

## 고분말도 혼화재를 첨가한 삼성분계 시멘트 콘크리트의 내구성 평가

### Durability Evaluation of Ternary Blend Concrete Mixtures adding Ultra Fine Admixture

안상혁	Ahn, Sang Hyeok	정회원 · 한국건설기술연구원 도로포장연구실 석사후연구원 (E-mail: shahn@kict.re.kr)
전성일	Jeon, Sung IL	정회원 · 한국건설기술연구원 도로포장연구실 수석연구원 (E-mail: jeonsi@kict.re.kr)
남정희	Nam, Jeong-Hee	정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 · 교신저자 (E-mail: archnam@kict.re.kr)
안지환	An, Ji Hwan	정회원 · 한국건설기술연구원 도로포장연구실 수석연구원 (E-mail: jenix@kict.re.kr)

#### ABSTRACT

**PURPOSES:** The purpose of this study is to evaluate the durability of ternary blended concrete mixtures adding ultra fine admixture.

**METHODS:** From the literature review, crack was considered as the main distress failure criterion on concrete bridge deck pavement. To reduce the initial crack development due to drying shrinkage, CSA expansion agent and shrink reduction agent were used to ternary blended concrete mixtures as a admixture. Laboratory tests including chloride ion penetration test, surface scaling test, rapid freeze & thaw resistance test, non restrained drying shrinkage and restrained drying shrinkage test were conducted to verify the durability of ternary blended concrete mixtures.

**RESULTS:** Based on the test results, proposed mixtures were verified as high qualified durable materials. Expecially initial drying shrinkage crack was not occurred in ternary blended concrete mixtures with CSA expansion agent.

**CONCLUSIONS:** It is concluded that the durability of proposed ternary blend concrete mixture was acceptable to apply for the concrete bridge deck pavement.

#### Keywords

*durability, ternary blend cement, ultra fine admixture, shrinkage*

Corresponding Author : Nam, Jeong-Hee, Research fellow  
Highway pavement research division, SOC research Institute,  
Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro,  
Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea  
Tel : +82.31.910.0190 E-mail : archnam@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering  
<http://www.ijhe.or.kr/>  
ISSN 1738-7159 (Print)  
ISSN 2287-3678 (Online)

#### 1. 연구배경 및 목적

일반적으로 교량 슬래브는 구조용 콘크리트로 구체를 시공하고 난 후 교면포장용 콘크리트로 포장공사를 실시하여 완성하게 된다. 교면포장의 목적은 평탄성 확보를 통한 사용성 향상, 내구성이 확보된 마모층의 공급, 염화물 침투를 막아 교량구조물의 수명을 연장하기 위함이다(Brian, 1999). 이에 교면포장은 교통하중과 환

경하중에 저항할 수 있도록 적합한 강도와 투수저항성을 가지는 재료로 시공되어야 한다. 특히 교면포장용 재료는 교량바닥판의 보호를 위해 상부에서 흘러들어오는 물의 침투를 최대한 억제할 수 있는 불투수성 재료여야 한다. 또한 교량바닥판과 일체거동을 위해, 바닥판과 유사한 성질의 재료이어야 하며, 계면에 부착성능이 우수해야 한다.

현재 국내에서 적용되고 있는 교면포장용 콘크리트에는 합성고무 라텍스 수지를 첨가한 콘크리트(LMC : Latex Modified Concrete)와 실리카흙(silica fume)을 첨가한 SFC(Silica Fume Concrete)가 있다. 2000년 이전에는 대부분 교면포장을 아스팔트 포장으로 하였으나, 2000년 이후 라텍스 수지를 첨가한 콘크리트(LMC)의 현장적용으로 콘크리트 교면포장이 확대되었다. 이외에 메타카올린, 섬유보강재 등을 혼입한 교면포장용 콘크리트 조성물이 개발되었으나, 시공실적은 거의 없는 것으로 조사되었다. 이들 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 내구성을 향상시킨 고성능 교면포장용 콘크리트로 분류될 수 있으나, 합성고무 라텍스 수지와 실리카흙이 고가의 재료로 경제성을 저하시키는 요인이 된다.

미국의 경우, 1977년대부터 24개 주에서 교면포장용으로 LMC가 시공되어, 현재까지 꾸준히 적용되고 있다. 또한 1987년 이후 실리카흙 콘크리트가 교면포장과 교량 접속부 포장에 활용되고 있다. 1990년에 미국 Missouri DOT에서 에폭시-폴리머 콘크리트가 교면포장에 적용된 이래로 일부 적용사례가 있으나 확대적용되고 있지는 않는 것으로 보고되고 있다. NCHRP(2004)에서는 미국 각 주별 교면포장재료에 대한 사용현황을 파악하기 위해 설문조사를 수행하였다. 설문문항에는 과거 사용재료건수, 현재 사용재료건수, 공용성 등급이 포함되었으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Overlay Type of Bridge Deck(NCHRP 333, 2004)

Overlay	No. of respondents <sup>a</sup>		Performance rating <sup>b</sup>	
	Past	Current	Range	Average
None	6	5	-	-
Asphalt <sup>c</sup>	28	16	1 to 5	3.6
Latex-Modified Concrete	26	20	1 to 5	2.4
Low-Slump Dense Concrete	26	12	1 to 5	2.4
Fly Ash Concrete	4	11	2 to 4	2.4
Silica Fume Concrete	10	21	1 to 3	2.0
Epoxy	11	11	1 to 5	2.6
Polyester	4	2	1 to 5	2.5
Other	5	4	1 to 5	2.8

a : Total number of Survey respondents=45.

b : 1=excellent, 5=poor, -=not applicable.

c : Asphalt without a membrane.

설문결과 아스팔트 포장 비율은 감소하는 추세이며, 전체적으로 콘크리트 포장이 주를 이루고 있었다. 특히 LMC가 상대적으로 강세를 보이지만 과거에 비해 적용

건수가 줄고 있으며, 실리카흙 콘크리트가 최근에 강세를 보이는 추세이다. 또한 플라이애시 콘크리트도 꾸준히 증가하고 있는 추이를 보이고 있다. 공용등급에서는 전반적으로 아스팔트 포장에 비해 콘크리트 포장의 포장상태가 더 양호한 것으로 평가되었으며, 콘크리트 포장에서 각 재료별 큰 차이는 없으나, 상대적으로 실리카흙 콘크리트가 가장 양호한 것으로 평가되었다. 이와 같이 미국에서는 교면포장용으로 다양한 콘크리트 재료가 적용되고 있으며, 국내에서와 같이 LMC가 주를 이루는 것과는 대조적이라 할 수 있다.

콘크리트 교면포장에서 발생할 수 있는 파손유형은 표면박리, 모르타르 pop-out, 스포링(spalling), AAR(alkali - aggregate reactivity), 균열 등이 있다(NCHRP 333, 2004). 특히 이 중에서 균열이 가장 주요한 파손으로 대두되고 있다. Wisconsin DOT에서는 콘크리트 교면포장의 균열발생 원인에 대한 연구를 수행하였고, 이를 통해 물-시멘트 0.4% 이하, 굵은 골재 최대 크기 19mm로 해야 한다는 배합조건을 제안하였다(Kochanski et al. 1990). Kansas DOT에서는 콘크리트 교면포장의 균열발생 원인을 콘크리트 수축 또는 수축의 구속력 때문이라고 결론을 내렸다(Schmitt and Darwin 1995, 1999 ; Miller and Darwin, 2000). Krauss and Rogalla(1996)는 콘크리트 재료의 낮은 수축, 낮은 탄성계수, 높은 크리프, 낮은 수화열 등이 조기에 발생하는 횡방향 균열을 줄일 수 있다고 하였다. French et al(1999)은 횡방향 균열이 발생한 72개의 교량에 대한 원인을 분석하였다. 교량 타입별로 구분하여 보면, 34개가 simply supported prestressed concrete girder bridge, 또 34개가 continuous steel girder bridge, 4개가 continuous rolled steel, wide flange girder bridges 등인 것으로 조사되어 교량 타입에 따라 영향도 있는 것으로 조사되었다. 또한 재료적 인자로는 단위 시멘트량, 골재타입 및 품질, 공기량, 수축율, 탄성계수 등이 관련 있는 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 사전연구를 통해 고분말도 플라이애시와 고로슬래그를 같이 혼합하여 고성능 콘크리트 제조가 충분히 가능한 것을 확인하였다. 이와 같은 제조기술을 현장에 적용하기 위해서는 경제성, 현장적용성 등을 고려한 배합 개선연구와 추가적인 실내 내구성 평가를 수행하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 실험개요

본 연구에서는 교면포장용 콘크리트 혼합물의 최적 배합비 제안과 내구성 검증을 위해 실내배합실험을 진행하였다. 문헌조사를 통해 콘크리트 교면포장에서 발생하는 파손 중 가장 많은 부분을 차지하는 것이 균열이었으며, 그 주요한 원인이 콘크리트 수축에 의한 것으로 교면포장의 내구성능 조건을 만족시키기 위해 고분말도 혼화제로 수축균열 억제를 위해 팽창제와 수축저감제를 검토하였다. 고분말도 플라이애시와 슬래그를 치환한 삼성분계 시멘트를 기본으로 하였으며, 수축저감을 목적으로 팽창제와 수축저감제를 비율에 따라 첨가하여 배합을 실시하였다. 또한 이를 비교하기 위해 Plain, SFC, LMC 배합을 실시하였다. 이들 배합에 대하여 슬럼프와 공기량 실험을 실시하였으며, 재령별 압축강도 실험을 진행하였다. 또한 수축에 대한 검토를 위해 자기수축실험, 비구속건조수축실험, 구속건조수축실험을 진행하였다. 내구성 평가를 위해 염소이온침투저항성실험, 동결융해실험, 표면박리실험, 알칼리골재반응실험을 진행하였다.

## 2.2. 실험재료

본 연구에서 사용된 결합재인 1종 포틀랜드 시멘트는 A사의 제품을 사용하였으며, 고분말도 플라이애시는 경상도 지역의 화력발전소의 석탄회를 정제하여 제조된 제품을 고분말도 슬래그는 KS규격 2종 제품을 사용하였다. 팽창제는 D사에서 제조된 CSA계를 수축저감제는 D사에서 제조된 제품을 사용하였다. Table 2는 연구에서 사용된 결합재의 화학성분을 보여주고 있다.

Table 2. Chemical Test Results of Binders

	Unit	Type 1 cement	UFFA	FGGBS	Expansion agent
SiO <sub>2</sub>	%	20.2	52.0	33.5	1.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5.7	18.8	13.8	12.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2.8	5.1	0.38	0.50
CaO	%	61.7	13.9	43.3	61.1
MgO	%	3.4	1.5	4.31	1.19
SO <sub>3</sub>	%	2.4	2.5	2.83	20.4
brain	cm <sup>2</sup> /g	3,200	6,102	7,075	3,984
gravity	g/cm <sup>3</sup>	3.15	2.5	2.85	2.85
(Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O)	%	0.78	1.5	0.65	0.33
Loss of Ignition	%	2.7	2.1	0.3	1.6

UFFA : ultra fine fly ash

FGGBS : finely ground granulated blast furnace slag

배합에 사용된 잔골재는 남한강 인근에서 채취한 강사를 사용하였으며, 굵은골재는 강원도 인근 석산에서 채취한 쇄석골재를 사용하였다. 굵은골재는 교면포장용 콘크리트의 포장두께를 감안하여 13mm 골재를 사용하였다. Table 3과 Fig. 1은 각각 골재의 물리적 특성과 입도분포를 보여주고 있다. 고성능감수제는 D사에서 제조된 폴리카본산계를 사용하였으며, AE제는 일반적으로 많이 사용되는 SLES타입의 음이온계 제품을 사용하였다.

Table 3. Physical Properties of Aggregates

Type	Size(mm)	Gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption rate(%)	F.M
Fine agg.	≤ 5	2.66	3.10	2.88
Coarse agg.	≤ 13	2.64	1.48	6.10

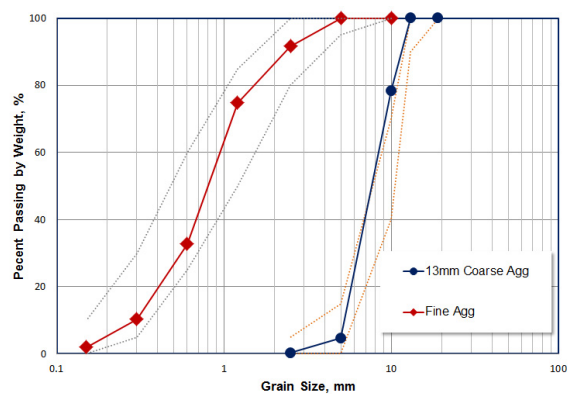


Fig. 1 Aggregate Gradation

## 2.3. 실험방법

본 연구에서는 굳지 않은 콘크리트의 유동성 측정방법의 일종인 슬럼프 시험(KS F 2401)을 수행하였으며, 콘크리트의 압축강도와 내구성에 영향을 미치는 공기량 실험을 압력법(KS F 2421)을 통해 수행하였다. 배합을 통해 제작된 공시체의 양생을 마치고 KS F 2405에 준하여 압축강도를 측정하였다. 내구성 평가로 염소이온 침투저항성실험(KS F 2711), 동결융해저항성실험(KS F 2456 A Type), 표면박리저항성실험(ASTM C 672)을 수행하였다. 또한, 교면포장용 콘크리트의 주요 지표로 균열에 대한 검토를 위해 수축실험을 수행하였다. 수축실험은 자기수축실험(KS F 2586), 비구속 건조수축실험(KS F 2424), 구속 건조수축실험(ASTM C 1581)을 수행하였다.

## 2.4. 배합실험계획

콘크리트 배합실험은 콘크리트 최적 배합비 제안과 내구성능을 평가하기 위해 수행하였다. 사전연구에서 고분말도 플라이애시와 슬래그를 첨가한 삼성분계 콘크리트의 치환율을 검토하였으며, 이를 통해 고분말도 플라이애시와 슬래그를 각각 10% 이상 첨가할 경우, 콘크리트의 성능이 크게 향상되는 것으로 나타났다(Jeon et al, 2009).

이에 본 연구에서는 알칼리-실리카 반응(ASR, alkali silica reaction)을 고려하여, 고분말도 플라이애시 20%, 고분말도 슬래그 10%를 첨가한 삼성분계 시멘트를 기본으로 하였다. 또한 교면포장용 콘크리트 혼합물의 수축에 대한 부분을 개선하고자, 팽창제와 수축저감제를 사용하였으며, 개발 재료에 대한 비교·검토를 위해 Plain, SFC, LMC 배합을 실시하였다. Table 4와 Table 5에는 본 연구에서 검토된 콘크리트 배합비를 나타내고 있다. 표에서 나타난 바와 같이 주요배합에서는 고분말도 플라이애시와 슬래그를 치환한 삼성분계 시멘트를 기본으로 팽창제의 첨가량을 0~12%로 변화를 주어 실험을 수행하였으며, 팽창제 5%에 수축저감제 1%(전체 결합재 중량대비)를 첨가하는 변수를 추가하였으며, AE제는 공기량 6%를 목표로 하여 각 배합별 첨가비율이 다르게 적용되었다. 비교배합에서 Plain 배합은 결합재를 보통 포트랜드 시멘트만 사용한 것이며, 결합재를 제외하고는 주요배합과 동일하게 구성되었다. 또한 SFC는 실리카흙을 첨

Table 4. Concrete Mixtures (1) – Main Variables

Type	W/B (%)	S/a (%)	Unit amount, kg/m <sup>3</sup>								
			W	Binder					Fine Agg.	Coarse Agg.	
				C	UFFA	FGGBS	CSA	SRA			
C0	40	55	160	280	80	40	0	-	950.7	772.0	
C4	40	55	160	264	80	40	16	-	950.1	771.5	
C8	40	55	160	248	80	40	32	-	949.4	771.0	
C12	40	55	160	232	80	40	48	-	948.8	770.4	
C5S1	40	55	160	256	80	40	20	4	949.7	771.2	

CSA : Expansion Agent

SRA : Shrink Reduction Agent

Table 5. Concrete Mixtures (2) – for Reference

Type	W/B (%)	S/a (%)	Unit amount, kg/m <sup>3</sup>					
			W	Binder			Fine Agg.	Coarse Agg.
				C	SF	Latex		
Plain	40	55	160	400	-	-	962.7	781.7
SFC	40	55	170.4	400.4	25.6	-	930.3	755.4
LMC	33	58	64.0	400	-	128	968.6	696.1

가한 콘크리트를, LMC는 라텍스를 혼입한 개질 콘크리트로, 현재 국내에서 상용되는 배합비를 사용하였다.

## 3. 실내배합실험 결과

### 3.1. 슬럼프/공기량 실험결과

Table 6은 각 배합별 혼화제 첨가율과 굳지 않은 상태에서의 슬럼프와 공기량 실험결과를 나타내고 있다. 본 연구에서는 각 배합별 목표공기량에 도달하기 위하여, AE제 첨가율을 다르게 하였다. 팽창제의 치환율을 증가 시킴에 따라 요구되는 AE제 함량이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 팽창제가 AE제의 계면활성작용을 일부 방해하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 팽창제 5%에 수축저감제 1%를 첨가한 C5S1 배합의 경우 AE제를 C12 배합에 비해 6배를 첨가하였으나, 공기량은 3.4%를 나타내어 목표공기량에 도달하지 못하였다. 이는 수축저감제가 표면장력에 저항하여 콘크리트의 수축을 저감시키는 재료인데, 이러한 재료적 특성이 굳지 않은 상태에서 AE제의 계면활성작용을 방해한 것으로 판단된다. 또한 C5S1 배합은 수축저감제의 특성으로 인해 슬럼프도 다른 배합에 비해 크게 저하된 것을 알 수 있다. LMC 배합은 별도의 혼화제를 첨가하지 않았다. 라텍스에는 원래 계면활성제가 들어 있으며, 또한 과도한 공기량 발생을 억제하기 위해 소포제도 같이 포함되어 있기 때문이다. LMC 배합에서는 슬럼프와 공기량이 22cm, 7.7%로 다른 배합에 비해 크게 나타났다. 본 배합에서는 C5S1과 LMC를 제외하고 공기량이 5~7% 사이를 나타내어 교면포장용 콘크리트의 배합기준을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 6. Test Results of Mixtures

Type	HRWR, %	AE, %	Slump, cm	Air Content, %
C0	1	0.2	12.0	5.6
C4	1	0.3	7.0	5.6
C8	1	0.4	16.0	5.7
C12	1	0.5	11.5	5.9
C5S1	1	3.0	2.5	3.4
Plain	1	0.1	6.0	6.9
SFC	1	0.1	13.5	6.8
LMC			22.0	7.7

### 3.2. 압축강도실험 결과

압축강도실험은 재령 7일, 28일, 56일, 90일에 측정

되었다. Fig. 2, Fig. 3은 각 배합별 압축강도 실험결과를 나타내고 있다. 압축강도 실험결과, 삼성분계 시멘트 콘크리트의 경우 재령 7일에 최소 36MPa 이상을 나타내었으며, 재령 90일에는 60MPa 이상을 나타내어, 강도발현 특성이 우수한 것으로 나타났다. 특히 재령 7일에는 Plain과 SFC 배합보다 압축강도가 작게 나타났으나, 재령 28일 이후 C12 배합을 제외하고 그 이상을 나타내었는데, 이는 플라이애시와 슬래그의 포졸란 반응에 의한 장기강도 증진효과 때문인 것으로 판단된다. C5S1 배합은 재령 90일에 압축강도가 70MPa 이상을 나타내었으며, 전체적으로 강도특성이 가장 우수한 것으로 평가되었다.

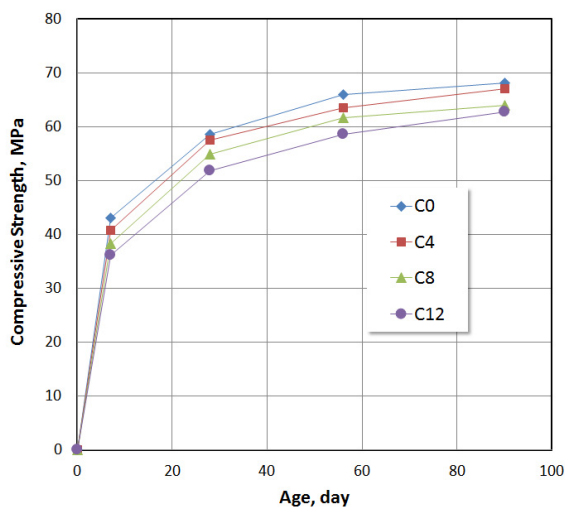


Fig. 2 Test Results of Compressive Strength (1)

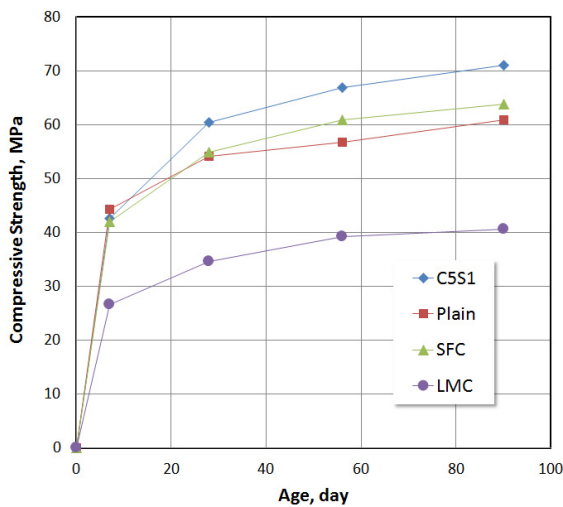


Fig. 3 Test Results of Compressive Strength (2)

또한 팽창제 치환율이 증가함에 따라 압축강도가 일정하게 감소하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 시멘트

의 일부분을 치환하여 첨가된 팽창제가 콘크리트 경화체의 팽창을 유도하기 위해 에트링자이트를 형성하게 되는데, 이 에트링자이트가 시멘트 수화반응에 의해 생성되는 칼슘실리케이트수화물에 비해 강도가 작기 때문인 것으로 판단된다. 또한 C5S1 배합의 경우 C4 배합보다 압축강도가 크며, C0 배합과 유사한 강도를 나타내는 것으로 보아, 수축저감제의 첨가가 압축강도에 일정부분 긍정적인 영향을 줄 수 있다고 볼 수 있으나, 다른 배합에 비해 상대적으로 공기량이 작은 것이 더 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

LMC는 낮은 물-시멘트비에 비해 압축강도가 상당히 작게 나타났다. 특히 Plain 배합에 비해 압축강도가 약 35% 정도 작게 나타났다. 특히 라텍스를 첨가할 경우, 연행공극의 크기가 일반 콘크리트에 비해 크게 나타나며, 라텍스에 의해 시멘트 페이스트 사이에 형성된 필름막이 강도를 저하시킨 것으로 판단된다. 물론 라텍스는 콘크리트 내부의 필름막을 형성하여 투수저항성 향상 및 내구성을 향상시키며, 특히 계면에 부착강도를 증진시키는 장점은 있다.

### 3.3. 염소이온침투저항성 실험결과

염소이온침투저항성 실험은 재령 56일, 90일에 측정되었다. Fig. 4는 염소이온침투저항성 실험결과를 나타내고 있다. 실험결과, Plain 배합의 경우 재령 56일에 약 3,900 쿨롱, 재령 90일에 약 2,000 쿨롱 정도의 '보통' 등급으로 나타났다. 이에 반해 삼성분계 시멘트 콘크리트는 C0 배합을 제외하고 재령 56일 이후에 통과전하량이 1,000 쿨롱 이하로 '매우 낮음' 등급을 나타내어 투수저항성이 우수한 것으로 평가되었다. 또한 C0 배합의 경우에도 재령 90일 이후에는 '매우 낮음' 등급을 나타내었다. 이는 플라이애시와 슬래그의 포졸란 반응에 의해 콘크리트 조직을 더욱 밀실하게 하여 콘크리트의 투수저항성이 향상되었기 때문으로 판단된다. 또한 팽창제를 첨가함에 따라 통과전하량이 감소하는 것으로 나타나, 팽창제를 치환할 경우 투수저항성이 향상되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 팽창제가 반응하여 에트링자이트를 형성하는데, 이것이 시멘트 페이스트 내 pore 공간을 메워주어, 콘크리트의 투수율을 낮추어주기 때문이다. SFC 배합의 경우 삼성분계 시멘트 콘크리트 배합과 유사하게 나타났으며, 특히 재령 56일 이후 통과전하량이 1,000 쿨롱 이하로 '매우 낮음' 등급을 나타내었다. LMC 배합의 경우 재령 56일에는 '낮음' 등급을, 재령 90일 이후 통과전하량이 1,000

쿨롱 이하로 '매우 낮음' 등급을 나타내었다.

염소이온침투저항성 실험은 콘크리트 혼합물의 투수율을 평가하기 위한 간접적 지표로 많이 활용되며, 특히 배합별 통과전하량 크기를 통해 상대적 비교·평가가 가능한 실험이다. 본 실험결과를 통해 삼성분계 시멘트와 팽창제를 동시에 사용할 경우 콘크리트의 투수저항성을 크게 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

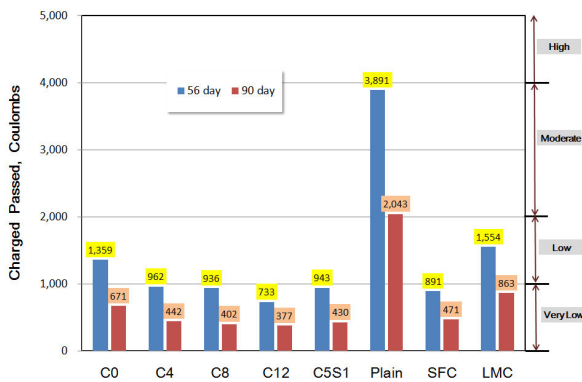


Fig. 4 Test Results of Chloride Ion Penetration Test

### 3.4. 동결융해저항성 실험결과

동결융해 실험결과, C5S1 배합을 제외하고 300 사이클까지 상대동탄성계수 90% 이상을 나타내었다. 이와 같은 결과는 대부분 모든 배합에서 동결융해저항성을 확보한 것으로 볼 수 있으며, 특히 연행공극을 충분히 확보한 것이 가장 주요한 요인인 것으로 판단된다. C5S1 배합의 경우, 120 사이클 이후 다른 배합과 달리 상대동탄성계수가 급감하였으며, 300 사이클에서 50% 이하로 나타내고 있다. C5S1 배합의 동결융해손상정도가 다른 배합에 비해 더 큰 이유는 굳지 않은 상태에서의 공기량이 다른 배합에 비해 작았기 때문이라고 볼 수 있으며, 또한 수축저감제가 첨가된 것이 또 하나의 요인일 수 있으나, 본 연구에서 정확한 원인을 분석하기에는 한계가 있다. 추후 수축저감제와 관련한 추가적인 연구가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

또한 삼성분계 시멘트 콘크리트에서 팽창제 치환율에 따른 상대동탄성계수가 거의 유사한 경향을 나타내고 있으며, 이는 팽창제의 치환율 변화가 동결융해손상에 영향을 미치지 않는 것을 의미한다. 현재까지의 결과로는 LMC 배합이 다른 배합들과 큰 차이를 나타내지는 않지만 동결융해저항성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 라텍스 입자가 시멘트 페이스트 내부에 필름막을 형성시켜 콘크리트의 내구성을 향상시

켰기 때문이며, 이것은 일반적으로 폴리머 개질 콘크리트가 일반 콘크리트에 비해 우수한 내구성을 나타내는 가장 주요한 요인이다. Fig. 5, Fig. 6은 콘크리트 배합별 동결융해 사이클에 따른 상대동탄성계수 추이를 나타내고 있다.

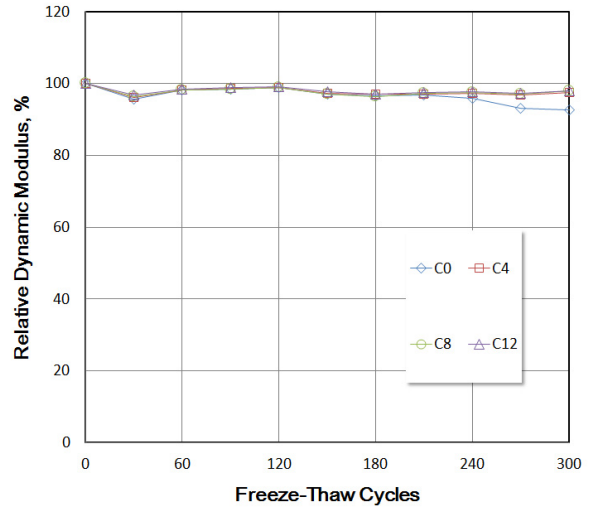


Fig. 5 Test Results of Freeze-thaw Cycles (1)

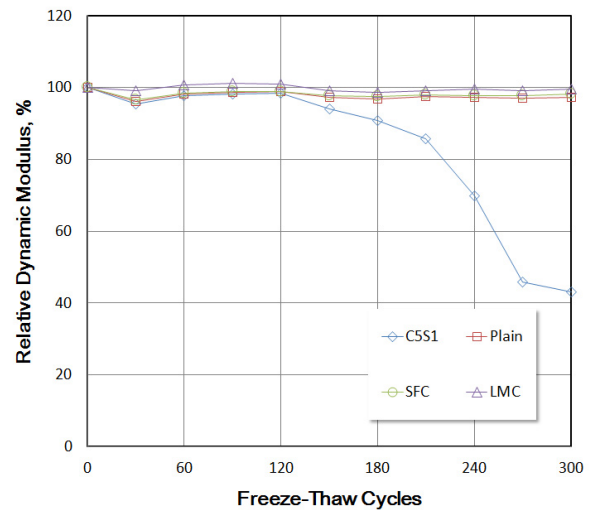


Fig. 6 Test Results of Freeze-thaw Cycles (2)

### 3.5. 표면박리저항성 실험결과

Fig. 7, Fig. 8은 동결융해 사이클에 따른 박리량 추이를 나타내고 있다. 실험결과, 모든 배합에서 Boras Method 기준 'Acceptable' 등급 이상, ASTM 기준 '2등급' 이상을 나타내어, 적정 표면박리저항성을 확보한 것으로 평가되었다. 그러나 각각의 배합별로 상당한 차이를 나타내고 있다.

플라이애시와 슬래그를 치환한 C0 배합과 Plain 배합 비교 시 상대적으로 C0 배합의 박리량이 좀 더 크게

나타났으나, 큰 차이를 보이지는 않았으며, 이에 반해 실리카흙을 첨가한 SFC 배합의 경우 상대적으로 박리량이 크게 저감되는 것으로 나타났다.

그러나 삼성분계 시멘트 콘크리트에 팽창제를 치환할 경우 박리량이 저감되어 Plain 배합보다 작은 박리량을 나타내었다. 이는 팽창제의 에트링자이트 형성이 콘크리트의 수밀성을 향상시켰기 때문인 것으로 판단된다. 이와 달리 팽창제와 수축저감제를 같이 사용할 경우 오히려 박리량이 증가하여 Plain 배합과 유사한 박리량을 나타내었다. 이와 같은 경향은 공기량 부족, 수축저감제의 존재가 콘크리트의 내구성에 영향을 미쳤을 것이라 판단되지만, 추가적인 분석연구가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

실험결과로는 LMC 배합이 가장 우수한 결과를 나타내고 있으며, 이는 동결융해 실험결과에서 분석한 바와 같이 라텍스의 필름막 형성에 기인한 것으로 판단된다. 위에서 언급한 바와 같이 모든 배합에서 적정 표면박리 저항성을 확보한 것으로 평가할 수 있다.

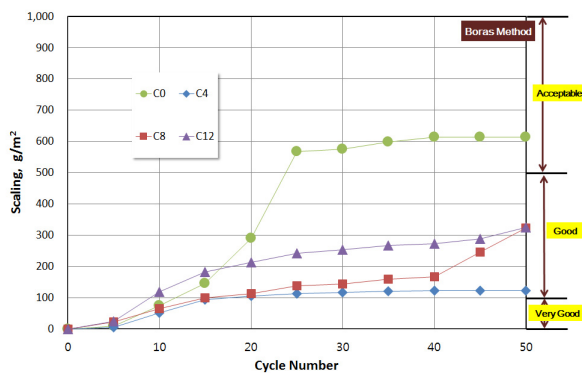


Fig. 7 Test Results of Scaling (1)

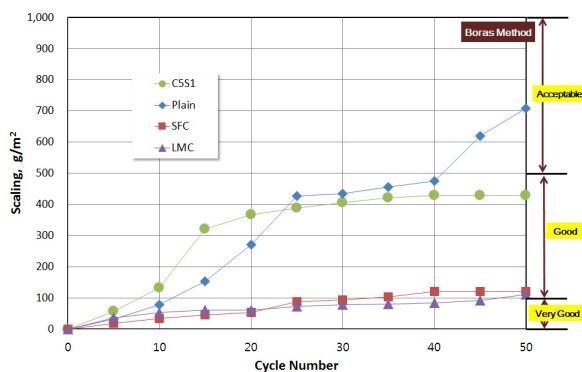


Fig. 8 Test Results of Scaling (2)

### 3.6. 자기수축 실험결과

본 연구에서는 콘크리트의 자기수축을 타설시점에서부터 40시간만 관측하였다. Fig. 9과 Fig. 10은 각 배

합별 수축·팽창 거동 추이를 나타내고 있으며, Fig. 11는 팽창제 치환율에 따른 자기수축량을 비교한 것이고, Fig. 12은 배합별 자기수축량을 비교한 것이다.

자기수축 실험결과, 팽창제 치환율이 증가함에 따라 수축량은 감소하는 경향을 나타내었으며, 팽창제 0%에서 4% 증가 시 수축량이 크게 감소하다가, 4%에서 8% 증가 시 수축량이 소폭 감소하고, 8%에서 12% 증가 시 약 300  $\mu\text{e}$  이상 팽창하는 것으로 나타났다. 특히 C8 배합의 경우 초기에 -200  $\mu\text{e}$ 까지 수축을 하다가, 11시간 이후부터 팽창거동을 하여, 40시간에는 -16.3  $\mu\text{e}$ 을 나타내어 자기수축이 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다. 또한 C12 배합의 경우 초기에 수축 경향을 보이다가 10시간 이후 팽창거동으로 전환되는데, 40시간에는 +363.7  $\mu\text{e}$ 을 나타내어 오히려 콘크리트가 전체적으로 팽창하는 특성을 나타내었다. 팽창제를 치환하지 않은 C0 배합의 경우 40시간에 -236  $\mu\text{e}$ 을, SFC 배합의 경우 -211.3  $\mu\text{e}$ 을 나타내어, 전반적으로 자기수축량이 크게 나타났다. 이는 Plain 배합보다 큰 수축량을 나타내는 것인데, 일반적으로 분말도가 높은 혼화재를 사용할 경우 자기수축량이 증가하기 때문이다. C5S1 배합의 경우 40시간에 +85  $\mu\text{e}$ 을 나타내어, C4와 C8 배합보다 수축저감능력이 우수한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 볼 때 팽창제와 수축저감제를 동시에 사용할 경우 좀 더 효과적(경제적)으로 수축을 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다. LMC 배합의 경우 자기수축량이 40시간에 -62.2  $\mu\text{e}$ 을 나타내어 상대적으로 작은 값을 나타내고 있으며, 라텍스 입자가 자기수축거동을 완화시켜주는 역할을 하는 것으로 판단된다.

자기수축 추이를 보면, C0, Plain, SFC 배합의 경우, 콘크리트 타설 후 자기수축이 시작되어 수축량 증가폭이 점점 완화되다가, 약 6시간~8시간 사이에 1차 변곡점이 발생하고, 이후 수축 기울기가 다시 커지며, 15시간 이후 수축량이 일정하게 유지되는 경향을 나타내었다.

팽창제를 치환한 배합의 경우, 콘크리트 타설 후 자기수축이 시작되어 수축량 증가폭이 점점 완화되다가, 약 5시간~7시간 사이에 1차 변곡점이 발생하고, 약 10시간~11시간 사이에 2차 변곡점이 발생하여 수축거동에서 팽창거동으로 전환되는 경향을 나타내었다. 팽창제와 수축저감제를 같이 사용한 배합의 경우, 콘크리트 타설 후 자기수축이 시작되어 일정하게 수축을 하다가, 약 6시간정도에 수축거동에서 팽창거동으로 전환되어 큰 증가폭을 보이며, 20시간 이후 팽창량 증가폭이 완화되는 경향을 나타내었다. C5S1 배합과 C8 배합의 경우

최저점(수축에서 팽창으로 전환되는 변곡점)에서 최고점의 변형률 차이는 약  $200\mu\epsilon$  정도로 거의 동일하나, C5S1배합이 C8 배합에 비해 수축저감능력이 더 우수하다는 것을 감안한다면, 팽창제와 수축저감제를 같이 사용하여 수축거동에서 팽창거동으로 전환되는 시점을 앞으로 당기는 것이 상당히 중요한 부분임을 알 수 있다. 이와 같이 자기수축 거동에서 수축저감제는 팽창거동으로 전환되는 시점을 앞으로 당겨 전체적인 수축량을 저감시키는데 효과가 있는 것으로 판단된다.

이와 같은 경향을 볼 때 팽창제의 CSA 성분이 약 6시간 전후부터 반응을 시작하여 에트링자이트를 형성하는 것으로 추정할 수 있으며, 팽창제만을 치환한 경우 이 시점에서 CSA 성분에 의한 팽창량 보다 시멘트 페이스트의 자기수축량이 더 크기 때문에 계속적으로 수축거동을 보이다가 약 10시간~11시간 이후 상대적 크기가 역전되어 팽창거동으로 전환된다고 추정된다. 이와 달리 팽창제와 수축저감제를 같이 사용한 경우, 수축저감제에 의해 시멘트 페이스트 내부에 작용하는 표면장력에 대한 저항력이 발생하고, 이에 자기수축거동을 완화시켜 팽창거동으로 전환되는 시점을 앞당겼을 것으로 판단된다.

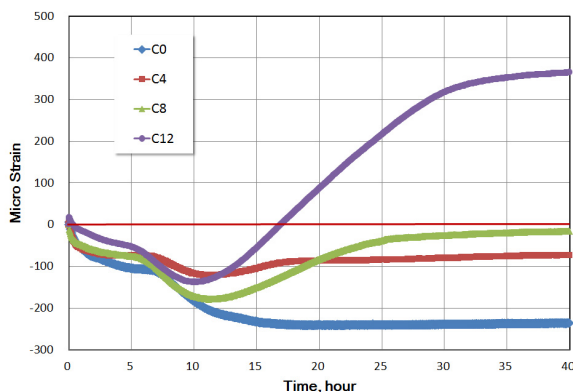


Fig. 9 Test Results of Autogeneous Shrinkage (1)

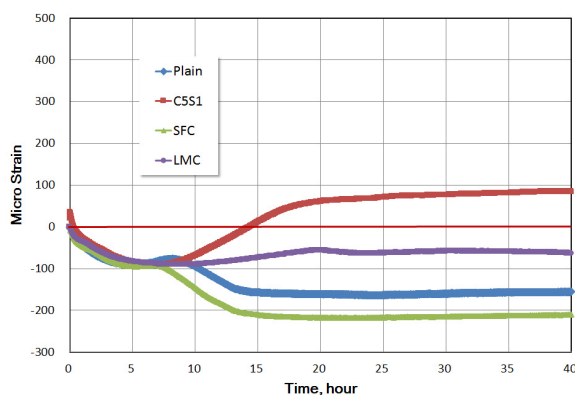


Fig. 10 Test Results of Autogeneous Shrinkage (2)

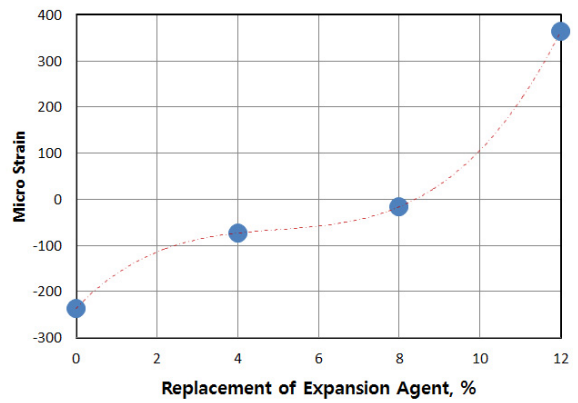


Fig. 11 Comparison of Autogeneous Shrinkage Results with Replacement of Expansion Agents

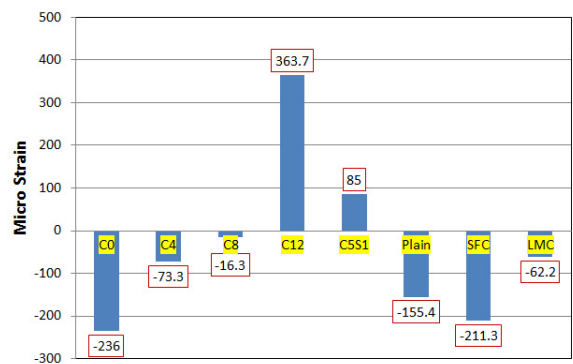


Fig. 12 Comparison of Autogeneous Shrinkage Results with Mix Designs

### 3.7. 비구속 건조수축 실험결과

비구속 건조수축 실험은 재령 80일까지만 분석되었다. Fig. 13와 Fig. 14는 비구속 건조수축 실험결과를 나타내고 있으며, Fig. 15는 재령 80일까지의 발생된 수축량을 배합별로 비교한 것이다.

그림에서 나타낸 바와 같이 Plain배합, SFC 배합, 삼성분계 시멘트를 사용한 배합에서는 건조수축 추이가 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 특히 팽창제 치환율 증가 시 수축량이 다소 증가하는 경향을 나타내었으나, 큰 차이가 아닌 것으로 판단된다. 팽창제와 수축저감제를 같이 첨가한 배합은 수축곡선의 기울기가 완만한 경향을 나타내어 전체적으로 건조수축량이 가장 작게 나타났다. 이와 같은 경향은 시멘트 페이스트 내부에 존재하는 물이 증발할 경우 페이스트 내부에 표면장력이 발생하여 수축이 발생하게 되는데, 수축저감제가 이 표면장력에 대한 저항력을 증진시켜 건조수축량을 감소시키기 때문이다. LMC 배합의 경우, 건조수축량은 가장 크게 발생하였으며, 이에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 사료된다.



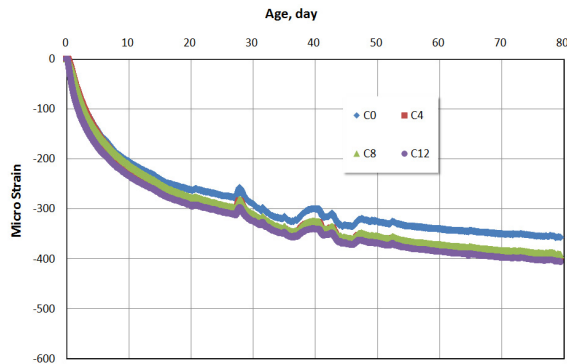


Fig. 13 Test Results of Non Restrained Drying Shrinkage Specimens (1)

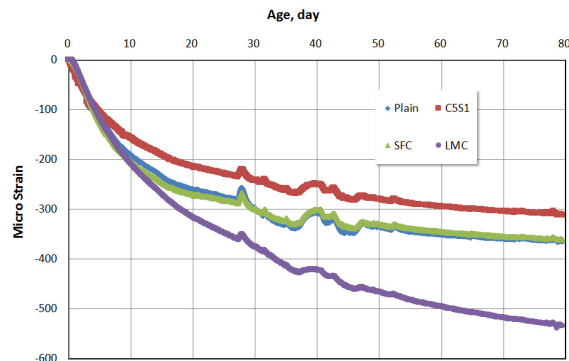


Fig. 14 Test Results of Non Restrained Drying Shrinkage Specimens (2)

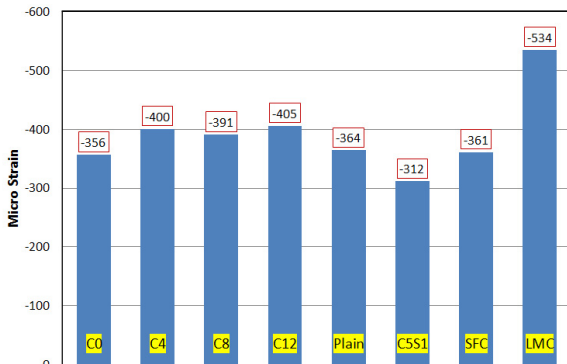


Fig. 15 Comparisons of Non Restrained Drying Shrinkage Specimens at 80 days

### 3.8. 구속 건조수축 실험결과

본 실험은 삼성분계 시멘트를 사용하고 팽창제 0%, 4%, 8%를 첨가한 배합에 대해서만 실시하였다. Fig. 16은 구속 건조수축 실험결과를 나타내고 있다. 이 그림은 콘크리트 시편을 구속하기 위해 설치된 안쪽 Ring에 부착된 철근 변형률의 추이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 콘크리트의 건조수축에 의해 Ring이 압축응력을 받아 변형률이 계속 감소하는 추이를 나타내고 있다.

압축변형률이 '0'으로 회복된다면, 콘크리트에 균열이 발생한 것으로 추정할 수 있다. 분석결과, 팽창제를 치환하지 않은 C0 배합에서 재령 44일 만에 균열이 발생하였으며, 이는 국내 교면포장 내구성품질기준(재령 56일까지 균열발생 허용안함)을 만족시키지 못하는 것이다. C4와 C8 배합은 56일까지 균열이 발생하지 않아, 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 이와 같이 팽창제를 치환하지 않은 배합에서만 건조수축균열이 발생하였다는 것은 팽창제가 콘크리트의 전체적인 수축을 저감시키는데 효과가 있다는 것을 반증하는 것이다. 팽창제는 초기에 콘크리트의 팽창을 유도하여 상대적으로 수축량을 저감시키는 효과가 있으며, 본 결과를 볼 때 결합재 양에 4% 이상 첨가 시 수축균열 저항성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

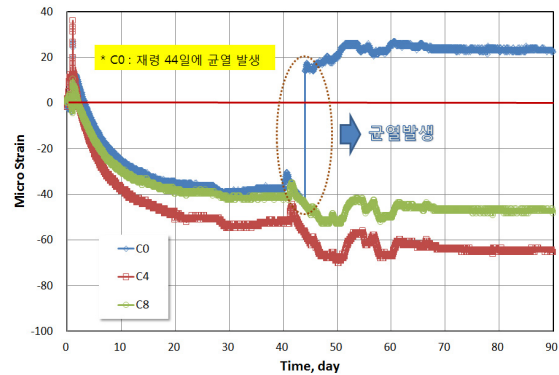


Fig. 16 Test Results of Restrained Drying Shrinkage Specimens

## 4. 결론 및 요약

본 연구에서는 고분말도 혼화재를 이용한 삼성분계 시멘트 콘크리트의 교면포장 적용기술 개발을 위해, 국내·외 현황 및 문제점을 분석하고, 이를 토대로 제기된 문제점을 해결하기 위해 고분말도 플라이애시와 슬래그를 치환한 삼성분계 결합재를 기본으로, 팽창제와 수축저감제 치환율에 따른 콘크리트의 성능을 내구성과 균열을 발생시키는 수축에 대하여 평가하였다. 또한 이를 비교하기 위해 Plain, SFC, LMC 배합에 대한 성능도 평가하였다.

Plain 배합 대비 전체적으로 가장 우수한 배합으로 평가된 것이 C4, C8, C12 배합이다. 이들 배합의 경우 비구속 건조수축 실험에서 Plain 배합에 비해 수축량이 좀 더 크게 측정되었으나, 그 차이가 크지 않으며, 상대적으로 자기수축에서 일정부분 보상되고, 구속 건조수축 실험에서도 팽창제 치환 시 균열이 발생하지 않은 것

으로 보아, 수축거동에 대한 안정성이 충분할 것으로 판단된다. 그러나 팽창제를 치환하지 않은 삼성분계 시멘트 콘크리트 C0 배합은 수축거동측면에서 단점이 부각되었으며, 특히 구속 건조수축 실험에서 재령 44일만에 균열이 발생하여 기준을 만족시키지 못하였다.

C5S1 배합의 경우 수축거동특성에서는 우수한 특성을 나타내고 있으나, 공기량 기준을 만족하지 못하는 부분, 동결융해손상을 상대적으로 더 크게 받는 점이 단점으로 부각되었으며, 추가적인 연구를 통해 수축저감제에 대한 매커니즘 규명과 배합성능 개선가능 여부를 평가해야 할 것으로 판단된다.

SFC 배합의 경우 전반적으로 우수한 성능을 나타내었으며, 수축거동측면에서 C0 배합과 유사한 성능을 나타내어, 구속건조수축을 평가한다면 균열 발생 가능성이 있을 것으로 추정된다.

LMC 배합의 경우 또한 전반적으로 우수한 성능을 나타내고 있으나, 건조수축량이 상대적으로 큰 것이 단점으로 부각되었다. 그러나 LMC 배합은 동결융해저항성, 표면박리저항성에서 가장 우수한 성능을 나타내었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(2013-0101-1-1) 재원으로 수행되었습니다.

#### References

French, C., L. Eppers, L. Quoc, and J.F. Jajjar(1999), "Transverse Cracking in Concrete Bridge Decks", *Transportation Research Record 1688*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., PP 21-29.

Henry G. Russell(2004) "NCHRP Synthesis 333:Concrete Bridge Deck Performance", pp19-24.

Joao Feiteira, Maria S. Ribeiro(2013), "Ploymer Action on Alkali-Silica Reaction in Cement Mortar", *Cement and Concrete Research 44*, pp97-105.

Kochanski, T., J. Parry, D. Pruess, L. Schuchardt, and J. Zeihr(1990), "Premature Cracking of Bridge Decks Study", Wisconsin Department of Transportation, Madison.

Krauss, P.D. and E.A.Rogalla(1996), "NCHRP Report 380 : Transverse Cracking in Newly Constructed Bridge Decks", Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp126.

Miller, G.G. and Darwin(2000), "Performance and Constructability of Silica Fume Bridge Deck Overlays", *SM Report No 57*, University of Kansas Center for Research, Inc., Lawrence, pp423.

P.Benson Shing and Naser Abu-Hejleh(1999), "Cracking in Bridge Decks : Cause and Mitigation", CDOT-DTD-R-99-8, pp3-12.

Schmitt, T.R. and D. Darwin(1995), "Cracking in Concrete Bridge Decks", *SM Report No.39*, University of Kansas Center for Research, Inc., Lawrence, pp152.

Sung-IL Jeon, Jeong-Hee Nam, Jin-Beom Lee, Soo-Ahn Kwon(2009), "Physical Property of Ternary Blend Concrete Using Finely-Ground Fly Ash and Finely-Ground Granulated Blast Furnace Slag", *13th REEAA Conference*.

Yunping Xi et al (2003), "Assessment of The Cracking Problem in Newly Constructed Bridge Decks in Colorado", CDOT-DTD-R-2003-3, pp23-25.

(접수일 : 2013. 9. 3 / 심사일 : 2013. 9. 4 / 심사완료일 : 2013. 10. 7)