

특 집

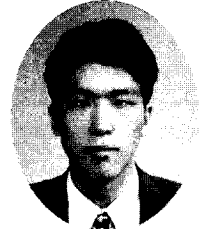
콘크리트 구조물의 공사 계측 기술 현황

거푸집 측압 및 수화열 계측

- Measurement of Hydration Heat and Formwork Pressure -



김무한*



강지훈**

1. 개 요

콘크리트는 여러 가지 재료가 혼합되어 하나의 재료로 형성되는 건축 재료이다. 따라서 혼합되기 전의 각 구성 재료에 대한 물성, 콘크리트로 혼합되는 과정 및 직후의 물성, 실제로 구조체를 형성하는 초기 단계 - 굳지 않은 상태의 물성, 경화되는 과정의 물성, 그리고 설계에서 계획한 성능을 발휘하는 단계에서의 물성 등 각 단계별로 각종 재료 시험이나 계측이 수행되고 있다.

본고에서 다루는 내용은 구조체를 형성하는 초기 단계의 상황에 대한 것이다. 그 중 가장 널리 발생하는 문제인 거푸집의 측압과 수화열에 대한 내용을 계측 경험을 토대로 다루었다. 계측 장비와 해석 기법이 발달하고 있어 손쉽게 원하는 자료를 얻을 수 있는 현실이므로 계측 장비나 방법, 또는 경험보다는 계측의 목적이나 계측 전후의 예측과 대책이 더 중요해지고

있다고 보며 본고의 내용이 향후 동일한 내용의 계측을 수행할 경우 참고가 되었으면 한다.

거푸집 측압의 경우, 국내의 논문이나 기고 등을 살펴보면 아직까지도 널리 수행되고 있지는 못한 것으로 판단된다. 수화열 계측의 경우는 구조물의 크기나 신종 콘크리트의 개발에 따라 현장 실험, 평가 연구 등의 목적으로 비교적 널리 수행되고 있는 편이다. 이러한 현상은 대체로 거푸집 측압에 관한 문제가 구조물을 형성하는 과정에서만 발생하고(붕괴 사고) 거푸집 시공에 대한 인식 부족 및 거푸집 측압의 최적 수치에 대한 학계의 관심 부족 등에 기인한다고 보며 주로 시공 현장의 관련자, 거푸집 업체 등이 관심을 가지는 정도이다.

즉, 신종 콘크리트 개발자들(시멘트업체, 연구자)은 주로 콘크리트 자체 물성(예를 들면 수화열)에 관심이 많고 설계자는 거푸집 설계에 대해 관심이 부족하고 시공자는 거푸집 붕괴 사고 없는 시공만을 바라고 있다.

요즘 흔히 언급하는 콘크리트의 균열 문제가 수화열뿐만 아니라 거푸집의 변형에 의해서도 발생하고 있음을 기억했으면 한다.

* 정회원, 충북대학교 건축공학과 교수

** 쌍용건설기술연구소 대리

2. 수화열 계측

2.1 계측의 동기

수화열 계측의 발단이 되는 문제는 주로 매스 콘크리트가 사용될 경우이다. 구조물의 고층화, 대형화 및 설계 하중의 상태에 따라 부재 치수가 특별히 큰 부재가 발생하는데 이 부분에 사용된 콘크리트를 매스 콘크리트라 지칭한다.

매스 콘크리트로 취급되는 구조물의 치수는 구조 형식, 사용 재료, 시공 조건에 따라 다르므로 일률적으로 정하기는 어렵지만 「콘크리트표준시방서(1999)」에 따르면 대체로 넓이가 넓은 판(슬래브)의 경우 두께가 80 cm 이상, 하단이 구속된 벽의 경우 두께가 50 cm 이상으로 규정하고 있다.

이러한 문제는 설계에서 흔히 발생하고 공사 관련자들은 경험이나 자료를 토대로 한 문제없는 공사의 진행을 바라고 있다.

2.2 방법

실제의 경우 대체로 시공 전후로 계측을 수행함이 바람직하다고 본다.

첫째로는 시공 전에 샘플을 별도로 제작하고 이에 대한 수화열 계측을 하여 실제 구조물에서 콘크리트가 발생할 수화열을 미리 예측한다. 이 경우 온도 해석 기법을 동원하면 샘플의 크기에 크게 관계없이 실제 구조물에 발생할 온도를 예측할 수 있으나 이것이 어렵다면 실제 구조물이나 시공 과정을 고려하여 적절한 샘플의 크기를 설정해야 한다.



사진 1. 샘플 구조물의 수화열 측정

둘째로 실제 시공되는 구조물에서 수화열을 계측한다. 특히 시공 전 별도의 시험없이 온도 해석에만 의존한 경우라면 시공지는 품질 관리의 목적을 위해서라도 온도 계측을 수행하여 만일의 경우에 대비하는 것이 바람직하다.

2.3 계측의 준비

수화열 계측 장비, 온도 센서 등 장비에 대한 계획과 샘플 시공이 포함되는 경우엔 부재의 제작 관련 내용, 센서의 설치 위치, 센서 설치 방법, 계측 기간 등 충분한 사전 계획이 필요하다. 참고로 실제 사용 예를 들면 다음과 같다.

표 1. 계측 계획 예

계측 장비	UCAM-70A
온도 센서	열전대 T 형
샘플 부재	1,200 × 1,200 × 1,200 (mm)
계측 위치	중심 2개, 중앙 4개 상하 표면부 4개, 외부 온도 1개
계측 기간	10일

보통 온도 센서로 사용하는 열전대(thermo couple)는 철근 등의 전도체에 대한 반응성이 콘크리트에서와 다르므로 파이프, 낚시줄, 노끈 등의 비전도체를 이용하여 설치한다.

2.4 온도 센서

수화열 온도 계측 센서는 콘크리트에 묻히기 때문에 접촉식을 채택하게 된다. 국내에서는 주로 열전대 T, K형을 사용하는데 실용 온도계의 종류와 특징을 살펴보면 (표 3)과 같다.

계측시에는 열전대 T형(단면적 : 0.65 mm²)을 사용하였다. T형의 경우 단면적이 0.3mm²인 제품도 있으나 계측기까지의 거리와 자료의 안정성을 고려하여 굵은 제품을 사용하는 것이 바람직하다.

표 2 열전대의 특징

장 점	단 점
1. 작은 곳 온도 측정 가능	1. 기준 접점이 필요
2. 지면이 적게 가능함.	2. 기준 접점, 보상도선에 대한 오차 고려
3. 진동, 충격에 견고함.	3. 보정에 주의
4. 온도차 측정에 편리	

표 3. 실용 온도계의 종류와 특징

종류	범위 (℃)	응답	기록	비용	
유리	-50 ~ +650	보통	부적합	저렴	
바이메탈식	-50 ~ +650	느림	적합	저렴	
액체충만식	-50 ~ +650	보통	적합	저렴	
증기압식	-50 ~ +650	보통	적합	저렴	
백금저항	-50 ~ +650	보통	적합	고가	
서머스터	-50 ~ +650	빠름	적합	보통	
열전대	R(PR)	-200 ~ +1200	빠름	적합	보통
	K(CA)	-200 ~ +1200			
	E(CRC)	-200 ~ +1200			
	J(IC)	-200 ~ +1200			
	T(CC)	-200 ~ +1200			
광온도계	-200 ~ +1200	-	부적합	보통	
광전반사	-200 ~ +1200	빠름	적합	고가	
전방사	-200 ~ +1200	보통	적합	고가	
2색	-200 ~ +1200	빠름	적합	고가	

치한 열전대이고 하부의 곡선은 외기온 상태이다.

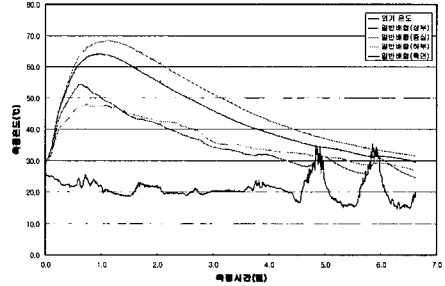


그림 1. 온도 계측 결과

이러한 방법으로 최고 온도와 표면부와 중앙부의 온도 차, 외기온 등을 고려하여 수화열에 의해 발생할 수 있는 문제점에 대한 예측이 가능하게 된다.

2.6 대책 마련

수화열을 계속하고 나면 향후 대책이나 방안에 대한 재검토가 필요한데 주로 수화열로 인한 문제점을 해결하는 방법들은 대체로 다음과 같으며 경우에 따라 적절한 방안을 모색한다.

- ① 시멘트, 배합비의 조정
- ② 콘크리트 타설 온도 조절(재료 온도)
- ③ 콘크리트 분할 타설
- ④ 거푸집 재료 및 양생
- ⑤ 줄눈, 온도 철근 설치
- ⑥ 파이프 쿨링

수화열이 발생하는 기본적인 요인이 시멘트이므로 시멘트를 저발열형으로 배합 조정하는 것이 대체로 바람직한 방법이다. 최적 조건을 선택하더라도 시공시의 오차나 품질 관리를 위해 시공 중 수화열 관리도 중요한 절차이다.

3. 거푸집 측압 계측

3.1 계측의 동기

시공 초기 단계에는 주로 콘크리트가 아직 굳지 않

주로 쓰이는 열전대 K, T 형의 내용을 개략적으로 살펴보면 다음과 같다.

① K 열전대

1960년에 호스킨스사에서 개발된 비금속 열전대로 니켈을 주로 하는 합금을 사용하고 내열성, 내식성이 우수하고 온도 직선성이 양호하여 많이 쓰이고 있으나 고온 영역에서 다소의 문제가 있는 것으로 나타나 유의해야 한다.

② T 열전대

+각에 구리, -각에 동·니켈 합금을 사용한 것이며 CC 열전대, 동/콘스탄탄 열전대라고도 한다. 저렴하고 가공성, 열 전기력 특성이 양호하여 저온 영역대에서 널리 사용되고 있다. 그러나, 상용 온도 한계가 낮고 전기저항 차와 열전도 오차, 지연 등의 문제가 발생하기 쉽다.

2.5 계측 결과

온도 계측 결과는 보통 다음의 <그림 1>과 같은 그래프로 표현되며 원하는 목적에 따라 적절히 표현한다. 참고로 <그림 1>에서 상부 2개의 곡선은 중심부에 위치한 열전대 계측값이고 중앙의 2개는 표면 부근에 위

은 상태이므로 이를 받치고 있을 도구가 필요하며 이러한 역할을 거푸집이 하게 된다. 일반적으로 소홀히 생각하기 쉬우나 앞에서 언급했듯이 붕괴 사고뿐만 아니라 변형에 의한 초기 피해는 구조물에 영구적으로 남게 된다.

따라서 안전하고 효율적인 거푸집의 설계를 위해서는 굳지 않은 콘크리트가 미치는 측압을 미리 예측해야 한다. 특히 콘크리트 제조 기술의 발달로 유동성이 우수한 경우 기존의 측압 자료만으로는 부족함을 느끼게 된다. 이러한 설계, 시공적 요청에 따라 거푸집 측압을 계측하게 되며 수화열 계측과 동일하게 시공 전 후에 계측을 하는 것이 바람직하다.

3.2 거푸집 설계 및 예측식

거푸집에 사용되는 하중은 많은 변수를 고려해야 하므로 영구 구조물의 설계에 사용되는 하중 산정과는 다르다. 거푸집의 설계에 사용되는 하중은 수직 하중, 수평 하중, 측압, 풍 하중, 특수 하중 등이 있다. 그 중 벽, 기둥 및 보의 측면 거푸집 설계시에 고려하는 콘크리트 측압은 다음과 같은 요인에 의해 좌우된다.

- ① 콘크리트 타설 속도, 타설 방법
- ② 콘크리트 경화 속도
- ③ 철근량
- ④ 구조물 부위

참고로 일반적으로 사용하는 거푸집 설계용 측압 자료는 다음과 같은 형식이다.

표 4. 거푸집 설계용 콘크리트의 측압(tonf/m²)

타설 속도(m/h)	10 이하의 경우		
부 위	H(m)	1.5 이하 1.5 초과, 4.0 이하	
기 등	W ₀ H	1.5W ₀ +0.6W ₀ (H-1.5)	
벽		길이 3m 이하	1.5W ₀ +0.2W ₀ (H-1.5)
		길이 3m 초과	1.5W ₀

H : 굳지 않은 콘크리트의 타설 높이(m)
 W₀ : 굳지 않은 콘크리트의 단위 용적 중량(tonf/m³)
 * 위 표는 타설 속도 10m/h 이하의 경우만 표기함.

계측 결과와 비교를 위해서는 좀더 다양한 거푸집

최대 측압 제안식과의 비교가 필요한데 ACI, CIRIA, Gardner&Qureshi 등의 제안식을 참고한다.

3.3 계측 방법 및 결과

① 보조 철물을 이용한 간접 계측법

거푸집에 사용되는 보조철물을 이용하는 방법으로 "Formwork Pressures in tall Walls with extended set concrete"의 내용을 참고하여 다음 <그림 2>와 같은 방법으로 측압을 측정할 수 있었다.

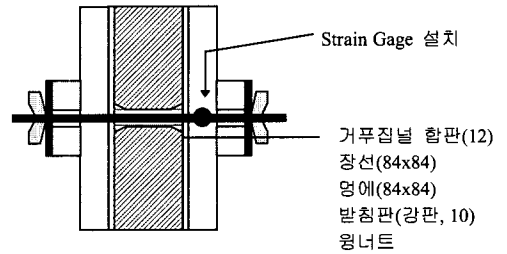


그림 2 계측 방법

거푸집에 사용되는 보조 철물인 폼타이가 거푸집에 작용하는 콘크리트의 측압에 저항하는 요소로 작용하므로 이 부분에 일반 변형계(strain gage)를 설치하여 폼타이의 변형량의 계측으로 폼타이에 작용하는 응력(stress)을 역으로 산정하는 방법이다. 즉, 변형(strain)에서 응력(stress)을 산정하는 방법인데 추가적으로 폼타이 철물의 탄성계수를 확인하는 인장 시험을 수행해야 한다.

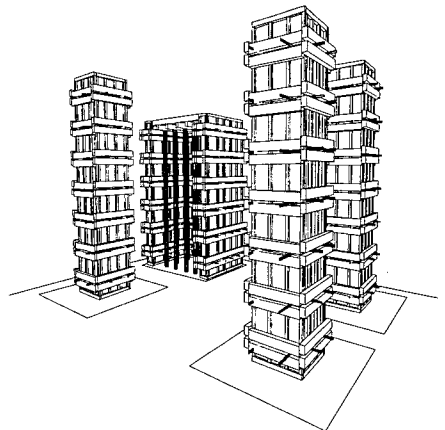


그림 3 거푸집 설치도

부재 전체적으로 측압 측정을 할 수 없기 때문에 실험에서는 계측이 수행되는 부분의 거푸집을 수직으로 분리하여 콘크리트 측압에 대한 저항을 폼타이가 모두 부담하도록 계획하였다.

〈그림 3〉은 거푸집 측압 실험에서 수행한 거푸집 제작 장면인데 모두 재래식 목재 거푸집 형식과 폼타이를 이용하였다.

② 압력계를 이용한 직접계측법

비교적 손쉬운 방법으로 거푸집 면에 압력계를 설치하여 콘크리트 타설시 직접 계측을 수행한다. 콘크리트 타설시 낙하하는 콘크리트에 계측 센서가 파손되거나 탈락되지 않도록 설치시 밀봉 작업 등을 유의해야 하나 가장 간편한 계측 방법으로 본다.

실제 계측에서는 압력을 받는 면이 넓은 둥근 형의 토압계를 이용하였으며 거푸집 탈형시에 계측기를 회수하였다.

③ 계측 결과

거푸집 측압의 측정 결과는 콘크리트의 유동 특성과 거푸집의 변형으로 인해 기존 이론식에 비해 크게 측정되었다. 고유동화제를 사용한 콘크리트의 사용시에는 거푸집의 설계를 검토해야 한다고 본다. 최대 측압을 비교한 결과는 다음과 같다.

표 5. 실험 결과

구분	Hydro-Static 가정	ACI 제안식	콘크리트 표준시방서	G&Q 제안식	실험 결과
W1	6.24	6.21	5.99	4.76	6.15
W2	5.28	5.26			5.76

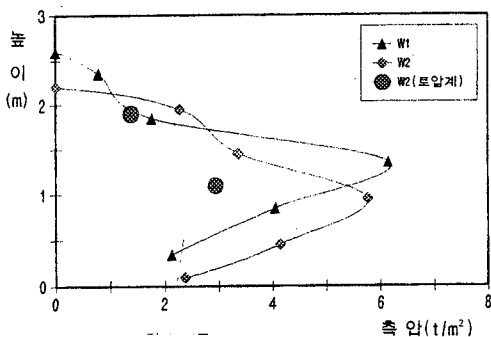


그림 4. 높이에 따른 측정 결과

실험에서 나타난 측압 결과는 사용된 콘크리트가 고강도 고유동 콘크리트이고 거푸집 배부름 현상 등과의 복합 작용을 한 점을 감안하여도 대체로 설계 이론치보다 높은 값을 보여 콘크리트나 시공 상황에 따라 측압이 변동하거나 크게 작용할 수 있음을 알 수 있었다.

실제 실험에서는 거푸집 변형, 폼타이의 국부 변형 등으로 다소의 오차가 있었으나 측정 수량을 늘리고 세심한 주의를 한다면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 맺음말

서두에도 언급했듯이 계측 기술과 해석 기술이 빠르게 발달하고 있는 상황이다. 즉, 계측방법론이나 경험보다는 계측의 목적이나 계측 전후의 예측과 대책이 더 중요하다고 본다. 설계, 시공의 안전성과 품질 향상은 충분한 사전 준비와 계측을 통해 얻을 수 있다고 본다. □

참고문헌

1. "초저발열콘크리트의 개발 및 대형매스콘크리트 구조물의 수화열제어 시공기술 개발", 건설교통부, 1999.
2. 「콘크리트 표준시방서」, 한국콘크리트학회, 1999.
3. "센서의 원리와 사용법", 세화.
4. P. S. Dunston, D. W. Johnston, P. P. McCain, "Formwork pressures in tall walls with extended set concrete".
5. 김종우 외, "고유동콘크리트의 거푸집측압 예측을 위한 실험적 연구", 「한국콘크리트학회가을학술발표회논문집」, 1996.
6. ACI Committee 347, "Guide to Formwork for Concrete(347-88R)", ACI Structural Journal Vol.85 Sep.-Oct., 1988.