

CSA 팽창재를 혼입한 강섬유 보강 모르타르의 균열 저항성능 평가

Evaluation of Crack Resistant Performance in Cement Mortar with Steel Fiber and CSA Expansion Admixture

안 중 길¹⁾ 박 기 태²⁾ 권 성 준^{3)*}
Jung-Kil Ahn Ki-Tae Park Seung-Jun Kwon

Abstract

Steel fiber is a effective composite for crack resistance and improve structural performance under tensile loading. This study presents an evaluation of crack resistance and structural performance in cement mortar with steel fiber and expansion agent through internal chemical prestressing. For this work, cement mortar samples with 10% replacement of cement binder with CSA (Calcium-Sulfo-Aluminate) expansion agent and 1% volume ratio of steel fiber are prepared. Including basic mechanical properties, initial cracking load and fracture energy are evaluated in cement mortar beam with notch. Initial cracking load and fracture energy in cement mortar with CSA and steel fiber increase by 1.75 and 1.41~1.53 times compared with those in cement mortar with steel fiber. With optimum mix design for steel fiber and CSA expansive agent, the composite with chemical prestressing can be applied to various members and effectively improve crack resistance to external loading.

Keywords : Steel fiber, CSA expansion agent, Crack resistance, Initial cracking load, Fracture energy

1. 서 론

콘크리트는 우수한 압축강도를 가지지만 인장강도가 약하므로 인장영역에 보강재를 필요로 한다. 대표적인 보강재는 철근이며, RC (Reinforced Concrete) 콘크리트의 가장 대표적인 예라고 할 수 있다. 인장영역에서 변형이 증가할수록 발생하는 균열을 방지하기 위해 다양한 보강재가 혼입되는데, 강섬유 (Steel fiber)는 대표적인 보강재료로 많은 연구를 통해 역학적 장점들이 보고되었다 (ACI 1999; Adbar et al., 1997; Cho et al., 2012). 최근 들어 다양한 섬유재료가 토목 공사에 사용되고 있지만 여전히 강섬유는 경제성, 수급안정성, 연성확보 등의 장점을 가지고 있으므로 많이 사용되고 있다.

콘크리트는 외부 하중에 대하여 구조적인 원인에 의한 균열이 발생할 수 있지만, 재료적인 특성으로도 많은 균열이

발생한다. 대표적으로 수화열에 의한 균열 (Rhee et al., 2010), 건조수축에 의한 균열 (Song et al., 2001), 그리고 열화인자 유입에 의한 철근부식 팽창압력에 의한 균열 (Song et al., 2005) 등이 그 예이다.

재료적인 균열에 대한 저항성을 높이기 위하여, 건조수축 저감제나 팽창제와 같은 혼화재료의 사용도 콘크리트의 건전성 확보를 위하여 매우 효과적이다 (Yoo et al., 2012; Maltese et al., 2005). 팽창제는 일반적으로 추가적인 수화물을 형성하여 구체의 체적을 증가시킴으로 인장에 의한 균열을 보상하고 건조수축 저감제는 공극수의 표면장력을 감소시켜 균열을 저감하는 것으로 알려져있다 (Yoo et al., 2012).

높은 단위시멘트량을 가지는 고성능 콘크리트는 탈형후 체적수축으로 인해 균열이 발생되기 쉬운데, 적절한 팽창성 혼화재료의 혼입을 통해 균열발생에 대해 적극적으로 저항할 수 있다. 만일 구속된 부재에서 콘크리트가 팽창하게 될

1) 정회원, 한국철도공사
2) 정회원, 한국건설기술연구원
3) 정회원, 한남대학교 건설시스템공학과, 교신저자

* Corresponding author : jjuni98@hannam.ac.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2014년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

경우 내부에 매립되는 강재나 섬유 보강재는

반력으로 압축력을 가지게 되는데, 이는 화학적 프리스트레싱 (Chemical prestressing)의 기본 개념이라고 할 수 있다 (Park et al., 2001; Sahamitmongkol et al., 2002).

화학적 프리스트레싱에 의한 연구는 건조수축에 의한 균열 저항성 개선 (Han et al., 1998; 2001; Nagataki and Gomi, 1998), 인장경화 및 연화 특성 (Ahn et al., 2003; Ahn, 2003; Kim, 2003)과 같은 실내실험을 기본으로 한 연구 뿐 아니라, 현장적용성 평가와 같이 적극적으로 사용된 연구 (Cho et al., 1999)도 수행되었다. 그러나 대부분 매립된 강재에 대한 화학적 프리스트레싱이며, 강섬유와 팽창재가 동시에 시멘트 모르타르에 혼입되어 사용될 경우, 이에 대한 역학적 성능 및 균열 저항성에 대한 연구는 매우 제한적이다.

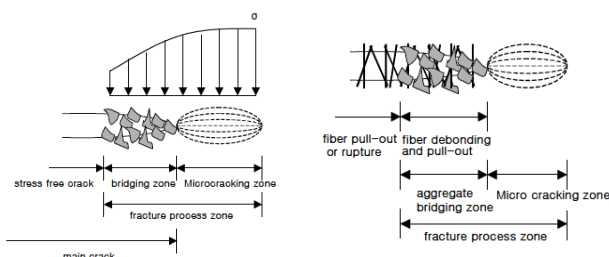
본 연구는 CSA (Calcium Sulfo Aluminate) 팽창재와 강섬유를 혼입한 시멘트 모르타르 부재에 대하여 기본적인 역학적 성능을 분석하고 노치를 가진 보 부재를 제작하여 균열 저항성 및 파괴에너지 평가를 수행하였다.

2. 강섬유 보강 콘크리트 및 CSA 팽창재의 특성

2.1 강섬유 보강 시멘트 매트릭스의 파괴 특성

콘크리트의 균열 선단에서의 파괴진행영역은 Fig. 1(a)과 같이 미소균열부분 (micro-cracking)과 Fig. 1(b)의 브리징부분 (bridging)으로 나눌 수 있다. 미소균열부분은 손상부이거나 공극의 확대, 골재와 시멘트 사이의 경계면에서 접착의 손실 등 미소 현상의 조합으로 파악할 수 있으며, 브리징부분은 균열면에서 골재나 섬유 보강재로 인하여 응력의 전달이 이루어지는 영역을 나타낸다. 파괴가 진행되는 동안 균열 선단의 파괴진행영역은 연화 상태에 있으며, 콘크리트의 파괴거동을 지배하게 된다 (Okamura and Maekawa, 1991).

강섬유 보강 콘크리트 경우는 보통 콘크리트와 균열 거동



(a) normal concrete (b) concrete with steel fiber

Fig. 1 Fracture progress in concrete (Ahn 2003)

에 있어서 상당한 차이가 있다. 콘크리트가 골재, 시멘트 페이스트의 경계면에서의 상대적인 강도에 의존하여 골재의 pull out, 파괴 등에 의해 응력이 전달되는 것과는 다르게 강섬유 보강 콘크리트의 경우는 콘크리트 내부에 분산되어 있는 강섬유가 pull out, 또는 파괴가 일어날 때까지 응력 전달의 역할을 수행하게 된다. 보통 강섬유 보강 콘크리트의 경우 임계 균열 열림 폭 (Critical cracking opening width)은 사용된 섬유 길이의 절반 정도에서 형성된다고 알려져 있다 (Ahn, 2003).

2.2 CSA 팽창재의 특성

일반 클링커는 4대 조성광물 (C_3A, C_2S, C_3A, C_4AF)을 가지게 되는데, $C_4A_3\bar{S}$ 계 클링커는 첨가되는 원료에 따라 알루미늄계 광물 ($C_4A_3\bar{S}, \beta C_2S - C_4A_3\bar{S}$)을 얻을 수 있다. 또한 수화물로는 칼슘 알루미늄 수화물 (CAH)과 칼슘실리케이트 수화물 (CSH)이 생성된다. $C_4A_3\bar{S}$ 계 클링커는 기존적인 화학조성이 $CaO-Al_2O_3-SO_3$ 로서, Al_2O_3 이 많으면 조강성, SO_3 이 많으면 고강도성, CaO 성분이 많으면 팽창성을 가지게 된다 (Kim, 2003). JIS A 6020에서는 물과 시멘트가 섞였을 때 수화반응에 의해 에트린자이트 또는 수산화칼슘을 생성하는 모르타르와 콘크리트를 팽창시키는 혼화재료로 정의하고 있다. 보통 K형, S형, M형과 석회계 팽창재 (O형)으로 분류하는데, 전자는 에트린자이트의 형성을 유도하고 후자는 산화칼슘을 주성분으로 수산화칼슘을 유도한다.

Fig. 2에서는 Nagataki (1998)의 CSA계 팽창재의 수화팽창과정을 나타내고 있다. 형성된 수산화칼슘은 $3CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot CaSO_4$

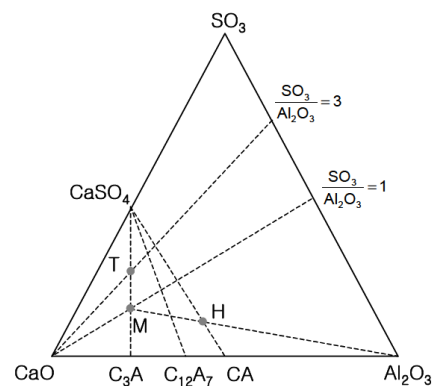
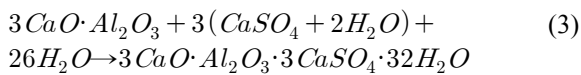
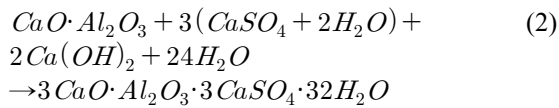
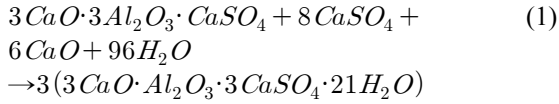


Fig. 2 Chemical compound of CSA expansion material (Nagataki and Gomi, 1988)

및 유리석고와 반응하여 침상의 에트린자이트를 생성하고 이것이 팽창의 주요인자가 된다. 식 (1)~식 (3)에서는 K형, S형, M형의 화학반응식을 나타내고 있으며, CSA 팽창제의 미케니즘에 대해서는 기존의 연구 (Kim et al., 2003; Han et al., 1998; 2011)에 잘 나타나 있다.



3. 실험계획 및 배합

3.1 배합

CSA 팽창제와 강섬유를 혼입한 시멘트 모르타르의 제조를 위하여 w/c (water to cement) 비는 0.4로 하였으며, CSA 팽창제 혼입은 시멘트 중량의 10%로 치환하였다. 강섬유는 전체 체적에 1.0%를 혼입하였는데, 기존의 연구에 의하면 0.5~1.5% 사이에서 최적의 강섬유 체적비가 결정된다고 알려져 있다 (Ahn, 2003; ACI 544, 1999). 또한 강섬유의 뭉침현상을 방지하기 위하여 펠라닌계 유동화제를 시멘트 중량 0.15% 첨가하였다.

Table 1에서는 CSA 팽창제의 화학성분을, Table 2에서는 강섬유의 물리적 성능 및 사진을 수록하였으며, 시편제조를 위한 시멘트 모르타르 배합은 Table 3에 나타내었다. 본 연구에서는 가장 일반적인 K형 CSA 팽창제가 사용되었다. Table 3에서 N은 보통 시멘트 모르타르를, S는 CSA 모르타르를, NSF는 보통모르타르와 강섬유를, SSF는 CSA 모르타르에 강섬유를 혼입한 배합을 나타낸다. 균열제어용으로 팽창제를 사용하는 경우는 큰 문제가 되지 않지만, 화학적 프리스트레싱을 위해 팽창제를 사용할 경우는 비교적 많은 양

Table 1 Chemical composition of CSA expansion admixture (Unit: %)

Ig.loss	Insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Sum	F-CaO
0.8	1.4	4.0	10.0	1.2	52.5	0.6	30.0	99.1	16.0

Table 2 Indent type steel fiber and shape

Type	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Aspect ratio (l/d)	Tensile strength (MPa)
Indent shape	30.00	0.50	0.40	59	1,065



[Shape of indent steel fiber]

Table 3 Mix proportions for cement mortar specimens

Types	W/ (C+E) (%)	E/ (E+C) (%)	Unit weight (kg/m ³)				
			W	C	E	S	F
N	40.0	0.0	356.0	891.0	0.0	891.0	0.0
S		10.0	356.4	801.9	89.1		0.0
NSF		0.0	356.0	891.0	0.0		78.5
SSF		10.0	356.4	801.9	89.1		78.5

이 투입되므로 과팽창에 의한 균열발생의 우려가 있다. 기존의 연구를 참조하여 10%의 시멘트 바인더량을 CSA 팽창제로 치환하여 배합을 조정하였다 (Park et al., 2001).

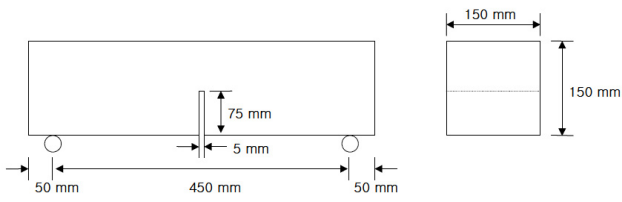
3.2 역학적 성능 실험

4가지 종류의 모르타르에 대한 역학적 성능을 평가하기 위해, 압축강도, 탄성계수, 포아송비가 측정되었다. KS F 2562 기준에 따라 압축강도 시험을 수행하였으며, KS F 2738에 따라 탄성계수와 포아송비가 측정되었다. 시험에 사용된 모든 원주형 공시체는 시험 수행 직전까지 양생온도를 20±2°C로 유지하였으며 양생포를 덮어 수분을 공급하였다. CSA 모르타르의 자유 및 구속 팽창률은 이미 기존의 시험결과 (Ahn et al., 2013)에서 알 수 있듯이 우수한 팽창특성을 가지고 있음을 확인하였다.

3.3 균열저항성 및 파괴에너지 실험

3.3.1 시편의 제원 및 제조

과괴특성 시험용 시편은 Table 3에서 제시한 4가지 배합 중 강섬유를 혼입한 배합 (NSF, SSF)에 대하여 5개의 시편을 제작하였다. 시편의 제원은 150×150×550mm이며 지간 길이를 450mm로 설정하였다. 노치 길이는 시편 높이의 1/2



(a) Geometry of cement mortar for fracture test



(b) Steel fiber of indent shape (c) Cement mortar mixing

Fig. 3 Sample geometry and mixing stage for the test

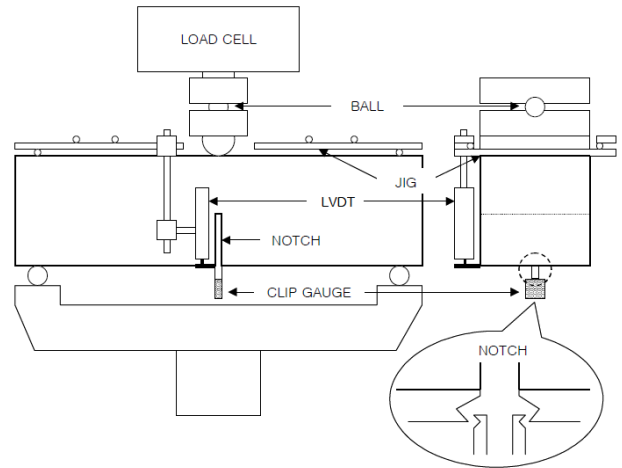
인 75mm로 하였으며 강섬유는 Table 2에서 언급한 indent shape 강섬유를 전체 제적비 1%로 혼입하였다. 재령 2일에 탈형하여 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 를 유지하면서 습윤양생을 실시하였으며 실험은 28일 양생후 수행하였다. Fig. 3에서는 시편의 채원과 강섬유 혼입시편 제조과정을 나타내고 있다.

3.3.2 파괴특성실험

강섬유 보강 CSA 모르타르의 파괴특성을 평가하기 위해 TC-992 방법에 따라 파괴실험을 수행하였다. 노치를 준 보 부재에 대해서 3점 휨 시험을 수행하였으며 하중 재하 단계에 따라 클립게이지를 이용하여 균열개구변위 (CMOD: Crack mouth opening displacement)를 측정하였다. 강섬유 보강이 이루어진 경우에는 변형량이 클 수 있으므로 LVDT를 통한 처짐도 같이 측정하였다. 재하 속도는 안정적인 파괴를 유도하기 위해 하중점의 처짐 속도가 0.06mm/min가 되도록 제어하였으며, 하중-균열폭 (Load-CMOD) 관계를 통해 인장특성 및 파괴에너지를 도출하였다. JCI 기준에서는 0.075~0.15mm/min을 제안하고 있으나 본 실험에서는 약간 낮은 재하속도로 평가하였다.

Fig. 4에서는 시험 상태 및 파괴후의 시편형태를 같이 도시하였다. 또한 TC-992 (Yoshinori and Yuichi, 2002) 기준을 참고하여 파괴에너지 (G_f)를 도출하였다. 파괴에너지 도출은 식 (4a, 4b)와 같으며 유효숫자 3자리까지 구한다.

$$G_f = \frac{0.75 W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (4a)$$



(a) Schematic diagram for fracture test



(b) Cement mortar sample after break up

Fig. 4 Fracture test setup and sample after break up

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) CMOD_c \quad (4b)$$

여기서 G_f 은 파괴에너지 (N/mm), W_0 및 W_1 는 공시체 파단까지의 하중-CMOD 곡선의 아래면적 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)와 공시체의 자중 및 재하제어장치가 하는 일 ($\text{N} \cdot \text{mm}$), A_{lig} 는 ligament의 면적 (mm^2), m_1 는 공시체의 질량 (N), S 는 재하스팬 (mm), L 은 공시체의 전길이 (mm), m_2 는 파단될 때까지 공시체에 부착된 제어장치의 중량 (N), $CMOD_c$ 는 파단시의 균열개구변위 (mm)를 나타낸다.

4. CSA 팽창재 및 강섬유를 혼입한 시멘트 모르타르의 균열저항성 및 파괴특성 평가

4.1 역학적 성능 평가

3.2절에서 언급한 기본적인 역학적 성능 (압축강도, 탄성

Table 4 Compressive strength in various mix conditions

Types	Without Steel Fiber (MPa)		With Steel Fiber (MPa)	
	N	S	NSF	SSF
1	49.4	49.5	51.9	53.7
2	52.4	49.7	53.5	60.3
3	52.7	48.2	55.5	59.5
Average	51.5	49.1	53.6	57.8

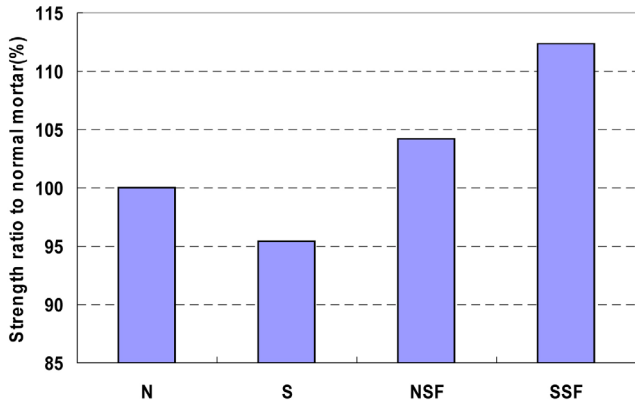


Fig. 5 Strength ratio to normal cement mortar

계수, 포아송비)에 대한 실험결과를 나타내었다. Table 4에서는 보통 모르타르와 섬유보강 모르타르의 압축강도를 나타내었으며, Fig. 5에서는 그 결과를 보통 모르타르에 대한 강도비로 나타내었다.

압축강도 결과에서 알 수 있듯이 CSA 모르타르의 경우 (S) 보통 모르타르에 비해 약간 강도감소가 발생하였는데, 이는 동일한 단위 결합재량을 가지지만, Table 3과 같이 단위 시멘트량의 차이가 발생하기 때문이다. 강섬유 혼입 콘크리트나 모르타르는 인장강도 증가에는 효과가 크지만 (Kim, 2003; Ahn et al., 2013), 압축강도에서는 큰 강도증진을 보이지 않으며 설계시 강도증가를 고려하지 않는다 (ACI, 1999). NSF에서 4.2%의 강도증가가 발생하였으나 CSA와 강섬유를 혼입한 SSF에서는 12.3%의 강도증가가 발생하였다. 이는 CSA 팽창제에 의한 효과를 내부의 강섬유가 효과적으로 구속하고 있으므로 강도증가가 발생한 것이라고 할 수 있는데, 큰 압축강도 증가를 기대하기는 어렵다고 판단된다. 탄성계수와 포아송비의 평균값 결과를 Table 5에 나타내었으며 보통모르타르에 대한 탄성계수 및 포아송비의 증감비를 Fig. 6에 나타내었다.

탄성계수는 NSF에서, 포아송비는 SSF에서 가장 크게 증가하였으나 10% 수준으로 역학적 성능의 큰 차이는 발견되지 않았다. 팽창제를 사용한 배합에서는 에트린자이트가 생

Table 5 Results of elasticity and Possion's ratio

Types	Without Steel Fiber (MPa)		With Steel Fiber (MPa)	
	N	S	NSF	SSF
Elasticity (MPa)	28,640	26,120	30,810	27,950
Possion's ratio	0.228	0.250	0.249	0.256

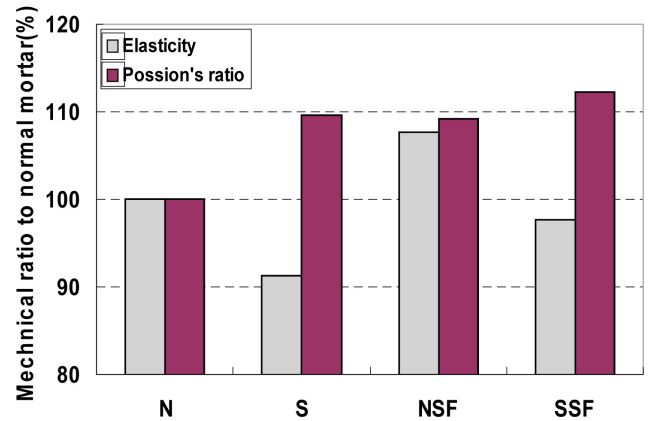


Fig. 6 Ratio of elasticity and Possion's ratio

성되므로 시멘트 수화에 의한 CSH 보다 강도가 낮게 되며, 이에 따라 약간 낮은 탄성계수가 평가되었다. 큰 차이는 아니지만 SSF 배합에서도 이러한 결과를 나타냈다.

4.2 균열저항성 및 파괴에너지 평가

4.2.1 파괴거동 및 균열저항성 평가

Fig. 7에서는 3점 휨 시험을 통해 강섬유로 보강된 보통 모르타르 휨 부재 (NSF) 및 CSA 팽창모르타르 휨 부재 (SSF)에 대하여 하중-처짐곡선 및 하중-균열개구변위 (CMOD)와의 관계를 도시하였다. 강섬유의 브리징효과로 인해 처짐량이 많이 증가하였으며, 팽창제가 혼입되었을 경우에는 초기 균열 하중이 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 내부에 철근을 매립하여 실험한 기존의 실험결과와 비슷한 경향을 나타내고 있는데 (Kim, 2003), SSF의 경우 강섬유에 대한 화학적 프리스트레싱 효과를 나타낸 것이다. 각 시편에 대한 결과 이외에 이상적으로 파괴가 관찰된 시편에 대하여 대표적인 파괴특성을 Fig. 8에 비교하였다. 이상적인 파괴는 Pre-peak에서는 균열발생으로 인한 강성변동이 크지 않고 Post-peak에서는 완만하게 하중-처짐-균열개구가 잘 나타나는 것을 의미한다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 NSF 모르타르에 비해 SSF 모르

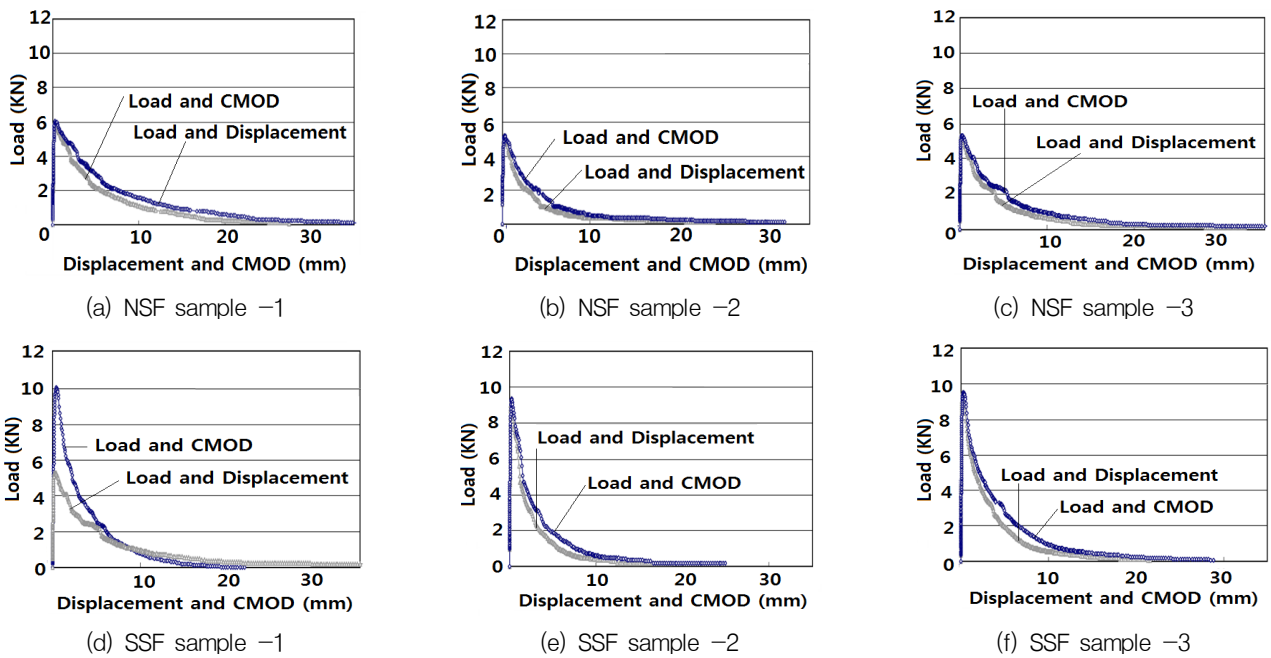


Fig. 7 Load-displacement and Load-CMOD for NSF and SSF

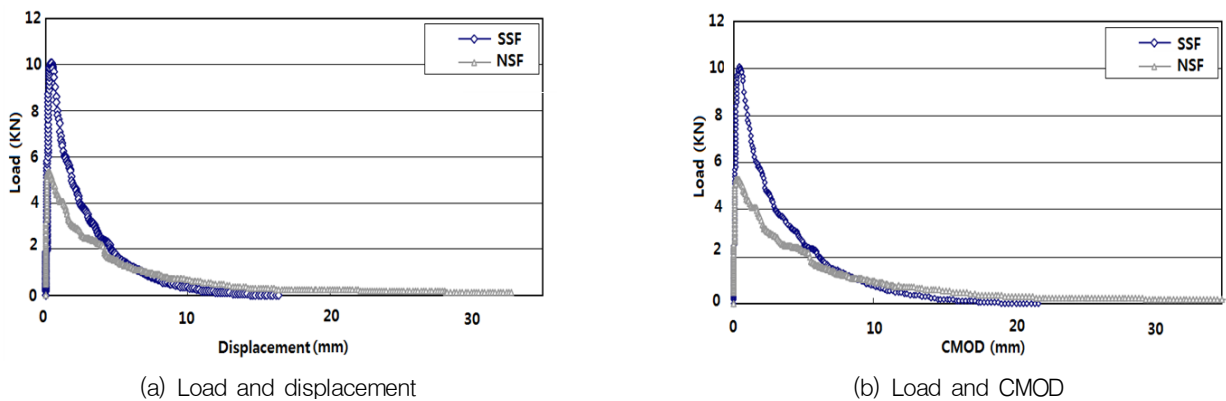


Fig. 8 Comparison of Load, displacement, and CMOD in NSF and SSF

타르에서 높은 휨저항 성능을 확인할 수 있다. 균열저항성을 평가하기 위해 초기균열 유발하중을 분석하였으며 그 결과를 Table 6과 같다.

CSA 팽창재와 강섬유를 혼입한 경우에서 팽창재를 혼입하지 않는 경우보다 1.75배의 초기균열하중 증가를 확인할 수 있었는데, 이는 팽창재 혼입에 따라 내부 강섬유의 화학적인 구속이 발생하여 휨인성이 증가한 것으로 판단된다. 직접적인 비교는 어렵지만, 기존의 연구에서는 (Kim, 2003) CSA 팽창재와 강섬유 혼입 콘크리트에 대해서 초기균열하중을 비교하였다. 강섬유를 혼입한 보통 콘크리트보다 강섬유 혼입 CSA 콘크리트에서 1.10~1.69배의 증가가 평가되었

Table 6 Initial cracking load of NSF and SSF

Types	Without CSA (KN)	With CSA (KN)
	NSF	SSF
1	5.99	10.10
2	5.21	9.37
3	5.31	9.50
Average	5.50	9.64

는데, 본 연구결과와 비슷한 경향을 나타내었다. 또한 기존의 연구에서는 1%의 강섬유 혼입보다 2%의 강섬유혼입이 CSA 팽창재를 사용한 경우 더욱 효과적임을 실험적으로 평가하였다.

Table 7 Fracture energy of NSF and SSF with varying notch depth

Types	Fracture energy in NSF (N/mm)		
	CMOD 3mm	CMOD 6mm	CMOD final
1	0.9518	1.5738	2.2527
2	0.7478	1.1158	2.0146
3	0.7655	1.2180	2.5494
Average	0.8217	1.3025	2.2722
Types	Fracture energy in SSF (N/mm)		
	CMOD 3mm	CMOD 6mm	CMOD final
1	1.3530	1.9986	2.7709
2	1.1600	1.6235	2.5469
3	1.2481	1.8999	3.1622
Average	1.2537	1.8407	2.8266

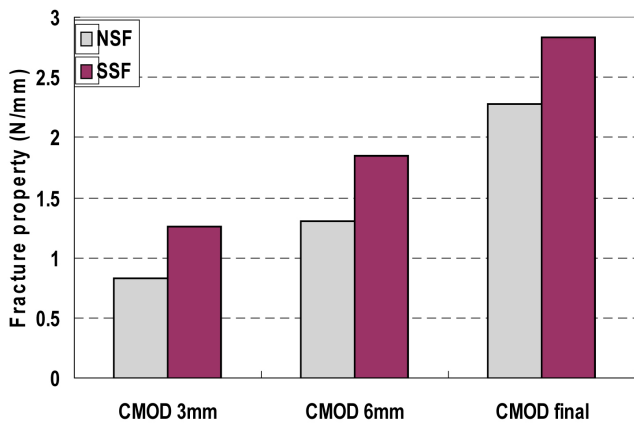


Fig. 9 Fracture energy in NSF and SSF with different notch depth

4.2.2 파괴에너지 평가

균열 발생 및 진전에는 파괴에너지가 소비되고 있으므로 파괴에너지의 비교를 통해 강섬유와 CSA 팽창재 사용 유무에 따른 균열저항능의 평가가 가능하다. 전술한대로 일본 콘크리트협회의 TC -992 기준에 의거하여 실험을 수행하였으며, 부재 높이를 D라고 할 때 CMOD가 0.02D (3mm), 0.04D (6mm), 그리고 파단시의 파괴에너지를 산출하였다. Table 7에서는 강섬유 보강 모르타르 (NSF)와 강섬유보강 CSA 모르타르 (SSF) 휨부재의 파괴에너지를 나타내었으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

SSF 모르타르에서는 NSF 모르타르에 비해 CMOD가 3mm 일 때에는 153%, 6mm일 때에는 141% 정도 크게 증가하였으며, 최종 파단시에는 124.4% 크게 평가되었다. 최종 파단시의 파괴에너지는 CMOD 3mm, 6mm에 비해서 약간 작게 평가되었는데, 좀 더 엄밀한 실험을 통하여 개선되리라 예상

된다. SSF 모르타르의 경우 화학적 프리스트레스의 작용으로 균열저항성이 뚜렷하게 향상되었는데, 이러한 chemical prestressing으로 인한 휨인성증가는 기존의 연구 (Ahn, 2003; Kim, 2003)에도 같은 경향을 보이고 있다.

5. 결론

CSA 팽창재를 혼입한 강섬유 보강 모르타르의 균열 저항 성능 평가를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 체적비 1%의 강섬유와 시멘트 바인더의 10% 중량을 CSA 팽창재로 치환하여 기존의 시멘트 모르타르와 균열저항성을 비교하였다. 압축강도 측정결과 NSF (강섬유 모르타르)에서는 보통 모르타르에 비하여 104.2%의 강도증가가 발생하였으나 SSF (강섬유+CSA)에서는 112.3%의 높은 압축강도가 평가되었다. SSF에서의 강도증가는 NSF와 비교시 큰 압축강도 증가는 없는 것으로 판단된다.
- (2) 강섬유를 혼입한 보통 모르타르보다 강섬유 혼입 CSA 콘크리트에서 1.75배의 초기 균열하중의 증가가 평가되었는데, 이는 화학적 프리스트레싱에 의한 강섬유의 브릿징효과가 크게 발현된 것으로 평가된다.
- (3) 파괴에너지 평가에서는 강섬유보강 CSA 모르타르에서는 강섬유보강 모르타르에 비해 CMOD가 3mm일 때에는 약 153%, 6mm일 때에는 약 141% 정도 크게 증가하였으며, 최종 파단시에는 124% 크게 평가되었다. 강섬유와 CSA 팽창재를 사용하는 것은 최대하중의 증가 뿐 아니라 초기 균열을 가진 콘크리트의 인성 증가에 매우 효과적임을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 (FRP Hybrid Bar를 활용한 해양항만구조물 수명향상 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. ACI Committee 544 (1999), Design Consideration for Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.4R.
2. Adebar, P., Mindess, S., St. Pierre, D., Olund, B.(1997), Shear tests of fiber concrete beams without stirrups, *ACI Structural Journal*, 94(1), 68-76.

3. Ahn, J. K. (2003), A Study on Evaluation of Crack Resistance in Chemically Prestressed Mortar, Master Thesis, Yonsei University (in Korean).
4. Ahn, J. K., Shim, B., Song, H. W., Byun, K. J. (2003), A study on fracture characteristics of chemically prestressed mortar, KCI Spring Conference, 15(1), 828-832 (in Korean).
5. Cho, C. G., Han, S. J., Kwon, M. H., Lim, C. K. (2012), Seismic performance evaluation of reinforced concrete columns by applying steel fiber-reinforced mortar at plastic hinge region, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 24(3), 241-248 (in Korean).
6. Cho, I. H., Yang, J. S., Kim, J. H. (1999), A field application of non-shrinkage high strength concrete using CSA expansive additives, *Proceedings of KCI*, 11(2), 77-80 (in Korean).
7. Han, C. G., Bahn, H. Y., Jun, B. C., Hong, S. H. (1998), A study on the properties of high performance concrete using CSA expansive additives, *Journal of Architecture Institute of Korea*, 14(11), 66-70 (in Korean).
8. Han, C. G., Han, M. C., Park, C. J. (2011), Study on the estimation of drying shrinkage of the concrete using CSA expansive additive based on regression analysis, *Journal of Architecture Institute of Korea*, 27(9), 109-116 (in Korean).
9. Kim, Y. K. (2003), A Study on Evaluation of Crack Resistance in Chemically Prestressed Steel Fiber Reinforced Concrete, Master Thesis, Yonsei University (in Korean).
10. Maltese, C., Pistolesi, C., Lolli, A., Bravo, A., Cerulli, T., Salvioni, D. (2005), Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars, *Cement and Concrete Research*, 35(2), 2244-2251.
11. Nagataki, S., Gomi, H. (1998), Expansive admixtures (mainly ettringite), *Cement and Concrete Composites*, 20(2-3), 163-170.
12. Okamura, H., Maekawa, K. (1991), *Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete*. Tokyo (Japan), Gihodo-Shuppan, 102-181.
13. Park, H. Y., Kim, C. Y., Choi, I. C., Bae, S. W., Ryu, J. H. (2001), Chemically prestressed precast concrete box culvert with expansive additives, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 13(1), 43-51.
14. Rhee, I. K., Kim, K. D., Kim, T. W., Lee, J. S. (2010), Heat of hydration and thermal crack control for floating concrete mass foundation, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 14(1), 156-164 (in Korean).
15. Sahamitmongkol, R., Tanaka, Y., and Kishi, T. (2002), Cracking Behaviors of chemical prestressed reinforced concrete members, JSCE Fourth International Summer Symposium, Kyoto, JAPAN, 5-13 (in Japanese).
16. Song, H. W., Cho, H. J., Park, S. S., Byun, K. J., Maekawa, K. (2001), Early-age cracking resistance evaluation of concrete structure, *Concrete Science and Engineering*, 3(1), 62-72.
17. Song, H. W., Kim, H. J., Kwon, S. J., Lee, C. H., Park, C. K. (2005), Prediction of service life in cracked reinforced concrete structures subjected to chloride attack and carbonation, 6th International Congress Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities, Dundee, Scotland, 5-7 July, Vol Cement Combinations for Durable Concrete, 767-776.
18. Yoo, S. W., Kwon, S. J., Jung, S. H. (2012), Analysis technique for autogenous shrinkage on high performance concrete with mineral and chemical admixtures, *Construction and Building Materials*, 34(9), 1-10.
19. Yoshinori, K., Yuichi, U. (2002), Test method for fracture property of concrete, *Concrete Journal*, 40(2), 8-15 (in Japanese).

Received : 10/08/2013
 Revised : 12/05/2013
 Accepted : 12/10/2013

요 지

강섬유는 콘크리트 부재의 인장영역에 효과적으로 작용하여 균열저항성을 높여주고 역학적 성능을 개선하는 것으로 알려져 있다. 본 연구는 팽창재를 사용한 강섬유 모르타르에 화학적 프리스트레싱을 인가하여 균열저항성 및 역학적 성능을 평가하는 연구이다. 이를 위해 시멘트 바인더의 10%를 치환한 CSA 팽창재가 사용되었으며 체적비 1%의 강섬유를 고려한 시멘트 모르타르 배합이 준비되었다. 기본적인 역학적인 성능평가 외에 노치를 가진 보를 제조하여 초기균열하중 및 파괴에너지를 평가하였다. 실험결과 강섬유와 CSA 팽창재를 혼입한 모르타르에서는 보통 강섬유 모르타르에 비하여 평균 1.75배의 균열저항성 하중이 증가하였으며, 파괴에너지 역시 1.41~1.53배 증가하였다. 최적의 강섬유 체적비와 팽창재의 혼입이 고려된다면 강섬유의 내부 화학적 프리스트레싱을 가진 복합재는 다양한 부재에 사용될 수 있으며, 외부하중에 효과적인 균열저감 기법으로 사용할 수 있다.

핵심 용어 : 강섬유, CSA 팽창재, 균열저항성, 초기 균열하중, 파괴에너지