

DADS를 이용한 유연 다물체의 동응력 해석

Dynamic Stress Analysis of Flexible Multibody using DADS

안 기 원*, 서 권 회**, 황 원 걸***
K. W. Ahn, K. H. Seo, W. G. Hwang

ABSTRACT

A great deal of time and effort are required to evaluate the safety and durability of a vehicle structure in the vehicle development stage. It is difficult to find the reasons for cracks which occur in the body and frame of a vehicle during tests. Recently computer aided engineering techniques have been utilized to solve the problems of safety and durability of vehicles.

In this study, a dynamic stress analysis is performed on the frame of the vehicle by rigid and flexible multibody dynamics techniques. The result of the analysis is compared to that of the actual test. The full vehicle dynamic models for the rigid and flexible bodies are developed by DADS package.

The modal coordinate system is used to save time for the dynamic stress analysis. The flexible multibody dynamic models have 12 normal modes considering the flexibility of the frame. Dynamic stresses are calculated by relating the stress influence coefficients and the applied forces.

주요기술용어 : Dynamic Stress(동응력), Flexible Multibody Dynamics(유연 다물체 동역학), Inertia Relief Analysis(관성 제거 해석), Vehicle Dynamics(차량 동역학)

1. 연구 배경

차량에 대한 다물체 동역학(multibody dyna-

mics)은 주로 구조물을 강체로 가정하여 승차감과 소안성 해석에 대하여 활발히 연구되어졌고, 실제 차량 개발 단계에 사용되었다.¹⁾ 그러나 다물체 동역학을 이용한 구조물의 안정성과 내구성 해석은 구조물을 강체 대신 유연체(flexible body)로 모델링 해야 하기 때문에 컴퓨터 성능의 제한이나, 이

* 정회원, 아시아자동차 기술연구소
** 아시아자동차 기술연구소
*** 정회원, 전남대학교 기계공학과

론에 대한 증명 등 많은 어려움이 있다.

차량 구조물의 안전성 평가는 일반적으로 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 정적인 상태에서 구조물에 하중을 주어 수행된다. 차량 개발 초기 단계에서는 프레임과 차체와 같은 구조물에 대해서 보(beam)요소를 이용하여 모델링한 후, 그 구조물에 대하여 굽힘과 비틀림 강성을 평가하므로써 대략적인 구조물의 안전성을 예측한다. 설계 목표치의 강성이 얻어지면, 그 구조물에 대해 셸(shell) 요소를 이용하여 보다 상세한 모델을 만들어 강도를 평가한다. 주로 차량 주행시 프레임과 차체에 대한 응력을 평가하기 위해서는 모든 구조물을 강체로 가정하여 강체 다물체 동역학 해석을 수행하여 서스펜션을 통하여 프레임과 서스펜션 마운팅 부분에 전달된 동하중을 산출한 후, 프레임과 차체의 유한요소 모델에 산출된 동하중을 정적으로 적용하였다. 그러나 이런 방법은 구조물의 탄성 성분을 고려하지 않았기 때문에 전달된 하중을 정확히 예측할 수 없다.

강체 다물체 동역학에서 프레임과 차체를 강체로 가정한 것과는 반대로 탄성을 고려한 유연 다물체 동역학(flexible multibody dynamics) 해석을 수행하면 더욱 실제에 가까운 동응력을 얻을 수 있을 것이다.²⁾ 유연 다물체 동응력 해석을 실시 하기 위해서는 다음과 같은 사항이 준비되어야 한다.

- 1) 강체 다물체 차량동역학 모델
- 2) 유한요소 모델
- 3) 차량 동역학 모델과 유한요소 모델이 합쳐진 유연체 모델
- 4) 실차 시험 데이터 구축

위에서 언급한 사항을 준비하기 위해서는 상당한 시간과 노력이 요구된다. 차량 개발 기간의 단축과 안전 설계를 위해서는 기존의 해석 방식으로는 어려워 보다 정확하고 효율적인 방법이 요구된다.

본 연구에서는 강체와 유연 다물체 동역학 기법을 이용하여 주행중 범프 통과시 차량의 프레임에 대한 동응력 해석을 수행하여 시험과 비교 평가하였다. 동응력 해석을 위해 동역학 해석 전문 상용 프로그램인 DADS를 이용하여 강체와 유연체에 대해 전체 차량 동역학 모델을 구현하였으

며, 구현된 모델을 이용하여 동응력을 계산하여 실차의 실험 결과와 비교하고 설계에 반영하도록 하였다. 동응력 해석시 해석 시간을 줄이기 위하여 모드 좌표를 사용하였으며, 12개의 진동 모드(normal mode), 응력 영향 계수(stress influence coefficient) 등이 이용되었다. 해석에 사용된 범프의 형태는 지그재그 범프(zigzag bump)이다. 범프를 통과하는 차량의 속도는 30km/hr이다.

본 연구를 통하여 차량 개발 단계에서 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 구조물의 안전성을 예측하는데 실제 활용될 수 있음을 보여 주었다.

2. 유연체의 동응력

차량 프레임에 대한 동응력 계산을 간략화하기 위해 프레임의 균열은 어느 특정 위치의 표면에서 발생한다고 가정하면 그 표면에서의 응력은 평면 응력성분들 즉, σ_x , σ_y , τ_{xy} 로 나타나게 된다. 각 응력성분은 단위하중(unit force)에 의한 응력 영향 계수와 대응하는 하중 이력의 곱의 중첩으로 표현되므로 식 (1)과 같이 공간과 시간의 함수가 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_x(t) &= \sigma_{x1}F_1(t) + \sigma_{x2}F_2(t) + \dots \\ &= \sum_{i=1}^m \sigma_{xi}F_i(t) \\ \sigma_y(t) &= \sigma_{y1}F_1(t) + \sigma_{y2}F_2(t) + \dots \\ &= \sum_{i=1}^m \sigma_{yi}F_i(t) \\ \tau_{xy}(t) &= \tau_{xy1}F_1(t) + \tau_{xy2}F_2(t) + \dots \\ &= \sum_{i=1}^m \tau_{xyi}F_i(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 응력 영향 계수 σ_{xi} , σ_{yi} , τ_{xyi} 는 조인트 부 또는 스프링-댐퍼 부착점에서의 반력 $F_i(t)$ 와 동일한 위치에서 동일한 방향으로 가해진 단위하중에 기인한 응력장으로 정의된다. 한편 응력 영향 계수를 구하기 위해 관성 제거 해석(inertia relief analysis) 기법을 이용하였다. 프레임과 같은 동적 구조물들은 관성하중을 유발하는 고유의 강체 운동을 하므로 강성행렬이 항상 특이행렬이 될 뿐

만 아니라 경계조건을 정의하여 유한요소 문제를 푸는게 쉽지 않으므로 MSC/NASTRAN의 관성 제거 해석에서는 프레임과 같이 구속되어 있지 않는 동적 구조물이 정적 평형상태에 있다는 가정하에 프레임의 관성이 조인트 반력들과 힘 평형을 이루기 위해 모든 절점에 발생된다. MSC/NASTRAN의 관성 제거 해석을 위해 SUPORT entry, PARAM, GRDPNT, x, PARAM, INREL,-1의 3가지 데이터 입력을 하면 된다.

본 논문에서는 식(1)과 같이 얻어진 응력 성분들을 등가응력인 다음 식(2)와 같이 von Mises 응력으로 변환하였다.

$$\bar{\sigma}(t) = \sqrt{\sigma_x^2(t) + \sigma_y^2(t) - \sigma_x(t)\sigma_y(t) + 3\tau_{xy}^2(t)} \quad (2)$$

3. 컴퓨터 시뮬레이션

3.1 차량 모델링

유연체 동역학 모델을 만들기 위하여 프레임에 대해 유한요소 모델링을 하였다. 해석에 사용된 4륜 구동 지프차량은 차체, 프레임, 엔진, 액슬 등으로 구성되어 있다. 프레임은 두 개의 사이드 레일, 5개의 크로스 멤버, 1개의 트랜스 미션 크로스 멤버로 구성되어 있다. 초기 설계시 프레임과 그에 장착되어 있는 부속품들의 강도가 매우 중요하므로 본 논문에서는 범프 통과시 프레임의 취약 부위를 예측함과 동시에 그 부위에서의 동응력을 해석하고자 한다. 결국 해석의 주관심을 프레임으로 국한시켰으며 차체와 엔진은 각각 하나의 관성 질량체로 간주하였다.

본 논문에서는 상용 유한요소 프로그램들을 이용하여 차체, 프레임, 엔진 등을 모델링한 후 해석하였다. 전처리 작업인 모델링에는 I-DEAS Master Series 5.0과 MSC/PATRAN v6.0을 이용하였으며, 유연 다물체 동역학 해석에 필요한 유한요소 데이터를 얻기 위한 구조 해석에는 MSC/NASTRAN v68.2.3을 이용하였다. 관심 대상인 프레임에서의 정확한 동응력 해석을 위해 쉘(thin shell) 요소로 모델링하였으며, 특히 쉘 요소의 z방향이 관성좌표의 z축과 일치하지 않는 경우가 대

부분이므로 표면에 대해 수직이 되도록 국부좌표를 만들어 관심부위인 동응력 측정 부위에 대해 표면집합을 설정함과 동시에 상세히 분할하였다. 차체와 엔진은 비구조 질량들로 각각의 도심에 회전 관성 모멘트를 갖는 집중 질량 요소로 모델링하였다. 엔진은 프레임에 대한 관성 하중을 고려해 주기 위해 3개의 보 요소로 프레임에 지지시켰으며, 3점 지지 방식이므로 스프링 요소를 사용하여 각 엔진 마운트 지점에서의 부상 강성 값들을 보상하였다. 차체는 8개의 보 요소로 프레임에 연결되어 있으며, 각 차체 마운트 지점에서 부상 강성 값들에 해당하는 스프링 요소로 프레임에 연결되어 있다.

본 유한요소 모델의 크기는 1,566개 절점, 1,941개 요소이다. 사용된 요소들의 구성은 보 요소가 238개, 쉘 요소가 1,668개, 스프링 요소가 33개, 집중질량 요소가 2개이다. 그림 1은 프레임이 유연체로 고려된 전체 차량 동역학 모델이다. 차량에 대한 전체 유한요소 모델 완성한 후 MSC/NASTRAN의 DMAP(Direct Matrix Abstraction Program) 모듈을 이용하여 진동 모드 해석(SOL 103)시 생성되는 절점 번호, 위치, 그리고 모드 형상에 관한 정보를 OUTPUT2 파일 형식으로, 질량 행렬에 관한 정보를 OUTPUT4 파일 형식으로 얻어냈다.

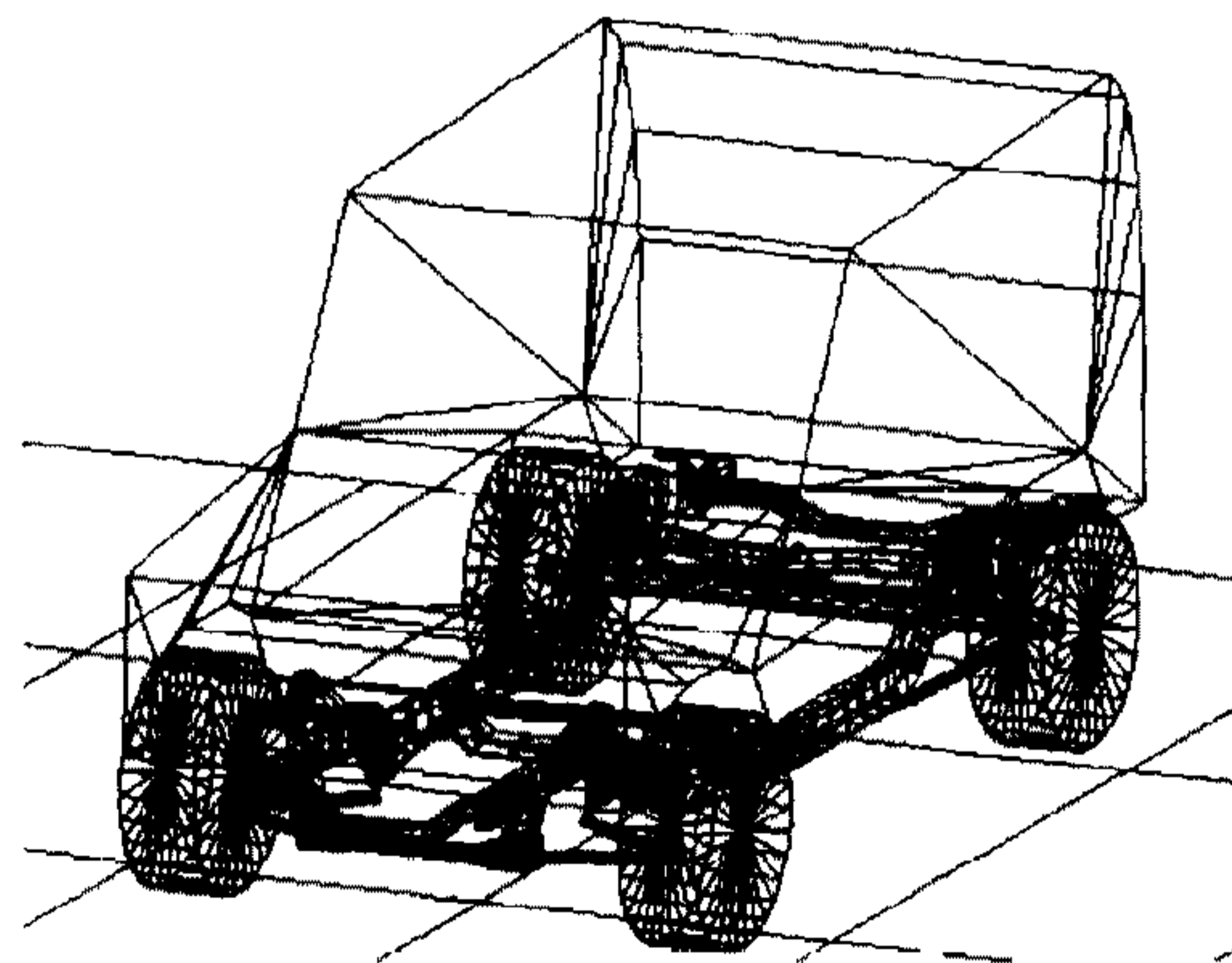


Fig. 1 Full vehicle dynamic model

Table 1 Normal mode and natural frequency(Hz)

모드	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hz	4.6	6.2	7.9	10.3	18.7	24.6	28.7	34.2	34.3	35.8	36.7	43.9

본 논문에서는 강체 모드들을 제외시키고 50Hz 까지 12개의 진동 모드를 고려하였다. 표 1은 해석에 의한 진동 모드와 고유 주파수를 나타낸다.

3.2 DFBT(DADS Flexible Body Translator) 실행

DFBT는 유한요소 데이터를 DADS 유연 데이터베이스로 변환시켜주는 기능을 한다. DFBT(big)은 200모드, 100,000절점, 120,000요소까지 데이터 처리가 가능하며, 실행 후 유연 데이터베이스 파일(*.flex)이 생성된다.

3.3 DADS/Flex 실행

DFBT를 실행시켜 얻게 되는 *.flex 파일에는 절점 번호, 위치, 모드 형상, 기하학적 형상에 대한 내용 등이 포함되어 있는데, DADS/Flex는 이런 내용들을 가시화시켜 준다. 특히 정적 모드를 사용하는 경우 모드 셋(mode set)에서 질량 행렬을 분리(decouple)시키는 직교화를 실행하여 모드 셋을 재정의하는 게 해석의 효율성을 향상시키는데 도움이 된다.³⁾

3.4 조인트 반력에 의한 동응력 계산

그림 2는 동응력을 계산하기 위한 전체 흐름도를 나타낸다. 먼저 MSC/NASTRAN에서 프레임에 대한 진동 모드 해석을 통하여 얻은 결과 즉, 절점 번호 및 좌표, 질량 행렬, 강성 행렬, 모드 형상 등이 내포되어 있는 데이터 파일을 DADS

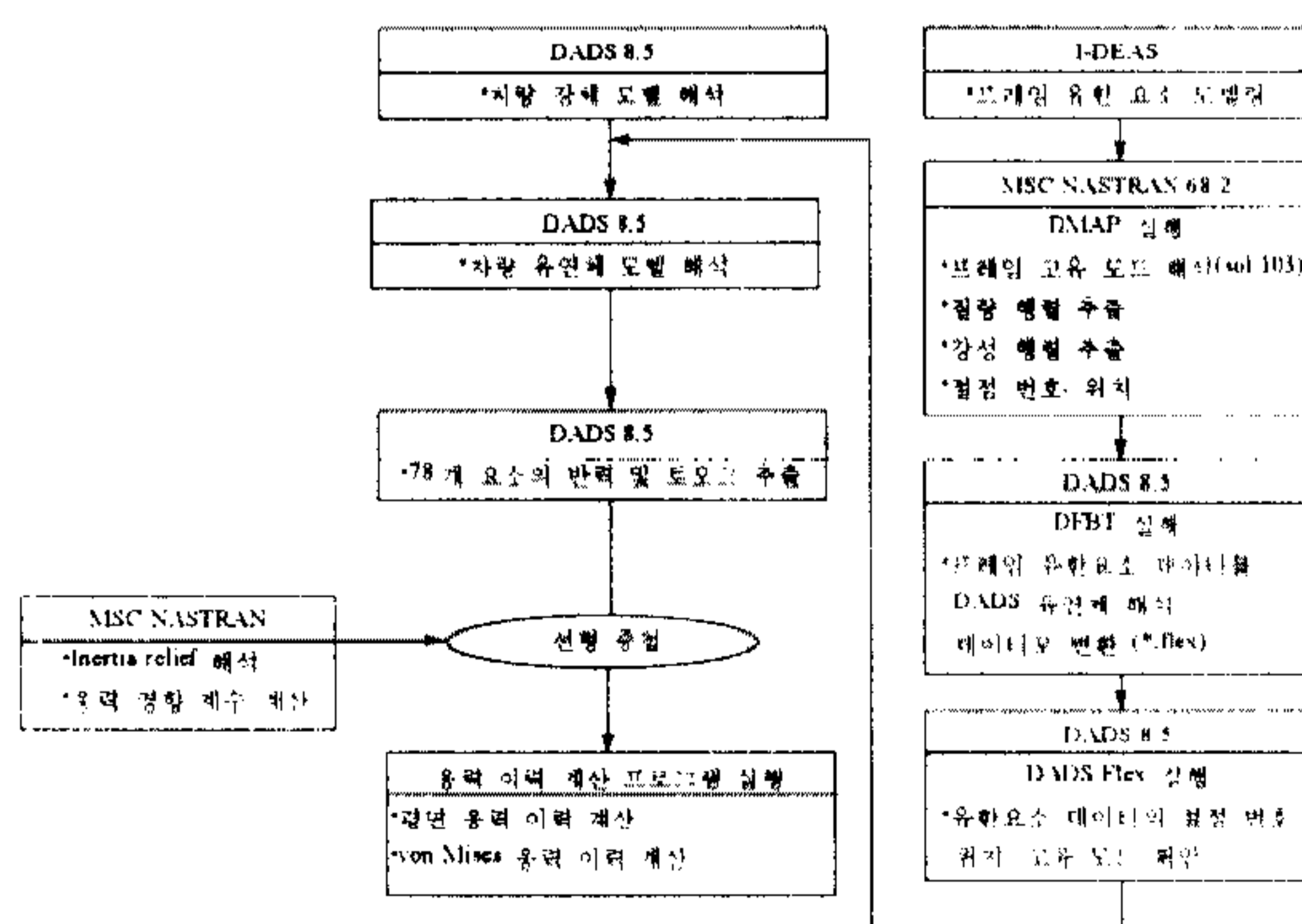


Fig. 2 Overall computational procedure

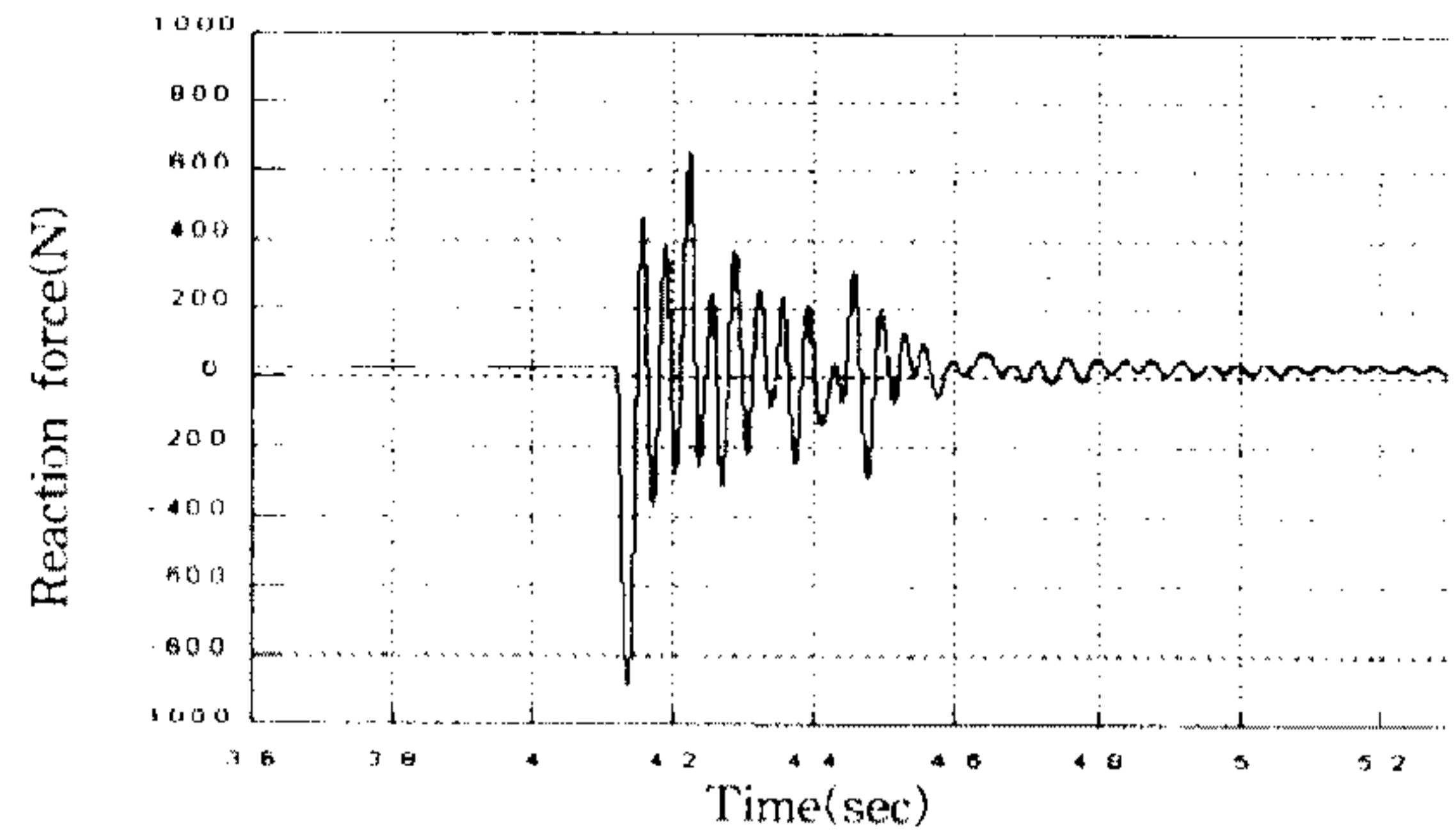


Fig. 3 Reaction force of front suspension

모델에서 읽어들이고 이를 이용한 DADS 해석이 수행되어 각 조인트에서 반력을 추출한다. 또한 MSC/NASTRAN에서 관성 제거 해석 기법을 이용하여 단위하중에 대한 응력 영향 계수를 구한다. 본 논문에서 단위하중은 78개이다. DADS 해석에 의한 조인트 반력과 응력 영향 계수가 선형적으로 중첩되어 동응력이 계산된다.⁴⁾

강체 및 유연체 모델에 대한 동적 시뮬레이션을 수행한 후 각 조인트에서 조인트 반력을 추출하기 위해 DADS 그래프용 명령어를 작성하였다. 그림 3은 조인트 반력중 앞 현가계(suspension tower)를 보여준다.

동응력 계산시에 필요한 응력 영향 계수를 얻기 위해 MSC/NASTRAN의 관성 제거 해석 기법을 이용하여 각 하중 조건에 대한 응력 영향 계수를 구하였다.

MSC/NASTRAN 해석 결과 파일(*.f06)에는 각 하중 조건별 응력 영향 계수들이 σ_{xi} , σ_{yi} , τ_{xyi} 로 출력되므로 각 성분별로 읽어 동적 시뮬레이션을 통해 얻은 조인트 반력들과 중첩한 후 관심있는 절점에서의 응력을 추출한다. 응력은 von Mises 응력 형태로 얻을 수 있도록 C 언어로 프로그래밍 하였다.

4. 동응력 실험 및 해석 고찰

그림 4는 30km/hr 직진 주행중 지그재그 범프 통과시 앞 프레임에서 스트레인 게이지 장착 모습을 보여준다. 그림 5는 스트레인 게이지에 의한 스트레인 이력을 동응력으로 변환하는 과정을 나타낸다. 그림 6은 지그재그 범프 통과시 앞 프레

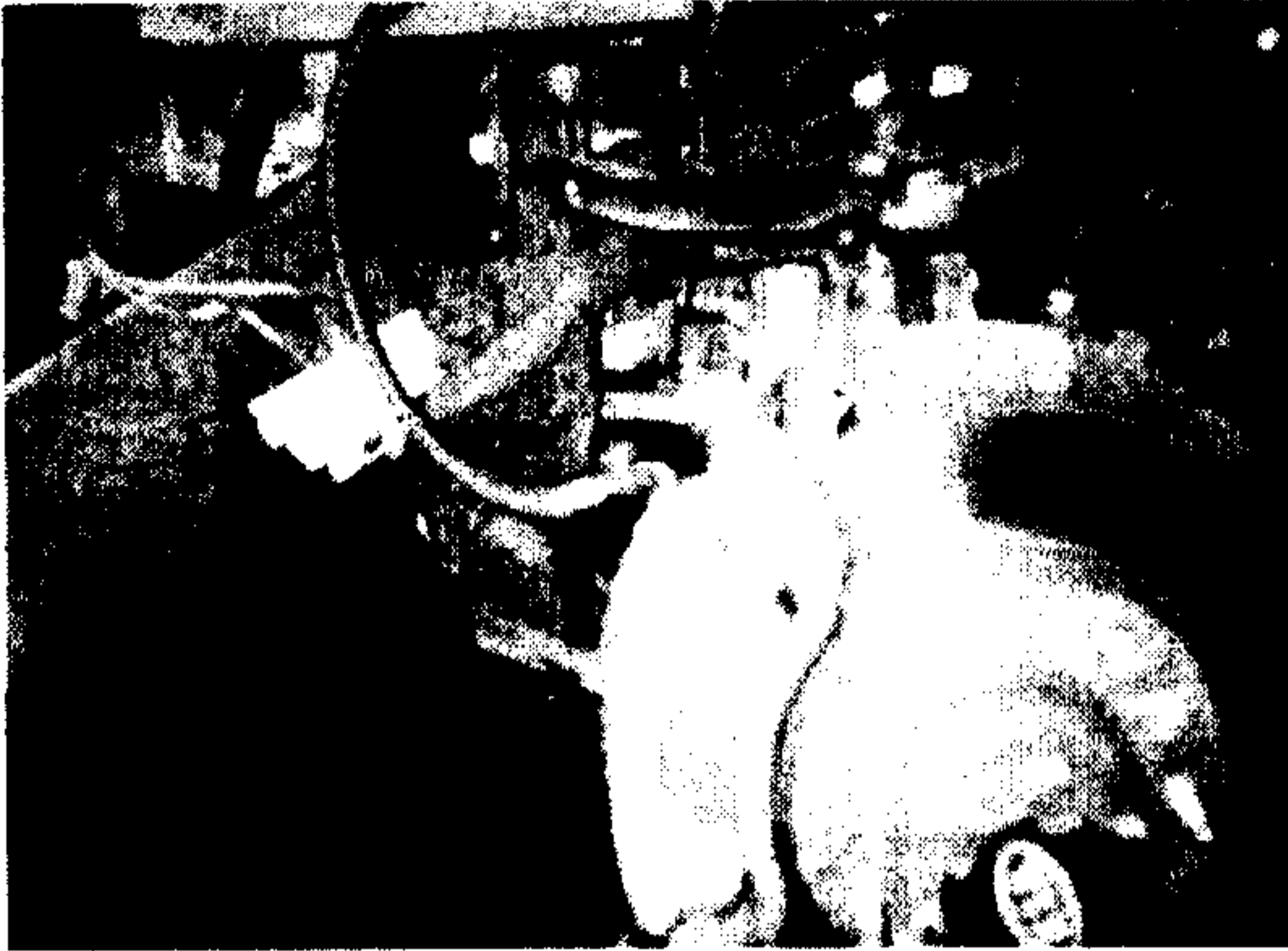


Fig. 4 Attachment position of strain gauge

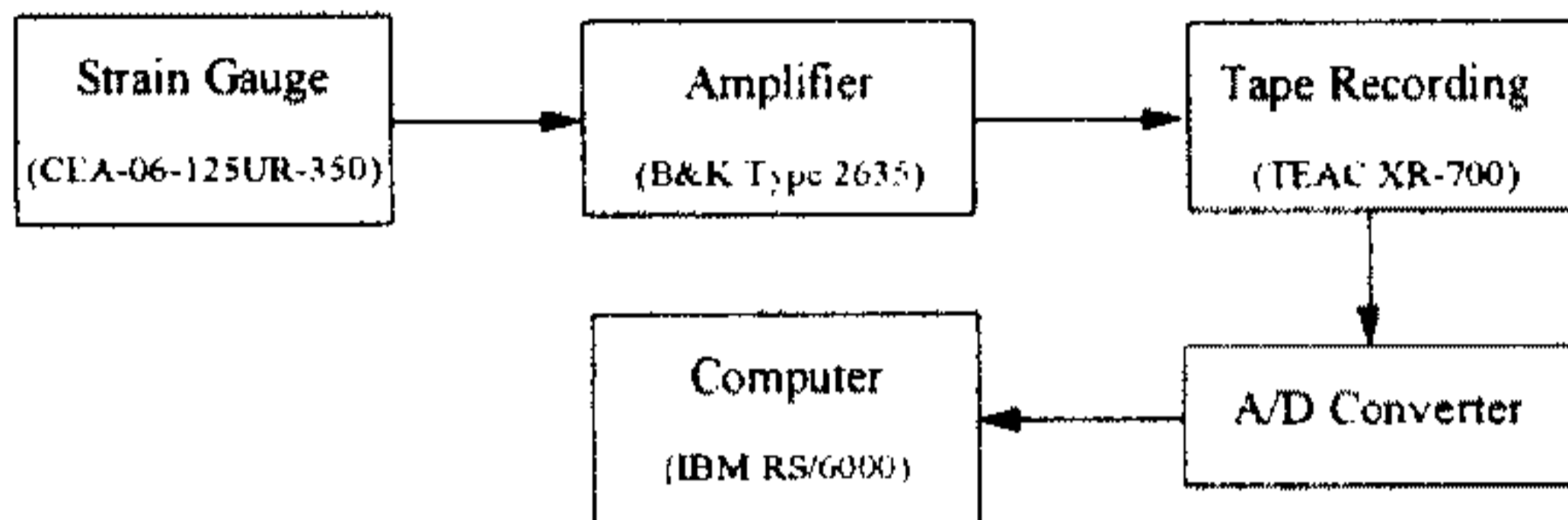


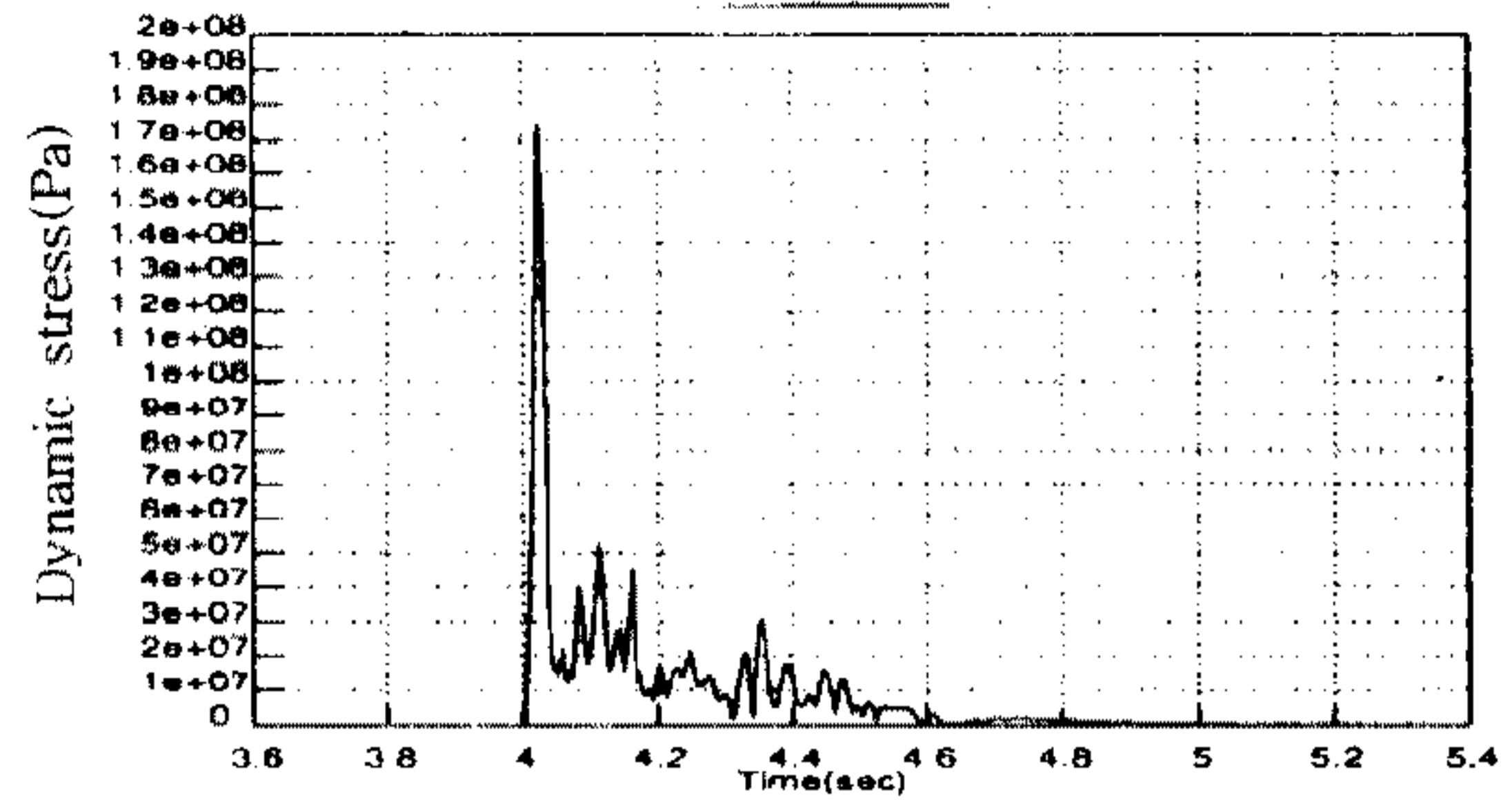
Fig.5 Block diagram of measurement system

임에서 해석과 시험결과를 나타낸다. 그림 6에서 해석과 시험의 경향은 대체적으로 유사하며, 유연체 해석이 강체 해석보다 낮게 나타나며 시험에 가깝다. 강체 모델에 의한 동응력은 $17.43e7(Pa)$, 유연체 모델에 의한 동응력은 $15.42e7(Pa)$, 시험에 의한 동응력은 $12.10e7(Pa)$ 을 나타내었다. 유연체에 의한 오차 개선율 $[(강체 모델-유연체 모델)/시험]100(\%)$ 은 16.61%이다.

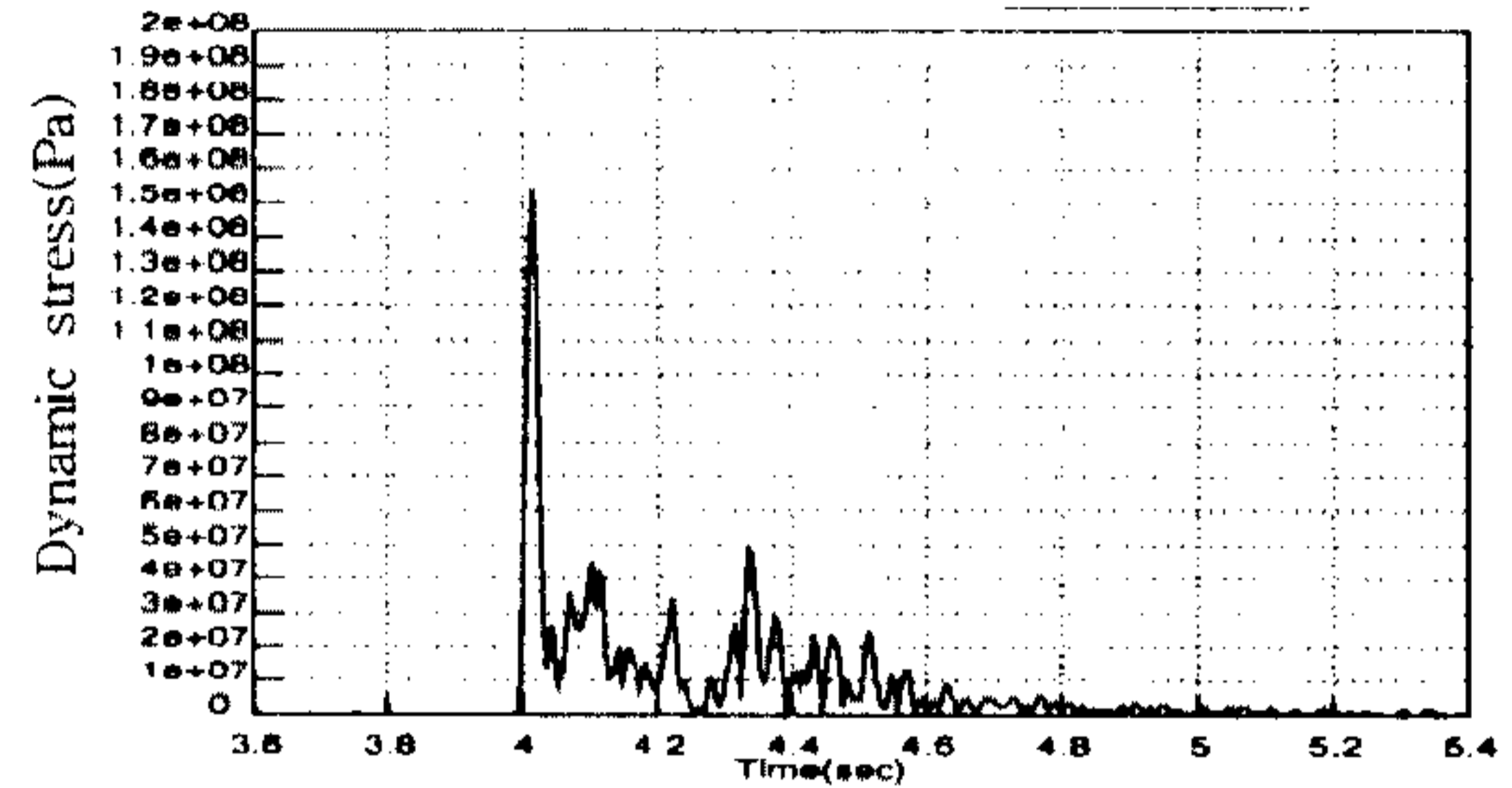
5. 결 론

본 논문은 차량 동하중에 의한 동응력을 범프 통과시 적용하여 해석을 수행한 후 시험과 비교하여 해석의 타당성을 고찰하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

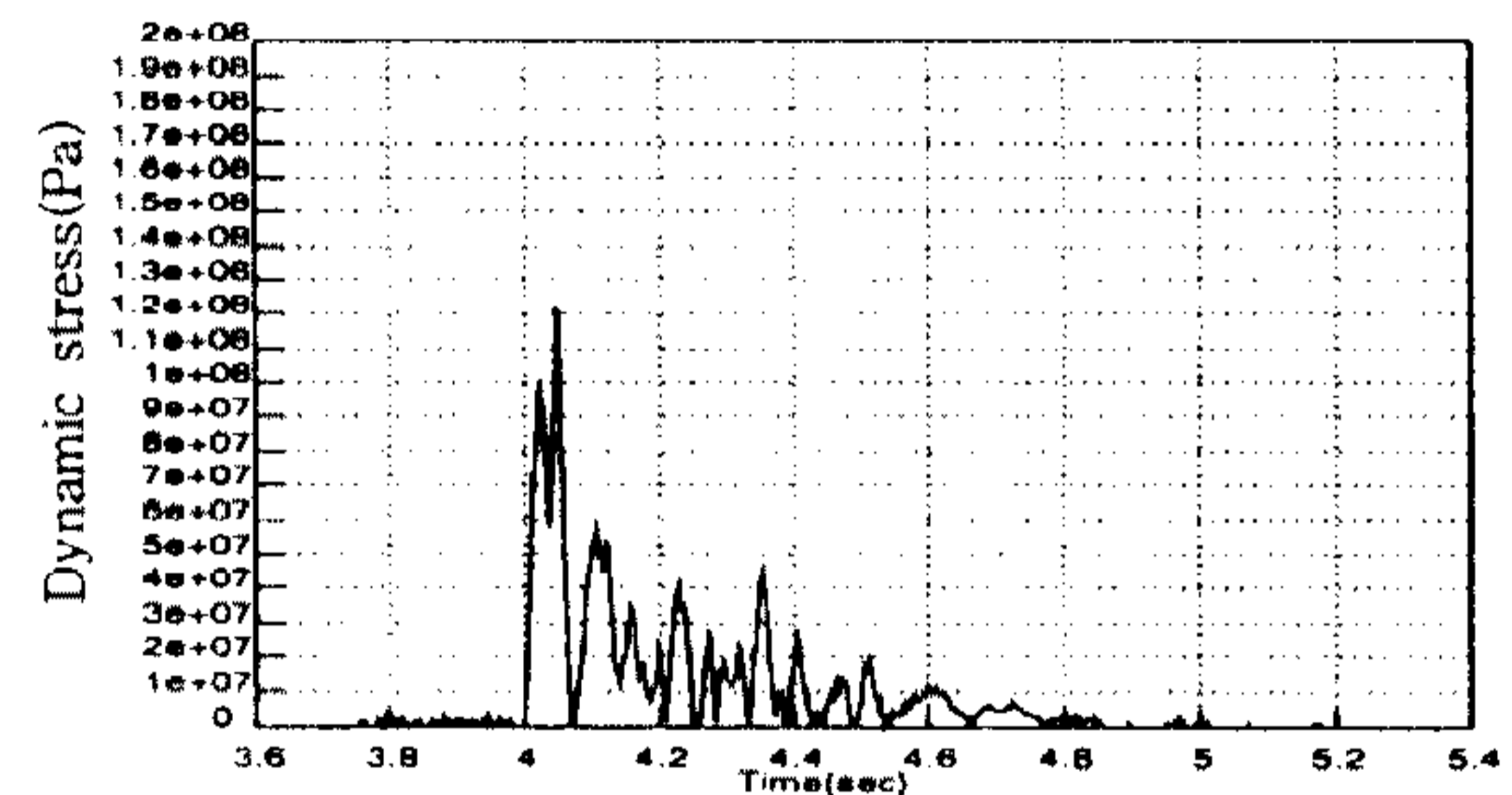
- 1) 강체 동역학 모델과 유한요소 모델을 결합시켜 차량 프레임의 동응력을 해석할 수 있는 유연 다물체 모델을 구현하였다.
- 2) 다물체 동역학 모델을 이용하여 저속 구간인 30km/hr에서 지그재그 범프를 통과할 경우 앞 프레임에서의 동응력은 강체 모델에 의한



(a) Rigid Body Analysis(Front Frame)



(b) Flexible Body Analysis(Front Frame)



(c) Test(Front Frame)

Fig. 6 Comparison of dynamic stress of front frame during zigzag bump pass at 30km/hr

경우 $17.43e7(Pa)$, 유연체 모델에 의한 경우 $15.42e7(Pa)$, 시험에 의한 경우 $12.10e7(Pa)$ 을 나타내었다. 유연체에 의한 오차 개선율은 16.61%이다.

- 3) 차량 개발 과정에서 본 연구 결과를 적용하면 개발 기간 단축뿐만 아니라 신뢰성 있는 안전 설계를 하는데 기여하리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. Steven P. Fuja, Henry A. Schmid, et.al., "Synthesis of Chassis Parameters for Ride

- and Handling on the 1997 Chevrolet Corvette", SAE970097.
2. Liu, Tzong-Shi, "Computational Methods for Life Prediction of Mechanical Components of Dynamic Systems", Ph.D. Thesis, The University of Iowa, 1986.
 3. DADS/Flex Manual, Rev. 8.5, CADSI 1997.
 4. Jaha Ryu, Sung-Soo Kim, and Sang-Sup Kim, "An Efficient Method of Distributing Inertia Loads for Quasi-Static Analysis in Dynamic Stress Computation", Technical Report R-85, The University of Iowa, August 1990.