

# 3D 프린팅 공법 적용을 위한 모르타르 구성성분 변화에 따른 레올로지 특성 연구

## Study on Rheological Properties of Mortar for the Application of 3D Printing Method

이호재<sup>1\*</sup> · 김원우<sup>1</sup> · 문재흠<sup>1</sup>Hojae Lee<sup>1\*</sup> · Won-Woo Kim<sup>1</sup> · Jae-Heum Moon<sup>1</sup>

(Received November 24, 2017 / Revised February 27, 2018 / Accepted March 13, 2018)

In this study, an experiment was conducted to analyze mortar based rheology for 3D printing method application. The tendency of rheological properties due to the change of W/B, binder type, replacement ratio, and super plasticizer which have a great influence on the flow characteristics of concrete was experimentally analyzed. Experiments were carried out by dividing into paste and mortar. In the paste experiment, rheology was analyzed by setting W/B, binder type, replacement ratio, and super plasticizer dosage as main variables. In the mortar experiment, the rheological properties of W/B and sand ratio were analyzed. As a result, as the W/B was increased, the viscosity decreased and the FA ratio to replace FA increased and the viscosity increased. In order to increase the fluidity, substitution of only 5% of SF reduces the shear stress and the viscosity is reduced by about 83%. Mortar rheological evaluation shows that there is a critical section where a large change occurs in the W/B 30 to 40% section. Also, in the same W/B, it is analyzed that there is a critical section where the shear stress increases more than twice in the sand ratio of 50~60%.

**키워드 :** 레올로지, 3D 프린팅, 구성재료, 유동특성

**Keywords :** Rheology, 3D printing, Construction materials, Rheological properties

## 1. 서론

건설기술이 발전되면서 콘크리트의 사용목적이 다양화됨에 따라 콘크리트의 유동특성 변화에 대한 요구가 증대되고 있다. 다변화된 유동특성이 적용된 콘크리트의 개발로 인해 객관적이고 정량화된 유동특성 평가방법의 필요성 또한 함께 증가하고 있다(Oh et al. 2014).

유동특성에 대한 정량화 연구는 1990년대 고유동 콘크리트의 개발로 인해 과학적인 접근방법에 필요성이 증대되며 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 콘크리트 레올로지 측정방법을 통한 유동특성의 정량화 연구는 시공성능 예측과 제어에 활용되고 있으며, 굳지 않은 콘크리트의 특성을 정량화 하는 방법으로 널리 활용되고 있다(Kwon et al. 2013).

최근 콘크리트를 활용한 건설기술 중에서 3D 프린팅은 콘크리

트의 정량적 유동특성 평가가 필요한 분야이다. 시멘트 복합재료는 기존의 소형 3D 프린터용 소재와는 달리 불균질하며 재료, 기후 환경, 시공조건 및 시간에 따른 변동성이 큰 재료이다. 따라서 소요의 압출 및 유동성능의 확보를 위해서는 사용재료의 환경적 시간의존적 특성 정보의 확보가 중요하다.

3D 프린팅 공법에 있어 배합, 이송, 압출에 필요한 기계적 요소의 설정을 위해 콘크리트의 유동성에 대한 정량적 데이터 확보가 필요하다(Lee et al. 2017). 기존연구들에서 콘크리트의 압출특성을 평가하기 위한 정량적 데이터로 유변학적 특성에 대한 평가를 수행하였다. 특히 배합으로 인한 장비의 기계적 요소는 시공동선, 시공시간을 포함한 시공법에 대한 영향으로 이어져 콘크리트의 유변학적 특성 평가는 더욱 강조되고 있다.

3D 프린팅 공법을 위한 콘크리트 유동특성의 제어는 장비의 압출속도, 이동속도 등과 연계되어 기존 공법들보다 더욱 세밀한

\* Corresponding author E-mail: [h.lee@kict.re.kr](mailto:h.lee@kict.re.kr)

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 구조융합연구소 (Structural Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

정밀도를 요구한다. 실내뿐 아니라 야외 현장에 3D 프린팅 공법 적용을 고려한다면 다양한 시공환경하 콘크리트 유동특성의 기초적인 평가가 필수적으로 선행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 구성성분 중 유동특성에 큰 영향을 미치는 인자(W/B, Binder Type, Replacement Ratio, High Water Reduction Agent)의 변화에 의한 레올로지 특성(Rheological Properties)을 실험적으로 분석하였다.

## 2. 3D 프린팅용 건설소재의 레올로지 요구특성 및 배합인자 설정

3D 프린팅을 통한 건설기술 개발은 2000년대부터 Contour Crafting(Khoshnevisk, 2004)을 비롯한 다양한 연구가 진행되었다. 대표적으로 Loughborough 대학(Le et al. 2012), Surrey 대학(Alwi et al. 2013) 및 Eindhoven 대학(Wolfs 2015)에서 건설용 3D 프린팅 연구를 수행하였으며, 장비 개발뿐 아니라 건설용 3D 프린팅의 필라멘트(Filament)로 사용되는 콘크리트의 물성에 대한 연구도 함께 진행하였다. 본 연구에서는 기존 연구에서 사용한 배합들을 수집, 3D 프린팅용 콘크리트에 요구되는 레올로지 특성 및 재료 구성을 분석하고 정의하였다.

### 2.1 레올로지 요구특성 정의

3D 프린팅 건설을 위해 소재로 사용되는 콘크리트에 요구되는

Table 1. Required performances of concrete for 3D printing method

Required performance	Definition
Workability	Fluidity required to transport mixture to the extrusion devices
Extrudability	A level of fluidity that can be extracted from the printer
Buildability	Support capability of each layer for additive manufacturing
Open time	Time to maintain Extrudability after mixing

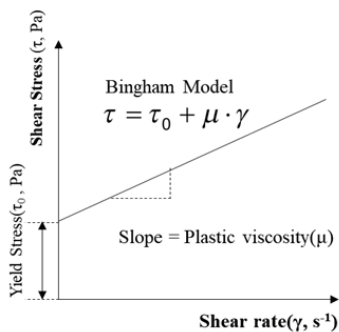


Fig. 1. Rheology properties(Bingham model)

특성은 크게 Workability, Extrudability, Buildability, Open time 네 가지로 구성된다.

상기 요구성능 중 extrudability와 buildability는 레올로지 특성인 shear stress와 viscosity의 값을 이용하여 장비의 압출성능에 맞는 콘크리트의 물성을 제어한다. Shear stress는 소요 extrudability를 위해 압출장치가 압출을 위해 가력할 때 필요한 구동력을 평가하기 위한 용도이다. Viscosity는 압출 이후 붕괴 또는 처짐이 발생하지 않고 적층될 수 있는 능력인 buildability의 소요성능 확보를 위해 평가한다.

Le et al. (2012)의 연구에서 3D 프린팅을 통한 압출 및 적층 성능 평가와 동시에 콘크리트의 레올로지를 평가하여 extrudability와 buildability를 만족하는 범위의 레올로지 특성을 도출하였다.

콘크리트의 레올로지 특성은 고체상태에서 가력을 통해 액체상태로 전환되는 형태를 갖고 있는데, Fig. 1과 같이 Bingham model에서는 고상에서 액상으로 전환을 위해 필요한 응력을 yield stress로 표현하고 있다. Bingham model은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \tag{1}$$

여기서

$\tau$  – shear stress [Pa]

$\tau_0$  – yield stress [Pa]

$\gamma$  – shear rate [ $s^{-1}$ ]

$\mu$  – plastic viscosity [Pa · s]

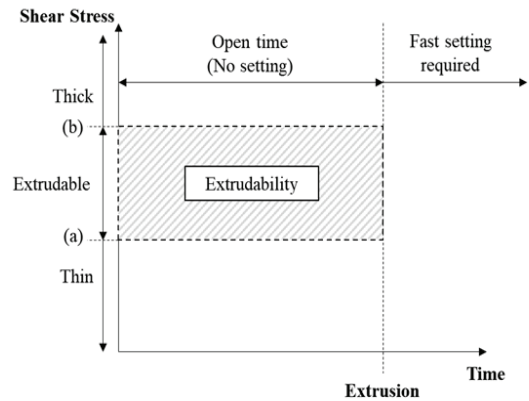


Fig. 2. Definition of extrudability & open time

Table 2. Required performances of concrete for 3D printing method

Required performance	Reference value
Yield Stress Fig. 1 (a) - (b)	0.3(a) - 0.9(b) (Unit: kPa)
Viscosity	300 - 500 (Unit: Pa·s)

3D 프린팅용 건설소재(콘크리트, 모르타르)의 압출을 위해 장비의 관점에서는 yield stress와 viscosity가 중요한 변수로 적용되는데 압출을 위한 외력 산정에 필수적이다.

Shear stress는 yield stress 0.3~0.9kPa의 범위가 압출을 위해 적합한 범위로 평가되었다. Viscosity는 Surrey대학에서 기존 연구를 토대로 제안한 300~500Pas의 범위를 참고치로 활용하였다(Alwi et al, 2013).

3D 프린팅용 건설소재 압출을 위해 필요한 레올로지 특성은 기존연구를 바탕으로 Fig. 2, Table 2에 정리하였다. Fig. 2의 압출 성능 확보를 위한 성능으로 Table 2에 정리된 수준의 레올로지 특성이 필요하다. 하지만 압출장비에 따라 요구성능은 달라지며, 측정장비에 따른 레올로지 특성치는 변동될 수 있어 Table 2의 값은 참고치로 활용했다.

## 2.2 레올로지 특성 영향인자 정의

콘크리트의 워커빌리티를 평가하는 대표적인 방법은 slump 측정 방법이다. 그러나 slump가 모든 유동특성을 대표하지는 못한다. Slump 결과는 shear stress나 viscosity 등의 다양한 레올로지

특성들이 반영된 최종 결과물의 한 형태라고 할 수 있다.

다양한 레올로지 특성 평가 방법이 복잡한 과정을 거치는 반면에 슬럼프 측정방법은 현장에서 간단하게 측정할 수 있기 때문에 슬럼프 측정결과를 통한 레올로지 특성을 도출하고자 하는 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 기존 연구에서 수행한 58개 배합에 대한 실험결과를 분석하여 레올로지에 가장 영향을 주는 인자들을 도출해 실험변수로 활용하였다.

배합에 변수로 사용된 인자는 굵은골재, 잔골재, 결합재, 단위수량, 감수제 혼입량을 변화하여 slump, yield stress, viscosity와의 관계를 평가하였다(Table 3에는 58개 배합 중 10개 배합에 대한 정보를 표현하였다.)

본 연구에서는 기존 연구에서 관계를 평가한 상기 인자들 외에 추가적으로 총골재량, 물-결합재 비, 페이스트-골재 비 등 레올로지에 영향을 주는 인자들로의 관점을 추가하여 상관분석법(correlation analysis)을 통해 연관 분석을 시도하였다.

상관분석법은 두 변수 간의 연관된 정도를 나타낼 뿐, 인과관계를 설명하는 분석법은 아니다. 그러나 실험적 검증을 위해 모든 인자를 선택할 수 없기에 각각의 연관성을 갖고 있는 인자를 우선적으로 도출하기 위해 적합한 방법이라고 판단된다.

상관분석법을 통해 각 배합변수와 yield stress 간의 상관관계를 평가한 결과는 Table 4에 나타났다. 양과 음의 방향과 무관하게 상관관계가 높은 인자들을 각각 순위를 평가하여 선정하였다. Yield stress와 가장 상관관계가 높은 변수는, 물-결합재 비, 페이스트-골재 비, 총 골재량으로 평가됐으며, viscosity와 높은 상관관계의 변수는 총 골재량, 단위 시멘트양과 단위수량이 높은 상관관계를 갖고 있었다.

상관분석법을 통해 분석한 레올로지에 영향을 미치는 배합변수를 도출하여 본 연구에서는 물-결합재 비, 페이스트-골재 비에 따른 레올로지 특성 변화에 대한 연구를 수행하였다. 또한 골재가 포함되지 않은 페이스트 상태에서의 결합재 종류, 결합재 치환율과 고성능 감수제 변화에 따른 레올로지 특성평가를 함께 수행하였다.

Table 3. Mix proportion to decide rheology properties(Bilgil, 2012)

Composition(kg/m <sup>3</sup> )						Rheology properties		
Gravel	Sand	Fine sand	Cement	Super plasticizer	Water	Slump	Yield stress	Viscosity
957	617	191	362	-	200	80	1717	174
952	614	190	360	-	204	100	1489	163
947	611	189	358	-	208	130	1219	160
943	607	189	356	-	212	165	881	133
938	604	188	35	-	216	225	802	84
1139	373	107	632	15.79	170	245	90	586
1132	371	106	628	15.69	175	250	61	535
440	890	254	617	15.42	189	270	47	528
0	1050	300	785	19.63	225	280	145	694
0	1039	297	777	19.43	233	285	204	371

Table 4. Correlation analysis results with yield stress

Type of constituent		Gravel (G)	Sand (S)	Cement (C)	Water (W)	Total aggregate (Agg)	Paste	W/B	Total weight (TW)	Paste/agg	Agg/TW	Paste/TW	G/TW	S/TW	C/TW	W/TW	Gravel/sand	SP%
No SP	With gravel	0.476	-0.391	-0.042	-0.537	0.243	-0.117	-0.125	0.481	-0.159	0.150	-0.150	0.471	-0.397	-0.063	-0.544	0.453	-
No SP	No gravel	-	0.902	-0.670	-0.614	0.902	-0.700	0.626	0.226	-0.795	0.821	-0.821	-	0.821	-0.742	-0.454	-	-
With SP	With gravel	0.196	-0.078	-0.307	-0.357	0.430	-0.357	0.052	0.158	-0.383	0.376	-0.376	0.192	-0.084	-0.322	-0.337	0.183	0.153
With SP	No gravel	-	0.707	-0.759	-0.263	0.707	-0.742	0.807	-0.841	-0.720	0.729	-0.729	-	0.729	-0.750	-0.102	-	0.732

### 3. 사용재료 및 평가방법

#### 3.1 사용재료 및 배합

사용재료는 A사의 1종 시멘트(Ordinary portland cement, 이하 OPC로 표기), S사의 Fly Ash(이하 FA로 표기), D사의 Silica Fume(이하 SF로 표기), ISO 표준사, D사의 폴리카르본산계 고성능 감수제(Super plasticizer, 이하 SP로 표기)를 사용했다. 실험을 위한 배합은 유동특성에 영향을 미치는 인자에 따라 단계별로 설정하였다.

배합실험은 페이스트 실험과 모르타르 시험으로 분리하여 진행하였다. 페이스트 실험은 W/B, 결합재 종류 및 치환율, 고성능감수제 혼입비율에 따른 레올로지 특성 변화를 평가하고자 실시하였으며, 모르타르 시험은 결합재와 골재 비에 따른 레올로지 변화를

Table 5. Mix proportion for rheology properties test(paste)

No.	W/B	OPC	FA	SF	SP
1	25	100	-	-	-
2	28		-	-	-
3	30		-	-	-
4	35		-	-	-
5	28	100	-	-	0.1
6			-	-	0.3
7			-	-	0.5
8		90	10	-	0.3
9		80	20	-	
10		70	30	-	
11		95	-	5	
12		90	-	10	

W/B=Water-Binder Ratio, OPC=Ordinary Portland Cement, FA=Fly Ash, SF=Silica Fume, SP=Super plasticizer

Table 6. Mix proportion for rheology properties test(mortar)

No.	W/B	Binder Type	Vol(binder)	Vol(sand)
1	30	OPC 100%	50	50
2	40		60	40
3			50	50
4			40	60
5	50		50	50

Table 7. Experiment type and purpose

Type	Purpose
Paste	<ul style="list-style-type: none"> <li>• W/B ratio</li> <li>• Binder type(FA, SF) &amp; replacement ratio</li> <li>• SP dosage ratio</li> <li>• Rheology depend on time</li> </ul>
Mortar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• W/B ratio</li> <li>• Binder-sand ratio</li> </ul>

측정하고자 실험을 실시하였다.

페이스트는 W/B에 따른 변화특성을 검토하고 결합재는 OPC로 고정시킨 상태에서 W/B를 4수준(25, 28, 30, 35%)로 변화시켜 평가하였다. 또한 결합재 종류별 치환율에 따른 레올로지 특성을 평가하고자 FA 3수준(10, 20, 30%), SF 2수준(5, 10%)로 변화시켜 평가를 진행하였다.

또한, 고성능감수제 사용량에 따라 레올로지 변화특성을 평가하고자 결합재를 OPC로 W/B는 28%로 고정시킨 상태에서 고성능감수제 혼입률을 3수준(0.1, 0.3, 0.5%)로 변화시켜 평가를 진행하였다. 모든 배합은 W/B 28%의 OPC를 100로 치환한 배합(Table 1의 2번 배합)을 기준배합으로 설정하여 실험결과를 비교하였다.

모르타르 배합비는 Table 6에 나타냈으며, 모르타르 배합은 W/B의 변화와 binder-sand의 비율 변화에 따른 레올로지 측정용 목표로 설정하였다. W/B에 따른 변화특성을 검토하고자 3수준(30, 40, 50%)으로 설정하여 측정을 진행하였으며, Binder-Sand 비에 따른 레올로지 변화를 평가하고자 3수준(60-40, 50-50, 40-60)의 비율로 배합을 설정하였다. binder-sand 비는 부피비로 배합을 설정하였다.

각각 주요 실험인자에 대해서는 Table 7에 추가적으로 정리하여 표기하였다.

#### 3.2 배합방법

배합방법은 페이스트 배합과 모르타르 배합모두 동일한 방법으로 배합을 실시하였다. 배합은 결합재를 믹서기에 투입 후, 재료의 균질성 확보를 위해 가수(加水) 전 3분간 건비빔을 실시하였으며, 건비빔 후 균일한 수화를 위해 배합수를 1분에 걸쳐 투입하였으며, 배합수 투입 후 3분간 본배합을 실시하였다.

페이스트에서 배합순서는 OPC만을 사용하여 W/B를 변화시켜 레올로지를 측정하여 측정 가능한 W/B 범위 중에서 가장 작은 W/B를 결정하고 그 이후 SP 혼입률을 변화시킨 배합, FA, SF의 치환율을 조정한 배합순으로 실험을 실시했다. 모르타르 배합은 순수 W/B와 골재율에 따른 레올로지 특성을 측정하고자 결합재와 감수제는 사용하지 않았다.

#### 3.3 레올로지 측정

레올로지 측정은 페이스트와 모르타르 모두 Brookfield 사의 DV-III programmable rheometer를 사용하여 측정하였다. 페이스트의 소성점도 및 항복응력 측정을 위해서 배합 직후 레오미터에 페이스트를 투입하여 레올로지 측정을 실시하였다.

레올로지 평가는 전단속도(shear rate)의 변화에 따른 전단응력(shear stress)의 변화량을 측정하였다. 또한, Fig. 3과 같이 hysteresis loop area에 의한 측정값의 이력현상을 피하기 위하여 전단속도를 하강계단식으로 설정하여 측정하였으며, 측정된 전단응력의 직선회귀분석을 통하여 Bingham 모델로 해석하였다(Choi et al. 2014).

레올로지 특성에 영향을 미치는 중요한 인자인 온도의 영향을 배제하기 위해 재료준비실과 배합실험실의 온도를 20°C로 유지하였으며, 재료온도와 배합온도 그리고 레올로지 측정용기의 bath 온도까지 모두 20°C에 맞춰 실험하였다.

레올로지 측정을 위해 shear rate는 10초 단위로 10rpm씩 최대 150rpm까지 상승시킨 후 동일하게 10초 단위로 10rpm씩 감소시켜 측정하였다.

페이스트를 활용한 레올로지 경시변화를 측정을 위해 W/B를 변화한 OPC 배합과 FA 치환 배합은 배합 직후 1차 레올로지 측정 이후 30분이 경과한 후에 2차로 레올로지 측정을 실시하였다. 2차 레올로지 측정을 위해 1차 측정한 상태의 실험용 페이스트를 아무런 외부가력 없이 존치하였다. 이는 3D 프린팅 공법 적용 시 장비의 압출과 정지를 반복하는 과정 중에 발생할 수 있는 교반, 정지, 압출 과정을 모사한 것이다.

일반적으로 3D 프린팅 공법에 필요한 유동학적 특성은 배합 초반의 압출에 대한 항복응력과 점성도 중요하지만, 출력 과정 동안 이동 중 압출과 정지를 반복하는 경우가 잦기 때문에 동일한 상태에서 정지 후, 재압출 시 발생하는 항복응력과 점성에 대한 고려가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 경시변화를 검토할 때 장비가 정지 후 재가동하는 형태를 모사하기 위해 1차 레올로지와 2차 레올로지 중간에 어떠한 외력도 가하지 않은 상태에서 측정을 수행하였다.

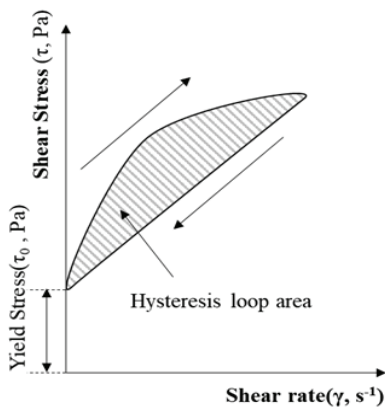


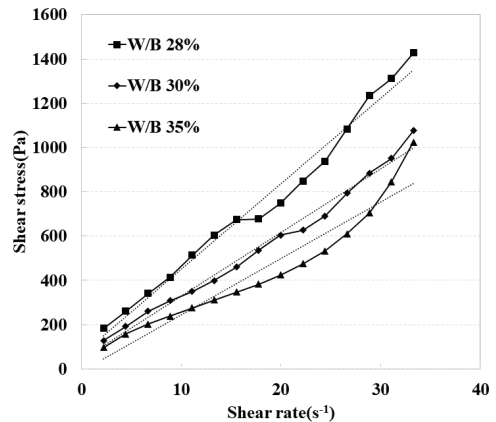
Fig. 3. Analysis model of rheology(Choi et al. 2014)

## 4. 레올로지 측정 결과

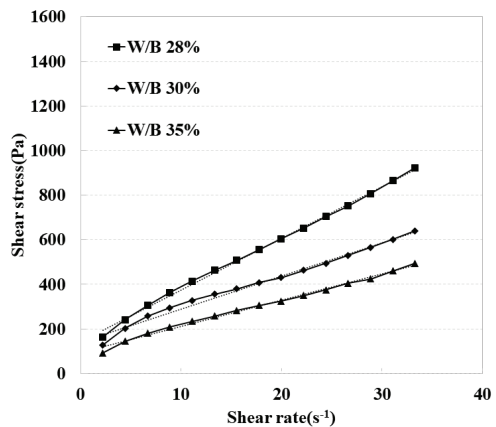
### 4.1 W/B에 따른 레올로지 변화

초기 설정한 4단계의 W/B 비율 중 W/B 28, 30, 35% 범위의 페이스트는 무리 없이 레올로지 측정이 가능했다. 페이스트를 이용하여 W/B에 대한 레올로지 특성을 측정한 결과 W/B 25%는 레오미터에서 측정할 수 있는 한계를 벗어난 레올로지 특성을 보여 정확한 측정을 할 수 없었다. 다른 배합들과 비교해 감수제 적용 없이는 충분한 유동성을 갖기 어려웠기 때문에 해석된다.

W/B 25%를 제외한 나머지 3수준의 배합에서는 W/B 증가에 따라 shear stress와 viscosity가 감소하는 것으로 평가됐다. Fig. 4에 볼 수 있듯이, 배합 30분이 지난 후 2차 레올로지를 측정했을 때는 shear rate에 따른 shear stress와 viscosity가 안정적으로 변화했음을 확인하였다. Viscosity는 시간 경과에 따라 W/B 28%는 약 40%, W/B 30%는 약 48%, W/B 35%는 약 53%가 감소하였다.



(a) Rheology properties after mixing



(b) Rheology properties after 30min from mixing

Fig. 4. Rheology properties with W/B ratio

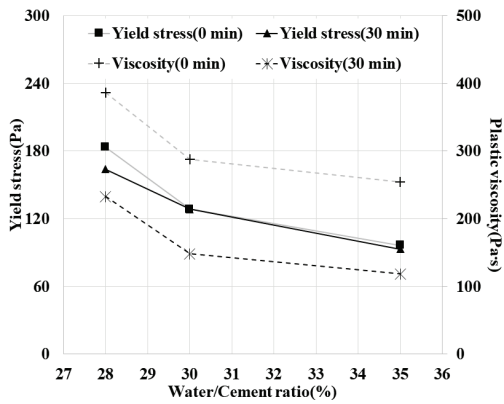


Fig. 5. Yield stress and plastic viscosity with W/B ratio

Fig. 4의 레올로지 측정결과는 Fig. 5와 같이 yield stress와 viscosity의 결과를 하나의 그래프로 표현하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이 yield stress는 시간에 따른 감소폭이 적었던 것과 비교해 viscosity는 상대적으로 큰 폭으로 감소했음을 한눈에 확인할 수 있었다.

#### 4.2 SP 혼입률에 따른 레올로지 변화

물-결합재 비에 따른 레올로지 특성 변화를 측정하면서 W/B 25%는 배합과 측정에 어려움이 있었으며, 28% 배합도 W/B 30%, W/B 35% 배합과 비교해 상대적으로 유동성이 부족했다. 압출 요구 성능에 맞춘 배합 검토를 위해 yield stress와 viscosity가 다른 배합에 비해 높은 28% 배합을 기준으로 고성능 감수제를 적용하였다. 고성능 감수제는 결합재 중량대비 0.1, 0.3, 0.5%를 적용하여 감수제를 적용하지 않은 배합과의 차이와 변화를 관찰하였다.

측정결과는 Fig. 6에 보이는 바와 같이, W/B 28% 배합에서 고성능 감수제 혼입률에 따른 레올로지 특성 평가 결과에서는 큰 특징을 발견하지 못했다. 0.3, 0.5% 적용 시 SP를 적용하지 않았을 때보다 yield stress가 소폭 감소하고, viscosity가 일정량 증가함을 확인하였다. 0.1%를 적용 시, 감수제를 적용하지 않은 배합보다 yield stress가 소폭 상승한 것을 확인하였으나, 이는 오히려 오차범위 이내의 작은 폭이라고 평가된다.

고성능감수제를 적용 시에도 시간에 따라서 yield stress와 viscosity는 일정량 감소했다. 고성능 감수제의 증가에 따른 yield stress의 감소와 viscosity의 증가는 기존연구(Bilgil, 2012)의 연구 결과와도 유사함을 확인할 수 있었다.

#### 4.3 Fly Ash 치환율에 따른 레올로지 변화

Fly Ash를 혼입한 배합은 배합 직후 yield stress 특성이 FA

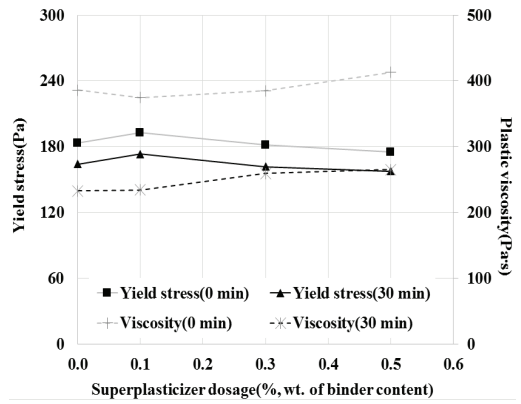


Fig. 6. Yield stress and plastic viscosity with SP dosage

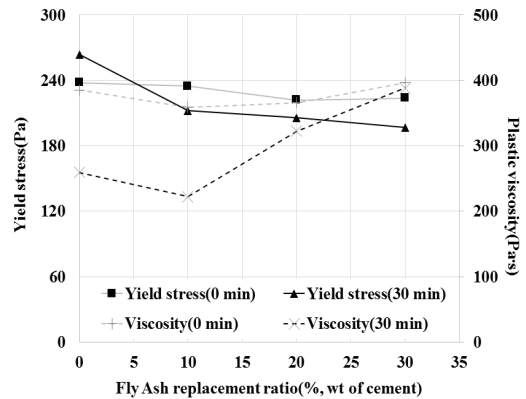


Fig. 7. Yield stress and plastic viscosity with FA replacement ratio

치환율과 무관하게 FA를 치환하지 않은 OPC 배합과 비교해서 크게 차이가 나지 않음을 확인할 수 있었다.

FA를 치환한 배합의 레올로지 측정 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 배합 직후 레올로지 측정과 배합 후 30분이 지난 레올로지 측정 결과에서 FA 10% 치환한 배합만이 OPC 배합과 비교해서 Viscosity가 감소하였으며, 20% 치환 시에는 OPC와 유사한 유변학적 거동을 보임을 확인할 수 있었다.

Viscosity는 시간 경과에 따라 OPC 배합은 약 32%, FA 10% 배합은 약 38%, FA 20% 배합은 약 30%가 감소한 반면, FA 30% 배합은 약 2% 정도만이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 FA 30% 치환 시, 시간이 경과됨에도 점도의 변동이 작았음을 의미하지만, 시간에 따른 점도의 변화보다 치환율에 의한 점도 증가가 3D 프린팅 공법에 있어 긍정적인 효과로 작용할 수 있다.

#### 4.4 Silica Fume 치환율에 따른 레올로지 변화

Silica fume 배합은 배합 직후 측정된 레올로지 결과에서도 상당히 안정적인 거동을 보였으며, Fig. 8에서와 같이 5~10%를 치

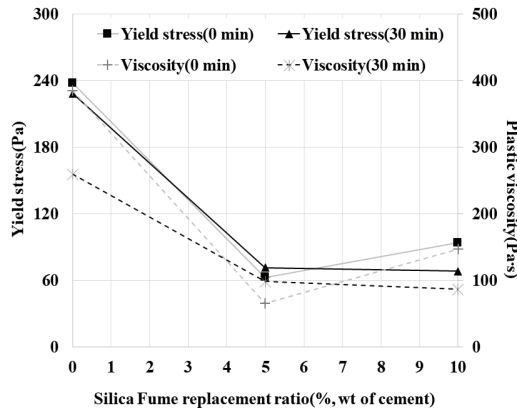


Fig. 8. Yield stress and plastic viscosity with SF replacement ratio

환한 결과 모두 OPC 합과 비교해 shear stress와 viscosity가 상당히 감소함을 확인하였다.

본 평가에서는 SF의 치환율에 따라 시공성이 향상되며 점도가 저하되는 것으로 특성 평가 결과가 나타났다. 특히 실리카흄은 5%만 적용해도 소성점도가 OPC 배합과 비교해서 약 83%가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 10%를 치환한 배합에도 OPC 배합과 비교해 약 62%가 감소됨을 검토하였다.

#### 4.5 모르타르 레올로지 변화

모르타르를 이용한 레올로지 변화에서는 두 가지 큰 실험변수 (W/B, sand ratio)를 갖고 실험을 실시하였다.

모르타르를 활용한 W/B변화에 따른 레올로지 측정 결과는 Fig. 9에서 보이듯이, W/B가 증가함에 따라 yield stress, viscosity가 모두 감소하였으나 40~50% 구간에서 일시적으로 viscosity가 소폭 증가하였다. 이는 yield stress의 결과 및 배합 직후의 viscosity와 비교하여 상대적으로 미소하며, 다른 결과 또한 큰 변화가 없었으므로 40~50% 구간에서 큰 차이가 없었다고 평가하는 것이 옳을 것으로 판단된다.

동일한 W/B에서 sand ratio를 변화시킨 배합은 sand 비가 40%, 50%일 때는 거의 유사한 거동을 보이는 것이 그래프상에서 가시적으로 표현되나, sand 비율을 60%까지 증가시키면 shear stress가 약 2배 이상 증가되는 것으로 나타났다. 이는 기존 해외 연구(Le et al. 2012) 결과에서 sand 비율을 55% 수준으로 설정한 근거로, 그 이유로는 3D 프린팅 공법 적용을 위한 yield stress 범위가 300~900Pa 범위로 제안되어 있는데 골재비율이 50%에서 60%로 증가됨에 따라 shear stress가 충분히 상기 범위 안에 포함될 수 있기 때문이다.

실험결과에 따르면 Sand 비율이 50%에서 60%로 증가되는 구

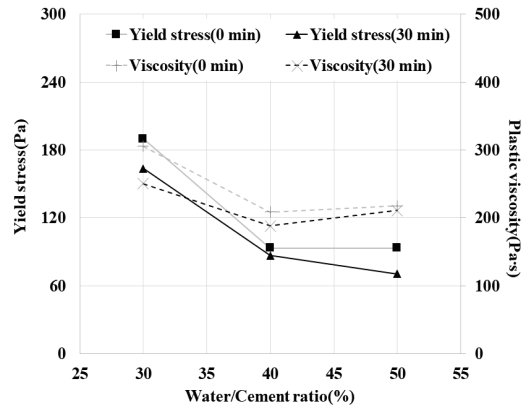


Fig. 9. Yield stress and plastic viscosity with W/B ratio (mortar, sand/ total weight=50%)

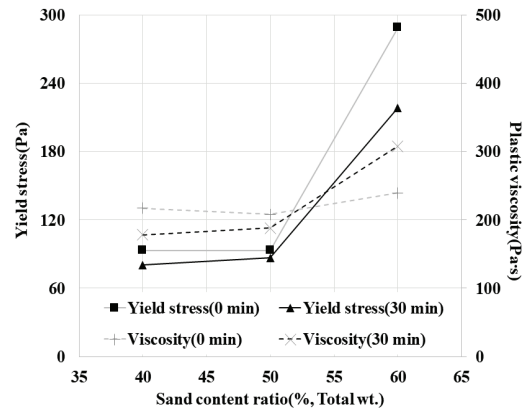


Fig. 10. Yield stress and plastic viscosity with W/B ratio (mortar, W/B=40%)

간에 shear stress가 급격하게 증가되는 threshold 구간이 존재하는 것으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

또한 sand 비율을 50%로 고정시킨 상태에서 W/B를 조정하여 실험한 결과는 Fig. 10에 그래프로 나타냈는데, W/B가 40%, 50%일 때는 거의 유사한 결과를 보였으나 W/B가 30%로 감소됨에 따라 yield stress가 두 값에 비해 거의 2배 가까이 증가했으며, viscosity가 증가되는 것으로 평가된다.

이는 앞서 sand 비에 따른 레올로지 변화와 마찬가지로 W/B 30%와 40% 사이에서 임계치가 존재하는 것으로 판단된다.

#### 4.6 실험인자별 레올로지 변화

본 연구에 평가했던 모든 인자에 따른 레올로지 특성변화를 Fig. 11에 나타냈다. 본 연구에서 평가한 배합은 모두 3D 프린터용으로 압출이 가능한 영역인 yield stress 300Pa 이상, viscosity 300Pa·s 이상 구간을 모두 만족하지 못했다. 그러나 Fig. 11에서

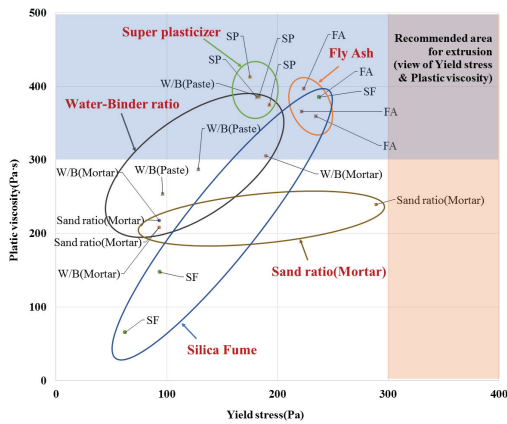


Fig. 11. Yield stress and plastic viscosity distribution

볼 수 있듯이 3D 프린팅용 소재로의 개발을 위해 레올로지 특성을 변화할 경우 W/B, sand ratio를 레올로지 특성 변화의 중요한 지배 인자로 활용할 수 있는 것을 확인하였다. 또한, 결합재 중 SF는 소량으로도 레올로지 특성을 크게 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 3D 프린팅 공법 적용의 특수성을 고려하여 콘크리트의 유동특성, 레올로지 특성을 제어하기 위해 페이스트와 모르타르를 이용한 레올로지 특성분석을 실시하였다.

W/B, 결합재 종류와 치환율, 고성능 감수제 혼입률에 따른 페이스트의 레올로지 특성 분석을 실시하였다. 또한 모르타르를 이용해 골재 적용에 따른 레올로지 특성 변화에 대한 분석도 함께 실시하였다. 상기 실험을 통해 본 연구에서 분석한 결과를 다음과 같이 요약하였다.

1. W/B의 증가는 yield stress와 viscosity를 감소시킨다. 페이스트와 모르타르 시험결과를 종합하여 검토했을 때, 특히 W/B 40~50% 적용구간에 레올로지 특성을 크게 변화시키는 threshold 구간이 존재하는 것으로 판단된다.
2. FA 치환은 치환율이 증가함에 따라 yield stress는 감소하고 viscosity는 증가하는데 이러한 경향은 기존연구(Kosmas et al. 2017)의 결과와도 유사함을 확인하였다.
3. SF는 5%만 치환해도 Shear Stress를 절반 이상 감소시키며 Viscosity를 약 83% 감소시켜 배합 유동성 증진에 큰 효과를 가져왔다.
4. 모르타르 레올로지 결과에서 W/B 40%로 고정 시 Sand 비율이 50~60% 구간에서 큰 폭의 Shear Stress 증가가 이루어졌다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업 연구비지원(17AUDP-B121595-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

- Alwi, A., Gardner, M., Karayiannis, S., Reodique, K., Starkey, B., Varley, T. (2013). MegaScale 3D Printing – Group 1 Final Report, 158–159.
- Andraž, H., Franci, K., Violeta, B. (2013). Rheological parameters of fresh concrete – comparison of rheometers, *Gradevinar*, **65**, 99–109.
- Behrokh, K. (2004). Houses of the Future Construction by Contour Crafting Building Houses for Everyone, *Urban Policy Brief*, 1–5.
- Bilgil, A. (2012). Estimation of slump value and bingham parameters of fresh concrete mixture composition with artificial neural network modelling, *Scientific Research and Essays*, **5(8)**, 1753–1765.
- Choi, Y.W., Choi, B.K., Park, M.S., Sung, D. (2014). A study on the rheology properties for development of sprayed high performance fiber reinforced cementitious composites for protection and blast resistant, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **2(3)**, 188–195 [in Korean].
- Kwon, S.H., Kim, Y.J., Lee, G.C., Choi, Y.W. (2013). Measurements and applications of concrete, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **25(3)**, 24–28 [in Korean].
- Kosmas, S., Harald, J., Marios, S., Tongbo, S. (2017). Fly Ash, Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials, Report No. 238–SCM, 65.
- Lee, H., Kim, W.W., Moon, J.H. (2017). “An experimental study of mortar rheology for 3D printing extruder,” *Proceedings of the Korea Concrete Institute, Korea*, **29(2)** [in Korean].
- Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A., Gibb, A.G.F., Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, *Materials and Structures*, **45**, 221–232.
- Manawadu, A.K., Wijesinghe, W.M.K.B., Abeyruwan, H. (2015). “Rheological behaviour of cement paste with fly ash in the formulation of self-compacting concrete (SCC),” *Proceedings*



of 6th International Conference on Structural Engineering and Construction Management, 192–199.  
Oh, J., Oh, J.S., Jung, H.Y. (2014). Applicability to the construction of 3D printing technology, The Magazine of the

Korean Society of Civil Engineers, **82(9)**, 38–45 [in Korean].  
Wolfs, R.J.M.(Rob) (2015). 3D Printing of Concrete Structures, Master's Thesis, TU Eindhoven.

### 3D 프린팅 공법 적용을 위한 모르타르 구성성분 변화에 따른 레올로지 특성 연구

본 연구에서는 3D 프린팅 공법 적용을 위한 콘크리트 기초 레올로지 분석을 목적으로 실험을 수행하였다. 콘크리트 구성성분 중 유동특성에 큰 영향을 미치는 인자(W/B, binder Type, replacement ratio, super plasticizer dosage)의 변화에 의한 레올로지 특성(rheological properties)을 실험적으로 분석하였다. 실험은 페이스트와 모르타르 크게 두 가지 인자로 구분하여 수행하였다. 페이스트 실험에서는 W/B, binder type, replacement ratio, super plasticizer dosage를 주요 변수로 설정하여 레올로지를 분석했다. 모르타르 실험에서는 W/B와 sand ratio에 따른 레올로지 특성을 분석했다. 결과적으로 W/B가 증가될수록 viscosity가 감소하였으며, FA를 치환할 FA 비율이 증가됨과 함께 viscosity가 증가하였다. 유동성 증가를 위해서는 SF를 5%만 치환해도 shear stress를 감소시키며 viscosity는 약 83%까지 감소되었다. 모르타르 레올로지 평가를 통해 W/B 30~40% 구간에서 큰 폭의 변화가 일어나는 임계치 구간이 존재하는 것으로 분석됐다. 또한 동일 W/B 내에서는 sand 비가 50~60% 구간에서 shear stress가 두 배 이상 증가하는 임계 구간이 존재하는 것으로 분석됐다.