

# 온도와 재령이 콘크리트의 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계에 미치는 영향

## Effect of Temperature and Aging on the Relationship between Dynamic and Static Elastic Modulus of Concrete

한 상 훈\*      김 진 근\*\*  
Han, Sang Hun      Kim, Jin Keun

### ABSTRACT

The paper investigates the relationships between dynamic elastic modulus and static elastic modulus or compressive strength according to curing temperature, aging, and cement type. Based on this investigation, the new model equations are proposed. Impact echo method estimates the resonant frequency of specimens and uniaxial compression test measures the static elastic modulus and compressive strength. Type I and V cement concretes, which have the water-cement ratios of 0.40 and 0.50, are cured under the isothermal curing temperature of 10, 23, and 50 °C.

Cement type and aging have no large influence on the relationship between dynamic and static elastic modulus, but the ratio of dynamic and static elastic modulus comes close to 1 as temperature increases. Initial chord elastic modulus, which is calculated at lower strain level of stress-strain curve, has the similar value to dynamic elastic modulus. The relationship between dynamic elastic modulus and compressive strength has the same tendency as the relationship between dynamic and static elastic modulus. The proposed relationship equations between dynamic elastic modulus and static elastic modulus or compressive strength properly estimates the variation of relationships according to cement type, temperature, and aging.

### 1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 안전성이나 내구성을 파악하기 위해 비파괴 검사법을 많이 이용하고 있다. 이러한 비파괴 검사법을 이용하면 많은 경우에 동탄성계수(dynamic elastic modulus)를 얻을 수 있는데 이 값은 시료의 일축압축실험에서 얻어지는 일반적인 정탄성계수와는 다르다. 일축압축실험에서 구해지는 정탄성계수는 크게 다음 3가지로 나눌 수 있다. 접선탄성계수(tangent elastic modulus)는 응력-변형률 곡선의 한 지점에서의 기울기를 나타낸다. 할선탄성계수(secant elastic modulus)와 현탄성계수(chord elastic modulus)는 같은 의미로 쓰이기도 하지만 엄밀히 구별하면, 할선탄성계수는 원점과 압축강도의 40%에 해당하는 지점을 연결한 직선의 기울기를, 현탄성계수는  $50 \times 10^{-6}$ 의 변형률에 해당하는 지점과 압축강도의 40%인 지점을 연결한 직선의 기울기를 나타낸다. 일반적으로 KS F 2438 규격(콘크리트 원주공시체의 정탄성계수 및 푸아송비 시험방법)에서 측정되는 정탄성계수는 위의 3가지 탄성계수에서 현탄성계수를 의미한다. 한편, 비파괴 시험법 중에서 충격공진(Impact

\* 정희원, 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부, 선임연구원

\*\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과, 교수

Echo : IE)법 등은 실험체에 매우 작은 충격을 주어 공진주파수를 측정하는 것으로 이 방법에 의해 구해지는 동탄성계수는 매우 낮은 변형률 수준에서 측정된 일종의 초기접선탄성계수로 간주할 수 있다. 따라서, 이러한 동탄성계수와 정탄성계수의 차이를 살펴보고 그 값들의 상관관계를 파악하는 것은 비파괴 검사법에 의해 측정될 수 있는 동탄성계수를 이해하고 이용하는 데 매우 중요하다.

본 연구에서는 충격공진기법에 의해 측정된 동탄성계수를 정탄성계수를 비롯한 여러 재료역학적 성질들과 비교해 보고 이러한 상관관계들이 온도와 재령에 따라 어떻게 변화하는지 고찰하였다.

## 2. 실험결과 및 분석

### 2.1 정탄성계수와 동탄성계수의 상관관계

측정값들의 상관관계를 알아보기 위해서 그림 1~4 에서는 이러한 실험값들을 그림으로 나타내었다. 또한 상관관계를 좀 더 정확하게 파악하기 위해서 식 (1)을 이용하여 실험값들을 회귀분석하였다.

$$E_c = E_d(1 - a e^{-bE_d}) \quad (1)$$

여기서,  $E_c$  : 정탄성계수 ( $\times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>)       $E_d$  : 동탄성계수 ( $\times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>)       $a, b$  : 비례상수

위의 식은 다음과 같은 가정들을 포함하고 있다. 일반적으로 동탄성계수가 커지면 그 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 40%이하의 압축강도에서 좀 더 선형적인 거동을 보인다. 그리고 응력-변형률 곡선이 선형적인 거동을 보일수록 동탄성계수와 정탄성계수의 값의 차이는 줄어든다. 따라서 동탄성계수가 매우 커지면 정탄성계수와 동탄성계수는 거의 같은 값을 가질 것이다. 또한 동탄성계수의 값이 0 이면 정탄성계수의 값도 0 이어야할 것이다. 이러한 조건들을 만족시키도록 식 (1)을 구성하였다.

먼저 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계가 시멘트의 종류에 따라 어떤 변화가 있는지 살펴보았는데, 그림 1은 23 ℃로 양생한 1종 및 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계를 나타내고 있다. 두 값들의 상관관계를 좀 더 정확히 파악하기 위해서 실험결과들에 식 (1)을 적용하여 상관관계식을 구하고 이 두 식들을 비교하였다. 그림 1에 나타난 바와 같이  $3.0 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup> 이하의 동탄성계수에서는 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 정탄성계수가 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 정탄성계수보다 조금 크지만 그 값의 차이는 매우 작고  $3.0 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 동탄성계수에서는 정탄성계수와 동탄성계수가 거의 일치한다. 따라서, 두 종류의 시멘트에 따른 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 한편, 회귀분석에 의한 식 (1)의 상수  $a$  와  $b$  값은 그림에 제시되어 있다. 시멘트 종류에 따른 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계의 변화는 기존에 제시되었던 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 상관관계식과 본 논문에서 제시된 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 상관관계식을 비교하여 다시 한 번 살펴볼 수 있다. 그림 2에서 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 회귀분석식들을 기존에 제안했던 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 예측모델식과 비교하고 있다. 실험값들의 분포를 고려해 볼 때, 회귀분석식들을 비교할 수 있는 유효범위는 동탄성계수가  $2.0 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>에서  $4.0 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup> 사이에 있을 때이고 이러한 범위는 그림 2에서 수직점선으로 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계식과 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 상관관계식이 별 차이가 없음을 알 수 있다. 즉, 앞에서 언급한 바와 같이 정탄성계수와 동탄성계수의 상관관계는 1종과 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트에서 차이가 없음을 알 수 있다.

그림 3은 양생온도에 따른 동탄성계수와 정탄성계수의 비교이다. 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 양생온도에 따른 실험값과 이를 바탕으로한 회귀분석식들을 나타내고 있다. 물-시멘트비가 0.40이 경우는 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 양생온도가 증가할수록 같은 동탄성계수에서 정탄성계수 값이 조금 증가하지만 그 값들의 차이는 크지 않다. 그러나 이러한 경향은 물-시멘트비가

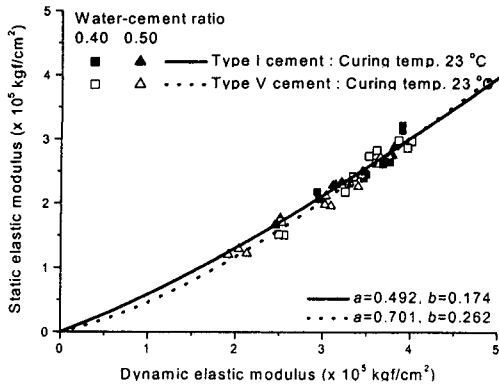


그림 1 시멘트의 종류에 따른 동·정탄성계수

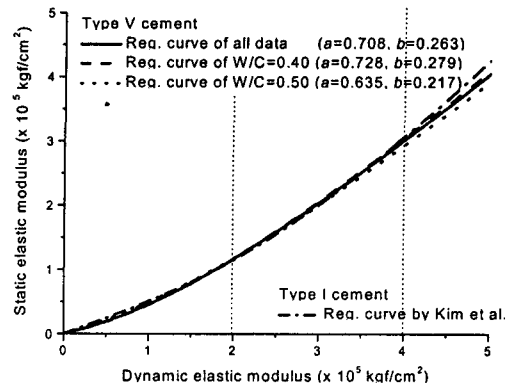
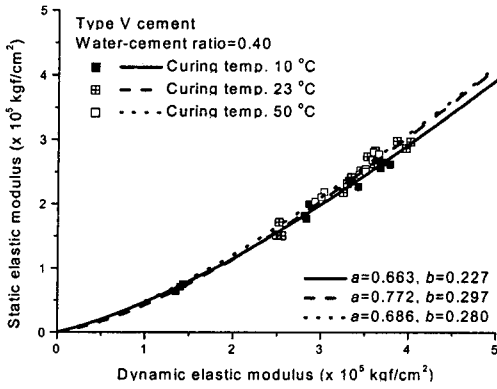
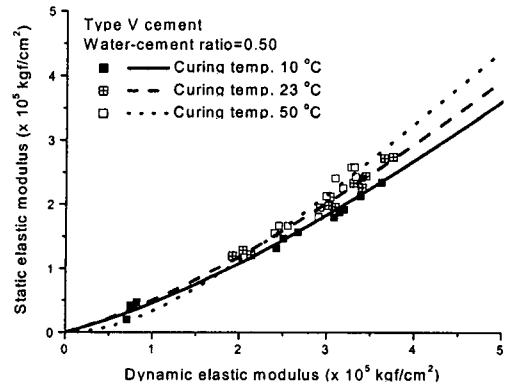


그림 2 동·정탄성계수의 회귀분석곡선

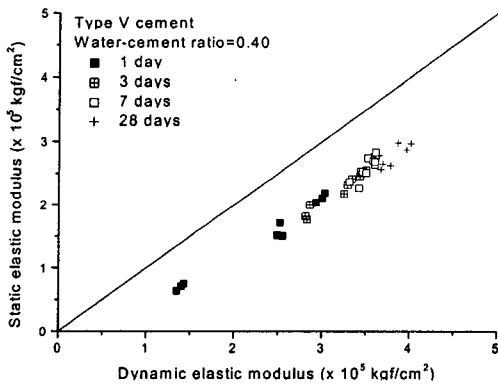


(a) 물-시멘트비=0.40

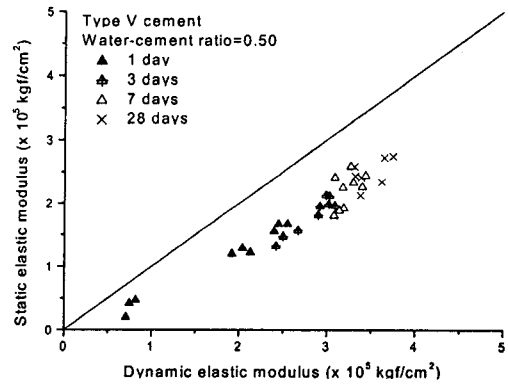


(b) 물-시멘트비=0.50

그림 3 양생온도에 따른 동·정탄성계수



(a) 물-시멘트비=0.40



(b) 물-시멘트비=0.50

그림 4 재령에 따른 동·정탄성계수

0.50인 경우에는 좀 더 확연하게 나타나게 된다. 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 동탄성계수가  $2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  보다 큰 범위에서

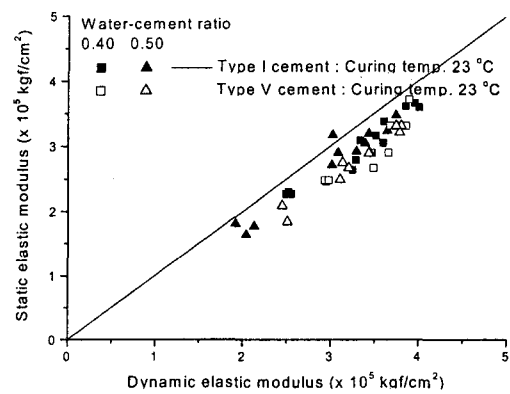
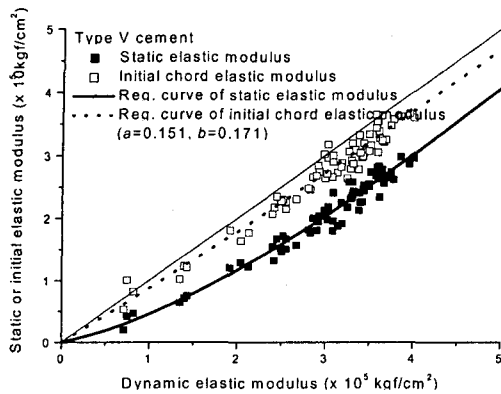


그림 5 동·정탄성계수와 초기현탄성계수    그림 6 시멘트의 종류에 따른 동탄성계수와 초기현탄성계수

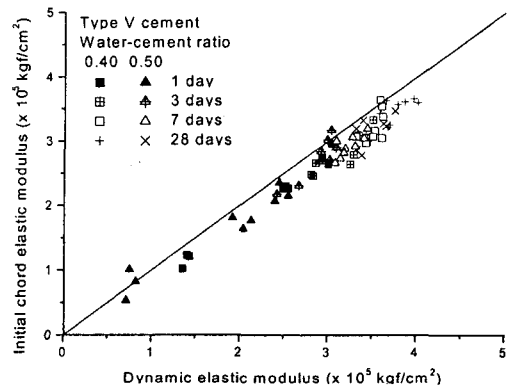
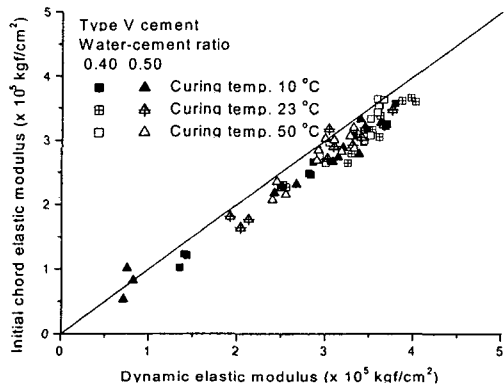


그림 7 양생온도에 따른 동탄성계수와 초기현탄성계수    그림 8 재령에 따른 동탄성계수와 초기현탄성계수

는 양생온도가 증가하면 같은 동탄성계수에서 정탄성계수가 10%이상 크다. 이것은 양생온도가 증가할수록 콘크리트의 수화가 빨리 진전되어 좀 더 취성적인 성질을 가지게 되는 것에서 그 이유를 찾을 수 있다. 콘크리트가 좀 더 취성적이 될수록 응력-변형률 곡선은 선형적인 거동을 보이고 동탄성계수와 정탄성계수의 비는 1에 가까워진다. 그러나 이러한 경향은 물-시멘트비에 따라서 조금씩 다르게 나타나기 때문에 이것을 정량적인 예측식으로 제시하는 것은 아직까지 어렵고 좀 더 많은 실험값들의 축적이 필요할 것으로 사료된다.

그림 4는 재령에 따라 동탄성계수와 정탄성계수를 비교하고 있다. 그림 4에 나타난 바와 같이 물-시멘트비가 0.40인 경우에는 재령에 따라 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계가 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 물-시멘트비가 0.50인 경우에는 0.40인 경우보다 실험값들 사이의 오차가 조금 크지만 상관관계는 크게 변하지 않음을 관찰할 수 있다. 즉, 재령에 따라 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 한편, 재령에 따라서 실험값의 분포가 일치하는 정탄성계수 및 동탄성계수의 범위가 넓지 않기 때문에 재령에 따라 실험값들을 회귀분석하는 것은 큰 의미가 없을 것으로 사료되어 실험값들을 식 (1)을 이용하여 회귀분석하지는 않았다.

## 2.2 초기현탄성계수와 동탄성계수의 상관관계

동탄성계수는 변형률 수준이 매우 낮은 상태에서의 접선탄성계수로 볼 수 있으므로 정탄성계수가 측정되는 변형률 수준을 낮

추면 낮출수록 정탄성계수와 동탄성계수의 차이는 줄어들 것이다. 이를 확인하기 위해서 응력-변형률 곡선에서 변형률이  $10 \times 10^6$  과  $50 \times 10^6$  인 곡선상의 점들을 연결한 직선의 기울기를 '초기현탄성계수'로 정의하고 이 값을 동탄성계수와 비교하였다.

그림 5는 동탄성계수와 초기현탄성계수 및 정탄성계수의 상관관계를 비교하고 있다. 예측한 대로 초기현탄성계수와 동탄성계수의 비가 정탄성계수와 동탄성계수의 비보다 좀 더 1에 가까움을 알 수 있다. 일반적으로 충격공진기법은 변형률 수준이 약  $6 \times 10^6$ 에 해당하는 지점에서 동탄성계수를 측정하므로 좀 더 정밀한 실험장치를 이용하여 정탄성계수를 이러한 변형률 수준에서 측정한다면 정탄성계수와 동탄성계수는 거의 일치할 것으로 사료된다.

앞의 정탄성계수의 경우와 마찬가지로 초기현탄성계수와 동탄성계수의 상관관계를 시멘트의 종류, 양생온도 및 재령에 따라 검토해 보았다. 그림 6은 시멘트의 종류에 따라 초기현탄성계수와 동탄성계수의 상관관계를 비교하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트가 같은 동탄성계수에서 초기현탄성계수의 값이 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 값보다 조금 크지만 두 값의 차이는 그리 크지 않다. 또한 그림 7과 8은 양생온도와 재령에 따른 초기현탄성계수와 동탄성계수의 상관관계이다. 그림에 나타난 바와 같이 양생온도와 재령은 두 값의 상관관계에 큰 영향을 미치고 있지 않음을 알 수 있다.

### 2.3 압축강도와 동탄성계수의 상관관계

콘크리트의 재료성질 중에서 가장 많이 사용되는 것이 압축강도이다. 따라서, 이러한 압축강도와 비파괴 시험법에 의한 동탄성계수의 상관관계를 고찰해 보는 것도 매우 중요한 일이다. 그림 9에서 11은 이러한 두 값의 상관관계를 시멘트의 종류, 양생온도, 재령에 따라 나타내고 있다. 또한 이러한 상관관계를 좀 더 정확하게 파악하기 위해 다음과 같은 상관관계식을 이용하여 실험값을 분석하였다.

1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트

$$f_{cu} = \alpha E_c^\beta = \alpha [E_d(1 - 0.708 e^{-0.263 E_d})]^\beta \quad (2)$$

5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트

$$f_{cu} = \alpha E_c^\beta = \alpha [E_d(1 - 0.492 e^{-0.174 E_d})]^\beta \quad (3)$$

여기서,  $f_{cu}$  : 압축강도 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\alpha, \beta$  : 비례상수

정탄성계수와 동탄성계수의 상관관계식들은 앞 2.1절에서 구했으므로 이 상관관계식들을 이용하여 동탄성계수와 압축강도의 상관관계식들을 구하고자 하였다. 그래서 기존의 시방서나 논문들에서 제시한 압축강도와 정탄성계수의 상관관계식에 2.1절에서 구한 식들을 대입하여 식 (2)와 (3)을 수식화하였다.

앞의 경우들과 같이 압축강도와 동탄성계수의 상관관계를 시멘트의 종류, 양생온도 및 재령에 따라 검토해 보았다. 그림 9는 시멘트의 종류에 따라 압축강도와 동탄성계수의 상관관계를 비교하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트가 같은 동탄성계수에서 압축강도의 값이 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 값보다 조금 크지만 그 차이는 5%미만으로 매우 작다. 따라서, 압축강도와 동탄성계수의 상관관계는 1종 및 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트가 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

그림 10은 양생온도에 따라 동탄성계수와 압축강도의 상관관계를 비교하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 10 °C와 23 °C로 양생한 콘크리트의 동탄성계수와 압축강도의 상관관계는 거의 동일하지만 50 °C로 양생한 콘크리트는 조금 다른 경향을 나타낸다. 이에 대한 원인은 크게 2가지로 설명할 수 있다. 먼저 첫 번째 이유로 고강도와 저강도에서 콘크리트의 탄성계수와 압축강도가 서로 다른 상관관계를 보인다는 것에서 찾을 수 있다. 「콘크리트 표준시방서」에서는 콘크리트의 압축강도와 정탄성계수의 상관관계를 고강도와 저강도로 나누고 압축강도 300 kgf/cm<sup>2</sup>를 기준으로 두 가지의 모델식을 제시하고 있다. 이러한 이유로 300 kgf/cm<sup>2</sup>이상의 압축강도 실험값이 많은 50 °C로 양생한 콘크리트가 10 °C나 23 °C로 양생한 콘크리트와는 다른 압축강도와 동탄성계수의 상관관계를 나타낼 수 있다. 그림 10은 「콘크리트 표준시방서」의 식들과 회귀분석식들을 비교하고 있다. 그림에 나타

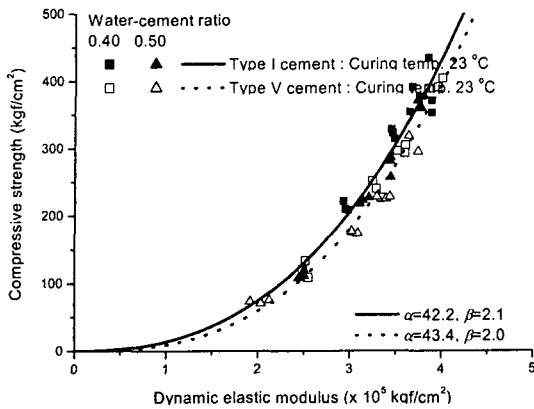


그림 9 시멘트의 종류에 따른 동탄성계수와 압축강도

계수를 가질 수 있으므로 이러한 결과가 나타날 수 있다. 앞에서 설명한 두 가지 이유가 복합되어 그림 10과 같은 결과를 얻은 것으로 사료된다. 그림 11은 재령에 따라 동탄성계수와 압축강도를 비교하고 있는데 그림에 나타난 바와 같이 재령에 따라 동탄성계수와 압축강도의 상관관계는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

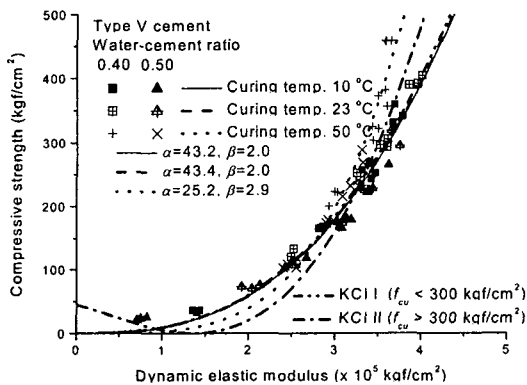


그림 10 양생온도에 따른 동탄성계수와 압축강도

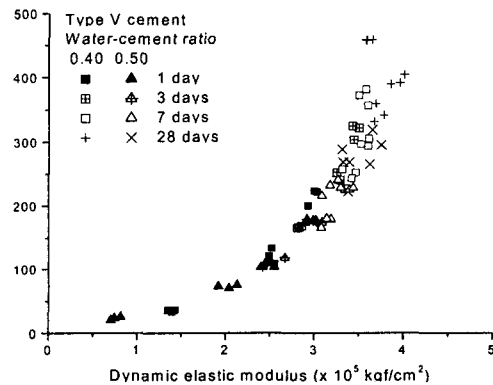


그림 11 재령에 따른 동탄성계수와 압축강도

난 바와 같이 양생온도 10 °C와 23 °C로 양생한 콘크리트의 실험결과에 대한 회귀분석식들은 저강도 콘크리트에 대한 식과 거의 유사함을 알 수 있다. 하지만, 고강도 실험값이 많은 양생온도 50 °C로 양생한 콘크리트의 실험결과 회귀분석식은 저강도 콘크리트에 대한 식보다 고강도 콘크리트에 대한 식과 더 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 양생온도에 따른 두 값의 상관관계에 대한 차이는 앞서도 설명한 바와 같이 온도에 따른 콘크리트 수화도의 변화로도 설명될 수 있다. 고온으로 양생한 콘크리트는 저온으로 양생한 콘크리트보다 수화과정이 빨리 진행되어 좀 더 취성적인 성질을 가지게 되며 조직도 저온 양생 콘크리트보다는 치밀하지 못하다. 같은 압축강도에서도 조직이 치밀한 콘크리트가 그렇지 못한 콘크리트보다 좀 더 큰 동탄성

### 3. 결론

온도와 재령에 따라 동탄성계수, 정탄성계수, 초기현탄성계수, 압축강도 사이의 상관관계들을 고찰한 후에 다음의 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계식은 시멘트의 종류와 재령에 큰 영향을 받지 않았다. 그러나, 양생온도의 변화에 따라 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계는 변화하여 두 값의 비는 온도가 증가함에 따라 1에 가깝게 접근하였다. 제시된 모델식은 이러한 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계를 잘 모델링하였다.
- 2) 초기현탄성계수와 동탄성계수의 비는 정탄성계수와 동탄성계수의 비보다 좀 더 1에 가까웠다. 이것으로 변형률 수준이 동탄성계수와 비슷한 상태에서 일축압축실험으로 탄성계수를 구하면 두 값이 거의 일치함을 추측할 수 있었다. 또한 초기현탄성계수와 동탄성계수의 상관관계는 온도와 재령에 크게 영향을 받지 않았다.
- 3) 압축강도와 동탄성계수의 상관관계는 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계와 같이 시멘트의 종류와 재령에는 큰 영향을 받지 않았지만 양생온도에 따라서는 그 상관관계가 변화하였다. 이러한 상관관계의 변화는 제시된 예측모델식을 사용하여 모델링하였다.

력상태계수  $\alpha_1$ 는 1되어 전 경간에서 일정한 값을 가지는 타이드-아치 거동을 하며  $\alpha_n$ 이 클수록 해당 내력상태계수  $\alpha_n$ 는 0에 가까운 탄성상태가 되어 주인장철근력은 하중점까지 일직선으로 변화는 선형형식이 된다. 등분포하중하에서의 주인장철근력  $T_{uniform}$ 은 다음과 같이  $n$ 개의 등가하중을 받는 보에서 주인장철근력들을 중첩하여 구하였다.

$$T_{uniform} = (T_1 + T_2 + T_3 + \dots T_n)_{point} \quad (10)$$

식(10)에 의해 구한 등분포하중을 받는 보의 주인장철근력은 전단경간중양 측, 지점으로부터  $l/4$  이하에서 계산된 주인장철근력보다 커지는 아치현상이 발생하였다. 이와 같이 구한 등분포에서의 주인장철근력  $T_{uniform}$ 를 이용하여 전 구간의 내부모멘트 팔길이를 계산한 후 식(6)에서의 내력상태계수 값인  $\alpha$ 를 회귀분석을 통하여 결정하였다.

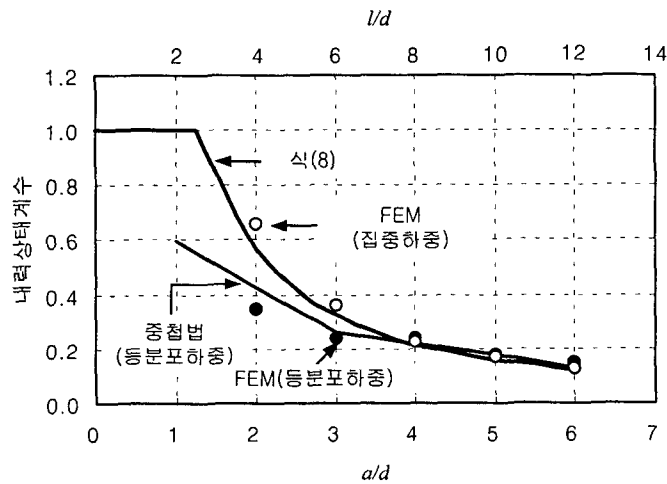


그림 4 중첩법을 이용한 내력상태계수

아치계수의 주변수인 전단경간 대 유효깊이 비는 2~6까지 변화를 주었으며 주인장철근비  $\rho$ 는 1%로 등분포하중을 받는 전단보강이된 보의 내력상태계수의 변화를 중첩법으로 구해 그림 4에 나타났다. 그림 4에서와 같이 등분포하중을 받는 보에서 내력상태계수는 전단경간 대 유효깊이 비가 4이하에서 집중하중의 내력상태계수 보다 적게 나왔다. 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 유한요소해석을 수행하였으며 이때 제원은 실제 실험을 수행한 보(Kim et al 1998)와 같이 하였다. 집중하중을 받는 보의 내력상태계수는 유한요소 해석한 결과 값과 실험에 의해 제안한 식(8)과 거의 일치하게 나타났다. 같은 제원으로 하중형태만 등분포하중으로 변화시켜서 유한요소해석을 한 결과 중첩법에 의해 구한 값이 짧은 보에서는 중첩법에 의한 값보다 작게 나왔지만 거의 유사함을 알 수 있다. 전반적으로 등분포하중의 내력상태계수가 집중하중보다 적게 나왔는데 이는 첫째, 하중형태 변화에 따른 전단력과 휨모멘트의 조합( $M/d \approx f/v$ )이 집중하중에서 보다 작아지며 둘째, 휨균열이 등분포 하중하에서는 지점 쪽으로 더욱 진전하여 발생하여 콘크리트 압축 함용력계적이 집중하중에서 보다 완만해졌고 셋째, 균열의 진전길이 및 각도 등의 변화가 요인이라 할 수 있겠다.

중첩법에 의한 결과를 살펴보면 집중하중과 등분포하중 각각의 내력상태계수는 서로 상관관계를 가지고 있으며 이를 식으로 표현하였다. 식(9)에 의해 계산된 집중하중을 받는 보의 내력상태계수를 중첩법에 의해 구한 등분포에서의 내력상태 계수로 나누어 이를 이차식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\alpha_{uniform} = (-0.02(\frac{a}{d})^2 + 0.23(\frac{a}{d}) + 0.37) \alpha_{point} \quad (1 \leq \frac{a}{d} \leq 6) \quad (11)$$

이 식을 이용하면 단순히 집중하중을 받는 보의 내력상태계수  $\alpha$ 를 알면 등분포하중의 내력상태계수를 구할 수 있다. 이 때 집중하중의 전단경간 대 유효깊이 비( $a/d$ )와 등분포하중의 경간 대 유효깊이 비( $l/d$ )와는  $1/2$ 만큼( $a/d = l/2d$ ) 대응한다. 단, 단면형상, 단면제원 등이 같은 전단보강이 된 보에서 단순히 하중형태의 변화가 있을 경우에 대해 전단경간 대 유효깊이 비  $a/d$ 가 1에서 6 까지 변할 때 등분포하중의 내력상태계수를 산출할 수 있게 제안하였다.

### 3. 결 론

등분포하중을 받고 있는 전단 보강이 된 철근콘크리트 보에서 발생하는 아치현상의 발생정도를 평가하기 위하여 전단경간길이에 따라 유한요소해석 방법과 중첩법으로 접근하였다. 본 연구의 해석결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 아치현상의 발생정도는 하중형태에 따라서 다르게 나타났으며, 집중하중상태가 등분포하중상태보다는 전단경간이 짧은 보의 경우에 크게 나타났다. 또한 등분포하중상태일 때 순수 보작용에 의해 파괴가 지배되는 임계  $l/d$  가 크게 나타났다.
- 2) 등분포하중을 받는 보에서의 아치현상은 집중하중을 받는 보에서의 내력상태계수 값을 이용하여 중첩법으로 설명할 수 있다.
- 3) 하중형태의 변화에 따른 내력상태계수의 차이는 휨과 모멘트의 조합( $M/d \approx f/v$ )의 변화와 휨균열의 전진 길이와 각도의 변화라 할 수 있다.
- 4) 집중하중과 등분포하중의 내력상태 상관관계를 식으로 제안하였다. 이 식은 극히 제한된 조건하에 제안된 것이며 차후 실험에 의한 검증이 필요하겠다.

### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-1999-0132) 지원으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Russo, G., Zingone, G., and Puleri, G. (1991) "Flexure-Shear Interaction Model for Longitudinally Reinforced Beams", *ACI Structural Journal*, V.88, No. 1, pp.60-68.
2. Kim, D-J., Kim, W., and White R. N. (1998), "Prediction of Reinforcement Tension Produced by Arch Action in Reinforced Concrete Beams", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 6, pp.611-622.
3. Kim, D. J., Kim, W., and White, R. N. (1999), "Arch Action in Reinforced Concrete Beams - A Rational Prediction of Shear Strength", *ACI Structural Journal*, Vol. 96 No.4, pp.586-593.
4. 김우, 김준성, 박대성, "내력상태계수 개념을 도입한 철근콘크리트 보의 전단파괴 가설(I) - 전단강도 일반식 유도를 중심으로", *대한토목학회논문집*, 20권, 5-A호, 2000, pp. 823-830.