



슬럼프 플로 시험을 이용한 고유동 콘크리트의 항복응력과 소성점도 평가

신태용¹⁾ · 한성호¹⁾ · 김재홍^{2)*}

¹⁾한국과학기술원 건설및환경공학과 대학원생 ²⁾한국과학기술원 건설및환경공학과 교수

Estimation of Yield Stress and Plastic Viscosity of Concrete Using the Slump Flow Test

Tae Yong Shin,¹⁾ Seong Ho Han,¹⁾ and Jae Hong Kim^{2)*}

¹⁾Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Rep. of Korea

²⁾Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Rep. of Korea

ABSTRACT The yield stress and plastic viscosity represent the rheological behavior of freshly-mixed concrete. Their measurements need a rheometer using a sample more than 20 L volume. A delicate control and analysis on the measurements, together with the high-volume sample requirement, makes it hard to apply the use of a rheometer in field. This paper proposes an analytical model to estimate the yield stress and plastic viscosity using the results of the slump flow test. The model is linearly approximated with its volume-of-fluid simulation results. A general tendency on the rheological properties is clearly confirmed with the proposed model: A high yield-stress concrete shows a higher slump flow, and the time to get 500 mm flow (T_{50}) is dominantly proportional to its plastic viscosity. In addition, the model reflects a small but non-negligible effect of the plastic viscosity on the slump flow, also the effect of yield stress on T_{50} , for the estimation. Finally, the model estimations are compared with the measurements using a commercialized rheometer such as ICAR and BML. Their biased measurements are discussed with the estimates using the proposed model.

Keywords : slump flow, rheology, Bingham model, yield stress, plastic viscosity

1. 서 론

굳지 않은 콘크리트의 워커빌리티 및 시공품질 평가에 대한 정량적인 평가를 위해서는, 콘크리트의 레올로지 특성 측정이 필요하다. 포틀랜드 시멘트를 사용하는 콘크리트는 일반적으로 틱소트로피(thixotropy) 현상과 함께 전단박화(shear-thinning) 거동을 보이므로, 전단변형률속도와 전단시간에 따른 모델 정식화가 필요하다(Roussel 2006; Choi et al. 2019). 슬럼프 플로와 같이 콘크리트의 자중으로 유도되는 흐름은, 항복응력(yield stress)과 소성점도(plastic viscosity)로 구성되는 빙햄 모델(Bingham model)을 이용하여 레올로지 모델을 단순화시켜 흐름을 분석할 수 있다(Ferraris et al. 2001; Roussel 2007a, 2007b; Wallevik et al. 2015).

콘크리트의 항복응력과 소성점도는 콘크리트용 레오미터를 사용하여 측정할 수 있다(Brower and Ferraris 2003; Koehler and Fowler 2004). 그러나 콘크리트용 레오미터는 구동 방식에 따라 동일한 배합에 대해서 측정값의 편차를 주고, 실험 장치 및 측정 방법의 편의성 문제로 인해 실제 시공 현장에서의 적용이 쉽지 않다.

콘크리트용 레오미터를 대신하기 위해, 슬럼프 시험(KS F 2402) 또는 슬럼프 플로 시험(KS F 2594) 결과로부터 항복응력과 소성점도를 추정하고자 하는 연구가 다양하게 진행되고 있다. 즉, 콘크리트의 슬럼프와 항복응력의 상관관계(Ferraris and de Larrard 1998; Roussel and Coussot 2005; Wallevik 2006) 또는 고유동 콘크리트의 슬럼프 플로와 항복응력의 상관관계(Roussel and Coussot 2005; Petit et al. 2007; Thrane et al. 2007; Neophytou et al. 2010)를 제시하여, 현장에서 시험 결과를 입력하여 항복응력을 추정한다. 또한, 슬럼프콘과 다른 형태의 플로 시험장치 개발 및 시험결과를 이용한 레올로지 특성 평가에 대한 연구도 진행되고 있다(Nguyen et al. 2006; Roussel 2007; Kim et al. 2017).

*Corresponding author E-mail : jae.kim@kaist.ac.kr

Received November 05, 2019, Revised February 07, 2020,

Accepted February 10, 2020

©2020 by Korea Concrete Institute

상기된 상관관계식을 사용하면, 고유동 콘크리트의 슬럼프 플로 증가에 따른 항복응력의 감소는 확인할 수 있으나, 상관관계식에 따른 항복응력 평가값의 편차가 여전히 존재한다. 항복응력과 소성점도를 고유동 콘크리트의 재료상수(material constant)로 사용하기 위해서는, 예측하고자 하는 흐름 조건(전단변형률속도, 전단시간 등)에서의 재료상수 평가가 필요하다. 이 논문에서는, 자중에 의해 유도되는 고유동 콘크리트의 흐름을 대상으로 항복응력과 소성점도를 평가하기 위해 슬럼프 플로를 전산유체역학(CFD) 시뮬레이션을 기반으로 상관관계식을 제시하고자 한다. 사전 연구에서 Volume of Fluid(VoF) 기법을 이용하여 슬럼프 플로를 CFD 시뮬레이션하고, 굽은 골재의 영향을 고려하여 항복응력과 소성점도를 역해석하는 알고리즘을 정립하였다(Shin et al. 2017). 기존의 역해석 시 사용한 비선형 최적화 알고리즘을 선형근사식으로 변환함으로써, 현장에서 슬럼프 플로와 500 mm 도달 시간을 측정하여 항복응력과 소성점도를 빠르게 평가하고자 한다. 또한, 500 mm 도달 시간 대신 슬럼프 플로의 진행 속도를 측정하는 경우 필요한 보정식도 함께 제안하고자 한다. 마지막으로, 총 94개의 고유동 콘크리트 배합을 이용하여 상관관계식의 신뢰성을 검증하고자 한다.

2. 상관관계 모델

2.1 시뮬레이션

2.1.1 모델링

슬럼프 플로 시험에 대한 VoF 시뮬레이션은, 밑지름 200 mm, 윗지름 100 mm, 높이 300 mm의 고유동 콘크리트를 단일 유체(single fluid)로 가정하여 자중(중력가속도 9.81 m/s²)에 의한 흐름을 모사하였다. 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.14-2를 사용하였다. 오일러리안 요소(Eulerian element)에서의 유체의 파괴분율 임계점을 0.5로 가정하였고, 요소의 평균 크기는 8~10 mm로 시멘트 기반 재료의 CFD 해석에 적합한 크기로 설정하였다(Kim et al. 2015). 효율적인 시뮬레이션을 위해 Fig. 1과 같이 44,840개의 오일러리안 요소로 3차원 1/4 대칭모델을 구성하였고, 하부 평판에서 모든 방향으로의 속도를 구속하여 경계조건을 설정하였다. 시간증분(time increment)은 0.03 s로 설정하여 30 s 동안의 흐름을 시뮬레이션하였다.

2.1.2 재료상수

콘크리트의 밀도는 2,400 kg/m³으로 가정하였다. 빙햄모델은, 콘크리트의 레올로지 특성을 식 (1)과 같은 전단응력(τ)-전단변형률속도($\dot{\gamma}$)의 관계로 표현한다.

$$\tau = \tau_y + \eta_p \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서, τ_y 는 항복응력이고, η_p 는 소성점도이다. 입력된 재료상수는 고유동 콘크리트의 슬럼프 플로 범위에 적합하도록

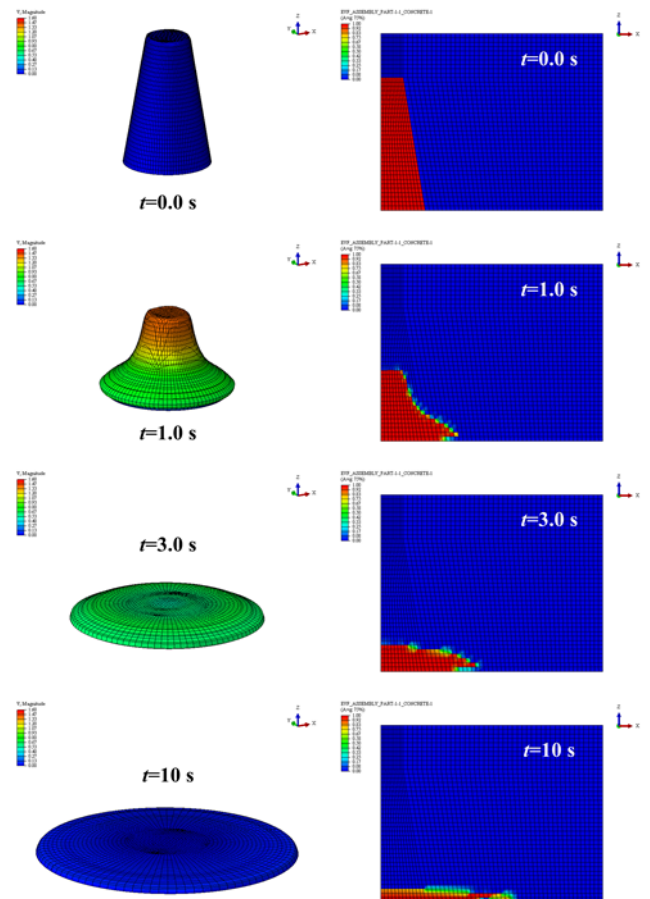


Fig. 1 Snapshots and volume fraction contours of the VoF simulation of the slump flow

록, 각각 $\tau_y=10\sim 100$ Pa, $\eta_p=50\sim 450$ Pa·s 범위로 총 46개의 조합을 구성하였다. 시뮬레이션 결과는 흐름이 멈추는 시점에서의 콘크리트의 지름(단일 유체의 슬럼프 플로, D_s)과 콘크리트가 지름 500 mm에 도달하는 시간(T_{50})으로 기록하였다. 이전 연구 사례를 토대로 슬럼프 플로에 적합한 정지속도는 2.5 mm/s 미만으로 설정하였다(Tregger et al. 2008). 추가로 콘크리트의 표면장력에 의한 효과는 점성에 의한 효과보다 매우 작으므로 이 해석에서는 고려하지 않았다.

2.1.3 회귀분석

앞서 설명한 슬럼프 플로에 대한 VoF 시뮬레이션 결과를 일반화하기 위해, 재료상수(τ_y , η_p)와 해석결과(D_s , T_{50})의 상관관계를 가장 높은 상관도(R^2)를 보이는 모델함수를 이용하여 회귀분석하였다. Fig. 2는 소성점도와 T_{50} 의 상관관계를 보여준다. 이때, 각 점은 해석결과를, 실선은 그 추세선을 의미하며, 추세선의 선형비례관계는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$T_{50} = a\eta_p \quad (2)$$

여기서, 비례상수는 $a = k_1 \exp(\tau_y/k_2)$ 함수식으로 항복응력의 지수함수로 산정하였을 때 가장 높은 상관도를 보였다.

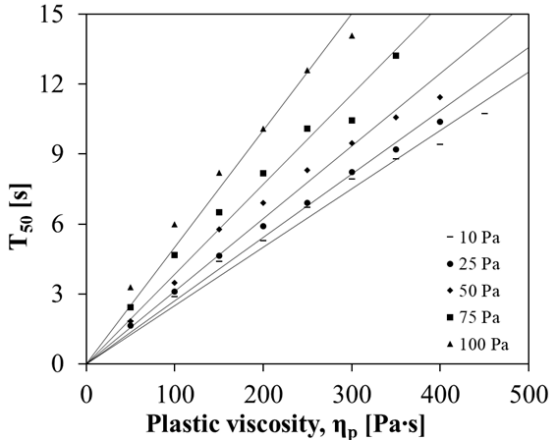


Fig. 2 Relation between the plastic viscosity and T_{50}

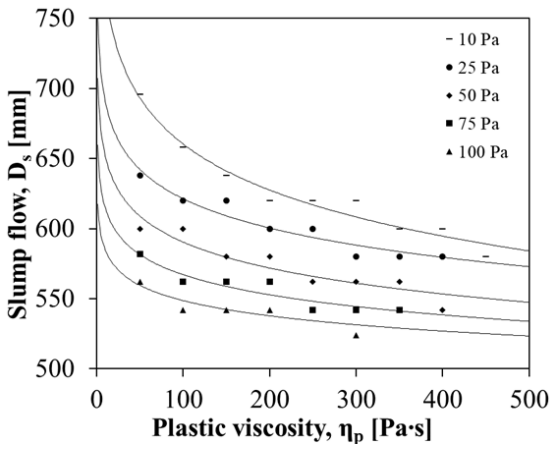


Fig. 3 Relation between the plastic viscosity and D_s

Table 1 Coefficients of the correlation equations (2) and (3)

k_1	0.02140 Pa ⁻¹
k_2	122.0 Pa
k_3	67.6 Pa·s
k_4	0.1975 mm/Pa
k_5	35.65 mm
k_6	1.041 mm/Pa
k_7	656.2 mm

Fig. 3는 소성점도와 D_s 의 로그함수 관계를 보여주며, 같은 소성점도를 가진 샘플에서 항복응력이 증가함에 따라 D_s 가 감소하는 경향을 보인다.

$$D_s = -b \ln\left(\frac{\eta_p}{k_3}\right) + c \quad (3)$$

여기서, 로그함수의 상수를 $b = -k_4 \tau_y + k_5$ 와 $c = -k_6 \tau_y + k_7$ 꼴의 항복응력과 선형관계로 표현하였을 때 높은 상관도를 보였다. Table 1에서 상관관계식 (2)와 (3)에서 사용하는 매개 변수의 값을 정리하였다.

2.1.4 굵은 골재의 영향에 대한 보정

상기된 시뮬레이션 결과에 대한 상관관계식은 콘크리트를 단일 유체로 가정한 해석결과로, 굵은 골재의 영향을 고려하지 않아 실제 콘크리트의 유동을 표현하는 데 한계가 있다. 고유동 콘크리트 배합에서는 상대적으로 약한 정도의 재료분리가 발생하여, 얇은 층류로 유동 시 배합의 표면에서 굵은 골재가 돌출되는 현상이 나타난다.

이를 고려하기 위해, 고유동 콘크리트의 재료분리 정도 (degree of segregation)를 정의하였다. 일반적으로 재료분리의 정도는 슬럼프 플로가 큰 배합에서 증가한다(Tregger et al. 2012). 단일 유체의 슬럼프 플로(D_s in millimeter)를 기준값으로 시그모이드 함수의 형태로 재료분리 정도를 정의하면 다음 식 (4)와 같다.

$$\theta = \frac{1}{1 + \exp(-0.05(D_s - 675))} \quad (4)$$

여기서, $\theta=0$ 은 재료분리가 없음을 의미하고, $\theta=1$ 은 완전한 재료분리가 일어나 굵은 골재 최대 치수에 해당하는 입자가 단일 유체로 가정할 수 있는 모르타르로부터 분리됨을 의미한다.

이러한 재료분리 현상은 굵은 골재에 대한 모르타르의 상대적인 유동을 발생시켜, 고유동 콘크리트의 슬럼프 플로를 증가시킨다. 식 (5)는 굵은 골재의 영향을 고려한 슬럼프 플로(D_f)로서, 시뮬레이션으로 구한 단일 유체의 슬럼프 플로(D_s)에 굵은 골재의 재료분리 영향을 고려하여 계산한다 (Shin et al. 2017).

$$D_f = D_s + D_s^2 \sqrt{\frac{\pi(1-\phi)\theta d_{\max}}{6V_0}} \quad (5)$$

이때, d_{\max} 는 굵은 골재의 최대 크기, ϕ 는 굵은 골재의 배합 내 부피분율, V_0 는 슬럼프 플로의 부피 $5.5 \times 10^6 \text{ mm}^3$ 이다.

2.2 역해석

2.2.1 상관관계

단일 유체의 항복응력과 소성점도는 식 (2)와 (3)을 연립한 역함수를 구성하여, 단일 유체의 슬럼프 플로 D_s 와 T_{50} 으로 계산할 수 있다.

$$\tau_y = 60.92 \ln(0.5 T_{50}) - 211.4 + 36.7 \sqrt{2.76 \{\ln(0.5 T_{50})\}^2 - 17.75 T_s + 329 - 0.458 D_s} \quad (6)$$

$$\eta_p = \frac{46.73 T_{50}}{\exp(0.0082 \tau_y)} \quad (7)$$

여기서, 단일 유체의 슬럼프 플로 D_s 와 T_{50} 은 각각 mm와 s 단위로 입력하여 계산한다.

현장에서 측정하는 슬럼프 플로는 굵은 골재의 영향을 고려한 슬럼프 플로(D_f)이므로, 식 (4)와 (5)에 따른 재료분리 정도를 고려해야 한다. 최종적으로 항복응력과 소성점도는 비선형 최적화(nonlinear optimization) 과정을 통해 수치적으로 계산할 수 있다(Shin et al. 2017).

상대적으로 복잡한 비선형 최적화 과정은 항복응력에 대한 선형근사(linear approximation)를 통해 단순화시킬 수 있다. 예를 들어, Fig. 4에서 붉은 실선은 굵은 골재의 영향을 고려한 슬럼프 플로(D_f)와 항복응력(τ_y)의 관계로, $T_{50}=3$ s, $d_{max}=25$ mm, $\phi=0.35$ 에 대하여 도시하였다. 항복응력에 대한 선형근사는 $D_f=600$ mm 지점을 기준으로 $D_f=500$ mm과 $D_f=700$ mm 지점을 양 끝점으로 하는 이선형함수(bilinear function)로 가능하였다. 이는 식 (8)과 같이 나타내며, Fig. 4에서 검은 파선으로 도시하였다.

$$\tau_y = \begin{cases} 447.6 - 0.5778D_f - \{p_0 - p_1(D_f - 600)\}T_{50} & \text{if } D_f < 600 \text{ mm} \\ 296.9 - 0.3267D_f - \{p_0 - p_2(D_f - 600)\}T_{50} & \text{if } D_f \geq 600 \text{ mm} \end{cases} \quad (8)$$

이때 항복응력의 단위는 Pa로 나타내며, 슬럼프 플로 D_f 와 T_{50} 의 단위는 각각 mm와 s로 입력한다.

식 (8)에서, 골재 크기에 따른 영향은 보정상수(p_0, p_1, p_2)로 반영하였고 Table 2에 그 값을 정리하였다. 굵은 골재의 크기에 따른 변화뿐만 아니라, 굵은 골재 부피분율에 의한 물성변화를 고려하기 위해서, 굵은 골재의 부피분율이 0.35에서 0.01씩 증가(감소)할 때, 각 보정상수값(p_i)를 0.5 %씩 증가(감소)시킨다. 사용 가능한 슬럼프 플로 범위($500 \text{ mm} < D_f < 700 \text{ mm}$, $1 \text{ s} < T_{50} < 15 \text{ s}$)에서 선형근사식은 비선형 최적화 과정으로 구한 항복응력 대비 절대오차는 10 Pa을 넘지 않는다.

한편, 소성점도에 대한 굵은 골재의 영향은 항복응력에 반영되어 식 (7)에 입력되고 T_{50} 에서 굵은 골재의 재료분리는 무시할 수 있으므로, 단일 유체에 대한 소성점도 상관관계식을 그대로 이용할 수 있다. 선형근사 모델을 이용한 소성점도의 산정 오차는 항복응력 산정 오차에서 기인하므로, T_{50} 에 대한 선형근사 오차는 10 % 미만이다.

2.2.2 흐름속도와의 상관관계

슬럼프 플로 길이 측정과는 달리 T_{50} 의 측정은 시험자에 따른 오차를 가지고 있으므로, 콘크리트가 지름 400 mm에 도달하는 시간(T_{40})을 추가로 측정하여, 시험 오차를 줄일 수 있다. 또한, 슬럼프 플로 시험 시 T_{40} 까지의 콘크리트 거동은 전단흐름 보다는 중력에 의한 자유낙하에 영향을 상대

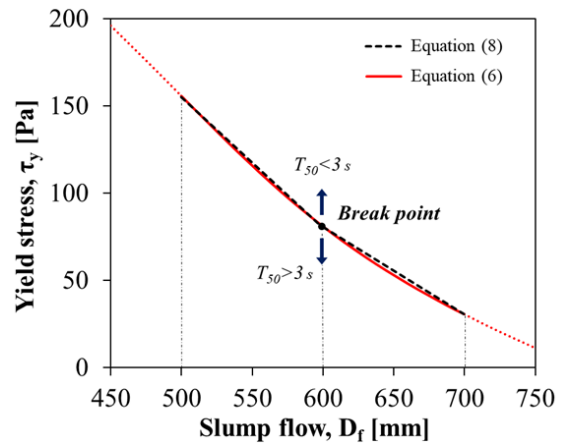


Fig. 4 Correlation between the yield stress and the slump flow of concrete ($T_{50}=3$ s, $d_{max}=25$ mm, and $\phi=0.35$): The nonlinear optimization to get the correlation can be approximated using the bilinear equation, of which breaking point is located at 600 mm. The breaking point moves down with a higher T_{50} .

Table 2 Coefficients of the approximation equation (8)

d_{max} (mm)	13	20	25
p_0 (Pa/s)	7.230	6.615	6.210
p_1 (Pa/mm·s)	0.0616	0.0563	0.0529
p_2 (Pa/mm·s)	0.0798	0.0730	0.0685

The value of each p_i needs to be corrected as ± 0.5 % when the volume fraction of coarse aggregates (ϕ) is changed by ± 0.01 based on $\phi=0.35$.

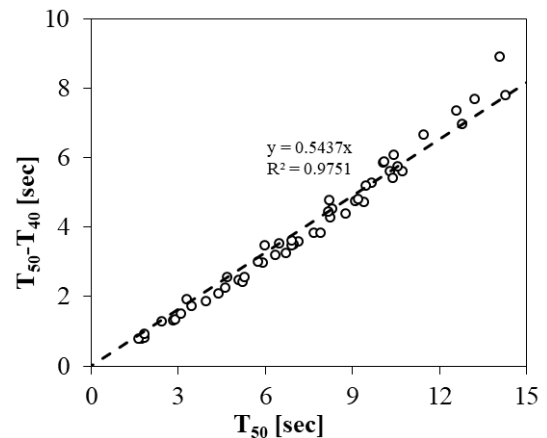


Fig. 5 Linear relationship between T_{50} and $(T_{50} - T_{40})$

적으로 많이 받게 된다. 이를 모델에 반영하기 위해 T_{40} 과 T_{50} 의 차이를 이용한 100 mm 구간의 흐름시간(흐름속도)을 측정값으로 사용할 수 있다. 모든 경우의 해석에서, Fig. 5와 같이 T_{50} 과 $(T_{50} - T_{40})$ 은 항복응력과 소성점도에 관계없이 선형 비례관계를 보였다.

$$T_{50} = 1.839(T_{50} - T_{40}) \quad (9)$$

3. 비교 검증

3.1 기존 모델

제안된 모델의 신뢰성을 검토하기 위해 기존의 모델식과 평가결과를 비교하였다. 사용된 기존 모델은 레올로지 이론에 근거하여 유도된 Roussel and Coussot(2005) 모델로, 슬럼프 플로우와 항복응력의 상관관계를 다음과 같이 제시한다.

$$\tau_y = \frac{225\rho V_0^2}{128\pi^2 R^5} = \frac{4.06}{D_f^5} \quad (10)$$

이때 ρ 는 콘크리트의 밀도, V_0 는 샘플의 총 부피, R 은 슬럼프 플로를 의미한다. 식 (10)에서 D_f 는 m 단위로 입력한다. 기존 모델에 의한 계산은 T_{50} 과 같은 시간에 대한 고려가 없어 소성점도에 대한 추정이 불가능하다.

슬럼프 플로 시험 결과와 소성점도의 상관관계는 ICAR 레오미터를 사용한 실험적 연구를 통해 추정할 수 있다(Koehler and Fowler 2010). 비록 상대적으로 높은 산포도($R^2=0.67$)를 갖지만, 식 (11)과 같이 간단한 선형관계를 정의할 수 있다.

$$\eta_p = 4.95 T_{50, inverted} + 3.10 \quad (11)$$

이때 $T_{50, inverted}$ 는 밀지름 100 mm, 윗지름 200 mm의 뒤집어진 형태의 슬럼프콘을 사용했을 때 T_{50} 을 의미한다. 슬럼프 콘의 방향은 슬럼프 플로우에 영향을 미치지 않으나, 뒤집어진 슬럼프콘을 이용하여 측정된 지름 500 mm에 도달 시간 ($T_{50, inverted}$)이 상대적으로 더 길다(Ramsburg 2003).

3.2 실험 및 고찰

검증 실험은 총 94개의 고유동 콘크리트 배합을 사용하였으며, 각 배합의 플로(D_f), 지름 500 mm 도달 시간(T_{50})과 상용 레오미터를 사용하여 항복응력과 소성점도를 측정하였다. 굵은 골재 부피분율은 각 배합별로 차이가 있으나 기준 값인 0.35와 큰 차이가 나지 않으므로, 본 검증실험에서는 골재부피분율에 의한 영향을 배제하였다. 실험에 사용된 레오미터는 ICAR Rheometer, ConTec 5 Viscometer(BML)로 두 가지이다. ICAR Rheometer에 대하여 63개의 배합, BML Rheometer에 대하여 31개의 배합을 시험하였다.

3.2.1 ICAR

각 배합의 슬럼프 플로(D_f), T_{50} , 굵은 골재 최대크기(d_{max})를 입력값으로 식 (7)과 (8)을 이용해 소성점도와 항복응력을 평가할 수 있다. 이를 ICAR 레오미터로 측정된 항복응력과 기존 모델식 (10)으로 계산한 항복응력과 비교하면 Fig. 6과 같다. 슬럼프 플로우가 증가할수록 항복응력이 감소하는 경향성은 제안된 모델뿐만 아니라, 기존 모델(Roussel and Coussot

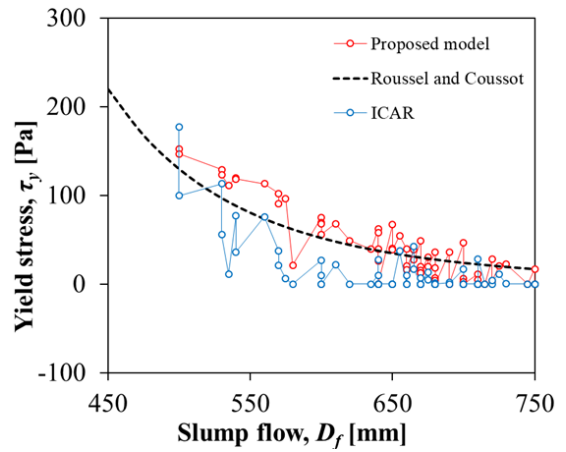


Fig. 6 Comparison of the estimated yield stress with ICAR measurements: The yield stress of ICAR measurements is overall 52 % less than that obtained by the proposed estimation

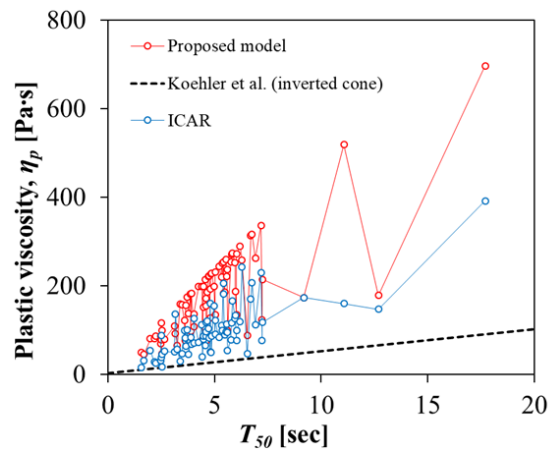


Fig. 7 Comparison of the estimated plastic viscosity with ICAR measurements: The plastic viscosity of ICAR measurements is overall 48 % less than that obtained by the proposed estimation

2005), ICAR 측정값에서도 동일하게 확인할 수 있다. 특히, 제안된 모델의 산정값은 레올로지 이론에 근거한 기존 모델과 비슷한 범위에 분포하였다. 제안된 모델을 이용하면, 비슷한 슬럼프 플로우를 갖는 배합(그래프상의 인근 점)의 항복응력이 크게는 50 Pa 이상 차이가 나타날 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 T_{50} 의 차이가 항복응력이 미치는 영향으로, 기존 모델에서는 고려할 수 없었다. 한편, ICAR 레오미터 측정된 항복응력은 두 모델을 이용한 산정값보다 낮았으며, 측정된 63개의 배합 중 44개 배합을 항복응력이 0 Pa인 뉴턴유체(Newtonian fluid)로 평가하였다. 이러한 낮은 측정값의 원인은, ICAR 레오미터의 측정 범위의 한계에서 기인한 실험오차로 볼 수 있다.

Fig. 7에서는 소성점도에 대한 측정값과 제안된 모델의 산정값을 비교하였다. 모든 산정값과 측정값에서 동일하게, T_{50} 이 증가함에 따라 소성점도가 증가함을 확인할 수 있다. 여기서, 기존 모델(Koehler et al. 2010)은 뒤집어진 슬럼프콘

을 이용한 $T_{50, inverted}$ 값을 기준으로 구성되었으므로, 상대적으로 낮게 측정되는 T_{50} 을 사용하여 산정한 소성점도가 다른 결과에 비해 낮게 분포하였다. 하지만, 시험방법의 차이를 고려하더라도 소성점도 추정의 오차가 최대 약 8배로 매우 크다. 이는 일반적으로 콘크리트 레오미터의 종류에 따른 측정값의 편차가 매우 크기 때문이다.

3.2.2 BML

BML 레오미터 측정값의 경우 ICAR 레오미터 측정값과 동일한 경향성을 갖는다. 하지만, ICAR 측정값에 비해 항복응력은 상대적으로 낮게(57%), 소성점도는 상대적으로 높게(133%) 측정된다(Hočevar et al. 2013). Fig. 8과 Fig. 9는 BML 레오미터 측정값과 제안된 모델을 이용한 산정값을 비교한 것으로, 앞서 ICAR 레오미터 측정값과 같이 D_f -항복응력과 T_{50} -소성점도의 경향성을 동일하게 보여주고 있다.

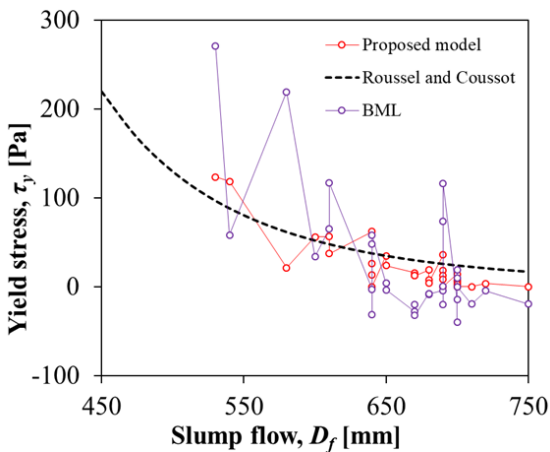


Fig. 8 Comparison of the estimated yield stress with BML measurements: The yield stress of BML measurements is overall 13 % greater than that obtained by the proposed estimation

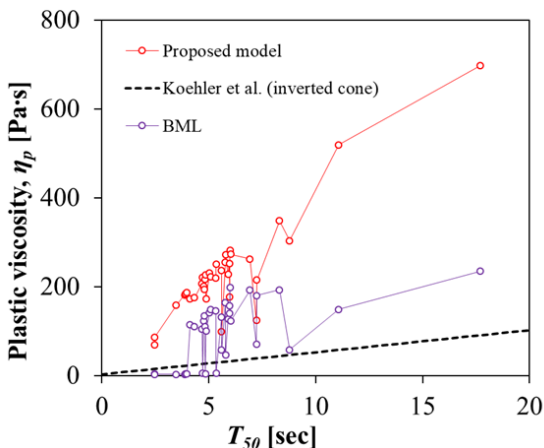


Fig. 9 Comparison of the estimated plastic viscosity with BML measurements: The plastic viscosity of BML measurements is overall 59 % less than that obtained by the proposed estimation

4. 결 론

이 논문에서는 고유동 콘크리트의 항복응력과 소성점도 산정을 위해 슬럼프 플로 시험의 측정값을 이용한 상관관계식을 제안하였다. 이를 위해, 슬럼프 플로 시험을 CFD 시뮬레이션하여, 빙햄모델로 가정한 단일 유체의 슬럼프 플로와 T_{50} 을 항복응력과 소성점도로 계산하였다. 굵은 골재에 대한 재료분리 정도를 정의하여, 단일 유체의 슬럼프 플로 계산에 반영함으로써 콘크리트 배합의 특성을 반영시켰다. 마지막으로 역해석에 대한 선형근사식을 구성하여, 고유동 콘크리트의 슬럼프 시험 결과를 입력값으로 하는 항복응력과 소성점도 산정식을 제시하였다. 다양한 고유동 콘크리트 배합에 대해 제안된 항복응력과 소성점도 산정 모델을 적용한 결과, 기존 모델 및 콘크리트용 레오미터 측정값과 동일한 경향성을 갖음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공학개인기초 기본연구사업임(NRF-2018R1D1A1B07047321).

References

- Brower, L. E., and Ferraris, C. F. (2003) Comparison of Concrete Rheometers. *Concrete International* 25, 41-47.
- Choi, B. I., Kim, J. H., and Shin, T. Y. (2019) Rheological Model Selection and a General Model for Evaluating the Viscosity and Microstructure of a Highly-concentrated Cement Suspension. *Cement and Concrete Research* 123, 105775.
- Ferraris, C. F., and de Larrard, F. (1998) Modified Slump Test to Measure Rheological Parameters of Fresh Concrete. *Cement, Concrete and Aggregates* 20, 241-247.
- Ferraris, C., Larrard, F., and Martys, N. (2001) Fresh Concrete Rheology: Recent Developments. *Materials Science of Concrete* VI, 215-241.
- Hočevar, A., Kavčič, F., and Bokan-Bosiljkov, V. (2013) Rheological Parameters of Fresh Concrete - Comparison of Rheometers. *Gradevinar* 65, 99-109.
- Kim, J. H., Jang, H. R., and Yim, H. J. (2015) Sensitivity and Accuracy for Rheological Simulation of Cement-based Materials. *Computers and Concrete* 15, 903-919.
- Kim, J. H., Lee, J. H., Shin, T. Y., and Yoon, J. Y. (2017) Rheological Method for Alpha Test Evaluation of Developing Superplasticizers' Performance: Channel Flow Test. *Advances in Materials Science and Engineering* 2017, Article ID 4214086.
- Koehler, E. P., and Fowler, D. W. (2004) *Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete (ICAR Report 105-3F)*. Austin, TX; University of Texas at

- Austin.
- Koehler, E. P., and Fowler, D. W. (2010) Comparison of Workability Test Methods for Self-consolidating Concrete. *Journal of ASTM International* 7(2), 1-19.
- Korea Agency for Technology and Standards (KATS) (2009) *Method of Test for Slump Flow of Fresh Concrete (KS F 2594)*. Seoul, Korea; Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Korea Agency for Technology and Standards (KATS) (2017) *Standard Test Method for Concrete Slump (KS F 2402)*. Seoul, Korea; Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Neophytou, M., Pourgouri, S., Kanellopoulos, A., Petrou, M., Ioannou, I., Georgiou, G., and Alexandrou, A. (2010). Determination of the Rheological Parameters of Self-compacting Concrete Matrix Using Slump Flow Test. *Applied Rheology* 20(6). 10.3933/AppIRheol-20-62402.
- Nguyen, T. L. H., Roussel, N., and Coussot, P. (2006) Correlation between L-box Test and Rheological Parameters of a Homogeneous Yield Stress Fluid. *Cement and Concrete Research* 36(10), 1789-1796.
- Petit, J. Y., Wirquin, E., Vanhove, Y., and Khayat, K. (2007) Yield Stress and Viscosity Equations for Mortars and Self-consolidating Concrete. *Cement and Concrete Research* 37, 655-670.
- Ramsburg, P. (2003) The SCC Test: Inverted or Upright?. *The Concrete Producer* 21, 34-38.
- Roussel, N. (2006) A Thixotropy Model for Fresh Fluid Concretes: Theory, Validation and Applications. *Cement and Concrete Research* 36, 1797-1806.
- Roussel, N. (2007a) Rheology of Fresh Concrete: From Measurements to Predictions of Casting Processes. *Materials and Structures* 40, 1001-1012.
- Roussel, N. (2007b) The LCPC BOX: A Cheap and Simple Technique for Yield Stress Measurements of SCC. *Materials and Structures* 40, 889-896.
- Roussel, N., and Coussot, P. (2005) "Fifty-cent Rheometer" for Yield Stress Measurements: From Slump to Spreading Flow. *Journal of Rheology* 49(3), 705-718.
- Shin, T. Y., Kim, J. H., and Han, S. H. (2017) Rheological Properties Considering the Effect of Aggregates on Concrete Slump Flow. *Materials and Structures* 50, 239.
- Thrane, L. N., Pade, C., and Svensson, T. (2007) Estimation of Bingham Rheological Parameters of SCC from Slump Flow Measurement. *5th International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete (SCC 2007)*, Ghent, Belgium; 3-5 September 2007, 353-358.
- Tregger, N., Ferrara, L., and Shah, S. P. (2008) Identifying Viscosity of Cement Paste from Mini-slump-flow Test. *ACI Materials Journal* 105, 558-566.
- Tregger, N., Gregori, A., Ferrara, L., and Shah, S. (2012) Correlating Dynamic Segregation of Self-consolidating Concrete to the Slump-flow Test. *Construction and Building Materials* 28(1), 499-505.
- Wallevik, J. E. (2006) Relationship between the Bingham Parameters and Slump. *Cement and Concrete Research* 36(7), 1214-1221.
- Wallevik, O. H., Feys, D., Wallevik, J. E., and Khayat, K. H. (2015) Avoiding Inaccurate Interpretations of Rheological Measurements for Cement-based Materials. *Cement and Concrete Research* 78(Part A), 100-109.

요 약 고유동 콘크리트의 레올로지 거동은 빙햄모델로 가정하여, 항복응력과 소성점도로 표현할 수 있다. 항복응력과 소성점도는 회전식 레오미터를 사용하여 측정하는데, 약 20 L 이상의 콘크리트 샘플이 필요하고 복잡한 측정 방법 및 분석 알고리즘으로 인해 현장에서의 사용이 매우 제한적이다. 이 논문에서는 현장에서 콘크리트 품질관리를 위해 필수적으로 적용하고 있는 슬럼프 플로 시험의 결과를 이용하여, 항복응력과 소성점도를 산정하는 모델을 제안하였다. 다양한 배합에 대한 콘크리트 레오미터를 사용한 측정값과 제안된 모델의 산정값을 비교분석하여, 모델의 신뢰성을 검증하였다. 이를 통해, 제안된 모델이 슬럼프 플로의 증가에 따른 항복응력의 감소, T_{50} (지름 500 mm에 도달하는 시간)의 증가에 따른 소성점도의 증가하는 일반적인 경향을 적절히 표현함을 확인하였다.

핵심용어 : 슬럼프 플로, 레올로지, 빙햄모델, 항복응력, 소성점도