

## 콘크리트펌프 유압실린더의 충전율 모델 제안

# Suggestion of a Model for Filling Coefficient of Hydraulic Cylinder in Concrete Pump

박찬규<sup>1</sup> · 장경필<sup>2</sup> · 정재홍<sup>1</sup> · 권승희<sup>2\*</sup>

Chan-Kyu Park<sup>1</sup> · Kyong-Pil Jang<sup>2</sup> · Jae-Hong Jeong<sup>1</sup> · Seung-Hee Kwon<sup>2\*</sup>

(Received June 9, 2016 / Revised June 21, 2016 / Accepted June 21, 2016)

In general, piston pumps are frequently used for concrete pumping. Filling coefficient signifies the ratio volume of a hydraulic cylinder to volume of concrete inside the cylinder. Therefore, it may be considered as a parameter directly affecting the flow rate and efficiency for concrete pumping. However, accurate analyses on this aspect have not yet been performed. In this paper, the data measured from horizontal pipeline pumping tests for 350m and 548m in length was analyzed to identify the relationships of rheological properties of concrete and stroke time with the filling coefficient. In addition, an equation allowing prediction of the filling coefficient from rheological properties of concrete and stroke time has been suggested.

**키워드** : 콘크리트 펌핑, 충전율, 유동특성, 스트로크 시간, 피스톤 펌프

**Keywords** : Concrete pumping, Filling coefficient, Rheological property, Stroke time, Piston pump

## 1. 서론

콘크리트를 펌프압송에 의해 타설하는 방식은 현재 어느 시공 현장에서나 쉽게 볼 수 있다. 이는 콘크리트를 쉽고 빠르게 타설할 수 있어 타설 시간을 단축할 수 있고, 대형 장비의 진입이 어려운 현장에서도 효과적으로 콘크리트를 타설할 수 있는 등 여러 가지 장점 때문이다.

최근 콘크리트 펌핑에 대한 관심이 높아지면서 많은 연구자들에 의해 콘크리트 펌핑 시 배관 내 유동 메커니즘, 펌핑성능의 예측, 그리고 펌핑 효율 증대를 위한 방법 등 다양한 연구들이 진행되어 왔다(Choi 2014a; Kaplan et al, 2013; Kwon 2013a; Kwon 2013b). 콘크리트의 펌핑성능에 영향을 미치는 인자들은 콘크리트와 운할층의 유동특성, 펌핑 압력, 파이프 길이, 온도 등 여러 가지가 있다(Choi 2014b; Golaszewski et al, 2004; Jacobsen et al, 2009; Jeong et al, 2016; Kwon et al, 2016; Kwon 2013a; Kwon 2013b; Ngo et al, 2010).

콘크리트의 펌핑에는 일반적으로 피스톤 펌프를 많이 사용한다. 피스톤 펌프는 두 개의 실린더에서 흡입과 토출을 반복하여 콘크리트를 밀어내는 방식이다. 즉, 흡입공정을 통해 실린더 내부에 콘크리트를 채우고, 이를 밀어내면서 동시에 반대쪽 실린더 내부에 콘크리트를 채우는 과정을 반복한다. 하지만 실제 콘크리트를 펌핑하는 과정에서는 실린더 내부를 가득 채우지 못하고, 약 70%에서 90% 정도의 범위로 채워져 펌핑이 이루어진다. 이 때 피스톤 펌프의 실린더 부피와 실린더 내에 채워지는 콘크리트의 부피비를 충전율(Filling Coefficient, F.C.)이라고 하며, 콘크리트의 펌핑에서 토출량에 직접적으로 영향을 미치는 요소이다. 따라서 현장에서 콘크리트의 펌핑 효율을 최대한으로 높이기 위해서는 충전율에 영향을 미치는 인자들에 대한 분석이 필요하다. 충전율은 다음의 식 (1)을 이용해 계산할 수 있다.

$$F.C. = \frac{Q_c / t_{stroke}}{V_{piston}} (\%) \quad (1)$$

\* Corresponding author E-mail: kwon08@mju.ac.kr

<sup>1</sup>삼성물산(주) (Samsung C&T Corporation, Kyonggi-do, 13530, Korea)

<sup>2</sup>명지대학교 토목환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Gyeonggi-do, 17058, Korea)

여기서,  $Q_c$ 는 토출량( $m^3/hr$ ),  $t_{stroke}$ 은 단위 시간당 스트로크 횟수 (the number of strokes per hour),  $V_{piston}$ 은 유압실린더의 부피 ( $m^3$ )이다.

이 연구에서는, 기존에 수행된(Kwon 2013b) 수평배관 350m와 548m 길이의 펌핑 실험을 통해 측정된 토출량, 압력 등의 데이터들을 바탕으로 여러 조건에서의 충전율을 조사해 보았다. 또한 여러 영향 인자를 고려해서 충전율을 계산할 수 있는 모델을 제안하였다. 콘크리트의 펌핑 실험에서는 총 4가지의 콘크리트 배합이 사용되었으며, 수평 배관 길이, 콘크리트의 유동특성, 그리고 펌핑 압력을 변수로 실험이 수행되었다.

## 2. 펌핑 실험

### 2.1 콘크리트 펌프

펌핑 실험에는 일반콘크리트 뿐만 아니라 초고강도콘크리트와 같이 점도가 매우 높은 콘크리트를 압송할 수 있는 대용량 펌프를 사용하였다. 앞서 언급했듯이, 콘크리트 펌핑에는 피스톤 방식의 펌프를 사용한다. 피스톤 펌프는 두 개의 실린더에서 흡입과 토출을 반복하여 콘크리트를 밀어내는 방식이다. 따라서 피스톤 펌프의 압력 파형은, 실린더 전환 시에 압력이 순간적으로 낮아지는

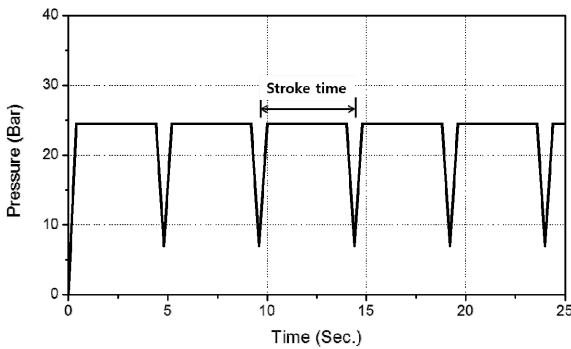


Fig. 1. Pressure pulse of concrete pump

Table 1. Pump specifications

Item	Content
Hydraulic pressure max.	250bar
Flow rate	71m <sup>3</sup> /h
Stroke	22times/min
Engine house	571kW
Delivery cylinder, $\phi$	180mm
Piston stroke	2,100mm
Permitted gross weight	12,000kg

부분과 높아지는 부분, 그리고 거의 일정한 압력이 유지되는 정상 상태 부분으로 구성된다. Fig. 1은 피스톤 펌프의 압력 파형을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 표시한 것과 같이, 실린더의 한 행정(cycle)에 소요되는 시간을 스트로크 시간(stroke time)이라고 한다. 실험에 사용된 펌프의 사양은 Table 1에 나타내었다. 펌프의 최대압력은 250bar, 토출량은 71m<sup>3</sup>/hr, 분당 최고 스트로크 횟수는 22회이다.

### 2.2 배관 설치

콘크리트의 펌핑 실험을 위하여 수평 길이 350m와 548m 배관을 설치하였다. 펌핑 실험 현장의 전경을 Fig. 2에 나타내었으며, 설치된 배관의 배치도를 Fig. 3에 나타내었다. 직선 구간은 약 48m로 설치되었다. 350m 길이의 펌핑 실험에서는 6개의 직선 라인이 설치되었으며, 548m 길이의 펌핑 실험에서는 10개의 직선 라인이 설치되었다. 각 직선 구간을 연결하는 곡선부에는 반경 1.1m인 곡관 두 개를 사용하여 연결하였다. 실험에 사용된 배관의 내경은 127mm이며, 배관 두께는 9.3mm이다.

### 2.3 콘크리트 배합

펌핑 실험에 사용된 콘크리트 배합은 일반 강도와 고강도 콘크리트 배합을 모두 사용하였다. 실험에 사용된 콘크리트의 배합표를 Table 2에 나타내었다. 콘크리트의 압축강도는 30MPa, 50MPa, 80MPa이며, 압축강도 80MPa에 해당하는 배합에서는 고점도, 저점도 배합으로 두 가지 콘크리트를 사용하였다(Table 2에서 S80-H, S80-L). 굵은 골재의 최대 크기는 20mm이며, 잔골재의 조립률은 2.85이다. 시멘트는 A사의 1종 시멘트를 사용하였으며, 비중은 3.15이다. 압축강도 30MPa의 일반 강도 배합에서는 감수제를 사



Fig. 2. The whole view of pumping test site

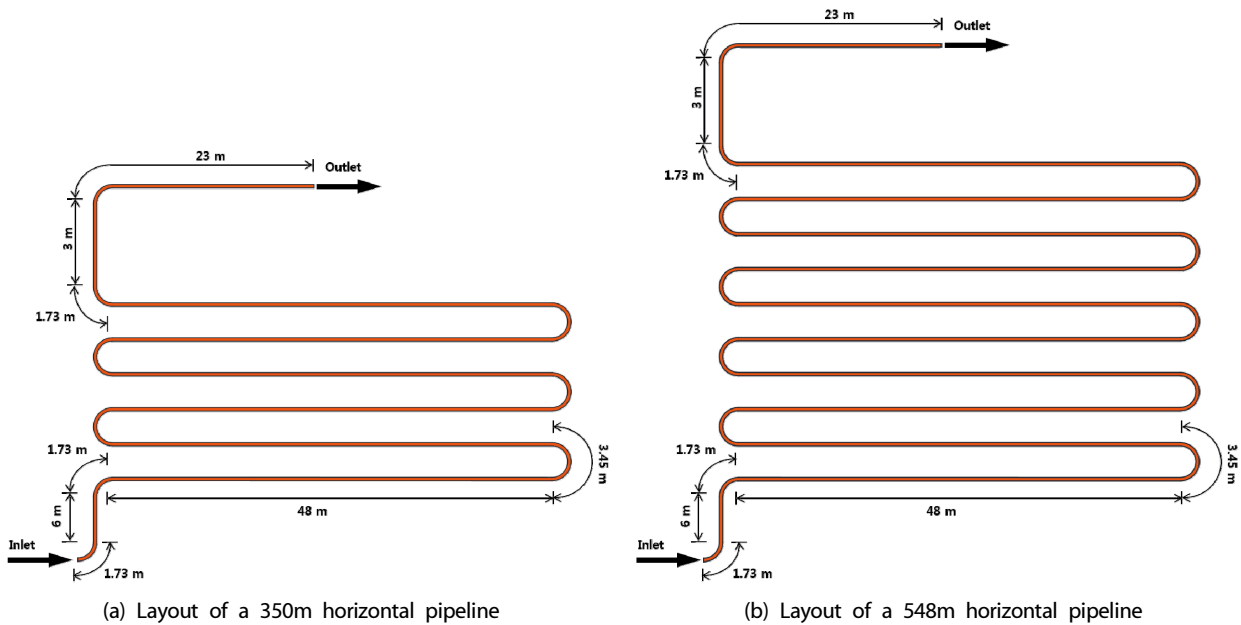


Fig. 3. Schematic diagrams of the pumping circuit

Table 2. Mixture proportions

Mixture	Design strength (MPa)	w/b (%)	S/A (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )							
				Water	Cement	Fly ash	ZSF*	Sand	Gravel	AD1**	AD2***
S30	30	47.6	47.0	175	331	37.0	-	816	945	3.31(0.9%)	-
S50	50	32.0	45.0	172	484	-	54.0	733	921	-	4.84(0.9%)
S80-H	80	25.0	47.0	160	544	96.0	-	732	848	-	9.60(1.5%)
S80-L		25.0	45.0	160	480	64.0	96.0	695	872	-	7.04(1.1%)

\*zirconia silica sume

\*\*water-reducing agent

\*\*\*polycarboxylate high-range water-reducing admixture

용하였고, 50MPa과 80MPa의 고강도 배합에서는 폴리카르보산계 고성능감수제를 사용하였다. 30MPa 배합에서의 혼화제 사용량은 결합재 무게의 0.9%를 사용하였다. 50MPa, 80MPa 고점도, 80MPa 저점도 배합에서는 각각 결합재 무게의 0.9%, 1.5%, 1.1%를 사용하였다. 80MPa 저점도 배합에서는 점도를 낮추기 위하여 혼화제로 지르코니아 실리카폼을 사용하였다.

## 2.4 실험 변수 및 방법

### 2.4.1 실험 변수

펌핑 실험에는 총 4가지의 콘크리트 배합이 사용되었으며, 수평 배관 길이, 콘크리트의 유동특성, 그리고 펌핑 압력을 변수로 실험이 수행되었다. 350m 길이의 펌핑 실험에서는 모든 배합에 대해 압력수준을 2가지로 하여 각각 토출량, 스트로크 시간, 그리고 충

진율을 측정하였다. 548m 길이의 펌핑 실험에서는 30MPa 콘크리트를 제외한 모든 배합에 대해 압력수준을 3가지로 하여 각각 토출량, 스트로크 시간, 그리고 충진율을 측정하였다.

### 2.4.2 실험 방법

배관 내 압력을 측정하기 위하여 총 6개 지점(0m, 5m, 100m, 300m, 400m, 500m)에 압력계를 설치하였다. 또한 토출량 측정을 위하여 토출부에 0.9m×0.9m×1.2m의 box를 제작하여 box의 0.5m, 1.0m 높이까지 콘크리트가 채워지는 시간을 측정하였으며, 이로부터 단위 시간당 토출량을 계산하였다. 압력 센서 설치 모습과 토출량 측정 모습을 Fig. 4에 나타내었다. 토출량 측정과 동시에 스트로크 수를 측정하였으며, 이로부터 단위 시간당 스트로크 횟수를 계산하였다. 콘크리트의 점도와 항복응력은 콘크리트 Rheometer (Koehler et al, 2006)를 사용하여 측정하였다.



(a) Installation of pressure sensor



(b) Measurement of flow rates

Fig. 4. Measuring system of the pressure and the flow rate

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 펌핑 속도와 충전율 관계

350m와 548m 길이의 수평배관 펌핑 실험으로부터 측정된 압력, 유량, 스트로크 시간, 그리고 충전율 측정 결과를 Table 3에 나타내었다. 펌핑 실험으로부터 측정된 충전율의 범위는 약 70%에서 90% 사이로 나타났다. 실험 결과를 살펴보면, 모든 배합에서

Table 3. Results of 350m and 548m pipeline pumping test

Mixture	Pipe length (m)	Pressure (bar)	Flow rate (m <sup>3</sup> /hr)	Stroke time (Sec.)	Filling coefficient (%)
S30	350	116	61.5	2.77	88.3
		74	32.5	4.47	75.4
S50	350	130	61.3	2.81	89.7
		80	34.8	4.59	82.8
	548	165	45.2	3.42	81.9
		125	33.5	4.56	81.5
		90	21.9	6.56	74.7
S80-H	350	169	22.7	6.72	79.4
		95	13.3	10.42	75.5
	548	175	17.3	8.2	77.7
		126	12.4	11.5	74.3
		88	8.9	15.6	71.8
S80-L	350	168	53.4	2.87	79.7
		103	29.1	4.76	71.9
	548	163	40.6	3.78	79.8
		112	30.0	5.01	78.1
		83	21.2	6.66	73.6

압력이 높을수록 토출량이 많은 것으로 측정되었으며, 스트로크 시간은 짧은 것으로 측정되었다. 따라서 토출량과 스트로크 시간은 각각 펌핑 압력에 따라 비례와 반비례 관계의 경향이 뚜렷하다고 볼 수 있다.

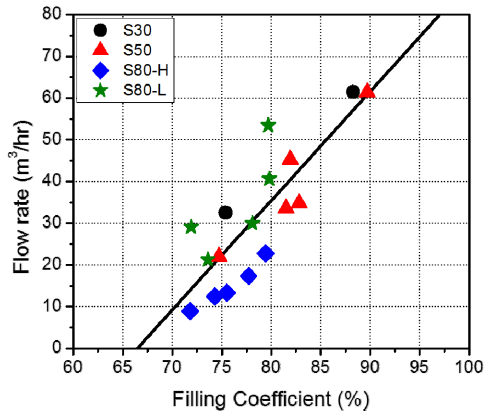
수평 길이의 펌핑 실험을 통해 측정된 토출량과 충전율의 관계, 그리고 스트로크 시간과 충전율의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 실험 결과를 살펴보면, 토출량은 충전율과 비례관계를 보이는 것을 알 수 있으며, 스트로크 시간은 충전율과 반비례관계를 보이는 것으로 나타났다. 스트로크 시간이 길수록 실린더 내에 채워지는 콘크리트의 양이 많을 것으로 예상한 것과는 다르게, 스트로크 시간이 짧을수록 실린더 내에 채워지는 콘크리트의 양이 더 많은 것으로 확인되었다.

Fig. 6은 스트로크 시간-충진율 관계 그래프를 일부 확대해서 나타낸 것이다. Fig. 6의 점선으로 표시한 부분을 살펴보면, 비슷한 스트로크 시간인데도 불구하고 충전율은 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 스트로크 시간에서는 콘크리트의 유동특성이 충전율에 영향을 미친다는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 콘크리트의 유동특성과 충전율의 관계를 분석하여 어떠한 상관성이 있는지를 확인해 볼 필요가 있다.

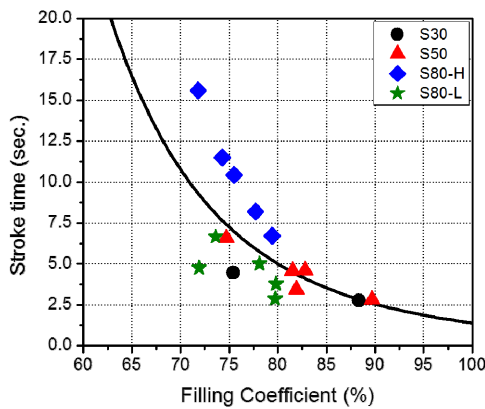
#### 3.2 콘크리트의 유동특성과 충전율 관계

콘크리트의 유동특성 및 펌핑 실험으로부터 측정된 충전율 측정 결과를 Table 4에 나타내었다. 펌핑 실험에 사용된 각 콘크리트 배합에 대한 유동특성 실험 결과를 살펴보면, 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 점도는 증가하는 경향을 보였다.

이는 고강도 콘크리트일수록 배합에 사용되는 결합재량이 많아



(a) Flow rate - filling coefficient



(b) Stroke time - filling coefficient

Fig. 5. Relationship between the pumping speed and the filling coefficient

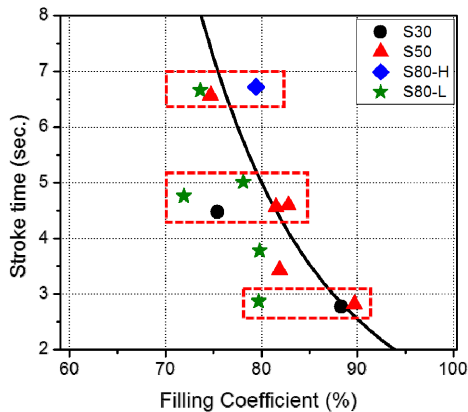


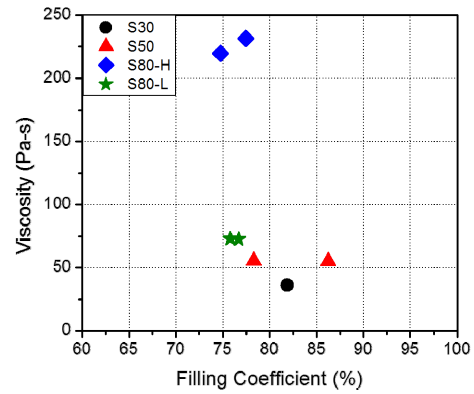
Fig. 6. Relationship between the stroke time and the filling coefficient

강도가 낮은 콘크리트에 비해 점도가 높은 것으로 사료된다.

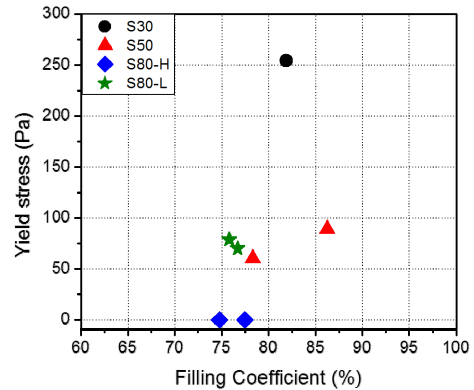
콘크리트의 유동특성과 충전율과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 결과를 살펴보면, 콘크리트의 점도와 항복응력 각각에

Table 4. Measured rheological properties of concrete

Mixture	Pipe length (m)	Viscosity (Pa · s)	Yield stress (Pa)	Filling coefficient (%)
S30	350	36.0	255	81.9
S50	350	54.9	89.0	86.6
	548	55.4	60.6	79.4
S80-H	350	231	0.10	77.5
	548	219	0.10	74.6
S80-L	350	72.7	79.5	75.8
	548	72.1	70.7	77.2



(a) Viscosity - filling coefficient



(b) Yield stress - filling coefficient

Fig. 7. Relationship between the rheological property and the filling coefficient

대해서는 충전율과의 관계를 찾아보기 어려운 것으로 보인다. 충전율은 콘크리트의 점도와 항복응력, 스트로크 시간 등 여러 가지 요인들에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문에, 콘크리트의 점도와 항복응력 각각에 대해서 충전율과의 상관성을 찾기에는 어려움이 있는 것으로 사료된다. 따라서 여러 영향 인자들을 동시에 고려해서 충전율과의 관계를 분석할 필요가 있다.

## 4. 충전율 모델 제안 및 민감도 분석

### 4.1 충전율 모델 제안

충진율은 콘크리트의 점도와 항복응력, 스트로크 시간 등 여러 가지 요인들에 의해 복합적으로 영향을 받는다. 따라서 여러 영향 인자들을 동시에 고려해서 충전율과의 관계를 분석할 필요가 있다. 이 연구에서는 여러 영향 인자들을 고려하여 충전율 예측 모델을 제안하고자 하였다. 이를 위해 콘크리트의 점도와 항복응력, 그리고 스트로크 시간을 동시에 고려하여 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석에 사용한 식은 다음의 식 (2)와 같으며, 충전율이 100%에서 각각의 영향인자들의 변화에 의해 감소되는 지수함수의 형태로 고려하였다.

$$r_{fc} = 100 - \alpha \cdot (\mu_c)^{n_1} \cdot (\tau_c)^{n_2} \cdot (t_{st})^{n_3} \quad (2)$$

여기서,  $r_{fc}$ 는 충전율(%),  $\mu_c$ 는 콘크리트의 점도(Pa·s),  $\tau_c$ 는 콘크리트의 항복응력(Pa),  $t_{st}$ 는 스트로크 시간(sec.)이다.  $\alpha, n_1, n_2, n_3$ 는 각각 회귀분석을 통해 얻고자 하는 상수이다. 회귀분석으로부터 얻어낸 상수들의 값은 Table 5에 나타내었다.

회귀분석을 통해 얻어낸 상수들의 값으로부터 콘크리트의 점도, 항복응력, 그리고 스트로크 시간이 작을수록 충전율은 높다는 것을 알 수 있다. 이 논문에서 제안한 모델의 정확성을 검증하기 위해 식 (2)로부터 계산된 충전율과 펌핑 실험으로부터 측정된 충

Table 5. Constant values found through the regression analysis

$\alpha$	$n_1$	$n_2$	$n_3$
0.606	0.505	0.147	0.552

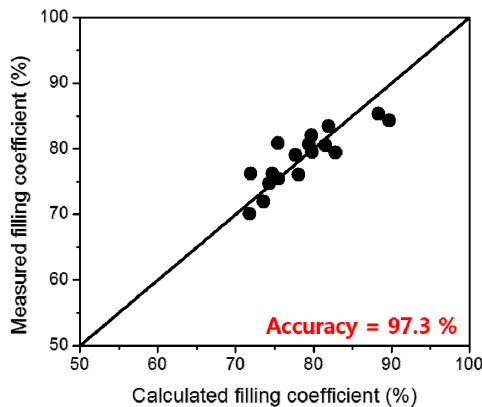


Fig. 8. Comparison between measured and calculated filling coefficients

진율을 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 정확도 계산은 아래의 식 (3)을 사용하였다.

$$Accuracy(\%) = \left( 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|measured\ F.C. - calculated\ F.C. |}{|measured\ F.C. |} \right) \times 100 \quad (3)$$

여기서,  $n$ 은 펌핑 실험 횟수를 나타낸다. 식 (2)의 제안식으로부터 계산한 충전율 값이 펌핑 실험으로부터 측정된 충전율을 약 97.3%의 높은 정확도로 예측하였다.

위의 결과로부터, 이 논문에서 제안한 충전율 모델식의 타당성이 검증되었다. 따라서 실제 현장에서 콘크리트의 유동특성과 스트로크 시간에 따른 펌핑 효율을 파악하는 데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

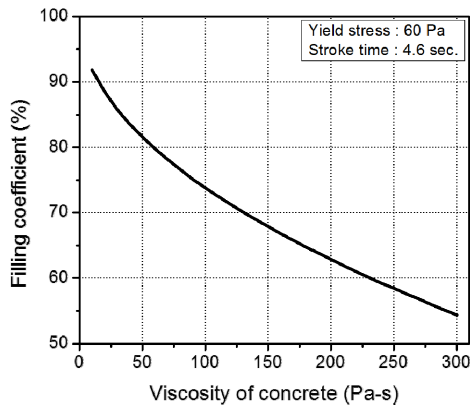
### 4.2 영향인자의 변화에 따른 충전율 변화량 분석

제안된 충전율 모델식을 이용하여 콘크리트의 점도와 항복응력, 그리고 스트로크 시간의 변화에 따른 충전율의 변화량을 분석하였다. Table 6과 같이 3가지 경우에 대하여 충전율을 계산하였다. Case 1은 항복응력과 스트로크 시간을 고정한 상태에서 점도만을 변화시킨 경우, case 2는 점도와 스트로크 시간을 고정한 상태에서 항복응력만 변화시킨 경우, 마지막으로 case 3는 점도와 항복응력을 고정한 상태에서 스트로크 시간만 변화시킨 경우이다. 펌핑 실험으로부터 측정된 충전율의 범위가 70%에서 90%인 것을 고려하여, 충전율이 80%인 경우의 콘크리트 점도, 항복응력, 그리고 스트로크 시간을 기준으로 콘크리트의 유동특성을 변화시키며 충전율의 변화량을 분석하였다.

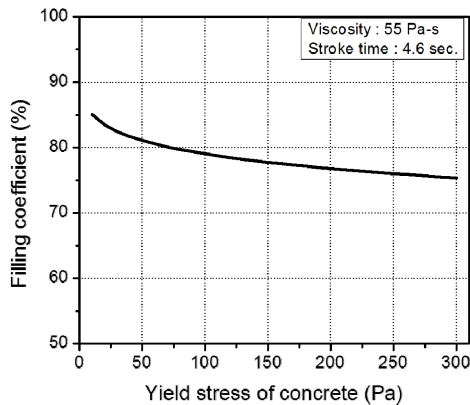
기준으로 정한 콘크리트의 점도와 항복응력, 그리고 스트로크 시간은 각각 55Pa·s, 60Pa, 그리고 4.6초이다. 콘크리트의 점도와 항복응력의 범위는 일반적으로 많이 사용되는 콘크리트의 유동특성 범위를 고려하여 점도는 10Pa·s에서 300Pa·s, 항복응력은 10Pa에서 300Pa의 범위로 하였고, 스트로크 시간은 펌핑 실험에서 측정된 모든 범위가 포함된 1초에서 15초를 범위로 하였다 (Table 6).

Table 6. Variation range of influence factors

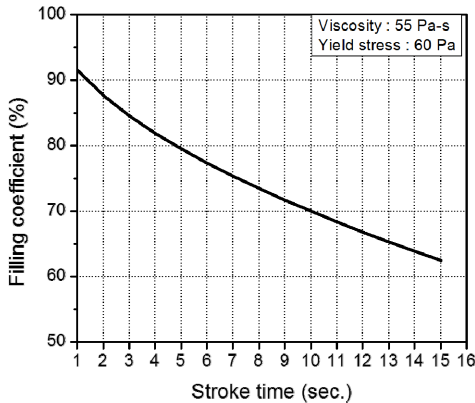
CASE	Viscosity (Pa·s)	Yield stress (Pa)	Stroke time (sec.)
1	10~300	60	4.6
2	55	10~300	4.6
3	55	60	1~15



(a) Viscosity - change of the filling coefficient(CASE 1)



(b) Yield stress - change of the filling coefficient(CASE 2)



(c) Stroke time - change of the filling coefficient(CASE 3)

Fig. 9. Results of the sensitivity analysis

Fig. 9는 콘크리트의 점도와 항복응력, 그리고 스트로크 시간의 변화에 따른 충전율의 변화량 분석 결과를 나타낸 것이다. 항복응력과 스트로크 시간을 고정한 상태에서 점도가 10Pa·s에서 300Pa·s까지 변화할 때의 충전율은 약 92%에서 54%까지로 변화폭은 거의 40% 가까이 되는 것으로 나타났다. 점도와 스트로크

시간을 고정한 상태에서 항복응력이 10Pa에서 300Pa까지 변화할 때의 충전율은 약 85%에서 75%까지로 변화폭은 10% 정도이다. 점도와 항복응력을 고정한 상태에서 스트로크 시간이 1초에서 15초까지 변화할 때의 충전율은 약 62.5%에서 92%까지로 변화폭은 30% 정도이다.

분석 결과를 살펴봤을 때, 충전율에 영향을 미치는 인자들 중에 콘크리트의 점도가 충전율의 변화량에 가장 민감한 것으로 밝혀졌으며, 두 번째로는 스트로크 시간, 그리고 항복응력 순으로 충전율의 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

기존에 수행된 350m와 548m 수평배관 펌핑 실험 데이터를 통하여 콘크리트의 유동특성, 토출량, 그리고 스트로크 시간과 충전율의 관계를 파악하였다. 또한 콘크리트의 유동특성과 스트로크 시간으로부터 충전율을 계산할 수 있는 모델을 제안하였다. 펌핑 실험에는 총 4가지 콘크리트 배합이 사용되었으며, 실험 결과를 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 실험을 수행한 모든 콘크리트 배합에서 토출량이 증가할수록 충전율은 증가하고, 스트로크 시간은 짧을수록 충전율이 증가하는 것으로 확인되었다.
2. 콘크리트의 유동특성과 스트로크 시간으로부터 충전율을 계산할 수 있는 모델식을 제안하였다. 제안된 모델식의 검증에 위해 펌핑 실험으로부터 측정된 충전율과 모델식으로부터 계산된 충전율과 비교하였다. 비교 결과, 계산된 충전율이 측정된 충전율을 약 97.3%의 높은 정확도로 예측하였다.
3. 제안된 충전율 모델식을 이용하여 콘크리트의 유동특성 변화에 따른 충전율의 변화량을 분석하였다. 항복응력과 스트로크 시간을 고정한 상태에서 점도가 10 Pa·s에서 300 Pa·s까지 변화할 때의 충전율의 변화폭은 거의 40% 가까이 되는 것으로 나타났다. 점도와 스트로크 시간을 고정한 상태에서 항복응력이 10Pa에서 300Pa까지 변화할 때의 충전율의 변화폭은 10% 정도이다. 점도와 항복응력을 고정한 상태에서 스트로크 시간이 1초에서 15초까지 변화할 때의 충전율의 변화폭은 30% 정도로 나타났다. 충전율에 영향을 미치는 인자 중 콘크리트의 점도가 충전율의 변화량에 가장 민감한 것으로 밝혀졌다.

## 감사의 글

본 연구는 삼성물산(주) 건설부문의 연구용역에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “국제공동 기술개발사업”의 지원을 받아 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

## References

- Choi, M.S., Kim, Y.S., Kim, J.H., Kim, J.S., Kwon, S.H. (2014a). Effects of an externally imposed electromagnetic field on the formation of a lubrication layer in concrete pumping, *Construction and Building Materials*, **61**, 18–23.
- Choi, M.S., Kim, Y.J., Jang, K.P., Kwon, S.H. (2014b). Effect of the coarse aggregate size on pipe flow of pumped concrete, *Construction and Building Materials*, **66**, 723–730.
- Gofaszewski, J., Szwabowski, J. (2004). Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars, *Cement and Concrete Research*, **34(2)**, 235–248.
- Jacobsen, S., Haugan, L., Hammer, T.A., Kalogiannidis, E. (2009). Flow conditions of fresh mortar and concrete in different pipes, *Cement and Concrete Research*, **39(11)**, 997–1006.
- Jeong, J.H., Jang, K.P., Park, C.K., Lee, S.H., Kwon, S.H. (2016). Effect of admixtures on pumpability for high-strength concrete, *ACI Materials Journal*, **113(3)**, 323–333.
- Kaplan, D., Larrard, F.D., Sedran, T. (2005). Design of concrete pumping circuit, *ACI Materials Journal*, **102(2)**, 110–117.
- Koehler, E.P., Fowler, D.W., Ferraris, C.F., Amziane, S. (2006). A new portable rheometer for fresh self-consolidating concrete, *Workability of SCC: Roles of Its Constituents and Measurement Techniques*, **233**, 97–116.
- Kwon, S.H., Jang, K.P., Kim, J.H., Shah, S.P. (2016). State of the art on prediction of concrete pumping, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **5(18)**, 1–11.
- Kwon, S.H., Jo, S.D., Park, C.K., Jeong, J.H., Lee, S.H. (2013a). Prediction of concrete pumping: Part I– Development of new tribometer for analysis of lubricating layer, *ACI Materials Journal*, **110(6)**, 647–656.
- Kwon, S.H., Jo, S.D., Park, C.K., Jeong, J.H., Lee, S.H. (2013b). Prediction of concrete pumping: Part II– Analytical prediction and experimental verification, *ACI Materials Journal*, **110(6)**, 657–668.
- Ngo, T.T., Kadri, E.H., Bennacer, R., Cussigh, F. (2010). Use of tribometer to estimate interface friction and concrete boundary layer composition during the fluid concrete pumping, *Construction and Building Materials*, **23(7)**, 1253–1261.

### 콘크리트펌프 유압실린더의 충전율 모델 제안

콘크리트의 펌핑에는 일반적으로 피스톤 펌프를 많이 사용한다. 충전율은 피스톤 펌프의 실린더 부피와 실린더 내에 채워지는 콘크리트의 부피비를 의미한다. 따라서 콘크리트 펌핑에서 토출량과 펌핑 효율에 직접적으로 영향을 미치는 인자라고 할 수 있다. 하지만 아직까지 이에 대한 정확한 분석은 이루어지지 않고 있다. 이 연구에서는 기존에 수행된 350m와 548m 수평배관 펌핑 실험 데이터를 바탕으로 콘크리트의 유동특성, 토출량, 그리고 스트로크 시간과 콘크리트펌프 충전율과의 관계를 파악하였다. 또한 콘크리트의 유동특성과 스트로크 시간으로부터 충전율을 계산할 수 있는 모델을 제안하였다.