플라이애쉬를 사용한 2성분계 초유동 콘크리트의 개발

Development of Fly Ash Super-Flowing Concrete

박 연 동* 조 일 호** 권 영 호*** 박 칠 림****
Park, Yon-Dong Cho, Il-Ho Kwon, Yeong-Ho Park, Chil-Lim

ABSTRACT

In this study, several rheological properties of binder pastes and concrete are investigated for the development of commercially available fly ash super-flowing concrete. Fly ash contents with 5 levels(0, 10, 20, 30, 40%), slag contents with 6 levels(0, 5, 15, 25, 35, 45%), and water-binder ratios with 4 levels(30, 33, 36, 39%) are selected for test variables to evaluate the super-flowing characteristics of binder pastes. For the estimation of the workability of super-flowing concrete, slump flow, funnel time, box height, and L-flow are measured and compared. As the results, the flow is decreased and the viscosity is increased with increasing fly ash content. Super-flowing concrete is succesfully produced with 30% fly ash replacement.

1. 서 론

전세계적으로 전산업분야에 걸쳐 기술개발에 대한 경쟁이 날로 치열해지고 있는 가운데, 콘크리트 분야에서도 재료의 성능을 극대화시킨 각종 고성능 콘크리트에 대한 연구, 개발이 활발히 진행되고 있다. 고성능이란 고강도, 고유동, 고내구성으로 대표될 수 있는데, 고유동성을 특히 강조한 초유동 콘크리트는 1980년대 후반 일본에서 개발된 이래[1] 콘크리트에 대한 기존의 고정관념을 뛰어 넘는 혁신적인 재료로 평가되고 있으며, 많은 연구자들의 관심과 함께 차세대 건설재료로 크게 각광받고 있다.

초유동 콘크리트의 사용은 자기채움성으로 인하여 콘크리트 타설시 다짐작업이 필요없게 되어 철근 배근상태, 작업인력의 숙련도 등 각종 작업조건의 영향을 받지 않을 뿐만 아니라 경화 후 품질의 균질성을 보장하고 콘크리트 공사의 근대화, 합리화 및 신공법 개발을 촉진한다.

본 저자들은 위와 같은 사실에 기초하여 초유동 콘크리트에 관한 연구를 시작하였으며, 1993년도에 시멘트, 고로슬래그 미분말(이하, 슬래그로 약기), 플라이애쉬를 사용한 3성분계 초유동 콘크리트 개발에 성공하여 그 결과를 발표한 바 있다.[2] 그러나, 3성분계 초유동 콘크리트의 경우, 단가가 상승하고 원재료 입수가 곤란하며, 추가설비가 필요하기 때문에 재료 입수에 문제점이 없고 경제적인 플라이애쉬를 사용한 초유동 콘크리트 개발을 진행하여 왔다. 본 연구에서는 결합재 종류 및 비율에 따

* 정회원, 동양중앙연구소 선임연구원, 공박
** 정회원, 동양중앙연구소 주임연구원
*** 정회원, (주)대우건설기술연구소 주임연구원
**** 정회원, (주)대우건설기술연구소 소장

른 페이스트와 몰탈의 유동특성 및 강도발현 특성을 비교, 분석하고 그 결과에 기초하여 콘크리트 실험을 수행함으로서 플라이애쉬를 사용한 2성분계 초유동 콘크리트 개발에 성공하였다.

2. 페이스트 및 몰탈 실험

2.1 실험계획

슬래그와 플라이애쉬를 혼합재로 사용한 3성분계 페이스트의 유동특성을 평가하기 위하여 각 결합재의 혼합비율을 변화시켜 실험을 수행하였으며, 유동특성은 플로우(몰탈 플로우 시험기를 사용하여 측정, 타격은 가하지 않음)와 P형 깔대기(그림 1 참조) 유하시간으로 측정하였다. 각 배합의 배합비 상세는 표 1과 같고, 물-시멘트비는 32%, 고성능감수제 첨가량은 1.25%로 고정하였다.

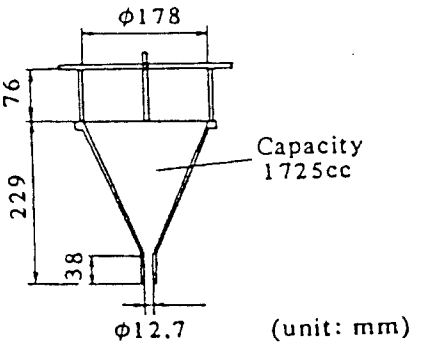


그림 1. P형 깔대기(유하시간 측정장치)

표 1. 3성분계 페이스트 배합비

슬래그 혼입율(%)	시멘트 혼입율 (%)					
	35	45	55	65	75	85
45	FA20		FA5			
35		FA20	FA10			
25			FA20			
15			FA30	FA20		
5			FA40		FA20	
0			FA45			FA15

플라이애쉬와 시멘트를 결합재로 사용한 2성분계 페이스트의 유동특성은 플라이애쉬 치환율과 물-결합재비를 변화시켜 가면서 평가하였는데, 유동특성은 3성분계 페이스트의 경우와 마찬가지로 플로우와 깔대기 유하시간을 통하여 평가하였다. 각 배합의 배합비는 표 2와 같고, 고성능감수제 첨가량은 플로우값이 250±25mm가 되도록 조절하였다. 또한, 플로우를 일정하게 조절한 배합비에 고성능감수제 첨가량을 0.2%씩 증감시킨 배합의 유동특성을 분석하였다. 2성분계 페이스트 배합비 상세는 표 2와 같다. 몰탈은 페이스트와 주문진 표준사를 1:1로 혼합하여 제조하였으며, 페이스트 및 몰탈의 혼합에는 몰탈혼합용 믹서를 사용하였다.

표 2. 2성분계 페이스트 배합비

물-결합 재비(%)	플라이애쉬 치환율(%)				
	0	10	20	30	40
30	○	○	○	◎	○
33	○	○	○	◎	○
36	◎	◎	◎	◎	◎
39	○	○	○	◎	○

○ 페이스트 유동성 실험
◎ 페이스트 유동성, 몰탈압축강도 실험

2.2 실험재료

실험에 사용된 재료의 물리적 성질은 표 3과 같다. 플라이애쉬는 보령화력발전소산 유연탄 플라이애쉬를 정제한 제품을 사용하였으며, 고성능감수제는 국내에서 시판중인 나프탈린계의 표준형 고성능감수제를 1 종류를 사용하였다.

2.3 실험결과 및 고찰

일반적으로 슬래그와 플라이애쉬를 콘크리트용 혼합재로 사용하게 되면 작업성이 개선되는 것으로 알려져 있으나, 국내생산 플라이애쉬의 경우 작업성을 악화시키는 것으로 보고되고 있다.[3)~5)] 페이스트에 대해서 실험한 본 연구의 결과도 이와 유

사한 현상을 보여주었는데, 그림 2에서 알 수 있듯이 동일한 플라이애쉬 혼입율 및 고성능감수제 첨가량 하에서 슬래그 치환율이 증가함에 따라 플로우가 점진적으로 커짐을 알 수 있다. 또한, 동일한 시멘트 혼입율(55%) 하에서 플라이애쉬 혼입율이 감소할수록(슬래그 혼입율이 증가할수록) 플로우값이 급격히 증가하여 플라이애쉬 첨가가 페이스트의 유동성에 악영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

표 3. 사용재료의 물리적 성질

종 류	물리적 성질
시멘트	보통 포틀랜드 시멘트 비중:3.15, 비표면적:3315cm^2/g 28일 압축강도:406kg/cm^2
플라이애쉬	보령 화력발전소산 비중:2.21, 비표면적:4201cm^2/g 강열감량:5.49%
슬래그	비중:2.92, 비표면적:6000cm^2/g
몰탈제조용 모래	주문진 표준사
잔골재	해사(세척사), 비중:2.58 조립율:2.73, 실적율:60.5%
굵은골재	쇄석, 최대크기:19mm 비중:2.61 조립율:6.82, 실적율:57.8%
고성능 감수제	나프탈린계, 표준형

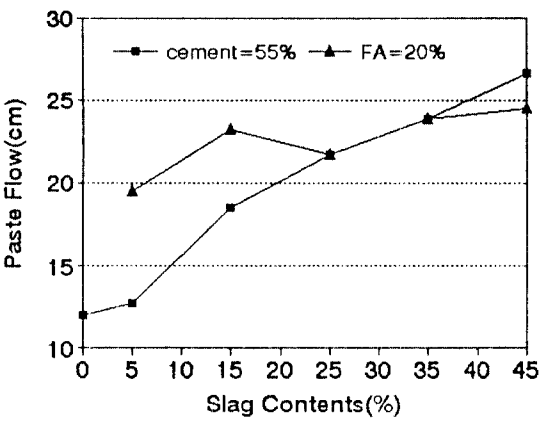


그림 2. 슬래그 첨가량에 따른 플로우값 변화

그림 3은 4 종류의 물-시멘트비에 대하여 플라이애쉬 치환율의 변화에 따라 플로우값을 250±25mm로 조절하기 위하여 첨가된 고성능감수제의 양을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 플라이애쉬 혼입량이 증가함에 따라 동일 플로우값을 유지하기 위하여 요구되는 고성능감수제 양이 증가하고 있다. 이러한 현상은 슬래그와 혼용한 그림 2의 경우와 동일하며, 따라서 플라이애쉬를 고성능, 고강도 콘크리트용 결합재로 사용할 때 고려하여야 할 중요한 요인으로 사료된다.

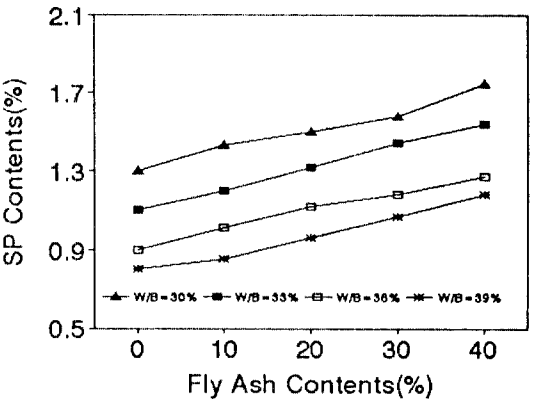


그림 3. 플라이애쉬 치환율에 따른 고성능 감수제 첨가량의 변화

그림 4는 4 종류의 물-시멘트비에 대하여 플로우를 일정하게 하고 플라이애쉬 치환율을 변화시켰을 때의 P형 깔대기 유하시간을 나타내고 있다. 일반적으로 페이스트 또는 콘크리트의 플로우는 항복치에 크게 영향을 받고 각종 깔대기 유하시간은 점도에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다.[6] 이와 같은 관점에서 그림 4의 결과를 분석해볼 때 동일한 플로우(항복치) 하에서 플라이애쉬 대체량이 증가함에 따라 그리고 물-결합재비가 감소함에 따라, 유하시간(점도)이 크게 증가하고 있음을 알 수

있다. 이미 개발된 3성분계 배합의 페이스트(시멘트:슬래그:플라이애쉬 = 35:45:20)는 플로우 250±25mm일 때 유하시간이 약 50초 정도로서, 이를 초유동 물성을 만족하는 페이스트의 전형적인 특성치로 가정할 때, 그림 4로부터 플라이애쉬 치환율이 10%인 경우 물-결합재비 30% 이하, 20%인 경우는 32~33%, 30%인 경우는 35~36%, 40%인 경우는 38~39%를 초유동 물성을 나타내는 물-결합재비로 판단할 수 있다.

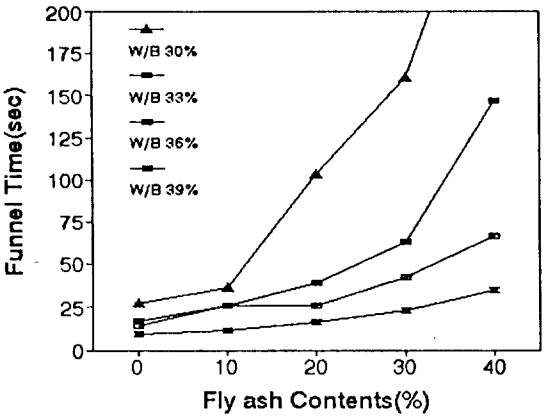


그림 4. 플라이애쉬 치환율에 따른 P형 깔대기 유하시간 변화

그림 5는 물-결합재비가 36%인 몰탈의 플라이애쉬 치환율에 따른 강도발현을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 3, 7일 초기 재령의 압축강도는 플라이애쉬 치환율이 증가함에 따라 감소하고 있으나 재령 28일에서는 플라이애쉬 치환율이 40%인 배합을 제외하고는 기준 배합에 비해 동등 이상의 강도를 발현하고 있다. 이와 같은 사실로부터 국내산 플라이애쉬가 ASTM C618-80의 F급 플라이애쉬임에도 불구하고 강도발현성이 비교적 뛰어남을 알 수 있다.

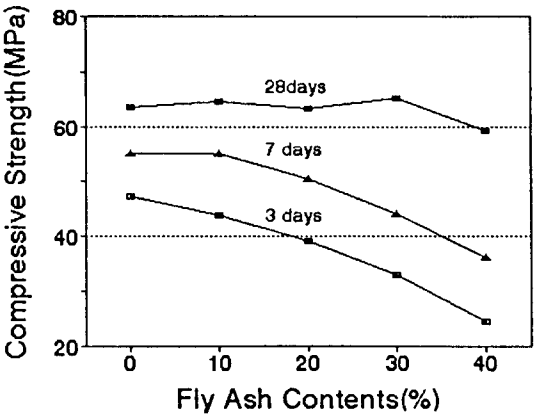


그림 5. 플라이애쉬 치환율에 따른 몰탈 압축강도

3. 콘크리트 실험

3.1 실험계획

콘크리트가 초유동 성능을 발휘하기 위해서는 결합재 체적이 어느 정도 이상이 되어야 하며,[6] 이러한 요구조건을 만족시키기 위해서는 단위결합재량이 증가되어야 하는데, 과다한 양의 시멘트 사용은 높은 수화열 발생 등의 문제점을 야기시킬 뿐만 아니라 비중이 높아 체적증가의 효과도 떨어진다. 플라이애쉬의 경우, 비중이 낮아 체적 증가의 효과가 클 뿐만 아니라 장기강도의 증진, 수화열 저감 등의 장점이 있으므로 초기강도 발현이 문제가 되지 않는 범위내에서 혼입하여 사용하면 효과가 클 것으로 판단된다. 이와 같은 사실과 페이스트 및 몰탈에 대한 실험 및 결과분석으로부터 얻은 초유동성을 발휘할 수 있는 2성분계 페이스트의 플라이애쉬 치환율과 물-결합재비 관계, 물-결합재비 32~39% 범위에서 행한 예비실험 결과들로부터 단위수량 195 kg/m^3, 물-결합재비 35%, 플라이애쉬 치환율 30%, 잔골재율 53%를 플라이

애쉬를 사용한 2성분계 초유동 콘크리트의 기본 배합비로 일차 선정하였다. 선정된 배합비의 초유동 성능을 검증하기 위하여 고성능감수제 첨가량 및 단위수량, 잔골재율을 변화시켜 실험을 수행하였으며, 배합비 상세는 표 4와 같다.

유동성능 평가를 위하여 슬럼프 플로우, O형 깔대기 실험, 박스 충전성 실험을 실시하였고, 아울러 철근 과밀 배근을 모사한 L형 충전성 실험장치를 사용하여 충전성을 종합적으로 평가하였다(그림 6 참조). L형 충전성 실험에 의한 충전성능 판단은 충전속도 및 최종 충전상태를 기준으로 육안관찰에 의해 우수, 양호, 보통, 불량의 4 수준으로 구분하였다.

표 4. 콘크리트 배합비

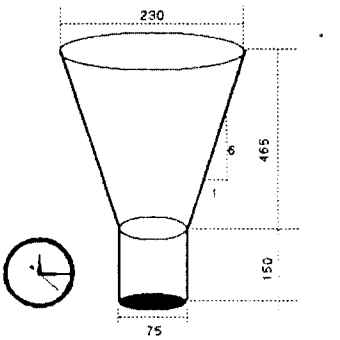
Mix no.	W/B (%)	S/a (%)	Fly ash(%)	Water (kg/m^3)	Binder (kg/m^3)	S.P. (%)
1	35	53	30	195	557	1.20
2	36	53	30	200	556	1.15
3	35	53	30	195	557	1.10
4	35	53	30	195	557	1.00
5	35	53	30	190	543	1.00
6	35	53	30	185	529	1.00
7	35	53	30	180	514	1.10
8	35	51	30	195	557	1.20
9	35	49	30	195	557	1.20
10	35	47	30	195	557	1.15

3.2 실험재료

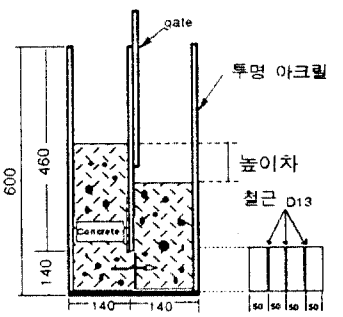
실험에 사용된 재료의 물리적 성질은 표 3과 같다.

3.3 실험결과 및 고찰

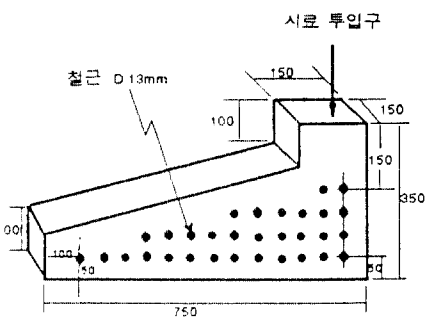
개발된 배합에 대하여 4가지 실험방법을 통하여 유동성능을 정량적, 정성적으로 평가한 결과, 기준배합을 비롯한 각 배합들은 우수한 자기채움능력을 발휘하여 초유동 콘크리트용 증점제 등 특수 혼화제나, 슬래그 미분말 등의 사용없이 플라이애쉬의 사용만으로도 초유동 콘크리트 제조가 가능함을 보였다. 기준배합에 대하여 단위수량 및 잔골재율을 변화시켜 가면서 유동성능을 분석해 본 결과, 초유동 성능을 나타낼 수 있는 단위수량 및 잔골재율의 하한치가 존재하였는데, 단위수량은 약 180 kg/m^3, 잔골재율은 47% 부근에서 그 값이 존재하였다(표 5 참조).



(a) O형 깔대기 시험



(b) 박스 충전성 시험



(c) L형 충전성 시험

그림 6. 유동성능 평가 실험장치

표 5. 유동성능 평가 실험 결과

Mix no.	슬럼프 플로우 (cm)	깔대기 유하시간 (초)	박스 높이차 (cm)	L 플로우
1	73.5	9.5	2.0	양호
2	69.0	7.0	2.0	우수
3	68.5	6.5	0.6	우수
4	64.5	6.0	2.0	우수
5	62.0	7.8	2.5	양호
6	64.0	6.2	5.5	양호
7	61.5	8.9	5.0	보통
8	61.0	8.6	4.0	양호
9	71.5	9.0	4.0	양호
10	72.0	8.1	1.5	불량

4. 결 론

본 연구의 결과, 증점제나 슬래그 미분말 등을 사용하지 않고 혼합재로 플라이애쉬만을 사용한 2성분계 초유동 콘크리트의 제조에 성공하였으며, 페이스트, 몰탈, 콘크리트 실험 및 결과분석을 통하여 얻은 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 슬래그 미분말의 경우 페이스트의 유동성을 증대시키는 효과가 있으나, 플라이애쉬는 페이스트의 유동성을 떨어뜨리고 점성을 증가시킨다.
2) 동일한 플로우를 유지시키기 위한 고성능감수제의 첨가량은 플라이애쉬 치환율이 증가함에 따라 증가한다. 또한, 동일한 플로우일 경우 플라이애쉬 치환율이 증가함에 따라 깔대기 유하시간이 증가한다.
3) 본 연구의 범위내에서는 플라이애쉬 치환율 30%의 경우, 물-결합재비 35~36%에서 가장 우수한 초유동성을 발휘하는 것으로 판단된다.
4) 개발된 배합이 초유동성을 나타내기 위한 단위수량 및 잔골재율의 하한치는 각각 180 kg/m^3, 47% 정도로 판단된다.
5) 개발된 2성분계 초유동 콘크리트의 실용화를 위해서는 현장 제조시의 품질관리 및 슬럼프 손실 등에 대한 많은 연구가 앞으로 이루어져야 하겠다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 건설부 국책과제 "초유동 콘크리트의 개발 및 실용화"의 연구비 지원으로 일부 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1) 小澤一雅, 前川宏一, 岡村 甫, "ハイパフォーマンスコンクリートの開發, コンクリート工學年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, 1989, pp. 69-74.
2) 조일호 외 3인, "고성능 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구(제2보, 초유동 콘크리트의 기초물성), 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제5권, 제2호, 1993, pp. 51-56.
3) 김진근, 박연동, 성근열, "고강도 플라이애쉬 콘크리트의 장기 강도 특성에 관한 연구," 콘크리트학회 논문집, 제3권, 제4호, 1991. 12, pp. 107-115.
4) 최종범 외 14인, "콘크리트 혼화재로서의 석탄회 이용방안 연구," 한국전력공사 기술연구원, 1989. 4, 249 pp.
5) 서정우, "플라이애쉬를 혼화재로 사용한 콘크리트의 실용화를 위한 연구," 박사학위논문, 한양대학교 토목공학과, 1989, 102 pp.
6) 岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅, "ハイパフォーマンスコンクリート", 技報堂出版, 1993, 232 pp.