

혼화재 종류에 따른 PSC 교량용 그라우트의 재료특성 평가

Evaluating Material Properties of Grout for PSC Bridge According to Admixture Type

원천봉* · 류두열** · 고경택*** · 윤영수****

Yuan, Tianfeng*, Yoo, Doo-Yeol**, Koh, Kyung-Taek***, and Yoon, Young-Soo****

Abstract

This experimental study investigates material properties of prestressed concrete (PSC) grout depend on the combination of fly ash (FA), silica fume (SF) and zirconia silica fume (Zr). Based on the test results, when FA and Zr were included in grout mixtures, the fluidity, bleeding and volume change increased with less superplasticizer. The compressive strength of all grout mixtures was quite high at the age of 7 and 28 days, and the ternary mixtures had the excellent development of strength than binary mixtures. Furthermore, autogenous shrinkage properties of ternary grout combining shrinkage reducing agent (SRA) and expansive additive (EA) was evaluated. The 47~80% autogenous shrinkage was reduced by using SRA and EA. In addition, the effectiveness of using SRA and EA was higher for the grout mixture with SF than that with Zr.

Key words : PSC Grout, Bleeding, Autogenous Shrinkage, Silica Fume, Zirconia Silica Fume

요 지

본 연구에서는 플라이 애시(FA), 보통 실리카폼(SF)과 지르코늄 실리카폼(Zr)을 사용한 PSC 그라우트의 재료특성을 평가하였다. 실험결과, FA와 Zr을 사용한 그라우트 배합들은 적은 감수제 혼입량에서도 우수한 유동성을 나타냈으나, 계획된 시간에 측정된 블리딩 및 체적변화량은 증가하였다. 압축강도는 모든 그라우트 배합들에서 재령 7, 28일에 우수한 강도 발현을 나타냈고, 3성분계 그라우트 배합들은 2성분계 그라우트보다 우수한 거동을 보였다. 또한 3성분계 그라우트 배합들을 수축저감제(SRA)와 팽창재(EA)를 병용하여 자기수축 특성을 평가한 결과, SRA와 EA를 사용함으로써 자기수축을 47~80% 저감하였으며, SF를 사용한 그라우트 배합에서 효과적인 수축저감 특성을 나타냈다.

핵심용어 : PSC 그라우트, 블리딩, 자기수축, 실리카폼, 지르코늄 실리카폼

1. 서 론

그라우트는 PSC 구조물의 텐던(tendon) 부식을 방지하기 위하여 사용된다. 덕트(duct) 내부에 삽입된 텐던을 외부의 염화물과 같은 물질로부터 보호하기 위하여 덕트 내부의 그라우트가 충분히 충전되어야 하며, 블리딩, 공극 및 균열이

발생할 경우 텐던 부식 및 취성파괴가 발생할 수 있기 때문에 그 중요성이 인식되고 있다. 특히 최근 국내·외에서 PSC 구조물의 텐던 부식 피해 사례들이 다수 보고되고 있으며, 그라우트의 품질과 충전성 문제로 인한 텐던의 부식과 직접적인 연관이 있는 것으로 확인되었다(Lau et al., 2013; Koh et al., 2017).

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정(E-mail: yuantianfeng@korea.ac.kr)
Member, Ph.D. Candidate, School of Environment and Architectural Engineering, Korea University

**한양대학교 건축공학부 조교수
Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

***한국건설기술연구원 구조융합연구소 위원
Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수(Tel: +82-2-3290-3320, Fax: +82-2-928-7656, E-mail: ysyoon@korea.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, School of Environment and Architectural Engineering, Korea University

최근 국내·외에서 플라이 애시, 실리카폼, 고로슬래그 등 산업부산물물을 사용하여 그라우트를 개발하고 있다. 즉 우수한 유동성, 블리딩 및 체적변화량과 압축강도를 가진 2성분계 및 3성분계 고품질 그라우트 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 텐던 구속에 의한 구속수축 균열도 공기, 물, 염화물 등의 유해물질의 통로가 되어 텐던에 부식을 초래할 수 있으므로 그라우트의 수축실험도 수행해야 한다고 제시되어 있다(Yoo et al., 2015; Yuan et al., 2016).

따라서 본 연구에서는 플라이 애시, 보통 실리카폼과 지르코늄 실리카폼 등을 조합 사용한 2성분계 및 3성분계 그라우트의 유동성, 블리딩, 체적변화량, 압축강도와 자기수축 등 재료특성을 평가하였다. 이러한 특성을 평가하여 PSC 교량용 그라우트 재료에 대한 참고자료로 활용하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서 사용한 배합 및 실험계획은 Table 1과 같다. 본 연구에서는 국내 현장에서 흔히 사용하고 있는 배합(물시멘트 비 0.4, 팽창재 1.0%)을 플레인 배합으로 하였다. 비교 변수들의 블리딩을 저감하기 위하여 물-결합재비(W/B)를 0.3으로 고정하였고, 보통 실리카폼(silica fume, SF)과 지르코늄 실리카폼(zirconia silica fume, Zr) 2종류, 플라이 애시(fly ash, FA) 1종류, 팽창재(expansive additive, EA) 혼입률 0.0, 1.0%의 2종류, 수축저감제(shrinkage reducing agent, SRA) 혼입률 0.0, 0.5%의 2종류간에 대한 조합으로 총 7개의 변수로 실험을 계획하였다. 즉 혼화재를 사용한 2성분계와 3성분계 그라우트의 유동성(fluidity), 블리딩(bleeding), 체적변화량(volume change)과 압축강도 등을 평가하여 우수한 변수들을 선정하고, 이에 대하여 EA와 SRA를 이용한 응결 특성과 자기수축특성을 평가하였다.

Table 1. Mixture Proportions of Grout

Specimens	W/B (%)	SF (%)	Zr (%)	FA (%)	EA (%)	SRA (%)	SP (%)
0.4W/C	40	-	-	-	1.0	-	-
FA	30	-	-	10	-	-	0.5
SF		10	-	-	-	-	0.7
Zr		-	10	-	-	-	0.5
SFA		10	-	10	-	-	0.9
ZrA		-	10	10	-	-	0.5
SFA-ER		10	-	10	1.0	0.5	0.9
ZrA-ER		-	10	10	1.0	0.5	0.5

2.2 사용재료

본 연구의 사용재료로서, 국내산 보통 1종 포틀랜드 시멘트

(비표면적 3,413 cm²/g, 밀도 3.15 g/cm³)와 결합재로 플라이 애시(비표면적 3,850 cm²/g, 밀도 2.13 g/cm³), 보통 실리카폼(비표면적 240,000 cm²/g, 밀도 2.10 g/cm³), 입자간 뭉침이 적은 지르코늄 실리카폼(비표면적 80,000 cm²/g, 밀도 2.50 g/cm³)을 사용하였다. 이러한 지르코늄 실리카폼은 매트릭스 균기전의 유동성을 향상시키고, 수화반응은 기존 실리카폼과 유사한 것으로 알려져 있다(Park et al., 2011). 실험에 사용된 시멘트와 혼화재의 물리적 및 화학적 성질은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. The Physical and Chemical Properties of Materials

Types	Cement	FA	SF	Zr
SiO ₂ (%)	21.00	65.30	96.00	94.00
Al ₂ O ₃ (%)	6.40	16.60	0.25	0.23
Fe ₂ O ₃ (%)	3.10	5.58	0.12	0.10
CaO (%)	61.30	-	0.38	-
MgO (%)	3.00	0.82	0.10	-
SO ₃ (%)	2.30	0.51	-	-
ZrO ₂ (%)	-	-	-	3.00
Density (g/cm ³)	3.15	2.13	2.10	2.50
Surface area (cm ² /g)	3,413	3,850	240,000	80,000

감수제(액상/갈색, 밀도 1.07 g/cm³)는 폴리카본산계 국내산 고성능 감수제(superplasticizer, SP)를 사용하였고 팽창재(비표면적 3,117 cm²/g, 밀도 2.98 g/cm³)는 일본산 CSA계를 사용하였으며, 수축저감제(액상/무색, 밀도 1.02 g/cm³)는 국내산을 사용하였다.

2.3 실험방법

본 연구에서 그라우트의 유동성, 블리딩 및 체적변화량과 압축강도는 유럽기준 EN 445에 따라 실험체를 제작 및 실험을 수행하였다(Table 3). 그라우트의 응결실험은 KS F 2436에 의하여 초결(3.5 MPa)과 종결(28.0 MPa)의 발현 시점을 평가하였다. 또한 그라우트의 자기수축 실험은 실제 PSC 구조물에 사용되는 텐던 및 덕트를 모사한 방법을 사용하였다(Yoo et al., 2015; Yuan et al., 2016). 즉 최대 텐던-덕트 면적비 0.45를 모사한 ø19mm 덕트(PVC파이프)를 사용하였다. 덕트 중앙에 콘크리트 매립게이지(concrete embedded gage)와 온도게이지(thermocouple)를 설치하여 그라우트의 자기수축(자유수축) 특성을 평가하였다. 즉 실험체를 지면과 30°의 기울기로 설치하고 하단에 그라우트 주입구를 설치하여 이를 펌프에 연결하고 그라우트를 교반한 후 펌프를 통해 파이프에 주입하였다. 모든 실험은 온도 20±1℃와 습도 60±5%가 일정하게 유지되는 항온·항습실에서 수행하였다.

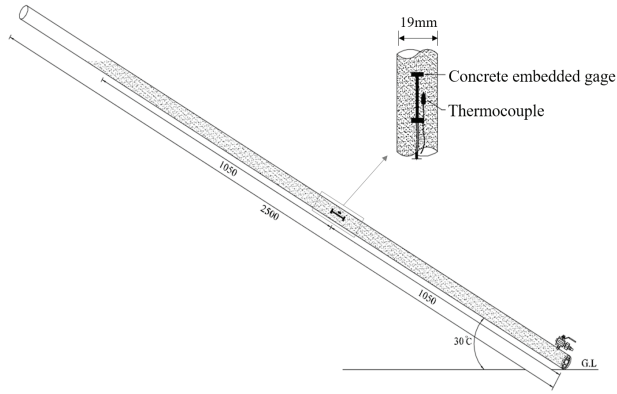


Fig. 1. Test Results of Bleeding

Table 3. Test Requirements of EN 445

Test method	Requirements
Spread test	1) $a_0 \geq 140$ mm 2) $0.8a_0 \leq a_{30} \leq 1.2a_0$ and $a_0 \geq 140$ 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 @ 28days

3. 실험결과 및 분석

3.1 유동성 실험

Table 4는 그라우트 유동성 실험 결과를 나타낸 것이다. BS EN 445 기준에 따라 유동성 실험은 그라우트를 배합한 후 첫 실험을 수행하고 30분이 지난 후 다시 실험을 수행하였다.

플레인 배합(0.4W/C)을 배합 후 첫 슬럼프 플로우는 BS EN 445 기준에서 제시한 140 mm 이하로 나타났음을 알 수 있다. 혼화재를 혼입한 2성분계와 3성분계 그라우트 변수들은 140 mm 이상의 목표 슬럼프 플로어를 만족하도록 현장에서 고성능 감수제를 사용하여 조정하였다. 플라이 애시와 지르코늄 실리카폼을 사용한 2성분계 및 3성분계 그라우트는 0.5%의 적은 감수제 혼입률로 목표 슬럼프 플로어를 만족하였으나, 보통 실리카폼을 사용한 2성분계 및 3성분계 그라우트는 0.7% 이상의 고성능 감수제 혼입률을 나타냈다(Table 1). 이는 플라이 애시는 구형 입형에 의한 볼 베어링(ball bearing) 효과로 유동성 개선에 효과적이며, 보통 실리카폼에 비해 지르코늄 실리카폼은 대표적 불순물인 carbon과 alkali가 적고 미세한 분말 입자간 뭉침이 적은 특성으로 유동성 증가하였기 때문이다(Park et al., 2011; Lee et al., 2012).

Table 4. Results of Grout Spread Test

Specimens		After mixing	After 30min	Remarks
0.4W/C	x-axis	90 mm	75 mm	NG
	y-axis	90 mm	75 mm	NG
B-FA	x-axis	145 mm	116 mm	OK
	y-axis	140 mm	115 mm	OK
B-SF	x-axis	140 mm	112 mm	OK
	y-axis	141 mm	113 mm	OK
B-Zr	x-axis	140 mm	110 mm	OK
	y-axis	143 mm	113 mm	OK
SFA	x-axis	160 mm	145 mm	OK
	y-axis	165 mm	140 mm	OK
ZrA	x-axis	160 mm	150 mm	OK
	y-axis	165 mm	150 mm	OK
SFA-ER	x-axis	155 mm	155 mm	OK
	y-axis	140 mm	140 mm	OK
ZrA-ER	x-axis	150 mm	140 mm	OK
	y-axis	150 mm	140 mm	OK

3.2 블리딩 실험

Figs. 2와 3은 혼화재 종류별 재령 경과에 따른 블리딩 및 체적변화량 거동을 나타낸 것이다. EN 445 기준에 따라 그라우트 타설 후 첫 1시간은 15분씩 블리딩 및 체적변화량을 측정하고, 그 후 2, 3, 24시간 간격으로 각각 측정하였다. 3시간 후 측정된 그라우트의 블리딩은 0.3% 이내, 체적변화량은 -1.0~5.0%의 범위를 만족해야 한다.

2성분계 그라우트 변수들에서 플라이 애시 10%혼입한 변수는 플레인 변수(0.4 W/C)와 동일하게 3시간 후 블리딩은 5.0% 이상으로 유럽 기준을 만족하지 못하였으며, 24시간 후 2.0% 이상의 블리딩으로 한국 국내 기준(KS F 2433)도 만족하지 못하였다. 반대로 보통 실리카폼과 지르코늄 실리카폼을 혼입한 변수들은 비록 3시간 후 유럽 기준 0.3% 이내를 만족하지 못하였으나 24시간 후 0.0%의 블리딩을 보여 주었다. 또한 체적변화량 거동에서 모든 2성분계 그라우트 변수들은 -2.3~4.8%로 기준 EN 445를 만족하지 못하였다. 특히 플라이 애시를 사용한 변수(B-FA)는 실리카폼을 사용한 변수들(B-SF, B-Zr)보다 43~53% 크게 나타났다.

3성분계 그라우트 변수들은 우수한 블리딩 저감 거동으로 3시간 후 0.3% 이내의 블리딩과 24시간 후 0.0%의 블리딩을 보여 주었다. 그러나 변수 SFA-ER는 3시간 후 다소 높은 블리딩을 보여 주었으나, EN 445의 유동성을 만족하는 범위 내에서 감수제량을 조절하면 0.3% 이내의 블리딩을 만족할 것으로 판단된다(Kang et al., 2014). 체적변화량에서 보통 실리카폼을 사용한 3성분계 그라우트 변수들은 지르코늄 실리카폼을 사용한 변수들 보다 23~36% 큰 값을 나타냈다.

결과적으로 모든 3성분계 그라우트 변수들은 2성분계 그라우트 변수들에 비해 우수한 특성을 확인할 수 있으며, EN 445의 기준을 만족하였다.

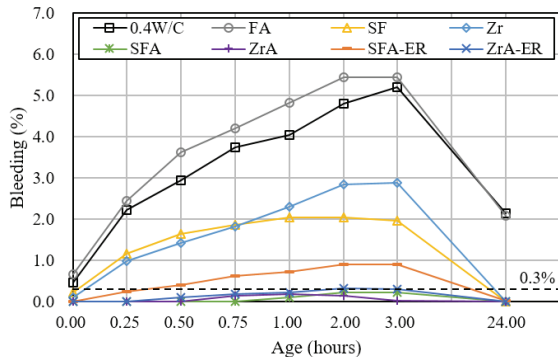


Fig. 2. Test Results of Bleeding

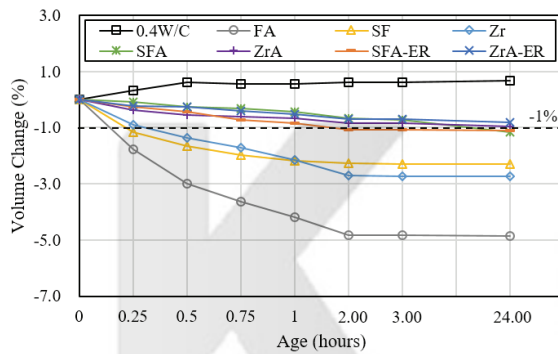


Fig. 3. Test Results of Volume Change

3.3 압축강도 실험

Fig 4는 그라우트 혼화재 종류 및 혼화제에 따른 압축강도의 변화를 재령에 따라 나타낸 것이다. 유럽기준 EN 445에 따라 40×40×160 mm의 각주형 공시체를 제작 및 양생하여 재령 7, 28일에 실험을 수행하고 각각 27 MPa, 30 MPa 이상이어야 한다.

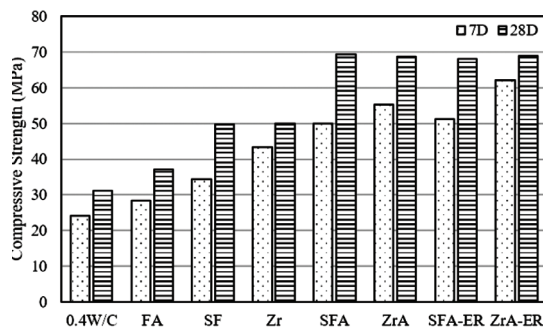


Fig. 4. Test Results of Compressive Strength

실험결과, 플레인 변수는 재령 7일에서 24 MPa로 기준을

만족하지 못하였지만 재령 28일에서는 31 MPa로 기준을 만족하였다. 이에 비해 2성분계 및 3성분계 그라우트 변수들은 재령 7일에서 0.2~1.6배, 재령 28일에서 0.2~1.3배로 우수한 강도 특성으로 재령 7, 28일의 기준 EN 445를 만족하였다. 플라이 애시만 사용한 변수는 실리카폼을 사용한 변수들보다 21~53% 낮은 강도 발현을 나타냈고 보통 실리카폼과 지르코늄 실리카폼을 사용한 변수는 유사한 강도 값을 나타냈다. 이는 플라이 애시에 비해 실리카폼(SF, Zr)의 초미립자로 매트릭스 공극을 채워 내부가 더욱 수밀해지고 포졸란 반응으로 인해 압축강도가 증가한 것으로 사료된다(Lee et al., 2010).

또한 3성분계 그라우트 변수들은 2성분계 그라우트 변수들보다 40% 이상의 강도 증진 특성을 나타냈다. 혼화제(SRA, EA)를 사용한 변수 ZrA-ER는 초기 재령(재령 7일)에 다소 높은 강도 발현을 확인할 수 있으나, 재령 28일에서는 유사한 압축강도 68 MPa로 나타났다. 이는 팽창제 성분 중 석고(CaSO₄)로 인하여 시멘트 성분 중 C₃S의 반응을 촉진시키는 것과 경화체 조직의 형성시기에 정량의 석고가 존재하여 초기강도 발현에 유리한 조직이 형성되었기 때문으로 사료된다(Han et al., 2003; Yuan et al., 2016).

결과적으로 2성분계 그라우트 변수들에 비해 3성분계 그라우트 변수들은 우수한 유동성, 블리딩 및 체적변화량과 압축강도 특성으로 유럽 기준(EN 445)을 모두 만족하였다. 따라서, 3성분계 그라우트에 대하여 응결 및 수축특성을 추가 평가하였다.

3.4 자기수축 실험

3.4.1 응결 특성 및 Time-zero 선정

일본콘크리트공학협회(JCI)에서 자기수축 거동을 평가하는데 있어, 초결(initial set, T_i) 시점을 수축발현 시점 time-zero로 정의하고 있다. 그러나 많은 연구자들(Hammer et al., 1998; Holt et al., 2001))은 초결을 수축발현시점 time-zero로 정의하여 자기수축을 평가할 경우, 자기수축의 주요 특성인 자기건조(self-desiccation) 특성을 고려하지 못해 정확한 수축거동을 평가하지 못한다고 제시하였다. 또한 일부 연구자들은 그라우트의 수축발현 시점을 수화반응으로 인한 수화열(hydration heat) 및 수축변형률 증가 시점(Fig. 5)을 time-zero로 정의하여 평가하기도 하였다(Yoo et al., 2015; Yuan et al., 2016). 이는 온도게이지(thermocouple)에서 측정된 온도와 그라우트의 수축변형률이 모두 증가하는 시점을 말하며, 이 시점 이전의 데이터는 그라우트의 수축 균열에 영향을 미치지 않기 때문이다.

Table 5는 KS F 2436에 의하여 측정된 초결과 종결(final set, T_f)의 발현 시점과 자기수축 실험을 통하여 측정된 수화열 및 수축변형률 증가 시점(increase time of strain and temperature, T_{TS})을 나타내고 있다. 수화열 및 수축변형률의

증가 시점은 초결 시점보다 최소 0.8시간 조기에 발현함을 알 수 있고, 보통 실리카폼을 사용한 변수들의 수화열 및 수축변형률의 증가 시점, 초결과 종결 시점은 지르코늄 실리카폼을 사용한 변수들보다 4시간 이상 조기에 발생하였음을 알 수 있다. 또한 팽창재와 수축저감제를 사용한 변수들은 미사용한 변수들보다 각 시점이 촉진되어 조기에 나타났다. 이는 수축저감제에 응결 및 수화반응을 촉진시키는 글리콜 에테르계가 주요 성분임으로써 응결시간이 다소 촉진된 것과 팽창재 성분 중 석고(CaSO₄)로 인하여 시멘트 성분 중 C₃S의 반응을 촉진시키는 것으로 사료된다(Han et al., 2006).

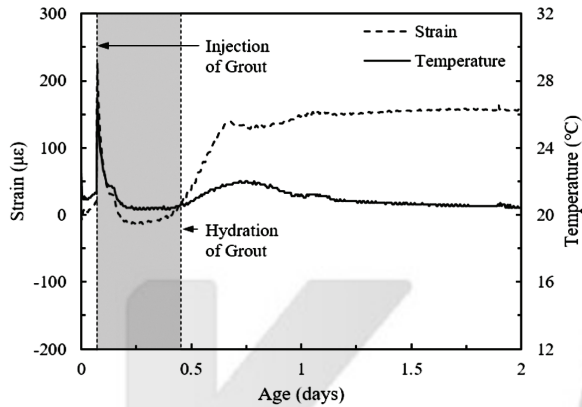


Fig. 5. Initial Strain and Temperature Behavior of Ternary Grout (ZrA)

Table 5. Test Results of Setting Time (hours)

Specimens	T_{TS}	T_I	T_F
SFA	7.17	7.97	9.79
ZrA	13.75	15.01	17.09
SFA-ER	5.33	6.29	7.33
ZrA-ER	9.83	13.40	16.20

Fig. 6은 수화열 및 수축변형률의 증가 시점, 초결과 종결 시점을 각각 time-zero로 선정하여 재령 22일의 자기수축 최대값을 나타낸 것이다. 수화열 및 수축변형률의 증가 시점을 time-zero로 선정할 경우 최대 자기수축 값은 초결 시점에 비해 -10~71 μm , 종결 시점보다 -20~124 μm 낮은 값을 나타냈다. 특히 지르코늄 실리카폼을 사용한 변수들에서 명확한 최대 자기수축 값 차이를 확인할 수 있다. 따라서 그라우트의 자기수축 거동을 평가함에 있어서, time-zero를 초결 시점으로 선정할 경우 수화열 및 수축변형률 증가 시점에 비해 다소 과대평가되는 것으로 판단됨으로써, 수화열 및 수축변형률 증가 시점을 time-zero로 선정하여 자기수축 거동을 평가하였다.

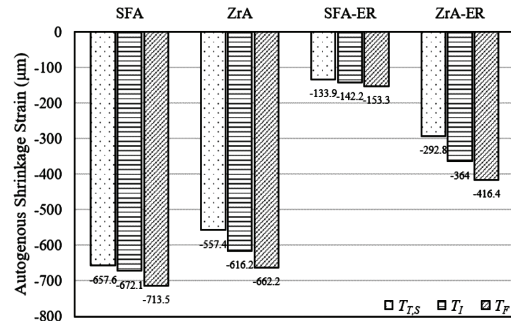


Fig. 6. Comparison of Autogenous Shrinkage Strain Measured from Start Time

3.4.2 자기수축 및 온도 거동

Fig. 7은 3성분계 그라우트의 time-zero를 수화열 및 수축 변형률 증가 시점으로 선정하고 자기수축 및 온도 거동을 나타낸 것이다.

그라우트가 수화반응을 시작하면서 수화열을 생성하게 된다. Fig. 7(a)는 매립된 온도계이에서 측정된 수화열 온도거동이다. 모든 변수들의 타설 후 초기 온도(재령 0.1일)는 항온·항습실의 온도보다 높게 나타났다. 이는 그라우트 배합단계에서 발생한 온도가 항온·항습실 온도보다 높기 때문이다. 플레인 변수와 3성분계 그라우트 변수들의 최대 수화열 온도는 유사한 값을 보여 주었다. 또한 보통 실리카폼을 사용한 변수들의 최대 수화열 온도 값은 지르코늄 실리카폼을 사용한 변수들보다 조기에 발현하였고 이는 응결 발현 특성의 거동과 동일하다.

Fig. 7(b)는 재령 22일의 자기수축 거동을 나타낸 것이다. 플라이 애시와 실리카폼을 병용한 변수들(SFA, ZrA)은 플레인 변수보다 2배 이상의 자기수축 변형률이 발생하였다. 이는 플라이애시와 시멘트의 평균 입경보다 작은 실리카폼(SF, Zr)을 병용함으로써 입자간 간격이 감소하였고 미세공극이 다량 발생하였기 때문에 매트릭스의 모세관 압력(capillary pressure)이 증가 즉 자기수축이 증가한 것으로 사료된다(Tangtermsirikul et al., 1998).

이러한 3성분계 그라우트 변수들에 수축저감제(0.5%)와 팽창재(1.0%)를 혼입 사용함으로써 재령 22일의 자기수축을 47~80% 감소하였고, 지르코늄 실리카폼을 사용한 3성분계 그라우트 변수보다 보통 실리카폼을 사용한 변수에서는 우수한 수축 저감 특성을 확인할 수 있다. 특히 보통 실리카폼과 혼화제를 사용한 변수에서 80%의 수축저감 특성으로 플레인 변수보다 50% 낮은 자기수축 거동을 나타냈다. 이는 수축저감제의 공극내 수축응력의 이완작용과 팽창재의 에트린자이트의 생성으로 팽창작용으로 자기수축을 감소하였기 때문이다(Han et al., 2003; Han et al., 2006).

또한 기존 연구자들에 의하여 배합변수 0.4W/C과 ZrA-ER의 구속수축 실험에서는 텐던 자기구속에 의한 수축균열이 발생하였다. 그러나 SFA-ER은 재령 22일에 -133.9 μm 의

자기수축 값으로 기존 연구한 3성분계 그라우트 변수(지르코늄 실리카폼 10%, 플라이 애시 10%, 수축저감제 0.5%, 팽창재 2.0%)와 유사한 자기수축 값을 보여 주었으며, 기존 연구한 3성분계 그라우트 변수는 구속수축 실험에서 텐던 구속에 의한 구속수축 균열이 발생하지 않았다(Yoo et al., 2015; Yuan et al., 2016). 따라서, 변수 SFA-ER 3성분계 그라우트는 플레인 변수(0.4 W/C)보다 텐던 구속에 의한 구속응력이 현저히 작아 구속수축 균열이 발생하지 않을 것으로 예측되나, 이에 대한 텐던 구속수축 특성 평가가 필요하다.

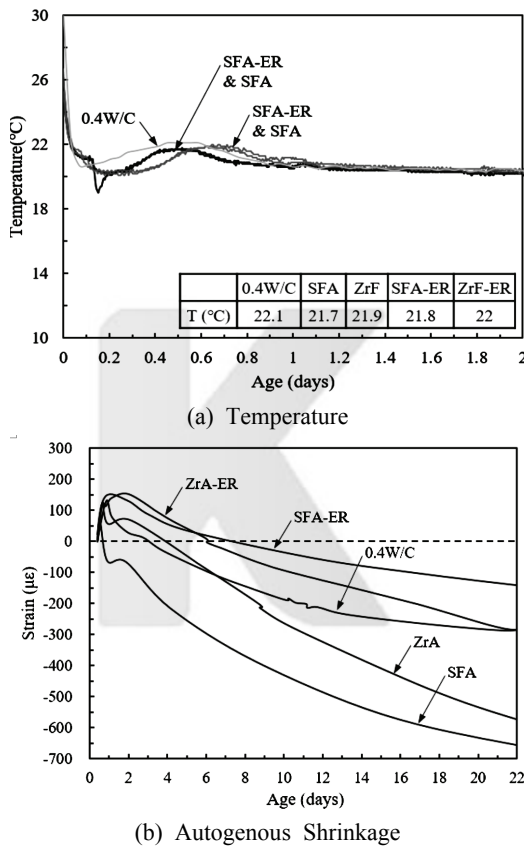


Fig. 7. Test Results of Autogenous Shrinkage and Temperature

4. 결론

본 연구에서는 혼화재 종류에 따른 그라우트의 특성을 평가하고자, 플라이 애시, 보통 실리카폼, 지르코늄 실리카폼을 사용한 2성분계 및 3성분계 그라우트에 대하여 유동성, 블리딩 및 체적변화량, 압축강도, 응결특성과 자기수축 실험을 수행하였다.

본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 굳지 않은 그라우트의 실험 결과, 플라이 애시와 지르코늄 실리카폼을 사용한 변수들은 낮은 감수제의 혼입

률로 우수한 유동성을 나타냈으나, 다소 큰 블리딩과 체적변화량을 나타냈다. 2성분계 그라우트는 플레인 변수(0.4 W/C)와 유사한 거동으로 유럽 기준 EN 445를 만족하지 못하였으나, 3성분계 그라우트 변수들은 우수한 블리딩 및 체적변화량 저감 특성으로 EN 445의 기준을 만족하였다.

- (2) 굳은 그라우트의 실험 결과, 플레인 변수는 재령 7일에서 24 MPa로 기준을 만족하지 못하였지만 재령 28일에서는 31 MPa로 기준을 만족하였다. 이에 비하여 2성분계 및 3성분계 그라우트 변수들은 모두 우수한 강도 특성으로 기준을 만족하였고, 3성분계 그라우트 변수들은 2성분계 그라우트 변수들보다 40% 이상의 강도 증진 특성을 나타냈다.
- (3) 3성분계 그라우트의 응결 실험 결과, 보통 실리카폼을 사용한 변수들의 초결과 종결 시점은 지르코늄 실리카폼을 사용한 변수들보다 4시간 이상 초기에 발생하였음을 알 수 있다. 또한 팽창재와 수축저감제를 사용한 변수들은 사용하지 않은 변수들보다 응결 시점이 촉진되어 발생하였다.
- (4) 3성분계 그라우트의 time-zero를 수화열 및 수축변형을 증가 시점으로 선정하고 자기수축 실험을 수행한 결과, 변수 SFA와 ZrA들은 플레인 변수보다 2배 이상의 자기수축 변형률이 발생하였으나 혼화제(SRA, EA)를 사용함으로써, 자기수축을 47~80%를 저감할 수 있었다. 특히 보통 실리카폼과 혼화제를 사용한 변수에서 80%의 수축저감 특성으로 플레인 변수보다 50% 낮은 자기수축 거동을 나타냈다.

이상을 종합하여 볼 때, 보통 실리카폼을 사용한 3성분계 그라우트 변수(SFA-ER)에서 우수한 유동성, 블리딩 및 체적변화량, 압축강도와 자기수축 거동을 나타냈다. 그러므로 추후 변수 SFA-ER의 텐던 구속에 의한 구속수축 균열 발생 여부 평가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 중견연구지원사업의 연구비지원(NRF-2016R1A2B3011392 연구사업)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Hammer, T.A., Justnes, H., Bjøntegaard, E.Ø., and Sellevold, E.J. (1998) Suggestion on the Terminology and the Test Methods Proposed by JCI. Edited by Tazawa, E., *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Japan Concrete

- Institute(JCI), Hiroshima, Japan, pp. 397-399.
- Han, C.G., Han, M.C., Song, S.H., and Yoon, S. (2006) Drying Shrinkage of Concrete Combining Expansive Additives and Shrinkage Reducing Agent. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 3, pp. 397-404.
- Han, C.G., Kim, S.W., Koh, G.T., and Pei, Z.L. (2003) 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, pp. 785-793.
- Hot, E. (2001) *Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete*. VTT Publication 446. Technical Research Centre of Finland, pp. 1-184.
- Kang, S.T., Ha, S.J., Ryu, G.S., Koh, K.T., and Kwon, S.H. (2014) The Effect of Chemical Admixture on the Bleeding of PSC Grouts. *Proceedings of Korea Concrete Institute Spring Conference*, pp. 457-458.
- Koh, K.T., Ryu, G.S., and Ahn, K.H. (2016) Effect of Chemical Admixture on the Quality Characteristics of Grout for Prestressed Concrete. *Journal of Korean Recycled Construction Resource Institute*, Vol. 5, No. 1, pp. 68-75.
- Lau, K., Lasa, I., and Paredes, M. (2013) *Bridge Tendon Failures in the Presence of Deficient Grout*. News & Announcements, Civil and Environmental Engineering, Florida International University.
- Lee, B.S., Jun, M.H., and Lee, D.H. (2012) The Effect of Mixing Ratio of Blast Furnace Slag and Fly Ash on Material Properties of 80MPa High Strength Concrete with Ternary Cement. *LHI Journal of Land, Housing and Urban Affairs*, Vol. 3, No. 3, pp. 287-297.
- Lee, S.T., and Lee, S.H. (2010) Mechanical Properties and Durability of Cement Concrete Incorporating Silica Fume. *Journal of Korean Ceramic Society*, Vol. 47, No. 5, pp. 412-418.
- Park, J.J., Ryu, G.S., Kang, S.T., An, G.H., Koh, K.T., and Kim, S.W. (2011) An Experimental Study on Viscosity of UHPC according to Silica Fume Types. *Proceedings of Korea Concrete Institute Spring Conference*, pp. 427-428.
- Tangtermsitikul, S. (1998) Effect of Chemical Composition and Particle size of Fly Ash on Autogenous Shrinkage of Paste. Edited by Tazawa, E., *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Japan Concrete Institute(JCI), Hiroshima, Japan, pp. 175-186.
- Yoo, D.Y., Ryu, G.S., Yuan, T.F., Koh, K.T., and Yoon, Y.S. (2015) Cracking Behavior of Posttensioning Grout with Various Strand to Duct Area Ratios. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27, No. 6, Article ID 04014197, pp. 1-9.
- Yuan, T.F., An, G.H., Ryu, G.S., Koh, K.T., and Yoon, Y.S. (2016) Evaluating Shrinkage Characteristic of Ternary Grout for PSC Bridge Using Expansive Additive and Shrinkage Reducing Agent. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 28, No. 5, pp. 519-525.

Received	September 26, 2017
Revised	September 27, 2017
Accepted	November 22, 2017