



상온 양생한 초고성능 콘크리트(UHPC)의 경화 전과 후의 성능 관계

강성훈¹⁾ · 홍성걸^{1)*}

¹⁾서울대학교 건축학과

Performance of Fresh and Hardened Ultra High Performance Concrete without Heat Treatment

Sung-Hoon Kang¹⁾ and Sung-Gul Hong^{1)*}

¹⁾Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

ABSTRACT This study investigates the relationship between the performance of fresh and hardened Ultra-High Performance Concrete (UHPC) without heat treatment. The performance of fresh UHPC is determined by the slump flow test related to the fluidity of concrete mixtures, and the air content test. The variables of these tests are the water to binder ratio, superplasticizer dosages and volume fractions of steel fiber. Generally, insufficient fluidity and excessive air contents in concrete mixtures lead to the insufficient packing density related to the performance of hardened concrete. The performance of hardened UHPC is determined by the compressive and flexural tensile tests. The results of the fresh UHPC tests show that there is the linear correlation between each variable and the slump flow diameter, and that the slump flow diameter is linearly decreased as the air content ratio increase. Using these results, the formula is developed to predict the fresh performance before mixing UHPC. The results of the hardened UHPC tests show that the hardened performance is not influenced by the air content ratio in the range of 3.2 to 4.2 per cent. However, the flexural tensile strength dominantly influenced by the volume fractions of steel fiber.

Keywords : ultra high performance concrete (UHPC), packing density, relative density, fresh performance, hardened performance

서론

초고성능 콘크리트(ultra high performance concrete, UHPC)는 지속가능한 차세대 건설재료로 인식되어, 1990년대 프랑스를 중심으로 현재까지 전 세계적으로 활발히 연구되고 있다. Ductal,¹⁾ compact reinforced concrete(CRC)²⁾로 대표되는 상용 UHPC 제품들은 고온 증기 양생과정(heat treatment)을 거쳐 압축강도 200 MPa 이상의 초고강도를 발휘하며, 국내에서 최초로 개발된 UHPC³⁾ 역시 고온 증기 양생과정을 거쳐 압축강도 180 MPa 이상을 나타낸다. 이들 UHPC 제품은 양생 방법을 포함한 정해진 제조법을 따라야 성능이 보장되기 때문에 주로 공장 제작형 프리캐스트 부재로 활용되어 왔다. 그러나 최근 미국, 스위스 등 몇몇 국가들은 UHPC의 우수한 내구성과 균열 저항 성능을 교량, 도로 등과 같은 사회 기반 시설물의 보수/보강 용도^{4,5)}로, 높은 유동성과 압축강도 특성을 프

리캐스트 교량 연결부의 채움재⁶⁾로 활용하고 있다. 이러한 보수/보강재 및 교량 연결부의 채움재로서 UHPC를 활용하기 위해서는 제조 및 양생이 현장에서 진행되어야 한다. 상대적으로 연구 개발을 먼저 시작한 프랑스 라파즈사는 프리믹스 제품을 이용한 현장 타설 기술을 상용화 하였으며, 이미 다수의 시공 실적을 보유하고 있다. 국내에서도 이와 관련한 연구 및 기술 개발의 필요성이 인식되어 몇몇 연구들이 진행되고 있지만, 선진국들과의 기술격차를 좁히기 위해서는 보다 다양한 연구가 진행될 필요가 있다. 더욱이 기존의 교량, 도로 등의 사회기반 시설과 더불어 UHPC는 건축 구조물의 손상 집중부위에 대한 적용 가능성이 검토⁷⁾ 되는 등 보다 폭넓은 활용방안이 모색되고 있는 현 상황에서, 현장타설 기술은 미리 확보되어야 할 주요 기술 중 하나이다.

공장 제작과 달리 현장 타설시 UHPC는 보다 다양한 환경적인 영향을 받게 된다. 일반 콘크리트에 비해 UHPC는 재료 구성비율과 양생 온도 및 습도 조건에 따라 경화 전 또 및 경화 후 성능에 많은 차이를 나타내며, 심지어 믹서의 형태, 크기 및 회전 속도에 따라서도 성능 차이를 나타낸다.⁸⁾ 현장타설 UHPC 제품은 일반적으로 물을 제외한 다른 재료들이 프리믹스 형태로 출시되기

*Corresponding author E-mail : sghong@snu.ac.kr
 Received May 23, 2013, Revised September 26, 2013,
 Accepted October 24, 2013
 ©2014 by Korea Concrete Institute

때문에, 실제로 현장 제조 및 타설시 영향을 미치는 재료 변수는 물-결합재 비와 강섬유 혼입률이다. 체적비(vol.%)로 2%가 혼입된 강섬유가 UHPC 재료비의 절반 가량을 차지할 정도로 강섬유는 고가의 재료이다. 따라서 현장에서 UHPC의 인장 성능 및 균열 저항 성능의 요구 정도에 따라 강섬유 혼입률이 조절 될 수 있다. 이러한 강섬유는 경화 전 UHPC가 흐르는 것을 방해하기 때문에 혼입률이 유동성 또는 충전성에 영향을 미치게 된다. 강섬유가 혼입된 UHPC 배합의 물 또는 고성능 감수제 비율이 그렇지 않은 배합보다 높은 것⁹⁾은 바로 이러한 이유 때문이다.

현장의 다양한 환경적 조건과 배근의 복잡한 정도에 따라 UHPC의 유동성 또는 충전성은 폭넓게 조절될 필요가 있다. 개발이 완료된 UHPC 제품에서 현실적으로 이들 특성을 조절 할 수 있는 방법은 물-결합재 비율 및 고성능 감수제 비율을 변경하는 것이다. 그러나 이러한 비율들은 충전성, 공기량과 같은 경화 전 성능에 영향을 미칠 뿐만 아니라 압축, 인장강도 및 탄성계수 등과 같은 경화 후의 성능에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이 연구에서는 물-결합재 및 고성능 감수제 비율, 그리고 강섬유 혼입률에 따른 UHPC의 충전성과 공기량 변화를 알아 보았으며, 이러한 요인 및 변화들이 경화 후의 UHPC 성능에 미치는 영향과 상관관계를 조사하였다.

2. 이론연구

2.1 경화 전 UHPC 성능

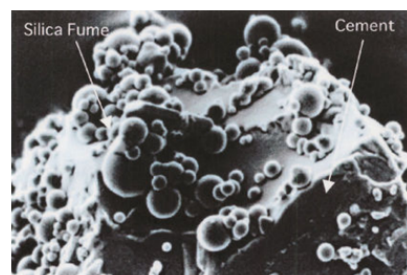
배합 구성이 최적화된 UHPC는 매우 낮은 물-결합재 비(0.2 이하)를 갖기 때문에 자기 충전성을 물에 의존하여 나타내기는 어렵다. 따라서 실리카 폼, 실리카 파우더와 같은 마이크로 입자에 의한 물리적인 효과와 더불어 폴리카본산(PC)계 고성능 감수제에 의한 화학 작용이 유동성 확보에 중요한 메커니즘을 형성한다.

물리적 윤활 작용은 Fig. 1(a)와 같이 시멘트 또는 모래 입자 사이에 위치한 완전 구형에 가까운 마이크로 입자들이 베어링 역할을 함으로써 가능하다. 따라서 마이크로 입자들의 분산정도에 따라 윤활 작용이 달라질 수 있다. 이 연구의 배합 개발 과정에서 실리카 폼의 분산정도가 유동성에 미치는 영향을 직접 확인할 수 있었다. 다른 조건이 모두 동일한 상태에서 분산(undensified)된 실리카 폼을 혼입한 경우 압축(densified) 제품 대비 테이블 플로 직경이 43.7% 증가하는 것으로 나타났다.

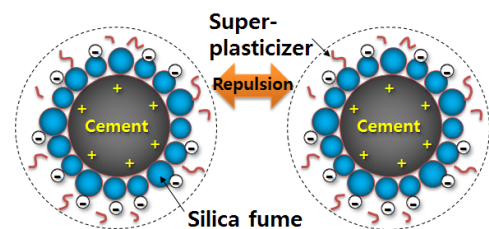
한편, UHPC에 사용되는 PC계 고성능 감수제는 Fig. 1(b)와 같이 전기이중층에 의한 정전기적 반발력과 고분자 흡착층의 상호작용에 의한 입체반발력(입체장애작용)이 동시에 작용한다.¹¹⁾ 따라서 고분자 흡착층의 side chain 길이 및 유효범위가 유동성에 영향을 미칠 수 있다.

Ingo et al.,¹²⁾ Tue et al.,¹³⁾ 그리고 Shihada and Arafat¹⁴⁾

는 이와 관련한 실험을 진행하였다. 이들의 연구에서는 고성능 감수제의 전체 혼입량을 SP1과 SP2로 나누었으며, SP1은 물과 함께 혼입하고 이후 몇 분간 휴식 시간을 갖고 SP2를 혼입하였다. 실험변수는 SP1 : SP2의 비율 및 휴식 시간으로 하였다. 실험 결과, 공통적으로 고성능 감수제 전량을 한꺼번에 혼입하는 방법보다 두 번으로 나누어 혼입하는 방법이 유동성 향상에 효과적인 것으로 나타났다. 또한, SP1과 SP2의 혼입 시간 간격을 약 2~3분으로 할 경우 유동성을 향상에 효과적이었다. 이는 SP1에 의한 1차 반발작용이 일어난 상태에서 일정시간 이후 혼입된 SP2가 수화작용이 일부 진행된 페이스트 층에서 다시 2차 반발작용을 하여 나타난 결과¹³⁾로 설명될 수 있다. 각 연구를 종합하면 SP1과 SP2의 최적 혼입 시간 간격은 3분으로 결론 내릴 수 있다. 그러나 SP1 : SP2의 최적 비율은 50% : 50%, 또는 40% : 60%로 각 연구에서 다소 상이한 결과를 나타냈다. 선행 연구¹⁵⁾에서도 고성능 감수제 혼입방법에 따른 UHPC 성능 실험을 진행하였다. SP1 : SP2의 혼입 시간간격은 3분으로 고정하고 혼입 비율을 총 5개(100 : 0, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 0 : 100)의 비율로 구분 하여 실험한 결과, 50% : 50% 비율에서 가장 큰 유동성을 나타냈으며, 다음으로 40% : 60% 비율이 유동성이 큰 것으로 나타났다. 전체 혼입량 중 절반 가량의 고성능 감수제가 물과 함께 먼저 혼입되어야 하는 또 다른 이유는 실리카 폼과 같은 미세 입자들은 물과 접촉하면 서로 뭉치려는 성질을 갖기 때문이다.¹⁶⁾ 이들이 뭉치게 되면 물리적 윤활작용이 악화 될 수 있다. 반면, 전량이 물과 함께 혼입되면 2차 반발작용을 기대할 수 없기 때문에 보다 높은 유동성을 기대하기 어렵다. 실험에서는 3분의 휴식시간을 적용하지 않는 경우 휴식시간을 적용한 경우에 비해 유동성이 감소하는 것으로 나타났다.



(a) Cement with silica fume



(b) Repulsion due to super-plasticizer

Fig. 1 Lubricating mechanism of UHPC¹⁰⁾

2.2 경화 후 UHPC 성능

경화 된 UHPC의 성능은 인장, 압축강도 및 탄성계수로 대표된다. RPC, CRC, Ductal 등과 같은 현재의 UHPC 제품들은 Bache의 densified small particles(DSP)¹⁷⁾와 de Larrard의 충전밀도(packing density)이론¹⁸⁾을 기본으로 하고 있다. 이들은 기존의 고성능 콘크리트와는 달리 매우 작은 입자들을 사용, 충전밀도를 극대화 시켜 150 MPa 이상의 초고강도를 실현하였다. 이후 Richard and Cheyrezy⁹⁾는 상대밀도(relative density)개념을 사용하여 RPC의 압축강도를 극대화 시켰다. 충전밀도는 입자를 둘러싼 단위 크기의 컨테이너에서 고체 재료들의 체적 점유율이며, 상대밀도는 물과 공기가 전혀 없는 이상 배합체의 밀도에 대한 실제 배합체의 밀도 비율로 각각 정의된다. 따라서 UHPC의 압축강도와 탄성계수는 충전밀도 또는 상대밀도와 직접적인 관련이 있다.

Fig. 2는 RPC 배합의 상대밀도에 관한 물-결합재 비(W/B)의 영향과 공기량의 변화를 나타낸 것으로 상대밀도 개념을 설명하는 대표적인 그림이다. 경화 전 UHPC에서 고체 재료를 제외한 나머지 물질은 공간(void)으로 분류되며, 이는 물과 갇힌 공기의 합으로 정의 된다. 최적 비율(optimum)을 기준으로 W/B가 감소하면 void 비율에서 물의 함은 감소하지만 유동성 저하로 인한 갇힌 공기량의 증가로 상대밀도는 감소한다. 반대로 W/B가 증가하게 되면 유동성 증가로 인한 갇힌 공기량은 감소하지만, void 비율에서 물의 함이 증가하게 되어 전체적인 상대밀도는 낮아진다. 유동성과 공기량의 상관관계는 Fig. 3(a)에서도 확인할 수 있다. Wille et al.¹⁶⁾는 UHPC 배합에서 골재(모래)와 강섬유를 제외한 그라우터의 유동성과 공기량 관계에 관한 실험을 수행 하였으며, 실험 결과 유동성이 증가할수록 공기량은 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. Richard and Cheyrezy는 void 비율이 최소가 되는 W/B 비율(B점)에서 현실적으로 2 vol.%의 공기량이 포함되며, 최적 배합은 B점이 아니라 유동성과 수화반응을 모두 고려하여 E점으로 이동한 BE구간에서 결정되어야 한다⁹⁾고 언급하였다.

2.3 섬유혼입에 따른 UHPC 성능

UHPC에서 강섬유는 인장성능 확보 및 연성적인 압축 파괴를 유도하기 위해 혼입되지만, 강섬유 혼입률은 인장, 압축 성능과 같은 굳은 콘크리트 성능과 더불어 굳기 전 성능인 유동성에도 영향을 미친다. 기존 연구¹⁹⁾에서 섬유 혼입률을 0 vol.% 부터 5 vol.% 까지 증가시킨 경우 인장강도는 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 초기 균열 강도에 있어 1 vol.%의 섬유 혼입률은 효과가 없는 것으로 나타났다.

한편, 압축강도에 관한 연구²⁰⁾에 따르면, 섬유 혼입률을 5 vol.% 까지 증가시킨 경우 혼입하지 않은 경우보다 최대 11%의 압축강도가 더 증가하였다. 일반적인 UHPC

제품의 섬유 혼입률인 2 vol.%의 강섬유가 혼입된 경우, 혼입하지 않은 경우보다 약 6%의 강도가 더 증가하였다.

배합비가 일정한 UHPC에서 섬유 혼입률이 증가하면 인장 및 압축강도가 비례하여 증가하는 것이 연구에서 보고되고 있다. 그러나 강섬유가 혼입되면 타설에 적합한 유동성 확보를 위해 W/B가 증가하게 된다. 압축강도가 W/B에 매우 민감한 UHPC의 경우 Fig. 2와 같이 최적 배합에서 W/B가 증가하게 되면 배합의 상대밀도가 낮아지게 되어 압축강도가 감소할 수 있다. 이 연구의 배합개발 과정에서 슬럼프 플로 650±50 mm를 만족하는 RPC 배합의 물-시멘트 비(W/C)를 결정된 바 있다. 실험 결과, Table 1과 같이 섬유 혼입률이 증가할수록 목표 슬럼프 플로를 만족시키는 W/C가 증가하였다. 2 vol.%의 섬유가 혼입된 경우 W/C를 최소 1% 이상 증가시켜야 섬유가 혼입되지 않은 배합과 동등한 슬럼프 플로를 확보할 수 있는 것으로 확인되었다.

2.4 상온 양생한 UHPC에 관한 기존연구

UHPC의 현장타설에 관한 연구는 2000년대 초반 스위스 로잔공대를 중심으로 시작되었다. 당시 유럽에서는 UHPC가 콘크리트 구조물 보수/보강재로 적합하다는 것을 증명하기 위해 프로젝트 SAMARIS^{4,21)}를 진행하였으며, 이 과정에서 핵심 기술인 현장타설 기술을 확보했다. 여기서 사용된 재료는 CEMTEC_{multiscale} 제품을 보수/보강용으로 최적화 시킨 것이다. 연구의 목표는 콘크리트 믹서 트럭을 이용한 현장타설 기술 확보, 기존 구조물과의 일체성 확보, UHPC를 활용한 보수/보강 공법의 합리성을 입증하는 것이었다. 우선 현장 타설 기술은, 타설 후 75분 경과시 슬럼프 플로가 450 mm 유지되는 배합 및 타설 기

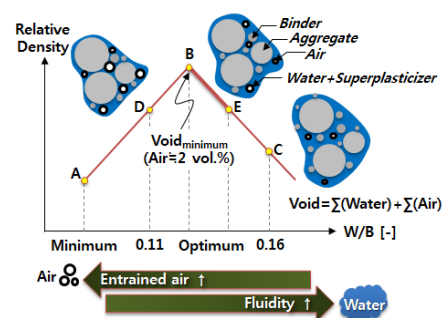


Fig. 2 Relationship between relative density and water contents⁹⁾

Table 1 Required water to cement ratio of RPC with various fiber volume fractions

Item	Fiber volume fractions (vol.%)			
	0	1.5	2	2.5
W/C (%)	21.0	21.5	22.0	23.0
W/B (%)	17.1	17.5	17.9	18.7
Slump flow (mm)	700.0	630.0	660.0	600.0

술을 확보하여, 이를 콘크리트 믹서 트럭 한대에 300 리터 씩 총 3번 타설하여 담았다. 섬유의 분산성을 확보하기 위해 이동 중 드럼을 회전 시키지 않았으며, 토출 시에만 드럼을 회전 시켰다. 이러한 작업의 한 사이클은 45분 이내에 이루어지도록 하여 유동성 감소를 최소화 하였다. 개발된 기술은 공사기간 단축에 따른 교통체증 해소 및 별도의 방수층 시공 불필요에 따른 경제적 효과를 나타내는 등 기존 공법에 비해 효율적인 것으로 평가되었다.

상온 양생한 UHPC에 관한 연구 결과는 2010년 이후 미국 미시건대 연구팀에 의해 본격적으로 보고되기 시작했다. Wille et al.¹⁶⁾는 UHPC 배합을 모르타르 믹서로 혼합한 후 상온 양생하여 압축강도 150 MPa 이상 달성하는데 성공하였다. 이때 사용된 시편은 50×50×100 mm³ 크기였다. 개발 과정은 우선 골재와 섬유를 제외한 시멘트, 실리카 폼, 실리카 파우더, 물, 고성능 감수제의 종류와 비율을 변경하여 최적 배합을 찾은 후 나머지 재료를 혼합하는 방식이었다. 즉, 그라우터 배합에서 시멘트와 실리카 폼 각각 3종, 고성능 감수제 5종, 배합비 5종을 복합적으로 적용한 38개 후보 중 강도가 가장 우수한 배합 하나를 선정 한 후 모래와 강섬유를 순서대로 넣는 과정으로 최적 배합을 결정하였다.

최적 배합 도출 과정 중 Fig. 3(a)와 같이 모르타르 테이블 플로 값(spread)과 계산된 공기량 값 사이의 선형 반비례 관계, 그리고 Fig. 3(b)와 같이 W/B와 spread 값 간의 선형 비례 관계가 관찰 되었다. 주목할 점은 기울기가 배합에 따라 조금씩 차이를 나타낸다는 것이다. 그림에서 각각의 기호는 W/B를 제외한 모든 변수가 동일한 배합의 실험 결과를 묶은 것이다. 즉, 시멘트 및 실리카 폼의 종류와 고성능 감수제 혼입률, 그리고 배합비가 서로

다를 경우 W/B에 따른 유동성 증가율이 달라 지는 것을 확인 할 수 있다. 특히, 감수제 혼입률의 증가에도 불구하고 동일한 W/B에서 spread가 감소하는 현상이 나타나는데, 이는 저자가 저술한 바와 같이 감수제의 최대 혼입률을 초과한 것과 더불어 배합이 최적 배합에서 떨어진 것을 원인으로 볼 수 있다. Fig. 3(b)에서 삼각형(▲)과 마름모(◆)로 표시된 두 그룹은 W/B와 더불어 감수제의 종류와 혼입률, 골재의 배합비까지 같다. 즉, 두 그룹은 W/B를 포함하여 시멘트와 실리카 폼의 종류만 다른 그룹이다. W/B에 따른 spread 증가를 선형 관계라고 가정할 때, 두 그룹의 실험 결과는 시멘트의 입도 분포 및 분말도, 실리카 폼의 입경 또는 분산 정도가 유동성에 영향을 미친다는 것을 알려준다. 또한, 고성능 감수제 사용량의 경우 최대 혼입량을 초과하면 유동성 증가 없이 갇힌 공기량만 증가하기 때문에 오히려 spread는 감소하는 것을 나타냈다. 따라서 적정 혼입량을 시멘트 중량의 1.4~2.4%, 또는 감수제의 다양성을 고려하여 고품분 혼입률 기준으로 0.5~0.9%를 사용할 것을 제안하였다.

Wille et al.의 연구에서 사용된 자료는 배합 개발 과정에서 측정된 결과를 활용했다. 즉, 골재와 섬유가 포함되지 않은 그라우터를 대상으로 한 실험 결과인 점, 유동성 측정을 테이블 플로 실험으로 진행한 점, 공기량을 측정이 아닌 계산으로 수행했다는 점, 마지막으로 압축강도 실험을 실린더가 아닌 큐브 시편으로 수행 했다는 점에서 일반적인 콘크리트 시험법과는 다소 차이가 있다.

한편, 일반 콘크리트와 달리 상온에서 양생한 UHPC는 28일 이후에도 지속적인 수화반응과 함께 압축강도가 증가한다. Parant²²⁾의 연구에서는 상온-대기 양생한 UHPC의 압축강도를 타설 후 400일까지 측정하였다. 그 결과 400일까지 강도가 지속적으로 증가 하는 것으로 나타났으며, 91일 이후 400일까지 11.5%의 강도가 더 증가하였다.

3. 실험개요

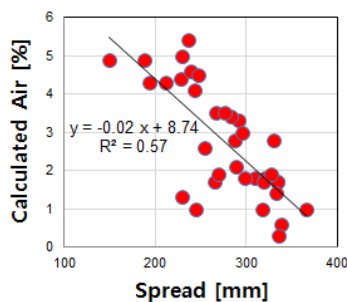
3.1 사용재료

3.1.1 시멘트 및 실리카 폼

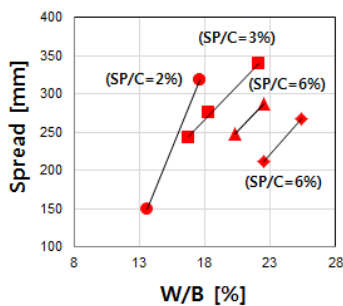
결합제인 시멘트와 실리카폼은 국내에서 공급이 원활한 제품을 사용하였다. 시멘트는 제조일로부터 약 2주 경과한 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 실리카 폼은 전 세계적으로 품질이 입증되고 국내에서 유통망이 확보된 노르웨이산 제품을 사용하였다. 시멘트와 실리카 폼의 자세한 정보는 Table 2에서 확인할 수 있다.

3.1.2 골재

골재로 45~800 μm의 입도 분포를 가지는 기성 규사 제품을 사용하였다. 사용 골재에는 SiO₂ 성분이 97% 이상 포함되어 있으며, 경도와 비중은 각각 7과 2.65 g/cm³ 이다.



(a) Spread versus air contents



(b) W/B versus spread

Fig. 3 Influence of W/B and air content on spread value¹⁶⁾

Table 2 Properties of cement and silica fume

Material	Fineness/specific surface area (cm ² /g)	Density (g/cm ³)	Chemical composition (%)					
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Cement	3492	3.15	21.16	4.65	3.14	62.79	2.81	2.13
Silica fume	200000	2.20	96	0.25	0.12	0.38	0.1	<0.2

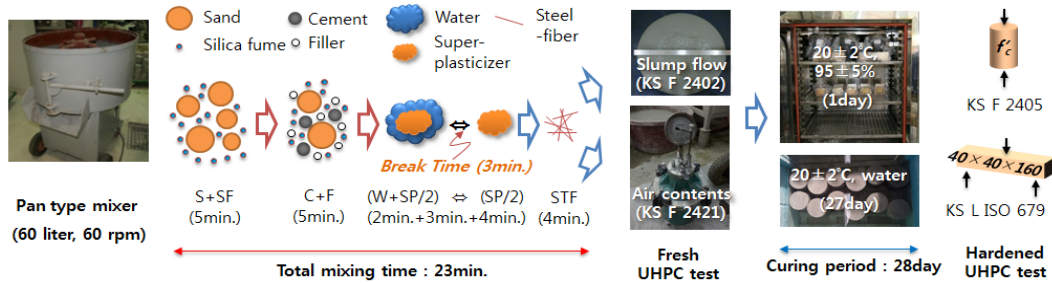


Fig. 4 Mixing, curing and test method of UHPC

3.1.3 충전재

시멘트와 실리카 폼의 중간 크기를 갖는 충전재는 배합의 충전밀도를 높여 굳은 콘크리트의 압축강도를 향상시키고, 실리카 폼과 더불어 굳기 전 콘크리트의 물리적 유효작용을 향상 시킨다. 또한 고온 양생시 추가적인 SiO₂ 성분을 제공하여 수화반응을 보다 활성화 시킨다. RPC의 재료 구성원리에서 충전재의 평균 입경은 고온 양생시 화학 반응성을 고려하여 5 μm에서 25 μm가 적합하다고 제시하였다.⁹⁾ 그러나 이 연구에서는 현장 타설을 고려하기 때문에 충전밀도를 높여 압축 성능에 효과적이고, 동시에 유효 작용에도 보다 효과적²³⁾ 평균 입경 2.2 μm, SiO₂ 성분 99% 이상인 호주산 제품을 사용하였다.

3.1.4 고성능 감수제

고성능 감수제는 폴리카보산계로 비중 1.01 g/cm³, 고형분 30%인 고유동/고강도 콘크리트용 제품을 사용하였다.

3.1.5 강섬유

강섬유는 UHPC에 가장 일반적으로 사용되고 있는 직경 0.2 mm, 길이 13 mm, 인장강도 2500 MPa 이상의 직선형을 사용하였다.

3.2 실험순서 및 방법

이 연구에서 사용한 배합비와 타설 방법은 제시된 자료에 최적화 된 것으로, 선행 연구^{15,24)}를 통해 결정 되었다. 배합비는 Table 3과 같으며, 물, 감수제 및 강섬유의 혼입 비율은 연구 목적에 맞게 조절하였다.

UHPC의 타설에는 용량과 속도가 각각 60 L, 60 rpm인 강제식 팬 믹서가 사용되었다. 우선 물과 접촉하기 전 실리카 폼을 최대한 분산시키기 위해 실리카 폼을 재료 중 입경이 가장 큰 모래와 함께 믹서에 넣고 5분간 혼합하

Table 3 Mix proportion of UHPC (wt.% of cement)

Cement	Silica fume	Sand	Filler	Super-plasticizer	Water	Steel fiber
1	0.25	1.1	0.35	0.025 to 0.04	0.185 to 0.225	0,1,2 (vol.%)

였다. 이후 분말 재료인 시멘트와 충전재를 넣고 다시 5분간 혼합 한 후 물과 절반의 감수제를 넣고 2분간 혼합 하였다. 나머지 절반의 감수제는 믹서를 정지하고 3분간의 휴식시간이 지난 후 혼입 하였으며, 2차 감수제 혼입 후 4분간의 믹싱작업을 거쳐 배합이 액체 상태가 되면 강섬유를 넣고 다시 4분간 혼합 작업을 진행하여 배합작업을 완료하였다. 전체적인 배합, 양생 및 실험 방법은 Fig. 4에 정리하였다. 배합이 끝난 UHPC는 KS 기준에 따라 공기량과 슬럼프 플로가 측정 되었다. 공시체는 탈형 전 24시간 동안 온도 20±2°C, 습도 95±5% 조건인 항온항습기에서 양생되었으며, 탈형 후 27일간 온도 20±2°C인 항온 수조에서 양생되었다. 타설 후 28일 쯤 되는 날 압축강도와 휨 인장강도 실험이 KS 기준에 따라 진행되었다.

3.3 실험변수

이 연구의 목적인 UHPC의 굳기 전 성능이 굳은 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 우선 배합 요인으로부터 굳기 전 성능을 조절하였다. 골재와 분말 재료의 종류와 배합비는 최적화 된 상태이기 때문에, 상황에 따라 변경할 수 있는 물-결합재 비율, 고성능 감수제 비율 및 섬유 혼입률의 범위를 self compacting concrete(SCC) 기준²⁵⁾에 따라 슬럼프 플로 550~800 mm에 맞게 결정하였다. 이러한 범위에서 공기량은 3.2~4.2%로 측정되었으며, 이는 고강도 콘크리트의 공기량에 관한 국내 기준²⁶⁾인 2~5%를 만족하는 결과이다. 전체적인 실험변수는 Fig. 5와 같이 배합 요인에 따른 UHPC의 굳기 전 성능 및 굳

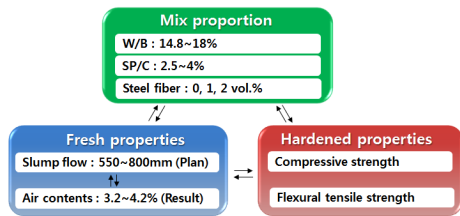


Fig. 5 Test variables

은 성능 관계, 굳기 전 성능과 굳은 후 성능 간의 관계, 그리고 굳기 전 성능에서 슬럼프 플로와 공기량과의 관계이다.

4. 실험 결과 및 분석

이 연구에서 수행한 실험 결과를 Table 4에 요약하였다. 실험 결과를 크게 경화 전과 후의 성능으로 구분하였으며, 각 성능에 미치는 요인과 상관관계는 표를 통해 분석되었다. 시편 3개로 진행한 강도 시험의 변동 계수 (COV)는 압축강도에서 0.32~7.4%, 휨 인장강도에서 0.95~9.82%로 휨 인장강도가 압축강도에 비해 결과의 편차가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 UHPC의 인장성능이 섬유 분산성과 방향성에 크게 의존하기 때문에 나타난 결과로 보인다.

한편, Table 4에서 No. 10은 SCC 기준을 만족시키지 못한 관계로 시편 제작을 하지 않았으며, No. 24는 상온

양생한 UHPC의 재료 특성을 고온 양생한 것과 비교하기 위해 No. 8과 동일한 배합을 고온 양생 시킨 그룹이다. 고온 양생 과정은 타설 후 24시간 동안 습윤 양생(20±2°C, 95±5%), 탈형 후 온도 상승 및 하강 시간을 포함한 72시간의 고온 양생(80±2°C, 95±5%)을 거쳐 이후 3일을 실온 양생(20±2°C, 60±5%)하는 것으로 진행되었다. UHPC는 48시간 이상의 고온 양생을 할 경우 고온 양생이 끝나는 시점에서 최대강도가 발현된다. 이 연구에서는 고온 양생한 시편의 강도실험을 타설 후 7일째 되는 날 진행하였다. 상온 양생한 No. 8의 재령 28일째 압축 및 휨 인장강도는 각각 147.3 MPa, 48.3 MPa로 동일한 배합을 고온 양생한 No. 24의 강도 181.7 MPa, 60.2 MPa의 81.07%, 80.23%로 나타났다. 이러한 강도 차이는 2.4절에서 설명한 바와 같이 양생 기간이 경과 할수록 점차 좁혀진다. 따라서 고온 양생 대비 상온 양생한 UHPC의 가장 큰 특징은 강도 발현의 지속성 및 최대강도 발현 시점으로 볼 수 있다.

4.1 경화 전 성능

4.1.1 배합 요인에 따른 충전성

Fig. 6은 물-결합재 비(W/B), 고성능 감수제 비(SP/C) 및 섬유 혼입률에 따른 슬럼프 플로 값을 나타낸 결과로,

Table 4 Test results

No	V _f (vol.%)	W/C (%)	W/B (%)	SP/C (%)	Slum flow (mm)	Air (%)	Compressive strength (MPa)						Flexural tensile strength (MPa)					
							Mean	COV	Test results			Mean	COV	Test results				
1	0	21.5	17.2	3	800	3.2	147.0	0.68%	147	148	146							
2	0	21	16.8	3	780		159.7	2.96%	156	165	158	28.1	1.39%	27.8	27.9	28.5		
3	0	20.75	16.6	3	690		153.7	3.70%	160	149	152	27.4	1.94%	27.8	27.6	26.8		
4	0	20.5	16.4	3	650	3.7	139.7	1.49%	142	138	139							
5	0	20	16	3	600	4.2	141.3	5.22%	133	147	144							
6	2	22.5	18	3	760	3.2	138.3	6.56%	137	148	130							
7	2	21.5	17.2	3	700		147.7	0.39%	148	147	148	46.7	9.82%	49.4	41.4	49.2		
8	2	21	16.8	3	620		147.3	4.91%	151	139	152	48.3	3.19%	49.6	48.9	46.6		
9	2	20.5	16.4	3	600	3.9	150.3	1.38%	148	151	152							
10	2	20	16	2	500		NA											
11	0	21	16.8	2.25	800	3.7	144.7	2.88%	146	140	148							
12	0	21	16.8	2.75	660	3.7	151.7	7.05%	161	154	140							
13	0	21	16.8	2.5	550	3.9	151.7	2.32%	148	155	152							
14	2	21	16.8	3.5	710	3.5	139.7	5.47%	148	138	133							
15	2	21	16.8	3.25	660	3.7	135.3	7.40%	125	145	136							
17	1	21	16.8	3	700		148.7	2.36%	152	145	149	29.8	0.95%	30.1	29.7	29.6		
16	2	21	16.8	2.75	550	4.2	152.7	3.36%	157	154	147							
18	0	18.5	14.8	4	660		151.0	3.97%	145	151	157							
19	0	19.5	15.6	3.5	680		159.0	1.26%	159	161	157							
20	0	22	17.6	2.5	680		158.3	2.92%	161	161	153							
21	2	19.75	15.8	4	670		147.3	1.41%	148	149	145							
22	2	20.75	16.6	3.5	660		141.7	6.86%	150	144	131							
23	2	23	18.4	2.5	660		141.0	5.35%	148	133	142							
24 ⁽¹⁾	2	21	16.8	3	620		181.7	0.32%	181	182	182	60.2	9.67%	61.4	65.4	53.9		

⁽¹⁾The specimens are cured with heat treatments (80±2°C, 95±5% for 72 hours)

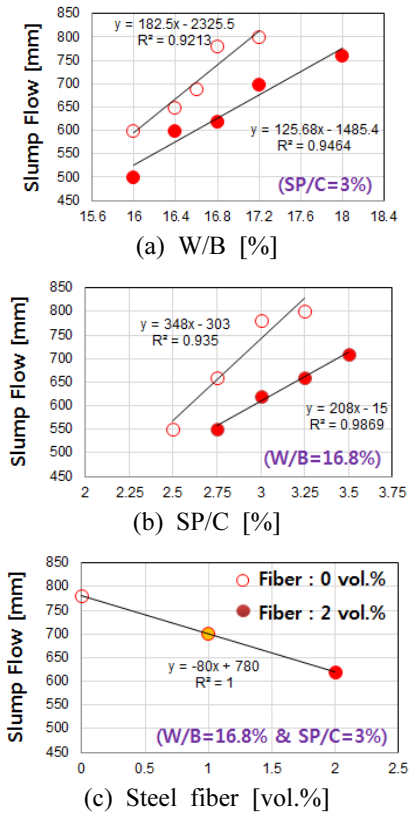


Fig. 6 Relationship between mix proportions and slump flow

세 가지 배합 요인에 따른 슬럼프 플로 값 사이의 선형 관계를 확인 할 수 있다. 항목별로는, W/B가 1% 증가 할 경우 섬유가 혼입되지 않은 배합은 평균 182.5 mm, 섬유가 2 vol.% 혼입된 배합은 평균 125.68 mm의 슬럼프 플로가 증가 하였다. 즉, W/B에 따른 슬럼프 플로 증가율은 강섬유가 2 vol.% 혼입된 배합이 그렇지 않은 배합에 비해 31.1% 감소하는 것으로 나타났다. SP/C에 따른 슬럼프 플로 증가율은, 섬유가 혼입되지 않은 배합은 348 mm, 2 vol.%의 섬유가 혼입된 배합은 208 mm로 강섬유 2 vol.% 혼입으로 인해 슬럼프 플로 증가율은 40.2% 감소하였다. 강섬유 혼입에 따라 감소하는 유동성 및 충전성 증가율은 W/B에 비해 그 효과가 더 큰 SP/C에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 슬럼프 플로 증가율에 있어 SP/C는 W/B에 비해 섬유가 혼입되지 않은 경우 90%, 2 vol.%의 강섬유가 혼입된 경우 66% 더 효과가 있는 것으로 나타나 섬유가 혼입되지 않은 경우 고성능 감수제에 의한 유동성 증가 효과를 더욱 극대화 시킬 수 있는 것으로 확인되었다. 한편, Fig. 6(c)와 같이 W/B와 SP/C가 각각 16.8%, 3%로 일정한 경우 섬유 혼입률 1 vol.% 증가에 따라 슬럼프 플로는 80 mm씩 일정하게 감소하는 것으로 나타났다.

4.1.2 충전성과 공기량의 관계

Fig. 7은 슬럼프 플로와 공기량과의 상관관계를 나타낸 것으로 속이 채워진 원은 섬유가 포함된 경우, 속이 빈 원은 그렇지 않은 경우를 나타낸다. 우선 두 경우를 비교해 보면 강섬유의 혼입 여부가 공기량에 미치는 뚜렷한

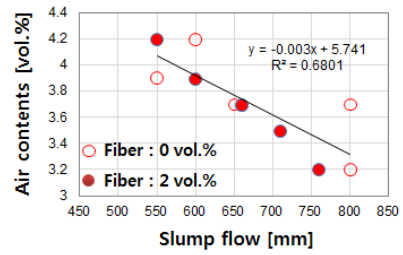


Fig. 7 Slump flow versus air contents

경향은 관찰되지 않는다. 이에 따라 추세선을 섬유 혼입률 구분 없이 모든 데이터를 대상으로 하여 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 슬럼프 플로 값이 증가할수록 공기량은 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 3(a)와 같은 다른 연구와도 동일한 결과이다. 따라서 굳기 전 UHPC 성능에 있어 강섬유는 유동성 및 충전성에 직접 영향을 미치지 않지만, 공기량에는 직접적인 영향을 미치지 않으며, 공기량과 유동성은 선형 반비례 관계인 것을 확인 할 수 있다. 공기량이 유동성에 직접적으로 관여하는 것은 아니지만, Fig. 2에 제시된 이론에 비추어 볼 때 UHPC 배합에서 공기량이 많은 것은 채워져야 할 공간이 많다는 것이며, 따라서 물처럼 흐르기 위해 채워져야 할 물 또는 감수제 양이 더 많이 필요하다는 것을 의미한다. 즉, 공기량이 줄어들어 배합 구성에서 빈 공간이 줄어들면 동일한 W/B, SP/C 일지라도 그렇지 않은 배합 보다 유효 작용에 관여할 수 있는 유체의 양이 증가하게 된다. 이 때문에 공기량이 감소하면 유동성이 증가하는 현상이 나타나게 된다. 배합 구성이 일정한 경우 W/B 또는 SP/C 증가가 유동성을 증가시키고 동시에 빈 공간을 채워 공기량을 감소시킨 것으로 해석된다. 이 때문에 유동성과 공기량이 선형 반비례 관계를 나타낸다. 강섬유 혼입률이 공기량에 크게 영향을 미치지 않는 원인은 다음과 같이 설명될 수 있다. 동일한 W/B, SP/C에서 강섬유 혼입률이 증가하면 슬럼프 플로가 감소하고 이에 따라 공기량이 증가하는 것은 실험을 통해 입증 되었다. 그러나 Fig. 7은 슬럼프 플로와 공기량간의 상관관계이다. 즉 동일한 슬럼프 플로 값을 만족시키기 위해 강섬유가 혼입 될 경우 그렇지 않은 경우보다 W/B 또는 SP/C를 증가 시켜야하며, 이로 인해 증가된 슬럼프 플로 값은 섬유 혼입에 의해 감소된 값을 충분히 보상 하는 것으로 분석된다. 이러한 경향은 Table 1의 실험 결과를 통해서도 확인 할 수 있다.

한편, 섬유 혼입 여부와 관계없이 SCC를 만족하는 슬럼프 플로 범위 550~800 mm에서는 고강도 콘크리트 기준의 공기량 2~5%를 만족하였다.

4.1.3 경화 전 성능 예측

4.1.1절과 4.1.2절의 실험 결과에서 UHPC의 세 가지 배합요인(W/B, SP/C, 섬유 혼입률)에 따른 경화 전 성능에서 선형 관계가 확인 되었다. 따라서 배합이 최적화된

UHPC를 현장 상황에 따라 슬럼프 플로 조절이 필요한 경우 이를 사전에 예측 할 수 있는 식의 유도가 가능하다. 여기서, 배합이 최적화 되었다는 의미는 물, 고성능 감수제, 강섬유를 제외한 나머지 고체 재료들의 배합비, 입도 범위, 성분이 강도 발현에 있어 가장 최적인 상태로 결정된 것이다. 한편, 이 연구의 실험 결과를 활용, 섬유 혼입 여부에 따른 슬럼프 플로를 W/B와 SP/C를 변수로 하여 나타내면 식 (1), (2)와 같다.

$$SFL_0 = 182.5(W/B) + 346(SP/C) - 3383 \quad (1)$$

$$SFL_2 = 125.7(W/B) + 208(SP/C) - 2126 \quad (2)$$

여기서, SFL_0 는 섬유가 혼입되지 않은, SFL_2 는 2 vol.%의 섬유가 혼입된 UHPC의 슬럼프 플로를 각각 나타내며, W/B와 SP/C의 단위는 % 이다.

한편, Fig. 7과 같이 슬럼프 플로와 공기량에도 선형적인 관계가 나타난다. 즉, 공기량을 슬럼프 플로의 함수로 나타낼 수 있으며, 슬럼프 플로는 식 (1) 및 (2)을 통해 예측 할 수 있다. 이러한 관계를 식으로 나타내면 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$Ar_0 = 15.890 - 0.5475(W/B) - 1.038(SP/C) \quad (3)$$

$$Ar_2 = 12.119 - 0.3771(W/B) + 0.624(SP/C) \quad (4)$$

여기서, Ar_0 는 섬유가 혼입되지 않은, Ar_2 는 2 vol.%의 섬유가 혼입된 UHPC의 공기량을 각각 나타낸다.

UHPC의 경제성, 작업성 및 인장성능을 고려하여 보통 2 vol.%의 섬유를 혼입하기 때문에 수식을 0과 2 vol.%로 구분하였으며, 식 (1)과 (2)에서 W/B와 SP/C 앞에 붙은 계수들은 각각의 요인이 슬럼프 플로에 미치는 영향성을 나타낸다. 이러한 근거 전 성능 예측 값을 실험값과 비교한 결과 Fig. 8과 같이 평균, 변동계수가 슬럼프 플로에서 1.00, 0.03, 공기량에서는 0.99, 0.05로 각각 나타났다.

4.1.4 제안식의 적용 범위

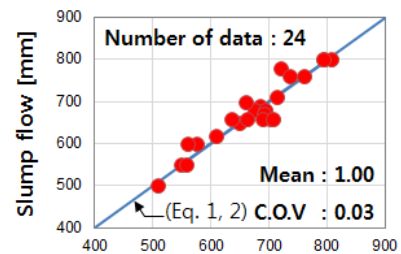
4.1.3절에서 제안한 식은 배합이 최적화된 UHPC의 근거 전 성능 예측 식으로, 동일한 배합에서 W/B, SP/C 및 섬유 혼입률을 변경한 이 연구의 실험 결과를 만족할 만한 수준으로 예측하였다. 제안식이 UHPC에 일반적으로 적용되기 위해서는 국·내외 다른 연구자들이 수행한 실험 결과도 만족할 만한 수준으로 예측 가능해야 한다. 그러나 최적 배합에서 W/B, SP/C 및 섬유 혼입률을 변경시켜 슬럼프 플로우 및 공기량을 측정 한 실험 결과를 현재로서는 찾기 힘들다. 그 이유는 첫째, 유동성 실험 방법의 차이점 때문이다. 이 연구에서는 SCC를 정량적 수치를 명시하는 기준에 따라 구분하기 위해 유럽 기준²⁵⁾에서 제시하는 시험방법과 수치를 적용하였다. 그러나 대표적인 UHPC 브랜드인 Ductal은 자체적으로 모르타르

유동성 실험법인 테이블 플로 수치를 유동성 평가 기준으로 사용한다. Ductal에서 제시하는 유동성 등급 기준은 Table 5와 같으며, 일반적인 용도로 등급 B를 권장한다.

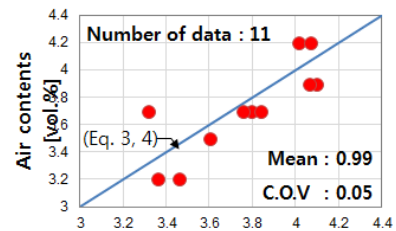
현재 국내·외 많은 연구자들이 UHPC 배합 최적화 단계에서 Table 5에 따른 실험 방법을 사용하며, 이 연구에서도 배합 개발 과정에서 이 방법을 사용했다. 가장 큰 이유는 실험의 간편성 때문이다. 이러한 실험 방법에 비해 슬럼프 플로 시험법은 UHPC에 적용하기에는 다소 번거로운 것이 사실이다. 따라서 UHPC의 재료 특성을 고려한 유동성 실험 기준이 국내에서 정립될 필요가 있다.

두 번째 이유는 실험 목적의 차이로 인해 비교 가능한 객관적 데이터의 확보가 어렵기 때문이다. 일반적으로 UHPC와 같은 고강도 콘크리트의 재료 개발 단계에서 구성 물질과 배합비를 변경하는 주된 원인은 최적 배합을 찾기 위해서이다. 이 과정에서 압축 강도 실험을 가장 기본적으로 수행한다. 최소 7개의 서로 다른 물질이 각각의 구성비율, 입경 및 성분에 민감하게 반응하는 UHPC의 경우, 실험 변수가 많게는 수백 개에 이르기 때문에 이 연구와 같이 특별한 목적을 두지 않는 한 각 변수마다 슬럼프 플로와 공기량 실험을 하는 것은 크게 의미가 없을 뿐만 아니라 시간과 노동력을 지나치게 많이 소모하는 일이다. 더욱이 1장에서 설명한 바와 같이 UHPC의 용도가 처음에는 공장 제작형이었기 때문에 최종 배합이 결정되면 이후에 W/B, SP/C를 변경하는 것도 크게 의미가 없었다.

그러나 이 연구와 같이 처음부터 상온양생 UHPC 개발을 목표로 한 Wille et al.¹⁶⁾의 연구 결과와는 간접적으로



(a) Slump flow [mm]



(b) Air contents [vol.%]

Fig. 8 Comparison between predicted and test results

Table 5 Flow domain classifications of fresh UHPC²⁷⁾

Class	A (stiff)	B (fluid)	C (highly fluid)
Average flow measurements after 20 blows (mm)	< 200	200~250	> 250

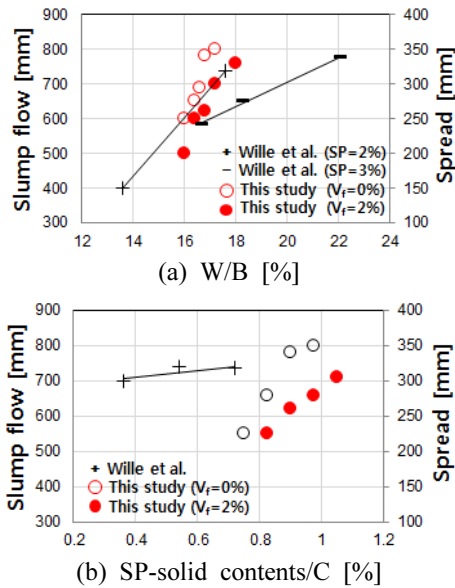


Fig. 9 Comparison of flow test results with other study

비교 할 수 있다. 38개의 그라우터 후보 배합을, 기본적으로 재료의 종류와 배합비가 다르게 구성했기 때문에 동일한 배합에서 W/B 또는 SP/C만 다르게 한 실험 결과가 많지는 않지만, 몇 개의 결과가 이를 만족 시킨다. Fig. 9(a)와 (b)는 각각 W/B와 고성능 감수제의 고흡분 혼입률에 따른 유동성 실험 결과를 Wille et al.의 연구 결과를 포함하여 나타낸 그래프이다. 우선 Fig. 9(a)에서 W/B에 따른 유동성의 선형적 증가 현상이 공통적으로 나타난다. 그러나 2장에서 언급 했듯이 W/B 외에 다른 조건들이 일치 하지 않는 경우 증가율에 있어 차이를 나타낸다. 더욱이 유동성 시험 방법에서의 차이 때문에 식 (1), (2)의 직접적인 적용은 불가능 하다. Fig. 9(b)에서도 유사하게 SP/C에 따른 유동성 관계가 선형성을 나타내지만, 역시 동일한 식의 적용은 불가능하다. 그러나 식 (1), (2)의 유도 과정에서 적용되었던 유동성과 공기량의 선형 반비례관계는 두 연구에서 동일하게 나타났다.

결론적으로, 식 (1)~(4)의 전개 과정에서 사용된 W/B와 유동성의 선형 비례관계, SP/C와 유동성의 선형 비례관계, 그리고 유동성과 공기량의 선형 반비례 관계는 성립한다. 그러나 이 외의 다른 요인들이 복합적으로 작용한다면 선형 관계가 약해져 식의 신뢰성이 감소한다. 따라서 제안식의 적용은 타설 현장의 기후 및 이동거리, 배근의 조밀성 등을 고려하여 유동성 조절이 필요하다고 판단될 때, 배합이 최적화된 UHPC에 한해 적용이 가능하다. 1장에서 언급 한 바와 같이 일반 콘크리트와 달리 UHPC는 아주 작은 차이가 재료 성능에 적지 않은 영향을 미치기 때문에 프리믹스와 같은 최적화된 제품의 경우 이러한 굳기 전 성능 예측식이 유용하게 활용 될 수 있다.

만약, 제품 배합이 이 연구와 다를 경우 식 (1)~(4)의 도출 과정과 같이 굳기 전 성능 실험 결과를 선형 조합하여 예측식의 도출이 가능하다.

4.2 경화 후의 성능

4.2.1 압축강도

이 연구에서 수행한 굳은 콘크리트의 성능 실험은 타설 후 28일째 수행하였다. 그러나 No. 8 배합에 한해 압축강도를 91일까지 측정하였다. 그 결과 Fig. 10과 같이 28일 이후에도 91일까지 강도가 14.2% 더 증가하였다. 즉, 28일 압축강도는 최종 강도의 87.5% 이하인 것으로 나타났다.

Fig. 11은 물-결합재 비(W/B)와 감수제 혼입률(SP/C)에 따른 압축강도 실험 결과이다. 우선, (a)에서 W/B가 16.8% 일 때 압축강도가 가장 높으며, 이를 기준으로 W/B가 증

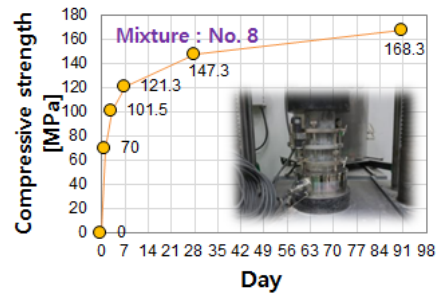


Fig. 10 Day-compressive strength relationship

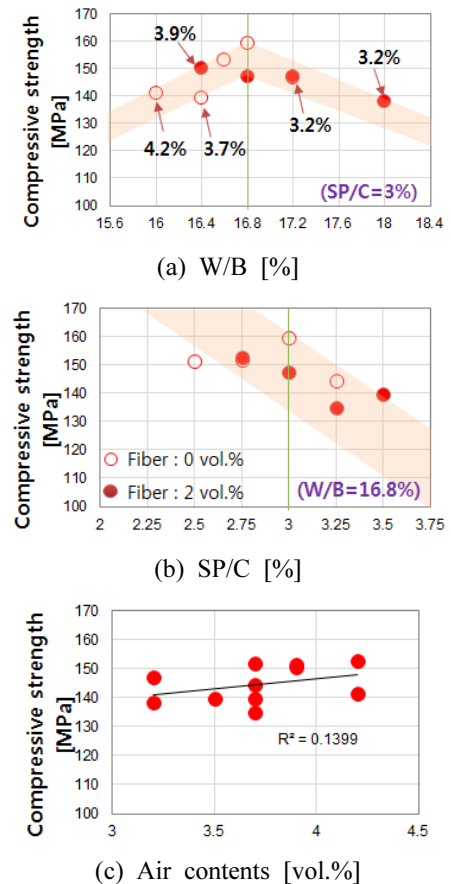


Fig. 11 Compressive strength with respect to W/B, SP/C and air contents

가하거나 감소 할 경우 압축강도가 감소하는 경향을 나타낸다. 즉, W/B 16.8%를 중심으로 Fig. 2와 같은 삼각형이 형성된다. 그림에서 표시된 숫자는 각 배합의 공기량을 나타낸다. 2.2절에서 언급한 바와 같이 W/B가 감소함에 따라 공기량이 증가하는 경향을 나타냈으며, W/B가 17.2% 일 때 이 연구에서 사용한 UHPC 배합의 최저 공기량인 3.2%를 기록하였다. 그러나 17.2%에서 W/B를 증가시켜도 공기량은 더 이상 감소하지 않았다. 공기량과 슬럼프 플로의 관계는 Fig. 7과 같이 선형성을 나타내기 때문에, W/B가 증가함에 따라 공기량은 감소하고 슬럼프 플로는 증가하는 경향을 보인다. 그러나 W/B가 17.2%일 때 슬럼프 플로는 760 mm로 기준²⁵⁾에서 제시하는 가장 높은 충전성 등급 SF3(760~850 mm)을 달성하였다. 따라서 W/B를 18%까지 증가시켜 슬럼프 플로를 800 mm까지 증가 시키더라도 공기량은 더 이상 감소하지 않는다. Richard and Cheyrez⁹⁾가 제시한 2%의 공기량 실현을 위해서는 배합 요인 외에 타설 방법과 믹서의 종류(진공 믹서 등), 믹싱 속도 등 보다 다양한 요인이 복합적으로 고려되어야 한다.

공기량과 압축강도의 상관관계는 Fig. 11(c)에서 확인할 수 있다. 2.2절의 이론과 같이 UHPC 배합에서 상대밀도가 높을수록 압축강도는 증가하지만, 슬럼프 플로 범위 550~800 mm에서 형성되는 3.2~4.2%의 공기량은 실제로 압축강도에 큰 영향을 미치지 못하였다.

한편, Fig. 11(b)와 같이 SP/C에 따른 압축강도에서 확인할 수 있듯이, SP/C가 3% 이하일 때는 28일 압축강도가 150 MPa 이상을 나타냈지만, 3% 이상일 때는 150 MPa에 미치지 못하였다. 따라서 유동성 향상을 위해 적정량 이상의 감수제를 혼입할 경우 수화 지연 반응 등으로 인한 압축강도 저하 여부가 사전에 검토 될 필요가 있다.

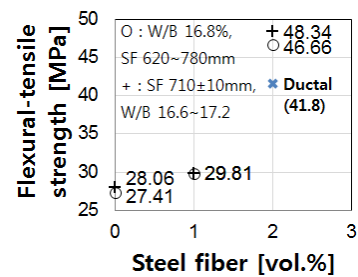
4.2.2 휨 인장강도

섬유가 혼입된 콘크리트의 인장강도에 관한 실험은 크게 직접 인장강도 실험과 휨 인장강도 실험으로 구분된다. 직접 인장강도 실험의 경우 실험 장치의 세팅 및 시편 제작이 어렵다. 만약 시편, 실험 세팅 또는 진행 과정에서 원인으로, 균열 부위에 아주 작은 편심과 회전각 일지라도 모멘트가 유발 되면 직접 인장강도 실험 결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 UHPC의 인장강도 실험에 관한 기준이 없는 현 상황에서 직접 인장강도 보다 휨 인장강도 시험법이 보편적으로 진행되고 있다. 휨 인장강도 실험에서 시편의 크기는 골재의 크기와 섬유의 길이 등을 고려하여 결정 되어야 한다. 이 연구에서는 UHPC의 최대 골재 크기가 0.8 mm이고, 길이 13 mm의 짧은 섬유가 혼입 되는 것을 고려하여 Fig. 4에 제시된 바와 같이 40×40×160 mm³ 크기의 직육면체 시편에 대한 3점 휨 강도 실험을 진행하였다. 시편 제작시 섬유를 시편의 길이 방향으로 나열시키기 위해, 몰드를 길이 방향으로 경사지게 하여 타설 하였다.

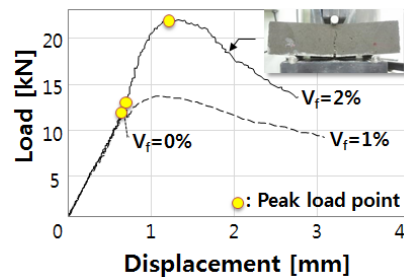
휨 인장강도 실험 결과를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12(a)는 섬유 혼입률에 따른 인장강도를 두 그룹으로 구분하여 나타낸 결과이다. “O”로 표시된 첫 번째 그룹은 물-결합재 비를 일정하게 하고 섬유 혼입률에 따라 달라지는 슬럼프 플로를 반영 그래프이고, “+”로 표시된 두 번째 그룹은 슬럼프 플로를 일정하게 유지시키기 위해 섬유 혼입에 따라 물-결합재 비를 증가시킨 결과이다. 이렇게 구분한 이유는 인장강도에 있어 굳기 전 성능이 미치는 영향을 알아보기 위해서이다. 그러나 슬럼프 플로의 변화 또는 물-결합재 비의 변화에 따른 휨 인장강도의 차이는 약 2~3% 범위, SCC를 만족하는 범위에서는 굳기 전 성능이 휨 인장강도에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 다만, 일반적으로 콘크리트의 인장강도는 압축강도와 관련이 있기 때문에, 배합 및 양생 조건이 동일한 경우 UHPC의 인장강도는 양생 온도 및 기간이 경과함에 따라 증가 할 수 있다. 이는 Table 4의 No. 8과 No. 24의 시험 결과로부터 확인할 수 있다.

따라서 상온 양생한 UHPC의 인장성능은 전적으로 섬유 혼입에 의존한다고 결론 내릴 수 있다. 그러나 Fig. 12(b)와 같이 1 vol.%의 섬유가 혼입된 시편의 휨 인장 거동에서 균열 발생 시 최대 강도에 도달하였으며, 균열 후 섬유 가교 작용에 의한 연성거동은 보였지만, 초기 균열 강도 이상을 발휘하지는 못하였다. 초기 균열까지의 거동은 섬유가 혼입되지 않은 시편과 거의 동일하게 진행되었다. 따라서 UHPC에 강섬유 1vol.%의 혼입으로 균열 발생 후 연성거동은 기대 할 수 있으나 초기 균열 억제에는 효과적이지 못하다는 결론을 내릴 수 있다.

한편, 섬유 2 vol.% 혼입으로 휨 인장강도 및 연성이 크게 증가되었다. Fig. 12(a)에서 “X” 기호는 동일한 시험 방법을 사용한 Ductal 제품의 휨 인장강도이다. Cattenom



(a) Strength-fiber volume fraction relationship



(b) Load-displacement relationship

Fig. 12 Results of flexural tensile test

핵발전소(프랑스) 건설 공사에서 사용된 UHPC의 인장강도 측정을 위해 Ductal 제품으로 40×40×160 mm³ 크기의 시편 196개가 제작 되었으며, 중앙 재하 방식으로 실험한 결과 휨 인장강도는 평균 41.8 MPa로 측정되었다.²⁸⁾ 이러한 결과와 비교해 볼 때, 이 연구에서 사용한 UHPC의 휨 인장강도는 비록 상온에서 양생되어도 대표적인 UHPC 제품과 동등 한 것으로 평가 된다.

5. 결 론

이 연구에서는 상온 양생한 UHPC의 경화 전과 경화 후 성능에 미치는 요인을 알아보기 위해 물-결합재비, 고성능 감수제 및 강섬유의 혼입률을 슬럼프 플로 550~800 mm 범위 내에서 조절하였으며, 이 조건에서 실험한 결과를 다음과 같이 정리 하였다.

- 1) 물-결합재 비(W/B)와 고성능 감수제 혼입 비율(SP/C)이 증가함에 따라 슬럼프 플로는 선형적으로 증가하였다. 그러나 섬유 혼입률이 증가함에 따라 W/B와 SP/C에 따른 슬럼프 플로의 증가율은 감소하는 것으로 나타났으며, 섬유 혼입률 만을 변수로 할 때 1 vol.%가 증가함에 따라 슬럼프 플로는 80 mm씩 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 섬유 혼입률이 높을수록 유동성 및 충전성을 증가시키기 위한 W/B와 SP/C는 더 높은 것으로 평가 되었다.
- 2) 슬럼프 플로 550~800 mm 범위에서 측정된 공기량은 3.2~4.2%로 고강도 콘크리트에 관한 국내 공기량 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 공기량은 강섬유 혼입률과는 관계없이 슬럼프 플로 증가에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 이 경향은 슬럼프 플로 760 mm까지만 보였으며, 이때 측정된 공기량 3.2%는 슬럼프 플로 800 mm까지 유지되었다.
- 3) UHPC의 슬럼프 플로와 공기량을 W/B, SP/C 및 강섬유 혼입률을 변수로 하여 예측할 수 있는 식을 도출하였다. 실험값을 예측한 값과 비교한 결과 평균, 변동계수는 슬럼프 플로에서 1.00, 0.03, 공기량에서 0.99, 0.05로 나타났다. 따라서 배합이 최적화된 UHPC 제품은 실험 결과의 선형 조합을 통한 공기 전 성능 예측식의 도출이 가능하다.
- 4) 압축강도에는 W/B가 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, W/B 16.8%를 꼭지점으로 W/B와 압축강도 관계에서 삼각형의 그래프가 그려졌다. 이 그래프에서 W/B가 감소함에 따라 공기량은 증가하였지만, 슬럼프 플로 550~800 mm 범위에서 측정된 3.2~4.2%의 공기량은 압축강도에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 다만, SP/C가 3% 이상 혼입된 경우 3% 이하로 혼입된 경우보다 더 낮은 압축강도가 측정되었다.
- 5) 휨 인장강도에 있어 16.6~17.2% 범위의 W/B와 620~780 mm 범위의 슬럼프 플로는 영향을 미치지 못하는

것으로 나타났다. 따라서 상온 양생한 UHPC의 인장 성능은 섬유 혼입에 지배되는 것으로 확인 되었다. 그러나 1 vol.%의 강섬유를 혼입 할 경우 균열 후 연성 거동은 기대 할 수 있으나, 초기 균열 및 휨 인장강도 증가는 기대하기 어려운 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행 되었으며, 서울대학교 공학연구소로부터 논문게재료를 지원 받았고, 이에 감사드립니다.

References

1. Acker, P. and Behloul, M., "Ductal Technology: a Large Spectrum of Properties, a Wide Range of Applications," *Proceedings of International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, University of Kassel, Germany, 2004, pp. 11-23.
2. Aarup, B., "CRC-Structural Applications of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete," *Proceedings of Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, University of Kassel, Germany, 2008, pp. 831-838.
3. Koh, K. T., Park, J. J., Ryu, G. S., and Kand, S. T., "Effect of the Compressive Strength of Ultra-High Strength Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites on Curing Method," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 3, 2007, pp.427~432.
4. Bruhwiler, E. and Denarie, E., "Rehabilitation of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete," *Proceedings of Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, University of Kassel, Germany, 2008, pp. 895-902.
5. Scheffler, B. and Schmidt, M., "Application of Ultra-High Performance Concrete for Multifunctional Road Pavements," *Proceedings of 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, University of Kassel, Germany, 2012, pp. 913-920.
6. Perry, V. H. and Seibert, P. J., "The Use of UHPFRC (Ductal) for Bridges in North America: The Technology, Applications and Challenges Facing Commercialization," *Proceedings of Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, University of Kassel, Germany, 2008, pp. 815-822.
7. Buzzini, D., *Quasi-Static Cyclic Tests on Three Hybrid Fibre Concrete Structural Walls*, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Swiss, 2006, 186 pp.
8. Park, J. S., Kim, B. S., Kim, Y. J., Choi, E. S., and Lee, C. H., "Compressive Strength of K-UHPC according to Mixing and Curing Method," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, 2011, pp. 201-202.

9. Richard, P. and Cheyrezy, M., "Composition of Reactive Powder Concretes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, 1995, pp. 1501-1511.
10. Sugano, S., "Application of High-Strength and High-Performance Concrete in Seismic Regions," *8th HSC/HPC Symposium*, Tokyo, 2008, pp. 1-8.
11. Lee, D. H. and Kim, T. S., "Concrete Admixture-Superplasticizer," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 8, No. 2, 1996, pp. 20-31.
12. Ingo, S., Jurgen, S., and Oliver, M., "Effect of Mixing and Placement Methods on Fresh and Hardened Ultra High Performance Concrete (UHPC)," *Proceedings of International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, University of Kassel, Germany, 2004, pp. 575-586.
13. Tue, N. V., Ma, J., and Orgass, M., "Influence of Addition Method of Superplasticizer on the Properties of Fresh UHPC," *Proceedings of Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, University of Kassel, Germany, 2008, pp. 93-100.
14. Shihada, S. and Arafat, M., "Effects of Silica Fume, Ultrafine and Mixing Sequences on Properties of Ultra High Performance Concrete," *Asian Journal of Materials Science*, Vol. 2, No. 3, 2010, pp. 137-146.
15. Kang, S. H. and Hong, S. G., "Influence of Packing Density and Mixing Method on Properties of Reactive Powder Concrete," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 1, 2012, pp. 707-708.
16. Wille, K., Naaman, A. E., and Parra-Montesinos, G. J., "Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way," *ACI Materials Journal*, Vol. 108, No. 1, 2001, pp. 46-54.
17. Bache, H. H., "Densified Cement/Ultra-Fine Particle-Based Materials," *The Second International Conference on Superplasticizers in Concrete*, Canada 1981, pp. 1-35.
18. De Larrard, F. and Sedran, T., "Optimization of Ultra-High-Performance Concrete By The Use of a Packing Model," *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 6, 1994, pp. 997-1009.
19. Kang, S. T., "Comparison of Flexural Tensile Strength according to the Presence of Notch and Fiber Content in Ultra High Performance Cementitious Composites," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 5, 2012, pp. 525-533.
20. Kang, S. T. and Ryu, G. S., "The Effect of Steel-Fiber Contents on the Compressive Stress-Strain Relation of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPC)," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 1, 2011, pp. 67-75.
21. SAMARIS 2005, Report D22, *Full Scale Application of UHPFRC for the Rehabilitation of Bridge-from the Lab to the Field*, European Project 5th FWP/SAMARIS -Sustainable and Advanced Materials for Road Infra Structures-WP 14: HPRCC, Lausanne, Swiss, 2005, 63 pp.
22. Parant, E., *Mecanismes D'endommagement et Comportements Mecaniques d'un Composite Cimentaire Fibre Multi-Echelles sous Sollicitations Severes: Fatigue, Choc, Corros (in French)*, Doctoral thesis, Laboratoire Central des Ponts et Chaussees, France, 2003, 245 pp.
23. Kang, S. T., Park, J. J., Ryu, G. S., and Kim S. W., "Influence of the Filler's Particle Size on the Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete(UHPC)," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 4, 2008, pp. 573-580.
24. Kang, S. H. and Hong, S. G., "Relationships between Performance of Fresh and Harden UHPC Cured at Room Temperature," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 2, 2012, pp. 431-432.
25. BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, and EFNARC, *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*, The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005, 63 pp.
26. Korean Agency for Technology and Standards, *Ready-Mixed Concrete (KS F 4009)*, Korean Standards Association, 2011, 48 pp.
27. Ahlborn, T. M., Peuse, E. J., and Misson D. L., *Ultra-High-Performance-Concrete for Michigan Bridges Material Performance-Phase I*, Center for Structural Durability, Michigan Technology University, 2008, 181 pp.
28. AFGC/SETRA Working Group, *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, 2002, 152 pp.

요 약 초고성능 콘크리트(UHPC)를 현장에서 타설 하기 위해서는 타설 장비, 배근 상태, 타설 환경 등 현장 조건을 고려한 유동성 조절이 필요하다. 구성 재료와 배합비가 최적화된 UHPC 제품에서 유동성 조절을 위해 현실적으로 변경 가능한 방법은 물-결합재 비(W/B) 또는 고성능 감수제 혼입률(SP/C)을 조절하는 것이며, 경제적 이유로 강섬유 혼입률도 변경 할 수 있다. 일반 콘크리트와는 달리 UHPC는 아주 작은 재료와 배합비 변화에도 굳기 전 또는 굳은 성능에 많은 차이를 나타낸다. 따라서 이 연구에서는 이러한 요인들이 UHPC의 슬럼프 플로우와 공기량에 미치는 영향, 그리고 인장 및 압축 성능에 미치는 영향을 알아보았으며, 슬럼프 플로우와 공기량과의 선형적인 상관관계를 이용하여 이러한 성능들을 예측할 수 있는 식을 유도 하였다. UHPC의 특성 중 하나인 자기 충전성을 만족하는 조건에서 압축강도에 관한 최적 W/B와 SP/C는 각각 16.8%와 3%로 결정 되었으며, 이러한 조건에서 측정된 공기량은 3.2~4.2%로 이 범위에서의 공기량은 압축강도에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 휨 인장강도에 있어 W/B와 SP/C는 무시할 만큼 작은 영향을 미쳤으며, 상온 양생한 UHPC의 경우 섬유 혼입률이 휨 인장성능을 지배 하는 것으로 평가 되었다. 다만, 체적비로 1%의 강섬유가 혼입된 시편의 경우 섬유가 혼입되지 않은 시편과 달리 균열 후 연성적인 거동은 보였으나, 강도 증진에는 효과가 없는 것으로 나타났다. 반면, 체적비 2%의 강섬유가 혼입된 시편은 강도와 연성을 크게 증가시켰다.

핵심용어 : 초고성능 콘크리트, 충전밀도, 상대밀도, 경화 전 성능, 경화 후 성능