용적비에 따른 유하시간

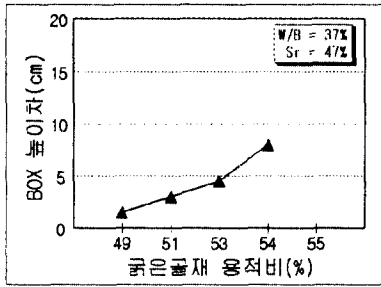


그림 11 굵은골재 용적비에 따른 간극통과성

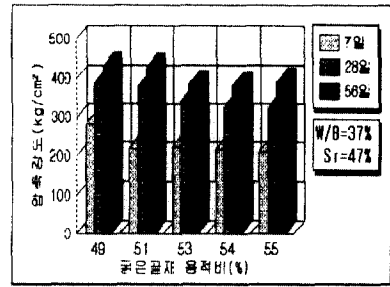


그림 12 굵은골재 용적비에 따른 강도특성

유사한 것으로 나타났다.

갈대기 유하시간은 동일한 굵은골재 용적비일 경우에 유동성이 큰 콘크리트일수록 감소되며, 점성이 큰 콘크리트일수록 증가하는 경향이 있다. 그러나, 잔골재 용적비 및 물/결합재비가 동일한 조건에서는 굵은골재 용적비가 증가하게 되면 골재입자의 간극이 좁아지기 때문에, 충돌·접촉빈도가 증대되고 에너지 소비가 증대하게 된다.

그림 11 및 그림 12은 굵은골재 용적에 따른 간극통과성 및 강도실험 결과이다.

실험결과, 굵은골재 용적비가 증가할수록 골재입자의 맞물림작용으로 간극통과성 높이차가 증대하는 것으로 나타났으며, 강도특성은 굵은골재 용적비가 작을수록 약간 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 굵은골재 용적비는 51±1%범위에서 정하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

화력 발전소의 F급 플라이애쉬를 사용한 초유동 콘크리트의 유동특성 결론은 다음과 같다.

- 1) F급 플라이애쉬를 30% 치환한 결합재의 구속수비는 0.96정도로 시멘트만 사용한 것에 비해 감소되나, 변형계수는 약간 증대한다.
- 2) 초유동 콘크리트의 배합설계에서 물/결합재비는 강도변화에 큰 영향이 없으나, 유동특성을 고려할 때 37±2% 범위가 가장 적합하다.
- 3) 잔골재 용적비는 점성 및 간극통과성을 고려하여 47±2% 범위에서 선정하는 것이 좋다.
- 4) 굵은골재 용적비는 유동속도, 유하시간, 간극통과성 및 압축강도를 고려하여 51±1% 범위에서

최적배합을 선정하는 것이 바람직하다.

5) 결합재의 구속수비를 저감시킬 수 있는 재료의 개발이 필요하다.

참고 문헌

1. 小尺一雅, 前川宏一, 岡村 甫, "ハイパフォーマンスコンクリートの開発", コンクリート工學 年次論文報告集, 日本コンクリート工學協會, Vol.11, No.1, 1989.6
2. 朴七林, 權寧鎬, 李相洙 外, "超流動 콘크리트의 流動特性에 관한 實驗的 研究", 한국콘크리트학회, 가을학술 발표 논문집 제 7권 2호, 1995.11. pp.1-7.