

피로강도평가를 위한 통합 전산 시스템의 개발

박 준 협* · 송 지 호**

(2000년 6월 24일 접수)

Development of Integrated Fatigue Strength Assessment System

Jun-Hyub Park and Ji-Ho Song

Key Words : Fatigue Life Prediction(피로수명예측), Expert System(전문가시스템), Load History(하중이력), Fatigue Properties(피로성질)

Abstract

An integrated fatigue strength assessment system was computerized. The system developed consists of 9 modules: user interface, cycle counting, load history construction, data searching, fatigue properties estimation, fatigue data analysis, true stress and strain analysis, expert system for crack initiation life prediction, fatigue crack initiation and propagation life prediction. Fatigue strength database also was included in this system. The fatigue expert system helps a beginner to predict a fatigue crack initiation life in fatigue strength assessment. The expert system module in this system is developed on the personal computer by using C language and UNiK, an expert system developing tool. To evaluate the system, the results of test under variable loading of SAE and failure data from a field were analyzed. The evaluation show that the system provided fatigue life prediction within 3-scatter band and gave reasonable predictions. To get more accurate predictions of fatigue life without fatigue properties, we recommend utilizing the system along with the fatigue strength database.

기호설명

- $\Delta\epsilon$: Total Strain Range(전 변형률 폭)
- $\Delta\epsilon_e$: Elastic Strain Range(탄성 변형률 폭)
- $\Delta\epsilon_p$: Plastic Strain Range(소성 변형률 폭)
- E : Elastic Modulus(탄성계수)
- σ_f' : Fatigue Strength Coefficient(피로강도계수)
- b : Fatigue Strength Exponent(피로강도지수)
- ϵ_f' : Fatigue Ductility Coefficient(피로연성계수)
- c : Fatigue Ductility Exponent(피로연성지수)

1. 서론

구조물이나 부품의 안전성과 신뢰성을 확보하

기 위해서는 피로강도 평가가 필수적이다. 그러나 피로강도 평가는 많은 전문적인 지식을 필요로 하여 피로에 관한 전문가가 아닌 설계자 등이 수행하기에는 어려움이 많은 것이 일반적이다.

이에 따라 일반 설계자 등이 간단한 매뉴얼의 도움으로 손쉽게 피로강도 평가를 할 수 있도록 도와주는 소프트웨어들이 개발되어오고 있다. 이러한 피로수명예측을 위한 대표적인 소프트웨어로는 I-deas, nCode International Ltd사의 nSoft, nCode사의 라이선스에 의한 제품들, LMS사의 TecWare 등이 있다. 그 밖에 사내용 소프트웨어로 개발되어 판매되는 것들도 있다.

그러나 이러한 소프트웨어들은 피로에 관한 구체적인 이해 없이도 소프트웨어의 매뉴얼이 요구하는 사항들만 입력시켜주면 피로강도 평가가 가능하나, 소유하고 있지 않은 정보가 필요할 때 대안을 제시하여 주지 못하거나 또는 하더라도 매우 미미한 상태이다. 그리고 그러한 대안들이 어떻게 프로그램에서 활용되고 있는지는 블랙박스(black

* 회원, 삼성종합기술원
E-mail : jhpark63@channeli.net
TEL : (031) 280-8097 FAX : (031) 280-6955

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

box)로 되어 있기 때문에 사용자들은 결과에 대해 합리적인 판단을 할 수 없는 것이 보통이다.

대부분의 소프트웨어들이 피로균열 발생수명 예측방법으로는 변형률-수명 접근방법을 사용하고, 피로손상법칙으로는 수정 Miner 의 법칙을 채택하고 있거나, 경우에 따라 변동 하중의 영향 등을 고려하기 위해서 피로한도(fatigue limit)이하에서의 S-N 곡선을 수정할 수 있도록 하고 있으나,⁽¹⁻⁴⁾ 전문적인 지식을 필요로 하는 수정계수에 대한 확실한 정보가 없기 때문에 실제 사용자들은 거의 수정 없이 수정 Miner 법칙을 그대로 사용하는 경우가 많다.

이상과 같이 피로강도평가를 위한 현재의 각종 소프트웨어는 개선되어야 할 여러 가지 문제가 있다고 보이며, 또한 근래에는 피로강도평가 대상과 목적이 매우 다양해짐과 동시에 피로강도 평가를 수행하는 설계자, 연구자들의 지식 수준도 매우 다양해져, 예상되는 여러 조건에서 피로강도 평가를 합리적으로 수행할 수 있으며, 또한 그 수행 과정을 사용자가 비교적 잘 알 수 있는 피로강도평가 시스템이 필요해지고 있다.

본 연구에서는 이러한 피로강도평가 시스템을 저자 중의 한 사람이 개발한 피로관련 소프트웨어를 기초로 개발하기로 하였다.⁽⁵⁾ 다양한 대상에 대해 다양한 조건 하에서 피로강도평가를 수행하려면, 현재까지 제안되고 있는 사용 가능한 많은 방법들을 시스템에 저장하고, 필요에 따라 합리적으로 선택하여 사용할 필요가 있다. 그러나 이를 위해서는 피로에 관한 전문적인 지식이 필연적으로 요구되며, 사용자들이 이를 충족시킬 필요가 있으나, 언제나 충족시킬 수 있다는 보장이 없으므로, 이 연구에서 개발하는 시스템에서는 특히 피로균열발생을 대상으로 하는 평가문제에서는 전문가 시스템을 활용하여 이러한 문제를 해결하도록 하였다. 전문가 시스템은 인공지능 분야의 하나로, 현재 여러 분야에서 이용되고 있으며, 피로강도 평가에 대해서도 여러 연구자들에 의해 전문가 시스템의 구축 및 이용이 시도되고 있다.⁽⁶⁻¹¹⁾

본 논문에서는 구축된 전문가 시스템에 대해 상세하게 서술할 지면적 여유가 없으므로, 여기서 개략적인 내용을 먼저 설명해 두면 다음과 같다.

전문가 시스템 구축을 위한 도구로서의 셸로는, 사용자 및 다른 소프트웨어와의 인터페이스가 쉽고 또한 기술적인 지원이 좋은 KAIST 의 이재규 교수팀이 개발한 UNIK 를 사용하고 있다.⁽¹²⁾

추론 방법은 전진추론방법(forward chaining)을 사용하고 있으며, 지식베이스는 프레임(frame)과 룰로 구성하고 있으며, 특히 룰은 통상적인 생성

룰(production rule)과 지식간 또는 룰 사이의 갈등 해소(conflict resolution)를 위한 메타룰(metarule)로 구성되어 있다.

이 연구에서 개발된 시스템은 피로 데이터베이스도 포함되어 있는 피로강도평가를 위한 통합 전산화 시스템이다.

2. 피로수명평가를 위한 통합

전산화 시스템 개요

2.1 시스템 구성

피로강도평가의 범위는 매우 넓으나, 본 시스템에서는 단축(uni-axial) 하중상태에서 일정진폭하중으로부터 랜덤하중을 비롯한 변동하중을 받는 경우까지의 피로강도평가 또는 피로균열 발생 또는 진전수명예측을 대상으로 하고, 다축(multi-axial) 하중하의 피로강도평가는 다루지 않고 온도의 영향은 사용자가 고려해주어야 한다. 또한 피로균열 진전수명을 예측하는 경우에는 뒤에서 설명할 전

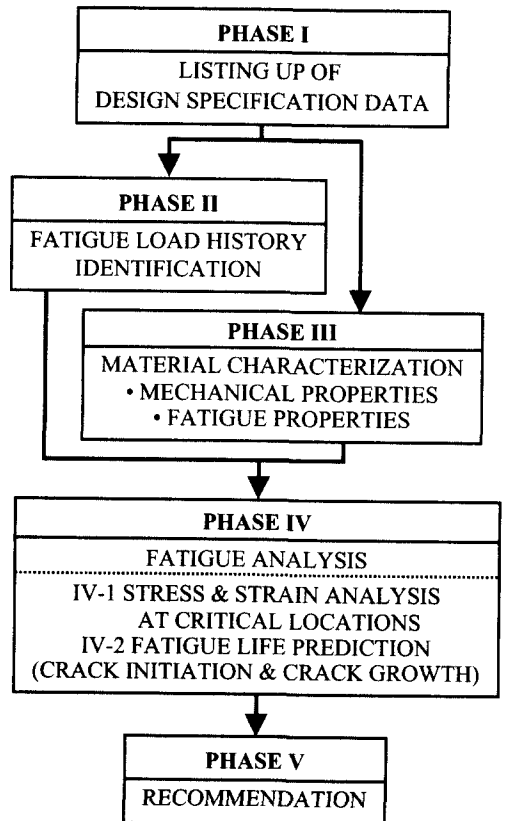


Fig. 1 Procedure of fatigue strength assessment

문가 시스템과 재료의 피로특성 추정 모듈은 사용할 수 없다.

피로강도평가 과정을 간단히 크게 단계별로 나누어 보면, Fig. 1에서 보는 바와 같이 5 단계로 나눌 수가 있을 것이다. 즉 제 I 단계(Phase I)는 대상물의 설계사양에 대한 정보를 파악하는 단계로, 대상물의 기하학적 정보, 제조에 관한 정보, 사용조건에 관한 정보 등이 그 대상이다. 제 II 단계는 대상물에 작용하는 하중이력을 파악하는 단계이다. 제 III 단계는 대상물의 재료특성을 파악하는 단계로써, 제 I 단계에서 주어진 각종 정보를 기초로 다음 단계의 피로해석에 사용할 피로특성치, 예컨대 S-N 곡선, ε-N 곡선, da/dN-ΔK 곡선을 얻는 단계이다. 제 IV 단계는 피로해석단계로써, 주로 위험부위의 응력, 변형을 해석과, 각종 피로설계 개념에 따라 관련 피로해석방법을 사용하여 피로수명을 예측하는 단계이다. 제 V 단계는 이전 단계까지 얻어진 결과를 바탕으로 피로 건전성에 대한 평가, 설계에 대한 조언 등을 제시하는 단계이다. 이상 5 단계 중 마지막 V 단계는 대체로 고도의 지식과 경험을 바탕으로 이루어지는 단계이며, 그 결과는 서술적 내용이 되어, 현재로서는 전산화가 간단하지 않으므로, 본 연구에서의 전산화 시스템에서는 일단 IV 단계까지를 대상으로 하고 있다. 제 I 단계의 내용은 본 전산화 시스템에 입력되는

내용이라 생각하면 좋다. 제 II 단계에서부터 제 IV 단계까지의 각종처리 내용이 전산화 시스템으로 구성되었으며, 그 구체적 내용을 모듈로 나타낸 것이 Fig. 2이며, 그림 중에는 각 모듈과 피로강도평가 과정과의 관계를 점선으로 표시해 두었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전체 시스템은 9개의 모듈로 구성되어 있다. 본 시스템의 수행한 초기 화면이 Fig. 3이다. 이하에서는 각 모듈에 대해 간단히 설명하기로 한다.

2.2 시스템 구성 요소 모듈

2.2.1 사용자 인터페이스(user interface)

시스템의 전체 메뉴를 관리하며, 각 모듈을 수행시키고, 각 모듈을 통합하는 기능을 한다.

2.2.2 제 II 단계 하중이력파악 관련 모듈

하중이력 파악과 관련해서는 일반적인 피로하중이 크기가 랜덤(random)하게 변화하는 변동하중인 점을 고려하여, 본 시스템에서는 크게 다음과 같은 두개의 모듈을 작성하고 있다. 하나는 부하하중이력(load history)이 주어지는 경우, 하중사이클을 셈하기 위한 하중파형 사이클 셈(cycle counting) 모듈과 다른 하나는 설계의 초기 단계 등에서 피로강도평가를 미리 또는 시험적으로 평가할 수 있도록 각종 변동하중이력을 작성해주는

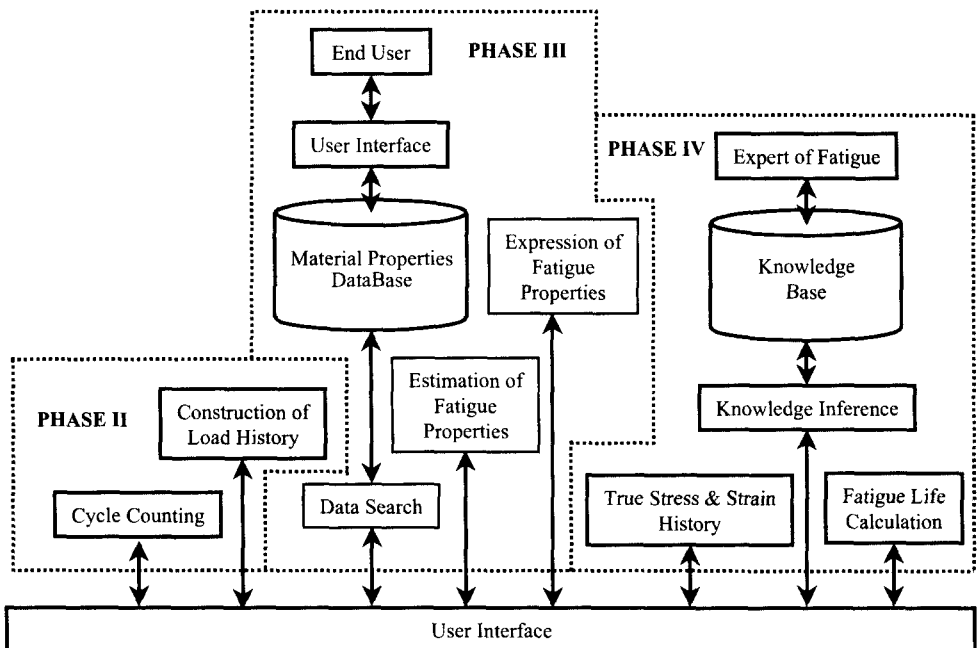


Fig. 2 Configuration of fatigue life prediction system developed

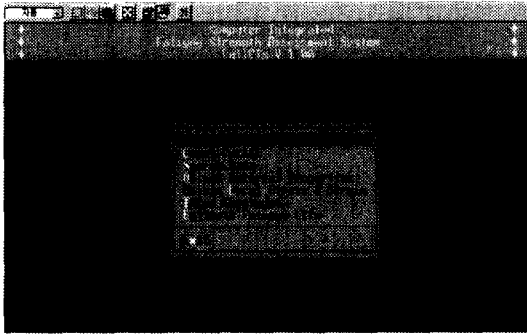


Fig. 3 Initial screen of the fatigue strength assessment system developed

모듈이다.

II-1) 하중파형 사이클 셸(cycle counting) 모듈

본 모듈에서는, 현재까지 제안되어 비교적 많이 사용되는 여러 중요한 사이클 셸 방법을 거의 모두 사용할 수 있도록 되어 있다.

본 모듈의 기능으로는,

- 1) 현장에서 획득한 이력을 피크(peak)와 밸리(valley)만으로 구성된 이력으로 변환해주는 기능
- 2) 레벨 경과 셸법(Level Crossing Counting)
- 3) 레인지 페어 셸법(Range-Pair Counting)
- 4) 레인플로우 셸법(Rainflow Counting)
- 5) 단순 레인플로우 셸법(Simplified Rainflow Counting)
- 6) 폭-평균 행렬(Range-Mean Matrix)를 작성해 주는 기능 등이 있다.

사용하고자 하는 셸법을 골라 이용할 수 있으며, 셸법 내용 자체를 모르는 경우에 전문가 시스템에 일임하면 우선적으로 단순 레인플로우 셸법으로 하중파형 사이클을 셸해 준다.

II-2) 하중이력 작성(load history construction) 모듈

본 모듈에서는 하중형태로는 다음의 3 가지 하중을 작성할 수 있도록 되어 있다.

- a. 일정진폭 하중
- b. 다단계 블록 하중
- c. 유사랜덤 하중(pseudo random loading)⁽¹³⁾

본 모듈의 유사랜덤 작성 기능을 사용하면, 부하 하중의 통계적 특성에 관한 몇 가지 정보만으로 실제 하중이력에 가까운 하중이력을 작성할 수가 있어 매우 편리하다.

이 모듈은 다음과 같은 기능을 가지고 있다.

- 1) 하중이력을 최대하중에 대한 비율로 나타내

어 무차원으로 표현하는 기능

- 2) 하중이력을 실제 단위를 갖는 값으로 표현하는 기능
- 3) 10 단계까지의 블록하중을 작성해주는 기능
- 4) 2 자유도까지의 진동계를 가상의 유사랜덤이력을 작성해 주는 기능
- 5) 하중 이력을 화면에 그려주는 기능

2.2.3 제 III 단계 재료특성 파악 관련 모듈

피로강도평가를 위해서는 대상이 되는 재료의 피로특성, 즉 S-N 곡선 또는 ϵ -N 곡선 혹은 피로균열진전속도, da/dN 와 ΔK 의 관계 등이 필요하다.

이러한 피로특성이 주어지는 경우에는 그대로 사용하면 되나, 주어지지 않거나 없는 경우에는 적당한 방법을 강구하여 구할 필요가 있다. 그 방법으로 본 시스템에서는 피로특성을 이미 저자들이 구축한 데이터베이스⁽¹³⁾를 이용하여 얻거나, 또는 재료의 기계적 성질로부터 추정하여 사용할 수 있도록 하고 있다.

데이터베이스를 이용하는 모듈이 데이터 검색 모듈이며, 기계적 성질로부터 피로특성을 추정하는 모듈이 피로특성추정 모듈이다. 이외에 S-N 곡선 또는 ϵ -N 곡선 혹은 da/dN - ΔK 곡선을 관계수식으로 구해주는 피로특성분석 모듈이 있다.

III-1) 데이터 검색(data searching) 모듈

이 모듈은 저자들이 구축한 재료 성질 및 피로강도 데이터베이스에 접근하여 사용자가 입력한 조건, 예컨대 재료명, 시편 형상, 열처리 조건 등에 맞는 데이터를 검색하여, 얻어진 결과를 재료명 목록 형태로 화면에 보여주고, 사용자가 적당한 것을 선택할 수 있도록 하는 기능을 갖고 있다. 사용자가 선택한 재료에 관한 각종 정보는 파일 형태로 저장할 수 있도록 하여, 필요 시 언제나 다시 사용할 수 있도록 하고 있다.

III-2) 재료의 피로특성 추정(fatigue properties estimation) 모듈

이 모듈은 기계적 성질로부터 ϵ -N 곡선을 추정하는 모듈이다. 기계적 성질로부터 ϵ -N 곡선을 추정하는 방법으로는,

- 1) Manson's original Universal Slopes
- 2) Manson's modified Universal Slopes
- 3) Mitchell's method
- 4) Seeger's Uniform Materials Law

을 사용할 수 있으며, 어떠한 재료에 대해 어떠한 방법이 가장 적절한지를 모르는 경우에 전문가 시스템에 일임하면, 저자들이 이미 발표한 연구결과를 바탕으로, ⁽¹⁵⁾ 재료에 따라 가장 알맞은 방법을

자동으로 선택하여, ϵ -N 곡선을 구해 준다.

III-3 재료의 피로특성 분석(fatigue data analysis) 모듈

데이터 검색 모듈에 의해 얻어진 원래 상태의 피로균열발생 데이터 또는 피로균열진전 데이터를 최소자승법(least square method) 또는 강건방법(robust method)으로 회귀분석(regression analysis)하여 대상 재료의 피로특성 관계식을 구해 준다.

피로특성 관계식을 구할 때 설계자가 컴퓨터 화면에 그려진 데이터를 보고 회귀 분석할 구간을 지정하여 주면 그 구간의 평균적 관계 및 90% 신뢰구간의 피로특성 관계식을 구해 준다.

구간 지정은 피로균열발생 데이터 즉 S-N 곡선 또는 ϵ -N 곡선일 때는 1 개 구간으로 하고, 피로균열진전 데이터 즉 da/dN - ΔK 곡선 또는 da/dN - ΔK_{eff} 곡선일 때는 3 개 구간으로 나눌 수 있도록 되어 있어, 피로수명 계산 시 구간별 다른 피로 특성들

을 이용할 수 있다.

2.2.4 제 IV 단계 피로해석 관련 모듈

일반적으로 피로파괴는 기하학적 형상이 급격히 변화하거나 결함이 존재하는 응력집중 부분에서 일어나므로, IV 단계의 피로해석 단계에서는 위험부위가 되는 응력집중 부분의 응력 및 변형률에 대한 정보가 필요하게 된다.

따라서 본 시스템에는 응력 집중부의 응력이나 변형률 이력 데이터가 직접 주어지지 않는 경우에, 하중이력 데이터로부터 참응력 및 참변형률 이력을 계산하는 모듈, 이 모듈에서 얻어지거나 또는 독립적으로 주어진 응력과 변형률 이력에 대해 피로수명을 계산하는 모듈이 있다. 피로수명 계산 모듈은 피로균열발생수명 계산과 피로균열진전수명 계산 모듈 2 개로 이루어 지고 있다.

일반적으로, 피로해석 단계에서 많은 전문가 지

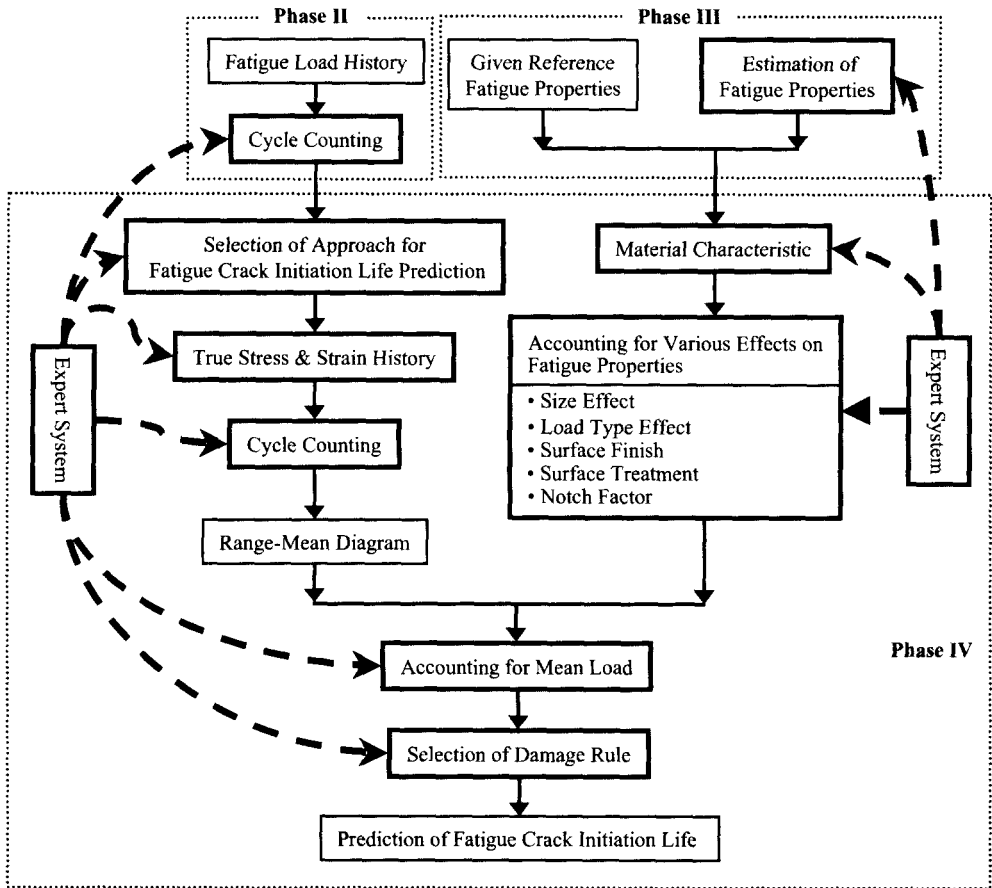


Fig. 4 Procedure of fatigue crack initiation life prediction in the system developed

식이 필요하여, 일반 설계자가 쉽게 피로해석을 수행할 수가 없다. 따라서 본 시스템에서는 각 해석 과정의 필요한 부분에는 물론, 특히 전문가 지식을 다양하게 필요로 하는 피로균열발생수명 계산과 관련해서는, 체계적으로 필요한 지식을 추론하는 전문가 시스템 모듈을 마련하여, 일반 설계자가 쉽게 피로해석을 할 수 있도록 하고 있다.

IV-1) 응력 집중부에서의 참응력 및 참변형률 이력 계산(true stress and strain analysis) 모듈

이 모듈은 대상 물체의 경계 부분 또는 특정 위치에서의 하중이력이 주어졌을 때, 응력집중부의 참응력 및 참변형률 이력을 구해주는 모듈로서, 실제 대상 물체의 응력 집중부위에 대해 하중-변형률 관계가 주어지는 간편한 경우에는 그 결과를 그대로 사용하고, 그렇지 않은 경우에는 재료의 되풀이 응력-변형률(cyclic stress-strain) 관계와 노이버의 법칙(Neuber's rule)을 이용하여 참응력 및 참변형률 이력을 구하여 준다.

참응력 및 참변형률을 계산하는 방법에 대해 구체적인 내용을 모를 때에는 전문가 시스템에 일임하면, 입력된 내용에 근거하여 타당한 방법을 선택하여 준다.

IV-2) 피로균열발생수명 계산 관련 전문가 시스템(expert system for crack initiation life prediction) 모듈

이 모듈은 현재까지 사용되어 오고 있는 많은 피로관련 지식과 본 저자의 연구실에서 얻어진 연구 결과를 지식 베이스화하여 피로균열발생수명 예측시, 전문가의 판단이 요구되는 부분을 처리, 수행해 주는 전문가시스템 모듈로서, 그 내용에 관해서는 이미 학회 등에서 발표한 바가 있다.⁽¹⁶⁾

피로균열발생수명 예측 과정에서, 전문가 시스템이 지식을 추론하여 적절한 방법을 제시해주는 부분을 Fig. 4에 나타내었고, 이 모듈을 수행한 화면이 Fig. 5이다.

파형 사이클 셉(cycle counting), 참응력과 참변형률 이력(true stress & strain history) 계산, 재료의 피로특성 추정(estimation of fatigue properties)에서의 전문가 시스템이 하는 내용에 대해서는 이미 앞에서 설명을 했다.

이외에 전문가 시스템이 지식을 추론하여 판단해주는 부분으로는, 먼저 피로균열발생수명 평가에서 사용하는 방법(approach for fatigue crack initiation life prediction)에 관한 것이 있다. 응력-수명(S-N)곡선을 이용하느냐, 변형률-수명(e-N)곡선을

이용하느냐 하는 것으로, 이용자가 요구를 하면, 하중의 크기, 위험부위의 응력집중계수의 크기, 재료의 기계적성질, 피로특성을 고려하여 전문가 시스템이 결정해 준다.

다음으로는 재료의 특성(material characteristics)을 결정해주는 것이 있다. 재료가 취성적인지, 연성적인지를 판단하는 것으로 단면축소율에 근거하여 이를 결정하여 준다. 본 시스템에서는 단면축소율 50%을 기준으로 하고 있다. 연성, 취성 특성은 경우에 따라 평활재 S-N 곡선으로부터 노치재의 S-N 곡선을 추정할 필요가 있을 때, 추정방법을 선택하기 위해 사용되며, 그 상세에 대해서는 문헌에 설명되어 있다.⁽¹⁷⁾

피로균열발생수명 예측시, 경우에 따라 여러 인자의 영향을 고려할 필요가 있다. 그 중 중요한 것으로서 치수효과(size effect), 축 하중인가 굽힘 하중인가 하는 하중부하형식의 영향(load type effect), 표면 거칠기 및 표면 가공의 영향(surface finish & surface treatment) 등이 있으며, 경우에 따라서는 노치의 영향을 노치계수의 형태로 고려할 필요도 있다. 이러한 여러 인자의 영향에 관해서는 현재까지 여러 평가법이 제안되어 사용되어 오고 있으며, 영향의 크기를 그래프 형식으로 나타내고 있는 경우도 많다. 평가법의 선택, 수치화 등의 문제가 약간 남아 있어, 현재 본 전문가 시스템에서는, 이들 영향에 관해서는 직접적으로 평가해 주지 않고, 이용자가 영향계수를 입력하도록 되어 있으며, 만약 모르는 경우에는 평가법을 상세하게 설명하고 있는 참고 문헌을 제시하여, 이용자들이 필요에 따라 고려할 수 있도록 하고 있다. 가까운 시일 내에 이 부분도 완전 자동 추론이 가능하도록 할 예정이다.

이상에서 지적한 인자 외에 또 하나의 중요한 인자의 영향으로는 평균하중의 영향이 있다. 평균하중의 영향을 고려하는 방법도 현재까지 여러 가

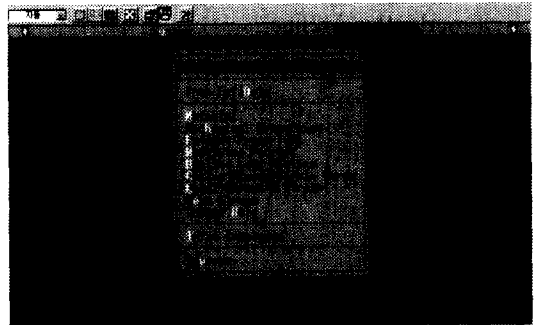


Fig. 5 Screen when the expert system runs

지가 제안되어 있으므로, 본 전문가 시스템에서는 이용자가 특수한 방법을 선택할 경우에는 그 방법을 사용할 수 있도록 하고, 그렇지 않는 경우에는 먼저 압축평균응력을 고려할 지 여부를 결정한다. 다음, 평균하중의 영향을 고되풀이수 영역에서의 평균응력(mean stress)의 영향과 저되풀이수 영역에서의 평균소성변형률(mean plastic strain)의 영향으로 나누어 고려하도록 하고 있다. 압축평균응력의 영향을 고려할 지의 여부는, 입력된 하중이력(load history)을 조사하여, 하중이력 전체에 대한 평균하중이 압축일 경우에는 압축평균응력의 영향을 고려하지 않도록 하고 있다. 그 이유는 이러한 하중이력의 경우에 압축평균응력의 영향을 고려하면, 경우에 따라 과대하게 수명을 길게 예측하게 되어 위험쪽의 평가가 되기 때문이다.

- 평균응력을 고려하는 방법으로는,
- 1) Soderberg 의 식
 - 2) 수정 Goodman 의 식
 - 3) Gerber 의 식

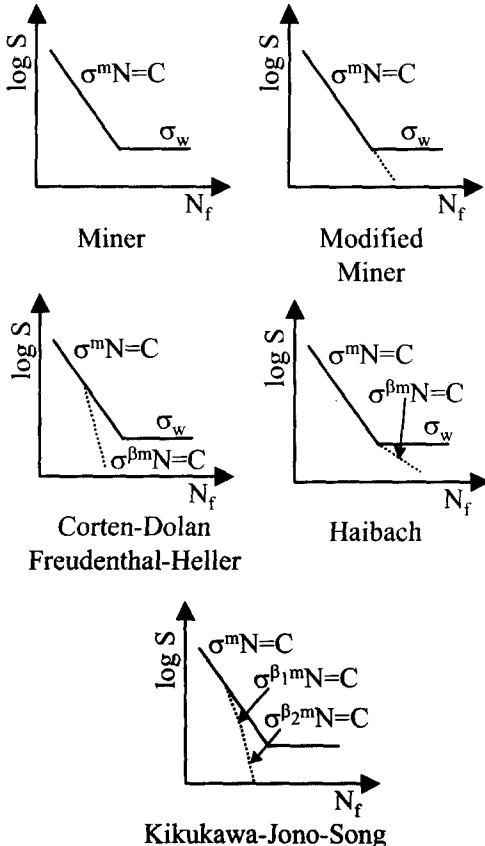


Fig. 6 Models of damage rule for fatigue life prediction

- 4) Morrow 의 식(σ_a - σ_r 선도라고도 함)
- 5) Smith-Watson-Topper 의 식
- 6) Smith 의 식

의 6 가지 방법을,

평균소성변형률의 영향에 관해서는,

- 1) Kikukawa 의 식
- 2) Sachs-Weiss 의 식

의 두 가지를 마련하여, 이용자가 원하는 평가방법을 선택할 수도 있으며, 평가법을 모르는 경우에는 전문가 시스템이, 재료의 종류, 입력된 기계적 성질 등을 고려하여 적절한 방법을 선택하여 준다. 평균응력 평가법으로는 연성재료인 경우에는 수정 Goodman 의 식이나, Morrow 의 식을, 취성재료의 경우에는 Smith 의 식을 선택하여 주며, 평균소성변형률의 영향에 대해서는 Kikukawa 의 식을 선택하도록 되어 있다.

피로수명 예측에서 가장 중요한 것이 손상법칙의 선택일 것이다. 변동하중하의 피로수명평가에서는 응력간섭효과와 피로한도 이하의 응력을 어떻게 고려하느냐에 따라 수명이 크게 달라지기 때문이다. 현재까지 제안된 대표적인 손상법칙으로는 Fig. 6 에 제시한 5 가지 정도가 있다. 일반적으로 S-N 곡선의 수정방법이라 불리는 것이다. 그러나 모든 방법은 Kikukawa-Jono-Song 의 방법에서 수정계수 β_1, β_2 를 변화시킴으로써 나타낼 수가 있다. 즉, $\beta_1 = \beta_2 = 1$ 일 때 수정 Miner 의 법칙이 되며, $\beta_1 < 1, \beta_2 = 1$ 일 때 Corten-Dolan 또는 Freudenthal-Heller 의 손상법칙이 된다. 또한, $\beta_1 > 1, \beta_2 = \infty$ 일 때 Haibach 의 손상법칙이 된다. 전문가 시스템이 하중이력, 재료의 종류가 주어지면 β_1, β_2 의 값과 수정 S-N 곡선의 시작점 응력 레벨값을 자동적으로 결정하여 주도록 되어 있다. 그 상세 내용은 문헌⁽¹⁶⁾에 설명되어 있다.

IV-3-1) 피로균열발생수명 계산(fatigue crack initiation life prediction) 모듈

이 모듈은 앞의 여러 모듈에서 얻어진 결과 또는 사용자가 입력한 내용을 가지고 피로수명을 계산해 준다.

피로균열발생수명 평가방법으로 응력-수명 접근방법이 선택되거나 추론된 경우에는, S-N 곡선 즉,

$$S_a = \sigma_f' (2N_f)^b \tag{1}$$

을, 변형률-수명 접근방법일 경우에는, Basquin-Coffin^(18,19)에 의해서 제안된 식,

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \varepsilon}{2} &= \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \\ &= \frac{\sigma_f'}{E} \cdot (2N_f)^b + \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^c \end{aligned} \quad (2)$$

을 이용하여, 수명을 계산한다.

여기서 S_0 는 응력진폭, $\Delta \varepsilon$ 는 전 변형률 폭, $\Delta \varepsilon_e$ 은 탄성 변형률 폭, $\Delta \varepsilon_p$ 은 소성 변형률 폭, E 는 탄성 계수, N_f 은 파단 수명, σ_f' 는 피로강도계수, b 는 피로강도지수, ε_f' 는 피로연성계수, c 는 피로연성지수이다.

IV-3-2) 피로균열진전수명 계산(fatigue crack propagation life prediction) 모듈

본 시스템에서는 피로균열진전 수명 계산 방법으로 통상적인 Paris 형의 균열진전식에 응력비의 영향을 Walker의 방법으로 고려한 다음식,

$$\frac{da}{dN} = C \left[(1-R)^a K_{max} \right]^m \quad (3)$$

을 이용하는 방법과 균열단합현상을 고려한 Elber의 다음식,

$$\frac{da}{dN} = C_{eff} (\Delta K_{eff})^n \quad (4)$$

을 이용하는 방법, 두 가지를 사용할 수 있도록 되어 있다.

수명은 되풀이수를 하나씩 누적시켜 얻어지며, 이 때 필요한 재료정수값 C, m, a, C_{eff}, n 등은 실제 주어진 값을 입력하거나, 데이터베이스를 이용하여 구하게 된다. 이 외 필요한 입력값으로는 초기 균열길이, 최종균열길이 또는 파괴인성치(fracture toughness), 응력강도계수 식, 하중이력, 하한계 응력강도계수 폭(threshold stress intensity factor range, ΔK_{th}), 파형사이클 셈 방법 등이다.

응력강도계수 식은 6 가지 시편형상(Center Crack Tension, Double Edge Crack, Single Edge Crack, Compact Type, Disk Shaped Compact, Wedge Opening Load)에 대해 참고문헌에 제시되어 있는 가장 정확도가 좋은 식을 마련하여,⁽²⁰⁾ 풀 다운 메뉴에서 선택하여 사용할 수 있도록 하고 있다.

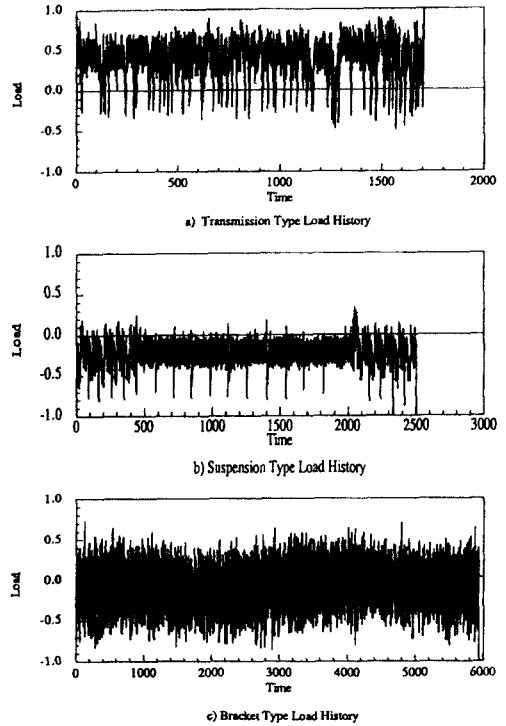


Fig. 7 SAE vehicle service load histories

3. 검증 및 검토

본 연구에서 개발한 피로강도평가를 위한 통합 전산시스템의 성능을 검토하기 위하여, 미국자동차공학회 피로손상분과위원회 (Cumulative Fatigue Damage Division of the SAE Fatigue Design and Evaluation Committee)의 변동하중하의 피로시험 데이터틀 이용하기로 하였다.⁽²¹⁾

이 피로데이터는 지상수송장치에 부하되는 대표적인 3 가지 하중 형태, 즉 트랜스미션(transmission), 브라켓(bracket), 서스펜션(suspension)에 부하되는 하중형태를 사용해서 동일한 재료, 동일한 시험조건 및 시편으로 라운드로빈(round-robin) 방식으로 실험한 결과로서, 현재까지 이 이상의 체계적인 데이터는 얻어지고 있지 않다. 따라서 피로수명평가 소프트웨어의 성능 검토 등에 거의 표준적인 검증 데이터로서 널리 사용되고 있다.

이 시험에서 사용한 시편의 재료는 U.S. Steel사의 Man-Ten 강과 Bethlehem사의 RQC -100 강이다. 두 재료의 기계적 성질 및 일정진폭하의 피로성질은 Table 1 과 2 와 같다. 둥근 노치(notch)를 가진 CT 형 시편에 부하한 하중 이력은 Fig. 5 와 같으

Table 1 Mechanical properties of Man-Ten and RQC-100

	Man-Ten	RQC-100
Yield Strength	322 MPa	805 MPa
Tensile Strength	577 MPa	852 MPa
Reduction of Area	67 %	44 %
True Fracture Strength	990 MPa	1100 MPa
Fracture Ductility	1.06	0.58
Strength Coefficient	998 MPa	1150 MPa
Strain Hardening Exponent	0.21	0.068
Elastic Modulus	206 GPa	208 GPa
Cyclic Yield Strength	330 MPa	620 MPa
Cyclic Strength Coefficient	1020 MPa	1275 MPa
Cyclic Strain Hardening Exponent	0.18	0.13

Table 2 Fatigue properties of Man-Ten and RQC-100

	Man-Ten	RQC-100
Fatigue Strength Coefficient	915 Mpa	1160 MPa
Fatigue Strength Exponent	-0.095	-0.075
Fatigue Ductility Coefficient	0.26	1.06
Fatigue Ductility Exponent	-0.47	-0.75

며, 각 하중 이력의 특징은 다음과 같다. 트랜스미션은 평균응력이 주로 영보다 크며, 비교적 급격히 변동하는 하중이며, 브라켓은 평균응력이 주로 영에 가까운 하중이며, 서스펜션은 평균 응력이 주로 영보다 작은 굽힘하중이다.

본 피로강도평가시스템에 의해 예측한 수명결과와 실제 시험결과를 비교한 것이 Fig. 6 이다. 그림 중의 일점 쇄선은 오차계수 3 및 1/3 을 나타내는 선으로, 피로균열발생수명 예측의 경우 일치여부의 기준으로 일반적으로 많이 사용되는 값이다. Man-Ten 재료의 경우, 하중 종류에 관계없이 시험결과는 거의 오차범위 3 배수 이내에 들어, 매우 좋은 예측이 되고 있다는 것을 알 수가 있다. RQC-100 인 경우는 브라켓 하중에 대한 두개의 결과가 위험쪽으로 예측되고 있으며, 서스펜션 하중의 3 개 정도의 결과가 약간 과도 안전 쪽의 예측이 되고 있으나, 전체적으로는 만족할 만한 예측 결과라 말할 수가 있을 것이다. 따라서 본 시스템을 사용하면 대체적으로 합리적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

다음은 본 피로수명 예측 시스템을 실제 파손한 기계구조물 부품의 피로수명평가에 적용해 본 예이다. 대상부품은 그림 Fig. 7 (a)와 같은 단볼이 축으로써, 연결용으로 사용되는 것이다. 이 축에

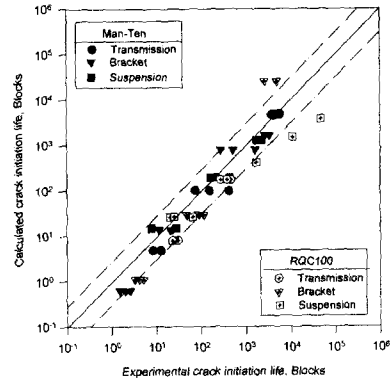
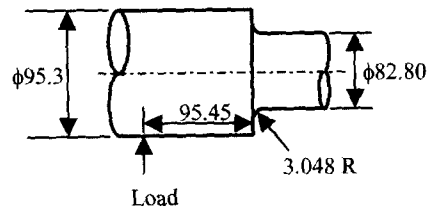
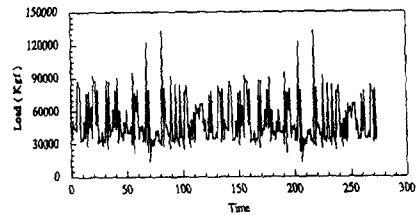


Fig. 8 Fatigue life prediction results for SAE load Histories



(a) Shaft (unit : mm)



(b) Load history applied on shaft

Fig. 9 Shaft and load history

대해서 설계자가 갖고 있는 데이터는 Fig. 7(b)와 같은 하중이력과 Table 3 과 같은 재료에 관한 최소한의 정보와 파손수명 데이터 뿐으로, 피로수명 예측에 반드시 필요한 재료의 피로특성에 관한 데이터는 없다.

이러한 조건 하에서 본 시스템을 사용하여, 피로수명을 예측하여 실제 파손 결과와 비교하여 보았다. 본 시스템을 사용하는 경우에도 부분적으로는 선택의 여지가 있으므로, 다음과 같은 몇 가지 경우에 대해 수명을 예측하였다.

Case 1 : 전문가시스템 모듈을 비롯하여 모든 모듈을 사용하여 수명을 예측하되, 피로특성치를 기계적 성질로부터 평가할 때, 본 시스템에 있는 피로데이터베이스로부터 가장 유사한 재료의 피로특성치를 사용하는 경우이다.

Case 2 : Case 1 에서 피로특성치를 기계적 성질로부터 평가할 때, 앞의 III-2)의 재료의 피로특성 추정 모듈을 사용하는 경우로, 측정 방법은 전문가 시스템이 결정해 준다.

Case 3 : 기계관련 회사의 강도설계부서에서 1년 이상 근무한 사람이 대학원(KAIST) 피로강도론 과목을 청강한 후, 자신이 갖고 있는 피로전문지식을 사용하여 수명을 예측한 결과로, Case 1 에서 전문가시스템 모듈을 사용하지 않는 경우이다.

Case 4 : Case 1 과 거의 같으나, 하중이력으로서 실제 하중이력을 사용하지 않고, 실제 하중이력의 주파수 특성에 관한 정보만을 이용하여, 본 시스템에서 제공하는 II-2) 하중이력 작성 모듈을 이용하여 유사랜덤하중을 발생시켜, 이 랜덤하중에 대해 수명을 예측한 경우이다.

이상 4 가지의 수명예측 결과가 Table 4 이다. 표에서 보는 바와 같이 본 시스템에서 특히 피로강도데이터베이스를 이용하는 Case 1 의 경우, 예측

수명은 안전측의 2 배수 이내가 되어 매우 좋은 결과가 되고 있다.

피로특성평가 모듈을 사용하는 Case 2 경우에는 예측수명은 실제수명의 1/5 정도가 되어, 약간 과도 안전측이 되고 있다. 이 결과는 피로특성치를 추정할 경우에는 가능하면 피로강도데이터베이스 등을 사용하는 것이 바람직하다는 것을 의미한다.

피로설계에 관하여 어느 정도의 경험과 대학원 수준의 비교적 높은 전문 지식을 갖고 있는 Case 3 의 경우에도, 수명을 2 배수 이내로 예측하여 좋은 결과가 되고 있다. Case 1 의 경우와 비교해보면, 이 경우 약간 위험측 예측이 되고 있어, 본 시스템의 전문가 시스템 모듈은 대체로 안전측 예측을 하고 있다는 것을 알 수가 있다.

하중이력의 주파수 특성만을 이용하여 하중이력을 시뮬레이션하여 사용하는 Case 4 의 경우에도 예측수명은 실제 수명의 1/2.4 정도가 되어, 비교적 좋은 결과가 되고 있다.

이상의 결과로부터, 본 연구에서 개발한 피로강도평가 통합 전산시스템을 사용하면 재료에 대한 피로특성을 모르는 경우에도 대체로 안전측의 수명예측이 가능하리라 예상되며, 특히 저자들이 이미 개발하여 발표한 피로강도 데이터베이스를 함께 사용하면, 안전측의 좋은 수명예측 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수가 있다.

또한 주파수 특성을 이용하여 시뮬레이션한 하중이력을 사용하는 피로강도평가도 어느 정도 실용적으로 사용 가능하다는 것을 알 수가 있어, 초기 설계단계에서 적극적으로 이용할 수가 있을 뿐만 아니라, 하중 이력의 데이터베이스 작성 등에도 많은 도움을 줄 것으로 예상된다.

Table 3 Given design data for fatigue life prediction

Material	AISI 4150 or 4340H
Heat treatment	Annealing
Surface treatment	Fine grinding
Tensile strength	703 MPa
Blocks to failure	7,000 Blocks

Table 4 Fatigue life prediction results for the shaft showing in Fig. 7(a)

Case	Expert system module	Fatigue properties estimation method used	Load History used	Predicted life (blocks)	Predicted life / Real life
Case 1	Used	Fatigue Database System	Real One	4,063	0.58
Case 2	Used	Estimation Module	Real One	1,265	0.18
Case 3	Not Used	Fatigue Database System	Real One	10,403	1.49
Case 4	Used	Fatigue Database System	Simulated Random Load	2,936	0.42

4. 결론

피로강도평가를 위한 통합 전산 시스템을 개발하고, 그 성능을 미국자동차공학회(SAE)의 변동하중 피로시험 데이터 및 실제 피로파손 예에 대해 검토하여, 얻어진 결과를 간추려 보면 다음과 같다.

(1) 본 시스템은 9개의 모듈로 구성되어 있으며, 본 시스템에는 피로강도 데이터베이스가 포함되어 있어, 재료의 피로특성을 모르는 경우에 재료의 기계적 성질에 대한 정보를 이용하여 데이터를 검색할 수 있도록 되어 있으며, 또한 데이터베이스에도 없는 경우에는 합리적인 방법으로 추정할 수 있도록 되어 있다. 또한 모듈 중에는 전문가시스템 모듈이 있어, 피로에 관한 전문 지식이 없는 일반 설계자도 본 시스템을 쉽게 사용할 수 있도록 하고 있다.

(2) 미국자동차공학회의 변동하중 실험결과에 대해 본 시스템의 성능을 검토한 결과, 예측수명은 실제 수명의 거의 3 배수 이내가 되어, 매우 만족할 만한 결과가 얻어 졌다.

(3) 실제 파손 예에 대한 적용 결과, 재료의 피로특성을 모르는 경우에도 본 시스템을 사용하면 대체로 안전쪽의 수명예측이 가능하며, 특히 피로강도 데이터베이스를 이용하면 더욱 정확한 수명예측이 가능하다.

(4) 실제 하중이력의 주파수 특성에 관한 정보를 이용하여, 하중이력을 시뮬레이션하여 피로강도를 평가하는 방법이 충분히 실용성이 있어, 설계의 초기 단계 등에서 적극적으로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Miner M. A. , 1945, "Cumulative Damage in Fatigue," *Journal of Applied Mechanics, Trans., ASME E* Vol. 12, pp. A159~164.
- (2) Corten H. T. and Dolan T. J. , 1956, "Cumulative Fatigue Damage," *Proc. of International Conference on Fatigue of Metals*, pp. 235~246
- (3) Freudenthal A. M. and Heller R. A. , 1958, "On Stress Interaction in Fatigue and a Cumulative Damage Rule : Part I-2024 Aluminum and SAE4330 Steel Alloys," *wadctr*, pp. 58~69.
- (4) 菊川眞, 城野政弘, 宋智浩, 1972, "繰返し塑性ひずみと累積疲労損傷(疲労限度以下の應力による疲労損傷)," *材料* Vol. 21, pp. 753~758.
- (5) 이시중, 송지호, 하재선, 1988, "변동하중하의 피로수명예측 -제 2 보:피로균열발생수명 예측을 위한 컴퓨터 소프트웨어-," *대한기계학회논문집* 제 12 권 제 6 호, pp. 1350~1357.
- (6) Kawamo, W. , 1990, "State of the Art of Database and Softwares on the Fatigue and Crack Propagation in Japan," *Proceedings of Fatigue '90*, Vol. IV, pp. 2449~2459.
- (7) McMahon, C. A., et al. , 1990, "Knowledge-Based Systems for Design for Fatigue," *Proceedings of Fatigue '90*, Vol. IV, pp. 2461~2466.
- (8) 정태형, 변준형, 이동형, 1991, "치차의 강도설계 전문가 시스템 개발연구," *대한기계학회 춘계학술대회논문집*, pp. 335~338.
- (9) 박중주, 서상민, 서명원, 최용식, 김영진, 1994, "재료 물성치 측정 및 피로수명평가 시스템의 개발," *대한기계학회논문집* 제 18 권 제 16 호, pp. 1465~1473.
- (10) 강득수, 박준협, 송지호, 1994, "피로강도평가를 위한 전문가 시스템 구축," *대한기계학회 춘계학술대회논문집 (I)*, pp. 103~106.
- (11) 송지호, 1994, "피로건전성 평가 시스템 개발에 관한 연구," *대한기계학회 춘계학술대회논문집 (I)*, pp. 25~32.
- (12) 이재규, 최형림, 김현수, 서민수, 주석진, 지원철, 1996, *전문가 시스템 원리와 개발*, 법영사
- (13) 송지호, 김종환, 김정엽, 1989, "유사랜덤하중파형 작성과 이를 이용한 랜덤하중하의 표면피로균열진전에 관한 기초적 검토," *대한기계학회 논문집* 제 13 권 제 1 호, pp. 125~134.
- (14) 박준협, 송지호, 1988, "피로강도 데이터베이스의 구축," *대한기계학회 논문집* 제 22 권 제 11 호, pp. 1947~1955.
- (15) Park, J. H. and Song, J. H., 1995, "Detailed Evaluation Methods for Estimation of Fatigue Properties," *International journal of fatigue*, Vol. 17, No. 5, pp. 365~373.
- (16) 박준협, 송지호, 정동관, 이신섭, 1994, "피로균열발생수명예측을 위한 전문가 시스템," *대한기계학회 추계학술대회논문집 (I)*, pp. 225~229.
- (17) 하재선, 송지호, 이시중, 1988, "변동하중하의 피로수명예측 -제 1 보:피로균열발생까지의 수명-," *대한기계학회 논문집* 제 12 권 제 4 호, pp. 760~780.
- (18) Basquin, O. H. , 1910, "The Exponential Law of Endurance Tests," *Am. soc. test. mater. proc.*, Vol. 10, pp. 625~630.
- (19) Coffin, L. F. Jr. , 1954, "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal," *Trans. ASME*, Vol. 76, pp. 931~950.
- (20) The Society of Materials Science, 1983, *JSMS Data Book on Fatigue Crack Growth Rates of Metallic Materials*, Vol. 1, Japan, Kyoto.
- (21) Wetzel, R. M. , 1977, *Fatigue Complex Loading : Analyses and Experiments*, The Society of Automotive Engineers.