

강섬유철근콘크리트보의 에너지감쇠에 관한 연구

Investigation on Damping of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams

강 보순* 김 유석** 황 학***
Kang, Bo Soon Kim, Yu Seok Hwang, Hak

국문 요약

본 논문에서는 강섬유 철근 콘크리트 보(SFRC)의 감쇠 거동에 대해서 실험적인 방법과 수치 해석적인 방법으로 연구를 수행하였다. SFRC는 보다 향상된 에너지 소산 능력으로 일반 철근 콘크리트보에 비하여 뛰어난 감쇠 거동을 보인다. 감쇠거동은 종방향 철근비, 강섬유의 형태와 부피, 콘크리트 강도, 응력 수준 등에 의해 영향을 받는다. SFRC보의 감쇠는 다양한 수준의 균열 상태에서의 동적실험 데이터를 통하여 평가하였다. 곡률과 감쇠의 관계식에 기초한 유한요소 프로그램(TICAL)이 개발되었으며, 0.44%의 강섬유를 혼입한 보의 경우 5~35%의 감쇠비 증가를 보였다.

주요어 : 강섬유 철근 콘크리트 보, 감쇠거동, 에너지 소산

ABSTRACT

In this paper, damping behavior of steel fiber reinforced concrete(SFRC) beams by experimental and numerical method is discussed. Because of its improved ability to dissipate energy, SFRC has a better damping behavior than that of reinforced concrete(RC). Damping behavior is influenced by longitudinal reinforcement ratio, ¹volume and type of steel fiber, strength of concrete and the stress level. Damping in the SFRC beams has been evaluated from dynamic experimental test data at various levels of cracked states in the beams. A FEM program(TICAL) has been developed based on the relationships between curvature and damping. It is observed for SFRC beams with 0.44% of tensile reinforcement steel that approximate 5% to 35% was relatively increased in the damping ratio generally depending on the load level.

Key words : SFRC Beam, Damping Behavior, Energy Dissipation

* 정회원, 경주대학교 건설환경시스템 공학부, 조교수
** 정회원, 엘지건설 기술연구소 연구원
*** 엘지건설 기술연구소장

1. 에너지 감쇠

1.1 서론

에너지 감쇠란 위치에너지와 운동에너지의 교환에 의한 진동에너지가 다른 에너지 형태로 바뀌어 소산되는 현상으로 이해된다. 구조물의 에너지감쇠 원인은 아주 다양하여, 그림1과 같이 에너지 감쇠를 구분할 수 있다.

구조물의 에너지감쇠를 나타내기 위하여 토목공학에서는 Kelvin-Voigt 모델이 가장 많이 사용된다. 식(1)은 이 모델에 의한 운동방정식으로 m 은 가속도에 비례하는 Mass이고 c 는 속도에 비례하는 점성 Damping이며, k 는 변위에 비례하는 구조물의 강성이다.

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F(t) \quad (1)$$

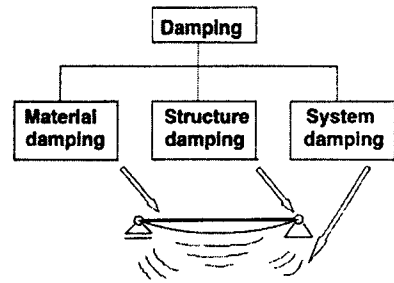


그림 1 감쇠의 분류

본 논문에서 사용하는 에너지 감쇠치는 한번의 진동에서 소산된 에너지감쇠 D_i 에 대한 탄성에너지 W_i 의 비율로, 식(2)에 의해 계산된다.

$$\xi_i = \frac{1}{4\pi} \frac{D_i}{W_i} \quad (2)$$

엄밀히 말하여 실제 재료의 에너지감쇠는 정확한 점성적인 특성을 나타내지 않으므로, 식(2)로 구해지는 값은 “등가점성에너지감쇠”로 표현된다.

1.2 구조물에너지 감쇠의 결정

철근콘크리트의 에너지 감쇠값을 구하는 일반적인 방법은 단순보나 내민보처럼 아주 간단한 구조물에 적용되는 자유진동실험이나

Resonance Bandwidth 방법이 자주 사용된다. 자유진동실험에서는 단순보에 천천히 힘을 가하여 준 후 놓으면 보는 자유진동을 하게된다. 그때 보의 처짐 진행을 따라가면 그림2와 같이 진동폭이 점점 감소하면서 사라지는 거동을 볼 수 있다.

따라서 보의 매 진동주기에 대하여 식(3)에서와 같이 Lehr's 에너지감쇠치는 진폭의 비에 의하여 구하여 진다.

$$\xi_i = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot n} \cdot \ln\left(\frac{x_i}{x_{i+n}}\right) \quad (3)$$

위의 식은 비균열 상태에서 중방향으로 모든 단면에서 에너지감쇠기능이 동일하다는 가정을 근거로 한다. 그러나 균열상태에서 철근콘크리트구조물의 에너지감쇠는 주로 균열된 부분에서 발생된다. 즉, 균열부에서의 철근과 콘크리트사

이의 상대적인 변위에 의해 진동에너지가 열로 변화됨으로 마찰에너지감쇠가 생긴다. 이와 같이, 구해진 에너지 감쇠치들은 구조물에 좌우되기 때문에 "구조물 관 에너지감쇠"라고도 말한다.

Free vibration experiment

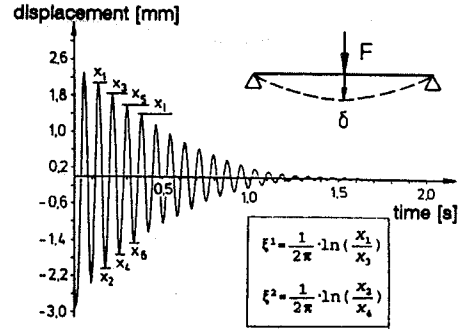


그림 2 자유진동 시험

1.3 요소에너지감쇠의 결정

구조물에 좌우되지 않는 요소에너지 감쇠를 구하기 위하여 구조물 전체의 에너지 감쇠는 각 부피 요소들의 에너지감쇠의 합과 같다는 기본가정을 사용하며, 이것은 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$D_{total} = \int D \cdot dv \quad (4)$$

위 식에서 \$D_{total}\$은 전체구조물에서 측정된 에너지감쇠이며, \$D\$는 부피요소의 에너지감쇠이다. 구조물을 \$n\$개의 요소로 분할하면 식(4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D_{total} = \sum_{i=1}^n D_i \quad (5)$$

식(5)의 \$D_i\$는 \$i\$번째 요소의 에너지감쇠이다. 에너지감쇠를 식(2)에서의 \$\xi\$와 에너지 \$W\$로 표시하면 식(5)는 다음과 같이 바뀌어 진다.

$$\xi_{total} \cdot W_{total} = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot W_i \quad (6)$$

식(6)은 구조물 전체의 에너지감쇠가 위치에너지로 곱해진 각 요소에서의 등가점성에너지감쇠의 합으로 구하여질 수 있음을 보여준다.

m번째 요소의 에너지감쇠는 식(6)으로부터 유도된식(7)에 의하여 구하여 질 수 있다.

$$\xi_m = \frac{\xi_{ges} \cdot W_{ges} - \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \cdot W_i - \sum_{i=m+1}^n \xi_i \cdot W_i}{W_m} \quad (7)$$

i번째 요소에 축적된 에너지 W_i 는 근사적으로 요소 중앙에서의 모멘트 M_i 와 곡률 x_i 로부터 식 (8)에 의하여 나타낼 수 있다.

$$W_i = \frac{1}{2} \cdot k_i \cdot M_i \quad (8)$$

식 (8)과 더불어 식 (7)은

$$\xi_m = \frac{\xi_{ges} \cdot \sum_{i=1}^n K_i \cdot M_i - \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \cdot K_i \cdot M_i - \sum_{i=m+1}^n \xi_i \cdot K_i \cdot M_i}{K_m \cdot M_m} \quad (9)$$

m번째 요소를 제외한 나머지 n-1개 요소의 에너지감쇠치를 알면 m번째 요소의 에너지감쇠는 식(9)으로 계산된다.

2. 실험프로그램

2.1 실험변수

실험은 그림3에 나타난 수평방향으로 진동할 수 있는 단순보에서 수행되었다. 시험체의 길이는 3m이고 폭과 높이는 각각 8cm와 16cm 이며, 그림4에 측정위치들이 표시되어 있다. 실험에서 사용된 변수는 다음과 같다.

- 강섬유 혼입량 (무섬유, 0.8 vol.%, 1.6 vol.%)
- 철근비 ($\mu=0.44\%$, 1.23%)
- 콘크리트강도 (B25 \cong 250, B45 \cong 450kg/cm²)
- 스트립 간격

표 1 Test Beam의 물성치

Beam designation	Number of beams	Volume fraction of fibers V_f [%]	Type of fibers	Degree of tension reinforcement $\mu_{01} = \mu_{02}$ [%]	concrete strength class by DIN 1045
B1	3	0.0	-	0.44	B 25
B2	3	0.8	straight	0.44	B 25
B3	3	1.6	straight	0.44	B 25
B4	3	0.0	-	1.23	B 25
B5	3	1.6	straight	1.23	B 25
B6	3	1.6	hookened	0.44	B 25
B7	3	0.0	-	0.44	B 25
B8	3	1.6	straight	0.44	B 25

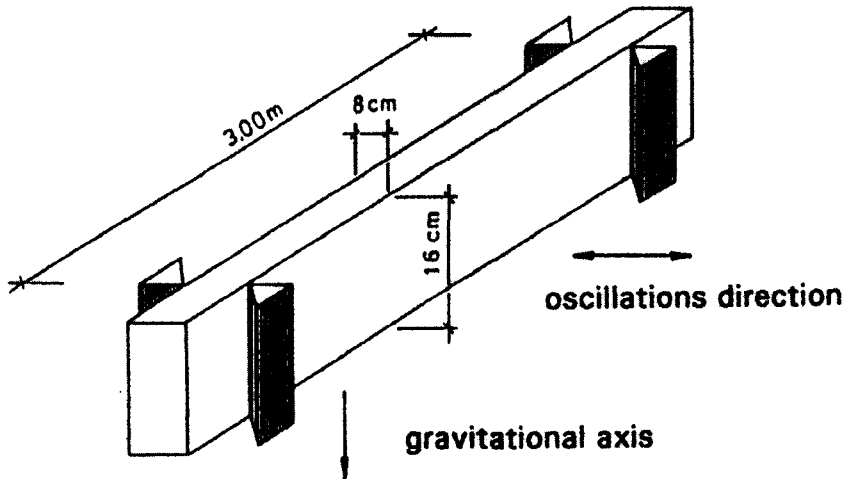


그림 3 시험 부재

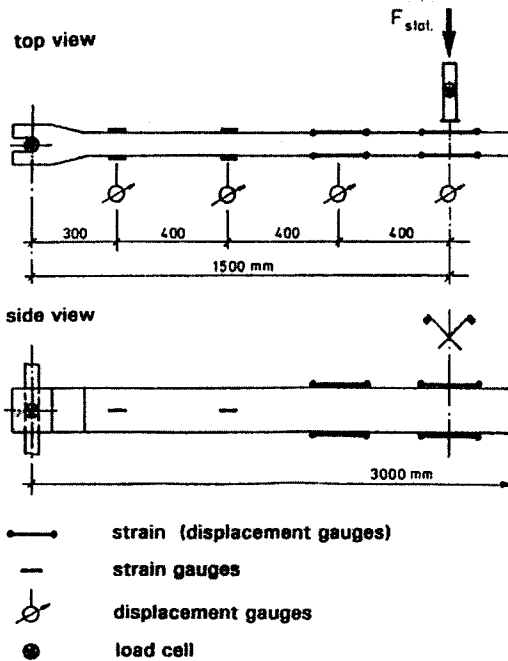


그림 4 측정 위치

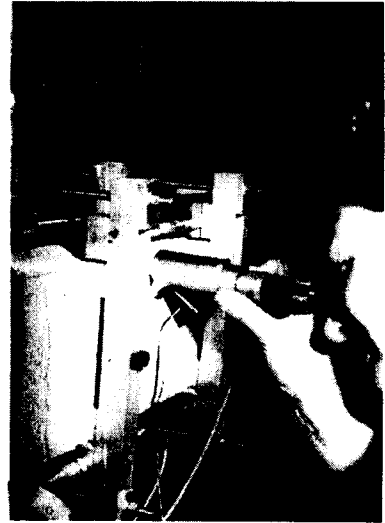


그림 5 측정

2.2 실험과정

전체 실험은 6가지의 초기 처짐에 따른 6개의 단계로 나뉘며, 각 단계에서의 실험 방법은 우선 초기 처짐이 정적으로 보에 가해진다. 이때 측정프로그램은 하중과 처짐 및 시험체 중간에서의 변형을 컴퓨터화면에 나타낸다. 이어서 시험체의 정적 구속을 갑자기 해제하여 자유진동을 하는 보의 진동 상태가 자동으로 측정된다.

첫 번째 시험단계(단계 V1)의 초기 처짐에는 균열이 발생하지 않는다. 이때의 진동들은 전체적으로 균열이 없는 상태에서 진행되므로 각 요소 사이의 진동특성간에는 큰 차이가 없다.

두 번째 단계(단계 V2)에서 첫 번째 균열이 발생하며, 이는 화면에 나타나는 힘과 변형의 관계에서 확인된다. 즉, 시험체를 휘게 하는 힘이 감소되면 균열이 발생된 것을 알 수 있다. 동시에 보 중간단면에서의 변형은 갑자기 증가한다: 그림5 다음 단계들은 초기 처짐을 증가시켜 기존의 균열 부(중앙) 이외의 위치에서 새로운 균열이 발생함을 확인하므로, 각 단계별 초기처짐 상태가 결정된다.

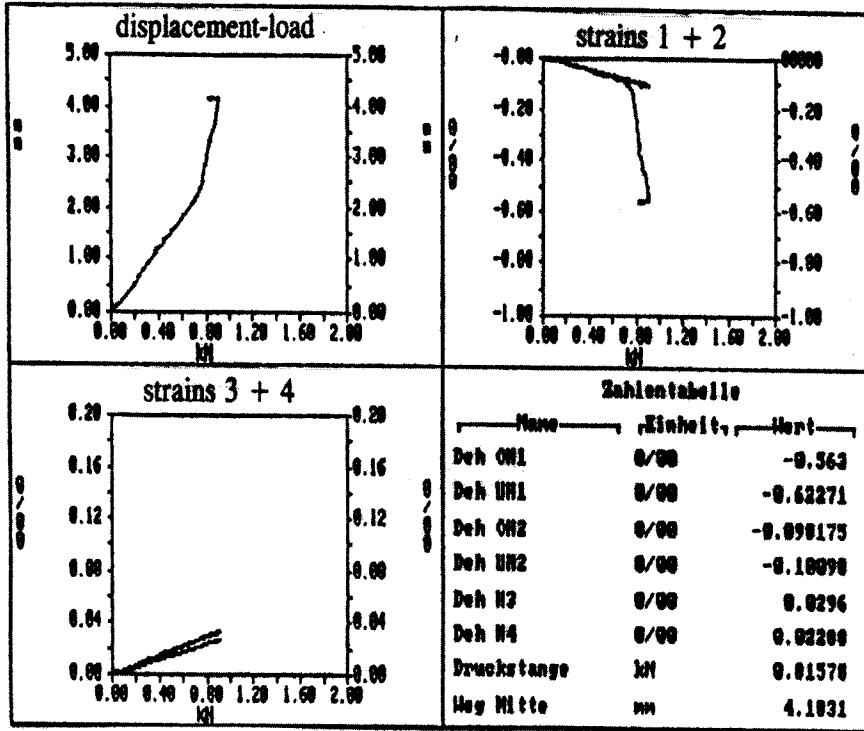


그림 6 요소1-4번에 대한 결과

3. 실험결과

3.1 구조물 에너지감쇠

각 처짐 단계의 진동에서 에너지 감쇠의 진행이 쌍곡선모양으로 나타나며, 마찰에너지감쇠로 인하여 발생하는 등가에너지 감쇠치가 처짐이 증가되면 감소되고 반대로 처짐이 감소하면 에너지 감쇠치는 증가한다. 곡선상의 점들은 최대 처짐과 측정 순간의 처짐에 의하여 결정된다.

그림7은 실험결과로 다섯 개의 상이한 초기 처짐에서 에너지감쇠와 처짐의 관계를 나타낸다. 이 곡선들로부터 처짐에 대한 에너지 감쇠치의 관계를 알 수 있으며 또한 에너지 감쇠치의 상한과 하한이 결정되고, 최대 처짐과 측정 순간의 처짐에 의해 결정되는 각 에너지 감쇠치들은 그 사이에 존재하게 된다.

강섬유로 보강된 시험체인 경우(혼입량: $V_f=1.6 \text{ Vol.}\%$)와 보강되지 않은 시험체인 경우(혼입량: $V_f=0.0 \text{ Vol.}\%$)에 대한 두 가지 다른 철근비($\mu=0.44\%$, $\mu=1.23\%$)에서의 결과가 그림8에 나타나

있다.

강섬유로 보강된 낮은 철근비의 시험체인 경우에 약 15%정도의 더 큰 에너지 감쇠치를 보이나 높은 철근비의 시험체인 경우는 강섬유 보강으로 인한 에너지 감쇠치 증가가 두드러지 않는다.

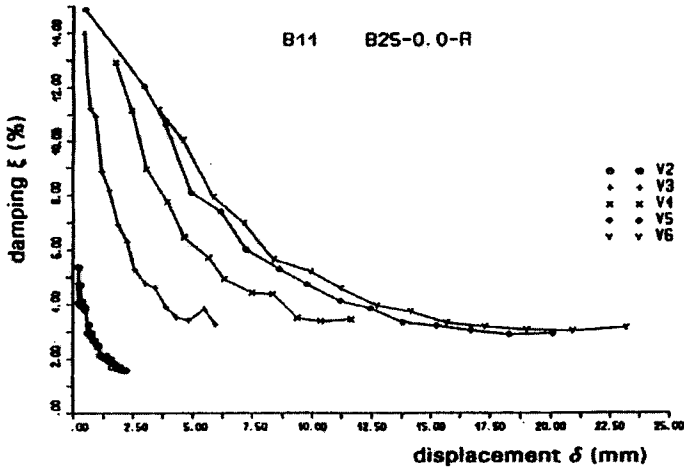


그림 7 상이한 초기 처짐에서의 에너지 감쇠와 처짐의 관계

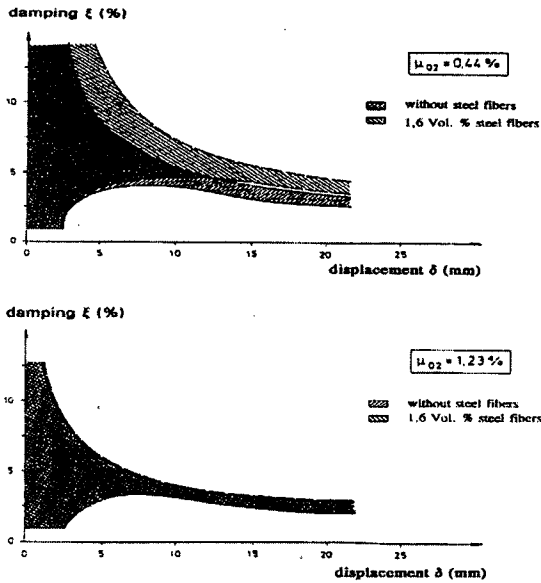


그림 8 저보강보와 과보강보에서의 강섬유의 영향

3.2 요소 에너지 감쇠

요소실험으로부터 구해진 에너지 감쇠치의 결과가 그림9와 10에 나타나 있다. 요소실험의 경우도 전체구조물시험에서와 같이 두 가지 다른 강섬유 혼입량($V_f=0.0$ Vol.%, $V_f=1.6$ Vol.%)에 대해 각각의 에너지 감쇠치를 구했다. 이 요소 에너지 감쇠치들은 실험에서 사용된 단면의 철근콘크리트에 대해서는 구조물의 경계조건에 관계없이 동일하다.

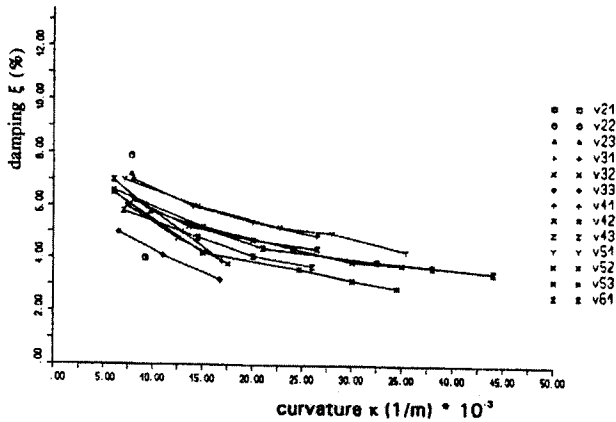


그림 9 곡률에 따른 감쇠변화

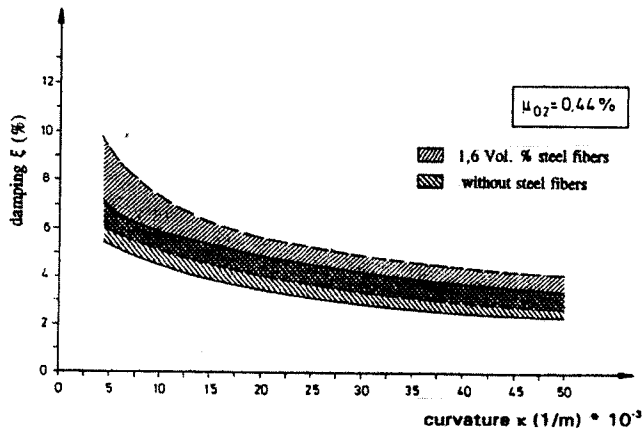


그림 10 곡률에 따른 감쇠변화

3.3 비교 계산

본 논문에서 사용된 실험방법의 검증을 위해, 실험결과와 FEM-프로그램에 의한 계산결과가 그림11와 12에 비교되어 있다. 그림11와 12는 최대처짐 2mm 와 함께 가장 낮은 하중단계 V1 그리고 그림13와 14는 최대 처짐 25mm를 초과하는 가장 높은 하중단계 V6에 대한 자유진동커브이다. 증대되는 하중과 같이 변화하는 고유진동수 및 진폭이 떨어져 사라지는 특성도 실험치와 계산치가 잘 일치한다. 또한 그림11에서14에서는 처짐크기(하중수준)에 대해 계산된 에너지 감쇠치와 실험에서 얻어진 에너지 감쇠치가 잘 일치된다. 따라서 본 실험에서 사용된 방법이 실무에서 사용될 수 있고 효과적임을 나타낸다.

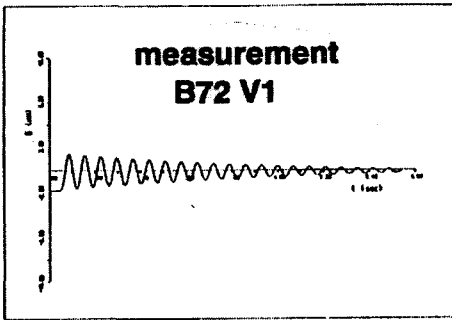


그림 11 측정결과('최대 처짐 2mm)

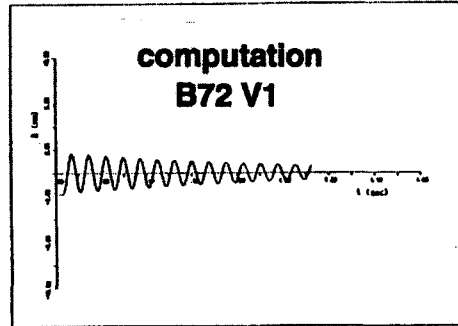


그림 12 계산 결과(최대 처짐 2mm)

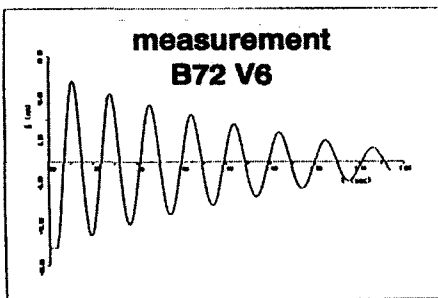


그림 13 측정결과 (최대 처짐 25mm)

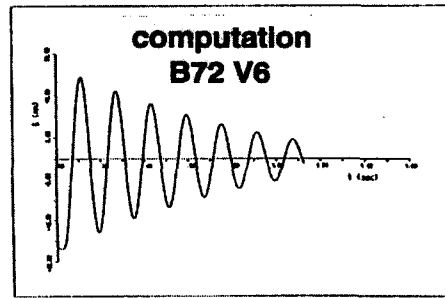


그림 14 계산 결과(최대 처짐 25mm)

4. 결론 및 연구과제

본 논문에서는 강섬유로 보강된 철근 콘크리트 보에서 에너지감쇠특성의 변화를 다루었다. 이것을 위한 구체적 방법으로는; 첫째, 진동 구조물의 전체적인 관찰로, 그 구조물의 전체적인 에너지감쇠특성을 결정하였다. 그러나 이 방법으로의 결과로는 다른 형태를 갖는 구조물에 대하여서는 구조적 차이로 인한 감쇠경향만을 파악할 수밖에 없었다. 둘째로는, 구조물의 요소실험에 의한 방법이다. 즉, 보 요소에서 행하는 실험에 의해 요소의 에너지 감쇠치를 결정하는 것으로 이는 각 구조물의 형태와는 무관한 값이다. 요소실험에 의해 구해진 에너지 감쇠치와 처짐각의 관계는 전산프로그램에서 각 요소별로 하중수준과의 관계에서 파악되었다. 이렇게 수치적으로 계산된 결과와 측정된 전체 구조물거동과의 비교(예를 들면 자유진동곡선) 및 분석에 의해, 에너지감쇠의 파악을 위한 요소적 방법이 구조물의 에너지감쇠특성을 실무에서도 사용할 수 있는 정확한 결과를 제공함을 보여 주었다. 추후 연구과제로는 구한 재료에너지 감쇠치를 이용하여 다른 형태의 구조물에 대한 구조적인 에너지감쇠의 연구가 요망된다.

5. 참고문헌

1. Bock, E., *Über den dynamischen E-Modul und die Dämpfung von Betonbalken verschiedener Bewehrung bei Bieigungs- und Längsschwingungen. Dissertation*, TH Berlin, 1939
2. Dieterle, R., Bachmann, H., *Versuche über den Einfluss der Rissbildung auf die dynamischen Eigenschaften von Leichtbeton- und Betonbalken. Bericht Nr. 7501-1, Inst. f. Baustatik u. Konstruktion ETH Zürich, Birkhäuser Verlag* 1979
3. Lenk, H., *Über das Schwingungsverhalten von Spannbeton- und Stahlbetonbalken. Dissertation*, TH Stuttgart, 1964
4. Teichen, K.-T., *Über die innere Dämpfung von Beton. Dissertation*, Universität Stuttgart, 1968
5. Heiland, D., *Untersuchungen zum Dämpfungsverhalten von stahlfaserverstärkte -m Stahlbeton bei globaler und elementweise differenzierter Betrachtungsweise, Dissertation*, Ruhr-Universität Bochum, 1991
6. Srinivasulu, P., Lakshmanan, N., Muthumani, K., Sivarama Sarma, B., "Dynamic Behavior of Fiber Reinforced Concrete Beams." *Proc. of the International Symposium on Fiber Reinforced Concrete*, Madras, Indien, Dez.1987, 2.85-2.94