

차량 동특성에 대한 프레임의 유연성 효과

이상범*

Flexibility Effects of Frame for Vehicle Dynamic Characteristics

Sang-Beom Lee*

Abstract

Previous method of computer simulation to predict the dynamic response of a vehicle has been based on the assumption that vehicle structure is rigid. If the flexibility of the vehicle structure becomes too large to ignore, rigid body assumption will no longer give good estimation of the dynamic characteristics. Therefore, in order to predict more precise vehicle dynamic characteristics, flexible multi-body dynamic analysis of a vehicle is necessary. This paper investigates dynamic characteristics of vehicle systems with flexible frames numerically. Joint reaction forces, vertical accelerations, pitch accelerations are analyzed for the vehicle systems with various flexible frames using multi-body dynamic analysis code and finite element analysis code.

Key Words : Dynamic Load History(동하중 이력), Finite Element Analysis(유한요소해석), Flexibility(유연성), Flexible Body(유연체), Multi-body Dynamics(다물체 동역학), Static Correction Mode(정적변형모드), Vibration Mode(진동모드)

1. 서론

요즈음처럼 빠른 주기로 새로운 자동차 모델이 출현되는 국제시장에서의 경쟁력을 확보하기 위해서는 빠른 시간 내에 차체 및 부품에 대한 정확한 동하중해석이 이루어져야 한다. 최근 들어 동하중이력 데이터를 실험을 통하지 않고 해석적으로 구하는 방법에 대하여 많은 연구가 이루어져 왔다⁽¹⁻³⁾. 즉, DADS, ADAMS 등의 다물체 동역학해석 프로

그램들이 개발되어 자동차 성능평가시 동하중 이력을 수치 해석적으로 계산하고 있으나 대부분의 경우 현재까지는 모든 물체를 강체라고 가정한 강제 동역학 해석법을 사용해 왔다⁽⁴⁾. 그러나 만약 차체의 유연성이 상당히 존재한다면 차체의 유연성 즉, 탄성변형체로서의 특성을 고려하지 않고 동하중 이력을 구하는 것은 많은 오류를 내포 할 위험이 있다.

따라서, 본 연구에서는 차체를 탄성 변형체로 모델링하여

* 국민대학교 자동차공학 전문대학원
(이상범 sblee@kookmin.ac.kr)

동하중 이력계산의 정확도를 개선시키려고 한다. 이때 차체의 유연성을 고려하기 위해서 동역학 해석시 차체의 변형을 몇 개의 진동모드와 정적변형모드^(1,5)의 조합으로 나타낼 수 있으며, 이들 모드들은 유한요소해석을 통해서 구한다. 유연 다물체 동역학 해석은 DADS, ADAMS 등의 프로그램을 사용하면 가능하다.

본 연구에서는 유연 차체 프레임에 갖는 차량 시스템의 동적거동을 수치해석적으로 분석하고자 한다. 즉, 다물체 동역학해석 프로그램인 DADS⁽⁶⁾ 및 유한요소해석 프로그램인 ANSYS⁽⁷⁾를 이용하여 세 가지 서로 다른 강성의 유연 차체 프레임에 갖는 차량 시스템에 대한 조인트 반력, 수직 가속도, 피치 가속도 등을 분석하고 이를 강체 동역학모델에 대한 해석 결과와 비교하고자 한다.

2. 차량의 다물체 동역학

차량 시스템은 다물체 동역학의 관점에서 볼 때 각종 기구학적 조인트에 의해 구속된 상대운동을 하는 서로 연결된 강체 또는 변형체들의 집합이라고 정의될 수 있다. 따라서 자동차의 동특성은 차체 및 새시부품들 사이의 연결성, 질량 및 질량관성모멘트, 스프링 및 댐퍼 등의 물성치 등에 의하여 특징지어질 수 있다. 최근 들어 다물체 동역학 또는 전산 동역학 분야에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔고, 그 연구의 결실로 범용 다물체 동역학 해석 프로그램들이 개발되고 있다. 자동차 업계에서도 이런 범용 다물체 동역학해석 프로그램 또는 자동차 해석 전용 프로그램 등을 사용하여 자동차 시스템의 동역학해석 및 설계분야에 많이 적용하고 있다.

상용 다물체 동역학해석 프로그램은 사용자가 대상 차량에 대한 기계적·물리적 특성자료를 입력하면 입력된 기계계의 기구학적 연결성 및 물리적 특성치로부터 동적해석에 필요한 운동방정식과 구속함수를 생성한 뒤 이들을 연결하여 다음과 같은 형태의 대수미분방정식으로 나타낸다.

$$M\ddot{\mathbf{q}} + C\dot{\mathbf{q}} + K\mathbf{q} - \sum_{j=1}^m \mathbf{Q}_j - \sum_{i=1}^m \frac{\partial \Phi_i}{\partial \mathbf{q}} \lambda_i = 0 \quad (1)$$

여기서, \mathbf{q} 는 일반좌표(generalized coordinate)로서 x, y, z, ψ, θ 및 ϕ 를 각각 나타내며, Φ_i 는 i 번째 구속함수를 나타내고 있다. 그리고 λ_i 는 구속함수와 관련된 라그랑지 승수(Lagrange multiplier)를 나타내며, \mathbf{Q}_j 는 j 번째

일반힘(generalized force)을 나타내고 있다.

또한, 다음의 식 (2)와 같이 변수 \mathbf{u} 를 정의하고,

$$\mathbf{u} - \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (\text{or } \dot{\mathbf{u}} = \ddot{\mathbf{q}}) \quad (2)$$

이를 이용하여 식 (1)을 변형하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M\dot{\mathbf{u}} + C\dot{\mathbf{q}} + K\mathbf{q} - \sum_{j=1}^m \mathbf{Q}_j - \sum_{i=1}^m \frac{\partial \Phi_i}{\partial \mathbf{q}} \lambda_i = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \psi, \theta, \phi) = 0 \quad (4)$$

위의 식 (3)과 (4)는 12 개의 1차 미분방정식을 구성하며, 3 개의 식 (2)-(4)는 입력된 기계계를 완전히 정의한다. 이렇게 구성된 식에 다음과 같은 Newton 반복법(Newton iteration method)을 적용하여 계산을 수행한다.

$$[\mathbf{J}(\mathbf{a}_p, \dot{\mathbf{a}}_p)] \Delta(\mathbf{a}_p, \dot{\mathbf{a}}_p) = \{-\mathbf{e}_p(\mathbf{a}_p, \dot{\mathbf{a}}_p)\} \quad (5)$$

여기서, \mathbf{J} 는 시스템에 대한 자코비언(Jacobian)이고, $\Delta \mathbf{a}_p$ 는 p 번째 시스템 변수에 대한 벡터 변화이며, \mathbf{e}_p 는 오차이다.

매번 반복 단계마다 적분 알고리즘을 이용하여 다음과 같은 일반좌표계의 새로운 값을 예측한다.

$$\{\mathbf{a}_{p+1}\} = \{\mathbf{a}_p + \Delta \mathbf{a}_p\} \quad (6)$$

$$\{\dot{\mathbf{a}}_{p+1}\} = \{\dot{\mathbf{a}}_p + \Delta \dot{\mathbf{a}}_p\} \quad (7)$$

$$\{\Delta(\mathbf{a}_{p+1}, \dot{\mathbf{a}}_p)\} = [\mathbf{J}^{-1}]\{-\mathbf{e}_p\} \quad (8)$$

Fig. 1은 위에서 설명한 적분 알고리즘의 흐름도를 나타내고 있다.

차체의 피로파괴 수명을 예측하기 위해서는 정확한 응력 이력 데이터가 있어야 하는데 이것은 흔히 시작차에 대한 주행시험 등을 통해 구하는 것이 보통이다. 최근 들어 이러한 응력이력 데이터를 실험을 수행하지 않고 수치해석적으로 구하는 방법에 대하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 즉, 앞에서 설명한 다물체 동역학해석 프로그램을 이용하여 자동차 성능 평가시 동하중 이력 등을 계산하는데 많이 이용하고 있으나 대부분의 경우 모든 물체를 강체라고 가정한 강체 동역학 해석법을 사용해 왔다. 그러나 만약 차체의 유

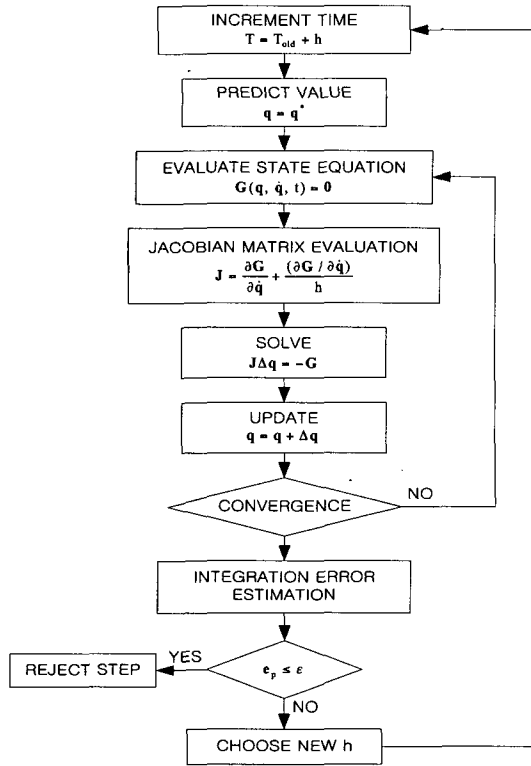


Fig. 1 Integration process of multi-body dynamic analysis

연성이 상당히 존재한다면 차체의 유연성 즉, 탄성 변형체로서의 특성을 고려하지 않고 동하중 이력을 구하는 것은 많은 오류를 내포할 위험이 있다. 따라서 본 연구에서는 차량의 프레임을 탄성 변형체로 모델링하여 동하중 이력 해석을 시도하고 프레임의 유연성이 동하중 이력에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이때, 프레임의 유연성을 고려하기 위하여 동역학 해석시 프레임의 변형을 몇 개의 저차 진동모드와 정적변형모드의 조합으로 나타낼 수 있으며, 이러한 모드들은 유한요소해석을 통하여 구한다. Fig. 2에 유연 다물체 동역학 해석 과정을 나타낸다.

3. 차량 프레임의 유한요소해석

본 연구에서 사용된 차량은 현가계에 프레임이 연결되어 있고 그 위에 나머지 현가질량이 부싱으로 마운트되어 있다. 프레임의 유연성이 차량의 동특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 먼저 프레임을 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 모델링을 한 후 진동해석 및 정적변형해석을

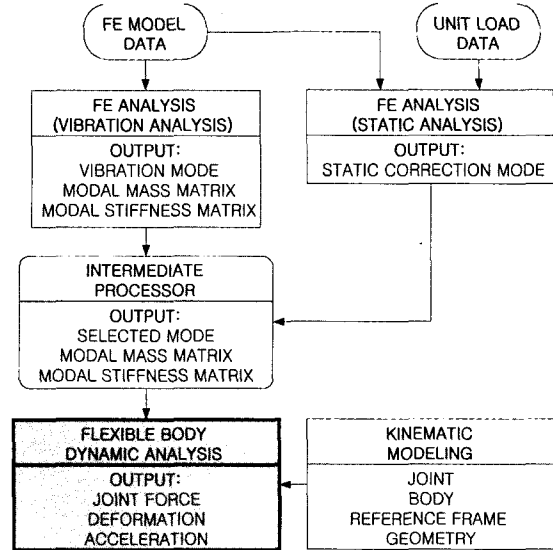


Fig. 2 Flexible multi-body dynamic analysis procedure

수행하여 고유진동수, 진동모드, 정적변형모드 등을 추출한다. 즉, 경계조건을 갖지 않는 자유진동해석 방법을 이용하여 프레임에 대한 3 개의 저차 고유진동수 및 진동모드를 추출한다. 또한, 현가장치 마운트 지점의 수직방향 병진운동만을 구속하는 경계조건을 설정하고, 집중힘이 작용되는 엔진 마운트의 부싱지점에 단위힘을 가해 정적변형모드를 추출한다.

Fig. 3은 본 연구에서 이용한 차체 프레임에 대한 엔진 마운트, 차체 마운트 및 현가장치 마운트의 위치를 나타내고 있다. 그리고 Fig. 4와 Table 1에 차체 프레임을 구성하는 빔요소의 번호와 단면적 및 단면계수를 각각 나타내고 있다.

본 연구에서는 차체 프레임의 유연성이 동하중 이력 계산에 미치는 영향을 검증하기 위해 3 종류의 차체 프레임 모델을 선정하여 연구대상으로 삼았다. 3 가지 모델의 형상, 빔요소의 단면적 및 단면계수는 모두 같고 탄성계수만을 기본모델에 대하여 0.5 배 및 10 배로 변경시키는 경우에 차량의 동특성의 변화가 어떻게 나타나는지를 비교·분석해 보기로 하였다. 이 방법은 비록 매우 간단하지만 해석결과로부터 중요한 결론들을 추론해 낼 수 있고 검증의 신뢰도가 매우 높기 때문에 가치 있는 시도이다. 즉, 차체 프레임 모델을 강체라고 가정한다면 변형을 무시할 수 있다는 것이고 이것은 탄성계수가 매우 높다고 가정하는 것과 유사하다. 또한 차체 프레임이 매우 유연한 변형체라면 상대적으로

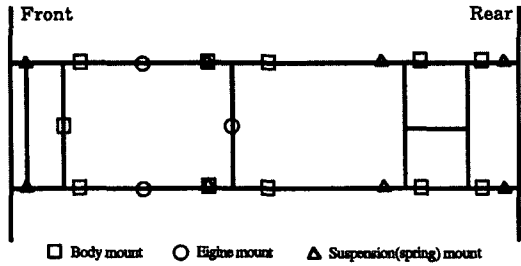


Fig. 3 Mount locations on frame

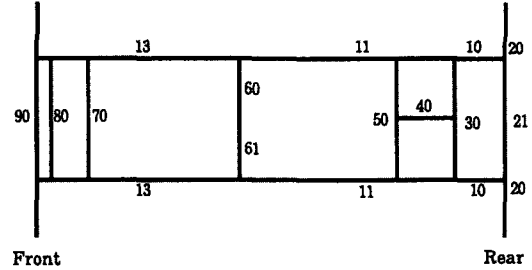


Fig. 4 Element numbers of frame

로 탄성계수가 매우 낮다고 가정해 볼 수 있는 것이다. 물론 차체 프레임의 구조 및 단면의 형상과 강판의 두께에 따라 유연성은 크게 달라질 수 있지만 여기에서는 문제를 간단히 하기 위해서 탄성계수만이 다른 모델들에 대하여 해석한다.

유연성이 높은 모델 즉, 탄성계수가 0.5 배인 모델을 model 1, 기존의 차체 프레임 모델을 model 2, 그리고 강체에 가까운 모델 즉, 탄성계수가 10 배인 모델을 model 3 이라고 정의한다.

각 모델의 탄성계수와 고유진동해석 결과를 Table 2에 나타내었다. 또한 1차 진동모드인 비틀림모드와 2차 진동

모드인 1차 굽힘모드, 그리고 3차 진동모드인 2차 굽힘모드를 Figs. 5-7에 각각 나타내었다.

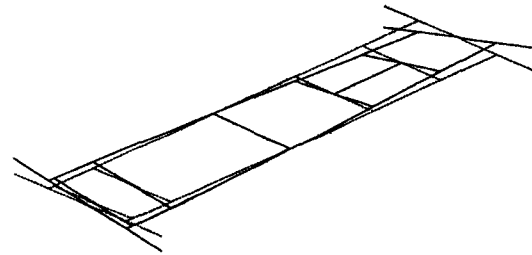


Fig. 5 1st vibration mode(torsion)

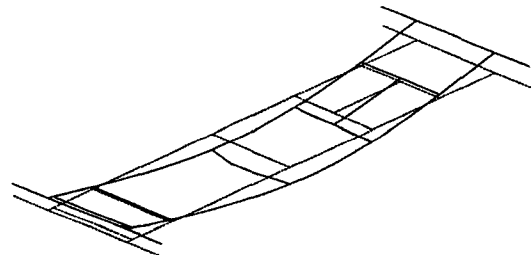


Fig. 6 2nd vibration mode(1st bending)

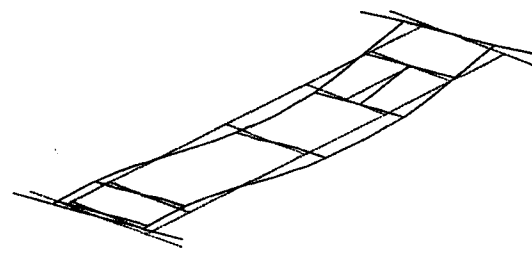


Fig. 7 3rd vibration mode(2nd bending)

Table 1 Section properties of frame

EID	A (m ²)	I _{xx} (m ⁴)	I _{yy} (m ⁴)	I _{zz} (m ⁴)	I _{xy} (m ⁴)
10	9.120E-04	2.568E-07	8.697E-07	4.630E-07	0.000E+00
11	7.680E-04	3.036E-07	1.253E-06	1.663E-07	0.000E+00
13	1.040E-03	3.633E-07	1.799E-06	3.978E-07	0.000E+00
20	5.150E-04	1.543E-07	4.980E-07	6.182E-08	1.802E-08
21	7.325E-04	1.646E-07	7.441E-07	2.332E-07	4.836E-09
30	4.200E-04	3.950E-08	9.236E-08	1.230E-07	2.890E-08
40	4.600E-04	2.719E-09	7.253E-08	3.539E-07	0.000E+00
50	8.819E-04	1.801E-07	1.134E-06	9.551E-07	4.485E-07
60	6.720E-04	9.298E-08	2.654E-07	7.783E-07	0.000E+00
61	3.900E-04	1.153E-09	2.930E-10	5.493E-08	0.000E+00
70	5.372E-04	4.376E-07	2.188E-07	2.188E-07	0.000E+00
80	4.430E-04	2.456E-07	1.228E-07	1.228E-07	0.000E+00
90	1.072E-03	5.449E-09	2.778E-06	6.135E-07	0.000E+00

Table 2 Young's moduli and natural frequencies of frames

Model no.	Young' modulus (N/m ²)	1 st mode (Hz)	2 nd mode (Hz)	3 rd mode (Hz)
1	9.950E+10	15.3	29.4	43.0
2	1.990E+11	21.7	41.6	60.8
3	1.990E+12	68.6	131.5	192.4

4. 차량의 다물체 동역학 해석

앞 절의 유한요소해석을 통해 얻은 프레임의 유연성이 차량의 동적특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 상용 다물체 동역학해석 프로그램인 DADS를 이용하여 현가질량, 전·후륜 차축 현가식 현가계, 타이어 등을 포함하는 강체 차량 모델과 유연체 프레임을 포함한 유연체 차량모델을 만들었다. 대상 차량의 동역학 모델은 강체, 조인트, 병진스프링, 회전스프링, 부싱, 그리고 제어요소로 구성되어 있으며 전체 자유도수는 68개이다. 유연체 모델에서는 차량의 현가질량을 유연성이 있는 프레임과 강체 현가질량으로 나누었고 탑재된 강체질량은 프레임에 부싱으로 연결시켰다.

Fig. 8은 강체 차량모델과 유연체 차량모델을 비교하여 나타내고 있다.

유연체 모델의 경우에는 차체 프레임의 유연성을 고려하기 위해 앞절에서 구한 진동모드와 정적변형모드를 혼합하여 사용하였으며, Fig. 9와 같은 높이 8 cm, 길이 80 cm인 조화함수 곡면의 형상을 갖는 범프를 3 종류의 속도로 통과시킬 때 차량의 동특성이 강체 모델 및 3 개의 서로 다른 유연성을 갖는 프레임 모델에 대하여 어떻게 나타나는지를

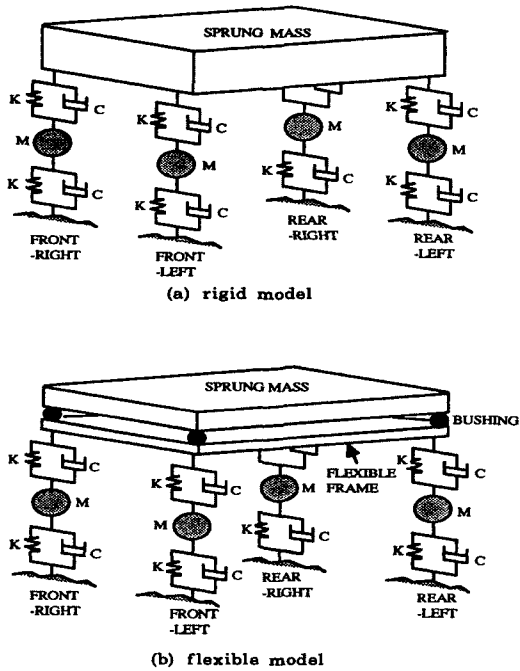


Fig. 8 Comparison of rigid and flexible model

알아보았다.

Fig. 10은 10.8 km/h의 주행속도로 범프를 통과할 때 차량 질량중심의 Z-방향 가속도 성분에 대한 시간선도이며, 강체모델과 유연체 기본모델(model 2)과의 비교이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 모델에 있어서 피크 값은 상당한 차이가 나고, 또한 앞바퀴와 뒷바퀴가 범프를 통과하는 중간과정에서도 상이한 응답선도를 보이고 있다. 즉, 프레임을 유연체로 모델링하였을 때에는 프레임의 진동특성이 나타나는데 비해 강체로 모델링한 경우에는 프레임의 진동특성은 나타나지 않고 거시적인 강체 동역학적 운동특성만이 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 프레임의 우측 전방에 붙어 있는 브래킷 조인트에서의 Z-방향성분의 반력-시간선도를 비교한 것이다. 이것도 가속도-시간선도의 비교에서 발견된 것과 유사한 추이를 볼 수 있다.

유연체 모델링의 정확도 및 신뢰도를 확인하기 위해서 앞절에서 선정된 프레임의 유연성이 서로 다른 3 개의 유연체 모델 즉, model 1, model 2, model 3에 대하여 앞에서 실시한 속도로 범프 통과 시뮬레이션을 다시 수행하였다. Figs. 12-13은 가속도-시간응답과 반력-시간응답을 각각 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것은 탄성계수가 높은 모델, 즉 강체에 더 가깝다고 할 수 있는 model 3의 가속도 및 반력선도가 강체모델의 응답선도에 가장 유사하고 유연성이 제일 큰 모델인 model 1은 강체모델과의 차이가 기본모델인 model 2보다도 더 커진다는 것이다. 따라서 차량 프레임과 같이 유연성을 무시할 수 없는 물체를 강체로 가정하여 동하중을 예측한다는 것은 매우 위험한 일이다.

차량 프레임의 유연성이 차량의 속도와 어떤 함수관계가 있는지를 알기 위해서 차량의 속도를 36 km/h 및 60 km/h로 증가시키면서 가속도 및 반력의 시간선도를 비교하여 보았다. Figs. 14-15는 차량의 속도가 36 km/h 일 때의 가속도 및 반력의 시간선도 비교를 각각 나타내고, Fig. 16은 차량의 속도가 60 km/h 일 때의 가속도-시간선도 비교를 나타낸다. 그리고 Table 3은 10.8 km/h, 36 km/h, 60 km/h의 주행속도로 Fig. 9에서 나타낸 범프를 통과시킬 때 차량에 가하는 가진주파수를 나타내고 있다.



Fig. 9 Bump shape

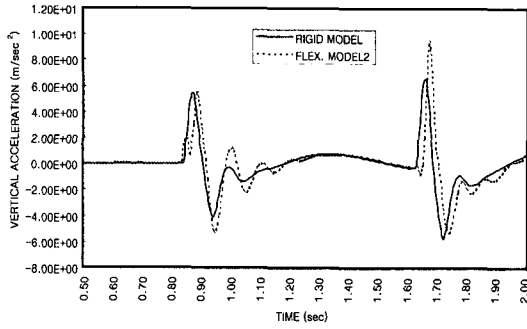


Fig. 10 Vertical acceleration of mass center of rigid and flexible model($v=10.8$ km/h)

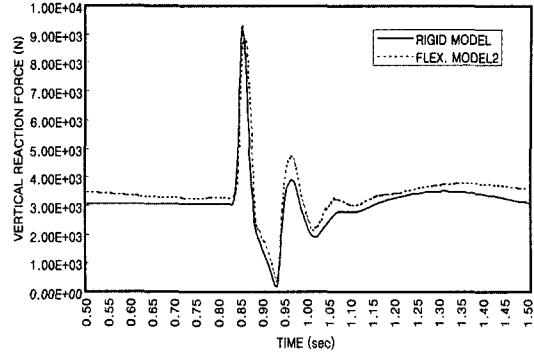


Fig. 11 Vertical reaction force of front-right bracket joint of rigid and flexible model($v=10.8$ km/h)

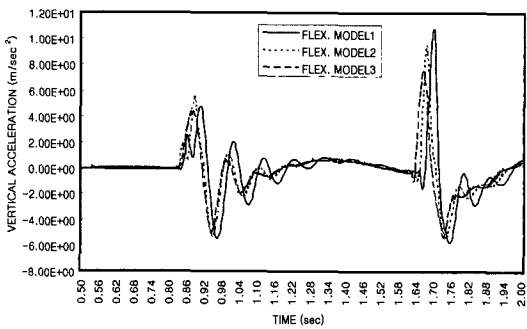


Fig. 12 Vertical acceleration of mass center of flexible models($v=10.8$ km/h)

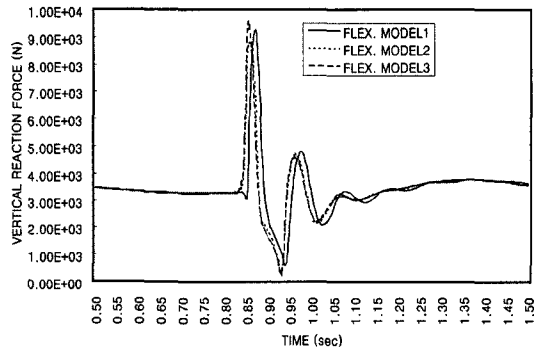


Fig. 13 Vertical reaction force of front-right bracket joint of flexible models($v=10.8$ km/h)

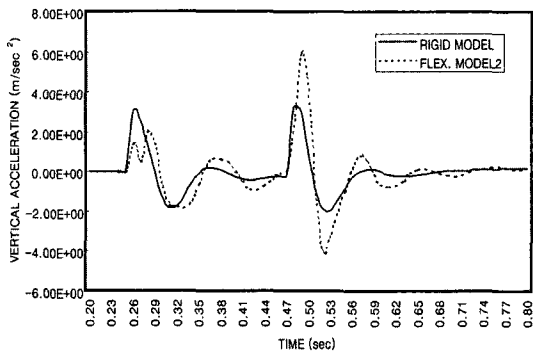


Fig. 14 Vertical acceleration of mass center of rigid and flexible model($v=36$ km/h)

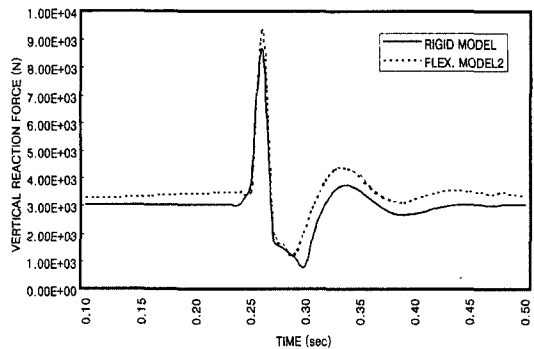


Fig. 15 Vertical reaction force of front-right bracket joint of rigid and flexible model($v=36$ km/h)

이들 결과로부터 속도가 커짐에 따라 유연성의 영향은 점점 커지는 반면, 가속도 및 반력의 피크값은 감소한다는 것을

알 수 있다. 이것은 저속도로 주행시 프레임의 저차 고유진동수와 범프 통과에 따른 가진주파수가 서로 비슷한 공진영역에

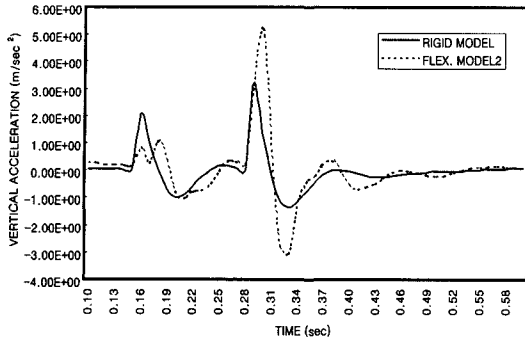


Fig. 16 Vertical acceleration of mass center of rigid and flexible model(v=60 km/h)

Table 3 Excitation frequencies

Velocity (km/h)	10.8	36	60
Excitation frequency (Hz)	23.6	78.5	131.2

있지만 주행속도가 커짐에 따라 범프 통과에 따른 가진주파수가 프레임의 기본 고유진동수로부터 멀어지기 때문이다.

5. 결론

본 논문에서는 서로 다른 3 개의 탄성계수를 갖는 유연체 프레임 차량모델 및 강체 차량모델을 사용하여 프레임의 유연성이 차량의 동특성에 미치는 영향을 분석하였다.

차량 동역학 해석을 위한 유연체 차량모델의 경우에는 차량 프레임의 유연성을 고려하기 위해 저차 진동모드와 정적 변형모드를 혼합하여 사용하였다. 강체모델과 유연체모델에 대하여 가속도, 반력 등을 비교한 결과 피크에서 상당한 차이가 나는 것을 알 수 있으며, 특히 앞바퀴와 뒷바퀴가 범프를 통과하는 중간 과정에 있어서 강체모델의 경우 거시적인 동역학적 거동만을 보이는 반면 유연체모델은 거시적인 동역학적 거동뿐만 아니라 진동특성도 함께 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 차량의 속도가 커짐에 따라 프레임의

유연성이 가속도 및 반력에 미치는 영향은 점점 커지며 가속도의 피크값은 프레임의 고유진동수와 가진주파수가 비슷한 범위에서는 상당히 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

추후, 차체 프레임의 결합부를 고려한 동적해석, 민감도 해석, 최적설계에 대한 연구를 수행 할 예정이다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- (1) Yoo, W. S. and Haug, E. J., "Dynamics of Flexible Mechanical Systems Using Vibration and Static Correction Modes", *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 8, pp. 315~322, 1986.
- (2) Baek, W. K. and Stephens, R. I., "Integrated Computational Durability Analysis", *Proceedings of the 2nd Annual Symposium on Mechanical System Design in a Concurrent Engineering Environment*, pp. 137~157, The University of Iowa, 1990.
- (3) Yim, H. J. and Lee, S. B., "An Integrated CAE System for Dynamic Stress and Fatigue Life Prediction of Mechanical Systems", *KSME Journal*, Vol. 10, No. 2, pp. 158~168, 1996.
- (4) Thomas, D. G., *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, 1992.
- (5) Yim, H. J., "Computational Methods for Dynamic Stress Analysis of Mechanical Systems", Ph. D. Thesis, The University of Iowa, 1990.
- (6) *DADS User's Manual*, Rev.5.5, Computer Aided Design Software Inc., 1992.
- (7) *ANSYS User's Guide*, Ver.5.4, ANSYS Inc., 1997.