

PVA 및 붕사를 사용한 고요변성 시멘트 계열 재료 제조를 위한 기초 물성 분석

Fundamental Properties Analysis for Thixotropic Cement-Based Materials Using PVA and Borax

이 향 선¹

이 유 정¹

이 영 준²

한 동 엽^{3*}

Lee, Hyang-Sun¹

Lee, You-Jung¹

Lee, Young-Jun²

Han, Dongyeop^{3*}

Master student, Department of Architectural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea¹

Undergraduate student, Department of Architectural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea²

Associate Professor, Department of Architectural Engineering, and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea³

Abstract

The aim of the research is to provide thixotropy on cement-based materials. For this purpose, the linkage between polyvinyl alcohol (PVA) and borax was used. Namely, adding the suspensions of PVA and borax in cement paste, the thixotropy of cement paste was confirmed. The thixotropy of cement-based materials can have various advantages on construction process, especially, the placing method using pipe can have advantages. As a result of this research, the linkage between PVA and borax is valid inside of cement paste. Therefore, using PVA and borax, it is confirmed that the cement-based materials can have thixotropy with this method, and it can be expected to contribute on developing new method of placing cement-based materials with thixotropy.

Keywords : fluidity, thixotropy, polyvinyl alcohol, borax, cement paste

1. 서 론

시멘트 계열 재료의 유동성 증진은 전통적인 개념의 사공연도 증진에서 벗어나 자기충전콘크리트와[1] 같은 고성능 콘크리트에서 최근 4차 산업혁명과 더불어 3D 프린팅을[2,3] 위한 유동성 성능 확보에까지 이르고 있다. 레올로지적인 관점에서 콘크리트의 유동성은 대체적으로 항복응력과 소성점도로 정의하는 경우가 많다[4]. 즉, 기존의 슬럼프 및 슬럼프 플로에서 측정되는 변형을 위한 최소한의 힘의 개념인 항복응력과[5,6] 유동하는 콘크리트에서 유동속도 및 재료분리 저감성능에 영

향을 미치는 소성점도는[7] 가장 대표적인 콘크리트 레올로지 정수 (Rheology parameters)이다. Wallavick et al.의 연구에서[8] 보는 바와 같이 유동성이 좋은 콘크리트의 조건은 매우 낮은 항복응력과 필요한 정도의 낮은 수준의 소성점도를 갖는 것인데, 여기서 필요한 정도의 낮은 수준의 소성점도란 재료분리에 저항하기 위함이다. 즉, 소성점도는 유동시에는 낮은 소성점도로 빠르게 유동하는 것이 필요하지만 일정 수준을 유지하면서 유동이 멈출 때에는 고정성과 재료분리저항성을 확보할 필요가 있다. 특히 이러한 성능은 그라우팅과[9] 같이 좁고 다양한 형태의 공간을 채우는 타설방식에서 필요한데, 이렇게 외력이 가해지는 경우에 소성점도가 낮으면서 외력이 제거되고 일정 시간 경과 후에 소성점도가 회복되는 물성을 요변성 (Thixotropy)이라 한다[10,11]. 시멘트 계열 재료에 있어서 요변성은 타설과정에 있어서 안정적인 타설을 가능하게 할 수 있는 능력이며 특히, 3D 프린팅에서는 매우 중요한

Received : February 23, 2020

Revision received : April 29, 2020

Accepted : May 11, 2020

* Corresponding author : Han, Dongyeop

[Tel: 82-55-772-1758, E-mail: donald.dyhan@gnu.ac.kr]

©2020 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

성능이라 할 수 있다.

고요변성의 원리는 재료의 미세구조의 붕괴와 회복이다 [12]. 시멘트 페이스트의 경우에도 미세한 수준의 요변성을 갖는데, 시멘트 입자의 가역적인 결합에 기인한다고 알려져 있다[13]. 즉, 콜로이드성 재료의 반데르발스 힘에 기인하는 약한 응집이 시멘트 계열 재료의 요변성을 부여하고 입도가 작은 분말상 재료를 다량 치환하는 경우에도 요변성을 부여할 수 있다. PVA는 고분자재료로서 붕사가 있는 경우에 결합하는 경향이 있다[14]. 이 결합은 PVA와 붕사의 비율에 따라 결합의 강도가 정해지며 결합이 약한 경우에는 외력에 의해 결합이 붕괴되기도 한다. 또한, 이렇게 붕괴된 결합은 자연스럽게 다시 결합되어 요변성을 갖는 재료라 할 수 있다. 그러나 기존의 요변성 재료가 시간의 경과에 영향을 받기 때문에 소성 점도를 회복하는데에 시간이 소요되는 반면 PVA와 붕사의 결합은 결합이 되는데에 소요되는 시간이 매우 짧다. 그러므로 이러한 PVA와 붕사를 적정량 시멘트 계열 재료에 적용하므로써 고요변성을 부여할 수 있을 것으로 기대한다.

이에 본 연구에서는 PVA와 붕사를 시멘트 페이스트에 첨가하는데에 있어서 시멘트 페이스트의 기초적인 성능에 어떠한 변화를 유발하는지 여부와 요변성 부여 가능성을 평가하여 향후 고요변성 시멘트 계열 재료를 제조하는데에 기여하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험 계획은 Table 1과 같다. PVA와 붕사를 활용하여 시멘트 계열재료의 요변성을 증진시키는 연구는 아직 진행되어 있지 않으므로 본 연구에서는 PVA와 붕사의 적정 사용량을 확인하기 위한 실험을 계획하였다. 실험은 두 단계로 진행하였다. 즉, 첫 번째 실험은 PVA와 붕사의 사용량에 따른 기본 물성 및 요변성 확보여부를 확인하는 실험을 실시하였다. 여기에서는 PVA와 붕사 자체의 사용량을 기준으로 실험을 계획하였다. 두 번째 실험에서는 PVA 대비 붕사의 비율을 고정하고 이 두 재료를 하나의 혼화재료로 보고 시멘트에 대한 질량비를 기준으로 실험을 계획하였다.

첫 번째 실험은 물시멘트 0.30과 0.40의 배합을 준비하였다. 각각의 물시멘트에 대하여 PVA 4% 용액과 붕사 4% 용액에 대하여 PVA용액을 0 g에서 200 g까지 9가지 경우로 준비하였으며 이 때에 붕사용액의 양의 200g으로 고정하였다.

Table 1. Experimental plan

		Mixture conditions		Test
Phase 1		w/c	0.3, 0.4	·Table flow (with and without dropping) ·Flow curve (yield stress, and viscosity) ·Compressive strength (3, 7, and 28 days)
	Dosage of PVA solution (g)*		0, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 180, 200	
Phase 2		w/c	0.3	·Table flow (with and without dropping) ·Flow curve (yield stress, viscosity, and thixotropy) ·Compressive strength (3, 7, and 28 days) ·Setting time (Vicat needle)
	Dosage of PVA solution and Borax solution (Mass cement %)**		0, 1, 2, 3, 4, 5	

* PVA solution was 4% and the dosage of Borax solution was fixed 200g for dosage of PVA solution assessment
 ** Borax solution was 4% and the dosage of Borax solution was fixed 100g for dosage of PVA solution assessment
 *** For PVA solution and Borax solution, the dosages were 4%, and 5%, respectively.

그리고 PVA 용액의 양을 100g으로 고정한 조건에서 붕사 용액의 양을 0에서 300g 까지 10가지 조건을 배합하였다. 흔히 혼화재료의 사용량을 시멘트 질량에 대한 백분율로 배합하는데에 반해 본 실험에서는 사용량의 기준이 없어 수용액의 양으로 배합하였다. 이에 대해서 시멘트 질량에 대한 백분율 비율을 Table 2에 환산하여 나타내었다. 시험항목으로는 플로를 측정하였는데, 플로콘을 들어올린 직후 비타격 상태의 플로와 15회 타격을 한 후의 플로값을 측정하였다. 또한, 레올로지 정수인 항복응력과 소성점도를 측정하였으며 PVA 포함 및 붕사 포함에 따른 압축강도 영향 요소를 확인하기 위해 28일 압축강도를 측정하였다.

두 번째로는 PVA와 붕사에 대하여 콘크리트의 혼화재료로 사용한다는 가정하에 시멘트 질량대비 비율로 배합을 실시하였다. 즉, 첫 번째 실험에서 얻어진 결과를 바탕으로 물시멘트 비 0.3의 시멘트 페이스트에 대하여 PVA 4% 용액을 시멘트 질량 대비 4% 첨가한 경우에 대하여 붕사 5% 용액을 시멘트 질량 대비 0%에서 5%까지 6가지 경우에 대하여 실험을 실시하였다. 붕사수용액의 농도의 변화는 붕사 사용량이 증가할수록 요변성능이 증가하지만 이와 동시에 추가적인 배합수가 증가하는 상황이 발생하여 농도를 증가시켰다. 시험사항으로는 첫 번째 실험과 동일하며 레올로지 측정에서 고요변성을 정량적으로 측정하였으며 붕사에 의한 응결지연현상을 확인하기 위해 응결시험을 실시하였다.

Table 2. Conversion of PVA and borax solutions mass to cement weight percentage

Solution	PVA				Borax		
	Mass (g)	Percentage (Mass cement %)		Mass (g)	Percentage (Mass cement %)		
		w/c			w/c		
		0.3	0.4		0.3	0.4	
PVA assessment	0	0	0	200	12.3	14.3	
	10	0.6	0.7				
	20	1.2	1.4				
	30	1.9	2.2				
	50	3.1	3.6				
	100	6.2	7.2				
	150	9.3	10.8				
200	12.3	14.3					
Borax assessment				0	0	0	
				10	0.6	0.7	
				20	1.2	1.4	
				30	1.9	2.2	
				50	3.1	3.6	
	100	6.2	7.2	100	6.2	7.2	
				150	9.3	10.8	
				200	12.3	14.3	
				250	15.4	17.9	
				300	18.5	21.5	

Table 3. Physical and chemical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Soundness (%)	Chemical component (%)					
			CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Al ₂ O ₃
3.15	3 390	0.05	63.4	22.0	3.44	2.13	1.96	5.27

2.2 사용재료 및 재료준비

본 연구에서 시멘트 페이스트를 제조하기 위해 사용한 재료는 국내산 보통포틀랜드시멘트와 수돗물을 사용하였다. 보통포틀랜드시멘트는 일반적인 시멘트로서 개략적인 성질은 Table 3와 같다. 요변성을 부여하기 위한 PVA와 붕사는 각각 수용액으로 제조하여 사용하였는데, PVA와 붕사 분말을 물에 녹이는 방법으로 제조하였다. PVA의 경우 상온의 물에서는 잘 녹지 않아 PVA를 물에 혼입한 후 200°C로 가열하여 수용액을 만들었다. 또한, 붕사의 경우는 수용액으로 만들 수 있는 농도가 그리 높지 않아 최대 5%까지 수용액으로 만들 수 있었다.

시멘트 페이스트 제조 방법은 PVA 수용액과 붕사 수용액의 반응속도가 빠르기 때문에 시멘트 페이스트를 먼저 제조하고 PVA 수용액을 혼입하여 믹싱한 후, 마지막으로 붕사 수용액을 혼입하여 믹싱하였다(Figure 1 참조).

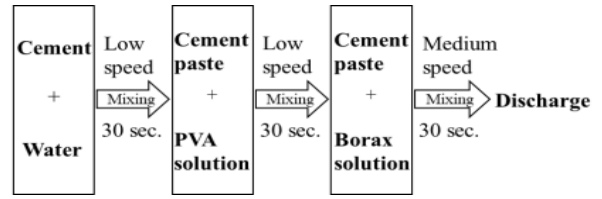


Figure 1. Mixing protocol for cement paste

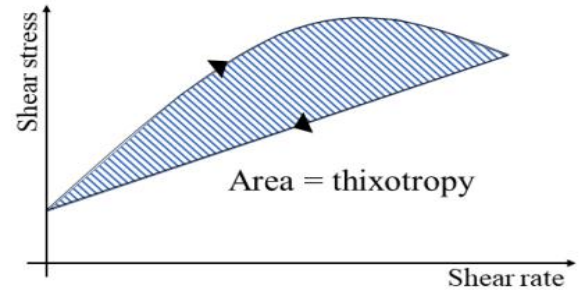


Figure 2. Hysteresis-loop for thixotropy

2.3 시험방법

본 연구에서는 시멘트 페이스트의 요변성 여부 및 기초적인 물성을 확인한다. 먼저, 시멘트 페이스트의 요변성을 확인하기 위하여 플로테스트를 실시하였다. 플로테스트는 KS L 5111의 플로테이블을 이용하여 플로콘을 들어올린 직후의 비타격 상태에서 플로를 측정하고 이후 15회 타격을 실시한 후의 플로를 측정한다. 레올로지 정수 및 요변성 측정방법은 독일의 Thermo KA사의 Viscotester-IQ 레오미터를 사용하여 빙험 모델(Bingham model)을 이용한 유동간 측정되는 소성점도와 추정되는 항복응력을 측정한다. 요변성 측정은 Figure 2에서 보는 바와 같이 hysteresis-loop방법에 의해 측정하고 여기서 나온 측정값은 소프트웨어 프로그램에서 계산된 값을 이용한다. 붕사 사용에 의한 응결 지연 및 PVA의 첨가에 의한 강도 변화를 측정하기 위해서 KS L 5102에 의한 비카트시험 및 KS L 5105에 의한 정육면체 형태의 몰드를 이용하여 재령 28일에 압축강도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 PVA와 붕사 수용액의 첨가량에 따른 결과

3.1.1 플로

요변성은 외력이 가해진 경우에 낮은 점성을 갖으면서 시간

이 지나면 점성이 회복되는 특성이다. 그러므로 테이블 플로에서 플로콘을 들어 올린 직후의 유동성과 충격을 가한 후의 상태를 가지고 요변성을 개략적으로 표현할 수 있을 것으로 판단하였다. Figure 3은 PVA와 붕산 수용액의 양에 따른 플로시험결과를 나타낸다. 먼저, Figure 3의 (a)의 경우는 4% PVA 수용액 사용량에 따른 플로 결과를 나타낸다. 먼저, 물결합재비 0.3에서 타격을 실시하지 않는 경우에는 PVA 수용액의 사용량과 관계없이 플로우는 증가하지 않고 100mm를 유지하는 것으로 나타났다. 즉, 외력이 추가적으로 가해지지 않는 상황에서는 플로시험 조건에서 유동성이 발휘되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 물결합재비 0.3에서 타격을 실시한 후와 물결합재비 0.4 비타격의 경우에는 모든 경우에 있어서 플로우가 증가하였다. (물결합재비 0.4의 시멘트 페이스트에서 타격한 경우는 모든 경우에 플로 300mm를 초과하였다.) 즉, 추가적인 외력이 발생한 경우에 유동을 시작하여 요변성을 갖는 것으로 판단된다. 타격에 의한 유동성 증진효과는 전반적으로 PVA 수용액의 사용량이 증가함에 따라 감소하였는데, 이를 통해 PVA 수용액의 사용량은 유동성 증진에 반하는 영향을 주는 것으로 판단된다.

한편, 붕산수용액의 사용량에 따른 플로 결과는 Figure 3의 (b)에서 나타내는 바와 같이 물결합재비 0.3 비타격 조건에서 유동성 발현이 되지 않고 타격 조건에서 유동성이 발현되는 요변성을 보여주고 있다. 다만, 흥미로운 부분은 붕산수용액 사용량에 따라 물결합재비 0.3 타격한 경우와 물결합재비 0.4 비타격 경우에 유동성이 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내는데, 이는 붕산수용액의 사용량에 따라 PVA의 결합에 사용되는 붕사의 양에 의한 영향과 더불어 과도한 붕산수용액이 배합수 증가 효과를 유발하는 것으로 판단된다. (물결합재비 0.4의 시멘트 페이스트에서 타격한 경우는 모든 경우에 플로 300mm를 초과하였다.)

3.1.2 레올로지

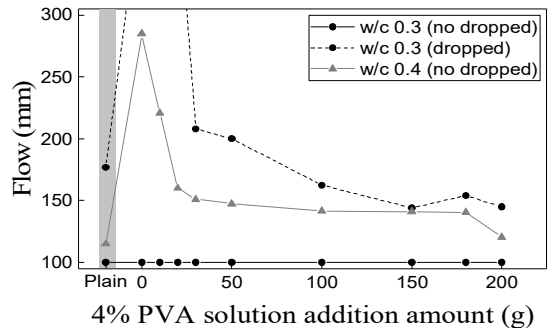
PVA 및 붕산 수용액 사용량에 따른 시멘트 페이스트의 빙험 모델을 사용한 항복응력 및 소성점도 검토결과를 Figure 4와 5에 나타내었다. 빙험모델은 유동하는 유체에 대해 측정하여 동적 항복응력 및 소성점도를 측정하는 방법으로 요변성을 판단하기에는 무리가 있다. 그러나 PVA 및 붕산 수용액이 시멘트 페이스트의 유동성에 미치는 요인에 대해서는 효과적으로 분석이 가능하다고 판단하였다. Figure 4 (a)는 PVA 수용액 사용량, (b)는 붕산 수용액에 따른 각각의 항복응력의 변화를 보여주고

있다. 전반적으로 PVA는 항복응력을 증가시키는 영향을 주고 있으나 이는 사용량이 100g을 넘어가는 수준에서 일어나고 있으며 붕사의 경우는 항복응력을 감소시키는 영향을 주고 있다.

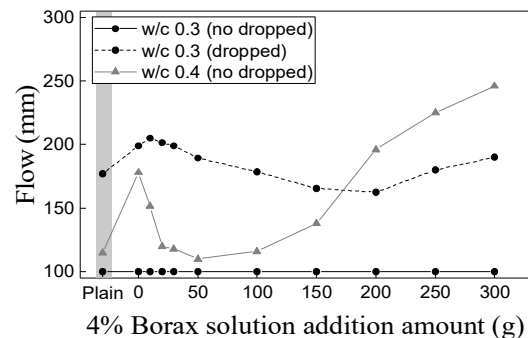
소성점도 결과는 Figure 5에 나타내고 있다. 소성점도 또한 항복응력과 유사한 경향을 나타내고 있다. 즉 PVA의 경우에는 소성점도를 증가시키는 영향을, 붕사의 경우에는 소성점도를 감소시키는 영향을 주고 있다. 즉, 이러한 결과에 따라 PVA와 붕사의 조합을 적절히 조정하여 요변성을 높이는 동시에 유동성에 악영향을 주지 않는 범위를 선택해야 한다는 것을 판단할 수 있었다. 특히, PVA 및 붕사의 사용 목적이 유동성의 증진이 아니므로 과도한 양의 붕산사용은 요변성 증진을 유발하더라도 꼭 바람직하다고는 할 수 없다고 생각된다.

3.1.3 압축강도

기존의 혼화제는 사용량이 소량으로 개선하고자 하는 성능 이외의 성능에는 큰 영향을 미치지 않는다. 그러므로 본 PVA 및 붕산 수용액이 압축강도에 미치는 영향에 대해 분석하여



(a) Influence of PVA solution
(The borax solution was added 200g for every case.)



(b) Influence of borax solution
(The PVA solution was added 100g for every case.)

Figure 3. Influence of PVA and borax solution on flow depending on adding amount. (All w/c 0.4 of dropped cases were removed because the pastes were spread wider than 300 mm.)

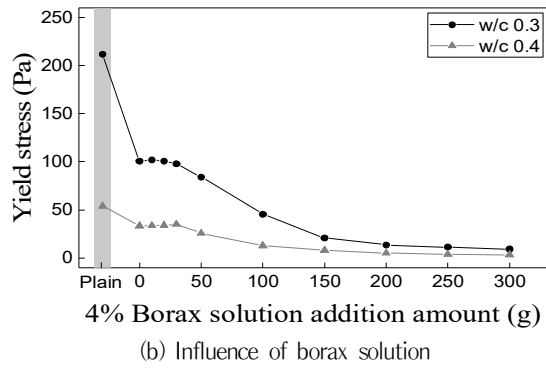
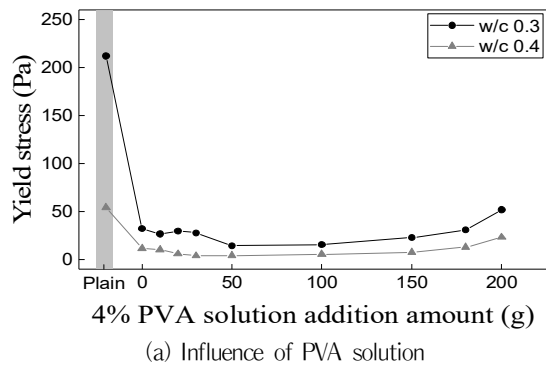


Figure 4. Influence of PVA and borax solution on yield stress (by adding amount)

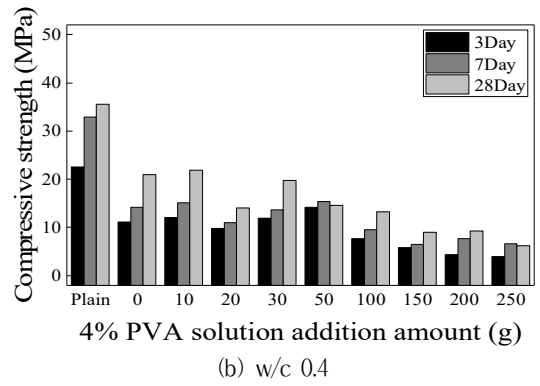
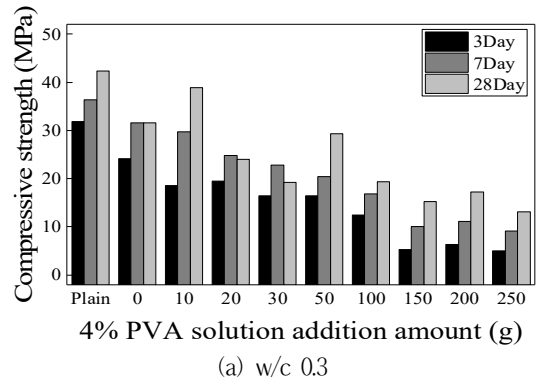


Figure 6. Influence of PVA solution on compressive strength (by adding amount)

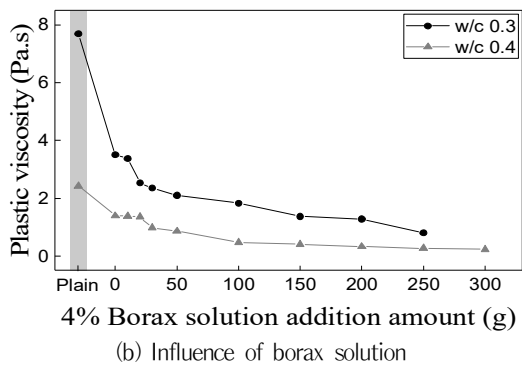
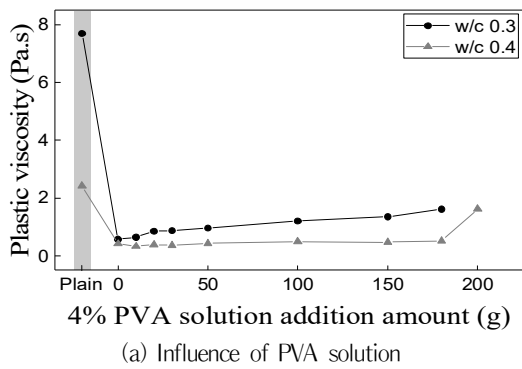


Figure 5. Influence of PVA and borax solution on plastic viscosity (by adding amount)

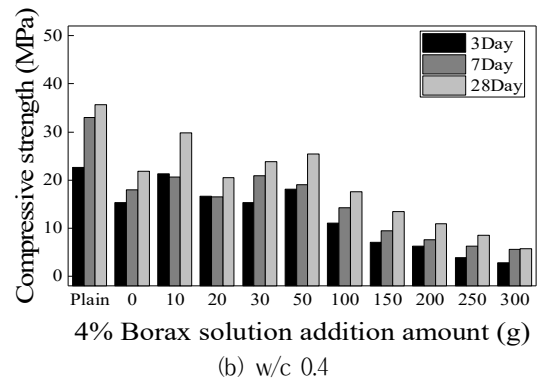
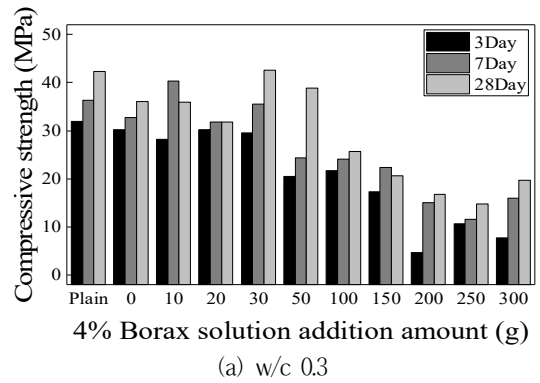


Figure 7. Influence of borax solution on compressive strength (by adding amount)

Figure 6과 7에 나타내었다. 먼저, Figure 6에서 나타내는 바와 같이 PVA 수용액은 사용량이 증가할수록 압축강도가 저하하는 경향을 나타내었다. 다만, 사용량이 10g 이내인 경우에는 그 영향도가 작다고 할 수준이었다. 또한, Figure 7에서 나타내는 붕사 수용액이 압축강도에 미치는 영향에 대해서는 대략 사용량이 50g 수준까지는 압축강도에 미치는 영향이 작다고 할 수 있었다. 이를 통해 PVA와 붕사 수용액을 콘크리트 배합에 사용할 때는 과도한 양을 사용하지 말아야 하며, 부득이한 경우에는 강도 보정이 필요할 수도 있다고 생각된다.

3.2 시멘트 질량 대비 첨가량에 따른 결과

3.2.1 플로

Figure 8은 시멘트 질량대비 PVA 및 붕사 수용액의 비율 증가에 따른 플로 결과를 타격과 비타격으로 나누어 나타내고 있다. 시험결과에서 나타내는 바와 같이 PVA와 붕사가 포함되지 않은 경우에도 비타격에서는 플로우가 발현되지 않았다. 이는 물시멘트비 0.30이 타격시 PVA 및 붕사 수용액 5% 이내에서는 비타격시 플로우가 발현되지 않아 유동성이 제어되고 있음을 알 수 있었다. 다만, 타격시에는 유동성이 발현되고 있어 PVA 및 붕사 수용액이 추가되면 타격시 유동성이 더욱 증진되어 PVA 및 붕사 수용액 첨가시 배합수 증진이 영향을 줌과 동시에 비타격시 유동성 제어가 이루어짐을 알 수 있었다. 다만, PVA 및 붕사 수용액 4% 부터는 타격시의 유동성이 저감되어 PVA와 붕사의 결합이 유동성을 저감시키는 요인으로 작용하였다고 볼 수 있다.

3.2.2 항복응력과 소성점도

Figure 9와 10에 시멘트 질량대비 PVA 및 붕사 수용액의 비율 증가에 따른 항복응력과 소성점도 변화를 나타내었다. PVA와 붕사 수용액을 첨가함에 따라 항복응력과 소성점도가 공통적으로 저하하는 모습을 보였다. 이는 항복응력과 소성점도 측정방식이 동적 측정방법인 Flow curve 방법을 사용한 것에 기인한다고 볼 수 있다. 즉, 외력이 가해지는 경우에는 PVA와 붕사의 결합에도 불구하고 수용액의 배합수의 양이 증가할수록 유동성이 증진되어 PVA와 붕사의 결합이 붕괴될 수 있는 약한 정도의 결합임을 알 수 있었다. 또한, 4% 이상의 PVA 및 붕사 수용액 첨가시에도 항복응력과 소성점도가 저하하였다. 이는 플로 시험의 타격보다 flow curve 시험의 전단변형이 더 에너지가 높아서 PVA와 붕사 결합을 붕괴시켰다고 볼 수 있다.

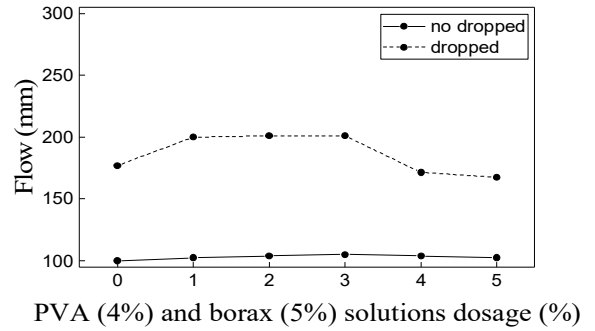


Figure 8. Influence of PVA and borax solutions on flow (by adding percentage)

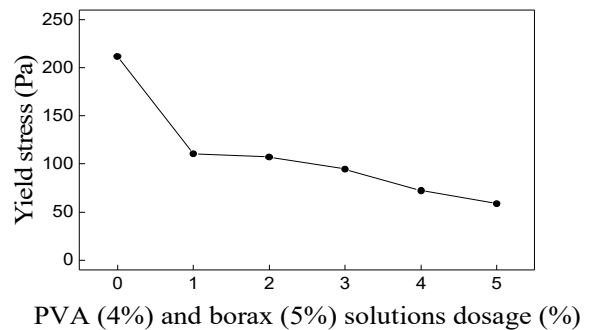


Figure 9. Influence of PVA and borax solutions on yield stress (by adding percentage)

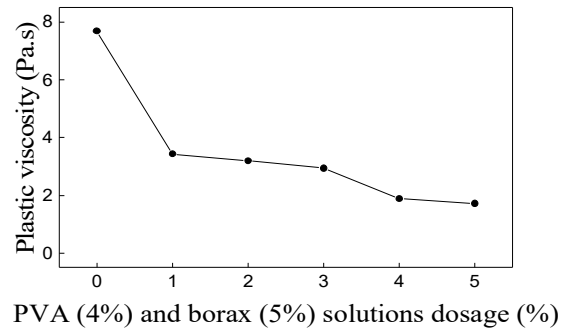


Figure 10. Influence of PVA and borax solutions on viscosity (by adding percentage)

3.2.3 요변성

요변성 시험결과는 가장 직접적인 성능을 보여주는 것으로 Figure 11에 나타낸다. 결과에서 나타내는 바와 같이 PVA와 붕사 수용액이 포함되지 않은 경우에는 요변성이 거의 나타나지 않았다. 그러나 PVA와 붕사 수용액이 포함되는 경우에는 매우 큰 폭으로 요변성이 발현되었으며 이는 5% 까지 지속적으로 증가하였다. 즉, PVA와 붕사의 결합으로 발생하는 요변

성은 매우 적은 양으로도 요변성을 발현할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 아직 적용 가능한 요소들에 따른 요변성 정도를 판단하거나 제시하는 연구가 진행되지 않아 적정 수준의 요변성을 파악하기는 추가 연구가 필요하다. 하지만 PVA와 붕사 첨가량이 증가하는 경우에는 콘크리트에 다양한 형태의 영향을 미칠 우려가 있어 적절한 요변성을 확보한 수준에서 최소량을 사용해야 할 것이다.

3.2.4 압축강도

PVA와 붕사는 수용액 상태로 첨가되었기 때문에 PVA와 붕사 수용액의 첨가량이 증가할수록 혼합수의 양이 증가한다. 즉, 압축강도는 저감되게 된다. 이러한 시험 결과를 Figure 12에 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이 전체적으로는 PVA와 붕사 수용액의 첨가량이 증가할수록 압축강도는 저감되는 모습을 보였다. 그러나 28일 압축강도를 기준으로 3% 첨가량까지는 압축강도에 영향을 크게 주지 않는 것으로 나타났다. 다만, 초기강도가 다소 저감하는 모습을 나타냈으나 이 또한 시험 오류 또는 큰 영향 범위는 아닌 것으로 판단된다.

3.2.5 응결시간

붕사는 시멘트 입자가 응해 되는 과정에서 발생하는 Ca^{2+} 와 OH 이온과 화학결합하여 $CaB(OH)_4$ 를 생성하여 시멘트 입자 표면에 피막을 형성한다고 알려져 있다[15]. 그 결과 붕사가 포함된 시멘트의 경우는 수화반응이 지연되었다. 본 연구의 재료인 붕사 수용액의 첨가율에 따른 응결 시간 측정결과를 Figure 13에 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이 PVA와 붕사 수용액 첨가량이 증가할수록 선형으로 초결과 종결이 지연되는 모습을 나타내고 있다. 그러나 특이점으로는 초결과 종결 사이의 시간은 다소 짧아지는 모습을 보이고 있다. 즉, 초결의 지연폭이 매우 큰데, 이러한 응결 지연효과를 충분히 이해하고 요변성 재료를 활용하는 것은 매우 중요하다고 하겠다. 그러나 PVA 및 붕사 수용액 첨가율이 4% 이내 범위에서는 종결이 9시간 이내로 이루어져 기존의 시멘트 재료보다는 응결이 지연되나 수직적인 시공이 이루어지는 건축 구조물의 시공에서 벗어나 그라우팅이나 뒷채움재료의 용도로써는 활용하는 방안도 모색해 볼 만하다. 또한, 향후 연구로 이러한 응결시간을 단축시키기 위한 연구가 필요해 보인다.

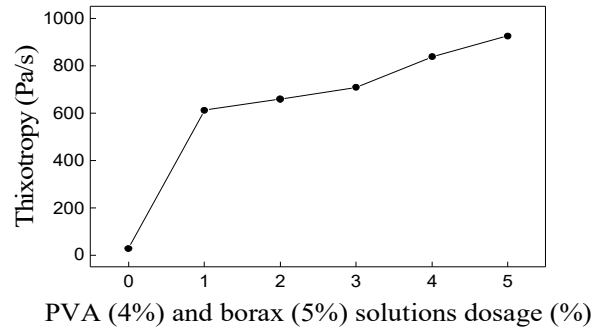


Figure 11. Influence of PVA and borax solutions on thixotropy (by adding percentage)

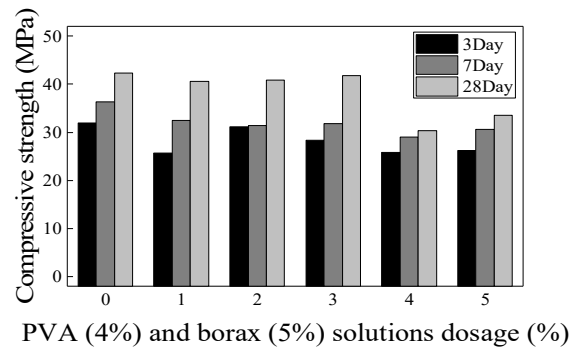


Figure 12. Influence of PVA and borax solutions on compressive strength (by adding percentage)

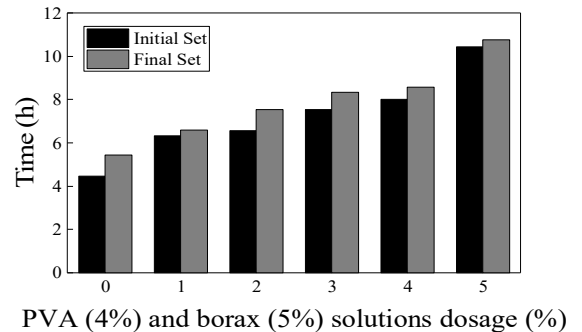


Figure 13. Influence of PVA and borax solutions on setting time (by adding percentage)

4. 결 론

본 연구에서는 시멘트 계열재료에 고요변성을 부여하기 위하여 PVA와 붕사의 결합을 이용하고자 하였다. 이러한 고요변성 시멘트 계열 재료는 다양한 유동성에서의 장점을 갖을 수 있으며 특히, 최근 주된 타설형태의 압송에 유리하며 타설된 재료의 안정화에 유리할 것으로 판단된다. 본 연구에서 진행된

PVA와 붕사 수용액의 첨가율에 따른 제반 성능 및 요변성 확보 여부 시험결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) PVA와 붕사의 결합은 시멘트 페이스트에 첨가되어도 발현하였으며 이는 시멘트 페이스트에 요변성을 부여하였다. 상대적으로 적은 양의 PVA와 붕사로도 요변성이 발현되었으며 과도한 양이 포함되는 경우에는 유동성에 악영향을 주었다.
- 2) PVA와 붕사 수용액을 포함하는 시멘트 페이스트는 외력이 작용하는 조건에서는 유동성이 발현되어 PVA와 붕사 수용액의 첨가량이 증가할수록 수용액에 포함되어 있는 배합수에 의해 유동성이 증진되고 항복응력 및 소성점도도 낮아졌다.
- 3) PVA 4%와 붕사 5% 수용액을 포함하는 시멘트 페이스트는 요변성 측정에서 매우 높은 수준의 요변성을 나타냈으며 PVA와 붕사 수용액 첨가량이 증가할수록 요변성이 높아지는 모습을 나타내었다.
- 3) PVA와 붕사 수용액을 포함하는 시멘트 페이스트의 강도는 PVA와 붕사 수용액의 첨가량이 증가하면 강도가 저감되는 경향을 보이나 PVA 4% 수용액 및 붕사 5% 수용액을 시멘트 질량의 3% 이내의 적정수준으로 사용한 경우에는 압축강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.
- 4) 붕사의 첨가는 시멘트의 수화를 지연시키는 경향을 나타내었다. 그러나 초결에 대한 영향이 상대적으로 컸으며 초결 이후 종결에 이르는 시간은 짧은 경향을 나타내었다. 그러나 요변성이 충분한 조건일 경우 외력이 없는 조건이라면 응결전까지 시멘트 페이스트의 유동이 제어될 것으로 판단한다.

요 약

본 연구의 목적은 시멘트 계열재료에 요변성을 부여하기 위한 것이다. 이를 위해 PVA와 붕사의 결합을 이용하였다. 즉, PVA와 붕사 수용액을 시멘트 페이스트에 첨가하여 PVA 및 붕사의 결합에 의한 요변성 발현여부를 확인하였다. 시멘트 계열 재료에서 요변성 발현은 시공과정에서 다양한 이점을 확보할 수 있으며 특히 최근 주된 타설 방법인 관을 사용한 타설 방법에서 유리하게 작용할 수 있다. 본 연구의 결과로써 시멘트 페이스트 내부에서 PVA와 붕사의 결합이 유효하다는 것을 알 수 있었다. 결과적으로 시멘트 계열 재료에 대하여 PVA와 붕

사를 이용하여 요변성을 부여할 수 있었다. 향후 본 연구의 결과를 이용하여 다양한 형태의 시멘트 계열재료의 시공성 개선에 도움이 될 것으로 기대한다.

키워드 : 유동성, 요변성, PVA, 붕사, 시멘트 페이스트

Funding

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning(2018R1C1B6005814).

ORCID

Hyang-Sun Lee, <http://orcid/0000-0002-9134-5842>

You-Jung Lee, <http://orcid/0000-0002-6945-1278>

Young-Jun Lee, <http://orcid/0000-0002-0870-6142>

Dongyeop Han, <http://orcid/0000-0003-0918-0530>

References

1. Khayat KH. Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete. *Materials Journal*. 1999 May;96(3):346-53. <https://doi.org/10.14359/632>
2. Gosselin C, Duballet R, Roux Ph, Gaudillière N, Dirrenberger J, Morel Ph. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*. 2016 Jun;100:102-9. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>
3. Duballet R, Baverel O, Dirrenberger J. Classification of building systems for concrete 3D printing. *Automation in Construction*. 2017 Nov;83:247-58. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.018>
4. Ferraris CF, Gaidis JM. Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste. *Materials Journal*. 1992 Jul;89(4):388-93. <https://doi.org/10.14359/2575>
5. Roussel N, Coussot P. "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: from slump to spreading flow. *Journal of rheology*. 2005 May;49(3):705-18. <https://doi.org/10.1122/1.1879041>
6. Saak AW, Jennings HM, Shah SP. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. *Cement and concrete research*. 2004 Mar;34(3):363-71. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.005>

-
7. Khayat KH, Guizani Z. Use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete. *Materials Journal*. 1997 Jan;94(4):332-40. <https://doi.org/10.14359/317>
 8. Wallevik OH, Wallevik JE. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. *Cement and concrete research*. 2011 Dec;41(12):1279-88. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.009>
 9. Khayat KH, Saric-Coric M, Liotta F. Influence of thixotropy on stability characteristics of cement grout and concrete. *Materials Journal*. 2002 May;99(3):234-41. <https://doi.org/10.14359/11968>
 10. Assaad J, Khayat KH, Mesbah H. Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete. *Materials Journal*. 2003 Mar;100(2):99-107. <https://doi.org/10.14359/12548>
 11. Ferron RPD. Formwork pressure of self-consolidating concrete: influence of flocculation mechanisms, structural rebuilding, thixotropy and rheology [dissertation]. [Chicago (U.S.A)]: Northwestern University; 2008. 293 p.
 12. Ferron RP, Gregori A, Sun Z, Shah SP. Rheological Method to Evaluate Structural Buildup in Self-Consolidating Concrete Cement Pastes. *Materials Journal*. 2007 Jan;104(3):242-50. <https://doi.org/10.14359/18669>
 13. Banfill PFG. The rheology of fresh cement and concrete—a review. *Proceedings of the 11th international cement chemistry congress*; 2003 May; Durban, Republic of south Africa: Document Transformation Technologies; 2003. p. 50-62.
 14. Casassa EZ, Sarquis AM, Van Dyke CH. The gelation of polyvinyl alcohol with borax: A novel class participation experiment involving the preparation and properties of a "slime". *Journal of Chemical Education*. 1986 Jan;63(1):57. <https://doi.org/10.1021/ed063p57>
 15. Davraz M. The effects of boron compounds on the properties of cementitious composites. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2010 Mar;17(1):1-18. <https://doi.org/10.1515/secm.2010.17.1.1>