

피로해석 소프트웨어 개발 및 응용

• 최 병 익 ■ 한국기계연구원 구조연구부, 책임연구원
e-mail : choibi@kimm.re.kr

이 글에서는 기존의 상용 유한요소해석 및 전·후처리 소프트웨어 등과 통합된 시스템을 이루어 기계부품 또는 구조물의 피로수명을 예측하기 위한 범용 피로해석 소프트웨어에 대해 소개하고자 한다.

국내의 현황

피로(fatigue)는 반복하중에 의해 손상(damage)이 누적되어 균열이 발생, 성장되어 파단에 이르는 현상이며, 소재의 인장강도 또는 항복강도 이하의 매우 낮은 응력에 의해서도 파손이 발생할 수 있어 그 중요성이 널리 인식되고 있다.

반복하중을 받는 기계구조물 또는 부품의 피로해석, 설계를 위해서는 취약부위에서의 응력 상태를 파악하는 일이 무엇보다도 우선되어야 한다. 실험으로 응력과 변형률을 구하는 방법은 설계의 초기 단계에서 적용이 불가능하고, 센서의 크기 등의 제한이 많아 최대 응력의 계측이 어려운 등의 단점이 있다. 유한요소해석에 의한 구조응력해석 방법은 최근 컴퓨터의 발전과 더불어 비약

적으로 발전을 거듭하고 있으며, 컴퓨터 응용 설계 시스템과 연계하여 쉽고 빠르게 사용할 수 있도록 개발되고 있어 통합 설계 시스템으로서의 CAE 환경 구축을 위한 기술개발이 더욱 활발히 진행되고 있다.

피로해석 기술도 설계를 위한 CAE 기술 발전과 궤를 같이 한다. 피로수명예측 소프트웨어는 설계 시스템의 유한요소해석 결과를 바탕으로 피로수명 또는 피로강도를 산출하며, 결과적으로 제품의 개발기간 단축, 경량화 설계 등을 달성할 수 있게 한다.

외국의 경우 피로수명을 예측하기 위한 소프트웨어의 개발은 매우 활발하게 이루어지고 있다. 영국(nCode 사의 nSoft)[1], 독일(LMS 사의 TecWare)[2], 오스트리아(Steyr 사의 FEMFAT) 등에서는 피로해석을 수행하는

소프트웨어가 개발되어 상업화되었으며, 유럽의 일부 자동차 업계에서는 자체 개발한 소프트웨어를 사용하고 있기도 하다. nSoft는 많은 양의 하중이력 데이터를 처리하는 데 우수하며, 단축뿐만 아니라 다축하중에 대한 피로수명 예측도 가능하다. TecWare는 하중 이력의 사이클 계수 특히 다축하중에 대해 장점을 가지고 있다. FEMFAT은 소재 DB가 풍부하고, 용접부에 대한 해석을 지원하며, 자동차 부품 설계에 적합하다. 현재 국내에도 자동차, 항공업 업계를 중심으로 이들 상용 코드가 도입되어 사용되고 있다.

국내의 경우 한국기계연구원에서는 변동하중하에서의 피로설계 연구[3], 응력집중을 고려한 축류의 피로수명 향상에 관한 연구[4] 등을 통하여 단축에서 특정부품의 피로수명예측을 위한 소프트

웨어를 개발하였으며, 한국과학기술원과 성균관대학교에서도 단축에서의 피로수명을 예측하기 위한 피로수명예측 소프트웨어를 개발하였다. 다축하중 하에서의 피로수명예측을 위한 소프트웨어의 개발은 아직 이루어지지 않고 있으며, 철도차량의 대차프레임 해석[5, 6] 등 일부의 다축피로해석 코드 개발과 응용 사례가 있는 정도이다.

피로 해석 소프트웨어 개발

본 연구실에서는 기존의 상용 유한요소해석 및 전·후처리(pre/post-processing) 소프트웨어 등과 통합된 시스템을 이루어 기계부품 또는 구조물의 피로수명을 예측하기 위한 범용 피로해석 소프트웨어(FAS : Fatigue Analysis System, 이하 FAS)를 개발하였으며, 이에 대해 소개하고자 한다.

FAS의 특징으로는 효율적인 해석을 위하여 취약 부위를 추출하여 피로해석을 수행하도록 하

였으며, 국내외의 피로 관련 물성을 광범위하게 모은 데이터베이스를 구축하여 해석에 필요한 물성치를 쉽게 이용할 수 있도록 하였다. 또한 다축하중 하에 대한 피로수명 예측이 지원되고, NASTRAN과 PATRAN 환경에서 사용될 수 있으며, 편리한 사용자 환경을 갖추고 있다.

피로 해석 소프트웨어의 구성 개발된 피로해석 소프트웨어 FAS는 메뉴 및 사용자와의 입출력을 포함하는 사용자 인터페이스 부분, 하중이력 분석 부분, 유한요소해석 결과분석 및 취약부 예측 부분, 물성 데이터베이스 부분과 이들을 통합하여 피로수명을 계산하는 수명예측 부분 등으로 구성되어 있다. 그림 1에 프로그램 구성의 개요를 보인다.

FAS는 CAD, CAE, 전후처리 소프트웨어, 해석 소프트웨어 등으로 구성되어 있는 기존의 설계 시스템과 통합되어 사용하도록 되어 있다.

최종 결과인 수명예측 결과는 개발된 FAS 전용 후처리기(post-processor)나 인터페이스를 통하여 상용 구조해석 프로그램의 후처리로 볼 수 있게 하였다.

하중이력

하중이력 분석 부분은 Filtering, FFT 등의 일반적인 신호처리 기능과 Race-

track, Rainflow 등 피로 수명 계산을 위한 하중이력 분석 기능을 포함한다. 그 결과는 그래픽 차트(graphic chart) 등을 통해 사용자가 직접 볼 수도 있도록 하였다.

다축 하중이력의 경우는 여러 개의 하중이력에 대해 하중 순서를 유지하면서 하중의 Peak와 Valley를 검출하고 하중이력을 축약하고, Biaxiality를 계산하여 비위상(non-proportional) 하중이력의 여부를 판별한다.

그림 2는 Rainflow 사이클 계수(cycle counting)를 수행한 결과를 보여준다.

유한요소해석 결과 및 취약부위 예측

FAS는 유한요소해석 결과와의 인터페이스 모듈(interface module)을 통해 요소, 절점, 물성, 응력 등의 정보를 읽어 피로수명 계산을 위한 취약부에 대한 모형을 구성한다.

피로는 일반적으로 물체의 표면에서 발생되는 현상이므로 FAS는 자유 표면에 대한 유한요소모형을 재구성하고, 등가응력 등 손상 정도를 대표할 수 있는 손상 파라미터를 정의하여 취약부위를 결정하여 효율적인 계산을 수행할 수 있다.[7, 8]

그림 3은 결정된 취약부를 전용 후처리에 의해 보여준다. 취약부 계산에는 절점수 및 그룹수를 설정할 수 있으며, 후처리를 통하여 확인 후 취사선택이 가능하다.

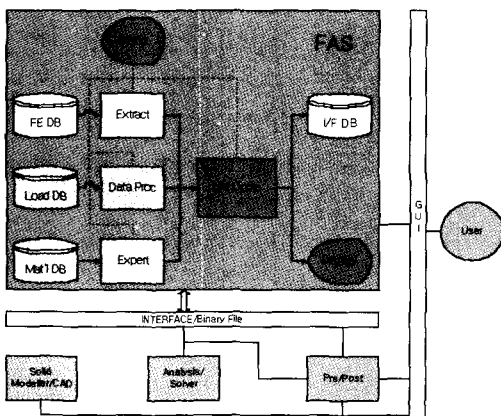


그림 1 FAS의 구성도

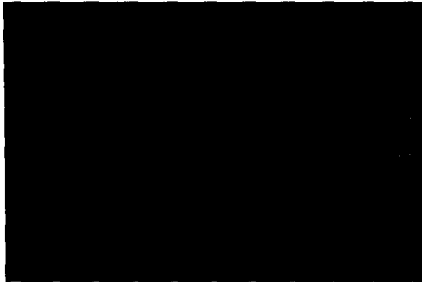


그림 2 사이클 계수

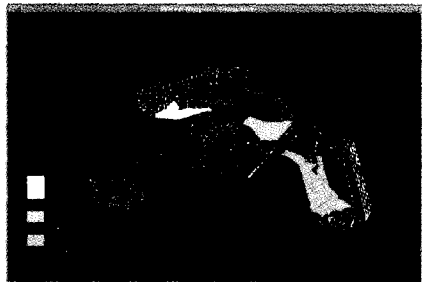


그림 3 취약부

물성 데이터베이스

FAS는 430종 이상의 소재에 대한 3,300개 이상의 응력(또는 변형률) - 수명 관계를 포함하는 풍부한 물성 데이터베이스를 갖고 있다[9]. 이들 데이터는 일본 재료학회의 금속재료 피로강도 데이터 북[10], 일본 기계학회의 금속재료 피로강도 설계자료 [11], 일본 경금속차량위원회 보고서[12]에서 수집하였으며, 금속재료대조핸드북[13]에 있는 유

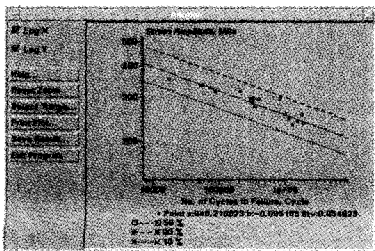


그림 4 소재물성 데이터베이스

사 규격 대조표를 데이터베이스에 추가하여 각 규격마다 다르게 사용되는 다양한 재료 기호 (KS, JIS, BS, ASTM 등)로 피로강도데이터를 검색할 수 있게 하였다.

수집된 피로강도 데이터를 검색, 추가, 수정 및 삭제할 수 있도록 구성되어 있으며, 데이터의 검색은 재료기호, 재료성질 및 시편형상, 피로 시험 조건 등 다양한 정보를 통하여 수행될 수 있다. 그림 4는 검색된 소재의 피로특성을 보여준다.

피로수명예측

FAS는 수정 Miner 가설, Corten-Dolan의 수정 S-N 곡선 방법, Freudenthal-Heller의 수정 S-N곡선 방법, Kikukawa - Jono -Song의 수정 S-N곡선 방법 등의 피로손상누적 가설을 고려한다[9].

평균응력의 영향을 고려하기 위해 고 되풀이 수 영역에서는 Soderberg, Goodman, Gerber, Morrow, S-W-T(Smith-Watson-Topper) 및 Smith가 제안한 방법을 이용하였고, 저 되풀이 수 영역에서는 Kikukawa 및 Sachs-

Weiss의 방법을 이용하였다.

응력집중에 의한 취약부위의 피로강도평가를 위해서는 Neuber의 법칙을 이용하였고, 응력집중 부위에서의 하중-변형률 관계곡선이 주어진 경우에는 하중-변형률 관계로부터 국부 변형률을 바로 구할 수 있다.

다축 피로수명예측의 경우는 등가응력 방법, 동위상(proportional) 변형률 - 피로수명 방법, critical plane 방법, 다축 안전계수 방법으로 구분된다.

등가응력 방법에는 Signed von Mises, Signed Tresca, Absolute principal stress 방법을, 그리고 동위상 변형률-피로수명 방법에 대해서는 S-W-T 방법과 Morrow 방법을 고려하였다. Critical plane 방법에 대해서는 Normal strain 방법, Shear strain 방법, S-W-T-Bannatine 방법, Fetami-Socie 방법을 이용하였다.

그림 5는 응력-피로수명 방법에 의해 피로해석을 수행하는 화면의 예를 보여준다.

피로해석 응용

개발된 프로그램을 이용하여 SAE 키홀(key hole) 시편 및 승용차용 너클(knuckle)의 피로해석을 수행하였으며, 상용 프로그램인 nSoft의 해석 결과와 비교하였다.

SAE 키홀 시편

SAE 키홀 시편에 suspension, transmission 및 bracket 하중이 작용하는 경우[14]에 nSoft

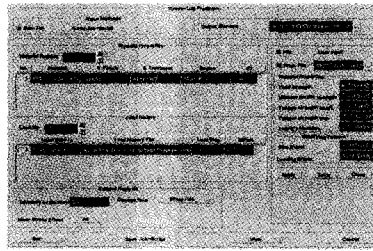
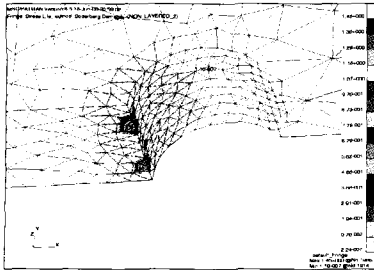
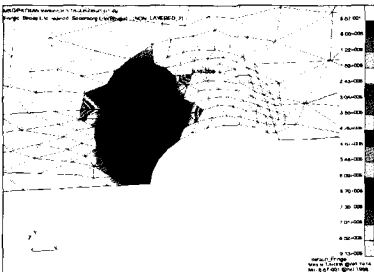


그림 5 응력-피로수명 방법



(a) 피로손상

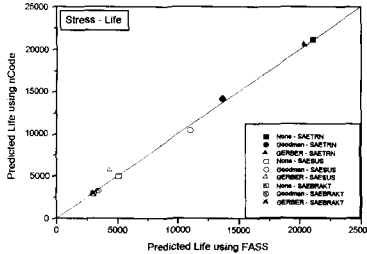


(b) 피로수명

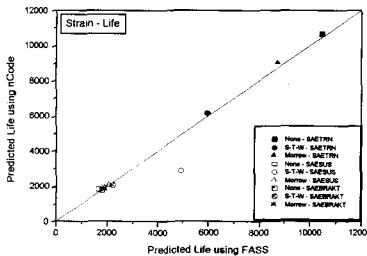
그림 6 피로해석 결과

및 FAS를 이용하여 피로수명을 예측하였다. 소재는 MAN-TEN 강으로 하였다. 그림 6은 해석 시간을 단축하기 위해서 자유표면 및 취약부위를 추출하고, 피로 해석을 수행하여 구한 손상분포 및 피로수명 분포를 각각 보여준다.

그림 7은 FAS 및 nSoft를 이용하여 구한 SAE 키홀 시편의



(a) 응력-피로수명



(b) 변형률-피로수명

그림 7 FAS와 nSoft에 의한 피로수명 예측 비교

피로수명 예측 결과를 보여 준다. 응력 - 수명 관계 및 변형률 - 수명 관계를, 그리고 하중이력은 transmission, suspension 및 bracket을 이용하였으며, 평균응력의 영향을 고려하기 위해서 여러가지 방법을 적용하였다.

거의 모든 경우에 대해 피로수명이 약 5% 이내에서 비교적 잘 일치하는 결과를 보임을 알 수 있다.

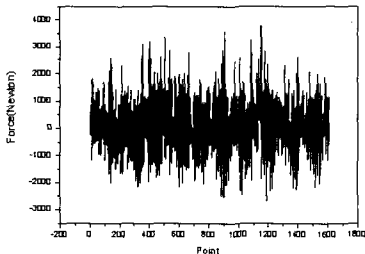
승용차용 너클

너클은 주행 중에 strut mount, lower ball joint, steering tie rod 및 wheel axis로부터 복합 다축 하중을 받는 대표적인 자동차용 부품이다. 여기에서는 RQC100 소재의 너클에 대한 해석을 수행하였다.

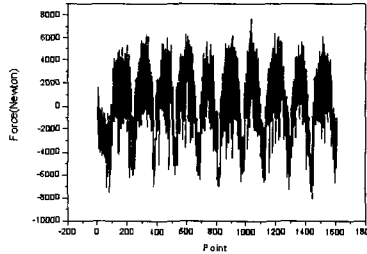
그림 8에서와 같이 strut mount에 작용하는 한 개의 하중 ((a))과 steering tie rod에 작용하는 두 개의 하중((b),(c))을 동시에 고려하여 해석하였다.

표 1은 FAS를 이용하여 자유표면을 추출하고, 피로수명을 계산하기 위한 취약부위를 추출한 결과이다. 전체 절점 중의 약 6.2%에 해당되는 취약부위의 절점에 대한 피로해석을 수행하게 되므로, 매우 효율적인 해석이 가능함을 알 수 있다. 특히 다축 피로해석과 같이 계산량이 많을 경우에는 더욱 효과적이다.

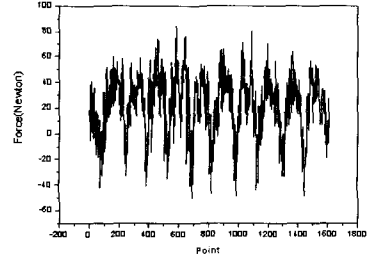
다축 하중이력을 받는 너클의 피로수명을 예측하기 위하여 critical plane 방법을 사용하였다. 피로해석은 Normal strain, S-W-T, Shear strain, Fetami-Socie 등 네 가지 방법에 의해 수행하였다.



(a) 하중 1



(b) 하중 2



(c) 하중 3

그림 8 Strut mount에 적용하는 하중

표 1 Knuckle의 유향요소모델

	전체 모델	표면추출 모델	취약부 모델
절점수	10,845	6,741	675

표 2 피로수명 예측 결과

피로 수명식	피로수명(blocks)
Normal strain	21,000
S-W-T	85,000
Shear strain	11,000
Fetami-Socie	12,000

표 2는 너클의 다축피로해석 결과를 보여주며, 그림 9는 FAS를 이용하여 Fetami-Socie 방법에 의해 구해진 피로수명 분포를 보여 준다. 해석결과 오른쪽 Steering tie rod와 연결되는 부위가 취약부로 예측되었다.

맺음말

기계부품 또는 구조물의 피로 수명을 예측하기 위한 범용 피로 해석 소프트웨어(FAS)를 개발하였으며, 특징은 다음과 같다.

첫째, 효율적인 해석을 위하여 자유표면 및 취약 부위를 추출하는 기능이 있다.

둘째, 소재 물성 데이터베이스를 구축하여 해석에 필요한 물성치를 쉽게 이용할 수 있다.

셋째, 다축하중에 대한 피로해석이 가능하다.

넷째, 상용 구조해석 프로그램과 통합환경에서 사용되며, 편리한 사용자 환경을 갖추고 있다.

개발된 소프트웨어를 이용하여 SAE 키홀 시편과 승용차용 너클

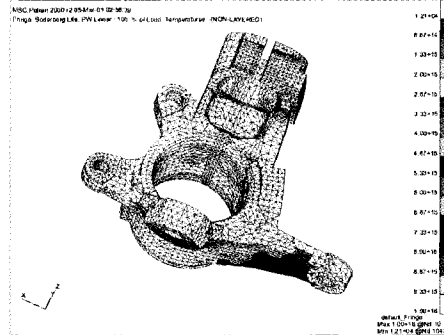


그림 9 너클의 피로수명

의 피로해석을 수행하였다. 키홀 시편의 경우 상용 프로그램인 nSoft를 이용한 해석 결과와 비교하여 약 5%의 오차 범위 내에서 피로수명이 잘 일치하였다. 다축하중 하의 승용차용 너클에 대해서는 취약부를 추출하여 전체 모델의 6.2%에 대해서만 계산함으로써 효율적인 해석을 수행할 수 있었다.

이 소프트웨어는 제품의 개발 기간을 단축하고 경량화 등 설계 작업의 생산성을 높일 수 있는 효과적인 도구로서 사용될 수 있을 것이다. 또한 이를 토대로 여러가지 기계부품이나 구조물에 대한 전용 피로해석 소프트웨어의 개발이 가능하게 되리라 기대한다.

[참고문헌]

1. nCode International Ltd., 1995, nSoft User Manual.
2. TecMath, 1997, Tecware for Fatigue User Manual.
3. 최병익 외, 1991, 변동하중 하에서의 피로설계 연구, 한국기계연구원 연구보고서, UCN 345-

1603.C.

4. 이상록 외, 1994, 응력집중을 고려한 축류의 피로수명 향상에 관한 연구, 한국기계연구원 연구보고서, UCN038-158.M.

5. 이상록 외, 1997, 피로 설계 및 내구성 평가기술 개발, 한국기계연구원 연구보고서, BSG043-481.M.

6. 최병익 외, 1997, 경전철용 관절대차 프레임 설계기술 연구, UCN040-531.M.

7. 김철언, 1998, 그래프론과 알고리즘, Postech Press.

8. A. V. Aho, J. E. Hopcroft, J. D. Ullman, 1982, Data Structures & Algorithms, Addison-Wesley.

9. 박준협, 1995, 피로강도평가의 전산화, 한국과학기술원 박사학위논문, KAIST.

10 JSMS, 1982, Data Book on Fatigue Strength of Metallic Materials, Vols. 1-5, The Society of Materials Science, Japan, Kyoto.

11. JSME, 1982, 피로강도의 설계자료, IV, 저주기 피로강도, JSME.

12. 일본 경금속차량위원회, 1984, 경금속차량위원회 보고서.

13. 이의종, 1995, 금속재료대조핸드북, 골드.

14. R. C. Rice, 1997, SAE Fatigue Design Handbook, 3rd ed., SAE, pp. 369 ~ 378.