

팽창재에 의한 초고강도 콘크리트의 수축저감

Applicability of Expansive Additive on Reducing Shrinkage in Ultra-High-Strength-Concrete



서경원*

Kyong-Won Seo



백기현**

Ki-Hyun Baek



김영진***

Young-Jin Kim



곽도연****

Do-Yeon Kwak

본 논문은 일본콘크리트공학협회 연차 논문집 Vol.30, No.1, 2008의 郭度連 박사 등이 게재한 논문을 번역한 것이다.

요 약 : 본 연구에서는 초고강도 콘크리트의 자기수축 제어대책으로서 팽창재를 이용하는 경우의 적절한 첨가량 및 유효성에 대하여 확인하였고, 재팽창 현상에 대해서 검토하였다. 그 결과 물시멘트비가 극히 낮은 초고강도 콘크리트의 특성상 과첨가의 경우는 미반응의 팽창재가 잔존하고 재팽창 할 가능성이 있는 것으로 나타났으며 초고강도 콘크리트용의 팽창재로서는 가능한 미수화 팽창재가 잔존하지 않는 팽창재 즉 팽창성을 충분히 가지면서 수화반응이 빠른 조강성의 비표면적이 큰 팽창재가 바람직한 것을 제안하고 있다.

1. 서 론

구조물의 고층화고내구화슬림화 요구에 따라 콘크리트의 고강도화가 요구되고 있으며 압축강도 150MPa 급의 초고강도 콘크리트가 실용화 되고 있다. 한편 초고강도 콘크리트는 낮은 물-시멘트비, 실리카 흙 등을 이용한 과도한 단위 결합재량에 의해 자기수축 변형률이 현저히 커진다. 초고강도 콘크리트의 자기수축제어 대책의 하나로서 팽창재가 검토되고 있으며 수축저감에 효과가 있음이 알려져¹⁾ 있지만 근거 데이터가 충분하지 않은 상황이다.

기존 연구에 의하면 초고강도 콘크리트에 팽창재를 이용하는 경우 원인불명의 이상팽창이 생길 경우도 있음이 보고되고 있다. 예를 들어 鈴木²⁾ 등은 물시멘트비 15%, 단위팽창재량 35kg의

경우 재령 100일을 넘어서부터 급격한 재팽창이 생기고 있음을 확인하였다. 또한 松田³⁾ 등의 연구에서는 물시멘트비 16%, 단위팽창재량 30kg의 경우 재령 60일 이후 재팽창 경향이 나타나고 있다. 이러한 연구는 밀봉양생 상태에서의 재팽창인데 비해 陣内⁴⁾ 등의 연구에서는 물시멘트비 15%, 단위팽창수량 40kg의 경우 7일 밀봉양생 후 기중환경에서도 재팽창 현상이 생기고 있다. 두 연구의 공통점으로서 물-시멘트비가 매우 낮은 초고강도 콘크리트인 점, 팽창재의 사용량이 표준사용량보다 많은 점을 들 수 있지만 같은 양의 사용에서도 재팽창이 생기는 경우와 생기지 않는 경우가 있어 재팽창의 생성조건, 메커니즘에 대해서는 불명확한 점이 많다.

본 연구에서는 초고강도 콘크리트에서 팽창재의 적절한 첨가량, 팽창효과 등을 확립함과 동시에 재팽창 현상을 검토하여 물시멘트비가 극히 작은 초고강도 콘크리트의 적절한 팽창재 사용에 대하여 제안하고 있다.

2. 실험 개요

2.1 사용재료 및 배합

<표 1>에 사용재료를 나타내었고 <표 2>에는 콘크리트의 배합을 나타내었다. 시멘트는 저발열계의 시멘트와 실리카폼을 혼합한 실리카폼 프리믹스 시멘트(SFPC)를 이용하였다. 팽창제는 석회계 2종류, 에트린자이트-석회복합계 1종류를 이용하였고, 각각은 비표면적이 다르다. 팽창재의 첨가량은 일반 콘크리트의 표준사용량인 20kg/m³에서 사용량을 증가시킨 40kg/m³까지 검토하였다. 콘크리트의 물-결합재비 W/B는 16.5%, 단위수량은 155kg/m³으로 하였다. 목표 슬럼프 값은 650±100mm, 공기량은 2% 이하로 하고 목표 슬럼프플로우를 만족하도록 고성능 감수제의 사용량을 조절하였다.

* (주)대우건설기술연구원 선임연구원

skw@dwconst.co.kr

** (주)대우건설기술연구원 책임연구원

*** 정희원, (주)대우건설기술연구원 수석연구원

**** 태평양머티리얼주식회사 개발연구소 주임연구원

표 1. 사용 재료

재 료	기 호	물 성
실리카폼프리믹스 시멘트	SFPC	밀도 3.07 g/cm ³ , 비표면적 6,160 cm ² /g
팽창재	EX I	석회계, 밀도 3.16 g/cm ³ , 비표면적 3,280 cm ² /g
	EXII	조강성 석회계, 밀도 3.19 g/cm ³ , 비표면적 4,920 cm ² /g
	EXIII	에트린자이트-석회복합계, 밀도 3.09 g/cm ³ , 비표면적 3,904 cm ² /g
조골재	G	밀도 2.64 g/cm ³ , 흡수율 0.67%, F.M.6.74
세골재	S	밀도 2.61 g/cm ³ , 흡수율 1.66%, F.M.2.88
혼화재	SP	폴리칼본산계 고성능 감수제

표 2. 콘크리트 배합

기 호	W/B(%)	단위량(kg/m ³)				
		W	SFPC	EX	S	G
PL	16.5	155	939	0	518	839
EX I -20			919	20	526	
EX I -40			899	40	526	
EXII-20			919	20	526	
EXII-30			909	30	526	
EXII-40			899	40	527	
EXIII-40			899	40	526	

표 3. 시험 수준 및 시험 재령

기호	시험 수준				
	자기수축	건조수축	압축강도		
			수중양생	밀봉양생	밀봉양생 7일 후 기중양생
PL	○	○	28일, 91일	7, 28, 91, 440일	28, 91, 440일
EX I -20	○	-		28, 91, 440일	-
EX I -40	○	○		7, 28, 91, 440일	28, 91, 440일
EXII-20	○	-		28, 91, 440일	-
EXII-30	○	-		28, 91, 440일	-
EXII-40	○	○		7, 28, 91, 440일	28, 91, 440일
EXIII-40	○	○		7, 28, 91, 440일	28, 91, 440일

2.2 실험 방법

2.2.1 플레인 콘크리트의 성능

슬럼프플로우의 시험은 「콘크리트의 슬럼프플로우 시험 및 500mm 플로우 도달시간의 측정」(JIS A1150), 공기량 시험은 「플레인 콘크리트의 압력에 의한 시험방법(공기실압력 방법 (JIS A 1128))에 근거하여 수행하였다. 비빔시 온도는 봉형 온도계를 이용하여 측정하였다.

2.2.2 응결시험

응결시험은 콘크리트의 응결시간 시험방법(JIS A11147)에 근거하여 실시하였다.

2.2.3 압축강도

콘크리트는 타설 24시간 후 탈형하여 수중양생, 밀봉양생, 밀봉양생 7일후 기중양생의 3종류에 대하여 실시하였다. 수중 양생은 20±1℃의 수중에서 실시하였고, 밀봉양생은 타설후 즉시 폴리프로필렌시트 및 알루미늄테이프를 완전히 밀봉하고 20±1℃의 항온실에서 측정하였다.

또한 밀봉양생 7일후 기중양생은 밀봉양생 7일후 막을 벗겨서 20±1℃, 상대습도 60%의 항온항습실에서 양생하였다. 압축강도는 <표 3>에 나타내었듯이 각각의 양생마다 소정의 재령에서 측정하였다.

2.2.4 자기수축

자기수축 변형률의 측정은 「(가)고유동 콘크리트의 자기수축 시험방법」⁵⁾에 근거하여 저탄성형의 온도측정 기능이 있는 매설형 변형률계를 이용하였다. <그림 1>에 나타내었듯이 10*10* 400 mm의 강제 형틀을 제작하고 매설형 변형률계를 중앙에 설치하였다. 형틀의 내측에는 공시체와의 마찰저항을 감소시키기 위해 테프론시트와 폴리에스테르 필름을 빈틈없이 설치하였다. 공시체는 1수준당 2개로 하고 2개의 평균치를 측정값으로 하였다. 자기수축 변형률은 콘크리트의 선팅창 계수를 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 가정하고 자기수축 시험체의 변형률로부터 온도 변형률의 영향을 제거해서 구하였다. 자기수축 변형률의 기점은 물주입 후의 측정값이 현저하게 변화를 나타내는 시점과 응결시험의 초결 시점이 거의 동등한 점으로부터 응결시험의 초결시각을 기점으로 하였다.

2.2.5 건조수축

매설 밀봉 변형률계를 이용하여 제작한 자기수축 시험체의 일부는 밀봉양생 재령 7일후 막을 해제하고 $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $60 \pm 5\%$ 의 항온항습실에서 연속해서 건조수축을 측정하였다.



그림 1. 시험체 제작

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 플레인 콘크리트의 물성 및 응결 특성

<표 4>에 플레인 콘크리트의 성상 및 응결시험 결과를 나타내었다. 목표 슬럼프플로우는 $650 \pm 100 \text{ mm}$, 공기량은 2% 이하이며, 모든 경우가 목표값을 만족하고 있다.

목표 슬럼프플로우를 만족하기 위한 고성능 감수제의 사용량은 팽창재를 이용하는 경우 PL의 0.8%에 비해 약간 증가하는 경향이 있으며 팽창재의 종류에 의한 차는 크지 않다.

응결시간은 팽창재의 첨가에 의해 약간 빨라지는 경향이 있으며 팽창재의 종류 및 첨가량에 의한 영향은 그렇게 크지 않다.

3.2 팽창재에 의한 수축저감 효과

<그림 2 (좌측)>에 팽창재를 사용하지 않은 플레인콘크리트 및 조강성 팽창재인 EXII를 이용한 콘크리트의 자기수축 변형률을 나타내었다. 플레인콘크리트의 자기수축은 재령 10일에서 총 변형률의 약 절반에 이르고 있으며, 재령 400일에서 약 430×10^{-6} 이 되었다. 한편 팽창재의 사용량 20 kg/m^3 에서는 30×10^{-6} , 30 kg/m^3 에서는 140×10^{-6} , 40 kg/m^3 에서는 약 330×10^{-6} 팽창하였으며 재령 400일의 자기수축은 20 kg/m^3 에서 약 200×10^{-6} , 30 kg/m^3 에서는 약 50×10^{-6} 의 수축, 40 kg/m^3 에서는 약 185×10^{-6} 의 팽창을 보이고 있다. 최대 팽창량에 이르는 시간은 20 kg/m^3 에서 26시간, 30 kg/m^3 에서 40시간, 40 kg/m^3 에서 49시간이었으며 팽창재량이 많을수록 팽창량도 크고 팽창지속시간도 길어졌다. 한편 최대 팽창량에 도달 후 수축으로 변환후의 구배는 팽창과 수축의 포텐셜이 대립함으로 인해 팽창재의 첨가량이 많을수록 완만하다. 따라서 최대팽창시점부터의 자기수축량은 플레인콘크리트에 비해 작아지고 있다. 바꾸어 말하면 초고강도 콘크리트에서는 가시적인 팽창량은 작더

표 4. 플레인 콘크리트의 성상

기호	SP/(SFPC+ EX) (%)	플레인 콘크리트				초결(h-m)	
		슬럼프플로우		공기량(%)	Temp(°C)	시발	종결
		(cm)	sec				
PL	0.80	69.0	10.6	1.0	23.0	9-07	11-32
EX I -20	0.85	61.0	17.5	1.4	22.5	6-51	8-59
EX I -40	0.90	74.0	12.2	1.1	22.3	6-40	8-55
EXII-20	0.85	59.5	17.2	1.6	24.5	6-57	9-07
EXII-30	0.90	66.0	11.7	1.0	24.5	6-20	8-15
EXII-40	0.95	73.5	11.3	1.3	24.0	6-52	8-45
EXIII-40	0.90	63.5	14.4	1.3	23.5	5-49	7-55

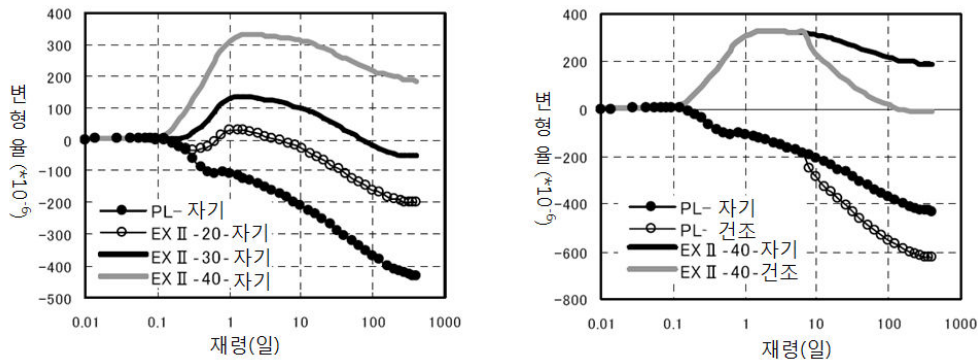


그림 2. 팽창재에 따른 수축 변형률의 저감 효과

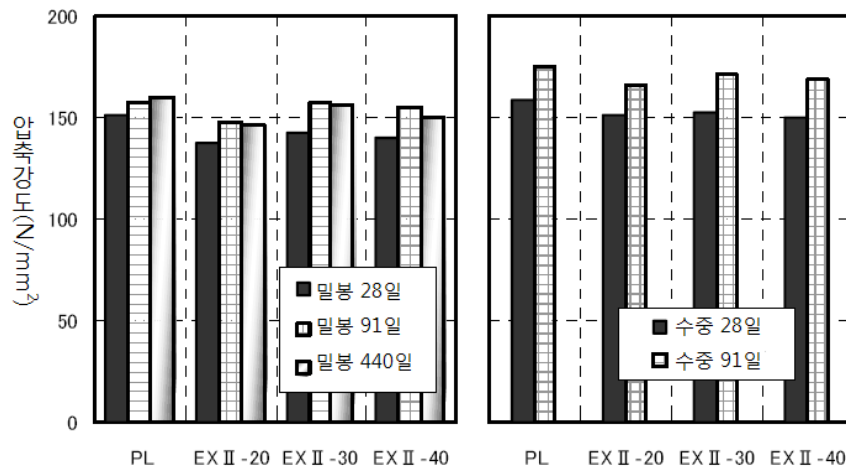


그림 3. 조강성 팽창재의 EXII에 따른 압축강도

라도 수축저감효과는 팽창량 이상으로 발휘되고 있다고 말할 수 있다.

재령 7일에서 기중에 폭로시킨 시험체의 전수축 변형률 측정 결과를 자기수축과 비교하여 <그림 2 (오른쪽)>에 나타내었다. 여기에서는 자기수축과의 구분 편의상 자기수축을 포함한 건조하의 전수축 변형률을 건조수축으로 칭한다. 플레인 콘크리트의 건조수축 변형률은 재령 400일에서 약 600×10^{-6} 이 되었다. 팽창재 EXII를 40 kg/m^3 첨가한 콘크리트의 수축 변형률은 재령 400일에서 약 0×10^{-6} 이 되었으며, 자기수축과 마찬가지로 팽창재의 혼입에 의한 수축 저감 효과를 볼 수 있었다.

<그림 3>에 팽창재 EXII의 첨가에 의한 압축강도의 변화를 양생조건마다 나타내었다. 첨가량에 관계없이 밀봉양생, 수중양생 모두 플레인 콘크리트에 비하여 거의 동등한 압축강도를 보이고 있으며 팽창재의 첨가 압축강도에 미치는 영향은 거의 볼 수 없다.

3.3 초고강도 콘크리트의 재팽창 현상

재팽창 현상을 검토하기 위해 각각 비표면적이 다른 3종류의 팽창재를 표준첨가량의 2배인 40 kg/m^3 을 첨가하여 실시한 자기수축 측정결과를 <그림 4>에 나타내었다. 측정재령 400일까지의 결과를 나타내었으며 오른쪽 그림은 초기재령 변화를 검토하기 위해 횡축을 로그축으로 나타내었다. 전술한바와 같이 조강성 팽창재의 EXII는 재령초기에 효과적으로 팽창하고 자기수축 저감효과를 볼 수 있다. 한편 EX I 및 EXIII는 초기 팽창량은 다르지만 재령 50일부터 재팽창을 하고 있다.

盛岡⁶⁾는 물결합재비 20~30%의 모르타르에 팽창재를 이용한 실험을 통해 낮은 물결합재비 모르타르에서는 연속적인 팽창이 크다는 것을 지적하였다. 일반적으로 시멘트의 완전수화에 필요한 수분량은 시멘트의 약 40%로 약 25%가 시멘트와 화학적인 결합에, 나머지 약 15%가 젤수로서 존재한다고 알려져 있으며⁷⁾

표 5. 압축강도

	양생방법	압축강도(MPa)			
		7일	28일	91일	440일
PL	막	114	151	158	160
	막7일후 기중		149	161	154
	수중	-	159	175	-
EX I -20	막	-	141	154	134
	수중	-	157	175	-
EX I -40	막	108	141	111	25
	막7일후 기중		139	131	41
	수중	-	153	90	-
EXII -20	막	-	137	147	146
	수중	-	151	166	-
EXII -30	막	-	143	158	156
	수중	-	153	172	-
EXII -40	막	110	140	155	150
	막7일후 기중		141	158	143
	수중	-	150	168	-
EXIII -40	막	107	142	103	36
	막7일후 기중		137	121	52
	수중	-	144	85	-

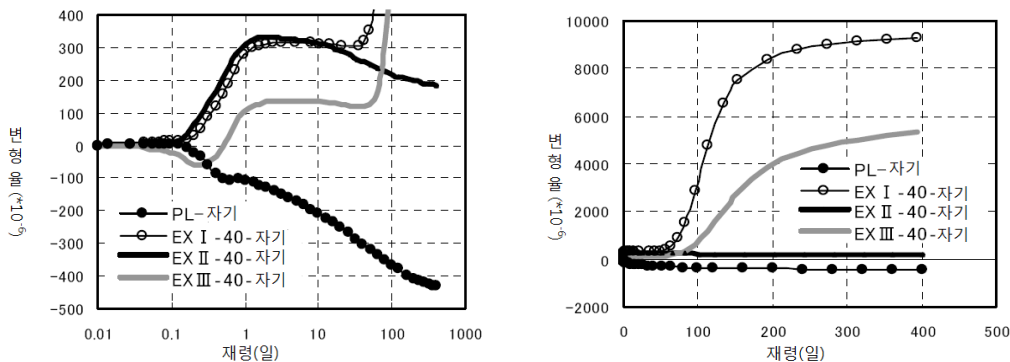


그림 4. 팽창재의 종류에 따른 자기수축의 변화

물결합재비가 25%에 못미치는 초고강도 콘크리트에서는 미반응의 결합재가 많이 존재하던가 혹은 결정수가 부족한 결정이 될 수 있다고 추측된다. 이와 같이 잔존하는 미반응 팽창재에 의해 재팽창이 생긴다고 생각할 수 있다.

그러나 자기수축 시험체와 같은 수분의 입출입이 없는 밀봉양생 상태에서 재령 50일 이상 경과 후 재팽창이 생기기 위해서는 여하튼 수분의 공급원이 필요하다. 물시멘트비가 매우 낮은 초고강도 콘크리트의 내부는 자기수축의 원인이 되기도 하는 자기 건조(self desiccation)가 심하고 내부습도는 극한까지 저하된다고 생각된다. 이와 같은 상태에서 골재의 함수상태 이하까지 자기 건조가 진행되어 내부습도가 저하되면 습도 구배력이 증가하

여 골재내부의 수분을 빼어내는 형태로 수분의 강제적인 공급도 가능하다고 생각된다. 본 연구의 배합으로부터 조골재와 세골재의 흡수율을 수량으로 환산하면 약 14 kg/m³이 되며 밀봉양생 상태의 시험체 내부로부터 약 14 kg/m³의 물이 공급될 수 있는 포텐셜을 갖게 된다.

<그림 5>에 밀봉양생 7일후 기중양생한 시험체의 변형률 측정 결과를 나타내었다. 막제거 후 재령 약 50일까지는 건조에 수반하는 수축을 보이고 있지만 이후 EX I 및 EX III에서 재팽창이 발생하고 있다. 초고강도 콘크리트는 매우 밀실한 콘크리트이며 수분의 증발, 침투는 매우 작다. <그림 6>은 수분일산량의 일례이다. 초고강도 콘크리트의 수분일산량은 물시멘트비 50% 콘크

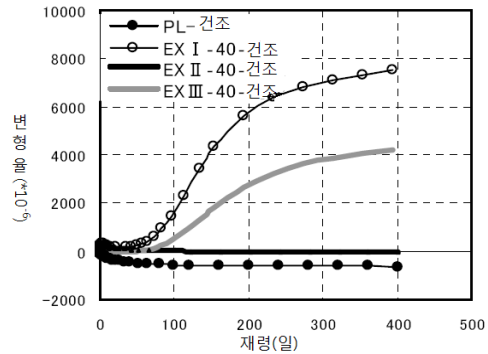
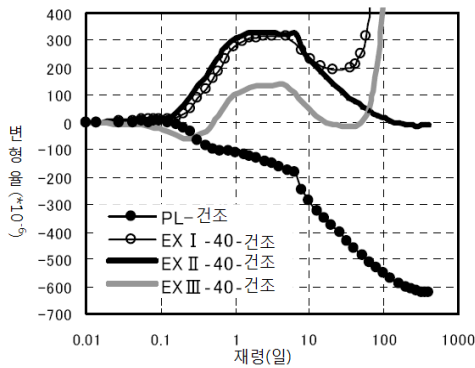


그림 5. 팽창재의 종류에 따른 건조환경하에서의 변형률의 변화

리트의 약 1/7~1/8 정도이다. 즉 기중양생이라도 표층부를 제외한 시험체의 내부는 밀봉양생과 큰 변화가 없는 것으로 생각되며 전술한 밀봉양생과 동일한 메커니즘으로 재팽창이 생기는 것으로 추측된다. 본 연구의 경우 수중양생에서는 변형률 측정은 하지 않았고 추측이지만 재팽창은 가장 생기기 쉽고 빠른 단계에서 생기는 것으로 생각된다. 수중양생에서도 양생수의 침투 속도는 따라붙지 못하고 자기건조가 생기고 있으며⁸⁾ 미반응의 팽창재가 존재하고 있어 천천히 콘크리트 내부로 침투하는 수분에 의해 재팽창이 생기는 것으로 생각된다.

한편 같은 양의 팽창재 첨가량이라도 EXII는 재령초기에 효과적으로 팽창하며 양생조건에 관계없이 재팽창은 생기지 않고 수축저감 효과를 볼 수 있다. 팽창재의 입도는 콘크리트의 팽창특성에 크게 영향을 미치고 있으며⁹⁾ 팽창률뿐만 아니라 반응속도 등도 크게 좌우된다. <표 1>에 나타내었듯이 EXII는 비표면적이 가장 크고 수화반응이 빠른 조강성 팽창재이며 미수화 팽창재가 잔존할 가능성이 낮다고 생각된다. 물시멘트비가 매우 낮은 초고강도 콘크리트에는 가능한 미수화 팽창재가 잔존하지 않는 팽창재 즉 팽창성능을 충분히 가지면서 수화반응이 빠른 조강성의 비표면적이 큰 팽창재가 바람직하다고 할 수 있다.

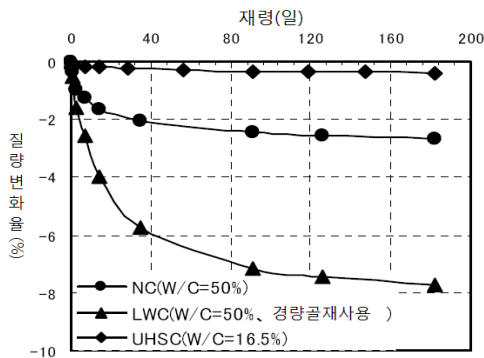


그림 6. 질량변화율의 예

<그림 7>에 재령 28일 및 91일의 압축강도를 나타내었고, <그림 8>에 재령 440일의 장기재령 압축강도를 양생방법별로 나타내었다. 재령 28일의 수중양생, 밀봉양생, 밀봉양생 후 기중양생의 각 양생방법에 의한 압축강도 차는 크지 않고 전술한 바와 같이 수분의 이동과 공급이 적다는 것을 증명하고 있다. 재령 28일부터 재령 91일 사이의 재팽창이 생긴 EX I 및 EXIII는 재령 28일부터 91일에 걸쳐 큰 폭의 강도저하가 생기고 있다. 수중양생의 강도저하가 가장 크고 빠른 단계에서 재팽창이 생기고 있다는 것이 추측된다. 440일의 장기재령에서도 재팽창에 동반하는 압축강도의 저하는 연속적으로 진행되고 있다. 한편 조강성 팽창재 EXII는 수분의 공급이 있으며 가장 재팽창이 생기기 쉬운 것으로 생각되는 수중양생에서도 재령 28일부터 91일에 걸쳐 압축강도는 증가하고 있으며 이후 재팽창이 생길 우려는 없다고 할 수 있다.

이상과 같이 초고강도 콘크리트는 물시멘트비가 극단적으로 낮기 때문에 미반응의 결합재가 많이 존재하므로 팽창재의 과침가를 주의하고 팽창재가 잔존할 가능성이 낮은 조강성의 분말도가 높은 팽창재 사용이 바람직하다고 할 수 있다. 단, 본 연구에서 기술한 미반응 팽창재의 잔존에 의한 재팽창 현상은 어디까지나 초고강도 콘크리트와 같은 물시멘트비가 매우 낮은 특수한 콘크리트만에 한정된 현상이며 일반적인 콘크리트에서는 생기기 어려운 현상이다. 본 연구의 고찰은 무구속 상태에서 얻어진 결과이며 실제의 구속조건하에서는 다른 양상을 나타낼 수도 있을 것으로 생각하며 이후 구속조건하에서의 검토가 필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 초고강도 콘크리트의 수축저감책으로서 팽창재를 검토하고 이의 적절한 사용에 대하여 검토한 결과 이하의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 조강성 팽창재는 초고강도 콘크리트의 수축저감에 효과적이며 굳기 전 콘크리트의 물성 및 압축강도에 미치는 영향

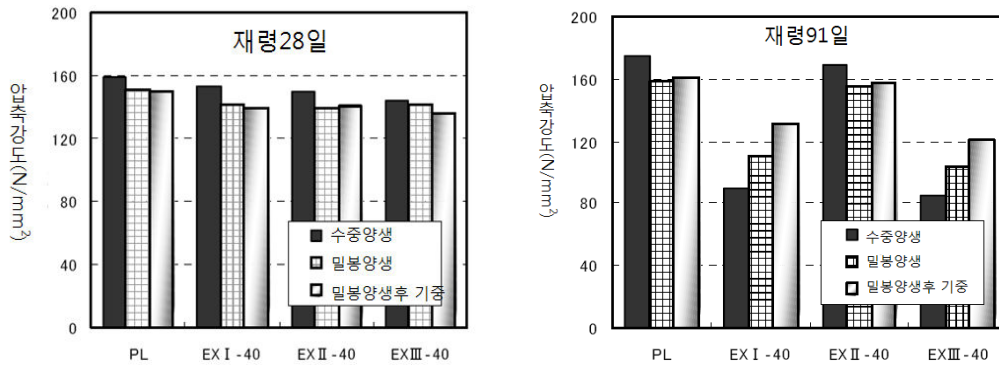


그림 7. 팽창재의 종류에 의한 압축강도의 변화

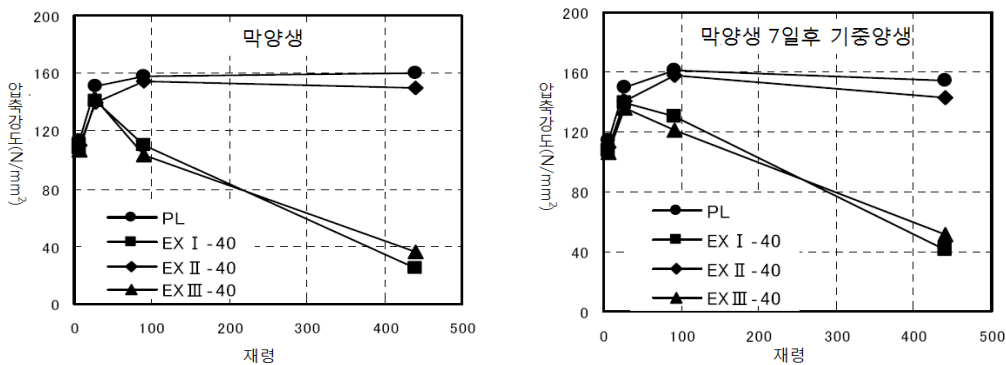


그림 8. 팽창재의 종류에 의한 장기재령의 압축강도

은 경미하다.

- 2) 물시멘트비가 매우 낮은 콘크리트에서 비표면적이 작은 팽창재의 첨가량이 많은 경우는 미수화의 잔존팽창재에 의한 재팽창이 생길 가능성이 있으며 초고강도 콘크리트용의 팽창재로서는 수화반응이 빠른 조강성의 비표면적이 큰 팽창재가 바람직하다.
- 3) 재팽창을 생기게 하는 구동력이 되는 수분은 초고강도 콘크리트의 자기진조에 의한 습도구배에 기인하며 내부의 골재에서 공급될 가능성을 보여주었다. [4]

참고문헌

1. 高田和法, 柳井修司, 渡部貴裕, 一宮 利通, “초고강도 콘크리트의 자기수축저감에 관한 연구,” 콘크리트공학 연차논문집, Vol.25, No.1, 2003, pp.1007~1012.
2. 鈴木雅博, 中瀬博一, 丸山一平, 佐藤良一, “초고강도 팽창 콘크리트의 자기응력에 미치는 온도이력의 영향,” 시멘트콘크리트 논문집, No.59, 2005, pp.375~382.
3. 松田拓, 嶋毅, 河上浩司, 西本好克, “초기온도 이력을 받은 초고강도 콘크리트의 자기수축특성,” 콘크리트공학 연차논문집, Vol.28, No.1, 2006, pp.1247~1252.

4. 陣内浩, 黒岩秀介, 並木哲, 渡邊悟土, “초고강도 콘크리트의 길이 변화에 관한 기초적 연구,” 일본건축학회 학술강연논문집, 2005, pp.393~394.
5. 일본콘크리트공학협회, 초유동 콘크리트 연구위원회 보고서(II), 1994, pp.209~210.
6. 盛岡実, 坂井悦郎, “팽창재를 혼합한 극저수 결합재비 모르타르의 팽창거동,” 팽창 콘크리트에 의한 구조물의 고기능화/고내구화에 관한 심포지엄, 2003, pp.103~108.
7. 荒井康夫, 시멘트의 재료화학, 대일본도서, 1984, 170pp.
8. 田澤榮一, 宮澤伸吾, “수화에 의한 자기수축,” 콘크리트공학, Vol.32, No.9, 1994, pp.25~30.
9. 栖原健太郎, 芦田公伸, 吉野亮悦, 辻幸和, “팽창재의 조도가 콘크리트의 팽창특성에 미치는 영향,” 콘크리트공학 연차논문집, Vol.29, No.1, 2007, pp.255~260.
10. 郭度連, 國府勝郎, 宇治公孝, “콘크리트 건조화의 수분의 존재상태 및 경시변화,” 콘크리트공학 논문집, 16권, 3호, 2004, pp.1~10.

담당 편집위원 :
천성철(주)대우건설기술연구원 bluebird@dwconst.co.kr