

# 폴리카보산계 고성능감수제 사용량이 초고성능 섬유보강 콘크리트의 성질에 미치는 영향

강수태\*  
Kang, Su-Tae\*

## The Effect of the Amount of Polycarboxylate Superplasticizer on the Properties of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete

### ABSTRACT

As the amount of polycarboxylate superplasticizer varied from 1.2% to 3.0% of the mass of binder, the change in the flowability & rheological properties, and strength of UHPFRC was investigated with experiments. The test results presented that the increase in the amount of superplasticizer was effective in improving the flowability up to 1.8%, but addition more than 1.8% was hardly beneficial for enhancing the flowability and rheological properties. Compressive strengths with different amounts of superplasticizer showed that the strength with 1.8% was slightly higher than that of 1.2%, but the amount more than 1.8% caused strength reduction, which was higher as the amount increased. The results in flexural strength according to the amount of superplasticizer showed a similar trend with the results in compressive strength. When the effect of compressive strength and fiber distribution characteristics on the flexural strength was analysed separately, it was found that high amount of superplasticizer caused an effect of fiber distribution in addition to the effect of compressive strength on flexural strength. This effect seems to be closely related to the results of flowability or rheological properties.

**Key words :** UHPFRC, Superplasticizer, Flowability, Compressive strength, Flexural strength

### 초록

이 연구에서는 폴리카보산계 고성능감수제의 사용량을 1.2%에서 3.0%까지 변화시켰을 때, UHPFRC의 유동성 및 유변특성의 변화, 그리고 강도 변화를 실험을 통해 살펴보았다. 실험결과에 따르면, UHPFRC에서 고성능감수제 사용량 1.8%까지는 사용량 증가에 따라 유동성 개선 효과가 나타났지만, 그 이상에서는 유동성 및 유변특성 개선에 효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 고성능감수제 사용량에 따른 압축강도 결과에서는 고성능감수제를 1.8% 사용하였을 때는 1.2% 사용했을 때 비해 고성능감수제 사용량 증가로 인해 강도가 약간 증가하지만, 그 이상의 고성능감수제 사용량에서는 사용량 증가에 따라 강도가 크게 감소하는 경향을 확인할 수 있다. UHPFRC 휨인장강도의 결과도 압축강도와 유사한 증감의 경향을 나타내었다. 휨인장강도와 연관성이 있는 압축강도 및 섬유 분포특성의 영향을 분리하여 분석한 결과, 많은 양의 고성능감수제를 사용했을 때 압축강도의 영향 이외에 섬유의 분포특성의 영향을 받았음을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 영향은 플로우 또는 유변특성 결과와 매우 밀접한 연관성이 있는 것으로 판단된다.

**검색어 :** 초고성능 섬유보강 콘크리트, 고성능감수제, 유동성, 압축강도, 휨강도

\* 중신회원 · 교신저자 · 대구대학교 건설시스템공학과 부교수 (Corresponding Author · Daegu University · [stkang@daegu.ac.kr](mailto:stkang@daegu.ac.kr))

Received July 28, 2017/ revised November 6, 2017/ accepted December 12, 2017

## 1. 서론

1990년대에 최밀충진 이론을 바탕으로 개발된 초고성능 섬유보강 콘크리트(Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete, 이하 UHPFRC)는 지속적이고 활발한 연구개발을 통해 최근에는 교량, 건축물, 미적 조형물 등 다양한 분야에 적용되고 있으며 활용범위를 계속적으로 확대해 나가고 있다. 일반적으로 초고성능 섬유보강 콘크리트라 하면 압축강도가 150MPa 이상이고 취성파괴가 발생하지 않도록 충분한 양의 섬유로 보강된 콘크리트를 의미한다(AFGC, 2002). 미연방도로국(FHWA)에서는 좀더 구체적으로 정의를 내리고 있는데, 최적 입도분포를 갖도록 하는 입자구성과 함께 물-결합재비가 0.25 이하이고 섬유로 보강된 콘크리트로 정의하고 있다(Graybeal, 2011).

초고강도 섬유보강 콘크리트에서 고강도를 얻기 위한 낮은 물-결합재비는 필연적으로 작업성 확보에 큰 어려움을 야기하기 때문에, 대부분 적지 않은 양의 고성능감수제(Superplasticizer)를 사용한다. 고성능감수제는 구성성분에 따라 크게 멜라민계, 나프탈렌계, 폴리칼본산계 등으로 나누어진다. 일반적으로 고성능감수제는 강도의 큰 변화 없이 유동성을 개선할 목적으로 사용한다. 하지만 초고성능 섬유보강 콘크리트에서와 같이 일반 콘크리트에서보다 훨씬 많은 양을 사용할 경우에는 강도에 미치는 영향이 작지 않을 수 있다(KCI, 2011; Alsadey, 2012; Dubey and Kumar, 2012). 일반 콘크리트에서 사용하고 있는 고성능감수제의 사용량은 최대 로 사용하더라도 통상 시멘트 중량의 1.0% 이내로 사용하고 있는 반면, 초고성능 콘크리트의 배합구성에서 사용되는 고성능감수제의 양은 약 1.5~2.0% 정도를 적용하고 있다. 지금까지의 고성능감수제 사용량과 콘크리트 강도의 관계에 관한 연구결과들을 살펴보면, 강도에 미치는 영향은 고성능감수제의 구성성분에 따라 약간씩 차이가 있는 것으로 알려지고 있다. 물-시멘트비 약 40%, 단위시멘트량 440kg/m<sup>3</sup> 콘크리트에 대하여, 나프탈렌계 고성능감수제를 사용한 경우, 사용량 증가에 따라 공기량은 감소하고, 압축강도는 0.5%까지는 증가하지만 그 이후에는 감소하며, 0.25%를 사용한 경우에 비해 1.0%를 사용한 경우 강도가 약 30%까지 감소하는

것으로 보고된 바 있다(KCI, 2011). 또한 리그난계 고성능감수제를 사용한 경우에는 공기량은 증가하며, 압축강도는 사용량이 증가함에 따라 저하되고, 특히 0.5% 이상에서 크게 감소되는 것으로 보고된 바 있다(KCI, 2011). 폴리칼본산계 고성능감수제의 경우에는 자기충진 콘크리트에 사용하였을 때 사용량 0.35% 이내에서는 사용량 증가에 따라 압축강도가 약간 향상되는 경향을 보인 결과가 있는 반면(Dumne, 2014), 사용량 2~12% 범위에서는 사용량 증가에 따라 압축강도가 선형적으로 크게 감소한다는 연구결과도 있었다(Dubey and Kumar, 2012).

최근 국내에서 개발하고 있는 UHPFRC는 주로 폴리칼본산계 고성능감수제를 사용하고 있으며 사용량은 고흡분을 기준으로 시멘트 중량의 1.8% 내외를 적용하고 있다. 제조사별 폴리칼본산계 고성능감수제의 특성에 따라 그 경향이 다를 수는 있겠지만, 앞서 설명한 바와 같이 기존의 연구결과들을 살펴볼 때, 적정량까지는 강도에 유익한 영향을 미치는 반면, 그 이상의 고성능감수제의 사용량은 오히려 강도를 저하시키는 결과를 초래함을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서는 폴리칼본산계 고성능감수제의 사용량을 1.2%에서 3.0%까지 변화시켰을 때, 유동성 및 유변특성의 변화와 함께 강도의 변화를 살펴보고자 하였다. 강도는 압축강도뿐만 아니라 휨인장강도도 함께 살펴보았다. 섬유보강 복합재료의 인장강도 또는 휨인장강도는 섬유의 분포특성과 밀접한 관련을 가지며(Kang and Kim, 2011; Kang et al., 2011; Yoo et al., 2014), 섬유의 분포특성은 굳지 않은 시멘트 모르타르의 유변학적 특성에 의해 영향을 받을 수 있다(Ozyurt et al., 2007). 따라서 과다한 고성능감수제의 사용은 UHPFRC의 섬유 분포특성에 영향을 미치고, 그 결과 휨성능에 큰 변화를 유발할 수 있다. 이러한 영향도 이 연구에서 함께 검토하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 사용재료 및 배합

UHPFRC는 시멘트, 모래, 실리카퓌ם, 충전재 등을 주요 구성재료로 한다. 실험에 사용된 UHPFRC의 배합은 Table 1과 같으며,

Table 1. Mix Proportions of UHPFRC

Mix	Unit mass (kg/m <sup>3</sup> )									
	Cement	Silica fume	Sand	Filler	EA	SRA	WRA	Water	Steel fiber	Anti foamer
M1	771	193	848	231	57.8	7.70	30.8	165	156	1.40
M2	771	193	848	231	57.8	7.70	46.3	160	156	1.40
M3	771	193	848	231	57.8	7.70	61.7	156	156	1.40
M4	771	193	848	231	57.8	7.70	77.1	151	156	1.40

EA: Expansive additive, SRA: Shrinkage reducing agent, WRA: Water reducing agent

Table 2. Physical & Chemical Properties of Cement, Silica Fume, and Filler

Item	Specific surface area (m <sup>2</sup> /kg)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Ig.loss (%)	Chemical composition (%)					
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
Cement	341	3,150	1.40	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.3
Silica fume	20,000	2,100	1.50	96.00	0.25	0.12	0.38	0.1	-
Filler	ND	2,600	0.01	99.50	0.38	0.04	0.01	0.01	-

단위용적 1m<sup>3</sup>에 대한 각 구성재료의 질량으로 나타내었다. 고성능감수제 사용량과 단위수량을 달리한 총 네 가지 배합에 대해 실험이 수행되었다. M1~M4 배합은 시멘트 중량에 대한 고성능감수제 고형분의 중량 백분율이 각각 1.2%, 1.8%, 2.4%, 그리고 3.0%에 해당하도록 고성능감수제를 사용하였으며, 고성능감수제 사용량이 증가함에 따라 배합수의 양은 조금씩 줄여서 적용하였다.

시멘트는 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 실리카폼은 UHPFRC의 재료성능 향상을 위해 시멘트 중량대비 25%를 사용하였다. 실리카폼은 공극 충전효과와 포졸란 반응을 통하여 재료의 밀도를 향상시킴으로써 강도증진의 효과가 있다(ACI, 2006). 잔골재는 밀도 2,620kg/m<sup>3</sup>, 평균입경이 0.5mm 이하의 규사를 사용하였고, 굵은골재는 사용하지 않았다. UHPFRC에 사용된 고성능감수제는 국내 D사의 폴리칼본산계 고성능감수제로서 밀도 1,010kg/m<sup>3</sup>이고, 암갈색을 띠고 있으며, 고형분량은 30%이다. 충전재(filler)는 물리적·화학적 효과로 UHPFRC의 강도향상에 도움이 되는 재료로서(Droll, 2004), UHPFRC 제조 시에 일반적으로 사용되고 있다. 이 실험에서 사용한 충전재는 입자의 평균입경이 약 4μm 정도이며, 비결정형 SiO<sub>2</sub>의 함유율은 98% 이상이고, 밀도는 2,600kg/m<sup>3</sup>이다. Table 2에 시멘트와 실리카폼의 물리·화학적 성질을 나타내었다.

강섬유는 인장응력 및 휨응력이 작용할 때 인성향상을 목적으로 사용되었으며, 고탄성용 강섬유로, 밀도는 7,500kg/m<sup>3</sup>이고, 길이 13mm, 직경 0.2mm로 형상비가 65이며, 인장강도는 2500MPa이다. 강섬유의 사용량은 콘크리트 전체 체적에 대하여 부피비로 2%를 적용하였다.

## 2.2 실험방법 및 실험체 제작

고성능감수제 사용량에 따른 UHPFRC의 재료특성 변화를 살펴 보기 위하여, 우선 굳지 않은 상태에서 KS L 5105에 따른 플로우 시험을 실시하였으며, 레오미터를 이용하여 유변특성(소성점도 및 항복응력)을 평가하였다. 레올로지 평가 시험에 사용된 레오미터는 Brookfield 점도계이며, 베인(vane) 형태의 스핀들을 사용하였다. 레올로지 시험은 0~19 rpm 범위에서 각 단계별 1.9rpm 씩 증가시켜 30초 간격으로 측정하고 또 최대 rpm에 도달 후 다시 1.9rpm 감소시키면서 측정하는 방법으로 진행하였으며, 그 측정결과에 대해 Bingham 모델( $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$  관계식)을 적용한 회귀분석을



Fig. 1. Equipment for Measuring Rheological Properties



Fig. 2. Placing to Induce Shear Flow of UHPFRC in Fabricating Flexural Beam Specimen

통해 항복응력(yield stress,  $\tau_0$ )와 소성점도(plastic viscosity,  $\mu$ )를 구하였다. Fig. 1은 레오미터를 이용한 유변특성 평가 실험 모습을 보이고 있다.

굳은 상태의 재료 특성으로 압축강도 및 휨인장거동 평가를 실시하였다. 압축강도는 직경 100mm, 높이 200mm의 원주형 공시체를 이용하여 측정하였으며, 휨인장거동 실험 목적으로는 단면의 크기가 100×100mm이고 길이가 500mm인 휨실험체를 제작하였다. 이 때, Fig. 2에서 보는 바와 같이 UHPFRC 타설 시 굳지 않은 매트릭스의 전단흐름이 발생하도록 유도하여, 타설방법 차이로 인한 섬유분포 특성의 변화를 배제하고 재료의 유동성 또는 유변특성의 변화에 따른 영향만을 살펴보고자 하였다.



Fig. 3. Flexural Tensile Test with Notched Beam



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Fractured Specimen After Test and (b) Fibers Bridging Cracked Faces

휨실험체는 양생 후 중앙부에 0.3mm 폭의 노치를 10mm 깊이로 내었으며, 노치 낸 보에 대해 Fig. 3과 같은 방법으로 지간 300mm로 하여 3점 재하 실험을 실시하였다. 하중 재하에 따른 중앙부 처짐과 노치에서의 균열개구변위를 각각 변위계와 클립게이지를 이용하여 측정하였다. Fig. 4는 실험을 실시한 이후에 실험체의 균열양상과 균열면에서 가교저항을 하고 있는 섬유의 모습을 보여 주고 있다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 플로우 및 유변특성

모든 실험결과는 Table 3으로 나타내었다. 먼저 플로우 측정결과를 살펴보면 Fig. 5와 같다. 고성능감수제 사용량이 1.2%인 M1 배합의 경우에 플로우 값이 가장 작게 나타났으며, 고성능감수제 사용량의 더 많은 M2-M4 배합에서는 플로우 값이 200mm 이상으로 크게 나타났다. 모든 경우의 배합에서 과도한 유동성으로 인한 재료분리 현상은 나타나지 않았다. 고성능감수제 사용량 1.2%와 1.8%인 M1과 M2 배합 사이에서는 고성능감수제 사용량 증가에 따른 유동성 개선이 뚜렷하게 나타났지만, 사용량 1.8%에서 3.0% 사이의 M2-M4 배합 사이에서는 플로우 값, 즉 유동성 차이가 전혀 나타나지 않았다. 이와 같은 결과는 레오미터로 측정된 유변특성의 결과에서도 동일하게 나타났다. Fig. 6은 M1-M4 배합의

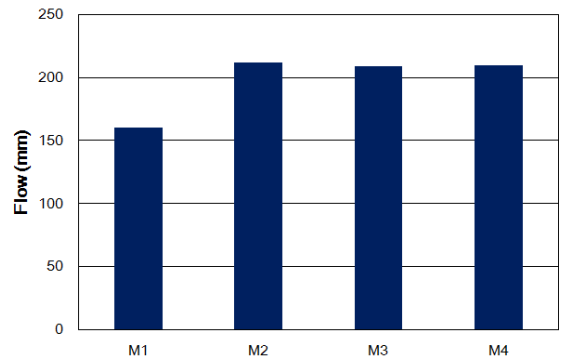


Fig. 5. Flow Test Result

Table 3. Summary of Test Results

Mix	Flow (mm)	Rheometer test		Compressive strength* (MPa)	Flexural test	
		Viscosity (Pa·s)	Yield stress (Pa)		Flexural strength* (MPa)	Defl. at peak* (mm)
M1	160	166	185	190±11.0	45.5±1.29	0.809±0.049
M2	212	54.0	0	192±5.5	39.7±0.48	0.868±0.263
M3	209	54.2	9.3	178±17.5	37.7±1.54	0.836±0.343
M4	210	51.1	18.5	135±5.4	31.8±0.65	0.660±0.089

\* The result was expressed as a form of average±standard deviation

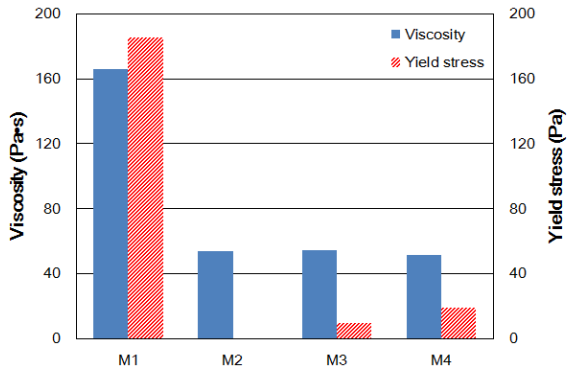


Fig. 6. The Results of Viscosity and Yield Stress

유변특성의 측정 결과는 나타난 것이다. M1 배합의 소성점도는 166Pa·s이고, 항복응력은 185Pa로 M2~M4 배합에 비해 소성점도와 항복응력 모두 매우 크게 측정되었다. 반면 M2~M4 배합은 소성점도가 50~55Pa·s 범위로 거의 차이가 없었으며 항복응력도 0~18.5Pa로 M1에 비해 매우 작은 값으로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 UHPFRC에서 고성능감수제 사용량 증가에 따른 유동성 개선 효과가 나타나는 고성능감수제의 사용량의 구간이 존재함을 의미하며, 그 이상의 고성능감수제 사용량은 UHPFRC의 유동성 및 유변특성 개선에 효과가 거의 없는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.2 압축강도

고성능감수제 사용량 변화에 따른 압축강도는 각 배합별 3개의 공시체에 대해 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 7로 나타내었다. 고성능감수제 사용량이 각각 1.2%와 1.8%인 M1과 M2 배합 사이에서는 압축강도의 변화가 거의 없으나, 2.4%와 3.0%에 해당하는 M3와 M4 배합에서는 고성능감수제 사용량 증가에 따라 압축강도가 크게 감소하는 경향을 확인할 수 있다. M1~M4 배합에서 고성능감수제의 사용량 증가와 함께 단위수량을 적게 고려함으로써 물-결합재비가 유사하도록 하였다. 고성능감수제 용액의 사용량에 포함된 물의 양을 고려하여 물-결합재비를 계산해 보면, M1~M4 배합의 물-결합재비는 19.4, 20.0, 20.6, 21.2%에 해당한다. 최소값과 최대값 사이에 약 1.8% 정도의 물-결합재비 차이가 발생한다. Kang et al.(2011)은 물-결합재비 0.2~0.4 범위에 대하여 물-결합재비와 압축강도의 경험적 선형 관계식을 제시한 바 있으며, 이 식에 따르면 물-결합재비 19.4%와 21.2% 사이에는 물-결합재비 차이로 인한 강도 차이가 약 10.3MPa가 있는 것으로 평가할 수 있다. M1의 압축강도를 기준으로 물-결합재비 차이로 인한 강도 증감과 고성능감수제 고품분의 사용량 증가로 인한 강도 증감을 나누어서 살펴보면 Fig. 8과 같다. M1~M4 배합의 압축강도 결과에서 물-결합재비의 영향으로 인한 강도증분을 제외한 고성능감수제

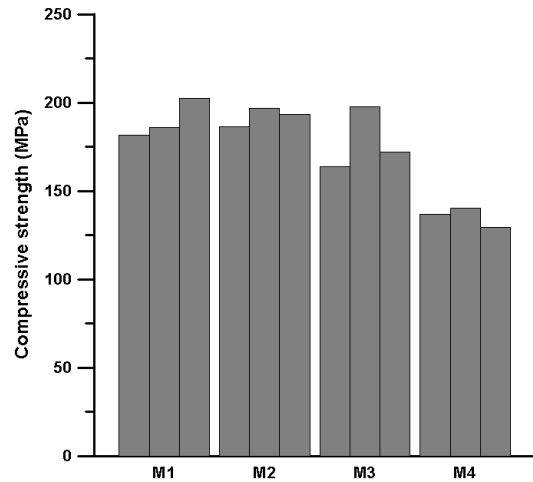


Fig. 7. Compressive Strengths with Different Dosages of Superplasticizer

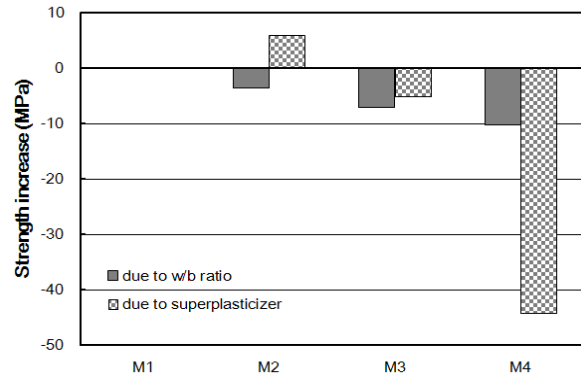


Fig. 8. Strength Increase Due to w/b Ratio and Superplasticizer

에 의한 영향만을 살펴보면, 고성능감수제를 1.8% (M2) 사용하였을 때는 1.2% 사용했을 때 비해 고성능감수제 사용량 증가로 인한 강도가 증가하지만, 그 이상의 고성능감수제 사용량에서는 강도가 크게 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 결과적으로 압축강도에 긍정적 영향을 미치는 고성능감수제 사용량의 제한범위가 존재함을 알 수 있으며, 그 이상의 사용량 증가는 강도를 크게 감소시키는 원인이 되는 것으로 판단된다.

### 3.3 휨인장강도

고성능감수제 사용량 변화에 따른 M1~M4 배합의 휨인장 실험으로부터 구한 하중-처짐 곡선의 결과는 Fig. 9와 같다. 하중-CMOD 관계 곡선도 이와 유사한 형태를 곡선을 나타내었다. 각 배합에 대해 3개의 실험체 결과를 보여주고 있는데, 개체별 곡선의 편차가 크지 않고 모두 처짐경화(deflection hardening) 거동을 보이는 것으로 볼 때, 타설방법 및 그로 인한 섬유배열 특성의 차이로 인한 거동의 변화는 배제된 것으로 볼 수 있다. 각 배합별

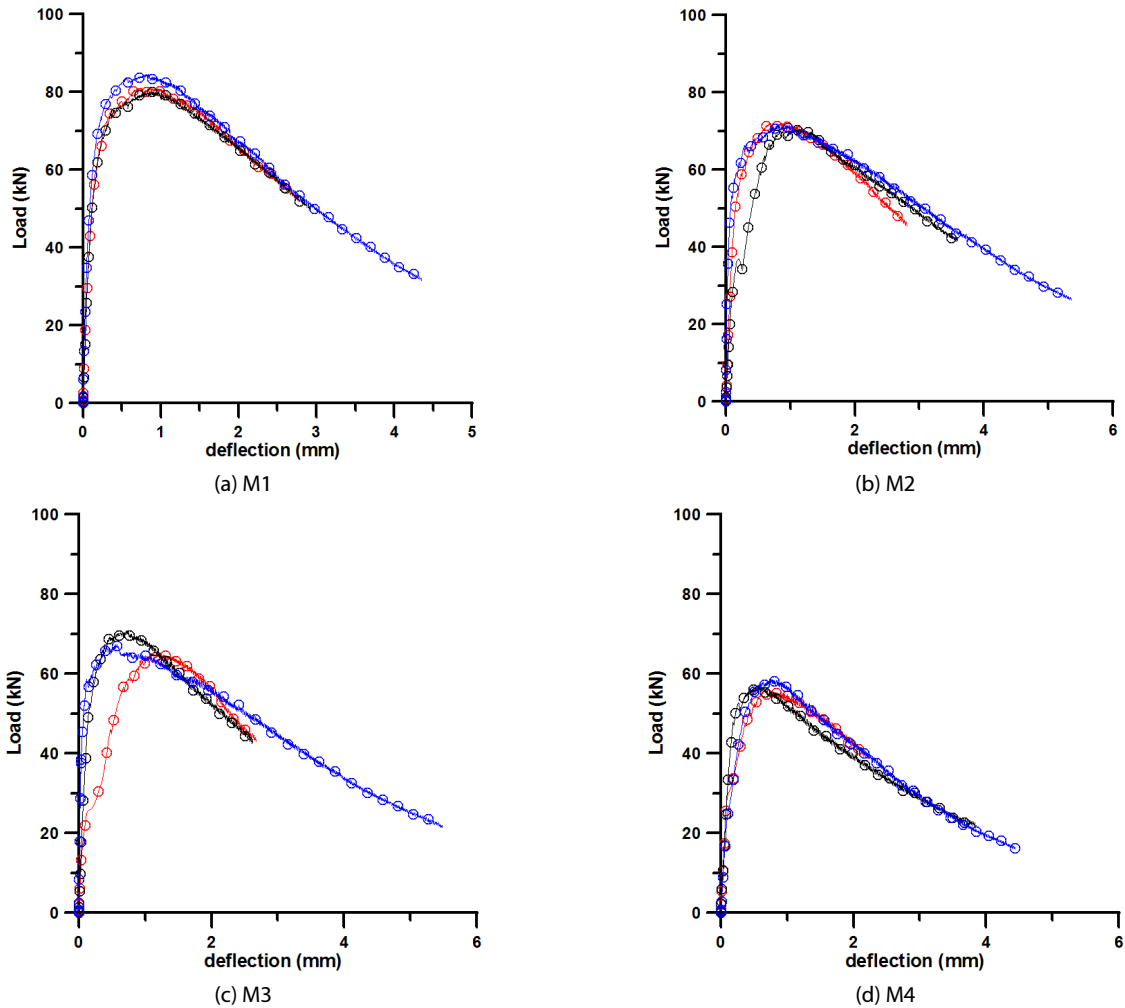


Fig. 9. Load-Deflection Curves Obtained from Flexural Specimens with M1~M4 Mixtures

평균 휨인장강도와 그 때의 처짐에 대한 결과는 Table 3에 다른 실험결과와 함께 나타내었다. 휨인장강도는 아래 식을 이용하여 구하였다.

$$f_r = \frac{3P_{\max}L}{2bh_e^2} \quad (1)$$

위 식에서  $P_{\max}$ 는 휨실험에서의 최대하중을 의미하고,  $L$ 와  $b$ 는 각각 실험체의 지간길이와 단면폭을 나타내고,  $h_e$ 는 전체 단면높이에서 노치의 깊이를 뺀 값을 의미하다.

Naaman(1972)은 섬유보강 콘크리트의 휨인장강도( $f_r$ )에 대해 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다고 하였다.

$$f_r = \lambda\tau_{eq}V_f(L_f/d_f) \quad (2)$$

여기서,  $\tau_{eq}$ 는 등가부착강도를 나타내며,  $\lambda$ 는 섬유의 길이, 방향성 및 분포밀도 등과 관련된 계수이다.

등가부착강도는 매트릭스의 강도, 섬유의 재질, 형상 등에 의해 영향을 받지만, 사용된 섬유가 동일한 섬유로 동일한 양만큼 사용되었고 매트릭스를 구성하는 재료가 동일한 경우에는 매트릭스의 강도의 함수로 가정할 수 있다. 섬유의 기하학적 특성이 모두 동일하다면 결국 Eq. (2)로부터 압축강도의 함수에 대한 휨인장강도의 비를 이용하여 섬유의 방향성 및 분포밀도에 따른 영향을 비교할 수 있다. Dong et al.(2011)은 강섬유, PVA섬유 등에 대하여 콘크리트 압축강도 변화에 따른 부착강도 실험을 통해 섬유의 부착강도가 콘크리트 압축강도의 0.785승에 비례한다고 밝힌 바 있다. 또한 인장철근과 콘크리트의 부착특성에서 인장철근의 평균 부착강도는 압축강도의 0.5승에 비례하는 것으로 알려져 있다(Jirsa et al., 1979). 이와 유사한 관계가 강섬유와 시멘트 매트릭스 사이에서도 성립된다고 가정하여 두 가지 부착강도와 압축강도의 관계식

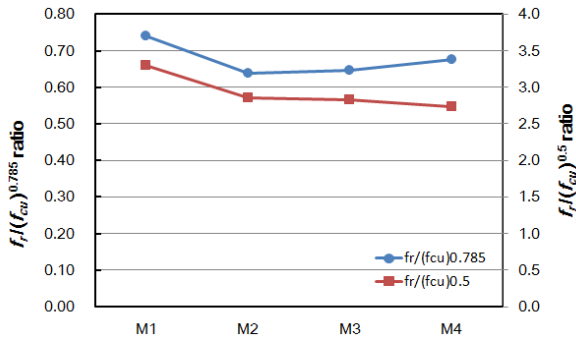


Fig. 10. Comparison of  $f_r/(f_{cu})^{0.785}$  and  $f_r/(f_{cu})^{0.5}$  Ratios of M1~M4 Mixtures

을 이용하여 휨인장강도 분석을 실시하였다. UHPFRC 압축강도 ( $f_{cu}$ )의 0.785승 값 및 0.5승 값에 대한 휨인장강도( $f_r$ )의 비를 계산한 결과는 Fig. 10으로 나타내었다. 고성능감수제 사용량 증가에 따른  $f_r/(f_{cu})^{0.785}$  및  $f_r/(f_{cu})^{0.5}$  비의 변화를 살펴보면, 부작강도를 압축강도의 0.785승의 함수로 고려했을 때와 0.5승의 함수로 고려했을 때 모두 M1 배합에 비해 M2~M4 배합의 결과가 각각 10%와 15% 정도 작게 나타나는 경향을 보였으며, M2~M4 사이에서는 고성능감수제 사용량 증가에 따라 영향은 별로 없는 것으로 보인다. 이 같은 차이는 UHPFRC의 휨인장강도가 압축강도에 의해서만 영향을 받은 것이 아니라 섬유 방향성 또는 분포밀도와 같은 이차적인 영향을 받았음을 의미한다고 볼 수 있다. 즉, M2~M4 배합이 M1 배합에 비해 섬유의 방향성 또는 분포밀도가 상대적으로 나빠졌다고 볼 수 있다. Fig. 10의 결과는 앞서 플로우 및 유변특성의 결과를 나타낸 Fig. 5 및 Fig. 6과 비교했을 때 매우 밀접한 연관성이 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 결과적으로 UHPFRC의 유동특성이 섬유의 방향성 또는 분포밀도에 영향을 미친다고 판단할 수 있다. UHPFRC의 유동특성과, 섬유의 분포특성에 따른 휨인장강도 변화 사이의 정량적 상관관계 분석은 단면 내 섬유분포의 정량적 평가 등의 추가적인 분석과 함께 이루어져야 하지만, 이 연구에서는 영향 여부만을 파악하였으며 향후 이에 대하여 체계적인 추가연구를 진행하고자 한다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 폴리칼본산계 고성능감수제의 사용량을 1.2%에서 3.0%까지 변화시켰을 때, UHPFRC의 유동성 및 유변특성의 변화, 그리고 강도 변화를 실험을 통해 살펴보았다. 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) UHPFRC에서 고성능감수제 사용량 1.8%까지는 사용량 증가에 따라 유동성 개선 효과가 나타났지만, 그 이상에서는 유동성

및 유변특성 개선에 효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 UHPFRC의 유동성 개선 효과가 나타나는 고성능감수제의 사용량의 구간이 존재함을 의미한다.

- (2) 고성능감수제 사용량에 따른 압축강도 결과에서는 고성능감수제를 1.8% 사용하였을 때는 1.2% 사용했을 때 비해 고성능감수제 사용량 증가로 인해 강도가 증가하지만, 그 이상의 고성능감수제 사용량에서는 사용량 증가에 따라 강도가 크게 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 압축강도에 긍정적 영향을 미치는 고성능감수제 사용량의 제한범위가 존재함을 확인할 수 있었다.
- (3) UHPFRC 휨인장강도의 결과도 압축강도와 유사한 증감의 경향을 나타내었다. 휨인장강도와 연관성이 있는 압축강도 및 섬유의 분포특성의 영향을 분리하여 분석한 결과, 많은 양의 고성능감수제를 사용했을 때 압축강도의 영향 이외에도 섬유의 방향성 또는 분포밀도와 같은 이차적인 영향을 받았음을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 영향은 플로우 또는 유변특성 결과와 매우 밀접한 연관성이 있는 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

#### References

ACI (2006). "ACI 234R-06: Guide for the use of silica fume in concrete." *American Concrete Institute*, p. 2.

AFGC (2002). *Ultra-high performance fibre-reinforced concrete - Interim recommendations*, Association Francaise de Genie Civil, Paris, France.

Alsadey, S. (2012). "Influence of Superplasticizer on Strength of Concrete." *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 1, No. 3, pp. 164-166.

Dong, H., Okubo, S. and Fukui, K. (2011). "Influence of concrete strength on the bond characteristics of reinforcing fibers." *Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan*, Vol. 127, pp. 249-255.

Droll, K. (2004). "Influence of additions on ultra high performance concrete-grain size optimization." *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, pp. 285-301.

Dubey, R. and Kumar, P. (2012). "Effect of superplasticizer dosages on compressive strength of self compacting concrete." *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 360-366.

Dumne, S. M. (2014). "Effect of superplasticizer on fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing fly ash." *American Journal of Engineering Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 205-211.

- Graybeal, B. (2011). *Ultra-high performance concrete*, Tech-note: FHWA-HRT-11-038, Federal Highway Administration, McLean, VA.
- Jirsa, J. O., Lutz, L. A. and Gergely, P. (1979). "Rational for Suggested Development, Splice and Standard Hook Provisions for Deformed Bars in Tension." *Concrete International*, Vol. 1, No. 7, pp. 47-61.
- Kang, S. T. and Kim, J. K. (2011). "The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites (UHPFRC)." *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, pp. 1001-1014.
- Kang, S. T., Lee, B. Y., Kim, J. K. and Kim, Y. Y. (2011). "The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete." *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 2450-2457.
- Korea Concrete Institute (2011). *New Concrete Engineering*, Kimoondang, pp. 117-121 (in Korean).
- Naaman, A. E. (1972). "A statistical theory of strength for fiber reinforced concrete." Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Ozyurt, N., Mason, T. O. and Shah, S. P. (2007). "Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs." *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 2, pp. 70-79.
- Yoo, D. Y., Kang, S. T. and Yoon, Y. S. (2014). "Effect of fibre length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fibre distribution characteristics of UHPFRC." *Construction and Building Materials*, Vol. 64, pp. 67-81.