

콘크리트의 레올로지 특성에 따른 펌핑관내 마찰저항계수의 예측에 관한 연구

Prediction of Pumping Friction Resistance Coefficient in Pipe Influenced by Concrete Rheology Properties

김형래* 조호규 김정철 이근주

Kim, Hyung-Rae* Cho, Ho-Kyoo Kim, Jung-Chul Lee, Kewn-Chu
R&D Division, Hyundai Engineering & Construction, YongIn-Si, GyungGi-Do, 446-712, Korea

Abstract

The establishment of the technology for evaluating friction resistance and pipe pressure and the relation of the fluid characteristics and pumpability of concrete is essential for concrete pumping performance for the rapid construction of super-tall buildings. In this study, a quantitative evaluation of concrete fluid characteristics and surface friction resistance was performed, applying different concrete mix proportions and pumping conditions. To achieve this, we developed a temporary horizontal pumping evaluation system to measure pipe pressure and surface friction characteristics, and performed an experiment to investigate the relations between concrete rheology characteristics and friction resistance in pipe. The experiment found that in terms of the rheology characteristics, plastic viscosity was reduced remarkably after pumping. As well, high regression between the surface friction and pressure gradient was confirmed. This means that it is possible to evaluate the friction resistance between concrete and pipe by means of a pumping system that includes a frictional resistance testing pipe. In addition, high regression between the plastic viscosity of concrete after pumping and friction resistance coefficient was confirmed. Finally, it is considered that pumping pressure can be predicted using the friction resistance coefficient derived in this study, and it has high regression

Keywords : concrete pumping, rheology, friction resistance coefficient

1. 서론

초고층으로의 콘크리트 펌핑에 있어서 압송성능은 콘크리트의 배합조건에 따라 크게 달라지는데, 고강도 콘크리트가 사용됨에 따라 점성증대로 인해 토출량이 감소되거나 압송 후 콘크리트의 유동성 저하 또는 재료분리 등에 의해 시공성이 저하되어 품질불량이 발생하는 등의 문

제점이 지적되고 있다[1]. 따라서, 초고층 건축물의 고속 시공이 가능하도록 하기 위한 펌핑기술을 확보하기 위해서는 콘크리트의 유동특성과 펌프압송성의 관계를 정량화하고 펌프 압송시 관내마찰 저항력을 평가하는 기술이 필수적이라 할 수 있다.

그러나, 실제 초고층현장에 있어서는 콘크리트 펌프 압송성의 평가를 위해 장거리 수평배관에 의한 실험이 수행되고 있으며, 주요 펌프 장비업체의 경험적인 데이터에 전적으로 의존하고 있는 실정이다. 이로 인해, 콘크리트의 재료적 특성에 기인하는 압송 메커니즘의 규명 및 정량화를 통한 사전예측 단계에까지는 이르지 못하고 있는 것이 현재의 기술 수준이다[2]. 특히 최근 들어 콘크리트의 압축강도 증가에 따른 결합재의 증가와 고성능 감수제

Received : September 21, 2012
Revision received : October 22, 2012
Accepted : October 23, 2012
* Corresponding author : Kim, Hyung-Rae
[Tel: 82-31-280-7389, E-mail: hrkim@hdec.co.kr]
©2014 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

의 사용에 따른 콘크리트의 점성 증대로 인해 압송부하가 증가되고, 관내에서의 유동특성이 복잡해짐에 따라 레올로지적 특성에 기반을 둔 평가 및 해석이 필수적으로 요구되고 있다[2,3].

따라서, 본 연구에서는 펌프 압송시 콘크리트의 배합조건에 따른 유동특성과 펌핑속도 등에 영향을 받는 관내마찰저항계수를 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 하였다.

2. 콘크리트의 관내 유동과 마찰저항의 관계

콘크리트 압송시 콘크리트와 배관내부표면 사이에는 미끄럼에 따른 마찰저항이 발생하게 되며, 관내벽면에 있어서의 마찰저항이 압력손실의 주된 원인이므로, 내부마찰저항은 콘크리트의 관내 유동 및 펌프 압송성을 평가함에 있어서 매우 중요한 요소가 된다[2,4]. 한편, 배관의 구간길이 l 과 반지름 R 을 갖는 관을 구간 압력차 ΔP 로 유체가 통과할 때, 관의 내벽면 부근에 발생하는 최대 전단력 τ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$\tau = \frac{\Delta P \pi R^2}{2\pi R l} = \frac{\Delta P R}{2l} \quad (1)$$

여기서, τ : 관벽에 작용하는 콘크리트 최대 전단력(Pa)

R : 배관의 반지름(cm)

ΔP : 콘크리트가 펌핑에 의해 길이 l 인 구간을 통과할 때 발생하는 배관내 압력차(Pa)

l : 배관의 구간 길이(cm)

한편, 점성이 높은 고강도 콘크리트가 관내에서 이동할 때, 유동속도는 미끄럼 유량(Q_S)에 의해 결정된다고 할 수 있으며, 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_R = \frac{Q_S}{\pi R^2} = \frac{Q - Q_B}{\pi R^2} \quad (2)$$

여기서, V_R : 미끄럼 속도(m/s)

Q : 전체 유량(m³/s)

콘크리트의 관내유동에 의한 마찰저항응력은 식(3)과

같이 미끄럼 속도와 관계식으로 나타낼 수 있는데, 이때 비례계수인 α 를 미끄럼 소성점도 또는 마찰저항계수라 한다. 한편, 펌프압송실험을 통하여 얻어지는 미끄럼 마찰저항응력이 배관 내벽에 작용하는 최대 전단력과 동일하다고 가정하여 식(4)와 같이 나타낼 수 있으며, 식(5) 및 식(6)에 의해 마찰저항계수에 의한 관내압력 추정이 가능한 것으로 판단된다[2,6].

$$f_R = \alpha V_R + C \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\Delta P \pi R^2}{2\pi R l} = \frac{\Delta P R}{2l} = f_R = \alpha V_R + C \quad (4)$$

$$\frac{\Delta P R}{2l} = \alpha V_R + C \quad (5)$$

$$\Delta P = \frac{2l}{R}(\alpha V_R + C) \quad (6)$$

여기서, f_R : 미끄럼 마찰저항응력(Pa)

α : 마찰저항계수(Pa · s/cm)

V_R : 미끄럼 속도(m/s)

C : 상수

3. 실험

3.1 실험인자 및 수준

Table 1에 나타난 바와 같이, 콘크리트의 유동특성 차이가 펌핑 시 관내압력에 미치는 영향을 파악하는 것을 목적으로 유동특성에 변화를 주기 위해 콘크리트의 압축강도와 플로우값 및 잔골재율을 배합조건에 따른 실험인자로 설정하고, 압송속도를 펌핑조건에 따른 실험인자로 설정하였다. 슬럼프 및 슬럼프 플로우는 압축강도 60MPa에 대해 500mm, 600mm, 700mm의 3개 수준, 80MPa 및 100MPa에 대해서는 700mm로 설정하였다. 또한, 잔골재율의 경우, 압축강도 80MPa 배합에 대해 3수준으로 설정하여 비교하였으며, 기타 배합조건에서는 해당 배합에 있어서 최적의 잔골재율을 결정하여 적용하였다. 펌핑조건에 있어서는 압송속도를 달리 하기 위해 펌핑주기(스트로크 타임)를 3~12초 범위 내에서 4단계로 나누어서 차등적으로 적용하였다.

Table 1. Experimental factors

Factor		Level
Concrete Mix Proportion	Compressive strength (MPa)	60, 80, 100
	Slump flow (mm)	500, 600, 700
Pumping Condition	Sand aggregate ratio (S/a)	42, 45, 47
	Speed level	Level 1, 2, 3, 4 (3~12 sec.)

3.2 사용재료

시멘트는 한국산 보통포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 시멘트를 혼합하여 사용하였으며, 고로슬래그 시멘트 중의 고로슬래그 미분말 함량은 40%였다. 실험에 사용된 골재는 KS 품질 기준에 적합한 것을 사용하였다. 화학혼화제는 국내 KMB사의 폴리카본산계 고성능 AE감수제를 사용하였으며, 배합별 목표 슬럼프 및 강도에 따라 고유동화제의 종류 및 사용량을 변화시켜, 80~100MPa 배합의 경우 Megad-8500SF, 60MPa의 경우 Megad-2500을 사용하였다.

Table 2. Concrete mix proportion

Grade	W/B	S/a	Unit Weight (kg/m ³)					AD (%)	
			W	OPC	BFS	SF	S		
20-60-500		44.1					315	914	5.1
20-60-600	27.2	44.3	163	432	168		316	912	5.4
20-60-700		44.5					317	908	5.7
20-80-700-42%		42					655	924	11.22
20-80-700-45%-1	23.9	45	158	521	105	34	701	876	11.22
20-80-700-47%		47					732	844	11.22
20-80-700-45%-2	24.7	45	158	506	102	32	708	884	10.88
20-100-700-1	20.7	42	145	504	112	84	647	912	16.8
20-100-700-2	21.3	42	145	489	109	82	655	922	16.32

3.3 콘크리트 배합

콘크리트 배합은 Table 2와 같으며, 압축강도 80MPa과 100MPa 콘크리트에 대해서는 기준배합보다 단위결합재량을 각각 20kg/m³ 저감시킨 배합을 추가로 고려하였다.

3.4 실험내용 및 방법

3.4.1 콘크리트의 기초 물성 및 레올로지 특성

콘크리트의 기본적인 물성실험으로서 슬럼프플로우, 공기량, 플로우 500mm 도달시간, V-lot 유하, L-flow 500mm 도달시간 등을 측정하고, 콘크리트용 포터블 레

오미터(ICAR사제)를 이용하여 콘크리트의 레올로지 특성인 항복응력과 소성점도를 구하였다[7,8]. 한편, 콘크리트의 기초물성 및 레올로지 특성에 대해 펌핑 전후의 변화를 확인하였다. 콘크리트 레올로지는 설정된 회전수별로 측정된 토크값으로부터 자동으로 산출되는 전단응력과 전단변형속도로부터 구했으며, 정적실험에서 구한 최대전단력으로부터 항복응력을 구하고, 동적실험결과에 의한 측정값을 직선회귀하여 얻어지는 직선 기울기로부터 소성점도로 산출하였다.

3.4.2 수평배관 펌프압송 및 압력계측

펌프압송실험에는 직경 125mm의 고압용 배관을 사용하였으며, 직선배관 38.3m, 90° 벤트관 7.3m, 45° 벤트관 2.4m, 30° 벤트관 2.4m로서 총 50.4m의 수평배관 간에 펌프압송성 평가시스템을 활용하였다. 펌핑압력은 메인유압과 함께, 펌프실린더로부터 각각 9.7m(P1), 13.2m(P2), 43.2m(P3) 지점의 배관에 설치된 압력센서에 의해 측정되었으며, 측정된 압력값은 데이터 수신장치를 통해 저장되었다.



Figure 1. Test of concrete rheology

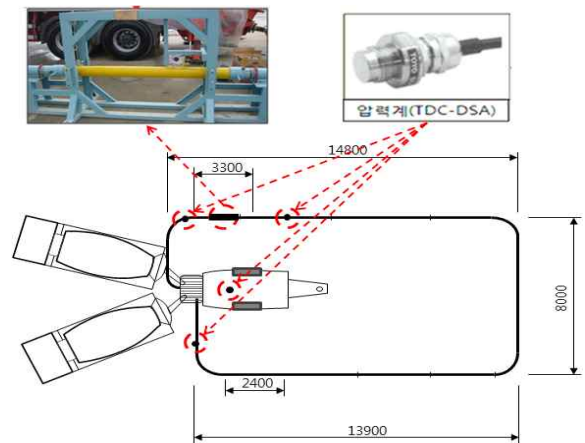


Figure 2. Temporary pumpability evaluation system

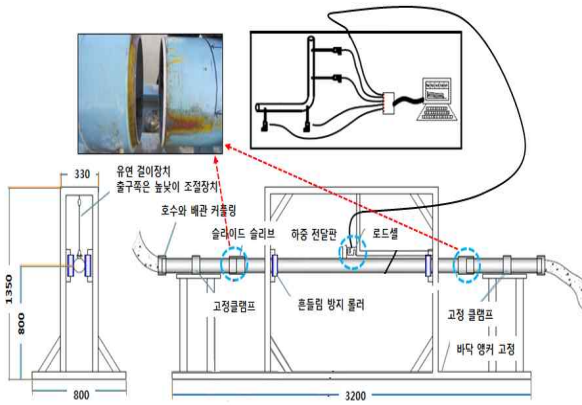


Figure 3. Test equipment to perform friction resistance evaluation

3.4.3 관내마찰저항력

압송관내 마찰저항력의 계측을 위해 길이 2.0m, 압송관 내경 125mm의 강관을 축방향으로 자유로운 거동이 가능하도록 제작하였다. Figure 3과 같이 관 사이의 실리콘 소재의 조인트가 축방향으로 자유로운 거동이 가능하게 하며, 콘크리트가 관내마찰저항 측정 시험배관을 통과하여 흘러갈 때 배관내부의 마찰력에 기인한 변위에 의해 로드셀에 하중이 작용하여 데이터가 측정되는 방식으로 제작하였다

배관에 작용하는 미끄럼 마찰저항응력은 수평배관 간 이 펌프압송성 평가시스템의 일부로서 구축한 관내마찰저항 시험장치를 통해 측정된 압송관에 작용하는 하중(F)으로부터 식(7)에 의해 산정할 수 있다[2,6].

$$f_R = F/2\pi Rl \text{-----} (7)$$

여기서, f_R : 미끄럼 마찰저항응력(N/cm²)

F : 압송관에 작용하는 하중(N)

R : 반지름(cm)

l : 관 길이(cm)

4. 실험결과 및 고찰

4.1 콘크리트의 기초 물성 및 레올로지 특성

펌프압송 전후의 굳지 않은 콘크리트의 물성 및 레올로지 특성을 측정하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Test result for properties and rheology of concrete

Grade of concrete		Slump flow (mm)	Slump flow 500mm (sec)	Air (%)	V-lot (sec)	L-flow (sec)	Yield stress (Pa)		Viscosity (Pa·s)
							Static	Dynamic	
20-60-500	before	570/570	3.25	4.0	9.59	5.21	142.2	37.2	57.8
	after	430/430	N.A.	4.3	6.04	N.A.	169.9	56.0	38.8
20-60-600	before	720/720	2.18	4.7	6.10	2.88	54.3	0.1	28.1
	after	560/560	2.52	4.7	4.13	1.36	136.8	75.8	18
20-60-700	before	770/770	2.5	4.2	5.14	2.33	185.3	14.5	38.8
	after	700/700	1.56	6.0	3.28	1.20	65.5	17.2	16.5
20-80-700 (42%)	before	750/750	1.98	4.0	7.66	3.57	167.3	0.1	54.6
	after	650/650	1.69	7.5	4.32	1.94	125.2	0.1	31.7
20-80-700-1 (45%)	before	780/780	5.21	2.2	10	4.38	277.8	0.1	84
	after	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	220.7	86.1	47.6
20-80-700 (47%)	before	700/700	4.47	2.6	13.03	8.98	167.4	0.1	87.6
	after	680/680	3.12	4.3	6.76	3.81	133.1	1.4	50.8
20-80-700-2 (45%)	before	750/740	3.38	2.4	7.80	3.12	160.6	0.1	30.7
	after	720/740	2.23	2.5	3.97	1.76	107.2	0.3	26.2
20-100-700-1	before	710/710	3.65	3.0	18.7	10.49	113.3	0.1	64.4
	after	670/680	3.78	3.5	6.3	3.67	157.8	13.5	45.5
20-100-700-2	before	700/700	5.55	2.7	23.22	8.62	120.7	0.1	97.1
	after	600/600	4.80	4.0	8.44	5.68	103.7	0.1	50.8

4.1.1 굳지 않은 콘크리트의 기초 물성

펌핑 전후 굳지 않은 콘크리트의 기초 물성 변화를 Figure 4~7에 나타냈으며, 고찰결과는 다음과 같다.

1) 슬럼프 플로우

콘크리트 배합 20-60-500, 20-60-600의 경우, 압송 전후의 슬럼프 플로우값은 100mm 이상의 차이를 보였으며, 슬럼프 플로우값이 700mm인 대부분의 배합에서는 압송전후에 100mm 이내의 변화를 보였다. 특히, 30mm 정도의 근소한 차이를 보인 경우도 있다.

2) 슬럼프 플로우 및 L-Flow의 500mm 도달시간

슬럼프 플로우 및 L-flow의 500mm도달시간의 경우, 강도수준이 높아짐에 따라 유동시간도 길어지는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트의 강도 증가에 따른 단위수량의 감소와 슬래그 시멘트와 같은 분말도가 높은 결합재량의 증가 등으로 인해 콘크리트의 점성이 증가되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 압송 후에는 전반적으로 유동시간이 감소하는 경향을 나타냈으며, 일부 배합의 경우 점성 감소로 인해 재료분리가 발생하였다.

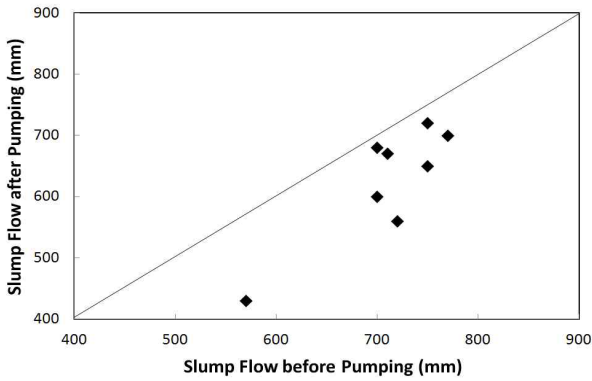


Figure 4. Slump flow test result before/after pumping

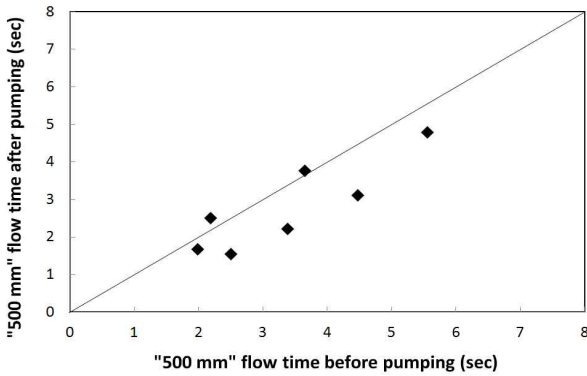


Figure 5. 500mm flow time before/after pumping

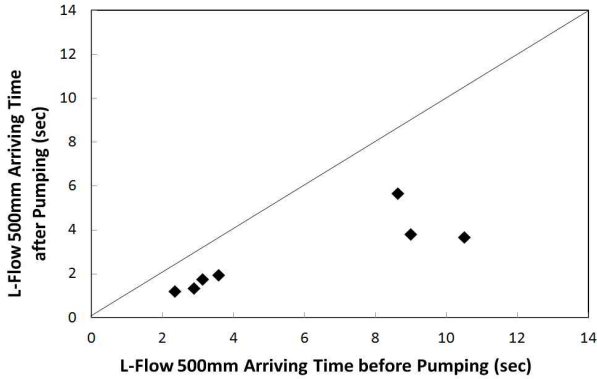


Figure 6. L-flow arriving time before/after pumping

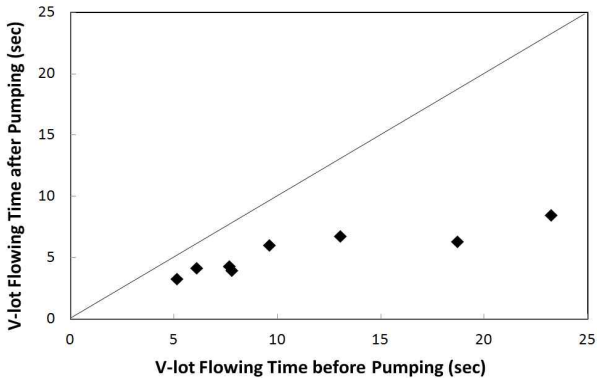


Figure 7. V-lot flow time before/after pumping

3) V-lot 유하시간

V-lot 유하시간의 경우 전체 배합에서 압송 후의 측정값이 감소하였다. V-lot 유하시험과 함께 상기한 슬럼프 플로우 및 L-플로우의 500mm 도달시간은 굳지 않은 콘크리트의 컨시스턴시를 평가하는 지표로서 마찰저항성이나 재료분리저항성 등과 관련된 측정항목인데, 실험결과 대부분의 배합에서 유하시간이 단축되었다. 이는 압송 후 콘크리트의 점성 감소에 의한 것으로 굳지 않은 콘크리트의 미끄럼 마찰저항성과 재료분리저항성이 감소하였음을 알 수 있다.

4.1.2 콘크리트의 레올로지 특성

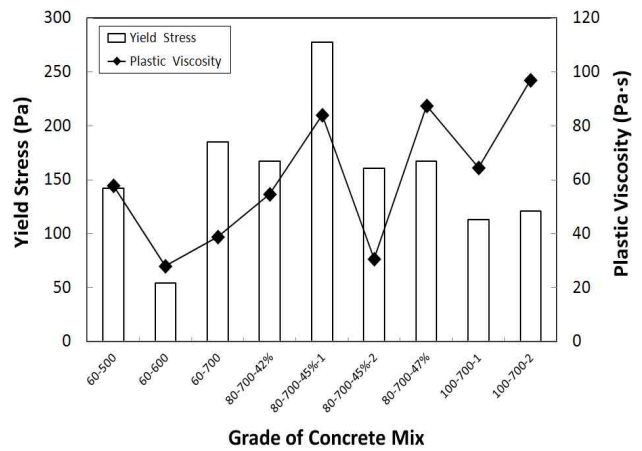


Figure 8. Yield stress and plastic viscosity of concrete

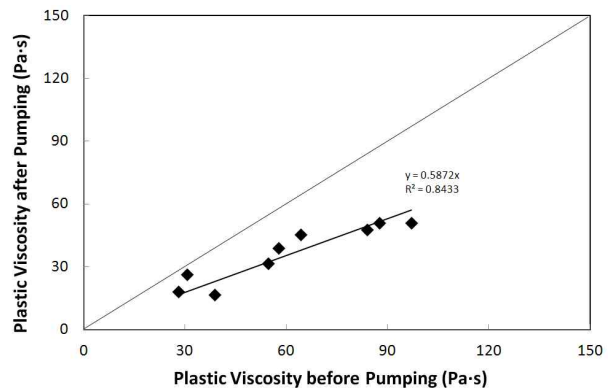


Figure 9. Plastic viscosity before/after pumping

레오미터로 측정된 전단속도와 전단응력으로부터 항복응력과 소성점도를 도출하였다. 항복응력의 경우 최초 스피들 회전속도 증가(Static Growth Test)에 따른 전단응력을 직선 회귀하여 y절편 값을 취하였다. 소성점도는 스

핀들의 최고 속도 도달 후의 감소에 따른 전단응력 값을 직선 회귀하여 기울기 값을 취하였다. Figure 8은 콘크리트의 배합조건별 콘크리트의 소성점도 및 항복응력의 측정결과를 나타낸다. 단위결합재량과 혼화제 사용량이 많은 고강도 영역일수록 소성점도가증가하는 경향을 나타냈다.

Table 4. Test result for pumping pressure and friction resistance

Grade of concrete	stroke time (sec)	Pumpin g speed (m ³ /h)	Friction resistance force (kgf)	Average of pumping pressure			Pressure loss coeff. (P1-P2)/3.5m	Pressure loss coeff. (P1-P3)/33.5m	
				Main pressure (bar)	P1 (bar)	P2 (bar)			P3 (bar)
20-60-500	9.3	25.5	32.6	46.2	6.6	6.3	1.2	0.087	0.159
	5.8	40.9	70.2	53.1	10.0	9.2	1.7	0.239	0.249
	4.8	49.5	107.0	68.4	13.8	12.4	2.2	409.1	0.347
20-60-600	9.9	24.0	17.6	39.8	4.2	3.6	0.0	0.181	0.126
	6.0	39.6	35.4	46.4	6.1	5.3	0.5	240.9	0.168
	5.0	47.5	59.9	57.5	9.0	7.7	1.1	388.3	0.237
20-60-700	8.6	27.6	22.4	39.9	2.7	2.4	0.0	0.071	0.079
	6.3	37.7	32.7	45.7	4.5	3.8	0.6	0.194	0.114
	4.9	48.4	51.9	54.8	7.2	6.1	1.3	0.322	0.178
20-80-700 (42%)	6.3	37.7	71.6	60.3	10.5	9.5	1.3	0.296	0.276
	4.9	48.4	84.5	70.7	13.6	12.3	1.6	0.351	0.358
	4.3	55.2	98.9	78.5	15.9	14.4	2.2	0.415	0.409
20-80-700-1 (45%)	2.9	81.9	144.0	108.1	25.2	23.0	4.0	0.647	0.634
	7.6	31.2	20.0	44.0	3.1	2.6	0.5	0.124	0.077
	5.2	45.7	33.2	58.7	7.9	7.1	1.3	0.228	0.197
20-80-700 (47%)	4.3	55.2	60.0	78.6	13.7	12.4	2.1	0.378	0.348
	2.5	95.0	219.5	133.2	29.1	26.4	4.8	0.765	0.724
	6.2	38.3	60.6	72.6	14.0	12.4	2.0	0.469	0.357
20-80-700-2 (45%)	5.2	46.5	60.0	84.1	17.7	16.0	3.0	0.493	0.439
	4.1	59.3	61.9	98.0	22.0	19.9	3.7	0.610	0.547
	3.1	74.2	111.9	124.7	30.7	28.0	5.2	0.772	0.759
20-100-700-1	6.2	38.3	90.9	54.1	8.0	7.5	1.0	0.157	0.211
	5.1	45.7	113.7	60.3	10.2	9.0	1.7	0.355	0.255
	4.0	57.9	141.0	71.3	13.3	12.2	2.3	0.315	0.327
20-100-700-2	3.2	76.9	202.9	89.3	17.8	16.1	2.7	0.469	0.449
	6.2	48.6	87.5	69	13.6	12.2	1.8	0.418	0.352
	5.4	61.9	111.5	80.5	17.4	15.7	2.5	0.477	0.445
20-100-700-1	4.2	80.2	144.3	93.4	21.2	19.0	3.1	0.613	0.538
	3.3	103.7	186.7	109.8	26.5	24.0	4.1	0.721	0.668
	6.5	36.5	105.7	75.4	15.2	13.7	2.0	0.427	0.396
20-100-700-2	5.2	45.7	133.3	88.4	19.5	17.9	2.7	0.475	0.501
	4.4	54.0	162.3	98.6	22.6	20.3	3.2	0.659	0.581
	3.1	76.6	238.1	127.1	31.7	28.4	4.5	0.951	0.811

한편, 펌프압송 전·후의 소성점도 측정결과, Figure 9와 같이 펌핑 전의 소성점도가 클수록 펌프압송 후에 감소하는 경향이 큰 것으로 나타났다. 페이스트와 같은 현탁물질(Suspension)의 구조변화에 관한 기존 연구를 토대로 고찰해 볼 때, 펌핑시 관내 압력 및 마찰저항 등의 외력에 의해 페이스트 간의 구조적 변화가 발생하며 그로 인해 점성저하가 발생하기 때문인 것으로 판단된다[5,9].

4.2 펌핑 관내압력 및 마찰저항력

4.2.1 관내압력에 따른 압력손실계수 및 마찰저항력

수평배관의 펌프압송시 각 배합조건 및 펌핑조건에 따른 관내압력 측정결과는 Table 4에 나타난 바와 같다. 즉, 펌프의 메인유압과 배관에 설치한 부위별 관내압력, 마찰저항 측정 시험배관을 통한 마찰저항력 등을 펌프실린더의 평균 왕복시간 및 시간당 토출량에 따라 나타냈다.

Figure 10은 P1~P2 구간에 있어서 관내압력수준에 따른 압력손실계수의 관계를 나타낸 것이다. 즉, 관내압력이 커질수록 압력손실계수도 비례하여 증가하는 선형관계를 나타내며 그 상관관계수가 매우 높은 것을 알 수 있다.

Figure 11은 콘크리트의 압송압력에 따른 마찰저항력의 관계를 나타낸 것으로서, 전반적으로 압송관내압력의 증가에 따라 마찰저항력이 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 마찰저항력의 증가로 인해 관내압력손실이 발생하는 것으로 추정할 수 있다.

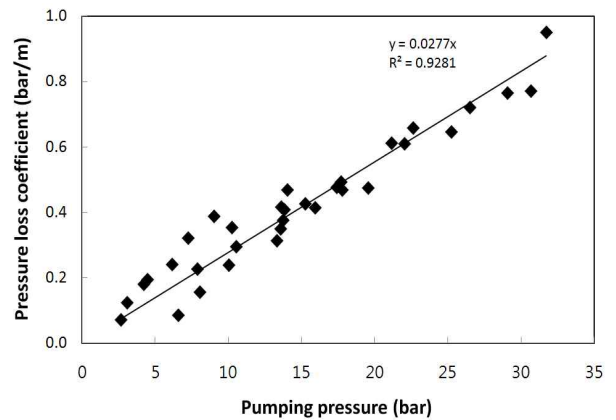


Figure 10. Pumping pressure and pressure loss coefficient

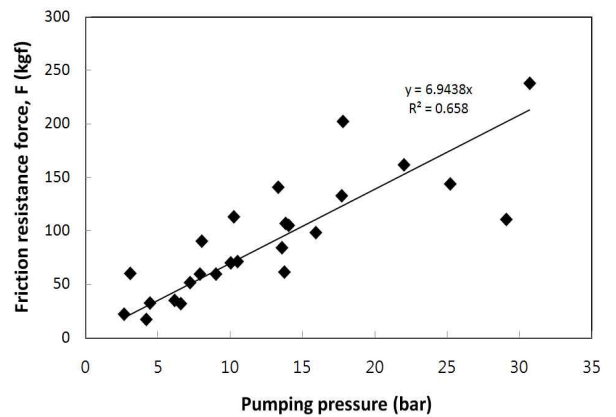


Figure 11. Pumping pressure and friction resistance force

4.2.2 마찰저항응력과 관내전단응력의 관계

Figure 12는 마찰저항력의 증가에 따른 관내부 벽면에 있어서의 콘크리트의 최대 전단력을 나타낸 것이다. 마찰저항력이 증가함에 따라 관내 전단력도 선형적으로 함께 증가하는 관계를 나타냈으며, 상관계수가 0.89로서 높은 상관성을 보였다. 이로부터 콘크리트의 점성 및 강도 등의 증가로 인한 마찰저항력의 증가가 관내 벽면에서의 콘크리트 전단력과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

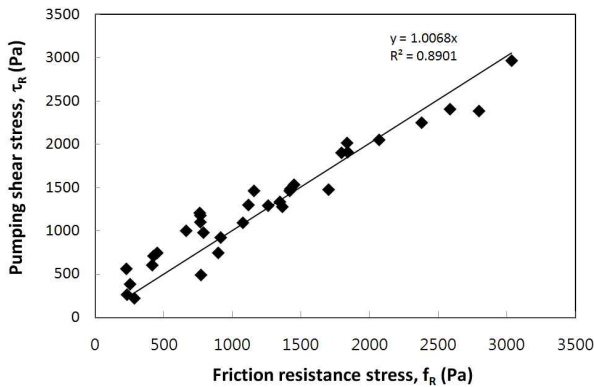


Figure 12. Friction resistance stress and shear stress

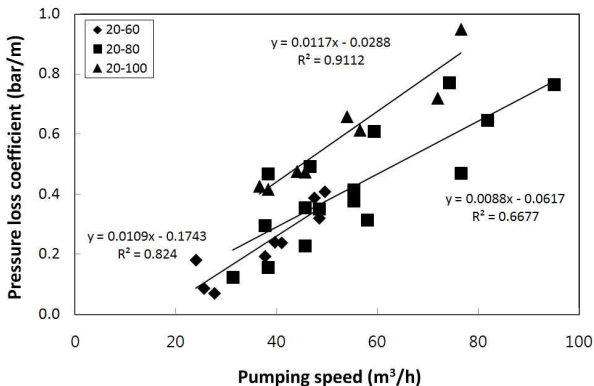


Figure 13. Pumping speed and pressure loss coefficient

4.2.3 펌핑속도와 관내압력손실계수의 관계

Figure 13은 시간당 이론토출량에 따른 관내압력손실의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 이론토출량은 펌핑시 실린더의 스트로크타임(펌핑주기)과 실린더 용적으로부터 산출한 계산값이다. 이론토출량이 증가함에 따라 동일한 콘크리트 배합의 펌핑시 관내압력손실계수는 커지는 경향을 보이고 있으며, 강도수준이 높을수록 관내마찰저항의 증가로 인해 관내압력손실계수가 커지는 것으로 나타났다.

4.3 콘크리트 배합별 마찰저항계수의 추정

4.3.1 관내 미끄럼속도에 의한 마찰저항계수의 산정

관벽과 콘크리트의 경계면이 유체마찰상태라고 가정한다면, 마찰저항은 콘크리트의 미끄럼속도에 비례하고 그 관계는 앞의 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 그에 따른 배합별 미끄럼속도와 마찰저항응력과의 관계는 Figure 14와 같으며, Table 5에 배합별 마찰저항계수의 산출 결과를 나타낸다. 한편, 미끄럼속도와 마찰저항응력의 관계로부터 산출되는 절편값인 C에 대해서는 유동상태의 관내 항복응력인 점을 고려하여 무시하였다.

Table 5. Result of calculation to determine friction resistance coefficient

Grade	Stroke time (sec)	Pumping speed (cm³/sec)	V_R (cm/sec)	f_R (Pa)	α (Pa·s/cm)
20-60-500	9.3	7090.3	57.8	270.5	10.14
	5.8	11369.0	92.7	747.3	
	4.8	13737.5	112.0	1278.6	
20-60-600	9.9	6660.6	54.3	564.3	9.31
	6.0	10990.0	89.6	752.7	
	5.0	13188.0	107.5	1213.4	
20-60-700	8.6	7667.4	62.5	223.2	7.58
	6.3	10466.7	85.3	607.1	
	4.9	13457.1	109.7	1005.4	
20-80-700 (42%)	6.3	10466.7	85.3	925.9	10.61
	4.9	13457.1	109.7	1096.4	
	4.3	15334.9	125.0	1297.3	
20-80-700-1 (45%)	2.9	22737.9	185.4	2020.5	9.83
	7.6	8676.3	70.7	387.5	
	5.2	12680.8	103.4	713.4	
20-80-700-2 (45%)	4.3	15334.9	125.0	1180.4	8.25
	2.5	26376.0	215.0	2392.0	
	6.2	10635.5	86.7	491.1	
20-80-700 (47%)	5.2	12680.8	103.4	1108.0	14.64
	4.1	16082.9	131.1	983.9	
	3.1	21271.0	173.4	1467.0	
20-100-700-1	6.2	10635.5	86.7	1465.2	14.47
	5.1	12929.4	105.4	1541.1	
	4.0	16485.0	134.4	1906.2	
20-100-700-2	3.2	20606.3	168.0	2412.5	16.48
	6.2	10635.5	86.7	1305.4	
	5.4	12211.1	99.6	1491.1	
20-100-700-2	4.2	15700.0	128.0	1915.2	16.48
	3.3	19981.8	162.9	2252.7	
	6.5	10144.6	82.7	1335.7	
20-100-700-2	5.2	12680.8	103.4	1483.9	16.48
	4.4	14986.4	122.2	2058.9	
	3.1	21271.0	173.4	2971.4	

4.3.2 레올로지 정수를 이용한 마찰저항계수 추정

각 배합별로 측정된 콘크리트의 레올로지 정수인 소성 점도와 마찰저항계수의 관계는 Figure 15와 같이 펌핑전

과 펌핑후의 R^2 값이 각각 0.84, 0.62로 나타나 펌핑전보다 펌핑이후의 소성점도에 의한 상관관계가 높게 나타났으며, 이를 식으로 나타내면 식(8)과 같다.

$$\alpha = 0.22\mu + 3.79 \text{-----} (8)$$

여기서, α : 마찰저항계수 (Pa · s/cm)

μ : 펌핑후 소성점도 (Pa·s)

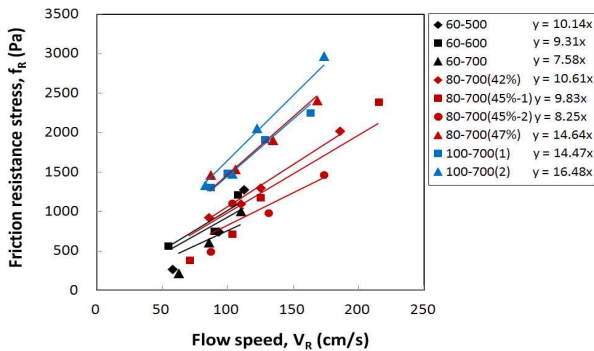


Figure 14. Flow speed and friction resistance stress

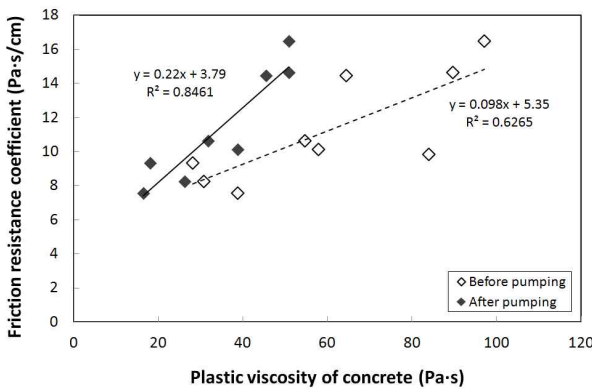


Figure 15. Plastic viscosity of concrete and friction resistance coefficient

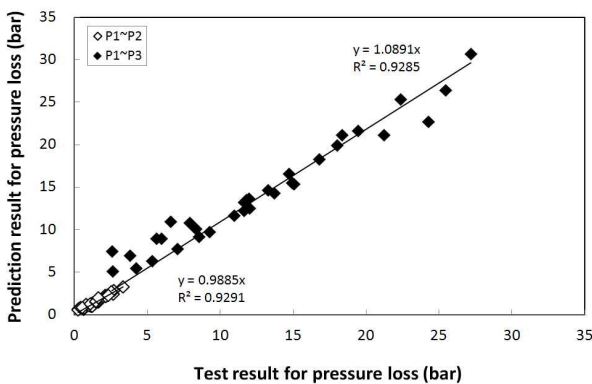


Figure 16. Test and prediction results for pressure loss in pipe

식(8)에 나타난 콘크리트의 소성점도에 의한 마찰저항계수의 추정식으로부터 얻어진 마찰저항계수를 이용하여 앞의 식(6)에 의해 배합별 측정구간에 따른 관내압력손실을 추정한 결과, Figure 16에 나타난 바와 같이 높은 상관관계를 나타냈다.

5. 결론

관내마찰저항 시험장치를 이용한 펌프압송성 평가시스템에 의해 펌프압송시 압력특성 및 관내마찰 저항계수를 구하고 관내압력손실을 추정한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 플로우 및 L-flow의 500mm 도달시간, V-lot 유하시간, 소성점도 등은 펌핑 전에 비해 펌핑 후 감소하는 경향을 나타냈으며, 이는 펌핑 중 배관내에서의 압력 및 마찰 등으로 인해 콘크리트의 점성이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.
- 2) 펌핑에 따른 관내압력은 콘크리트의 관내유동에 의해 발생하는 마찰저항력과 매우 상관성이 높은 것으로 나타났으며, 동일한 콘크리트 배합에 있어서 펌핑속도가 높아질수록 관내압력손실계수가 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 관내 미끄럼속도와 마찰저항력의 선형관계로부터 마찰저항계수를 산출하는 것이 가능하며, 마찰저항계수와 펌핑 후의 굳지 않은 콘크리트의 소성점도의 사이에는 높은 상관관계가 얻어졌다.
- 4) 본 연구를 통해 도출한 마찰저항계수에 의한 관내압력의 예측모델에 의한 추정값은 실험값과 높은 상관성을 보였으며, 향후 굳지 않은 콘크리트의 레올로지 특성에 대한 측정을 통하여 펌핑관내의 마찰저항계수를 산출하고 압송부하를 추정하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 콘크리트를 펌프압송할 경우, 콘크리트의 배합조건에 따른 레올로지 특성의 차이와 압송속도에 의해 펌핑관내의 마찰저항력이 달라지게 되는 것에 착안

하여 레올로지특성과 펌핑관내 마찰저항계수의 상관관계를 도출하고자 하였다. 이를 위해 콘크리트용 레올로지 측정장치와 관내마찰저항 평가시험장치를 이용하여 레올로지특성과 마찰저항력을 측정하기 위한 펌프압송실험을 수행하였다.

연구결과, 펌핑전후의 레올로지특성에 큰 변화가 있는 것으로 파악되었으며, 시험장치에 의해 측정된 관내마찰저항력과 이론상의 관내 최대전단력이 거의 동일한 값을 나타냈다. 또한, 펌핑 후 콘크리트의 소성점도와 관내마찰저항계수의 상관관계가 매우 높은 것으로 나타났으며, 본 연구에서 도출된 마찰저항계수에 의한 압송압력의 예측값이 실측결과와 매우 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.

키워드 : 콘크리트 펌핑, 레올로지, 마찰저항계수

Acknowledgement

This research was supported by a grant from the High-Tech Urban Development Program funded by the Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.

References

1. Ji SW, Seo CH, Development of concrete pumping technology in high-rise buildings, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 2006 Apr;50(4):66-71.
2. AIJ, [Method and Construction Guidelines for Concrete Pump], Tokyo(JP):Architectural Institute of Japan;1994, 182p, Japanese.
3. Stefan Jacobsen, Lars Haugan, Flow condition of Fresh mortar and concrete in different pipes, *Journal of Cement and Concrete Research*, 2009 Nov;39(11):997-1006.
4. AIJ, [Comprehensive Evaluation of Concrete Pumpability-The 6th Association for Research on Pumping Technology], Tokyo(JP): Architectural Institute of Japan ; 2009, 99 p, Japanese
5. Tattersall GH, Banfill PFG, *The Rheology of Fresh Concrete*, Boston (MA):Pitman Advanced Pub, Program; 1983, 351 p.
6. JSCE, [Concrete pump construction guide], Tokyo (JP):Japan Society of Civil Engineers ; 2002, 229 p, Japanese.
7. Eric P. Koehler, David W. Fowler, Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete, ICAR Report 105-3F, International Center for Aggregate Research, 2004 Aug.
8. Eric P. Koehler, David W. Fowler, Summary of Concrete Workability Test Methods, ICAR Report 105-1, International Center for Aggregate Research, 2003 Aug.
9. Kwon HW, Bae YK, Lee JS, Kim SI, Kim HS, Lee JS, The experimental study on the coefficient of friction change tendency which it follows in kinds of concrete strength and pumping pressure grade, *Proceedings of the Korea Institute of Building Construction*, 2009 May; Seoul, Korea, Seoul(Korea): Korea Institute of Building Construction; 2009, p. 69-73.
10. Deng SC, Zhang XB, Qin YH, LUO GX, Rheological Characteristic of Cement Clean Paste and Flowing Behavior of Fresh Mixing Concrete with Pumping in Pipeline, *Journal of Central South University of Technology*, 2007 Feb;14(1):462-465.
11. Chiara F. Ferraris, Nicos S. Martys, Relating Fresh Concrete Viscosity Measurements from Different Rheometers, *Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2003 May-June;108(3):229-34.
12. Seo I, Lee HS, Park HG, Kim WJ, An experimental study on correlation between rheological parameter of picked mortar and fluidity of concrete from 30 to 150MPa, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 2009 Oct;25(9):93-100.
13. Ko JH, Moon HJ, Seok WK, Park SJ, A study on the 1:1 full scale core wall mock-up test of high strength concrete performed by testing pumpability, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 2008 Aug;24(8):203-10.