

시멘트 종류에 따른 초고성능 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Properties of UHPC with Different Types of Cements

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

ABSTRACT

A Cement account for the most amount than other materials in the material composition of ultra-high-performance concrete. If we especially consider the effect of high temperature curing on the cement hydration and the problems of autogenous shrinkage, heat of hydration we need selection of proper cement type by grasping influence of cement in the properties of UHPC.

Therefore, in this paper we examined properties of fluidity, compressive strength and elastic modulus of UHPC due to domestic portland cement types.

In results, we could get a result that the low heat cement increase fluidity, compressive strength in UHPC compare with high early strength cement and ordinary portland cement. we are systematically going to examination on the influence of UHPC by domestic portland cement types.

요 약

초고성능 콘크리트(UHPC)의 재료구성에서 시멘트는 다른 재료에 비해 가장 많은 양을 차지하고 있는데 자기수축이나 수화열 등의 문제와 특히 재령초기에 실시하는 고온양생이 시멘트 수화에 미치는 영향을 고려한다면 UHPC의 특성에 미치는 시멘트의 영향을 정확히 파악하여 적절한 시멘트를 선정해야할 필요가 있다. 따라서 이 논문은 시멘트 종류가 UHPC에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험적 연구로서 국내에서 사용되는 포틀랜드 시멘트의 종류에 따른 초고성능 콘크리트의 유동성, 압축강도, 탄성계수의 특성을 검토하였다. 실험결과, 저열포틀랜드 시멘트 사용 시 보통포틀랜드 및 조강포틀랜드 시멘트 보다 유동성과 압축강도가 향상된 결과를 얻었다. 향후 보다 체계적인 연구를 통하여 시멘트 종류가 UHPC에 미치는 영향을 보다 체계적으로 검토할 예정이다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 책임연구원

1. 서 론

콘크리트는 압축강도가 증가할수록 취성과파괴 등의 문제점을 지니게 되는데 이를 개선하기 위해 강섬유를 보강하여 인성을 향상시켜 연성거동을 함과 동시에 150MPa 이상의 초고강도를 지닌 RPC (Reactive Powder Concrete) 계열의 초고성능 콘크리트(UHPC : Ultra-High Performance Concrete)가 개발되어 주목을 받고 있다. UHPC는 물-결합재비를 약 20%로 대폭 낮추고 시멘트 매트릭스의 균질성을 얻기 위해 굵은 골재를 사용하지 않은 상태에서 시멘트, 광물질 혼화제, 모래, 충전재로 재료를 구성하며 고성능 감수제로 고유동성을 확보한다. 여기에 강섬유를 혼입하므로써 인성을 대폭 향상시키며 재령초기에 2~3일간 90℃의 고온양생을 실시하여 시멘트 매트릭스의 반응을 활성화하여 초고강도를 나타내는데 이것을 초고성능 섬유보강 시멘트 복합체 또는 초고성능 콘크리트로 정의할 수 있다.

UHPC에 대한 연구는 유럽, 미국, 일본 등을 중심으로 활발히 진행되고 있으며 특히 프랑스의 경우, RPC가 선유도 보도교 건설을 통해 국내에서도 잘 알려진 Ductal[®]로 상품화되어 세계 각국에 RPC로 건설되는 구조물에 대해 재료와 기술을 공급하고 있는 등 상당한 연구가 진척되었다. 국내에서도 최근 들어 본 연구진들을 중심으로 압축강도 200MPa, 휨강도 30MPa 이상을 발휘하는 UHPC를 개발하여 재료역학적인 검토를 바탕으로 구조물에도 사용하기 위한 지속적인 연구가 진행 중에 있다^{1,2)}.

한편, 초고강도를 얻기 위해 낮은 물-결합재비로 구성된 UHPC 특성상 시멘트가 가장 많은 양을 차지하고 있는데 1m³에 대한 시멘트량으로 환산하면 약 800kg/m³을 차지한다. 선행연구²⁾에서는 경제적인 면을 고려하여 국내에서 가장 널리 사용되는 보통포틀랜드 시멘트를 채택하여 UHPC를 제조하고 있다. 그러나 시멘트 사용량이 많을수록 자기수축이나 수화열 등의 문제와 특히 재령초기에 실시하는 고온양생이 시멘트 수화과정에 미치는 영향을 고려한다면 UHPC의 특성에 미치는 시멘트의 영향을 정확히 파악하여 적절한 시멘트를 선정해야할 필요가 있다.

이에 이 논문은 시멘트 종류가 UHPC에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험적 논문으로서 국내에서 사용되는 포틀랜드 시멘트 종류에 따른 유동성, 압축강도, 탄성계수의 특성을 검토하여 이에 대한 영향을 검토하고자 하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

(1) 결합재

본 실험에 사용한 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트(Type I), 조강포틀랜드 시멘트(Type III), 저열포틀랜드 시멘트(Type IV)이며 혼화제는 비표면적 약 200,000cm²/g을 갖는 실리카 폼을 사용하였다. 사용 시멘트들의 물리·화학적 특성을 표 1에 나타내었다.

표 1 사용 시멘트들의 물리·화학적 성질

| 구분 | 항목 | 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 |
| 보통포틀랜드(1종) | TYPE I | 3,413 | 3.15 | 1.40 | 21.01 | 6.40 | 3.12 | 61.33 | 3.02 | 2.3 |
| 조강포틀랜드(3종) | TYPE III | 4,660 | 3.15 | 1.30 | 55.93 | - | - | - | 3.0 | 3.7 |
| 저열포틀랜드(4종) | TYPE IV | 3,597 | 3.20 | 0.90 | - | - | 3.29 | - | 1.9 | 2.0 |

(2) 골재

밀도 2.62g/cm³, SiO₂ 98% 정도의 0.5mm 이하 모래를 사용하였고, 굵은 골재는 사용하지 않았다.

(3) 충전재

충전재는 입자들의 평균 크기가 약 2 μ m이고 밀도 2.65g/cm³, SiO₂성분 99%이상인 재료를 사용하였다.

(4) 고성능 감수제

고성능 감수제는 폴리칼본산계로 밀도 1.01g/cm³의 압갈색 액상형태를 사용하였다.

(5) 강섬유

강섬유는 인장강도 2,500MPa, 직경 0.2mm, 길이 13mm, 형상계수 65의 고탄성 강섬유를 사용하였다.

표 1 UHPC 배합(중량비)

| 재 료 | 상 대 비 |
|-------------|-------------|
| 물 결합재비(W/B) | 0.2 |
| 시멘트 | 1 |
| 실리카 폼 | 0.25 |
| 골재 | 1.1 |
| 충전재 | 0.3 |
| 고성능감수제 | 0.018 |
| 강섬유 | 콘크리트 체적의 2% |

2.2 배합 및 실험방법

(1) 배합

이 연구의 UHPC 배합은 표 1과 같이 시멘트량을 기준으로 다른 구성재료의 상대적인 비로 설정하였고 속도조절이 가능한 60리터 용량의 모르타르용 믹서를 사용하여 제조하였다.

(2) 플로우 시험

배합된 UHPC의 유동성은 KS L 5105에서 제시된 시험기구를 이용하여 플로우치로 측정하였다.

(3) 양생방법

온도 20℃, 상대습도 65%가 되는 조건에서 습윤양생을 1일간 실시한 후 공시체를 탈형하고, 그 후 온도 90±2℃의 고온수증양생을 3일 동안 실시하였다.

(4) 압축강도 및 탄성계수

UHPC의 압축강도는 $\Phi 100 \times 200$ mm 크기의 공시체를 만들어 KS L 2405에 준하여 측정하였고, 탄성계수는 KS F 2438에 준하여 측정하였다. 이들의 값은 공시체 8개의 평균값이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 C₃A의 영향

시멘트의 강도는 시멘트 겔 간의 결합으로 발현되며 초기에는 약한 결합작용으로 경화가 진행하면서 C-S-H와 같은 섬유상 수화물이 Si-O-Si의 강한 결합으로 전환되어 강도가 증진되게 된다³⁾. 특히 C₃A의 함량이 높은 시멘트일수록 수화 시 강도증진에 취약한 수화물인 조직이 느슨한 Ca(OH)₂겔을 많이 생성하게 된다. 물론 정상적인 시멘트의 수화과정을 거치면서 Ca(OH)₂겔은 C-S-H로 전환되고 순차적으로 조직이 치밀한 수화물을 생성하지만 UHPC와 같이 재령초기에 고온양생을 통해 수화를 촉진하면 Ca(OH)₂겔이 C-S-H로 전환에 앞서 골재계면에 과다하게 Ca(OH)₂겔을 생성시키고, Ca(OH)₂겔로 두텁게 형성된 골재계면은 UHPC의 강도발현에 악영향을 줄 수도 있다. 이에 프랑스의 SETRA에서 제시한 UHPC 설계 지침서에서는 C₃A의 함량이 낮은 시멘트를 사용하도록 권고⁴⁾하기도 한다. 특히 표 2와 같이 보통포틀랜드 시멘트의 경우 저열시멘트에 비해 C₃A의 함량이 높기 때문에 이러한 C₃A함량에 따른 영향을 충분히 검토하여야 한다. 한편, 선행연구¹⁾에서는 보통포틀랜드 시멘트로 제조한 경우에도 UHPC가 상당히 밀실한 구조로 형성되기 때문에 고온양생기간에 주의될 기술이면 Ca(OH)₂겔의 영향으로 인한 압축강도에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단하고 있으나 향후 이에 대해 자세히 검토할 예정에 있다

표 2 사용 시멘트들의 C₃A 함량

| 구분 | | C ₃ A 함량(%) |
|------------|----------|------------------------|
| 보통포틀랜드(1종) | TYPE I | 9 |
| 조강포틀랜드(3종) | TYPE III | 9.7 |
| 저열포틀랜드(4종) | TYPE IV | 1.2 |

3.2 유동성

그림 1에서 시멘트 종류에 따른 UHPC의 유동성은 Type I는 약 220mm로 나타났고 이에 비해 Type III은 약 150mm, Type IV는 약 250mm로 나타나 Type IV의 경우 UHPC의 유동성을 크게 향상시키는 것으로 나타났다. 여기서 Type III의 경우 Type I에 비해 분말도가 크기 때문에 비표면적 증

가에 따른 유동성 저하가 나타난 것으로 볼 수 있으나 Type IV의 경우, Type I의 분말도와 비슷하지만 유동성이 크게 향상되었다. 따라서 UHPC의 유동성은 분말도의 영향도 받지만 폴리칼본산계 감수제가 시멘트 배합온도의 영향을 민감하게 받는 것으로 추측된다.

3.3 압축강도 및 탄성계수

그림 2는 압축강도를 나타낸 것으로 UHPC 전용 대형믹서에 비해 모르타르 믹서의 분산효율이 낮아 선행연구¹⁾에 비해 강도가 다소 낮게 나타났다. 그림 2에서 Type IV의 경우, 압축강도가 195MPa를 나타내 Type I의 180MPa, Type III의 184MPa 보다 증진된 값을 나타내었다. 이는 고온양생 과정에서 장기강도 증진에 영향을 주는 Type IV의 C₂S나 C₄AF 등의 수화가 활성화 된 것으로 보이나 향후 보다 체계적인 연구를 이러한 원인에 대해 검토할 예정에 있다. 그림 3의 탄성계수는 시멘트 종류에 상관없이 44.5GPa 정도의 값을 형성하여 탄성계수는 시멘트 종류에 따른 영향이 적은 것으로 나타났다.

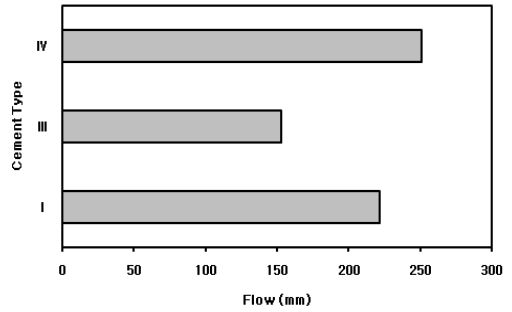


그림 1 시멘트 종류에 따른 UHPC의 유동성

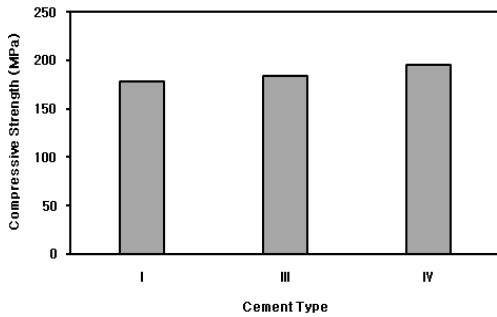


그림 2 시멘트 종류에 따른 UHPC의 압축강도

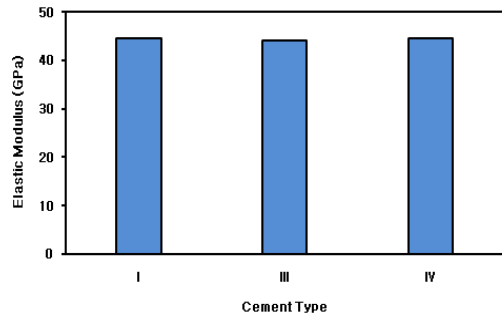


그림 3 시멘트 종류에 따른 UHPC의 탄성계수

4. 결론

이 논문은 UHPC를 제조함에 있어 시멘트 종류 따른 영향을 파악하기 위한 실험적 연구로서 저열 포틀랜드 시멘트 사용 시 보통포틀랜드 및 조강포틀랜드 시멘트 보다 유동성과 압축강도가 향상된 결과를 얻었다. 그러나 고온양생을 실시하는 UHPC 제조 특성상 향후 보다 체계적인 연구를 통하여 UHPC에 적합한 시멘트의 선정에 주의를 기울여야 할 것으로 판단되며 이에 검토할 예정에 있다.

감사의 글

이 논문은 한국건설기술연구원 기본연구사업인 “하이브리드 사장교용 초고성능 콘크리트 개발” 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한국건설기술연구원, 콘크리트 교량의 내구성 향상 기술 개발, 2006.
2. 박정준 외 3인, “초고강도 강섬유 보강 시멘트 복합체의 구성인자가 압축강도에 미치는 영향”, 콘크리트학회 논문집, Vol. 17, No.1, pp33-39. 2005.
3. 한국콘크리트학회, 최신 콘크리트 공학, 2005.
4. BFUP Groups, Ultra High Performance Fiber-reinforced Concretes, AFGC/SETRA, 2002.