

CSA 팽창재를 혼입한 철근보강 모르타르의 인장 경화-연화 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Tension-Hardening and Softening Characteristics in Reinforced Mortar with CSA Expansion Agent

최 세 진¹⁾
Se-Jin Choi

안 중 길²⁾
Jung-Kil Ahn

박 기 태³⁾
Ki-Tae Park

권 성 준^{4)*}
Seung-Jun Kwon

Abstract

Expansion agent is a very effective admixture for prevention of cracking due to autogenous/drying shrinkage and this can induce internal chemical prestress to embedded reinforcement. In this paper, tension-softening and hardening in cement mortar with steel and CSA expansion agent are experimentally evaluated. Cement mortar with steel reinforcement is prepared and tensile strength test is performed for evaluation of cracking and tensile behavior. In spite of slightly reduced strength and elasticity in CSA mortar, significantly increased tension-hardening behavior is evaluated in CSA mortar with induced chemical prestress. Furthermore previous tension softening models are compared with the test results and improvement are proposed.

Keywords : Tension-Hardening, Tension-Softening, CSA expansion agent, Crack, Initial cracking load

1. 서론

콘크리트는 압축강도는 우수하지만 압축강도의 1/8~1/12 수준의 낮은 인장강도를 가지고 있으므로 인장영역에서는 보강재를 필요로 한다. 대표적인 보강재는 철근이며 RC (Reinforced Concrete) 구조체를 건설하는 기본 요소가 된다. 최근들어 강섬유나 하이브리드 섬유 등이 콘크리트에 혼입되면서 인장성능을 개선하고 연성확보, 내진성능 개선 등 우수한 역학적 성능을 가진 복합체들이 등장하고 있다 (ACI 1999; Adebar et al., 1997; Cho et al., 2012; Kang and Ryu, 2011). 이러한 복합재의 혼입은 물리적인 보강효과를 가지게 되는데, 화학적 응력 (Chemical prestress)을 인가하여 콘크리트 부재에 인장성능을 보강할 수 있다. 대표적인 것이 팽창재 혼입을 통한 내부 철근의 구속력 증가이다. 이미 많은 문헌에서 Chemical prestressing에 대한 연구가 수행되었는데, 팽창재를 혼입한 콘크리트에서는 수축력을 보상하여 건조수축이나 자기수축 제어에 매우 효과적으로 알려져 있다 (Yoo et al.,

2012; Maltese et al., 2005). 또한 구속된 시편에서는 내부 철근이나 강섬유에 압축력을 도입하여 우수한 균열저항성을 나타낸다 (Park et al., 2001; Sahamitmongkol et al., 2002; Kim, 2003).

기존의 연구에서는 주로 팽창재 혼입 콘크리트에 대해 고품질 콘크리트의 제조 (Han et al., 1998), 건조수축 평가 (Han et al., 2011; Nagataki and Gomi, 1998)에 대한 연구와 실제 구조물 일부를 팽창 콘크리트로 제조하여 균열을 저감한 연구 (Cho et al., 1999)가 있다. 화학적 프리스트레싱에서도 일부 연구가 진행되어 강도개선과 휨저항성 증가에 대한 연구가 수행되었으나 (Sahamitmongkol et al., 2002; Kim, 2003), 팽창재를 혼입한 시멘트 모르타르의 인장경화 및 연화 모델에 대한 연구는 매우 제한적이다.

본 연구는 CSA (Calcium Sulfo-Aluminate) 팽창재 혼입에 따른 철근보강 모르타르의 기초적인 역학적 성능 평가, 균열저항성 평가, 그리고 철근보강 모르타르의 인장 연화-경

1) 정회원, (재)포항산업과학연구원, 강구조연구소
2) 정회원, 한국철도공사
3) 정회원, 한국건설기술연구원
4) 정회원, 한남대학교 건설시스템공학과, 교신저자

* Corresponding author : jjuni98@hannam.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2014년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

화특성을 분석하도록 한다.

2. 콘크리트의 인장연화-경화 특성

2.1 RC 콘크리트의 균열진전과 인장연화-경화특성

철근콘크리트 부재 내의 철근은 인장력을 받고 있으며 콘크리트에 다수의 균열이 발생한 경우, 콘크리트의 균열부에서는 모든 인장력이 철근에 의해 전달되지만 균열과 균열 사이에서는 부착에 의한 인장력이 철근에서 콘크리트로 전달된다. 이 결과 콘크리트가 철근의 인장강성을 증가시키는 역할을 하게 되는데 이를 인장경화라고 한다. Fig. 1은 일축인장부재에서의 인장경화-연화특성을 나타내고 있는데, 철근만 있는 경우와 비교하였을 때 철근콘크리트 부재의 강성이 더 크게 증가하는 것을 나타내고 있다. 철근과 콘크리트의 부착이 좋은 경우, 균열의 분산성은 커지지만 균열의 수는 콘크리트의 인장강도 등에 지배된다고 알려져 있다 (Okamura and Maekawa, 1991; Ahn, 2003).

Fig. 1(a)의 하중-평균변형률의 관계로부터, 콘크리트만의 인장응력-변형률 관계를 이끌어내면 Fig. 1(b)와 같은데 이는 콘크리트의 인장강도 이후, 응력이 감소하는 연화상태를 나타낸다. 이처럼 RC 부재에서 콘크리트의 응력만을 고려했을 경우 콘크리트의 강성이 저하되는 현상은 RC 부재에서의 인장연화특성과 아주 비슷하다. 미세관점에서 볼 때 RC 부재에서 철근 주위에 미세한 내부 균열이 다수 발생하고 있고, 이러한 균열의 발생 성장에 콘크리트의 파괴 에너지가 소비됐기 때문이라고 알려져 있다 (Shawky, 1994; Okamura and Maekawa, 1991).

평균응력-평균변형률 관계로부터 도출한 인장경화효과는 그 자체로서도 중요하지만, 균열이 발생한 철근콘크리트 부

재의 해석에 있어 인장경화특성을 고려하지 않으면 부재의 강성이 과소 평가되므로 실제거동과 상당한 차이를 보일 수 있다. 보다 정밀한 해석과 평가를 위해서는 인장경화특성의 고려가 매우 중요하며, 이러한 연구는 특히 내진분야에서 많이 활용되고 있다 (Nam et al., 2006).

2.2 팽창 콘크리트에서의 인장연화 특성

인장응력하에서의 콘크리트 인장연화모델은 균열 간격, 철근의 방향, 철근비와는 무관하다고 알려져 있고 평균변형률이 균열변형률에 도달하면 콘크리트의 응력은 인장연화를 고려하여 점진적으로 감소된다. 인장연화를 고려한 철근콘크리트 영역의 모델은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 (Okamura and Maekawa, 1991). 그러나 팽창재를 사용한 RC 부재에서는 화학적 프리스트레싱이 발생하므로 이를 고려해야 한다. Shawky (1994)에 의하면, 보통콘크리트와 같이 균열 발생시 변형률은 인장강도에 도달한 인장변형률의 2배의 값을 취하고, 균열 발생시 변형률 이후의 연화 영역을 식 (2)와 같이 모델링하였다.

$$\bar{f}_c = f_t \left(\frac{\epsilon_{tu}}{\epsilon_t} \right)^c \quad (1)$$

$$\bar{f}_c = f_t \left(\frac{\epsilon_{tu}}{\epsilon_t} \right)^\alpha, \quad \alpha = c + 1000 \frac{f_{cp}}{\rho E_s} \quad (2)$$

여기서, \bar{f}_c 는 콘크리트의 평균응력, f_t 는 콘크리트 인장강도, $\bar{\epsilon}_t$ 는 평균변형률, ϵ_{tu} 는 균열발생시 인장변형률, f_{cp} 는 화학적 프리스트레스 응력, ρ 는 철근비, E_s 는 철근의 탄성계수, α 는 감소율이다. c 는 부착응력을 나타내는 계수로서 이형철근시 0.4, 원형철근시 0.2를 나타낸다.

팽창 콘크리트의 인장연화의 감소정도는 팽창 변형률의 함수로 이루어져 있으며 내부 프리스트레싱 있는 경우, 보통 콘크리트보다 연화가 크게 발생하는데, 그 이유로 두가지를 제시하고 있다. 하나는 모델식에 있어서는 프리스트레싱에 의해 인장강도가 커지므로 인위적으로 파괴 에너지를 작게 할 필요가 있기 때문이고, 나머지는 재하에 의해 철근의 구속이 해방되었을 때에 콘크리트가 일부 팽창하기 때문이다 (Ahn, 2003; Shawky, 1994).

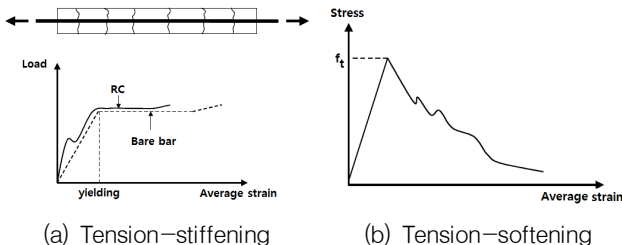
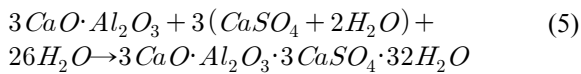
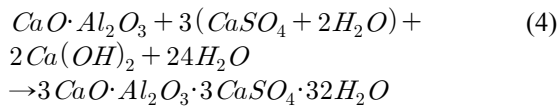
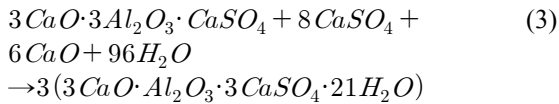


Fig. 1 Tension-Stiffening and Softening in RC member (Okamura and Maekawa, 1991)

3. 실험계획 및 역학적 특성

3.1 CSA계 팽창재의 특성

CSA 팽창재의 원인은 여러 가지 주장이 있으나, 일반적으로 에트링가이트의 침상결정이 성장될 때에 동반되는 성장압에 의하여 수화물 사이를 밀쳐내는 힘에 의해 팽창이 일어난다는 설명이 지배적이다 (Andac and Glasser, 1994). $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$ 계 팽창재 (K형, S형, M형, O형)가 주로 사용되는데, O형은 수산화칼슘 반응이므로 생략하였다. K형, S형, M형에 대한 수화반응식은 식 (3)~식 (5)과 같으며, 팽창재의 팽창기구는 Fig. 2에 나타내었다.



3.2 실험 배합

본 실험에서는 w/c (water to cement ratio)를 0.4로 하였으며, 팽창재 혼입량은 시멘트 중량의 10%로 하였으며, 펄라닌계 유동화제를 시멘트 중량의 0.15% 첨가하여 시편을 제조하였다. CSA 팽창재의 경우 수축 및 균열저감용으로는

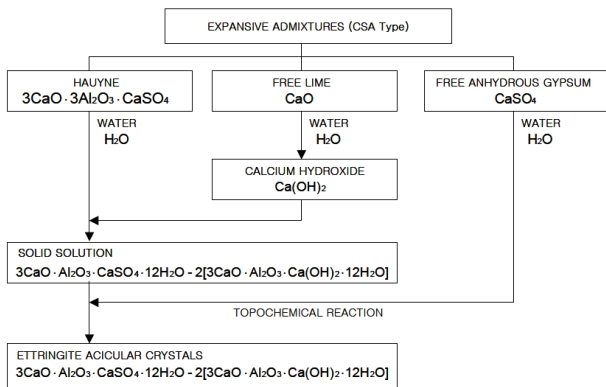


Fig. 2 Expansion mechanism of CSA expansive admixture (Andac and Glasser, 1994)

큰 분량이 필요하지 않으므로 바인더 치환을 하지 않는다. 그러나 혼화재료로서 화학적 프리스트레싱을 위해서는 상당한 량을 시멘트 치환으로 사용하는데, 시멘트량에 추가적으로 많은 팽창재가 혼입될 경우 과팽창에 의한 균열이 발생하기 때문이다. 기존의 연구 (Kim, 2003; Ahn, 2003; Park et al., 2001; Ahn et al., 2003)에서도 시멘트 치환을 통하여 화학적 프리스트레싱을 유도하고 있다. 본 연구에서는 K-Type의 CSA 팽창재가 사용되었는데, Table 1에서는 시멘트 모르타르의 배합표를, Table 2에서는 CSA 팽창재의 화학성분을 나타내었다. Table 1에서 N은 보통 시멘트 모르타르를, NE는 CSA 시멘트 모르타르를 나타낸다.

3.3 CSA 모르타르의 기본물성 시험 및 파괴특성 시험

3.3.1 기본 물성평가 및 팽창 특성시험

(1) 압축강도 및 탄성계수

KS F 2562와 JIS A 6202의 기준을 따라 압축강도 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 모든 공시체는 시험 수행 직전까지 양생온도를 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지하였으며 제작된 공시체는 양생포를 덮어서 건조 상태를 방지하는 방법으로 양생을 하였다. 또한 탄성계수는 KS F 2438 방법에 의거하여 시험을 수행하였다. Fig. 3에서는 압축강도 시험상태와 공시체

Table 1 Mix proportions for concrete specimens

Types	W/(C+E) (%)	E/(E+C) (%)	Unit weight (kg/m^3)			
			W	C	E	S
N	40	0.0	356.0	891.0	0.0	891.0
NE		10	356.4	801.9	89.1	

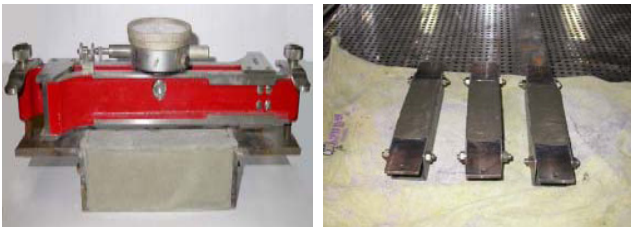
Table 2 Chemical composition of CSA expansion admixture (Unit: %)

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



(a) Specimens for test (b) Compressive strength test

Fig. 3 Compressive strength and setup for test



(a) Whitmore gauge measurement

(b) Restrained specimen

Fig. 4 Whitmore gauge for restrained specimen

물드를 나타내고 있다.

(2) 자유팽창률 및 구속팽창률 시험

자유팽창률 측정을 위해 75×100×410mm의 크기의 공시체를 제작하였다. 보통 시멘트 모르타르와 CSA 모르타르의 경우를 비교하기 위해 공시체를 각각 3개씩 제작하였고 재령 2일째에 탈형하였다. 20±2℃의 양생온도를 유지하면서 매립형 게이지를 사용하여 재령에 따른 팽창률을 측정하였다.

Fig. 4에서는 휘트모어 게이지를 이용한 구속 팽창률 시험용 공시체와 양생과정을 나타내고 있다.

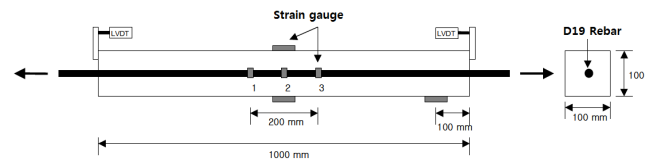
구속팽창률 측정을 위해 KS F 2562의 시험규정에 따라 구속기구를 이용하여 공시체를 제작하였고, 20±2℃의 양생온도와 60±2%의 습도를 유지시키면서 휘트모어 게이지를 이용하여 팽창률을 측정하였다.

3.3.2 화학적 프리스트레싱 및 인장경화특성 시험

(1) 시험시편 제조 및 준비

Fig. 5에서는 인장경화-연화시험에 사용된 시편을 나타내었는데 100×100×1000mm의 모르타르 단면 중앙을 D19의 이형철근이 관통하고 있는 시편이다. 시편은 Table 1의 배합에 따라 보통모르타르 부재 5개, CSA 모르타르 부재 5개를 제작하였고, 재령 2일째에 탈형하여 양생온도는 20±2℃를 유지하면서 재령 28일 전까지 수중 양생하였다. 인장시험시 시편의 양 단부에 LVDT를 설치하여 길이변화를 측정하고 평균변형률을 산출하였다. 또한 시편 중앙부의 철근에는 중앙 200mm 구간에 100mm 간격으로 게이지를 부착하여 양생재령에 따른 팽창 변형률을 측정하였고, 모르타르의 팽창을 내부의 철근이 구속함으로써 콘크리트에 도입되는 화학적 프리스트레싱을 추정하였다.

Fig. 5에서는 공시체의 시험형상과 일축인장부재의 양생을 나타내고 있다.



(a) Geometry of Reinforced mortar



(b) Curing condition

Fig. 5 Geometry and curing condition of reinforced mortar

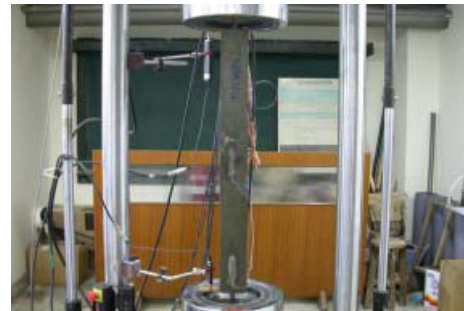


Fig. 6 Test setup for 1-D tensile test

(2) 화학적 프리스트레싱 평가 및 일축인장시험

타설 후부터 시험 직전까지 철근에 부착된 게이지를 통해 팽창변형률을 측정하여 부재에 도입되는 화학적 프리스트레싱을 추정하였다. 또한 재령 28일째에 일축인장시험을 수행, 응력-변형률 관계를 통해 인장경화특성을 도출하였다. 시험장비로는 변위제어가 가능하며 500KN의 하중재하능력과 75mm의 최대 변위량을 가지고 있는 Instron-1333을 사용하였다. Fig. 6에서는 일축인장시험 모습을 나타내고 있다.

4. 철근에 구속된 CSA 모르타르의 인장경화시험

4.1 CSA 팽창 모르타르의 역학적 성능평가

4.1.1 자유 및 구속팽창률

Fig. 7 및 Fig. 8에서는 재령에 따른 보통 모르타르와 CSA 팽창모르타르의 자유팽창률과 구속 팽창률 측정결과를 나타내고 있다. Fig. 7에서 보통모르타르를 사용하였을 경우에는

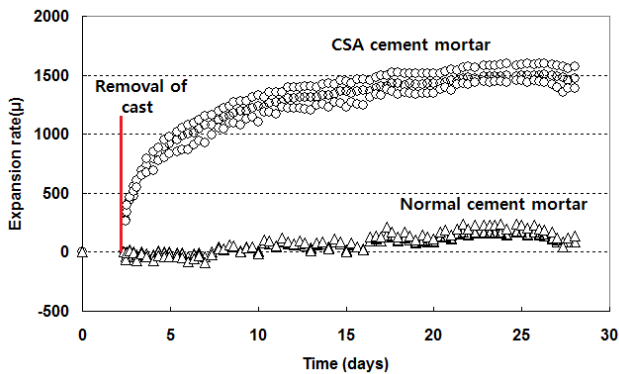


Fig. 7 Free expansion rate in cement mortar with/without CSA

길이변화에 있어서는 약간의 수축변형이 측정되었다. 그러나 CSA 팽창모르타르의 경우 재령 2일째 탈형 후에 구속이 이루어지지 않은 상태에서부터 지속적인 팽창재의 효과로 인하여 재령에 따라 변형률의 증가가 평가되었다. 육안상 과팽창에 의한 팽창균열은 관찰되지 않았고, 재령 7일까지 매우 활발하게 팽창률이 증가하고 있으며 이후로는 완만하게 증가하였다. 이와 같은 체적 팽창은 철근이나 섬유보강 등의 다양한 내적 구속조건을 통해 매트릭스에 화학적 프리스트레스에 의한 압축력을 인가할 수 있다.

Fig. 8에서는 시편 내부의 구속철근과 외부의 구속판에 의해서 팽창이 구속되고 있음에도 팽창효과가 나타나고 있음을 확인할 수 있으며 재령 7일 이전까지는 꾸준히 팽창을 하지만 그 이후로는 팽창효과가 감소하고 있다. 규정 (KS F 2562)에 의하면 재령 7일에서의 팽창성은 300μ 이상, 28일에서는 -200μ 이상이 되어야 한다고 규정되어 있는데, 본 실험에서는 두 조건을 모두 만족하였다.

4.1.2 압축강도 및 탄성계수

본 절에서는 압축강도 및 탄성계수 실험결과를 나타내고 있다. Table 3에서는 역학적 특성 실험결과를 요약하였으며 Fig. 9에 나타내었다. 압축강도는 CSA를 넣은 경우 5%정도 감소하였으며, 탄성계수는 8% 정도 감소하였다. 실험시 사

Table 3 Mechanical properties in cement mortar with/without CSA

Types	Compressive strength (MPa)		Elasticity (MPa)	
	N	NE	N	NE
1	49.4	49.5	30,351	26,345
2	52.4	49.7	28,736	25,870
3	52.7	48.2	26,810	26,131
Average	51.5	49.2	28,632	26,115

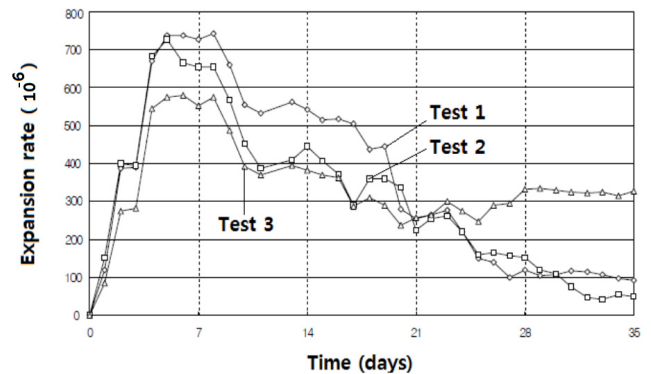


Fig. 8 Restrained expansion rate in cement mortar with CSA

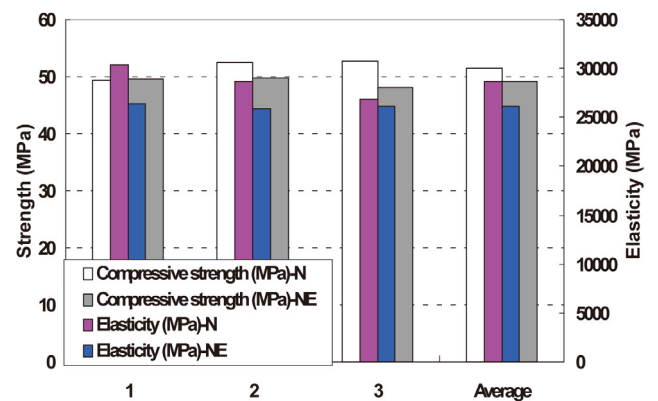


Fig. 9 Results of mechanical properties in CSA cement mortar

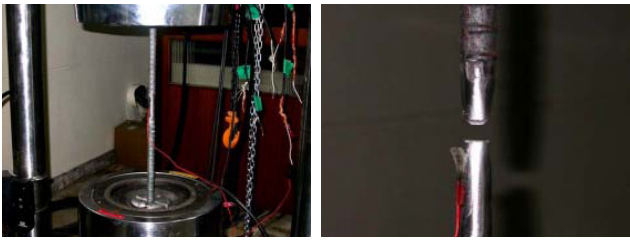
용한 배합표에서 시멘트의 중량이 N경우보다 NE에서 10% 정도 감소하였으므로 역학적인 성능이 약간 감소하였다. 기존의 시험결과에서는 CSA를 첨가하여 압축보다 인장에서 더욱 효과적임을 실험적으로 나타내었다 (Kim, 2003).

4.2 인장경화연화 특성 평가 및 분석

4.2.1 철근의 인장시험

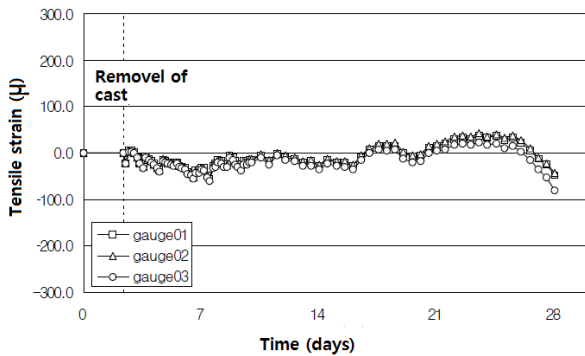
보강 모르타르의 인장경화거동에서 모르타르만의 응력분포를 알기위해 철근만의 인장시험을 수행하였다. SD30의 D19 철근으로 일축인장시험 수행시 필요한 철근의 탄성계수, 철근 항복변형률 및 항복응력이 평가되었다. 철근 시편 3개로 인장시험을 수행하였으며, 철근의 파단이 일어날 때까지 인장력을 가한 후 응력-변형률 곡선을 통해 철근의 탄성계수, 항복응력 및 항복변형률을 산출하였다. 철근의 항복응력 산출에는 0.2% offset 방법이 사용되었으며, Fig. 10에서는 실험 사진을 나타내었다.

3개의 강제 시편에 대해 평균 항복변형률은 0.002, 항복응

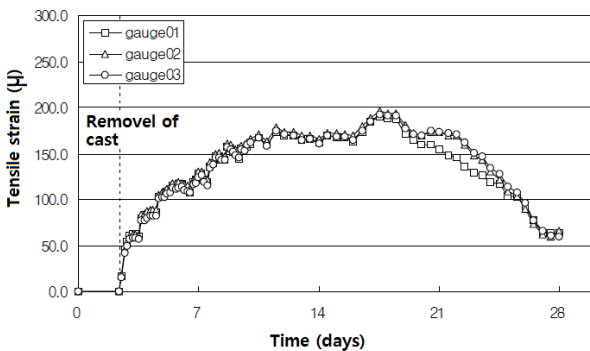


(a) Test setup of tensile test (b) break up of steel

Fig. 10 Tensile test for stress-strain relation of steel



(a) Tensile strain of steel in cement mortar without CSA



(b) Tensile strain of steel in cement mortar without CSA

Fig. 11 Tensile behavior of steel embedded in cement mortar

력은 415.5MPa, 탄성계수는 203,000MPa로 평가되었다. 항복응력은 408.0~426.3MPa 수준으로 비교적 작은 편차를 나타내었다.

4.2.2 일축인장시험 부재의 재령에 따른 변형률 평가

본 절에서는 보통 모르타르 5개와 CSA 모르타르 5개에 매립된 철근의 변형률을 평가하였다. 5개 시편중 대표적인 재령-변형률 그림을 Fig. 11에 도시하였으며, 5개 부재에 대한 철근의 팽창률을 Table 4에 요약하였다. 한편 CSA 모르타르는 보통 모르타르에 비해 10% 바인더량을 CSA 팽창제로 치환한 것이다.

Table 4 Final strains in embedded steel (μ : at 28 days)

Member		1	2	3	4	5
N	1	-96	-172	-47	-127	-196
	2	103	-72	-43	-90	-111
	3	-223	-187	-81	-73	-170
	Average	-72	-144	-57	-97	-159
NE	1	34	40	124	63	125
	2	53	77	21	66	70
	3	24	89	55	59	47
	Average	37	69	67	63	81

보통 모르타르로 제작된 부재의 경우, 내부 철근의 변형률이 음(-)의 값으로 떨어지고 있는데, 이는 초기 수화에 의한 팽창 이후 시멘트 페이스트의 수축작용에 의한 것이다. 그러나 CSA 모르타르로 제작된 부재에서는 철근에 의한 마찰에 의해 축방향의 변형이 구속되고 있음에도 불구하고 초기재령에서 팽창효과가 지속적으로 나타나고 있다. 재령 15~22일 사이에 최대 변형률이 발생하였으며, 이후에 변형률이 감소하였다. 28일 재령후 보통모르타르 부재의 경우와는 다르게 인장(+)에서 변형률이 잔존하고 있었으며, 상응하는 압축력이 모르타르부에 도입되고 있다고 할 수 있다. 28일 경과 후 보통 모르타르에서는 -57~-159의 압축변형률이, CSA 모르타르에서는 37~81의 인장변형률 (μ)이 측정되었다.

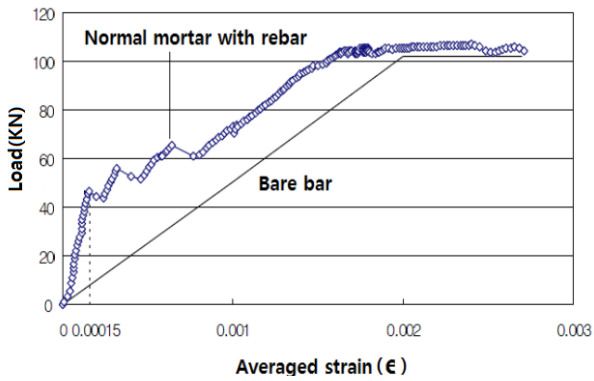
4.2.3 보통 및 CSA 모르타르의 인장경화효과 평가

화학적 프리스트레싱 응력은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

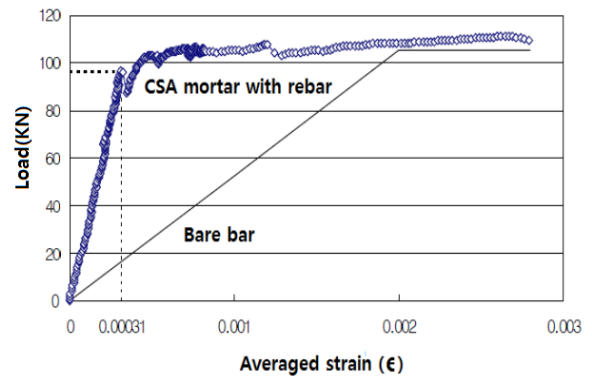
$$f_{cp} = \epsilon_s E_s \frac{A_s}{A_c} \quad (6)$$

여기서, f_{cp} 는 화학적 프리스트레싱에 의한 도입응력 (MPa), ϵ_s 는 철근의 변형률, A_s 및 A_c 는 철근 및 콘크리트의 단면적 (mm^2)을 나타낸다. 측정된 보통 모르타르 철근의 평균 변형률은 -106μ 이며, CSA 모르타르 철근의 평균변형률은 $+63\mu$ 이므로 변형률 차이는 169μ 이다. 이 값을 식 (6)에 고려하고 철근 및 모르타르 면적비 (0.028)를 고려하면 f_{cp} 은 대략 1.0MP로 도출할 수 있다.

일축인장시험에서 불완전한 local failure를 제외한 시편은 3개였으며 그중 보통 모르타르와 CSA 모르타르 일축인장시험의 대표적인 결과를 Fig. 12에 도시하였다. 또한 시멘트 모르타르에서 저항하는 응력-변형률관계를 Fig. 13에 나타내었다.

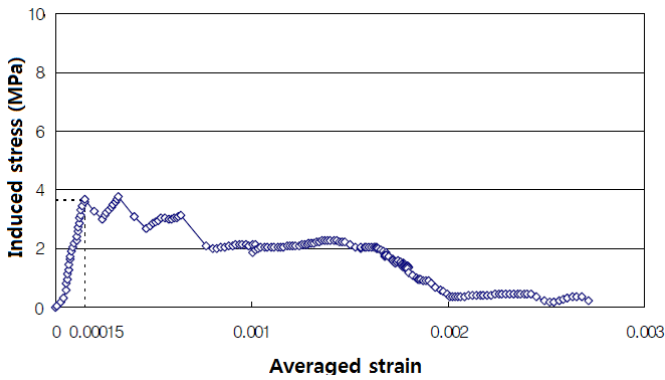


(a) Tension hardening in normal mortar with steel

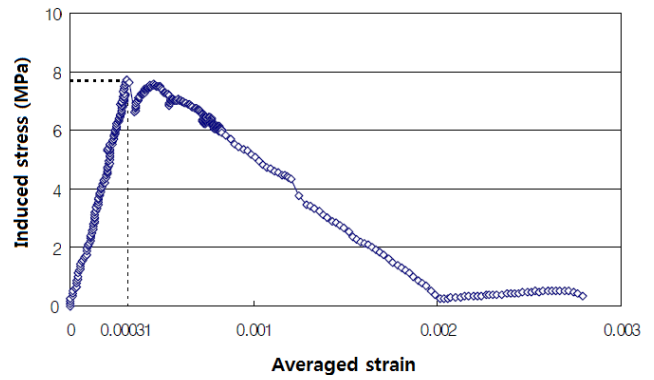


(b) Tension hardening in CSA mortar with steel

Fig. 12 Tension hardening in different cement mortar with steel



(a) Induced stress in normal cement mortar



(b) Induced stress in CSA cement mortar

Fig. 13 Induced stress in the different mortar

Fig. 12(a)에서 알 수 있듯이 균열 발생 이후에 균열이 발생한 부분 (점선표시)에서는 모르타르부가 더 이상 인장력에 저항할 수 없음에도 불구하고, 모르타르와 철근의 부착 효과에 의해 모르타르가 철근으로부터 전달되는 인장력을 어느 정도 부담하여 인장경화효과가 나타나고 있다. 균열이 발생하기 전까지는 탄성적인 거동을 보이고 있으나 균열이 발생한 이후에는 하중이 점차로 증가함에 따라 철근의 거동에 가까워지는 것을 관찰할 수 있다. 초기 균열 발생 이후에도 몇 번의 추가적인 균열이 발생하고 있으며 그 때마다 하중의 부분적인 저하를 볼 수 있다.

Fig. 12(b)의 팽창모르타르 부재에 있어서도 보통모르타르 부재와 비슷한 거동을 보이고 있지만, Fig. 12(a)와 비교하였을 때 초기균열을 유발하는 하중이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 보통모르타르 부재에서와 다르게 철근의 항복에 이를 때까지 초기 균열이 발생한 이후에 추가적인 균열 발생에 의한 하중의 급격한 저하 현상을 거의 발견할 수 없었다. 이는 CSA 모르타르 부재의 역학적 우수성을 나타낸

것으로 초기균열 이후에도 건전성이 우수하게 확보되고 있음을 의미한다.

Fig. 12의 결과에서 철근만의 변형률을 제거하면 모르타르만이 부담하는 응력-평균변형률 관계를 Fig. 13과 같이 도출할 수 있다. Fig. 13(b)와 같이 CSA 모르타르 부재의 경우 초기균열 발생시 저항응력이 크게 증가하였다. 철근으로 내부 구속이 이루어진 모르타르 부재의 경우 팽창재를 사용하게 되면 화학적 프리스트레스가 도입되어 그만큼 초기 균열에 저항하는 응력이 크게 작용하고 있으며, 이후에 추가적인 균열 발생이 억제되고 있음을 알 수 있다. Table 5에서는 초

Table 5 Induced stress of the different cement mortar (MPa)

Type	N	NE
1	3.692	7.741
2	5.801	8.389
3	5.067	8.354
Average	4.856	8.161

Table 6 Initial cracking load for pure mortar with steel (KN)

Type	N		NE	
	Mortar	Mortar with steel	Mortar	Mortar with steel
1	46.7	39.1	96.7	80.5
2	71.2	59.5	97.0	86.0
3	62.9	52.0	103.0	85.7
Average	60.3	50.2	98.8	84.1

기균열 발생시 모르타르 최대응력을 비교하였다.

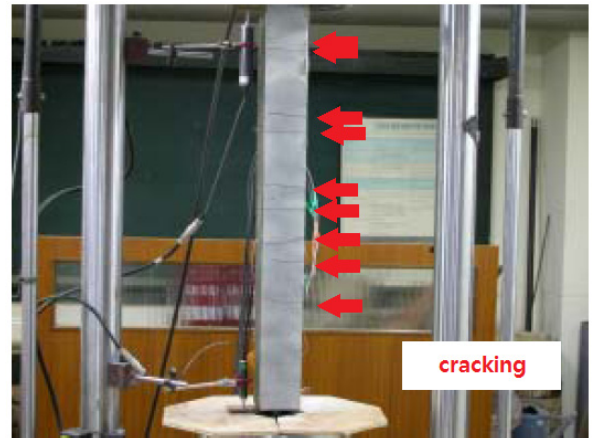
시험 결과 CSA 모르타르 부재가 보통 모르타르 부재에 비해 초기균열 발생시 응력이 2.5MPa~4.0MPa 정도 증가하였다. 이상적으로 마찰이 전혀 없는 조건에서 식 (6)의 이론과 기계적 실험을 통하여 마찰을 가지게 되는 실험결과와는 차이가 발생한다. 만일 CSA 팽창량이 시편의 길이방향으로 일정하고 직접인장시험에서 철근의 인장변형이 전구간에서 일정하다면 실험을 이용한 이론값의 검증은 합리적인 결과를 가져올 수 있을 것이다. 식 (6)을 이용하여 도출된 1.0MPa과는 비교적 큰 차이가 있는데 다음과 같은 원인을 추론할 수 있다.

① 인장시 작용하는 철근과 기계 지그와의 슬립 및 변형률의 측정방법에 있어 장치 문제, ② 팽창모르타르 자체의 재료적인 특성, ③ 미세균열이 진전할 때, 철근과 모르타르의 완전한 일체가 되지 못하는 점 등으로 요약할 수 있다. 그러나 도입된 화학적 프리스트레스로 인하여 초기 균열을 유발하는 하중이 커지고 이후 추가 균열 발생이 억제되는 등 역학적 성능이 개선됨을 확인하였다.

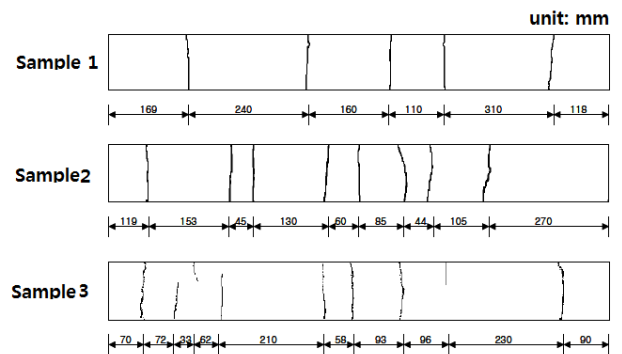
보강 모르타르 부재의 초기균열 발생하중과 모르타르에 인가되는 하중은 Table 6에 나타내었으며, 각각의 균열패턴을 Fig. 14에 도시하였다. CSA 모르타르 부재에서 평균 167.5%의 초기균열 하중의 증가를 확인할 수 있었으며, Fig. 14에서는 초기 균열이후에도 추가균열의 발생이 거의 없음을 알 수 있다.

4.2.4 CSA 인장경화 함수의 비교

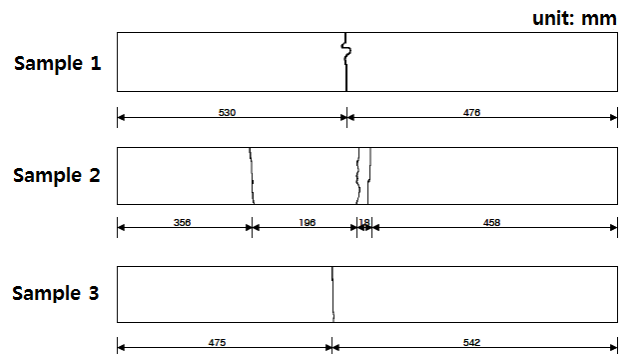
3장에서는 Okamura and Maekawa (1991)의 보통콘크리트의 인장경화모델과 Shawky (1994)의 팽창콘크리트의 인장경화모델을 언급하였다. Shawky 모델에서 필요한 화학적 프리스트레싱 응력 (f_{cp})는 팽창률 측정을 통해 도출한 1.0MPa (식 (6))과 일축인장시험에서 평균으로 계산된 3.3MPa (Table 6)을 각각 부재에 도입된 화학적 프리스트레스로 고려하여 해석을 수행하였다. 식 (2)의 f_{cp} 가 1.0MPa일 때 α 는 0.572, 3.3MPa일 때는 0.967로 도출되었으며, 이 값들을 이용한 해



(a) Cracks in normal mortar with rebar



(b) Crack pattern at average strain of 0.0027 (normal mortar with rebar)



(c) Crack pattern at average strain of 0.0027 (CSA mortar with rebar)

Fig. 14 Crack patterns in the different cement mortar

석결과는 Fig. 15에 나타내었다.

Fig. 15에서 두가지 식이 전반적으로 실험결과를 잘 반영하고 있으나, α 가 0.572일 경우 (f_{cp} : 1.0MPa)인 경우 인장연화 초기 영역에서 더욱 정확함을 알 수 있다. 또한 CSA 모르타르 부재는 화학적 프리스트레스의 도입으로 인하여 초기 균열을 유발하는 인장응력이 보통모르타르 부재의 경

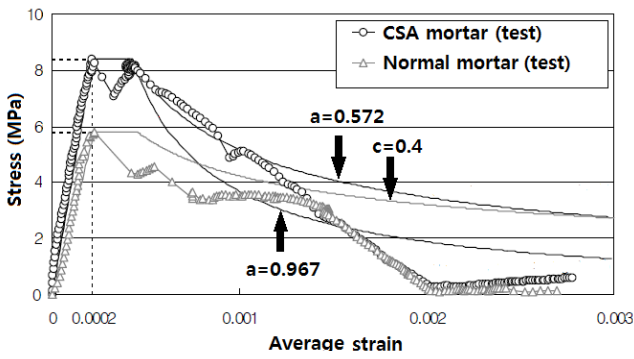


Fig. 15 Comparison of tension-hardening with previous models

우보다 크게 작용하고, 초기균열 발생 이후에 추가적인 균열 발생에 의한 응력의 급격한 저하 현상이 발견되지 않는다는 것을 알 수 있다. 보통 모르타르 부재에서 C 를 0.4를 사용했을 경우 실험값과는 약간 차이가 발생하였는데, 콘크리트를 대상으로 하지 않고 시멘트 모르타르를 대상으로 한 것에 기인한 것으로 판단된다.

CSA 모르타르 부재를 대상으로 실험 결과를 이용하여 α 를 0.572에서 0.967로 증가시킬 경우 일반 모르타르 부재보다 낮은 인장연화곡선이 도출되었다. 기존의 이론과는 다른 거동을 보이는 데 (Myoju et al., 2001), 이는 추가적인 실험을 통하여 기존 모델의 개선이 필요하다고 판단된다.

5. 결론

CSA 팽창재를 혼입한 철근보강 모르타르의 인장 경화-연화 특성에 관한 실험적 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 구속이 없는 조건에서 CSA 모르타르의 팽창률은 1400~1600 μ 수준을 가졌으며 보통 시멘트 모르타르는 0~200 μ 수준의 변형률을 나타내었다. 또한 CSA 모르타르에 매립된 철근의 평균변형률은 28일 양생 후 63 μ 을, 보통 모르타르에서는 -106 μ 를 나타내었는데, 이는 이론상 1.0MPa 정도의 화학적 프리스트레싱을 내부 철근에 인가한 것으로 계산되었다.
- (2) 철근을 가진 CSA 모르타르와 보통 모르타르 부재에 1축 인장시험을 수행하여, 모르타르만이 저항하는 응력을 계산하였다. 2.5~4.0MPa 수준으로 CSA 모르타르에서 응력이 증가하였으며, 보 시편에 대해서는 평균 168%의 초기균열 하중의 증가를 나타내었다. CSA를 혼입한 모르타르 부재에서는 초기균열의 저항성 이외

에 변형의 증가에 따른 추가균열이 현저히 감소하는 것을 확인하였다.

- (3) 기존 팽창재를 혼입한 콘크리트의 인장연화모델에서는 화학적 프리스트레싱이 증가할수록 인장연화가 크게 발생하지만, 실험결과와는 다른 결과를 보이고 있었다. 추가적인 연구를 통하여 화학적 프리스트레싱을 받는 부재의 인장연화곡선에 대한 개선이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

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

References

1. ACI Committee 544 (1999), Design Consideration for Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.4R.
2. Adebare, 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, 58-72 (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. Andac, O., Glasser, F. P. (1994), Polymorphism of Calcium Sulfoaluminate ($\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{16} \cdot \text{O}_3$) and its solid solution, *Advances in Cement Research*, 22(6), 57-60.
6. 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).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. Kang, S. T., Ryu, G. S. (2011), 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*, 23(1), 67-75 (in Korean).
11. Kim, Y. K. (2003), A Study on Evaluation of Crack Resistance in Chemically Prestressed Steel Fiber Reinforced Concrete, Master Thesis, Yonsei University (in Korean).
 12. 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.
 13. Myoju, F., Xiao, H., Toshiharu, S. (2001), Effect of Multi-Axial Restraint against Cracking Resistance in Bending Member of Expansive Concrete, *Proceeding of Japan Concrete Institute*, 23(3), 589-594.
 14. Nagataki, S., Gomi, H. (1998), Expansive admixtures (mainly ettringite), *Cement and Concrete Composites*, 20(2-3), 163-170.
 15. Nam, S. H., Song, H. W., Byun, K. J., Maekawa, K. (2006), Seismic analysis of underground reinforced concrete structures considering elasto-plastic interface element with thickness, *Engineering Structures*, 28(2), 1122-1131.
 16. Okamura, H., Maekawa, K. (1991), *Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete*, Tokyo (Japan), Gihodo-Shuppan, 102-181.
 17. 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.
 18. 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).
 19. Shawky, A. A. (1994), *Nonlinear Static and Dynamic Analysis for Underground Reinforced Concrete*. Ph.D. Dissertation, Tokyo (Japan), University of Tokyo, 22-36 (in Japanese).
 20. Shim, B., Kim, Y. K., Song, H. W. (2004), A Study on Crack Behavior of Chemically Prestressed Steel Fiber Reinforced Concrete, *KCI Fall Conference*, 16(2), 121-124 (in Korean).
 21. 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.

Received : 08/07/2013
 Revised : 09/03/2013
 Accepted : 09/09/2013

요 지

팽창재는 콘크리트의 건조/자기수축으로 인한 균열에 매우 효과적인 혼화재료이며 콘크리트 내부 철근에 화학적 프리스트레스를 인가할 수 있다. 본 논문에서는 CSA 팽창재에 의해 화학적 프리스트레스가 도입된 모르타르의 인장경화성능을 평가하였다. 철근으로 내부구속이 이루어진 철근 모르타르 시편에 대하여 일축인장시험을 수행하였으며, 균열거동 특성과 인장경화 특성을 분석하였다. CSA 모르타르에서는 압축강도 및 탄성계수는 약간 감소하였으나, 화학적 압축응력이 철근에 도입되었으며, 일반 모르타르 부재에 비해 167.5% 초기균열하중이 증가하였다. 높은 인장경화특성을 평가하였으며, 기존의 인장연화모델과 실험값을 비교하여 기존 제안식의 보완점을 제시하였다.

핵심 용어 : 인장경화, 인장연화, CSA 팽창재, 균열, 초기균열하중