

Research Paper

중유동 콘크리트 제조를 위한 레올로지 성능 범위 제안

A Suggestion of Rheological Performance Range for Manufacturing Mid-workability Concrete

이유정¹ · 이영준² · 한동엽^{3*}

Lee, Yu-Jeong¹ · Lee, Young-Jun² · Han, Dong-Yeop^{3*}

¹Master student, Department of Architectural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea

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

³Associate 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

ABSTRACT

The aim of the research is providing the rheological performance range for manufacturing "mid-workability concrete". The mid-workability concrete means the normal strength range concrete mixture with high workability. Since there is not enough study or quantitative definitions on performance of the mid-workability concrete, in this research, the performance range for high workability of mid-workability concrete mixture using rheology. Because of the mixture characteristics of generally used normal strength concrete such as relatively high water-to-cement ratio and no SCMs, segregation of coarse aggregate should be prevent to achieve a successful high workability. From the experimental study in this research scope, 5 to 35 Pa.s of plastic viscosity was desirable to prevent segregation for mid-workability concrete, and general performance range with rheological parameters was provided.

Keywords : mid-workability concrete, rheology, segregation resistance, superplasticizer, rheology parameters

Received : June 28, 2021

Revised : July 13, 2021

Accepted : July 20, 2021

1. 서론

중유동 콘크리트는 일반강도 콘크리트에 대해 고유동 콘크리트에 준하는 수준의 유동성을 확보한 콘크리트로 정의할 수 있다. 이는 노동력의 고령화 및 레미콘 8·5제 등과 같은 사회적 변화에 따른 콘크리트 공사의 공기단축 필요성에 대응할 수 있는 콘크리트의 성능개념으로 낮은 물시멘트비 및 혼화재료 치환에 의한 기존의 고유동 콘크리트와는 다른 접근 방법을 필요로 한다. 즉, 일반강도 콘크리트 배합에 있어서 고성능 감수제를 통한 유동성 증진은 상대적으로 높은 물시멘트비, 적은 분체량에 기인하여 재료분리를 유발할 수 있기 때문에 충분한 고유동 성능을 발휘함과 동시에 재료분리를 방지할 수 있는 방안을 강구해야 한다[1,2]. 이러한 유동성과 재료분리 저항성의 동시 확보는 중유동 콘크리트에 국한하는 것은 아니다. 이미 Wallevik 등은 자기충전 콘크리트(self-consolidating concrete, SCC)에 대하여 고유동성과 동시에 재료분리 저항성을 확보할 수 있는 성능 범위를 레올로지 정수를 활용하여 정량적으로 정의한 바가 있다[3]. 콘크리트의 유동 성능을 과학적이고 정량적으로 정의하는 레올로지 정수 중 항복응력과 소성점도는 각각 콘크리트의 유동성과 재료분리 저항성과 관련이 있다고 알려져 있다. 즉, 고유동성과 재료분리 저항성을 확보하기 위해서는 낮은 항복응력과 적정 수준의 소성점도를 필요로 한다[4].



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.

이러한 성능 범위는 중유동 콘크리트에서도 유효할 것으로 판단된다. 이와 유사한 연구로는 한천구 등에 의한 분리저감형 고성능 감수제의 개발에 대한 연구가 있었다. 이 연구는 중유동 콘크리트와 유사한 방향의 접근법을 제시하였으나 혼화제의 개발에 집중하고 있어 중유동 콘크리트에 대한 정량적인 성능 정의는 부족하다고 할 수 있다[5].

콘크리트의 유동성 기준은 KS 규격과 지방서에서 규정하여 관리하고 있으나, 현재 일반강도 콘크리트와 고유동 콘크리트의 품질 기준만 규정되어 있을 뿐 중유동 콘크리트에 대한 기준은 아직 정비되어 있지 않다. 다만, KS F 4009의 규격에 따르면 일반강도 콘크리트의 유동성 범위는 슬럼프와 슬럼프 플로 두 가지로 정의하고 있으며 그 중 슬럼프 플로는 500-600mm 이내로 만족하여야 하며 고유동 콘크리트의 유동성 범위는 슬럼프 플로 기준 600mm 이상인 콘크리트로 규정하고 있다[6]. 이에 본 연구에서는 일반강도 수준의 콘크리트가 확보할 수 있는 고유동 범위를 500-600mm 슬럼프 플로로 규정하고 이 상황에서 재료분리를 유발하지 않는 조건으로 중유동 콘크리트의 성능을 정의하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 중유동 콘크리트의 제조를 위한 성능 범위에 대하여 보다 과학적이고 정량적인 기준을 제시하기 위하여 레올로지 정수인 항복응력과 소성점도를 기준으로 성능 범위를 정의하고자 한다. 이러한 성능 범위 정의는 향후 중유동 콘크리트의 제조 및 활용에 기여할 것으로 판단한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험 계획은 Table 1과 같다. 예비 실험을 통해 제조하고자 하는 일반강도 콘크리트의 강도를 21, 24, 27, 그리고 30MPa로 정리하였고, 이러한 강도를 만족하는 물시멘트비를 확인하였다. 또한 이러한 일반강도 수준의 콘크리트 배합에 대하여 재료분리 발생 없이 안정적으로 중유동 콘크리트 기준의 유동성을 확보하는 데에 어려움이 있다는 것을 확인하였다 [7]. 이에 일반강도 수준의 물시멘트비 4가지에 대하여 단위수량은 지방서에서 허용하는 최고 수준인 185kg/m³, 잔골재율은 0.4로 고정하였다. 실무적인 관점에서는 잔골재율이 0.4보다 높아야 재료분리 저항성에 유리하겠지만, 본 연구에서는 재료분리가 발생하는 조건을 포함하기 위하여 잔골재율을 다소 낮은 수준으로 책정하였다. 콘크리트의 유동성 확보를 위해

Table 1. Experimental plan

Mixture	w/c*	0.45, 0.50, 0.55, 0.60	
	Unit water content(kg/m ³)	185	
	S/a**	0.4	
	SP***	Type Dosage(% cement mass)	General Superplasticizer 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50
Test	VMA****	Type Dosage(% unit water content)	Powder 0, 0.1, 0.3, 0.5
	- Slump		
	- Slump flow(observation for segregation)		
	- EIS(using data from slump and slump flow)		
	- Plastic viscosity(via flow curve)		
	- Dynamic yield stress(via flow curve)		
	- Static yield stress(via stress-growth test)		

* Water-to-cement ratio

** Sand-to-aggregate ratio

*** Superplasticizer

**** Viscosity Modifying Admixture

고성능 감수제의 첨가율은 0%부터 1.50%까지 총 6가지의 경우로 하였고, 증점제 첨가에 따른 콘크리트의 재료분리 억제를 위해 증점제의 첨가율은 0%부터 0.5%까지 총 4가지의 경우를 준비하였다.

본 연구의 목적인 중유동 콘크리트의 성능 범위 정의를 위해 유동성 측정과 레올로지 정수 측정을 실시하였다. 이에 콘크리트의 유동성 분석을 위한 슬럼프, 슬럼프 플로를 측정하도록 계획하였고, 재료 분리 평가는 육안 관찰을 통해 재료분리 여부를 판단하고 동시에 한천구 등이 제시한 정량적 재료분리 방법인 EIS법을 이용하였다[8]. 한천구 등이 제시한 일반강도 콘크리트의 재료분리 판정 방법은 EISN법을 사용하도록 제안하고 있으나, 중유동 콘크리트의 유동성은 고유동 콘크리트에 준하므로 고유동 콘크리트의 재료분리를 판정하는 EIS법을 적용하는 것으로 하였다. 또한, 레올로지 시험인 플로커브 시험을 통해 Bingham 관계식을 이용하여 동적항복력과 소성점도를 측정하도록 계획하였는데, 여기에 더해 정적항복력도 측정하도록 계획하였다. 다만, 재료분리가 발생하는 단계에서는 레오미터의 고장을 유발할 수 있으므로 재료분리 경계까지 실험을 진행하였으며 슬럼프, 플로시험 결과에서 재료분리로 판정 된 경우에는 시험을 진행하지 않았다.

2.2 사용재료 및 재료준비

콘크리트 제조를 위한 시멘트로는 일반적인 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다(Table 2 참조). 배합을 위한 배합수는 수돗물을 사용하였으며 굵은 골재는 25mm 골재에 13-5mm 골재를 추가로 혼합, 잔골재는 부순 모래와 강모래를 혼합하여 표준 입도 곡선에 맞추어 사용하였다(Figure 1, 2 참조). 본 연구에서 사용한 혼화제는 K사의 일반 고성능 감수제와 D사의 분말형 증점제이다(Table 3, 4 참조). 콘크리트의 배합은 40L 강제형 팬타입 믹서를 사용하여 35L 분량을 2분 30초에 걸쳐 믹싱하였다(Figure 3 참조).

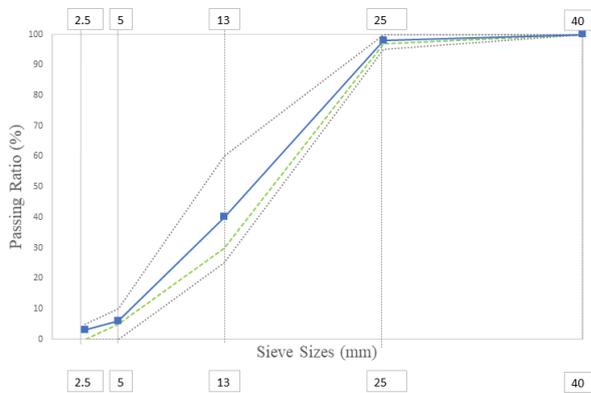


Figure 1. Particle size distribution of coarse aggregate

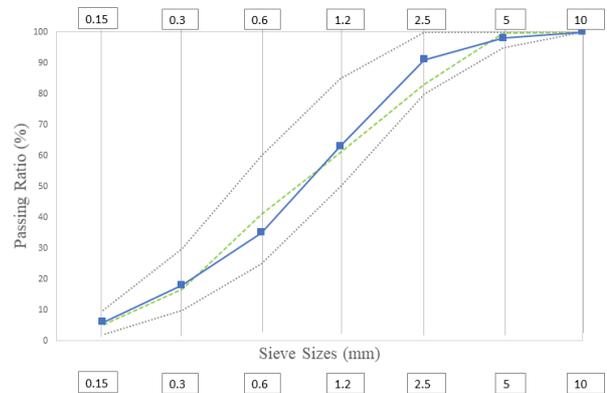


Figure 2. Particle size distribution of fine aggregate

Table 2. Physical and chemical properties 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 properties of superplasticizer

Type*	Phase	Color	Maincomponent
Generic type	Liquid	Brown	Polycarboxylate

Table 4. Physical properties of VMA

Type*	Phase	Color
Generic type	Powder	Ivory

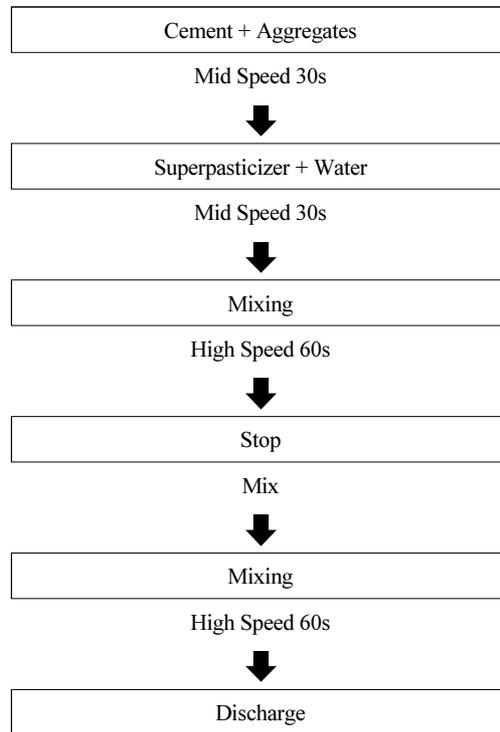


Figure 3. Concrete mixing method

2.3 시험방법

본 연구에서 진행한 슬럼프와 플로시험은 각각 KS F 2402, KS F 2594방법에 따라 실시하였다[9,10]. 또한, 슬럼프 및 슬럼프 플로시험 결과를 이용하여 EIS법을 통해 콘크리트의 재료분리 여부를 판단하였고, 더불어 육안으로도 콘크리트의 재료분리를 판정하였다. EIS법은 유동화 콘크리트의 재료분리를 판정하는 방법으로 슬럼프 플로우에 대한 슬럼프의 관계비율로써 EIS 정수가 2.5 이상인 경우에 재료분리로 판정하는 방법이다. 관찰을 통한 재료분리 판정은 1) 슬럼프 플로 측정 결과 굵은 골재의 중앙부 집중 현상과 2) 슬럼프 플로우의 원형이 파괴되고 가장자리에 시멘트 페이스트나 블리딩 발생을 기준으로 판단하였다[11]. 레올로지 시험은 Germann instruments 사의 I-CAR plus 콘크리트용 레오미터를 사용하여 시험을 실시하였고, Flow Curve 방법과 Stress-growth 방법 두 가지를 사용하여 측정하였다. Flow Curve 방법을 이용하여 콘크리트의 소성점도 및 동적항복응력을 측정하였고, Stress-growth 방법을 이용하여 정적항복응력을 측정하였다. 레올로지 시험을 통해 측정된 동적항복응력과 정적항복응력은 개념적인 차원에서 다소 차이가 있는데, Figure 4에서[12] 보는 바와 같이 동적항복응력은 이미 유동하고 있는 물체에서 추론된 항복응력 값이라면, 정적항복응력은 실제로 정지하고 있는 물체가 움직임을 시작하기 직전에 측정된 항복응력 값이다. 그러므로 본 연구에서는 소성점도와 함께 두 가지의 항복응력을 모두 평가하는 것으로 하였고, 중유동 콘크리트 제조를 위한 유동성을 만족하는 레올로지 정수범위를 제안하고자 하였다.

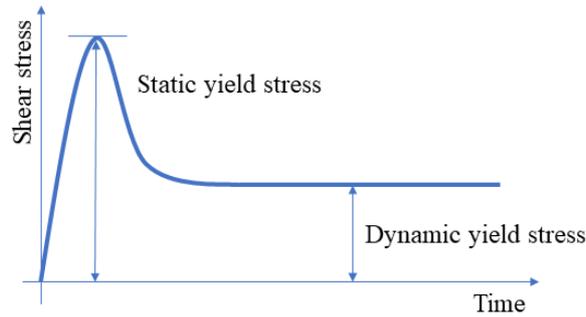


Figure 4. Conceptual difference between dynamic and static yield stress

3. 실험결과 및 분석

3.1 유동성 및 재료분리 판정

3.1.1 슬럼프 플로

먼저, 진행한 실험의 배합이 중유동 콘크리트의 유동성 범위를 만족하는지 분석하여 Figure 5에 나타내었다. 감수제를 첨가하지 않은 배합과 감수제 첨가 비율이 0.25%로 상대적으로 낮은 배합에서는 충분한 유동성이 발현되지 않아 목표로 하는 수준의 유동성인 400mm, 500mm 및 600mm 플로우를 만족하지 않았다. 다만 물시멘트비가 높아졌을 경우(21MPa 급, w/c

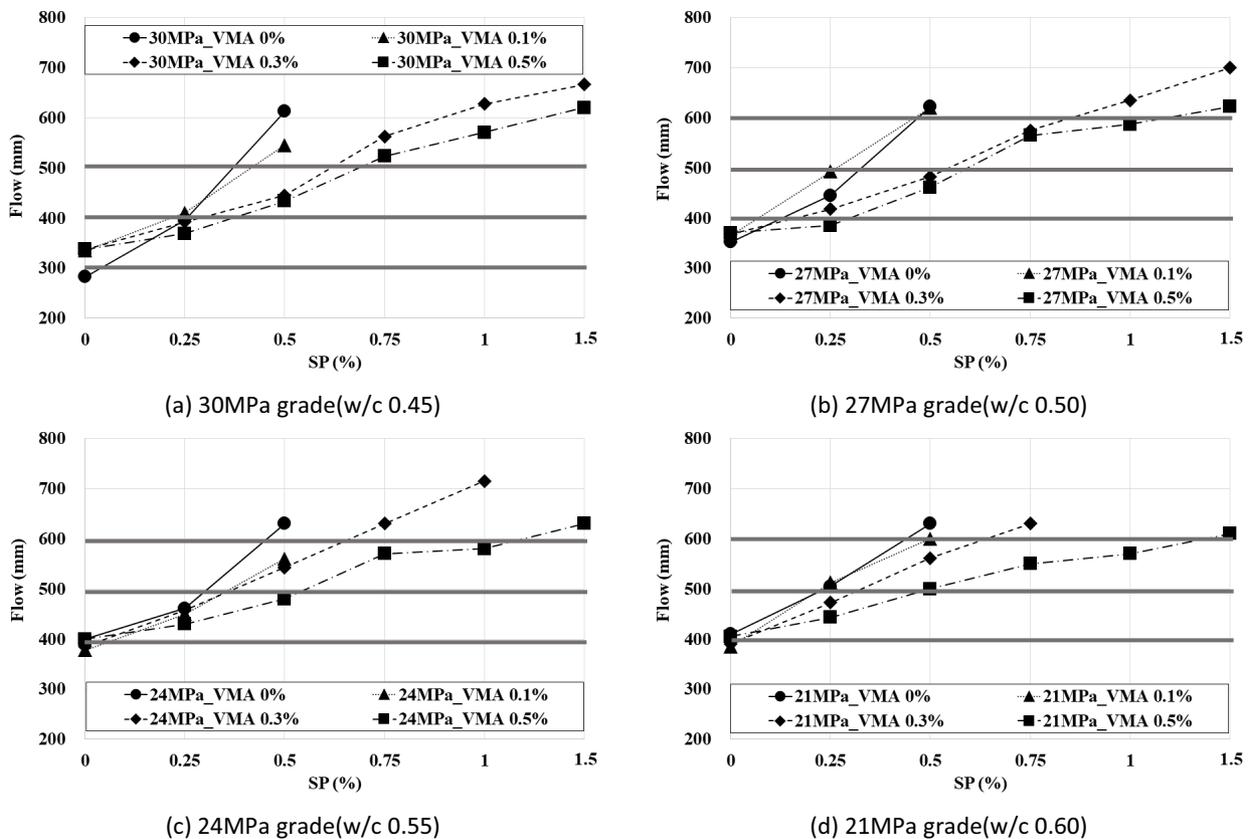


Figure 5. Influence of SP and VMA dosage on slump flow for each strength grade mixture

0.60) 적은 양의 감수제 첨가만으로도 충분히 유동성을 갖는 것을 알 수 있었다. 감수제 첨가량이 0.5%일 경우 대체적으로 목표로 하는 유동성을 발휘하는 듯 보였으나 재료분리 발생 경계선에 위치하는 것을 알 수 있었다. 이 경우, 증점제를 사용할 경우에는 증점제 사용량이 0.3% 이상인 경우에 재료분리를 안정적으로 방지할 수 있었으나 유동성은 다소 저하하는 경향을 보였다. 감수제 첨가량이 0.75%일 경우 증점제를 첨가하지 않았거나 증점제 첨가량이 0.1% 이하로 낮은 경우 모든 물시멘트비에서 재료분리가 발생하였고, 증점제 첨가량 0.3% 이상일 경우 상대적으로 낮은 물시멘트비에서는 중유동 콘크리트의 유동성 범위를 만족하였으나, 물시멘트비가 0.60인 경우에는 재료분리 발생 경계에 위치하여 재료분리 발생 우려가 있는 것으로 판단되었다. 슬럼프 플로 실험 결과를 통해 중유동 콘크리트 제조를 위한 배합에서는 물시멘트비에 따라 감수제는 0.25%~0.75%, 증점제는 최소 0.3% 이상의 범위에서 사용해야 충분한 유동성을 가질 것으로 판단하였다.

3.1.2 EIS

슬럼프 플로 시험을 통한 재료분리 판정과 함께 정량적인 재료분리 판정 방법인 EIS를 사용한 재료분리 판정 결과를 Figure 6에 콘크리트의 강도별로 나타내었다. 대체적으로 육안 관찰을 통해 재료분리를 판정한 결과와 일치하였다. 다만 일부 물시멘트비가 상대적으로 높은 w/c 0.55배합에서는 육안 관찰 결과 재료분리로 판정하였으나, EIS 판정 결과 재료분리가 아닌 것으로 판정되는 것을 확인하였다. 이는 콘크리트가 재료분리의 경계에 있거나 재료분리가 발생하였을 때 골재의 붕괴로 인해 슬럼프 값이 크게 측정된 것으로 판단하였다. 하지만 이와 같은 배합에서 EIS 정수를 보면 재료분리 판정 기준인 2.5에 여전히 근접해서 나타나고 있다.

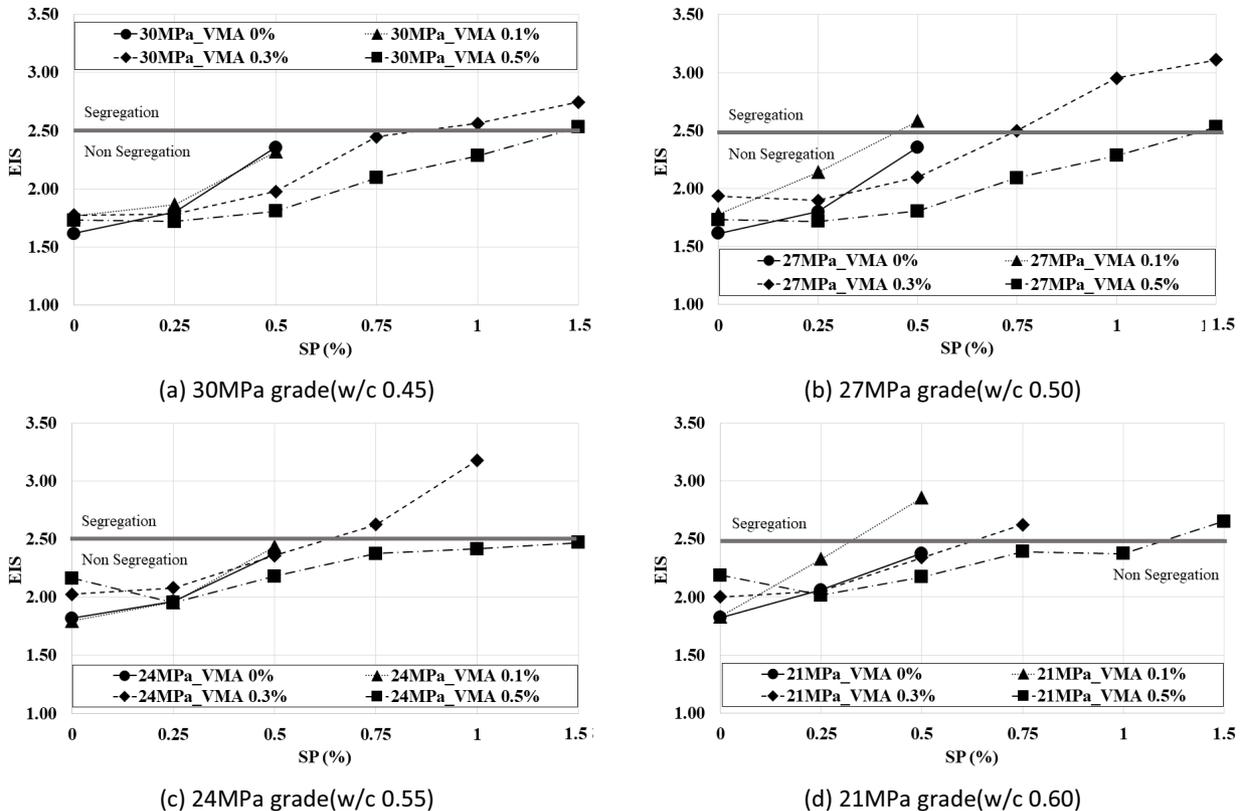


Figure 6. Influence of SP dosage on segregation(EIS value) depending on VMA dosage and w/c

3.2 레올로지 거동 분석

3.2.1 소성 점도

일반강도 콘크리트 배합에 대한 소성점도 측정 결과를 Figure 7에 강도별로 나타내었다. 먼저, 감수제를 첨가하지 않은 배합에서 증점제를 포함하는 모든 배합에 대해 낮은 유동성으로 인해 레올로지 측정이 불가능하였다. 또한, 감수제 첨가량이 증가함에도 데이터가 연결되지 않는 부분은 재료분리로 판정하여 레올로지 측정이 불가능한 부분이다. 소성점도는 전반적으로 증점제 사용량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며, 감수제 사용량이 증가할수록 감소하는 모습을 보였다. 감수제 사용량 변화에 따른 소성점도의 변화에서 주목할 점은 감수제 사용량이 증가할수록 소성점도가 감소하지만 어느 지점부터 더 이상 감소하지 않고 증가하는 모습을 볼 수 있다. 이러한 소성점도 측정 결과는 재료분리 발생 우려 혹은 재료분리 발생으로 인한 결과로 판단된다. 즉, 재료분리로 인해 굵은 골재의 분리가 발생하여 정상적인 레올로지 측정이 불가능하여 나타난 것으로 생각된다[13]. 이러한 경우는 증점제를 첨가하는 경우에도 나타났는데, 감수제 첨가량이 과다할 경우 발생할 수 있는 재료분리 가능성이 증점제의 사용량에 따라 통제되지 못하여 발생한 결과로 판단된다.

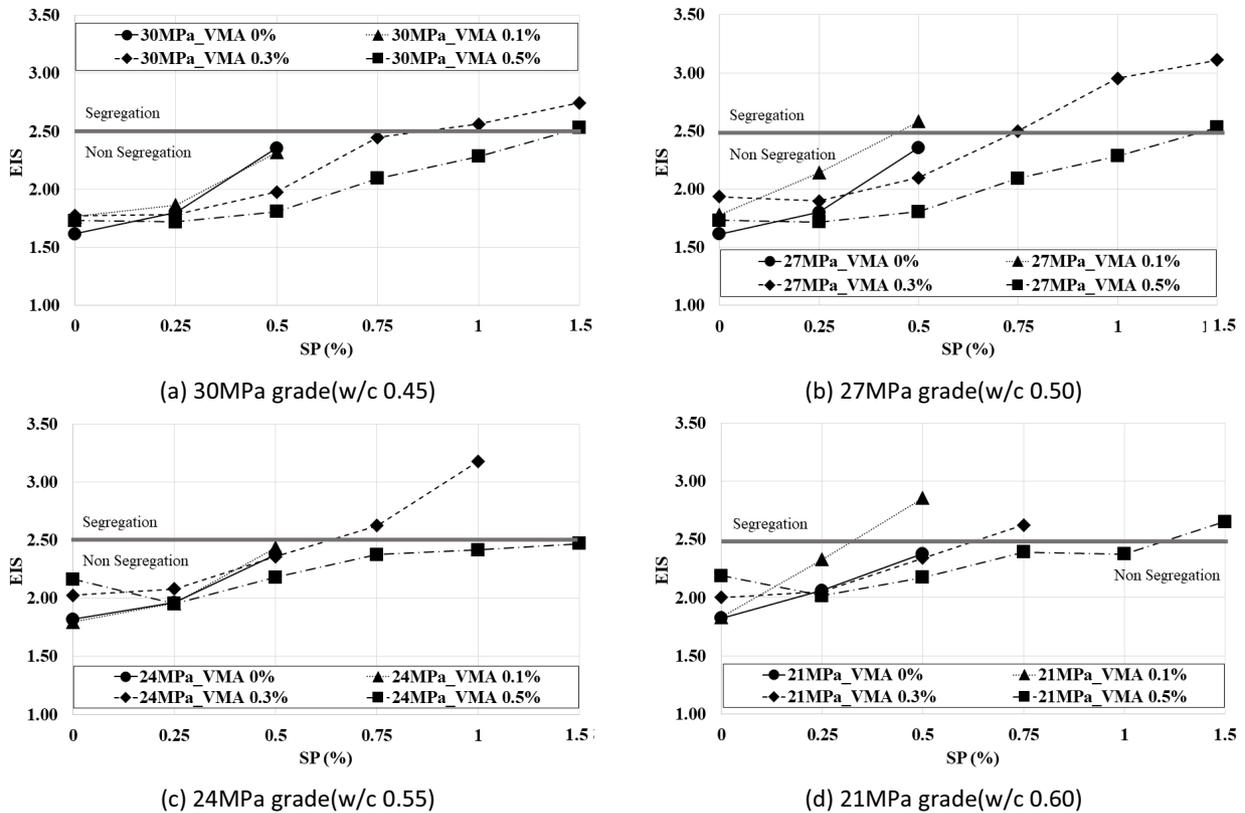


Figure 7. Influence of SP and VMA dosage on plastic viscosity for each strength grade mixture

증점제 사용에 따른 소성점도 증가 및 재료분리 저감 효과에 따른 관계를 살펴보면 증점제 첨가량이 증가할수록 소성점도가 증가하며 콘크리트의 재료분리방지 효과 또한 얻을 수 있었으며 그 결과 더 많은 양의 감수제를 사용하여도 재료분리를 방지할 수 있었다. 이러한 결과는 콘크리트의 재료분리 발생 방지와 소성점도가 관련 있으며, 재료분리 발생 방지를 위해서는 높은 소성점도 확보가 중요한 요인으로 작용하기 때문에 나타난 결과로 생각한다. 증점제를 첨가하였을 때 특이한

부분은 증점제 첨가율이 가장 높은 0.5% 배합에서는 감수제 첨가량이 증가함에 따라 전반적으로 소성점도가 증가하는 변화는 있으나 소성점도의 변화 폭이 매우 크지 않고 대체적으로 비슷한 수준에서 측정된다고 생각할 수 있다. 이러한 결과는 고성능 감수제의 사용이 콘크리트의 항복응력에만 영향을 미치고 소성 점도의 변화에는 크게 영향을 미치지 않는다는 이론적 내용을 보여주는 것으로 사료된다.

3.2.2 동적 항복 응력

동적항복응력은 유동곡선(flow curve) 시험을 실시하여 얻어지는 shear rate와 shear stress와의 관계를 통해 Bingham 관계식에서 얻어진다. 동적항복응력 결과는 Figure 8에 압축강도 30, 27, 24, 21MPa급 배합에 대해 나타내었다.

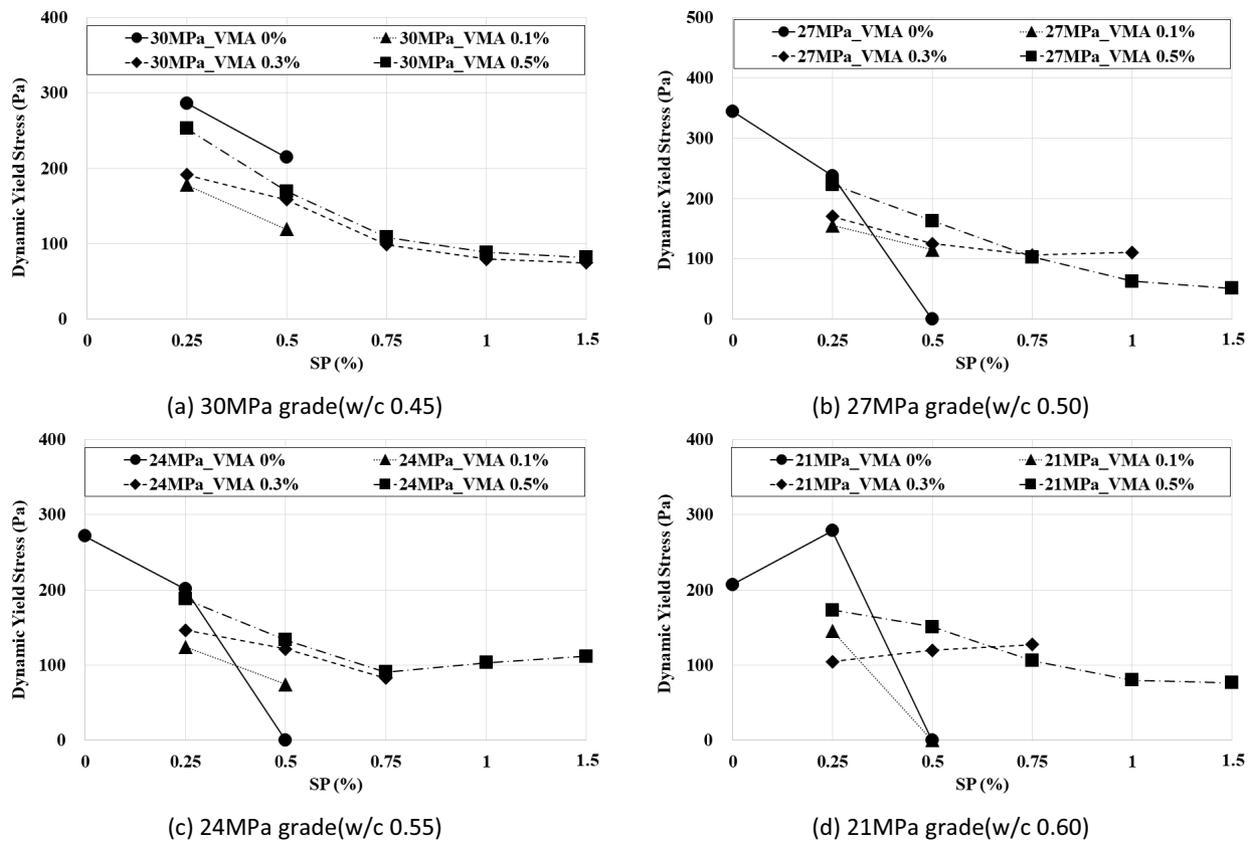


Figure 8. Influence of SP and VMA dosage on dynamic yield stress for each strength grade mixture

소성점도와 동일하게 감수제를 첨가하지 않은 배합에서 증점제를 사용하는 경우에는 낮은 유동성으로 인해 레올로지 측정이 불가능하였고, 감수제 첨가량이 증가함에 따라 데이터가 연결되지 않는 부분은 재료분리로 판정된 부분이다. 소성점도의 경우 재료분리 경계 혹은 재료분리 발생 영역에서 일반적이지 않게 소성점도 값이 증가하는 것으로 나타났으나, 동적 항복응력은 이러한 영향과 무관하게 감수제 첨가량이 증가함에 따라 감소하는 결과가 나타났다. 이는 이전 연구에서 밝힌 바와 같이 동적항복응력을 결정하는 과정에서 실제 측정된 값이 아닌 추정치에 의해 결정되기 때문에 발생하는 결과로 보인다. 또한, 이러한 동적항복응력의 경향은 기존의 고성능 감수제 사용량이 유동성 증진에 기여한다는 사실을 잘 나타내고 있다. 다만, 재료분리 경계에 있어서도 특별한 변화요소가 보이지 않아 동적항복응력 측정결과로는 레오미터를 이용한 재료분리

현상을 특정하기 어렵다고 할 수 있다. 다만, 동적항복응력 측정 결과가 0을 나타내는 경우가 있는데, 이 경우는 고유동이 달성되는 경우로 받아들여질 수 있으나, 본 연구에서는 육안 관찰 결과 재료분리 발생 경계로 판단되어 동적항복응력 측정 결과가 콘크리트의 재료분리 판정과는 연관성이 낮은 것으로 판단할 수 있었다.

3.2.3 정적 항복 응력

정적 항복 응력은 유체가 완전히 정지된 상태에서 전단응력을 가하였을 때(stress-growth) 유체가 실제로 움직이기 시작 하는 순간의 응력을 측정하는 방식이다. 즉, 동적 항복 응력이 빙헴 모델에 의한 추정 값이라면 정적 항복 응력은 실제로 유체가 움직이기 시작한 때에 측정된 값이라고 할 수 있다.

Figure 9는 압축강도 30, 27, 24, 21MPa급 배합의 정적 항복 응력 측정 결과를 나타낸 것이다. 데이터가 연결되지 않는 부분은 동적 항복응력 측정 결과와 동일한 조건이다. 결과에서 보는 바와 같이 정적 항복 응력 측정 결과는 소성점도의 측정 결과와 유사하게 고성능 감수제의 사용량이 증가할수록 감소하다 어느 지점부터 감소하지 않고 증가하는 모습을 보이고 있다. 고성능 감수제의 사용은 입자들의 분산 작용을 일으키기 때문에 사용량이 증가할수록 항복응력이 감소하는 것이 일반적인 현상이다. 이러한 현상은 동적 항복응력에서는 나타났으나, 정적 항복응력 측정 결과에서는 오히려 소성점도의 변화 경향과 유사하게 재료분리 발생 경계와 재료분리 발생 영역으로 접근할수록 항복응력 값이 증가하는 모습이 나타났다. 이러한 결과는 소성점도 측정 결과와 마찬가지로 재료분리 발생 경계 혹은 재료분리 발생 영역에서 굵은 골재의 분리로 인해 정상적인 레올로지 측정이 불가능하여 나타나는 결과로 판단된다.

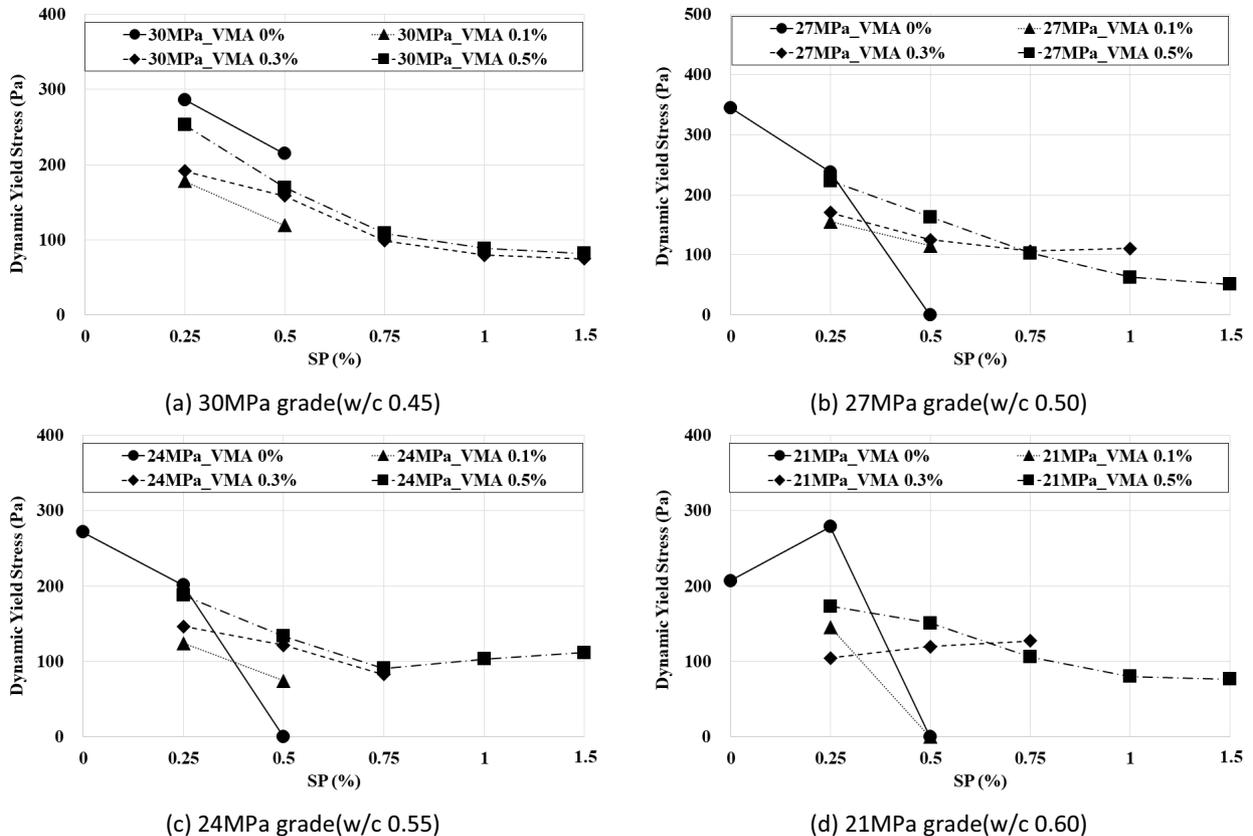


Figure 9. Influence of SP and VMA dosage on static yield stress for each strength grade mixture

3.3 중유동 콘크리트의 성능 범위 정의

3.3.1 유동성 달성과 레올로지 정수 범위

이상의 실험결과와 선행 연구 결과에서 중유동 콘크리트 제조를 위해 유동성과 레올로지 측정 결과를 분석하여 목표 유동성 달성과 레올로지 정수의 관계를 Figure 10에 제시하였다[14]. 정리된 결과에서 재료분리가 발생한 배합 및 재료분리가 발생하지 않았으나 목표 유동성을 달성하지 않은 배합을 제외하고 안정적으로 유동성을 확보한 배합의 레올로지 정수를 사용하여 적정 레올로지 정수 범위를 분석, 제안하고자 한다.

먼저, 중유동 콘크리트를 달성하기 위한 유동성 범위를 정의하기 위해 레올로지 정수 중 항복응력 범위를 정의하고자 하였다. 항복응력에는 정적항복응력과 동적항복응력이 있으며 측정 방법에 차이가 있으며 그에 따른 결과도 다르다. 본 연구에서는 향후 레올로지 정수인 소성점도와 항복응력을 병행하여 사용하기 위해 소성점도를 얻는 과정인 flow curve 방식으로 얻어지는 동적항복응력을 사용하여 성능 범위 정의에 사용하고자 하였다.

재료 분리 발생 없이 목표한 플로인 400mm, 500mm와 600mm를 달성한 배합들의 레올로지 정수를 살펴보면 전체적으로 동적항복응력은 50~300Pa 범위에 위치하여 있었다. 다만, 목표 플로 600mm의 경우 재료분리 발생없이 달성한 경우가 단 한 가지에 불과하였다. 이를 통해 600mm 수준의 플로를 재료분리 없이 달성하는 것은 본 연구의 범위 및 조건에서는 어렵다고 판단하였다.

실험 결과를 바탕으로 목표 플로 400mm 달성을 위한 레올로지 정수 범위는 동적 항복 응력 300Pa 이하, 목표 플로 500mm 달성을 위한 레올로지 정수 범위는 동적 항복 응력 150Pa 이하의 범위가 목표 플로 달성을 위한 최소 레올로지 정수 범위로 판단하였다. 즉, Figure 10을 분석하였을 때 중유동 콘크리트 제조를 위해 충분한 유동성을 확보하기 위한 최소 레올로지 정수 범위는 동적항복응력 300Pa 이하의 범위로 제안하고자 한다.

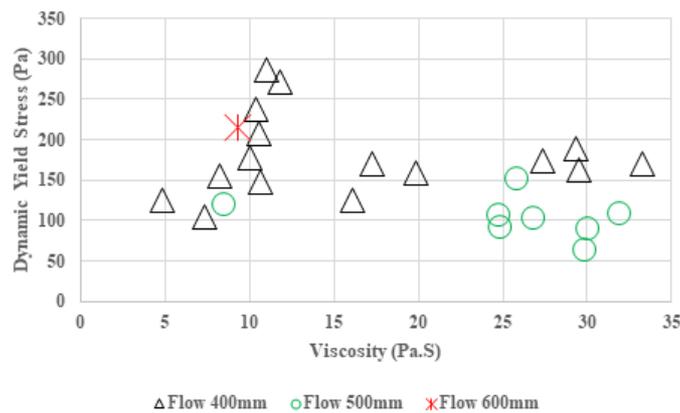


Figure 10. Rheological parameters for mid-workability concrete(mixtures without segregation and with sufficient workability)

3.3.2 재료분리 저항성과 레올로지 정수 범위

중유동 콘크리트 제조 시 재료분리 저항성은 충분한 유동성 달성과 함께 반드시 필요한 조건 중 하나이다. 위의 실험 결과를 통해 재료분리 저항성을 가지기 위한 최소의 소성점도 범위를 Figure 10과 Table 5를 통해 분석하였다.

충분한 유동성을 확보하면서 재료분리를 방지할 수 있는 소성점도의 범위는 대체적으로 항복응력이 높은 400mm 유동성을 만족하는 경우에 상대적으로 낮은 수준의 소성점도 범위를 보이고, 항복응력이 낮아지는 500mm 유동성을 만족하는 경우에는 상대적으로 높은 수준의 소성점도 범위를 갖는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 유동성의 발현에 따라 재료분리 발생 가능성

이 증가하는 것을 볼 수 있었고, 이를 제어하기 위한 소성점도 범위는 증가한다는 것을 알 수 있었다. 즉, 실무적으로 중유동 콘크리트를 제조하기 위해서는 유동성을 확보하기 위한 고성능 감수제의 사용과 더불어 발현하고자 하는 유동성의 범위에 따라 적절히 증점제와 같은 혼화제 및 분체를 활용하는 방법 등으로 배합의 소성점도를 확보해야 한다는 것을 알 수 있었다.

Table 5. Summary on influence of superplasticizer dosages and VMA dosages on slump flow depending on water-to-cement ratio

		30MPa						27MPa					
		SP 0%	SP 0.25%	SP 0.50%	SP 0.75%	SP 1.00%	SP 1.50%	SP 0%	SP 0.25%	SP 0.50%	SP 0.75%	SP 1.00%	SP 1.50%
VMA 0%		□ _O	□ _O	⊙ _O	× _O	× _O	× _O	□ _O	△ _O	× _O	× _O	× _O	× _O
	LSUBE	□ _{LSUBE}	□ _{LSUBE}	⊙ _E	× _E	× _E	× _E	□ _{LSUBE}	△ _E	⊙ _E	× _E	× _E	× _E
	R	□ _R	□ _R	⊙ _R	× _R	× _R	× _R	□ _R	△ _R	× _R	× _R	× _R	× _R
VMA 0.1%		□ _O	△ _O	△ _O	× _O	× _O	× _O	□ _O	△ _O	⊙ _O	× _O	× _O	× _O
	LSUBE	□ _{LSUBE}	△ _E	△ _E	× _E	× _E	× _E	□ _{LSUBE}	△ _E	× _E	× _E	× _E	× _E
	R	□ _R	△ _R	△ _R	× _R	× _R	× _R	□ _R	△ _R	⊙ _R	× _R	× _R	× _R
VMA 0.3%		□ _O	□ _O	△ _O	○ _O	⊙ _O	× _O	□ _O	△ _O	△ _O	○ _O	⊙ _O	× _O
	LSUBE	□ _{LSUBE}	□ _{LSUBE}	△ _E	○ _E	× _E	× _E	□ _{LSUBE}	△ _E	△ _E	× _E	× _E	× _E
	R	□ _R	□ _R	△ _R	○ _R	× _R	× _R	□ _R	△ _R	△ _R	○ _R	⊙ _R	× _R
VMA 0.5%		□ _O	□ _O	△ _O	○ _O	○ _O	⊙ _O	□ _O	□ _O	△ _O	○ _O	○ _O	× _O
	LSUBE	□ _{LSUBE}	□ _{LSUBE}	△ _E	○ _E	○ _E	× _E	□ _{LSUBE}	□ _{LSUBE}	△ _E	○ _E	○ _E	× _E
	R	□ _R	□ _R	△ _R	○ _R	○ _R	⊙ _R	□ _R	□ _R	△ _R	○ _R	× _R	× _R

		24MPa						21MPa					
		SP 0%	SP 0.25%	SP 0.50%	SP 0.75%	SP 1.00%	SP 1.50%	SP 0%	SP 0.25%	SP 0.50%	SP 0.75%	SP 1.00%	SP 1.50%
VMA 0%		△ _O	△ _O	× _O	× _O	× _O	× _O	△ _O	× _O	× _O	× _O	× _O	× _O
	E	△ _E	△ _E	⊙ _E	× _E	× _E	× _E	△ _E	○ _E	⊙ _E	× _E	× _E	× _E
	R	△ _R	△ _R	× _R	× _R	× _R	× _R	△ _R	× _R	× _R	× _R	× _R	× _R
VMA 0.1%		□ _O	△ _O	× _O	× _O	× _O	× _O	□ _O	× _O	× _O	× _O	× _O	× _O
	LSUBE	□ _{LSUBE}	△ _E	○ _E	× _E	× _E	× _E	□ _{LSUBE}	○ _E	× _E	× _E	× _E	× _E
	R	□ _R	△ _R	× _R	× _R	× _R	× _R	□ _R	○ _R	× _R	× _R	× _R	× _R
VMA 0.3%		□ _O	△ _O	× _O	× _O	× _O	× _O	□ _O	△ _O	× _O	× _O	× _O	× _O
	LSUBE	□ _{LSUBE}	△ _E	○ _E	× _E	× _E	× _E	□ _{LSUBE}	△ _E	○ _E	⊙ _E	× _E	× _E
	R	□ _R	△ _R	× _R	× _R	× _R	× _R	□ _R	△ _R	× _R	× _R	× _R	× _R
VMA 0.5%		△ _O	△ _O	△ _O	○ _O	× _O	× _O	△ _O	△ _O	○ _O	○ _O	× _O	× _O
	E	△ _E	△ _E	△ _E	○ _E	○ _E	⊙ _E	△ _E	△ _E	○ _E	○ _E	○ _E	⊙ _E
	R	△ _R	△ _R	△ _R	○ _R	× _R	× _R	△ _R	△ _R	○ _R	○ _R	× _R	× _R

- : Lower than flow 400mm
- △ : Higher than flow 400mm and lower than flow 500mm
- : Higher than flow 500mm and lower than flow 600mm
- ⊙ : Higher than flow 600mm
- : Segregation
- O : Segregation Evaluation using Observation
- E : Segregation Evaluation using EIS
- R : Segregation Evaluation using Rheology Parameters

또한 재료분리가 발생하였을 경우 굵은 골재의 분리로 인하여 소성점도가 더 이상 감소하지 않고 비정상적으로 증가하는 형태의 측정 결과를 이전 연구에서 밝힌 바와 같이 5Pa.s 이하의 소성점도를 갖는 경우의 콘크리트는 재료분리에 취약한 콘크리트 배합이 될 것으로 판단하였다. Table 5는 본 연구에서 진행한 모든 배합에 대한 유동성 확보 여부 및 재료분리 판정 방법에 따른 재료분리 판정 여부를 표로 정리하여 나타내었다. 표의 정리에서 관찰에 의한 판정, EIS에 의한 판정 및 레올로지에 의한 판정은 대체적으로 일치하나 재료 분리 발생 경계에서는 간혹 다른 판정이 발생하는 경우도 있는 것을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 콘크리트의 재료분리 판정에 있어서 레올로지를 이용한 방법이 가장 예민하고, EIS를 이용한 방법이 가장 둔감하였다고 정리되었다. 그러나 이러한 판정 방법의 차이가 절대적이지는 않으며 향후 재료분리 판정에 대한 연구가 필요하다고 판단한다.

4. 결론

본 연구는 일반강도 범위의 콘크리트에 대하여 소요의 유동성을 확보하는 콘크리트 배합에 대해 중유동 콘크리트로 정의하고 중유동 콘크리트의 제조를 위한 일반강도 콘크리트의 유동성 증진과 재료분리 저항성 확보를 위해 일반 고성능 감수제와 증점제를 사용함으로써 중유동 콘크리트의 적절한 레올로지 정수 범위를 제시하고자 하였다. 유동성 달성 확인을 위해 플로 테스트를 진행하였고, 재료분리 판정을 위한 EIS법, 재료분리 저항성 확보 분석을 위해 레올로지 측정을 진행하였다. 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 증점제 첨가량이 증가할수록 슬럼프 플로 값이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 증점제 첨가로 인해 콘크리트의 소성점도가 증가하여 유동성이 저하된 것으로 생각된다.
- 2) 중유동 콘크리트 제조를 위한 적정 증점제 첨가량은 0.3%~0.5%이며 물시멘트비에 따라 첨가량의 적정량에는 차이가 있을 것으로 생각된다. 증점제 첨가량 0.1%의 경우 슬럼프 플료가 감소하는 것으로 보아 재료분리 방지 효과가 있으나, 재료분리 발생 시점에는 큰 차이가 없었기 때문에 재료분리 발생 방지 효과의 정도가 미비한 것으로 판단된다.
- 3) 중유동 콘크리트의 목표 플로인 400~600mm 달성을 위한 최소 레올로지 범위는 동적항복응력 300Pa, 소성점도는 5~35Pa.s 범위로 제시하고자 한다.
- 4) 소성점도가 5Pa.s 이하로 저하될 경우 콘크리트의 재료분리 발생 가능성이 높아지는 것으로 판단되며 최소 5Pa.s 이상의 소성점도를 확보하여야 재료분리 저항성을 가질 수 있을 것으로 생각된다.

요약

본 연구에서는 중유동 콘크리트 제조를 위해 기존의 재료분리 판정법과 레올로지 정수를 활용하여 콘크리트 재료분리 상황을 정의하고자 하였다. 중유동 콘크리트는 일반강도 범위의 비교적 높은 물시멘트비 조건에서 높은 유동성을 발현하는 조건으로 고성능 감수제를 사용하면서 재료분리를 제어하는 것이 매우 중요하다. 이에 본 연구조건에서는 고형분량이 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 : 중유동 콘크리트, 레올로지, 재료분리 저항성, 고성능 감수제, 레올로지 정수

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).

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

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

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

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

References

1. 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 <http://doi.org/10.5345/JKIBC.2017.17.5.429>
2. Lee JH, Kim JH. Performance Evaluation of Superplasticizers Using a Test Mortar. *Korean Society of Civil Engineers*. 2016 Oct;10:9-10
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;12:1279-88. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.009>
4. 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.
5. Han CG, Jiang YR, Oh SK, Banh HY. Development and Property Analysis of Segregation-Reducing Type Flowing 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>
6. KS F 4009:2016. Ready-Mixed Concrete. Eumseong (Korea):Korea Agency for Technology and Standards.2016.4-7
7. Jeon JW, Son BG, Lee HS, Han DY. Segregation possibility analysis for normal strength concrete depending on aggregate quality. *Busan·Ulsan·Gyeongnam Chapter of Architectural Institute of Korea*. 2018 Nov;25(1):127-128
8. Han CG, Kim GC, Park BK. Suggestion of segregation evaluation method based on evaluation index for segregation (EIS). *Proceeding of the Korea Concrete Institute Conference*. 2008 Nov;20(2):923-6.
9. KS F 2402:2017. Standard test method for concrete slump. Eumseong (Korea);Korea Agency for Technology and Standards.

2017.1-5

10. KS F 2594:2021. Method of test for slump flow of fresh concrete. Eumseong (Korea);Korea Agency for Technology and Standards.2021.1-3
11. Han CG, Han ID. Proposal on the Evaluation Method of Segregation Resistance of Normal Strength Concrete. Journal of the Architectural Institute of Korea. 2015 Jul;31(7):83-90. http://dxdoiorg/105659/JAIK_SC201531783
12. Germann Instruments, Inc. ICAR Rheometer [Internet]. Evanston (IL): Available from: [http://www.germann.org/Test Systems/ICAR%20Rheometer/ICAR%20Rheometer.pdf](http://www.germann.org/Test_Systems/ICAR%20Rheometer/ICAR%20Rheometer.pdf)
13. Lee YJ, Lee YJ, Han DY. A Fundamental Research on Determining Segregation Boundary using Rheological Parameters for 21 and 24MPa grade of Normal Strength Concrete. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2020 Oct;20(5): 399-407. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2020.20.5.399>
14. 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>