폴리믹스 혼입 고강도 콘크리트의 펌프압송 성상에 관한 실험적 연구

이주호¹⁾ · 문형재²⁾ · 김정진^{1)*}

¹⁾롯데건설(주)기술연구원 ²⁾잠실 롯데월드타워 현장

An Experimental Study on Pumpability Characteristics of High Strength Concrete Mixed Polymix

Joo-Ho Lee,¹⁾ Hyung-Jae Moon,²⁾ and Jeong-Jin Kim^{1)*}

¹⁾LOTTE Engineering & Construction Company, Research & Development Institute, Seoul 140-846, Korea

²⁾LOTTE Engineering & Construction Company, Lotte World Tower Construction Site in Jamsil, Seoul 138-240, Korea

ABSTRACT The aims of this research is to develop a fire resistant admixture to enhance high-pressured pumping of high-strength concrete (HSC) with a compressive strength of 60~80 MPa. Generally, the efficiency of HSC high-pressured pumping is dramatically reduced due to entanglement of short fibers added to prevent fire spalling. Therefore, the fire resistant admixture that can facilitate pumping of fire resistant HSC is urgently needed presently. The fire resistant HSC mix is comprised of Polypropylene fiber, Nylon fiber and Polymer powder. The test results showed that the slump-flow was improved by approximately 70% of the HSC without fire resistant admixture. However, the air void content was increased slightly due to the addition. The standard design compressive strength at 28-days was satisfied, while its flexural strength was similar to the concrete without the admixture. Since the flexural strength was 12~15% of its compressive strength, the general trend of flexural to compressive strength ratio in normal concrete was maintained. Even though its elastic modulus was decreased by adding the admixture, the study results showed that the concrete can be used for construction since all of the test results exceeded the code requirements.

Keywords : polymix, fiber mixed concrete, elastic modulus, pipe pressure, coefficient of friction

1. 서 론

고강도 콘크리트는 부재의 축소나 경량화가 가능해, 설계기준강도 50 MPa 이상의 고강도 콘크리트를 이용한 교량이나 건축물의 공사가 증가하고 있다.¹⁾ 또한, 현재는 콘크리트 구조물의 장수명화가 중시되고 있어, 내구성의 향상도 도모할 수 있는 고강도 콘크리트의 적용범위는 더욱 넓어지고 있는 실정이다.

특히 초고층 구조물의 건설이 증가하면서 고강도 콘크리트의 필요성 및 초고층 위치까지의 타설 방안에 대한 연구도 활발히 진행되고 있는데, 이러한 여러 방안 중 펌프압송이 가장 효율적인 방안으로 인식되고 있다.²⁾ 그러나 현재 고강도 콘크리트 펌프압송 시공에 있어서 중요한 문제점 중 한 가지로 펌프압송 후 유동성 변화를 들 수 있는데, 펌프압송시의 유동성 변화에 대한 기존 연구 결과³⁾에서는 펌프압송 후 슬럼프 플로우가 감소하는 것으로

보고되고 있지만, 수평배관 시험시 압력과 실제 수직배관 시공시 압력변화의 차이에 따른 펌프압송 전후의 성상 변화에 대해서는 명확하게 규명되어 있지 않은 실정이다.

한편, 초고층 구조물에 50 MPa 이상 고강도 콘크리트를 적용할 경우 내화관리기준(국토해양부 고시)³⁾을 만족해야 하는데, 현재의 여러 내화공법 중 부재 단면을 변화시키지 않으면서 내화성능을 확보할 수 있다는 장점 때문에 일반적으로 섬유혼입 공법을 적용하는 경우가 늘고 있다. 그러나 이 경우 콘크리트의 강도가 높아질수록 섬유혼입량도 함께 증가시켜야 하는 문제가 있다.

콘크리트는 고강도화 될수록 점성이 증가하게 되는데, 내화성능 확보를 위해 섬유를 혼입하면 점성증가와 함께 유동성이 크게 감소하게 되므로, 초고층까지의 펌프압송성 및 시공성을 저감시키는 원인이 될 수 있다. 그러나 콘크리트에 300 μ m 이내의 미립자를 첨가하면, 미립자의 윤회작용으로 고강도 콘크리트의 펌프압송 시 관내저항을 저감시켜 펌프압송성 및 유동성을 향상시키는 것이 가능하다는 연구 결과가 보고된 바 있다.⁴⁾

따라서 이 연구에서는 기존에 사용되던 섬유혼입 공법에 폴리머 분말을 추가하여 최소의 섬유혼입량으로 내화

*Corresponding author E-mail: duson12@lottenc.com

Received February 9, 2012, Revised July 24, 2012,

Accepted August 9, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

성능을 확보함과 동시에 펌프압송시 고강도 콘크리트의 관내저항을 저감시켜 섬유혼입 고강도 콘크리트의 펌프 압송성능을 향상시키고자 폴리믹스(PP섬유 + 나이론섬유 + 폴리머분말) 혼입공법을 개발하였으며, 초고압펌프를 사용한 600 m 수평펌프압송실험 실시를 통해 펌프압송 전후의 각종 특성을 분석함으로써 섬유혼입 고강도 콘크리트의 펌프압송 후의 유동성 예측을 위한 기초 자료로 제시하고자 한다.

2. 기존문헌 고찰

2.1 펌프압송성 예측

유체의 위치에너지와 운동에너지의 합은 항상 일정하다는 성질을 이용하여 유체가 흐르는 속도와 압력, 높이의 관계를 수량적으로 나타내면 Fig. 1과 같다. 베르누이 정의와 에너지평형 이론을 바탕으로 마찰계수 λ 를 산출하고 이를 바탕으로 배관 내 콘크리트 압력 및 시간당 토출량을 산출할 수 있다. 특히 섬유혼입 시 엉킴현상 등으로 인해 유동성 및 압송성이 저하되는 현상이 일반적인데, 이를 보완하기 위한 마찰계수 저감방안, 파이프 압력, 펌프압력 등에 대한 펌프압송성 예측 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 이 연구에서는 마찰계수 산정은 식 (1)을, 이때의 시간당 토출량은 식 (2)를 활용하고자 한다.

$$F = \frac{(\Delta P \times \pi \times D^3)}{(16 \times O \times L)} \times 1000000 \quad (1)$$

여기서,

F = 마찰계수

ΔP = 일정지점에서 관내압력감소

D = pipe diameter (mm)

O = output (m³/hr)

L = pipe length (m)

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \times L \times S \quad (2)$$

Fig. 1 Estimation of pumpability by bernoulli's theorem

여기서,

Q = 시간당 토출량 (m³/hr)

D = delivery cylinder diameter (m)

L = delivery cylinder length (m)

S = cylinder에 1시간 동안 콘크리트가 채워진 회수

이때 이 실험을 위해 사용된 초고압펌프의 delivery cylinder의 직경은 180 mm, 길이는 2.1 m이다.

2.2 유동성 변화 메커니즘

펌프압송에 의한 콘크리트의 유동성 변화의 원인을 고성능 AE감수제의 구조변화에 착안한 기존 연구에 의하면, 콘크리트 정치 후의 성상은 압송 전에 비해 유동성은 저하하고 점성은 증가하여 일반적인 유동성과 점성의 관계를 나타내고 있지만 압송 후의 성상변화는 유동성 및 점성이 함께 저하하므로 일반적인 유동성과 점성의 관계 메커니즘으로는 설명이 힘들 것으로 판단된다.⁵⁾

한편, 이러한 압송 전·후의 콘크리트 유동성 변화는 압송의 영향에 의한 고성능 AE감수제의 구조변화에 의한 것으로, 고성능 AE감수제는 주사슬에 의해서 시멘트 입자 표면에 흡착되고, 옆사슬의 입체장해 작용에 의해 시멘트입자를 분산시킨다. 압송시, 콘크리트에는 큰 압송 압력 및 콘크리트 중의 골재들 간의 충돌과 마찰 등에 의해 큰 전단력이 발생하여, 고성능 AE감수제에 큰 외력으로 작용하게 되면 Fig. 2와 같이 시멘트입자 주변에 흡착된 고성능 AE감수제의 측쇄(側鎖)가 수축하는 구조변화가 일어나 입체장해 작용의 효과감소 및 시멘트입자 간의 마찰경감 등에 의해 점성의 저하가 발생하는 것으로 사료된다.⁶⁾

2.3 폴리믹스 혼입에 의한 폭렬방지 메커니즘

초고층 구조물 시공에 있어 고강도 콘크리트의 사용은 계속적으로 증가하고 있는 추세이다. 그러나 고강도 콘크리트는 내부가 치밀한 공극구조로 이루어져, 화재발생시 고온에 의한 수증기압으로 콘크리트가 떨어져 나가는 폭렬이 발생할 수 있어, 화재시에는 일반강도 콘크리트보다 오히려 더 취약할 수 있다. 최근에는 고강도 콘크리트에 섬유를 혼입하여, 섬유가 고온에 녹아 생긴 통로로 콘크리트 내부의 수증기가 배출되도록 하여 콘크리트

Fig. 2 Concrete flowability according shrinkage of chain⁷⁾

의 폭발을 방지하는 방안이 고강도 콘크리트의 내화공법으로 채택되어 널리 적용되고 있는 실정이다.

그러나 고강도 콘크리트의 내화성능을 확보하기 위해 섬유를 단독으로 혼입할 경우, 내화성능은 확보할 수는 있는 반면, 콘크리트의 점성을 크게 증가시켜 펌프 압송 성능이 저하되므로, 결국 500 m 이상 초고층까지 섬유혼입 고내화 고강도 콘크리트를 펌프압송을 통해 압송하여 시공하고자 할 경우 어려움이 발생할 수 있다.

한편, Fig. 3은 유기질섬유와 폴리머분말(구형, 크기 250 μm 이하)을 혼합한 Polymix(이하 PM)의 SEM 결과를 나타낸 것이며, Fig. 4는 PM를 혼입한 고강도 콘크리트의 폭발방지 매커니즘을 나타낸 것이다. PM는 3개의 서로 다른 용융점을 가진 섬유와 분말로 이루어져 있는데, 화재발생 초기 콘크리트 내부가 120°C까지 상승하면 폴리머분말이 먼저 용융되고, 이때 발생된 공극으로 온도상승에 의해 생성된 수증기가 이동, 수증기압이 감소되며, 이후 PP섬유, NY섬유의 용융에 의해 생성된 통로를 통해 수증기를 외부로 배출, 콘크리트의 폭발을 방지하는 원리이다.

이를 통해 고강도 콘크리트가 화재에 노출시 콘크리트의 내화성능이 확보되는 물론이며, 300 μm 이하의 미립자가 혼입되어 있음으로써, 평상시에는 미립자의 볼베어링작용에 의해 펌프압송성능이 대폭 개선⁴⁾되어 고내화 고강도 콘크리트의 초고층 시공을 가능하게 할 수 있다.

Fig. 3 The composition of polymix (SEM)

Fig. 4 Mechanism of fire resistance by mixing polymix

3. 실험 개요

3.1 실험계획 및 배합

Table 1은 이 실험의 배합사항을 나타낸 것으로, 고강도 콘크리트 설계강도는 최고강도인 80 MPa와 최상부 타설예정인 60 MPa를 대상으로 하였고, 3성분계 결합재(OPC:FA:SF)를 사용하였다. PM 혼입 유무에 따라 각종 역학적 특성을 검토하기 위한 W/B는 80 MPa의 경우 22.5%, 60 MPa의 경우 27.5%로 설정하였으며, 목표 슬럼프 플로우는 700 $\pm$ 50 mm, 목표 공기량은 2.0 $\pm$ 1.0%이다.

또한 PM 혼입의 경우 기존 배합과 동일하게 적용하였고, 혼입량은 콘크리트 전체용적 대비 0.1% 투입하였으며, Superplasticizer(이하 SP)제 사용량은 0.15%씩 증가시키는 것으로 설정하였다.

3.2 사용 재료

이 실험에 사용한 재료로 결합재 중 시멘트는 국내 T사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC), 플라이애시는 보령산 2종 플라이애쉬(FA), 실리카퍽은 스웨덴 E사의 densified 제품(SF)을 사용하였는데, 이들의 물리화학적 특성은 Table 2와 같다.

혼화제로써 고성능 AE감수제는 국내 S사의 폴리칼본산계를 사용하였고 그 물리적 특성은 Table 4와 같다.

특히, 이 실험에 사용된 PM의 물리적 특성은 Table 5와 같다. PM는 전술한 바와 같이 고강도 폭발방지재로서 폴

Table 1 Mixture proportion

Strength (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	SP/B (%)	Unit weight (kg/m ³)					
				W	C	FA	SF	S	G
80	22.5	43	1.65	152	507	135	34	660	887
60	27.5	47	1.5	160	437	116	29	764	875

Table 2 Physical and chemical properties of binders

Type	Chemical component (%)					Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Blaine (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
Cement	20.50	5.20	3.29	61.63	3.41	3414	3.15
Fly ash	51.89	29.49	6.92	4.91	0.98	4155	2.20
Silica fume	91.26	2.01	0.85	1.20	0.40	200000	2.20

Table 3 Physical properties of aggregates

Type	Density (g/cm ³)	FM	Absorption ratio (%)	0.08 mm passing ratio (%)
Sea sand	2.59	1.70	1.80	0.30
Crushed sand	2.68	3.70	1.90	2.40
Crushed coarse aggregate	2.68	6.30	1.00	0.10

리머 분말:폴리프로필렌섬유:나일론섬유 = 50:25:25(%)로 구성되어 있다. 이 중 폴리머 분말은 밀도가 0.93 g/cm^3 , 직경은 $250 \mu\text{m}$, 용융점은 127°C 이다. 섬유 중 폴리프로필렌섬유(PP)는 밀도가 0.91 g/cm^3 , 길이가 19 mm , 직경이 $70 \mu\text{m}$, 용융점이 162°C 이고, 나일론섬유(NY)는 밀도가 1.15 g/cm^3 , 길이는 12 mm , 직경이 $22 \mu\text{m}$, 용융점은 220°C 로 가장 높다.

3.3 시험 항목 및 시험 진행사항

PM의 혼입유무에 따른 각종 시험항목을 설정하였다. 콘크리트의 펌핑 전 후 굳지 않은 특성, 경화특성, 펌프 및 파이프압력 관련 각종 특성을 검토하고자 하였으며, 시험 항목은 Table 6과 같다. 각 위치별 펌핑 압력은 사용배관의 중앙부에 구멍을 뚫어 전기식 다이어그램 방식의 압력센서를 설치하여 측정하였다.⁷⁾

이 테스트를 위해 펌프는 P사의 570 Kw급 초고압펌프를 사용하였고, 파이프는 ZX125, 8.8 T, 내경 125 mm (5 inch)로 200 Bar 이상의 압력을 견딜 수 있는 독일에서 생산된 파이프를 사용하였다.

기존에 수행된 펌프압송 테스트의 경우 우수한 초고압 펌프를 이용했음에도 불구하고, 파이프는 상대적으로 낮은 압력범위의 제품을 사용하여 실제 초고층 시공시에

Fig. 5 Test view of pumpability

발생할 수 있는 최대 250 Bar의 상황을 실험을 통해 확인하지 못하는 단점이 있었다.

Fig. 5는 펌프압송 mock-up테스트 광경으로, 최대 250 Bar의 펌프압력 상황을 실험을 통해 확인하기 위해서 현장 상황과 유사한 환경을 설정한 후, PM의 혼입유무에 따른 펌프압송 전 후의 각종 특성을 비교 검토하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 굳지 않은 특성

4.1.1 슬럼프 플로우

PM의 혼입유무에 따른 고강도 콘크리트의 슬럼프 플로우 검토 결과는 Fig. 6 및 7과 같다. 먼저 무혼입의 경우 압축강도 60, 80 MPa 펌프압송 전 측정 결과는 각각 710 mm, 740 mm로 목표 슬럼프 플로우 $700 \pm 50 \text{ mm}$ 를 만족하였다. 펌프압송 후 배관을 통과한 콘크리트의 슬럼프 플로우는 60 MPa, 80 MPa의 경우 각각 570 mm, 540 mm로 감소율이 20% 및 27% 정도 발생하였다.

한편, PM 혼입에 따른 슬럼프 플로우는 SP제 사용량이 plain 대비 0.1% 정도 증가하여 펌프압송 전 슬럼프 플로우는 기준을 만족하였고, 펌프압송 후 슬럼프 플로우값이 60 MPa, 80 MPa의 경우 각각 710 mm, 610 mm로 감소율은 각각 1% 및 8% 발생하였다.

Fig. 6 Slump flow test results of 60 MPa concrete

Table 4 Properties of chemical admixture

Type	Main component	Density (g/cm^3)	pH	Viscosity (cp)
Superplasticizer	Polycarbonic acid	1.10	6.50	40

Table 5 Properties of fire resistance materials (PM)

Fire resistance material		Density (g/cm ³)	Length (mm)	Diameter (mm)	Melting point (°C)
Polymer powder		0.93	-	0.25	127
Fiber	Polypropylene	0.91	19	0.07	162
	Nylon	1.15	12	0.02	220

Table 6 Test items

Type	Test items
Fresh properties	- Slump flow (mm) - Air content (%) / viscosity
Hardened properties	- Compressive strength (MPa) - Flexural strength (MPa) - Elastic modulus
Pumpability properties	- Maximum pump pressure (Bar) - Pump cylinder stroke time - Output ($\text{m}^3/\text{hr.}$)
	- Maximum pipeline pressure (Bar)
	- Pipeline pressure with length (for every 100 m point)
	- Pressure reducing ratio of pipeline (Bar)
	- Friction factor

Fig. 7 Slump flow test results of 80 MPa concrete

Plain에 비해 PM 투입시 약 70% 정도 슬럼프 플로우가 개선되었는데, 이는 폴리머분말의 구형 미립자 성분의 직경이 300 μm 정도로, 폴리머분말의 불베어링 효과에 의한 유동성 개선에서 기인된 것으로 판단된다.

4.1.2 공기량

공기량은 Fig. 8과 같이 60 MPa 및 80 MPa의 경우 모두 목표공기량 2.0 $\pm$ 1.0%를 만족하였고, PM의 혼입유무에 따른 공기량은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

한편 펌핑 후 공기량 상승효과는 60, 80 MPa의 경우 각각 0.5~1.0%, 1.4~1.6% 상승하였다. 일반적으로 콘크리트 펌핑 후에는 공기량이 감소되는 것으로 보고되고 있으나, 일부 펌프압송성 테스트에서는 압송 후 공기량이 증가하는 것으로 보고되고 있다.⁸⁾ 이는 수평압송시 배관 내 콘크리트층 상부에 발생하는 공기층에 기인한 것으로 판단되며, 사용된 AE제 등이 펌프압송장치의 호퍼에서 콘크리트와 함께 강력하게 교반되면서 AE제의 역할이 활성화되어 공기량이 순간적으로 늘어나고 강력한 피스톤 압력에 의해 펌핑시 공기량이 추가 투입된 것으로 판단된다.

4.1.3 점성

60 MPa의 PM 혼입 고강도 콘크리트의 전단속도와 전단응력의 상관관계를 Fig. 9와 같이 나타내었다.

Fig. 8 Air content test results of 60 and 80 MPa concrete

Fig. 9 Correlation between shear rate and stress

Bingham 모델식을 활용한 결과, 콘크리트 펌프압송 후 소성점도는 감소하고 항복응력은 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 펌프압송 후 단위수량의 감소하고 공기량이 증가함에 따른 결과로 판단된다.

4.2 경화 특성

4.2.1 압축강도

28일 압축강도 측정 결과는 Fig. 10, 11과 같다. 재령 28일에서의 압축강도는 강도수준에 관계없이 모두 설계강도를 만족하는 것으로 나타나 이 배합을 적용하기 위한 콘크리트 강도 관리기준일을 재령 28일로 설정해도 무방할 것으로 판단된다. PM의 혼입에 따라 콘크리트의 탄성계수가 감소 및 폴리머 필름 형성으로 압축강도는 plain 대비 약 1.54% 정도 감소하는 것으로 나타났으나 설계기준강도에는 큰 변화가 없는 것으로 확인되었다.

4.2.2 휨강도

휨강도 측정결과는 Fig. 12와 같다. 일반적으로 고강도 콘크리트 영역으로 갈수록 취성적 파괴에 의해 휨강도 발현율은 낮게 나타난다. 보통 압축강도 40~50 MPa에서는 휨강도가 압축강도의 1/7~1/8, 압축강도 100 MPa급의

Fig. 10 Compressive strength of 60 and 80 MPa concrete

초고강도 콘크리트에서는 약 1/10 정도로 알려져 있다. 이 연구결과에서도 휨강도 발현율이 압축강도 대비 12~15% 정도로 기존 연구 결과와 유사하게 나타났으며, PM을 혼입함에 따라 기존 plain 대비 약 15~20% 정도 휨강도가 증가되는 것으로 나타났다.

4.2.3 탄성계수

이 실험을 통해 도출된 탄성계수와 기존 KBC코드에

Fig. 11 Tensile strength of 60 and 80 MPa concrete

Fig. 12 Flexural strength of 60 and 80 MPa concrete

Fig. 13 Elastic modulus of 60 and 80 MPa concrete

의해 계산된 탄성계수와 비교를 실시한 결과, Fig. 13과 같이 PM 혼입 유무에 따라서 PM를 혼입한 경우 탄성계수가 0.2~2.5% 감소하는 것으로 나타났지만, 실험 결과값은 기존 KBC코드를 통해 예측한 탄성계수에 비해 높은 값을 발현하므로 현재 개발된 고강도 콘크리트가 구조재료로 적용이 가능함을 확인하였다.^{8,9)}

4.3 압송 특성

4.3.1 파이프 및 펌프의 최대압력

60 MPa 및 80 MPa의 PM 혼입 유무에 따른 펌프 및 배관의 압력 측정 결과는 Fig. 14~17과 같고 60 MPa 및 80 MPa의 섬유혼입 유무에 따른 파이프 및 펌프의 최대 압력 측정 결과는 Fig. 18과 같다. Plain의 경우 펌프 최대압력은 60 MPa가 325 Bar, 80 MPa가 317 Bar로 측정되었고, 파이프의 최대압력은 570 m 지점을 통과하는 60 MPa의 경우 161 Bar, 228 m 지점을 통과하는 80 MPa의 경우 179 Bar로 나타났다.

60 MPa의 경우 PM 혼입 유무에 관계없이 펌프 및 파이프 최대압력은 유사하게 나타났으나, 80 MPa의 경우는 plain에 비해 PM 혼입시 파이프 및 펌프의 최대 압력이 오히려 낮게 발생되었다. 콘크리트에 섬유를 투입하면 섬유의 엉킴현상 등으로 콘크리트의 점성이 증가, 콘크리트의 유동성을 크게 저하시켜 결국 파이프 및 펌프의 압력을 크게 증가시키는 것이 일반적이지만, 이 연구에서는 PM 혼입에 의한 유동성 저하현상이 전혀 없는 것으

Fig. 14 Pumpability test results of 80 MPa plain concrete

Fig. 15 Pumpability test results of 80 MPa fiber Concrete

Fig. 16 Pumpability test results of 60 MPa plain concrete

Fig. 17 Pumpability test results of 60 MPa fiber concrete

Fig. 18 Comparison with maximum pump and pipeline pressure according to the concrete types

로 확인되었다.

이는 PM의 구성재료인 폴리머 분말에 의한 유동성 향상이 요인인 것으로 판단되며, ACI 자료⁴⁾에 의하면 모래 중 300 μm 미만 미립분은 물과 함께 윤활제의 역할을 하는 것으로 보고되고 있어, 이 실험에 사용된 폴리머 분말(250 μm)의 경우 입형이 구형이므로 배관통과 시 윤활제 역할을 하여 배관압력이 저감된 것으로 판단된다.

압송길이별 배관압력의 감소는 60 MPa의 경우 570 m 통과시 161 Bar에서 15 Bar로 배관압 감소율(배관압감소/압송길이) 0.257 Bar/m를 나타냈다. 80 MPa의 경우는 228 m 통과시 179 Bar에서 25 Bar로 배관압 감소율이 0.675 Bar/

Fig. 19 Comparison with predicted and real outputs

m로 나타나 콘크리트의 강도가 높을수록, 배관길이가 짧을수록 배관압 차이가 커지는 것을 확인하였다.

4.3.2 마찰계수 및 예상 토출량

강도별 콘크리트 마찰계수 및 예상 토출량은 Fig. 19와 같이 60 MPa가 약 44 m^3 로 가장 크게 나타났으며, 마찰계수는 2.3 정도로 나타났다. 콘크리트 강도가 높을수록 배관압 감소치와 마찰계수가 커지므로 시간당 콘크리트의 토출량은 작아진다.

실제 토출량을 측정한 결과 1.2 $\times$ 1.2 $\times$ 1.2 m 박스를 채우는 시간은 60 MPa의 경우 2분 32초, 80 MPa의 경우 2분 29초가 소요되었다. 실제 고강도 콘크리트 압송시 드라이브실린더 내부에 콘크리트가 가득 충전되지 않기 때문에 스트로크타임을 통해 측정한 토출량과 실제 채움시험을 통해 채움비율(filling rate)을 결정하는 것이 매우 중요하다.¹⁰⁾

이 연구에서는 콘크리트 강도에 관계없이 채움비율을 85%라고 가정했을 때 실제 배관통과 후 얻어진 실제값과 -5~+6%로 매우 유사한 값을 나타내었다. 따라서 60 MPa 이상 고강도 콘크리트의 경우 채움비율을 85%로 설정하고 관리해도 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 실제 초고층 프로젝트 적용을 위해 개발된 폭발방지재를 사용하여 60 MPa 및 80 MPa 고강도 콘크리트의 펌프압송성 테스트를 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 굳지 않은 콘크리트의 특성 측정결과 PM 혼입유무에 관계없이 펌핑 전 700 $\pm$ 50 mm, 펌핑 후 500 mm 이상을 만족하였고, PM 혼입에 따른 슬럼프 플로우는 plain에 비해 약 70% 정도 개선되었는데, 이는 폴리머분말(구형 미립자 성분, 직경 250 μm)의 볼 베어링 효과를 통해 유동성이 개선된 결과로 판단되며, 이를 활용할 경우 500 m 이상 초고층구조물 시공시 고강도 콘크리트의 수직압송이 가능할 것으로 판단된다.

- 2) 펌핑 후 공기량은 모두 상승하였는데 이는 수평압송에 따른 영향이며, 사용된 AE제 등이 펌프 압송 장치의 호퍼에서 콘크리트가 강력하게 교반되면서 AE제가 활성화되고 특히 강력한 피스톤압력에 의해 펌핑 시 공기량이 추가 투입된 것으로 판단된다.
- 3) PM 혼입에 따른 콘크리트의 연성증가로 인해 압축강도 및 탄성계수는 약 4% 정도 감소하였지만, 압축강도의 경우 설계기준 이상으로 발현되었고, 휨 성능은 PM 혼입시 약 20% 정도 개선되었다.
- 4) 펌프압송 테스트 결과 60 MPa의 경우 PM 혼입 유무에 관계없이 펌프 및 파이프의 최대압은 유사하게 나타났다. 80 MPa의 경우 plain에 비해 PM 혼입시 파이프 및 펌프의 최대 압력이 오히려 낮게 발생되었으며, PM 혼입에 따른 엉킴현상 등에 의한 유동성 저하 및 펌프압송 부하현상은 발생하지 않았다. 이는 내화재료로 사용되고 있는 폴리머 분말의 구형 미립자 성분이 물과 함께 윤활제 역할을 하기 때문으로 판단되어 500 m 이상 초고층 시공시 무리 없이 사용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) 압송길이별 배관압 감소율은 60 MPa의 경우 0.257 Bar/m, 80 MPa의 경우 0.675 Bar/m로 콘크리트의 강도가 높을수록, 배관길이가 짧을수록 배관압 감소율이 크게 나타났다. 또한 배관통과 후 얻어진 실제 토출량 값과 스트로크타임을 통한 계산토출량의 차이를 통해 고강도 콘크리트 압송시 채움비율을 85%로 설정하고 관리해도 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. *High-Rise Buildings Construction Manual*, Daewoo E&C, Korea, 2007, pp. 8-15.
2. Jee, S. W. and Seo, C. H., "Development of Concrete Pump-

- ing Technology in High-Rise Buildings," *Review of Architecture and Building Science*, Vol. 50, No. 4, 2006, pp. 66-71.
3. *The Fire Performance of High-Strength Concrete Columns, Beams Management Standards*, Notice 2008-334 from Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea, 2008.
4. ACI Committee 304, "Placing Concrete by Pumping Methods," *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 4, 1995.
5. Morimoto, S., "Change of Flowability of Self-Compacting Concrete due to Pumping(ポンプ壓送による自己充填コンクリートの流動性變化)," Koghi University of Technology, Master dissertation, Japan, 2003, pp. 19-28.
6. Jiro Sakue, J., "Change in Flowability of Self-Compacting Concrete due to External Force(外力による自己充填コンクリートの流動性變化のメカニズム)," Koghi University of Technology, Master dissertation, Japan, 2006, pp. 15-22.
7. Kim, S. H., Jee, S. W., and Seo, C. H., "Experimental Study on the Characteristics of Internal Pressure on Pipeline in High Pressure Pumping for High-rise Building," *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure and Construction*, Vol. 23, No. 12, 2007, pp. 149-156.
8. Yasumichi, K., "An Experimental Study on the Pumpability of High Strength Concrete(高強度コンクリートのポンプ壓送性に関する實驗的研究)," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 28, No. 1, 2006, pp. 1217-1222.
9. Ko, J. W., Kim, J. J., Lee, S. H., Moon, H. J., and Park, S. J., "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 Architectural Institute of Korea, Structure & Construction*, Vol. 26, N. 9, 2010, pp. 71-78.
10. Kwon, H. W., "An Experimental Study on the Pumpability Considering an Effective Ratio of Concrete Delivery Cylinder in Stationary Concrete Pump," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 1, 2009, pp. 149-150.

요 약 기존 내화성능 확보기술인 섬유혼입 콘크리트의 경우 내화성능을 높이기 위해 섬유량이 과다하게 투입되면 초고압 펌핑시 엉킴현상이 발생하여 압송효율이 급격히 저하되는 문제점이 있다. 이에 이 연구에서는 기존 섬유 이외에 추가로 유동성 개선효과 및 내화성능을 확보할 수 있는 폭렬방지재를 개발하여 이를 활용한 60~80 MPa 고강도 콘크리트의 펌프압송성능 개선을 이 연구의 목표로 설정하였다. 이 연구에서 사용된 폭렬방지재는 pp섬유, 나일론 섬유 및 폴리머 분말을 혼입한 폴리믹스로서 이를 활용한 결과는 다음과 같다. 섬유혼입 유무에 따른 굳지않은 특성 중 슬럼프 플로우는 섬유투입시 압송 후 기존 대비 약 70% 물성이 개선되었고, 공기량은 섬유혼입에 관계없이 압송 후 다소 증가하였다. 압축강도는 재령 28일에서 설계기준강도를 상회하였고, 휨 강도는 압축강도 발현을 대비 12~15%로 기존 경향과 유사하게 나타났다. 탄성계수는 섬유혼입시 감소하였지만, 기준값 이상으로 문제는 없을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 폴리믹스, 섬유혼입 콘크리트, 탄성계수, 파이프압력, 마찰계수