

바닥판 적용 초고성능 시멘트 복합체의 인장응력-균열개구 관계

Tensile Stress-Crack Opening Relationship of Ultra High Performance Cementitious Composites(UHPCC) Used for Bridge Decks

권 승 희^{1)*} 이 승 국²⁾ 박 성 용³⁾ 조 근 희⁴⁾ 조 정 래⁵⁾
Kwon, Seung Hee Lee, Seung Kook Park, Sung Yong Cho, Keun Hee Cho, Jeong Rae

Abstract

Two different UHPCCs having different fiber lengths and volume fractions are considered to be applied to bridge decks. The objective of this study is to estimate cracking resistance of the two UHPCCs. The notched beam tests were performed with the UHPCCs, and the relationships between load and CMOD(Crack Mouth Opening Displacement) were obtained from the tests. The tensile stress and crack opening relationships optimally fitting the measured load-CMOD curves were found through the inverse analyses. The UHPCC with 2% volume fraction of 13 mm long fiber has lower fracture energy than the UHPCC with 0.5% and 1.0% volume fractions of 16.3 mm and 19.5 mm long fibers, respectively. It indicates that the latter UHPCC is more effective in uniformly distributing crack formation and reducing crack width.

Keywords : UHPCC, Cracking resistance, Tensile stress-crack opening relationship, Inverse analysis, Fracture test

1. 서론

국내 초고성능 시멘트 복합체(Ultra High Performance Cementitious Composites, UHPCC)에 관한 연구는 2000년대 중반부터 시작되었다. 재료개발, 재료특성 파악 및 재료 모델 개발에 관한 많은 연구들이 수행되었고(Kang et al., 2008; Kang et al., 2010; Kang et al., 2011; Cha et al., 2010; Kim et al., 2011; Yoo et al., 2011a; Yoo et al., 2011b; Lee et al., 2011; Kwon et al., 2012), 최근에는 실제 구조물에 적용하기 위한 구조부재 거동, 설계 및 해석에 관한 연구들이 수행되고 있다(Kang et al., 2008; Kook et al., 2010; Seonwoo et al., 2011; Joh et al., 2011; Yang et al., 2010; Lee et al., 2011; Hwang et al., 2011; Lee et al., 2011).

UHPCC는 높은 압축강도(200 MPa)와 인장강도(10

MPa)를 갖으며, 사용수명 200년을 확보할 수 있는 우수한 내구성을 나타낸다(Lee et al., 2011). 이러한 뛰어난 재료 특성을 바탕으로 실제 구조물에 적용되는 사례가 꾸준히 증가할 것으로 예상된다.

UHPCC의 적용성이 높은 부재 중 하나로 교량 바닥판을 들 수 있다. 사장교의 경우는 자중의 30% 정도를 바닥판이 차지할 만큼 실제 교량에서 바닥판에 의한 하중 부담이 매우 큰 것이 사실이다(Joh et al., 2011). 또한 차량 하중, 제설제 도포, 외부환경에 대한 노출로 인하여 내구수명이 매우 짧은 것으로 알려져 있다(Kim et al., 1999). 교량의 바닥판을 UHPCC로 시공하게 될 경우, 거더의 자중을 크게 줄이면서도 충분한 내구성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

기존의 UHPCC에 관한 연구는 13 mm 길이에 0.2 mm 직경의 직선형 고탄성용 강섬유(밀도 7.5 g/cm³, 인

1) 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 부교수, 교신저자

2) 학생회원, 명지대학교 토목환경공학과 석사

3) 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원

4) 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

5) 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

* Corresponding author : kwon08@mju.ac.kr 031-330-6418

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2013년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

장강도 2,500 MPa)를 전체 부피에 2% 함유시킨 경우에 대한 것이 대부분 이었다(Kang et al., 2008; Kook et al., 2010; Seonwoo et al., 2011; Lee et al., 2011; Joh et al., 2011; Yoo et al., 2011a; Yoo et al., 2011b; Kim et al., 2011). 여기서는 교량 바닥판에 적용할 목적으로 기존과 같이 13 mm 길이에 0.2 mm 직경의 섬유를 2% 함유한 UHPCC와 0.2 mm 직경을 갖는 16.3 mm, 19.5 mm 길이 섬유를 각각 0.5%, 1.0% 함유한 UHPCC 등 두 가지 재료를 고려한다.

바닥판의 구조적 안전성 및 사용성, 내구성은 인장균열에 의해 좌우되며, 따라서 균열저항성을 정량적으로 평가하여 설계에 반영해야 한다. 이 연구의 목표는 앞서 언급한 섬유의 종류 및 혼입량을 달리한 두 가지 UHPCC의 균열저항성을 정량적으로 파악하는 것이다. 이를 위해 두 재료에 대한 휨인장 파괴실험이 수행되었으며, 실험으로부터 측정된 하중과 균열개구변위(CMOD, Crack Mouth Opening Displacement) 관계를 최적으로 묘사하는 인장응력과 균열개구(COD, Crack Opening Displacement)의 관계를 역해석(inverse analysis)을 통해 파악하였다. 역해석 결과를 바탕으로 두 UHPCC 재료의 균열저항성에 대한 평가 및 분석이 이루어졌다.

2. 실험

2.1 재료

Table 1은 실험에 사용된 UHPCC의 배합을 나타낸 것이다. 두 가지 종류의 UHPCC가 제작되었으며, 섬유를 제외한 매트릭스의 배합은 동일하다. 섬유는 밀도 7.5 g/cm³와 인장강도 2,500 MPa인 강재로 만들어진 직경 0.2 mm의 섬유를 사용하였다. 배합에 따라 섬유의 길이와 혼입량에 차이가 있다. 첫 번째 배합(M1)의 경우 길이 13 mm 섬유가 전체 부피에 대해 2% 함유되었으며,

Table 1 Mix design of UHPCCs

Mix	Steel fiber		Relative weight ratios to cement					
	<i>l</i> (mm)	<i>V_f</i> (%)	C	W	SF	S	Filler	SP
M1	13.0	2.0	1.00	0.20	0.25	1.10	0.30	0.02
M2	16.5	0.5						
	19.5	1.0						

l: Fiber length

V_f: Volume fraction of fiber

C: Cement

W: Water

SF: Silica Fume

S: Fine Aggregate

두 번째 배합(M2)에는 16.3 mm와 19.5 mm 길이의 섬유가 각각 0.5%와 1.0% 함유되었다.

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)가 사용되었다. 잔골재는 밀도 2.62 g/cm³, 평균입경이 0.5 mm 이하의 모래를 사용하였으며, 고성능 감수제는 밀도 1.01 g/cm³의 암갈색 폴리카본산계 감수제를 사용하였다. 충전재로는 석영질 미분말이 사용되었다.

2.2 실험체 형상 및 제작

Fig. 1(a)는 보 실험체의 형상을 나타낸 것이다. 단면

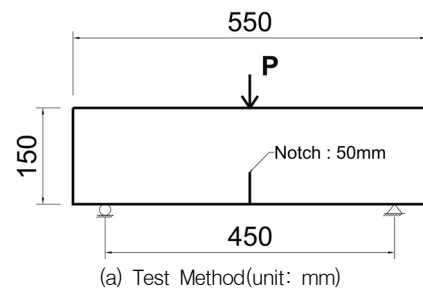


Fig. 1 Test method and test setup for notched beams

의 크기는 150 mm × 150 mm이고, 길이는 550 mm이다. 실험체의 제작에 2개의 UHPCC 전용 믹서가 사용되었다(Park et al., 2007). 배합 M1에 대해 2개의 믹서에서 각각 3개씩의 실험체가 제작되었다. 배합 M2에 대해서도 2개의 믹서를 사용하여 3개씩의 동일 실험체가 제작되었다. Table 2는 각 배합과 배치(batch)에 따른 실험체 개수를 나타낸 것이다.

모든 실험체는 타설 후 익일에 90±2 °C의 온도에서 3일 동안 양생하였다. 양생 후 Fig. 1(a)에서 보듯이 톱 자르기(saw cutting)를 통해 보의 중앙부에 50 mm 깊이의 노치를 두었다. 노치를 두지 않을 경우 균열의 위치 및 균열 진전 방향이 실험체마다 일정하지 않아 파괴특성을 분석하는 데 어려움이 있을 수 있다.

보 실험체 이외에 직접인장 실험체로 파괴특성을 파악하는 연구도 수행되고 있으나, 직접인장 실험의 경우 노치를 두더라도 실제 단면 내 응력분포가 상대적으로 일정하여 안정적인 균열진전을 유도하는 데 오히려 어려운 점이 있다.

보 실험체 이외에 압축강도와 탄성계수 측정을 위한 ϕ 100 mm×200 mm 실린더형 공시체를 배합별로 3개씩 제작하였다.

2.3 실험 방법

Fig. 1은 실험방법과 실험전경을 나타낸 것이다. Fig. 1(c)와 같이 실험 전에 실험체 바닥면에서 균열개구변위(CMOD)를 측정하기 위해 COD(Clip On Displacement) 게이지를 설치하였다. 양쪽 지점간의 거리는 450 mm였으며, 지점 중간에 노치가 위치되도록 하였다. 3점 휨 실험 방법으로 실험이 진행되었으며, 중앙부 가압면에 0.003 mm/sec의 속도로 변위가 증가되도록 하였다.

Fig. 2는 노치가 있는 보 실험과 더불어 수행된 압축강도 및 탄성계수 실험전경이다. 실험체의 양쪽 옆면에 콘크리트 변형률 게이지를 부착하여, 강도와 함께 탄성계수



Fig. 2 Compressive strength test setup

를 측정하였다.

3. 역해석(Inverse Analysis)

3.1 역해석에 사용된 하중-균열개구변위

Table 2에서 보듯이 각 배합과 배치마다 3개의 동일 실험체로부터 하중-균열개구변위가 측정되었으며, 역해석을 수행하기 위해서는 실험결과에 대한 평균을 구할 필요가 있다. 평균하는 방법에 따라라도 하중-균열개구변위 곡선이 달라질 수 있으며, 이 곡선의 작은 변화에도 역해석 결과가 달라질 수 있다.

기존의 연구에서 동일한 파괴상태를 기준으로 동일 실험체에 대한 파괴실험결과와 평균방법이 제안되었다(Zhao et al., 2008). 이 연구에서는 기존에 제안된 방법에 따라 동일 실험체에서 측정된 하중-균열개구변위의 평균을 구하였다. Fig. 3은 M1B2의 실험결과를 평균하는 과정을 설명한 것이다. Fig. 3(a)의 최초 실험 데이터로부터 Fig. 3(b)와 같이 동일한 파괴상태에서의 하중-균열개구변위 값을 동일한 수만큼 추출한다. 다음으로 Fig. 3(c)와 같이 하중-균열개구변위 데이터를 순서대로 평균하여 하나의 하중-균열개구변위 곡선을 구한다. 역해석을 수행함에 있어 실험 측정값의 수가 많을 경우 계산에 소요되는 시간이 크게 늘어나게 된다. 따라서 실험결과를 정확하게 나타내면서도 최소의 측정값을 역해석에 사용하는 것이 바람직하다. 이 연구에서는 평균된 하중-균열개구변위를 최적으로 모사하는 다중선형함수(multi-linear function)를 찾는 방식으로 Fig. 3(d)와 같이 역해석에 사용될 20

Table 2 The number of companion specimens

Mix	Batch (Mixer)	Specimen	The Number of Companion Specimens
M1	B1	M1B1	3
	B2	M1B2	3
M2	B1	M2B1	3
	B2	M2B2	3

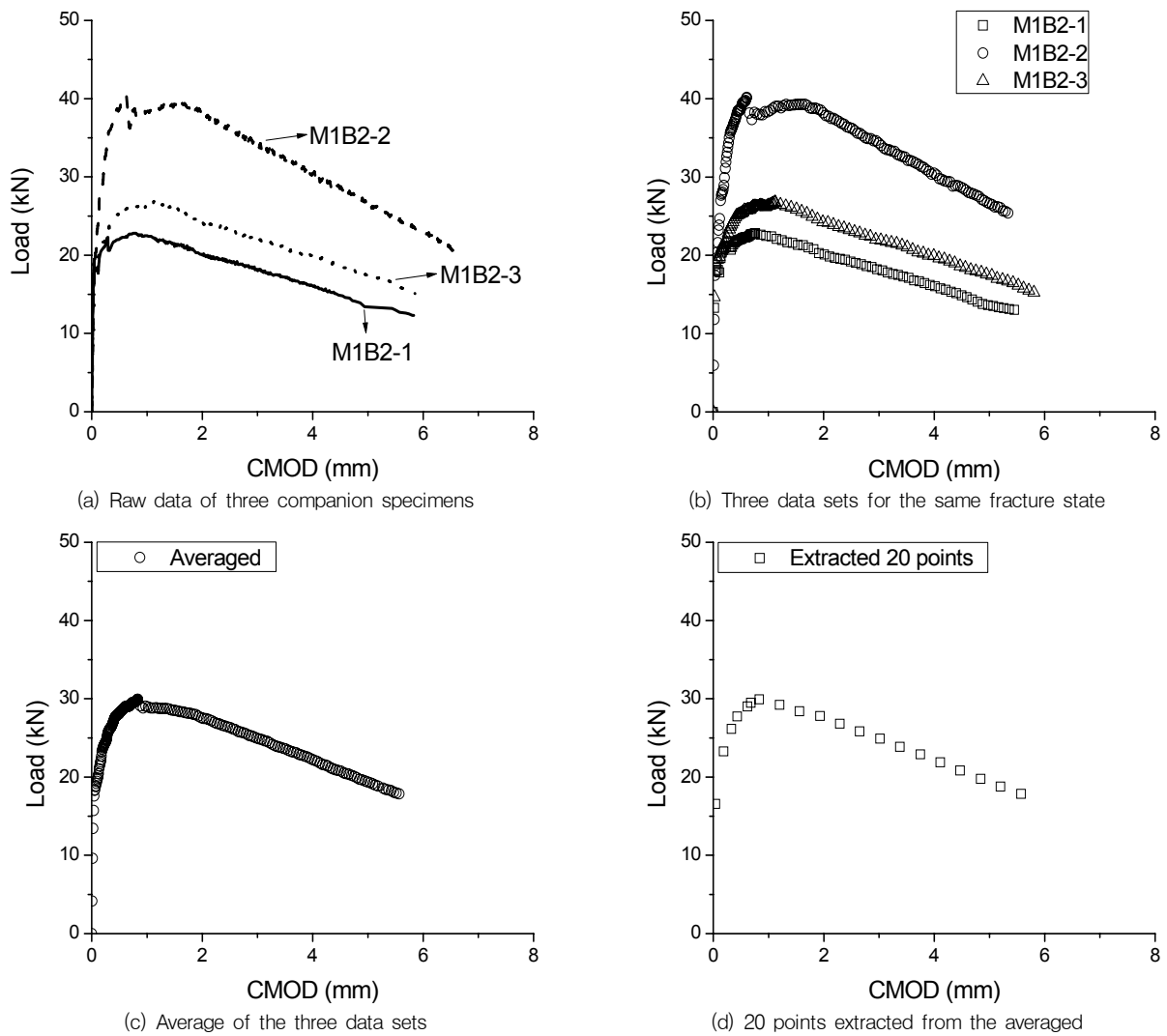


Fig. 3 Data processing for companion specimens (M1B2)

개의 측정값을 추출하였다. 20개의 측정값은 처음부터 최고하중까지 7개, 최고하중부터 마지막 측정위치까지 13개의 측정값으로 구성된다.

3.2 UHPCC의 인장응력-균열개구 관계

UHPCC의 인장응력-균열개구 관계는 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 균열 메커니즘에 따라 3선형 연화곡선으로 표현할 수 있다(Kang et al., 2010). 첫 번째 매우 급한 응력 감소구간은 매트릭스 자체에 균열이 시작되는 부분이고, 두 번째 수평구간은 섬유에 의한 가교 효과로 섬유의 인발이 진행되면서 응력이 일정하게 유지되는 구간이며, 마지막 세 번째 구간은 섬유인발이 어느 정도 진행된 후 균열폭의 증가에 따른 응력감소를 표현하고 있다.

UHPCC의 경우 매트릭스 자체는 매우 취성적 균열거동을 보이며, 인장균열에 대한 파괴에너지가 매우 작다. 따라서 역해석에 Fig. 4(a)의 첫 번째 구간을 고려할 경우 역해석으로부터 구해지는 첫 번째 구간에 해당되는 파라미터가 매우 민감하여, 의미 있는 결과를 얻는데 어려움이 있다. 또한 첫 번째 구간을 고려하지 않더라도 측정된 하중-균열개구변위를 정확히 모사하는 데에는 문제가 없다(Kang et al., 2010). 따라서 이 연구에서는 Fig. 4(b)와 같이 쌍선형 연화곡선을 역해석에 적용하였다.

3.3 역해석 알고리즘 및 실험체 모델링

Fig. 5는 역해석 알고리즘을 나타낸 것으로, Fig. 4(b) 연화곡선의 각 파라미터를 조정하면서 반복적으로 유한요

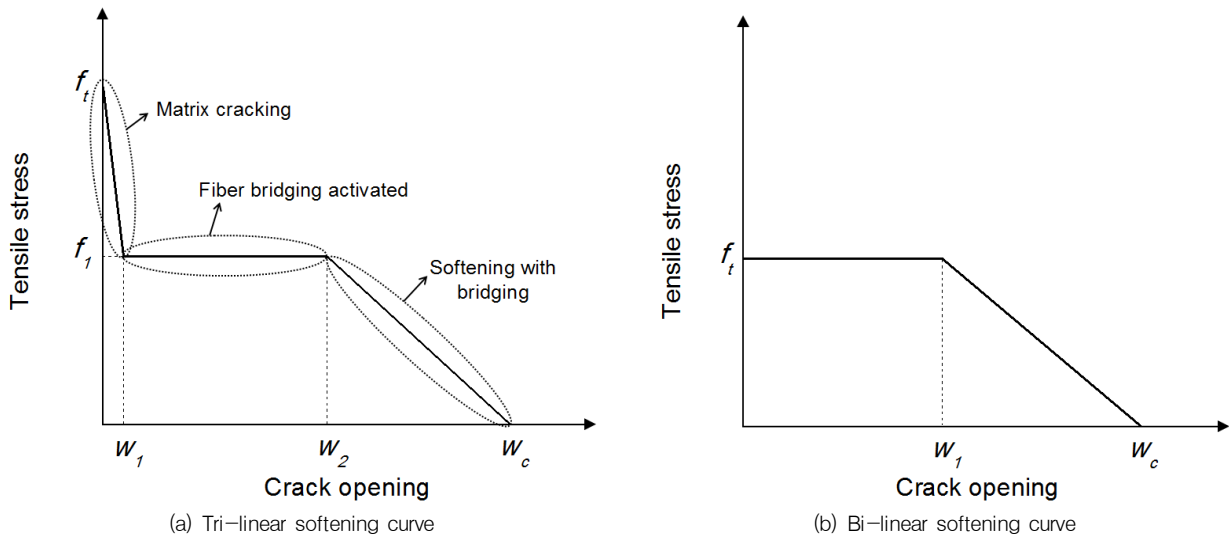


Fig. 4 Relationship between tensile stress and crack opening

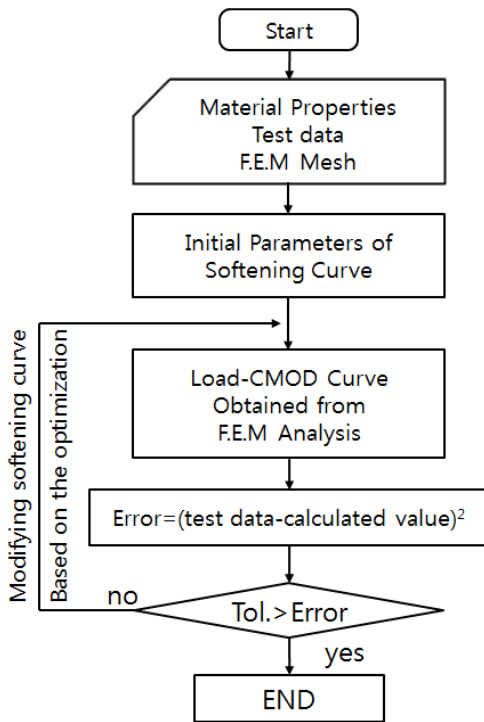


Fig. 5 Algorithm of inverse analysis

소 해석을 수행하게 되고, 실험결과를 최적으로 모사하는 연화곡선을 찾은 후 해석을 종료하게 된다. Fig. 6은 실험체에 대한 유한요소 모델링을 나타낸 것으로, 실험체의 대칭성을 고려하여 반쪽만을 모델링하였다. 반복적인 유한요소 해석과정에서 파라미터의 조정하는 최적화 기법으로 비선형 회귀분석에 가장 일반적으로 사용되는 Marquardt-Levenberg 방법(Brown, 1970)을 사용하였다.

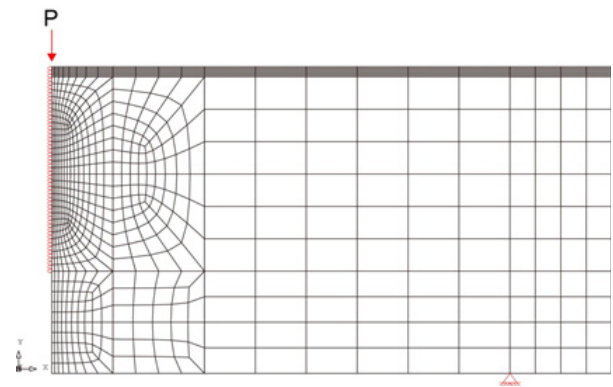


Fig. 6 Finite element mesh for notched beam specimen

Table 3 Measured compressive strength and elastic modulus

Mix	Batch (Mixer)	Compressive Strength (MPa)		Elastic Modulus (GPa)	
M1	B1	188	174	54.6	53.2
	B2	160		51.8	
M2	B1	203	189	56.4	52.3
	B2	175		48.2	

4. 결과 및 분석

4.1 압축강도 및 탄성계수

Table 3은 압축강도와 탄성계수 측정결과를 나타낸 것이며, 두 배치에 대한 평균값도 표시하였다. 압축강도의 경우 M2 배합이 M1 배합에 비해 다소 크게 나타났으며, 탄성계수는 배합에 따른 큰 차이를 보이지는 않았다. 그

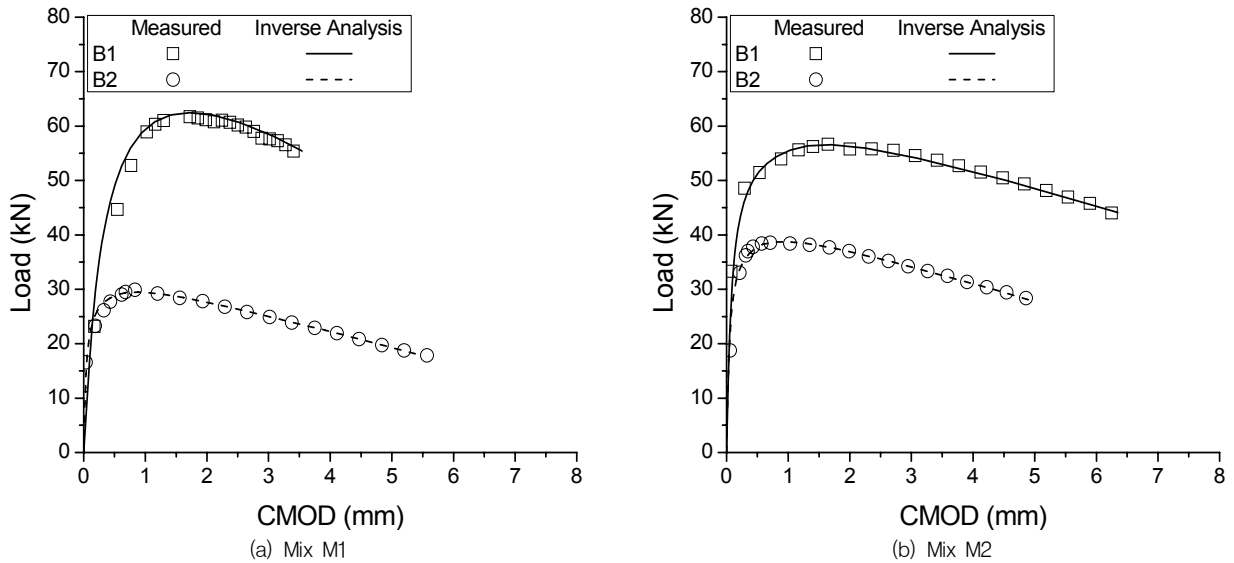


Fig. 7 Comparison between the measured Load-CMOD and the Load-CMOD obtained from the best fits

러나 동일 배합이더라도 사용한 믹서에 따라 강도와 탄성 계수가 차이를 보이고 있다. 모든 경우에 B1 배치에 대한 강도 및 탄성계수 측정값이 B2 배치에 비해 크게 나타나고 있다. 믹서에 따라 섬유 및 매트릭스 구성재료를 고르게 분산시키는 성능에 차이가 있는 것으로 보인다.

4.2 인장응력-균열개구 관계

Fig. 7은 역해석 결과와 실험결과를 비교한 것이다. 역해석결과가 실험결과를 매우 정확히 모사하고 있음을 알 수 있다. Table 4는 역해석을 통해 구한 실험결과를 최적으로 모사하는 연화곡선의 세 가지 파라미터, f_t , w_1 , w_c 를 실험변수별로 정리한 것이며, 각 배합별 두 배치에 대한 평균값도 나타내었다.

UHPCC의 인장강도를 나타내는 연화곡선의 첫 번째 파라미터 f_t 의 경우 M1 배합이 M2 배합에 비해 다소 높게 나타났다. 이것은 M1 배합의 섬유 혼입량 ($V_f=2\%$)이 높고 섬유의 길이($l=13.0$ mm)가 짧아, 단위면적당

분포하는 섬유의 개수가 M2 배합보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 섬유의 가교효과를 나타내는 파라미터인 w_1 과 w_c 의 경우 모두 M2 배합이 크게 나타났다. M2 배합에 함유된 섬유의 길이($l=16.3$ mm, 19.5 mm)가 길어 균열이 시작된 이후, 섬유의 가교 효과가 크게 나타난 것으로 보인다.

4.3 UHPCC 제작 과정에 따른 역학적 성능 변화

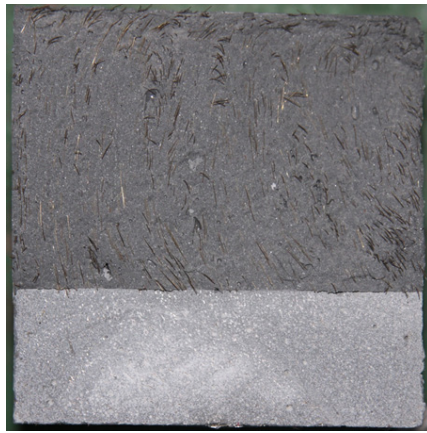
Table 3의 압축강도와 탄성계수 결과와 마찬가지로 Table 4의 최적화된 연화곡선에 대한 결과도 믹서에 따른 영향을 크게 받고 있음을 확인할 수 있으며, 연화곡선의 각 파라미터도 대부분 B1 배치가 B2 배치에 비해 크게 나타나고 있다. Table 3에서 확인할 수 있듯이 B2 배치의 경우 매트릭스 강도가 B1 배치에 비해 낮아, 균열에 의한 섬유의 인발 저항성 또한 B1 배치가 더 큰 것으로 판단된다.

이 연구에서 그리고 기존의 연구에서도 일부 파악되었지만, UHPCC의 경우 믹서의 성능 및 믹싱 방법에 따라 역학적 성능이 변화할 수 있다(Park et al., 2007). Fig. 3(a)에서도 보듯이 동일 실험체의 경우에도 인장균열 거동이 큰 차이를 보이고 있으며, 이는 단면 내 섬유의 분산 및 방향성의 차이에 기인한다. Fig. 8은 M1B2에 대한 동일 실험체 3개의 실제 파괴단면을 비교한 것으로, 섬유의 분포 및 방향성이 서로 상이하다는 것을 확인할 수 있다.

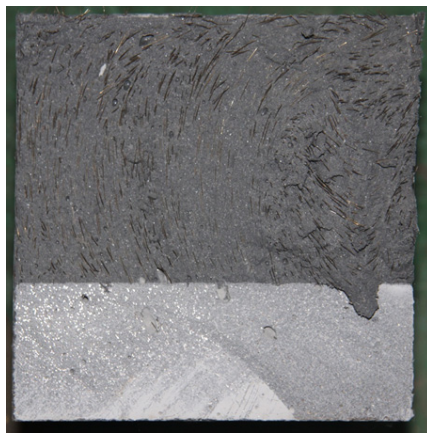
믹싱방법 뿐만 아니라 타설방법에 따라서도 역학적 특

Table 4 Optimized softening curve and fracture energy

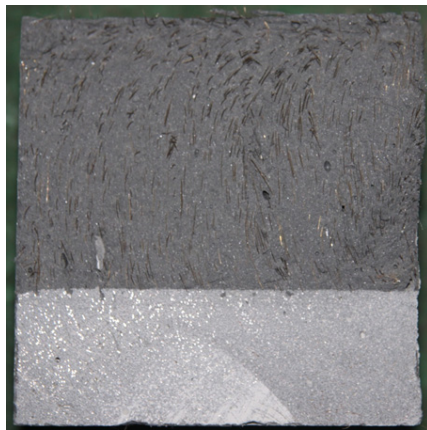
Mix	Batch (Mixer)	Softening Curve						Fracture Energy G_F (N/mm)	
		f_t (MPa)		w_1 (mm)		w_c (mm)			
M1	B1	13.4	9.43	0.30	0.30	4.44	4.73	31.8	23.2
	B2	5.45		0.30		5.02		14.5	
M2	B1	10.4	8.80	0.60	0.43	8.30	7.05	46.3	34.1
	B2	7.20		0.26		5.80		22.0	



(a) M1B2-1



(b) M1B2-2



(c) M1B2-3

Fig. 8 Fracture surfaces of companion specimens for M1B2

성이 큰 영향을 받을 수 있다. 그러나 아직까지 UHPCC의 제작과정이 역학적 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구는 충분히 수행되어 있지 않다. 앞으로 실제 구조물에 대한 UHPCC 재료의 적용성을 확대하는 데에도 이 부분에 대한 면밀한 연구가 필요할 것이다.

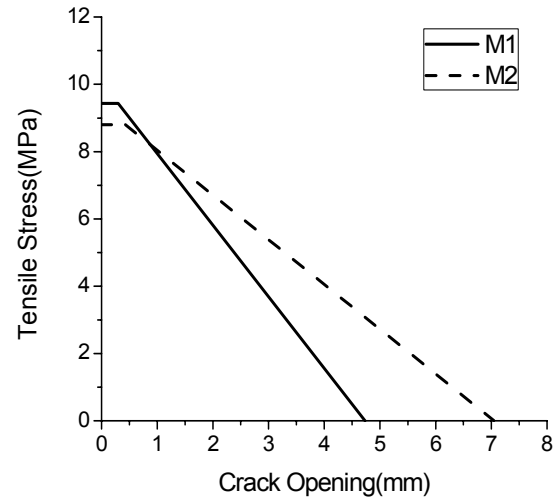


Fig. 9 Optimized softening curve

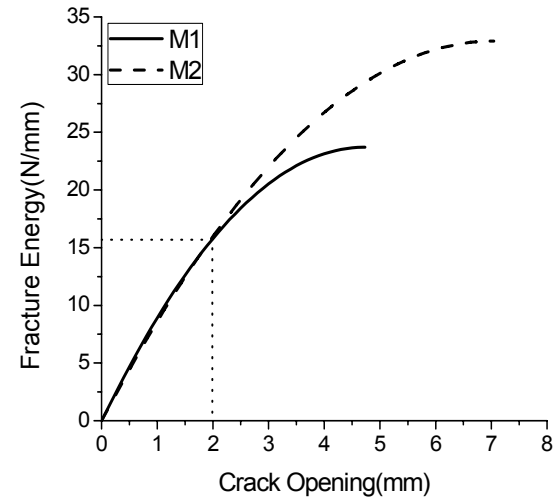


Fig. 10 Variation of fracture energy over crack opening

4.4 균열저항성

Fig. 9는 M1과 M2 배합의 연화곡선을 비교한 것이다. 이 연화곡선의 면적은 균열이 발생할 때 필요한 단위면적당 에너지, 즉 파괴에너지(G_F)를 의미한다. 연화곡선으로부터 계산된 파괴에너지를 Table 4에 같이 나타내었다. M2 배합의 파괴에너지가 M1 배합에 비해 1.47배 크며, 이는 M2 배합에 함유된 길이가 긴 섬유에 대한 가교효과가 길이가 짧은 섬유가 함유된 M1 배합보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 9의 연화곡선으로부터 균열개구의 증가에 따른 파괴에너지의 증가를 계산해 보았으며, Fig. 10과 같이 비교해 보았다. Fig. 10에서 보듯이 균열개구 2mm까지

M1과 M2 배합은 거의 동일한 균열저항성을 갖지만, 2mm 보다 큰 균열개구에서는 M2 배합이 더 큰 균열저항성을 나타내고 있다. 따라서 16.3 mm와 19.5 mm 길이의 섬유가 각각 0.5%와 1.0% 함유된 UHPCC가 13 mm 길이의 섬유가 2% 함유된 UHPCC에 비해 실제 바닥판 부재에서 균열을 분산시키고 균열폭을 감소시키는 효과가 클 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구를 통해 실제 교량의 바닥판에 적용할 목적으로 고려되고 있는 두 가지 UHPCC에 대한 균열저항성을 실험과 해석적 방법으로 평가해 보았다. 기존에 많이 사용해 오던 13 mm 길이의 강섬유가 2% 함유된 UHPCC에 비해 섬유의 길이 및 혼입량을 달리하여 16.3 mm와 19.5 mm 강섬유가 각각 0.5%, 1.0% 함유된 UHPCC의 균열저항성이 큰 것으로 나타났으며, 따라서 균열을 분산시키고 균열폭을 감소시키는 데 두 종류의 섬유를 혼용한 UHPCC가 더 효과적일 것이다.

단일 섬유를 2% 함유한 UHPCC의 경우 인장강도가 더 크게 나타났으나, 섬유의 가교효과(bridging effect)가 길이가 긴 섬유를 사용하는 경우에 비해 작아 균열저항성을 나타내는 파괴에너지의 크기가 길이가 긴 섬유를 사용한 UHPCC에 비해 작게 나타난 것으로 판단된다.

UHPCC의 역학적 특성은 제작과정에 따른 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 앞으로 실제 구조물에 대한 UHPCC 재료의 적용성을 확대하기 위해서는 재료의 혼합과정 및 타설과정이 역학적 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석 및 예측하는 연구가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 한국건설기술연구원 주요사업(하이브리드 사장교 바닥판 개발)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Brown, K. M., "Derivative-Free Analogus of The Levenberg, Marquardt and Gauss Algorithms for Nonlinear Least Square Approximations", No. 320-2994, IBM, Philadelphia, 1970.
2. Cha, S. W., Kim, K. H., Kim, S. W., Park, J. J., Bae, S. G., "Models for Hydration Heat Development and Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 22, No. 3, 2010, pp.389-397. (In Korean)
3. Hwang, H. H., Yeo, I. S., Cho, K. H., Park, S. Y., "Evaluation of Flexural Strength for UHPC Deck Joints with Lap-Spliced Reinforced Steel Bar", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 15, No. 6, 2011, pp.92-99. (In Korean)
4. Joh, C. B., Kim, B. S., Hwang, H. H., Choi, K. K., Choi, S. H., "Punching Shear Strength of Deck Slabs Made of Ultra High Performance Concrete", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 15, No. 4, 2011, pp.221-231. (In Korean)
5. Kang, S. T., Lee Y., Park, Y. D. and Kim, J. K. "Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber", Composite Structures, vol. 92, No. 1, 2010, pp.61-71.
6. Kang, S. T., Park, J. J., Koh, G. T., Kim, S. W., "Evaluation on Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams with Ultra-High Performance Cementitious Composites", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 12, No. 5, 2008, pp.81-90. (In Korean)
7. Kang, S. T., Park, J. J., Ryu, G. S., Kim, S. W., "Influence of the Filler's Particle Size on the Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete(UHPC)", KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 28, No. 4A, 2008, pp.573-580. (In Korean)
8. Kang, S. T., Park, J. J., Ryu, G. S., Kim, S. W., "The Effect of Steel-Fiber Reinforcement on the Compressive Strength of Ultra High Performance Cementitious Composites(UHPCC)", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 14, No. 5, 2010, pp.110-118. (In Korean)
9. Kang, S. T., Ryu, G. S., "The Effect of Steel-Fiber Contents on the Compressive Stress-Strain Relation of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPCC)", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 23, No. 1, 2011, pp.67-75. (In Korean)
10. Kim, S. W., Choi, S., Lee, K. M., Park, J. J., "Autogeneous Shrinkage Characteristics of Ultra High Performance Concrete", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 23, No. 3, 2011, pp.295-301. (In Korean)
11. Kim, S. W., Kang, S. T., Han, S. M., "Characteristics and Application of Ultra High Performance Cementitious Composite", Magazine of Concrete Institute, vol. 18, No. 1, 2006, pp.16-21. (In Korean)
12. Kim, Y. J., Chung, C. H., Kim, S. W., "Highway Bridge Decks - Past, Today and Future", Magazine of Concrete Institute, vol. 11, No. 3, 1999, pp.53-63. (In Korean)
13. Kook, K. H., Shin, H. O., Kwahk, I. J., Yoon, Y. S., "Bond Characteristics of Ultra High Performance Concrete", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 22, No. 6, 2010, pp.753-760. (In Korean)
14. Kwon, S. H., Lee, S. G., Park, S. Y., Cho, K. H., Cho, J. R., Kim, S. T., "Analysis on Flexural Behavior of UHPC used for Bridge Deck : Part I. Stress-Crack Opening Relationship for Tensile Crack", KCI Spring

- Conference, Korea, vol. 24, No. 1, 2012, pp.249-250. (In Korean)
15. Lee, C. D., Kim, W. J., Cho, K. S., Kim, J. H., "Design of UHPC(Ultra High Performance Concrete) Girder Cable Stayed Footbridge", Magazine of Concrete Institute, vol. 23, No. 5, 2011, pp.38-44. (In Korean)
 16. Lee, C. H., Chin, W. J., Choi, E. S., Kim, Y. J., "An Experimental Study on the joints in Ultra High performance Precast Concrete Segmental Bridges", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 23, No. 2, 2011, pp.235-244. (In Korean)
 17. Lee, S. G., Kwon, S. H., Cho, K. H., Cho, J. R., Park, S. Y., Kim, S. T., "Experiments on Cracking Resistance of UHPC used for Bridge Deck", KCI Autumn Conference, Korea, vol. 23, No. 2, 2011, pp.141-142. (In Korean)
 18. Park, J. J., Ryu, G. S., Kang, S. T., Kim, S. W., "Comparison in the Performance of Laboratory High-Speed Mixer & Real-Size Mixer in the Manufacturing Ultra-High Performance Concrete", KSCE Conference, 2007, pp.2379-2382. (In Korean)
 19. Seonwoo, Y. H., Park, S. K., Kwahk, I. J., Yoon, Y. S., "Analysis on Bond Characteristics of Reinforcements for UHPC Hybrid Cable-Stayed Bridge Deck Joints", KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 31, No. 3A, 2011, pp.207-214. (In Korean)
 20. Yang, I. H., Joh, C. B., Kim, B. S., "An Experimental Study on Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete Prestressed Girders", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 22, No. 6, 2010, pp.777-786. (In Korean)
 21. Yoo, D. Y., Park, J. J., Kim, S. W., Yoon, Y. S., "Characteristics of Early-Age Restrained Shrinkage and Tensile Creep of Ultra-High Performance Cementitious Composites (UHPCC)", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 23, No. 5, 2011, pp.581-590. (In Korean)
 22. Yoo, D. Y., Park, J. J., Kim, S. W., Yoon, Y. S., "Evaluating Early Age Shrinkage Behavior of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPCC) with CSA Expansive Admixture and Shrinkage Reducing Agent", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 23, No. 4, 2011, pp.441-448. (In Korean)
 23. Zhao, Z., Kwon, S. H., and Shah, S. P., "Effect of Specimen Size on Fracture Energy and Softening Curve of Concrete: Part I. Experiments and Fracture Energy", Cement and Concrete Research, vol. 38, No. 8-9, 2008, pp.1049-1060.

Received : 08/21/2012

Revised : 10/18/2012

Accepted : 10/22/2012

요 지

실제 교량의 바닥판에 적용할 목적으로 섬유 길이 및 혼입량을 달리한 두 가지 초고성능 시멘트 복합체를 고려하고 있다. 이 연구의 목적은 이 두 재료의 균열저항성을 평가하는 것이다. 두 재료에 대한 휨인장 파괴실험을 수행하였고, 실험으로부터 얻은 하중-균열개구변위 관계를 최적으로 모사하는 인장응력-균열개구 관계를 역해석을 통해 파악하였다. 역해석결과 13 mm 길이의 섬유를 2% 함유한 UHPCC는 16.3 mm와 19.5 mm 길이의 섬유를 각각 0.5%와 1.0% 함유한 UHPCC에 비해 파괴에너지가 작은 것으로 나타났다. 균열을 보다 분산시키고 균열폭을 감소시키기 위해서는 길이가 긴 두 종류의 섬유를 혼용한 UHPCC를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 초고성능 시멘트 복합체, 균열저항성, 인장응력-균열개구 관계, 역해석, 파괴실험