

## 굳지 않은 모르타르의 채널 플로와 레올로지 특성의 상관관계

신태용<sup>1</sup>, 이진현<sup>1</sup>, 김재홍<sup>1</sup>, 김명규<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>울산과학기술원 도시환경공학부, <sup>2</sup>경남과학기술대학교 기계공학과

### Correlation between Channel-Flow Test Results and Rheological Properties of Freshly Mixed Mortar

Tae Yong Shin<sup>1</sup>, Jin Hyun Lee<sup>1</sup>, Jae Hong Kim<sup>1</sup>, Myeong Kyu Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Urban and Environmental Engineering, UNIST

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology

**요약** 모르타르를 포함한 건설재료의 작업성은 시공 품질을 결정짓는 중요한 요소 중 하나이다. 콘크리트 등 건설재료의 작업성을 정량적으로 표현할 수 있는 레올로지 특성은 상용화된 레오미터를 통해 측정할 수 있지만, 경제적 또는 공간적 제약으로 인해 실제 시공현장에서의 사용에는 한계가 있다. 많은 건설현장에서는 콘크리트 또는 모르타르의 작업성을 평가하기 위해 슬럼프 플로 시험 등을 통해 정성적으로 재료의 시공성을 평가하고 있다. 이 논문에서는 시공현장에서 간편하게 모르타르의 레올로지 특성을 측정할 수 있는 채널 플로 시험과 레올로지 특성과의 상관관계식을 제안하고자 한다. 이를 위해서 VOF기법을 이용한 유동 해석을 진행하였으며, 유동 시뮬레이션 결과를 로그함수 모델로 일반화하여 채널 플로 길이와 정지시간을 데이터베이스화 하였다. 수립된 데이터베이스를 기준으로 최소 자승법을 이용한 회귀분석을 진행하였고, 결과적으로 6개의 매개변수로 구성된 모르타르의 채널 플로 시험 결과와 레올로지 특성의 상관관계식을 도출하였다. 또한, 상용 레오미터로 측정된 레올로지 특성과 채널 플로 실험결과로부터 예측된 레올로지 특성을 비교검증 함으로써 제안된 상관관계식의 현장적용 가능성을 확인하였다.

**Abstract** The workability of mortar determines its construction performance in a structure showing its designed resistance to external loads. Measuring the rheological properties of mortar is one way of quantifying its workability, but its field-applications are limited due to economical and spatial issues. The robustness of the slump flow test allows its use for evaluating the workability of mortar, even though it is a rather qualitative test method. This paper proposes a channel flow test and develops a correlation between its result and the rheological properties of mortar. The volume-of-fluid simulation for the channel flow test was accomplished, and a numerical database for the correlation was composed. A correlation model to estimate the rheological properties of mortar using the results of the channel flow test as inputs is proposed.

**Keywords** : Concrete, Flow Simulation, Rheology, Slump Flow, Workability

### 1. 서론

모르타르는 물, 시멘트, 잔 골재를 배합하여 생산하는 건설재료의 종류로, 긴장재 쉬스관 충전, 교차 받침 부

타설 등 응력집중이 발생할 수 있는 부분에 주로 사용되고 있다. 또한, 최근 개발된 초고성능 콘크리트(Ultra-high Performance Concrete, UHPC) 등에서는 섬유보강된 형태의 모르타르로 최고 180 MPa까지 배합 설계되

이 논문은 2014년도 경남과학기술대학교 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

\*Corresponding Author : Myeong Kyu Kim(Gyeongnam National University of Science and Technology)

Tel: +82-55-751-3314 email: mgkim@gntech.ac.kr

Received June 17, 2016

Revised July 6, 2016

Accepted July 7, 2016

Published July 31, 2016

고 있다. 이러한 모르타르 형식의 건설재료는 집중응력이 발생할 수 있는 구조 부재에 적용되므로, 일반 콘크리트 부재에 비해 더욱 높은 시공품질을 요구한다. 그럼에도 불구하고 모르타르에 대한 현장에서의 작업성 평가는 슬럼프 시험 등 정성적인 방법에 의존하고 있다. 특히 KS L 5105 규격에서는, 모르타르의 작업성을 플로 테이블 시험으로 평가하도록 제시하고 있으나, 이는 유동성이 낮은 배합에만 적용 가능하다.

한편 최근 건설재료의 시공성능에 대한 연구가 활발히 이루어지면서, 콘크리트의 레올로지 특성에 대한 측정 기술이 발전하고 있다. 굳지 않은 모르타르의 레올로지 특성도 레오미터를 이용하여 비교적 정확하게 측정할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 하지만 레올로지 실험장비가 고가이고 휴대성이 떨어져 실제현장에서 활용하기에는 여전히 어려움이 많다. 따라서 시공현장에서 간편하게 모르타르의 레올로지 특성을 추정할 수 있는 현장 시험기를 개발하기 위한 연구가 다양하게 시도되고 있다[1-5].

본 연구에서는 고유동 모르타르의 채널 플로 시험을 제안하고, 이에 대한 해석적인 분석을 통해 정량적인 레올로지 특성 추정식을 도출하고자 한다. 해석적인 분석은 VoF(Volume-of-Fluid)기법을 이용하여 채널 플로 과정을 시뮬레이션하였다. 모르타르의 채널 플로-유동은 로그함수 모델로 일반화하여 채널 플로 시험결과에 대한 데이터베이스를 수립하였다. 이러한 데이터베이스를 기반으로 회귀분석을 통해 빙햄유체(Bingham Fluid)로 가정한 모르타르의 항복응력(Yield Stress)과 소성점도(Plastic Viscosity)를 추정할 수 있는 상관관계식을 도출하였다.

## 2. 본론

### 2.1 채널 플로 시험의 규격화

콘크리트의 유동성 측정을 위해 주로 사용하는 슬럼프 플로 시험(KS F 2594, ASTM C 1611)의 경우, 상단 지름 100 mm, 하단 지름 200 mm, 높이 300 mm의 원기둥 형태 샘플이 퍼져나가는 지름을 측정한다. 샘플의 부피는 약 5.5 L로 일반적인 굵은 골재 최대 치수 20 mm의 콘크리트 배합을 시험한다. 그에 반해 모르타르의 경우 굵은 골재를 사용하지 않으므로, 골재 최대 치수는 5 mm로 줄어든다. 따라서 동일한 시험의 신뢰성을 확보

하면서, 시험 샘플의 부피를 줄일 수 있다. 채널 플로 시험은 그라우트 유동성 시험법인 EN 13395-2 규격에 착안하여, 자중에 의한 층류를 유도하도록 설계되었다.

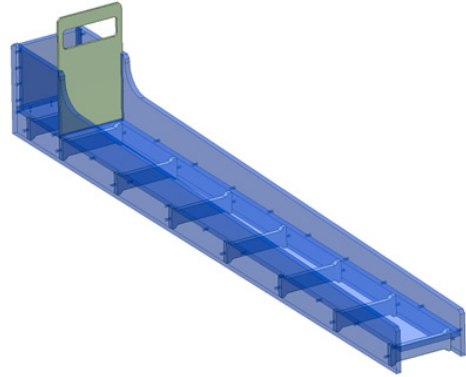


Fig. 1. Channel flow apparatus

최적화된 채널 플로 시험기는 Fig. 1과 같이, 너비와 높이가 100 mm이고 길이가 800 mm 개수로 형태이다. 한쪽 면에 위치한 가로, 세로, 높이가 모두 100 mm인 몰드에 모르타르 재료를 채운 후(사용된 샘플 부피 1 L), 게이트를 개방하여 자중에 의한 모르타르의 흐름을 유도하는 실험이다. 시험 시 측정값은 모르타르의 흐름이 멈출 때까지 흘러간 길이( $C_f$ )와 흐름의 정지시간( $T_f$ )이다.

### 2.2 채널 플로 시뮬레이션

#### 2.2.1 레올로지 시뮬레이션 기법

채널 플로-유동 데이터베이스 수립을 위한 채널 플로의 시뮬레이션은 VoF기법을 이용하여 진행하였다[7]. 연속방정식과 운동방정식을 지배방정식으로 하는 비압축성 유체의 거동은 다음과 같은 Navier-Stokes 방정식으로 속도장( $v$ )을 구성한다.

$$-\frac{1}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{v} + g = \frac{Dv}{Dt} \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 재료의 밀도,  $\mu$ 는 재료의 점도, 그리고  $g$ 는 중력가속도를 의미한다.

속도장에 대한 방정식과 함께 각 요소에 대한 재료부피분율( $C$ )은 아래의 이류방정식(Advection Equation)을 만족한다. 재료부피분율은 유체의 각 요소에 대한 점유

율에 관한 변수로서,  $C=1.0$ 인 경우는 유체가 요소크기에 해당하는 공간을 완벽히 채우고 있음을 의미하고, 반대로  $C=0.0$ 인 경우에는 유체가 요소 공간 내에 존재하지 않음을 의미한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = 0 \quad (2)$$

재료부피분율의 계산값이 특정 임계값보다 클 때, 유체가 공간을 채운다고 가정하여 단일유체의 경계면을 예측할 수 있다. 본 연구에서는 일반적으로 적용되는  $C=0.5$ 를 임계값으로 설정하였다[7].

두 지배방정식의 해는 유한요소법, 즉 오일러리안 요소 내 속도장과 재료부피분율이 두 미분방정식으로 표현되도록 가중잔여법(Weighted Residual Method)을 이용하여 구할 수 있다.

### 2.2.2 시뮬레이션 설계

채널 플로 시뮬레이션을 위한 모델링은 실제 시험기 크기와 동일하나 효율적 해석을 위해 1/2 대칭모형으로 모델링하였으며, 모델 상부는 개방하고 하부와 양 측면을 전단구속하여 경계조건을 설정하였다. 요소의 크기는 해석시간을 최소화 하면서 비교적 정확한 값을 얻을 수 있는 10 mm로 설정하였고, 사용된 요소의 총 개수는 2,700개 이다[8]. 총 해석시간(Step Time)은 65 sec이고 시간 증분(Time Increment)는 0.1 sec로 설정하였다. 즉, 초당 10 프레임씩 총 650 프레임의 채널 플로에서의 유체의 거동을 해석하였다. 참고로, 채널 플로 시뮬레이션의 계산 시간은 4 thread Intel Core i5-4670 3.4GHz CPU를 사용했을 때 한 샘플 당 16 h였다.

시뮬레이션을 위한 주요한 입력변수는 유체의 항복응력과 소성점도, 그리고 유체의 밀도이다. 유체의 밀도는 일반적인 모르타르의 밀도인  $2,200 \text{ kg/m}^3$ 로 동일하게 가정하였으며, 또한 모르타르를 빙햄모델(Bingham Model)로 가정하여 항복응력과 소성점도를 입력하였다.

### 2.2.3 흐름곡선의 매개변수화

시뮬레이션 결과 Fig. 2와 같은 모르타르의 유동을 확인할 수 있다. 흐름곡선을 시간에 따른 모르타르 하단부의 길이로 정의하면, 모델 상의 최하단 요소의 재료부피분율이 0.5이상인 연속된 요소들의 길이로 결정된다. 예

를 들어 항복응력 15 Pa, 소성점도 30 Pa·s의 레올로지 특성을 갖는 모르타르의 흐름곡선은 Fig. 3과 같다.

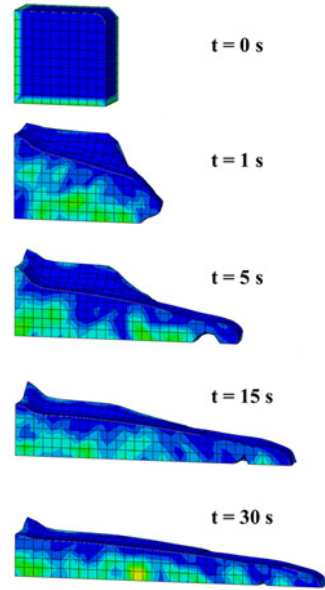


Fig. 2. Example of channel flow simulation

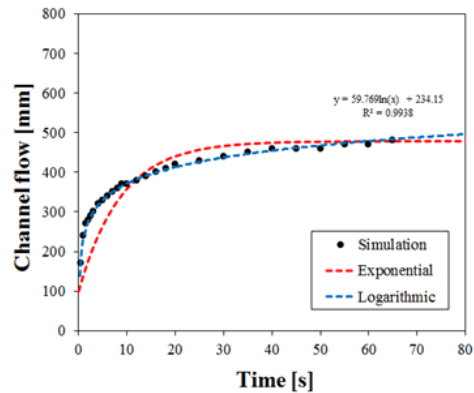


Fig. 3. Spread curve of channel flow simulation

시간에 따른 흐름곡선에 대한 데이터베이스를 구성하기 위해 지수함수(Exponential Function) 또는 로그함수(Logarithmic Function)를 이용하여 매개변수화를 시도하였다[9]. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이, 식 (3)과 같은 형태의 로그함수가 대부분의 흐름곡선에 대해 결정계수(Coefficient of Determination) 0.95이상으로 곡선맞춤이 가능하였다. 곡선맞춤 결과 각 흐름곡선  $C(t)$ 에 대한

여 스프레드의 크기와 관련된  $\alpha$ , 흐름의 감쇠와 관련된  $\beta$  값을 구할 수 있다.

$$C(t) = \alpha + \beta \ln(t) \quad (3)$$

흐름의 정지는 실험적으로 확인된 정지속도(Cut-off Velocity,  $V_f$ )를 1 mm/s로 설정하여[9] 판단하였다. 따라서 흐름의 정지 시간과 흘러간 길이인 채널 플로는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_f = \beta / V_f \quad (4)$$

$$C_f = \alpha + \beta \ln(T_f) \quad (5)$$

최종적으로 모르타르의 채널 플로 시뮬레이션은 항복 응력 0-60 Pa, 소성점도 1-100 Pa·s 범위에서 총 48 종류의 레올로지 특성에 대해 진행하였다. 각 시뮬레이션 샘플에서 획득한 흐름곡선을 식 (3)으로 매개변수화하여, 흐름의 정지 시간과 채널 플로를 데이터베이스화 하였다.

### 2.3 회귀분석

일반적으로 콘크리트의 슬럼프 플로(흐름의 최종 길이)는 재료의 항복응력과, 흐름의 정지 시간은 소성점도와 관련이 있다고 알려져 있다[10-11]. 이러한 상관관계는 채널 플로 시험에 대해서도 유효하였으며, 정량적인 분석을 위해 Fig. 4에 레올로지 특성과 채널 플로 시뮬레이션 결과를 비교하여 도시하였다.

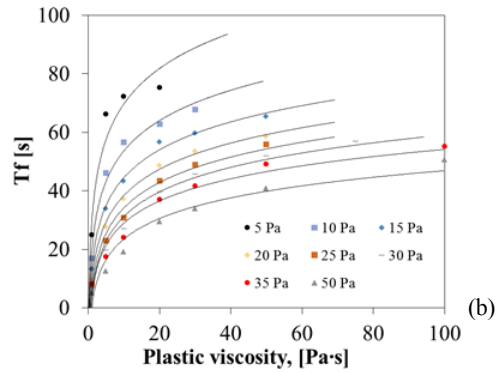
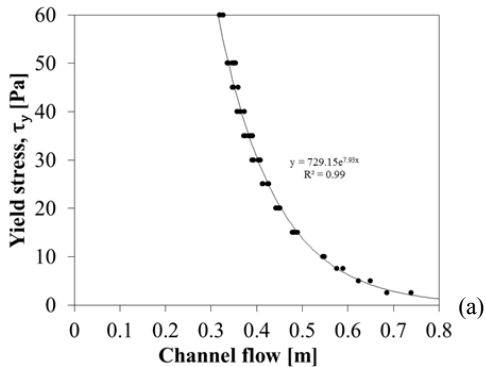


Fig. 4. Correlations with the flow parameters (a)Yield stress (b)Plastic viscosity

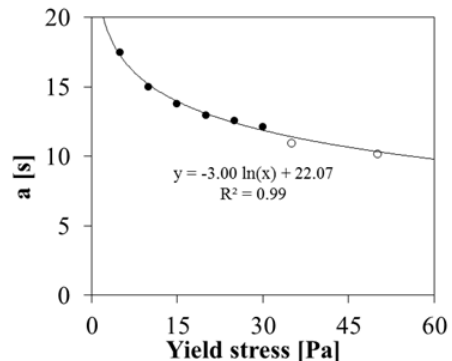
결과적으로 샘플의 항복응력은 흐름의 정지시간과 상관없이 오직 채널 플로( $C_f$ )만으로 결정된다(Fig. 4(a) 참조):

$$\tau_y = k_1 \exp(-C_f/k_2) \quad (6)$$

여기서 채널 플로( $C_f$ )는 mm, 항복응력( $\tau_y$ )은 Pa 단위이므로, 회귀분석으로 결정되는  $k_1$ 과  $k_2$ 의 단위는 각각 Pa와 mm가 된다. 결정된 회귀분석상수는 Table 1에 기입하였다. 또한, 소성점도의 경우에는 다음의 지수함수로 추정할 수 있다:

$$\eta_p = \exp\left(\frac{T_f - b}{a}\right) \quad (7)$$

여기서 채널 플로의 정지시간( $T_f$ )는 s, 소성점도( $\eta_p$ )는 Pa·s 단위이다. 항복응력에 따른 매개변수  $a$ 와  $b$ 는 Fig. 5와 같은 모델함수로 결정된다.



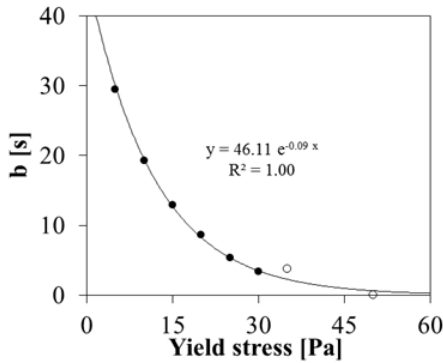


Fig. 5. Regression analyses for ‘a’ and ‘b’

$$a = -k_3 \ln(\tau_y / k_4) \tag{8}$$

$$b = k_5 \exp(-\tau_y / k_6) \tag{9}$$

비교적 큰 항복응력( $\tau_y \geq 35 Pa$ )에서 발생하는 약간의 오차를 제외하면, 매개변수함수  $a$ 와  $b$ 는 결정계수가 0.99이상으로 우수한 곡선맞춤이 진행되었다.

결과적으로, 채널 플로 시뮬레이션 데이터베이스에 대한 회귀분석으로 결정되는 6개의 상수를 정리하면 Table 1과 같다. 즉, 식 (6)과 (7)을 이용하면 채널 플로 시험결과로부터 굳지 않은 모르타르의 레올로지 특성을 결정할 수 있다.

Table 1. Coefficients for the correlating model

$k_1$ (Pa)	$k_2$ (mm)	$k_3$ (s)	$k_4$ (Pa)	$k_5$ (s)	$k_6$ (Pa)
729	126	3.0	1568	46.1	11.6

## 2.4 검증실험

### 2.4.1 모르타르 샘플

제안된 상관관계식의 실험적 검증을 위해 다양한 유동성을 보이는 모르타르 샘플을 준비하였다. 모르타르 샘플은 물, 시멘트, 모래의 배합비를 질량 비 0.35:1:1.5로 제조하였으며, 유동성은 폴리카보산계 고성능 감수제를 시멘트 질량 대비 0.10%~0.16%를 사용하여 제어하였다. 사용한 시멘트의 종류는 1종 포틀랜드 시멘트이며, 모래는 시멘트 강도 측정 용 표준사를 사용하였다.

고성능 감수제의 사용량과 측정 시간을 적절히 조절하여, Table 2와 같이 총 14개 샘플의 채널 플로와 정지 시간을 측정하였다.

Table 2. Rheological properties and flow parameters

Label	$C_f$ [m]	$T_f$ [s]	$\tau_{y, meas}$ [Pa]	$\eta_{p, meas}$ [Pa·s]
A000	635	71	68.84	1.41
A020	635	71	51.89	1.63
A040	615	75	54.72	1.78
A060	555	68	65.66	1.78
A080	550	69	81.90	1.65
A100	515	55	85.07	1.76
A120	450	40	86.84	1.74
B000	645	62	82.25	1.23
B020	475	38	92.13	1.52
B040	430	28	110.5	1.59
B060	430	27	123.9	1.61
B080	420	29	162.0	1.65
B100	370	23	184.6	1.65
B120	350	20	216.0	1.52

또한, 실내 실험실에서 사용 가능한 모르타르용 레오미터를 사용하여 샘플의 레올로지 특성을 측정하였다. 사용된 레오미터는 회전형 레오미터로 내부 용기의 내경은 74 mm이고, 회전을 전달하는 베인의 직경은 50 mm이다. 용기 내에 샘플을 약 130 mm 높이까지 채워 측정을 하므로, 측정에 사용되는 샘플의 부피는 0.56 L이다. 토크-회전속도 관계를 측정된 후 Reiner-Riwlin 식을 이용하여 샘플의 항복응력과 소성점을 계산하였다. 모르타르용 레오미터를 이용한 측정방법과 레올로지 특성 계산 과정은 사전 연구[12]를 참고하고, 그 결과를 정리하면, Table 2와 같다.

### 2.4.2 검증 고찰

이 실험에 사용된 레오미터 뿐만 아니라, 모든 건설재료용 레오미터는 넓은 간격(Wide-Gap) 레오미터로 회전시 발생하는 전단변형률속도장을 선형으로 가정할 수 없다. 또한 골재 최대 치수를 고려하면, 전단변형률속도장 내에서의 균질성 가정이 국부적으로 위배되므로, 측정된 레올로지 특성에 대한 상대적인 비교는 가능하지만 정확한 재료상수의 결정은 어렵다. 즉, 레오미터로 측정된 항복응력과 소성점도는 시험 장치에 따라 이론적인 값과 다른 편향된 결과를 보인다. 이 논문에서 사용된 레오미터의 측정 편향성을 보정하기 위해서, 제안된 상관관계식으로부터 추정된 항복응력(식 6)과 소성점도(식 7)와 비교하여 Fig. 6에 도시하였다.

비교 그래프 Fig. 6(a)를 통해, 이 논문에서 제안한 항복응력 예측식과 레오미터를 이용한 측정식은 결정계수 0.9 이상으로 유사한 경향성을 가짐을 확인할 수 있다.

만약 다른 형태의 모르타르용 레오미터를 사용한다면, 이 경향성은 달라진다. 즉, 앞서 설명한 바와 같이 레오미터를 이용하여 측정된 항복응력은 상대적인 비교는 가능하지만, 이론적인 재료상수로 볼 수는 없다. 또한, 소성점도의 경우에는 항복응력에 비해 다소 산포가 증가하였지만, 실험오차 등에서 기인한 이상점(Outlier)을 제거하면 여전히 경향성을 확인할 수 있다. 결과적으로, 사용된 레오미터의 측정값에 대한 보정식은 다음과 같다.

$$\tau_{y,est} = 0.249\tau_{y,meas} - 8.48 \quad (10)$$

$$\eta_{p,est} = 6.18\eta_{p,meas} - 7.84 \quad (11)$$

여기서  $\tau_{y,meas}$ 와  $\eta_{p,meas}$ 는 레오미터를 이용해 측정된 항복응력과 소성점도이고,  $\tau_{y,est}$ 와  $\eta_{p,est}$ 는 채널 플로 시험결과로부터 예측된 항복응력과 소성점도이다.

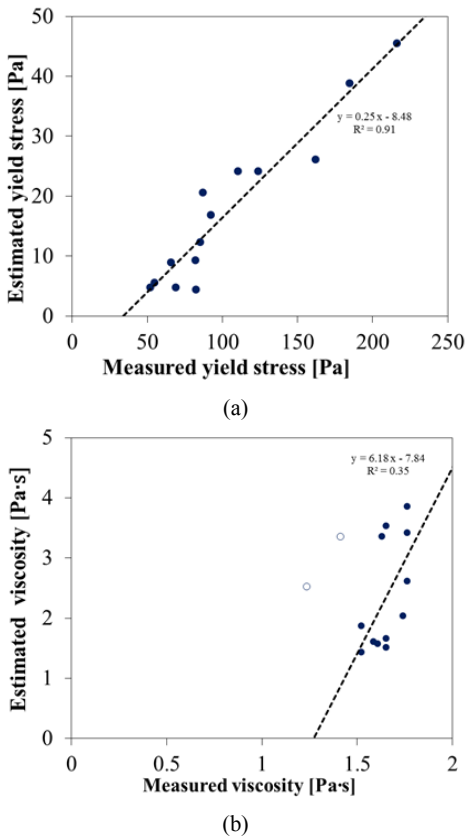


Fig. 6. Measurement-Estimation relationship  
(a)Yield stress (b)Plastic viscosity

레오미터 측정값을 재료상수로 보정한 항복응력, 소

성점도와 채널 플로 시험결과의 상관관계는 Fig. 7과 같이 나타난다. 항복응력에 대한 예측식은 비교적 일관된데 반해, 소성점도의 경우 오차가 다소 발생하였다. 이러한 오차의 원인으로는 사용된 레오미터의 특성에서 기인한다. 일반적으로, 콘크리트나 모르타르의 유동성 실험에서 흐름의 정지 시간과 소성점도는 비례관계를 가지는 것으로 알려져 있는데, Table 2에 나열된 실험결과는 상관관계가 다소 떨어진다. 흐름의 정지 시간( $T_f$ )이 20 s에서 71 s로 변화하는 동안, 소성점도는 1.23-1.78 Pa·s 사이의 값으로 상대적으로 작은 변화로 측정되었다. 사용된 모르타르용 레오미터는, 특히 시험된 모르타르 샘플의 레올로지 특성 범위에서, 소성점도 측정의 민감도 한계를 갖는 것으로 판단된다.

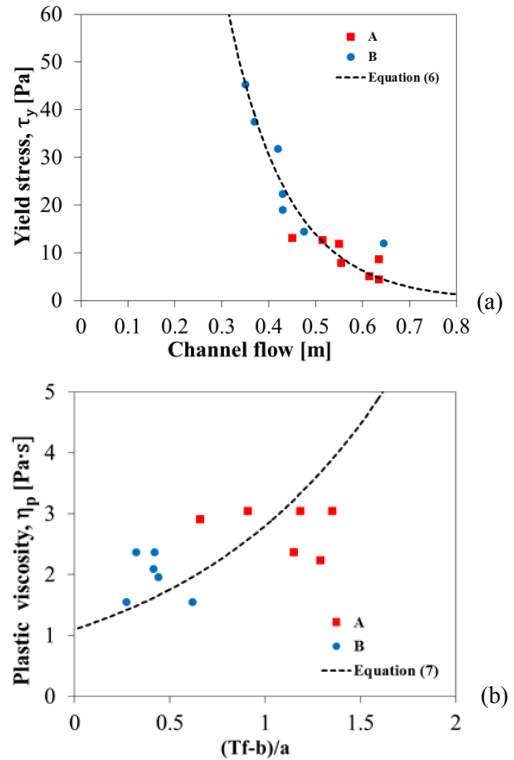


Fig. 7. Comparison of experiments to prediction  
(a)Yield stress (b)Plastic viscosity

### 3. 결론

채널 플로 시험은 현장에서 모르타르의 유동성을 간편하게 측정할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는, 채널

플로 시험에 대한 VoF 시뮬레이션을 통해 시험 결과와 재료의 레올로지 특성의 상관관계식을 도출하였다. 이 예측식을 이용하면, 채널 플로 시험으로 측정되는 흐름 길이와 정지 시간으로부터 모르타르의 항복응력과 소성 점도를 계산할 수 있다. 제안된 상관관계를 통해 확인한 결과는 다음과 같다.

- (1) 모르타르의 항복응력은 채널 플로 흐름 길이와 지수함수의 관계를 가지며 정지 시간과는 무관하다.
- (2) 소성점도의 경우에는 채널 플로 흐름 길이와 정지 시간에 모두 영향을 받고, 대체적으로 정지 시간에 따라 증가한다.
- (3) 다양한 모르타르 샘플의 채널 플로 시험 결과와 상용 레오미터로 측정한 결과를 비교한 결과, 상용 레오미터로 측정한 항복응력과 소성점도는 이론값과 편향된 결과를 보였다.

## References

- [1] L. Brower, C. Ferraris, "Comparison of Concrete Rheometers", *Concrete International*, Vol. 25(8), pp. 41-47, 2003.
- [2] A. Gram, J. Silfverbrand, "Obtaining Rheological Parameters from Flow Test - Analytical, Computational and Lab Test Approach", *Cement and Concrete Research*, Vol. 63, pp. 29-34, 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.03.012>
- [3] N. Roussel, "The LCPC BOX: A Cheap and Simple Technique for Yield Stress Measurements of SCC", *Materials and Structures*, Vol. 40(9), pp. 889-896, 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-007-9230-4>
- [4] N. Roussel, "Correlation between Yield Stress and Slump: Comparison between Numerical Simulations and Concrete Rheometers Results", *Materials and Structures*, Vol. 39, pp. 501-509, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-005-9035-2>
- [5] A. Saak, H. Jennings, S. Shah, "A Generalized Approach for The Determination of Yield Stress by Slump and Slump Flow", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34(3), pp. 363-371, 2004.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.005>
- [6] British Standards, "Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures- Test Methods - Determination of Workability. Test for Flow of Grout or Mortar", BS EN 13395-2. 2002.
- [7] C. Hirt, B. Nichols, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics Free Boundaries", *Journal of Computational Physics*, Vol. 39(1), pp. 201-225, 1981.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- [8] J. H. Kim, H. R. Jang, H. J. Yim, "Sensitivity and Accuracy for Rheological Simulation of Cement-based Materials", *Computers and Concrete*, Vol. 15(6), pp. 903-919, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2015.15.6.903>
- [9] N. Tregger, L. Ferrara, S. Shah, "Identifying Viscosity of Cement Paste from Mini-slump-flow Test", *ACI Materials Journal*, Vol. 105(6), pp. 558-566, 2008.
- [10] L. Schwatzentruber, R. Le Roy, J. Cordin, "Rheological Behaviour of Fresh Cement Pastes Formulated from a Self Compacting Concrete (SCC)", *Cement and Concrete Research*, Vol. 36(7), pp. 1203-1213, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.036>
- [11] J. Murata, H. Kikukawa, "Viscosity Equation for Fresh Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 89(3), pp. 230-237, 1992.
- [12] J. H. Lee, J. H. Kim, M. K. Kim, "Fine Aggregates Size Effect on Rheological Behavior of Mortar", *Journal of the Korea Academia- Industrial*, Vol. 16(8), pp. 5636-5645, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.8.5636>

신 태 용(Tae Yong Shin)

[정회원]



- 2016년 2월 : 울산과학기술원 도시환경공학부 학사졸업
- 2016년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술원 도시환경공학부 석박사 통합과정

<관심분야>

건설공학, 콘크리트, 레올로지

이 진 현(Jin-Hyun Lee)

[정회원]



- 2015년 2월 : 울산과학기술대학교 도시환경공학부 학사졸업
- 2015년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술원 도시환경공학부 석박사 통합과정

<관심분야>

건설공학, 콘크리트, 레올로지

**김 재 흥**(Jae Hong Kim)

[정회원]



- 2008년 8월 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과(공학박사)
- 2008년 11월 ~ 2011년 7월 : Northwestern University Postdoctoral Fellow
- 2011년 8월 ~ 현재 : 울산과학기술원 도시환경공학부 교수

<관심분야>

건설공학, 콘크리트, 레올로지

---

**김 명 규**(Myeong Kyu Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 경상대학교 기계공학과(공학박사)
- 1980년 6월 ~ 1982년 8월 : 대동공업(주) 연구원
- 1982년 9월 ~ 1982년 8월 : 대동공업(주) 연구원
- 1982년 9월 ~ 현재 : 경남과학기술대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

기계공학, 유체역학