

연속체 손상역학을 이용한 용접구조물의 수치피로시험기법

이치승* · 김영환* · 김태우* · 유병문* · 이제명*

*부산대학교 공과대학 조선해양공학과

Numerical Fatigue Test Method of Welded Structures Based on Continuum Damage Mechanics

Chi-Seung Lee*, Young-Hwan Kim*, Tae-Woo Kim*, Byung-Moon Yoo* and Jae-Myung Lee*

*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Corresponding author ; jaemlee@pusan.ac.kr

(Received April 22, 2008 ; Revised May 22, 2008 ; Accepted June 16, 2008)

Abstract

Fatigue life evaluation of welded structures in a range of high cycles is one of the most difficult problems since extremely small plastic deformation and damage occur during the loading cycles. Moreover, it is very difficult to identify the strong non-linearities of welding, inducing residual stress. In this paper, numerical fatigue test method for welded structures was developed using continuum damage mechanics with inherent strain. Recently, continuum damage mechanics, which can simulate both crack initiation at the micro-scale level and crack propagation at the meso-scale level, has been adopted in the fracture related problem. In order to consider the residual stresses in the welded structures, damage calculation in conjunction with welding, inducing inherent strain, was proposed. The numerical results obtained from the damage calculation were compared to experimental results.

Key Words : Welded structures, Continuum damage mechanics, High cycle fatigue, Inherent strain method, Residual stress

1. 서 론

선박 및 해양구조물과 같은 구조물은 수(기)밀성, 접합효율성 등으로 인해 필수적으로 용접작업이 수행된다. 용접구조물이 그 기능을 수행함에 있어 구조 강도를 건전한 수준으로 유지하는 것은 매우 중요하지만, 용접과정에서 발생하는 여러 가지 결함으로 인해 구조 강도가 현저하게 저하하는 현상이 자주 발생한다. 용접으로 인해 유발되는 대표적 결함에는 수소 유기균열(hydrogen induced cracking), 잔류응력문제 등이 있는데, 특히 용접이음부 및 이와 인접한 영역에서 발생하는 잔류응력은 구조물의 강도를 현저하게 저하시키거나 파단을 촉진시키는 역할을 함으로써 전체적인 기능을 상실하게 만드는 원인이 되기도 한다.

용접구조물에 존재하는 잔류응력은 열변형률의 불일치로 인하여 나타나는데, 이는 용접구조물의 피로수명에 큰 영향을 미치며 특히, 인장 잔류응력은 구조물의 피로수명을 급격히 감소시키는 원인으로 알려져 있다¹⁾. 복잡한 형상을 가지는 구조물을 포함한 강 구조물의 잔류응력을 정확하게 예측하는 것은 매우 어려우나, 용접구조물의 정확한 피로평가를 위해서 잔류응력효과는 반드시 고려되어야 한다.

잔류응력을 이론적으로 해석하는 방법에는 열탄소성 해석법과 고유변형도법이 있다. 열탄소성해석법은 용접에 따른 열전달 과정 및 복잡한 탄소성 반복 과정을 시간에 따라 추적하여 최종 잔류응력을 구하는 방법이며, 고유변형도법은 불균일한 온도분포의 결과로 생기는 용접이음부 주위의 탄성 응력장의 특이점(Singular point)을 통해 잔류응력을 구하는 방법이다²⁻⁵⁾. 컴퓨터

사용 시간 등을 고려하였을 때, 고유변형도법은 열탄소성해석법에 비해 시간 및 비용적인 면에서 다소 경제적이라 할 수 있다.

반복하중을 받는 용접구조물은 균열발생에서 균열진전에 이르는 파단과정을 거치게 되는데, 파단에 이르기까지의 균열전파에 관한 연구는 파괴역학의 발전에 힘입어 활발한 연구가 지금까지 진행되고 있다⁶⁾. 그러나 파괴역학 관점에서 균열진전을 평가하기 위해서는 초기 균열의 가정이 필요한데, 이의 정도나 위치를 가정하기란 매우 어렵다. 따라서, 용접구조물의 보다 정확한 균열성장해석을 위해서는 연속체 손상역학을 기반으로 하여 손상누적을 통한 초기균열의 위치를 예측하는 것이 필요하다⁷⁾. 연속체 손상역학은 정확한 파단 기준을 통해 다축 하중 상태에서의 구조물 내부의 균열발생 및 균열진전을 모두 기술할 수 있다.

본 연구에서는, 고유변형도법 및 연속체 손상역학에 기반을 둔 용접구조물의 수치피로시험기법을 개발하였다. 용접구조물의 잔류응력분포는 고유변형도법을 통해 계산되었으며, 고사이클피로거동이 해석되었다. 제안된 방법의 검증을 위해 수치해석결과를 피로시험결과와 비교하였다.

2. 수치피로시험기법

2.1 용접구조물의 고유변형도 및 잔류응력

용접구조물의 잔류응력은 실험적 방법이나 열탄소성법과 같은 해석적 방법 등으로 구할 수 있다. 이러한 방법들은 정확한 결과를 제공하지만, 시간 및 비용 소모적인 방법이다. 이의 대안으로, 용접조건, 재료물성치, 기하학적 정보만으로 잔류응력을 예측할 수 있는 기법이 제안되어왔다³⁻⁵⁾.

Ueda 등은 맞대기용접구조물의 횡단면에서의 종방향 고유변형도를 그림 1 및 그림 2에 보인 바와 같이 사다리꼴 모양으로 근사한 후, 용접조건, 재료물성치, 기

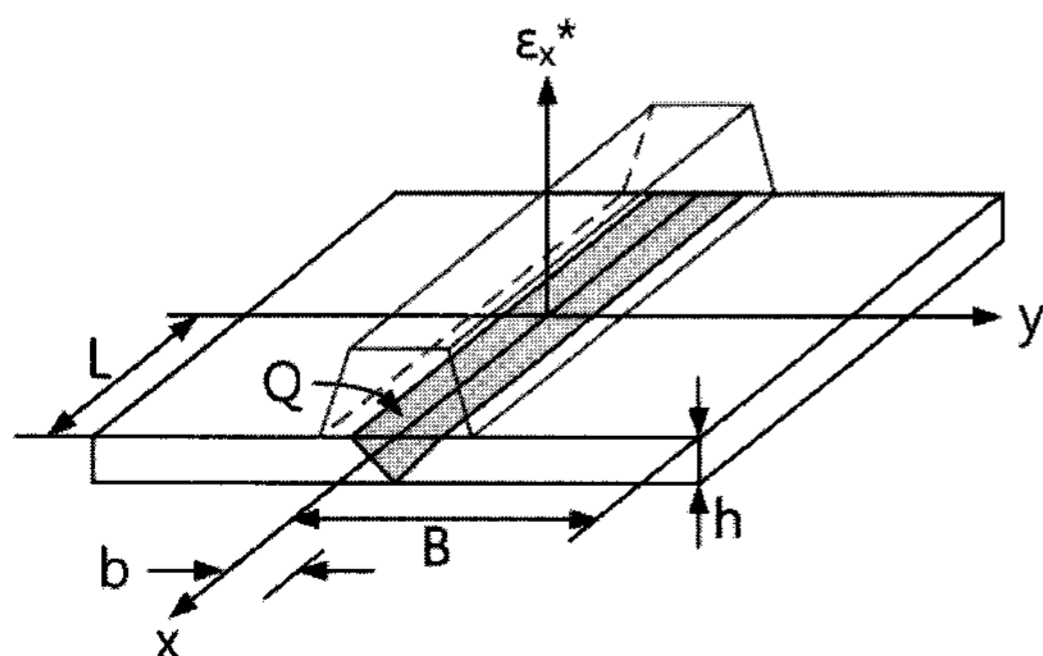


Fig. 1 Butt welded plate and its inherent strain distribution (trapezoidal area)

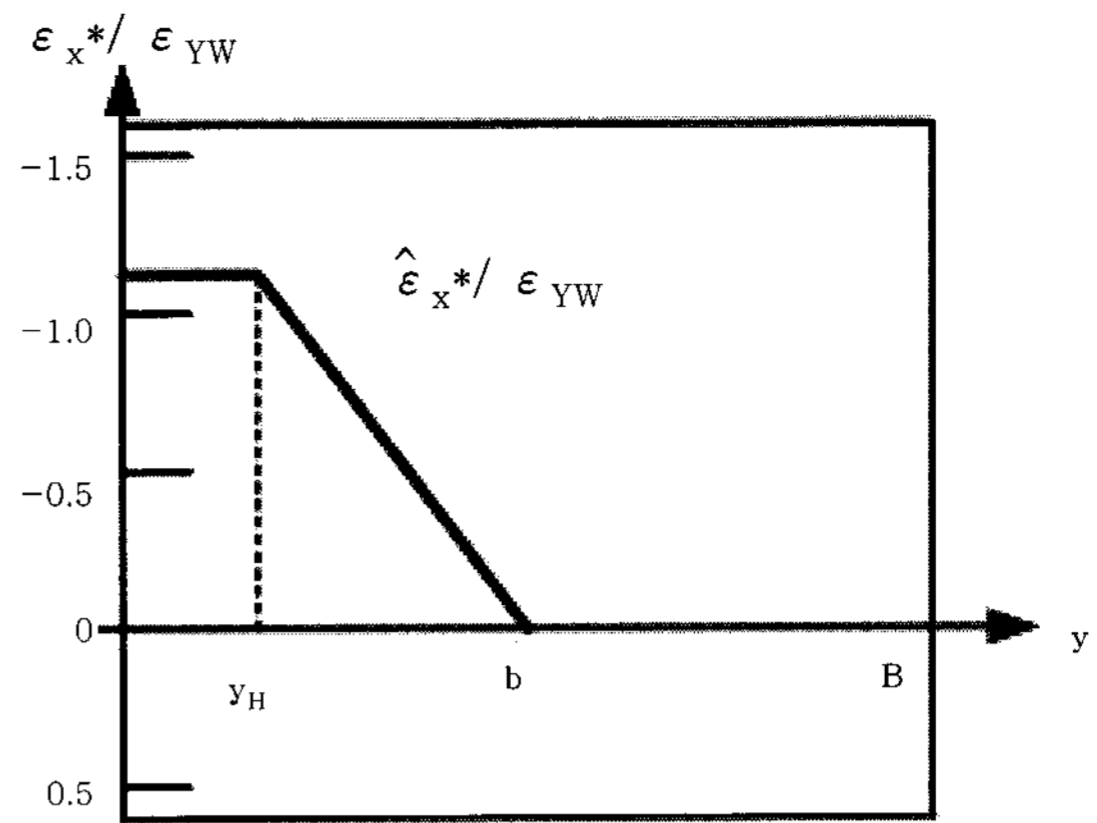


Fig. 2 Simplified inherent strain distribution

하학적 정보를 통한 이론식을 식 (1)-(8)과 같이 개발하였다⁴⁾.

$$y_H = \frac{0.242Q}{c\rho(T_m - T_0)} \quad (1)$$

$$b = \xi b_0 \quad (2)$$

$$\hat{\epsilon}_x = \zeta \hat{\epsilon}_{x0} \quad (3)$$

$$b_0 = \frac{0.242\alpha EQ}{cph\sigma_{YB}} \quad (4)$$

$$\hat{\epsilon}_{x0} = \frac{\sigma_{YW}}{E} \quad (5)$$

$$\xi = 1 - \frac{0.27\alpha ET_{av}}{\sigma_{YB}} \quad (6)$$

$$\zeta = -1 - \frac{0.27\alpha ET_{av}}{\sigma_{YB}} \quad (7)$$

$$T_{av} = \frac{Q}{c\rho A} \quad (8)$$

여기서,

- y_H : Width of the heat affected zone(HAZ)(mm)
- Q : Line heat input(J/mm)
- c : Specific heat(J/g°C)
- ρ : Density(g/mm³)
- T_m : Mechanical melting point over which yield stress disappear(°C)
- T_0 : Room temperature(°C)
- b : Width of the inherent strain zone for a finite plate where the average temperature rise T_{av} tends to zero(mm)
- b_0 : Width of the inherent strain zone for an infinite plate where the average tem-

- perature rise T_{av} tends to zero(mm)
- ξ : Normalized width of the longitudinal inherent strain
- $\hat{\varepsilon}_x^*$: Inherent strain magnitude
- $\hat{\varepsilon}_{x0}^*$: Inherent strain magnitude in infinite plate
- ζ : Normalized magnitude of the longitudinal inherent strain
- α : Linear thermal expansion coefficient(1/°C)
- E : Young's modulus(GPa)
- h : Thickness of plate(mm)
- σ_{YB} : Yield stress of base metal(MPa)
- σ_{YW} : Yield stress of weld metal, HAZ(MPa)
- A : Area of transverse cross section(mm²)
- T_{av} : Average temperature(°C)

한편, 식 (9)-(12)의 구성방정식 및 평형방정식을 통해, 그림 3에 보인 바와 같이 잔류응력을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^* \quad (9)$$

$$\sigma_{ij}^0 = E_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e = E_{ijkl} (\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^*) \quad (10)$$

$$\sigma_{ij}^0 n_j = (E_{ijkl} \varepsilon_{kl}) n_j - (E_{ijkl} \varepsilon_{kl}^*) n_j = 0 \quad (11)$$

$$\sigma_{ij,j}^0 = (E_{ijkl} \varepsilon_{kl})_{,j} - (E_{ijkl} \varepsilon_{kl}^*)_{,j} = 0 \quad (12)$$

여기서,

E_{ijkl} : Elastic modulus tensor

σ_{ij}^0 : Residual stress

ε_{ij}^e : Elastic strain

ε_{ij}^* : Inherent strain

ε_{ij} : Total strain

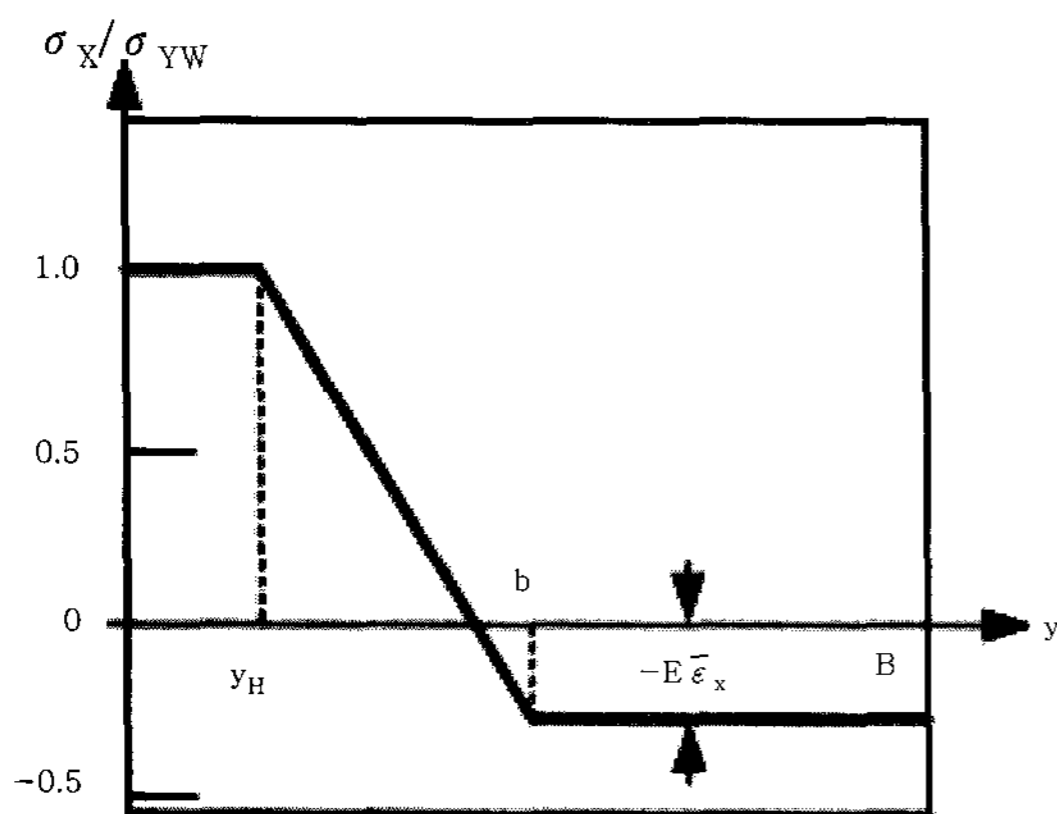


Fig. 3 Simplified residual stress distribution

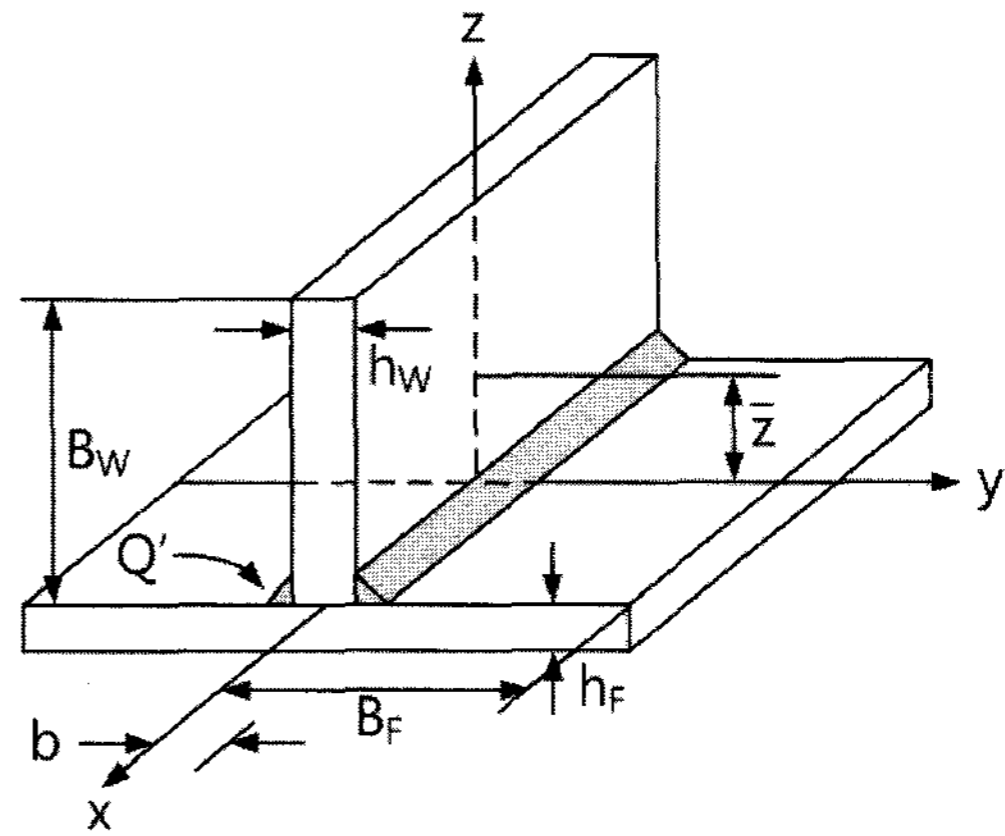


Fig. 4 Fillet welded plate

또한, Yuan 등은 그림 4에 보인 바와 같은 T-조인트 용접구조물의 잔류응력에 대한 이론식을 식 (13)-(17)과 같이 제안하였다⁵⁾.

$$Q' = \frac{2Qh}{2(h_F + h_W)} \quad (13)$$

$$b_0 = \frac{0.484\alpha EQ}{c\rho(2h_F + h_W)\sigma_{YB}} \quad (14)$$

$$\xi = 1 - \frac{0.27\alpha ET_{av}(1 + \beta)}{\sigma_{YB}} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{\bar{z}^2 A}{I} \quad (16)$$

$$T_{av}' = T_{av} + \Delta T_{av} \quad (17)$$

여기서,

Q' : Modified line heat input(J/mm)

h_F : Thickness of flange(mm)

h_W : Thickness of web(mm)

\bar{z} : Distance between weld center and neutral axis of transverse cross section(mm)

I : Inertia moment of transverse cross section (mm⁴)

β : Dimensionless factor which is measuring the flexibility against to the bending deformation during welding

T_{av}' : Modified average temperature(°C)

2.2 연속체 손상역학

하중의 크기가 재료의 항복응력보다 낮을 경우, 거시적인 범위에서, 소성 및 손상과 같은 재료결합이 관찰되지 않지만, 구조물은 파단에 이른다. 따라서, 이러한

현상의 정확한 기술을 위해 거시적인 범위와 미시적인 범위에 관한 관계를 역학적으로 기술할 필요가 있는데, Lemaitre 등은 그림 5에 보인 바와 같이 미시적 범위에서의 역학적 모델을 거시적 범위로 확장하는 모델(Two-scale model)을 제안하였다⁷⁻⁸⁾.

미시적 수준에서의 손상발전방정식은 다음 식과 같다.

$$\dot{D} = \left(\frac{Y^\mu}{S_1} \right)^{S_2} p^\mu \quad (18)$$

여기서,

- μ : Micro-scale
- D : Damage variable
- Y : Strain energy density release rate
- S_1 : Damage strength
- S_2 : Damage exponent
- p : Accumulated plastic strain

손상의 발전에 따른 균열폐쇄(Crack closure) 효과를 고려한 인장-압축 선택형 변형률에너지 밀도 해방률은 식 (19)와 같다.

$$Y^\mu = \frac{1+\nu}{2E} \left[\frac{\langle \sigma_{ij} \rangle \langle \sigma_{ij} \rangle}{(1-D)^2} + \frac{h \langle -\sigma_{ij} \rangle \langle -\sigma_{ij} \rangle}{(1-hD)^2} \right] - \frac{\nu}{2E} \left[\frac{\langle \sigma_{kk} \rangle^2}{(1-D)^2} + \frac{h \langle -\sigma_{kk} \rangle^2}{(1-hD)^2} \right] \quad (19)$$

여기서,

- $h(0 \leq h \leq 1)$: Crack closure parameter
- ν : Poisson's ratio
- $\langle \rangle$: Macauley parenthesis

미시적 수준에서의 손상발전방정식은 국소화이론(Localization law)을 통해 식 (20)과 같이 거시적 수준에서의 손상발전방정식으로 표현된다.

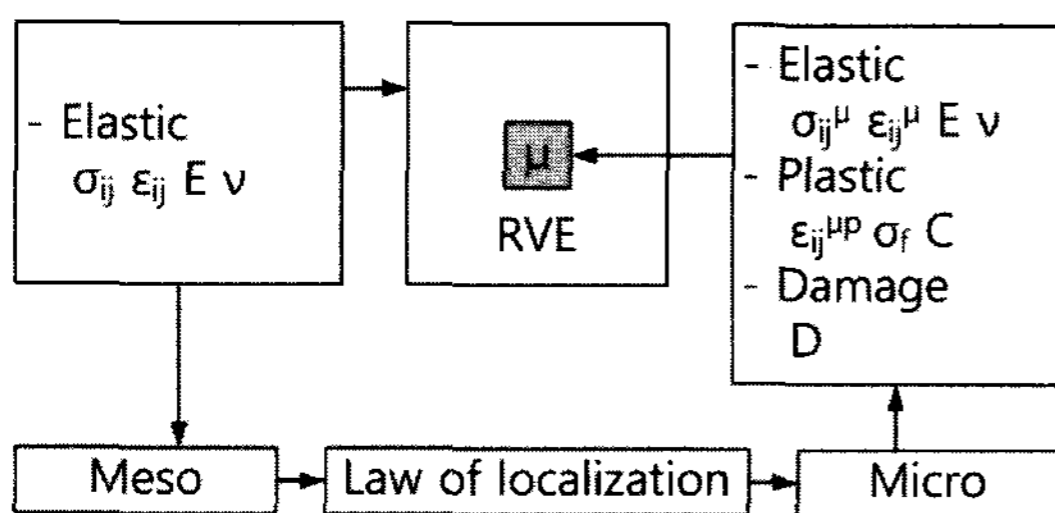


Fig. 5 Two-scale model

$$dD = \left[\frac{(\sigma_{eq} + k\sigma_f)^2 R_v^\mu}{2ES_1(1+k)^2(1-D)^2} \right]^{S_2} \frac{d\sigma_{eq}}{C(1+k)} \quad (20)$$

if $\sigma_{eq} \geq \sigma_f$

식 (20)을 한 주기에 대해 적분하면, 식 (21)과 같이 한 주기에 대한 손상증분의 형태로 표현된다.

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \frac{2(R_v^\mu)^{S_2} [(\sigma_M + k\sigma_f)^{2S_2+1} - [\sigma_f(1+k)]^{2S_2+1}]}{C(1+k)(2S_2+1) [2ES_1(1+k)^2(1-D)^2]^{S_2}} \quad (21)$$

또한, 삼축 응력 함수(Triaxiality function)는 다음과 같다.

$$R_v^\mu = \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left[\frac{\sigma_H(1+k)}{\sigma_{eq} + k\sigma_f} \right]^2 \quad (22)$$

여기서,

- $k(= 3aE/2C)$: Material parameter
- C : Kinematic hardening parameter
- σ_f : Fatigue limit stress

피로수명식 도출을 위한 양함수 표현은 $N=0$ 일 때의 손상변수 $D=0$ 와 $N=N_{cr}$ 일 때의 손상변수 $D=D_{cr}$ 의 경계조건을 고려하여 명확히 기술될 수 있다.

2.3 재료정수의 결정

고사이클피로문제에 있어서 재료정수를 명확히 결정하는 것은 매우 힘들며, 이의 결정을 위한 방법으로 재료피로시험과 같은 연구들이 수행되었다⁹⁾. 그러나 이런 연구는 실험을 직접 수행하여야 하는 등의 시간 및 비용적인 측면에서 그리 효율적이지 못하다. 이의 대안으로 손상 연계 유한요소법을 사용하여 재료정수를 결정하는 기법이 최근 수행되고 있다¹⁰⁻¹²⁾.

그림 6에 KA36강 용접구조물의 모재에 대한 일축인장시험선도와 전술한 방법을 통해 시뮬레이션한 진응력-진변형률 곡선을 보인다.

2.4 수치피로시험 절차

본 연구에서 수행된 수치피로시험 절차를 그림 7에 보인다. 먼저, MSC.Patran을 이용하여 용접구조물 유한요소모델을 모델링한 후, 고유변형도법을 통해 계산된 용접잔류응력분포를 이에 삽입한다. 이어서, MSC.Nastran을 통해 용접구조물의 구조해석을 수행한 후, 구조물의 응력-변형률 정보를 얻는다. 한편, 손상 연계

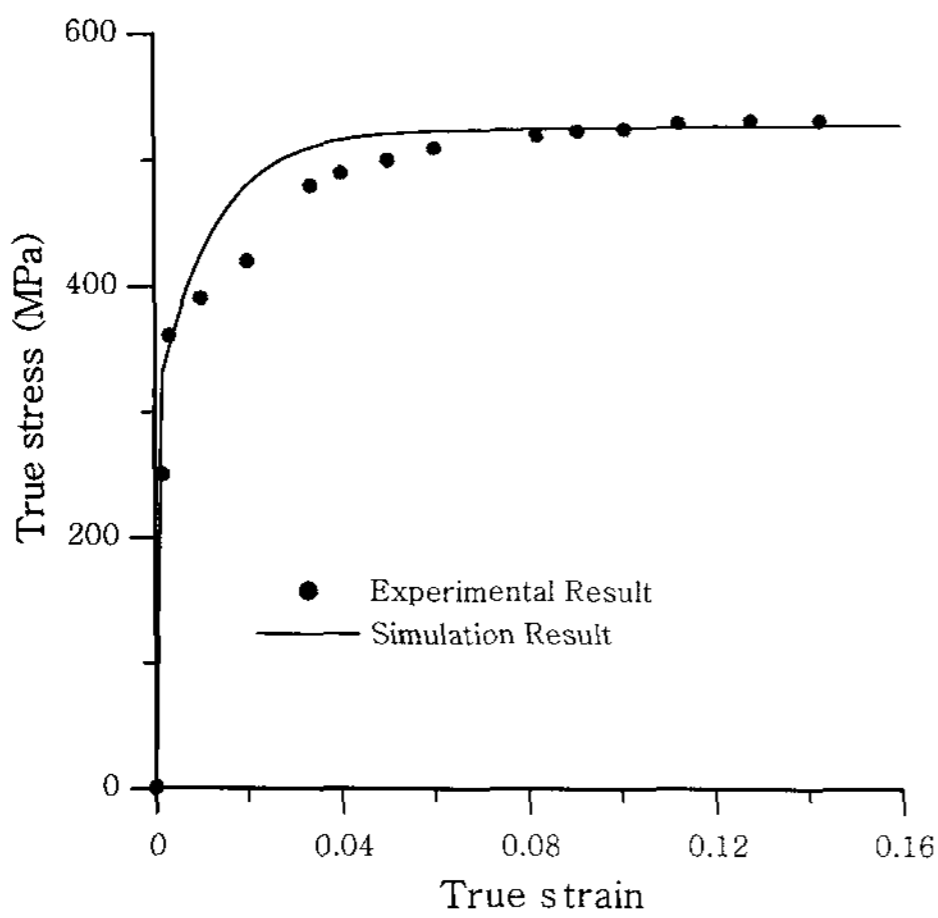


Fig. 6 True stress-strain curves between numerical analysis and experiment of KA36 steel

유한요소법 기반의 In-House Code를 이용하여 용접 구조물의 재료정수를 구한다. 최종적으로, 구조물의 응력-변형률 정보 및 재료정수를 바탕으로 용접구조물의 손상해석을 수행한다. 반복된 구조-손상해석을 통해 용접구조물 유한요소모델의 요소 내부의 손상값이 누적되며, 이 값이 임계손상값에 도달하게 되면 해당 요소의 강성을 손상의 양만큼 수정하게 된다. 수정된 용접구조물 유한요소모델 정보를 바탕으로 구조-손상해석을 계속 수행하게 되며 주요해석영역의 요소 내부 손상값이 임계손상값에 도달하게 되면 해석을 종료하며 이 시점에서의 피로사이클수가 예측 피로수명이 된다.

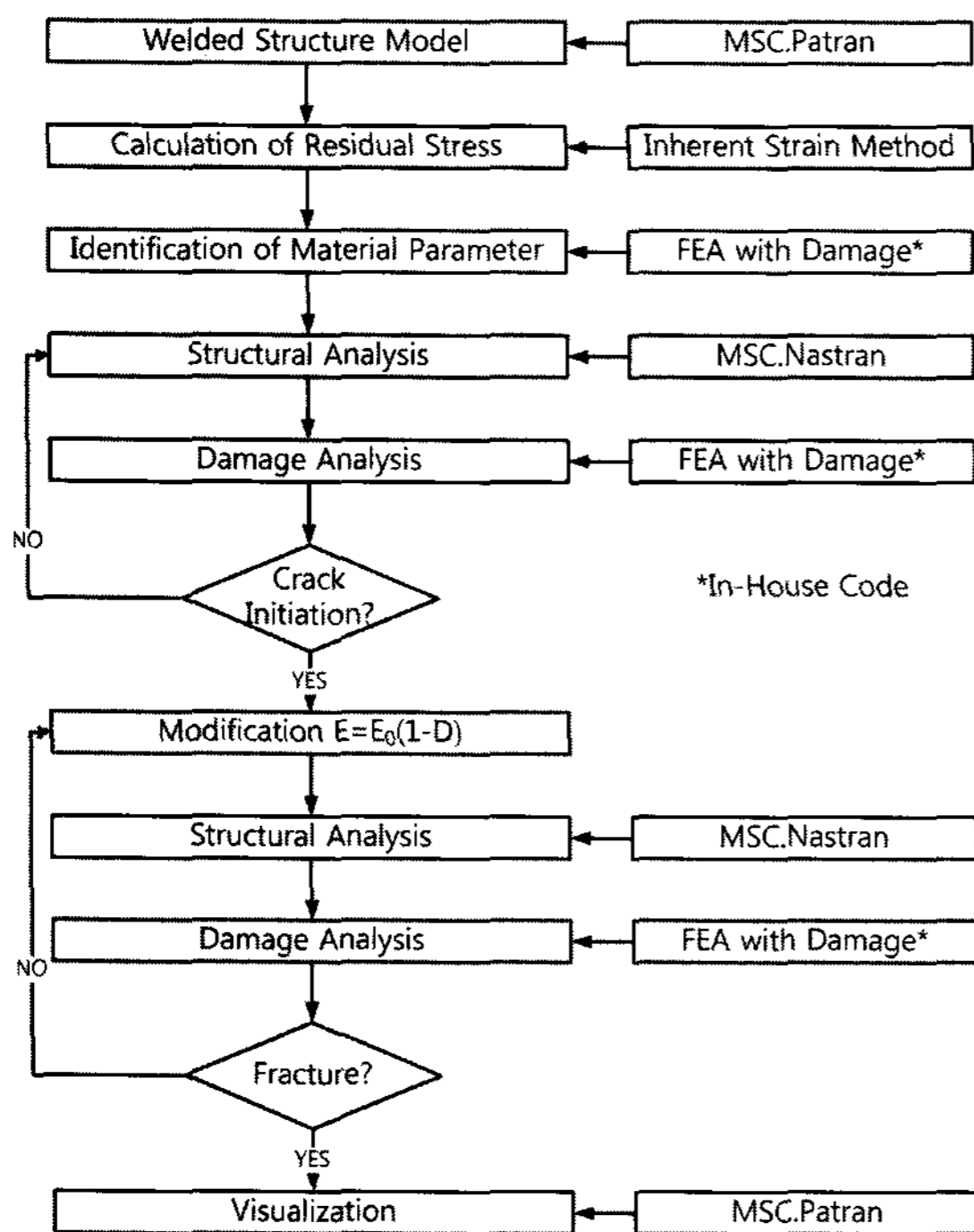


Fig. 7 Numerical fatigue test method procedure

3. 수치피로시험 결과

제안기법을 통해 용접구조물의 수치피로시험을 수행하였으며, 이를 피로시험결과¹³⁾와 비교함으로써 제안기법의 적합성 및 유용성을 검증한다.

그림 8 및 표 1, 표 2에 각각 용접구조물 피로시험편 및 용접조건, 재료정수를 보인다.

수치피로시험은 그림 9 및 그림 10에 보인 바와 같이 용접비드부분에서 균열이 발생하여 파단에 이르는 과정에 걸쳐 수행되었다. 최초 균열은 약 200,000사이클에서 발생하였으며, 약 3,000,000사이클에서 균열이 완전히 전파하여 파단되었다.

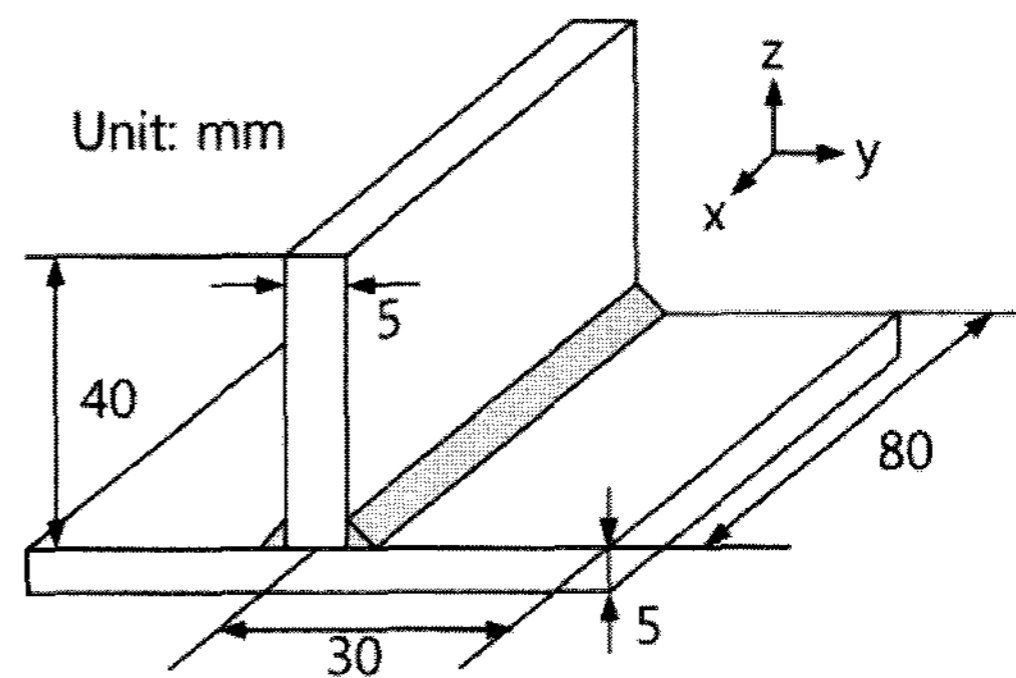


Fig. 8 Welded structures specimen for fatigue test

Table 1 Welding condition

Line heat input(J/mm), Q	2400
Mechanical melting point($^{\circ}$ C), T_m	700
Room temperature($^{\circ}$ C), T_0	15
Specific heat(J/g $^{\circ}$ C), c	0.63
Density(g/mm ³), ρ	7.85×10^{-3}
Linear thermal expansion coeff.(1/ $^{\circ}$ C), α	1.2×10^{-5}
Electric current(A)	250
Electric pressure(V)	26
Welding velocity(cm/mm)	30
Welding method	CO ₂

Table 2 Material parameters of welded structures

	Base metal	Weld, HAZ
Elastic modulus(MPa), E	2.0×10^5	2.0×10^5
Poisson's ratio, ν	0.30	0.30
Fatigue limit strength(MPa), σ_f	285	393
Yield strength(MPa), σ_Y	356	491
Hardening parameter(MPa), C	2850	3928
Damage strength(MPa), S_1	2.85	3.92
Damage exponent, S_2	2.85	3.92

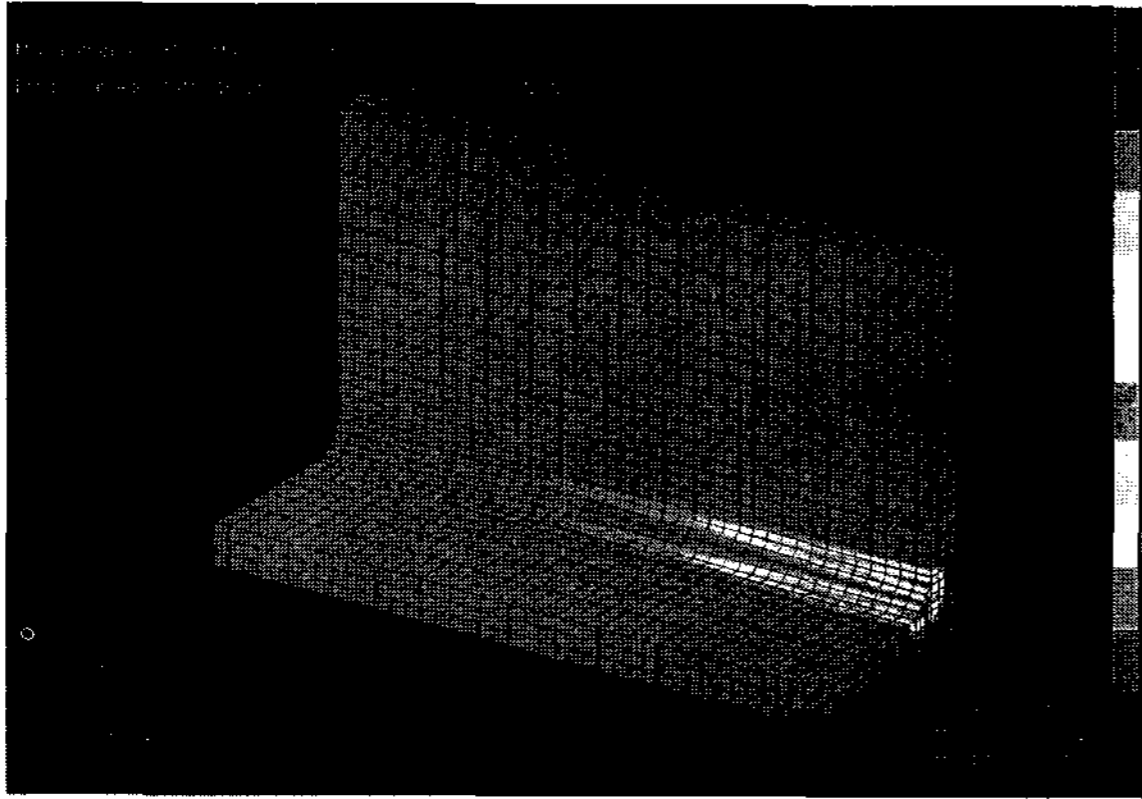


Fig. 9 Damage distribution of crack initiation state

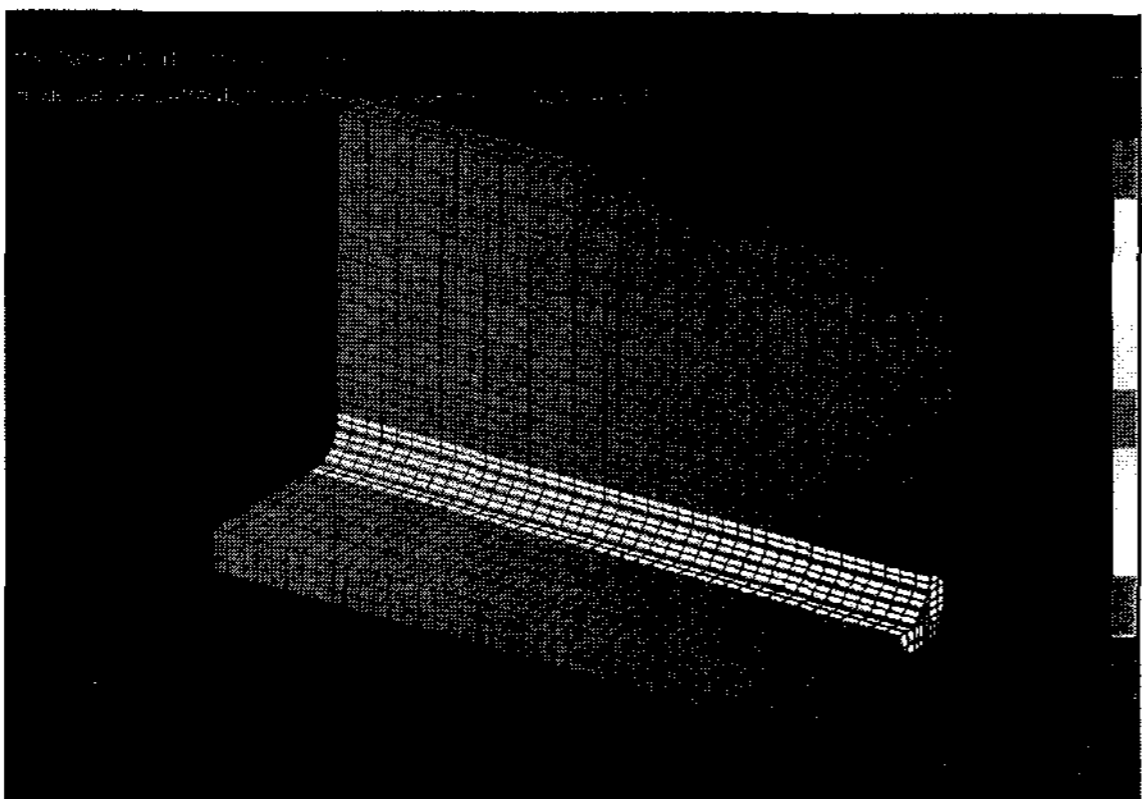


Fig. 10 Damage distribution of fracture state

균열발생위치는 열영향부(HAZ)에서, 균열형태는 토우균열(Toe crack)임을 관찰할 수 있었는데, 이는 일반적인 T조인트 용접구조물의 균열발생위치 및 균열형태¹⁴⁾와 일치한다.

제안기법을 통해 예측된 용접구조물의 피로수명을 그림 11에 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 연속체 손상역학을 이용한 수치피로시험기법을 개발하였으며, 그 결과를 피로시험결과와 비교하여 사용기법의 적합성 및 유용성을 검증하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 용접구조물의 구조강도에 큰 영향을 미치는 잔류응력을 고유변형도법을 이용하여 계산하였으며, 이를 용접구조물 유한요소모델에 적용함으로써 용접구조물의 수치피로시험을 위한 기초환경을 시간 및 비용적인 면에서 매우 효율적으로 구축하였다.

2) 용접구조물에 대한 모델링에서 피로수명예측에 이르는 수치피로시험 과정을 상용유한요소해석코드와 In-House Code를 연계하여 구축하였으며, 이는 유한요소

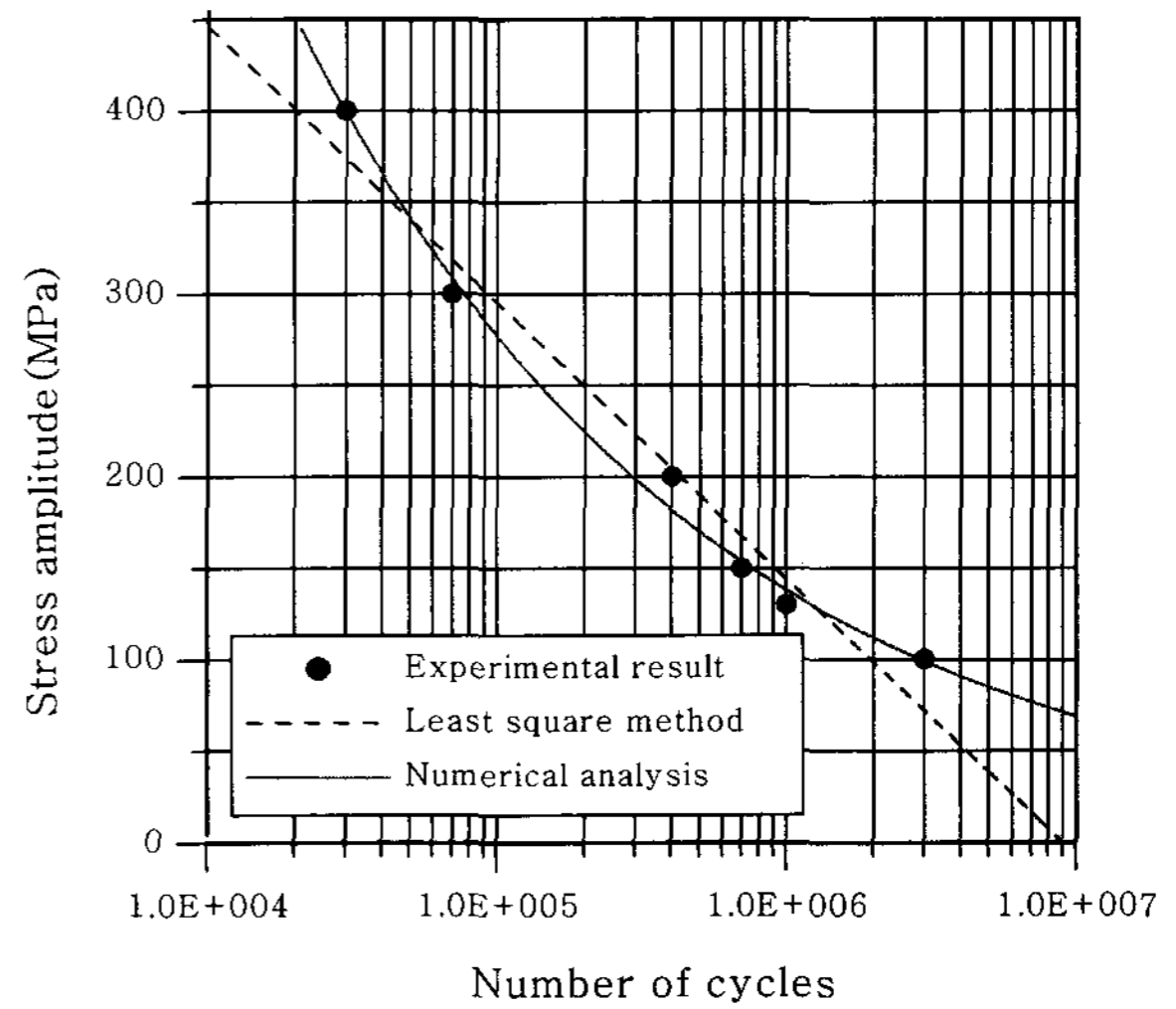


Fig. 11 Wöhler curve of experimental result and numerical analysis of welded structures

법 기반 피로성능평가 분야에서 큰 활용성을 가지리라 예상된다.

3) 최근 적합성 및 유용성이 활발히 검증되고 있음에도 불구하고 재료정수 선정의 어려움으로 인해 연속체 손상역학의 역학문제에 대한 적용상의 제한이 있었으나, 본 연구에서 제안한 손상 연계 유한요소법을 통해 재료정수 선정에서 역학문제 적용에 이르는 여러 난점들을 해결하였다.

4) 막대한 시간과 비용이 소요되는 피로시험과 비교할 때, 제안기법은 고효율·비용절감형 예측기법임을 확인하였으며, 본 연구의 기법이 용접구조물의 피로성능평가분야에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. E. Oñate and M. Cervera: Derivation of Thin Plate Bending Elements with One Degree of Freedom Per Node, *Engineering Computation*, **10** (1993), 543-561
2. Chang Doo Jang and Seung Il: Calculation of Residual Stresses by Inherent Strain Method, *Journal of KWJS*, **7-1** (1989), 36-41 (in Korean)
3. Y. Ueda and K. Fukuda: New Measuring Method of Three-dimensional Residual Stresses in Long Welded Joints using Inherent Strains as Parameters, *Journal of Engineering Materials and Technology*, **111** (1989), 1-8

4. Y. Ueda and M.G. Yuan: Prediction of Residual Stresses in Butt Welded Plates using Inherent Strains, *Journal of Engineering Materials and Technology*, **115** (1993), 417-423
5. M.G. Yuan and Y. Ueda: Prediction of Residual Stresses in Welded T- and I-joints using Inherent Strains, *Journal of Engineering Materials and Technology*, **118** (1996), 229-234
6. T.L. Anderson: *Fracture Mechanics*(2nd Edition), CRC Press, 1995, 1-764
7. J. Lemaitre: *A Course on Damage Mechanics*(2nd Edition), Springer-Verlag, 1992, 1-228
8. J. Lemaitre, J.R. Sermage and R. Desmorat: A Two-scale Damage Concept applied to Fatigue, *International Journal of Fracture*, **97** (1999), 67-81
9. C.A. Brebbia and A.V. Farahani: *Fatigue Damage of Materials*(1st Edition), WIT Press, 2003, 309-319
10. Jae Myung Lee and Dong Ryul Yoon: Development of Numerical Method for Assessment of Crack Initiation in Welded Joint, *Journal of KWJS*, **20-2** (2002), 27-31 (in Korean)
11. Jae Myung Lee, Jeom Kee Paik, Sung Won Kang and Myung Hyun Kim: Health Monitoring of Weldment by Post-processing Approach using Finite Element Analysis, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, **16-4** (2002), 32-36 (in Korean)
12. Chi Seung Lee, Young Hwan Kim, Tae Woo Kim and Jae Myung Lee: Numerical Fatigue Test Method based on Continuum Damage Mechanics, *Journal of KWJS*, **25-1** (2007), 63-69 (in Korean)
13. Wha Soo Kim: Residual Stress & Fatigue Strength in Welded Ship Structures, *Journal of KWJS*, **15-3** (1997), 12-19 (in Korean)
14. 엄기원: *최신용접공학*(제 1판), 동명사, 2004, 1-402