J Rec Const Resources 8(4)413-420(2020)
https://doi.org/10.14190/JRCR.2020.8.4.413

Print ISSN : 2288-3320
Online ISSN : 2288-369X

펌핑 조건에 따른 콘크리트 작업성 변화 실내 평가 방법 제안

Suggestion of a Evaluation Method for Variation of Concrete Workability According to Pumping Condition through Lab-Scale Test

이정수[1] · 장경필[2] · 권승희[3*]
Jung-Soo Lee[1] · Kyong-Pil Jang[2] · Seung-Hee Kwon[3*]

(Received September 21, 2020 / Revised October 28, 2020 / Accepted October 30, 2020)

In this study, a new lab-scale test equipment was developed to evaluate the variation of concrete workability after pumping. The equipment was designed to simulate the pressure and shearing applied to concrete during actual pumping. In order to examine the feasibility of evaluating variation of concrete workability through lab-scale test equipment, real-scale pumping tests and lab-scale tests were performed together. The design strength of concrete used in the both tests was 24, 35, and 60MPa, and the length of pipe used in pumping tests was 130, 304, and 518m. The lab-scale tests were performed in consideration of actual pumping conditions(pressure, shearing, and pumping duration time). The workability(slump or slum flow) of concrete was measured before test, after the pumping test, and after lab-scale test. In all tests, workability of all concrete mixtures decreased. In addition, the results of both tests were measured greatly similarly.

키워드 : 콘크리트 펌핑, 압력, 전단, 작업성 변화, 실험 장비
Keywords : Concrete pumping, Pressure, Shearing, Variation of workability, Test equipment

1. 연구 배경 및 목적

대부분의 건설 현장에서 콘크리트 타설은 펌핑을 통해 이루어지며, 이 과정에서 콘크리트는 압력과 전단을 동시에 경험하게 된다. 펌핑 후 콘크리트의 작업성 변화는 압력과 전단에 의한 골재의 흡수율 증가 및 유동화제의 유효량 감소, 그리고 시간 경과 등 다양한 원인이 거론되고 있으며(Feys et al. 2016; Jang et al. 2018a; Jean et al. 2006; Secrieru et al. 2018), 압력과 전단에 의해 발생하는 작업성 변화가 시간 경과에 의한 변화보다 더 큰 것으로 알려져 있다. 특히 고층 건물, 장경간 교량 시공현장과 같이 장거리 펌핑이 요구되는 경우 콘크리트에 매우 높은 압력과 전단이 작용하기 때문에 작업성 변화도 크게 발생한다. 이로 인해 펌핑 전 콘크리트의 작업성이 품질관리기준을 만족하더라도 펌핑 후 타설 위치에서 품질기준을 만족하지 못하는 경우가 빈번하게 발생한다. 또한 펌핑 과정에서 재료분리 또는 작업성 저하가 발생할 경우 배관이 폐색될 수 있으며, 문제를 해결하는 과정에 상당한 시간과 비용 손실을 초래할 수 있다. 펌핑 후 콘크리트의 작업성 변화를 검토하기 위한 방법으로 실제 시공현장과 동일한 조건의 펌핑 실험을 수행하고 있다. 그러나 이 과정에서 많은 전문 인력과 시간, 비용이 소모되며, 실험에 필요한 공간 확보와 콘크리트의 생산 및 폐기 처리에 어려움이 있다. 따라서 보다 간편하고 경제적인 방법으로 펌핑에 의한 콘크리트의 작업성 변화를 평가하는 기술이 필요한 상황이다.

최근 콘크리트의 펌핑 메커니즘을 기반으로 시공성능을 예측하고 그 결과를 설계에 반영하기 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다. 현재 콘크리트의 유동특성과 시공 조건에 따라 펌핑성능을 정량적으로 예측하는 방법이 많은 연구자(Feys et al. 2015; Kaplan et al. 2005; Kwon et al. 2013a; 2013b; Kwon et al. 2016)

* Corresponding author E-mail: kwon08@mju.ac.kr
[1]명지대학교 하이브리드구조실험센터 연구교수 (Hybrid Structural Testing Center, Myongji University, Gyeonggi-do, 17060, Korea)
[2]한국건설기술연구원 국민생활연구본부 박사후연구원 (Department of Living and Built Environment Research, KICT, Gyeonggi-do, 10223, Korea)
[3]명지대학교 토목환경공학과 교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Gyeonggi-do, 17060, Korea)

Copyright ⓒ 2020 by Korean Recycled Construction Resources Institute
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

에 의해 제시되었으며 높은 정확성을 확보하고 있으나, 펌핑 후 콘크리트의 물성변화 평가에 대한 연구는 일부 콘크리트를 사용하여 실규모 펌핑 실험을 수행한 사례연구(case study)에 그쳐있다(Feys et al. 2016; Jang et al. 2018; Lee et al. 2012).

기존의 실규모 펌핑 실험과 다른 방법으로 콘크리트의 물성변화를 평가하기 위해서는 펌핑 메커니즘에 기반하여 실험 장비를 개발하고 펌핑 중 콘크리트가 받는 압력과 전단을 모사할 수 있어야 한다. 콘크리트 펌핑 메커니즘에 대한 기존 연구(Kwon et al. 2013b)에서 펌핑 중 배관 내부 벽면에 수 밀리미터의 얇은 윤활층이 형성되고, 이 영역에서 대부분의 펌핑 속도가 발현된다고 설명하였다. 또한 콘크리트의 유동특성과 펌핑 조건에 따라 배관 내부 콘크리트 전체가 플러그 흐름(plug flow) 거동을 보이는 경우, 전단 흐름(shear flow)과 플러그 흐름 거동을 동시에 보이는 경우, 그리고 콘크리트 전체가 전단 흐름 거동을 보이는 경우로 구분될 수 있음을 시사하였다.

실규모 콘크리트 펌핑 실험을 수행한 기존 연구(Choi et al. 2013; Choi et al. 2014; Jang et al. 2018a; 2018b)에서 콘크리트 펌핑 중 배관의 압력은 펌프 바로 앞에서 가장 높고 일반적으로 배관을 따라 선형적으로 감소하는 것을 확인하였다. 또한 펌핑 압력과 토출량 사이에는 선형적인 관계가 있으며(Jang and Choi 2019; Secrieru et al. 2018), 동일한 펌핑 조건(압력, 펌핑 거리, 배관의 직경)에서 윤활층의 점도가 콘크리트 토출량에 끼치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다(Jang et al. 2018b).

Jean et al.(2006)은 펌핑 후 콘크리트의 물성변화를 평가하기 위하여 콘크리트에 일정한 압력을 가할 수 있는 실내 실험 장비를 개발하였다. 그러나 펌핑 후 콘크리트의 물성변화를 정확하게 평가하기 위해서는 선형적으로 감소하는 압력과 배관 내부의 전단을 함께 고려할 수 있어야 한다.

이 연구에서는 콘크리트 펌핑 메커니즘을 바탕으로 콘크리트에 가해지는 압력과 전단을 모사할 수 있는 실내 실험 장비를 개발하였다. 또한 동일한 콘크리트에 대하여 실규모 펌핑 실험과 실내 모사 실험을 동시에 수행하여 개발된 실내 실험 장비를 통한 펌핑 후 콘크리트 작업성 평가 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 콘크리트 펌핑 메커니즘

2.1 재료 특성

굳지 않은 콘크리트(이하 콘크리트)는 항복응력 이하의 전단 조건에서 고체와 같이 거동하지만 항복응력 이상의 전단응력이 작용할 경우 유체와 같은 거동을 하는 성질이 있으며(Tattersall et al. 1983), 일반적으로 콘크리트는 다음 식에 나타낸 Bingham fluid 모델(Bingham 1992)을 사용하여 흐름 거동을 설명할 수 있다.

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

여기서 τ는 재료에 가해지는 전단응력(Pa), τ_0는 재료의 항복응력(Pa), μ는 재료의 소성점도(Pa s), 그리고 $\dot{\gamma}$는 재료에 가해지는 전단속도(shear rate)를 의미한다.

2.2 펌핑 중 배관 내부 콘크리트의 흐름

Fig. 1에 배관 내부 콘크리트의 흐름 메커니즘(Kwon et al. 2013b)을 나타내었다. 펌핑 중 배관 내부 벽면과 콘크리트 사이에는 수 밀리미터의 얇은 윤활층이 자연스럽게 형성되며, 배관 내부

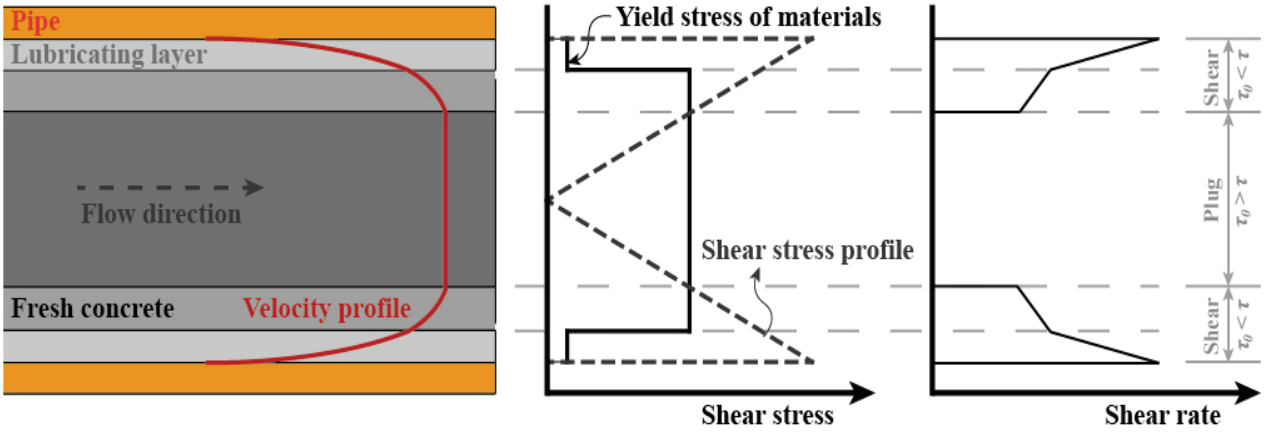

Fig. 1. Flow mechanism of concrete in the pipe during pumping

전 단면에 걸쳐 전단응력이 작용한다. 이때 재료의 항복응력 이상의 전단응력이 작용하는 영역에서는 전단 흐름(shear flow)이 발생하고 반대로 전단응력이 재료의 항복응력 이하로 작용하는 경우 정치 상태와 동일하게 볼 수 있는 플러그 흐름(plug flow)이 발생하게 된다. 윤활층의 점도와 항복응력이 콘크리트에 비해 매우 낮고 전단응력은 배관 내부 벽면에서 가장 크게 발생하므로 이 구간에서 대부분의 흐름 속도가 발현된다.

2.3 콘크리트가 받는 전단 및 압력

Fig. 2에 펌핑 중 콘크리트가 받는 전단과 압력을 개략적으로 나타내었다. 펌프의 호퍼로 쏟아진 콘크리트는 실린더 내부 피스톤의 수평 반복 이동을 통해 배관으로 이동한다. 펌프 내부의 콘크리트는 매우 높은 전단응력을 받게 되며 배관 내부에서는 상대적으로 낮은 전단응력이 일정하게 유지된다. 콘크리트가 받는 압력은 펌프에서 가장 높고 배관을 따라 선형적으로 감소하여 토출부에서 0이 된다.

3. 실내 실험 장비 개발

이 연구에서는 실제 펌핑 중 콘크리트가 받는 압력과 전단을 모사할 수 있는 장비를 개발하였으며, Fig. 3에 실험 장비의 사양을 나타내었다. 이 장비는 콘크리트 용기와 덮개, 전단을 가하기 위한 모터와 베인 회전체, 압력을 가하기 위한 유압 펌프, 베인의 회전속도와 시간에 따른 압력 변화를 제어할 수 있는 프로그램으로 구성되어 있다.

콘크리트 용기는 유압장치에 의해 발생하는 압력을 충분히 견

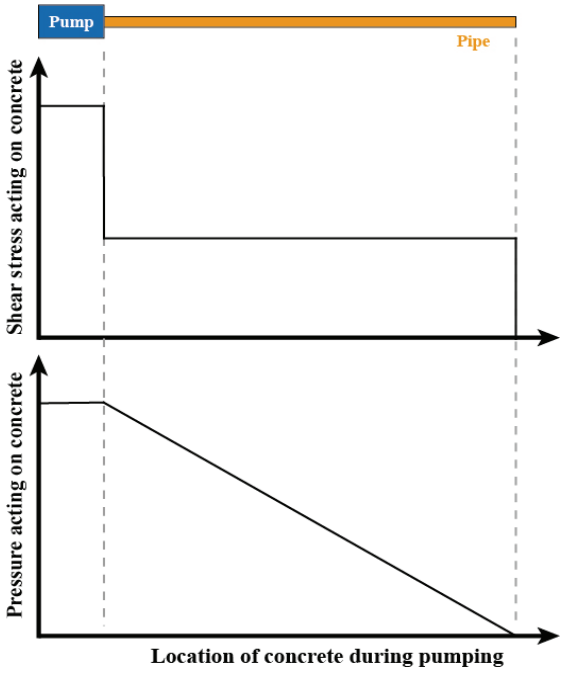

Fig. 2. Schematic description of shear stress and pressure acting on concrete during pumping

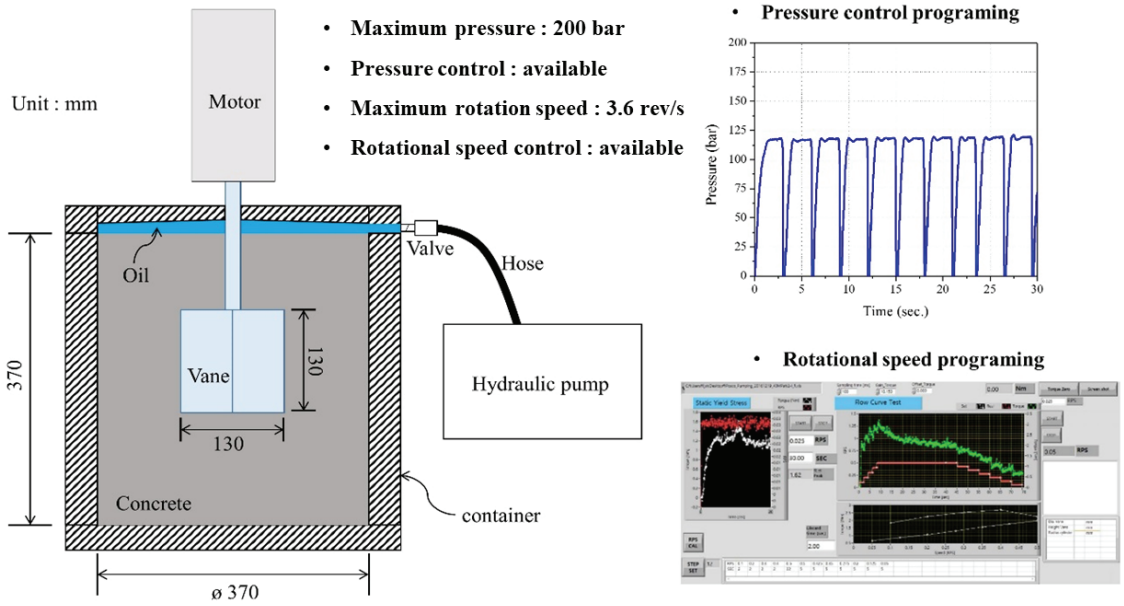

Fig. 3. Schematic description of equipment for pumping simulation

딜 수 있도록 제작되었으며, 유압장치는 콘크리트 펌핑 중 배관 내부 압력을 고려하여 최대 200bar의 압력을 가할 수 있도록 하였다. 베인 회전체는 최대 3.6rev/s의 속도로 회전할 수 있다. 제어 프로그램을 통해 피스톤 행정 과정에서 발생하는 압력의 맥동과 선형적으로 감소하는 압력을 구현할 수 있으며, 베인의 회전 속도를 제어할 수 있다. 용기와 베인의 크기는 기존 규격(KCI-UC111, 2019)에 따라 회전 중 굵은골재의 영향을 받지 않는 범위에서 결정하였다.

Fig. 4에 실내 실험 장비의 형상을 나타내었다. 용기와 콘크리트 계면에서의 미끄러짐을 방지하기 위해 용기 내부에 원주 방향으로 돌기를 두었다. 베인 회전체는 용기 덮개에 결합되어 있으며 높은 압력조건에서도 덮개와 회전체의 축 사이에 발생하는 마찰력을 최소화하도록 제작되었다. 실험 장비의 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 2.6, 1.5, 2.7m로 실내 배치가 용이하다.

4. 실내 실험 장비를 사용한 펌핑 후 콘크리트 물성변화 평가 가능성 검토

이 연구에서는 실규모 펌핑 실험과 실내 모사 실험을 동시에 수행하였으며, 두 실험에서 측정된 콘크리트의 슬럼프 변화를 서로 비교하였다.

4.1 재료 및 장비

이 연구에서는 Table 1에 나타낸 것과 같이 설계기준압축강도가 서로 다른 세 가지 콘크리트 배합(24, 35, 60MPa)을 사용하였다. 콘크리트 배합에 사용된 굵은 골재의 최대 직경은 모두 25mm이다. C는 1종 보통 포틀랜드 시멘트, FA는 플라이애시, BS는 고로슬래그, AD는 polycarboxylate 계열의 고성능 감수제이다. 시멘트, 플라이애시, 고로슬래그의 비중은 각각 3.15, 2.23, 2.20이다.

Fig. 5에 실규모 펌핑 실험에 사용된 펌핑 서킷(circuit)의 구성을 나타내었다. 배관의 직경은 127mm이며, 펌프로부터 토출부까지의 거리는 세 종류(120, 304, 518m)로 구분된다. 배관 내 최대 압력을 측정하기 위하여 펌프로부터 2m 위치에 압력센서를 설치하였다.

Table 1. Concrete mixture proportions

Design strength(MPa)		24	35	60
W/B(%)		50.8	37.6	24.3
S/a(%)		51.0	48.3	45.1
Unit weight (kg/m^3)	W	164	160	160
	C	210	277	526
	FA	48.0	64.0	-
	BS	65.0	85.0	132
	S	916	827	688
	G	900	906	858
	AD	2.26	2.98	7.90

FA=fly ash, BS=ground granulated blast-furnace slag, and AD=polycarboxylate high-range water reducing agent.

(a) Container (b) Vane spindle (c) installed equipment

Fig. 4. Detail of equipment for pumping simulation

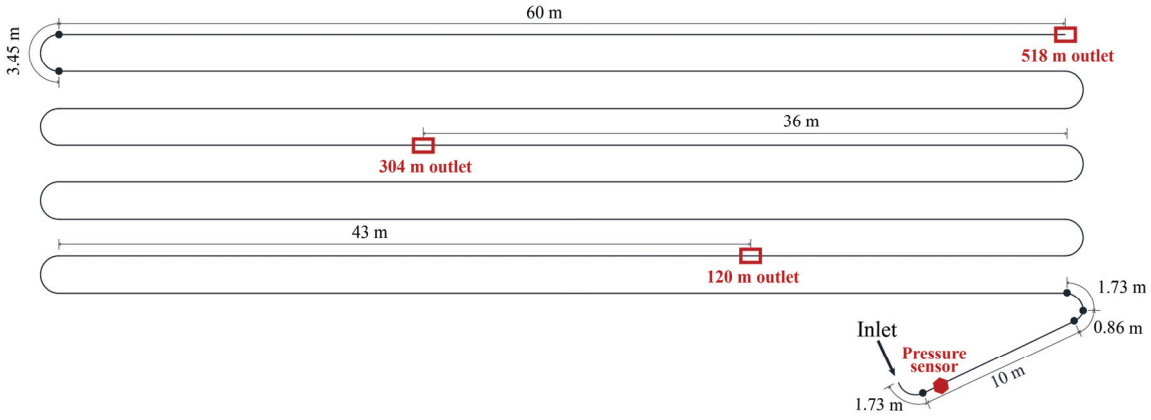

Fig. 5. Details of pumping circuit for real-scale concrete pumping

4.2 실험 방법

Fig. 6에 이 연구에서 수행한 실험 방법을 나타내었다. 실규모 펌핑 실험 과정에서 배관 내부의 압력을 측정하였으며, 토출부에 사각형 박스를 설치하여 콘크리트 부피와 채움 시간 측정 결과로부터 토출량을 계산하였다. 이 결과로부터 콘크리트가 배관을 따라 이동하는 시간과 베인의 회전속도를 계산하여 실내 모사 실험에 적용하였다. 콘크리트의 이동 시간은 펌핑 거리와 배관의 반경, 실험으로부터 측정된 토출량을 사용하여 다음 식(2)를 따라 계산된다. 펌프 내부에서의 콘크리트 이동 시간은 피스톤 행정 시간(stroke time, t_S)을 직접 측정하여 실내 실험에 적용하였다.

$$t_D = \frac{\pi R_P L_P}{Q_C} \times 3600 \tag{2}$$

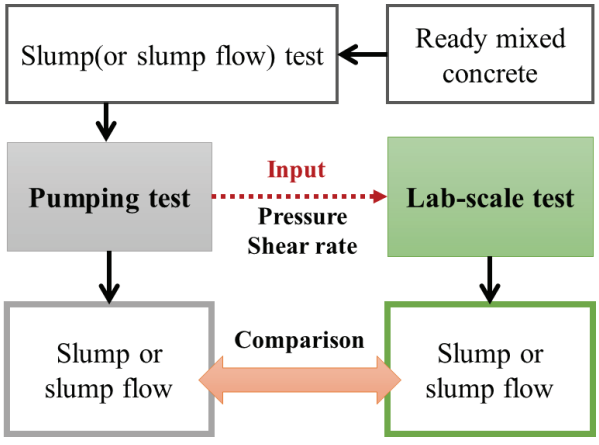

Fig. 6. Experimental method for examining field application of lab-scale test equipment

여기서 t_D는 콘크리트가 배관을 따라 이동하는 시간(s), R_P는 배관의 내부 반경(m), L_P는 배관의 길이(m), 그리고 Q_C는 측정된 콘크리트의 토출량(m^3/h)을 의미한다.

배관 내부 콘크리트에 작용하는 전단을 고려하기 위한 베인의 회전속도는 베인과 배관의 반경, 콘크리트 토출량을 고려하여 다음 식(KCI-UC111)에 따라 계산하였다.

$$\Omega_V = \frac{Q_c}{7200\pi^2 R_V R_P^2} \tag{3}$$

여기서 Ω_V는 베인의 회전속도(rev/s), 그리고 R_V는 베인의 반경(m)을 의미한다.

실험 수행 전, 실규모 펌핑 실험 후, 그리고 실내 실험 후 콘크리트의 슬럼프(또는 슬럼프 플로)를 표준시험방법(KS F 2402, KS F 2594)에 따라 측정하였다.

Table 2에 실험 변수를 나타내었다. 변수명 L1, L2, L3는 각각 펌핑 거리 120, 304, 518m를 나타내며, S24, S35, S60은 각각 콘크리트의 설계기준압축강도를 의미한다. 실험변수 L1-S24의 경우 동일한 실험을 2회 반복 수행하였다.

Table 2. Variable of concrete pumping tests

Designation	Pipe length(m)	Design strength(MPa)
L1-S24	120	24
L2-S60	304	60
L3-S35	518	35
L3-S60	518	60

4.3 결과 및 분석

Table 3에 실규모 펌핑 실험 중 측정된 최대 압력과 토출량, 피스톤 행정 시간을 나타내어다. 또한 식(2)와 식(3)을 따라 콘크리트의 배관 이동 시간(=펌핑 시간)과 베인의 회전속도를 계산하여 함께 나타내었다. Table 3에 나타낸 결과를 고려하여 실규모 펌핑 실험과 유사한 조건으로 실내 모사 실험을 수행하였다.

Table 4에 실험 전, 실규모 펌핑 후, 실내 모사 실험 후의 슬럼프 및 슬럼프 플로우 측정 결과를 나타내었다. 펌핑 후 모든 콘크리트의 작업성이 감소하였으며, 실내 실험 결과 또한 유사한 경향을 보인다. Fig. 7에 모든 실험 변수에 대한 펌핑 후 작업성(슬럼프 또는 슬럼프 플로)과 실내 실험 후 작업성을 서로 비교하여 나타내었다. 실내 실험을 통해 측정된 슬럼프 변화가 실제 펌핑 결과와 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 식(4)를 사용하여 계산된 실내 실험 방법의 정확성은 약 92%로 나타났다.

$$Accuracy(\%) = \left(1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|S_P - S_L|}{|S_P|}\right) \times 100 \qquad (4)$$

여기서, S_P는 실규모 펌핑 후 측정된 콘크리트 슬럼프 또는 슬럼프 플로(mm), S_L는 실내 모사 실험 후 측정된 콘크리트 슬럼프 또는 슬럼프 플로(mm), 그리고 n은 실험 횟수를 의미한다.

Table 3. Measured pumpability of concrete and calculated pumping duration

Designation	Measured			Calculated	
	Max. pressure (bar)	Discharge rate, Q_C(m³/h)	Stroke time, t_S(s)	Pumping duration, t_D(s)	Rotation speed of vane, Ω_V(rev/s)
L1-S24-1	25.1	40.0	7	137	2.22
L1-S24-2	20.2	40.0	7	137	2.22
L2-S60	45.6	38.8	7	357	2.15
L3-S35	69.6	25.9	9	912	1.44
L3-S60	69.0	35.4	6	667	1.96

Table 4. Result of slump or slump flow test

Designation	No.	Slump or slump flow(mm)		
		Before test	After pumping	After lab test
L1-S24	1	180	90	90
	2	155	140	130
L2-S60	1	665	525	600
L3-S35	1	90	30	30
L3-S60	1	220	140	120

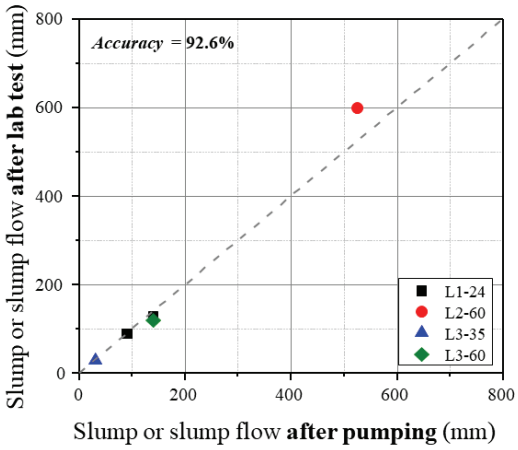

Fig. 7. Comparison of concrete slump(or slump flow) after lab-scale test and real-scale pumping test

이 실험 결과는 일부 콘크리트 배합에 대한 사례연구로써 이 연구에서 개발된 실내 실험 장비의 정확성을 일반화하기에는 어려움이 있으나, 실내 실험만으로 펌핑 후 콘크리트의 물성변화 평가가 가능하다는 것을 알 수 있다. 장비의 개선과 실험 방법의 정립을 통해 현장 콘크리트의 펌핑 후 물성변화를 평가하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 펌핑에 의한 콘크리트의 작업성 변화를 평가하기 위한 실내 실험 장비를 개발하였다. 이 장비를 사용한 실내 평가 가능성을 검토하기 위하여 세 가지 콘크리트 배합(24, 35, 60MPa)과 세 가지 길이의 배관(120, 304, 518m)을 사용한 실규모 펌핑 실험을 수행하였으며, 펌핑 실험과 동일한 조건을 적용하여 실내 실험을 수행하였다. 실험 과정에서 콘크리트의 슬럼프 및 슬럼프 플로를 측정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 펌핑 후 콘크리트의 작업성 변화를 평가하기 위한 실내 실험 장비를 개발하였다. 이 장비는 펌핑 중 배관 내부의 콘크리트가 받는 압력과 전단을 모두 고려할 수 있도록 제작되었다. 콘크리트가 담겨진 내압 용기에 최대 200bar의 압력을 가할 수 있다. 또한 베인 회전체를 사용하여 펌핑 중 콘크리트가 받는 전단을 모사할 수 있다.
2. 실내 실험 장비는 제어 프로그램을 통해 콘크리트에 가해지는 압력과 베인의 회전속도를 시간에 따라 변화시킬 수 있도록 설계되었다. 피스톤 펌프의 맥동을 고려할 수 있으며, 배

관을 따라 선형적으로 감소하는 압력을 모사할 수 있다.

3. 실내 실험 장비를 사용한 펌핑 후 콘크리트 작업성 변화 평가 가능성을 검토하기 위하여 실규모 펌핑 실험과 동일한 펌핑 조건의 실내 모사 실험을 수행하였다. 모든 실험 후 콘크리트의 슬럼프(또는 슬럼프 플로)가 감소하였으며, 실규모 펌핑 실험과 실내 실험 결과가 매우 유사한 것을 확인하였다.

이 연구에서 실내 실험 장비를 사용하여 펌핑 후 콘크리트의 작업성 변화 평가가 가능함을 확인하였다. 추후 연구에서는 펌핑 중 콘크리트의 유동특성(점도와 항복응력) 변화 이력을 검토하기 위한 장비 개선이 이루어질 계획이며, 다양한 압력 및 전단 조건에서의 실험을 통해 콘크리트의 작업성 및 유동특성 변화 메커니즘을 정량적으로 분석하고자 한다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/구토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20TBIP-C158690-01).

References

Bingham, E.C. (1922). Fluidity and Plasticity, Mcgraw-Hill Book Co, Inc.

Choi, M.S., Kim, Y.S., Kim, J.H., Kim, J.S., Kwon, S.H. (2014). 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., Roussel, N., Kim, Y.J., Kim, J.K. (2012). Lubrication layer properties during concrete pumping, Cement and Concrete Research, **45**, 69-78.

Feys, D., Schutter, G.D., Khayat, K.H., Verhoeven, R. (2016). Changes in rheology of self-consolidating concrete induced by pumping, Materials and Structures, **49**, 4657-4677.

Jang, K.P. (2018). Design of Concrete Pumping Performance Based on Quantitative Prediction, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering of Myongji University, Korea [in Korean].

Jang, K.P., Choi, M.S. (2019). How affect the pipe length of pumping circuit on concrete pumping, Construction and Building Materials, **208**, 758-766.

Jang, K.P., Kwon, S.H., Choi, M.S., Kim, Y.J., Park, C.K., Shah, S.P. (2018a). Experimental observation on variation of rheological properties during concrete pumping, International Journal of Concrete Structures and Materials, **13(2)**, 167-181.

Jang, K.P., Kim, W.J., Choi, M.S., Kwon, S.H. (2018b). A new method to estimate rheological properties of lubricating layer for prediction of concrete pumping, Advanced in Concrete Construction, **6(5)**, 465-483.

Jean, S.S., Kim, S.H., Ji, S.W., Seo, C.H., Kim, O.J., Lee, D.B. (2006). An experimental study on the quality variation of concrete caused by high pressure in pumping, Proceedings of the Korea Concrete Institute, Korea Concrete Institute, **18(1-2)**, 613-616 [in Korean].

KCI-UC111. (2019). Standard Test Method for Estimation of Changed Concrete Properties after Pumping using Pressure Container and Vane Impeller, Korea Concrete Institute.

Kim, J.S., Kwon, S.H., Jang, K.P., Choi, M.S. (2018). Concrete pumping prediction considering different measurement of the rheological properties, Construction and Building Materials, **171**, 493-503.

KS F 2402 (2017). Standard Test Method for Concrete Slump, KS Standard, Korea [in Korean].

KS F 2594 (2015). Method of Test for Slump Flow of Fresh Concrete, KS Standard, Korea [in Korean].

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, **10(3)**, 75-85.

Kwon, S.H., Jo, S.D., Par, C.K., Jeong, J.H., Lee, S.H. (2013a). Prediction of concrete pumping: Part I. Development of a new tribometer to measure rheological properties of lubricating layer, ACI Materials Journal, **110(6)**, 647-655.

Kwon, S.H., Jo, S.D., Par, C.K., Jeong, J.H., Lee, S.H. (2013b). Prediction of concrete pumping: Part II. Experimental verification for prediction of pumping considering lubricating layer, ACI Materials Journal, **110(6)**, 657-667.

Lee, J.H., Moon, H.J., Kim, J.J. (2012). An experimental study on pumpability characteristics of high strength concrete mixed polymix, Journal of the Korea Concrete Institute, **24(5)**, 509-516. [in Korean].

Secrieru, E., Cotardo, D., Mechtcherine, V., Lohaus, L., Schrofl, C. (2018). Changes in concrete properties during pumping and

formation of lubricating material under pressure, Cement and Concrete Research, **108**, 129–139.

Tattersall, G.H., Banfill, P.F. (1983). The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Advanced Publishing Program, London, UK.

펌핑 조건에 따른 콘크리트 작업성 변화 실내 평가 방법 제안

이 연구에서는 펌핑 후 콘크리트의 작업성 변화를 실내에서 평가하기 위한 새로운 실험 장비를 개발하였다. 이 장비는 실제 펌핑 중 콘크리트가 받는 압력과 전단을 모사할 수 있도록 설계되었다. 실내 실험 장비를 사용한 펌핑 후 콘크리트 작업성 변화 평가 가능성을 검토하기 위하여 실규모 펌핑 실험과 실내 모사 실험을 동시에 수행하였다. 실규모 펌핑 실험에 사용한 콘크리트의 설계기준압축강도는 24, 35, 60MPa이며, 배관의 길이는 130, 304, 518m이다. 펌핑 실험과 동일한 콘크리트를 사용하여 실제 펌핑 조건(압력, 전단, 펌핑 시간)을 고려한 실내 모사 실험을 수행하였다. 실험 전, 실규모 펌핑 실험 후, 실내 모사 실험 후 콘크리트의 작업성(슬럼프 또는 슬럼프 플로)을 측정하였다. 실규모 펌핑 실험과 실내 실험 모두 콘크리트의 작업성이 감소하였으며, 두 실험의 결과가 매우 유사하게 측정되었다.