

# 초고강도 콘크리트의 제조 및 현장적용성에 관한 연구

## A Study on the Manufacture and Application of Ultra-high Strength Concrete

최 일 호\*

Choi, Il-Ho

정 양 희\*

Jung, Yang-Hee

김 옥 종\*\*

Kim, Ook-Jong

이 도 범\*\*\*

Lee, Do-Bum

### Abstract

Because reinforced concrete structures were being high more and more in recent year, concrete was being demanded high performance of high strength and high fluidity. But various characteristics must be confirmed besides guarantee of demand strength in ultra-high strength concrete.

In ultra-high strength concrete, autogenous shrinkage and drying shrinkage grow big because of a low water cement ratio and much quantity of binder. So dangerousness of crack generation grow big in early ages. And ultra-high strength concrete is influenced by use materials more than ordinary strength concrete.

In this study we were examined mix design, autogenous shrinkage and pumpability of ultra-high strength concrete to apply on the ground.

키워드 : 초고강도 콘크리트, 자기수축, 펌프압송성

Keywords : Ultra-high strength concrete, Autogenous shrinkage, Pumpability

## 1. 서 론

최근 RC구조물이 100층 이상으로 대규모 및 고도화됨에 따라 고강도 및 고유동 등 콘크리트의 고성능 확보는 필수적인 요소기술이 되었다. 그러나, 60MPa 이상의 초고강도콘크리트 영역에서는 요구강도의 확보 이외에 제반특성에 대한 검토가 반드시 수반되어야 한다. 초고강도콘크리트는 낮은 물결합재비에서 다량의 결합재 사용에 의해 구성되므로 자기 및 건조수축의 변형량으로 인해 콘크리트 구조물에 균열이 더욱 많이 발생할 수 있다. 또한, 초고강도콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비해 사용재료의 종류나 품질이 강도 및 수축특성 등의 역학적 성상에 미치는 영향이 크기 때문에 사용재료의 선정에 각별히 주의해야 하고, 특히 매트릭스의 성능을 좌우하는 사용 잔골재의 품질이 이러한 특성에 미치는 영향이 크다는 것은 이미 확인되었다. 그리고, 국내 건설여건상 콘크리트의 고층부 타설을 위해서는 펌프압송시공이 반드시 필요하지만, 초고강도 콘크리트는 높은 결합재량으로 인해 점성이 매우 높아져 펌프압송에는 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 즉, 콘크리트의 소성점도가 커지면 펌프압송 시의 압력손실은 그에 비례하여 증가하게 된다. 그로 인해 콘크리트의 압송성능은 저하되고, 슬럼프 및 슬럼프플로우 저하 등의 품질변화가 발생하여 시공성에 영향을 받게 된다. 그러므로, 초고강도 콘크리트의 현장적용에 앞서서는 서전에 반드시 펌프압송성능에 대한 검토가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 결합재 구성을 달리하여 설계기준강도 60, 80 및 100MPa 초고강도콘크리트의 배합을 도출한 후, 압축강도 및 자기수축 등의 역학적 특성을 검토하고, 배척플랜트 생산 및 펌프압송 실험을 통하여 초고강도콘크리트의 실용화를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험개요

본 실험에서는 우선적으로 슬럼프플로우 650±50mm와 공기량 2.0±1.5%의 요구성능을 만족하는 초고강도콘크리트의 배합을 설계기준강도 수준별(60, 80, 100MPa)로 입형판정실적률(57.4%) 및 조립률(2.71)이 양호한 품질의 바다모래를 사용하여 도출하고, 그 프레쉬 및 경화성상과 자기수축의 특성을 파악하였다. 설계기준강도 60 및 80MPa의 콘크리트에 대해서는 사용 결합재의 구성을 달리하여 제작한 시험체에 대하여 압축강도 및 자기수축 특성을 실내실험을 통하여 파악하였고, 실용화 검토를 위하여 설계기준강도 60, 80 및 100MPa의 초고강도콘크리트를 배척플랜트 설비를 이용하여 생산한 후 250m 길이의 파이프배관을 통한 펌프압송실험을 통해 펌프압송성과 압송전·후 콘크리트의 물리적 성상을 검토하였다. 한편, 사용재료로서 설계강도 60MPa은 OPC와 BS의 2성분계 결합재를 사용하였고, 설계강도 80 및 100MPa은 OPC, BS, FA 및 SF 중의 3성분계 결합재를 사용하였다. 결합재의 화학적 특성은 표 1과 같다. 사용골재로서 굵은골재는 남양산 화강암 부순돌(최대크기 20

\* 대림산업(주) 기술연구소 건축연구지원팀 주임연구원

\*\* 대림산업(주) 기술연구소 건축연구지원팀 차장

\*\*\* 대림산업(주) 기술연구소 건축연구지원팀 팀장

mm)을 사용하였으며, 잔골재는 용진군산 바다모래를 사용하였고, 그 물리적 특성은 표 2와 같다.

표 1. 사용 결합재의 화학적 특성

시료명	lg loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	비표면적 (cm <sup>2</sup> /g)
OPC	1.09	22.48	6.26	3.14	63.28	0.26	2.10	3,706
BS	0.01	33.54	15.22	0.51	43.88	2.62	2.54	4,578
FA	4.31	50.89	29.99	7.42	5.01	0.98	0.00	3,768
SF	3.52	88.12	0.47	1.46	1.47	0.73	0.15	200,000

표 2. 사용골재의 물리적 특성

물리적성질	조립률	표준 비중	흡수율	입형판정 실적률(%)	0.08mm체 통과율(%)
굵은골재	6.57	2.63	0.72	57.9	1.25
바다모래	2.71	2.62	0.68	57.4	0.59

## 2.2 콘크리트 혼합 및 실험방법

콘크리트 혼합방법은 모르타르 제조 후, 굵은골재를 투입하는 방법으로 실시하였다. 프레쉬 물성의 평가는 슬럼프플로우 및 공기량 측정 외에 L형 플로우, V형 깔대기유하 및 U형 박스시험을 실시하였다. 콘크리트의 경화성장 평가는 KS F 2403 및 2405에 의거하여 재령 1, 3, 7, 28, 56 및 91일의 압축강도를 측정하였다.

자기수축시험은 KS F 2586에 준하여 수행하였으며 시험체는 그림 1에서와 같이 100×100×400mm의 철제 빔 몰드를 사용하여 시험체의 거동이 몰드에 의해 구속을 받지 않도록 두께 1mm의 테프론 시트와 폴리에스테르 필름을 설치하여 제작하였다. 자기수축은 수화반응 시작시 발생되어지므로 초결시점에서 콘크리트를 탈형한 후, 표면에서의 수분증발 및 흡수를 방지하기 위하여 폴리에스테르 필름을 피복후 알루미늄 점착테이프로 밀봉하여 온도 20±2℃, RH 60±5% 조건의 항온항습실에서 측정하였다.

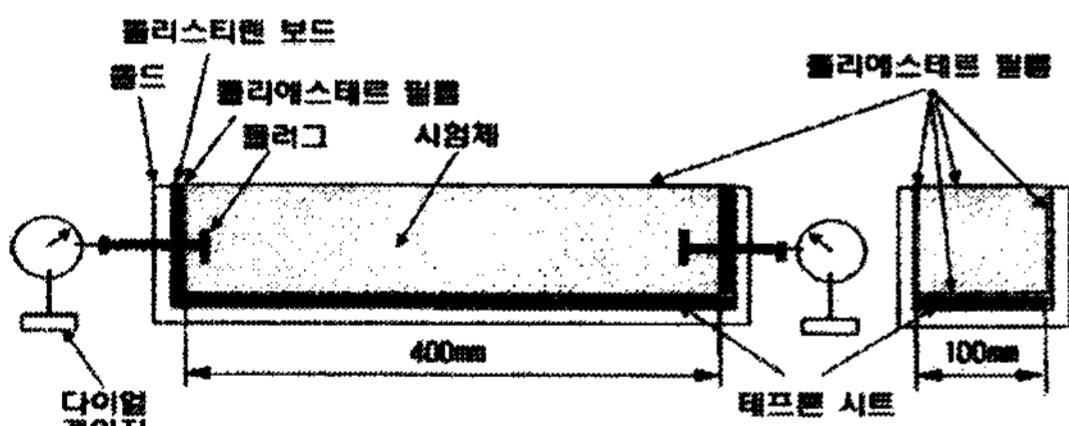


그림 1. 자기수축 시험 장치

표 3. 설계강도 수준별 콘크리트의 배합 및 프레쉬 성상

콘크리트 구분	W/B (%)	S/a (%)	단위용적질량(kg/m <sup>3</sup> )							AE제 (B×%)	SP제 (B×%)	프레쉬 성상					
			W	Binder				S	G			공기량 (%)	슬럼프 플로우(mm)	L형 플로우		V형 유하시간 (sec)	U-box 단차 (mm)
				OPC	BS	FA	SF							500mm 도달시간	최종도달 거리(mm)		
60OPC	25	48	155	620	0	0	0	777	845	0.01	1.15	-	-	-	-	-	
60BS30				434	186	0	0	771	839			2.9	640	11.8초	750	17	31
60FA20				496	0	124	0	758	825			-	-	-	-	-	-
80OPC	22	45	150	682	0	0	0	711	872	0.01	2.20	-	-	-	-	-	
80BS30SF5				443	205	0	34	701	859			3.0	660	12.9초	740	20	50
80FA20SF5				512	0	136	34	686	841			-	-	-	-	-	-
100BS30SF5	19	32	142	486	224	0	37	487	1038	0.01	3.72	0.8	710	26.0초	805	37	0

콘크리트의 배척플랜트 생산은 경기도 광주에 위치하고 있는 N레미콘사의 설비를 사용하였다. 펌프압송에는 Putzmeister BSA 14000 HP-D 고압펌프를 사용하였으며, 파이프는 3m 직관과 90° 곡관을 사용하여 총 길이 250m로 배관하였다. 설계기 준강도 60, 80 및 100MPa의 초고강도콘크리트는 가로 1.2m, 세로 2.4m 두께 0.2m 크기의 벽체 실험체에 각각 타설하였다. 펌프압송 전·후 콘크리트의 슬럼프플로우, 공기량 및 압축강도와 압송관내 압력을 측정하였으며, 벽체 실험체의 코아공시체를 채취하여 구조체 콘크리트의 압축강도를 최종적으로 평가하였다. 벽체 실험체 및 펌프압송배관은 그림 2와 같다.

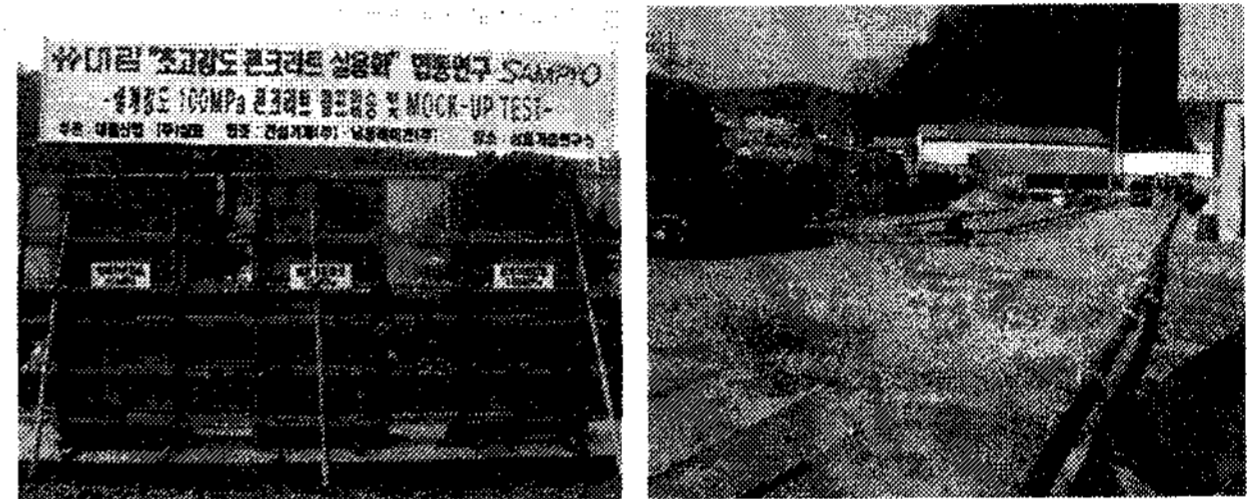


그림 2. 펌프압송실험

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 프레쉬 성상 및 압축강도

설계강도 수준별 콘크리트의 최적배합을 결정하기 위한 배합실험을 통하여 표 3의 최적배합을 도출하였다. 콘크리트의 유동성 평가를 위한 L형 플로우 실험시 500mm 도달시간의 결과는 설계강도 60 및 80MPa의 경우가 11.8초 및 12.9초로 동등한 수준의 유동속도를 보였으며 설계강도 100MPa의 경우에는 26초로 매우 느린 유동속도 결과를 나타냈다. 그러나, 최종 유동거리는 805mm로 750mm와 740mm를 나타낸 60 및 80MPa보다 높게 나타났는데, 이는 V형 깔대기 유하시간의 결과 또한 37초로 17 및 20초의 60MPa 및 80MPa의 결과보다 매우 높은 결과를 나타내고 있어 유동성은 월등히 좋은 반면에 점성이 크게 증가된 것을 알 수 있다. 콘크리트의 충전성 평가를 위해 U형 박스단차를 평가한 결과는 모든 배합에서 5mm 이하의 단차를 나타내고 있어 매우 우수한 충전성능을 확인하였다.

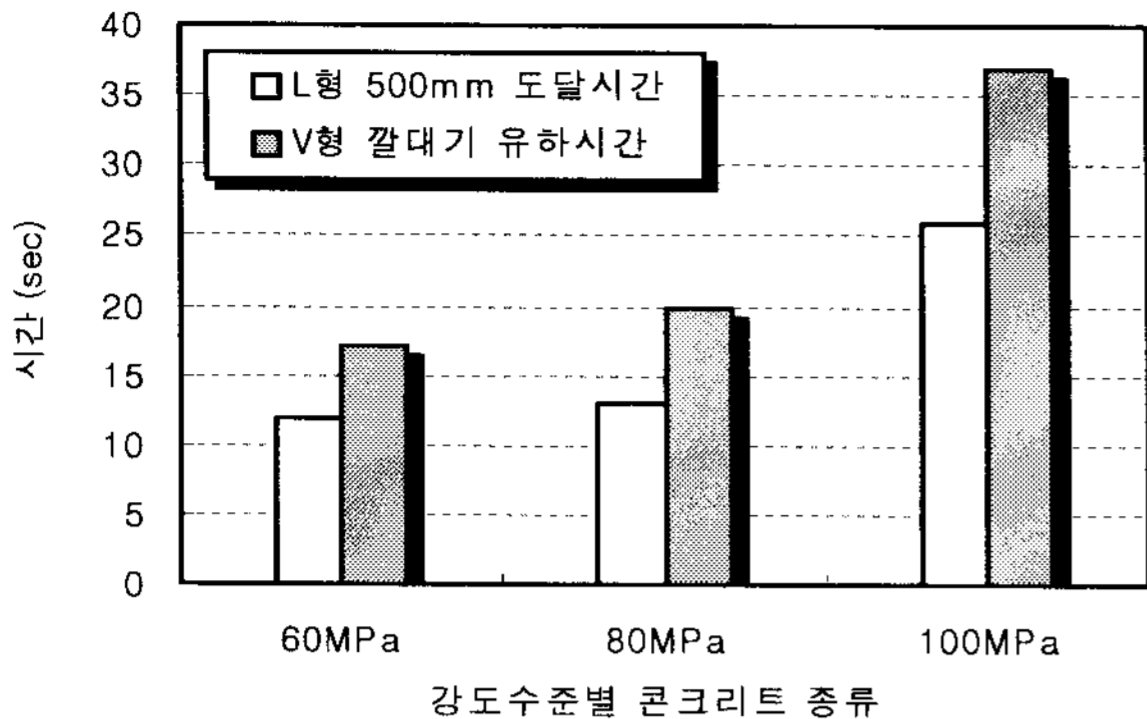


그림 3. 프레스 콘크리트 실험결과

압축강도는 그림 4와 같이 재령 28일에 모두 설계강도의 100% 이상을 확보하였으며, 재령 91일의 경우 설계강도 60MPa는 156%, 설계강도 80MPa는 128%, 설계강도 100MPa는 112%의 수준으로 3성분계의 결합재 사용으로 안정적인 압축강도 확보가 가능하였다.

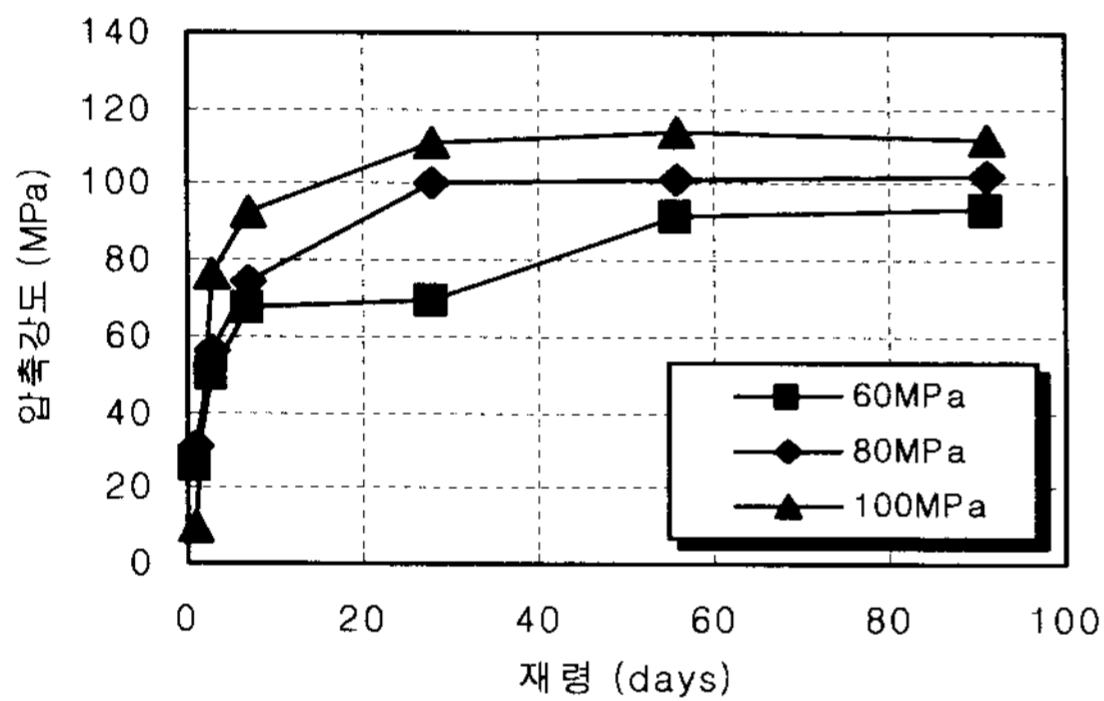


그림 4. 재령별 압축강도 측정결과

### 3.2 자기수축

그림 5는 설계강도 60, 80 및 100MPa의 콘크리트에 대하여 결합재의 구성을 달리하여 검토한 자기수축 길이변화를 나타낸 것이다. 설계강도 60MPa의 자기수축 결과는 재령 28일에 BS가  $471 \times 10^{-6}$  정도로 가장 큰 값을 나타냈으며 OPC는  $304 \times 10^{-6}$ , FA는  $277 \times 10^{-6}$ 의 크기로 FA의 결과가 가장 낮은 변형률을 나타내었다. 이를 비율로 환산하면 BS의 경우가 FA의 경우보다 약 42%, OPC보다는 약 36% 정도로 큰 자기수축 변형률을 나타내었는데 이는 BS를 사용한 콘크리트의 경화체 조직이 수화반응이 진행됨에 따라 콘크리트 내부의 상대습도 저하로 발생되어지는 자기진조의 발생과 잠재수경성에 의한 경화체내의 모세관 장력이 증대한 영향으로 분석된다. 반면 FA의 경우에는 기존 연구결과에 의해 확인된 바와 같이 콘크리트 경화체내의 상대습도 변화가 거의 발생되지 않기 때문에 자기진조의 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 한편 SF를 사용하여 검토한 설계강도 80MPa의 경우에는 60MPa의 결과보다 자기수축이 증가하는 것으로 나타났으며 이는 W/B가 낮아짐에 따라 결합재량이 많아진 것에 의한 결과로 판단된다. 그러나, 그 경향은 60MPa의 경우와는 다르게 분석될 수 있다. 재령 28일에서의 자기수축 변형률 크기는 BS가  $523 \times 10^{-6}$ , OPC가  $440 \times 10^{-6}$ , FA는  $385 \times 10^{-6}$ 의 순서로 60MPa와 동일한 결과를 보였다. 가장 적은

자기수축 변형률을 나타낸 FA의 결과를 28일 재령의 결과를 기준으로 비교해 보면 60MPa에서는 OPC가 8.9%, BS가 41.2% 증가된 결과를 나타낸 반면 80MPa에서는 12.5% 및 27% 정도의 증가비율을 보이고 있어 설계강도 80MPa의 경우 OPC와는 수축량의 차이가 커진 반면 BS와는 작아진 결과로 분석될 수 있다. 이러한 경향은 BS 및 FA와 SF를 사용하여 3성분계의 결합재를 사용한 설계강도 80MPa이 표 1에서도 알 수 있듯이 CaO함량이 극히 적은 SF와 함께 OPC보다 CaO함량이 적은 BS 및 FA를 3성분계의 결합재로 사용함으로써 전체 결합재의 CaO함량이 낮아져 자기수축 변형률 저감에 영향을 미친 것으로 판단된다.

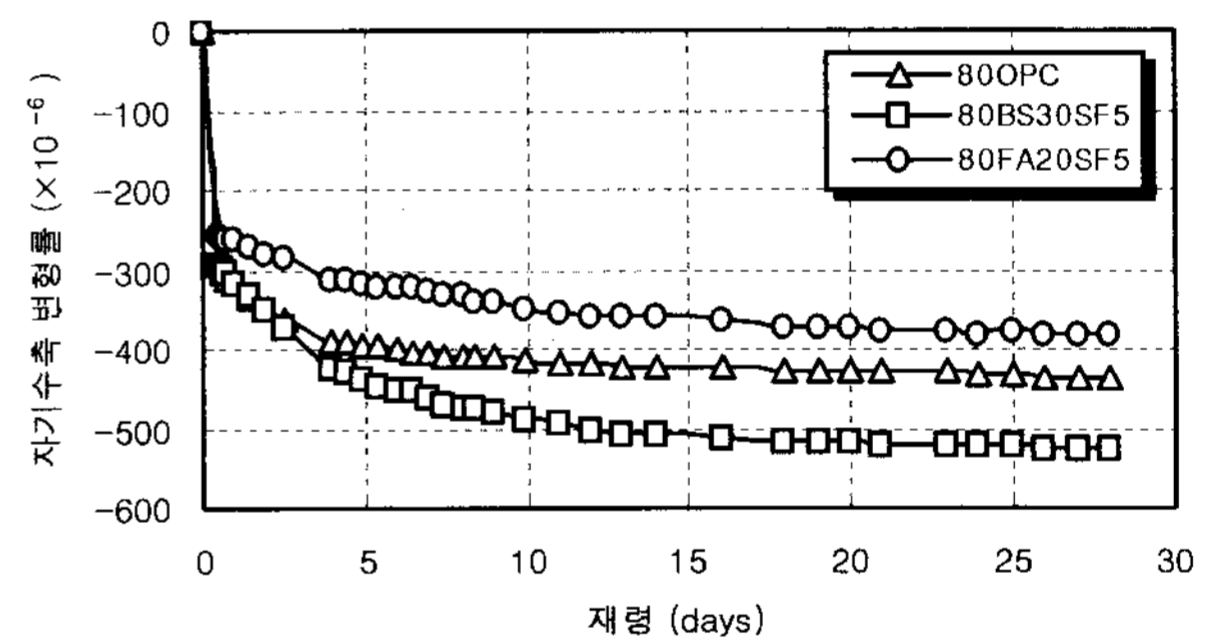
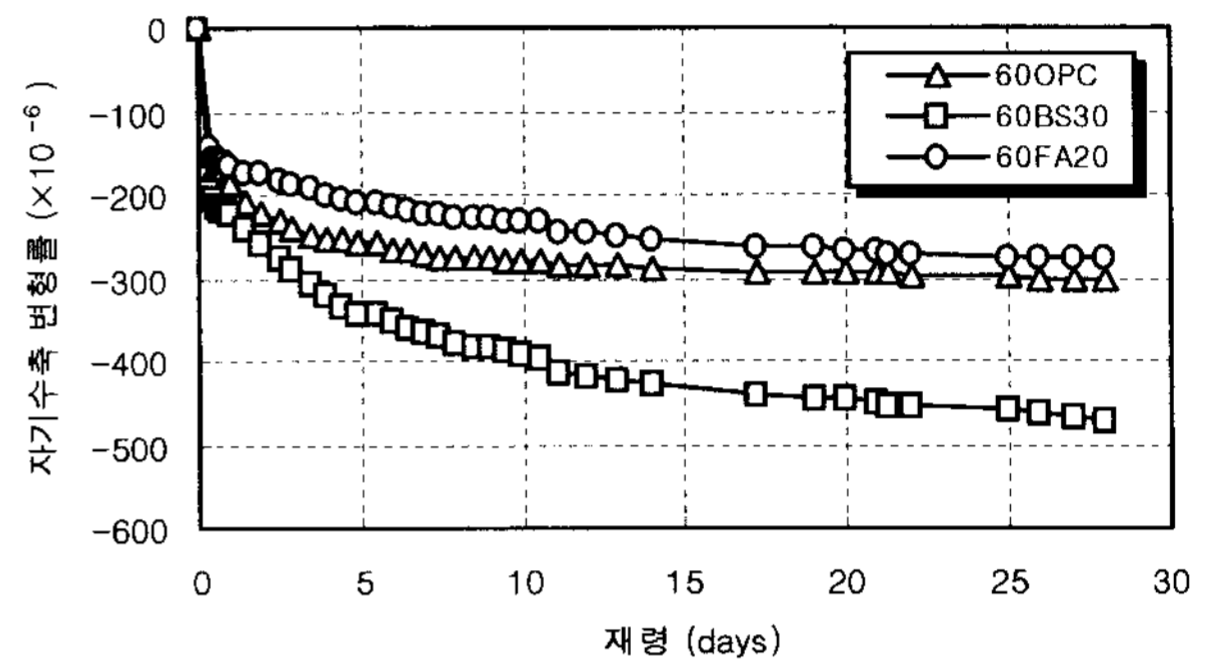


그림 5. 자기수축 측정결과

### 3.3 배치플랜트생산 및 펌프압송

배치플랜트 설비를 이용한 초고강도콘크리트의 생산 후, 펌프 압송 전·후 슬럼프플로우 측정결과는 그림 6과 같다. 압송전·후의 슬럼프플로우는 2~3cm 정도 증가하거나 감소한 결과를 나타내고 있어 유동성 감소는 그다지 크지 않은 것을 확인할 수 있었다. 이것은 높은 분체량으로 인한 영향으로 유동성의 감소보다는 콘크리트의 점성증가에 영향을 미친 것으로 판단된다.

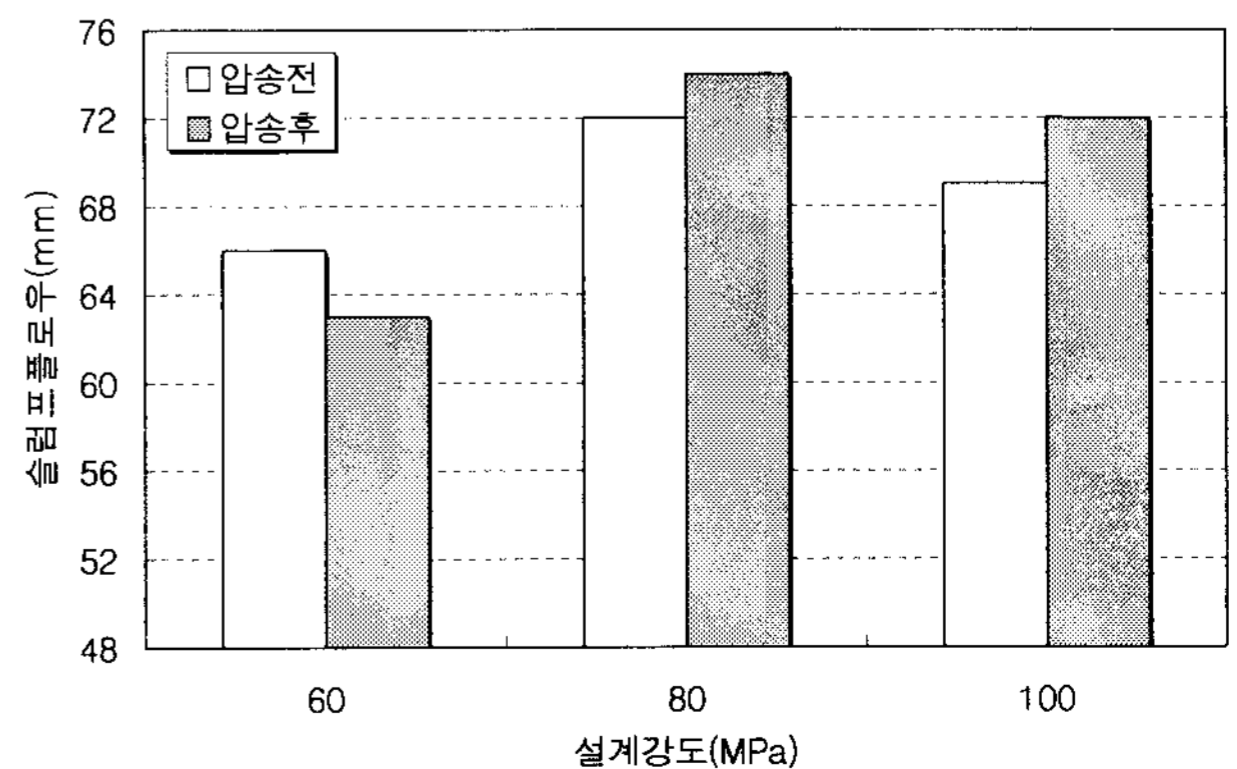


그림 6. 슬럼프플로우 측정결과

펌프압송 전·후의 압축강도 측정결과 그림 7과 같이 강도 차이는 5% 내외의 결과를 보이고 있어 250m 파이프 배관을 통한 콘크리트 압송이 압축강도에 미치는 영향은 작은 것으로 평가되었다. 외기에서 폭로양생을 실시한 공시체의 압축강도는 낮은 대기온(최저 -9℃, 평균 0.1℃ 및 최고 15℃)의 영향으로 표준양생을 실시한 공시체보다 낮게 측정되었다. 한편, 벽체 실험체의 코아공시체를 채취하여 검토한 재령 28일의 압축강도의 결과는 그림 8과 같이 설계강도의 100%를 상회한 결과를 보이고 있어 장기강도 증진은 양호하게 이루어진 것을 알 수 있었다.

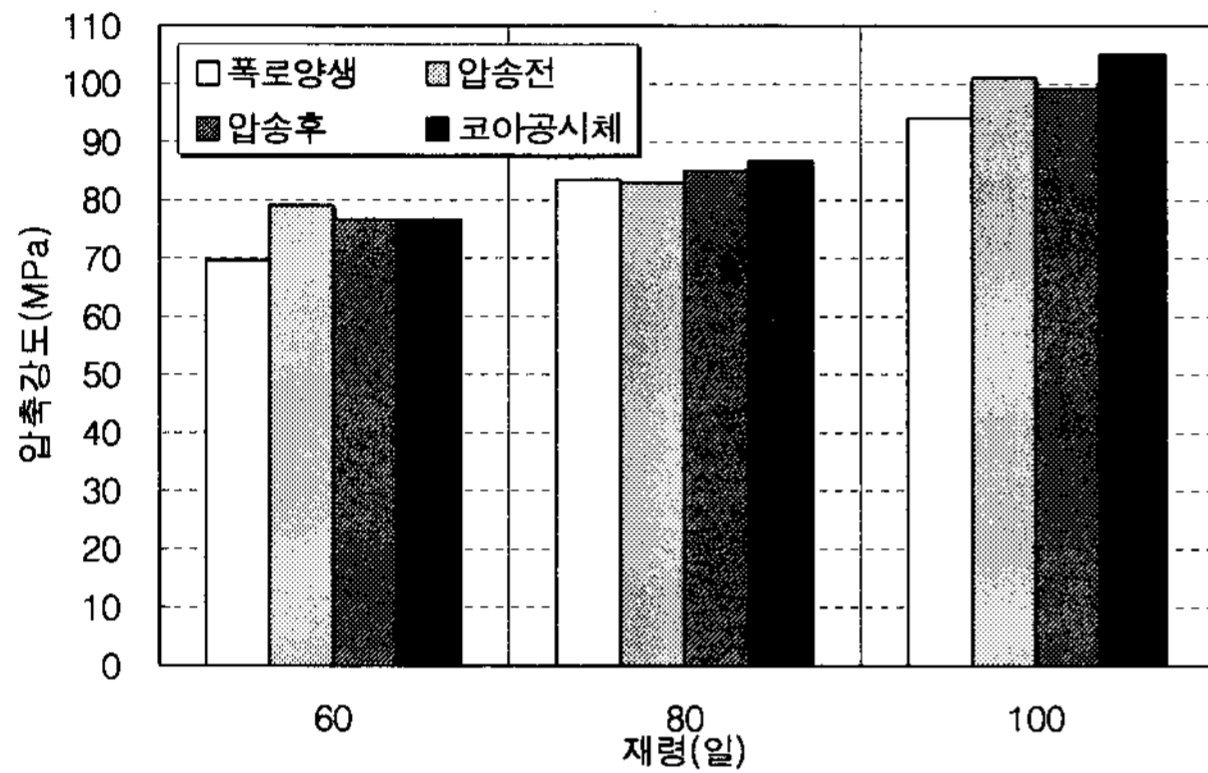


그림 7. 조건별 압축강도 측정결과

파이프 배관의 시작점인 압송부와 끝점인 토출부의 배관내 압력 측정결과는 그림 8과 같다. 압송부와 토출부의 관내압력은 각각 5~25MPa 및 5~13MPa로 측정되었으며, 최대 약 70%의 관내 압력손실이 발생하였다. 이것은 콘크리트의 높은 점성에 기인한 결과로서 향후 초고강도콘크리트의 현장적용을 위해서는 펌프압송성능의 검토가 매우 중요함을 확인할 수 있었다.

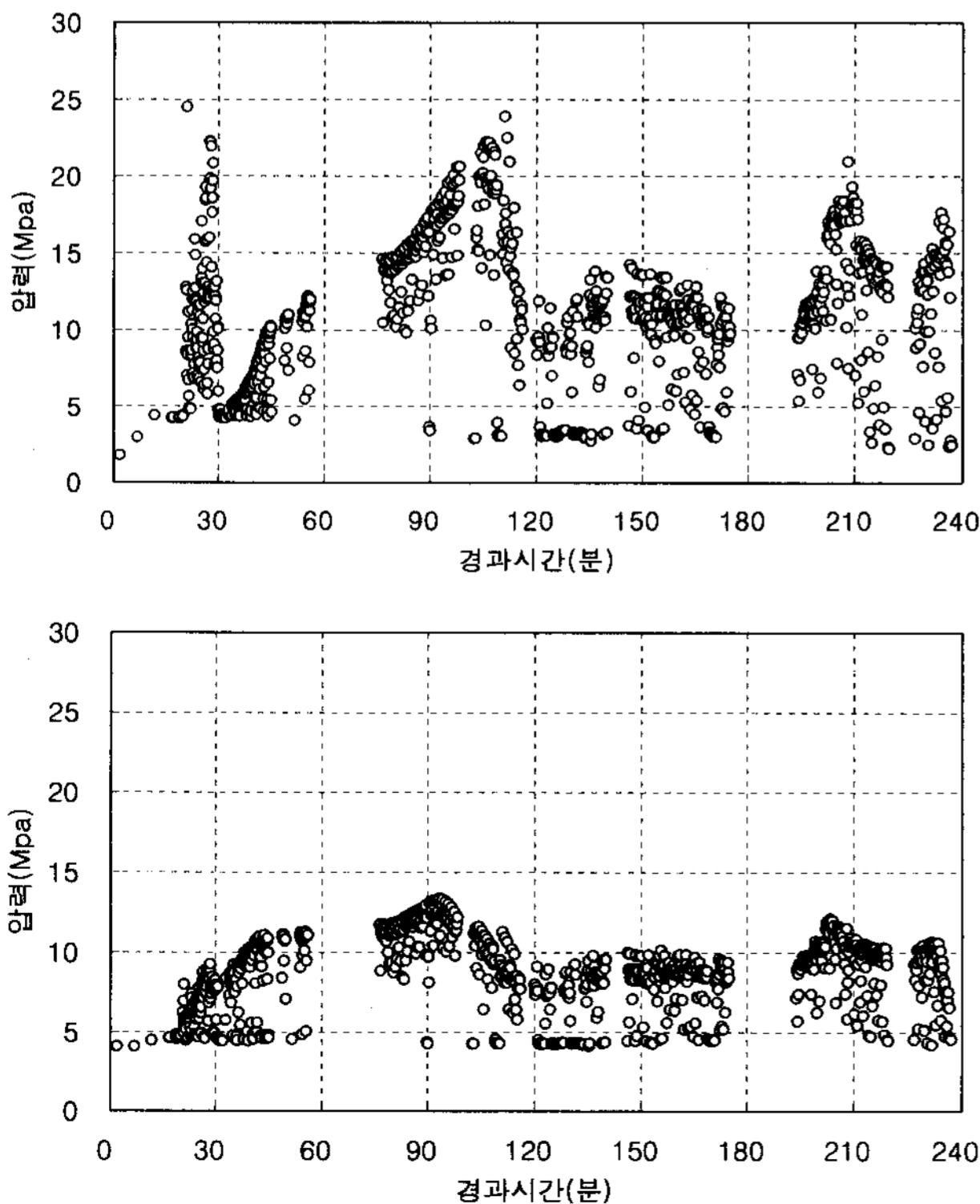


그림 8. 압송부 및 토출부 배관내 압력 측정결과

#### 4. 결론

- 1) 0.19~0.25의 W/B에서 검토된 프레쉬 성상은 전반적으로 양호한 결과를 보였으나, W/B 0.19의 경우에는 과도한 점성증가로 이에 대한 개선이 필요하다.
- 2) BS를 사용한 콘크리트의 자기수축은 크게 나타나고 있어 이에 대한 저감방안을 고려할 필요가 있으며 FA 및 SF를 사용한 경우에는 자기수축 저감에 효과적임을 알 수 있었다.
- 3) 초고강도콘크리트의 배치플랜트생산 및 펌프압송실험을 통해 구조체의 안정적인 압축강도 확보와 펌프압송이 가능함을 확인할 수 있었으며, 향후 초고강도콘크리트의 실용화를 위한 기초자료를 제시하였다.

#### 참고 문헌

1. A.M Neville, "Properties of Concrete", Fourth Edition, Longman
2. 名和豊春 外 2人, "モルタル硬化體の濕度變化と自己收縮の關係", セメント・コンクリート論文集, 日本セメント協會, No.55, pp218-225