

Suspension System의 가속내구해석

Accelerated Durability Analysis of Suspension System

민한기*, 정종안**, 양인영***
Hanki Min, Jongan Jung, Inyoung Yang

ABSTRACT

The durability test, along with the crashworthiness test, requires the most time and expense in the vehicle development process. The durability design using CAE tools reduces the time required for both the durability test and actual vehicle production. Existing dynamic stress analyses designed for the analysis of vehicle fatigue mainly calculate the dynamic stress history and fatigue after performing dynamic analysis and stress analysis with relevant software applications and then superpositioning the dynamic load history and stress influence coefficient at each joint. This approach is a complex process, taking into account the flexibility of the parts. It is, however, incapable of giving accurate consideration to the contacts between components, the non-linearity of materials, and tire-road surface interactions. This approach also requires that the analysts have an expertise in software applications of various kinds or an expert in each area must perform the analysis. This requires as a great deal of manpower and time. In order to complement the existing approaches for dynamic stress analysis, this study aims at the following: (1) to suggest the simple and accurate analysis technique which is capable of producing all the possible necessary results; (2) to reduce dramatically the time and manpower needed to construct a model designed to analyze dynamics, quasi-static stress, and fatigue; and (3) to enable an accurate analysis of fatigue by improving the accuracy of dynamic stress. we verify the presented analysis method through durability evaluation of the knuckle of passenger car.

주요기술용어 : Durability(내구성), Vehicle development process(차량개발과정), Vehicle fatigue(차량피로), Analysis technique(해석기술), Non-linearity(비선형성)

1. 서론

차량의 신뢰성 확보를 위해 주요부품들에 대

한 새로운 응력 해석 및 성능평가의 필요성이 대두되었다. 그 중에서도 노면으로부터 불규칙한 반복하중을 받는 차량구조물의 피로수명 평가는 개발과정에서 반드시 고려되어야 할 중요한 사항이다. 따라서 각 자동차 메이커들은 내구성을 보장하기 위하여 개발단계에서부터 시제품

* 회원, 성화대학교 항공자동차정비과
** 회원, 송원대학 자동차과
*** 회원, 조선대학교 기계공학부

을 만들어 장기간에 걸쳐 실차시험을 하고 있다. 그러나 시제품 제작에서 생산결정에 이르기까지 매 단계마다 품질향상 및 내구성 보장을 위하여 실차시험을 실시하는 것은 시간이나 비용측면에서 비합리적이다. 최근에는 하드웨어 및 응용소프트웨어의 급속한 발달로 그것들을 모두 시험하지 않고도 피로수명을 예측하는 것이 가능하게 되었다.

본 연구에서는 ADAMS¹⁾나 DADS²⁾와 같은 동력학해석 소프트웨어를 이용하여 동하중이력을 구한 후 NASTRAN³⁾과 같은 유한요소해석 소프트웨어를 이용하여 구한 응력영향계수와와의 중첩을 통하여 동응력이력을 구하여 최종적으로 피로해석을 수행했던 기존의 해석방법⁴⁾을 개선하였다. 그리고 해석방법의 타당성을 입증하기 위하여 지프형 승용차의 1/4모델(front)에 대해 주행시험장의 다양한 내구시험로(pothole track, pave road, ripple road)를 통과하는 주행시물레이션을 실시하여 서스펜션 너클의 각 부위별 동응력 이력을 구하여 각 노면이 피로수명에 미치는 영향을 평가하였다.

가상주행 해석기법과 동적 비선형 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D⁵⁾를 이용하여 동응력해석을 한 후 피로해석을 수행하는 이방법의 장점은 동력학해석과 응력해석 모델이 동일하며, 해석프로그램도 동일하다는 장점이 있다. 또한 투입인원이나 소요시간도 기존의 해석방법에 비해 대폭절감 할 수 있으며 구조물이나 재료의 비선형성, 노면의 형상, 타이어의 접촉문제도 실제에 가깝게 재현 가능하므로 해석의 정확도도 높일 수 있다. Fig. 1은 기존의 해석방법과 본 연구를 통하여 제안된 해석방법의 차이를 보여준다.

2. 가상주행해석기법을 이용한 동응력해석

기존의 동응력 해석 방법은 ADAMS나 NASTRAN을 목적에 맞게 통합하여 적용해야 하므로 해석자가 다양한 분야에 대한 전문지식과 CAE S/W에 대한 깊이 있는 지식을 갖추지 않고서는

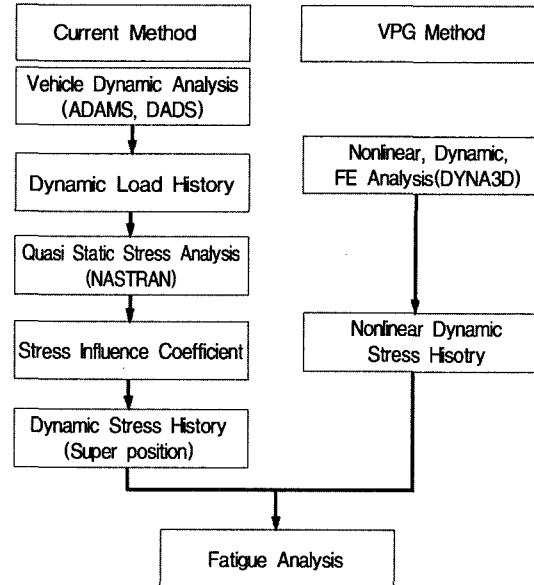


Fig. 1 The relative merits of the VPG approach to computation in fatigue prediction

잘못된 결과를 얻게되는 오류를 범할 수 있을 뿐만 아니라 재해석하는 과정에서 인터페이스(interface) 프로그램을 개발해야 한다는 것도 중요한 문제점중의 하나이다.

가상주행 해석기법은 기존의 해석기법과는 달리 동특성해석과 응력해석이 서로 다른 응용 소프트웨어를 사용하여 중첩하는 과정을 거치는 것이 아니라 오직 하나의 응용소프트웨어에서 한번의 해석만으로 원하는 부위에서의 동응력이력을 구할 수 있다.⁶⁾ 또한 재료의 비선형성, 노면의 형상, 노면과 타이어의 접촉, 타이어의 공기압, 부품간의 접촉 문제 등도 실제에 가깝게 모사하는 것이 가능하다.

해석대상 차량의 전륜 현가장치는 더블위시본형(double wishbone type)의 독립현가 방식이고 후륜 현가장치는 4개의 링크를 갖는 차축현가 방식이다. 그 중 연구 대상은 전륜 현가장치의 너클(knuckle)이며, 너클의 피로수명을 예측하기 위한 현가계와 타이어의 유한요소 해석모델은 1/4 모델로써 Fig. 2와 같다.

타이어는 실제에 가깝게 모델링하기 위하여

고무의 특성을 고려한 박판과 솔리드요소로 모델링하였다.⁷⁻⁹⁾ 그리고 휘일의 림에 끼워져 일체로 회전하며 노면으로부터의 충격을 흡수하고 또 노면과 마찰하여 자동차의 구동, 조향, 그리고 제동을 가능하게 한다. 현가계중 연구의 대상인 너클은 Fig. 3과 같이 1009개의 솔리드요소로 모델링하였으며 그외의 각종 링크들은 강체(보요소)로 모델링하였다.¹⁰⁻¹²⁾

동응력해석을 위하여 구성된 1/4모델의 시뮬레이션은 해석모델이 40km/h의 속도로 해석대상 노면을 통과하도록 하였다. 본 연구에 적용된 주행로는 MGA주행시험장의 내구시험로에서 데이터화한 파트홀 트랙(pothole track), 패이브로드(pave road) 및 리플 로드(ripple road)을 사용하였다.¹³⁾ 각각의 노면형상은 Fig. 4와 같다.

각 노면을 통과할 때의 차량의 거동은 Fig. 5와 같으며, 등가응력의 크기가 최대인 시점에서의

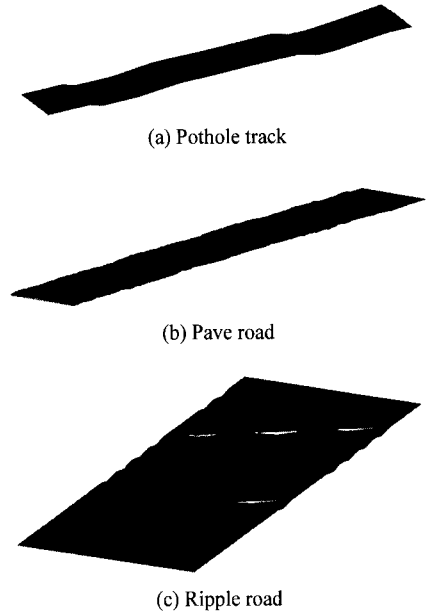


Fig. 4 Typical road surfaces

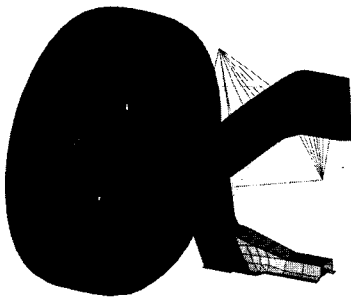


Fig. 2 VPG analysis model

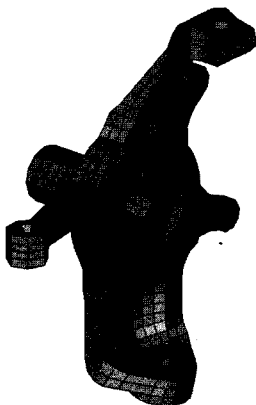


Fig. 3 Finite element model of the knuckle

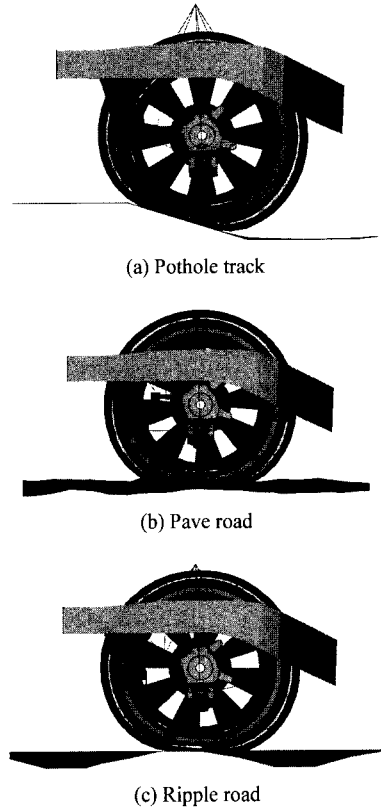


Fig. 5 Simulation of vehicle motions, passing the durability test road

너클의 응력분포도는 Fig. 6에 나타내었다. 응력 집중이 발생하는 위치는 전통적인 너클의 정적 응력해석 결과와 동일하였다.(Fig. 6의 a, b, c)

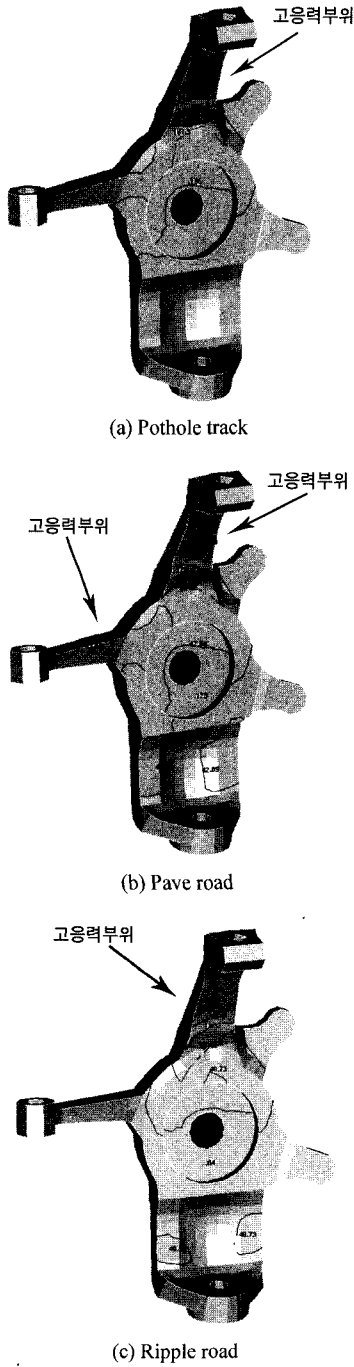


Fig. 6 Mises stress distribution of the knuckle

그리고, 이들 위치에서의 동응력이력을 피로 수명평가에 이용하였는데 Fig. 7에 보인 것과 같이 큰응력 진폭의 수는 파트홀 트랙, 페이브 로드, 리플 로드순으로 나타났다. 이와 같이 가상주행 해석방법은 해석대상 부품의 응력분포를 시간에 따라 구할 수 있을 뿐아니라 피로에 취약한 부분도 손쉽게 찾을 수 있다.¹⁴⁾

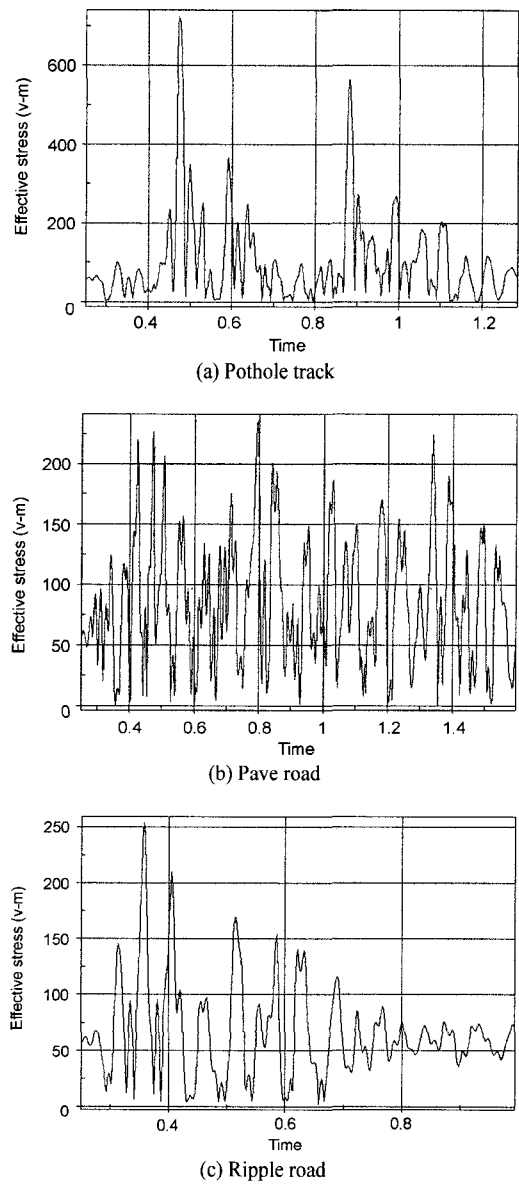


Fig. 7 Dynamic stress history for the VPG analysis, passing the durability roads at 40Km/h

3. 피로균열 생성수명 계산

차량구조물에서 피로균열은 대부분 노치(notch)와 같은 응력집중부위에서 발생하며 균열 생성수명과 균열이 진전하여 파괴에 이르는 균열진전수명으로 나뉜다. 구조물의 피로균열 생성수명을 예측하는 데는 load-life관계, stress-life 관계, strain-life관계 등을 이용할 수 있으나, 본 연구에서는 재료의 strain-life 관계(low cycle fatigue data)를 사용하여 노면의 형상이 피로수명에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고, 불규칙한 하중을 받는 차량구조물의 피로균열 생성수명을 계산하기 위하여 동응력이력을 유용한 일정진폭의 이력으로 바꿀 필요가 있는데 레인플로우(rainflow)법에 의한 사이클 카운팅(cycle counting)을 하였다. 가속내구해석시 평균응력이 피로수명에 미치는 영향은 크지 않으나 보다 정확한 해석을 위하여 식 (1)과 같은 Smith-Watson-Topper의 식을 사용하여 고려하였다.¹⁵⁾

$$\sigma_{\max} \epsilon_a E = (\sigma_f')^2 (2N)^{2b} + \sigma_f' E (2N)^{b+c} \quad (1)$$

여기에서 σ_{\max} 는 최대응력, ϵ_a 는 변형률진폭, E 는 탄성계수, σ_f' 는 피로강도계수, $2N$ 는 반복횟수(수명), b 는 피로강도지수, ϵ_f' 는 피로연화계수, c 는 피로연화지수이다.

피로균열이 가장 먼저 발생할 것으로 예측되는 부위에 대한 누적손상량(cumulative damage)은 식 (2)의 Miner's rule로 계산 가능하다.¹⁶⁾

$$nD = \frac{n}{N} \quad (2)$$

여기에서 n 은 반복횟수, D 는 피로손상량, N 은 재료의 피로수명이다.

Table 1은 주어진 노면을 각각 1회 통과하였을 때의 대상차량 너클의 저주기 피로해석 결과이다.

파트홀, 페이브, 리플 등 3가지 노면중에서 가장 큰 피로손상량을 주는 것은 파트홀이고 반복해서 30858회 통과하면 피로균열이 시작될 것으로 예측되었다. 이것은 1일 1회씩 40kph로 파트

Table 1 Fatigue analysis result

Road case	No. of reversals	Damage /Repeat	Repeats
Pothole	44	3.241e-5	30858
Pave	120	8.252e-8	12118480
Ripple	54	5.002e-8	19992802

홀을 통과하는 경우가 발생한다고 가정하면 84년 이상의 수명이 나오므로 일반적인 차량의 수명을 고려한다면 충분한 피로강도를 갖고있음을 알 수 있다. 그리고 페이브와 리플은 피로손상량이 무시해도 좋을 만큼 적은 양임을 알 수 있다. 특히 페이브와 리플은 파트홀에 비해 많은 reversal 수를 갖고 있지만 대부분이 낮은 진폭을 갖고 있어서 너클에 주는 손상이 거의 없는 것을 알 수 있었고, 파트홀의 경우에는 두개의 큰 진폭을 갖는 reversal이 대부분의 손상을 준다는 것도 알 수 있었다.

4. 결론

피로수명해석에 소요되는 시간과 비용이 절감되는 향상된 CAE 해석기술을 서스펜션 시스템에 적용하여 본, 본 연구의 내용 및 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 피로수명해석에 소요되는 시간(모델링, 계산, 데이터 interface), 비용(인원, 소프트웨어나 하드웨어등의 CAE tool)을 40%정도 절감할 수 있는 향상된 CAE 기술은 새시부품¹⁷⁾ 뿐만 아니라 서스펜션 시스템에도 적용이 가능함을 알 수 있었다.

- 노면의 형상, 타이어와 지면의 접촉, 재료의 비선형성, 부품간의 접촉 등과 같이 기존의 해석 방법으로는 불가능했던 것들을 비교적 쉽게 고려할 수 있으므로 해석결과의 신뢰성을 높일 수 있다.

- 설계변경이나 제품의 개발단계에서 피로수명의 예측을 위한 새로운 해석방법을 적극 활용한다면 엔지니어의 중요한 결정에 많은 도움을

줄 수 있다. 뿐만 아니라 시행착오를 줄일 수 있는 최적화된 프로토타입(prototype)을 제작할 수 있으므로 차량의 개발기간을 단축시킬 수 있다.

- 현재까지는 기본적인 해석방법의 개발과 CPU 시간의 절감을 위하여 단순화된 모델을 이용하였으나, 향후에는 전체차량을 모델링하여 모든 내구시험과정을 대체할 수 있는 해석기술을 개발하고자 한다.

참 고 문 헌

- 1) ADAMS/Flex Documentation kit, Version 11.0, Mechanical Dynamics ADAMS.
- 2) DADS Flex Manual, CADSI, P. O. Box 203, Oakdale, Iowa 52319.
- 3) K. Blakely, MSC/NASTRAN Basic Dynamic Analysis Users Guide, Version 68, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1993.
- 4) J. H. Ryu, H.-S. Kim, S. M. Wang, "A Method of Improving Dynamic Stress Computation for Fatigue Life Prediction of Vehicle Structure," SAE 971534, 1997.
- 5) LS-DYNA3D User's Manual, LSTC.
- 6) M. Papadrakakis, "A Method for the Automated Evaluation of the Dynamic Relaxation Parameter," Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 25, pp.35-48, 1981.
- 7) Z. H. Zhong, "Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems," Division of Solid Mechanics, Department of Mechanical Engineering, Linkoping University, Sweden, 1993.
- 8) A. Kamoulakos, B. G. Kao, "Transient Response of a Rotating Tire Under Multiple Impacts with a Road Bump using PAM-SHOCK," 1999.
- 9) A. M. Burke, O. A. Olatunbosun, "Contact Modelling of the Tyre/Road Interaction," Int. J. of Vehicle Design, Vol.18, No.2, 1997.
- 10) A. Tang, A. Farahani, T. Palmer, "Kinematic and Dynamic Nonlinear Finite Element Analysis of a Multibody Linkage System using LS-DYNA3D," 3rd International LS-DYNA3D Conference, Engineering Technology Associates, 1998.
- 11) J. S. Majcher, R. D. Michaleson, A. R. Solomon, "Analysis of Vehicle Suspensions with Static and Dynamic Computer Simulations," SAE 76183, 1976.
- 12) A. Matzenmiller, K. Schweizerhof, W. Rust, "Joint Failure Modeling in Crashworthiness Analysis," 2nd International LS-DYNA3D Conference, 1997.
- 13) eta/VPG Applications Manual, eta.
- 14) I. B. Chyun, "A CAE Network to Fatigue Life Prediction for a Vehicle Frame on the Basis of Computational Methodology," Ph.D. Thesis, Chonnam National University, Korea, 1998.
- 15) K. N. Smith, P. Watson, T. H. Topper, "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals, J.Mater., Vol.5, No.4, pp.767-778, 1970.
- 16) M. A. Miner, Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics, Trans, ASME, E, Vol.12, pp.A159-164, 1945.
- 17) G. S. Choi, H. K. Min, S. H. Paik, "Dynamic Stress Analysis of Vehicle Using Virtual Proving Ground Approach," SAE 2000-01-0121, 2000.