

석영미분말의 입자크기가 UHPC의 유동성 및 강도에 미치는 영향

Effect of siliceous powder's particle size on the workability and strength of UHPC

강 수 태* 박 정 준* 류 금 성* 고 경 택** 김 성 욱** 이 장 화**
Kang, Su Tae Park, Jung Jun Ryu, Gum Sung Koh, Gyung Taek Kim, Sung Wook Lee, Jang Hwa

ABSTRACT

Ultra high performance concrete (UHPC) in this study is composed of sand, cement, silica fume, siliceous powder, superplasticizer and steel fiber. UHPC is composed of fine mineral particles below 0.5mm in diameter. In general, siliceous powder improves the mechanical properties of concrete by physical and chemical effect. Physical effect is related with filling interior voids which weaken the mechanical properties and chemical effect with reaction of SiO_2 with cement hydrates in a condition of high temperature and pressure. We evaluated the effect of siliceous powder's particle size on the mechanical properties of ultra high performance concrete in air pressure and 90°C steam curing condition. siliceous powder's particle size in this study is in the range of 2 μm to 26 μm . Fluidity in a fresh concrete, compressive strength, ultimate strain, elastic modulus and flexural strength in a hardened concrete was evaluated. We could find out that the smaller siliceous powder's particle size is, the better the fluidity and strength properties.

요 약

본 연구에서의 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, UHPC)는 모래, 시멘트, 실리카폼, 석영미분말, 강섬유 및 고성능감수제 등으로 구성되며, 평균입경 약 0.5mm이하의 아주 작은 입자들로 구성된다. 일반적으로 석영미분말은 일정크기 이상의 공극을 메움으로써 물리적 성능개선의 효과가 있으며 또한 높은 SiO_2 함량을 가지므로 고온 또는 고압의 양생조건에서 시멘트 수화물과의 화학반응을 통해서도 성능 향상효과가 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 상압, 90°C 증기양생 조건에서 석영미분말의 입자크기가 초고성능 콘크리트의 역학적 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 알아보고자 하였으며, 평가항목으로는 굳지 않은 상태에서의 유동성과 굳은 상태에서의 압축강도, 극한변형률, 탄성계수 및 휨강도를 평가하였다. 석영미분말의 입경크기의 영향은 약 2 μm 에서 26 μm 까지의 범위에서 고려하였으며, 입경 크기가 작을수록 유동성 및 강도특성이 모두 향상되는 것으로 나타났다.

* 정희원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 연구원

** 정희원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 책임연구원

1. 서론

본 연구에서의 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, UHPC)는 압축강도 180MPa 이상을 확보하며, 콘크리트의 압축강도와 더불어 고강도 콘크리트에서 일반적으로 문제가 되는 연성과 인성을 증가시키기 위하여 강섬유를 혼입 보강함으로써 휨강도와 인장강도가 크게 향상된 특징을 보인다. 초고성능 콘크리트는 구성입자 중 가장 큰 입경을 가지는 모래의 평균입경이 약 0.5mm 이하일 정도로 아주 작은 입경의 입자들로 구성되어 있으며, 주요 배합구성분은 모래, 시멘트, 실리카폼, 석영미분말, 강섬유 및 고성능감수제로 구성된다. UHPC는 매우 낮은 배합수량에서도 최적으로 조밀한 미세구조를 형성하는데, 다음과 같은 영향에 의한 것이다. 첫째는 물리적 최적화로서 가는 입자들의 높은 충전밀도에 의한 것이고, 둘째는 화학적 최적화로서 반응성 미세입자들의 수화반응과 포졸란반응에 의한 것이며, 셋째는 부착 최적화로서 시멘트 매트릭스와 골재 사이의 천이영역(ITZ, Interfacial Transition Zone)의 역학적 특성 향상에 의한 것이다.

일반적으로 석영미분말과 같은 충전제는 일정크기 이상의 공극을 메움으로써 물리적 성능개선의 효과가 있으며 또한 높은 SiO₂함량을 가지므로 고온 또는 고압의 양생조건에서 시멘트 수화물과의 화학반응을 통해서도 성능 향상효과가 있는 것으로 알려져 있다. 화학적 효과에 비해 물리적 효과가 상대적으로 훨씬 크기 때문에 일반적으로 충전제는 화학적으로 비반응성 물질로 취급하기도 한다. Goldman A. et al(1993)에 따르면 콘크리트 강도에 미세입자의 충전재가 미치는 영향에 관한 연구에서 강도증진 효과를 수화반응에 의한 효과, 충전효과, 그리고 포졸란 반응에 의한 효과로 구분하였으며, 수화반응에 의한 효과는 약 전체 강도의 약 50~60%이고, 충전효과는 약 30~40%, 그리고 포졸란 반응에 의한 효과는 10% 이내라고 밝히고 있다.

본 연구에서는 상압, 90℃ 증기양생 조건에서 석영미분말의 입자크기가 초고성능 콘크리트의 역학적 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 알아보려고 하였으며, 평가항목으로는 굳지 않은 상태에서의 유동성과 굳은 상태에서의 압축강도, 극한변형률, 탄성계수 및 휨강도를 평가하였다.

2. 배합설계 및 사용 석영미분말의 구분

본 연구의 실험에서 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이며 반응성 분체는 실리카폼을 사용하였다. 이들의 물리·화학적 성질은 표 1과 같다. 잔골재는 밀도 2.62g/cm³, 평균입경이 0.5mm이하의 모래를 사용하였고, 굵은 골재는 사용하지 않았다. 고성능 감수제는 폴리칼본산계의 고성능 감수제(밀도 1.01g/cm³, 암갈색)를 사용하였다. 충전재로 사용한 석영미분말은 입자들의 평균 크기를 30 μ m 이하 범위 내에서 크기에 따라 5가지로 분류하여 각각 평균입경 2.2, 4.2, 8.2, 14.1 및 26.6 μ m를 사용하였으며, 물리·화학적 성질은 표 2와 같다. 강섬유는 인장응력 및 휨응력이 작용할 때 인성향상을 목적으로 사용되는 고탄성용 강섬유(밀도 7.8g/cm³, 길이 13mm, 직경 0.2mm, 인장강도 2,500MPa)를 콘크리트 제작비에 사용 혼입하였다. 본 연구의 실험에서 사용한 배합은 표 3과 같다.

표 1. 시멘트와 실리카폼의 물리·화학적 성질

항목 구분	비표면적 (cm ² /g)	밀도 (g/cm ³)	Ig.loss (%)	화학적 구성(%)					
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
OPC	3,413	3.15	1.40	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.3
S.Fume	200,000	2.10	1.50	96.00	0.25	0.12	0.38	0.1	-

표 2 석영미분말의 물리·화학적 성질

Items	F2	F4	F8	F14	F26
Physical Properties					
D ₁₀	1.1	1.5	1.9	1.9	11.6
D ₅₀	2.2	4.2	8.2	14.1	26.6
D ₉₅	5.0	11.5	22.9	52.5	60.3
Specific Gravity	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Chemical Properties					
SiO ₂	99.47	99.5	99.764	99.8	99.91
Fe ₂ O ₃	0.05	0.04	0.02	0.02	0.02
Al ₂ O ₃	0.4	0.38	0.18	0.14	0.05
TiO ₂	0.04	0.04	0.02	0.02	0.01
CaO	0.01	0.01	0.006	0.004	0.003
MgO	0.009	0.007	0.004	0.003	0.002
Na ₂ O	0.008	0.005	0.003	0.003	0.001
K ₂ O	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002

표 3. 배합표(질량비)

항목	W/B	시멘트	실리카 폼	모래	석영미분말	고성능감수제	강섬유(부피비)
상대비	0.2	1	0.25	1.1	0.3	0.018	V _f =2%

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 상태에서의 콘크리트 특성

초고성능 콘크리트의 유동성 평가를 위하여 KS L 5105에서 제시된 방법을 사용하였으며, 재료의 흐름이 멈춘 후 퍼진 최대직경과 그에 수직인 방향의 직경을 측정하여 평균값을 플로우 값으로 하였다. 석영미분말의 입자크기에 따른 유동성 평가실험의 결과는 그림 1과 같다. 입경이 가장 작은 F2와 F4의 경우에는 플로우 값이 약 200mm로 비슷하게 나타났으며, 이보다 큰 입경에 대해서는 입경이 클수록 플로우 값이 작게 나타나는 경향을 보였다. 따라서 석영미분말 입경이 작을수록 유동성은 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

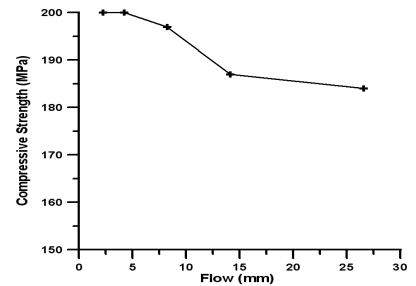


그림 1 입경크기에 따른 유동성 평가

일반적으로 미세 입자들로 배합구성을 할 경우, 상대적으로 큰 표면적을 가지므로 더 많은 배합수를 필요로 하는 것으로 알려져 있다. 하지만 고성능감수제를 사용할 경우에는 이와 같지 않다. 시멘트 입자는 상대적으로 큰 표면적 때문에 더 많은 배합수를 필요로 하는 것이 아니라, 표면장력이 굵은 입자에서보다 미세 입자에서 더 크게 작용하기 때문이다. 따라서 석영미분말에 고성능감수제를 첨가하게 되면 미세한 석영미분말 표면에 전기 이중층(electric double layer)을 형성하여 석영미분말의 분산을 돕고 시멘트 입자 사이를 채우는데 훨씬 효과적으로 작용하게 되고, 그 결과 시멘트 페이스트의 유동성이 증가한다. Nehdi(1998)의 연구결과에 따르면 가장 조밀한 입자구성에서 작업성이 가장 좋은 것으로 나타났는데 이와 같은 결과는 흡수된 물이 공극을 메울 뿐만 아니라, 입자주위의 흡착수층 두께를 증가시켜 점성을 감소시키고 유동특성을 향상시키기 때문이라고 밝히고 있다. 이와 같은 기존의 연구 결과는 본 연구에서 수행한 실험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있으며, 평균입경 4 μ m이하의 입경에 대해서는 크게 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.2 굳은 상태에서의 콘크리트 특성

그림 2는 석영미분말의 입자크기와 압축강도와와의 관계를 나타내며, 그림 3은 석영미분말 입경에 따른 극한변형률의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서는 보는 바와 같이 압축강도와 극한변형률은 석영미분말 입경에 따른 변화가 거의 동일한 경향을 보이며, F2의 경우에 압축강도 및 극한변형률이 가장 크게 나타났으며, F4, F8까지는 석영미분말 입자크기가 증가할수록 강도 및 변형률이 감소하는 경향을 보이다가 그 이상의 입경에 대해서는 거의 비슷하게 나타났다. 그림 4와 그림 5는 각각 석영미분말의 입자크기에 따른 탄성계수와 휨강도의 변화를 보여주고 있다. 그림 4을 살펴보면 석영미분말의 입경이 가장 작은 F2의 경우에 탄성계수가 가장 크게 나타나고 입경이 커질수록 그 값이 감소하는 경향을 보이다가 F8보다 큰 입경에서는 탄성계수의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은 휨강도 실험결과에서도 동일하게 나타나고 있다. 실험결과를 살펴 볼 때 작은 입자크기의 석영미분말을 사용할수록 공극을 메우는 효과가 더 좋으며, 일정크기 이상의 입경에서는 그 효과가 크지 않은 것으로 판단된다.

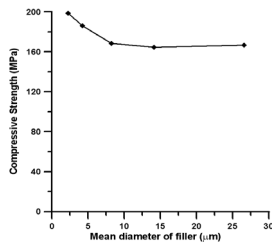


그림 2 평균입경과 압축강도 관계

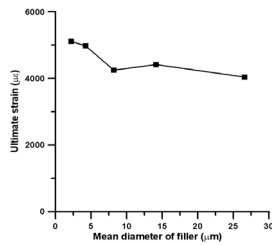


그림 3 평균입경과 극한변형률 관계

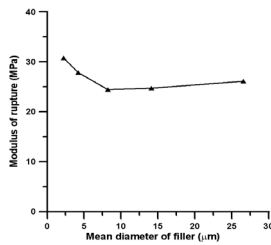


그림 4 평균입경과 휨인장강도 관계

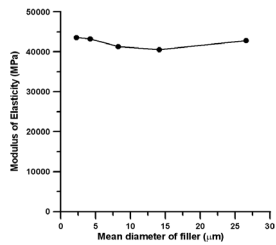


그림 5 평균입경과 탄성계수 관계

4. 결론

본 연구에서는 석영미분말의 입경크기가 초고성능 콘크리트의 유동성 및 강도특성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 석영미분말의 입경크기의 영향은 약 2 μ m에서 26 μ m까지의 범위에서 고려하였으며, 입경 크기가 작을수록 유동성이 향상되는 것으로 나타났다.
- (1) 강도특성에 미치는 석영미분말의 입경크기 영향에 관한 실험을 수행한 결과, 입경이 작을수록 강도특성이 좋은 것으로 나타났으며, 이와 같은 결과는 작은 입경의 입자가 공극을 메우는데 더 효과적이기 때문으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 ‘하이브리드 사장교용 초고성능 콘크리트 개발’에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. A. Goldman and A. Bentur, "The Influence of micro-fillers on enhancement of concrete strength", Cement and Concrete Research, Vol. 23, 1993, pp. 962-972.
2. M. Nehdi, "Microfiller effect on rheology, microstructure, and mechanical properties of high-performance concrete", Ph. D. Thesis, University of British Columbia, 1998.