

피로해석시스템 개발

최병익*, 이학주*, 한승우*, 김정엽*, 황기현**, 강재윤***

Development of a Fatigue Analysis Software System

B. I. Choi*, H. J. Lee*, S. W. Han*, J. Y. Kim*, K. H. Hwang**, J. Y. Kang***

Key Words: 피로 수명(Fatigue Life), 피로 손상(Fatigue Damage), 유한요소 해석(Finite Element Analysis), 데이터베이스(Data Base), 전문가시스템(Expert System)

Abstract

A general purpose fatigue analysis software to predict fatigue lives of mechanical components and structures was developed. This software has some characteristic features including functions of searching weak regions on the free surface in order to reduce computing time significantly, a database of fatigue properties for various materials, and an expert system which can assist any users to get more proper results. This software can be used in the environment consists of commercial finite element packages.

Using the software developed fatigue analyses for a SAE keyhole specimen and an automobile knuckle were carried out. It was observed that the results were agree well with those from commercial packages.

1. 서 론

모든 기계 구조물이나 부품 등은 정상적으로 사용되는 환경에서 파손되지 않도록 설계된다. 발전 설비나 대형 구조물 등 파손이 중요한 안전 문제로 이어지거나, 교통수단이나 수송기계 등 경량화가 중요시되는 경우에는 파손에 대한 강도는 더욱 심각하게 고려되어야 한다. 이러한 경우에는 반복하중을 고려한 피로설계가 이루어져야만 한다. 피로에 의한 파손은 소재의 항복이나 파괴가 발생하는 응력보다 낮은 응력에서 발생하기 때문이다.

피로설계에 있어서 실험적인 접근을 피할 수는 없겠지만 해석적인 예측 수단 역시 매우 중요하다. 피로실험은 시간과 경비 면에서 큰 부담이 되므로, 신속하고 비교적 정확하게 피로강도를 예측할 수 있는 소프트웨어는 설계자에게 매우

긴요한 도구가 된다.

강도 예측 수단으로서 가장 흔히 쓰이는 방법의 하나는 유한요소해석 소프트웨어를 이용한 구조해석이다. NASTRAN, ANSYS 등 선진국의 유명 소프트웨어들이 국내 현장에서도 대단히 많이 사용되고 있다. 지금까지는 피로해석 및 설계는 이들 소프트웨어를 이용하여 구한 응력해석 결과를 바탕으로 하여 피로해석 전문가에 의해 수행되어 왔다. 최근에는 상용 피로해석 소프트웨어도 개발되고 있으나, 아직도 아쉬운 점은 현재 상용화되어 있는 소프트웨어도 피로 전문가가 아니면 좋은 결과를 기대하기 어려운 점이다. 따라서 현장의 설계자나 피로 전문가 모두가 쉽게 활용할 수 있는 소프트웨어의 필요성은 절실하다.

본 연구에서는 기계부품 또는 구조물의 피로수명을 예측하기 위한 범용 피로해석 소프트웨어(Fatigue Analysis Software, 이하 FAS)를 개발하였다. FAS의 특징으로는 효율적인 해석을 위하여 취약 부위를 추출하여 피로해석을 수행하도록 하였으며, 피로수명예측 전문가 시스템을 도입하여 피로에 관한 전문 지식이 없는 사용자도 손쉽게

* 한국기계연구원

** 한라대학교

*** 한국과학기술원

비교적 정확하게 피로해석을 수행할 수 있도록 하였고, 국내외의 피로 관련 물성을 광범위하게 모은 데이터베이스를 구축하여 해석에 필요한 물성치를 쉽게 이용할 수 있도록 하였다. FAS는 NASTRAN과 PATRAN 환경에서 사용될 수 있으며, 편리한 사용자 환경을 갖추었다.

개발된 소프트웨어를 이용하여 SAE 키홀(Keyhole) 시편 및 승용차용 너클(Knuckle)의 피로 해석을 수행하였으며, nSoft 및 MSC/FATIGUE를 이용한 해석 결과와 비교하였다.

2. 피로 해석 소프트웨어

2.1 피로 해석 소프트웨어의 구성

개발된 피로해석 소프트웨어 FAS는 메뉴 및 사용자와의 입출력을 포함하는 사용자 인터페이스 부분, 유한요소해석 결과를 바탕으로 하는 취약부 예측 부분, 하중이력 분석 부분, 물성 데이터베이스 및 이들을 통합하여 피로수명을 계산하는 수명예측 부분 등으로 구성되어 있다. Fig. 1에 프로그램 구성의 개요를 보인다.

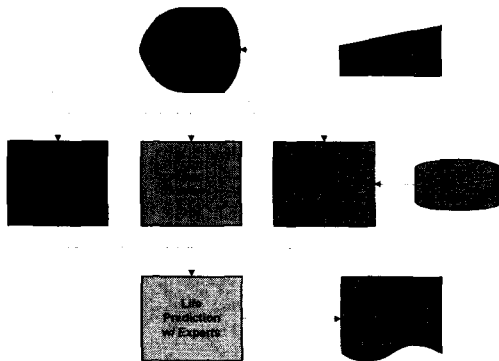


Fig. 1 Structure of fatigue analysis software

사용자 인터페이스는 Graphic User Interface를 바탕으로 Pop-up 및 Pull-down Menu 등을 통해 사용자의 편의성을 최대한으로 도모하였다. 하중이력 분석 부분은 Filtering, FFT 등의 일반적인 신호처리 기능과 Racetrack, Rainflow 등 피로 수명 계산을 위한 하중이력 분석 기능을 포함한다. 그 결과는 Graphic Chart 등을 통해 사용자가 직접 볼 수도 있도록 하였다.

최종 결과인 수명예측 결과는 상용 구조해석

프로그램의 Post-processor와의 Interface를 통하여 Post-processor로 볼 수 있게 하였다.

2.2 취약부위 예측

개발된 FAS의 해석 기능은 유한요소 모형 위에서 그에 대한 유한요소해석 결과를 바탕으로 이루어진다. FAS는 유한요소해석 결과와의 Interface Module을 통해 요소, 절점, 물성, 응력 등의 정보를 읽어 피로수명 계산을 위한 취약부에 대한 모형을 구성한다.

피로는 일반적으로 물체의 표면에서 발생한 균열이 진전하여 파손에 이르는 현상이므로 피로 해석의 대상으로 물체의 표면만을 고려할 수 있다. 또한, 물체의 표면 중에서도 취약 부위만을 추출하면 매우 효율적인 계산을 수행할 수 있다. FAS의 취약부위 예측 부분은 읽어드린 유한요소해석 정보로부터 자유 표면에 대한 유한요소 모형을 재구성하고, 이 모형에서 취약부위를 예측하는 기능을 갖는다. 취약부위는 등가응력 등 손상 정도를 대표할 수 있는 손상 파라미터를 정의하고, 그 값이 큰 절점들을 찾아 Cluster를 구성하고 이 Cluster들의 상황을 판단하여 최종 결정하도록 되어 있다[1, 2].

피로수명 계산에는 많은 시간이 소요되므로 취약부위만을 대상으로 하면 피로해석 시간을 획기적으로 단축할 수 있으나, 손상 파라미터를 어떻게 결정하느냐 하는 문제가 정확한 취약부위를 추출하는 가장 중요한 요소가 된다. 특히 다축 하중의 경우에는 Critical Plane에서의 최대응력 등으로 정의될 수 있지만, 이의 계산에 소모되는 시간이 많아 취약부위 추출의 의의를 잃을 수도 있다.

2.3 물성 데이터베이스

피로수명 계산에 반드시 필요한 선행 조건은 관련 물성 데이터를 확보하는 일이며, 따라서 물성 데이터베이스는 범용 피로해석 소프트웨어가 반드시 갖추어야 할 요소의 하나다. FAS도 430종 이상의 소재에 대한 3,300개 이상의 응력(또는 변형률) - 수명 관계를 포함하는 풍부한 물성 데이터베이스를 갖고 있다[3]. 이들 데이터는 일본 재료학회의 금속재료 피로강도 데이터 북[4], 일본 기계학회의 금속재료 피로강도 설계자료[5], 일본 경금속차량위원회 보고서[6]에서 수집하였으

며, 금속재료대조핸드북[7]에 있는 유사 규격 대조표를 데이터베이스에 추가하여 각 규격마다 다르게 사용되는 다양한 재료기호(KS, JIS, BS, ASTM 등)로 피로강도데이터를 검색할 수 있게 하였다.

수집된 균열발생수명 관련된 정보를 17개의 데이터 테이블로 구분하였다. 각 테이블들을 관계형 데이터베이스 형태로 연결하여 사용자가 손쉽게 피로강도 데이터를 검색, 추가, 수정 및 삭제할 수 있도록 구성되어 있다.

데이터의 검색은 재료기호, 재료성질 및 시편형상, 피로시험 조건 등 다양한 정보를 통하여 수행될 수 있다. 예를 들면, 재료기호에 JIS 규격을 입력하면 유사한 재료기호 KS, NF, DIN, ISO 등의 유사 규격들이 표시된다.

2.4 피로수명예측

피로수명은 반복하중에 의해 균열이 발생할 때까지의 피로균열 발생수명과 발생한 균열이 진전하여 파단에 이르게 될 때까지의 피로균열 진전수명의 2 단계로 크게 구분할 수 있다. 개발된 FAS는 피로균열 발생수명을 해석 대상으로 한다.

피로균열 발생수명은 피로손상누적 개념에 의해 계산된다. 개발된 FAS는 다음의 피로손상누적 가설을 고려한다[3].

- 1) Miner의 선형누적손상가설
- 2) 수정 Miner 가설
- 3) Corten-Dolan의 수정 S-N곡선 방법
- 4) Freudenthal-Heller의 수정 S-N곡선 방법
- 5) Kikukawa-Jono-Song의 수정 S-N곡선 방법

평균응력의 영향을 고려하기 위해 고 되풀이수 영역에서는 Soderberg, Goodman, Gerber, Morrow, Smith-Watson-Topper 및 Smith가 제안한 방법을 이용하였고, 저 되풀이수 영역에서는 Kikukawa 및 Sachs-Weiss의 방법을 이용하였다.

응력집중에 의한 취약부위의 피로강도평가를 위해서는 취약부위의 진응력 및 진변형률 이력을 구해야 하며, 이를 위해 되풀이 응력-변형률 곡선과 Neuber의 법칙을 이용하였다. 응력집중 부위에서의 하중-변형률 관계곡선이 주어진 경우에는 하중-변형률 관계로부터 국부 변형률을 바로 구할 수 있다.

피로균열 발생수명 예측해석에 필요한 관계식

으로는 하중의 크기가 대체로 작은 고 되풀이수 영역에서는 Basquin이 제안한 관계식을 이용하였으며, 하중의 크기가 대체로 큰 저 되풀이수 영역에서는 Coffin과 Manson이 제안한 소성변형률과 수명사이의 관계식을 이용했다.

2.5 피로손상평가 전문가시스템

피로해석에는 많은 종류의 물성치와 해석 모델, 평가 기법들이 요구되며, 해석을 수행하는 사람의 판단이 필요한 경우도 많다. 이 판단을 돕기 위한 전문가 시스템은 설계자가 효율적인 해석을 수행하는데 큰 도움이 될 것이다. 개발된 FAS에는 소재의 피로 물성 추정, 피로강도 수정계수 추론, 적정 해석 기법 추론 등의 세 가지 기능에 대한 전문가 시스템이 있다.

피로수명 계산에 요구되는 물성이 충분하지 않을 때에는 피로 관련 물성을 추론하는 기능으로부터 도움을 얻을 수 있다. 개발된 FAS는 간단한 인장시험으로 쉽게 얻을 수 있는 인장강도, 항복응력, 탄성계수, 단면수축율, 연신율, 경도 등으로부터 수명 계산에 필요한 피로 관련 물성들을 추정할 수 있는 다양한 기존의 연구 결과들을 제시하며, 사용자가 이의 판단에 어려움이 있으면 전문가시스템은 사용자가 가지고 있는 데이터의 보유정도에 따라 가장 적합한 추정식을 선택한다[3].

피로강도 수정계수는 표준시편에서 구한 피로한도와 어떠한 조건 하에서 구한 피로한도와 의 비로써 정의된다. 이러한 조건에는 대상 부위의 크기, 형상, 하중 형식, 표면 상태 등을 들 수 있다. 이들 수정계수의 선정 역시 사용자의 판단이 중요하나, FAS의 피로강도 수정계수 추론 모듈은 다음의 계수들을 추정할 수 있다.

- 1) 치수 효과 계수
- 2) 하중 형식 효과 계수
- 3) 표면 거칠기 효과 계수
- 4) 표면 처리 효과 계수
- 5) 노치 계수

치수효과는 재료의 등가지름을 구하는 Mischke의 방법과 일본기계학회에서 제안한 방법을 이용한다. 하중효과는 굽힘이나 비틀림, 또는 인장-압축의 경우 각각 피로한도가 다를 것을 고려하기 위한 계수로서, Bannantine, Landgraf 및 JSME의 방법들을 고려할 수 있다. 표면계수는 표면의

거칠기로 인한 응력집중으로 피로한도가 낮아지는 영향을 고려하는 계수로서, 연마(Mirror-polished), 연삭(Fine-ground), 절삭(Machined), 압연(Hot-rolled), 단조(as-forged) 등에 대하여 Juvinall, Noll & Lipson, JSME 등의 연구결과가 있다. 각각의 경우에 대하여 n 차 다항식으로 근사화하여 사용한다. 표면처리효과란 열처리나 단조, Shot Peening 등의 영향으로 피로한도가 변화되는 효과로서, 내부와 표면의 경도비로써 그 계수를 고려할 수 있다. 노치효과란 노치에 의한 응력집중에 의해 노치가 없는 시편의 피로한도보다 피로한도가 저하되는 영향을 나타낸다. 이는 응력집중의 정도와 재료의 성질에 의하여 결정되게 된다. Peterson, JSME 등의 방법들이 있다.

손상법칙 선택목들은 앞서의 5 가지의 피로 손상법칙 가운데에서 주어진 하중이력의 특성에 적절한 것을 선정한다. 또한, 국부 변형률 변환이나 사이클 계수 방법들도 여러 가지 중에서 적절한 것을 선정할 수 있게 한다.

3. 피로수명에 측

개발된 프로그램을 이용하여 SAE 키홀(Keyhole) 시편 및 승용차용 너클(Knuckle)의 피로 해석을 수행하였으며, nSoft 및 MSC/FATIGUE의 해석 결과와 비교하여 개발된 프로그램의 타당성을 검증하였다.

3.1 SAE 키홀(Keyhole) 시편

SAE 키홀 시편에 Suspension, Transmission 및 Bracket 하중이력이 작용하는 경우[8]에 nSoft 및 본 연구에서 개발된 FAS를 이용하여 피로수명을 예측하였다. MAN-TEN강의 물성을 사용하였으며, 자세한 해석 절차 및 해석 조건은 참고문헌 [9]에 나타나 있다.

Fig. 2는 SAE 키홀 시편의 솔리드모델 및 단위 하중이 작용할 경우에 유한요소해석 결과 얻어진 주응력분포를 보여주며, 노치 부근에서 최대응력이 발생됨을 보여 주고 있다. Fig. 3은 FAS의 Graphic User Interface를 보여 주며, Fig. 4(a), (b)는 해석 시간을 단축하기 위해서 자유표면 및 취약부위를 추출하고, 피로해석을 수행하여 구한 손상분포 및 피로수명 분포를 각각 보여준다. 최대응력이 발생된 부위가 취약부위로 추출되었

음을 알 수 있으며, 그림에서 흰색으로 표시된 표면은 취약부위가 아니므로 피로해석이 수행되지 않았다.

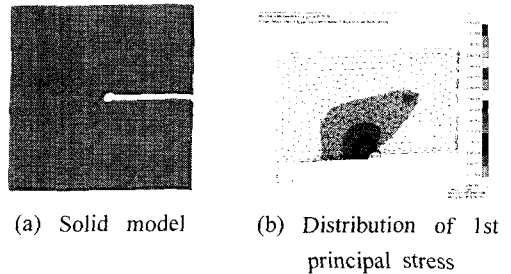


Fig. 2 SAE keyhole specimen

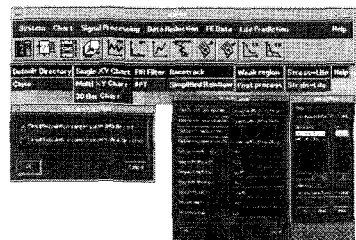
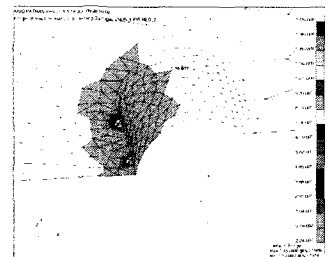
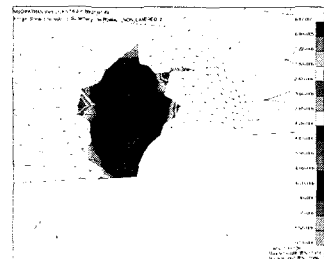


Fig. 3 Example of GUI



(a) Fatigue damage



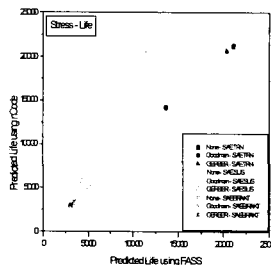
(b) Fatigue life

Fig. 4 Results of fatigue analysis

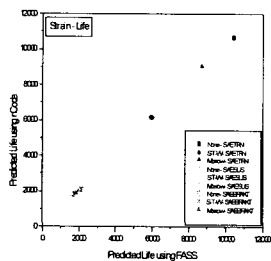
Fig. 5는 FAS 및 nSoft를 이용하여 구한 SAE 키홀 시편의 피로수명 예측 결과를 보여 준다.

응력 - 수명 관계 및 변형률 - 수명 관계를, 그리고 하중이력은 Transmission, Suspension 및 Bracket을 이용하였으며, 평균응력의 영향을 고려하기 위해서 여러 가지 방법을 적용하였다.

그림에서 Suspension 하중이력이 작용할 때, 평균응력을 고려할 경우를 제외하고는 피로수명이 약 5 % 이내에서 비교적 잘 일치하는 결과를 보임을 알 수 있다. 수명예측 결과가 비교적 차이가 나는 Suspension 하중이력은 평균응력이 압축으로 작용되고 있는 특성이 있으므로, 압축 평균응력이 피로수명에 미치는 영향에 대한 검토가 더욱 요구된다.



(a) Stress - Life



(b) Strain - Life

Fig. 5 Comparison of fatigue lives using FAS and nSoft for SAE keyhole specimen

3.2 승용차용 너클(Knuckle)

너클은 주행 중에 Strut Mount, Lower Ball Joint, Steering Tie Rod 및 Wheel Axis로부터 복합 다축하중을 받는 대표적인 자동차용 부품이므로 해석 대상 모델로 선정하였으며, 너클의 소재는 MAN-TEN강으로 가정하였다. 다만 FAS의 경우에는 다축하중에 대한 피로해석 모듈의 개발이 현재 진행 중에 있으므로 해석은 Strut Mount에 수직하중(Fig. 6)이 작용하는 단축피로에 대해서만 수행되었다.

Knuckle의 유한요소모형은 44,349 개의 요소와 10,845 개의 절점으로 구성되어 있으며, 사용된

요소는 4-절점 Tetrahedral Solid 요소이며, Spindle 이 장착되는 부위의 절점을 모두 구속하였으며, Engine Mount가 장착되는 부위에 하중을 부가하였다.

Fig. 7은 수직하중 1 kN이 작용하는 경우에 너클에 작용하는 주응력 분포를 보여 주며, "A" 부위에 위치한 절점 3,720에서 15.4 MPa의 최대 주응력이 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 FAS를 이용하여 자유표면을 추출하고, 피로수명을 계산하기 위한 취약부위를 추출한 결과를 보여 준다. 전체 절점 10,845 개 중에서 자유표면을 구성하는 절점의 수는 6,741 개이며, 취약 부위를 구성하는 절점의 수는 123 개로 추출되었다. Fig. 7에 나타난 최대 주응력이 발생되는 절점을 포함한 영역이 취약부위로 추출되었음을 알 수 있다. 전체 절점 중의 약 11 %에 해당되는 취약부위의 절점에 대한 피로해석을 수행하게 되므로, 매우 효율적인 해석이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 9는 FAS 및 MSC/FATIGUE를 이용하여 구한 손상분포를 보여 준다. 최대 손상 발생 위치 및 크기가 매우 잘 일치함을 알 수 있으며, Goodman 방법을 이용하여 평균응력의 영향을 고려한 결과 1 Block 동안에 누적된 손상은 약 2.61×10^{-5} 으로 계산되었다. Table 1은 FAS 및 MSC/FATIGUE를 이용하여 구한 피로수명 예측 결과를 보여 준다. 응력-수명 관계를 이용하였으며, 평균응력은 Goodman 방법과 Gerber 방법을 고려하였다. FAS 및 MSC/FATIGUE를 이용한 피로수명 예측 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

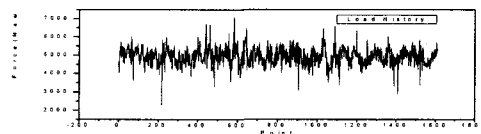


Fig. 6 Vertical loads on knuckle strut mount

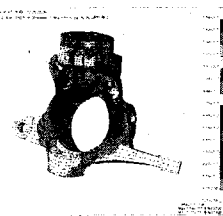


Fig. 7 Distribution of 1st principal stress (Vertical load = 1 kN)

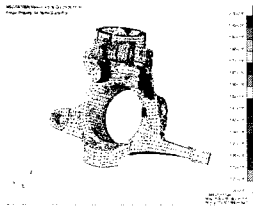
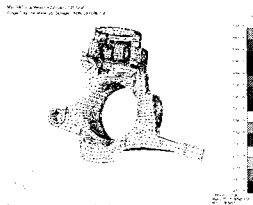
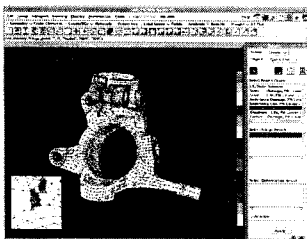


Fig. 8 Selected free surfaces and weak regions



(a) MSC/FATIGUE



(b) FAS

Fig. 9 Distribution of fatigue damage of knuckle

Table 1 Results of fatigue life prediction

Mean stress effect	FAS, blocks	MSC/FATIGUE, blocks
Goodman	3.83×10^4	3.89×10^4
Gerber	3.28×10^5	3.53×10^5

4. 결 론

1. 기계부품 또는 구조물의 피로수명을 예측하기 위한 범용 피로해석 소프트웨어(FAS)를 개발하였으며 특징은 다음과 같다.

첫째, 효율적인 해석을 위하여 자유표면 및 취약 부위를 추출하여 피로해석을 수행한다.

둘째, 피로수명예측 전문가 시스템을 도입하여 피로에 관한 전문 지식이 없는 사용자도 손쉽게

비교적 정확하게 피로해석을 수행할 수 있다.

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

넷째, 현재에는 NASTRAN과 PATRAN 환경에서 사용되며, 편리한 사용자 환경을 갖추고 있다.

2. 개발된 소프트웨어를 이용하여 SAE 키홀(Keyhole) 시편 및 승용차용 너클(Knuckle)의 피로해석을 수행하였으며, nSoft 및 MSC/FATIGUE를 이용한 해석 결과와 비교하였다.

피로수명을 예측한 결과, 약 5 %의 오차 범위 내에서 피로수명이 비교적 잘 일치하였다.

3. 다축하중 하에서의 피로수명예측, 다른 구조 해석 소프트웨어와의 Interface 등에 관한 연구는 현재 진행 중이다.

후기

본 연구는 2000년도 과학기술부 국책연구개발 기술사업인 엔지니어링 핵심공동 기반기술 개발사업의 일환인“피로해석 소프트웨어 시스템 개발” 사업 결과의 일부임을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] 김철언, 1998, 그래프론과 알고리즘, Postech Press.
- [2] A. V. Aho, J. E. Hopcroft, J. D. Ullman, 1982, Data Structures & Algorithms, Addison-Wesley.
- [3] 박준협, 1995, 피로강도평가의 전산화, 한국과학기술원 박사학위논문, KAIST.
- [4] JSMS, 1982, Data Book on Fatigue Strength of Metallic Materials, Vols. 1-5, The Society of Materials Science, Japan, Kyoto.
- [5] JSME, 1982, 피로강도의 설계자료, IV, 저주기 피로강도, JSME.
- [6] 일본 경금속차량위원회, 1984, 경금속차량위원회 보고서.
- [7] 이의중, 1995, 금속재료대조핸드북, 골드.
- [8] R. C. Rice, 1997, SAE Fatigue Design Handbook, 3rd ed., SAE, pp. 369 ~ 378.
- [9] 최병익, 2000, 피로해석 소프트웨어시스템 개발(III), 연차실적·계획서, 한국기계연구원.