

초고층 압송계측을 통한 고성능 콘크리트의 유동특성과 압송성능과의 상관관계

The Correlation between Rheological Properties and Pumpability of High Performance Concrete from High-Rise Pumping Monitoring

김 규 동¹ 한 천 구^{2*}

Kim, Gyu-Dong¹ Han, Cheon-Goo^{2*}

Department of Engineering, Lotte World Tower, LOTTE Engineering & Construction, Seoul, 140-846, Korea ¹

Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Naedeok-Dong, Cheongju-City, 360-764, Korea ²

Abstract

In this study, the evaluation and the analysis of the correlation between rheological properties and pumpability of high performance concrete, C80A which was applied to the height of from 200 m to 350 m in a super tall building, was carried out by measuring pumping pressure and flow rate, testing concrete properties at before and after pumping. As the results, C80A had satisfactory properties of fresh and hardened concrete to the requirements even after pumping and the maximum pumping pressure showed increase of 10~15% at every 50m higher pumping and the average flow rate showed the above 25m³ per hour which means proper productivity. Additionally it was verified that pumping pressure and friction factor in pipeline are inversely proportional to slump flow and showed a tendency to increase according to the higher T-500 value.

Keywords : high performance concrete, pumping pressure, friction factor, pumping

1. 서 론

최근 초고층 구조물 시공 시 콘크리트의 사용이 크게 증가하고 있다. 초고층 구조물에 적용되는 콘크리트의 경우는 몇 가지 요소기술을 확보해야 하는데, 이중 고층부까지 콘크리트를 운송하기 위한 펌프압송 성능 확보가 가장 중요한 요소기술로 인식되고 있다.

한편, 일반 건축물에 사용되는 보통강도 콘크리트와는 달리 초고층 건축물에는 무거운 자중의 축하중과 높이에 따른 횡하중에 저항하기 위하여 고강도와 고유동 성능이

복합된 고성능 콘크리트의 사용이 필연적으로 요구되는데, 이러한 고성능 콘크리트는 유동학적 특성으로 인하여 고층부까지 압송할 경우 배관 내부에 상당한 부하가 발생할 수 있으며, 그 압송부하가 커질 경우 시간당 타설량이 작아져 시공생산성이 저하될 수 있으므로 고성능 콘크리트에 대한 물성 개선이나 장비, 배관시스템의 최적화 및 압송모니터링을 통한 통합관리가 필요한 실정이다[1].

한편, 초고층 건축의 실제 시공 시 계획되었던 압송높이에 따른 최대 압송압력, 배관내 마찰계수와 토출량 등의 압송성능과 압송 전·후 콘크리트의 슬럼프 플로우나 소성점도와 같은 유동 특성에 대한 계측 데이터의 확보와 분석을 통해 수직배관 압송예측의 정확도를 높일 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 초고층 건축물 시공 시 설계기준 강도 80MPa의 고성능 콘크리트를 대상으로 펌프압송 시의 계측 결과를 근거로 하여 압송성능과 유동특성의 상관

Received : March 11, 2015

Revision received : April 7, 2015

Accepted : April 9, 2015

* Corresponding author : Han, Cheon-Goo

[Tel: 82-43-229-8480, E-mail: cghan@cju.ac.kr]

©2015 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

관계 분석을 통해 유동특성에 따른 압송 가능 여부, 시공 생산성을 극대화할 수 있는 방안을 도출하고자 한다.

2. 콘크리트의 유동성 변화 메커니즘

2.1 콘크리트의 레올로지

콘크리트의 레올로지와 워커빌리티는 컨시스턴시(Consistency)와 호모지니어티(Homogeneity)와 관련되어 있다. 컨시스턴시는 단위수량, 시멘트 종류, 골재의 양과 입도, 공기량, 온도, 혼화재료 등에 따라 영향을 받으며, 호모지니어티는 콘크리트의 재료 분리나 마감성에 영향을 미친다. 콘크리트의 레올로지와 워커빌리티와의 관계는 Figure 1과 같다. Table 1의 레올로지(rheology) 모델들은 물질이 변형될 때의 전단응력(Shear stress)과 전단변형속도(Shear strain rate)의 관계를 나타내는 컨시스턴시 곡선을 간단한 구성식에 적용시켜 모델링한 것으로, 이미 다양한 물질에 대해 많은 모델이 제안되고 있다 [2].

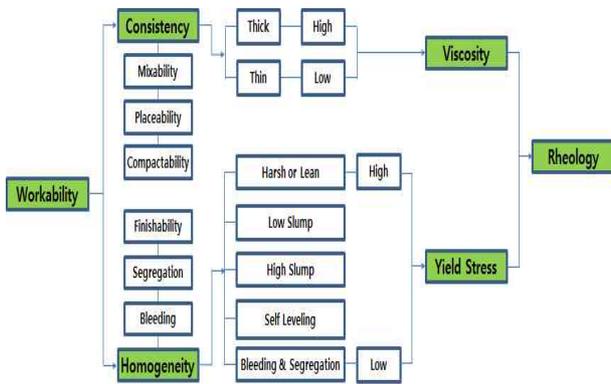


Figure 1. Workability and Rheology of concrete

Table 1. Rheology models of concrete

Newton model	Bingham model	Non-Bingham model
$\tau = \eta \dot{\gamma}$	$\tau = \eta_{pl} \dot{\gamma} + \tau_y$	$\tau = \mu \dot{\gamma}^n + \tau_y$

τ : Shear stress(Pa), $\dot{\gamma}$: shear rate(s^{-1}), τ_y : Yield stress(Pa),
 η : Newtonian viscosity($Pa \cdot s$), η_{pl} : Plastic viscosity($Pa \cdot s$),
 μ : Non-Newtonian viscosity coefficient, n : Non-Newtonian viscosity index

한편, Figure 2는 피스톤 펌프에 의한 수송관 내 콘크리트 압송 시 콘크리트의 거동을 나타낸 것이다[3]. 실린더에 공급된 콘크리트는 수송관 내부로 밀려들어가는 과정에서 수송관 내부 마찰력에 의해 전단응력 및 열응력이 발생하게 된다. 이때, 콘크리트와 관과의 접촉부위는 마찰력에 의해 중심부분이 압축력을 받게 되는데, 이로 인해 콘크리트 물성에 변화가 발생할 수 있으며 이는 토출량 증감에 영향을 미치게 되므로, 콘크리트 펌프 압송 시 이에 대한 영향을 신중히 고려해야 한다.

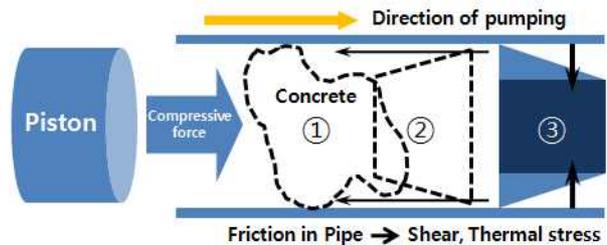


Figure 2. Behavior of concrete in pipe at pumping

2.2 콘크리트의 유동성 변화 메커니즘

콘크리트는 일반적으로 압송 전에는 유동성이 저하하면서 점성이 증가하는 성상을 나타내지만 압송 후에는 유동성 및 점성이 함께 저하하는 성상을 나타낸다. 그림 3은 펌프압송 영향에 의한 고성능 AE감수제의 구조적 변화를 나타낸 것으로, 압송 시, 콘크리트내부의 골재간 충돌과 마찰 등에 의해 큰 전단력이 발생하여, 고성능 AE감수제에 큰 외력으로 작용되면 시멘트입자 주변에 흡착된 고성능 AE감수제의 측쇄(Side chain)가 수축하는 구조변화가 일어나 입체장해 작용의 효과감소 및 시멘트입자간의 마찰경감 등에 의해 점성의 저하가 발생하는 것으로 알려져 있다[4].

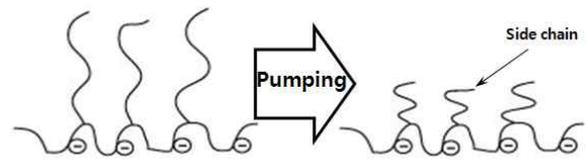


Figure 3. Concrete flowability according shrinkage of chain

2.3 콘크리트의 소성 점도와 T-500과의 관계

Kurokawa and Tanigawa는 굳지 않은 콘크리트에서 슬럼프 플로 값 s_f 가 500mm에 도달하는 시간 t_{500} 을 이용

하였는데, 시료의 윗부분과 아랫부분의 비가 일정하다고 가정하여, 콘크리트의 소성점도를 슬럼프 값 s_f 또는 슬럼프 플로우 값 S_f 과 T_{500} 으로부터 산출 할 수 있는 식 1과 식 2를 제안하였다[5].

한편, 고유동 콘크리트에서는 식 1, 2를 이용하여 콘크리트의 소성점도를 간단하게 추정하는 것이 가능하다.

$$\eta(S_p, T_{500}) = (0.870S_p^2 - 21.9S_p) \times T_{500} \text{ ----- (1)}$$

$$\eta(S_f, T_{500}) = 125.3 \left(1 - \frac{4 \times 10^4}{S_f^2}\right) \times \left(1 - \frac{25 \times 10^4}{S_f^2}\right) \times T_{500} \text{ ---- (2)}$$

여기서, $\eta(S_p, T_{500}), \eta(S_f, T_{500})$: 콘크리트의 소성점도(Pa · s)
 s_f : 슬럼프 값 (mm), S_f : 슬럼프 플로우 값(mm)
 T_{500} : 슬럼프 플로우 500mm 도달시간(s)

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

본 연구는 고성능 콘크리트를 이용한 초고층 구조물의 실제 펌프 압송시 압송성능 예측결과와 압송 전후의 콘크리트 물성시험 결과를 비교 분석하도록 계획하였으며, 실험계획은 Table 2와 같다.

Table 2. Experimental factors

Grade of concrete		C80-20	
Factors considered	Pumping height (m)	200, 250, 300, 350	
	Test conducted at before & after pumping	Fresh concrete	Slump flow (mm) Time to 500mm flow (sec) Temperature (°C) Air contents (%)
Hardened concrete		Early strength at 12hours (MPa)	
		Compressive strength (MPa)	
		Elastic modulus (GPa)	

먼저, 대상 콘크리트의 규격은 Table 3의 설계기준강도 80MPa, 굵은 골재 최대치수는 20mm로 하였으며, 소요 슬럼프 플로우는 650 ± 100 mm, T-500은 4~10초, 재령 12시간의 조기강도는 거푸집 해체를 위한 5.0MPa, 기준 재령에는 설계기준강도를 만족해야 하는 품질관리기준을 설정하였다. 주 실험변수는 압송높이로써, 200 m로부터 350m 높이까지 매 50m 마다 압송성능 예측과 압송 전후의 콘크리트 물성시험을 실시하도록 계획하였다. 콘크리

트 물성시험은 굳지 않은 콘크리트 특성으로 슬럼프 플로우, 공기량, 온도 등을 측정하고, 역학적 특성으로 조기강도, 압축강도 및 탄성계수를 측정하도록 계획하였다.

Table 3. Mix proportions of concrete

Type	W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)								
		W	OPC ^a	FA ^b	MS ^c	Coarse agg. 20mm	Fine agg. 10mm	W.S ^d	D.S ^e	S.P
C80-20	0.27	132	380	60	44	581	327	572	336	6.0

^a Cement, ^b Fly ash, ^c Micro Silica, ^d Washed sand, ^e Dune sand

3.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료로서 시멘트는 현지에서 생산되는 1종 보통 포틀랜드 시멘트로써 BS EN 197-1 CEM1 42.5N의 품질기준을 만족하는 제품을 사용하였으며, 물리, 화학적 특성은 Table 4와 같고, 플라이애시 및 마이크로 실리카의 물리·화학적 특성은 Table 5 및 6에 나타내었다. 잔골재는 고성능 콘크리트의 원재료 중 유동성을 좌우하는 가장 중요한 재료이며, 조립율이 3.4~3.6 범위인 Washed Sand와 0.3mm보다 작은 입자의 Dune Sand를 적정비율로 혼합하여 합성 잔골재의 조립율이 2.7~2.9의 범위가 되도록 관리하였다. 잔골재와 굵은 골재의 대표적인 물성시험결과와 입도시험 결과는 Table 7과 8에 정리하였으며, 인공적으로 습식 파쇄하여 생산되는 부순 모래인 Washed Sand와 사막에서 채취하는 자연 모래인 Dune Sand의 샘플 사진을 Figure 4에 나타내었다.

Table 4. Physical and chemical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Setting time(min. ^a)		28day Comp. strength(MPa)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	L.O.I. ^c (%)
		Initial	Final				
3.15	3,560	150	200	54.6	21.0	63.0	3.25

^a Minutes, ^b Compressive, ^c Loss of Ignition

Table 5. Physical and chemical properties of fly ash

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	S.A.I.* (%)	Moist content (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	L.O.I. (%)
2.22	2,120	86.0	0.03	60.1	30.1	5.0	1.1	0.91

* Strength Activity Index

Table 6. Physical and chemical properties of micro silica

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	P.A.I.* (%)	Bulk density (ton/m ³)	SiO ₂ (%)	L.O.I. (%)
2.15	200,000	150	0.03	90.3	2.29

* Pozzolan Activity Index

Table 7. Physical properties of fine agg.* and coarse agg.

Fine agg.(Washed sand)		Coarse agg.	
Tests	Results	Tests	Results
Silt content(%)	0.7	Silt content(%)	0.7
Density(g/cm ³)	2.70	Density(g/cm ³)	2.72
Water absorption(%)	0.6	Water absorption(%)	0.6
Crushing value(%)	15.8	Flakiness index(%)	17.0
Strength of rock(MPa)	150	Elongation index(%)	19.0

※ Aggregates

Table 8. Sieve analysis of fine agg. and coarse agg.

Seive size (mm)	Fine aggregates		Seive size (mm)	Coarse aggregates		
	W.S	D.S		20mm	14mm	10mm
5.0	98	100	37.5	100		
2.36	66	100	20.0	98	100	
1.18	35	100	14.0	52	98	100
0.600	19	100	10.0	10	45	97
0.300	10	91	5.0	0.9	0	13
0.150	6	40	2.36			
0.075	4	3	1.18			



Figure 4. Fine aggregates

3.3 압송성능 계측 및 압송 전·후 콘크리트 시험계획

압송성능 계측은 압송높이 200m지점부터 350m 까지 매 50m높이 단위로 수행한다. 압송성능 계측 계획 및 계측 위치를 Figure 5에 나타내었으며, 장비에서 발생하는 유압(P0)과 배관 내 최대 압송압력(P1)을 측정하고, 압송 시 분당 스트로크수를 기준으로 시간당 토출량을 산정한다. 또한 압송 전에 콘크리트 샘플을 채취하고, 압송 후의 콘크리트는 호퍼와 타워크레인을 이용하여 지상에서 시험을 실시하며 Figure 6은 압송성능 계측 시스템과 콘크리트 시험전경을 나타낸다.

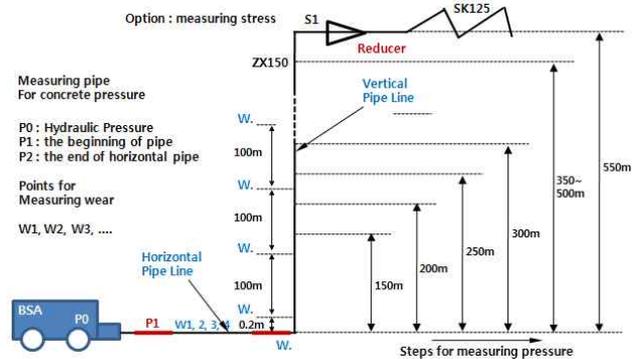


Figure 5. The plan of pumpability measurement



Figure 6. Pressure measuring and concrete testing

4. 실험결과 및 분석

4.1 압송 전·후의 굳지 않은 콘크리트 특성

수직압송 높이별 압송 전후의 콘크리트 물성시험결과를 Table 9와 같다. 압송 후의 슬럼프 플로우는 550~595mm으로서 품질관리기준인 650±100mm를 만족하였으며, 압송에 따른 슬럼프 플로우 손실은 압송 높이에 비례하여 증가하는 경향을 보였지만 육안관찰 결과, 압송 후에도 양호

한 시공성이 확보되는 것을 확인하였다. 압송 후의 500mm 플로우 도달시간(이하, T-500)도 압송 전에 비해 약간 증가하였지만 4.3~6.5 초의 범위로 적절한 반죽질기가 확보되는 것을 알 수 있었다. 펌프압송 마찰에 따른 온도증가는 1월에 실시한 350m 압송 시의 결과가 1.5℃로 가장 낮아, 압송높이나 배관길이에 따른 영향보다는 외기온도 조건에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

Table 9. Measured concrete properties before and after pumping

Pumping height (m)	Before pumping			After pumping		
	Slump flow(mm)	T-500 ^a (sec. ^b)	Temp. ^c (°C)	Slump flow(mm)	T-500 (sec)	Temp (°C)
200	630	4.6	28.0	580(▼50)	5.1(▲0.5)	30.0(▲2.0)
250	645	3.8	28.0	595(▼50)	4.3(▲0.5)	31.0(▲3.0)
300	660	4.2	27.0	580(▼80)	4.9(▲0.7)	29.0(▲2.0)
350	620	5.1	24.0	550(▼70)	6.5(▲1.4)	25.5(▲1.5)

^a Time to 500mm flow, ^b Seconds, ^c Temperature, ▼: down, ▲: up

4.2 압송 전 · 후의 경화 콘크리트 특성

경화 콘크리트의 역학적 특성은 Table 10과 같다. 거푸집 조기 해체를 위한 재령 12시간의 초기강도는 압송 후가 압송 전에 비해 3.2~4.2배 증가한 5.5~17.5MPa로 품질 기준을 만족하였으며, 양생초기의 외기온도 조건에 의한 영향을 크게 받는 것을 알 수 있었다. 또한, 재령 28일의 압축강도는 압송 후에 92.8~107.0MPa의 범위로서 압송 전에 비해 최대 10%까지 증가하는 결과를 보였으며, 동일 재령의 탄성계수는 압송 후에 45.5~48.1GPa의 범위로 압송 전에 비해 3~5% 증가하거나 감소하는 결과를 나타내었으나, 압송 전·후의 역학적 특성은 모두 품질기준을 만족하는 양호한 결과를 나타내었다.

Table 10. Mechanical properties of HPC^a before and after pumping

Pumping height (m)	Before pumping			After pumping		
	Comp. ^b strength @12h(MPa)	Comp. strength @28D ^d (MPa)	Elastic modulus @28D(GPa)	Comp. ^b strength @12h(MPa)	Comp. strength @28D ^d (MPa)	Elastic modulus @28D(GPa)
200	5.5	85.3	49.6	17.5	92.8	48.1
250	3.5	88.8	48.9	14.0	94.5	47.4
300	1.3	90.2	44.6	7.0	91.0	45.5
350	1.3	97.0	43.8	5.5	107.0	46.7

^a High Performance Concrete, ^b Compressive, ^c 12hours, ^d 28days

4.3 압송성능 계측 결과

수직압송 높이 200m부터 350m까지의 압송성능 계측 결과는 Table 11과 같다. 펌프에 발생한 최대 유압은 압송 높이가 매 50m씩 높아질수록 5~10%씩 증가되었으며, 장비의 안전율을 고려하여 최대 280bar를 초과하지 않도록 관리하였다. 배관 내 작용하는 최대 압송압력은 매 50m 마다 약 10~15%씩 증가하였으며, 350m 높이에서는 최대 145 bar로 한계치인 220 bar의 66%수준으로 안전함을 알 수 있었다. 시간당 토출량 검토에서 200~300m 높이까지는 28~48m³/h의 양호한 압송효율을 보였지만, 350m 높이에서는 관리 한계치인 25m³/h 에 근접하여 굵은 골재 치수를 작게 하거나 배합조정을 통해 안정적인 압송효율을 확보할 수 있는 방안이 필요할 것으로 사료된다.

Table 11. Pumpability monitoring results of C80A-20

Items	Pumping height (m)			
	200	250	300	350
Pipeline length ^a (m)	351	395	444	494
Slump flow(mm)	600~650	640~660	630~690	600~675
Max. hyd. press. ^b (bar)	220~240	240~260	255~280	265~280
Max. pump. press. ^c (bar)	100~115	120~135	130~140	140~145
Strokes(times/min)	11.0~14.0	13.0~15.0	9.0~13.0	7.5~9.0
Pumping speed(m ³ /h)	35~45	42~48	28~42	25~29

^a Pipeline length: pumping height + horizontal line + CPB Post & Boom length

^b Maximum hydraulic pressure, ^c Maximum pumping pressure

4.4 펌프압송 시 유동 특성과 압송성능과의 상관관계

슬럼프 플로우와 T-500은 현장에서 쉽게 정량적으로 평가할 수 있는 고성능 콘크리트의 유동특성에 해당되므로 두 가지의 시험결과와 배관 내 압송압력, 시간당 토출량을 근거로 한 관내 마찰계수와와의 상관관계를 분석하였으며, 장비에 작용하는 유압이 거의 유사한 300~350m 높이에서 실시한 계측 결과를 근거로 분석을 수행하였다.

1) 슬럼프 플로우 변화에 따른 압송성능의 영향

압송 높이별 슬럼프 플로우 변화와 배관 내 작용하는 압송압력과의 상관관계는 Figure 7과 같다. Figure 7에 나타난 바와 같이 압송압력은 높이에 따라 슬럼프 플로우의 크기에 반비례하는 것으로 나타났으며, 0.95 이상의 높은 상관성을 가지는 것을 알 수 있었다. 또한 슬럼프 플로우 변화에 따른 마찰계수와와의 상관관계는 Figure 8에 나타나

었다. 마찰계수는 압송 높이를 포함한 압송배관의 길이와 시간당 토출량 등을 근거로 하기 때문에 높이별로 구분하지 않고 전체 데이터를 대상으로 상관관계를 분석하였다. 그 결과 마찰계수와 슬럼프 플로우도 반비례의 상관성을 가지고 있었으며 높지는 않지만 0.62 정도의 상관성을 가지는 것을 알 수 있다.

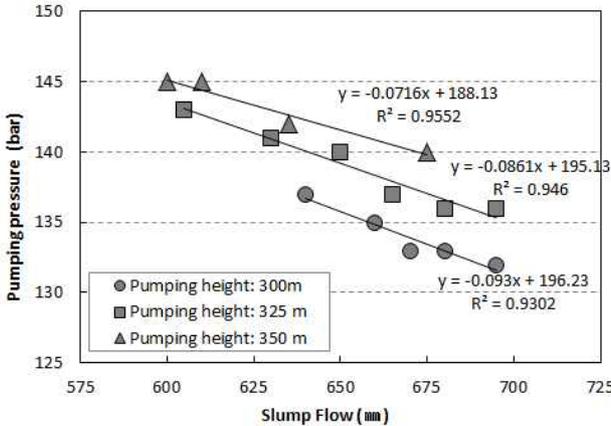


Figure 7. Slump flow and pumping pressure

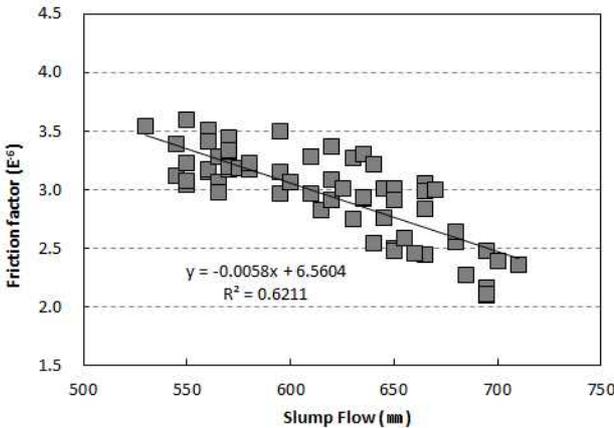


Figure 8. Slump flow and friction factor

이러한 결과를 근거로 볼 때, 슬럼프 플로우는 품질기준 범위인 550~750mm 내에서 높은 영역인 650~750mm로 관리가 된다면 배관 내 작용하는 압송압력을 낮출 수 있고, 마찰계수를 줄일 수 있으므로 압송효율측면에서 보다 유리할 것으로 사료된다.

(2) T-500 변화에 따른 압송성능의 영향

T-500은 유동성보다는 점성의 고저와 연관성을 가지는 시험항목으로써, 시험결과 측정시 최대한 측정 오차를

줄이고자 일정한 방식으로 평가하도록 하였으며, T-500과 압송압력과의 상관관계는 Figure 9와 같다.

압송 높이별로 약간의 차이는 있지만 압송압력은 T-500이 높을수록 증가하는 경향을 보였으며, 약 0.6~0.8의 양호한 상관성을 가지는 것을 알 수 있었다. 또한 T-500과 배관 내 작용하는 마찰계수와의 상관관계는 Figure 10에 나타내었다. 그 결과 마찰계수는 T-500이 높을수록 증가하는 정비례의 상관관계를 보였으며, 약 0.8 이상의 높은 상관성을 가지는 것을 알 수 있다.

이러한 결과에서 볼 때 T-500이 품질관리기준 내에서 낮은 영역인 4~7 초의 범위로 관리된다면 보다 양호한 압송효율과 압송성능을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

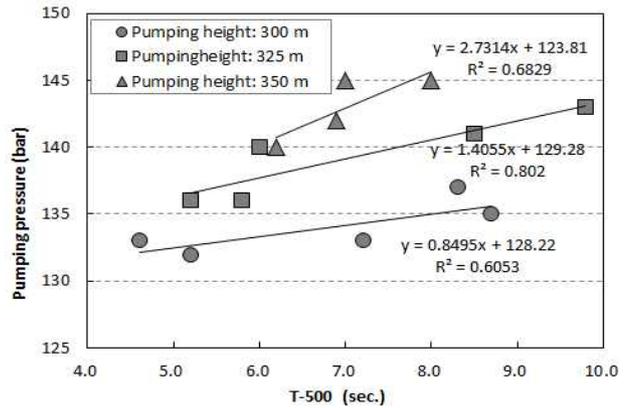


Figure 9. T-500 and pumping pressure

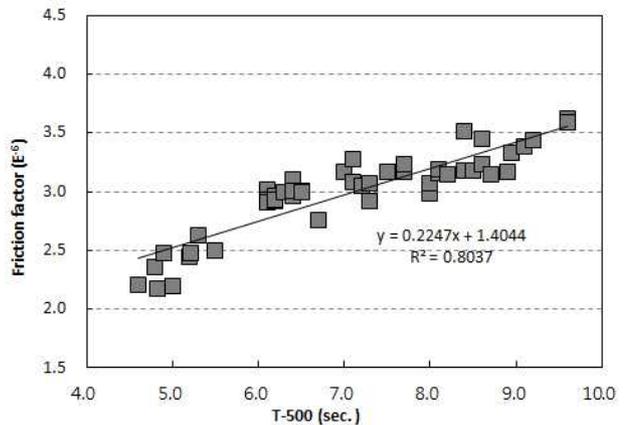


Figure 10. T-500 and Friction factor

5. 결 론

본 연구에서는 초고층 구조물 시공에 사용되는 고성능

콘크리트의 유동특성과 압송성능과의 관계를 구명하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 압송 후의 슬럼프 플로우는 550~595mm로서 품질관리기준인 650 ± 100 mm를 만족하였고, T-500은 압송 후 4.3~6.5 초의 범위로 적절한 반죽질기가 확보되었다. 또한, 펌프압송 시 마찰에 따른 온도증가는 압송높이나 배관길이보다는 외기온도 조건에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 2) 압송 후 초기강도는 5.5~17.5MPa로 품질기준을 만족하였으며, 재령 28일의 압축강도는 압송 후에 92.8~107.0MPa로 압송 전에 비해 최대 10%까지 증가하여, 압송 전·후의 역학적 특성은 모두 품질기준을 만족하였다.
- 3) 펌프에 발생한 최대 유압 및 배관 내 작용하는 최대 압송압력은 압송 높이가 매 50m씩 높아질수록 각각 5~10%, 10~15%씩 증가하였다. 시간당 토출량은 200~300m 에서 28~48m³/h였으나, 350m에서는 25m³/h에 근접하여 추후 굵은 골재 치수 조정 등을 통한 검토가 필요하였다.
- 4) 슬럼프 플로우 변화에 따른 압송성능의 영향으로 압송압력과 배관 내 마찰계수는 슬럼프 플로우의 크기에 반비례하였으며 각각 0.93~0.95 및 0.62 정도의 상관성을 가지는 것으로 나타났다.
- 5) T-500 변화에 따른 영향으로 압송압력과 마찰계수는 T-500이 높아질수록 증가하는 경향을 보였으며, 마찰계수와는 0.80의 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

따라서, 슬럼프 플로우와 T-500은 현장에서 쉽게 평가할 수 있는 유동성 지표임에, 양호한 압송성능을 확보하기 위한 관리지표로써 충분히 활용이 가능할 것으로 사료된다.

요 약

본 연구에서는 초고층 구조물 시공에 사용되는 80MPa의 고성능 콘크리트를 대상으로 높이가 200m부터 350m인 지점까지 압송계측 결과를 근거로 하여 압송성능과 고성능 콘크리트의 유동특성과의 상관관계를 분석하였다. 굳지 않은 콘크리트의 물성과 초기강도 및 기준 재령에서의 압축강도 및 탄성계수는 모두 품질기준을 만족함이 확

인되었다. 또한, 높이별 최대 압송압력은 약 10~15%씩 증가하였으며, 시간당 토출량은 최소 25m³를 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 압송압력과 마찰계수는 슬럼프 플로우의 크기에 반비례하는 것으로 나타났으며, 압송압력과 마찰계수는 T-500이 높을수록 증가하는 경향을 보였다.

키워드 : 고성능 콘크리트, 압송압력, 마찰계수, 펌프압송

References

1. Kim GD, Lee SH, Kang SK, Kim JH, Kim KJ. Evaluation of Rheological Properties of High Strength Concrete at Different Mixing Parameter, Journal of the Korea Concrete Institute, 2007 Aug;19(2):653-56.
2. T. C. Powers, The Properties of Fresh Concrete, New York; 1968, p. 25-40.
3. Ko JW, An Experimental Study on the Physical Property Change of High Strength Concrete for High-rise Building Before and After Concrete Pumping Transfer, Journal of the Architecture Institute of Korea, 2010 Sep;26(9):71-8.
4. Shinichiro M, Change of Flowability of Self-Compacting Concrete due to Pumping [Master dissertation], [Kochi(Japan)]: Kochi University of Technology; 2003, 42 p.
5. Kurokawa Y, Tanigawa Y, Study on Slump test and Slump flow test of Fresh Concrete, Transactions of the Japan Concrete Institute, 1994;16(1):437-42.