

초고층 구조물 시공을 위한 고성능 콘크리트의 펌프압송 기술에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Concrete Pumping Technology of High Performance Concrete for the High-Rise Building Construction

김 규 동¹

한 천 구^{2*}

Kim, Gyu-Dong¹

Han, Cheon-Goo^{2*}

Research & Development Institute, 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, high performance concrete of C60 and C80 were applied to a super tall building and those had satisfactory properties of fresh and hardened concrete to the requirements even changes according to time. Especially the evaluation and analysis of the relation of the rheological properties and pumpability of high performance concrete, C60-14 which was applied to the height of from 500m to 575m in the building, was carried out by measuring pumping pressure and pumping speed, testing concrete properties at before and after pumping. As results, the max. pumping pressure showed increase of 5% at every 25m higher pumping and the average pumping speed showed the above 25m³ per hour which means proper productivity. Additionally it was verified that the loss of slump flow after pumping was increased according to plastic viscosity values and the increment of temperature through concrete pumping.

Keywords : high performance concrete, pumpability, pumping pressure, pumping

1. 서 론

최근 건축물의 고층화, 대형화가 진행되면서 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 수많은 초고층 건축물들이 도시의 랜드마크를 형성하고 있다. 이러한 초고층 건축물을 시공하는데는 많은 핵심요소 기술들이 적용되는데, 그 중에서 특히, 고층부로 콘크리트를 이송시키는 압송기술은 시공 및 생산성 측면에서 상당히 중요한 기술이라 할 수 있다[1].

일반 건축물에 사용되는 보통강도 콘크리트와는 달리 초

고층 건축물에는 고강도, 고유동성을 갖춘 고성능 콘크리트가 필연적으로 사용되어지며, 고성능 콘크리트는 그 배합의 특성상 물결합재비(이하, W/B)가 낮고, 다량의 결합재를 사용함에 따라 일반 콘크리트에 비해 상대적으로 높은 점성을 가지게 된다[2]. 또한, 이러한 고성능 콘크리트를 작은 직경의 배관을 통해 고층부까지 압송할 경우, 배관내에 상당한 부하가 발생하여, 시간당 타설량 감소와 시공생산성 저하를 유발하게 되므로, 고성능 콘크리트에 대한 물성개선이나 장비, 배관시스템의 최적화 등 압송부하를 낮추고자 하는 노력이 필요하게 된다.

따라서 본 연구에서는 설계강도 60~80MPa의 고성능 콘크리트를 적용하는 실제 초고층 건축물을 대상으로, 높이 575m 까지 60MPa 고성능 콘크리트의 수직 압송시 계측결과를 근거로 하여, 펌프압송 성능과 고성능 콘크리트의 유동특성과의 상관관계를 분석, 실제 초고층 건축물 시공시 그

Received : March 3, 2015

Revision received : March 26, 2015

Accepted : April 14, 2015

* Corresponding author : Han, Cheon-Goo

[Tel: 82-2-411-9810, E-mail: cghan@cju.ac.kr]

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

분석결과를 적극 활용함으로써, 초고층 건축물의 시공계획과 초고층 펌프압송 시공 시에 유효한 자료로 활용하고자 한다.

2. 펌프압송 메카니즘

2.1 유동성 변화 메카니즘

2.1.1 콘크리트의 레올로지

굳지 않은 콘크리트는 액체의 성질과 고체의 성질이 동시에 존재하는 물체로 볼 수 있는데, Figure 1과 같은 점성유체의 거동 모델을 통하여 유동 메카니즘을 설명할 수 있다. 점도는 유체의 내부 저항으로 정의할 수 있는데, 거리가 H만큼 떨어진 평행한 두 평판(고정, 비고정) 사이에 유체가 채워져 있을 때 한쪽 평판을 이동시키면 유체의 종류에 따라 평판을 움직이는데 필요한 힘의 크기가 달라진다[4].

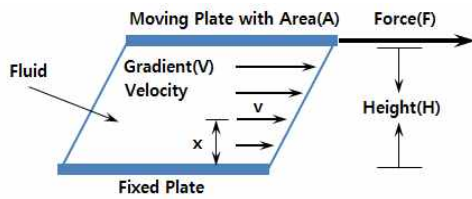


Figure 1. Model of viscous fluid

2.1.2 콘크리트의 유동성 변화 메카니즘

초고층 구조물은 다량의 콘크리트가 최상층부까지 펌프압송을 통해 운반 및 타설이 이루어져야 하므로, 고성능 콘크리트의 적용이 필수적이며, 슬럼프보다는 슬럼프 플로우와 점성과의 관계가 더욱 중요한 요인으로 인식되고 있다.

콘크리트는 일반적으로 압송 전에는 유동성이 저하하면서 점성이 증가하는 성상을 나타내지만 압송 후에는 유동성 및 점성이 함께 저하하는 성상을 나타낸다[4]. 이는, 압송의 영향에 의한 고성능 AE감수제의 구조변화에 의한 것으로, 펌프 압송시, 콘크리트에 큰 압송압력 및 콘크리트중의 골재들 간의 충돌과 마찰 등에 의해 큰 전단력이 가해져서, 고성능 AE감수제에 큰 외력으로 작용되어 Figure 2와 같이 시멘트 입자 주변에 흡착된 고성능 AE감수제의 Side Chain이 수축하는 구조변화가 일어나 입체장애작용 효과의 감소 및 시멘트입자간의 마찰경감 등에 의해 점성의 저하가 발생하는 것으로 분석된다[4].

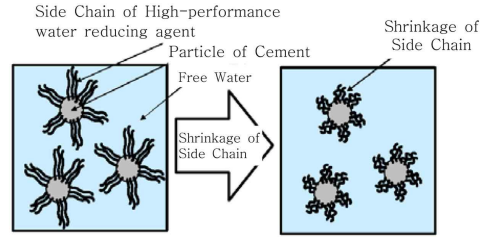


Figure 2. Concrete flowability according shrinkage of chain

2.2 레오미터

콘크리트 압송과정에서의 문제점을 사전에 파악하기 위해, 최근에는 Figure 3과 같이 레오미터에 의한 펌프압송 성능 예측이 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 본 연구에서는 Figure 4의 Binghammodel과 Figure 5의 콘크리트 유동 특성을 고려한 레오미터를 사용하여, 초고층 현장에서의 펌프압송 콘크리트의 품질관리 수단으로의 활용가능성에 대한 검토를 실시한다.

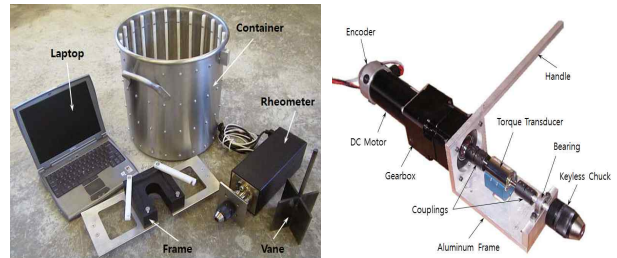


Figure 3. ICAR Rheometer system

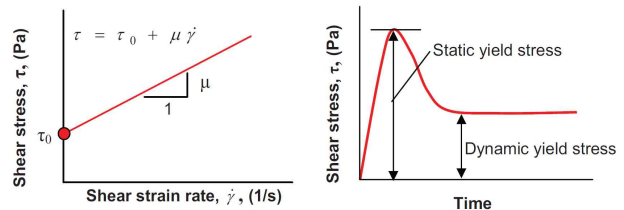


Figure 4. Binghammodel Figure 5. Flow behavior of concrete

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

고성능 콘크리트의 규격별 굳지 않은 특성과 경화 시 역학적 특성 검토를 위한 실험계획은 Table 1, 2와 같다. 먼저, 콘크리트의 규격은 60, 80MPa로 2수준, W/B는 강도 및 골재크기별로 27, 29, 34%로 하였으며, 골재는 14, 20mm의 2수준으로 실험계획 하였다. C80-20과 C80-14는 기준

재령 56일, C60-14는 기준재령 28일에 각각의 설계기준강도를 만족하도록 하였으며, 이에 따라 각 규격별로 마이크로 실리카의 치환율을 차별화하여 적용하였다. 한편, C60-14의 경우만 Table 3과 같이 타설 높이별 압송모니터링을 실시하는 것으로 계획하였다.

한편, 유동특성에 따른 압송가능 여부, 시공 생산성을 극대화할 수 있는 품질관리 시스템을 수립하기 위한 절차는 Figure 6과 같다. 먼저, 압송을 위한 최적배합설계를 위해 원재료 검토, 저점도 HPC 개발을 위한 배합실험을 수행하고, 최적배합으로 도출된 시방배합의 현장 적용에 있어서 반입된 콘크리트의 유동특성과 경화특성에 대한 평가와 압송 시의 압송압력, 토출량 등에 대한 모니터링을 실시하여 생산품질관리에 피드백하는 품질관리 시스템을 실시한다.

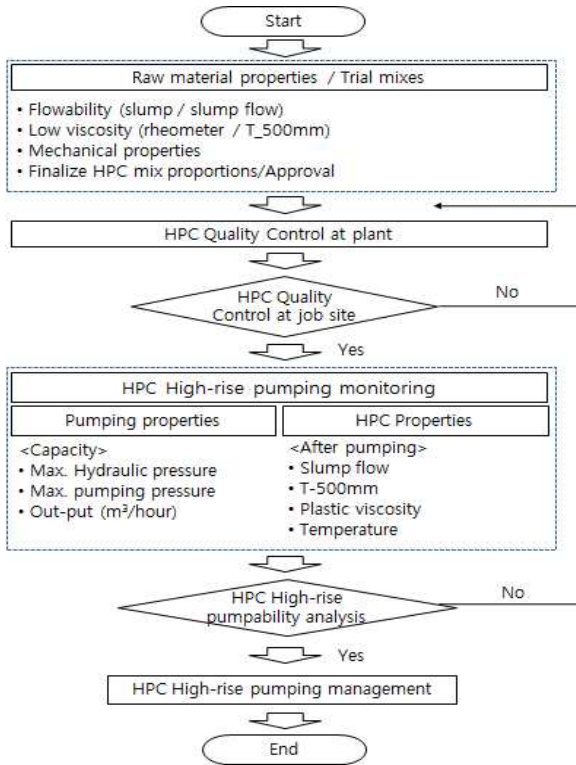


Figure 6. Flow chart of quality management system

Table 1. Experimental factors

Factors considered		Tests Conducted
Compressive strength (MPa)	C60, C80	Slump flow
W/B (%)	27, 29, 34	Temperature
Aggregate size (mm)	14, 20	Air content
Target slump flow (mm)	650±100	Compressive strength
Air content (mm)	2.0±1.0	(28, 56 days)

* Design Strength: $f_{cu}(\text{cube}) = 0.8 \times f_{cy}(\text{cylinder})$

Table 2. Mix proportions of concrete

Type	W/B (%)	Unit Weight (kg/m ³)									
						Coarse Agg.			Fine Agg.		
		W	OPC ^a	FA ^b	MS ^c	20 mm	14 mm	10 mm	W.S ^d	D.S ^e	S.P
C80-20	0.27	132	380	60	44	581	-	327	572	336	6.0
C80-14	0.29	155	384	96	48	-	562	303	525	322	3.5
C60-14	0.34	166	376	94	25	-	465	381	528	352	3.5

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

Table 3. Monitoring plan to the pumping height

Type	Placing quantity	Placing location	Height	Pipeline length
C60-14	84~132m ³	Core Wall	500~575m	589~680m

3.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료로서 시멘트는 현지에서 생산되는 1종 보통 포틀랜드 시멘트로서 BS EN 197-1 CEM1 42.5 N의 품질기준을 만족하는 제품을 사용하였으며, 물리, 화학적 특성은 Table 4와 같다. 플라이애시는 수화열 저감, 유동성 및 내구성 확보 등을 목적으로 사용되었으며, 특히 둥근 입자 형태는 고층부로의 압송특성을 개선할 수 있으므로 그 사용이 필수적이다. 플라이애시는 ASTM Class F 급을 사용하였으며, 인도산으로 물리·화학적 특성은 Table 5와 같다. 실리카 흙(마이크로 실리카)은 ASTM C 1240과 ACI 234R의 관리기준을 만족하는 노르웨이산 E사의 제품으로 강도발현, 내구성 확보 및 압송성 개선을 목적으로 하였으며, 물리·화학적 특성은 Table 6과 같다.

Table 4. Physical and chemical properties of cement

	Test items	Code Standard	Test results
Chemical Properties	LOI (Loss of Ignition,%)	Max.5.0	3.25
	Insoluble Residue (%)	Max.5.0	0.48
	MgO (%)	Max.5.0	1.20
	SO ₃ (%)	Max.3.5	2.46
	Total Alkali as Na ₂ O(%)		0.44
	Chloride (%)	Max.0.1	0.012
	SiO ₂ /CaO (%)		21.0/63.0
	C ₃ S / C ₃ A		52.0/7.05
	Blaine (cm ² /g)		3,560
	Density (kg/m ³)		3.15
Physical Properties	Initial/Final set time (Min)	Min. 60	150/200
	28day Comp. strength (MPa)	42.5 ~ 62.5	54.6

Table 5. Physical and chemical properties of fly ash

Test items	Code Standard	Test results
SiO ₂ (%)		60.1
Al ₂ O ₃ (%)	Totalmin. 70	30.1
Fe ₂ O ₃ (%)		5.0
CaO (%)	Max. 10.0	1.1
MgO (%)		0.71
SO ₃ (%)	Max. 2.0	0.15
Loss of Ignition (%)	Max. 6.0	0.91
Residues on 45 μ m sieve (%)	Max. 12.0	10.1
Blaine (cm ² /g)	Min. 2,000	2,120
Density (kg/m ³)		2.22
Strength Activity (28day)	Min. 75	0.86
Moisture content (%)	Max. 3.0	0.03

Table 6. Physical and chemical properties of micro silica

Test items	Code Standard	Test results
SiO ₂ (%)	Min. 85.0	90.3
Soluble Alkalies Na ₂ O ₃ (%)	-	0.56
CaO (%)	-	0.65
Loss of Ignition (%)	Max. 6.0	2.29
Residues on 45 μ m sieve (%)	Max. 75.0	10.1
Blaine (cm ² /g)	Min. 150,000	212,000
Density (kg/m ³)		2.15
Pozz. Activity Index (%)	Min. 105	145
Moisture content (%)	Max. 3.0	0.03

3.3 펌프압송 모니터링 계획 및 시스템 구성

압송 모니터링은 압송높이 150m지점에서 사전 모니터링을 1차 수행하고, 200m 시점부터 매 50m높이 단위로 모니터링을 수행한다. 높이별 압송모니터링 수행계획 및 계측위치 Figure 7에 나타내었으며, 장비에서 발생하는 유압(P0)과 배관 내 최대 압송압력(P1) 및 수평배관 끝단의 배관 압력(P2)를 측정하고, 시간당 토출량은 분당 스트로크수를 기준하여 펌프의 실효율은 기존연구를 참조하여 80%를 적용하여 산출한다[1]. Figure 8은 압송모니터링 계측 시스템의 구성을 나타낸다.

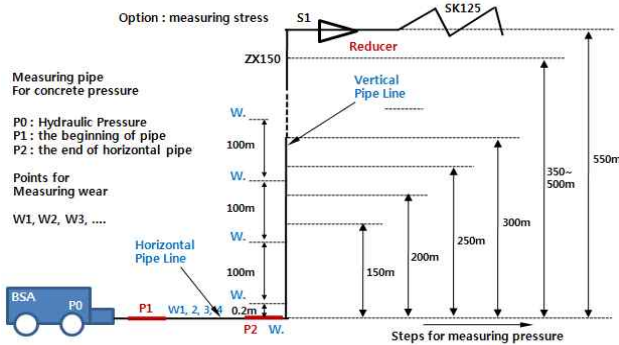


Figure 7. The plan of pumping monitoring

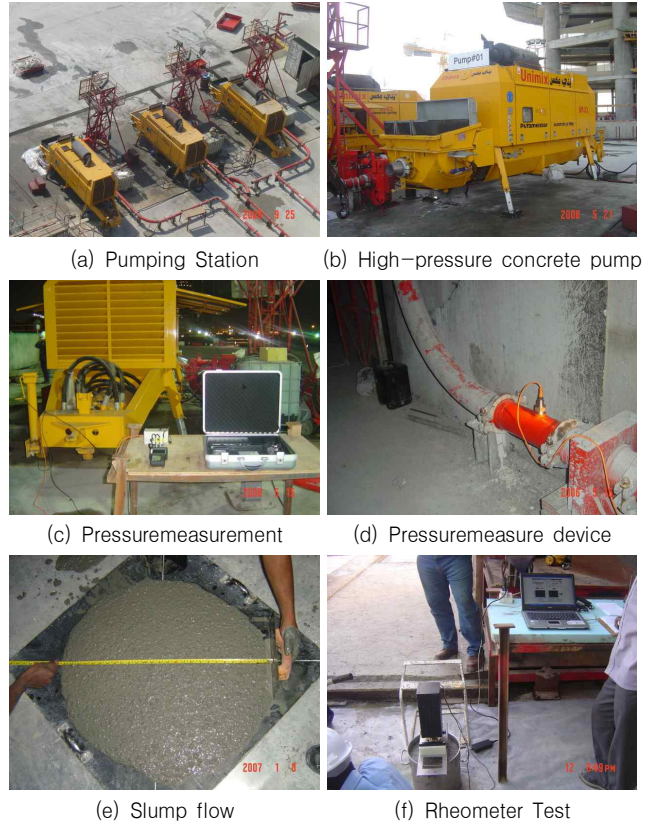


Figure 8. Pumping monitoring instrumentation systems

4. 실험결과 및 분석

4.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

Table 7은 본 실험에 사용된 고성능 콘크리트의 굳지 않은 특성을 나타낸다. 152층까지 적용 예정인 C60-14의 경우, 생산 직후의 슬럼프 플로우가 660mm, 60분이 경과한 시점에 615mm의 값을 나타내어 적절한 변화폭을 가지고, 육안 관찰 시 양호한 반죽질기와 워키빌리티 확보가 가능한 것으로 나타났다. 콘크리트 온도는 규격에 따라 약간 차이는 있지만 27~29℃ 범위의 결과를 보였으며, 공기량이나 단위질량 측정결과도 소요의 품질기준을 만족하는 양호한 시험결과이었다.

Table 7. The Properties of fresh concrete

Type	Slump flow(mm)			Temperature(℃)		Air (%)	Density (kg/m ³)
	0	30Min	60Min	0	60Min		
C80-20	610	585	565	27.0	28.0	1.2	2,464
C80-14	650	625	610	28.0	29.0	1.4	2,393
C60-14	660	630	615	27.5	29.0	1.1	2,384

4.2 경화 콘크리트의 특성

경화 콘크리트의 역학적 특성은 Table 8에 나타내었다. Table 8에서 알 수 있듯이 ACS 거푸집 조기 해체를 위한 재령 12시간의 초기강도와 기준 재령에서의 압축강도 및 탄성계수 값은 모두 양호한 결과를 나타내었다.

원재료 검토에서부터 실내배합 그리고 BP Test에 이르는 일련의 과정을 통해 도출된 3가지 규격의 고성능 콘크리트는 경화상태에서의 역학적 특성 측면에서 모두 품질관리기준을 만족하여 배합의 적정성을 확인할 수 있었으며, 특히, C80-20의 경우는 12시간의 초기강도는 다소 낮았지만, 이후의 재령에서는 가장 우수한 강도특성을 나타내었고, C80의 경우는 W/B 변화에 따른 강도차이가 확인되었다.

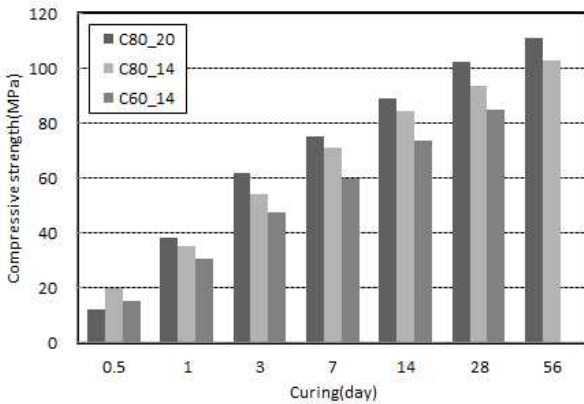


Figure 9. Compressive strength to the concretemixtures

Table 8. Themechanical properties of hardened concrete

Type	Comp. strength test results(MPa)								Elasticmodulus (GPa)		
	0.5D*	1D	3D	7D	14D	28D	56D	28D	56D	91D	
C80-20	12.0	38.0	62.0	75.0	89.0	102.5	111.0	48.4	49.8	51.2	
C80-14	20.0	35.0	54.0	71.0	84.5	93.5	103.0	45.7	46.7	-	
C60-14	15.0	30.5	47.5	60.0	73.5	85.0	-	41.9	-	-	

* D : day

4.3 타설 높이별 콘크리트 펌프압송 모니터링 결과

4.3.1 압송성능 계측 결과

C60-14 콘크리트는 지상 138층(500m)부터 지상 152층(575m)까지 적용되었으며, 500m지점부터 매 25m마다 총 4차에 걸쳐 모니터링을 실시하였다. 모니터링 결과는 Table 9에 요약 정리하였으며, Figure 10~12는 수직높이에 따른 압송 모니터링 결과를 나타낸다. 초고압 펌프는 고압방식 상태로 운영되었으며, 안전율을 고려하여 장비에 작용하는 최

대 유압(Max. Hydraulic pressure)과 압송시 배관내 작용하는 최대압송 압력(Max. Pumping pressure)을 220bar로 설정하여 관리하였으며, 시간당 토출량(Pumping speed)은 시공생산성을 고려하여 최소 25m³로 설정하였다.

Table 9. Pumpability monitoring results of C60-14

Items	1st	2nd	3rd	4th
Concrete Type	C60-14			
Pumping height(m)	500	525	550	575
Pipeline length*(m)	636	659	685	705
Slump flow(mm)	645~710	540~650	625~680	580~685
Max. Hydraulic pressure(bar)	165~180	165~188	171~182	181~200
Max. Pumping pressure(bar)	155~170	160~185	166~177	175~197
Stroke(times/min)	9.5~11.0	8.5~11.0	8.8~9.9	7.0~9.6
Pumping Speed(m ³ /h)	32~35	35~38	30~32	25~31

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

펌프에 발생하였던 최대 유압은 500m 이상의 높이에 압송할 시에도 160~200bar 범위로서 안전측인 것을 알 수 있었고, 최대 압송압력은 압송높이가 높아짐에 따라 지중의 증가에 따라 완만하게 증가하는 경향을 보였으며, 575m 높이에 압송할 경우에도 135bar의 지중영향을 제외할 경우 배관길이와 곡관에 의한 영향은 45~60bar 정도 발생하는 것을 알 수 있었다. 시간당 토출량 검토에서 시간당 25~38m³의 결과를 보였으며, 극초고층의 콘크리트 시공에도 충분한 압송효율을 가지는 것이 확인되었다.

한편, 모니터링 결과, 높이별 최대 압송압력이 약 5% 정도 씩 증가하는 일반적인 경향을 보였으며, 시간당 토출량도 25m³를 만족하는 안정적인 압송효율을 나타내었다.

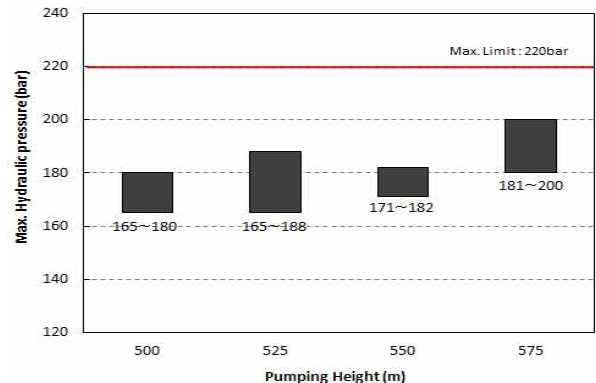


Figure 10. Themax. hydraulic pressure and pumping height

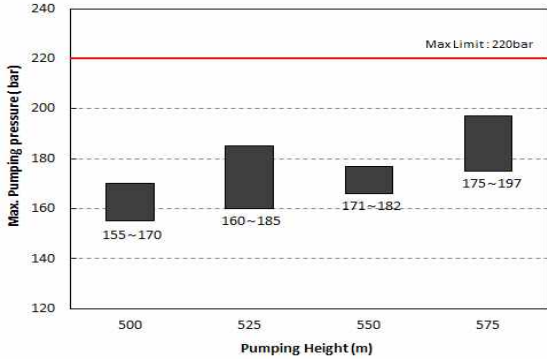


Figure 11. Themax. pumping pressure and pumping height

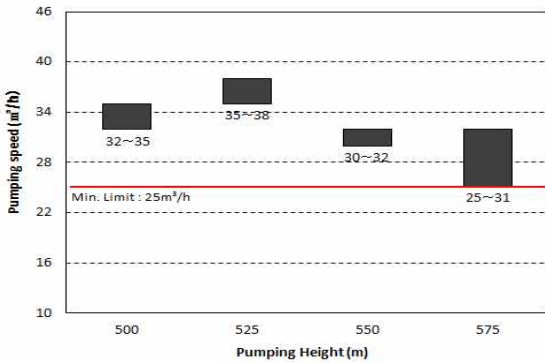


Figure 12. Pumping speed and pumping height

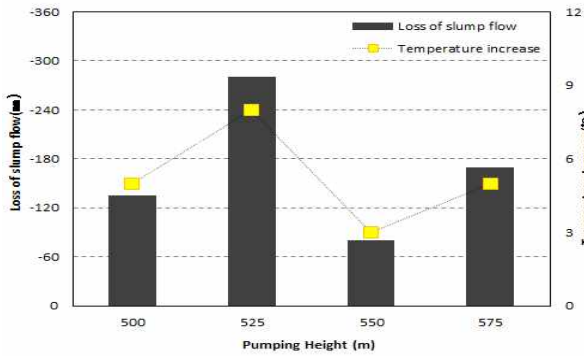


Figure 13. Slump flow loss and pumping height

4.3.2 압송 전·후 콘크리트 물성변화 고찰 결과

C60-14콘크리트의 압송 전·후 물성은 Table 10과 같이 고층부 압송에 유효한 것으로 나타났다. 타설시기가 7월부터 9월까지 하절기이었기 때문에 압송 전후의 물성변화가 외기온도에 크게 좌우되었음을 알 수 있는데, Figure 13과 같이 8월에 실시한 2차 모니터링 결과를 보면, 압송 후의 온도가 8°C 증가함에 따라 슬럼프 플로우 손실이 280mm로 크게 증가됨을 알 수 있다.

경화 콘크리트의 특성 중 재령 12시간의 초기강도는 압송 후에 1.3~2.0배 높게 나타났으며, 기준재령은 압송 전·후

에 거의 유사한 결과를 나타냈다.

한편, 레오미터 시험결과, 압송 전의 소성점도 크기에 따라 슬럼프 플로우 손실도 비례하여 커지는 것으로 나타났으며, 압송 후의 소성점도는 다소 차이는 있지만 압송 전에 비해 약 40~50% 수준으로 낮아지는 경향을 보여 펌프압송 시 레오미터를 통해 콘크리트의 유동특성을 정량화하는 것이 가능할 것으로 사료된다.

Table 10. Monitoring results for properties and rheology of C60-14

Items	1st	2nd	3rd	4th
Pumping height (m)	500	525	550	575
Slump Flow (mm)	Bef. ^a	645	650	680
	Aft. ^b	510	370	600
Loss	Bef. ^a	-135	-280	-80
	Aft. ^b	-135	-280	-80
Temperature. increase (°C)	+ 5.0	+ 8.0	+ 3.0	+ 5.0
Plastic viscosity (Pa · sec)	Bef.	34.4	64.5	39.0
	Aft.	16.5	33.4	21.9
12Hours E. ^c	Bef.	15.0	18.5	9.8
Comp. ^d (MPa)	Bef.	15.0	18.5	9.8
	Aft.	19.6	21.0	18.5
28Days Comp. (MPa)	Bef.	69.5	71.0	68.8
	Aft.	69.0	72.5	70.5
28Days E.mod. ^e (GPa)	Bef.	39.5	40.9	41.1
	Aft.	41.0	41.4	42.5

^a Before pumping, ^b After pumping, ^c Early, ^d Compressive strength, ^e Elastic modulus

5. 결 론

본 연구에서는 초고층 구조물 시공시, 적용되는 규격별 고성능 콘크리트의 유동특성과 경화특성을 평가하고 압송높이별 압송성능을 모니터링하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 고성능 콘크리트의 굳지 않은 특성으로, 경시변화에 따른 각 규격별 슬럼프 플로우 손실은 40~45mm로 유사한 경향으로 품질기준을 만족하는 결과를 나타내었다. 하지만, 60MPa HPC의 수직압송 시험결과에서 알 수 있듯이 압송 마찰에 따른 슬럼프 플로우 손실과 온도증가량이 크게 나타났으며, 이를 고려한 생산품질 관리와 추가적인 데이터 확보와 분석이 필요한 것으로 판단되었다.
- 2) 경화 콘크리트 특성으로 ACS거푸집 조기 해체를 위한 재령 12시간의 초기강도와 기준 재령에서의 압축강도 및 탄성계수 값은 모든 규격의 HPC와 60MPa HPC의 수직 압송에 따른 압송 전·후의 평가에서도 양호한 결과를 나타내었다. 특히, 재령 12시간의 초기강도는

압송 후에 상당히 높은 값을 나타내어 초기강도에 대한 합리적인 평가방법에 대해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

- 3) 펌프압송성능의 모니터링 결과, 높이별 최대 압송압력이 평균적으로 약 5% 정도씩 증가하는 일반적인 경향을 보였으며, 시간당 토출량도 25m³ 이상의 안정적인 압송효율을 나타내었다. 또한, 펌프압송 후 콘크리트의 온도증가와 압송 전의 콘크리트 소성점도의 크기에 따라 슬럼프 플로우의 손실이 증가됨을 확인할 수 있었다.

요 약

본 연구에서는 초고층 구조물 시공시, 적용되는 규격별 고성능 콘크리트의 특성을 평가하고 60MPa의 고성능 콘크리트를 대상으로 높이가 500m부터 575m인 지점까지 압송 계측 결과를 근거로 하여 압송성능과 고성능 콘크리트의 유동특성의 상관관계를 분석하였다. 분석 결과, 각 규격별 굳지 않은 콘크리트의 물성과 재령 12시간의 초기강도 및 기준 재령에서의 압축강도 및 탄성계수는 모두 품질기준을 만족함이 확인되었다. 또한, 높이별 최대 압송압력은 약 5% 정도씩 증가하였으며, 시간당 토출량도 최소 25m³를 만족하는 것으로 나타났다. 펌프압송 후 콘크리트의 온도증가와 압송 전의 콘크리트 소성점도의 크기에 따라 슬럼프 플로우의 손실이 증가됨을 확인할 수 있었다.

키워드 : 고성능 콘크리트, 압송성능, 압송압력, 펌프압송

References

1. Kim GD, Lee SH, Kang SK, Kim JH, Kim KJ, Evaluation of Rheological Properties of High Strength Concrete at Differentmixing Parameter, Journal of the Korea Concrete Institute, 2007 Aug;19(2):653-56.
2. Lee JH,moon HJ, Kim JJ, An experimental study on puMPability characteristics of high strength concretemixed polymix, Journal of the Korea Concrete Institute, 2012 Oct;24(5):509-16.
3. Goto K, Pumping up of Concrete in the 296m High-rise Building, Journal of the Architecture Institute of Japan, 1993;197-98.
4. Jiro S, Change in Flowability of Self-CoMPacting Concrete due to External Force[master's thesis],[Kghi (Japan)]: Koghi University of Technology; 2003. 28 p.