

3차원 모델에 의한 차량 현가계의 동적해석

이재형 · 최영휴¹⁾ · 이장무²⁾

Dynamic Analysis of an Automotive Suspension System with a 3-D Model

Jae-Hyung Lee, Young-Hyoo Choi, Jang-Moo Lee



● 이재형 (서울대 기계공학과)
● 1958년생.
● 기계역학을 전공하였으며, 차체의 유연성이 동적거동에 미치는 영향에 대하여 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

주요 안전성과 승차감에 대한 기본적인 이론이 개발되던 초기에는 자동차의 주행역학 해석이나 진동현상의 규명이 해석적 방법의 한계로 인하여 매우 간단한 모델을 이용하거나 실험적인 방법에 의존하여 왔다. 그러므로 현가장치의 동적설계는 경험과 시행착오에 의하여 이루어졌으며, 실제로 투자되는 노력과 비용에 비하여 그 결과는 매우 미약하였다.

차량의 조종안정성을 해석하기 위해서는 차륜과 현가장치에 의한 비선형성과 조향장치의 동특성 등을 고려한 3차원 차량 모델을 이용하여 정상상태와 과도상태에서의 조향입력에 대한 차량 주행역학을 해석하여야 한다. 승차감, 조향성능, 주행안정성 등의 동적성능과 현가장치의 특성관계를 규명하기

위하여 3차원 차량모델에 의한 해석과 설계 변수에의 민감도 해석을 수행할 필요가 있다.

2. 승용차의 진동 및 주행역학 해석

2.1 승용차의 수학적 모델링

현가장치는 맥퍼슨스트러트나 더블 위시본과 같은 독립현가식과 판스프링이나 링크시스템을 사용하는 차축현가식으로 구분할 수 있다. 일반적으로 승용차는 그림 1과 같이 전륜은 독립현가방식, 후륜은 차축현가방식을 채택하고 있다. 이 차량에 대한 수학적 모델을 구하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- ① 차량은 대칭이고 차체와 차축은 강체이다.
- ② 차량은 정속으로 주행한다.
- ③ 차체와 차축의 상대운동은 수직면 내에서만 일어난다.
- ④ 스프링과 속업소바는 병렬로 연결되어 있다.

1) 창원대 정밀기계공학과

2) 서울대 기계설계학과

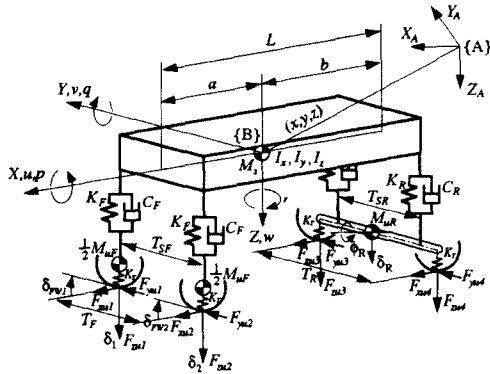


그림 1 차량의 수학적 모델

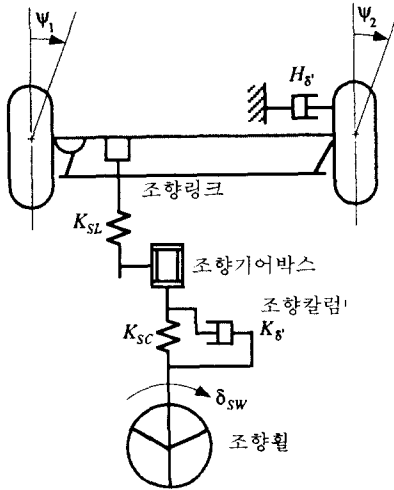


그림 2 조향장치의 모델

- ⑤ 차륜의 강성은 등가 스프링으로 모델링 하였다.
- ⑥ 차륜과 노면은 항상 점접촉을 유지한다.
- ⑦ 노면의 불규칙 정도는 차륜과 노면 접촉점의 수직변위로 고려되어진다.

이 모델의 운동 자유도는 총 12개로 차체가 5개, 뒷 차축 2개, 전륜이 좌우가 각각 2개씩이며, 조향 핸들이 1개의 자유도를 갖고 있다.

조향장치는 조향핸들, 조향칼럼, 기어박

스, 조향링크지, 전륜으로 구성되어 있으며 다음과 같은 가정을 하여 그림 2와 같이 모델링하였다.

- ① 조향핸들과 전륜의 상대운동은 조향각도 조절을 위하여 회전운동만을 한다.
- ② 조향핸들은 기어박스와 조향칼럼을 통하여 전륜과 연결되어 있으며, 조향칼럼은 강성을 갖는다.

운동방정식은 뉴턴-오일러 방정식을 이용하여 기준좌표계{A}에 대하여 구한 후 차량의 무게중심에 고정된 이동좌표계{B}에 대하여 변환시킨다.

승용차는 구동방식에 따라 전륜구동방식, 후륜구동방식, 4륜구동방식으로 나눌 수 있다. 일반적으로 중형 승용차의 경우에는 후륜구동방식을 많이 채택하고 있으며, 4륜구동방식은 지프형 승용차나 산업용 차량과 같이 특수 목적용 차량에 주로 사용된다. 최근에는 승용차의 경우 차종에 관계없이 전륜구동방식을 선호하고 있다.

전륜구동의 경우 전륜에 구동력이 전달되고 구동축의 회전각속도는 전륜의 회전각속도의 기어비로 구속된다. 구동토크는 구동축을 통해 전달되며 제동토크는 바퀴에 직접 가해지도록 모델링되어 있다. 차륜에 작용하는 마찰력은 차체의 속도와 차륜의 회전속도의 차이로 계산된다.

2.2 차륜의 반력

차량의 접지면에서 작용하는 외력은 차륜을 통하여 전달된다. 차륜과 노면의 접촉력은 수직방향 접촉력과 종방향 접촉력 및 횡방향의 접촉력으로 나누어진다. 이들 접촉력은 그림 3에서 보는 바와 같이 차륜과 노면의 접촉면 내에서 원의 방정식을 만족하는 관계에 있다고 가정한다. 먼저 차륜의 수직방향의 접촉력은 노면의 요철과 차륜중심의 변위에 의한 롤링 반경(rolling radius)의 변화와 수직방향 차륜 강성의 함수로 표현된다.

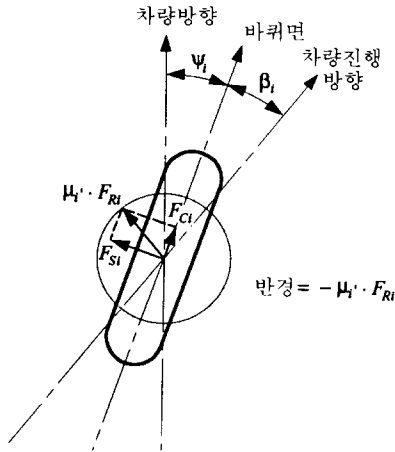


그림 3 차륜에 작용하는 힘

$$F_{Ri} = K_T (R_w + z_i - Z_{Bi}) \quad (1)$$

그림 3에서 u_{Gi} 와 v_{Gi} 는 차륜의 속도를 지면에 대해 투사한 속도이다. 종방향의 미끄러짐은 이속도와 차륜의 회전속도의 차이에 의해 계산된다.

$$slip = 1 - \frac{w_i z_i}{u_{Gi} \cos \psi_i + v_{Gi} \sin \psi_i} \quad (2)$$

종방향 반력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_{Ci} = -\mu_i (slip_i) F_{Ri} \quad (3)$$

이 식에서 μ_i 는 차륜과 지면의 마찰계수로서 종방향 미끄러짐의 함수로 표시된다. 차륜의 슬리브각은 그림 3으로부터 $\beta_i = \tan^{-1}(v_{Gi}/u_{Gi}) - \psi_i$ 이 됨을 알 수 있다. 또한 차륜이 횡방향 반력은 슬리브각과 캠버각의 함수로서 미소변화에 대하여 선형화시키면 $F_{Si} = C_{s0}\beta + C_{c0}\gamma$ 가 된다. 이때 C_{s0} 와 C_{c0} 는 슬리브각 변화와 캠버 각변화에 의한 차륜의 횡방향 반력의 변화인 선회강성과 캠버강성을 나타낸다. 차륜에 작용하는 횡방향 반력은 무차원화된 차륜 슬리브각도-측방향력 선도를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{Si} = \sqrt{\mu_i^2 F_{Ri}^2 - F_{Ci}^2} g(\beta) \quad (4)$$

이 식에서 β_i 는 무차원화된 슬리브각도이다.

3. 수치해석 및 실험

3.1 수치해석

운동방정식 $[A]\{\ddot{x}\} = [B]\{x\} + \{F(x, x, t)\}$ 의 형태를 갖는 12자유도의 연립 미분방정식이다. 여기서, $[A]$ 와 $[B]$ 는 차량의 입력변수들에 의하여 결정되어지는 계수 행렬이고, $\{x\}$ 는 차량의 운동 자유도에 해당하는 열벡터이다. $\{F\}$ 는 가진력을 나타낸다. 이 방정식을 수치적분하기 위하여 4차 룽게-쿠타(4th order Runge-Kutta) 적분법과 가우스 소거법(Gauss elimination method)을 사용하였다. 수치해석 프로그램은 과도상태 주행 역학 해석, 정상상태 주행역학 해석, 전복안정성 해석, 노면 가진시의 진동 해석의 네 가지 기능을 갖고 있다. 이 프로그램을 사용하여 그림 4와 같은 형상의 범프를 시속 20 Km/h로 통과할 때, 차량의 피치각도와 수직변위 및 수직 가속도에 해당하는 차량의 진동을 해석한 결과를 그림 6부터 그림 8에 나타내었다.

3.2 실차실험

수치해석 결과를 검증하기 위하여 실차실험을 수행하였다. 실험장비로는 차량의 조향 입력을 측정하기 위한 조향각 측정용 핸들, 차량의 자세를 측정하기 위한 자이로메터와

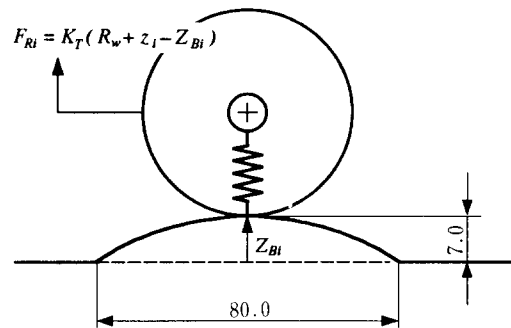


그림 4 범프의 형상

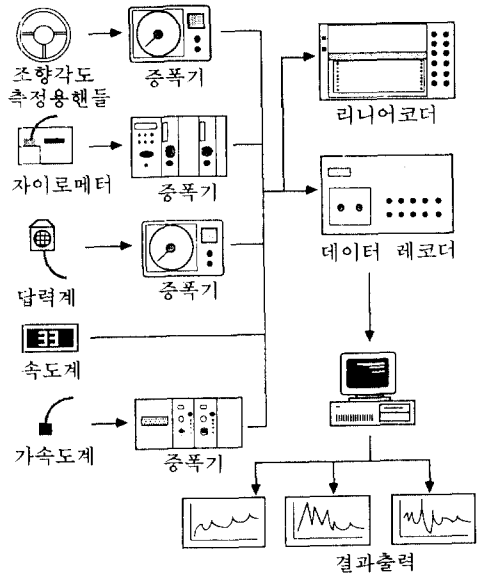


그림 5 실험장치의 구성도

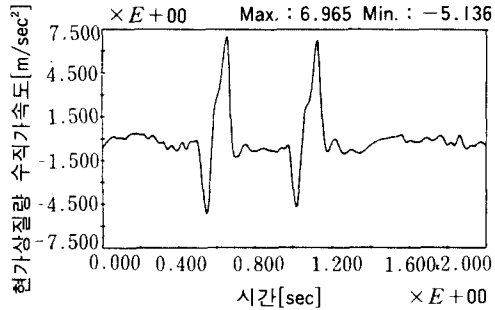


그림 8 차체의 수직가속도

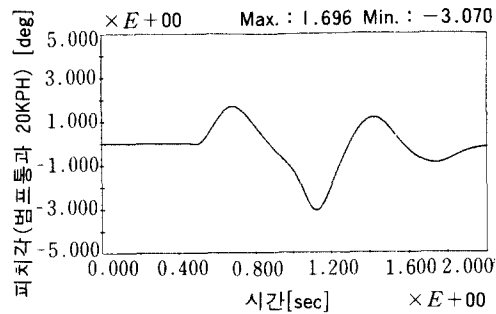


그림 9 차체의 피치각도(실험치)

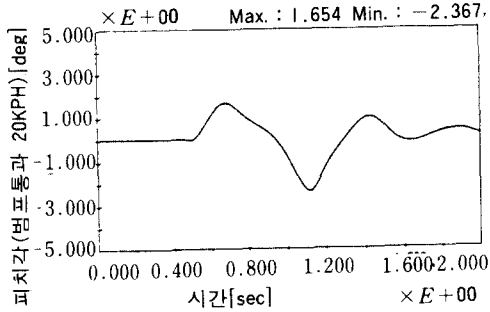


그림 6 차체의 피치각도

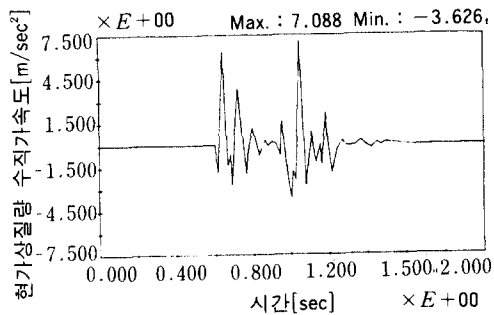


그림 10 차체의 수직가속도(실험치)

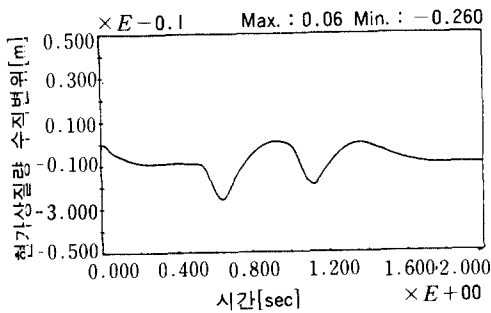


그림 7 차체의 수직변위

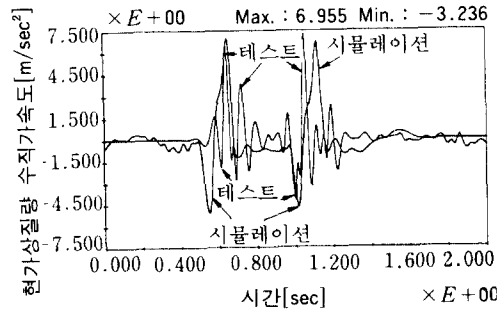


그림 11 차체의 수직가속도 비교

가속도계 및 신호를 증폭하기 위한 증폭기 등을 그림 5와 같이 탑재하였다. 실험은 정상상태에 대한 응답을 구하기 위한 일정 반경 정속 주행시험과 과도상태의 응답을 알아보기 위하여 차선변경시험 및 단일 범프 통과시험을 실시하였다. 그림 9와 그림 10은 범프통과 실험을 통하여 구한 피치각도와 수직 가속도를 보여주고 있다. 그림 11에서 보는 바와 같이 수치해석에 따른 수직 가속도의 응답은 실차 실험결과와는 다소의 위상 지연이 나타나고 있으나 크기는 대체로 일치하고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) 김원석, 1989, "선회조향과 노면가진에 의한 자동차의 과도진동에 관한 연구," 서울대학교, 공학석사학위논문.
- (2) 최영휴, 1991, "승차감 및 조종성능을 고려한 승용차 현가장치의 동적설계 연구," 서울대학교, 공학박사학위논문.
- (3) The Bendix Corporation Research Laboratories, 1970, "Vehicle Handling-Asimulation Study of the Handling Performance fo Thirteen Configurations of an Intermediate Size American Passenger Car," Final Report, Nov., 1970, Contract No. FH-11-7571, NTIS PB200880.
- (4) Allen, R. W., 1987, "Steady-State and Transient Analysis of Ground Vehicle Handling," SAE870495.
- (5) Nalecz, A. G., 1987, "Investigation Into the Effects of Suspension Design on Stability of Light Vehicles," SAE870497. 