

프리믹스 시멘트의 활용성 분석을 위한 결합재의 혼합방법에 따른 고강도 콘크리트의 물성 분석

Physical Analysis of High Strength Concrete According to Mixing Methods of Binders for Application Analysis of Pre-Mix Cement

한 천 구*

Han, Cheon-Goo

이 해 일***

Lee, hae ill

Abstract

It is important to increase the strength of binders in order to enhance the strength of concrete. However, when the mineral admixture used for high strength concrete is incorporated individually, its dispersibility decreases due to the phenomenon of compaction, which reduces its fluidity and results in insufficient strength being created. To solve this problem, we can pre-mix each binder in advance to disperse a mineral admixture among binders, which will strengthen the fluidity and strength of concrete. Therefore, this study analyzed the properties of high strength concrete depending on the mix method used, to determine the effect of pre-mix cements ranging from W/B 15 to 35%. It was found that the fluidity of pre-mix increased to a level higher than that of individual mix due to its dispersion and ball bearing effect. The air content was slightly decreased from the result of individual mix due to the micro filler effect, which causes fine particles of silica-fume to fill the voids among cement particles, while the setting time of pre-mix was shorter than that of individual mix, because enhanced dispersion of pre-mix affects hydration heat time. The compressive strength of pre-mix increased due to the phenomenon of compaction of gap structure, and the variation of coefficient decreased by 1.69% on average in strength variation.

KeyWord : Pre-Mix Cement, High Strength Concrete, Fluidity, Compressive Strength

1. 서론

일반적으로 콘크리트를 고강도화 하기 위해서는 결합재의 강도를 증가시키는 것이 중요하다. 그런데 이와 같이 결합재의 강도를 증가시키는 방법으로는 고성능 감수제 등을 사용하여 W/B를 저감시키는 방법, 실리카폼과 같은 고분말의 결합재를 사용하여 수화물량을 증가시키는 방법 등으로 분류할 수 있다.^{1~5)}

특히 고강도 콘크리트에서는 강도증진 및 내구성 증진 등을 목적으로 광물질 혼화재를 반드시 사용하게 되는데, 각각의 혼화재들이 가진 고결현상으로 인하여 개별투입 혼합 시에는 분산성이 크게 저하되어 유동성을 저감시키고, 충분한 강도를 발휘하지 못하는 문제가 발생한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 각각의 결합재를 사전에 혼합하는 즉, 프리믹스하여 콘크리트를 제조하게 되면 실리카폼 등 광물질 혼화재가 충분히 결합재 중에 분산되어 콘크리트의 유동성 향상 및 강도증진 등에 기여할 수 있는 것으로 보고되고 있다.^{6~10)}

그러므로 본 연구에서는 국내에서 사용되는 일반적인 재료조

건에서 국외의 연구와 동일하게 프리믹스 시멘트의 효과가 발휘될 수 있는지를 분석하기 위하여 W/B 15~35 %인 조건에서 결합재의 혼합방법 변화에 따른 콘크리트의 물성을 비교분석하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같고, 배합사항은 표 2와 같다. 먼저 배합사항으로 W/B는 고강도 영역인 15, 25, 35 %의 3수준, 혼합방법은 결합재를 콘크리트 혼합 시 각각 투입하는 개별혼합과 콘크리트 혼합 전 미리 프리믹스하여 혼합하는 2수준으로 변화시켜 총 6배치를 실험계획하였다.

이때 결합재는 보통 포틀랜드 시멘트 70 %(이하 OPC)+고로슬래그 미분말 20 %(이하 BS)+실리카폼 10 %(이하 SF)의 결합재를 사용하였다. 또한 개별혼합의 경우 목표 슬럼프 플로우 600±100 mm, 목표 공기량 3.0±1.0 %를 만족하도록 배합설계한 후 프리믹스의 경우에도 동일한 배합조건을 적용하였다.

* 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사, 정회원

** (주)조영이엔씨, 정회원

실험사항으로 굳지 않은 콘크리트에서는 유동화 시간, 슬럼프 플로우치, 슬럼프 플로우 50 cm 도달시간, 공기량 및 응결시간을 측정하도록 계획하였고, 경화 콘크리트에서는 압축강도를 계획된 재령에서 측정하도록 계획하였다.

표 1. 실험계획

실험요인		실험수준	
배합사항	W/B(%)	3	15, 25, 35
	목표 슬럼프 플로우(mm)	1	600±100
	목표 공기량(%)		3.0±1.0
	결합재		OPC 70 %+BS 20 %+SF 10 %
	혼합방법	2	개별혼합, 프리믹스
실험사항	굳지 않은 콘크리트	·유동화 시간 ·슬럼프 플로우치 ·슬럼프 플로우 50 cm 도달시간 ·공기량 ·응결시간	
	경화 콘크리트	·압축강도(1, 3, 7, 28, 91일)	

표 2. 배합사항

W/B (%)	S/a (%)	AE/C (%)	SP/C (%)	W (kg/m³)	질량배합(kg/m³)				
					C	BS	SF	S	G
15	37	0.02	1.9	157	733	209	105	428	759
25	42	0.01	1.2	166	465	133	66	616	886
35	45	0.01	1.1	170	340	97	49	725	923

2.2 사용재료

본 연구에 사용한 각 재료의 물리·화학적 성질은 표 3~7과 같다. 즉, OPC는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 혼화제로 BS 및 SF는 국내에서 유통되는 일반적인 것을 사용하였다. 잔골재는 국내산 강모래와 부순 모래를 일정비율로 혼합한 혼합 잔골재, 굵은 골재는 국내산 25mm의 부순 굵은 골재를 사용하였다. 또한 혼화제로 SP제는 국내산 폴리칼본산계, AE제는 국내산 음이온계를 사용하였다.

표 3. OPC의 물리적 성질

밀도 (g/cm³)	분말도 (cm³/g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
			초결	중결	3일	7일	28일
			3.15	3.144	0.18	230	375

표 4. BS의 물리·화학적 성질

밀도 (g/cm³)	분말도 (cm³/g)	염기도	MgO (%)	SO₃ (%)	Cl (%)	강열감량 (%)
2.92	4.323	1.82	6.25	1.84	0.01	0.09

표 5. SF의 물리·화학적 성질

밀도 (g/cm³)	분말도 (cm³/g)	화학적성분(%)						
		LOI	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	K₂O
2.21	160.000	1.38	96.65	1.87	0.03	0.19	0.32	0.56

표 6. 골재의 물리적 성질

구분	밀도 (g/cm³)	조립률 (FM)	흡수율 (%)	단위용적 질량(kg/m³)	0.08 mm체 통과량(%)
잔골재	2.59	2.92	1.12	1.694	1.15
굵은 골재	2.70	6.93	1.20	1.584	0.10

표 7. 혼화제의 물리적 성질

구분	형태	색상	밀도(g/cm³)	주성분
SP제	액상	연황색	1.04	폴리카본산계
AE제	액상	미백색	1.01	음이온계

2.3 실험방법

먼저 프리믹스 시멘트의 제조방법은 독일 Eirich사의 RV02E 믹서를 사용하여 각각의 배합비가 결정된 시멘트와 혼화제를 콘크리트 혼합 전 미리 건비빔 상태로 5분간 혼합하여 제조하였으며, 프리믹스 시멘트 제조용 회전형 믹서는 사진 1과 같다.

콘크리트의 혼합은 수평형 2축 믹서를 사용하여 그림 1의 순서로 혼합하였다.

굳지 않은 콘크리트의 실험으로 유동화 시간은 콘크리트가 혼합되기 시작하여 유동성이 발휘되는 시점을 초단위로 시간을 측정하였는데, 실제로 믹서에서 콘크리트를 비벼보면 된비빔 배합에서 유동성이 발휘되는 시점을 육안으로 파악할 수 있으므로 이를 표현하고자 데이터화하였다. 슬럼프 플로우치는 KS F 2594, 슬럼프 플로우 50 cm 도달시간은 중심에서 4방향으로 50 cm가 표시된 지점을 슬럼프 플로우 시험 시 콘크리트가 도달한 시간을 측정하여 평균값으로 구하였다. 공기량은 KS F 2421, 응결시간은 KS F 2436의 관입저항침에 의한 콘크리트의 응결시간 시험방법에 의거 측정하였다.

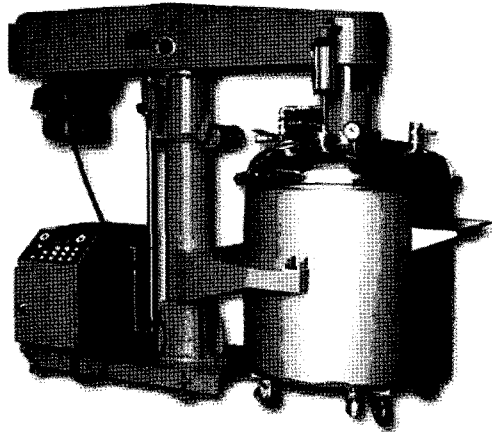


사진 1. 프리믹스 시멘트 제조용 회전형 믹서

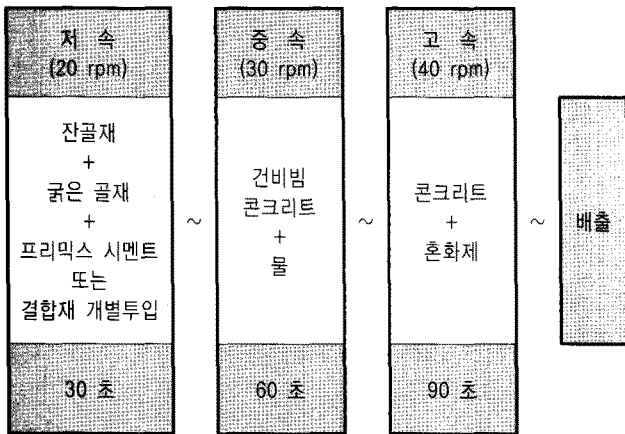


그림 1. 콘크리트의 혼합

경화 콘크리트의 실험으로 압축강도는 KS F 2405에 의거 표준온도조건에서 계획된 재령까지 양생한 후 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

3.1.1 유동성

그림 2는 W/B 변화에 따른 유동화 시간을 나타낸 그래프이다. 프리믹스의 경우가 개별혼합의 경우보다 약 8초 정도 빠른 것으로 나타났는데, 이는 결합재의 사전혼합에 따른 분산성이 향상되어 결합재간의 뭉침현상이 감소하여 유동성이 발휘되는 시간이 단축된 것으로 분석된다.

그림 3은 W/B 변화에 따른 슬럼프 플로우치를 나타낸 그래프이다. 프리믹스의 경우가 개별혼합의 경우보다 약 37 mm 정도 큰 것으로 나타났는데, 이는 개별혼합의 경우 콘크리트 혼합 시 각각의 결합재가 균일하게 분산되기 어려워 유동성이 나쁘게 나타난 반면, 프리믹스의 경우는 각각의 결합재를 미리 시멘트 중에서 분산시킨 것이기 때문에 콘크리트 혼합 시 분산성이 증가하여 슬럼프

플로우치가 증가한 것으로 분석된다. 이는 사진 2와 같이 SF와 같은 구형의 초미립 혼화제가 개별혼합의 경우는 시멘트 입자 표면에 코팅이 불균일하게 나타난 반면, 프리믹스의 경우는 시멘트 입자 표면에 균일하게 코팅되어 상대적으로 양호한 볼베어링 작용을 한 요인으로 판단된다.

그림 4는 W/B 변화에 따른 슬럼프 플로우 50 cm 도달시간을 나타낸 그래프이다. 프리믹스의 경우가 개별혼합의 경우보다 약 6초 정도 빠른 것으로 나타났는데, 이는 슬럼프 플로우치의 증가 요인과 마찬가지로 양호한 볼베어링작용의 영향으로 분석된다.

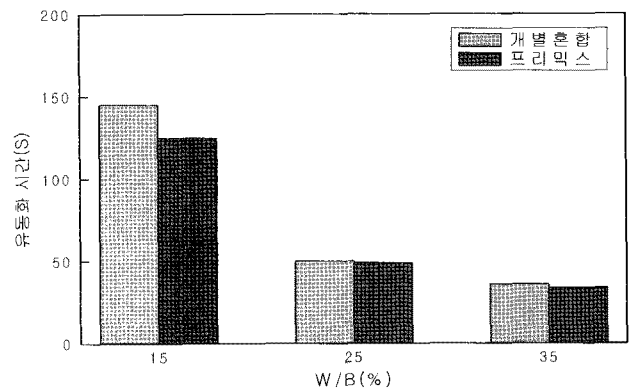


그림 2. W/B 변화에 따른 유동화 시간

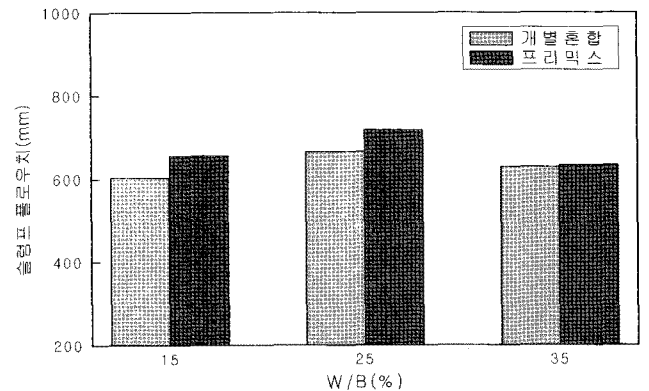
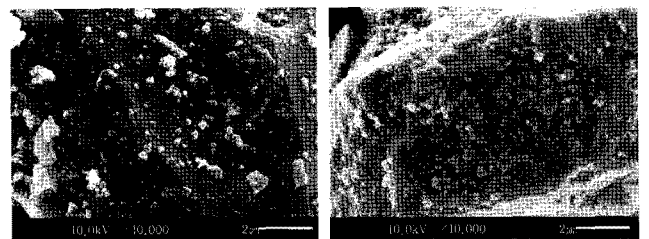


그림 3. W/B 변화에 따른 슬럼프 플로우치



개별혼합

프리믹스

사진 2. SEM에 의한 미세구조

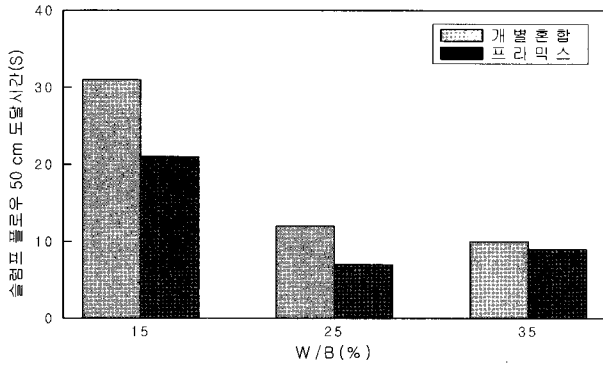


그림 4. W/B 변화에 따른 슬럼프 플로우 50 cm 도달시간

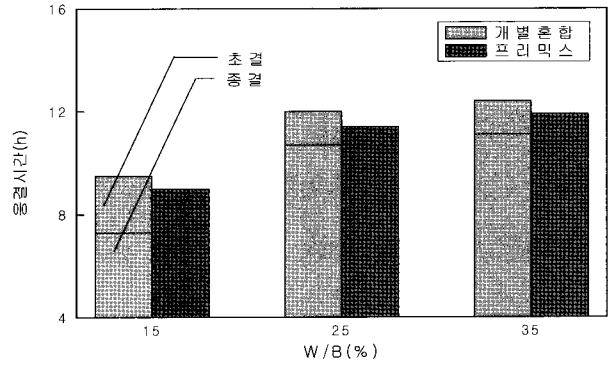


그림 6. W/B 변화에 따른 응결시간

한편 W/B가 클수록 유동화 시간 및 슬럼프 플로우 50 cm 도달 시간이 단축되었는데, 이는 분체량이 저하하여 페이스트와 골재 계면 사이의 마찰이 작아짐에 따른 점성저하의 요인으로 분석된다.

또한 전반적으로 W/B가 낮을수록 프리믹스에 의한 유동성 향상의 효과가 양호한 것으로 나타났는데, 이는 결합재의 양이 많을수록 분산성에 미치는 영향이 크기 때문으로 판단된다.

3.1.2 공기량

그림 5는 W/B 변화에 따른 공기량을 나타낸 그래프이다. 프리믹스의 경우가 개별혼합의 경우보다 약 0.3 % 정도 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 프리믹스의 양호한 분산성으로 인한 SF의 미세한 입자가 시멘트 입자사이의 공극을 어느 정도 충전하는 마이크로 필러 효과에 의해 상대적으로 공기량이 감소한 것으로 분석된다.

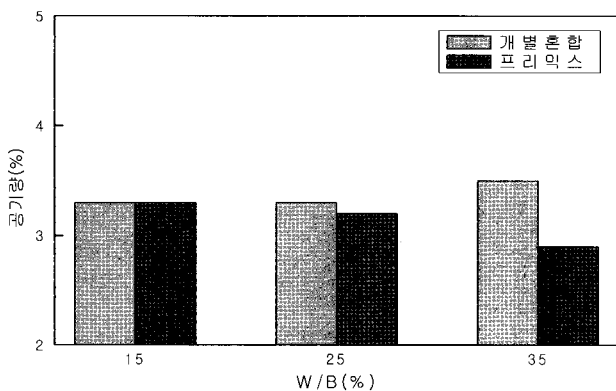


그림 5. W/B 변화에 따른 공기량

3.1.3 응결시간

그림 6은 W/B 변화에 따른 응결시간을 나타낸 그래프이고, 그림 7은 프리믹스와 개별혼합간의 응결시간을 상호 비교하여 나타낸 그래프이다. 프리믹스의 경우가 개별혼합의 경우보다 약 30분 정도 빠른 것으로 나타났는데, 이는 프리믹스에 의한 결합재의 균질한 분산이 수화발열 속도의 증가에 기여한 것으로 분석된다.

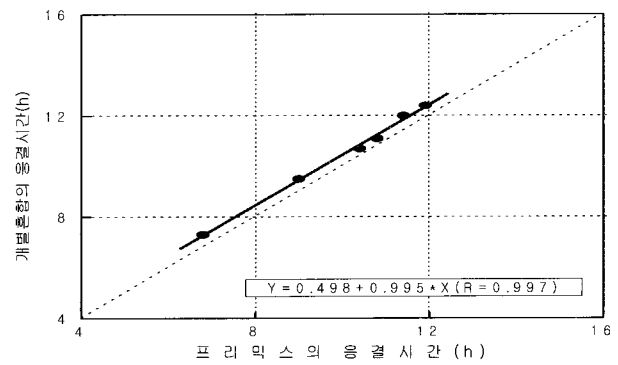


그림 7. 프리믹스와 개별혼합의 응결시간 비교

3.2 경화 콘크리트의 특성

3.2.1 압축강도

그림 8은 W/B 변화에 따른 압축강도 나타낸 그래프이고, 그림 9는 프리믹스와 개별혼합간의 압축강도를 비교하여 나타낸 그래프이다. 프리믹스의 경우가 개별혼합의 경우보다 약 7 MPa로 10 % 정도로 큰 값을 나타내었는데, 이는 프리믹스에 의한 결합재의 균질한 분산이 시멘트 입자사이의 공극을 효과적으로 충전하는 마이크로 필러 효과에 의해 공극구조가 치밀화된 결과로 분석된다.

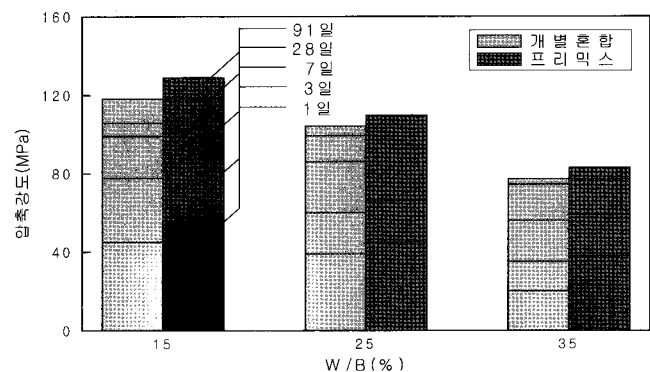


그림 8. W/B 변화에 따른 압축강도

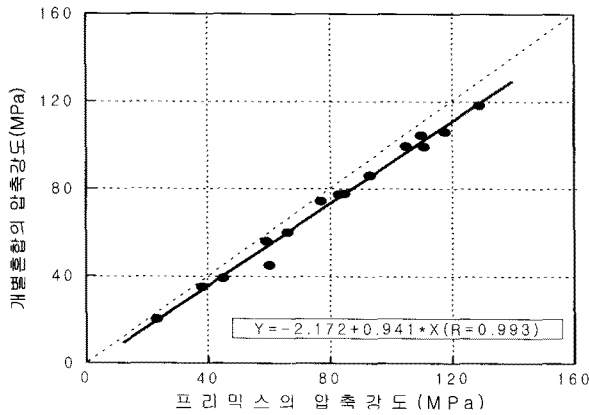


그림 9. 프리믹스와 개별혼합의 압축강도 비교

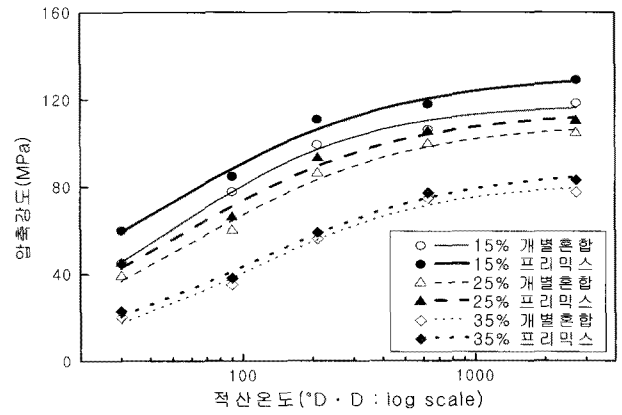


그림 10. 적산온도에 따른 강도발현해석

한편 W/B가 10 %씩 낮아질수록 프리믹스에 의한 압축강도 향상의 효과가 약 3.5 %씩 커지는 것으로 나타났는데, 이는 단위 결합재량이 증가할수록 프리믹스의 양호한 분산성이 압축강도 증가에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

또한 1일 재령에서는 약 20 %, 91일 재령에서는 약 7 % 정도로 초기재령일수록 프리믹스에 의한 압축강도 향상의 효과가 커지는 것으로 나타나, 차후 실무현장 적용 시 거푸집 제거시기의 단축으로 공기단축에도 효과적일 것으로 판단된다.

3.2.2 적산온도에 의한 강도발현 해석

W/B 변화 및 프리믹스 여부에 따른 강도발현해석으로 본 연구에서 사용한 모델식은 다음과 같은 가마다(鎌田)의 로지스틱(Logistic)곡선을 이용하였다.¹¹⁾

$$F_c = \frac{F_\infty}{1 + \exp(-k \log M + m)}$$

여기서 F_∞ : 최종강도(MPa)
 k, m : 실험상수
 M : 적산온도($^{\circ}D \cdot D$ 또는 $^{\circ}C \cdot day$)

그림 8은 로지스틱 모델을 활용한 적산온도에 따른 강도발현 해석을 나타낸 그래프이고, 표 9는 로지스틱 해석모델의 실험상수 값을 나타낸 표이다. 로지스틱 모델식을 이용한 강도발현해석 결과 결정계수가 0.984~0.991 정도로 나타나 실험에 의하여 측정된 값과 로지스틱 모델 식에 의해 예측된 값이 비교적 양호한 추정 정밀도를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 본 결과를 이용하여 W/B와 재령을 결정하게 되면 압축강도의 예측이 가능할 수 있음을 알 수 있었다.

표 8. 로지스틱 해석모델의 실험상수값

W/B (%)	구분	실험상수			
		F_∞	k	m	R^2
15	개별혼합	117.7	1.030	3.972	0.991
	프리믹스	132.1	0.832	3.044	0.986
25	개별혼합	108.8	0.947	3.892	0.988
	프리믹스	114.5	0.917	3.636	0.984
35	개별혼합	81.80	1.057	4.894	0.987
	프리믹스	88.10	0.954	4.429	0.991

3.2.3 강도편차분석

본 연구의 범위에서 프리믹스의 경우는 균질한 분산성으로 유동성 향상, 압축강도 증진과 함께 압축강도의 편차도 개선될 것으로 추측된다.

따라서 표 9는 W/B를 무차원화 하여 1회 시험결과치의 3개 공시체를 개개의 값으로 하여 압축강도의 각 재령별로 프리믹스와 개별혼합간의 편차를 표준편차와 변동계수로 그 효과를 분석한 것이다. 분석결과 표준편차를 평균치로 나누어 백분율로 표현한 변동계수는 프리믹스의 경우 4.76 %, 개별혼합의 경우 6.45 %를 나타내었다. 이 결과를 토대로 프리믹스 시멘트는 각 결합재가 콘크리트 내에 균질하게 분포되어 개별혼합보다 평균 변동계수는 1.69 % 정도 작아지는 양호한 결과임을 알 수 있었다.

표 9. 강도 데이터의 편차분석

재령 (일)	개별혼합		프리믹스		변동계수 차(A-B)
	표준편차 (MPa)	변동계수(A) (%)	표준편차 (MPa)	변동계수(B) (%)	
1	3.00	8.63	2.33	5.46	3.17
3	3.81	6.61	3.28	5.21	1.40
7	4.52	5.61	3.59	4.09	1.52
28	5.21	5.58	4.41	4.41	1.17
91	5.84	5.83	4.96	4.62	1.21
평균	-	6.45	-	4.76	1.69

4. 결 론

본 연구에서는 프리믹스 시멘트의 활용성을 분석할 목적으로 W/B 15~35 %의 범위에서 결합재의 혼합방법에 따른 고강도 콘크리트의 물성을 비교분석 하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 유동성은 프리믹스의 경우가 개별혼합의 경우보다 균일분산 및 시멘트 입자에 균질한 코팅으로 인한 불 베어링 효과로 유동화 시간은 약 8초 단축되었고, 슬럼프 플로우치는 약 37 mm 정도 증가하였으며, 슬럼프 플로우 50 cm 도달시간은 약 6초 정도 단축되었다.
- 2) 공기량은 프리믹스의 경우가 개별혼합의 경우보다 SF 미세 입자의 양호한 분산성으로 시멘트 입자간의 공극을 어느 정도 충전하는 마이크로 필러 효과로 약 0.3 % 정도 감소하였다.
- 3) 응결시간은 프리믹스의 경우가 개별혼합의 경우보다 결합재의 균질한 분산이 수화발열속도에 영향을 주어 약 30분 정도 단축되었다.
- 4) 압축강도는 프리믹스의 경우가 개별혼합의 경우보다 균질한 분산에 의한 공극구조의 치밀화로 인해 약 7 MPa 정도 큰 값으로 나타났다. 또한 W/B가 낮을수록, 초기재령일수록 프리믹스에 의한 압축강도 증진의 효과가 커지는 것으로 나타났다. 강도편차로는 평균적으로 약 1.69 % 정도 변동계수의 감소효과를 나타내었다.

종합적으로 본 연구결과에 의하면 고강도 콘크리트에 국내에서 일반적으로 유통되는 결합재를 프리믹스 시멘트로 제조하여 사용하게 되면 각 결합재의 개별혼합보다 양호한 유동성 및 강도증진의 효과가 얻어짐을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김기훈, 이주선, 노상균, 이해일, 황인성, 한천구, 결합재 조합 및 믹싱시간 변화에 따른 프리믹스 시멘트를 사용한 고성능시멘트 모르타의 기초적 특성 분석, 대한건축학회 추계 학술발표대회 논문집, 제28권 제1호, pp.459~462, 2008.10
2. 김기훈, 황인성, 김성수, 최성용, 한민철, 한천구, 초고강도용 시멘트 결합재의 물성에 미치는 실리카폼 종류의 영향, 한국건축사공학회 춘계 학술논문 발표대회 논문집, 제7권 제1호, pp.51~54, 2007.4
3. 김성일, 배장춘, 김기훈, 황인성, 김성수, 한천구, 고강도 콘크리트용 프리믹스 시멘트의 분체조합 변화에 따른 페이스트의 유동특성, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제19권 제2호, pp.657~660, 2007.11
4. 김성일, 장기현, 이충섭, 한동엽, 김기훈, 한천구, 프리믹스 시멘트를 사용한 모르타의 기초적 특성 분석, 한국건축사공학회 춘계 학술.기술 논문발표회 논문집, 제8권 제1호, pp.93~97, 2008.5

5. 김형태, 실리카폼 및 실리카폼 콘크리트의 특성과 이용, 한국콘크리트학회 학회지, 제3권 제3호, pp.23~30, 1991.9
6. 문한영, 김진철, 실리카폼 혼합 고강도 콘크리트의 기초물성에 관한 연구, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제3권 제2호, pp.21~25, 1991.11
7. 배준영, 김종백, 조성현, 노현승, 김정환, 박승범, 프리믹스 혼합시멘트를 사용한 콘크리트의 품질편차에 관한 연구, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제20권 제2호, pp.569~572, 2008.10
8. 변근주, 남진원, Silica Fume Concrete, 기문당, 2006
9. 한국콘크리트학회, 최신콘크리트공학, 기문당, 2005.2
10. 황인성, 김성일, 최성용, 이해일, 김성수, 한천구, 실리카폼 종류변화에 따른 프리믹스시멘트 페이스트의 유동특성, 대한건축학회 추계 학술발표대회 논문집, 제27권 제1호, pp.535~538, 2007.10
11. 鎌田英治, 洪悦郎, 田畑雅幸, 浜幸雄, ロジスティック曲線を應用したコンクリート強度推定法の提案, 日本建築學會論文報告集, No.367, pp.1~10, 1986.9

(접수 2009. 8. 31, 심사 2009. 9. 11, 게재확정 2009. 9. 18)

요 약

일반적으로 콘크리트를 고강도화 하기 위해서는 결합재의 강도를 증가시키는 것이 중요하다. 그러나 고강도 콘크리트에 사용되는 광물질 혼화재들이 가진 고결현상으로 인해 개별투입 혼합 시에는 분산성이 크게 저하되어 유동성을 저감시키고, 충분한 강도를 발휘하지 못하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 각각의 결합재를 사전에 프리믹스하여 콘크리트를 제조하게 되면 광물질 혼화재가 충분히 결합재 중에 분산되어 콘크리트의 유동성 향상 및 강도증진 등에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 W/B 15~35 % 범위내에서 프리믹스 시멘트의 효과를 분석하기 위해 결합재의 혼합방법에 따른 고강도 콘크리트의 물성을 분석하였다. 그 결과 유동성은 프리믹스의 균일분산 및 불 베어링 효과로 인해 개별혼합보다 양호한 결과를 나타내었고, 공기량은 프리믹스의 시멘트 입자간 공극을 실리카폼의 미세한 입자가 충전하는 마이크로 필러 효과로 인해 개별혼합 보다 약간 감소하였으며, 응결시간은 프리믹스의 균질한 분산이 수화발열속도에 영향을 주어 개별혼합보다 단축되었다. 압축강도는 프리믹스의 공극구조 치밀화로 인하여 증가하였으며, 강도편차 또한 평균적으로 약 1.69 % 정도 변동계수가 감소하는 효과를 나타내었다.

키워드 : 프리믹스 시멘트, 고강도 콘크리트, 유동성, 압축강도