

고성능 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구

정재동 · 박연동 · 노재호 · 한정호 · 조일호* · 김기철

〈동양중앙연구소 이차제품연구실〉

1. 서론

최근 외국에서는 고성능 콘크리트(high performance concrete)에 관한 연구가 다방면으로 진행되고 있다. 고성능 콘크리트에 대한 연구방향은 미국, 캐나다, 유럽 등지에서 실시하고 있는 고강도, 고내구성에 초점을 둔 연구와 일본과 같이 '다짐이 필요 없는' 초유동성 확보에 대한 연구로 대별할 수 있다.

특히 초유동 콘크리트는 경화 전에는 유동성과 재료분리저항성 등이 우수하여 다짐이 필요 없고, 타설 후에는 경화·건조수축, 수화발열에 의한 균열저항성이 우수하여 초기결함이 억제되며, 경화 후에는 치밀한 미세구조를 형성하여 내구성을 저해하는 요인에 대한 저항능력이 우수한 장점을 가지고 있기 때문에 고성능 콘크리트라고도 불리고 있다.

한편 국내의 경우는 콘크리트 구조물의 잇따른 붕괴사고나 신도시 부실시공 사례 등으로 일반 콘크리트 품질조차 신뢰하지 못하는 불신분위기가 계속되고 있다. 이러한 국내의 열악한 상황과 향후 건설시장 개방 등 건설환경 변화를 고려한 콘크리트 공사의 합리화와 공법 혁신, 콘크리트 이차제품 분야에의 파급효과를 고려한 고성능 콘크리트 개발은 매우 시급하다고 판단된다.

본 연구는 3성분계 미분말 결합재를 사용한 초유동 콘크리트를 제조함에 있어서 주요 배합요인의 변화에 따른 콘시스턴시 변화와 이의 정량적 평가방법 등에 대하여 주로 검토하였다.

2. 실험계획

2.1. 실험 재료 (표 1 참조)

본 연구에서는 콘크리트의 강도 향상 및 수화열 저감, 유동성 개선을 위하여 보통 포틀랜드 시멘트에 고

표 1. 사용재료 및 기본물성

종 류	기 본 물 성
시멘트	보통 포틀랜드 시멘트 비중 3.15, 블레인값 3,160cm ² /g 28일 압축강도 385kgf/cm ²
슬래그	고로 슬래그 미분말 비중 2.92, 블레인값 6,000cm ² /g
플라이 애쉬	보령화력발전소산 유연탄 플라이애쉬 비중 2.15, 블레인값 2,613cm ² /g
잔골재	해사, 비중 2.57, 조립율 3.08 실적율 63%
굵은골재	19mm 채석, 비중 2.61, 조립율 2.68, 실적율 58.4%
고성능감수제	나프탈렌계

표 2. 실험 계획 및 배합설계

항목 Series	W/B (%)	Water (kg/m ³)	Binder (kg/m ³)	s/a (%)	SP (Bx %)
W량 변화	32	150~ 190	469~ 594	53	1.2
s/a 변화		180	562.5	45~ 55	1.2
고성능감수제 첨가율 변화		180	562.5	53	1.0~1.8

미분말 슬래그와 플라이애쉬를 35 : 45 : 20의 중량비로 혼합한 결합재를 사용하였으며 재료분리저항성 증가를 위하여 별도의 화학 증점제는 사용하지 않았다. 고성능 감수제는 나프탈렌설폰산계 표준형을 사용하였으며 시간경과에 따른 유동성 변화와 응결 실험에서는 표준형과 함께 슬럼프로스 저감형 및 고성능 AE 감수제를 사용하였다.

2.2. 실험 개요

주요 배합요인이 콘크리트의 유동성과 충전성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 물결합재비(W/B : Water/Binder)를 32%로 고정시키고, 결합재 구성비(시멘트 : 슬래그 : 플라이애쉬 비율)를 변화시키거나 단위수량(W)을 150~190kg/m³(결합재량 500~585kg/m³), 세골재율(S/A) 48~56%, 고성능감수제 첨가율 B×1~2%로 변화시킨 예비실험을 실시하였다.

예비실험을 통하여 충전성이 우수한 기준 배합 콘크리트를 선정하고 시리즈별로 표 2와 같이 각각 단위수량, 세골재율, 고성능감수제 첨가량을 변화시켜 콘크리트의 유동성 및 충전성을 측정하였으며 아울러 시간경과에 따른 유동성 변화 및 응결시간, 압축강도 등을 측정하였다.

콘크리트 비빔 방법은 팬형 강제식 믹서를 사용하여

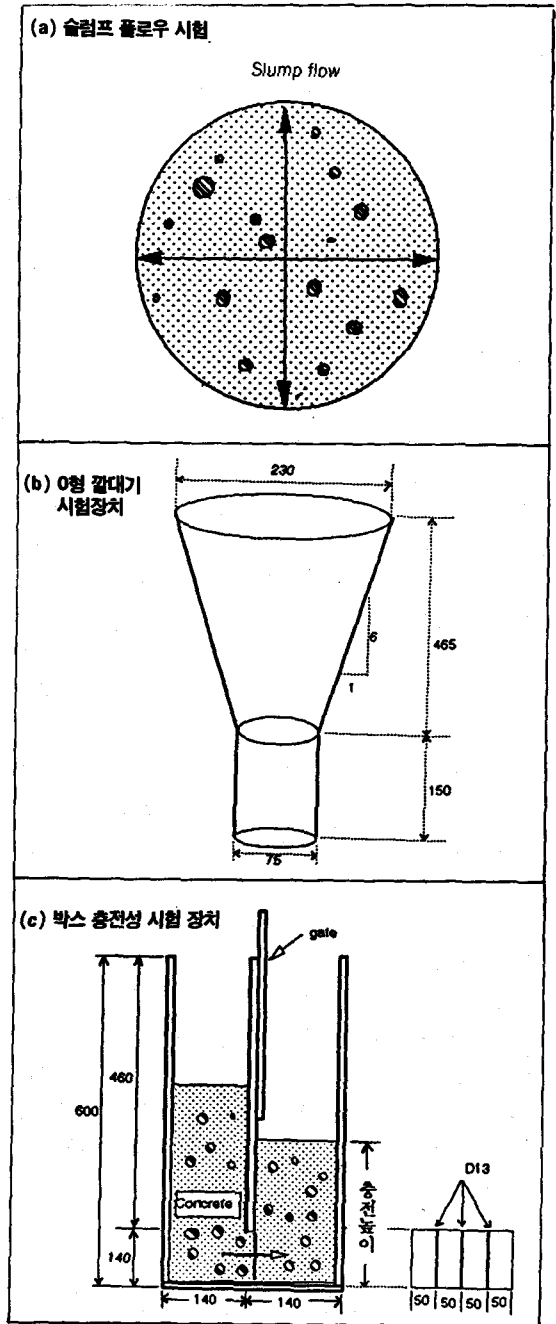
- (1) 결합재와 세골재를 먼저 투입하고 30초간 건비빔 후
- (2) 물, 고성능감수제를 동시 투입하여 2분간 비빔
- (3) 물탈에 조골재를 투입하여 1분간 비빔 후 배출

2.3. 콘크리트 콘시스턴시 측정방법 및 실험기구

초유동 콘크리트의 콘시스턴시 측정은 재래의 슬럼프 측정방법으로는 불충분하여 여러가지 새로운 방법이 제안되어 있으나 아직 정해진 시험법이 있는 것은 아니다. 본 연구에서는 슬럼프 플로우 실험, O형 깔때기 실험, 박스 충전성 실험등의 방법을 사용하였다. (그림 1 참조)

- (1) 슬럼프 플로우 실험 : KS F 2402의 콘크리트 슬럼프 실험을 실시한 후, 콘크리트 플로우를 각각 직각으로 2회 측정한 평균값
- (2) O형 깔때기(O type funnel) 실험 : O형 깔대

그림 1. 콘시스턴시 시험장치



기의 윗면까지 콘크리트 시료를 채운 후, 하부 유출구를 열어 전체 시료가 완전히 낙하하기까지의 소요시간을 (유하시간) 측정

- (3) 박스 충전성 실험 : 박스의 간막이를 닫고 한쪽의 윗면까지 콘크리트를 채운 후, 간막이를 열어 반대편으로 콘크리트가 흘러들어난 후의 채워진 높이(충전높이)를 측정

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 단위수량(결합재량)의 영향(그림 2 참조)

그림 2에 나타낸 바와 같이 다른 조건이 일정한 경우 단위수량을 증가시키기에 따라 유동성(최종 변형능력, 변형속도)과 충전성을 모두 증가시키고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 단위수량을 증가시키므로 단위결합재량이 함께 증가하고 결과적으로 콘크리트중의 페이스트 용적을 증가시키는 대신 골재의 용적(특히 조골재의 용적)을 감소시키므로써 얻어진 결과이다.

즉 콘크리트 유동시 골재끼리의 응집현상이나 철근과 조골재 사이의 마찰저항을 감소시키고 조골재와 몰탈부분이 일체가 되어 유동하도록 하기 위해서는 일정량 이상의 단위결합재량이 필요하다고 판단된다.

아울러 콘크리트의 종합적인 콘시스턴시를 측정하기 위해서는 슬럼프 시험만으로는 곤란하였고 깔대기 시험장치와 박스 시험장치 등을 사용함으로써 간극통과성이나 재료분리 저항성, 충전성 등의 상대평가가 가능함을 알 수 있다.

3.2. 세골재율 변화(그림 3 참조)

세골재율 증가에 따라 충전높이는 증가하였으나 슬럼프 플로우와 깔대기 유하시간은 매우 작게 감소하였다.

즉 콘크리트중의 골재용적(잔골재와 굵은골재 전체)이 일정한 본 시리즈에서는 세골재율을 감소시켜 조골재량을 상대적으로 늘려도 슬럼프 플로우 및 유하시간의 변화는 작았으나 충전성은 조골재량이 증가할 수록 조골재 끼리 서로 충돌, 접촉하는 가교현상이 심해지기 때문에 몰탈과 조골재가 일체가 되어 변형할 수 없게 되므로 간극통과성, 충전성이 저하하는 것으로 판단된다.

따라서 양호한 충전성을 확보하기 위해서는 단위조골재량을 어느 한도 이하로 낮춤으로써 조골재 사이의 거리를 충분히 확보할 수 있도록 조골재 표면에 필요량의 몰탈을 부착시킬 필요가 있음을 알 수 있다.

그림 2. 단위수량(결합재량)과 콘시스턴시의 변화

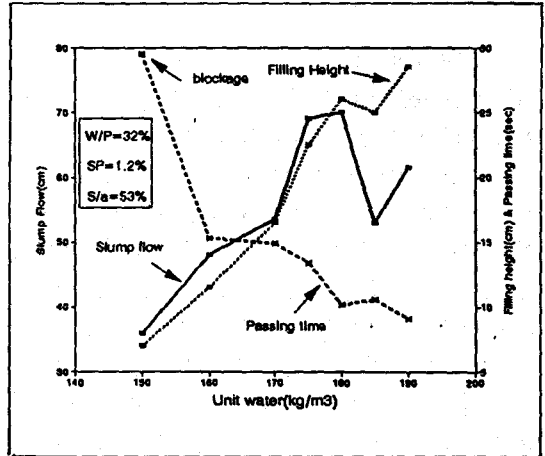


그림 3. 세골재율과 콘시스턴시의 변화

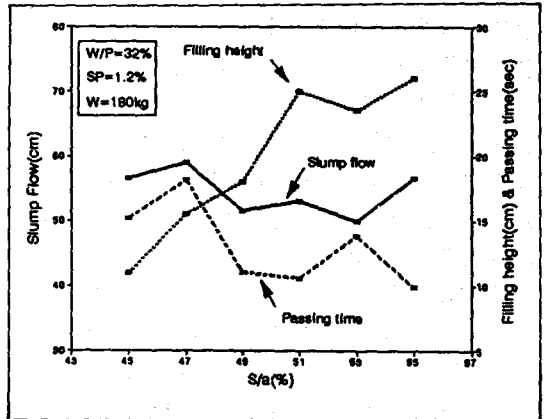
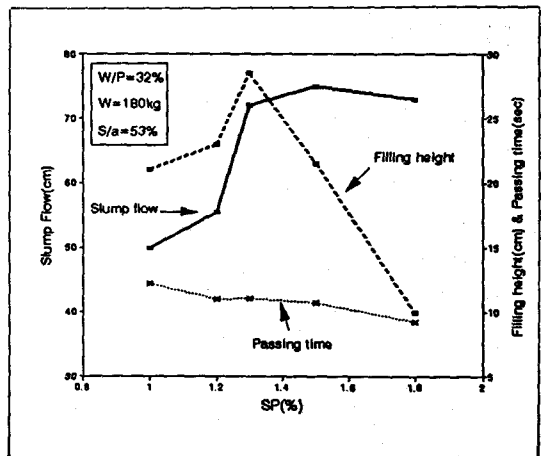


그림 4. 고성능감수제량과 콘시스턴시의 변화



3.3. 고성능감수제 첨가량 변화(그림 4 참조)

고성능감수제 첨가율을 증가시키기에 따라 콘크리트의 슬럼프 플로우는 크게 증가하나 일정 첨가율 이상에서는 더 이상 증가하지 않았다. 또한 유하시간은 첨가율 증가에 따라 약간 짧아지지만 그 차이는 매우 적게 나타났고, 특히 충전성을 최대로 하는 최적 첨가율이 존재하였다. 즉 재료분리 저항성을 저하시키지 않는 범위내에서 유동성이 최대가 되는 고성능 감수제의 첨가량이 존재함을 알 수 있다. 일반적으로 고성능 감수제 사용량 증가에 따라 분체의 분산성이 향상되어 시멘트 페이스트의 항복치가 감소하고 콘크리트의 슬럼프 플로우는 증가하지만 이와 함께 블리딩이 커지고 슬럼프 플로우는 60cm 이상인 경우에는 재료간의 분리가 일어나기 쉽다고 보고되고 있다. 즉 고성능 감수제 첨가량이 많아서 슬럼프 플로우는 커지는 배합일 수록 조골재의 분리가 커지게 되는 것이다.

본 실험결과에서도 최적 첨가량 이상에서는 급격히 충전높이가 저하하는 현상을 발견할 수 있었는데 그와 동시에 블리딩 및 다량의 공기포가 표면위로 떠올랐고 블리딩수에 흑색의 플라이애쉬 미립자가 부유하는 것이 관찰되었다.

따라서 본 실험의 결과로부터 유동성이 일정 범위를 넘어 과대해 지면 콘크리트의 재료분리 저항성은 저하하는 경향을 나타내었고, 초유동 콘크리트에서는 유동성과 재료분리 저항성의 양자를 만족하는 적정배합을 선정할 필요가 있다.

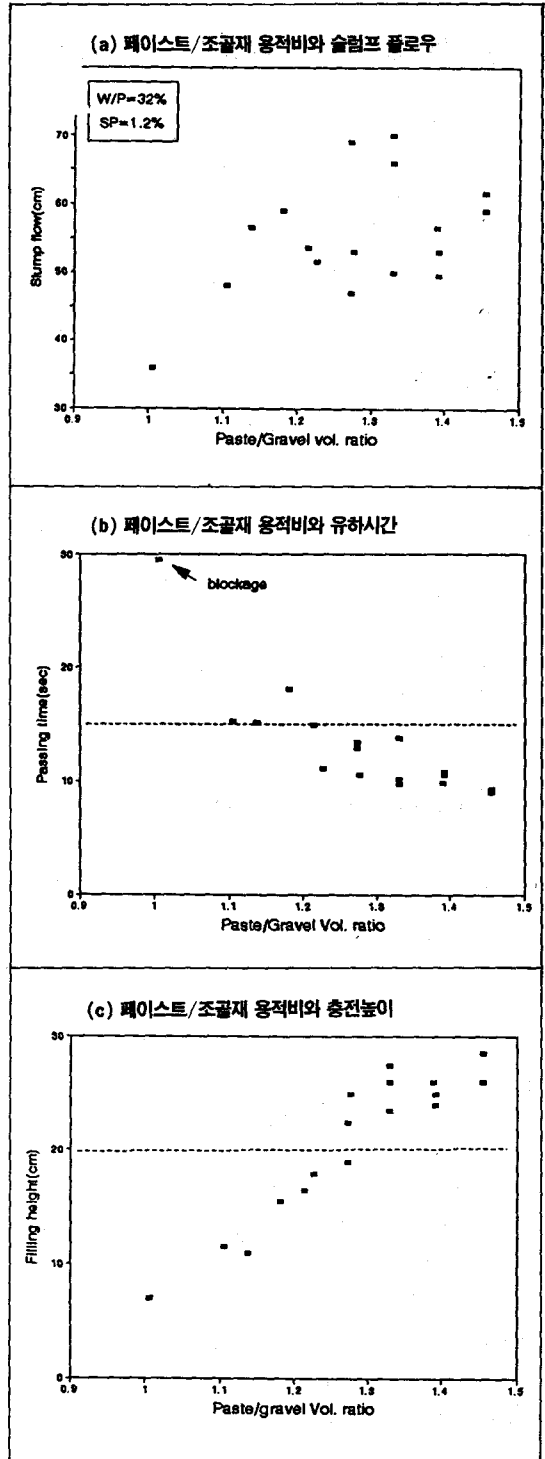
3.4. 종합고찰

3.4.1. 페이스트/조골재 용적비(V_p/V_g)와 콘시스턴시(그림 5 참조)

결합재 비율은 $C : Sg : F = 35 : 45 : 20$, $W/B = 32\%$, 고성능감수제 첨가율을 1.2%로 하여 세골재 및 단위수량(단위결합재량)을 변화시킨 경우 콘시스턴시의 변화 결과를 예비 및 본실험을 종합하여 살펴보면 다음과 같은 경향을 나타내었다.

- (1) V_p/V_g 증가에 따라 슬럼프 플로우는 증가하나 어느 한계를 넘으면 슬럼프 플로우는 큰 변화를 나타내지 않았다.

그림 5. 페이스트/조골재 용적비와 콘시스턴시 변화



- (2) V_p/V_g 가 약 1.0~1.1% 이하이면 O형 깔때기 시험에서 폐쇄현상이 발생하였으나, 1.1 이상이면 V_p/V_g 증가에 따라 약간씩 유하시간이 짧아졌다.
- (3) V_p/V_g 와 충전높이는 거의 직선적으로 비례한다.
- (4) 충전성이 우수한(충전높이 약 25cm 이상) 초유동 콘크리트 제조를 위한 V_p/V_g 는 약 1.25 이상으로 나타났다.

이상의 실험결과로부터 콘크리트의 유동성과 충전성에 미치는 영향은 구성재료들의 용적(양)과 깊은 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 몰탈량의 관점에서 보면 미분말량과 세골재량을 늘리고 조골재량을 저감시킴으로써 충전성이 개선되고, 페이스트량의 관점에서 보면 조골재량이 일정해도 페이스트량에 따라 슬럼프 플로우, 플로우속도, 충전성은 달라지고 조골재가 많을수록 양호한 충전성을 나타내는 페이스트량이 많아짐을 알 수 있다.

3.4.2. SP 첨가율에 의한 영향(그림 6 참조)

예비 및 본 실험결과에서 C : Sg : F=35 : 45 : 20, W/B 32%, s/a 53%, 단위수량 180kg/m³로 하고 고성능감수제 첨가율을 1.0~1.8%로 변화한 콘크리트 콘시스턴스 측정결과,

- (1) SP 첨가량 증가에 따라 슬럼프 플로우는 증가하나 어느 이상에서는 더 이상 증가하지 않았다.
- (2) 고성능감수제 첨가량 증가에 따라 유하속도는 약간씩 감소하는 경향을 나타낸다.
- (3) 충전높이가 최대가 되는 고성능감수제 첨가량이 존재한다.
- (4) 동일한 W/B비, 단위수량(단위결합재량), s/a일 경우, 슬럼프 플로우가 약 60~70cm 정도로 하는 것이 충전성을 최대로 발휘시킨다.

3.4.3. 콘시스턴스 시험법 사이의 관계

예비 및 본실험 결과를 종합하면 그림 7에 나타난 것과 같이 콘크리트의 슬럼프 플로우와 유하시간 사이에서는 상관성이 보이지 않음을 볼 수 있다. 즉, 콘크리트의 점도(유동속도와 관계)와 항복치(변형량)는 서로 별개의 물질임을 알 수 있다. 또한 그림 8에 나타난 슬럼프 플로우와 충전높이와의 관계에서 볼 수 있는 것처럼 배합요인에 따라 유동성과 분리저항

그림 6. SP 첨가율과 초유동 콘크리트 레올로지

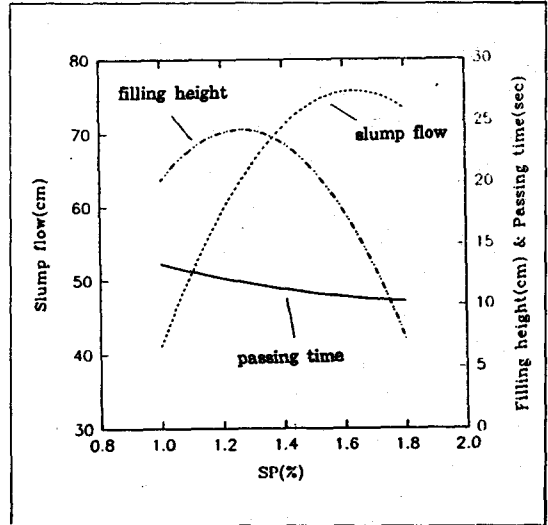


그림 7. 슬럼프 플로우와 유하시간

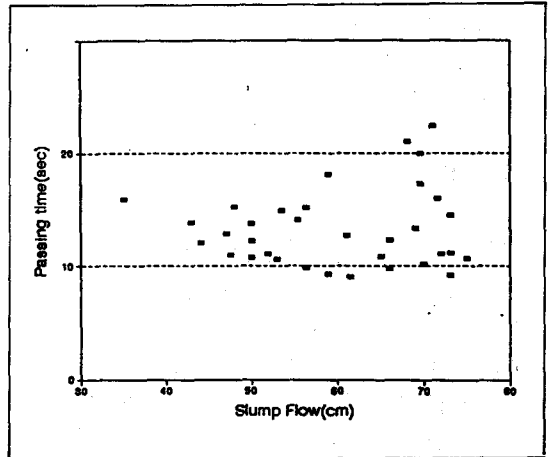
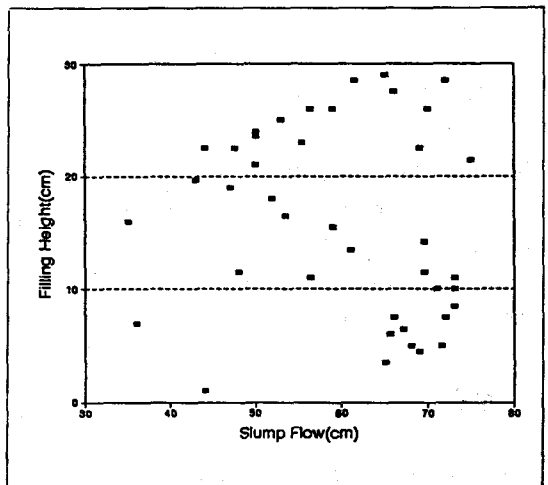


그림 8. 슬럼프 플로우와 충전높이



성이 모두 우수하여 양호한 충전성을 나타내는 배합과 유동성이 불량하여 충전성이 저하하는 배합, 그리고 유동성이 지나치게 커서 재료 분리저항성 감소로 충전성이 저하하는 배합으로 분류할 수 있다.

또한 그림 9에 나타난 바와 같이 양호한 충전성을 나타내기 위해서는 유동속도가 빠를 필요가 있다. 그러나 빠른 유동속도를 나타내는 배합이라도 충전성이 나쁜 경우도 있으므로 유하시간 만으로 콘크리트의 충전성을 판단하기는 어려울 것으로 판단된다.

3.4.4. 시험방법에 따른 편차(표 3 참조)

기준배합에 대하여 6회 반복 실험한 유동성 및 충전성 측정결과를 보면 시험법 가운데 슬럼프 플로우 측정값의 변동이 가장 컸고, 충전높이의 변동이 가장 작았다. 슬럼프 플로우 측정값의 변동이 큰 이유는 사용재료의 상태나 기온 등의 외부조건, 시험자에 의한 차이 등에 의해 시험법 자체의 오차발생 가능성이 큰 것으로 사료된다. 따라서 슬럼프 플로우가 큰(50-70cm) 영역에서의 측정값은 큰 의미를 가질 수 없을 것으로 판단된다.

3.5. 기타

3.5.1. 유동성의 경시변화 및 응결

그림 10과 표 5에 나타나듯이 고성능감수제 종류에 따라 슬럼프 유지성능과 응결시간에 있어서 큰 차이를 나타내었다. 특히 고성능 AE 감수제는 유동성의 유지성능이 매우 양호하였으나 응결 지연 현상이 매우 심하게 나타나 고성능감수제의 선택에 있어 반드시 검토가 필요가 할 것으로 사료된다.

3.5.2. 압축강도

우수한 충전성을 나타내었던 기준 배합 콘크리트의 28일 압축강도는 674kgf/cm^2 이었다. 고강도 콘크리트 시공에서 자주 지적되고 있는 작업성의 문제를 높은 자기 충전능력으로 해결할 수 있으면서도 동시에 강도 발현에 있어서도 고강도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 단위 시멘트량이 적음에도 불구하고 고강도를 얻을 수 있었던 것은 미분말 슬래그의 영향이 매우 큰 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 증점제를 사용하지 않은 물결합재비

그림 9. 유하시간과 충전높이 간

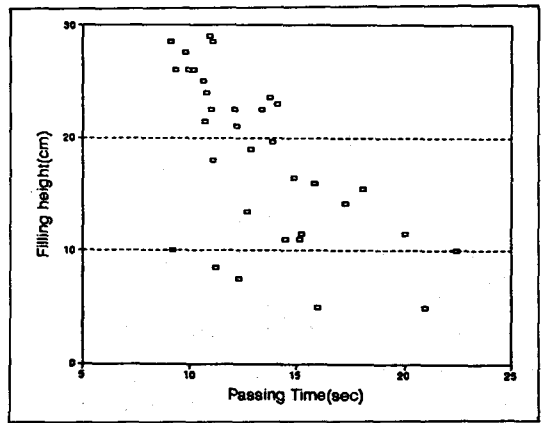


표 3. 기준배합의 변동 정도(6회 반복)

종 류	측정법	플로우 (cm)	유하속도 (초)	충전높이 (cm)
	최 소 값	47.5	9.8	22.5
	최 대 값	70	14.1	29
	평 균	59	11.6	25.3
	표 준 편 차	8.5	1.7	2.4

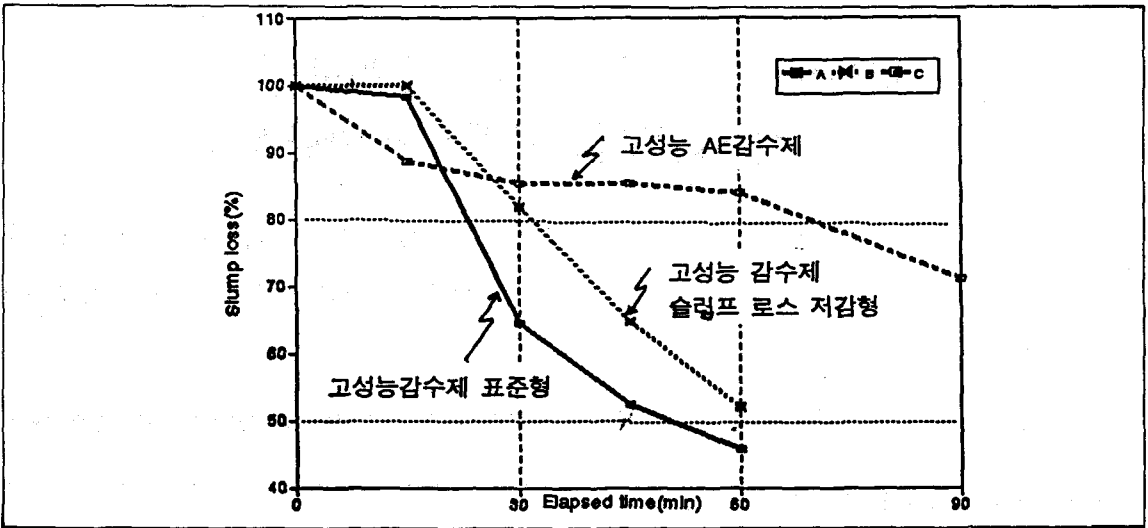
표 5. 응결시간

종 류	항 목	응결시간(시간:분)	
		초 결	종 결
고성능 감수제	표준형	8 : 40	11 : 30
	슬럼프 로스 저감형	8 : 30	11 : 20
고성능 AE 감수제 표준형		24 : 50	28 : 00

표 6. 초유동 콘크리트 압축강도

계 령	3일	7일	28일
압축강도 (kgf/cm ²)	260	445	654

그림 10. 시간 경과에 따른 슬럼프 플로우 변화



32%, 결합재 구성비율 C : Sg : F=35 : 45 : 20의 삼상분계 초유동 콘크리트의 제조가 가능하였으며 실험결과로부터 작업성에 미치는 배합요인의 영향과 평가시험법의 적정성에 관하여 정리하면 다음과 같다.

- (1) 초유동 콘크리트의 제조를 위한 최소 단위결합재량 및 최소 세골재(율) 존재한다.
- (2) 초유동 콘크리트에서 페이스트/조골재 용적비와 충전성은 비례관계가 존재한다.
- (3) 초유동 콘크리트의 유동성과 분리저항성을 동시에 만족하기 위한 고성능감수제 최적 첨가량이 존재하며 최적점 이하에서는 유동성 저하로, 최적점 이상에서는 분리저항성 저하로 충전성이 저하한다.
- (4) 초유동 콘크리트의 작업성은 슬럼프 플로우 시험만으로 평가가 곤란하며 유동성, 분리저항성, 간극통과성 등의 종합적인 충전성 평가를 위한 새로운 시험법의 개발 및 정립이 필요하다.
- (5) 본 실험에서 사용한 박스 충전성 시험장치는 초유동 콘크리트의 충전성을 종합적으로 평가하기 위한 시험법으로 사용 가능하다고 판단된다.

〈참고문헌〉

- (1) 三浦律彦 外 3人, “高速流動 콘크리트에關する基礎的研究” 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.185-190, 1991
- (2) 藤原浩己 外 3人, “高流動 콘크리트의 充填性에關する基礎的研究”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.27-32, 1992
- (3) 十河茂幸 外 3人, “三成分系低發熱セメントを用いた高流動 콘크리트의 基礎的性質”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.33-38, 1992
- (4) 김남호 외 3인, “고성능 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구(제1보, 고미분말슬래그 혼합시멘트의 물성)”, 한국 콘크리트학회 발표 논문집, 제5권, 2호, pp.45-50, 1993.