한국전산구조공학회
2004년도 가을 학술발표회 논문집

유한 요소 해석 기반 피로평가 전문가시스템 개발

Development of an Expert System for Fatigue Strength Assessment based on FEA

최 홍 민**, 서 정 관**, 이 제 명*, 백 점 기*, 안 규 백***
H.M. Choi**, J.K. Seo**, J.M. Lee*, J.K. Paik*, K.B. Ann***

ABSTRACT

The assessment of fatigue property is one of the most indispensable factors to design mechanical structures or parts. For accurately assessing fatigue property, it is necessary to precisely identify the loading condition and material property of the objective structure. However, there are many kind of problems in conducting predictive activity for a design concerned with variable factor such as fatigue phenomenons and environments. Therefore, most of the fatigue problems have been assessed from exiting experiment data and prediction method.

In this study, expert system is developed for simply conducting performance assessment of weldments based on Finite element Analysis carrying out performance improvement and safety assessment of welded structures.

1. 서 론

최근 활발하게 수행되고 있는, 해양구조물, 특수선 등 미경험 선종 Project에 있어서 새로운 강재 및 신공법의 적용을 통하여 건조원가절감 및 신기술확보를 위한 노력이 이루어지고 있다. 이에 따라 설계자체에 소요되는 시간은 최근의 컴퓨터 기반기술의 총체적인 발달에 힘입어 비약적인 단축을 이루었으며, 구조변경이나 재질변경 등을 설계단계에서 수시로 수행할 수 있게 되었다. 이러한 시스템설계를 가능하게 해주는 가장 좋은 방법은 세부 평가내용들을 설계진행과 함께 실시간으로 파악할 수 있게 해주는 전문가시스템의 활용이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는, 연속체 손상역학수법에 바탕을 둔 재료손상모델과 유한요소해석수법을 적용하여, 다양한 강재의 기본 재료 특성치만을 이용하여 파손현상과 관련된 여러 가지 건전성평가를 실시간으로 수행하고 설계지원을 할 수 있도록 하는 유한요소 해석을 기반으로 하는 전문가시스템을 개발하였다.

* 부산대학교 조선해양공학과 교수
** 부산대학교 조선해양공학과 석사과정
*** 삼성중공업 책임연구원

2. 전문가시스템개발

손상이나 강도저하 등의 역학적 효과를 비교적 정밀하게 묘사할 수 있는 연속체손상역학수법과 비선형 유한요소해석을 연계한 손상평가용 유한요소해석코드를 개발하여 이를 손쉽게 활용할 수 있도록 하는 목적으로 전문가시스템으로 확장하였다.

용접부에서 가장 문제가 되는 피로강도평가를 위해, 우선 각종 선급용 강재에 관한 피로특성 데이터베이스를 구축하였다. 또한 미경험 강재에 대한 피로특성평가를 시스템화 하여 저비용, 고효율적으로 수행할 수 있도록 하였다. 최종적으로는, 용접재료의 역학적 특성, 각종 용접영향 등을 고려한 용접부 정밀설계용 강도평가시스템을 구성하고 있다.

2.1 요소강성방정식 및 손상발전방정식

유한요소해석을 수행할 경우 구성방정식에 포함되는 재료정수의 결정은 기계적 특성치를 이용하여 결정한다. 본 연구에서는 이들 기계적 특성치를 이용한 재료정수들의 기준값을 설정하고, 이 결과를 이용한 시뮬레이션 결과와 기존 피로시험의 재료적인 특성을 바탕으로 재료정수들의 가장 적합한 값을 결정해나가는 방법을 사용하였다.

즉, 재료의 손상현상을 정밀하게 묘사할 수 있는 비선형 유한요소정식화를 하였고, 정식화 과정에서의 적용상 문제점인 재료정수결정은 유전적 알고리즘을 이용하여 자동화 시켰다.

비선형 유한요소해석에 있어서 증분형 요소강성 방정식은 초기변형률법에 의해 구해지며[1],[2] 손상발전을 고려한 소성 변형률속도는 다음과 같이 주어진다.[3]

$$\left\{\dot{\varepsilon}^{p}\right\}=\frac{3}{2}\dot{p}\frac{\left\{\sigma^{d}\right\}}{\sigma_{eq}} \tag{5}$$

여기서,

$$\dot{p}=\left(\frac{2}{3}\left\{\dot{\varepsilon}^{p}\right\}^{T}\left\{\dot{\varepsilon}^{p}\right\}\right)^{1/2}=\left\langle\frac{\sigma_{eq}/(1-D)-R-k}{K}\right\rangle^{N} \tag{6}$$

$$R=Q_1 p+Q_2\left[1-\exp(-bp)\right] \tag{7}$$

$\dot{p}$ 는 누적변형률 속도를 나타내며, 6개의 파라미터 K, N, k, Q1, Q2, b는 재료정수로서, 자동추출 근사기법을 이용하여 결정될 수 있다.[4]

식(6)에 포함되는 손상변수 D는, 등방경화 소성이론을 적용한 아래의 손상발전방정식에 의해 계산된다.

$$\dot{D}=\left(-\frac{Y}{S}\right)^{s}\dot{p} \tag{8}$$

$$-Y=\frac{1}{2E(1-D)^{2}}\left[\frac{2}{3}(1+\nu)\sigma_{eq}^{2}+3(1-2\nu)\sigma_{H}^{2}\right]^{1/2} \tag{9}$$

여기서, s 및 S는 손상발전에 관계하는 재료정수이며, Y는 에너지 해방률(Energy release rate)이다, 식(5)-(9)에 의해 모든 응력상태 및 누적소성변형율과 연계되어 크기에 의해 손상량이 계산되며, 재료의 파괴는 이 손상변수값이 1.0에 도달하는 시점으로부터 판단되어진다.[5],[6]

2.3. 최적화 기법

강재의 기본 기계적 특성치를 입력값으로 하여, 내부에 탑재된 유한요소해석 프로그램에 필요한 각종 해석용 재료상수를 자동 추출하는 최적화 알고리즘이 개발 되었다.

강재의 기계적 특성치, 피로시험결과와 시뮬레이션 결과와의 오차를 수식적으로 최소화하여 이들 재료상수를 결정한다.

추론엔진에서는 다음과 같이 3개의 단계로 추론엔진을 구성한다. 첫 번째로 기억기반 추론 방법으로 기존의 데이터를 이용하여 해석용 재료정수를 구한다. 두 번째로 기데이터에서 실험적인 수치값을 기계적인 특성치와 해석용 재료정수의 상관관계를 이용하여 상관관계형 추론식을 정의 할 수 있다. 세 번째로는 Fig.2와 같이 기억기반추론 방법과 재료정수 상관 관계형 추론식을 이용해 결정된 해석용 재료정수의 관계를 최적화시키기 위해 유전적 프로그램을 사용하여 최종적으로 재료정수를 결정하였다.[7]

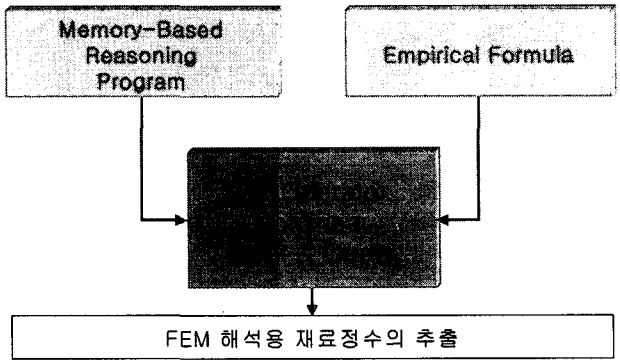

Fig. 1 Procedure of Genetic programming in the Inference Engine

이렇게 얻어진 해석용 재료정수를 이용해 실제의 강재와 비교해보았고, Fig. 2와 같이 실제의 S-N선과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

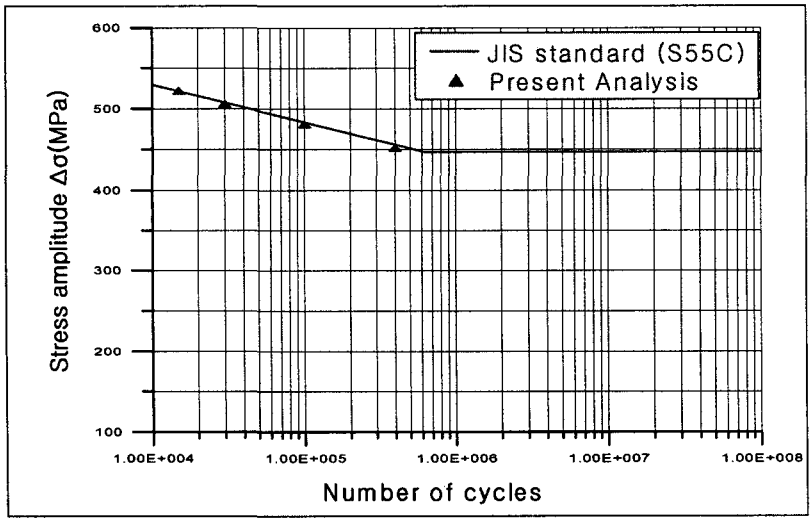

Fig. 2 The result of compare experiment and genetic programming for S-N curves

2.4. 구조적 건전성 평가

용접 잔류응력의 이완을 고려한 용접부의 피로강도 평가 모델이 필요하다. 각각의 임의 구조부재에 대해서 용접부 손상의 강도특성평가의 조합화 된 식을 사용하여 근사적으로 구조초기의 결함에 의한 특성을 추정할 수 있다.

구조 초기의 결함 특성을 고려하기위해 사용된 식은 용접에 의한 잔류응력의 탄소성모델 추정식, 잔류응력의 이상화 분포의 근사식, 용접시공조건에 의한 추정식, 용접 이음부 표면의 추정식, 고유응력을 이용한 잔류응력 추정식으로 구분할 수 있다.[8],[9]

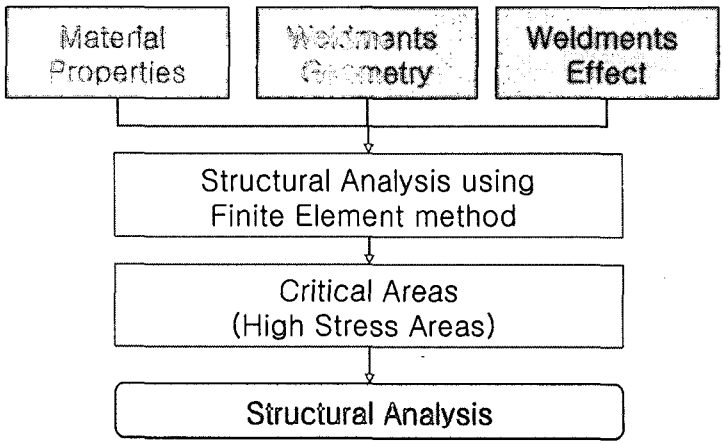

Fig. 3 Flow chart for prediction Fatigue Crack Initiation life for weldments

이 잔류응력 추정식은 입열량, 구조부재의 기하학적인 구분, Weld joint, pass수 등에 따라 구조초기의 결함의 특성을 고려하여 구조적인 결함의 분포를 수식적으로 도출 할 수 있다. 이렇게 계산된 잔류응력은 용접구조물에 전체적으로 변형률과 응력의 형태로 계산이 되어지고, 관심모델영역에 손상발전방적으로 구성된 시스템 유한요소 코드와 연동하여 응력 집중부의 요소로 피로평가를 수행할 수 있다.

이는 실제의 구조적인 용접부의 피로강도 특성 평가의 중요한 해석의 변수로 계산되어진다.

Fig. 3는 용접부 피로수명을 예측하기 위해서 기본적인 재료물성치, 용접부 형상 치수 그리고 용접영향효과를 입력하여 구조적 해석을 수행하는 개념도이다.

용접부 피로수명의 예측을 위해서 용접부의 기하학적인 불연속에 의하여 발생되는 국부응력과 국부변형률을 탄소성 유한요소해석을 통하여 구한 후, 국부변형률근사법과 손상발전방정식으로 피로균열발생수명을 예측할 수 있다.

본 시스템에서 적용하는 있는 용접부 피로수명을 예측 모델을 적용하는 방법을 Fig. 4에 나타내었다. 국부변형률 근사법과 같은 방법으로 주변형률 주응력을 응력집중부에서 산출하여 손상역학 유한요소코드에 적용하여 손상 발생량을 정량적으로 계산하여 용접부의 피로수명을 예측하는 도식도이다.

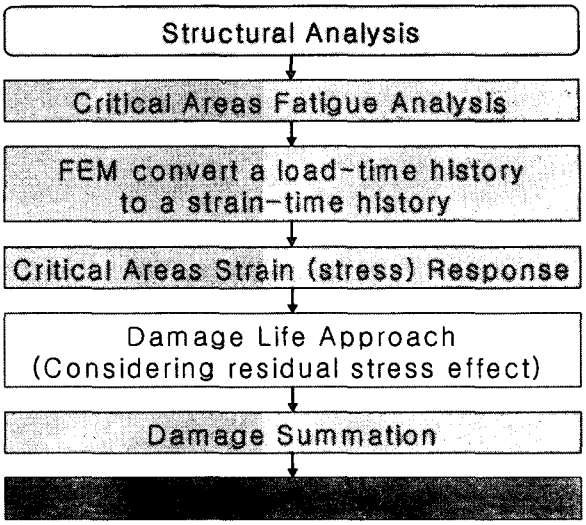

Fig. 4 Damage-based Fatigue assessment (Developed approach)

이 시스템의 용접부 피로평가 수법에 대한 검증으로 용접부의 기하학적인 불연속에 의하여 발생되는 국부응력과 국부변형률을 탄소성 유한요소해석을 통하여 구한 후, 국부변형률 근사법을 적용한 피로균열 초기발생수명과 비교해보았다.[10]

Fig. 5는 이러한 구조적인 해석에서 국부변형률 근사법을 이용하여 최대 주변형률을 나타내는 지점에서의 피로수명해석을 수행의 도식표이다.

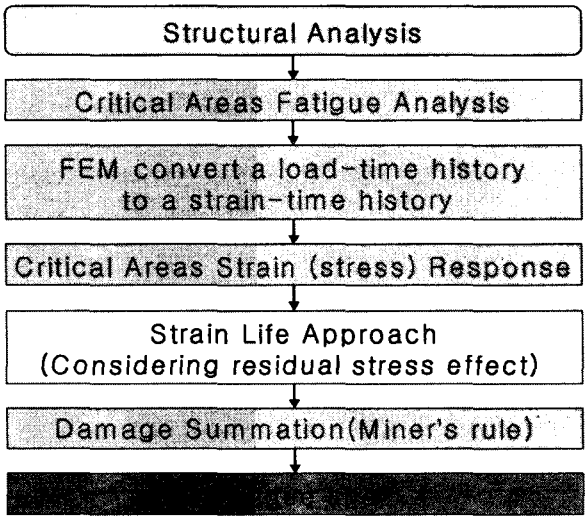

Fig. 5 Strain-based Fatigue assessment (Conventional approach)

strain-based와 damage-based 평가 기법을 비교하기 위하여 프로그램피로평가 결과를 Fig.6에서 보여주고 있다.

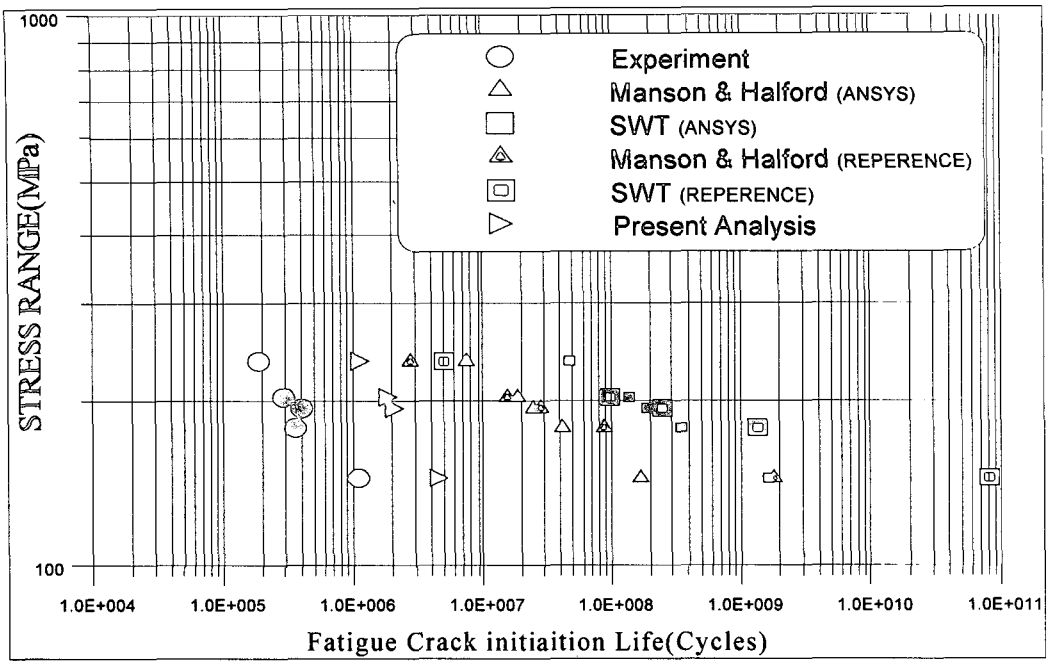

Fig. 6 Fatigue Crack Initiation life of the present procedure combined with Strain-based Fatigue assessment (without considering residual stress effect)

2.5 전문가시스템의 활용 예

전술한 바와 같이, 해석용 재료상수들이 선택되면, 이를 바탕으로 이미 탑재되어 있는 동일한 해석코드를 이용하여 반복하중하의 재료에 대한 피로강도평가를 수행한다.

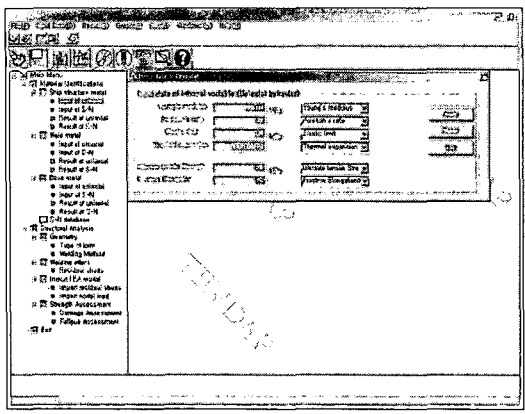

Fig. 7 Material properties input process on the GUI program

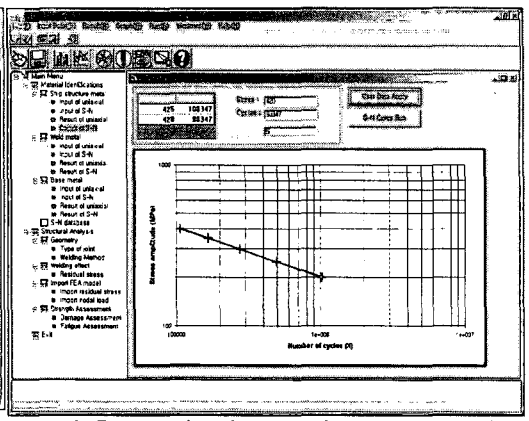

Fig. 8 Determination fatigue properties (S-N relation)

Fig. 7는 피로강도평가에 대한 초기입력 단계이고, Fig. 8에는 상기의 과정을 거쳐서 얻어진 피로강도특성 평가결과를 나타내고 있다.

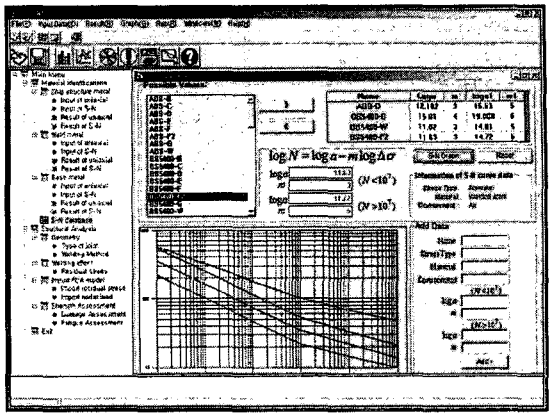

Fig. 9 Database for S-N relation ABS, IIW, DNV and BS

한편, 실제 조선소에서는, 각 선급협회가 제시하는 기본강재들에 대한 피로강도를 기준으로 다양한 설계활동을 수행하고 있다.

가이드 혹은 테이블화 되어있는 기존의 자료들에 대한 체계적인 조사를 바탕으로, 본 시스템에서는 선급용 강재의 피로강도 특성 데이터베이스를 구축하고, 간단히 이들 정보를 추출하여 사용할 수 있는 모듈로서 포함시켰다. Fig. 9에서는 이를 프로그램화 하여 나타내었다.

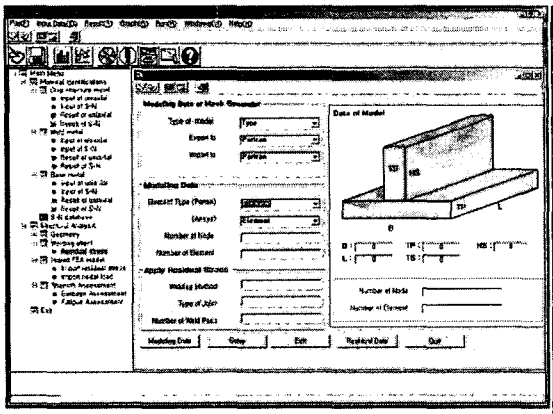

Fig. 10 Welding effect if residual Stress

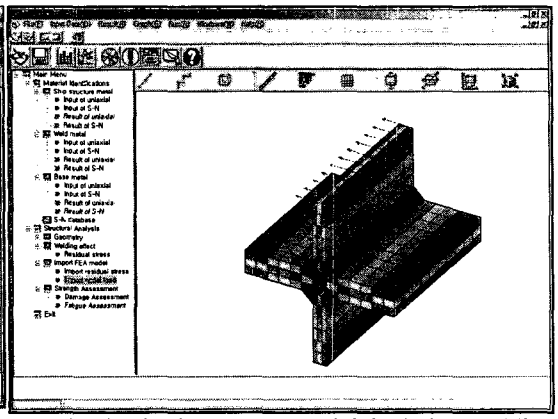

Fig. 11 Apply for target model includes welding effect

Fig. 10은 용접이음부의 형상과 용접방법에서의 각각의 초기잔류응력의 근사식에 필요한 함수를 각각 적출하여 유한요소모델에 용접에 의한 초기잔류응력을 분포시키는 것이며, Fig. 11에서는 강도평가를 위한 하중입력을 보여주고 있다.

이상과 같이, 용접부의 특성 평가를 해석용 입출력자료의 자동처리로 사용자가 보다 빠른 시간으로 용접부의 강도특성을 내부적으로 자동처리 모듈로 탑재하여 실시간으로 평가할 수 있도록 하였다. 또한 용접부의 특수 형상은 피로특성평가는 기존의 범용유한요소해석 코드와의 연동 가능하게 하여 용접부 피로평가를 할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는, 간단한 기계적 특성치만을 이용하여 강재의 피로특성을 평가할 수 있는 해석적 기법을 개발하였다. 즉, 개발이론을 손상역학기법을 이용한 비선형유한요소해석코드에 적용하고, 이를 GUI type 통합시스템에 탑재하였다. 이를 이용하여 각종 강재별 손상특성과 용접부의 강도 특성을 체계적으로 평가할 수 있으며, 용접부를 대상으로 손상 특성 및 피로강도를 정량적 평가하면서 실시간으로 수행할 수 있다.

본 개발 시스템은, 각종 강재의 피로강도 특성을 손쉽게 평가할 수 있을 뿐만 아니라, 다양한 강재의 손상발생 특성도 정량적으로 평가할 수 있으므로, 선박설계 활동에서 가장 중요시되고 있는 용접부의 강도 특성을 체계적으로 평가할 수 있는 기초로 활용될 수 있다. 또한 본 연구를 이용하여, 설계지원용 기법으로 활용한다면 효율적이고 비용절감을 기대할 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

[1] K.J. Bathe, "Finite Element Procedures", Prentice-Hall International, Inc., 1966.

[2] J.J. Skrzypek, and A. Ganczarski., "Modeling of Material Damage and Faiure of Structures" - Theory and Application, Springer, 1998.

[3] J.M. Lee and Y. Toi, "Damage Analysis of Functionally Gradient Materials Subjected to Thermal Shock and Thermal Cycle", JSME International Journal Series A, Vol.45, No.3, pp.331-338, 2002.

[4] N. Mostaghel and R. A. Byrd, "Inversion of Ramberg-Osgood equation and description of hyteresis loops", International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol.37, pp.1319-1335, 2002.

[5] J. Lemaitre and J.P. Sermage, "One Damage Law for Different Mechanisms" Computational Mechanics, Vol.20, pp.84-88, 1997.

[6] Y. N. Rabtnov and A. Ganczarski, "Creep Problems in Structural Members", North-Holland, 1969.

[7] J. R. Koza, "Generic programming", Cambridge, MA: MIT Press, 1992.

[8] K. Matsuoka, I. Takahashi, T. Yoshii, H. Iidaka and E. Fujii. "influence of plate thickness and hear input on fatigue strength of non-load-carrying fillet weld joints." J Soc Naval Arch, Vol. 168, 507-517, 1990.

[9] K. Matsuoka, T. Yoshii, "Weld Residual Stress in Corner Boxing Joints", J Soc Naval Arch, Vol. 180, 753-761, 1996.

[10] T.L. Teng, P.H. Chang, "Effect of residual stresses on fatigue crack initiation life for butt-welded joints", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 145, 325-335, 2004.