

유한요소법을 이용한 현가장치용 겹판스프링의 시뮬레이션

안오순*(전남대 대학원 기계공학과), 이경백(여수공대 자동차과), 김영배(전남대 기계공학과)

Simulation of Leaf Spring for Suspension using FEM

O.S. Ahn(Mech. Eng. Dept., CNU), K.B. Lee(Auto. Eng. Dept., YSTC), Y.B. Kim(Mech Eng. Dept, CNU)

ABSTRACT

The leaf spring is generally used effectively in load supporting because it has tension-diffused function in comparison with other springs. Nowadays the leaf spring is used widely in the suspensions of automobile and trains. The stiffness and the damping characteristics of the leaf spring being essential for the performance of vehicles, the exact evaluation is required. Various approximate formula are normally used for the leaf spring design. However, accuracy and trust are decreased because the contact and frictional characteristics between leaf plates are generally neglected. In this paper, nonlinear stiffness matrix of the leaf spring is solved by contact-element applying FEM for considering the contact and frictional characteristics between leaf plates. The results of proposed FE model are compared with test data.

Key Words : Leaf Spring(겹판스프링), Hysteretic Characteristic(이력특성), Contact Pair(접촉면), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서론

차량이 등장한 이후로 승차감을 향상시키기 위하여 여러 방면의 노력이 이루어져 왔다. 소형차량에서는 맥퍼슨(McPherson)식이나 위시본(Wishbone)식 또 그 밖의 여러 가지 링크형 현가장치 등이 사용되었다. 그러나 이러한 장치들의 기계적인 한계가 있어 이를 극복하기 위하여 최근에는 여러 가지 전자제어장치들이 개발되고 적용되어지고 있다. 이에 부합하여 차량의 해석기술도 최근 상당한 수준에 이르렀으며, 특히 소형차량의 각 현가장치에 대한 동특성 해석 기술은 많이 발달하였으나, 그에 비해 대부분의 중대형 차량에 장착되어 있는 겹판스프링(leaf spring)의 동역학 모델링 및 해석은 여러 방향으로 연구가 진행 중에 있으나 그에 미치지 못하고 있다.

겹판스프링의 일반적인 이론적 해석 방법은 판과 판사이의 마찰과 접촉 특성을 무시하고 유도하는 근사 계산식이 있다. 이의 단점을 보완하기 위해 최근에 와서 Hamano는 유한요소법을 이용하여 겹판스프링의 각 날장판을 쉘요소, 판과 판사이의

접촉상태를 집합요소를 사용하여 해석하였다⁽¹⁾. Song은 상용 동역학해석 프로그램인 ADAMS를 이용하여 마찰력이 스프링의 동특성에 미치는 영향을 연구하였다⁽²⁾.

다른 현가장치에 비해 상대적으로 단순하게 스프링질량(Sprung mass)을 지지하고, 차체 구조의 일부를 겸하여 차체를 단순화시키고, 판 사이의 마찰이 감쇠력으로 작용해서 진동시에 유효한 감쇠작용을 하며, 스프링이 끊어지더라도 재생이 용이한 장점 등을 가져 대부분의 중대형 차량에 장착되고 있다. 하지만 판간 마찰에 의해 이력특성(Hysteretic Characteristic)을 띠는 성질을 갖고 있다. 이러한 이력특성 때문에 각 운동구간에서 정적 대각선 스프링 상수가 변하여 도로 입력에 따른 스프링질량의 동특성에 영향을 미치게 된다.

차량의 동특성 해석시 이러한 겹판스프링의 이력특성을 고려하기 위하여 겹판스프링을 샤클이 포함된 4개의 링크로 치환하여 기구학적 움직임을 구현하고 링크 사이의 각 조인트에 회전 스프링을 조정하여 이력특성을 나타내는 링크치환법이 널리 사용된다. 이 방법은 이력특성을 구현하는데 상대적으로

로 많은 변수를 조정해야 하고, 겹판스프링의 진행 방향 및 횡방향 강성을 설정하는데 어려움이 있다.

본 논문에서는 판과 판사이의 접촉효과와 마찰의 영향을 고려하기 위하여 접촉요소를 적용한 유한요소 모델을 이용하여 겹판스프링의 비선형 강성행렬을 구하였다. 또한 이 모델을 실제 시험결과와 비교하여 유한요소 모델의 정확도와 신뢰성을 검토하였다.

2. 기초이론

2.1 겹판스프링 기구학

스프링의 전방 연결부는 차체와 부싱으로 연결되어 회전운동이 가능하며, 후방 연결부는 샤를과 부싱으로 연결되어 있고 이 연결점을 중심으로 겹판스프링의 변형에 의해 샤를이 회전운동을 할 수 있도록 되어 있다. 차축과 스프링이 연결된 점이 운동하는 동안 이 같은 연결관계에 따라서 Fig. 1과 같이 기구학적으로 아크(Arc)운동을 한다.

겹판스프링의 기구학적 운동을 구현하기 위하여 시험자료를 기초로 점 A, E를 정한다. 두 점은 차축이 주행조건 하에서 외부 도로입력에 의해 발생할 수 있는 최대 상하방향의 위치이고, 차축은 정상시 이 점을 지나는 아크 선상을 움직이면서 도로입력을 차체에 전달시킨다. 차축을 점A와 E 사이에서 움직이도록 하기 위해 겹판스프링의 이력특성에 의해서 결정된 차축의 수직변형을 통해 점C를 결정하고 수평거리를 보상하여 최종적으로 점D를 결정한다. 이 때 차축은 반드시 아크선상에 위치해야하므로 차축을 C점에서 D점으로 이동시킴으로 수평거리를 보상하여 최종적인 위치를 결정할 수가 있다.

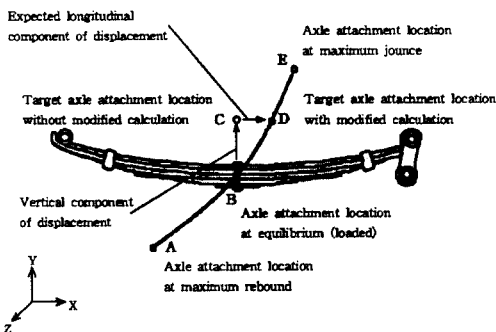


Fig. 1 Locus of axle center

2.2 이력곡선

겹판스프링의 하중-처짐 곡선은 판간 접촉마찰력으로 인해 Fig. 2와 같은 이력곡선을 보인다. 이 곡선은 과도변형구간(Transition Area)인 비선형

구간 AB, CD에 의해 특성이 결정되어진다. 이러한 과도변형 구간은 하중이 증가하거나 감소함에 따라 하중의 작용방향이 바뀔 때 겹판스프링의 끝 접촉부와 인접하는 판간의 미끄러짐 때문에 발생한다고 알려져 있다. 그리고 대각 스프링비라고 하는 직선 AC의 기울기는 동적 스프링비라고 할 수 있고, 점E와 점F 간의 하중 차는 임의의 하중에서의 판간 마찰력(2F)라고 한다.

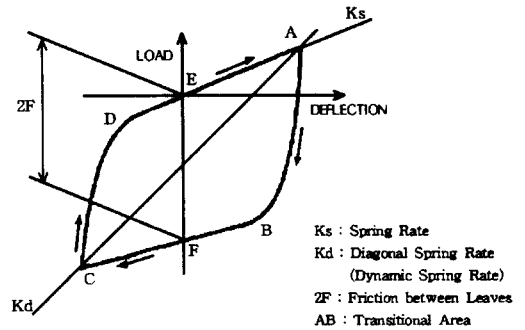


Fig. 2 Hysteresis loop of leaf spring

겹판스프링은 금속판 형상에 의한 비선형성과 판간 마찰력에 의한 완전한 비선형성을 가지고 있는 힘-변형 장치이다. 그 특성의 중요한 한 부분은 쿨롱마찰(Coulomb Friction)에 의해 에너지를 소비하는 장치일 뿐만 아니라 에너지를 저장하는 기능을 가지고 있다. Fig. 3은 겹판스프링의 전형적인 수학적 모델을 보여준다. 그림에서와 같이 가장 단순하고 유용한 겹판스프링 모델은 스프링비 요소와 마찰감쇠 요소로 나타낼 수 있다.

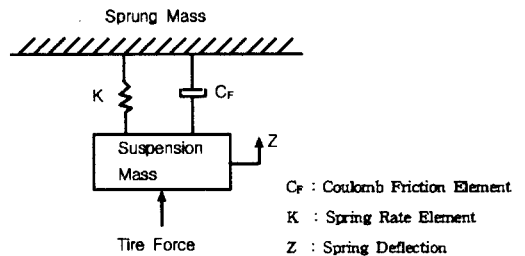


Fig. 3 Simple representation of leaf spring suspension

2.3 유한요소법

유한요소법(Finite Element Method)은 컴퓨터상에서 가상으로 기계요소를 생성하여 힘, 열, 진동 등의 입력에 대해서 체계적으로 기계요소/시스템의 반응을 예측할 수 있게 해준다. 유한요소법의 수학적 배경은 가장 간단한 보 구조물의 경우를 보면

가해진 힘에 비례하여 변위가 늘어난다는 Hook의 법칙으로부터 시작한다. 공학해석 대상이 되는 물체를 정형화된 '유한(Finite)'한 크기의 수많은 요소로 나누고, 각 요소에 Hook의 법칙 같은 수식을 적용하고 각 요소간의 관계식을 고려하여 물체 전체에 대한 식을 구성한 다음 선형 방정식을 풀어 물체의 변위, 응력, 진동 등을 해석하는 것이다. 유한요소법은 유한하게 자른 요소내에서 해석하고자 하는 변수를 보간 함수(Shape Function)의 개념을 도입하여 근사하여 최종 대수 방정식을 끄집어 내지만 요소의 크기를 계속 작게 나누어 가면 미분 방정식을 해석적으로 풀었을 때의 해에 수렴한다는 보장이 있다.

유한요소해석은 세 단계를 거치는데, 그 첫 번째로 유한요소 모델링은 해석 대상이 되는 물체를 유한한 크기의 요소로 나누어야 하며 물체의 물성값, 하중상태, 경계조건 등을 결정해야 하는 가장 중요한 단계이다. 첫 번째 과정이 끝나면 유한요소해석을 하는데 이것은 유한요소 해석 프로그램의 핵심적인 부분이며, 전처리 프로그램으로부터 모델링된 것을 넘겨받아 실질적으로 풀 수 있는 대수방정식을 구성하고 해를 구하는 과정이다. 마지막으로 해석결과 후처리(Post-processing)과정이 있다. 보통 유한요소의 수는 대단히 많기 때문에 해석결과를 한눈으로 알아 볼 수 있는 프로그램이 필요한데 이것이 해석 후처리 프로그램(Post-processor)이다.

3. 유한요소 모델링

3.1 형상 설계

본 논문에서 검토한 모델은 직형 승합차의 후방 현가장치에 사용된 곱판스프링으로 프로그래시브형(Progressive Rate Type)이다.

곱판스프링은 다음과 같은 치수를 갖는다.

- Span : 1054 mm
- 판 폭 : 70 mm
- 판 두께 : 메인판 = 7 mm, 보조판 = 9~12 mm
- 판 수 : 메인판 = 4 매, 보조판 = 1 매
- Camber : 159.5 mm
- 최대하중 : 1000 kgf

3.2 유한요소 모델링

유한요소(Finite Element) 모델은 장착되지 않은 상태(Unclamped)의 곱판스프링의 형상데이터로부터 기하학적인 자료를 만들고, Fig. 4와 같이 유한요소 모델을 I-DEAS를 사용하여 만들었다. 모델은 먼저 4개의 노드(Node)를 공유하는 230개의 2차원 솔리드 요소(CPS4I)로 구성하였고, 이를 다시

노드 8개를 공유하는 690개의 3차원 요소(C3D8I)로 구성하였다. U볼트로 고정되어 있는 판의 중앙부는 각 판을 하나의 강체로 모델링 하였다.

곱판사이의 접촉은 다음의 세 경우로 나누어 정의하였다. 첫째는 미끄럼 접촉(Sliding Contact)이 일어나는 부분으로 판 끝단에 부착된 spacer와 판이 접촉하는 경우이고, 두 번째는 메인판(Main Leaf)과 보조판(Auxiliary Leaf)사이에서 고착접촉(Sticking Contact)이 일어나는 경우이다. 그리고 세 번째는 앞의 두 경우에서 제외된 부분으로 접촉이 일어나지 않는 경우이다. 접촉이 일어나는 부분을 각각 master와 slave로 나누어 정의한 후 CONTACT PAIR를 사용하여 표현하였다. 미끄럼에 대해서는 FINITE SLIDING 옵션을 사용하였다.

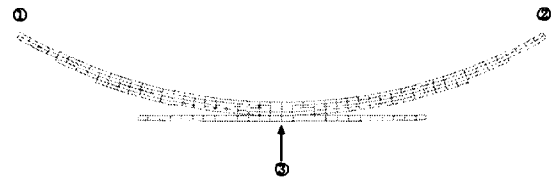


Fig. 4 FE Model of leaf spring

경계조건은 차량 프레임에 연결되는 아이부(Eye) ①은 1,2,3,4,5 방향을 구속하였고, 샤클에 연결되는 ②는 2,3,4,5 방향을 구속하였다. 도로에서 전달되는 하중이 차축(Axle)과 곱판스프링이 연결되는 U볼트가 체결된 부분으로 전달되므로 하중조건은 곱판 중앙 밑 부분 ③에 집중하중을 가하였다.

4. 유한요소 모델의 검증

4.1 성능시험

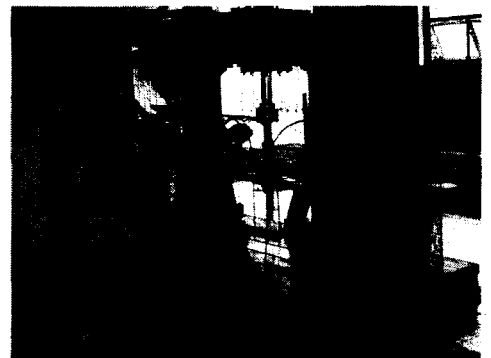


Fig. 5 Leaf Spring Test M/C Controller

곱판스프링의 유한요소 모델을 검증하기 위하여 Fig. 5와 같은 장비를 이용하여 스프링의 실제 정

적 스프링비를 구하였다. 실험은 유한요소 모델에서의 경계조건과 약간 다르게 겹판스프링의 아이부양쪽 끝단은 상하방향의 하중만이 부하되도록 마찰이 적게 지지하고 중앙부는 실제의 부차상태와 기능상 유사한 형태로 지지한 후 유압 액츄에이터로 수직하중이 0~1000 kgf까지 가해지는 상태에서 수직방향에 대한 변위를 측정하였다.

이 실험에 의해 측정된 정적 스프링상수는 두 개로 $K_1 = 4 \text{ kgf/mm}$, $K_2 = 4.76 \text{ kgf/mm}$ 이다. K_1 은 보조판이 메인판에 접촉하기 전까지의 강성이고 K_2 는 완전히 접촉된 후의 강성이다.

4.2 유한요소 해석

유한요소 모델에 대하여 범용 유한요소 해석프로그램(ABAQUS)을 사용하여 0~1000 kgf 까지 일정 하중씩 단계적으로 하중을 증가시키면서 정적 해석(Static Analysis)을 수행하였다.

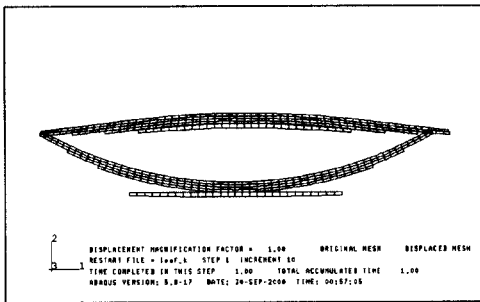


Fig. 6 Displacement distribution of leaf spring

겹판스프링 중앙부에 작용한 하중이 1000 kgf일 때의 변위 변화를 Fig. 6과 같이 해석 후처리 프로그램(Post-processor)을 통해서 보여주고 있다.

Fig. 7은 성능시험과 유한요소 해석의 결과를 비교하여 보여주고 있다. 유한요소 해석에 의한 결과 $K_1 = 4.2 \text{ kgf/mm}$, $K_2 = 4.7 \text{ kgf/mm}$ 로 성능시험 결과와의 오차가 각각 5%, 1.3%로 거의 일치함을 볼 수 있었다.

그러나 정적 스프링상수값이 실험의 경우 메인판에 보조판이 접촉하기 시작하는 시점(Initial Contact)에서부터는 강성값이 완만히 증가하다 완전히 접촉이 일어나는 시점(Compact Contact)에서부터는 일정한 강성값을 나타냈다. 하지만 시뮬레이션의 경우 그와는 약간 다르게 접촉이 시작되는 시점과 완전히 접촉된 시점을 정확히 구현하지 못하고 실제보다 좁은 영역에서 그 과정이 끝났다.

이런 현상이 발생하는 요인으로 실제 겹판스프링의 곡률반경이 일정하지 않으나 설계시 이의 정확한 설계자료를 확보하지 못하여 일정한 곡률을 적용하였다.

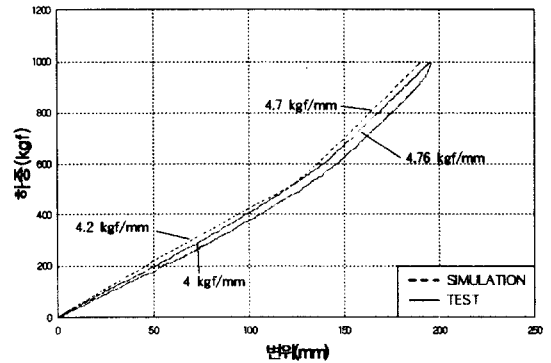


Fig. 7 Static Load-Deflection curve

5. 결론

본 논문에서는 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 프로그래시브형 겹판스프링의 유한요소 모델링 방법을 제시하였다. 먼저 판사이의 접촉뿐만 아니라 마찰력의 영향까지 고려한 2차원 및 3차원 유한요소 모델을 이용하여 프로그래시브형 겹판스프링의 비선형 하중-변위 곡선을 재현하고 이를 시험결과와 비교하여 모델의 타당성을 입증하였다. 이 모델을 초기 설계단계에서 설계자가 원하는 스프링비를 예측하는데 응용할 수 있을 것이다.

지금까지 유한요소 모델의 강성행렬을 추출하는 과정을 거쳐 차량 동역학 프로그램에 적용하여 스프링의 동적 거동을 해석하고 차량 동역학 모델을 구성할 예정이다.

참고문헌

1. T. Hamano and M. Itoh, "Analysis of Leaf Spring using Finite Element Method with a Joint Element," Spring Conference, Vol. 37, pp. 39~46, 1992.
2. J. Song and Y. Maruyama, "Dynamic Characteristics of Leaf Spring by ADAMS Software," Spring Conference, Vol. 38, pp. 31~36, 1993.
3. 최선준, 최연창, 최재찬, 권혁홍, "현대차용 겹판스프링의 설계프로그램 개발," 한국자동차 공학회, 1995.
4. 박태원, 임홍재, 이기호, 박찬중, 정일호, "소형 버스의 동역학 해석을 위한 판스프링 모델링 기법 개발," 한국정밀공학회지, 제99권, 제99호, pp. 149-150, 1999.
5. "Design and Application of Leaf Springs," SAE, 1990.
6. "ABAQUS/Standard User's Manual(Ver 5.6)," H.K.S. Inc., 1996.