

콘크리트 규격 및 압송압에 따른 마찰계수 변화경향에 대한 실험적 연구

The Experimental Study on the Coefficient of Friction Change Tendency which It Follows in Kinds of Concrete Strength and Pumping Pressure Grade

권 해 원* 배 연 기** 이 재 삼*** 김 석 일**** 김 현 섭***** 이 종 서*****
 Kwon, Hae-Won Bae, Yeoun-Ki Lee, Jae-Sam Kim, Seog-Il Kim, Hyun-Seob Lee, Jong-Seo

Abstract

Plan of concrete pumpability test or the theoretical character knowledge in the mechanic is become accomplished with character. But the character knowledge of the concrete is not considered appropriately, The theoretical background and assumed fact is a little different representative characteristic of the concrete. Concrete pumping experiment result it leads consequently and is produced the coefficient of friction which in concrete type and sending in more pressure it follows changes must grasp the tendency which. But until currently the majority experiment and research did not pass by this process. Grasps the coefficient of friction change tendency which it follows in concrete type and when pumping concrete more pressure data fundamentally from the experimental research which it sees consequently under providing the man with underdeveloped genital organ.

키 워 드 : 펌프압송성, 마찰계수,
 Keywords : Pumpability, Coefficient of Friction,

1. 서 론

최근 전 세계적으로 그 중에서도 특히 우리나라에서는 초고층 빌딩 건축이 매우 활발히 진행되고 있다. 이러한 초고층 빌딩 건축을 위해서는 특화된 여러 가지 요소기술이 필요하게 된다. 그 중에서도 RC조 또는 콘크리트가 주 구조체 역할을 하는 구조물의 경우에는 콘크리트를 원하는 곳까지 또 요구되는 시간내에 원하는 양을 운반하는 것이 가능할 것인가 또는 얼마나 운반할 수 있을 것인가를 확인하는 것은 매우 중요한 작업이다.

초고층 구조물의 상층부에 콘크리트를 타설하기 위해서는 콘크리트의 물성뿐만 아니라, 고정식 펌프카의 성능, 배관의 내구성 그리고 환경 등을 고려하여 실험을 실시하고 정확히 분석해야만 한다. 최근 초고층 현장 중 일부는 이에 대한 정확한 예측이 이루어지지 않아 배관이 폐색되거나 파손되는 등의 사고가 발생하여 안전의 위험과 공정에 부담을 안기기도 하였다.

따라서 최근에는 여러 가지 방법을 통해 펌프압송성능을 평가하고 실제 현장시공시에 어느 정도의 성능을 발휘할 것인가에 대한 연구와 실험이 이루어지고 있다. 그 중에서도 가장 높은 신뢰도를 얻고 있는 한 방안이 고정식 펌프카의 운영압력과 초기 배관압 및 주요위치의 배관압을 측정하여 마찰계수를 구하여 위치별 시간당 토출량을 추정하는 방안이 많이 채택되고 있다.

하지만, 이 방법의 경우 배관을 수직으로 원하는 높이만큼 설치하고 실험하기 어려움에 따라, 주로 수평으로 배관을 설치하고 실험을 실시하게 된다. 이 때 수평상태의 배관이 수직상태에서 받게되는 저항과 유사한 수준이 되기 위해서는 곡관의 개수와 길이 및 반경(R), 그리고 수직배관의 길이와 관경에 따라 차이는 발생하지만, 수직배관 길이에 비해 작게는 5배 크게는 20배 이상의 배관을 설치해야 하는 어려움이 있다. 따라서, 경제성과 안전성, 그리고 효율성을 고려하여 적정수준으로 배관계획을 하고 그에 따라 실험을 실시하고 있다.

이렇게 실험이 진행됨에 따라, 실제 고층부에 요구되는 압력은 실험과정에서 장비에 걸리지 않게 된다. 다시 말해 실시공에서는 고압의 환경에 콘크리트가 놓이게 되지만, 펌프압송성 실험상에서는 고압의 환경에 놓이지 않은 상태인 콘크리트의 자료를 얻게 되는 것이다.

실 시공에서 계속된 자료는 압송압력이 높아짐에 따라, 토

* (주)렉스콘 연구개발팀 연구원
 ** (주)렉스콘 연구개발팀 책임연구원
 *** (주)렉스콘 연구개발팀 팀장
 **** 두산건설(주) 해운대 두산위브 더 제니스 현장 공무부장
 ***** 두산건설(주) 해운대 두산위브 더 제니스 현장 공사부장
 ***** 두산건설(주) 해운대 두산위브 더 제니스 현장 상무

출량도 증가하고 있다.¹⁾ 하지만 증가하는 압송압과 토출량을 바탕으로 마찰계수를 추정하게 되면 위 실험환경의 가정과 실제가 같다면 마찰계수는 변동이 없어야 하지만, 마찰계수도 함께 증가하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

이는 펌프압송성 실험 계획이나 이론적 바탕이 기계중심의 지식만이 바탕이 됨에 따라 콘크리트의 특성이 적절히 고려되지 않았기 때문인 점과 이론적 배경과 가정사항(assumed fact)이 콘크리트의 특성과 다소 차이가 있기 때문인 것으로 사료된다.

따라서 펌프압송성 실험에 의해 산출된 마찰계수를 콘크리트 규격 및 압송압에 따라 변화하게 된다. 이 변화하는 경향을 통해 콘크리트 펌프 운영시 가압되는 압력상태로 추정할 필요가 있다. 하지만 현재까지의 대다수 실험과 연구가 이 과정을 거치지 않은 것으로 파악되고 있다. 따라서 본 실험적 연구에서는 콘크리트 규격 및 압송압에 따른 마찰계수 변화 경향을 파악하는 기초적 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

실험에 적용할 콘크리트의 배합을 사전에 확정된 후, 실험에 사용할 장비와 배관계획을 하도록 한다. 시험항목은 아래 표 3과 같이 경화 전 콘크리트의 물성과 경화 후 콘크리트의 물성, 그리고 압송 전후의 콘크리트 물성 및 압송중 배관압과 장비압 그리고 토출시간을 측정하도록 한다.

1) 콘크리트 압송 전 시험항목

콘크리트 압송전 굳지 않은 콘크리트의 온도, O-lot 유하 시간, 단위중량, 공기량 슬럼프 플로 500mm도달시간, 슬럼프 플로 등을 측정하고, 재령 28일 압축강도 시험체를 제작한 후 표준양생을 실시하고 경화 콘크리트의 재령 28일 압축강도를 측정하도록 한다.

2) 콘크리트 압송 후 시험항목

콘크리트 압송 전 시험항목과 동일한 항목에 대해 시험을 실시하여 측정하고 기록으로 남기도록 한다.

3) 콘크리트 압송시의 측정항목

콘크리트 압송시 측정항목은 아래 그림 2와 같은 배관계획에 따라, 장비, 0, 100, 200, 300, 400m지점에서 압력을 측정하도록 한다.

표 1. 실험항목 및 기준

구 분	항 목		비 고
적용규격	30, 40, 50, 60MPa		-
압력 측정 위치	압력 측정 위치	총길이 400m 장비, 0, 100, 200, 300, 400m	그림 2 참조
	압송압	80, 100, 120Bar or 60, 80, 100Bar	-
압송 전·후	경화 전	콘크리트 온도, O-lot Test, 단위 중량, 공기량, Slump flow 500mm 도달시간, Slump flow	-
	경화 후	28일 압축강도	-
스트록크 효율 및 압송속도	1m ³ 백호 버킷 채움시간		-

2.2 실험방법

아래 그림 1과 2와 같이 배관과 장비 및 센서를 장착하고 위치를 확정된 후, 폴리카본산계 혼화제를 적용한 윤활모르타르를 선송하고, 실험에 사용할 규격 중 가장 높은 규격을 생산한 다음 샘플을 채취하여, 콘크리트 압송 전 시험항목에 대하여 시험을 실시하고, 재령 28일 압축강도를 측정할 시험체를 제작하도록 한다. 샘플 채취 및 샘플테스트 후 전체 배관을 가득채운 다음 압송을 실시하도록 하며, 압송속도 및 유압이 일정 수준으로 유지될 때 토출되는 콘크리트를 호퍼로 받아내도록 한다. 이와 동시에 토출되는 콘크리트가 일정량 채워지는 시간을 같이 측정하도록 한다. 이렇게 일정량이 채워진 호퍼는 백호등의 장비를 이용하여 압송된 콘크리트의 샘플을 다시 채취하도록 한다. 압송 후 콘크리트의 샘플에 대해 압송 전 콘크리트 시험항목과 동일한 항목에 대하여 시험을 실시하고 기록으로 남기도록 한다.

또한 실험에 적용할 콘크리트가 배관전체를 채운 후 압송을 개시할 때부터 호퍼에 채움이 완료되는 시간까지 펌프압송 장비, 배관의 각 지점에서는 다이내믹 데이터 로거를 이용하여 스트록 변환타임과 사이클을 정확히 판단할 수 있으며, 압력의 변화를 충분히 분석 고찰할 수 있을 수준의 속도를 데이터를 읽어들이도록 한다. 뿐만 아니라, 실험개시 시간과 호퍼에 샘플을 담기 시작하는 시간을 미리 컴퓨터의 시간과 맞춰놓은 시계로 확인하여 초 단위로 기록하도록 한다.

시험결과와 계측결과를 바탕으로 베르누이의 정의(식 1)와 힘의 평형이론을 바탕으로 아래 식 2를 도출하고 규격 및 압송압별 마찰계수를 산출하도록 한다. 이렇게 구해진 압송압별 마찰계수를 통해 마찰계수와 압송압별 추세경향을 파악하도록 한다.

$$P_t = P + \delta V^2 / 2 \quad (\text{식 1})$$

$$F = \Delta P / (L/d \times \delta / 2 \times V^2) \quad (\text{식 2})$$

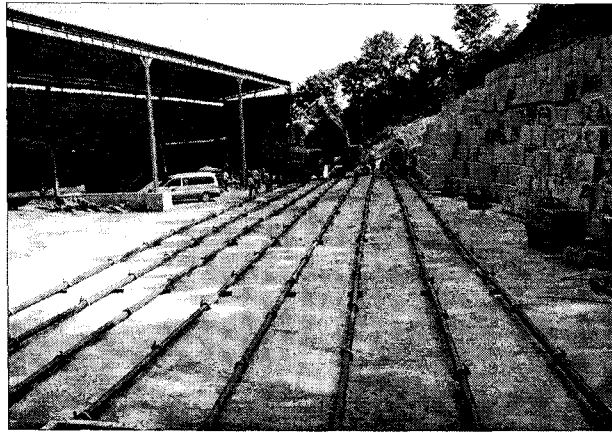


그림 1. 펌프압송성 실험 전경

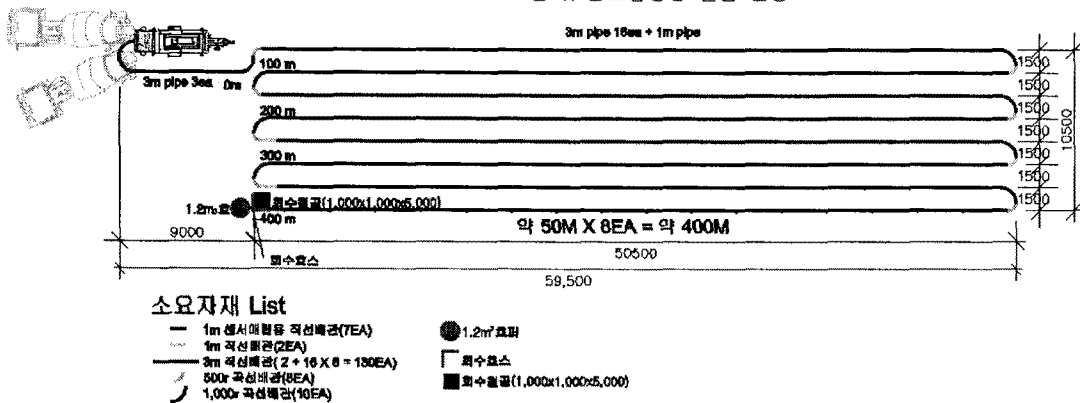


그림 2. 콘크리트 압송실험 배관 개요도(400m)

3. 실험결과

콘크리트 규격 및 압송압에 따른 마찰계수 변화경향을 알아보기 위해 실험을 실시한 결과 아래 각 항과 같이 나타났다.

3.1 콘크리트 압송 전·후 실험결과

콘크리트 압송 전·후 콘크리트의 물성시험결과는 아래 표 2와 같다.

표 2. 압송 전·후 콘크리트의 물성시험 결과

구 분	콘크리트 온도 (°C)	O-lot Test (Sec)	단위 중량 (t/m ³)	공기량 (%)	Flow 500mm 도달시간 (Sec)	Slump Flow (mm)	염화물 함량 (kg/m ³)	
배관 길이 400m	20-60-600	압송 직전	29.3	3"50	2.20	4.5	2"13	700 /680
		80Bar 압송	31.0	3"37	2.21	4.3	1"72	620 /610
		100Bar 압송	30.2	2"47	2.23	4.2	1"44	620 /610
		120Bar 압송	31.3	2"43	2.23	4.0	1"44	600 /590
		0.070						
20-50-600	압송 직전	28.3	4"59	2.25	4.3	2"13	700 /680	
	80Bar 압송	31.2	2"88	2.26	4.1	1"72	620 /610	
	100Bar	32.1	2"91	2.26	4.0	1"44	620	
0.098								

구 분	콘크리트 온도 (°C)	O-lot Test (Sec)	단위 중량 (t/m ³)	공기량 (%)	Flow 500mm 도달시간 (Sec)	Slump Flow (mm)	염화물 함량 (kg/m ³)
20-40-600	압송					/610	
	120Bar 압송	32.8	2"84	2.26	4.0	1"44	600 /590
	압송 직전	28.3	2"50	2.23	4.0	1"35	690 /690
	80Bar 압송	31.3	2"41	2.24	3.7	1"25	570 /550
	100Bar 압송	31.0	1"78	2.27	3.7	0"91	620 /610
20-30-600	120Bar 압송	30.6	2"40	2.28	3.5	0"72	630 /610
	압송 직전	29.0	2"59	2.24	4.8	1"54	680 /660
	80Bar 압송	30.1	2"54	2.24	5.0	1"19	600 /600
	100Bar 압송	29.5	2"22	2.27	4.8	0"94	650 /610
20-30-600	120Bar 압송	29.5	2"12	2.27	4.7	0"88	660 /630
	0.041						
0.081							

3.2 콘크리트 압송시 측정결과

콘크리트 압송시 위 그림 2와 같은 배관계획에 따라 측정된 장비, 0, 100, 200, 300, 400m에서의 배관압, 펌프압송 장비압, 호퍼채움시간을 바탕으로 산출한 규격 및 압송압별 마찰계수를 아래 표 3에 나타내었다.

표 3. 규격별 압력계측 결과와 마찰계수 (400m)

구분	설정 압송압 (bar)	펌프카 최고압 (bar)	0m 최고압 (bar)	100m 최고압 (bar)	200m 최고압 (bar)	300m 최고압 (bar)	400m 최고압 (bar)	델타P (bar)	호퍼 채움시간 (sec/0.4 m ³)	마찰계수
20-30-600	80	66.64	34.52	23.00	12.05	7.56	0.70	59.08	34.47	1.81
	100	72.37	43.80	30.05	16.43	9.89	1.37	62.48	32.81	1.82
	120	81.60	52.94	37.68	22.11	12.30	1.82	69.30	29.88	1.84
20-40-600	80	52.84	34.21	21.97	11.72	6.89	0.68	45.95	55.34	2.26
	100	88.65	45.69	28.96	15.70	8.97	1.10	79.68	33.22	2.35
	120	97.55	54.24	37.08	20.48	12.09	1.43	85.46	31.16	2.36
20-50-600	80	61.98	37.33	26.75	17.36	10.16	1.58	51.82	62.28	2.86
	100	81.14	49.68	34.94	21.53	12.28	1.74	68.86	50.89	3.11
	120	103.14	62.85	45.02	29.30	16.90	2.20	86.24	43.32	3.31
20-60-600	80	58.56	36.10	23.97	15.66	9.28	0.84	49.28	79.10	3.46
	100	82.23	51.53	35.08	21.24	11.71	1.20	70.52	59.06	3.70
	120	97.62	59.57	43.35	29.30	17.07	1.43	80.55	52.87	3.78

3.3 콘크리트규격과 압송압에 따른 마찰계수 변화경향

표 3의 마찰계수를 살펴볼 때, 각 규격별로 압송압력이 증가함에 따라 마찰계수가 증가한 것을 확인할 수 있다. 마찰계수가 증가하는 경향은 선형변형을 할 수도 있으며, 로그선형변형을 할 수도 있으며, 그 외 다른 변형에 더 적합할 수도 있다.

그 중 가장 대표적인 증가경향을 나타내는 1차 선형변형함수와 로그변형함수에 위 자료를 대입하여 압송압과 마찰계수와의 관계 및 결정계수를 파악하여 아래 표 4와 5에 나타내었다.

규격 및 압송압별 마찰계수변화경향을 살펴본 결과 결정계수는 선형과 로그선형 모두 0.9이상을 보였으며, 상대적으로 로그선형이 더 높은 것으로 나타났다.

표 4. 규격 및 압송압별 마찰계수 변화경향

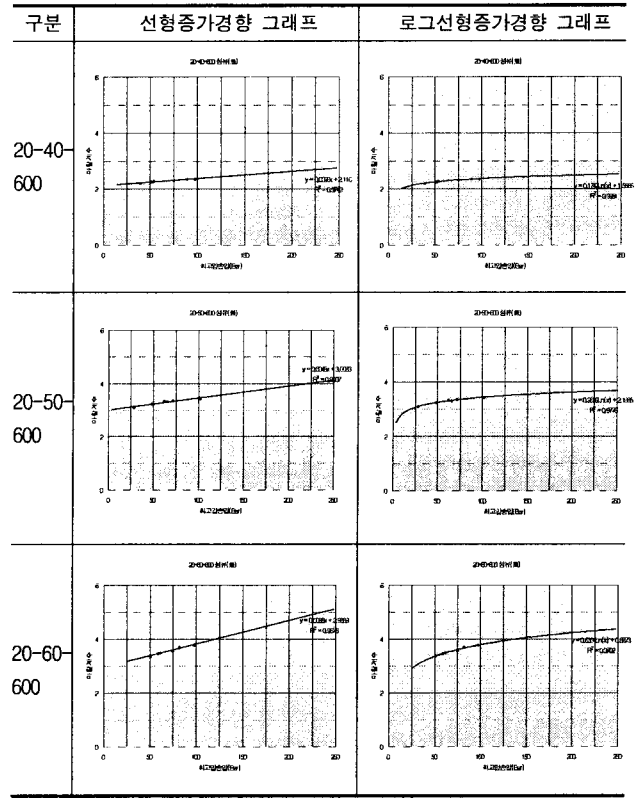
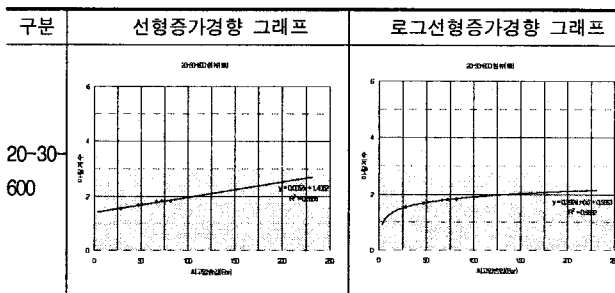


표 5. 규격 및 압송압별 마찰계수변화경향 및 결정계수

구분	추세식종류	결정계수 (R ²)	변화경향함수
20-30-600	1차 함수	0.9558	$y = 0.0057x + 1.4062$
	로그함수	0.9932	$y = 0.2921 \ln(x) + 0.5653$
20-40-600	1차 함수	0.9749	$y = 0.0026x + 2.116$
	로그함수	0.9951	$y = 0.1743 \ln(x) + 1.5666$
20-50-600	1차 함수	0.9007	$y = 0.0045x + 3.0083$
	로그함수	0.9776	$y = 0.2689 \ln(x) + 2.1985$
20-60-600	1차 함수	0.9676	$y = 0.0088x + 2.9359$
	로그함수	0.9702	$y = 0.6304 \ln(x) + 0.8873$

4. 결 론

콘크리트 규격 및 압송압에 따른 마찰계수 변화경향을 알아보기 위하여 위 실험을 진행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 각 규격별 마찰계수는 설계기준강도가 증가할수록 더 높은 마찰계수를 가지는 것으로 나타났다.
- 2) 압송압의 증가에 따른 마찰계수의 증가경향은 선형증가시와 로그선형증가시 모두 결정계수 0.9이상을 보이는 것으로 나타나 높은 신뢰도를 보였다.
- 3) 압송압의 증가에 따른 마찰계수는 선형증가에 비해 로그 선형증가가 더 높은 결정계수를 보이는 것으로 나타났다.

위 결론에 따라, 더욱 정확한 압송위치별 시간당 타설량과 고정식 콘크리트 펌프의 최대도출압력을 검토하기 위해서는 기존 펌프압송성 실험과 더불어, 압송압력의 증가에 따른 마찰계수 변화경향을 파악하여 시간당 타설량과 장비성능을 검토할 필요가 있을 것으로 확인되었다.

하지만, 이상의 결론은 제한된 샘플에 의한 결과이므로, 추후 더 많은 샘플과 실험을 통해 그 경향을 지속적으로 확인할 필요가 있을 것으로 판단되며, 현장 또는 실험실내에서 간편하게 마찰계수를 구할 수 있는 장비의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 초고층 건축물 시공을 위한 80MPa 고강도콘크리트 펌프압송에 관한 연구, 김우재 외 5인, 2007
2. 초고층 건축물 시공을 위한 콘크리트 펌프압송에 따른 배관압력특성에 관한 실험적 연구, 김상현·지석원·서치호, 2007
3. 초고층 건축물에서 콘크리트 펌프 압송 기술의 발전, 대한건축학회, 지석원·서치호, 2006
4. 콘크리트 펌프<기술 및 실무요령>, 이원인터네셔널(주), 1991
5. 콘크리트 펌프압송 시 배관압력 특성에 관한 실험적 연구, 김상균·김상현·지석원·서치호·김옥중, 이도범, 2007
6. 펌프압송에 의한 균지않은 콘크리트의 특성 변화에 관한 실험적 연구, 김영균, 2005
7. Stationary Concrete Pumps(For highest demands and economical solutions), Putzmeister, 2006