

Research Paper

고유동 일반강도 콘크리트의 요변성 부여에 따른 거푸집 누출 저감 성능 분석

Assessment of Formwork-Seepage Minimization in High Fluidity, Normal Strength Concrete Utilizing Thixotropic Properties

김영기¹ · 이유정² · 김인태³ · 한동엽^{4*}

Kim, Young-Ki¹ · Lee, Yu-Jeong² · Kim, In-Tae³ · Han, Dong-Yeop^{4*}

¹Doctoral Student, Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

²Doctoral Student, Department of Architectural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea

³Master Student, Department of Architectural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea

⁴Associate Professor, Department of Architectural Engineering, and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea

*Corresponding author

Han, Dong-Yeop
Tel : 82-55-772-1758
E-mail :
donald.dyhan@gnu.ac.kr

Received : April 25, 2023

Revised : May 31, 2023

Accepted : June 16, 2023

ABSTRACT

The central objective of this study is to curtail the leakage of mortar or cement paste, often resultant of ill-constructed formwork, by implementing thixotropy in the formulation of high-fluidity, standard-strength concrete. When such concrete is utilized in smaller scale construction projects, instances of formwork gaps due to suboptimal construction precision may lead to significant leakage of mortar and paste, a problem not typically encountered with traditional slump-flow concrete. In this investigation, Polyvinyl Alcohol(PVA) and borax are incorporated into the concrete mixture to induce thixotropy. The experimental design includes varying methodologies for integrating PVA and borax, while assessing alterations in diverse concrete performances, including thixotropy and leakage reduction potential that simulates formwork gap conditions. Under the experimental conditions defined within this study, it was found that replacing, rather than merely adding PVA and borax, aids in averting water addition via suspensions. This approach yielded promising results in terms of concrete properties and proved efficacious in stemming leakage in concrete possessing sufficient thixotropy. Notably, when a 6% PVA suspension was substituted, a significant reduction in leakage was observed. Consequently, it is projected that construction quality can be ensured, even with lower precision formwork, by applying thixotropy to concrete through the use of PVA and borax.

Keywords : high fluidity concrete, thixotropy, polyvinyl alcohol, borax, formwork leakage

1. 서론

1.1 연구 배경

고유동 콘크리트의 도입은 콘크리트 구조물 시공에 있어 품질의 향상과 더불어 시공인력 저감 및 시공 시간 단축이라는 이점을 가져왔다[1]. 이러한 고유동 콘크리트는 특수 콘크리트의 일종으로 규모가 크거나 특수한 조건의 시공조건에서 주로 사용되었다. 그러나 최근 노동력의 감소 및 노령화, 사회환경의 변화에 따른 레미콘 가용시간 및 시공시간의 감소로 인해 일반적인 시공조건에서도 고유동 콘크리트의 사용이 요구되고 있다[2]. 고유동 콘크리트의 사용경 확대는 기존의 특수한 조건에서의 높은 수준의 품질관리 조건에서 일반적이고 소규모의 건설 현장 조건에서도 고유동 콘크리트를 사용할 수 있는



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

환경에 직면하였음을 뜻한다. 즉, 이러한 경우 상대적으로 낮은 수준의 품질관리 및 시공정밀도 상황에서 고유동 콘크리트를 사용할 수 있게 되었다. 결국, 기존의 일반적인 수준의 유동성을 갖는 콘크리트는 유동의 형태가 무너지는 형태로서 다소간의 거푸집 틈새에도 콘크리트의 누출 발생이 심각한 문제가 되지 않았다. 그러나 고유동성을 발휘하는 콘크리트의 경우에는 유동의 형태가 흐르는 형태를 가짐으로써 거푸집의 틈새를 통해 다량의 페이스트 및 모르타르가 분리되어 누출될 우려가 있다[3]. 특히, 일반강도 배합의 콘크리트에 고유동성이 부여될 때는 굳지 않은 상태에서 항복응력이 감소하여 유동성이 발휘됨과 동시에 감수제 첨가에 의한 시멘트 입자 분산 작용에 따른 잉여수 방출로 인한 소성점도의 저감 또한 예측되어 거푸집 틈새를 통한 누출 및 재료분리가 심화될 수 있다[4]. 이러한 문제는 일반강도 콘크리트를 사용하는 대다수의 건설 현장에서 고유동 콘크리트를 사용하고자 할 때 발생할 수 있는 문제점이며 이에 대한 대책으로는 거푸집 조립과정에서 조립 정밀도 향상과 충분한 검사를 통한 사전 예방 방법이 주로 거론될 수 있다. 하지만 이러한 방법은 여전히 유품을 사용하여 조립하는 형태의 거푸집을 사용하는 소규모 현장에서는 항상 확보되기 어려운 면이 있다. 이에 본 연구에서는 재료적인 관점에서 거푸집 틈새를 통한 누출을 줄이는 방안을 제시하고자 한다.

요변성(Thixotropy)은 대상 물체에 대해 일정한 외력이 가해지는 경우 물체의 소성점도가 감소하지만, 가해진 외력이 제거되면 다시 소성점도가 회복되는 성질이다[5]. 이러한 요변성은 현탁액(Suspension)을 구성하는 입자들의 가역적인 결합과 분해로 이해된다[6]. 즉, 가역적 결합을 특성으로 하는 입자들이 외부의 응력에 의해 분해되었다가 응력이 제거된 후에 다시 결합하는 현상이다. 이러한 입자의 가역적 결합 특성은 시멘트 입자에서도 볼 수 있는데, 콜로이드 영역에 있는 시멘트 입자들의 콜로이드 힘(Colloidal forces)에 의해 요변성이 발현될 수 있다[7,8]. 그러나 이러한 시멘트 페이스트의 요변성은 그 크기가 제한적이고, 모르타르나 콘크리트와 같이 골재를 포함할 때는 무시할 수 있는 수준으로 낮다. 또한, 시멘트 입자의 결합을 지배하는 수화반응은 비가역적인 결합 형태로서 시멘트 입자 자체로서의 요변성을 기대하는 것은 현실적이지 않다. 그러므로 많은 연구자가 시멘트 계열재료에 요변성을 부여하고자 추가적인 재료를 첨가하는 방법을 채택해 왔다. 즉, 말뚝 시공을 위한 벤토나이트 현탁액을 활용하는 방안이나 Ferron 등에 의한 메타카올린(Metakaoline)을 활용한 자기 충전 콘크리트의 요변성 부여를 통한 거푸집 측압 저감 등이 대표적이다[9,10]. 이와 유사하게 저자들은 이전 연구를 통해 PVA와 붕사를 시멘트 계열재료에 포함해 요변성을 얻고자 하였다[11-13]. 이러한 방안은 기존의 방법과 달리 PVA와 붕사의 직접적인 결합을 유도함으로써 보다 직관적이고 강한 요변성을 얻을 수 있을 것으로 기대한다. 이전 연구에서는 모르타르에 대해 요변성이 발현되어 거푸집 틈새를 통한 누출을 저감하는 성능을 확인하였다.

본 연구에서는 고유동성이 부여된 일반강도 배합의 콘크리트에 대하여 거푸집 틈새에 따른 누출을 방지할 목적으로 요변성을 부여하고자 한다. 이렇게 부여된 요변성은 다양한 거푸집 틈새에 의한 콘크리트 및 모르타르의 누출을 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 통해 PVA와 붕사를 통해 콘크리트 및 시멘트 계열재료에 요변성을 부여하는 것이 가능하며 실제 콘크리트의 거푸집 틈새를 통한 재료누출에 따른 품질 저감 방지에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 실험사항

2.1 실험계획

본 연구는 고유동성을 발휘하는 일반강도 배합의 콘크리트에 대하여 다양한 조건의 PVA와 붕사를 혼입하여 요변성 발현 여부 및 거푸집 틈새를 모사한 조건에서 콘크리트 및 모르타르의 누출 저감 성능을 평가하고자 하였다. 이를 위한 실험계획을 Table 1에 나타내었다. 물시멘트비는 일반강도 범위를 확보할 수 있는 수준에서 28일 압축강도 약 24MPa를 만족할 것으로 판단되는 0.55로 진행하였고 잔골재율은 0.45로 고정하였다. 단위수량은 두 가지 경우로 구분하여 진행하였는데 단위수량을 185kg/m³으로 하고 PVA 및 붕사 수용액을 그대로 혼합한 경우(이하 AD(Addition)), 혼합하는 PVA 및 붕사 수용액

에 포함된 물의 양만큼 단위 수량 185kg/m^3 에서 차감하는 경우(이하 RP(Replacement))로 하였다. 콘크리트의 고유동성을 발현하기 위한 감수제는 시중에서 사용되는 폴리칼복실계 고성능 감수제를 사용하였으며 사용량은 시멘트 질량 대비 0.5%로 첨가량을 고정하였다. 이러한 조건에 대하여 요변성 부여 정도를 평가하기 위해 6.53% 농도의 PVA 수용액 첨가량을 시멘트 질량 대비 0~7% 범위에서 6가지로 준비하였고, 이에 대해 5% 농도의 붕사 수용액 첨가량을 PVA 수용액 질량 대비 50%로 고정하였다. 이는 이전 연구 결과에 따른 최적의 요변성이 부여된 PVA와 붕사 비율에 따라 결정하였다.

Table 1. Experimental framework

Mixture conditions		Test
W/C*	0.55	
Unit water content (kg/m ³)	Fixed 185, Variable 185****	
S/a	0.45	
SP**	Type Dosage (% cement mass)	Polycarboxylate - Slump and Slump flow - EIS(using data from slump and slump flow) - Rheology(yield stress, plastic viscosity, thixotropy)
PVA***	Type Dosage (% cement mass)	Diluted solution(6.53 %) - Setting time(vicat needle) - Leakage weight and length(before and after compaction)
Borax	Type Dosage (% PVA mass)	Diluted solution(5 %) 50

*Water-to-cement ratio

**Super plasticizer

***Polyvinyl alcohol

****Subtract water mass of the PVA and borax solutions from unit water content to keep the same unit water content

시험 항목으로는 먼저 고유동 콘크리트의 유동 성능을 개략적으로 확인하기 위해 슬럼프 플로를 측정하였고 PVA 및 붕사 수용액을 사용함에 따라 콘크리트 배합에 미치는 영향 정도를 판단하기 위해 재료분리 여부를 판단하고자 재료분리 정수(이하 EIS)를 이용하여 적절한 배합 여부를 평가하였다. 콘크리트에 대한 실험이지만, 굵은 골재의 재료분리 및 거꾸집 틈새로 굵은 골재가 통과될 확률은 적다고 판단하여 굵은 골재를 제거한(wet-sieving) 모르타르 조건에서 레올로지 시험을 통해 항복응력, 소성점도 및 요변성을 측정하였다. 또한, 요변성 확보를 위해 사용되는 붕사에 의한 응결 지연 정도를 확인하기 위해 응결시험을 실시하였고 실질적인 누출 방지 성능을 확인하기 위해 거꾸집에 발생하였다고 가정된 틈새를 20, 30, 40mm 인 3단계로 구분하여 누출 정도를 평가하고자 하였다.

2.2 사용재료 및 시료 준비

2.2.1 사용재료

콘크리트 배합을 위한 배합수는 일반 수돗물을 사용하였으며 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 사용된 시멘트의 물리·화학적 특성을 Table 2에 나타내었다. 고성능 감수제는 폴리칼복실계로 국내 D사의 제품을 사용하였으며 그 특성을 Table 3에 나타내었다. 요변성 부여를 위해 사용한 PVA는 시중에서 구할 수 있는 농도 6.53%로 제조된 수용액을 사용하였고 붕사의 경우 붕사 분말을 고온의 물에 녹인 후 식혀서 사용하였으며 붕사 수용액의 농도는 5%로 하였다. 콘크리트 배합을 위해 사용된 잔골재는 부순 모래와 강모래를 7:3 비율로 혼합하여 표준 입도 곡선에 맞추어 사용하였으며 굵은 골재의 경우 부순 굵은 골재를 표준 입도 곡선에 맞도록 25mm 굵은 골재에 13mm, 5mm 골재를 혼합하여 사용하였다.

2.2.2 콘크리트 배합

본 연구에서 사용한 PVA와 붕사는 40L 강제형 믹서를 이용하여 고유동 콘크리트를 먼저 배합하고 PVA 수용액 및 붕사 수용액을 차례로 혼합하여 믹싱하였다. 이러한 배합 과정을 Figure 1에 도식화하여 나타내었다.

Table 2. Physical and chemical characteristics of cement

Density(g/cm ³)	Blaine(cm ² /g)	Soundness(%)	Chemical component(%)				
			CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Al ₂ O ₃
3.15	3.390	0.05	63.4	22.0	3.44	1.96	5.27

Table 3. Physical attributes of superplasticizer

Phase	Color	Main component	Specific gravity	Solid content(%)	pH
Liquid	Brown	Polycarboxylate	1.048	20	5.4

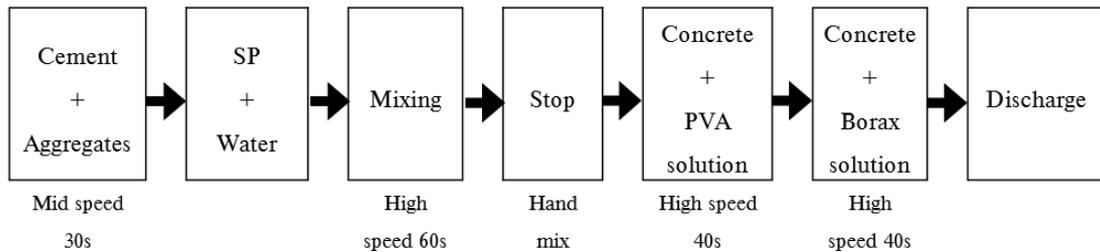


Figure 1. Concrete mixing procedure

2.2.3 콘크리트 배합설계

고유동 콘크리트에 요변성을 부여하기 위한 PVA 및 붕사 수용액은 콘크리트에 첨가될 때 여분의 물이 혼합되므로 수용액의 물을 추가하는 방법과 치환하는 방법으로 단위 수량을 달리하여 그의 영향 또한 비교하고자 하였다. 고유동 콘크리트는 슬럼프 플로 600±100mm의 범위를 만족하도록 하였고 PVA의 경우 시멘트 질량 대비 질량으로 첨가하고자 하였으며, 붕사의 경우 PVA 질량 대비 50%로 첨가량을 설정하였다. 이러한 조건으로 치환하는(RP) 경우는 혼합되는 수용액에서 포함된 물의 양만큼 배합수에서 차감하는 방법을 결정 후 식 (1)에 의하여 배합수의 양을 결정하였다. 본 연구에서 계획된 배합설계에 의한 배합표를 Table 4에 나타내었다.

$$RU = W - (PW + BW) \tag{1}$$

여기서,

RU : Revised unit water content after replacement(kg/m³)

W : Unit water content(kg/m³)

PW : Water amount from PVA solution(kg/m³)

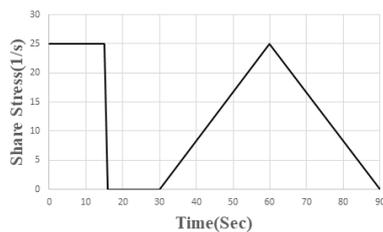
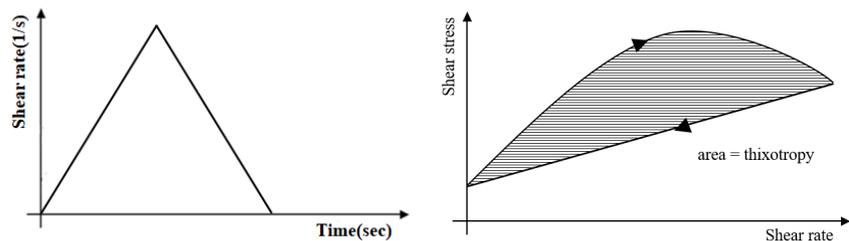
BW : Water amount from Borax solution(kg/m³)

Table 4. Mixture proportions of high fluidity concrete for thixotropy

No.	Application of PVA and borax	Unit weight(kg/m^3)							
		W	OPC	S	G	PVA	Borax	SP	
1	Plain(No PVA and borax)	185	336	770	868	0	0	17	
2	AD	3%	185	336	770	868	10	5	17
3		4%	185	336	770	868	13	7	17
4		5%	185	336	770	868	17	8	17
5		6%	185	336	770	868	20	10	17
6		7%	185	336	770	868	24	12	17
7	RP	3%	171	336	770	868	10	5	17
8		4%	166	336	770	868	13	7	17
9		5%	161	336	770	868	17	8	17
10		6%	156	336	770	868	20	10	17
11		7%	152	336	770	868	24	12	17

2.3 시험방법

고유동성이 적용된 콘크리트의 유동성을 확인하기 위해 슬럼프 플로시험을 KS F 2594에 따라 진행하였다[14]. 또한, PVA 및 붕사 수용액의 추가 및 치환에 따른 배합 적절성 및 요변성 발휘 조건을 평가하기 위해 콘크리트의 재료분리를 판단하였다. 콘크리트 배합의 정량적인 재료분리 여부를 판단하기 위해 EIS를 활용하였으며 이를 위해 슬럼프 플로시험 결과에서 얻어진 슬럼프를 측정하였다[15]. EIS에 의한 재료분리 여부 및 위험성은 기존 연구에서 제시한 기준인 2.5를 기준으로 하였다. 또한, 콘크리트의 유동성에 대해 보다 정량적이고 과학적인 분석을 위해 레올로지 기법이 활용되었는데, 굵은 골재를 제거한 모르타르에 대해 소성점도, 항복응력 및 요변성을 측정하였다. 배합이 완료된 콘크리트에 대해서는 5mm 체를 이용한 wet-sieving 기법으로 모르타르를 얻었으며 Anton Paar 사의 MCR 302 레오미터를 이용하여 Building Materials Cell (BMC)를 이용하여 모르타르 상태의 제반 성능을 측정하였다. 모르타르의 항복응력과 소성점도는 Bingham model을 이용하여 측정하였으며 요변성은 hysteresis loop을 이용하여 측정하였는데, 요변성 측정을 위한 hysteresis loop을 위한 shear rate protocol과 요변성을 측정하기 위한 개념을 각각 Figure 2, 3에 나타내었다. 요변성을 부여하기 위한 재료로 사용된 붕사는 기존의 연구 결과들에 따라 시멘트의 수화를 지연시키는 작용을 하는 것으로 알려져 있다[16]. 그러므로 본 연구에서는 요변성을 부여하기 위해 사용된 붕사의 사용량에 따라 콘크리트의 응결 지연에 미치는 영향을 검토하기 위해 응결시험을 실시하였으며 이를 위해 동일한 조건의 시멘트 페이스트를 제조하여 KS L ISO 9597에 따라 비카트응결시험을 실시하였다[17].


Figure 2. Protocol for shear rate in hysteresis loop

Figure 3. Hysteresis loop

3.2 EIS

PVA와 붕사 수용액의 첨가 및 치환에 따른 콘크리트 배합에 미치는 영향을 보기 위한 재료분리 여부를 정량적으로 평가한 EIS 계산 결과를 Figure 6에 나타내었다. PVA 및 붕사 수용액을 추가한 AD의 경우는 PVA 수용액 첨가량 3~6% 범위에서 EIS 2.5 초과로 재료분리로 판정되었다. 이는 수용액에 의한 배합수의 증진에 기인하여 콘크리트의 배합이 붕괴하여 소성점도가 증가한 결과로 보인다. 물론, PVA와 붕사에 의한 요변성 확보로 인해 소성점도가 증가하였겠지만, 배합수 증진에 따른 배합에 대한 악영향이 더 큰 것으로 보인다. 이를 통해 위의 슬럼프 플로 결과에서 보이는 결과에 대해 PVA 및 붕사 수용액을 추가할 때는 재료분리를 유발하여 슬럼프 플로 결과가 낮게 나오는 것으로 판단된다. 반면, PVA 및 붕사 수용액을 치환한 RP의 경우는 PVA 치환량이 3~4% 범위에서 재료분리로 나타났으며 그 이상의 경우에는 EIS 2.4~2.5의 범위를 보여 재료분리가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 즉, PVA와 붕사의 치환이 3~4% 범위는 요변성 부여에 따른 소성점도 증진 효과보다 붕사의 응결 지연 등의 요인으로 재료분리가 발생한 것으로 판단되나 PVA 치환율이 5%를 넘어서면서 요변성 부여에 따른 소성점도 증진이 배합의 안정성에 기여할 수 있는 범위에 들어온 것으로 보인다. 다만, 이러한 경우에 유동성이 저하하므로 이에 대한 적절한 조치가 추가로 고려되어야 할 것이다. 결과적으로 PVA와 붕사 수용액은 추가하는 것보다는 치환하는 편이 콘크리트의 유동성 및 재료분리 저항성에 유리하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 요변성 발현으로 예상되는 유동성 저감 및 재료분리 저감은 수용액을 6% 이상 추가하거나 5% 이상 치환하였을 때 작용한다는 것을 알 수 있었다.

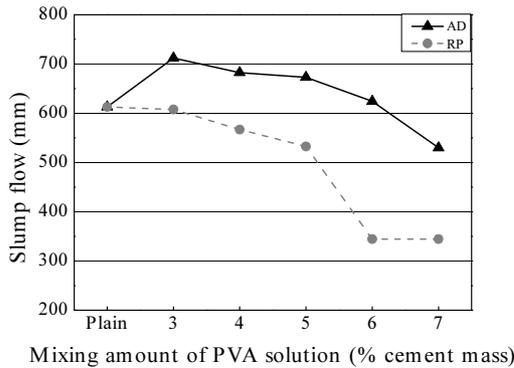


Figure 5. Slump flow of high fluidity concrete by thixotropy (Comparisons Made at Water-to-Cement Ratio 0.55 for Both addition and Substitution)

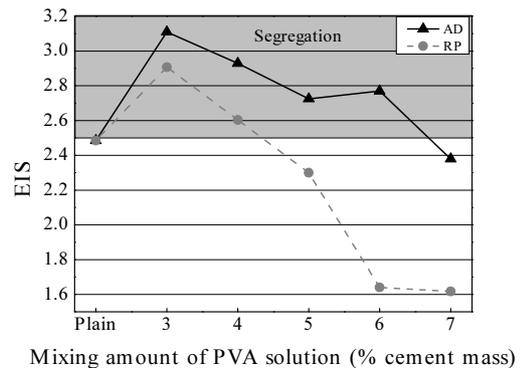


Figure 6. Electrochemical impedance spectroscopy(EIS) of high fluidity concrete by thixotropy(Comparisons made at water-to-cement ratio 0.55 for both addition and substitution)

3.3 레올로지

요변성이 부여된 콘크리트 배합에 대하여 요변성을 포함한 레올로지적 거동 특성을 평가하기 위하여 레올로지 측정을 하였고, 그 결과를 Figure 7, 8, 9에 나타내었다. 다만, 레올로지 결과는 굵은 골재를 포함하지 않는데, 이는 PVA와 붕사에 의한 요변성 부여가 시멘트 페이스트에 작용한다는 점에 기인하여 굳이 굵은 골재를 포함하지 않았다. 물론, 굵은 골재를 포함한 콘크리트의 유동 특성(슬럼프 플로의 결과)과 완전히 일치할 수는 없지만, 요변성 발현 및 굵은 골재에 대한 모르타르의 유변학적 거동을 확인해 보고자 한다. 먼저, 항복응력의 경우는 Figure 7에 나타내었다. 항복응력 결과는 PVA와 붕사 수용액의 함유량 증가와 더불어 다소 불규칙적이지만 전반적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 즉, 이는 PVA와 붕사의 혼입이 모르타르의 유동성을 줄이는 방향으로 작용했다는 의미이며 이는 PVA와 붕사의 가역적 결합에 기인한다고 보인다. 다만, 앞선 슬럼프 플로의 결과와 비교하여 수용액들을 추가하는 AD의 경우는 슬럼프 플로가 증가하는 모습을 보여 항복응력이 저감하는 형태를 보여야 하나 항복응력이 증가하는 모습을 보인다. 이는 레올로지 측정 결과가 모르타르에 의한 결과라는 부

분에 착안하여 콘크리트의 굵은 골재의 재료분리에 기인하여 콘크리트의 슬럼프 플로 결과와 모르타르의 항복응력 결과가 일치하지 않는 것으로 판단된다. 그러나 수용액들을 치환한 RP의 경우는 슬럼프 플로 결과와 유사하게 항복응력이 증가하는 모습이 나타났는데, 이는 재료분리가 크게 발생하지 않는 경우이기 때문으로 생각된다. 모르타르의 항복응력을 전체적으로 보았을 때, PVA와 붕사를 추가한 AD의 경우는 항복응력의 증가가 치환한 경우인 RP보다 다소 낮은 수준으로 이루어지고 있다. 이는 PVA와 붕사 수용액이 추가되면서 유동성에 작용하는 여러 가지 요인 중 항복응력을 줄이는 입자 간 결합과 항복응력을 증진시키는 배합수의 증가가 상호 작용한 결과로 보인다. 반대의 경우로 수용액들을 치환한 경우는 배합수의 증가가 이루어지지 않아 항복응력을 감소시키는 요인은 적은 반면, 항복응력을 증가시키는 요인이 작용해 항복응력의 상승 폭이 큰 것으로 판단된다. 특이한 점은 수용액을 추가한 AD의 경우 PVA 수용액 6% 이상의 경우에서 항복응력이 급격히 저하하는 모습이 보이는데, 이는 수용액에 의한 배합수의 증가가 항복응력에 지배적으로 작용하기 때문으로 생각된다.

Figure 8은 모르타르의 소성점도 결과를 나타내었다. 먼저, 수용액을 추가한 AD의 경우는 PVA 수용액의 혼입량이 증가하여도 뚜렷한 증가세를 보이지 않았다. 수용액의 추가에 따른 배합수의 증가는 모르타르의 소성점도를 낮추는 원인으로 작용한다. 그러나 PVA와 붕사의 결합은 정적인 상태에서 소성점도를 증가시키는 원인이 된다. 결국, 수용액들을 치환한 RP의 경우 지속적으로 소성점도가 증가하는 모습이 이를 뒷받침한다. 또한, 소성점도의 변화가 없는 AD와 소성점도가 증가하는 RP의 차이를 통해 수용액들을 치환함으로써 콘크리트 배합에서 굵은 골재의 재료분리를 막을 수 있는 안정적인 배합을 달성할 수 있음을 알 수 있었다. 다만, RP 모르타르의 소성점도 측정 결과의 증대가 PVA와 붕사의 결합에 의한 요변성의 결과로 보고자 하는 결과에

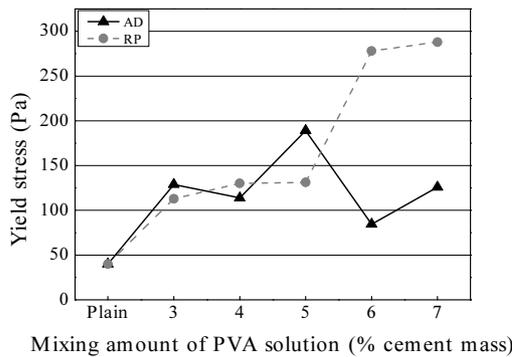


Figure 7. Yield stress of mortar under wet-sieving conditions of high fluidity concrete by thixotropy(Comparisons made at water-to-cement ratio 0.55 for both addition and substitution)

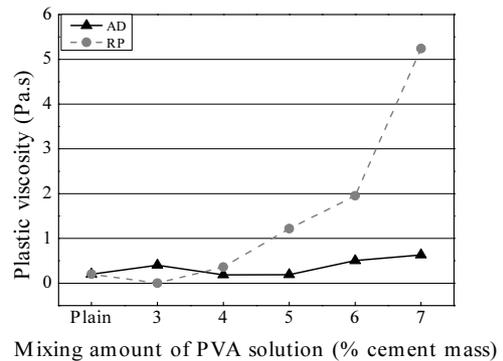


Figure 8. Plastic viscosity of mortar under wet-sieving conditions of high fluidity concrete by thixotropy(Comparisons made at water-to-cement ratio 0.55 for both addition and substitution)

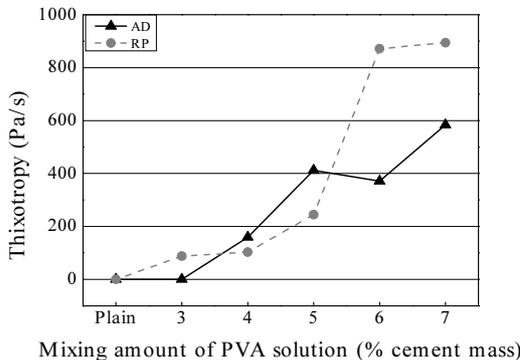


Figure 9. Thixotropy of mortar under wet-sieving conditions of high fluidity concrete by thixotropy(Comparisons made at water-to-cement ratio 0.55 for both addition and substitution)

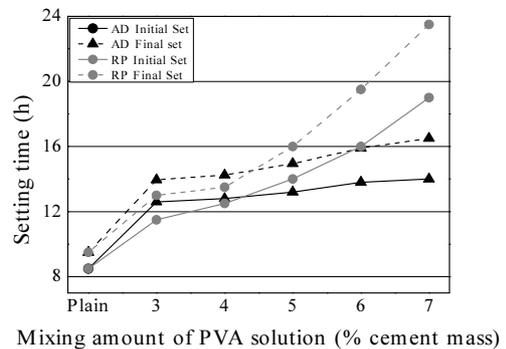


Figure 10. Setting time of cement paste under high fluidity concrete conditions by thixotropy(Comparisons made at water-to-cement ratio 0.55 for both addition and substitution)

대해서 요변성이란 외력이 가해지지 않은 상태에서 소성점도가 증진되며 외력이 가해질 때는 소성점도가 저하하는 성질이라는 것에 주목할 때, 시료를 유동시키면서 측정하는 Bingham 측정방식에서 얻어진 소성점도가 요변성의 결과로 얻어진 소성점도를 반영하는지에 대한 의문이 있을 수 있다. 그러나 PVA와 붕사의 가역적 결합을 완전히 분리하기 위한 응력의 정도를 알 수 없고, 이를 확인하는 것이 본 연구의 범위를 벗어난다고 판단된다. 하지만 여전히 소성점도 증가의 원인으로 작용할 수 있는 요인이 PVA와 붕사의 혼입에 국한되기 때문에 소성점도의 증가는 요변성 발현에 따른 결과로 해석하는 것이 적절하다고 생각한다.

Figure 9에는 wet-sieving 모르타르의 요변성 측정 결과를 나타내었다. 수용액들의 혼입 방법에 있어서 추가와 치환 모두 요변성을 부여하고 있는 경향을 보였다. 먼저, 수용액을 추가하는 AD의 경우는 PVA 수용액 4%부터 요변성이 발휘되기 시작하여 수용액의 혼입량이 증가함에 따라 요변성이 증대되었다. 반면, 수용액을 치환하는 RP의 경우는 PVA 수용액 3%부터 요변성이 발현되어 AD의 경우보다 적은 양의 PVA 및 붕사량으로도 요변성이 발현되는 모습을 보였다. 이는 AD의 경우 수용액 상태에서 추가되는 배합수로 인해 PVA와 붕사의 요변성 발현이 저해되는 결과로 판단할 수 있는데, 이는 전체적인 경향성에서 AD의 경우보다 RP의 경우에 더 높은 요변성을 발현하는 경향에서도 확인할 수 있었다. 특히, RP의 경우, PVA 수용액 6%의 경우에 급격히 요변성이 증가하는 모습을 보였는데, 이는 슬럼프 플로, 항복응력에서 보이는 경향과 유사하였다. 즉, 본 연구의 조건에서 PVA 수용액 6%를 치환할 때 콘크리트에 대하여 요변성 발현이 급격히 증진되는 결과를 도출할 수 있었다.

3.4 응결 지연 정도

콘크리트에 요변성을 부여하기 위해 사용된 붕사의 경우, 이전의 연구들에서 시멘트 수화를 지연시킨다고 보고되고 있다. 이에 본 연구조건에서 사용된 붕사가 콘크리트의 응결 지연에 미치는 영향을 판단하기 위해 비카트 시험을 통해 시멘트 페이스트 상태의 응결을 측정하였다. Figure 10은 응결시험의 결과를 나타낸다. 먼저, PVA와 붕사가 포함되지 않은 시멘트 페이스트의 경우는 초결이 8시간 30분, 종결이 9시간 30분으로 나타났다. 이와 비교하여 PVA와 붕사가 포함되었을 때 초결과 종결이 모두 지연되는 현상을 나타내고 있다. 특히, 수용액을 추가한 AD의 경우보다 치환한 경우인 RP의 경우에 응결 지연 현상이 더욱 크게 발생하고 있는데, 특히 PVA 수용액 5% 이상의 경우에 그 현상이 나타나고 있다. 즉, 붕사 수용액을 포함하는 것은 시멘트 페이스트의 응결 지연에 영향을 주며, 붕사 수용액의 양이 증가할수록 응결 지연은 더욱 커지는 것으로 나타났다. 특히, 붕사 수용액을 치환하는 경우는 응결 지연 폭이 더 크게 나타나, 시멘트 페이스트 내에서의 붕사 수용액의 농도가 시멘트 페이스트의 응결 지연에 직접적으로 영향을 주는 것으로 판단되었다. 즉, 위의 요변성 확보 관점에서 붕사 수용액의 치환이 더 유리한 조건을 조성하는 경향을 나타냈으나 이렇게 치환되는 붕사 수용액이 시멘트 페이스트의 응결을 크게 지연시키는 것은 개선되어야 할 부분으로 판단된다. 이에 향후 연구에서는 붕사 수용액을 사용하면서 콘크리트의 응결 지연을 방지하거나 이를 보상하는 등의 요소를 제시해야 할 것으로 판단된다.

3.5 누출량

요변성을 부여한 고유동 콘크리트의 조건에서 PVA 및 붕사 수용액의 첨가량에 따라 누출 경향성을 측정한 결과를 Figure 11에 나타내었다. 먼저 틈새 폭 20mm에서 수용액을 추가한 AD는 1000g 수준으로 유지되다가 오히려 PVA 수용액의 양이 증가함에 따라 다소 증가하였는데, 수용액을 치환한 RP는 역시 1000g 수준으로 유지되다가 PVA 수용액 양이 증가함에 따라 다소 감소하였다. 이는 AD 조건에서 PVA 및 붕사의 첨가는 유동성과 요변성의 상호관계에서 오히려 유동성 측면을 증진시키는 영향이 강한 반면, RP의 조건에서 PVA 및 붕사의 치환은 유동성과 요변성의 상호관계에서 요변성 발현이 더욱 지배적으로 발생하는 데에 기인하는 것으로 생각된다. 틈새 폭 30mm에서는 AD와 RP 모두 2000g 수준으로 누출량이 지속되었다. 이후 AD와 RP 모두 다소 감소하는 경향을 나타내었으나 그 감소 폭이 RP의 경우가 AD의 경우보다 더 크게 나타났다. 틈새 폭 40mm에서는 PVA와 붕사가 없는 경우와 비교하여서 3%의 PVA 수용액이 첨가되었을 때 AD와

RP 모두 오히려 누출량이 증가하는 모습을 보였다. 즉, 소량의 PVA 및 봉사의 혼입은 추가하는 경우는 수용액에 의한 물의 양과 봉사에 의한 응결 지연, 그리고 치환하는 경우는 봉사에 의한 응결 지연이 틈새를 통한 콘크리트 누출량에 오히려 약 영향을 주는 것으로 판단된다. 그러나 수용액을 추가하는 AD의 경우는 PVA 수용액 7%에서, 수용액을 치환하는 RP의 경우는 PVA 수용액 6%에서 콘크리트 누출을 저감하는 효과를 보였다. 특히, 수용액을 치환하는 경우 PVA 수용액 6%의 경우 33.72% 수준으로 누출량이 감소하여 매우 큰 효과를 나타낸다고 판단하였다. 이는 이전의 요변성 측정결과에서와 마찬가지로 치환하는 경우 수용액에 따른 배합수 증가 효과를 배제하고 요변성 발현 효과를 높인 결과라고 생각된다.

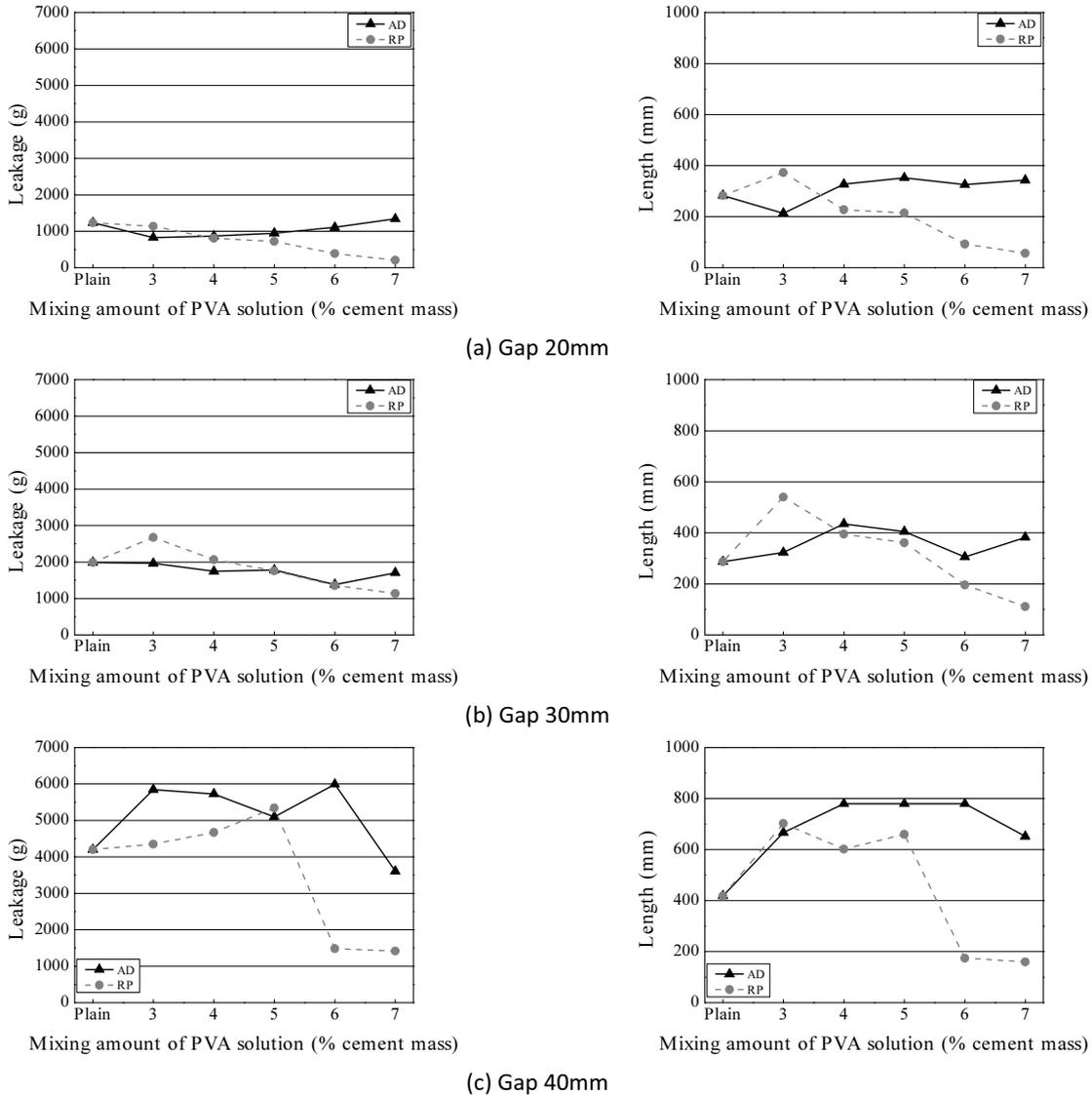


Figure 11. Leakage tendency of high fluidity concrete by thixotropy in accordance with gap(Comparisons made at water-to-cement ratio 0.55 for both addition and substitution)

4. 결론

본 연구에서는 고유동 성능을 갖는 일반강도 배합 콘크리트에 대하여 거꾸집 틈새를 통한 콘크리트 및 모르타르의 누출

량을 저감하는 방법으로 PVA와 붕사를 이용하여 요변성을 부여하고자 하였다. 이에 따라 콘크리트에 미치는 제반 특성 및 거꾸집 틈새를 모사한 조건에서 누출되는 콘크리트 및 모르타르의 양을 평가하고 분석하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) PVA와 붕사를 수용액 상태로 첨가할 경우 요변성이 발현되나 발현 정도가 작으며 배합수에 영향을 주어 대체로 유동성을 증진시키거나 소성점도 증진을 저해하여 재료분리가 발생하는 것을 확인하였다. 반면, 수용액을 치환할 때는 요변성 발현 정도가 크며 그로 인해 유동성이 감소되거나 소성점도가 증가하는 현상이 관찰되었다. 따라서 콘크리트의 요변성 발현을 위해 PVA와 붕사를 수용액 상태로 첨가할 경우 치환하는 방식으로 첨가하는 것이 적합할 것으로 판단된다.
- 2) 요변성 발현을 위해 붕사 수용액을 사용하였을 때 수용액 혼입 방법 및 양과 관계없이 응결 지연 효과가 발생하였다. 이러한 응결 지연 효과는 붕사 수용액 양이 증가할수록 크게 나타나며 수용액을 추가하는 경우보다 치환하는 경우에 더욱 크게 나타나 향후 이에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.
- 3) 거꾸집 틈새를 모사한 콘크리트 누출 방지 시험에서는 대체로 틈새가 클수록 누출되는 모르타르 양이 증가하였다. 그러나 요변성이 부여된 콘크리트의 경우는 이러한 누출량을 줄일 수 있었으며 특히 PVA와 붕사가 치환되었을 때 추가한 경우보다 그 효과가 크게 나타났다. 결과적으로 PVA 수용액 양 기준으로 6% 이상의 PVA 수용액을 치환할 때 누출량 감소 효과가 뚜렷하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

요약

본 연구의 목적은 고유동성이 부여된 일반강도 배합 콘크리트에 대하여 요변성을 부여하여 시공정밀도가 낮은 거꾸집 틈새를 통해 누출될 수 있는 모르타르나 시멘트 페이스트의 양을 저감하는 것이다. 본 연구에서는 콘크리트에 요변성을 부여하기 위해 PVA와 붕사를 사용하였다. 이에 PVA와 붕사를 사용하는 방법에 대하여 각각의 수용액을 추가하고 치환하는 방법에 따라 요변성을 포함하는 콘크리트의 성능의 변화와 거꾸집의 틈새를 모사한 누출 저감 성능을 평가하였다. 본 연구에서 진행된 실험의 조건에서는 PVA와 붕사를 추가하는 방법보다는 치환하는 방법이 추가적인 물의 사용을 억제하여 재료분리 저항성과 응결 지연에서 더 양호한 콘크리트 물성을 나타내었으며 요변성의 발현 및 거꾸집 누출 방지에도 효과적인 것으로 나타났다. 특히, PVA 수용액 6%를 치환하였을 때 의미 있는 수준의 거꾸집 누출 감소 효과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 PVA와 붕사를 이용하여 콘크리트 배합에 대해 요변성을 부여할 수 있다고 판단하였다. 또한 거꾸집의 시공정밀도가 다소 낮은 경우에도 PVA와 붕사를 사용하여 콘크리트에 요변성을 부여함으로써 시공 품질을 확보할 수 있을 것으로 기대한다.

키워드 : 고유동 콘크리트, 요변성, 폴리비닐 알코올, 붕사, 거꾸집 틈새 누출

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(2022R1C1C11010146).

Acknowledgement

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(2022R1C1C11010146).

ORCID

Young-Ki Kim,  <http://orcid.org/0000-0003-4159-0492>

Yu-Jeong Lee,  <http://orcid.org/0000-0002-6945-1278>

In-Tae Kim,  <https://orcid.org/0009-0002-3300-1168>

Dong-Yeop Han,  <http://orcid.org/0000-0003-0918-0530>

References

1. Oh SG. Concept and quality evaluation method of high fluidity concrete. Korea Cement Association. 2003 Sep;160:51-2.
2. Choi YW, Jeong JG. Development and utilization of high fluidity concrete. Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference. 2008 Apr 24; Pyeongchang, Korea. Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2008 p. 1109-11.
3. Bradley G, Howarth IM. Water soluble polymers: the relationship between structure, dispersing action, and rate of cement hydration. Cement, concrete and aggregates. 1986 Aug;8(2):68-75. <https://doi.org/10.1520/cca10059j>
4. Wallevik OH, Wallevik JE. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. Cement and concrete research. 2011 Dec;14(12):1279-88. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.009>
5. 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>
6. Trgger NA, Pakula ME, Shah SP. Influence of clays on the rheology of cement pataes, Cement and Concrete Research. 2010 Mar;40(3):384-91. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.11.001>
7. Lee SJ, Park HC, Jeon BS. Coagulation and thixotropy alumina colloidal suspension. Journal of the Korean Ceramic Society. 1999 Dec;36(12):1281-6.
8. Yang M, Neubauer CM, Jennings HM. Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspensions: Review and results from paste. Advanced Cement Based Materials. 1997 Jan;5(1):1-7. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)90009-2](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)90009-2)
9. Choi JH, Yoo CS, Han YS. A study on engineering characteristics of the drilling fluid depending on the mix water. Journal of the Korean Geosynthetics Society. 2016 Dec;15(4):43-52. <https://doi.org/10.12814/jkgss.2016.15.4.043>
10. Ferron RD. Formworkpressure of self-consolidating concrete: influence of flocculation mechanisms, structural rebuilding, thixotropy and rheology [dissertation]. [Chicago (IL)]: Northwestern University; 2008. 293 p.
11. Kim YK, Lee YJ, Heo JH, Han DY. Possibility analysis on reducing formwork leakage of high-fluidity mortar by using PVA and Borax. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2022 Apr;22(2):125-36. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2022.22.2.125>
12. Lee HS, Lee YJ, Han DY. Fundamental properties analysis for thixotropic cement-based materials using PVA and Borax. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2020 Jun;20(3):213-21. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2020.20.3.213>
13. Lee HS, Lee YJ, Han DY. A basic study on the fluidity cement paste mixed with PVA and Borax. Proceeding Korean Recycled Construction Resources Institute. 2019 Apr 4; Wonju, Korea. Seoul (Korea): Korean Recycled Construction Resource Institute; 2019. p. 29-30.
14. KS F 2594. Method of test for slump flow of fresh concrete. Seoul (Korea): Korean Standard Association; 2021. 3 p.
15. Han CG, Kim GC, Park BK. Suggestion of segregation evaluation method based on evaluation index for segregation(EIS). Proceedings of the Korean Institute of Concrete Conference. 2008 Nov 7; Goyang, Korea. Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2008. p. 923-26.
16. Jiří K, Tomáš O, Pavel D. The effect of boron and its compounds on setting of portland cement. Advanced Materials Research. 2014 Aug;1000:16-9. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.16>
17. KS L ISO 9597. Determination of setting time and soundness of cements. Seoul (Korea): Korean Standard Association; 2019. p. 4-5.