

초고강도용 시멘트 결합재의 물성에 미치는 실리카폼 종류의 영향

The Influence of the Type of Silica Fume on the Property of Cement Binder for Ultra High Strength

김기훈* 황인성** 김성수*** 최성용**** 한민철***** 한천구*****
Kim, Ki Hoon Hwang, Yin Seong Kim, Sung Su Choi, Sung Yong Han, Min-Cheol Han, Cheon-Goo

Abstract

This study investigates the properties of paste and mortar from different types and forms of silica fume on cement binder for ultra high strength. Although most Silica Fumes distributed in the market fulfill the KS quality standard, each type showed different levels of loss of ignition. When evaluating cement binder for ultra high strength in a form of paste. Flow, viscosity and moving freely time show great difference depending on the Silica Fume's form and type of primary particle's dispersibility. The evaluation of Silica Fume's dispersibility can be possible with the paste test since there is a high correlation of flow quality between paste and mortar. The compressive strength when using Silica Fume was correlated to the SiO₂ content. Synthetically, selecting Silica Fume with the most the ideal primary particle is the key to optimizing the formation for cement binder for ultra high strength.

키워드 : 초고층 건축물, 초고강도 콘크리트, 프리믹스 시멘트, 실리카폼, 점도
Keyword : Super Tall Building, Ultra High Strength Concrete, Pre-Mx Cement, Silica fume, Viscosity

1. 서론

최근 우리나라에서는 건축구조물의 초고층화, 대형화에 따라 압축강도 100MPa 이상의 초고강도 콘크리트에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 초고강도 콘크리트는 낮은 W/B, 고성능 AE 감수제 사용, 실리카폼 등과 같은 초미립자 혼화재의 사용으로 얻어질 수 있다. 이 중 실리카폼은 95% 이상이 1 μ m 미만의 매우 미세한 입자로서 콘크리트 혼합과정에서 분산이 되지 않을 경우 점성 증가에 따른 유동성 및 팽창성 등의 작업성 저하와 불균일한 콘크리트의 품질을 초래할 수 있기 때문에 실리카폼을 콘크리트 내에서 적절히 분산시키는 것은 매우 중요하다.

특히, 완벽한 실리카폼의 분산을 위한 고성능AE감수제량 및 혼합시간의 증가는 초고강도 콘크리트의 품질, 경제성, 생

산성 등을 저하시키기 때문에 실리카폼에 대한 품질시험을 통하여 분산성이 양호한 실리카폼을 선정 사용해야 하지만 이에 대한 검토는 미흡한 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 국내에서 유통되고 있는 실리카폼에 대한 기초적인 물성을 검토하고, 이를 사용하여 제조한 초

고강도용 시멘트 결합재의 페이스트 및 모르타르의 물성을 비교 검토함으로써 초고강도 콘크리트 제조를 위한 시멘트 결합재의 고성능화에 기여하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같다. 즉, 실험요인으로 국내에서 유통되는 실리카폼 11종류에 대하여 밀도 및 화학성분 등 실리카폼에 대한 기초적 물성을 검토하고, 초고강도용 결합재로 시멘트 : 슬래그미분말 : 실리카폼을 7 : 2 : 1 인 비율에서 실리카폼 종류별 11수준에 대하여 페이스트 및 모르타르의 물성을 검토하는 것으로 하였다. 이때, 실리카폼 A를 플레인으로 목표 플로우 230 \pm 10mm를 만족하도록 배합설계한 후 실리카폼 종류에 따라 동일 배합을 적용하였다. 실험사항은 표 1과 같고, 배합사항은 표 2와 같다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 A사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 고로슬래그 미분말은 국내 K사의 제품을 사용하였는데, 그 물리적 성질은 표 3 및 4와 같다. 잔골재는 주문진산 표준사를 사용하였고, 혼화제는 고성능 감수제로 국내산 E사의 폴리카르본산계를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 표 5와 같다. 또한, 실리카폼은 국내에서 유통되고 있는 6종의 분말형 제품과 5종의 과립형 제품을 사용하였는데, 그 물리·

* 아세아시멘트(주) 연구개발팀 연구원, 정회원
** 아세아시멘트(주) 연구개발팀 선임연구원, 정회원
*** 아세아시멘트(주) 연구개발팀장, 정회원
**** 청주대 일반대학원 석사과정, 정회원
***** 청주대 건축공학부 전임강사, 정회원
***** 청주대 건축공학부 교수, 정회원

화학적 성질은 표 6과 같다.

표 1. 실험계획

실험 요인		실험 수준	
실험 요인	배합비	1	1 : 1
	목표 플로우(mm)	1	230±10
	실리카폼 종류	11	· 분말형 6종 (A, B, C, D, E, F) · 과립형 5종 (a, b, c, d, e)
실험 사항	실리카폼	2	· 밀도 · 화학성분
	굳지않은 모르터*	4	· 페이스트 플로우 · 페이스트 점도 · 모르터 플로우 · 유동화시간
	경화 모르터*	1	· 압축강도(3, 7, 28일)

* 초고강도용 시멘트 결합재는 시멘트 : 고로슬래그 미분말 : 실리카폼 = 7 : 2 : 1 비율로 혼합

표 2. 배합사항

구분	배합비	W/B (%)	SP (%)	질량배합(kg/m ³)				
				W	C	BS	SF	S
페이스트	-	25	1.0	429	1199	342	171	-
모르터	1 : 1	25	1.3	259	717	205	102	1024

표 3. 시멘트의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,375	0.08	225	290	22.0	31.2	40.1

표 4. 고로슬래그 미분말의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	강열감량 (%)	염기도	화학 성분(%)		
				SO ₃	MgO	Cl
2.92	4,323	0.09	1.82	1.84	6.25	0.01

표 5. 고성능 감수제의 물리적 성질

주성분	형태	색상	밀도 (g/cm ³)	고형분 (%)
플리카르본산계	액상	연황색	1.04	17

표 6. 실리카폼의 물리·화학적 성질

구분	KS 기준	실리카폼 종류											
		분말형						과립형					
		A	B	C	D	E	F	a	b	c	d	e	
밀도(g/cm ³)	-	2.21	2.13	2.21	2.26	2.13	2.10	2.22	2.27	2.11	2.13	2.28	
화학 성분 (%)	LOI	5.0↓	0.99	1.86	4.73	2.34	1.38	1.22	2.65	2.68	4.13	5.09	4.54
	SiO ₂	85↑	96.3	95.1	83.4	93.5	96.7	95.9	88.2	88.5	89.0	89.5	92.0
	Al ₂ O ₃	-	19.2	2.11	2.8	2.07	1.87	1.91	2.47	2.22	2.22	1.97	2.18
	Fe ₂ O ₃	-	0	0	0.62	0.03	0.03	0	1.09	1.03	0.74	0	0
	CaO	-	0	0	2.69	0	0	0	0	0	0	0.41	0
	MgO	5.0↓	0	0	2.25	0.42	0.19	0	1.87	1.96	0.8	0.25	0
	SO ₃	3.0↓	0.35	0.17	1.76	0.38	0.32	0.39	0.39	0.42	0.62	0.57	0.75
	K ₂ O	-	0.49	0.74	1.78	1.32	0.56	0.63	3.31	3.17	2.49	2.24	0.58

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 실리카폼의 화학성분은 형광 X선 분석기를 사용하였고, 밀도는 전자밀도계를 사용하여 측정하였다. 초고강도용 시멘트 결합재는 고효율 믹서로 5분간 혼합하여 제조하였다. 시멘트 페이스트 및 모르터의 혼합은 모르터 믹서에서 3분간 실시하였고, 페이스트 플로는 KS F 4041에 의거하여 측정하였으며, 모르터 플로는 KS L 5111의 규준에 의거 무충격 플로우로 측정하였다. 유동화 시간은 혼합 개시부터 유동성이 발휘되어 퍼지기 시작하는데 걸리는 시간을 육안 관찰하였고, 시멘트 페이스트의 점도는 점도계(Brookfield DV-II+, 50rpm, Spindle NO 6)를 사용하여 점도가 비교적 안정화 되는 30초 후에 측정하였다. 또한, 압축강도는 KS L 5105에 의거 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실리카폼의 물리·화학적 성질

표 6은 국내에서 유통 중인 실리카폼의 물리·화학적 성질을 나타낸 것이다.

먼저 실리카폼 종류별 밀도는 2.1~2.3g/cm³ 정도의 수준으로 분말형보다 과립형이 다소 높은 것으로 나타났으며, 화학성분 중 SiO₂함량은 과립형보다 분말형 제품이 비교적 높은 것이 확인되었다. 또한, 강열감량은 분말형보다 과립형이 다소 높은 경향으로 나타났지만, 실리카폼 종류에 따른 차이가 큰 것으로 나타났는데, 이는 미연소탄분 및 보관 기간 차이에 따른 수분 흡수량 등의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

이상을 종합하면 국내에서 유통되는 실리카폼은 KS F 2567의 규정치를 대부분 만족하는 것으로 나타났다.

3.2 시멘트 결합재의 페이스트 특성

그림 1은 시멘트 결합재의 실리카폼 종류 변화에 따른 페이스트 플로우, 점도 및 유동화 시간을 나타낸 것이다.

페이스트 플로는 실리카폼의 분말·과립형의 형태에 의한 차이보다 종류에 따른 차이가 큰 것으로 나타났는데, 분말형은 F>A>E≅B>C>D, 과립형은 a≅b>c>e>d의 순으로 나타났다. 이는 실리카폼의 화학적 성질 분석결과 중 형태별 강열감량과 반비례하는 경향으로 보관기관에 따라 증가하는 실리카폼 입자의 수분흡수 및 응집에 의한 분산성 저하에 기인한 것으로 판단되며 플로우와 반비례의 경향으로 나타나는 페이스트 점도를 통해서도 확인할 수 있었다.

시멘트 결합재 페이스트가 풀리는 유동화 시간은 전체적으로 분말형 실리카폼이 과립형보다 빠른 것으로 나타났는데, 이는 일차입자로의 분산이 용이한 분말형이 시멘트 입자에 코팅되어 불베어링 효과에 의해 유동성 및 분산성이 증가한 것으로 사료된다. 또한 실리카폼 종류에 따라서는 분말형 A, B, E, F와 과립형 A의 경우는 혼합 개시 후 30초 이내에 빠르게 유동성이 발휘되어 분산성이 양호한 것으로 나타난 반면, 강열감량이 높은 분말형 D와 과립형 c, d, e의 경우는 유동화 시간이 증가하여 분산성이 저하하였다.

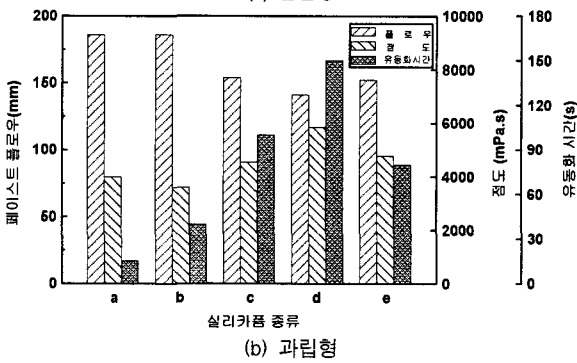
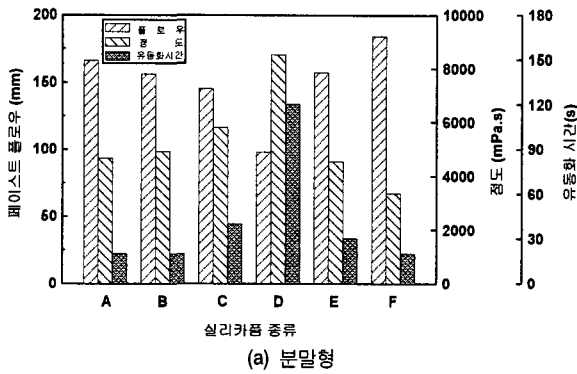


그림 1. 실리카폼 종류 변화에 따른 페이스트 몰로우, 점도 및 유동화 시간

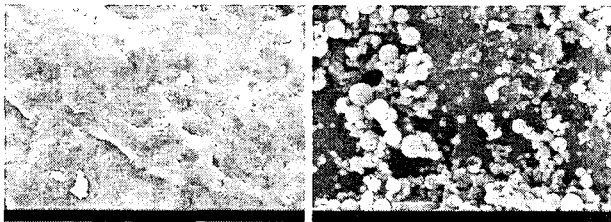


사진 1. 초고강도용 시멘트 결합재

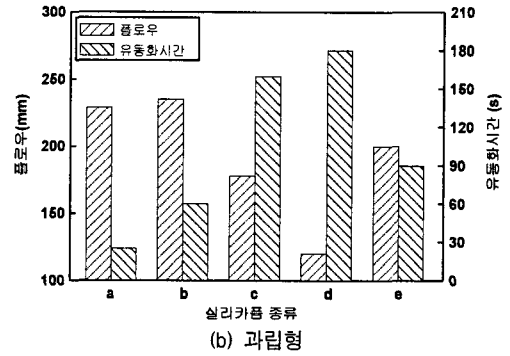


그림 2. 실리카폼 종류에 따른 모르터 몰로우 및 유동화 시간

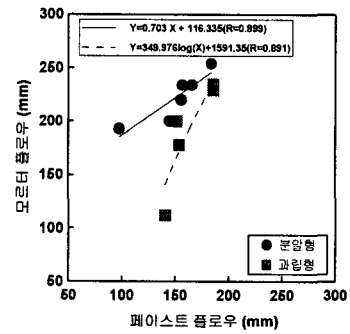


그림 3. 페이스트 몰로우와 모르터 몰로우의 관계

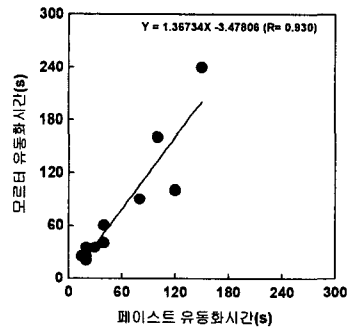
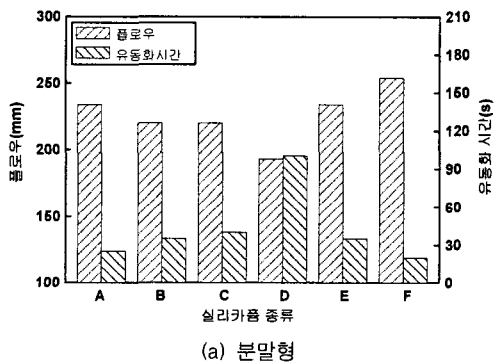


그림 4. 페이스트 유동화 시간과 모르터 유동화 시간의 관계

3.3 굳지않은 모르터의 특성

그림 2는 시멘트 결합재의 실리카폼 종류에 따른 모르터 몰로우 및 유동화 시간을 나타낸 것이고, 그림 3은 페이스트몰로우와 모르터 몰로우의 관계를 나타낸 것이며, 그림 4는 페이스트 유동화 시간과 모르터 유동화 시간의 관계를 나타낸 것이다.



모르터 몰로우는 분말형 F > A ≃ E > B > C > D, 과립형 b > a > e > c > d의 순으로 페이스트에서의 결과와 일치하는 경향으로 나타났다. 이것은 페이스트에서와 같이 1μm 이하의 일차입자로 분산되는 실리카폼의 분산성 차이에 따른 실리카폼의 볼베어링 작용 및 filler 효과의 차이가 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

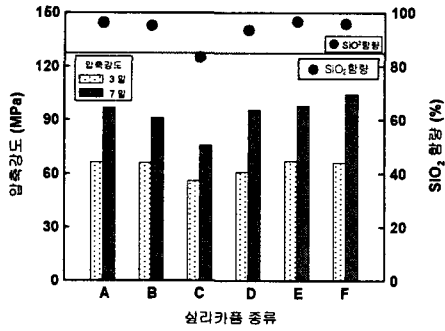
또한, 모르터의 유동화 시간은 페이스트의 유동화 시간과 일치하는 것으로 나타나 페이스트에 의한 실리카폼의 분산성 평가 가능성을 확인할 수 있었다.

3.4 압축강도

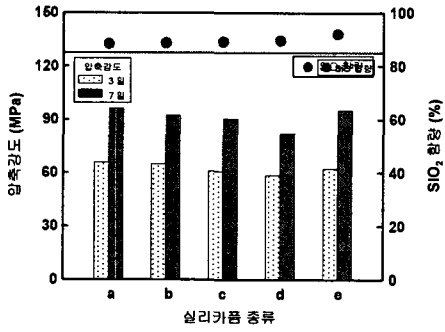
그림 5는 시멘트 결합재의 실리카폼 종류별 압축강도 및 SiO₂ 함량을 나타낸 것이고, 그림 7은 실리카폼의 SiO₂ 함량과 압축강도의 관계를 나타낸 것이다.

분말형 실리카폼을 사용한 경우는 실리카폼의 SiO₂ 함량이 증가할수록 포졸란 반응성이 증진되어 압축강도가 증가하는 경향으로 나타났고, SiO₂의 함량 차이에 의한 압축강도의 차이

는 재령이 증가할수록 더욱 증가하는 것으로 나타났지만, 과립형 실리카폼을 사용한 경우는 SiO₂ 함량에 따른 압축강도의 증진현상이 거의 나타나지 않았는데, 이는 실리카 함량의 분포가 넓지 않음에 기인한 것으로 판단된다.



(a) 분말형



(b) 과립형

그림 5. 실리카폼 종류에 따른 압축강도 및 SiO₂ 함량

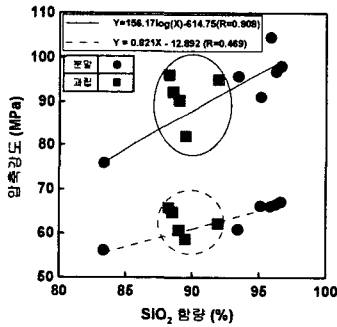


그림 6. SiO₂ 함량과 압축강도의 관계

4. 결론

본 연구에서는 초고강도용 시멘트 결합재의 실리카폼 형태 및 종류에 따른 물리·화학적 성질, 페이스트 및 모르타의 물성을 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 국내 유통 중인 실리카폼의 대부분은 KS의 품질규격을 만족하였지만, 실리카폼 종류별 강열감량은 보관 기간 차이에 따른 수분 흡수량과 미연소탄분 등에 기인하여 다소 차이가 있었다.
- 2) 초고강도용 시멘트 결합재의 페이스트 상태로의 검토 결과, 플로우, 점도, 유동화 시간은 실리카폼의 형태 및 종류별 일차입자로의 분산성에 따라 차이가 크게 나타났다.

- 3) 실리카폼 종류 변화에 따른 페이스트와 모르타의 유동특성은 높은 상관관계가 있는 것으로 나타나 간편한 페이스트 실험에 의해 실리카폼의 분산성 평가가 가능한 것으로 판단된다.
- 4) 분말형 실리카폼을 사용한 경우의 압축강도는 SiO₂ 함량과 높은 상관관계가 있는 것으로 분석되었다.

이상의 결과에서 초고강도 콘크리트 제조를 위한 초고강도용 시멘트 결합재는 최적의 일차입자를 갖는 실리카폼의 선정이 중요함을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. 今橋太 ; シリカフェームの分散性と超高强度コンクリートの流動性, 無機マテリアル, Vol. 5, 1998. 1, PP. 54-59
2. ACI 234-R ; Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, 2006.
3. Silica Fume Association ; Silica Fume User's Manual, 2005. 4
4. 김성수, 차완호, 권오봉, 손유신, 이승훈 ; 설계강도 150MPa 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재의 개발, 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제18권 1호, 2006. 5, PP. 25-28