

## 초고성능 강섬유보강 시멘트 복합체의 충전슬러리 최적배합 도출

# Optimum Mix Proportions of In-fill Slurry for High Performance Steel Fiber Reinforced Cementitious Composite

김승원<sup>1</sup> · 박철우<sup>1\*</sup> · 김성욱<sup>2</sup> · 조현명<sup>1</sup> · 전상표<sup>1</sup> · 주민관<sup>1</sup>

Seung-Won Kim · Cheol-Woo Park\* · Seong-Wook Kim · Hyun-Myung Cho · Sang-Pyo Jeon · Min-Kwan Ju

(Received August 5, 2014 / Revised September 23, 2014 / Accepted September 25, 2014)

As political circumstances in overseas countries and Korea varies, the risk of vulnerability from unexpected extreme loading conditions, such as explosions or extreme impacts, also increased. In addition, construction companies in Korea recently have taken chances of overseas expansion to countries where their domestic situations are not in rest. Therefore, the resistance of construction materials for blast or impact loading become taking more consideration from engineering field. This study is a part of the research to develop a high performance fiber reinforced cementitious composite materials with high volume steel fibers and primary purpose of this study is to find an optimum mix proportions of in-fill slurry. In order to accomplish the tasks this study performed experimental investigations on the slurry for consistency, compressive strength, flowability, J-penetration, bleeding and rheology properties as well as mechanical properties, compressive and flexural strength, with respect to different mix proportions.

**키워드** : 강섬유보강 시멘트 복합체, 폭발 및 충격하중, 최적배합, 충전슬러리

**Keywords** : Steel fiber reinforced cementitious composite, Blast and Impact loading, Optimum mix proportions, In-fill slurry

## 1. 서론

국내에서는 충돌·충격에 대한 방호·방폭 안전성 관련 시장이 주로 차량충돌 방호벽, 해상교량 선박충돌 방지공, 석유·가스 플랜트와 같은 화학플랜트 및 국방시설물과 같은 일부 국가중요시설의 방호·방폭 기능 부여로 한정되어 있어 관련 시장이 활성화 되어 있지 않다. 신철 구조물과 달리 사용 중 사회기반시설물 및 건축물의 경우, 방호·방폭 기능을 부여하기 위해서는 별도의 대응책을 마련할 필요성이 있다. 즉, 기존의 구조물에 대한 방호·방폭 기능부여 및 강화를 위한 고성능 보강자재의 개발 및 적용기술이 필요하다.

기존구조물의 방호·방폭 성능 향상을 위한 보강재료의 경우 연구 초기단계의 수준으로서, 다양한 방식의 접근을 통한 기술개발이 이루어져야 하는 분야이다. 국내의 보수·보강 시장은 일반적인 하중에 대한 구조적인 보수·보강이나 미관적인 보수가 대부

분이며, 현재 보수·보강에 활용되는 재료조차도 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이다. 국내에서 개발된 재료의 경우에도 재료 자체의 품질 및 성능에 대한 실험자료 및 적용사례가 부족할 뿐만 아니라 이를 평가할 수 있는 표준화된 기준이 없어 성능 및 효과를 검증할 수 없기 때문에 신뢰성이 저하되고 있다. 또한 최근까지 방호·방폭 개념에서 개발 및 연구된 사례가 미비하며, 몇몇 사례의 경우에도 국가안보 및 군사보안과 밀접한 관련이 있기 때문에 연구결과와 국내·외적 교류 및 공유가 상당히 제한적이다. 폭발시 발생하는 폭발과 함께 비산물과 같은 파편에 대응할 수 있는 내충격 성능을 요구한다. 콘크리트 구조물의 관통파괴를 억제하기 위해서 배면보강이나 콘크리트 재료의 물성보강에 따른 방법을 고려해야 한다.

따라서 본 연구에서는 기존구조물 방호·방폭 성능개선을 위하여 슬러리 충전 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(High Performance

\* Corresponding author E-mail: tigerpark@kangwon.ac.kr

<sup>1</sup>강원대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Gangwon-Do, 245-711, Korea)

<sup>2</sup>한국건설기술연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyeonggi-Do, 411-712, Korea)

Fiber Reinforced Cementitious Composite, 이하 HPFRCC)의 개발연구를 수행하였다.

## 2. 연구개요 및 방법

본 연구는 폭발 또는 극한 충격에 대응하기 위하여 파괴하중의 증가 및 파괴에너지 흡수를 극대화할 수 있는 고성능 강섬유보강 HPFRCC 재료의 개발을 위한 기초연구로서 내부 충전을 위한 슬러리의 최적배합을 위한 특성을 분석한 연구이다. 본 연구에서 다루는 강섬유보강 HPFRCC의 섬유 혼입량은 약 8% 수준의 고풍입량으로서 이의 내부 충전성능의 최적화가 매우 중요하다. 따라서 필요한 유동성의 확보와 함께 그에 따른 역학적인 특성의 검증이 필요하다. 이에 슬러리의 충전성능을 개선할 수 있도록 하기 위하여 슬러리의 컨시스턴시, 플로우, J-FPT(J-Fiber Penetration Test) 특성을 분석하였으며, 증점제의 사용 및 재료 변수에 따른 레올로지 특성을 분석하였다. 또한 실제 타설 시의 문제점을 분석하기 위하여 블리딩 실험을 수행하였으며, 고려된 배합변수에 따른 역학적 특성을 규명하기 위하여 압축강도 및 휨강도 실험을 수행하였다.

### 2.1 사용배합 및 재료

재료의 구성은 1종 보통포틀랜드시멘트, 실리카 폼, 0.5mm 이하의 직경을 갖는 잔골재로 구성하고, 굵은골재를 사용하지 않는다. 물과 결합재비는 0.4로 고정하였으며, 충전성능 분석을 위하여 결합재 대비 잔골재량을 1:0.5, 1:1.0 및 1:1.5, 총 3가지 변수에 대하여 고려하였다.

또한 충전성능 개선을 위하여 고성능감수제를 사용하였으며, 점성을 높이고 재료분리 저감을 목적으로 증점제를 활용하였다.

Table 1. Experimental variables for mix proportion of slurry

Materials	Variables
W/B ratio	40% (Control)
Superplasticizer	2% (Control), 2.5%
Viscosity agent	0% (Control), 0.05%
Fine aggregate content (B:F.A. ratio)	1 : 0.5 (Control), 1 : 1.0, 1 : 1.5
Silica fume	0% (Control), 5%, 10%, 15%

- \* W40 : W/B 비 0.4
- \* SF00 : 실리카 폼 치환 00%
- \* SP00 : 결합재 중량 대비 00%
- \* VA5 : 결합재 중량 대비 0.05%

Table 2. Material properties of cement and silica fume

Composition (% mass)	Cement	Silica fume
CaO	60.12	0.38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.59	0.25
SiO <sub>2</sub>	21.95	96.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.81	0.12
MgO	3.32	0.10
SO <sub>3</sub>	2.11	-
Particle size (cm <sup>2</sup> /g)	3,400	200,000
Specific gravity	3.15	2.10

Table 1은 본 연구에 사용된 배합변수를 나타낸다. 소요 강도 발현을 위하여 실리카 폼을 시멘트 중량 대비 5%, 10% 및 15%를 치환하여 실험을 진행하였다. 시멘트 및 실리카 폼의 물리·화학적 특성은 Table 2와 같다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 컨시스턴시

충전슬러리의 컨시스턴시 측정은 KS F 2432에 의거하여 수행



Fig. 1. Consistency test procedures

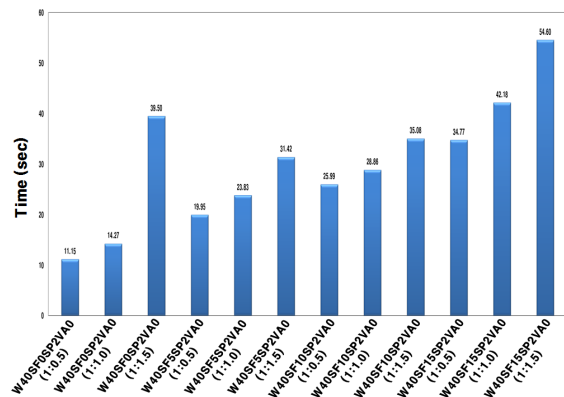


Fig. 2. Consistency changes according to variation of the amount of fine aggregate

하였으며, 윗면의 안지름 70mm, 아랫면의 안지름 10mm, 높이 420mm인 황동 깔때기를 활용하여 깔때기 내의 슬러리를 유출시켜 슬러리가 처음 끊어질 때까지의 시간을 측정하였다(Fig. 1).

Fig. 2는 잔골재량 변화에 따른 컨시스턴시 실험결과를 나타내고 있다. 컨시스턴시 실험결과, 잔골재량 변화에 따른 컨시스턴시 측정시간은 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 또한 실리카 폼 혼입을 증가에 따른 컨시스턴시 측정시간 역시 증가하는 것으로 나타났다. 이 실험결과, 본 연구 목적에 적합한 잔골재량은 결합재 대비 1:0.5 임을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 HPFRCC 충전용 슬러리 배합에 결합재 대비 잔골재량은 1:0.5로 설정함이 바람직 할 것으로 판단된다.

위 결과에서 도출된 1:0.5의 비율을 바탕으로 증점제를 결합재 중량 대비 0.05%를 활용하여 컨시스턴시 실험을 수행하였다. Fig. 3은 증점제를 활용한 컨시스턴시의 실험결과이다.

실험결과, 증점제의 사용으로 인하여 측정된 컨시스턴시의 값은 증가하는 것으로 나타났으며 이러한 특성을 활용하여 실제 고 혼입량(섬유부피비 약 8%)의 섬유가 촘촘히 배치된 사이를 통과하여 충전되어야 하는 슬러리의 최적배합에 최적화된 증점제의 사용량을 결정하여야 할 것으로 판단된다.

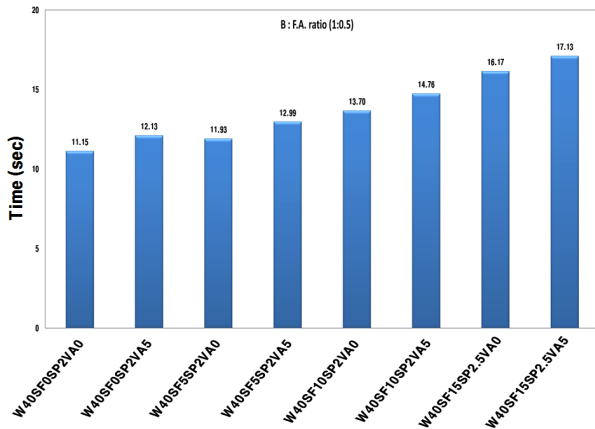


Fig. 3. Consistency changes with respect to addition of viscosity control admixture



Fig. 4. Mini flow test procedures

### 3.2 미니플로우

Mini Flow 실험은 플로우 콘(윗지름 70mm, 아랫지름 100mm)을 들어 올려 직경 300mm까지 도달하는 시간을 측정하였다(Fig. 4). Fig. 5는 증점제를 활용한 Mini Flow 실험결과이다.

Mini Flow 실험결과에서도 증점제의 사용으로 인하여 재료의 분리가 거의 일어나지 않으며 재료의 안정성을 확보가능한 것으로 분석되었다. 또한 증점제의 활용을 통하여 슬러리의 충전성능을 조절할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 J-Penetration

J-FPT(J-Fiber Penetration Test)는 영국의 L. Svemova (2005)에 의해 고안된 실험방법으로 슬러리의 섬유 침투성능을 측정할 수 있는 지표로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 6은 본 실험을 위하여 제작된 실험장비이다. 장비의 양끝단 중, 낮은쪽에 섬유를 채우고 높은 쪽에 슬러리를 채운 후 중간막을 열어 섬유가 포함된 낮은 부분이 완전 침전되는 시간을 측정함으로써 실제 섬유의 사이를 통과하여 내부를 충전하는 시간을 측정한다. Fig. 7은 증점제를 활용하여 J-FPT 실험을 통한 슬러리의 침투 실험결과이다.

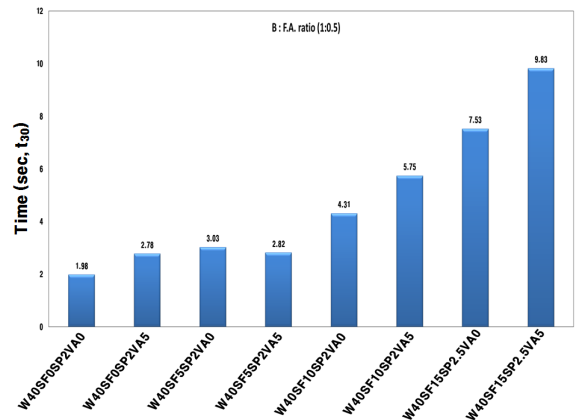


Fig. 5. Results of mini flow test

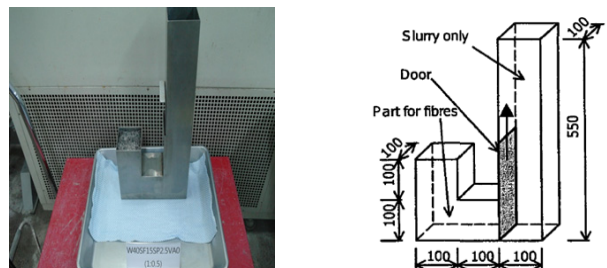


Fig. 6. J-FPT (J-Fiber Penetration Test) equipment

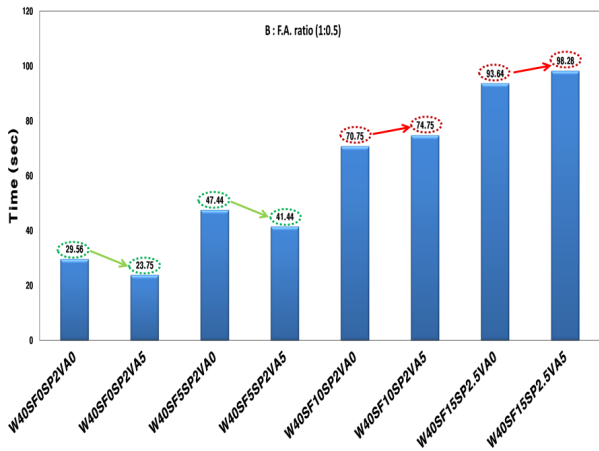


Fig. 7. Results of J-FPT

슬러리 충전성능 평가를 통하여 실리카 품 혼입 0% 및 5%의 경우, 증점제를 활용한 변수에서 더 빠른 충전시간을 나타내었다. 그러나 실리카 품 사용량 증대에 따라 충전성능 저하 및 특히, 증점제를 사용한 경우 충전성능이 다소 감소하는 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. 하지만 그 차이는 크지 않아 이러한 특성의 차이는 실제 재료분리를 방지하고 안정된 충전에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단된다.

### 3.4 블리딩

본 연구의 슬러리 배합에서는 굵은골재를 전혀 사용하지 않아 재료 품질확보를 위하여 블리딩 실험을 수행하였으며, 실험은 KS F 2433을 준용하였다. Fig. 8은 증점제를 활용한 배합변수별 슬러리의 블리딩 실험전경이다. Fig. 9는 실험결과이다. 실리카 품 5% 치환 시, 3시간 이후 블리딩이 발생하지 않는 것으로 확인되었다. 실리카 품 10% 치환 시에는 시간과 관계없이 블리딩은 발생하지 않았다.

### 3.5 레올로지

본 연구에서는 재료분리 저감을 목적으로 증점제를 활용하였다. 이에 따라 각 변수별 실리카 품 혼입율 및 증점제 활용 유무에 따른 레올로지 실험을 진행하였다. Fig. 10은 각 변수별 레올로지 실험결과를 나타내고 있다. 실험결과, 실리카 품 혼입율 증가 및 증점제 첨가에 따른 전단응력(Shear stress)은 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 상대적으로 큰 실리카 품의 분말도가 슬러리 매트릭스에서 충전재와 같은 역할을 하여 재료분리를 억제한 것으로 판단된다. 또한 이러한 재료분리 저감을 통하여 슬러리의 점성을

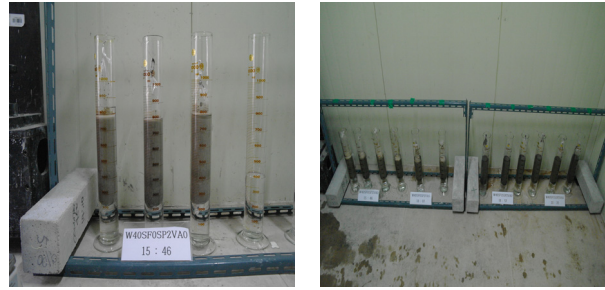


Fig. 8. Bleeding test

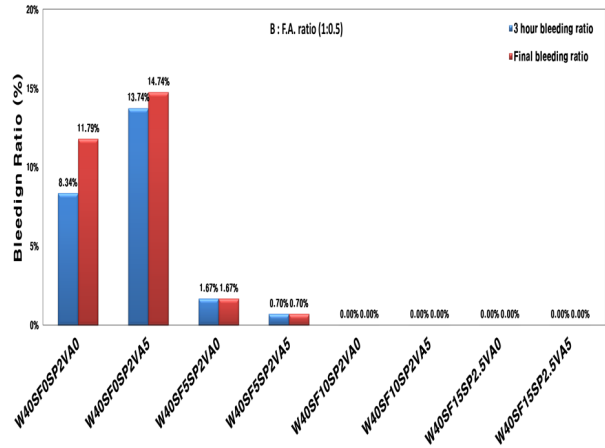


Fig. 9. The result of bleeding test of test variables

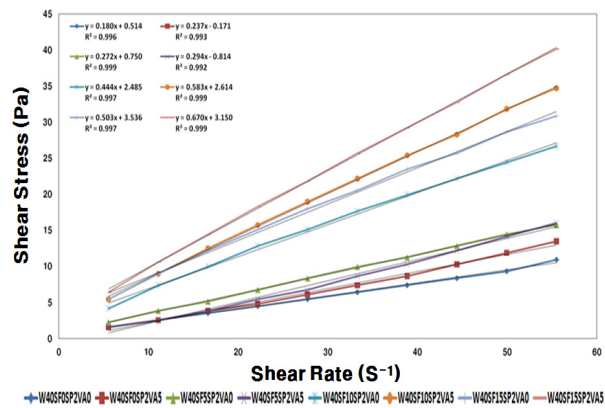


Fig. 10. Results of rheology property tests

확보할 수 있어 실리카 품의 사용이 적절할 것으로 사료된다.

### 3.6 압축강도

슬러리 충전 HPRCC 예비시험체의 압축강도는 50×50×50mm<sup>3</sup>의 압축 공시체를 제작하였다. 또한 섬유 혼입율에 따른 압축강도를 측정하기 위해 섬유를 혼입한 것과 그렇지 않은 것에 대해 압축

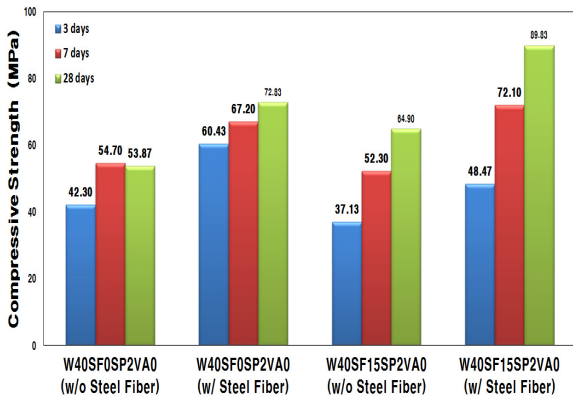


Fig. 11. Compressive strength changes according to the amount of silica fume

강도를 측정하였다. Fig. 11은 슬러리 충전 HPFRCC의 압축강도 실험결과이다. 실리카 폼 치환하지 않은 시험체의 압축강도가 초기재령에서 오히려 다소 높은 것으로 나타났지만 이후 재령이 증가함에 따라 실리카 폼의 혼입에 따른 압축강도의 증가가 나타났다. 또한 섬유 포함 여부는 강도발현에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

### 3.7 휨강도

슬러리 충전 HPFRCC 예비시험체의 휨강도는 100×100×400mm<sup>3</sup>의 휨 공시체를 제작하였다. Fig. 12는 슬러리 충전 HPFRCC의 휨강도 실험결과이다. 변수는 실리카 폼의 치환 여부이며 재령 28일에 측정된 결과로서 실리카 폼의 치환이 휨강도를 약 20% 가까이 증진시킨 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서 다루고 있는 강섬유보강 슬러리 충전 HPFRCC 재료의 특성에 따라 휨강도가 압축강도의 70%를 상회하는 것으로 나타났다. 이는 일반적인 시멘트 콘

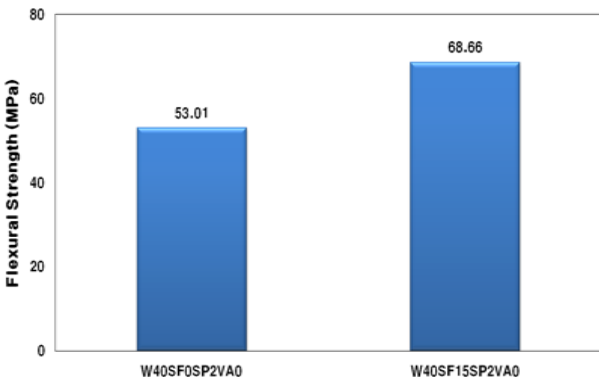


Fig. 12. Flexural strength changes according to the amount of silica fume

크리트계 재료와는 극명하게 다른 특성으로 이러한 휨강도의 증진은 급작스런 하중의 작용 시 파괴에너지 흡수에 매우 긍정적으로 작용할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구는 폭발 또는 극한 충격에 대응하기 위하여 파괴하중의 증가 및 파괴에너지 흡수를 극대화할 수 있는 고성능 강섬유보강 HPFRCC 재료의 개발을 위한 기초연구로서 내부 충전용 슬러리의 최적배합을 위한 특성을 분석한 연구이다. 실험적 연구를 통하여 도출한 결론은 다음과 같다.

1. 컨시스턴시 특성은 잔골재의 양이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 또한 실리카 폼 혼입을 증가에 따른 컨시스턴시 측정시간 역시 증가하는 것으로 나타났다. 결과를 통하여 본 연구 목적에 적합한 잔골재량은 결합재 대비 1:0.5임을 확인할 수 있었다.
2. 충전슬러리는 고훈입량(섬유부피비 약 8%)의 섬유가 촘촘히 배치된 사이를 통과하여 충전되어야 하므로 이러한 성능의 확보를 위하여 증점제의 사용을 고려하였으며 실험결과, 증점제 사용량의 증가에 따라 컨시스턴시의 값은 증가하는 것으로 나타났다.
3. Mini Flow 실험결과에서도 증점제의 사용으로 인하여 재료의 분리가 거의 일어나지 않으며 재료의 안정성 확보가 가능한 것으로 판단되었다. 또한 증점제의 활용을 통하여 슬러리의 충전성능을 조절할 수 있을 것으로 판단되었다.
4. J-FPT 실험결과, 실리카 폼 혼입 0% 및 5%의 경우, 증점제를 혼입하여 활용한 변수에서 더 빠른 충전시간을 나타내었다. 그러나 실리카 폼 사용량 증대에 따라 충전성능 저하 및 특히, 증점제를 사용한 경우 충전성능이 다소 감소하는 경향을 나타내는 것으로 분석되었다.
5. 블리딩 실험결과, 실리카 폼 5% 치환 시 3시간 이후 블리딩이 발생하지 않는 것으로 확인되었다. 실리카 폼 10% 치환 시에는 시간과 관계없이 블리딩은 발생하지 않았다.
6. 레올로지 특성을 분석한 결과, 실리카 폼 혼입을 증가 및 증점제 첨가에 따른 전단응력(Shear stress)은 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 상대적으로 큰 실리카 폼의 분말도가 슬러리 매트릭스에서 충전재와 같은 역할을 하여 재료분리를 억제한 것으로 판단된다.
7. 실리카 폼을 치환하지 않은 시험체의 압축강도가 초기재령에

서 오히려 다소 높은 것으로 나타났지만 이후 재령이 증가함에 따라 실리카 폼의 혼입에 따른 압축강도의 증가가 나타났다.

- 8. 휨강도는 실리카 폼을 포함한 경우, 약 20% 가까이 증가하는 것으로 나타났으며, 강섬유보강 슬러리 충전 HPCFRCC 재료의 특성에 따라 휨강도가 압축강도의 70%를 상회하는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호방폭연구단 (과제 번호 : 13SCIPS02)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### References

Jun-Ki Lee, Joon-Ho Choi, Jeong-Seob Yoon and In-Sung

Cho (2010), Study on Material Segregation of Grout and Filling Characteristic of Grouting for Post-Tensioned Concrete Beam, Journal of the Korea Concrete Institute, **22(3)**, 419-426 [In Korean].

Kuldeep Dager (2012), SLURRY INFILTRATED FIBROUS CONCRETE (SIFCON), International Journal of Applied Engineering and Technology, **2(2)**, 99-100.

L. Svermova and P. J. M. Bartos (2002), Development of insitu SIFCON for connections in precast concrete and seismic resistant structures, 27th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, 553-559, Singapore.

Pang-jo Chun, Sang Ho Lee, Sang Ho Cho and YunMook Lim (2013), Experimental Study on Blast Resistance of SIFCON, Journal of Advanced Concrete Technology, **11**, 144-150, Japan.

#### 초고성능 강섬유보강 시멘트 복합체의 충전슬러리 최적배합 도출

최근 국내외 정세의 변화와 함께 예상하지 못한 테러 등의 극한의 하중의 발생가능성이 증대하고 있다. 또한 국외 건설시장의 활성화와 함께 몇몇 중동국가를 포함하여 정세가 불안정한 국가로의 진출이 잦아지고 있어 신규 또는 기존 사회기반시설 및 건축물의 물리적인 안전성이 많이 요구되고 있다. 따라서 기존의 콘크리트나 강재로는 저항이 불거한 폭발 또는 충격하중의 저항성이 건설재료로서의 중요성이 증가하고 있는 실정이다. 본 연구는 이러한 폭발 및 충격하중에 저항하기 위한 초고성능 강섬유보강 시멘트 복합체를 개발하기 위한 기초연구로서 고흡입량의 강섬유를 우선 도포하고 내부를 충전하기 위한 슬러리의 최적배합의 결정을 위한 연구이다. 이러한 고흡입량의 강섬유의 내부를 충전하기 위한 슬러리의 기초특성을 분석하고자 재료혼입을 변수로 하여 컨시스턴시, 흐름도, J-Fiber Penetration, 블리딩 및 레올로지 특성 및 역학적 특성으로 압축강도와 휨강도를 측정하였다.