

# PC용 FEM을 이용한 점탄성 재질의 강성계산

金光駿

한국과학기술원 생산공학과 교수



●1953년 9월 1일 생  
●진동공학 분야 중에서  
실험적 모드해석을 전공  
하고 이를 이용한 진동  
감쇠·방진에 관심을 가  
지고 있으며, 절삭공작  
기계의 안정성 해석과  
점탄성재료의 응용등에  
도 많은 관심을 가지고  
있다.

## 1. 머리말

방진(vibration isolation)의 목적으로 기계 구조물의 연결부에 점탄성 재질의 요소들이 사용되어 온지는 매우 오래 되었다. 그러나 이러한 재료가 갖는 여러가지 복잡한 물성과 방진 요소에 가해지는 큰 변형으로 인한 비선형성 등으로 인하여 유한요소법이나 기타 다른 해석적인 방법으로 설계단계에서 방진특성과 관련된 강성을 예측하는 것이 어려웠기 때문에 이미 제조되어 있는 여러가지의 방진요소중 최선의 것을 택하거나 시행착오(trial and error)적인 방법으로 설계·제작을 개선하여 왔다.

본 글은 필자가 지난 1년의 연구연가기간 동안 진동 및 소음분야의 연구용역회사인 Anatrol (Cincinnati, Ohio)에서 이 문제를 해결해 보려고 노력하던 중 얻게 된 몇가지 결과 및 문제점들을 간단히 기술하고자 한다.

## 2. 방진고무요소가 있는 구조물의 모델화

필자가 연구대상으로 삼았던 자동차의 엔진 블록과 밸브 덮개(rocker cover) 사이에 설치되어 있는 점탄성 재질요소들(seal and grommet)을 간략화하여 표현한 그림이 그림 1에 보여지고, 이를 방진효과와 관련지어 모델화한 그림이 그림 2에 보여진다. 여기서의 해석 목표는 엔진블록과 밸브덮개 사이에 수직방향으

로 주어진 전체 예비변형량  $\delta$ 에 대하여 그로밋(grommet)과 시일(seal) 각각에 가해지는 예비 변형율을 산출하고 이 상태에서 계의 동적강성(dynamic stiffness)을 예측하는 것이었다.

그림 1에 보인 바와 같이 그로밋은 집중질량인 밸브덮개의 위·아래 양쪽에서 받치고 있게 되므로, 그림 2의 고무요소  $R_1$ 은 그로밋의 위부분,  $R_2$ 는 그로밋의 아래부분과 시일로 이루어지게 된다.

일반적인 방진고무요소들은 점탄성재질로서 점성과 탄성을 동시에 가지게 되지만, 방진효과와 관련해서는 고유진동수가 감쇠율보다 훨씬

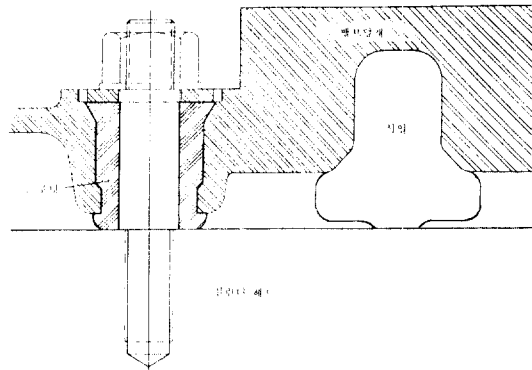


그림 1 실린더 헤드 위에 장착되는 시일-그로밋 계의 개략도

$R_1, R_2$  : 점탄성 재질 요소

$M$  : 집중질량

$\delta$  : 상부 받침대와 하부 받침대 사이의 변형

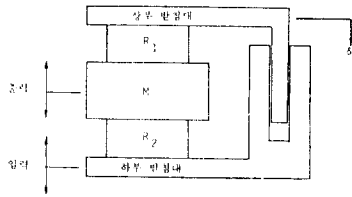


그림 2 외압을 받는 점탄성 재질요소를 이용한 방진장치에 대한 모형

센 큰 의미를 갖기 때문에, 탄성만을 고려하였다. 예압을 받는 고무요소들의 동적 강성예측을 위한 절차를 간략히 나타낸 그림이 그림 3에 보인다.

### 3. 유한요소법을 이용한 고무요소의 강성계산

그림 1에서 그로밋과 시일부분을 유한요소로 구성한 모델이 그림 4에 보인다. 그로밋은 축

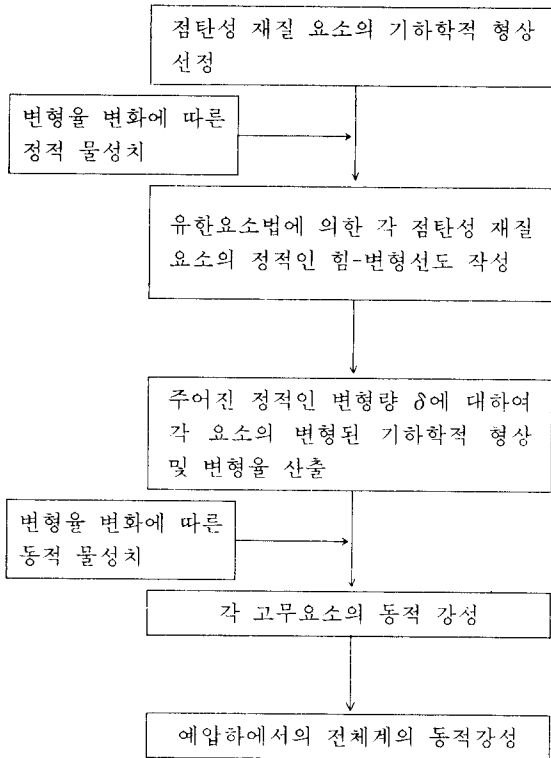


그림 3 전반적인 절차의 흐름도

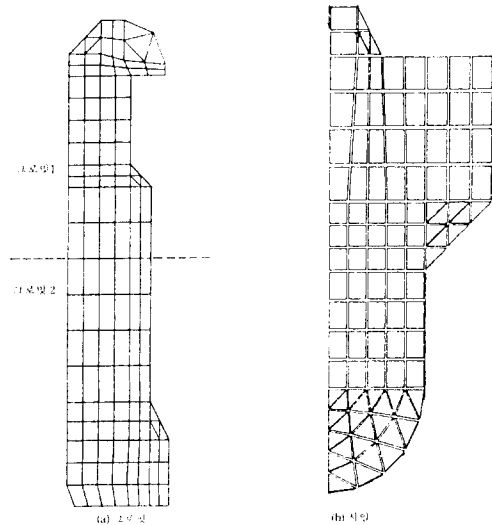


그림 4 시일과 그로밋에 대한 유한요소 모형

대칭성을 가지고 있으며, 시일은 단위길이당의 강성을 구하면 되므로 2차원 문제로 취급할 수 있게 된다.

그로밋은 그로밋 1과 그로밋 2로 나누어 이들 각각과 시일에 대한 하중-변형선도를 유한요소법을 이용하여 계산하는 과정에서의 중요한 문제점은 다음과 같았다.

- (1) 매우 큰 예압으로 인한 기하학적인 비선형성
- (2) 예비 변형에 따라 변하는 고무재료의 물성치로 인한 비선형성
- (3) 예압의 변화에 따른 경계조건의 변화
- (4) 변형의 정·동적 특성 산출을 위한 재료의 물성규명
- (5) 변형의 정·동적 특성에 따른 경계조건의 고려

문제점(1) : 유한요소법 전산프로그램의 많은 경우가 그렇겠지만, 필자가 사용하였던 프로그램(CASA-GIFTS)도 매우 큰 변형을 취급할 수 있는 비선형문제 해결기능을 가지고 있지 못하였다. 따라서 필자는 많은 양의 정적 예하중(예를 들어 20%)을 한꺼번에 가하지 않고

여러단계(1%씩 20번)로 나누어 가하면서 각 단계에서 발생한 변형량이 다음 단계의 모델에 반영되도록 하는 보조 프로그램을 작성하여 이용하였다. 물론 예하중의 변화에 따른 물성치의 변화도 각 단계에서 고려될 수 있도록 하였다.

문제점(2): 일정한 온도에서의 힘-변형 관계를 결정하는 물성은 종탄성계수, 횡탄성계수(혹은 프와송비)라 할 수 있다. 금속의 경우에는 이들 값이 예압에 따라 크게 변하지 않는 것으로 간주되나, 본 내용에서와 같은 점탄성 재료의 경우에는 예비 변형율에 의존하는 정도가 매우 크다. 따라서 이러한 특성은 다단계 유한요소법 계산을 위하여 사전 자료로 준비되어 있어야 한다. 예하중하에서의 종탄성계수 측정은 어느정도 가능하지만 횡탄성계수의 측정은 매우 어렵다. 필자는 이러한 물성치가 유한요소법의 입력으로 사용되는 것에 중점을 두고 프와송비는 예압에 관계없이 일정하다는 가정하에 유한요소계산과 실험결과를 조화시키는 방향으로 프와송비를 산출하였다(다음 기회에 소개할 예정임).

문제점(3): 예압의 변화에 따른 경계조건의 변화는 가장 어려운 부분이었으며, 본 글에서도 해결방법보다는 문제 제기 자체를 강조하고자 한다. 왜냐하면 그로밋의 경우가 시일의 경우와 같지 아니하며, 각 경우에 사용되는 경계조건의 타당성은 반드시 세부적인 실험과의 비교를 통해서만 입증의 가능성이 있는데, 이것이 여간 어려운 문제가 아니고 아직까지 비교자료를 가지고 있지 못한 상태이기 때문이다. 이에 대하여 보다 자세한 논의는 필자에게 직접 해주기를 바란다.

문제점(4): 기계구조물을 구성하는 대부분 재료의 경우 그 물성치는 정적인 변형이거나 혹은 동적인 변형이거나 상관없이 일정하다. 그러나 점탄성 재료의 경우는 동적 탄성계수가 정적 탄성계수에 비해 크게 되므로 이에 대한 특별한 유의가 필요하다. 여기서 동적이라 함은 일반적으로 주파수에의 의존성을 의미하나,

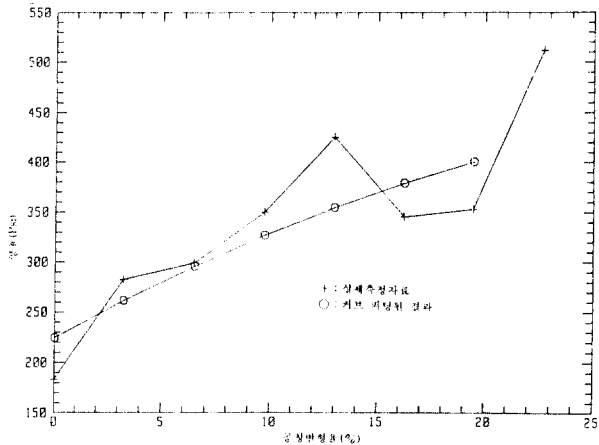


그림 5 정적인 예비 변형율과 정적 영률 관계의 한 예

관심의 대상이 되는 진동수의 범위가 비교적 작다는 가정하에서 일정한 정수로 간주하였다. 그림 5와 그림 6에는 각각 한 재료의 정적, 동적 탄성계수가 보여진다. 따라서 주어지는 정압에 의한 평형상태를 산출하기 위해서는 정적 탄성계수를 사용하였고, 일정한 정적 예하중하에서의 동적 스프링상수 산출을 위해서는 동적 탄성계수를 사용하였다.

문제점(5): 이 문제도 또한 문제점(3)과 마찬가지로 일반적인 해법을 논한다는 것이 무리라고 생각된다. 따라서 필자가 전문엔지니어

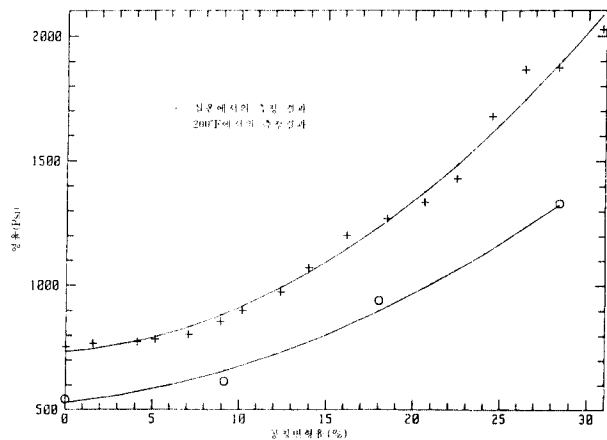


그림 6 정적인 예비 변형율과 동적 영률의 한 예

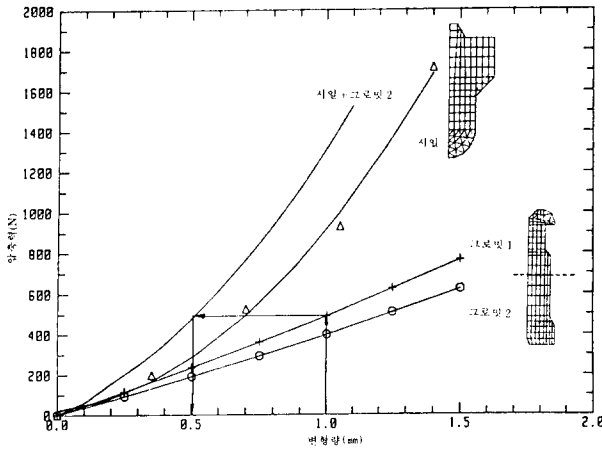


그림 7 예압을 받는 시일-그로밋계의 정적평형 선도

몇 명과 의논한 후에 취했던 내용만을 간단히 언급하고자 한다. 정적인 변형의 경우에는 하중이 가해진 후 응력-이완(stress-relaxation)이 충분히 일어날 수 있는 시각적인 여유가 있음을 감안하여 볼트와 그로밋의 경계면, 밸브 덮개와 그로밋의 경계면 등에서 미끄럼 현상이 일어나는 것을 허용하였고, 동적인 변형의 경우에는 이것을 허용하지 않았다.

그림 7에는 정적인 하중-변형특성이 비선형적으로 나타날 경우, 설계변수로 주어지는 전체변형량에 대하여 각 요소의 변형량을 산출해 낼 수 있는 간단한 방법이 보여지고 있다.

#### 4. 맺음말

점탄성 재료는 다른 금속성재료에 비해 그

물성이 예하중, 주파수, 온도등에 크게 의존한다. 그러나 이러한 복잡한 의존성을 설계단계에서 모두 동시에 고려하는 것이 현재로서는 거의 불가능하다. 즉 예를 들어 주요 사용온도, 진동수 범위 등이 좁혀질 수 있다면, 그 범위내에서는 일정한 정수로 가정하는 것이 현실적이라고 보여진다.

또한 전절에서 지적한 바와 같이 여러가지 문제점이 있을 수 있는데 문제점(1)은 사용하고자 하는 유한요소프로그램의 기능에 따라 좌우되고, 문제점(2)와 (4)는 점탄성 재료의 물성측정과 관련되어 사용가능한 실험장비에 따라 정밀도의 차이는 있겠지만 대부분 해결될 수 있다고 생각된다. 그러나 문제점 (3)과 (5)에서의 경계조건문제는 유한요소법의 일반적인 약점중의 하나로서, 해석자의 전문적 경험에 바탕을 둔 직관력에 의해서만 어느정도 가능하게 된다.

이 밖에도 해석 대상의 유일한(unique) 모형화(본 글에서는 그로밋 분할선의 설정)가 어렵다던가, 프와송비가 예압에 관계없이 과연 일정한가, 동적 강성계수 산출을 위하여 예압하에서의 동적변형량을 어느 범위로 정할 것인가 등 여러가지 난제가 산적해 있음을 지적하고자 한다. 그러나, 본 글에서 구체적인 결과의 예를 보여주지는 못하였지만, 시제품제작 이전의 단계에서 주어진 한 설계안에 대하여 상대적인 성능개선을 위한 설계변형방향의 제시는 가능하기 때문에, 앞에서 열거한 여러가지 어려운 점에도 불구하고, 컴퓨터/유한요소법 소프트웨어를 이용한 점탄성 재질요소의 해석은 계속적으로 확대될 것으로 기대된다.

