

# 레올로지 정수를 이용하여 21, 24MPa급 일반강도 콘크리트의 재료분리 경계를 판단하기 위한 기초연구

## A Fundamental Research on Determining Segregation Boundary using Rheological Parameters for 21 and 24MPa grade of Normal Strength Concrete

이 유 정<sup>1</sup>

이 영 준<sup>2</sup>

한 동 엽<sup>3</sup>

Lee, You-Jung<sup>1</sup>

Lee, Young-Jun<sup>2</sup>

Han, Dongyeop<sup>3\*</sup>

Master student, Department of Architectural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea <sup>1</sup>  
Undergraduate student, Department of Architectural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea <sup>2</sup>

Associate Professor, Department of Architectural Engineering, and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea <sup>3</sup>

### Abstract

The aim of the research is to provide the boundary conditions for segregation of normal strength grade and high fluidity concrete mixture (so called mid-fluidity concrete) with rheology parameters. Since the normal strength grade concrete mixture has a relatively high water-to-cement ratio and no SCMs, it is easy to be segregated when superplasticizer is added. Hence, to achieve the mid-fluidity concrete of normal strength grade and high fluidity, preventing segregation of the mixture is inevitable. In this research, using two superplasticizers with different solid concentrations, the flow behaviors and rheological behaviors were assessed by increasing fluidity until the segregation happened. According to the experiment in this research, an unusual behavior in rheology parameters was observed when the concrete mixture started to be segregated. From this results and report, it is expected to contribute on the definition of segregation with rheological test methods.

keywords : mid-fluidity concrete, rheology, segregation resistance, superplasticizer, solid concentration

### 1. 서 론

건축공사에 있어서 공기 단축은 간접비 감소와 더불어 매우 중요한 요소이다. 특히, 시간에 따라 액상에서 소성상태, 그리고 고체상태로 변화하는 시멘트 계열 재료의 시공에서 공기는 짧은 것이 유리하다[1]. 이러한 시멘트 계열 재료 본연의 특징에 기인하는 시공의 신속화 외에도 최근 사회적인 변화에 의해 콘크리트 시공의 신속화가 요구되고 있다. 건설현

장의 노령화와 더불어 레미콘 8·5제는 대부분의 건설현장에서 콘크리트 시공이 제한된 시간에 이루어져야 한다는 것을 의미한다. 이러한 사회적 변화는 기존의 고성능 콘크리트(고강도, 고유동, 고내구성 콘크리트)에만 주로 적용되는 고유동 콘크리트 배합의 개념을 일반강도 수준의 보통 콘크리트에도 적용하도록 하였다. 이에 본 연구에서는 일반강도 수준의 보통 콘크리트가 고유동에 준하는 적정 수준의 유동성을 보유하는 콘크리트를 중유동 콘크리트라고 정의하고자 한다.

현재 콘크리트의 유동성을 증진하는 방법 중 가장 대중적인 방법은 유동화제(감수제)를 사용하는 것이다. 유동화제의 유동성 증진 원리는 콘크리트 구성재료의 분산작용이다[2]. 이러한 분산작용은 레올로지적인 관점에서 항복응력을 저감시키는 작용을 하지만 이론상으로 소성점도에는 영향을 주

Received : July 14, 2020

Revision received : September 9, 2020

Accepted : October 13, 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.

지 않는 것으로 알려져 있다[3]. 그러나 이 과정에서 응집되어 있는 시멘트 입자를 분산시키면서 간혀있는 배합수를 해방시키게 되어 결과적으로는 소성점도를 낮추는 역할을 수행하게 된다. 그 결과, 고성능 감수제를 과도하게 첨가하는 경우에 과도한 블리딩 등 재료분리현상을 경험하게 된다 [4,5]. 이러한 유동화제에 의한 고유동성 확보는 비교적 물시멘트비가 낮고 분체계 혼화재료를 다량 치환하는 고성능 콘크리트 배합에서는 크게 문제가 되지 않았다. 그러나 일반강도 콘크리트는 상대적으로 높은 물시멘트비에 혼화재료의 치환도 거의 없는 상황에서 유동화제, 특히 고성능 감수제의 사용은 소성점도의 과도한 저하로 이어져 재료분리에 대한 우려가 커지게 된다. 즉, 중유동 콘크리트의 기본 개념은 1) 일반강도 콘크리트 배합, 2) 적절한 수준의 고유동성, 그리고 3) 재료분리 저항성을 필수적으로 포함하게 된다.

그러나 이러한 유동성 증진과 재료분리 저항에 대한 개념은 새로운 개념이 아니다. 이미 한천구 등인[6,7] 고성능 감수제의 재료분리 유발 문제점을 지적하고 재료분리 방지형 고성능 감수제를 제안하였으며 자기충전콘크리트 (self consolidating concrete, SCC)의 연구에서도 유동성 증진과 더불어 재료분리 방지를 위하여 증점제를 일정량 사용하고 있다[8]. 이는 Wallevik 등의 연구에서도 자기충전콘크리트의 항복응력 및 소성점도의 범위 정의에서도 나타나고 있다[9].

레올로지는 재료의 흐름과 변형을 연구하는 학문으로 시멘트 계열 재료에 있어서 유동성을 해석하는 방법으로 사용되고 있다. 그러나 레올로지 측정을 위한 레오미터는 주로 유동성이 양호한 상태에서 측정 가능하며 대부분의 연구에서는 유동성이 양호한 콘크리트에 대해서만 레올로지 측정 및 분석이 진행되어 왔다. 그러므로 콘크리트의 재료분리가 발생하는 상황 혹은 그 경계에서 레올로지 측정에 따른 어떠한 결과가 발생하는지에 대한 연구는 진행되지 않았다. 이에 본 연구에서는 중유동 콘크리트를 레올로지 정수로 정의하기 위한 기초자료로서 재료분리가 발생하는 영역 혹은 그 경계에서 콘크리트 레올로지 측정의 경향을 파악해 보고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험 계획은 Table 1과 같다. 먼저, 선행된 예비시험을 통해 건축구조물에서 일반적으로 가장 많이 사용

되는 강도 범위인 24MPa 급과 21MPa급 콘크리트의 물시멘트비가 각각 0.55와 0.60인 것을 확인하였다. 이를 통해 2가지의 물시멘트비 변수에 대하여 실험을 계획하였다. 잔골재율은 재료분리에 불리한 수준인 0.4로 고정하였으며 단위수량은 175kg/m<sup>3</sup>에서 185kg/m<sup>3</sup>, 195kg/m<sup>3</sup>의 다소 낮은 수준에서 다소 높은 수준까지 3가지 변수를 준비하였다. 콘크리트의 유동성 증진을 위한 고성능 감수제는 감수제를 사용하지 않는 경우와 더불어 1.00% 까지 총 5가지의 경우를 준비하였는데, 보다 세밀한 분석을 위해 고행분량이 다른 두 가지 고성능 감수제를 준비하였다.

Table 1. Experimental plan

	w/c <sup>*</sup>	0.55, 0.60
	Unit water content (kg/m <sup>3</sup> )	175, 185, 195
	S/a <sup>**</sup>	0.4
Mixture	Type	High solid concentration Low solid concentration
	SP <sup>***</sup>	
	Dosage (% cement mass)	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1
Test	- Slump	
	- Slump flow (observation for segregation)	
	- EIS (using data from slump and slump flow)	
	- Plastic viscosity (from flow curve)	
	- Dynamic yield stress (from flow curve)	
	- Static yield stress (from stress-growth test)	

\* Water-to-cement ratio

\*\* Sand-to-aggregate ratio

\*\*\* Superplasticizer

본 연구에서는 일반강도 범위 콘크리트에서 재료분리가 발생하는 시점의 레올로지적 거동을 판단하는 것이 중요하다. 그러므로 굳지 않은 상태의 콘크리트 특성을 파악하는데에 중점을 두었는데, 시험 항목으로는 슬럼프, 슬럼프 플로를 측정하도록 계획하였다. 재료분리평가는 육안관찰을 통해 재료분리여부를 판단하고 동시에 EIS법을 이용하였다. 또한, 레올로지 시험인 플로커브를 통해 동적항복응력과 소성점도를 측정하도록 계획하였는데, 여기에 더해 정적항복응력도 측정하도록 계획하였다. 다만, 재료분리가 발생하는 단계에서는 레오미터의 고장을 유발할 수 있으므로 재료분리 경계까지 실험을 진행하였으며 슬럼프, 플로시험 결과에서 재료분리로 판정된 경우에는 시험을 진행하지 않았다.

### 2.2 사용재료 및 재료준비

본 연구에서는 콘크리트를 대상으로 실험을 실시하였다.

시멘트로는 일반적으로 구할 수 있는 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다(Table 2 참조). 배합을 위한 배합수는

Table 2. Physical and chemical properties of cement

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

Table 3. Physical properties of superplasticizer

Type	Phase	Color	Solid concentration (%)
HS	Liquid	Brown	19 - 20
LS	Liquid	Yellow	14 - 14.5

\*HS: High solid concentration type,  
LS: Low solid concentration type

수돗물을 사용하였으며 굵은 골재는 Figure 1에서 보는 바와 같은 입도의 부순 굵은 골재를 사용하였으며 잔골재는 Figure 2에서 보는 바와 같이 표준입도에 맞도록 부순 모래와 강모래를 7:3으로 배합하여 사용하였다. 본 연구에서는 일반강도 영역의 콘크리트로 광물성 혼화제는 사용하지 않았다. 고성능 감수제는 고품분률이 다른 두 가지 고성능 감수제를 사용하였는데, 모두 폴리칼복실계 고성능 감수제였으며 고품분률만 다른 고성능 감수제였다(Table 3 참조). 콘크리트의 배합은 40L 강제형 팬타입 믹서를 사용하여 35L 분량을 2분 30초에 걸쳐 배합하였다.

### 2.3 시험방법

본 연구에서 진행된 시험으로 슬럼프 및 플로시험은 각각 KS F 2402, F 2594방법에 따라 진행하였다. 또한, 슬럼프 및 슬럼프 플로시험결과를 활용하여 한천구 등의 EIS법을 [10] 사용하여 재료분리 여부를 판단하고 그와 병행하여 육안으로 재료분리를 판단하였다. EIS법은 유동화 콘크리트의 재료분리를 판정하는 방법으로 슬럼프 플로값에 대한 슬럼프의 비율로 수치를 도출하여 이 수치가 2.5 이상인 경우에 재료분리로 판정하는 방법이다. 관찰을 통한 재료분리 판정은 1) 슬럼프 플로 중앙에 굵은 골재가 쌓여있는 경우, 그리고 2) 슬럼프 플로 외곽으로 원형이 파괴되며 시멘트 페이스트가 흐르는 것을 기준으로 판단하였다. 레올로지시험은 Germann instruments사의 I-CAR plus 콘크리트용 레오미터를 사용하여 시험을 실시하였으며 레오미터 프로그램에서 제공하는 Flow curve 방법 및 Stress-growth방법을 통

해 소성점도 및 동적항복응력, 정적항복응력을 측정하였다. 항복응력은 재료가 흐르거나 변형을 일으키기 위해 넘어서야 할 최소한의 힘으로 정의된다. 그러므로 이는 슬럼프 및 플로시험결과와 연관이 있는 것으로 알려져 있으며 거푸집에 부어넣은 콘크리트의 채움성능, 그리고 타설 이후에 굵은 골재의 침하에 따른 재료분리 방지에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 특히, 동적항복응력과 정적항복응력은 개념적인 차원에서 다소 차이가 있는데, Figure 3에서[11] 보는

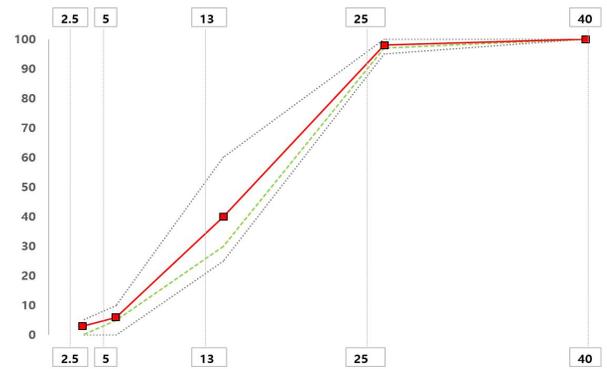


Figure 1. Particle size distribution of coarse aggregate

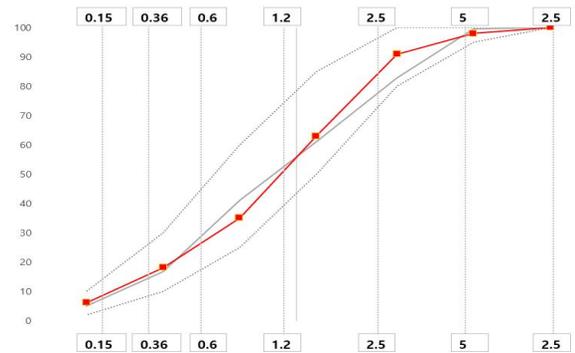


Figure 2. Particle size distribution of fine aggregate

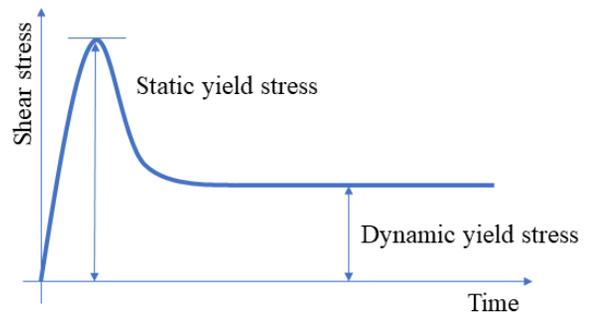
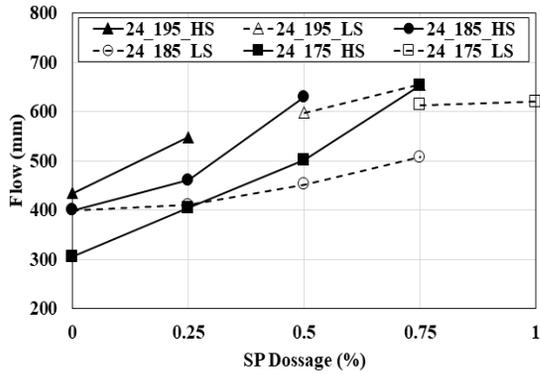
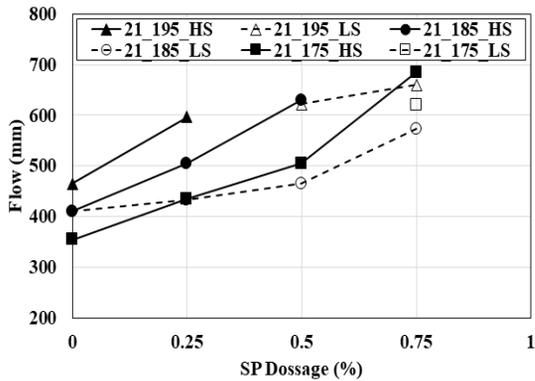


Figure 3. Conceptual difference between dynamic and static yield stresses



(a) 24MPa grade (w/c 0.55)



(b) 21MPa grade (w/c 0.60)

Figure 4. Influence of SP dosage on flow depending on unit water content for each strength grade mixture

Table 4. Conditions of slump flow for segregation evaluation (24MPa grade)

	SP dosage (% cement mass)				
	0	0.25	0.50	0.75	1.00
175_LS					
175_HS					
185_LS					
185_HS					
195_LS					
195_HS					

바와 같이 동적항복응력은 이미 유동하고 있는 물체에서 추론된 항복응력값이라면, 정적항복응력은 실제로 정지하고 있는 물체가 움직임을 시작하기 직전에 측정된 항복응력값이다. 그러므로 본 연구에서는 소성점도와 함께 두 가지의 항복응력을 모두 평가하는 것으로 하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

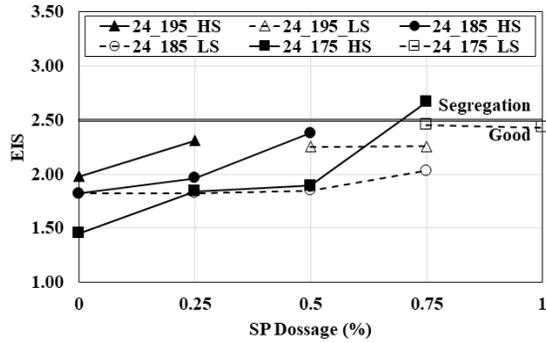
#### 3.1 유동성 및 재료분리 판정

##### 3.1.1 슬럼프 플로

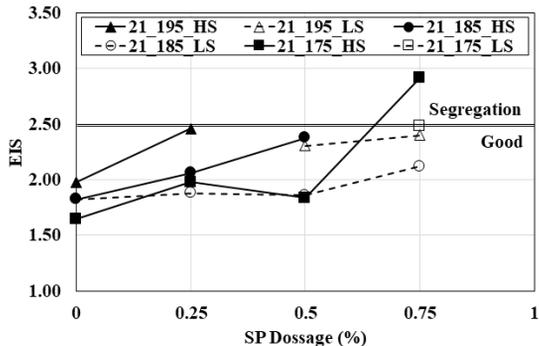
먼저, 압축강도 24MPa급 배합에 대해 단위수량, 고성능 감수제의 고형분량에 따른 고성능 감수제의 슬럼프 플로에 미치는 영향을 Figure 4 (a)에 나타내었다. 그림에서 고성능 감수제의 첨가율이 증가함에도 데이터가 없는 경우는 재료분리로 판정한 부분이다. 결과에서 보는 바와 같이 전반적으로 고성능 감수제의 첨가량이 증가하면서 슬럼프 플로값은 증가하는 것을 알 수 있었다. 반면, 같은 양의 감수제라도 고형분량이 낮은 감수제의 경우는 플로가 더 낮게 측정됨을 확인할 수 있었다. 이는 재료분리 발생 범위에도 영향을 주었는데, 고형분량이 높은 고성능 감수제의 경우와 비교하여 고형분량이 낮은 고성능 감수제의 경우는 전반적으로 재료분리가 발생하는 첨가율 범위가 증가하는 모습을 확인하였다. 그러나 이러한 의미가 유동성 증진에 유리하다는 것은 아니었다. 이는 고형분량이 높을수록 콘크리트 구성재료의 분산 성능이 뛰어나다는 것을 의미하지만, 고형분량이 낮은 고성능 감수제의 경우는 보다 세밀한 유동성 조절이 가능할 수 있는 것으로 판단된다.

압축강도 21MPa급 배합에 대한 유동성 및 재료분리 분석을 Figure 4 (b)에 나타내었다. 강도가 낮은 경우에도 고성능 감수제의 첨가율이 증가할수록 슬럼프 플로값이 증가하는 경향에는 변화가 없었다. 다만, 단위수량이 증가함에 따라 고성능 감수제의 사용 범위가 제한되었는데, 단위수량이 높을수록 고성능 감수제에 의한 재료분리가 쉽게 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 고성능 감수제의 고형분량에 따른 재료분리 양상은 고형분량이 낮은 고성능 감수제의 경우에 보다 많은 고성능 감수제를 첨가할 수 있었으나 이것이 보다 높은 수준의 유동성을 확보할 수 있다고는 판단하기 곤란하였다.

즉, 실험의 대상이 된 압축강도 24MPa 및 21MPa의 일반 강도 콘크리트 범위에서는 고형분량의 변화가 유동성 변화



(a) 24MPa grade (w/c 0.55)



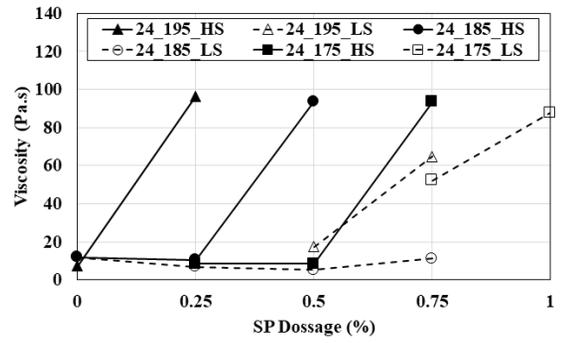
(b) 21MPa grade (w/c 0.60)

Figure 5. Influence of SP dosage on EIS depending on unit water content for each strength grade mixture

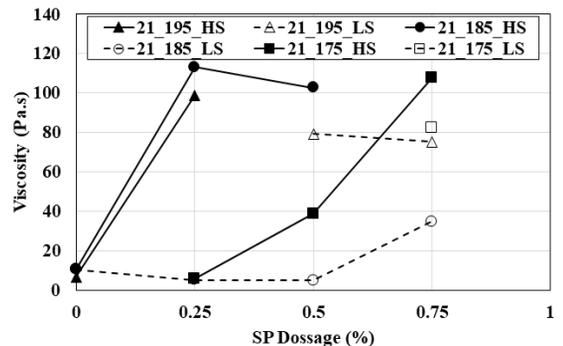
에는 영향을 주지 않지만 고성능 감수제에 의한 재료분리 가능성을 판단할 때에 고품분량이 적은 고성능 감수제는 보다 세밀하게 유동성을 조정할 수 있을 것이라는 판단을 할 수 있었다. 이러한 결과는 다음의 Table 4에 24MPa 급 콘크리트 배합에서 육안으로 판단한 콘크리트의 재료분리 양상을 통해서도 확인이 가능하였다.

### 3.1.2 EIS

위의 경우 슬럼프 플로시험 과정에서 콘크리트의 슬럼프 플로 상태를 바탕으로 재료분리 여부를 판단하였다. 이에 대하여 정량적인 근거로 콘크리트의 재료분리를 판단하는 EIS 법으로 콘크리트 재료분리를 판단하고 이를 비교하였다. Figure 5 (a), (b)는 각각 압축강도 24MPa 및 21MPa 급 콘크리트 배합에 대하여 EIS를 판단한 결과이다. 결과에서 보는 바와 같이 대부분의 관찰로 판단한 결과는 EIS의 2.5값 이하로 계산되어 관찰결과와 EIS 판정결과가 일치하는 모습을 보였다. 다만, 24MPa급 및 21MPa급 배합에서 단위수량 175kg/m<sup>3</sup>에서 고품분량이 높은 고성능 감수제를 0.75% 첨가한 경우에 공통적으로 EIS에서는 재료분리로 판정하였



(a) 24MPa grade (w/c 0.55)



(b) 21MPa grade (w/c 0.60)

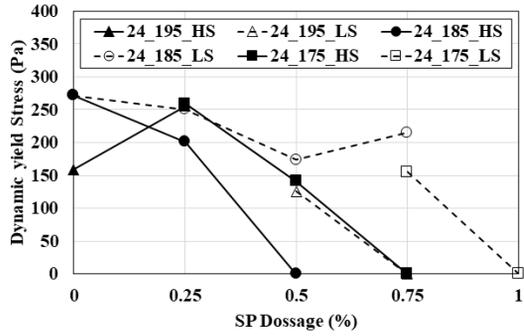
Figure 6. Influence of SP dosage on plastic viscosity depending on unit water content for each strength grade mixture

다. 해당 배합의 경우는 가장 낮은 단위수량조건에서 고품분량이 높은 고성능 감수제로 재료분리 발생 이전 수준의 첨가량으로 가장 재료분리 방지에 불리한 배합으로 볼수 있다. 즉, 재료분리가 발생할 수 있는 경계면의 조건으로 육안관찰에 의한 재료분리와 EIS에 의한 재료분리 판정의 경계면에 있는 배합조건이라고 판단할 수 있으며 이 때의 레올로지 정수에 의한 판단을 통해 재료분리에 가까운 배합상황에서 레올로지 정수변화를 판단할 수 있을 것으로 생각된다.

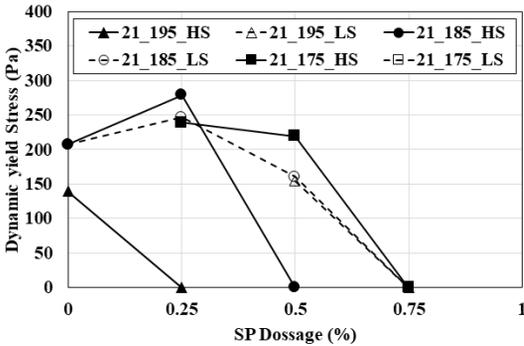
## 3.2 레올로지 거동 분석

### 3.2.1 소성점도

압축강도 24MPa급 배합에 대해 단위수량 및 고성능 감수제의 고품분량, 그리고 고성능 감수제 사용량에 따른 소성점도 결과를 Figure 6 (a)에 나타내었다. 소성점도 결과는 매우 특이한 형태를 나타내었는데, 전체적인 관점에서 고성능 감수제의 사용량이 증가할수록 소성점도가 증가하는 모습을 나타내었다. 이론적인 측면에서는 고성능 감수제는 소성점도의 변화에 크게 작용하지 않는 것으로 알려져 있다. 그러나



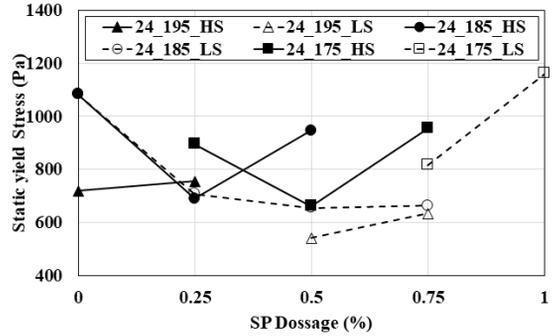
(a) 24MPa grade (w/c 0.55)



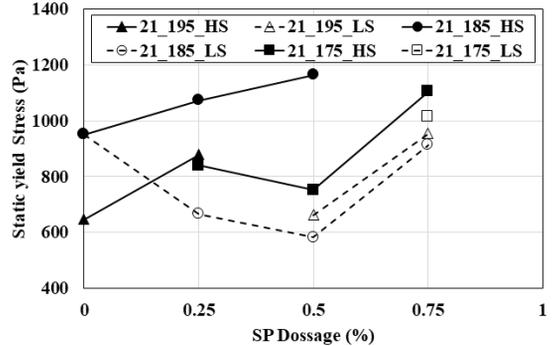
(b) 21MPa grade (w/c 0.60)

Figure 7. Influence of SP dosage on dynamic yield stress depending on unit water content for each strength grade mixture

고성능 감수제의 분산작용에 의한 시멘트 입자간에 갇혀있던 배합수가 빠져나옴에 따라 소성점도가 감소하는 것으로 알려져 있다. 또한, 이러한 현상이 과도한 경우는 재료분리가 발생한다. 즉, 고성능 감수제를 과다하게 사용하는 경우에 소성점도가 저감하고 그 결과 재료분리가 관찰되는 것이다. 그러나 본 연구의 조건에서는 고성능 감수제의 사용량이 증가함에 따라 소성점도가 증가하는 모습이 관찰되었다. 이러한 모습은 Figure 6 (b)에서 보는 바와 같이 압축강도 21MPa 급 배합에서도 동일하게 관찰되었다. 그러나 압축강도 24MPa급 배합에서 단위수량 185, 195kg/m<sup>3</sup> 배합에 대해 고품분량이 적은 고성능 감수제를 사용한 경우에 이러한 경향이 작게 나타났으며 압축강도 21MPa 급 배합에서도 단위수량 185, 195kg/m<sup>3</sup> 배합에 대해 고품분량이 적은 고성능 감수제를 사용한 경우에도 소성점도가 증가하는 경향이 작게 나타났다. 특히, 압축강도 21MPa 급 배합의 단위수량 185kg/m<sup>3</sup>의 적은 고품분량의 고성능 감수제를 사용한 경우를 살펴보면 고성능 감수제 사용량이 0.5%까지는 소성점도가 서서히 감소하는 모습을 보이다가 0.75%가 되면서 소성점도가 증가하는 것으로 보였다. 또한, 고성능 감수



(a) 24MPa grade (w/c 0.55)



(b) 21MPa grade (w/c 0.60)

Figure 8. Influence of SP dosage on static yield stress depending on unit water content for each strength grade mixture

제 사용량이 1%가 되는 경우는 육안으로 재료분리를 판정한 부분이었다. 즉, 이러한 관점에서 볼 때, 레오미터에 의한 레올로지 측정간 재료분리에 가까운 상태의 콘크리트 배합에서 소성점도가 증가하는 거동이 있을 수 있다고 판단된다. 결국, 육안 및 EIS기법으로 판단할 수 있는 재료분리 발생영역의 경계에서 레오미터로 측정할 때 일반적이지 않은 소성점도의 증가가 재료분리 발생가능성을 보이는 거동으로 판단할 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.2.2 동적 항복응력

동적 항복응력은 유동곡선(flow curve)을 통해 빙험모델을 기반으로 계산되는 결과로 위의 소성점도 결과와 동시에 얻어진다. 동적 항복응력 결과는 Figure 7 (a), (b)에 압축강도 24, 21MPa급 배합에 대해 나타내었다. 소성점도의 경우는 재료분리 발생영역 인근에서 일반적이지 않게 소성점도 값이 증가하는 것으로 나타난 반면, 동적 항복응력은 고성능 감수제가 증가함에 따라 감소하는 결과가 나타났다. 이는 널리 알려진 고성능 감수제의 분산제로써 역할에 기인하는 것으로 소성점도의 증가와는 다르게 매우 일반적인 결과이다.

다만 특이한 점은 항복응력이 0에 가까운 값으로 변화하는 것이다. 즉 소성점도와 동적 항복응력 결과에 따라 관찰한 결과, 재료분리에 근접한 영역에서 빙험모델에 의한 소성점도 및 동적 항복응력에서는 항복응력의 저하와 소성점도의 일반적이지 않은 증가가 관찰되는 것으로 나타났다.

### 3.2.3 정적 항복응력

정적 항복응력은 유체가 완전히 정지된 상태에서 전단응력을 서서히 늘려(stress-growth) 유체가 실제로 움직이기 시작할 때의 응력을 측정하는 방식으로 측정된다. 즉, 동적 항복응력이 빙험모델에 의한 추정값이라면 정적 항복응력은 실제로 측정된 값이다. Figure 8 (a), (b)는 각각 압축강도 24, 21MPa급 배합의 단위수량, 고성능 감수제 고품분량, 고성능 감수제 사용량에 따른 정적 항복응력 측정 결과이다. 결과에서 보는 바와 같이 정적 항복응력결과는 소성점도와 유사하게 고성능 감수제의 사용량이 증가할수록 증가하는 모습을 보이고 있다. 고성능 감수제의 사용은 재료를 분산시키기 때문에 사용량이 증가할수록 일반적으로 항복응력이 감소되어야 한다. 이러한 현상을 동적 항복응력에서는 확인할 수 있었는데, 정적 항복응력 측정 결과에서는 오히려 소성점도의 경향과 유사하게 재료분리 영역으로 접근할수록 항복응력값이 증가하는 경향이 나타났다. 그러므로 본 연구의 조건 내에서는 재료분리 영역에 접근하는 경우에 소성점도와 정적 항복응력은 일반적이지 않게 고성능 감수제의 사용량이 증가할수록 증가하는 추세를 보이고 동적 항복응력만이 일반적인 경향으로 감소한 결과를 보였다.

### 3.2.4 재료분리 영역과 레올로지 정수

이상의 실험결과에서 콘크리트 배합이 재료분리 영역으로 접근하는 경우에 소성점도, 동적 항복응력, 그리고 정적 항복응력의 레올로지 정수의 변화가 어떻게 변화하는지를 콘크리트 레오미터를 이용하여 측정하여 보았다. 측정 결과, 재료분리 영역에 접근할수록 소성점도와 정적 항복응력은 일반적이지 않게 증가하는 경향을 보였고, 동적 항복응력만 특이한 경향을 보이지 않았다. 이를 토대로 재료분리가 발생하는 콘크리트에 대해 레올로지 측정 상황을 유추해 보면 Figure 9와 같이 설명할 수 있다. 즉, 콘크리트를 굵은 골재가 모르타르에 혼입된 혼탁액(suspension)으로 보는 관점에서 재료분리가 발생하는 경우, 굵은 골재가 레오미터 컨테이너의 아랫부분에 침전된다고 볼 수 있다. 이러한 결과 레오미터의

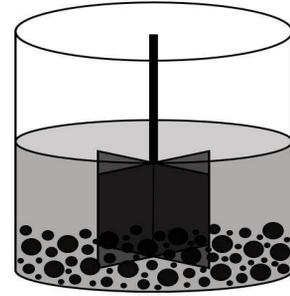


Figure 9. Conceptual drawing of rheometer conditions when segregation is occurred

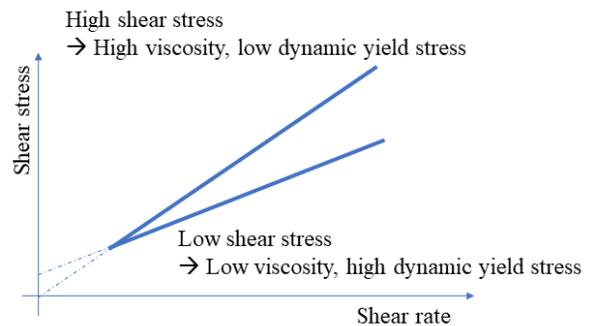


Figure 10. Conceptual drawing of flow curve when segregation is occurred

베인(vane)이 침전된 골재에 의해 매우 높은 수준의 응력으로 측정되는 것으로 생각된다. 즉, 재료분리 없이 굵은 골재가 균등하게 분포하는 경우와 달리 소성점도의 경우는 전단 변형속도(shear rate)가 낮으면 골재의 침전이 적거나 침전된 골재의 영향을 적지만 전단변형속도가 높으면 침전된 골재의 영향을 비교적 많이 받아 전단응력이 더 높게 측정되는 것으로 생각된다. 그러나 동적 항복응력의 경우는 전단변형속도와 전단응력간의 관계 데이터에서 추론되는 값이기 때문에 오히려 소성점도가 높게 나오는 경우(관계 기울기가 급한 경우)에는 항복응력이 0에 가까운 값이 얻어지는 것으로 생각할 수 있다(Figure 10 참조). 또한, 정적 항복응력의 경우는 실제로 유체를 유동시키기 위한 힘을 측정하므로 골재의 침전이 이 힘을 증가시킨다고 볼 수 있을 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 일반강도 범위의 콘크리트에 대하여 소오의 유동성을 확보하는 콘크리트 배합에 대해 증유동 콘크리트

트로 정의하고 증유동 콘크리트의 유동특성을 파악하기 위한 연구의 일환으로 재료분리 단계의 레올로지 특성을 파악하고자 하였다. 증유동 콘크리트는 일반강도의 비교적 낮은 수준의 물시멘트비를 갖으면서 유동성을 확보해야 하기 때문에 재료분리 발생 시점에 대한 이해가 필요하고, 기존의 재료분리를 파악할 수 있는 방법인 육안관찰, EIS법과 비교하여 레올로지 시험 결과를 비교하였다. 그 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고행분량이 다른 두 개의 고성능 감수제로 실험을 실시하였을 때, 고행분량이 높은 고성능 감수제는 유동성 증진효과가 빨리 나타났으며 적은 사용량에도 재료분리가 관찰되었다. 반면, 고행분량이 낮은 고성능 감수제는 재료분리가 발생할 때의 사용량이 고행분량이 높은 고성능 감수제보다 높게 나타났는데, 이러한 결과가 낮은 고행분량의 고성능 감수제가 안정적으로 더 높은 유동성을 확보한다고 할 수는 없었다.
- 2) 슬럼프 플로시험 결과 후에 관찰을 통한 재료분리 판정 결과는 EIS에 의한 재료분리 판정 결과와 매우 유사하였다. 이를 통해 EIS에 의한 재료분리 판정이 증유동 콘크리트 범위에서도 유효하다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 관찰 및 EIS에 의해서 재료분리가 아니라고 판정된 경우에도 레오미터에 의한 실험에서 일반적이지 않은 성상의 레올로지 정수 측정 결과가 나타났다. 즉, 재료분리 경계에 가까워져 올수록 슬럼프 플로에 의한 유동성 측정 결과는 증진되지만 소성점도와 정적 항복응력은 증가하였다. 반면, 빙험모델에 의해 계산되는 동적 항복응력은 일반적인 경향과 마찬가지로 슬럼프 플로에 의한 유동성 측정 결과가 증진될수록 감소하는 경향을 나타내었다.

이상을 종합하면 증유동 콘크리트의 유동성 경향에서 외부 관찰 및 EIS와 다르게 콘크리트의 재료분리가 발생하는 경우에 레올로지 측정기법을 활용할 때 소성점도 및 정적 항복응력을 측정함으로써 재료분리가 발생하기 시작하는 인근 영역을 측정해 낼 수 있을 것으로 판단한다. 다만, 레올로지 측정 방법의 한계에 의해 완전히 재료분리가 발생하는 부분은 측정장비의 고장을 유발할 수 있으므로 주의가 필요하다.

## 요 약

본 연구에서는 증유동 콘크리트 제조를 위해 기존의 재료분리 판정법과 레올로지 정수를 활용하여 콘크리트 재료분

리 상황을 정의하고자 하였다. 증유동 콘크리트는 일반강도 범위의 비교적 높은 물시멘트비 조건에서 높은 유동성을 발현하는 조건으로 고성능 감수제를 사용하면서 재료분리를 제어하는 것이 매우 중요하다. 이에 본 연구조건에서는 고행분량이 다른 두 가지 고성능 감수제를 사용하여 일반강도 콘크리트 배합의 유동성을 증진시키면서 재료분리가 발생하기 시작하는 범위의 유동특성과 레올로지 정수의 변화에 대해 관찰하였다. 기존의 레올로지를 이용한 유동성 측정연구는 고유동성을 확보한 조건에서 측정되어야 했기 때문에 재료분리가 발생하는 조건은 측정의 대상에서 제외되었던 경우가 많았다. 본 연구에서는 재료분리가 발생하기 시작하는 상태의 콘크리트 배합조건에서 기존의 재료분리 판정법이나 관찰에 의한 방법으로는 아직 재료분리에 이르르지 않았다고 판단되더라도 레올로지 측정 정수인 소성점도와 정적 항복응력 측정값에서 이상측정값이 관찰되는 것을 확인하였다. 이러한 결과가 콘크리트에 있어서 재료분리가 발생하는 조건을 레올로지적으로 정의할 수 있는 기초적인 자료를 제공할 것으로 판단한다.

**키워드** : 증유동 콘크리트, 고성능 감수제, 고행분량, 레올로지, 정적 항복응력

## Funding

Not applicable

## 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(2018R1C1B6005814).

## ORCID

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. Han CG. Ready-mixed-concrete quality management. Korea: Kimundang; 2010. 10 p. Korean.
  2. Wedding P, Bradley G, Howarth I. Water Soluble Polymers: The Relationship Between Structure, Dispersing Action, and Rate of Cement Hydration. *Cement, concrete and aggregates*. 1986 Aug;2:68-75. <https://doi.org/10.1520/cca10059j>
  3. 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>
  4. Son BG, Han DY. Study on water reducer performance for efficient fluidity development and securing robustness of normal strength range concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2017 Oct;17(5):429-35 <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2017.17.5.429>
  5. Lee JH, Kim JH. Performance evaluation of superplasticizers using a test mortar. *Korean Society of Civil Engineers*. 2016 Oct;10:9-10.
  6. Han CG, Jiang YR, Oh SK, Bahn HY. Development and property analysis of segregation-reducing type flowig concrete using the viscosity agent. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 1999 Aug;11(4):95-105. <https://doi.org/10.22636/JKCI.1999.11.4.95>
  7. Han CG, Yu HB, Oh SK, Bahn HY. Manufacturing and properties analysis of semi-high-fluidity concrete using segregation-reducing type superplasticizer. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2000 Jun;16(6):59-67.
  8. Peter B, Kamal HK. Use of viscosity-modifying admixtures to enhance robustness of SCC. *The Third North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*; 2008 Nov 10-12; Chicago, IL. Newyork(USA) : Curran Associates; 2008. p. 566-71.
  9. 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>
  10. Han CG, Kim GC, Park BK. Suggestion of segregation evaluation method based on evaluation index for segregation (EIS). *Proceeding of Korea Concrete Institute*; 2008 Nov 7; Goyang, Korea. Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2008. p. 923-6.
  11. Germann Instruments, Inc. ICAR Rheometer [Internet]. Evanston (IL): Available from: <http://www.germann.org/TestSystems/ICAR%20Rheometer/ICAR%20Rheometer.pdf>