

CAE 해석 기반 내구도 평가 방법에 대한 연구

주병현(KAIST 기계공학과), 남기원* (KAIST 기계공학과), 이병채(KAIST 기계공학과)

Study on the durability assessment based on CAE analysis

B. H. Joo(Mechanical Eng. Dept. KAIST), K. W. Nam* (Mechanical Eng. Dept., KAIST), B. C. Lee(Mechanical Eng. Dept. KAIST)

ABSTRACT

We evaluate the durability of vehicle chassis component under dynamic loadings. Since the fatigue analysis of vehicle component is based on the dynamic load history it must be done by dynamic analysis. But in case the vehicle component has natural frequencies much larger than reversing frequencies of load history, we can get small analysis errors by applying quasi-static analysis. So it is inefficient that we apply to the dynamic analysis for all the vehicle components.

In this research, we discuss the quasi-static analysis method which is appropriate for the fatigue analysis. And in case we can only perform the fatigue analysis based on dynamic analysis, we introduce more efficient method in the analysis time and hard disk storage.

Key Words : durability, inertia relief, static mode

1. 서론

최근 신차의 개발기간을 단축하고 신뢰성 높은 자동차를 만들기 위해 설계 단계부터 CAE 기반 설계를 많이 도입하고 있다. 이런 추세를 반영하듯 점점 더 많은 양의 작업들이 CAE 를 통해 이루어지고 있으며 가급적 실제적인 거동을 정확하게 예측하기 위해 많은 노력을 하고 있다. 특히 내구도 분야는 불확실성이 크기 때문에 더 많은 노력이 요구된다.

수명 평가와 관련하여 크게 3 개의 기본 단계로 나눌 수 있는데 첫째는 가장 어려운 작업으로 하중 이력을 결정하는 것이고 둘째는 구조물에 가해지는 하중과 변형의 관계를 결정하는 것이고, 셋째는 수명을 평가하는 것이다. 이 중 이 논문은 구조물에 가해지는 하중과 변형의 관계를 적절하게 결정하는 방법에 초점을 맞추고 있다.

본 논문에서는 피로 해석에 적합한 준정적 방법에 대해 논의하고 동적 해석을 기반으로 피로 해석을 해야만 하는 경우 시간과 저장 공간 측면에서 더 효율적인 기법을 소개하고 각각의 방법들을 LCA 모델과 RTB(Rear Torsion Bar)모델에 대해 적용

해 본다.

2. 본론

2.1 Inertia relief 해석

자동차 부품에 대해 피로 해석을 수행할 때 고 유진동수가 높은 부품에 대해서는 이전 시간의 거동이 이후의 변형에 큰 영향을 주지 않으므로 동적 해석을 판성력을 고려한 정적 해석으로 근사해 풀 수 있는데, 이를 준정적(quasi-static)해석이라 한다. 준정적 해석에서는 단위 하중에 의한 탄성 거동을 구하고 여기에 하중 이력을 곱하여 동적 탄성 거동 이력을 구한다. 여러 하중 방향에 대한 하중 이력이 주어졌을 때는 각각의 경우에 독립적으로 단위 정적 거동을 구하고 이를 선형 결합하여 시간 동적 거동을 근사한다. 이와 같이 준정적 해석을 할 때 중요하게 고려할 사항은 작용하는 하중과 모멘트가 정적 평형을 이루고 있는가를 평가하는 것이다. 만약 정적 평형을 이루지 못한다면 가속도가 생기게 되며 이 경우 반드시 inertia relief 를 고려한 준정적 해석을 해야 한다. 즉, 고정된 구조물에 힘을 가하는 경우 모든 힘이 탄성 변형에 기여하지만, 그렇

지 않고 구조물이 이동하는 경우 힘은 탄성 변형뿐만 아니라 강체운동에도 영향을 미치게 되므로 움직이는 구조물에 대해 탄성 변형만을 고려하려면 강체운동에 의한 영향을 제거해 주어야 한다.

앞서 언급했듯이 **inertia relief** 해석은 강체 운동을 하고 있는 구조를 해석할 때 쓰이는 방법으로 대표적인 예는 도로를 주행하는 자동차, 공중에 떠 있는 비행기를 들 수 있다. 이들은 모두 외력이 결정되어 있으나 강체 운동을 구속할 변위 경계 조건이 주어지지 않은 경우이다. 이 해석에서 강체운동을 제거하기 위해 고정된 부분에서는 관성력과 외력이 균형을 이루므로 거기에서의 반력은 상쇄되어 없어지며 결과적으로 임의의 한 점을 고정해도 원래 문제와 구조적으로 동가가 된다. 여기에서 필요한 것은 모델의 질량과 특정한 절점을 기준으로 계산된 관성 모멘트이다. 피로 해석과 같이 구조물에 작용하는 응력이 중요한 경우 **inertia relief** 해석을 수행하면 구조물의 탄성변형에 영향을 미치는 응력만을 산출할 수 있다. 일반적으로 선형 정적 해석은 **inertia relief** 를 고려한 선형 정적 해석에 포함되기 때문에 하중과 모멘트의 정적 평형 여부에 관계없이 모든 경우에 **inertia relief** 해석을 수행하는 것이 바람직하다.

2.2 동적 해석

어떤 조건을 만족하는 경우 동적 해석을 단순화하여 정적 해석으로 근사할 수 있다. 즉 관성력과 감쇄력을 무시할 수 있는 경우 동적 해석은 정적 해석과 동가가 된다. 엄밀하게 동적 해석을 해야 하는 경우는 외부에서 작용하는 하중 이력의 반복 주파수가 구조물의 가장 낮은 고유진동수와 비슷할 경우이다. 그러나 동적 해석과 정적 해석 중에 어떤 것을 선택하는 것이 타당한지에 대한 절대적인 기준은 없다. 일반적으로 구조물의 가장 낮은 고유진동수가 외력의 진동수에 비해 대략 10 배 정도 클 경우 준정적 해석을 해도 오차가 작다고 알려져 있다.

유한요소법을 이용하여 응력의 시간응답을 구하는 동적 해석을 수행하기 위해서는 많은 시간과 저장 공간을 필요로 하기 때문에 가급적 정적 해석을 하는 것이 바람직하며 어쩔 수 없이 동적 해석을 수행해야 하는 경우 시간과 저장 공간을 고려해야 한다. 특히 피로 해석의 경우 동적 해석을 선행 작업으로 처리해야 하므로 그와 같은 제약 사항이 문제가 될 수 있다.

대표적인 동적 해석 방법으로는 동적 평형 방정식을 수치적분 하여 동적 반응을 요구되는 매 시간 간격마다 풀어내는 직접 적분방법과 동적 반응을 고유 모드의 선형결합으로 표현하는 모드 합성 방법이 있다. 물론 정확도 면에서는 컴퓨터 계산상의 오차가 영향을 끼칠 정도로 시간 간격을 작게 하지

만 않으면 직접 적분방법이 모드 합성 방법에 비해서 더 정확하다. 그러나 이 방법을 실제적인 문제에 적용하는 것은 거의 불가능하기 때문에 피로 해석에서는 대부분 모드 합성 방법을 사용한다.

그러나 모드 합성 방법을 사용한다 할지라도 요소 또는 절점 별로 응력에 대한 이력을 얻어내는 것은 많은 시간이 소요되므로, 유한요소 해석에서 직접 응력에 대한 이력을 얻어내는 것은 바람직하지 않다. 고유 모드의 선형 결함으로 동적 반응을 근사할 수 있듯이 피로 해석을 위해 필요한 응력 또는 변형률에 대한 이력을 효과적으로 얻어내기 위해 고유 모드의 응력을 구하고 이를 선형 결함하여 구조물의 응력에 대한 이력을 구하는 방법을 적용한다. 즉, 각각의 고유 모드에 대응하는 응력을 얻어 낸 후 모드 합성 해석을 통해 외부에서 가해지는 하중 이력을 적용하고 각각의 고유 모드에 대한 변위의 시간 이력을 얻어낸다. 그리고 고유 모드의 응력과 변위에 대한 시간 이력을 적절히 결합하여 최종적으로 응력에 대한 시간 이력을 얻어낼 수 있다. 최종적인 작업은 상용 피로 해석 프로그램을 이용하여 수행하였다.

일반적으로 동적 해석에 기반한 피로 해석이 준정적 해석에 기반한 것보다 더 정확하기 때문에 본 논문에서는 고유진동수가 높아 준정적 해석을 해도 무방한 모델과 그렇지 않은 모델에 대해 피로 해석 결과를 비교, 평가 하였다. 또한 모드 합성 방법에서는 사용되는 모드의 개수에 따라 수명이 다르게 산출되므로 사용되는 모드의 개수에 대한 피로 수명을 분석하였다.

2.3 고유진동수가 높은 자동차 부품의 피로 해석

그림 1 과 같은 LCA(Lower Control Arm)는 외부에서 가해지는 하중 이력의 반복 주파수보다 LCA 의 고유진동수가 훨씬 크기 때문에 피로 수명을 평가할 때 **inertia relief** 를 고려한 준정적 해석도 타당한 결과를 주는 것으로 알려져 있다. 이 모델에 대해 피로 해석을 수행하기 위한 하중 이력은 A 부분에 가해지는 3 개의 볼 조인트 하중, 부쉬 부분인 B 와 C 부분에 가해지는 각각 3 개의 하중과 3 개의 모

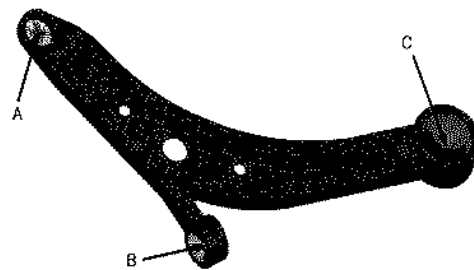


Fig. 1 LCA finite element model for fatigue analysis

Node	Surface	Life (Repeats)	Damage
1	3306 Bottom	5233	1.91104E-4
2	2728 Bottom	10567	9.46371E-5
3	5179 Bottom	11777	8.49078E-5
4	3307 Bottom	17172	5.8233E-5
5	5667 Bottom	28030	3.56653E-5

Fig. 2 Fatigue analysis results using critical plane method

멘트 등으로 총 15 개의 하중 이력이 작용된다. 이 때 B 와 C 부분에서의 반력과 모멘트에 대한 이력은 다물체 동역학 해석을 통해 얻어낼 수 있다.

하중 이력이 모두 15 개 이므로 국부 변형률 방법 중 다축상태의 피로를 고려할 수 있는 임계 평면법(critical plane method)을 사용하여 피로 해석을 수행하였고 그림 2 에 피로 수명이 가장 낮은 순서로 결과를 나타내었다. 3306 번 절점에서 가장 수명이 작을 것으로 예측되었다.

LCA 는 가장 낮은 고유진동수가 700Hz 이상으로 외력의 반복 주파수에 비해 상당히 높기 때문에 준정적 해석으로도 충분히 정확한 피로 해석 결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 정적 해석에 비해 동적 해석이 더 정확하다고 알려져 있으므로 inertia relief 해석을 바탕으로 한 피로 해석의 타당성을 평가하기 위해 동적 해석을 기반으로 한 피로 해석 결과와 비교하였다. 표 1 에 동적 해석에 기반한 피로 해석 결과를 사용된 고유 모드의 개수에 따라 나타내었다.

표 1 에서 30 개의 고유 모드를 사용할 때를 제외하면 수명이 계속 줄어드는 것을 확인할 수 있고 수명이 준정적 해석 결과로 수렴해 가는 것을 알 수 있다. 그러나 50 개의 고유 모드를 사용해도 준정적 해석을 했을 경우와 비교해 수명이 2 배 정도 더 크게 나왔다. 더 많은 고유 모드가 사용된다면 점점 수명이 줄어들어 준정적 해석 결과와 거의 같아질 것이라는 것을 예측할 수 있지만 이런 방식으로 비교하는 것은 매우 비효율적이기 때문에 바람직하지 않다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 고유 모드에 정적 모드를 추가하여 사용하는 방법을 도입하였다.

Table 1 Fatigue analysis results at node No.3306 according to the number of modes

Number of modes	Fatigue life(Repeats)
10	1.145×10^7
20	1.574×10^5
30	1.714×10^5
40	2.368×10^4
50	1.144×10^4

Table 2 Fatigue analysis results at node No. 3306 according to the number of modes including static modes

Number of used mode (Eigen mode + Static mode)	Fatigue life (Repeats)
10 + 15 = 25	20933
20 + 15 = 35	9943
30 + 15 = 45	7120
40 + 15 = 55	6164

이 정적 모드를 사용할 경우 특히 하중이 작용하는 주변에서의 반응을 적절히 표현할 수 있다. LCA 와 같은 부품은 15 개의 하중이력이 작용하기 때문에 이에 대응하는 15 개의 정적 모드를 가지게 되며 이 정적 모드를 고유 모드에 추가하는 과정에서 직교화를 수행하여 고유 모드의 특징인 M-직교화를 유지하게 된다. 이런 방법으로 구해진 정적 모드의 특징은 진동수가 매우 크다는 것이다. 정적 모드를 추가시켜 얻은 피로 해석 결과는 표 2 와 같다. 이 표에서 정적 모드를 추가할 경우 더 적은 개수의 모드로도 inertia relief 를 고려한 준정적 피로 해석 결과와 거의 같아지는 것을 확인할 수 있다.

2.4 고유진동수가 낮은 자동차 부품의 피로 해석

그림 3 과 같은 RTB 모델은 가장 낮은 고유진동수가 27Hz 정도로 낮기 때문에 하중의 반복주파수와 비슷한 크기가 된다. 그러므로 RTB 에 대한 피로 해석을 수행하기 위해서는 반드시 동적 해석에 기반을 두어야 한다. 그러나 LCA 모델에서 했던 것처럼 inertia relief 해석에 기반한 피로 해석과 동적 해석에 기반한 피로 해석의 결과가 어떤 특성을 보이는지를 비교 평가해 보는 것은 의미 있는 일이다.

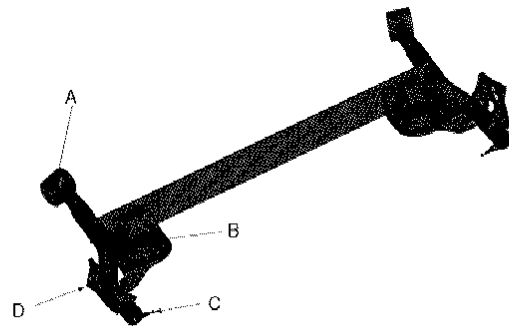


Fig. 3 Finite element model of Rear Torsion Bar

1	274 Bottom	791	1.26386E-3
2	275 Bottom	1014	9.86096E-4
3	10322 Bottom	1016	9.84397E-4
4	12060 Top	1262	7.92309E-4

Fig. 3 Fatigue analysis results using critical plane method in case of applying inertia relief

2.4.1 inertia relief 에 기반을 둔 RTB 의 피로 해석

그림 3에서 알 수 있듯이 RTB의 inertia relief 해석 모델에는 왼쪽과 오른쪽에 각각 4 곳씩 총 8 곳에 하중이 작용된다. 왼쪽에 대해서 A는 차체와 연결되는 부분, B는 스프링에 의해 힘을 받는 부분, C는 댐퍼에 의해 힘을 받는 부분, D는 휠에 의해 힘이 가해지는 부분으로 각각에 3개의 힘과 3개의 모멘트가 가해지므로 총 48개의 하중이력이 가해지게 된다. 임계 평면법을 적용한 결과를 그림 3에 나타내었다.

2.4.2 모드 합성 방법에 기반을 둔 RTB 의 피로 해석

LCA와는 달리 RTB의 고유진동수는 외력의 반복 주파수와 비슷하기 때문에 동적 해석에 기반을 피로 해석을 해야 한다. 동적 해석을 위해 시간 간격은 하중이 작용되는 시간 간격과 같게 하였으며, 여러 절점에 대해 모드 합성 방법에 사용된 고유 모드의 수에 따라 피로 해석 결과가 어떻게 달라지는지를 그림 4에 나타내었다.

이 결과에서 특징적인 것은 크게 세가지 정도이다. 첫째는 inertia relief 해석을 기반으로 한 피로 수명에 비해 모드 합성 방법에 기초를 둔 피로 수명이 1/20 정도로 줄어든 것이다. 이것은 그림 5에서 보면 알 수 있듯이 피로 수명이 가장 짧게 예측되는 274번 절점에 대해 절대 주응력의 변동을 보면 모드 합성 방법의 응력이 훨씬 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 RTB의 고유진동수와 외력의 반복 주파수가 비슷하기 때문에 생기는 응력의 증폭현상이다. 둘째는 10개의 모드만을 사용해도 30개의 모드를 사용하였을 경우와 피로 수명의 차이가 거의 없다는 것이다. 이것은 하중의 반복 주파수 영역과 비슷한 고유진동수가 7번째와 8번째이기 때문이다. 그러므로 높은 고유진동수는 피로 해석에 거의 영향을 주지 못하며 정적 모드를 추가해도 피로 해석 결과는 거의 변함이 없을 것이다. 마지막으로 피로 손상이 가장 클 것으로 예측되는 부분이 바뀐다는 것이다. 즉 inertia relief 해석에서는 274번 절점에서 가장 손상이 클 것으로 예측되었지만 모드 합성 방법에 기반을 둔 피로 해석에서는 2012번 절점의 손상이 더 크다고 예측되었다.

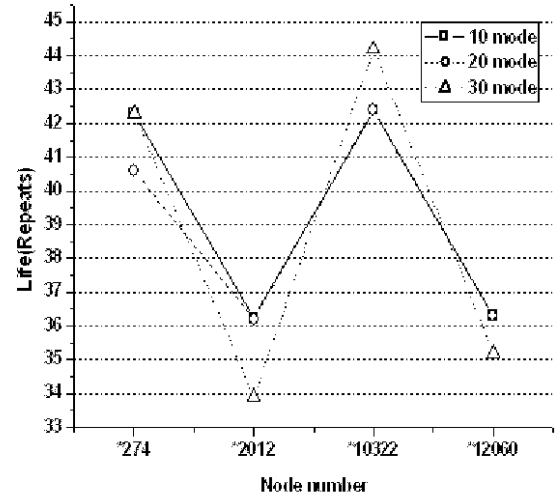


Fig. 4 Fatigue analysis results according to the number of used modes

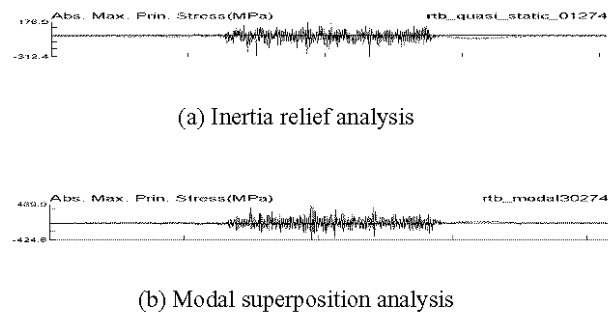


Fig. 5 Comparison of stress history in node 274

3. 결론

본 논문에서는 준정적 해석에 기반한 피로 해석과 동적 해석에 기반한 피로 해석에 대해 여러 가지 고려할 점을 고찰해 보고 이에 대한 해결책을 제시하였다. 피로 해석의 초기 단계에서 하중 이력의 반복 주파수를 분석하고 이를 해석하고자 하는 자동차 부품의 고유진동수와 비교해 고유진동수가 상당히 큰 경우 반드시 inertia relief를 고려한 준정적 해석을 수행해야 한다. 이때 다물체 동역학을 통해 필요한 반력과 모멘트를 구할 수 있다. 또한 동적 해석에 기반한 피로 해석 결과로부터 inertia relief 해석의 타당성을 확인할 수 있었고 모드 합성 방법을 수행할 때 정적 모드를 고유 모드와 함께 사용함으로써 적은 개수의 고유 모드만으로도 충분히 수렴된 피로 수명을 예측할 수 있었다. 또한 고

유진동수가 하중 이력의 반복 주파수와 비슷한 경우 반드시 동적 해석을 수행해야 하며 준정적 기반 피로 해석에 비해 수명이 훨씬 낮아지는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 동적 해석에 기반한 피로 해석 기법으로 시간과 저장 공간 면에서의 효율을 고려하여 정적 모드를 함께 이용하는 모드 합성 방법이 가장 바람직하다고 판단하였다. 특히 정적 모드의 사용은 고유 모드의 개수가 많이 필요하게 되는 모드 합성 방법의 단점을 어느 정도 해결해 줄 수 있다. 높은 고유진동수를 가진 자동차 부품에 대해서는 **inertia relief** 를 적용한 피로 해석이 모드 합성 법과 거의 같은 결과를 나타냈고, 모드 합성 법은 고유진동수가 낮은 모델에 대해 동적 특성을 반영하는 피로 해석 결과를 보였다.

참고문헌

1. M. Haiba, D.C. Barton, P.C. Brooks, and M.C. Levesley, "Review of life assessment techniques applied to dynamically loaded automotive components", *Computers&Structures*, vol.80, pp.481-494, 2002
2. P. Heyes, J. Dakin, and C.St. John, "The assessment and use of linear static fe stress analyses for durability calculations", *SAE Paper*, No.951101, 1995
3. M. Anvari, and B. Beigi, "Automotive body fatigue analysis. Inertia relief or transient dynamics?", *SAE Paper*, No.993149, 1999
4. E. Chase, "Truck durability evaluation through computer simulation", *SAE Paper*, 2001-01-2763, 2001
5. F.A. Conle ,and C.W. Mousseau, "Using vehicle dynamics simulations and finite-element results to generate fatigue life contours for chassis components", *International Journal of Fatigue*, Vol.13, No.3, pp.195-205, 1991
6. nSoft V5.3 Online Documentation