

ERCO 혼입시기 및 혼입을 변화가 HPFRCC의 자기수축저감 및 기초적 특성에 미치는 영향

Influence of Addition Timing and Dosage of ERCO on Autogenous Shrinkage and Fundamental Properties of HPFRCC

한 천 구 이 제 현*

Han, Cheon-Goo Lee, Je-Hyun*

Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Naduk-Dong, Cheongju-Si, 28503, Korea

Abstract

For the entire world, due to the increased risks of explosion and terrorisms, damages on human life and properties have been increased. Regarding this issue, research on high performance fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC) with the protecting performance for the building structures or military facilities against explosion or bombing has been increased (important). Among a series of the research, using emulsified refined cooking oil(ERCO) to reduce the autogenous shrinkage may cause some adverse effect on performance of the mixture such as increased viscosity, decreased fluidity, air content, and strength. Hence, in this research, based on the optimum design of HPFRCC induced by previous research, the influence of ERCO adding timing and dosage on autogenous shrinkage and fundamental properties were analyzed. As a result, it was revealed that 0.5% of ERCO should be added right after the mixing is most effective for the quality of HPFRCC such as fluidity, strength development and autogenous shrinkage reducing.

Keywords : ERCO, HPFRCC, Autogenous shrinkage, Adding timing

1. 서 론

최근 전 세계적으로는 폭발성 물질 사용 증가에 따른 폭발 사고 및 폭탄테러 등으로 인하여 인명 및 재산피해가 점점 증가하고 있는 추세이다. 우리나라의 경우도 2010년 북한의 연평도 포격사건과 같은 군사도발로 말미암아 중요 건축물이나 군사시설에 방호·방폭 성능을 향상시킬 필요성이 대두됨에 따라 고성능의 섬유보강 콘크리트에 대한 관심이 집중되고 있다.

즉, 섬유보강 고성능 시멘트 복합체(High performance

fiber reinforced cementitious composites, 이하 HPFRCC)는 고유동, 고강도, 고내구 및 고인성을 발휘하는 재료로써 뛰어난 방호·방폭 성능을 갖는 우수한 재료이지만 섬유다량 사용에 따른 시공성 저하와 낮은 물결합재비에 따른 자기수축 균열이 문제점으로 제기되고 있다.

이에 Lee and Han[1,2]는 다양한 유·무기 섬유조합, 물결합재비, 배합비 및 섬유혼입을 변화에 따른 HPFRCC의 공학적 특성을 분석하여 최적의 HPFRCC 배합조건을 도출한바 있다. 또한, Jo and Han[3,4]의 연구에서는 자기수축 저감제로 개발된 유화처리정제식용유(Emulsified refined cooking oil, 이하 ERCO)[5]를 HPFRCC에 혼입하여 최적의 ERCO 혼입율을 도출한바 있다. 하지만 ERCO를 혼입하게 되면 큰 자기수축에는 효과적이지만, 지방분과 시멘트 알칼리성분의 조기에 반응하여 유동성, 공기량 및 압축강도의 저하를 유발할 수 있어 단점으로 지적되었다. 그러나, 만약 ERCO의 첨가시기를 시멘트와 물이 먼저 반응할 수

Received : January 17, 2018

Revision received : March 13, 2018

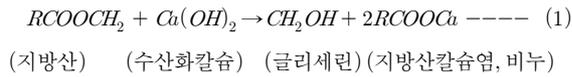
Accepted : March 21, 2018

* Corresponding author : Lee, Je-Hyun

[Tel: 82-43-229-8480, E-mail: ljh63811@naver.com]

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

있도록 투입시기를 늦추게 된다면 지방분과 시멘트 알칼리와의 비누화작용(식 1 참조)으로 시멘트 수화반응 저해에 따른 품질저하를 최소화할 수 있을 것으로 예상된다.



그러므로, 본 연구에서는 기존에 도출된 HPFRCC의 최적 배합에 ERCO를 배합수와 함께 첨가하는 전혼입과 모르타르 믹싱 완료 후 첨가하는 후혼입로 나누어, ERCO 혼입율 변화에 따른 유동성, 공기량, 강도 및 자기수축 길이변화율을 측정하고 분석함으로써 최적의 ERCO 혼입시기 및 혼입율을 도출하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획 및 배합사항은 Table 1 및 2와 같다.

Table 1. Experimental plan

Items		Variables		
Mixture	W/B (%)	25		
	Binder (%)	1	OPC : FA : SF ¹⁾ = 70 : 20 : 10	
	Target flow (mm)		200 ± 20	
	Target air content (%)		2.0 ± 1.0	
	Compositions		SS ²⁾ + OL ³⁾	
	Fiber	Mixing ratio (SS : OL) ⁴⁾	1	1 : 1.5
		Content (%)		1.25
	ERCO	Mixing phase	2	Pre-mix ⁵⁾ , Post-mix ⁶⁾
		Dosage (%)		3
	Test	Fresh mortar	2	· Flow test · Air content
Hardened mortar		4		· Compressive strength (3, 7, 28 days)
	· Tensile strength (28 days)			
	· Stress-strain curve			
	· Autogenous shrinkage			

- 1) OPC : FA : SF = Ordinary portland cement : Fly ash : silica fume
 2) SS : Short steel fiber 3) OL : Long organic fiber
 4) Volume ratio 5) Mix the ERCO with mixing water
 6) Mix the ERCO after mortar mixed 7) Plain

Table 2. Mix proportions

ERCO (%)	W/B (%)	Binder ¹⁾ : S	Unit weight(kg/m ³)								AD (%)	Fiber mixing ratio (%)	Fiber content (%)
			W	C	FA	SF	S	SS	OL	ERCO			
0			232	650	186	93	558	39	8.3	-			
0.5	25	1 : 0.7	227	650	186	93	510	39	8.3	4.6	0.7	1 : 1.5	1.25
1			223	650	186	93	510	39	8.3	9.3			

1) Binder(OPC : FA : SF = 70 : 20 : 10)

즉, 배합사항으로 W/B는 25%의 1수준으로 하였고, 결합재 치환율은 OPC(보통 포틀랜드 시멘트) : FA(플라이애시) : SF(실리카퓌ם) = 7 : 2 : 1, 목표 플로는 200 ± 20, 목표 공기량은 2.0 ± 1.0%를 만족하도록 배합설계 하였다. 섬유 조합의 경우 기존 연구[1]에서 도출된 최적의 섬유조합인 길이가 짧은 강섬유(Short steel fiber, 이하 SS)와 길이가 긴 유기섬유(Long organic fiber, 이하 OL)를 1 : 1.5의 비율로 1.25% 혼입하며, 자기수축 저감제인 ERCO 혼입율은 0, 0.5, 1%의 3수준으로 물과 함께 혼입하는 전혼입, 비빔완료 후 혼입하는 후혼입의 총 5수준을 실험 계획하였다.

실험사항으로 굳지 않은 모르타르에서는 플로 및 공기량을 측정하였고, 경화 모르타르에서는 압축강도(3, 7, 28일), 인장강도(28일), 인장응력-변형곡선 및 자기수축 길이변화율을 측정하는 것으로 계획하였다.

2.2 사용재료

본 실험의 사용재료로 시멘트와 플라이애시 및 실리카퓌ם은 시중에서 제조·판매되는 재료를 사용 하였고, 잔골재는 충북산 부순골재를 이용하였는데, 각 재료의 물리·화학적 성질은 Table 3~6과 같다. 섬유는 SS섬유와 OL 섬유를 복합 사용하였는데, 각각의 물리적 성질은 Table 7과 같고, 그 모습은 Figure 1과 같다.

또한, 자기수축 저감제로 개발된 ERCO는 국내 D사에서 제조·시판되는 제품을 사용하였는데, 그 물리·화학적 성질은 Table 8과 같다. 혼화제는 국내 S사에서 생산되는 저점도형 폴리칼본산계(고성능 AE 감수제)를 사용 하였고, 그 물리적 성질은 Table 9와 같다.

Table 3. Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Setting time (min.)		Compressive Strength (MPa)		
		Initial	Final	3 D	7 D	28 D
3.15	3 550	210	305	25.3	34.9	50.2

Table 4. Physical and chemical properties of fly ash

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	L. O. I. (%)	Absorption (%)	SiO ₂ (%)
2.23	3 660	4.9	0.3	49.2

Table 5. Physical and chemical properties of silica fume

Density (g/cm ³)	Blaine (m ² /g)	L. O. I. (%)	Chemical composition (%)			
			SiO ₂	MgO	SO ₃	Cl ⁻
2.20	24.8	1.5	92.9	0.04	0.62	0.17

Table 6. Physical properties of fine aggregate

Density (g/cm ³)	Absorption (%)	Distribution of grain shape (%)	Fineness modulus
2.54	0.9	58.5	2.80

Table 7. Physical properties of fiber

Types	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect ratio	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (MPa)
SS	13	0.12	108	7.8	2 650
OL	30	0.47	61	1.11	623

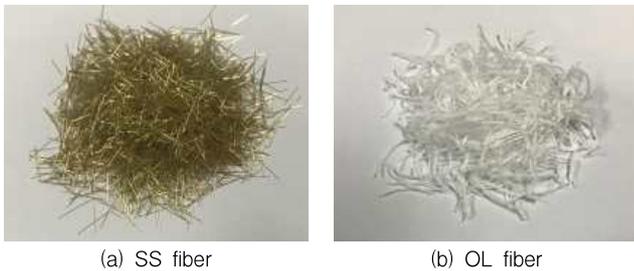


Figure 1. Shape of fiber

Table 8. Physical and chemical properties of ERCO

Density (g/cm ³)	Main ingredient (%)			Viscosity (cP)
	Saturated acid	Multi Unsaturated acid	Omega-3 Acids	
0.98	15	54	8	25

Table 9. Physical properties of admixture

Component	Density (g/cm ³)	Solid content (%)	pH
Polycarboxylate	1.2	38	6.5

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 HPFRCC의 혼합은 트윈샤프트 믹서를 사용하여 Figure 2와 같이 혼합하였다. 단, ERCO 혼입시기로서 전혼입의 경우는 배합수 투입시 ERCO를 섞어 혼입하였고, 후혼입의 경우에는 HPFRCC Mixing 완료 후 ERCO를 혼입하는 방식으로 진행하였다.

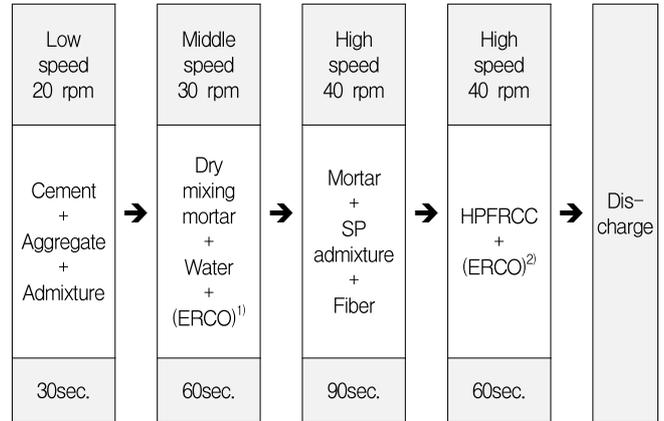


Figure 2. Mixing of HPFRCC

굳지 않은 모르타르의 시험으로 Flow 시험은 KS L 5111, 공기량은 KS F 2421에 의거하여 측정하였다. 경화모르타르의 시험으로 압축강도는 KS F 2403의 규정에 따라 시험체를 제작하여 20 ± 2℃의 양생수조에서 각각의 재령에 따라 양생한 후 KS L 5105의 규정에 의거하여 3 MN UTM을 사용하여 측정하였다. 인장강도시험의 경우 국내 KS 표준규격에 일축인장 시험이 규정되어 있지 않아 일본 토목학회 기준인 JSCE-E-53에 의거하여 공시체 제작 및 인장강도시험을 실시하였고, 인장강도시험시에는 부착형 스트레인 게이지를 이용하여 변형률도 동시에 측정하여 응력-변형곡선을 구하였다. 자기수축 길이변화율 시험은 KS F 2586의 규정에 의거하여 Figure 3과 같이 40 × 40 × 160mm 각주형 몰드의 바닥과 양단에 1mm 두께의 테프론 시트(Teflon sheet)를 깔아서 공시체가 구속되지 않도록 하고 또한, 램과 은박테이프로 밀봉하여 수분증발에 의한 건조수축을 방지한 상태에서 매립형 스트레인 게이지를 설치하여 응결시간 시험의 초결 시점을 기준점으로 하여 자기수축 길이변화율을 측정하였다.

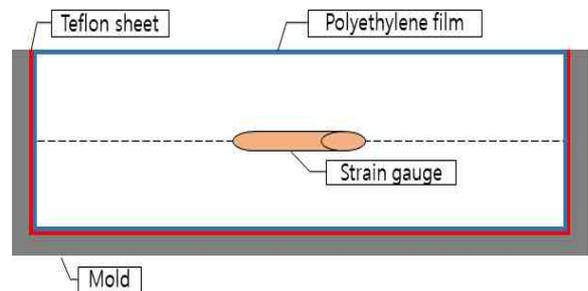


Figure 3. Test method of autogenous shrinkage

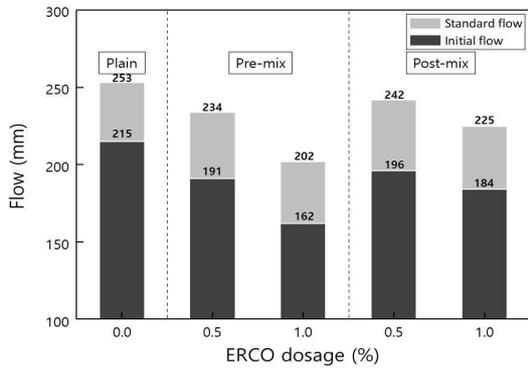


Figure 4. Influence of ERCO dosage and mixing phase on flow

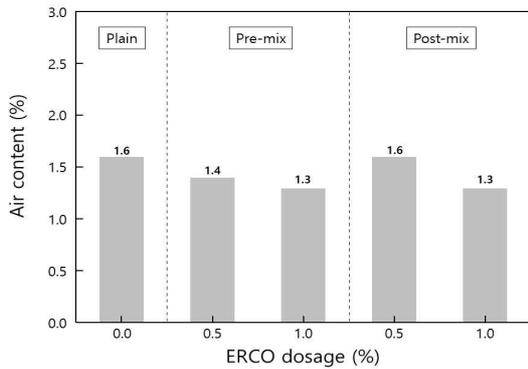


Figure 5. Influence of ERCO dosage and mixing phase on air content

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 모르타르

3.1.1 플로우빌리티

굳지 않은 모르타르의 특성으로 Figure 4는 ERCO 혼입 시기 및 혼입을 변화에 따른 플로를 나타낸 그래프이다. 먼저, 플로의 초기치는 플로콘을 들어올린 후 충격을 가하지 않고 즉시 측정된 값이고, 표준치는 초기치 측정 후에 15초 동안 25회 타격하여 측정된 값을 나타낸 것이다. 전반적으로 ERCO 혼입율이 증가할수록 플로가 감소하는 경향을 나타내었고, 혼입시기에 따라서는 전혼입에 비해 후혼입시 유동성 감소가 작게 나타나는 경향을 나타내었다.

이중, ERCO 혼입을 증가에 따른 유동성 저하 현상은 ERCO의 경우 물에 비해 높은 점성을 갖기 때문에 혼입율이 증가할수록 모르타르 매트릭스의 점성이 증가한 것 및 ERCO 혼입을 증가에 따른 배합수의 감소에 기인하여 유동성이 감소한 것으로 분석된다.

ERCO 혼입시기에 따른 유동성 변화로 먼저 전혼입의 경

우는 ERCO와 물이 동시에 투입되기 때문에 시멘트의 알칼리 성분과 ERCO의 지방산 성분이 빠른 비누화 반응에 의해 시멘트 입자 표면에 비누막이 형성되면서 유동성을 저하시킨 것[4] 및 ERCO의 AE제 흡착작용에 기인하여 공기량을 저하시켜 볼베어링 작용의 감소에 기인하여 유동성이저하한 것으로[6] 분석된다. 반면, 후혼입의 경우는 시멘트표면이 물과 접촉하여 수막을 이루면서 비누화가 늦어짐에 따라 유동성 저하가 적고, 또한 AE제에 의해 공기가 생성된 후 ERCO가 첨가되어 AE제 흡착작용이 감소하여 유동성 저하가 작아진 것으로 분석된다.

3.1.2 공기량

Figure 5는 ERCO 혼입시기 및 혼입을 변화에 따른 공기량을 나타낸 그래프이다. 전반적으로 ERCO 혼입율이 증가할수록 공기량은 감소하는 경향을 나타내었으며, 혼입시기에 따라서는 후혼입시 공기량의 저하가 작은 것으로 나타났다.

이의 원인으로는 ERCO의 성분중 유화제가 친수기와 친유기(소수기)로 이루어져 유지류 성분을 물속에 분산시키는 데[7], 전혼입의 경우 AE제의 소수기성분을 함유한 부분에 공기대신 ERCO의 유지성분이 흡착되어 공기량이 감소하였으나, 후혼입의 경우에는 AE제에 의해 공기가 확보된 상태에서 ERCO를 혼입하여 전혼입에 비해 양호한 공기량을 나타낸 것으로 분석된다.

3.2 경화 모르타르

3.2.1 압축강도

경화 모르타르의 특성으로 Figure 6은 ERCO 혼입시기 및 혼입을 변화에 따른 재령 3, 7, 28일의 압축강도를 나타낸 그래프이다. 전반적으로 Plain에 비해 ERCO 0.5% 혼입시 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었고, 1% 혼입시에는 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 전혼입에 비해 후혼입시 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다.

원인분석으로 먼저, ERCO 혼입을 변화에 따른 압축강도 변화의 경우 0.5% 혼입시에는 적절한 ERCO의 혼입으로 모르타르 내부의 모세관 공극을 시멘트의 알칼리 성분과 ERCO의 지방산 성분의 비누화 반응에 의해 생성되는 미세 비누에 의한 공극충전 효과에 의해 압축강도가 증가한 것 혹은 실험오차요인으로 분석되며, 1% 혼입시에는 미세비누의 생성에 필요한 유지성분의 양보다 다량의 유지성분이 시

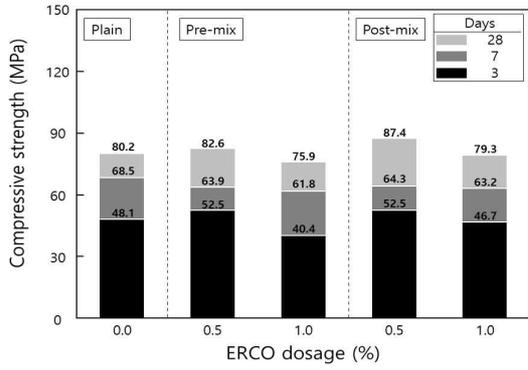


Figure 6. Influence of ERCO dosage and mixing phase on compressive strength

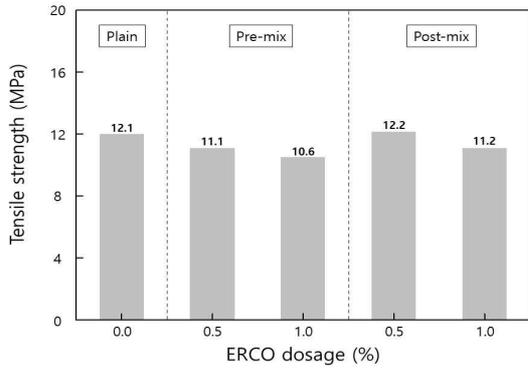


Figure 7. Influence of ERCO dosage and mixing phase on tensile strength

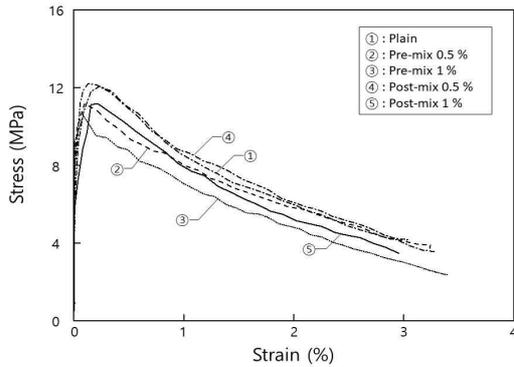


Figure 8. Influence of ERCO dosage and mixing phase on stress-strain curve

멘트 입자를 감싸 물과 시멘트 입자의 수화반응을 저하시켜 강도가 저하한 것으로 분석된다[7,8].

또한, 혼입시기에 따른 압축강도 변화는 전혼입시에는 비누화 반응에 의해 시멘트 입자 표면에 비누막이 형성되어 수화를 저하시켜 강도가 낮아진 반면, 후혼입의 경우에는 시멘트 입자에 충분히 물입자가 감싸진 후에 ERCO를 혼입하여 양호한 수화가 진행된 것에 기인한 것으로 분석된다.

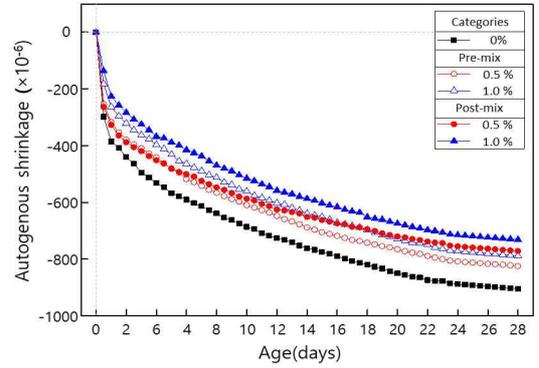


Figure 9. Influence of ERCO dosage and mixing phase on autogenous shrinkage

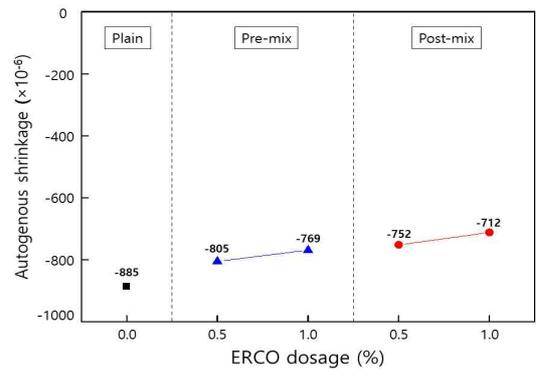


Figure 10. Influence of ERCO dosage and mixing phase on autogenous shrinkage(at 28 day)

3.2.2 인장강도

Figure 7은 ERCO 혼입시기 및 혼입율 변화에 따른 재령 28일의 인장강도를 나타낸 그래프이고, Figure 8은 인장응력-변형 곡선을 나타낸 그래프이다. 전반적으로 10 ~ 12 MPa의 유사한 인장강도가 측정되었으며, 압축강도의 경향과 유사하게 ERCO 혼입율이 증가할수록 감소, 전혼입에 비해 후혼입시 강도는 증가하는 경향을 나타내었다.

인장응력-변형곡선의 경우는 ERCO 혼입시기 및 혼입율에 관계없이 유사한 인장변형률이 측정됨에 따라, ERCO가 인성에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 분석된다.

3.2.3 자기수축 길이변화율

Figure 9 및 10은 ERCO 혼입시기 및 혼입율 변화에 따른 재령 28일까지의 자기수축 길이변화율을 나타낸 그래프이다. 전반적으로 ERCO 혼입율이 증가할수록 자기수축 길이 변화율은 감소하였으며, 혼입시기의 경우에는 전혼입에 비해 후혼입시 자기수축 길이변화율이 감소하는 경향을 나타내었다.

먼저, Plain의 경우에는 -905×10^{-6} 에 비해 전혼입 0.5%의 경우 에는 -820×10^{-6} 로 길이변화율이 10% 감소하였으며, 1% 혼입은 -784×10^{-6} 로 14% 감소, 후혼입 0.5%의 경우 -767×10^{-6} 로 16%감소, 1%혼입은 -727×10^{-6} 로 20% 감소하였다. 이는 ERCO 혼입율이 증가할수록 비누화 반응에 의해 다량의 미세비누가 모세관 공극을 밀실히 충전함에 기인하여 자기수축이 저감되었는데[7], 특히, 혼입시기의 경우 전혼입 1%와 후혼입 0.5%가 유사한 자기수축 저감효과를 나타낼 정도로 효과적임을 알 수 있었다.

하지만, 기존의 연구[9]에 의하면 압축강도 측정값을 고려하여 수화속도가 더 빠른 후혼입이 전혼입 보다 더 큰 자기수축량을 나타내야 하지만, 본 연구에서는 ERCO를 혼입함에 따라 미세비누의 공극충전효과에 기인하여 오히려 자기수축이 작은 상이한 결과를 나타냈다.

3.3 종합분석

본 연구에서는 ERCO의 혼입시기 및 혼입을 변화에 따른 HPFRCC의 품질특성을 검토하여 최적의 품질을 발휘하는 혼입시기 및 혼입율을 도출하고자 하였다. 종합분석 결과는 Table 10과 같이 Plain을 100%로 정하고 각각의 혼입방법 및 혼입율에 대한 백분율 및 전혼입(A)과 후혼입(B)에 대한 비율로 효과를 분석하였다.

Table 10. Comprehensive analysis

Separation	Plain (%)	Pre-mix (A : %)		Post-mix (B : %)		Effect of post-mix [(B / A) * 100]	
		0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Flow(Initial flow)		88.8	75.3	91.2	85.6	102.7	113.7
Air content		87.5	81.3	100	81.5	114.3	100.2
	3D.	109.0	84.0	109.2	97.1	100.2	115.6
Compressive strength	7D.	93.2	90.2	93.9	92.2	100.8	102.2
	28D.	103.0	94.6	108.9	98.8	105.7	104.4
Tensile strength		92.4	87.5	101.2	92.5	109.5	105.7
Reduction of autogenous shrinkage		109.0	113.1	115.0	119.5	105.5	105.7

전반적으로 굳지 않은 상태의 플로와 공기량의 경우 전혼입에 비해 후혼입이 Plain과 더 근접한 결과를 나타내었으며, 경화상태의 압축 및 인장강도의 경우에도 전혼입과 후혼

입 모두 Plain에 비교할 때 양호한 비율을 나타내었지만 후혼입이 더 높은 비율로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 자기수축저감 효과의 경우에도 전혼입 1%와 후혼입 0.5%가 유사한 비율을 나타낼 정도로 후혼입의 효과가 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

종합적으로 전혼입(A)과 후혼입(B)의 비율을 분석한 결과 모든 측정사항에서 후혼입이 100 ~ 116% 범위로 큰 값을 나타내어 HPFRCC의 품질향상에 효과적임을 알 수 있었고, ERCO 혼입량의 경우는 모든 품질 및 효율성을 종합적으로 고려하면 0.5%가 최적인 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 HPFRCC에 ERCO를 물과 함께 혼입하는 전혼입과 믹싱완료 후 혼입하는 후혼입의 2가지 방법과 0, 0.5 및 1.0%의 혼입을 변화에 따른 HPFRCC의 자기수축저감 및 기초적 특성을 분석하여 최적의 혼입시기 및 혼입율을 도출하고자 하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 굳지 않은 상태의 플로치는 ERCO 혼입율이 증가할수록 Plain에 비해 감소하는 경향을 나타내었고, 전혼입에 비해 후혼입시 유동성이 향상되어 시공성 측면에서 후혼입이 더욱 효과적인 것으로 나타났다.
- 2) 공기량의 경우는 ERCO 혼입율이 증가할수록 AE제의 ERCO 흡착작용에 기인하여 Plain에 비해 공기량이 감소하는 경향을 나타내었지만, 전혼입에 비해 후혼입시 공기량 감소를 완화시키는 것으로 나타났다.
- 3) 경화 모르타르의 강도 특성의 경우 전반적으로 ERCO 혼입율 0.5% 혼입시에는 증가, 1.0% 혼입시에는 감소하는 경향을 나타내었고, 전혼입에 비해 후혼입시 양호한 압축 및 인장강도가 측정되었다.
- 4) 자기수축 길이변화율의 경우에는 ERCO 혼입율이 증가할수록, 특히 전혼입에 비해 후혼입시 감소하여, 기존에 문제시되었던 자기수축 저감제의 경제성과 균열 방지에 효과적일 것으로 예상된다.

이상을 종합하면 HPFRCC의 자기수축 저감을 위해 혼입하는 ERCO의 혼입시기는 양호한 유동성, 공기량, 강도발휘 및 자기수축 균열 저감을 위하여 믹싱완료 후 첨가하는 방법이 바람직하고, 혼입율은 0.5%를 첨가하는 것이 제반품질 면에서 가장 효과적인 것으로 판단되었다.

요 약

전 세계적으로 폭발성 물질 사용 증가와 폭탄테러 등으로 인명 및 재산 피해가 증가하고 있는 추세이다. 이에 중요 건축물이나 군사시설에 방호·방폭 성능을 향상시킬 목적으로 섬유보강 고성능 시멘트 복합체(HPFRCC)에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나, HPFRCC의 자기수축 문제를 해결하기 위해 ERCO를 혼입하게 되면 높은 점성 및 지방분의 시멘트 알칼리와의 조기반응으로 유동성, 공기량 및 강도 등 품질저하의 문제점이 발생한다. 이에 본 연구에서는 기존에 도출된 HPFRCC의 최적 배합에 ERCO 혼입시기 및 혼입을 변화에 따른 HPFRCC의 자기수축저감 및 기초적 특성에 대해 분석하였다. 그 결과 모르타르 믹싱완료 후 ERCO를 0.5% 혼입하는 후혼입 방법이 유동성, 강도 및 자기수축저감 등의 HPFRCC의 품질 향상에 가장 효과적인 것으로 밝혀졌다.

키워드 : ERCO, HPFRCC, 자기수축, 혼입시기

References

1. Lee JT, Han CG. Engineering properties of HPFRCC including both organic and inorganic fibers, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2015 Dec;15(6):615–20.
2. Lee JT, Han CG. Physical properties of HPFRCC using fiber combinations according to change of W/B and fiber replacement ratio, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 2015 Nov;31(11):71–8.
3. Jo SJ, Han CG. Fundamental properties and reduction of autogenous shrinkage of HPFRCC depending on various fiber contents and ERCO dosages, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2017 Feb;17(1):1–8.
4. Jo SJ, Han CG. Engineering properties of HPFRCC depending on various fiber mixing ratio and ERCO contents, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 2017 Feb;33(2):45–51.
5. Han MC, Kim TC. Autogenous shrinkage of the high strength concrete using emulsified waste cooking oil, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 2012 Sep;28(9):139–46.
6. Park YJ. Field applications and engineering properties of combined fiber reinforced concrete [Dissertation], [CheongJu (Korea)]: CheongJu University; 2016. 92 p.
7. Lee JH. Engineering properties and field applications of HPFRCC according to mixing phase of emulsified refined cooking oil [Dissertation], [CheongJu (Korea)]: CheongJu University; 2018. 91 p.
8. Jo MK, Han CG. Autogenous shrinkage mock-up test of high performance concrete by emulsified refined cooking oil, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 2016 Sep;4(3):307–15.
9. Yang EI, Shin JH, Choi YS, Kim MY, Lee KM. Comparison on characteristics of concrete autogenous shrinkage according to strength level, development rate and curing condition, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2011 Dec;23(6):741–7.
10. Kim TC. Reduction of autogenous shrinkage for high strength concrete using emulsified refined cooking oil [Dissertation], [CheongJu (Korea)]: CheongJu University; 2016. 143 p.
11. Han MC, Woo DH. Effect of emulsified refine cooking oil on the engineering properties of high volume admixture concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 2013 Sep;29(9):57–64.