

주변환경조건을 고려한 온도이력 해석

Analysis of Temperature Rise History Considering Construction Environment



이 장 화*

1. 서 론

콘크리트 구조물이 대형화, 특수화되고 시공법이 발전함에 따라 대량급속 시공이 증가되고 있으며 과거보다는 상대적으로 고강도의 콘크리트 시공이 빈번해 지고 있다. 따라서 콘크리트의 시멘트 수화열로 인해 구조물에 온도응력이 발생하게 되고 경우에 따라서는 구조물에 균열을 발생시키며 이러한 균열이 사용성, 방수성, 내구성에 지대한 영향을 미치는 경우도 자주 일어나고 있다.

과거에는 이러한 현상은 주로 콘크리트 댐 또는 부재치수가 수미터 이상이 되는 콘크리트 구조물에서만 나타나는 것으로 인식되었다. 그러나 최근에는 사용재료, 콘크리트의 설계강도 및 시공조건 등에 따라서는 부재의 최소치수가 비교적 작은 50cm 이상의 벽체구조물의 경우에도 매스콘크리트 범주에서 설계 시공하도록 규정하고 있다.⁽¹⁾

매스콘크리트에 발생하는 균열은 일반적으로 폭이 크고 부재를 관통하는 경우가 많아 구조물의 내력, 내구성, 수밀성 및 미관 등의 소요품질을 손상시키기 때문에⁽²⁾, 시공전에 콘크리트 구조물 내부의 온도상승 및 하강량을 예측하고 온도상승량 및 하강량을 최소화시킬 수 있는 대책의 수립이 절실한 실정이다.

매스콘크리트의 타설시 구조물 요인, 배합요인, 시공요인, 환경요인 및 콘크리트의 온도요인 등이 수화열로 인한 온도상승에 큰 영향을 미치게 된다. 온도이력 해석에 있어 기존의 연구에서는 대부분이 정량적요인에 해당하는 구조물요인과 배합요인 및 콘크리트의 온도요인을 주로 고려하여 왔다.

따라서 콘크리트 타설후 재령별 변화에 해당하는 시공요인과 주변환경요인을 고려하여 해석하는 것이 대단히 중요하다고 하겠다. 이러한 매스콘크리트의 온도이력을 정확히 예측하기 위해서는 재령별로 민감하게 변하는 시공 및 주변환경요인을 엄밀히 반영

* 성희원, 한국건설기술연구원 구조연구실장

하여 온도이력을 합리적으로 해석하는 것이 절실히 요구된다.

본 고에서는 매스콘크리트의 시공 및 주변환경요인을 해석하는 개념을 도입하고 실제 시공시에 발생하는 각종 주변환경요인에 대한 수치해석을 실시하여 실험 결과와 비교함으로써 현장 적용에 참고자료가 되도록 하고자 한다.

2. 주변환경조건을 고려한 모형화

그림 1은 거푸집 제거전과 제거후, 추가적인 양생 조건 및 기후조건 변화에 따른 표면부 및 중심부의 온도거동에 대한 모형실험결과⁽¹⁰⁾를 도시한 것이다. 실험결과에서 각 곡선은 콘크리트 타설후 재령 50시간에 거푸집을 제거하고 재령 58시간까지 8시간동안 대기에 방치한 다음 재령 63시간까지 5시간동안 콘크리트면에 초속 6~8m/sec의 송풍을 가한후 계속 대기상에 방치하는 일련의 실험조건에서 중심부(P1)와 표면부(P2, P3)의 온도이력 측정결과를 재령별로 나타낸 것이다.

실험에 있어서 콘크리트는 저열시멘트 350kg/m³, 물 157.5kg/m³을 배합한 것으로서 28일 압축강도는 382kg/m²이며 타설후 대기온도는 -10°C~-25°C를 유지했다. 콘크리트에 송풍을 가한 이유는 콘크리트면의 온도변화를 크게 하기 위해서이며, 이것은 거푸집 제거후 바람이 심하게 부는 기후조건을 모사한 것이다. 실험에서 거푸집 제거후 재령 58시간에 송풍을 시작할 때 이미 콘크리트에는 균열이 발생된 것으로

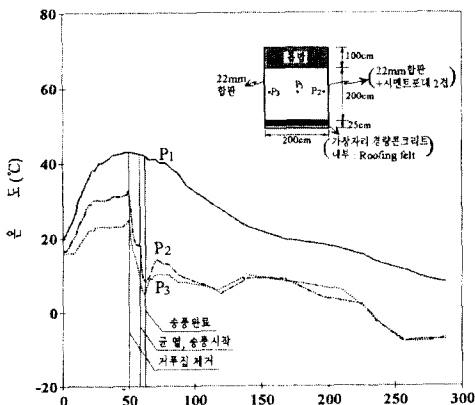


그림 1 주변환경조건 변화에 따른 온도이력

보고되어 있다.

온도이력곡선(그림 1)에서 알 수 있는 바와 같이 중심부는 거푸집제거에 민감하지 않으나 표면부의 경우에는 거푸집제거, 대기온도 및 양생조건 변화에 민감하게 거동하여 온도이력곡선에 시공환경 변화에 따른 영향이 분명하게 나타나고 있다. 실제로 목재거푸집의 경우 양생과정에서 거푸집을 제거하면 콘크리트에는 거푸집의 보온효과가 없어지게 되고 이로 인해 콘크리트의 온도는 대기온도와 평형을 이루기 위해 급격히 하강한다. 이때 콘크리트면에는 온도하강에 따른 수축변형으로 인해 인장응력이 발생하게 되며, 온도하강 속도가 일정한도 이상으로 커지게 되면 수축변형에 따른 인장응력이 콘크리트가 가지고 있는 인장변형 능력을 초과하게 되어 콘크리트에는 균열이 발생하게 된다.

일반적으로 매스콘크리트 구조물을 시공할 경우 거푸집 준치 및 제거, 거푸집 제거후 기후조건 변화 등을 고려하면 대부분 그림 1의 조건과 유사한 환경으로 재현될 가능성이 크다. 따라서 이러한 실험과정을 해석하기 위해서는 아래와 같은 주변환경 조건을 정량화하여 온도이력 해석알고리즘에서 정식화하는 것이 필요하게 된다.

- 1) 시공기간중($0 \leq t \leq t_1$) 실제대기온도
- 2) 거푸집준치($t < 50hr$)시의 열전달상태
- 3) 거푸집 제거후 방치($50hr \leq t < 58hr$)시의 열전달상태
- 4) 송풍실시($58hr \leq t < 63hr$)시의 열전달상태
- 5) 송풍종료($63hr \leq t$)시의 열전달상태

여기서, t : 임의의 재령(hr)

t_1 : 시공(양생) 종료시기

콘크리트 타설후 주변환경 조건의 변화를 정량화하는 방법으로는 재령별로 주변환경 조건이 변화함에 따른 열전달 상태의 변화를 열전달 계수의 변화로 표현하는 방법으로 모형화하는 것이 가능하다.

3. 온도이력 해석을 위한 구조모형화

매스콘크리트의 온도상승 및 하강에 영향을 미치는 요인^{(11), (12), (13)}은 대단히 많다. 여러가지 온도상승

영향요인중 중심부는 물론 표면부의 온도 거동에 특히 영향을 미치는 요인으로서 지금까지 해석적으로 평가되지 않고 있는 요인은 양생 및 대기온도, 거푸집제거 영향 등의 주변환경 조건이다. 매스콘크리트 표면부의 온도상승은 중심부의 온도에 비례하지만 표면부의 온도하강은 표면부의 조건 즉, 양생 및 대기온도, 거푸집제거 영향을 가장 크게 받는다. 매스콘크리트에서 온도거동에 의해 발생하는 균열은 시공현장에서의 경험을 통해서 볼 때 목재거푸집의 경우 거푸집을 제거한 직후부터 1일 혹은 수일이내에 발생하며, 강재거푸집의 경우에는 거푸집 제거전에 발생하기도 한다.

따라서 온도거동 해석모형은 기존에 고려되었던 영향요인외에 위에서 기술한 바와 같이 시공현장의 양생 및 대기온도, 거푸집존치, 거푸집제거, 추가적인 양생 및 기후조건 변화 등과 같은 시공 및 주변환경 조건을 반영해야 한다. 본 연구에서는 매스콘크리트의 온도거동에서 시공 및 주변환경 조건을 해석하기 위해, 이들 요인을 콘크리트 타설후의 재령에 따른 변수로 정식화하며 구조물별 온도거동 해석모형은 그림 2, 그림 3 및 그림 4와 같다.

4. 주변환경 조건의 해석에

그림 1의 모형실험⁽¹⁰⁾에 대해 본 연구에서 개발한 해석알고리즘을 이용하여 해석한 결과를 실험결과와 비교분석하고자 한다.

그림 1의 타연구자의 모형실험에 대해 본 연구의 해석알고리즘을 이용하여 해석하기 위해서는 여러가지 특성치가 필요하게 된다. 특히 실제의 대기온도가

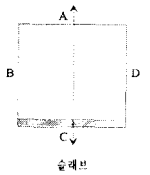
력이 있어야 하며, 또한 최대 단열온도상승량, 반응속도상수 등에 대한 실험자료가 있어야 한다.

그러나 이들 자료는 해당 참고문헌상에 나타나 있지 않아 가정하여 적용하였으며 이중에서 거푸집면의 열전달계수는 시방서⁽¹¹⁾의 참고값을 고려하여 추정하였다. 본 연구에서는 실험상의 환경조건 즉, 지속적인 저온상태, 재령 50시간에 거푸집 제거, 재령 58시간부터 재령 63시간까지 5시간 동안 6~8(m/sec)의 송풍, 이후 계속 대기상에 방치한 일련의 양생과정의 해석에 중점을 두었다.

그림 5, 그림 6 및 그림 7은 각각의 측정 P1, 측정 P2, 측정 P3에 대해 그림 1의 모형실험에서의 실측값과 본 연구의 해석알고리즘을 이용한 해석값을 비교하여 도시한 것이다.

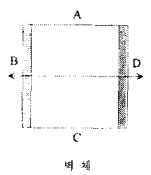
본 연구의 해석결과인 그림 5, 그림 6 및 그림 7과 모형실험의 실측결과를 비교해 볼 때 초기의 해석결과는 거푸집제거 영향, 송풍효과, 송풍 종료후 방치효과 등이 재령별로 분명하게 나타나고 있으나, 송풍종료후 방치상태인 재령 70시간 이후부터는 해석결과의 이력곡선은 굴곡이 거의 없다. 이것은 해석에서는 양생(대기)온도가 실제와 달리 최고온도와 최저온도의 중간값에 해당하는 -12°C로 적용되었기 때문이다.

수치모형의 해석결과에서도 나타난 바와 같이 표면부는 대기(양생)온도와 주변환경조건의 변화에 따라 민감하게 변하며, 중심부의 경우 표면부보다는 덜 민감하나 상당한 영향을 받는다. 따라서 양생 및 대기온도와 시공환경 조건과 같은 주변환경 조건이 해석에 엄밀하게 반영되어야만 실제의 온도이력을 정확히 예측할 수 있다.

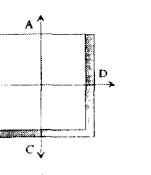


슬래브
A: 열전달경계
B, D: 단열경계
C: 거푸집면, 열전달경계
→ 열효율방향
· 열효율방향

그림 2 슬래브 및 벽체의 해석모형

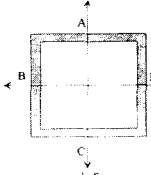


벽체
A, C: 단열경계
B, D: 거푸집면, 열전달경계
→ 열효율방향

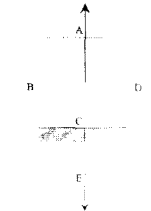


보
A: 열전달경계
B, C, D: 거푸집면, 열전달경계
→ 열효율방향

그림 3 보 및 기둥의 해석모형

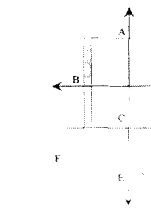


기둥
A, B, C, D: 거푸집면, 열전달경계
→ 열효율방향



기초슬래브
A, C: 열전달경계
B, D: 단열경계
E: 일정한 온도경계
→ 열효율방향
· 열효율방향

그림 4 기초슬래브 및 지중보의 해석모형



지중보
A, C: 열전달경계
B, D: 거푸집면, 열전달경계
E: 일정한 온도경계
F, G: 단열경계
→ 열효율방향

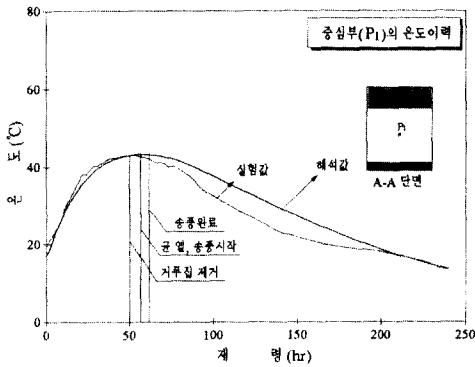


그림 5 중심부(P1)에 대한 실험값 및 해석값

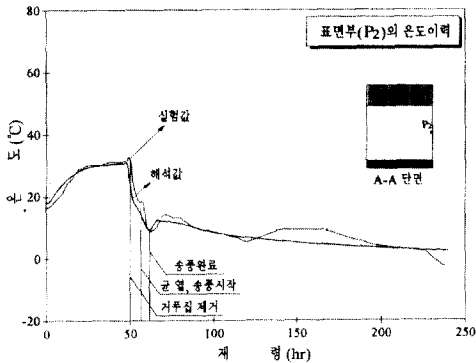


그림 6 중표면부(P2)에 대한 실험값 및 해석값

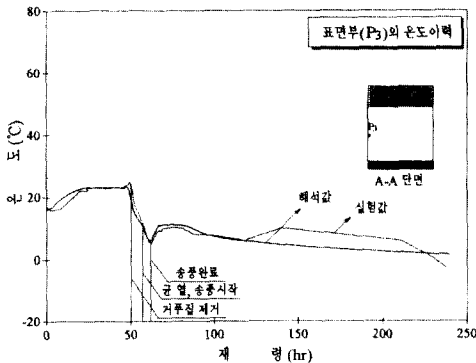


그림 7 표면부(P3)에 대한 실험값 및 해석값

5. 결 론

앞에서 분석한 바와 같이 매스콘크리트 구조체의 온도이력 해석시 시공과정의 주변환경 조건이 엄밀하게 반영되어야 실제와 근접하는 결과를 얻을 수 있다.

특히 대기온도와 거푸집 존치 및 제거, 거푸집 제

거후의 기후조건 및 양생조건 등은 온도이력에 민감한 영향을 미친다. 따라서 최근에 건설이 빈번한 매스콘크리트 구조물에 대해서는 주변환경 조건을 엄밀히 반영하여 사전 해석을 통한 설계·시공계획을 수립하고 시공시에 대책을 강구함으로써 구조물의 품질을 확보하는 것이 요구된다.

참 고 문 헌

1. Carlson, R.W. and Johnson, R., "Curing of Mass Concrete", *J. of ACI*, No.9, Vol.48, 1952, pp. 716-718.
2. ACI Committee 301, "Suggested Specifications for Structural Concrete for Buildings", *J. of ACI*, No.10, Vol 60, 1963, pp. 1321-1373.
3. ACI Committee 207, "Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures", *J. of ACI*, No.4, Vol. 67, 1970, 4, pp. 273-309.
4. ACI Committee 207, "Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete", *J. of ACI*, NO.7, Vol. 70, 1973, 7, pp. 445-470.
5. 日本土木學會, 콘크리트標準示方書 施工篇, 1986, 9, p. 119.
6. 日本建築學會, 建築工事標準仕様書·同解説(JASS 5), 1986, 9, p. 375.
7. 건설부, 콘크리트표준시방서, 1988, 12, p. 591.
8. 건설부, 건축공사표준시방서, 1989, 8, p. 169.
9. 長瀧重義, 佐々良, "마스콘크리트における溫度ひびわれ制御の動向", *콘크리트工學*, Vol. 26, No. 5, 1988, pp. 4-11.
10. Hansen T.C., "Surface Cracking of Mass Concrete Structures at Early Form Removal", *RILEM Bulletin*, No. 28, Sept. 1965, pp. 145-153.
11. Rawhouser, C., "Cracking and Control of Mass Concrete", *J. of ACI*, Vol. 16, No.4, Feb. 1945, pp. 305-346.
12. 마스콘크리트의溫度應力研究小委員會, "마스콘크리트의溫度應力推定方法に關する概往の研究の總括(その1)", *콘크리트工學*, Vol. 21, No. 8, 1983, 8, pp. 4-17.
13. 平價友兒, 倉林清, "마스콘크리트의斷熱溫度上昇する關に概往の研究成果について", *마스콘크리트의溫度應力發生メカニズムに關するコロキウム論文集*, 日本콘크리트工學協會, 1982, pp. 1-6.