

## 세계 최장거리 초고강도 콘크리트 펌프 압송 모니터링 및 통합 리스크 제어 기술 개발

김진우 현대건설(주) 기술/품질 개발원 과장  
 김상민 현대건설(주) 기술/품질 개발원 부장  
 박영호 현대건설(주) 기술/품질 개발원 상무



### 1. 서언

최근의 건설프로젝트는 사회적·환경적 요구로 인하여 점차 대형화·고층화되고 있으며, 이를 뒷받침할 지속적 첨단 건설기술의 개발을 필요로 하고 있다. 특히 초고층 건축물이나 초장대 교량과 같은 대형 구조물에서 콘크리트 압송 기술은 가장 핵심적인 건설기술 중 하나이다. 현재 콘크리트 압송공법은 콘크리트에 압력을 가하고 배관을 통하여 타설 위치까지 콘크리트를 수송하는 방식이 가장 보편화된 콘크리트 운반방법으로 활용되고 있지만 현장에서 콘크리트 품질이나 배관 및 펌프 등에서의 문제점은 안전, 품질 및 예산의 손실을 초래하게 된다. 따라서 현대건설 기술/품질 개발원에서는 『콘크리트 펌프 압송 모니터링 및 통합 리스크 제어 시스템』을 개발함으로써 일정 간격의 배관내 압력을 실시간으로 모니터링하고 특정 구간의 압력 이상 발생시 자동제어 기능을 갖추어 콘크리트 타설 중에 배관에서 발생하는 리스크를 사전에 관리하고자 하였다.

### 2. 펌프압송 이론 및 기존 공법의 문제점

#### 2.1 펌프압송 관련 이론

일반적으로 굳지 않은 콘크리트는 액체의 성질과 고체의 성질을 동시에 가진 점성이 있는 유체이다. 점성을 가진 유체의 거동모델을 통하여 그 흐름을 파악할 수 있으며, 점성을 지닌 콘크리트는 펌프의 압력의 영향으로 배관 말단부로 토출된다. 이때 배관 내부를 이동하는 콘크리트는 자중과 배관내 마찰손실의 저항을 발생하게 되는데 콘크리트 자중에

따른 저항은 (콘크리트 자중)×(높이)로 쉽게 얻어질 수 있으며, 배관내 마찰손실은 베르누이 정리로 계산 할 수 있다. 콘크리트 압송에 필요한 펌프의 압력( $\Delta P$ )은 베르누이 정리에 의하여 배관내부에 작용하는 마찰손실( $P_1$ ), 배관연결부위 및 곡관에서 발생하는 국부압력손실( $P_2$ ) 그리고 배관의 수직높이에서 중력으로 인하여 발생하는 압력( $P_3$ )의 합으로 구성된다.

여기서  $P_1$ 항의 마찰계수는 시멘트 페이스트와 골재의 마찰계수가 동시에 고려된 관계식이 필요하지만 이를 산출하기가 어려우므로 일반적으로 콘크리트 슬럼프값을 변수로 하는 관계식을 사용하므로 정확도가 떨어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 펌프 압송성 실험에서 도출된 계측시스템을 통한 예비실험에서 압력센서 구간별 압력차이를 이용하여 압송되는 콘크리트의 실제적인 마찰계수를 보정 할 수 있도록 하였다.

$$\Delta P = P_1 + P_2 + P_3 = (\lambda \frac{l}{d} \times \frac{v^2}{2g} \times \gamma) + (\xi \frac{v^2}{2g} \times \gamma) + (h \times \gamma)$$

여기서,  $\Delta P$ =펌프의 압력( $kgf/m^2$ )

$$P_1 = \text{배관내 마찰손실} (kgf/m^2)$$

$$P_2 = \text{국부압력손실} (kgf/m^2)$$

$$P_3 = \text{높이에 따른 압력손실} (kgf/m^2)$$

$\lambda$ =마찰계수

$l$ =배관 수평길이( $m$ )

$d$ =배관직경( $m$ )

$v$ =유속( $m/s$ )

$g$ =중력가속도( $9.8m/s^2$ )

$\gamma$ =비중량( $kgf/m^3$ )

$\xi$ =국부마찰저항계수

$h$ =배관 수직높이( $m$ )

## 2.2 기존 콘크리트 펌프압송의 문제점

펌프를 이용한 콘크리트 타설공법은 작업위치까지 편리하게 콘크리트를 수송할 수 있는 방식이지만 콘크리트의 유동성 저하, 이상물질 투입, 배합 오차 등 많은 이유로 배관막힘 현상을 일으키게 된다. 배관 내에 콘크리트가 폐색되면 콘크리트 속의 수분이 분리되어 먼저 빠져 나가고 몰탈만 남게 되어 막힘 정도는 더욱 심해지며, 그 구간도 계속 확장된다. 막힌 배관 내 펌프 압력이 배관 허용치 이상으로 높아질 경우 파열에 의하여 예상치 못한 안전사고로 이어질 수도 있다. 또한 현재 방식의 콘크리트 공사 조건에서는 정확한 배관 파열 시점과 위치를 사전에 감지하기는 어렵기 때문에 배관 파열 후에야 교체하는 경우가 많다.

그림 1은 배관 내부에 콘크리트 폐색현상 후 폐기된 배관을 나타낸 사진이며, 배관이 파열되면 콘크리트 작업은 중단되고 관련된 모든 공사가 함께 중단된다. 초고층 건축물의 경우 배관길이가 매우 길기 때문에 배관내 콘크리트 잔량도 상당히 폐기에 큰 어려움을 겪게 된다.



그림 1. 콘크리트 폐색으로 폐기된 배관

## 3. 펌프압송 모니터링 및 통합제어 시스템

### 3.1 시스템 개요

『콘크리트 펌프 압송 모니터링 및 통합 리스크 제어 시스템』은 콘크리트를 고층 건물 혹은 높은 위치로 공급하는 콘크리트 배관의 막힘 위치를 찾아내는 방법으로 콘크리트 공급 배관의 길이 방향을 따라 일정 간격으로 압력센서가 설치된다. 이는 배관 내부 압력들을 감지하여 콘크리트 펌프의 가동 후 특정 압력 센서의 내부 압력 또는 내부 압력의 변화

율이 정상 압력 범위 또는 정상 압력 이하로 낮아지면, 콘크리트 공급배관에 이상이 발생한 것이므로 통합제어실에 이를 무선방식으로 전달하는 방식이다.

그림 2와 같이 사전 경보시스템을 통하여 현장에서 근무하는 콘크리트 엔지니어와 현장사무실의 상황관리자는 콘크리트 배관 내부의 구간별 압력 상황과 진행 현황을 실시간으로 무선 모니터링 할 수 있으며, 이상상황 발생시 펌프를 순간적으로 정지 할 수 있게 된다.

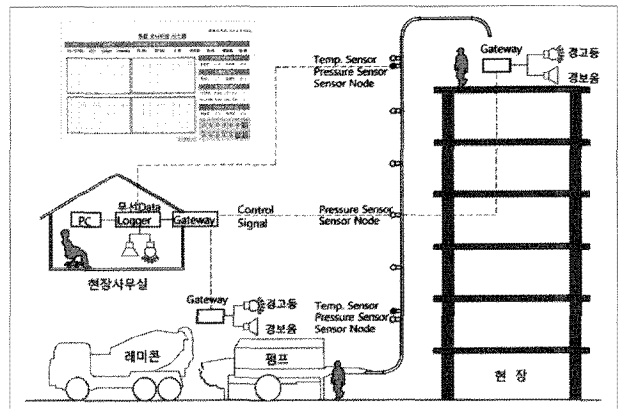


그림 2. 펌프압송 모니터링 및 통합 제어 시스템 구성도

### 3.2 이상 압력 감지 시스템 구성

콘크리트가 배관 내에서 펌프의 압력을 받아 이동하게 되면 일정한 정상 압력 크기(Max-Min)와 구간(Stroke time)이 설정된다. 콘크리트가 정상적으로 배관속을 통과하면 그림 3과 같이 일정한 그래프로 표시된다. 그러나 배관에 문제가 생기게 되면 그림 4의 프로세스에 의하여 콘크리트 처리 절차가 진행된다. 본 시스템에서는 이러한 이상 압력 및 스트로크를 각 구간별로 사전에 감지할 수 있도록 정상 범위의 기준 값을 설정 할 수 있다.

예를 들어 600m 지점 배관의 정상 압력 기준을 40 ~ 60 bar로 설정할 경우 이를 넘어서게 되면 1차적으로 오퍼레이터에게 경고 신호가 전달되고 이러한 신호가 반복적으로 발생할 경우 그림 4의 제어 프로세스에 의거하여 자동적으로 펌프를 정지시키도록 하였다. 배관 내부 압력의 변동 현상을 분석하면 펌프 오퍼레이터는 이상 고압 발생 구간에서 막힘이 생긴 것으로 추정할 수 있으며, 이 구간에서의 신속한 보수를 실시할 수 있다.

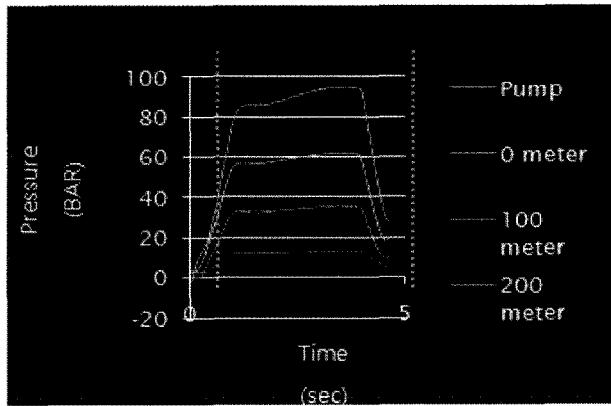


그림 3. 구간별 압력 데이터 측정

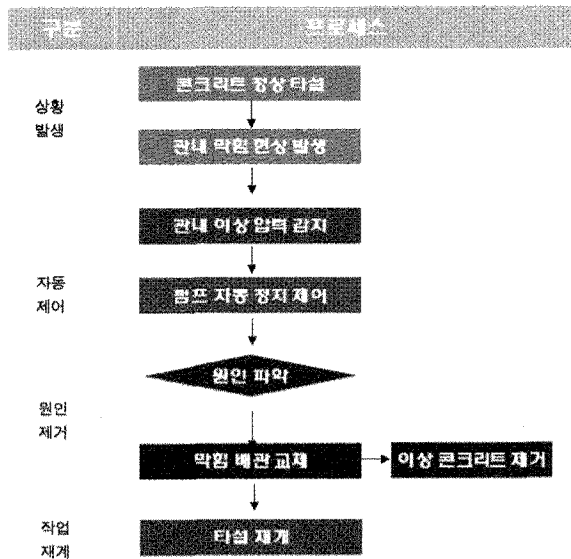


그림 4. 이상 압력 발생시 처리 프로세스

## 4. 세계 최장거리 1.2km 초고강도 콘크리트 펌프 압송성 실험

### 4.1 실험계획 및 방법

펌프 압송성 실험(Pump Trial Test)은 콘크리트의 타설 능력을 사전에 검증하여 실제 작업이 성공적으로 진행 될 수 있도록 하는 중요한 실험이다. 펌프 압송성실험을 통하여 단순히 콘크리트 배합과 펌프 기종 선정 이외에 전체 콘크리트 타설시스템을 구축하고 사전에 발생 가능한 품질과 안전에 관한 리스크를 제거할 수 있다. 그림 5는 2009년 10월에 실시한 초고층 고성능 콘크리트 1.2km 장거리 펌프 압송성 실험 장면이다.

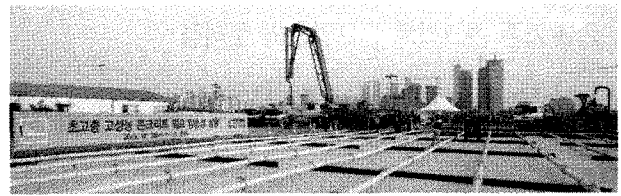


그림 5. 1.2km 장거리 펌프 압송성 실험

### 4.2 콘크리트 압송장치 및 실험계측 장비 구성

실험계획은 실제 초고층 구조물이 들어서게 될 현장과 가까운 장소에서 국내의 펌프압송성실험 사례를 분석하여 그림 6과 같이 1.2km 이상의 수평배관을 설치하도록 계획하였다. 현장에서 발생하는 모든 실험 데이터는 상황실에서 무선으로 송수신 할 수 있도록 구성하여 사용 편리성을 높였다.

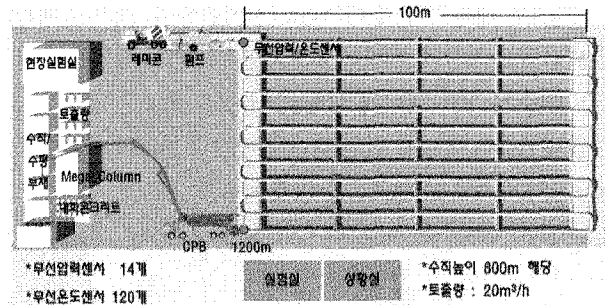


그림 6. 초고층 펌프 압송성 실험 배치도

### 4.3 초고강도 고성능 콘크리트

본 기술에서 적용된 초고강도 고성능 콘크리트는 100MPa 이상의 초고강도를 확보하면서도 점성은 낮추고 유동성을 높여, 펌프와 배관을 이용한 콘크리트 타설공법에 최적화 될 수 있도록 설계되었다. 하지만 점성을 지나치게 줄이면 콘크리트 재료분리 현상을 초래하기 때문에 최적의 유동성을 찾아내는 것이 핵심기술이라 할 수 있다. 이번 연구에서 개발한 초고강도 고성능 콘크리트는 유동성 확보 이외에도 공사기간 단축을 위하여 18시간 내에 10MPa 이상의 초기강도를 발현할 수 있으며 해안현장 등 환경이 열악한 조건에도 뛰어난 내구성을 보장할 수 있도록 개발하였다. 본 콘크리트 개발을 위하여 현대건설 기술/품질 개발원은 6개 레미콘 전문사와 공동연구개발에 관한 양해각서를 체결하였으며 초고층에 필요한 다양한 용도의 콘크리트를 단계적으로 개발하였다.

### 4.4 실험 결과 고찰

#### 4.4.1 배관내 압력 모니터링

본 실험의 주요 공정은 다음 세 가지로 구분 할 수 있다. 즉, 센서 설치 및 데이터 모니터링 등 계측과 관련된 부분과 상태별 동작 및 전체 실험진행을 위한 공정제어와 관련된 부분 그리고 테스트 현황 및 전체 실험 모니터링과 관련된 상태 모니터링 부분으로 이루어진다. 현장에서 측정된 배관내 압력 데이터 및 콘크리트 압송 전·후 데이터는 그림 7 및 그림 8과 같이 실시간으로 디스플레이 되며 자동적으로 데이터베이스화 될 수 있도록 하였다.

No.		시험명	시험시간	종료시간	실험상태	
YJ-12-100		유진	1200m	100MPa	11:35 07:00	
실험내역		실험항목	입송 순			비고
			1차	2차	3차	
날짜	2009. 10. 27	폼로우 50cm 도말 (s)	1	2		
		폼로우 (mm)				
차량번호	9056	V-Lot (s)				
		L-flow 50cm 도말 (s)				
출고시각	09:37	L-결근 flow 50cm 도말 (s)				
도착시각	10:10	공기량 (%)				
압송시작	10:17	온도 (°C)				
결과시각	07:09:00:1	단위수량 (kg/m³)				
		점화량 함유량 (kg/m³)				
		Viscosity (cP)				END

그림 7. 콘크리트 압송 전/후 물성 데이터 디스플레이

No.		시험명	시험시간	종료시간	실험상태
YJ-12-100		유진	1200m	100MPa	11:35 07:00
배관 모니터링 시스템		<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 40%;"> </div> <div style="width: 55%;"> <p>콘크리트 온도 (°C)</p> <p>36.5 36.5</p> <p>포화압 (MPa)</p> <p>12.5 13.7</p> <p>점화량 (kg/m³)</p> <p>187.5</p> <p>최대압력(1200m)</p> <p>3.4</p> </div> </div>			

그림 8. 실시간 배관 모니터링 출력 사례

#### 4.4.2 배관내 이상 압력 모니터링 및 제어

배관에 문제가 생기게 되면 압력이 급속히 높아지다가 하강하기를 몇 차례 반복하며 펌프의 스트로크도 크게 변화한다. 이 반복이 수차례 진행되어 배관이 파열하게 되면 압력과 스트로크는 0으로 떨어지게 된다.

그림 9에서는 콘크리트 점도가 높은 경우 발생하는 배관내 이상 압력의 변화를 나타내고 있다. 그래프를 보면 이미 배관이 완전히 막히기 이전부터 거리별로 압력이 상승하여

거리별 압력 차이가 줄어들어 수렴하게 된다. 이때 펌프 자체의 압력은 정상 동작시의 스트로크를 따라서 상승 및 하강을 반복하지만 펌프로부터 거리가 먼 구간 일수록 압력은 비선형적으로 거동하고 있음을 알 수 있다.

현장실험결과 본 시스템의 적용으로 배관파열 전 배관 구간별 압력의 이상 유무를 확인할 수 있었고 신속한 위치추적과 교체를 통하여 타설작업을 재개할 수 있었다.

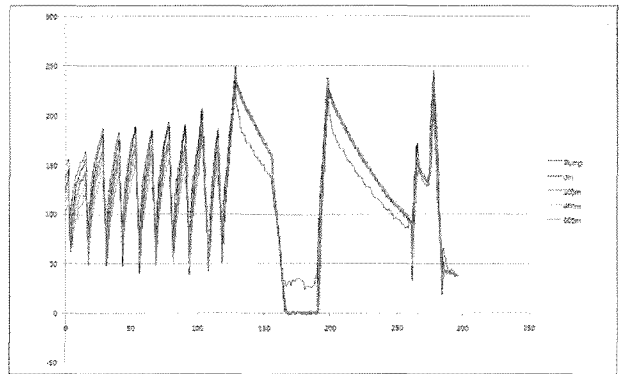


그림 9. 이상 압력 발생시 배관내 압력 변화

## 5. 결론

본 연구를 성공적으로 수행하기 위해서는 사전에 콘크리트 재료, 계측 시스템 및 타설 시공 분야의 전문기술을 최대한 끌어내고 통합하는 것이 필요충분조건이었다. 이를 위하여 현대건설 기술/품질개발원에서는 전문업체들과 공동연구개발에 관한 양해각서를 체결하고 긴밀한 연구 협업체계를 구성하여 초고층 고성능 콘크리트 펌프 압송 모니터링 및 통합 리스크 제어 시스템이라는 실험적 연구가 수행되었으며, 그 결과 세계 최장거리 1.2km 초고강도(100MPa) 콘크리트 펌프 압송성 실험에 성공할 수 있었다.

이러한 결과를 초고층 건물이나 초장대 교량 같은 실제 프로젝트에 성공적으로 적용하기 위해서는 본 실험적 연구에서 도출된 다양한 데이터를 다각적으로 분석하고 그 적용성에 대한 내용을 추가·보완하는 후속 연구가 진행되어야 할 것이며, 이를 통하여 국내 건설기술이 국제 건설시장을 주도하는 글로벌 리더로서의 역할을 수행 할 수 있도록 최선의 노력이 필요하다고 판단된다.

- 김진우 e-mail : jinwoo@hdec.co.kr
- 김상민 e-mail : smkim@hdec.co.kr
- 박영호 e-mail : yhpark@hdec.co.kr