

양생온도에 따른 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구

The Effect of Curing Temperature on the Mechanical Property of Concrete

김진근*, 김훈**
Kim, Jin-Keun, Kim, Hoon

ABSTRACT

The property of concrete at different places in mass concrete is affected by the age under the same curing temperature. For more accurate analysis of thermal stress in mass concrete, it is necessary to obtain the property of concrete with age and curing temperature.

In this study, the effects of curing temperature and age (Maturity) on the development of the property of concrete were investigated by using concrete specimens made with type I cement. The curing temperatures are 23℃, 50℃, and 80℃, respectively.

As the maturity increases, the strength of concrete was increased. The results obtained experimentally was compared with the previous models, and good agreements was obtained.

1. 서론

매스 콘크리트에서 시멘트의 수화반응에 의해 발생하는 열은 약재령 콘크리트 내부의 온도 증가를 유발하며, 이로 인해 체적변화를 초래하여 경화단계의 콘크리트 구조물에 균열을 유발하게 된다. 따라서 수화열에 의한 균열해석시에 온도에 따른 정확한 약재령 콘크리트의 역학적 성질이 필요하게 된다. 이러한 필요성에 의하여 미국과 같은 선진국에서는 1950년대부터 연구가 수행되었으며, 숙성도에 따른 강도특성에 대해서는 Plowman의 모델식등이 제안되었다. 또한, 일본에서는 매스콘크리트의 온도에 따른 영향에 관한 연구가 1970년대 말부터 수

행되어, 大崎의 모델식등이 제안되었다. 그러나 국내에서는 최근에 들어와 연구가 시작되어 한국과학기술원의 연구실에서도 콘크리트의 열적 성질에 관한 연구가 수행중에 있다.

우리나라에서는 상온 하에서 콘크리트의 구조적, 재료적 특성은 많은 연구자에 의하여 다양하게 연구되어 왔으나, 고온 하에서의 콘크리트 거동에 대한 연구는 상대적으로 매우 미비하였다. 왜냐하면 일반적으로 콘크리트 구조물은 고온 하에 노출되는 경우가 드물기 때문이다. 대부분의 토목구조물은 고온에 노출되는 경우가 거의 없으며, 건축구조물의 경우 화재 발생시에 일시적으로 고온에 노출된다. 그러나 현재에는 고온 폐수처리장, 원자력발전소의 차폐시설등의 특수 철근콘크리트 구조물이 많이 건축되고 있어 이에 대한 연구가 필요하다.

* 정희원, KAIST 토목공학과 교수, 공박

** 정희원, KAIST 토목공학과 석사과정

본 논문에서는 특히 양생온도에 따른 약재령 콘크리트의 역학적 특성을 알아내기 위한 실험을 실시하고, 기존의 모델식과 비교분석하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험계획

양생조건중에서 콘크리트의 역학적 성질에 영향을 가장 크게 미치는 조건인 온도에 대한 특성을 알아보기 위하여 다음의 표 1에 나타난 바와 같이 실험을 실시하였다. 표 1은 일본의 大崎의 모델식을 이용하여 구하였다[1].

표 1 실험일정

| 양생온도 | 25℃ | 50℃ | 76℃ |
|------|-----|---------|--------|
| 실험일정 | 1일 | - | 3.12시간 |
| | 2일 | 14.3시간 | - |
| | 3일 | 21.4시간 | 9.12시간 |
| | 7일 | 50.0시간 | 21.4시간 |
| | 28일 | 199.6시간 | 85.7시간 |

한편, 본 논문에서는 수화반응초기의 양생온도에 대한 영향을 고려하기 위하여 콘

표 2 시멘트의 물리적·화학적 성질

| 시멘트 종류 | 비 중 | 분말도 (cm ² /g) | 응 결 | | 안정율 (%) | 강도(kg/cm ²) | | |
|--------|------|--------------------------|-----|-----|---------|-------------------------|------------|---------------|
| | | | 초 결 | 종 결 | | σ_3 | σ_7 | σ_{28} |
| Type I | 3.14 | 2,810 | 45분 | 5시간 | 8.12 | 120 | 210 | 290 |

| 성 분 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | Ig. loss | Insol Res. | Free CaO |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|-------------------|------------------|----------|------------|----------|
| 함유율(%) | 20.9 | 5.4 | 3.3 | 62.1 | 2.8 | 3.1 | 0.07 | 1.19 | 1.1 | 0.33 | 0.9 |

표 3 골재의 물리적 성질

| 종 류 | 최대입경 (mm) | 비중 | 흡 수 율 (%) | 조립율 (F.M.) |
|-----------|-----------|------|-----------|------------|
| 강 모 래 | - | 2.59 | 0.78 | 2.89 |
| 화강암 부순 자갈 | 13mm | 2.60 | 1.25 | 6.7 |

크리트 타설직후부터 표 1에서 제시한 온도로 양생을 시작하였다. 따라서 초기 양생온도의 영향으로 인하여 콘크리트의 역학적 성질이 변화하게 된다.

2.2 실험재료 및 양생조건

시멘트는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고 시멘트에 대한 물리적, 화학적 성질등을 표 2에 나타내었다. 잔골재는 조립율이 2.89인 금강 유역의 대평리산 강모래를 사용하였고, 굵은골재는 최대치수가 13mm인 화강암 쇄석을 사용하였으며, 표 3에 각 골재의 물리적 성질을 나타내고 있다. 또한, 콘크리트의 작업성을 확보하기 위한 혼화제는 naphthalene계 고성능 감수제인 super-20을 사용하였다. 감수제에 대한 물성치는 표 4에 나타나 있다.

콘크리트의 배합강도가 500kg/cm²정도를 예상하여 배합설계를 실시하였다. 표 5에서 제시한 배합비를 이용하고 콘크리트 제작시 강제식 믹서를 사용하였다. 사용된 시험체는 $\phi 100 \times 200$ mm의 압축강도용 공시체를 사용하였다.

본 논문에서 중요한 요인이 되는 양생조건은 타설직후 건조기를 이용하여 대기의

표 4 혼화제의 성분 및 성상

| 종류 | 형상 | 색조 | 성분 | 비중 |
|--------|----|-----|----------------------|------|
| type F | 액상 | 암갈색 | naphthalene polymers | 1.21 |

표 5 콘크리트의 배합표

| 예상 압축강도 (kg/cm ²) | 단위중량(kg/m ³) | | | | 고성능 감수제 (%) | 슬럼프 (cm) | 공기량 (%) |
|----------------------------------|--------------------------|-----|-----|------|-------------------|-------------|------------|
| | 시멘트 | 물 | 잔골재 | 굵은골재 | | | |
| 500 | 500 | 175 | 504 | 1175 | 1 | 21 | 2 |

온도를 양생온도로 조절하였고, 탈형은 23℃에서 1일을 건조양생시의 적산온도와 일치하는 재령에서 실시하였다. 또한 탈형이 후에 각 온도에서 습윤양생을 실시하였다.

2.3 실험방법

실험은 표 1에 주어진 재령에 따라서 실험을 실시한다. 이 때에 사용된 기기는 250ton 용량의 Instron사의 Closed-loop Servo-hydraulic Dynamic Materials Testing System이다. 콘크리트의 표면을 평평하게 하기 위하여 유황 캘핑을 실시하였다.

탄성계수를 알아내기 위한 응력 - 변형도 관계곡선을 구하기 위하여 공시체 주변에 콤프레소미터를 부착하고 LSC를 이용하여 두군데의 변위를 측정하여 축방향 변형을 측정하였다. 또한 쪼갬인장강도 실험은 KS F 2423에 따라서 실시하였다.

3. 실험고찰

3.1 양생온도에 따른 콘크리트의 역학적 성질

양생온도에 따른 콘크리트의 압축강도는

표 6 ~ 8에 나타낸 바와 같다. 표에서 보면 상대적으로 높은 양생온도에서 압축강도는 비교적 낮게 나타나고 있다. 이러한 현상은 초기재령에서 양생온도의 영향이 크게 좌우된다고 판단된다.

한편 양생온도가 높아질수록 초기재령에서 강도증가가 크게 일어나고 후기 재령에서는 강도증가율이 둔화된다. 이러한 강도발전 현상은 초기 양생온도가 높을수록 초기에는 수화반응속도가 크게 나타나고 있으므로 강도가 높게 발전되지만 후기에는 급격한 수화반응에 의해서 상대적으로 커다란 다공질의 빈약한 화학생성물이 만들어져 대부분의 공극이 채워지지 않기 때문에 강도가 적게 나타난다. 또한 낮은 양생온도에서는 초기에 수화량이 적기 때문에 강도가 적게 나타나고 후기에는 수화과정에서 발생하는 화학생성물이 강도에 유리한 물질이 만들어지고 공극을 채우므로 강도의 증가량이 상당히 크게 나타난다[2].

인장강도는 양생온도에 따른 변화량이 적게 나타나며, 경시변화에 대한 인장강도의 변화도 적게 나타나고 있다.

탄성계수는 ASTM C469에 의한 식을 이

표 6 양생온도(23±4℃)에서의 콘크리트의 역학적 성질

| 23℃의 재령 | 적산온도 | | 압축강도 (kg/cm ²) | 인장강도 (kg/cm ²) | 탄성계수 (kg/cm ²) | ACI모델식에 의한 탄성계수 |
|------------|-------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| | Plowman (℃-hr) | 大崎 (℃-day) | | | | |
| 1 일 | 888 | 43.8 | 228.8 | 31 | 2.07×10 ⁵ | 2.27×10 ⁵ |
| 2 일 | 1776 | 87.5 | 296.4 | 38 | 2.44×10 ⁵ | 2.59×10 ⁵ |
| 3 일 | 2664 | 131.3 | 345.6 | 39 | 2.60×10 ⁵ | 2.79×10 ⁵ |
| 7 일 | 6216 | 306.3 | 408.9 | 39 | 2.71×10 ⁵ | 3.03×10 ⁵ |
| 28 일 | 23604 | 1121.6 | 477.8 | 46 | 3.28×10 ⁵ | 3.28×10 ⁵ |

표 7 양생온도(50±2℃)에서의 콘크리트의 역학적 성질

| 적산온도 | | | 압축강도 (kg/cm ²) | 인장강도 (kg/cm ²) | 탄성계수 (kg/cm ²) | ACI모델식에 의한 탄성계수 |
|------------|-------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 23℃의 재령 | Plowman (℃-hr) | 大崎 (℃-day) | | | | |
| 2 일 | 891 | 72.9 | 265.6 | 31 | 2.45×10 ⁵ | 2.44×10 ⁵ |
| 3 일 | 1271 | 103.4 | 266.7 | 33 | 2.57×10 ⁵ | 2.45×10 ⁵ |
| 7 일 | 3061 | 251.3 | 298.0 | 38 | 2.68×10 ⁵ | 2.59×10 ⁵ |
| 28 일 | 8933 | 981.7 | 311.5 | 41 | 3.33×10 ⁵ | 2.65×10 ⁵ |

표 8 양생온도(76±3℃)에서의 콘크리트의 역학적 성질

| 적산온도 | | | 압축강도 (kg/cm ²) | 인장강도 (kg/cm ²) | 탄성계수 (kg/cm ²) | ACI모델식에 의한 탄성계수 |
|------------|-------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 23℃의 재령 | Plowman (℃-hr) | 大崎 (℃-day) | | | | |
| 1 일 | 259 | 35.5 | 116.9 | 13 | 1.07×10 ⁵ | 1.62×10 ⁵ |
| 3 일 | 831 | 116.7 | 251.5 | 34 | 2.25×10 ⁵ | 2.38×10 ⁵ |
| 7 일 | 1874 | 262.1 | 306.7 | 40 | 2.68×10 ⁵ | 2.85×10 ⁵ |
| 28 일 | 7242 | 987.9 | 340.8 | 47 | 3.37×10 ⁵ | 2.77×10 ⁵ |

용하여 구하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$E_c = \frac{0.4f'_c - f_{c_{0.005}}}{\varepsilon_{0.4f'_c} - 0.0005}$$

$$f'_c(t) = \frac{f'_c}{100} \left\{ 32 + 54 \log \frac{M}{1000} \right\}$$

표 6 ~ 8에 나타난 바와 같이 양생온도에 의한 탄성계수의 변화는 적게 나타나고 있다. 또한 ACI에서 규정한 식을 이용하여 탄성계수를 구한 값과 본 논문의 실험에 의하여 구한 값과는 많은 차이를 보이고 있다. 또한, 수화열 및 열응력 해석시에 입력 데이터로 사용하기 위한 초기 콘크리트의 탄성계수를 알아내기 위한 연구를 추가적으로 수행하여야 할 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 인장응력이나 탄성계수에 대한 양생온도에 의한 영향이 적게 나타나는 것으로 밝혀졌다.

3.2 기존의 모델식과의 비교[1]

표 9 와 그림 1은 Plowman의 모델식과 大崎의 모델식을 이용하고 본 논문에서 실험한 결과와 비교한 것이다.

위에서 이용한 Plowman의 모델식은 다음과 같다.

또한 大崎의 모델식은 다음과 같다.

$$y = 0.012x^2 - 0.028x + 0.02 \quad M \leq 30$$

$$y = 0.112x - 0.347 \quad M > 30$$

여기서 $x = (2.398 \ln M / 3.5) - 1.0$

$$f'_c(t) = yf'_c$$

위 식들에서 f'_c 은 양생온도가 20℃인 28일 강도이고 M은 각 모델식에서 정의한 적산온도로써 나타내어진다.

표 9에서 나타낸 바와 같이 Plowman의 식이 초기재령에서는 실험값과 차이가 많이 나고 있다. 그 차이는 초기의 양생온도가 수화반응에 많은 영향을 주고 있는 것으로 사료된다. 그러나 후기재령에서는 모델식과 실험값의 차이가 작아진다.

大崎의 모델식은 실험값과 많은 편차를 나타내고 있다. 적산온도의 식에서 양생온도에 대한 영향을 크게 보고 제안된 것으로 판단된다.

표 9 각 모델식과의 비교(압축강도(kg/cm²))

- Plowman식

| 재령 | 23℃ | | | 50℃ | | | 76℃ | | |
|-----|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| | 적산온도 | 모델값 | 실험값 | 적산온도 | 모델값 | 실험값 | 적산온도 | 모델값 | 실험값 |
| 1일 | 888 | 115.6 | 228.8 | - | - | - | 259 | 1.1 | 116.9 |
| 2일 | 1776 | 180.0 | 296.4 | 891 | 115.9 | 265.6 | - | - | - |
| 3일 | 2664 | 217.6 | 345.6 | 1271 | 148.9 | 266.7 | 831 | 109.4 | 251.5 |
| 7일 | 6216 | 296.2 | 408.9 | 3061 | 230.5 | 298.0 | 1874 | 185.0 | 306.7 |
| 28일 | 23604 | 420.1 | 477.8 | 8933 | 329.9 | 311.5 | 7242 | 310.4 | 340.8 |

- 大崎식

| 재령 | 23℃ | | | 50℃ | | | 76℃ | | |
|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 적산온도 | 모델값 | 실험값 | 적산온도 | 모델값 | 실험값 | 적산온도 | 모델값 | 실험값 |
| 1일 | 43.8 | 86.8 | 228.8 | - | - | - | 35.5 | 64.6 | 116.9 |
| 2일 | 87.5 | 160.5 | 296.4 | 72.9 | 141.1 | 265.6 | - | - | - |
| 3일 | 131.3 | 203.6 | 345.6 | 103.4 | 178.3 | 266.7 | 116.7 | 191.1 | 251.5 |
| 7일 | 306.3 | 293.7 | 408.9 | 251.3 | 272.6 | 298.0 | 262.1 | 277.1 | 306.7 |
| 28일 | 1121.6 | 431.6 | 477.8 | 981.7 | 417.5 | 311.5 | 987.9 | 418.1 | 340.8 |

예를들면, 28일 강도에서 보면 23℃에서는 실험값은 477.8kg/cm²이고 Plowman는 420kg/cm²이 된다고 제안하였고, 大崎는 431.64kg/cm²이 된다고 하였다. 그 차이가 두 모델식과 실험값이 적게 나타나고 있으나, 양생온도가 50℃일 때는 Plowman의 식에서는 실험값과 20kg/cm²정도의 편차를 나타내고 있으며 大崎의 식에서는 100kg/cm²의 차이를 보이고 있다. 또한 76℃에서도 비슷한 양상으로 나타나고 있다. 한편 大崎의 식보다는 Plowman의 모델식이 적산온도에 의한 콘크리트의 역학적 특성을 추정하는 것이 더욱 정확한 것으로 나타났다. 또한, Plowman식에서도 초기재령에서의 양생온도에 대한 보정을 가해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

양생온도에 관한 콘크리트의 역학적인 특성을 파악하기 위한 실험을 수행한 결과, 결론은 다음과 같다.

- 1) 초기 양생온도가 높아질수록 초기재령에서는 콘크리트의 강도가 크게 나타나고 있으며, 후기재령에서는 작게 나타나고 있다.
- 2) 적산온도에 관한 모델식중에서 초기 양생온도의 영향을 고려하기 위한 방법을 모색하는 연구가 계속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.
- 3) 강도발현식은 大崎의 모델식보다는

Plowman의 모델식이 적합한 것으로 생각된다.

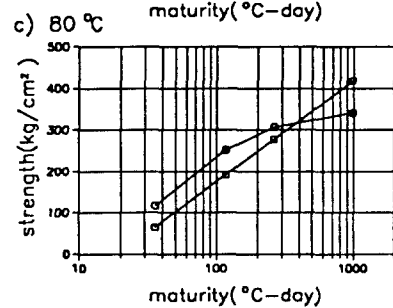
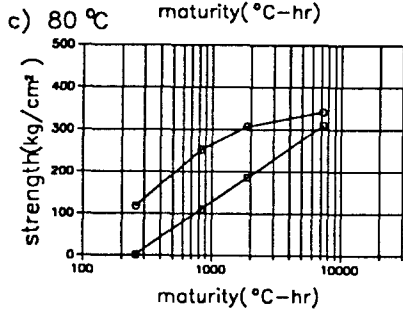
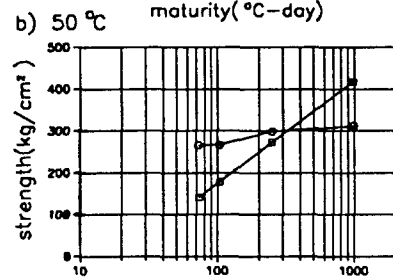
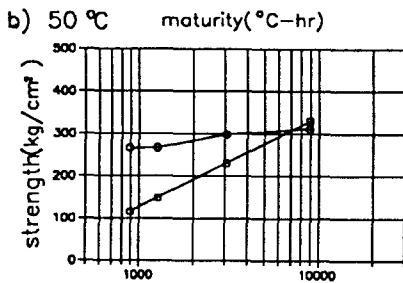
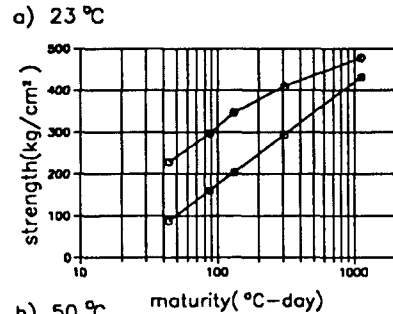
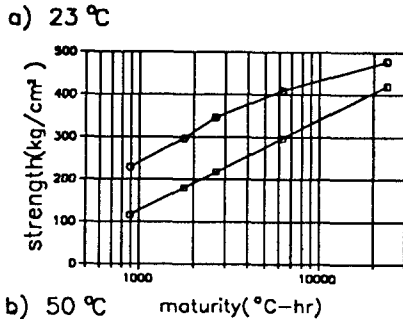
- 4) 수화반응속도에 직접적으로 영향을 주는 단위시멘트량이 다량함유되는 고강도 콘크리트의 양생온도에 관한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.
- 5) 수화열 및 열응력 해석시에 사용되는 약재령콘크리트의 탄성계수를 알아내기 위한 연구가 필요하다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 동 재단에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이종대, “크리이프를 고려한 매스콘크리트의 수화열에 대한 온도응력 해석”, Kaist,1993(석사학위논문)
2. A.M. Neville, “Properties of Concrete (3-rd Edition)”, Pitman, 1981, pp.268 ~358
3. 김남호, “저온에서의 콘크리트 강도발현 상태에 관한 실험적 연구”, 한양대학교, 1987.6(석사학위논문)



- Plowman의 모델식 -

- 大崎의 모델식

그림 1 기존의 모델식과 실험결과의 비교

(O : 실험치, □ : 모델식에 의한 값)