

차체 구조물의 피로수명 예측을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 방법에 관한 연구

이상범, 박태원**, 박종성***, 이선병****, 임홍재*****

A Study on Computational Method for Fatigue Life Prediction of Vehicle Structures

Sang Beom Lee, Tae Won Park, Jong Sung Park, Sun Byung Lee, Hong Jae Yim

ABSTRACT

In this paper a computer aided analysis method is proposed for durability assessment in the early design stages using dynamic analysis, stress analysis and fatigue life prediction method. From dynamic analysis of a vehicle suspension system, dynamic load time histories of a suspension component are calculated. From the dynamic load time histories and the stress of the suspension component, a dynamic stress time history at the critical location is produced using the superposition principle. Using linear damage law and cycle counting method, fatigue life cycle is calculated. The predicted fatigue life cycle is verified by experimental durability tests.

1. 서론

자동차의 초기설계에 있어서 차량을 구성하고 있는 여러 부품들의 피로수명을 예측하고 내구성능이 설계자가 원하는 범위 내에 들어가도록 하는 것은 필수적인 일이다. 차량부품에 대한 내구도 평가를 위해서는 주행시험, 실험실내구시험 등이 수행된다. 그러나 시작차를 이용한 내구시험결과가

설계에 피드백 되기까지는 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 과정을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용함으로써 차량 개발 초기의 리드타임과 실험횟수를 현격히 줄일 수 있으며, 내구도해석을 효율적으로 수행할 수 있다. 최근에 이러한 분야에 대한 많은 연구가 국내외적으로 이루어지고 있다⁽¹⁻³⁾.

본 연구에서는 차량부품의 동하중이력, 정적응력, 재료물성치 및 피로물성치를 이용하여 응력-수명법, 반복횟수계산법 그리고 선형손상이론⁽⁴⁾에 기초한 차량현가부품의 내구수명예측기법을 제시한다. 그리고 본 연구에서 제안된 피로수명 예측기법을 차량의 현가장치 부품에 적용하여 피로해석을

* 정회원, 국민대학교 자동차공학 전문대학원

** 정회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

*** 생산기술연구원

**** 국민대학교 대학원

***** 국민대학교 기계자동차공학부

수행하고 해석결과를 시험값과 비교함으로써 본 연구에서 제시된 피로수명예측을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 방법의 타당성을 검증해 보고자 한다.

2. 내구도해석 과정

Fig. 1은 본 연구에서 제시하는 내구도해석 과정을 나타내고 있다. 먼저 차량의 각 부품에 대한 동하중이력을 추출하기 위하여 Fig. 2에 나타난 차량 동역학모델을 일정한 속도로 VPG(virtual proving ground) 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다⁽⁵⁾. 이를 통하여 차량의 각 부품에 대한 동하중이력을 얻게 된다. 또한 내구도해석을 수행할 부품의 정적하중에 의한 응력을 상용유한요소해석 프로그램인 MSC/NASTRAN⁽⁶⁾으로 구한다. 그리고 마지막으로 내구도해석을 수행하기 위하여 동하중이력, 정적응력, 재료물성치, 피로물성치 등을 피로해석 프로그램인 MSC/FATIGUE⁽⁷⁾에 입력하여 각 부품에 대한 내구수명을 평가한다.

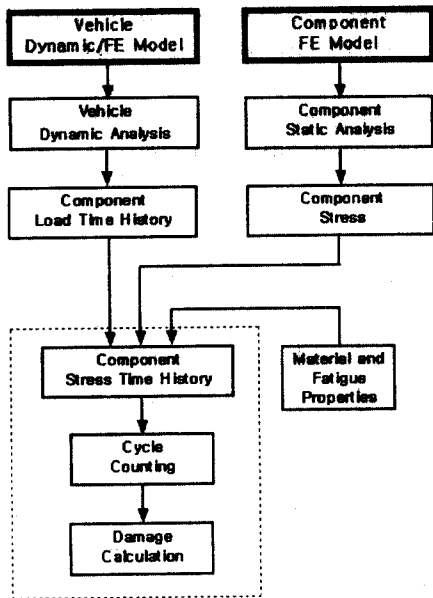


Fig. 1 Durability analysis procedure



Fig. 2 Flexible vehicle dynamic model

3. 동하중이력해석

본 연구에서 이용한 차량 현가장치 유한요소 모델을 Fig. 3에 나타내었다. 이 모델은 7000여 개의 요소와 9000여 개의 절점으로 구성하였다.

내구도해석을 하기 위해서는 동하중이력 데이터를 피로해석 프로그램에 입력해야 하는데, 자동차 내구도시험시 수행하는 방법으로 동하중이력해석을 수행하였다. 즉, 해석에 대한 경계조건으로 좌우의 트레일링 압과 차체의 연결부, 좌우의 후방 댐퍼와의 연결부, 스테빌라이저 바와의 연결부 등 총 5개 부위를 지지하였다. 그리고 하중조건으로 Fig. 4~5과 같은 사인과 형태(sine wave form)로 후방 현가장치의 양쪽 차륜과 연결되는 스핀들 위치에서 차체수직방향(z-방향)으로 $0 \pm 1.3W$ 의 하중을 가하였으며, 또한 차체길이방향(y-방향)으로 $0 \pm 2W$ 의 하중을 가하였다. 이러한 2개의 동하중이력선도가 피로해석의 입력데이터로 들어간다. 여기서, W는 부품에 가해주는 하중으로서 3518N이다.



Fig. 3 Finite element model of the rear suspension

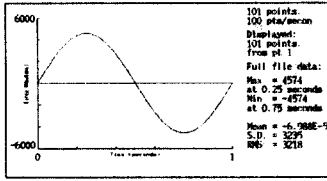


Fig. 4 Dynamic load time history of the spindle in the z-direction

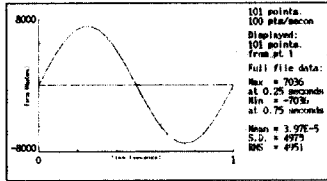


Fig. 5 Dynamic load time history of the spindle in the y-direction

4. 정적해석

응력이 피로해석의 입력데이터로 사용되므로 부품에 대한 정적해석을 수행하였다. 하중조건으로는 차체 내구시험시의 조건과 동일하게 현가장치의 양쪽 스프링들 부위에 차체의 수직방향과 차체의 길이방향으로 1N의 힘을 각각 가하였으며 이를 통하여 각 절점에 대한 응력을 구하였다.

Fig. 6과 7에 현가장치 너클의 응력분포에 대한 결과를 나타내었다. 이 정적해석 결과는 앞에서 구한 동하중이력과 함께 동응력을 계산하는 데 사용된다.

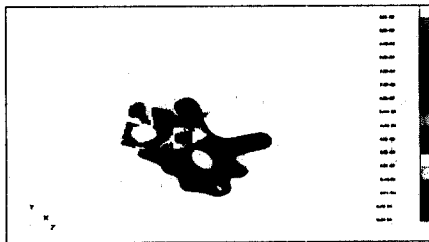


Fig. 6 Stress contour plot of the knuckle due to z-direction load

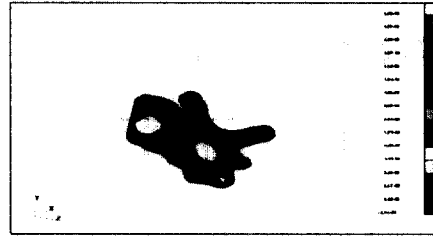


Fig. 7 Stress contour plot of the knuckle due to y-direction load

5. 피로해석

5.1 입력데이터

차체부품에 대한 전산응용 피로해석을 수행하기 위해서는 유한요소모델의 각 절점에 대한 응력 데이터, 동하중이력 데이터와 함께 재료물성치와 피로물성치를 입력해야 된다.

본 연구에서는 차체부품에 대한 물성치를 고려하여 SAE1035-169-CON을 사용하였으며 물성치를 Table 1에 나타내었다. 또한 재료에 대한 S-N 선도를 Fig. 8에 나타내었다.

Table 1 Material and fatigue properties used in fatigue analysis

Material SAE1035-169-CON	
Yield strength	410 MPa
Ultimate tensile strength	550 MPa
Elastic modulus	2.1E5 MPa
Stress range intercept	2137 MPa
Fatigue transition life	1E6 cycle
First fatigue strength exponent	-0.0872
Second fatigue strength exponent	-0.0872
R-ratio of test	-1

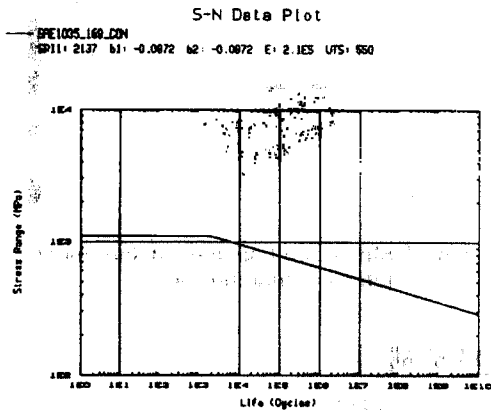


Fig. 8 S-N curve for SAE1035-169-CON

5.2 피로해석 과정

일반적으로 차량부품의 피로해석에는 피로수명이 길고 소성변형 영역이 상대적으로 작기 때문에 피로해석방법으로 응력-수명법을 주로 사용하고 있으며 크랙의 시작과 성장에 구분을 두지 않고 전체 파단수명을 기준으로 피로수명을 산출한다. 따라서 본 연구에서도 이 방법을 이용하여 현가장치 너클에 대한 피로해석을 수행하였으며, 그 과정은 다음과 같다.

먼저 식 (1)에서 보는 바와 같이 정적응력과 동하중이력을 곱하여 각 절점에 대한 동응력이력을 구한다. 만약, 정적해석시 가해진 하중이 단위 하중이 아닌 경우에는 가해진 하중 P_{fea} 로 나누어줌으로써 단위하중에 대한 응력으로 보정한다.

$$[\sigma_{ij}](t) = \frac{[\sigma_{ij}]P(t)}{P_{fea}} \quad (1)$$

복합하중이 작용하는 경우 식 (2)에서 보는 바와 같이 각각의 하중에 대한 응력성분을 서로 중첩시킨다.

$$[\sigma_{ij}]_s(t) = \sum_{s=1}^n [\sigma_{ij}](t) \quad (2)$$

한 점에 대한 동응력이력이 계산되면 레인폴로 집계(Rainflow counting)를 사용하여 각 절점에 대한 응력폭 $\Delta\sigma$ 와 평균응력 σ_m 을 갖는 여러 개의 사이클을 계산한다. 또한 위에서 구한 응력이력으로부터 Miner의 법칙을 사용하여 각각의 응력크기에서의 피로수명 주기수에 해당하는 응력을 계산하여 전체 손상을 합산한다. 이때 손상합이 1에 도달하면 파단에 이르는 것으로 평가한다.

5.3 피로해석 결과

현가장치 너클에 대한 정적응력, 동하중이력, 재료물성치, 피로물성치 등을 입력하여 피로해석을 수행하였다. 해석방법은 앞에서 설명한 응력-수명법을 이용하였으며, 생존확률을 99%로 설정하였고 평균응력효과는 Goodman 선도를 이용하였다. 그 밖의 피로해석에 대한 조건들을 Table 2에 나타내었다.

또한 Table 3에 해석결과인 전체손상과 그 역수인 피로수명사이클을 나타내었다. 이 결과로부터 가장 손상이 큰 절점은 z-방향 하중이 작용하는 경우 900번 절점이며, y-방향 하중이 작용하는 경우 2004번 절점인 것을 알 수 있다. Fig. 9에는 2004번 절점의 동응력이력선도를 나타내고 있다. 또한 Fig. 10~11에 피로해석 결과를 그래프로 나타내고 있으며, Fig. 12에서는 z-방향 하중과 y-방향 하중에 대하여 파괴가 일어날 수 있는 지점, 즉 피로수명 사이클수가 가장 작은 지점을 나타내고 있다.

그리고 피로파괴가 일어날 가능성이 있는 지점인 900번 절점과 2004번 절점에 대한 내구수명을 본 연구에서 제시한 내구도해석 결과와 함께 실험 결과를 Table 4에 비교하여 나타내었으며, z-방향과 y-방향에 대해 각각 1.003과 0.691의 피로수명비를 보이고 있다.

Table 2 Conditions for the fatigue life prediction analysis

Analysis type	S-N
Mean stress effect	Goodman
F E result	Stress
Stress/strain combination	Max. principal
Form of data	Min/max
Certainty of survival	99%
Material	SAE1035-169-CON
Surface finishing condition	No finish No treatment

Table 3 Computer simulation results for damage and fatigue life cycle

	Node number	Damage	Life cycle
z-direction load	900	4.823E-7	2.269E5
	7734	4.406E-6	2.269E5
	895	1.193E-6	5.227E5
	7742	1.193E-6	5.227E5
	894	1.231E-6	8.126E5
	7740	1.231E-6	8.126E5
	8951	7.778E-7	1.286E6
	864	4.823E-7	2.073E6
	1719	4.823E-7	2.073E6
1725	4.823E-7	2.073E6	
y-direction load	2004	9.591E-6	1.043E5
	9093	9.591E-6	1.043E5
	1818	7.778E-7	1.286E6
	8922	7.778E-7	1.286E6
	2104	2.929E-7	3.414E6
	9092	2.929E-7	3.414E6
	1822	1.007E-7	9.928E6
	8947	1.007E-7	9.928E6
	1719	3.104E-7	3.222E7
1806	3.104E-7	3.222E7	

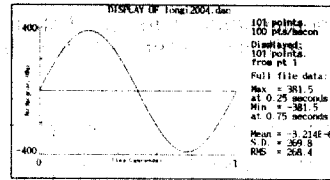


Fig. 9 Dynamic stress time history of node 2004

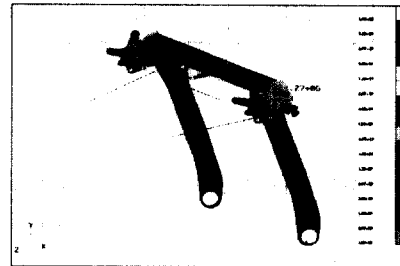


Fig. 10 Contour plot of the fatigue life due to z-direction load

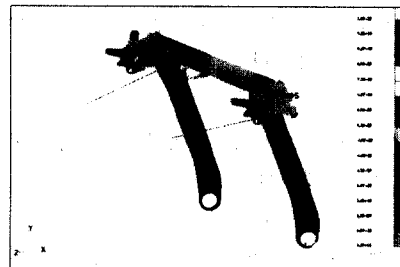


Fig. 11 Contour plot of the fatigue life due to y-direction load

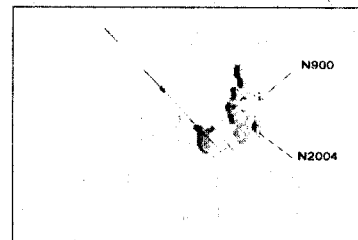


Fig. 12 Fatigue failure points

Table 4 Comparisons of the predicted fatigue life with experimental fatigue life

Unit : Cycle

	Experiment	Prediction	Ratio (Exp./Pre.)
z-direction load	2.276E5	2.269E5	1.003
y-direction load	0.721E5	1.043E5	0.691

6. 결론

본 연구에서는 차량부품의 내구수명예측을 위한 전산해석기법을 제시하였으며 수행된 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 차량부품의 동하중이력, 정적응력, 재료물성치 및 피로물성치를 이용하여 응력-수명법, 반복회수 계산법 그리고 선형손상이론에 기초한 피로수명 예측기법을 제시하였다.

2) 본 연구에서 제안된 피로수명 예측기법을 차량의 현가장치 부품에 적용하여 피로해석을 수행하였으며, 해석결과를 시험값과 비교함으로써 본 연구에서 제시된 해석방법의 타당성을 검증하였다.

추후 본 연구를 통하여 개발된 기법을 VPG 시뮬레이션을 통하여 추출된 차량의 동하중이력을 이용하는 내구수명예측기술을 개발할 계획이다.

참고문헌

(1) Landgraf, R.W. and Conle, F.A., "Vehicle Durability Analysis", Proceedings of the First Annual Symposium on Mechanical System Design in a Concurrent Engineering Environment, The University of Iowa, pp.239~259, 1989.

(2) Baek, W.K. and Stephens, R.I., "Integrated Computational Durability Analysis", Proceedings of the Second Annual Symposium on Mechanical System Design in a Concurrent Engineering Environment, The University of Iowa, pp.137~157, 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) Bannantine, J.A., Comer, J.J. and Handrock, J.L., *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, 1990.

(5) 임홍재, 이상범, 최재욱, 장성국, "차체의 유연성을 고려한 차량의 동하중 이력계산을 위한 컴퓨터 시뮬레이션", 대한기계학회논문집, 제19권, 제11호, pp.2962~2970, 1995.

(6) *MSC/NASTRAN User's Manual*, The MacNeal-Schwendler Co. 1991.

(7) *MSC/FATIGUE User's Manual*, The MacNeal-Schwendler Co. 1996.