



# 팽창재 및 수축저감제를 이용한 PSC 교량용 3성분계 그라우트의 수축특성 평가

원천봉<sup>1)</sup> · 안기홍<sup>2)</sup> · 류금성<sup>2)</sup> · 고경택<sup>2)</sup> · 윤영수<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>고려대학교 건축사회환경공학부 <sup>2)</sup>한국건설기술연구원 구조융합연구소

## Evaluating Shrinkage Characteristic of Ternary Grout for PSC Bridge Using Expansive Additive and Shrinkage Reducing Agent

Tian-Feng Yuan<sup>1)</sup>, Gi-Hong An<sup>2)</sup>, Gum-Sung Ryu<sup>2)</sup>, Kyoung-Taek Koh<sup>2)</sup>, and Young-Soo Yoon<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 02841, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 10223, Rep. of Korea

**ABSTRACT** This paper reports on analyzing the free and restrained shrinkage characteristic of ternary grout used cementitious admixture. In this study, the cementitious admixture was used such as fly ash, zirconia silica fume by combination of expansive additive (a, b) and shrinkage reducing agent. And a number of basic performance tests were conducted to investigate bleeding, volume change, fluidity and compressive strength behavior. According to the results, within appropriate mixing ratio, even the fluidity is not influenced by expansive additive and shrinkage reducing agent, the resistant properties of bleeding, volume change, shrinkage and compressive strength are increased. Comparing with plain grout, the free shrinkage reduced by a minimum of 29% which specimens are added expansive additive and shrinkage reducing agent. The combination of expansive additive a and shrinkage reducing agent is the most effective for reduction of shrinkage. And increasing the mixing ratio of expansive additive and shrinkage reducing agent extended cracking time. Nevertheless, combined addition of expansive additive a 2.0% and shrinkage reducing agent 0.50% has best shrinkage reduction behavior and not appeared cracking. From the above, the mixing ratio of 2.0% of expansive additive a and 0.50% of shrinkage reducing agent is high performance ternary grout for PSC bridge.

**Keywords** : ternary grout, shrinkage cracking, expansive additive, shrinkage reducing agent

### 1. 서 론

PSC (prestressed concrete) 교량용 그라우트(Grout)는 덕트(Duct) 외부 콘크리트와 텐던(Tendon)의 부착력을 확보하고 삽입된 텐던을 염화물과 같은 외부의 유해한 물질로부터 보호하기 위하여 사용된다. 국외에서는 PSC 구조물의 부식피해 사례들이 이미 다수 보고되고 있으며, 이를 통해 구조물의 사용수명이 그라우트의 품질과 충전성 문제로 인한 텐던의 부식과 직접적인 연관이 있음을 확인하였다.<sup>1-3)</sup> 또한, 긴장재의 경우 기존의 철근과는 달리 응력부식(Stress corrosion)의 형태인 수소취화 현상에 의해 부식되며 녹물이나 균열과 같은 시각적인 경고 없이 취성적으로 파괴되기 때문에 매우 위험하다. 이렇듯 그라우트의 고품질화는 PSC 구조물의 내

구수명 확보에 중요한 기술이다.

PSC 교량의 내구성 저하는 그라우트의 충전불량에 의한 것으로 인지되고 있으나, Yoo et al. (2015)은 국내 현장에서 흔히 사용하고 있는 배합(물-시멘트 비 0.4, 팽창재 1.0%)은 과대한 블리딩(Bleeding)이 발생할 뿐만 아니라 텐던 구속에 의한 구속수축균열이 발생하였다고 제시하였다. 이러한 수축 균열은 공기, 물, 염화물질 등의 유해물질의 통로가 되므로 텐던에 부식을 초래할 수 있으므로, PSC 구조물에서 블리딩 및 침하에 의한 그라우트의 충전 불량만이 내구성 저하 요인이 아니라, 수축 균열에 의한 영향도 반드시 고려해야 한다고 제시하였다.<sup>4)</sup>

그러므로, 본 연구에서는 물-결합재비(W/B)를 30%로 제한하고, 결합재는 보통 포틀랜드 시멘트에 플라이 애쉬, 지르코늄 실리카 폼 등 혼화제를 활용한 3성분계 고품질 그라우트에 대하여, 자유수축 및 구속수축 등 수축특성에 미치는 팽창재 및 수축저감제의 영향을 분석함으로써, 블리딩 및 수축균열 저항성이 우수한 고품질 그라우트 배합을 선정하고자 한다.

\*Corresponding author E-mail : ysyoon@korea.ac.kr

Received December 1, 2015, Revised May 22, 2016,

Accepted July 21, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구에서는 그라우트의 블리딩량을 저감하기 위해 W/B는 30%로 제한하고, 예비실험을 통하여 가장 양호한 성능을 발휘하는 플라이 애쉬와 지르코늄 실리카폼을 병용 사용한 3성분계 그라우트를 플레인 배합으로 선정하였다. 이에 팽창제 a 혼입률 1.0, 2.0%의 2수준, 팽창제 b 혼입률 0.25, 0.50%의 2수준, 수축저감제 혼입률 0.25, 0.50%의 2수준으로 변화시켜 병용함으로써 총 7배치를 실험 변수로 계획하였는데, 단위시멘트량에 대한 비율로 치환하여 사용하였다. 그라우트의 배합상세는 Table 1과 같고, 각 그라우트 변수에 대하여 유동성, 블리딩, 체적변화량, 압축강도(재령 7, 28 일), 수축(자유수축, 구속수축) 등 실험계획 하였다.

본 연구의 사용재료로서, 국내산 보통 포틀랜드 시멘트와 플라이 애쉬를 사용하였고 지르코늄 실리카폼은 호주산을 사용하였다. 팽창제 a는 일본산 CSA계(Table 3), 팽창제 b는

Table 1 Mix proportion

Specimens	W/B (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )		EA-a (%)	EA-b (%)	SRA (%)	SP (%)
		Binder	Water				
0.0E-0.0R	30	1620	486	-	-	-	0.50
1.0E-0.25R				1.0	-	0.25	0.50
1.0E-0.50R					-	0.50	0.50
2.0E-0.25R				2.0	-	0.25	0.50
2.0E-0.50R					-	0.50	0.50
1.25E-0.50R				1.0	0.25	0.50	0.55
1.50E-0.50R					0.50		0.55

\*Binder: cement, fly ash, silica fume

Table 2 The physical properties of materials

Material	Principal properties
Cement	Type : ordinary portland cement Density: 3.15 g/cm <sup>3</sup> Blaine: 3413 cm <sup>2</sup> /g
Fly ash	Density: 2.13 g/cm <sup>3</sup> Blaine: 3669 cm <sup>2</sup> /g
Ziricania silica fume	Type: white amorphous powder Specific gravity: 2.5 Density: 0.2-0.3 g/cm <sup>3</sup>
Super plasticizer	Type: free-flowing powder Density: 0.7 g/cm <sup>3</sup>
Expansive additive a	Type: white powder Density: 2.90 g/cm <sup>3</sup>
Expansive additive b	Type: grey powder Density: 2.61 g/cm <sup>3</sup>
Shrinkage reducing agent	Type: white powder Specific gravity: 3.16

Table 3 The chemical composition of expansive additive a

Types	CaSO <sub>4</sub>	3CaO·3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CaSO <sub>4</sub>	CaO
Expansive additive a	45~55	25~35	15~25

Table 4 The chemical composition of Cemete and expansive additive b

Types	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>	L.O.I.
Cement	21.0	6.4	3.1	61.3	3.0	2.3	1.4
Expansive additive b	33.1	8.8	1.7	26.1	1.3	1.9	19.9

국내산 팽창성 그라우트제(Table 4), 수축저감제와 고성능 감수제는 국내산을 사용하였다(Table 2).

### 2.2 실험방법

본 연구에서는 유럽규정 EN 445에 따라 그라우트의 유동성(Fluidity), 블리딩(Bleeding) 및 체적변화량(Volume change)을 측정하였다. 즉 유동성 실험은 그라우트를 배합한 후 첫 실험을 수행하고 30분이 지난 후 다시 실험을 수행하였다. 또한 블리딩 실험은 텐던을 삽입한 상태에서 실험을 수행하도록 되어 있고, 그라우트 타설 시부터 첫 1시간은 15분씩 블리딩량 및 체적변화량을 측정하고, 그 후 2시간, 3시간, 24시간 간격으로 각각 측정하였다. 그라우트 압축강도는 40×40×160 mm의 직사각형 공시체를 EN 196-1에 따라 제작 및 양생한 후 재령 7일, 28일에 실험을 수행하였다. 각 실험 결과는 Table 5를 만족하여야 하였다.

또한 그라우트의 수축/팽창실험은 국외에서 블리딩 및 수축/팽창 측정하는 기준 EN 445을 참고하여 실제 PSC 구조물에 사용되는 텐던 및 덕트를 모사하여 실험하였다(Fig. 1, 2). 그라우트의 침하 및 블리딩이 수축에 미치는 영향을 최소화하고, 충분한 구속길이를 확보하기 위하여 텐던의 길이를 총 2100 mm로 제작하고, 펌프로 시편 하단에서 그라우트를 주입하여 실험을 수행하였다. 텐던과 덕트의 직경은 도로설계편람(2010)에서 제시한 최대 텐던-덕트 면적비 0.45를 선택하였고, 이에 대응하는 텐던 ø12.7 1가닥과 ø19의 덕트

Table 5 Test requirements of BS EN 445

Test methods	Requirements
Spread test	1) a0 ≥ 140 mm 2) 0.8a0 ≤ a30 ≤ 1.2a0 and a0 ≥ 140 mm
Bleeding test (wick induce)	0.3%@3 hours
Volume change (wick induce)	-1~+5%@24 hours
Compressive strength	≥ 27 MPa@7 days ≥ 30 MPa@28 days

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 그라우트의 기본재료 특성

##### 3.1.1 그라우트 유동성 실험

Table 6은 수축저감제 및 팽창제 혼입률 변화에 따른 그라우트의 유동성 실험 결과이다. 그라우트 모든 변수들에 대하여 믹스 후 측정 시 150 mm 이상의 플로우를 만족하도록 고성능 감수제 혼입량을 현장에서 조절을 수행하였다. 전반적으로, 동일한 고성능 감수제 0.50%를 혼입한 모든 변수들은 규정 EN 445에서 제안한 기준을 만족하였고, 혼화제를 혼입한 변수들은 0.0E-0.0R 변수에 비해 유동성이 떨어졌다. 이는 모든 혼화제는 분체로 구성되어 기인한 것으로 사료된다. 특히 수축저감제의 혼입률이 증가할수록 유동성이 감소하는 반면 팽창제의 혼입률이 증가할수록 다소 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

##### 3.1.2 그라우트 블리딩 실험

Fig. 4는 팽창제 a 및 수축저감제 혼입률별 재령 경과에 따른 블리딩 거동을 나타낸 것이고, Fig. 5는 재령 경과에 따른 체적변화량 거동이다. 플레인 변수 0.0E-0.0R은 재령 3시간 경과 후 0.92%의 과대한 블리딩량과 -1.06%의 체적변화량으로 유럽기준을 만족하지 못하였다. 이는 지르코늄 실리카 폼의 대표적 불순물인 Carbon과 Alkalirk가 적은 것과 미세한 분말 입자간 뭉침현상이 적어 블리딩량이 많은 것으로 판단된다.<sup>8)</sup>

Fig. 6은 수축저감제 0.50%에 팽창제 a와 팽창제 b를 동시에 혼입하여 재령 경과에 따른 블리딩 거동을 나타낸 것이고, Fig. 7은 재령 경과에 따른 체적변화량 거동이다. 팽창제 b의 혼입률이 증가할수록 블리딩 및 체적 팽창량이 증가함

Table 6 Result of grout spread test

Specimens		After mixing (mm)	After 30 min (mm)	Remarks
0.0E-0.0R	x-axis	160	192>150>128	OK
	y-axis	165	198>150>132	OK
1.0E-0.25R	x-axis	153	184>140>122	OK
	y-axis	155	186>140>124	OK
1.0E-0.50R	x-axis	150	180>140>120	OK
	y-axis	150	180>140>120	OK
2.0E-0.25R	x-axis	168	201>145>134	OK
	y-axis	168	201>150>134	OK
2.0E-0.50R	x-axis	160	192>145>128	OK
	y-axis	165	198>145>132	OK
1.25E-0.50R	x-axis	155	186>140>124	OK
	y-axis	155	186>140>132	OK
1.50E-0.50R	x-axis	165	198>140>132	OK
	y-axis	170	204>145>136	OK

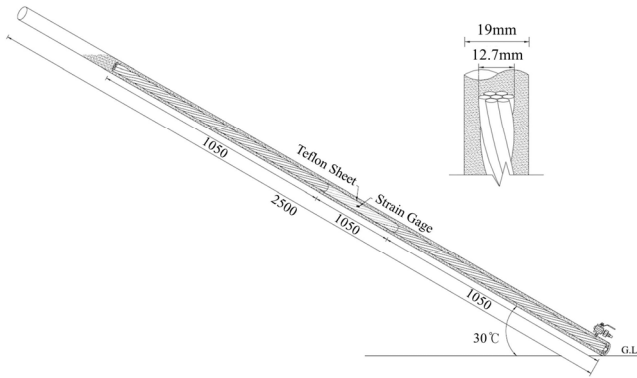


Fig. 1 Free shrinkage test equipment

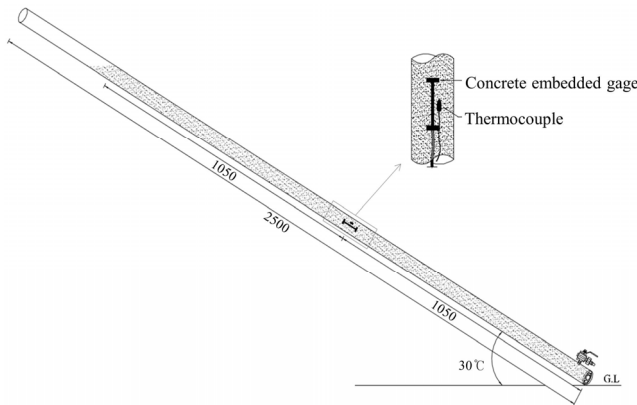


Fig. 2 Restrained shrinkage test equipment

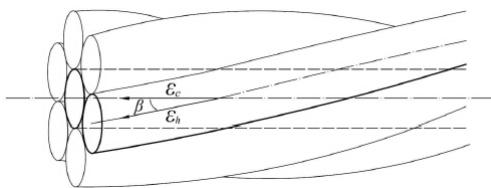


Fig. 3 Schematic description of seven-wire strand

(PVC파이프)를 사용하여 자유수축/팽창 및 구속수축/팽창 실험을 수행하였다.<sup>5)</sup> 이는 그라우트의 수축/팽창 실험에서 텐던의 개수에 따른 변형률의 차이는 텐던 개수의 영향을 받지 않고 미미한 것으로 나타났기에 1가닥을 사용하여 실험을 수행해도 무방하다고 제시되어있다.<sup>6)</sup>

$$\epsilon_c = \frac{1}{\cos^2 \beta} \epsilon_h \quad (1)$$

본 연구에서는 7-wired 텐던을 사용하여 실험을 수행하였다. 7-wired 텐던의 경우 중심에 1가닥의 텐던을 주변에 6가닥의 텐던이 감싸고 있는 형태이며(Fig. 3), 따라서 축방향 변형률을 산정하기 위해서는 다음의 식 (1)을 이용하여 측정된 변형률을 보정해주어야 한다.<sup>7)</sup> 여기서,  $\epsilon_c$ 는 중앙부 와이어의 변형률이며,  $\beta$ 는 축방향을 기준으로 한 주변와이어의 각도,  $\epsilon_h$ 는 주변 와이어의 변형률이다.

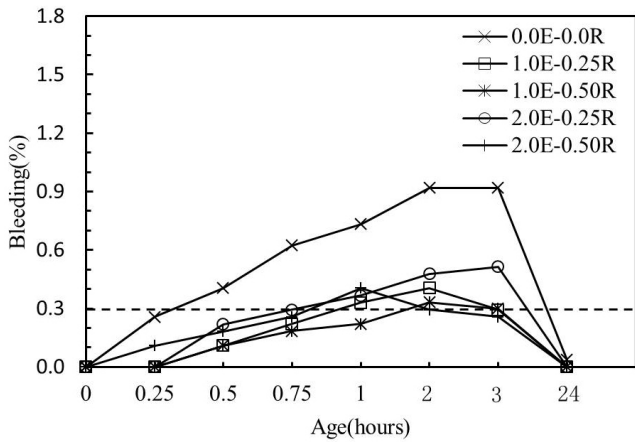


Fig. 4 Bleeding with contents of EA-a and SRA

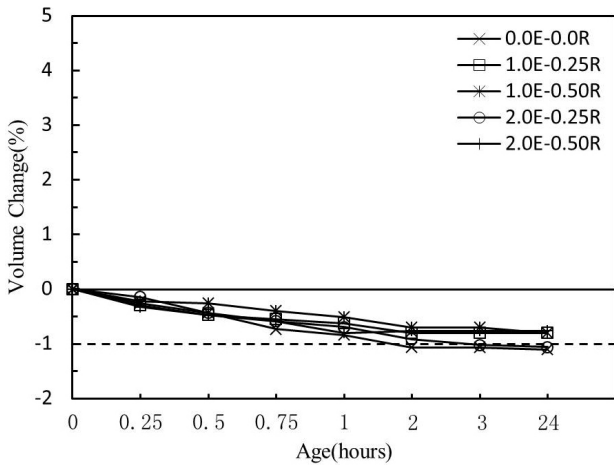


Fig. 5 Volume change with contents of EA-a and SRA

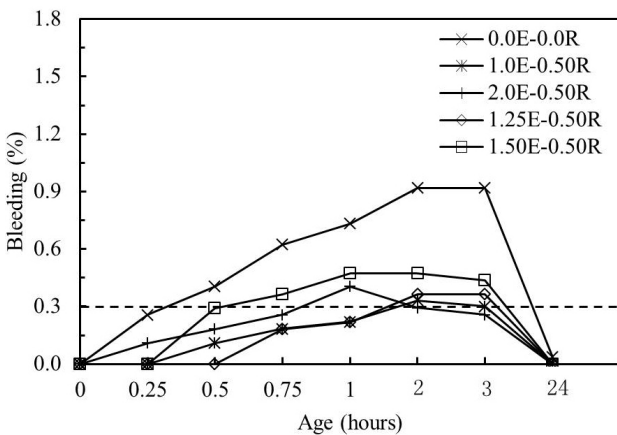


Fig. 6 Bleeding with contents of EA and SRA

을 알 수 있다. 이는 팽창재 b는 금속성 팽창재로서 극 초기 재령부터 그라우트 팽창을 유발하여 밀실구조를 형성하지 못한 것으로 판단한다. 그러나 팽창재 b를 0.50%를 혼입한 변수 1.50E-0.50R는 재령 0.5시간부터 0.6%의 팽창을 보여 줌으로써 과대한 블리딩을 위험한 부분 밖으로 밀어내었다. 이를 통해 블리딩에 의한 문제가 해결될 것으로 판단된다.

결과적으로 팽창재 a 2.0%와 수축저감제 0.50%를 병용한 변수에서 우수한 블리딩 및 체적저감 성능이 나타났다.

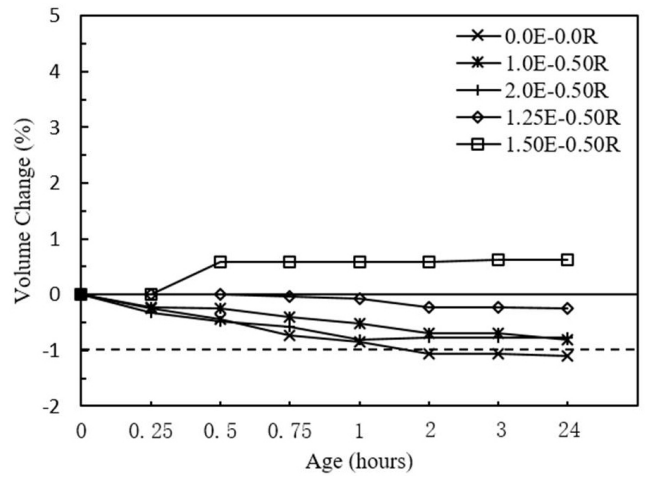


Fig. 7 Volume change with contents of EA and SRA

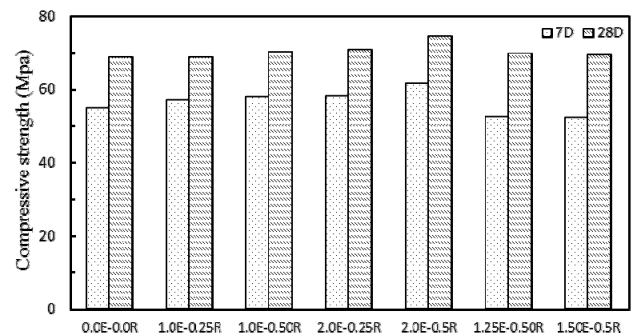


Fig. 8 Compressive strength with contents of EA and SRA

### 3.1.3 그라우트 압축강도 실험

Fig. 8 혼화제 혼입률에 따른 압축강도 실험 결과, 모든 변수들은 재령 7일에 50 MPa 이상, 재령 28일에 65 MPa 이상의 강도발현으로 유럽규정에서 제시한 재령별 28 MPa, 30 MPa를 만족하였다. 팽창재 a의 혼입률이 증가할수록 압축강도는 다소 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 팽창재 성분 중 석고( $CaSO_4$ )로 인하여 시멘트 성분 중  $C_3S$ 의 반응을 촉진시키는 것과 경화체 조직의 형성시기에 정량의 석고가 존재하여 강도발현에 유리한 조직이 형성되었기 때문으로 사료된다. 그러나, 팽창재 b를 혼입 시 강도가 저하하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 과다한 팽창제의 혼입으로 인하여 다량의 에트린자이트의 생성으로 그라우트 조직에 과도하게 팽창함으로써 강도발현에 불리한 조직이 형성되는 것에 기인<sup>9)</sup>한 것으로 분석된다.

결과적으로 팽창재 a 2.0%와 수축저감제 0.50%를 병용한 변수에서 재령 28일에 최고 강도 74.55 MPa를 타나냈다.

## 3.2 그라우트의 자유수축/팽창 특성

### 3.2.1 Time-zero 선정

본 연구에서는 온도와 습도가 일정하게 유지되는 항온·항습실에서 그라우트를 펌프를 이용하여 시편 하단에서 주입하고 수축량을 측정하였다. Fig. 9는 그라우트의 초기 수

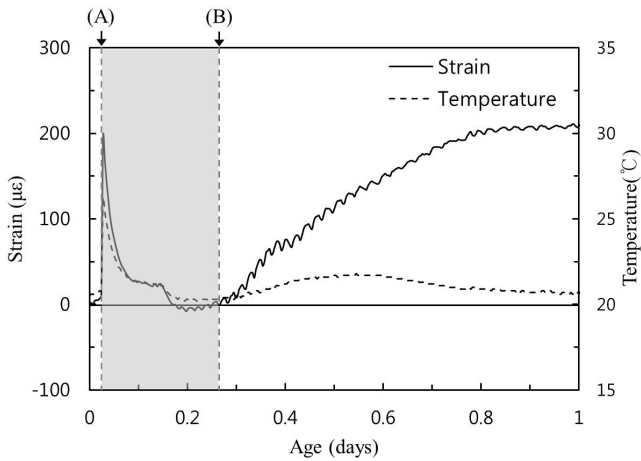


Fig. 9 Initial strain and temperature behaviors

축 및 온도 거동이다. A 점은 그라우트를 주입한 시점이다. 그라우트를 주입 후 열전대(Thermocouple)에 측정된 온도가 감소되면서 매립게이지의 변형률도 감소됨을 볼 수 있다. 이는 배합 시 그라우트의 내부 온도가 항온·항습실(20°C)의 온도보다 높기 때문이다. 시간이 지남에 따라서 그라우트의 내부온도는 항온·항습실의 온도로 감소하게 되는데, 이로 인해 매립게이지의 변형률도 감소하게 된다. 이는 그라우트의 수화반응에 의한 변형률이 아니라 배합 시 그라우트의 온도와 항온·항습실의 온도차에 의한 것이다. B 점에서부터 그라우트가 수화반응을 시작하면서 수화열을 생성한다. 이로 인해 Thermocouple에서 측정된 온도와 매립게이지의 변형률 모두 증가하게 된다. 그러므로 B 점 이전의 데이터는 그라우트의 수축 균열에 영향을 미치지 않으며, 따라서 수축 균열을 평가하는데 필요하지 않은 데이터이다.

그러므로 본 연구에서는 영점(Time-zero)은 B 점으로 하여 그라우트의 수축/팽창을 측정하여, 수축 균열에 영향을 미치는 정확한 그라우트의 수축/팽창 변형률을 평가하였다.

### 3.2.2 혼화제 혼입률에 따른 거동

팽창제 및 수축저감제 혼입률별 재령 경과에 따른 초기 온도 거동을 통하여, 팽창제와 수축저감제의 혼입률이 증가할수록 그라우트를 타설한 후 활발한 수화반응이 일어나는 시간이 지연됨을 알 수 있으나 최고 온도는 다소 큰 차이가 없었다. 팽창제와 수축저감제 혼입률에 따른 최고 온도 값은 각각 21.9, 21.8, 22.0, 21.7, 21.8, 21.8, 21.7°C이다.

Fig. 10은 팽창제 및 수축저감제 혼입률별 재령 경과에 따른 자유수축/팽창 거동이다. 변수 0.0E-0.0R에서는 활발한 수화반응이 시작하는 동시에 급격한 수축거동을 보여주었으며, 재령 22일에 수축량은 -510 µm이 나타났다. 이에 비해 팽창제와 수축저감제를 혼입한 변수들은 최소 29% 이상의 수축저감 특성을 나타냈다. 특히 수축저감제의 혼입률이 증가할수록 수축저감 성능이 우수하게 나타났으며 재령 경과에 따라 다소 완만한 수축거동을 나타냈다. 이는 수축저감제가 그라우트 내부 모세관수의 표면장력을 저감하였기 때문으로 판단된다. 또한 팽창제 a의 혼입률이 증가할수록 활

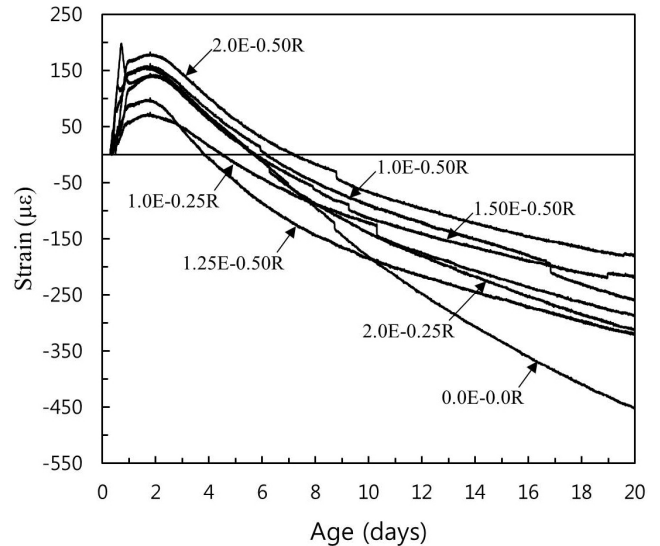


Fig. 10 Free shrinkage strains of grout with contents of EA and SRA

발한 수화반응의 진행과 동시에 팽창량이 증가하였는데, 이는 팽창제의 주요성분인  $CaSO_4$ 와  $C_3A$ 의 수화반응으로 에트린자이트가 생성되어 팽창을 일으켰기 때문인 것으로 판단된다. 팽창제 b는 그라우트가 굳지 않는 상태에서 팽창을 유발하였기에 팽창제 a만 혼입한 변수와 다소 차이 없이 유사한 거동을 나타냈다.

### 3.3 그라우트의 구속수축/팽창 특성

Fig. 11은 팽창제 및 수축저감제 혼입률별 재령 경과에 따른 구속수축/팽창 거동이다. 변수 0.0E-0.0R은 그라우트를 타설 후 재령 0.9일에 덕트 내부 그라우트가 텐던의 구속에 의하여 구속균열이 발생하였다. 이는 그라우트가 수화반응이 활발하게 진행하면서 일정한 강도가 발휘되었으나 재령 0.7일부터 급격한 수축이 발생하면서 그라우트가 텐던의 구속에 의하여 수축균열이 발생하였음을 알 수 있다. 팽창제 및 수축저감제 혼입률이 증가할수록 구속수축저감 성능이 우수해졌음을 알 수 있는데, 이는 수축저감제의 혼입률이

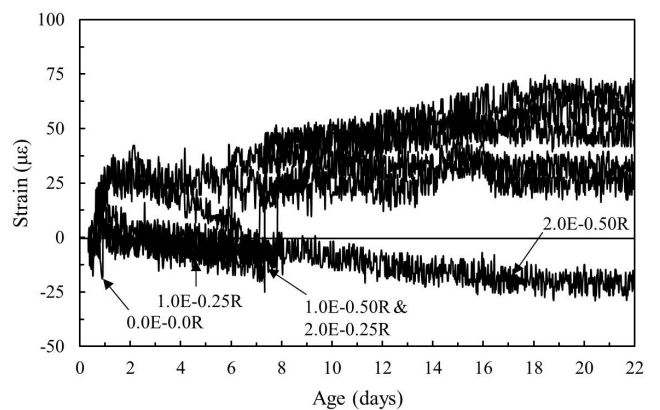
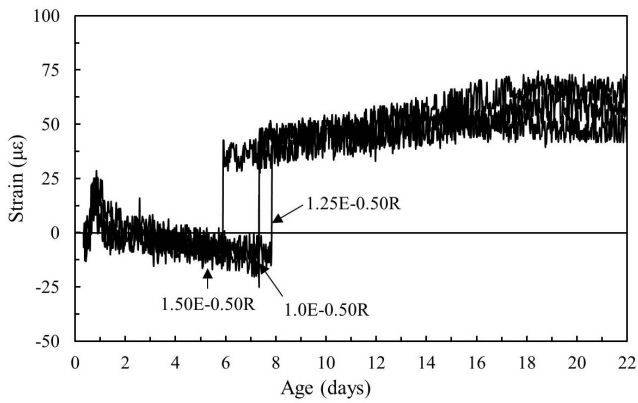


Fig. 11 Restrained shrinkage strains of grout with contents of EA a and SRA



**Fig. 12** Restrained shrinkage strains of grout with contents of EA (a&b) and SRA

증가할수록 그라우트 내부 모세관수의 표면장력을 저감하여 완만한 수축거동을 가지고 있기 때문(Fig. 10)에 수축균열이 뒤늦게 발생함을 알 수 있다.

또한 팽창제 a의 혼입률이 증가 할수록 구속수축균열이 후기에 발생함을 알 수 있다. 이는 초기 재령에서 팽창제의 혼입으로 시멘트 성분 중  $C_3S$ 의 반응을 촉진시켜 우수한 강도 발현 및 에트린자이트 물질이 생성하여 초기 재령에 팽창성을 유발하였기에, 이로 인하여 그라우트의 수축 균열이 후기에 발생한 것으로 사료된다. 즉 변수 1.0E-0.25R, 1.0E-0.50R 2.0E-0.25R들은 재령 5.4, 7.0, 6.4일에 수축균열이 발생하였다.

팽창제 b 0.25%, 0.50%를 혼입한 변수들은 재령 7.4, 5.3일에 텐던 구속에 의한 수축균열이 발생하였다. 팽창제 b 0.25%를 혼입한 변수는 변수 1.0E-0.50R와 다소 같은 재령에서 수축균열이 발생하였으나, 팽창제 b 0.50%를 혼입한 변수는 1.25E-0.50R에 비해 1.7일 조기에 발생하였다. 이는 금속성 팽창제 b를 추가 혼입으로 에트린자이트의 과다 생성으로 인하여 그라우트 조직이 과도하게 팽창함으로써 초기 재령 강도 발현에 불리한 조직이 형성됨으로 그라우트에 우수한 초기 강도 성능이 구성하지 않은 상태에서 과도한 수축이 발생한 것<sup>9)</sup>으로 사료된다.

그러나 유독 팽창제 a 2.0%, 수축저감제 0.50%를 혼입한 변수에서는 텐던 구속에 의한 수축균열이 발생하지 않았음을 알 수 있고 재령 20일부터 완만한 수축거동을 나타냈다. 이는 팽창제 a와 수축저감제의 중첩효과로 인한 것으로 사료된다.<sup>10,11)</sup>

#### 4. 결 론

본 연구에서는 우수한 고품질 그라우트 배합을 선정하고 자, 플라이 애쉬, 지르코늄 실리카폼을 사용한 3성분계 그라우트의 수축특성에 미치는 팽창제 a, b 및 수축저감제의 혼입률을 변화시켜 병용하여 실험을 수행하였다. 본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 그라우트의 유동성은 분체로 구성된 팽창제 및 수축저감제의 혼입으로 인하여 플레인 변수보다 다소 감소하였으나, 결과적으로 모든 변수들은 유럽규정 EN 445를 만족하였다. 또한 플레인 변수는 과대한 블리딩 및 체적변화량으로 유럽규정을 만족하지 못하였으나, 팽창제 및 수축저감제를 혼입한 변수들은 최소 블리딩 및 체적변화량을 각각 45%, 26%의 저감특성을 나타냈다. 특히 팽창제 a 2.0%, 수축저감제 0.50%를 혼입한 변수에서는 우수한 그라우트 블리딩 및 침하저감 특성을 보여 주었다.
- 2) 압축강도는 낮은 W/B와 플라이 애쉬, 지르코늄 실리카폼 혼입으로 인하여 재령 7일에 50 MPa 이상을 나타냈으며 유럽규정을 만족하였다. 결과적으로 팽창제 a 2.0%, 수축저감제 0.50%를 혼입한 변수에서 재령 28일에 최고 강도 74.55 MPa를 나타냈다.
- 3) 혼화제 혼입률별 재령 경과에 따른 자기수축은 변수 0.0E-0.0R 변수보다 최소 29%이상의 수축저감특성을 나타냈다. 팽창제 및 수축저감제의 혼입률이 증가할수록 그라우트의 수축이 감소하고 재령 22일에는 완만한 수축거동을 나타냈다. 결과적으로 플레인 변수는 -510  $\mu\epsilon$ 으로 최대 수축량을 보여 주었고 팽창제 a 2.0%, 수축저감제 0.50%를 혼입한 변수 -148  $\mu\epsilon$ 로 최소 수축량을 나타냈다.
- 4) 혼화제 혼입률별 재령 경과에 따른 구속수축은 팽창제 a 및 수축저감제의 혼입률이 증가할수록 텐던 구속에 의한 수축균열은 뒤늦게 발생하고, 팽창제 b의 혼입률이 증가할수록 극초기 팽창으로 인하여 수축균열은 조기에 발생함을 알 수 있다. 유독 팽창제 a 2.0%, 수축저감제 0.50%를 혼입한 변수에서 수축균열이 발생하지 않았다.

이상을 종합하여 볼 때, 플라이 애쉬와 지르코늄 실리카폼을 사용한 3성분계 고품질 그라우트에 대하여, 팽창제 a 2.0%, 수축저감제 0.50%를 병용하게 되면 우수한 블리딩 및 침하 저감특성과 압축강도를 얻는 동시에, 텐던 구속에 의한 수축균열을 억제하는 고품질 3성분계 그라우트 배합으로 제안한다.

#### 감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02), 한국연구재단 중견연구자지원사업(NRF-2016R1A2B3011392)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### References

1. Woodward, R., Durability of Post-Tensioned Tendons on Road Bridge on the UK, Durability of Post-Tensioning

- Tendons, Fib-IABSE Technical Report Bulletin, 2001, No. 15.
2. Rachel, G., "Bridge Tendon Failures in the Presence of Deficient Grout," News & Announcements, Ivan Lasa and Mario Paredes, 2013.
  3. Schokker, A. J., Breen, J. E., and Kreger, M. E., "Grouts of Bonded Post Tensioning in Corrosive Environments", *Journal of ACI Materials*, Vol.98, No.4, 2001, pp.296-305.
  4. Trejo, D., Pilai, R. G., Hueste, M. D., Reinschmidt, K., and Gardoni, P., "Parameters Influencing Corrosion and Tension Capacity of Post Tensioning Strands", *Journal of ACI Materials*, Vol.106, No.2, 2009, pp.144-153.
  5. Korea Road and Transportation Association (KRTA), Korea highway bridge design code, Seoul, Korea, 2010.
  6. Yoo, D. Y., Ryu, G. S., Yuan, T. F., Koh, K. T., and Yoon, Y. S., "Cracking Behavior of Posttensioning Grout with Various Strand-to-Duct Area Ratios", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.27, No.6, 2015, pp.04014197(1-9).
  7. Moon, D. Y., Zi, G. S., Kim, J. H., Lee, S. J., and Kim, G., "On Strain Change of Prestressing Strand During Detensioning Procedures", *Engineering Structures*, Vol.32, No.9, 2010, pp.2570-2578.
  8. Park, J. J., Ryu, G. S., Kang, S. T., An, G. H., Koh, G. T., and Kim, S. W., "An Experimental Study on Viscosity of UHPC according to Silica Fume Type", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.1, 2011, pp.1229-5515.
  9. Han, C. G., Han, M. C., Song, S. H., and Yoon, S., "Drying Shrinkage of Concrete Combining Expansive Additives and Shrinkage Reducing Agent", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.18, No.3, 2006, pp.397-404.
  10. Han, C. G., Kim, S. W., Koh, G. T., and Pei, Z. L., "Properties on the Shrinkage of High Performance Concrete Using Expansive Additive and Shrinkage Reducing Agent", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.15, No.6, 2003, pp.785-793.
  11. Koh, K. T., Park, J. J., Ryu, G. S., and Kang, S. T., "Shrinkage Properties of High Performance Concrete Used Expansive Additive and Shrinkage Reducing Agent", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.26, No.4, 2006, pp.787-794.

요 약 본 논문에서는 혼화제에 따른 3성분계 그라우트에 대하여 자유수축 및 구속수축에 대하여 평가하였다. 본 연구에서 3성분계 그라우트는 플라이애쉬, 지르코늄 실리카폼을 사용하였고, 팽창재(a, b)와 수축저감제 혼화제를 병용 사용하였다. 또한 유럽규정 EN 445에 따라 그라우트의 기본재료특성 실험을 수행하여 블리딩, 체적변화량, 유동성, 압축강도 실험을 수행하여 기본재료특성 거동도 분석하였다. 실험결과, 팽창재와 수축저감제 혼입률에 따라 유동성은 다소 영향은 없었으나, 우수한 블리딩 및 침하 저감성과 압축강도를 나타냈다. 자유수축 거동에서는 팽창재와 수축저감제를 혼입한 변수들은 0.0E-0.0R 변수보다 최소 29%의 수축저감성을 보여 주었다. 특히 팽창재 a와 수축저감제를 병용 사용한 변수에서는 수축 저감의 효과가 더욱 우수한 것으로 나타났으며, 혼화제의 혼입률이 증가할수록 텐던 구속에 의한 수축균열은 뒤늦게 발생함을 알 수 있었다. 그러나 유독 팽창재 a 2.0%, 수축저감제 0.50%를 혼입한 변수에서는 우수한 수축저감성으로 수축균열이 발생하지 않았다. 종합하여 볼 때, 본 연구의 실험 조건에서는 팽창재 a 2.0%, 수축저감제 0.50%인 조합이 PSC 교량용 고품질 3성분계 그라우트의 최적의 혼입률인 것으로 분석된다.

**핵심용어** : 3성분계 그라우트, 수축균열, 팽창재, 수축저감제