

유한요소해석 후처리 기법을 이용한 용접부의 건전성 평가

이제명* · 백점기* · 강성원* · 김명현**

*부산대학교 조선해양공학과

**뉴욕전력 연구개발원

Health Monitoring of Weldment By Post-processing Approach Using Finite Element Analysis

JAE-MYUNG LEE*, JEOM-KEE PAIK*, SUNG-WON KANG* AND MYUNG-HYUN KIM**

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

**Research and Development, New York Power Authority, White Plains, NY, 10601 U.S.A.

KEY WORDS: Health Monitoring 건전성평가, Continuum Damage Mechanics 연속체 손상역학, Finite Element Methods 유한요소법, Residual Stress 잔류응력, Welding-induced Damage 용접유기손상

ABSTRACT: In this paper, a numerical methodology for health monitoring of weldment was proposed using finite element method coupled with continuum damage mechanics. The welding-induced residual stress distribution of T-joint weldment was calculated using a commercial finite element package SYSWELD+. The distribution of latent damage was evaluated from the stress and strain components taken as the output of a finite element calculation. Numerical examples were given to demonstrate the usefulness of this so-called "post-processing approach" in the case of welding-induced damage assessment.

1. 서 론

선박, 해양구조물, 교량, 압력용기, 송전용 철탑 등, 대형 구조물의 조립에 사용되는 용접은, 용접부에 존재하는 결함들이 구조물의 강도유지에 큰 영향을 미친다는 이유로 조립단계에서부터 까다로운 조건들을 많이 요구한다(AWS). 이는 구조물의 붕괴 등을 유발하는 치명적인 결함들이 용접부에서 대부분 발생하고 있기 때문이며, 따라서 용접부의 건전성평가에 대한 엄격한 관리가 행해지고 있다.

그러나, 최근의 각종 신공법 도입 및 신강재 개발에 따르는 기존연구 및 관리방법의 확장이 체계적으로 이루어지지 않고 있으며, 이러한 현실은 설계나 시공상의 많은 변화가 있음에도 불구하고 강도 및 건전성 평가에 관한 기준은 기존의 것을 그대로 사용하는 모순으로 이어지고 있다.

특히 선박, 해양구조물 등과 같은 대형구조물의 경우는 대부분이 주문생산방식이며, 잘못된 설계기준 혹은 시공기준이 재시공에 따른 엄청난 손실을 야기함은 물론, 설계변경, 재시공 등도 충분한 강도유지를 보장하지 못한다. 또한, 용접부에 존재하면서 육안으로 판별이 되지 않는 내부결함들은 겉으로 드러나지 않은 채로, 구조물의 성능저하 및 수명단축의 커다란 원인을 제공하기도 한다. 초음파탐상을 비롯한 여러 가지 비파괴검사가 일반적으로 용접이 완료된 뒤에 수행되는 것을 감안한다면, 용접부의 결함파악을 위한 예측수법 개발은 재시공 또

는 보수공사에 천문학적 비용을 필요로 하는 대형 용접구조물에 아주 유용한 수단으로 사용될 것은 자명한 일이다.

본 연구에서는, 이러한 용접부의 강도평가 그리고 건전성 평가를 목적으로, 유한요소해석을 이용한 해석적 수법을 개발하고, 간단한 용접구조물에의 적용을 통하여 유용성을 검토한다.

2. 유한요소해석

2.1 3차원 열전도해석

본 연구에서는 몇 가지 전형적인 형상의 용접구조물 중에서 용접균열사태가 많이 보고되고 있는 필릿이음부에 대한 3차원 용접시뮬레이션 및 손상해석을 수행한다.

용접관련 문제에 대한 유한요소해석의 경우, 실제의 용접현상을 얼마만큼 충실히 계산에 고려하는지의 여부가 해석결과에 신뢰성향상에 중요한 인자로서 작용한다. 그리고 해석과정 그 자체는, 역학적으로 인장 혹은 압축응력을 발생시키는 원인이 다르다는 것만 제외하면, 보통의 열응력문제 혹은 초기치문제 해법과 동일한 과정을 거치게 된다(Zienkiewicz, 2000). 따라서, 용접열원에 의한 열전도해석이 수행되고, 해석모델내부의 전 위치에서 얻어진 온도구배에 의해 변형해석을 수행한다.

보통의 경우, 이 열전도해석을 수행할 때, 용접이라는 비교적 특수한 공정적인 상황을 고려하기 위하여, 용접아크의 실시간 이동에 대한 구체적인 표현, 온도범위에 따라 서로 다른 물리적 성질 등, 일반적인 유한요소해석기법에 추가하여 몇 가지 특별한 고려가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 고려를 비교적 쉽게 할 수 있도록 개발되어진 범용해석코드 SYSWELD+(2000)를 이용하여 잔류응

제1저자 이제명 연락처: 부산광역시 금정구 장전동 산 30
051-510-2342 jaemlee@pnu.edu

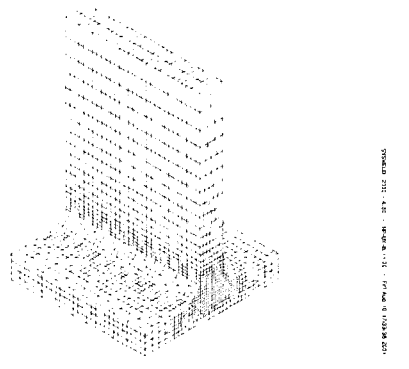


Fig. 1 Finite element mesh subdivision for T-joint

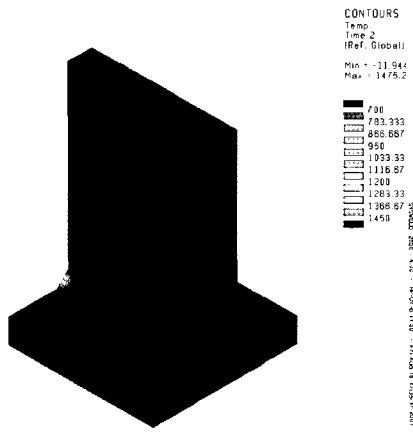


Fig. 2 Temperature distribution at t=2 sec

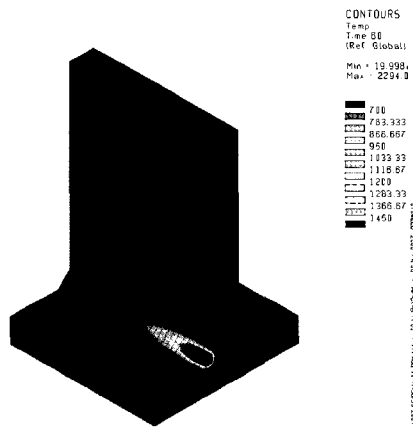


Fig. 3 Temperature distribution at t=60 sec

력해석을 수행하였다. 실제 해석상에서는 상변태 및 이동열원의 효과 등 용접과정 고유의 특성들을 고려한 과도해석을 수행하였다. 유한요소해석결과의 후처리과정을 통한 손상예측을 수행하기 위한 것이 목적이므로, 일반적인 단층용접을 고려한 용접조건을 해석조건으로 설정하였다. Fig. 1에는 해석용 요소 분할도를 나타낸다. 용접아크의 이동은 3차원 이동열원을 나타내는 Double Ellipsoid 모델을 사용하였다(Goldak et al., 1984). Fig. 2, 3에는 용접시작 직후와 끝난 직후에서의 온도분포를 나

타낸다.

2.2 3차원 잔류응력해석

용접잔류응력을 유발시키는 것으로는, 급격한 온도이력의 반복에 따른 국부적인 소성영역의 발생, 재료의 상변태에 따른 비탄성거동, 구조물 자체가 가지는 구속의 정도 등이 있다. 이외에도 상변태(Phase Transformation)에 따른 역학적 특성변화 및 재료물성치의 온도의존성 등에 대한 고려도 실제의 용접현상을 고려한 보다 정밀한 해석을 위해서는 고려되어야 한다 (Devaux, 2000).

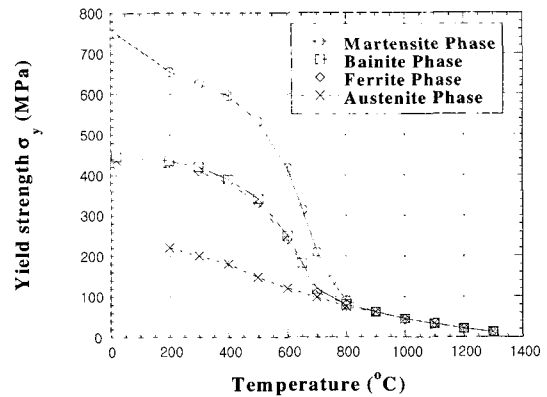


Fig. 4 Temperature dependence yield strength for each phase of filler material

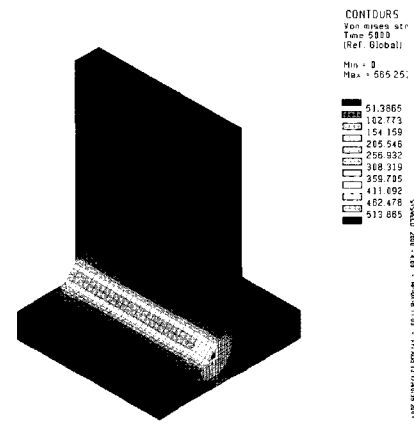


Fig. 5 Equivalent stress distribution at t=5000 sec (MPa)

Fig. 4는, 이러한 용접에 의한 비선형성을 표현하기 위해 사용된 기계적특성의 대표 예로서, 각 상별 온도의존형 항복응력을 나타내고 있다. 즉 잔류응력해석에는 Fig. 4와 같은 각 상별 특성을 고려함으로써, 용접과정 특유의 비선형성을 고려하였다. Fig. 5에서는 전체구조가 충분히 냉각되었다고 판단되는 시간에서의 잔류응력분포로써 von Mises 등가응력 분포를 나타내고 있다. 실험 등에서 얻어지는 전형적인 잔류응력분포(Teng et al., 2001)와 정성적으로 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 이렇게 얻어진 잔류응력 등을 이용하여, 다음 절에서는 손상분포에 관한 예측을 수행한다.

3. 후처리 기법을 이용한 손상평가

재료 및 구조물이 외력의 작용을 받아 그 내부에 미소결함이 발생·성장하여 균열에 이르는 과정을 수치적으로 파악하는 수법의 한 종류로서 손상역학수법이 제안된 이후, 크리프손상, 피로손상 등 과거 해석상의 난점으로 여겨지던 여러 가지 문제에 대한 실용적인 수법으로 이용되어 왔다(Chaboche, 1988). 즉, 재료내부의 손상 역시 응력이나 변형률과 같은 하나의 역학현상임에 착안하고, 변형률-응력관계와 동일한 공역관계 개념으로 손상변수-에너지해방률의 관계를 정의한 후, 이 과정에서 손상발전방정식을 유도해 내는 방법이 널리 사용되고 있다(Skrzypek and Ganczarski, 1999).

일반적으로 유한요소해석 과정에서 이러한 손상발전을 충실하게 고려함으로써 보다 정도 높은 해석결과를 얻고자 하는 방법이 채용되고 있으나, 피로문제 등과 같이 방대한 계산량이 문제가 되는 경우에는, 유한요소해석결과를 이용한 후처리 과정으로 손상평가를 수행하는 방법이 이용되기도 한다(Lemaitre and Doghri, 1994).

3.1 손상발전방정식

본 연구에서는 방대한 계산량을 필요로 한다는 면에서 계산상의 제한요소를 많이 가지는 용접문제에 대해, 전술한 바와 같은 후처리기법을 이용하여 손상평가를 수행한다.

후처리 기법을 이용할 경우, 2장에서 유한요소해석과는 별개로 손상발전을 정의하는 과정인 손상발전방정식의 도출이 필요하게 된다. 본 연구에서는 등방경화 소성이론을 적용한 손상이론을 사용한다(Skrzypek and Ganczarski, 1999).

우선, 등방성 손상발전은 다음 식에 의해 표현된다.

$$\dot{D} = \left(-\frac{Y}{S_1} \right)^{S_2} \dot{p} \quad (1)$$

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

여기서, S_1 및 S_2 는 손상발전에 관계하는 재료정수이며, Y 는 에너지해방률(Energy release rate), p 는 누적 소성변형률 속도를 나타낸다. E , ν , σ_{eq} 및 σ_H 는 탄성계수, 프와송비, 등가응력 및 정수압응력을 나타낸다.

식 (1)은 Y 에 대한 손상변수 D ($0 \leq D < 1$)의 증가율을 정의하고 있으며, 동일한 응력상태라도 변형률속도가 클수록 손상의 증가량도 커짐을 알 수 있다.

손상발전개시는, 누적소성변형률이 한계변형률 ϵ_{pd} 를 초과하면 손상이 발전한다고 다음 식과 같이 가정한다(Toi and Lee, 2002).

$$\dot{D} = \begin{cases} 0 & p < \epsilon_{pd} \\ \dot{D} & p \geq \epsilon_{pd} \end{cases} \quad (3)$$

3.2 재료정수의 결정

2장에서 수행한 잔류응력평가 대상재료에 대한 단축 인장시험에 대하여, 손상발전방정식을 채용한 유한요소해석을 수행하여 각 재료정수를 결정함과 동시에 손상발전방정식에 대한 검증을 실시한다.

먼저 손상효과를 고려한 소성변형률속도에 대한 정의는 다음을 따른다(Toi and Lee, 2002).

$$\left\{ \dot{\epsilon}^p \right\} = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{\left\{ \sigma^d \right\}}{\sigma_{eq}} \quad (4)$$

여기서,

$$\dot{p} = \left(\frac{2}{3} \left\{ \dot{\epsilon}^p \right\}^T \left\{ \dot{\epsilon}^p \right\} \right)^{1/2} = \left(\frac{\sigma_{eq} / (1-D) - R - k}{K} \right)^N \quad (5)$$

$$R = Q_1 p + Q_2 [1 - \exp(-bp)] \quad (6)$$

이 식은 Chaboche, Rousselier에 의한 점소성 구성식을 손상발전을 고려한 등방경화모델로 확장한 이론이다. $\left\{ \sigma^d \right\}$ 는 편차응력을 나타내며, 6개의 파라미터 K, N, Q_1, Q_2, b 는 재료정수, $\langle \rangle$ 는 Macauley 괄호이다.

Rabotnov(1969)에 의해, 크리프 손상문제를 다루기 위해 제안된 손상재료의 응력상태를 나타내는 유효응력 $\left\{ \bar{\sigma} \right\} = \left\{ \sigma \right\} / (1-D)$ 는 변형률 등가가설(Strain Equivalence Principle)과 함께 손상역학에서 자주 이용되는 중요한 개념이다. 변형률을 나타내는 구성방정식은 손상의 유무에 관계없이 그 형태는 변하지 않는다는 가설을 변형률 등가 가설이라고 부르며, 손상변수를 고려한 유한요소정식화에 사용되는 원리이다. 이 원리에 따르면, 손상의 영향을 도입한 구성방정식은 비손상상태의 구성방정식 중의 응력항을 일반적인 응력으로부터 유효응력으로 바꾸어 주면 된다. 변형률 등가 가설과 유효응력 개념을 이용하면, 손상을 고려한 응력변화율벡터와 탄성변형율벡터의 관계는 다음 식에 의해 주어진다.

$$\begin{aligned} \left\{ \dot{\bar{\sigma}} \right\} &= (1-D) \left\{ \dot{\bar{\sigma}} \right\} - \dot{D} \left\{ \bar{\sigma} \right\} \\ &= (1-D) \left[D_\epsilon \left[\left\{ \dot{\epsilon} \right\} - \left\{ \dot{\epsilon}^p \right\} - \left\{ \dot{\epsilon}^T \right\} \right] - \dot{D} \left\{ \bar{\sigma} \right\} \right] \\ &= \left[D_\epsilon \right] \left\{ \dot{\epsilon}^e \right\} - \dot{D} \left\{ \bar{\sigma} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $\left\{ \dot{\epsilon} \right\}$, $\left\{ \dot{\epsilon}^p \right\}$, $\left\{ \dot{\epsilon}^T \right\}$ 그리고 $\left\{ \dot{\epsilon}^e \right\}$ 는 각각 전변형률 속도, 소성변형률속도, 온도변형률속도 그리고 탄성변형률속도를 나타낸다.

3.3 유한요소정식화

소성변형을 및 손상의 발전을 위 식들에 의해 고려함으로써, 유한요소해석에 있어서의 증분형 요소강성 방정식은 초기변형률법(Bathe, 1996)에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$[k_o] \{\Delta u\} = \{\Delta f\} + \{\Delta f_p\} + \{\Delta f_T\} + \{\Delta f_D\} \quad (8)$$

$$[k_o] = \int_V [B_o]^T [\overline{D}_e] [B_o] dV \quad (9)$$

$$\{\Delta f_p\} = \int_V [B_o]^T [\overline{D}_e] \{\Delta \epsilon^p\} dV \quad (10)$$

$$\{\Delta f_T\} = \int_V [B_o]^T [\overline{D}_e] \{\Delta \epsilon^T\} dV \quad (11)$$

$$\{\Delta f_D\} = \int_V [B_o]^T \Delta D [\overline{\sigma}] dV \quad (12)$$

여기서,

- $[B_o]$ Strain-displacement matrix
- $[D_e]$ Stress-strain matrix for undamaged state
- $[\overline{D}_e]$ Stress-strain matrix for damaged state
- $[k_o]$ Incremental stiffness matrix
- $\{\Delta f\}$ External force increment vector
- $\{\Delta f_p\}$ Apparent external force increment vector due to plastic strain increment vector
- $\{\Delta f_D\}$ Apparent external force increment vector due to damage increment
- $\{\Delta f_T\}$ Apparent external force increment vector due to thermal strain increment vector

본 연구에서는 상변태등과 같은 용접공정 특유의 사항들을 계산에 고려하기 위하여 잔류응력 해석에는 범용코드 SYSWELD+를 사용하였으며, 손상발전방정식의 도출과 검증 그리고 손상평가용 후처리기법을 위해 식 (8)-(12) 로 나타내는 알고리즘과 식(1)-(7)로 나타낸 손상을 고려한 구성방정식을 채용한 유한요소해석프로그램을 사용하였다.

Fig. 6, 7은 모재와 용접재료의 단축인장시험에 관한 수치해석결과이다. Table 1에는, 각 온도범위별로 사용된 재료정수들 중에서 대표적으로 20℃에 해당되는 것을 보이고 있다. 전술한 해석기법을 이용하여 항복응력, 최대인장강도 및 파단변형률 등 실험결과와 일치하는 해석결과를 얻을 수 있었다. 이와 같은 과정을 통하여, 실제 재료가 갖는 역학적 특성을 표현하는 구성방정식을 표현할 수 있으며, 특히 식 (1), (2)로 나타내는 손상발전방정식계는 동일재료가 가지는 손상특성을 표현하는데 아주 유용하게 사용되어질 수 있다. 즉, 2장에서 얻어진 모든 해석영역에서의 응력·변형률이력과 식 (1)로 표현되는 손상발전방정식을 이용하여 용접구조물의 손상량을 평가할 수

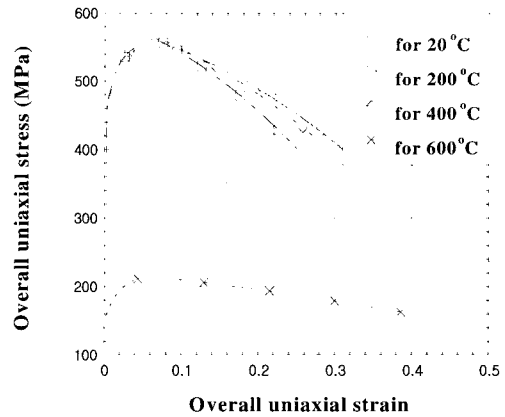


Fig. 6 Uniaxial stress-strain behavior of filler material for each temperature

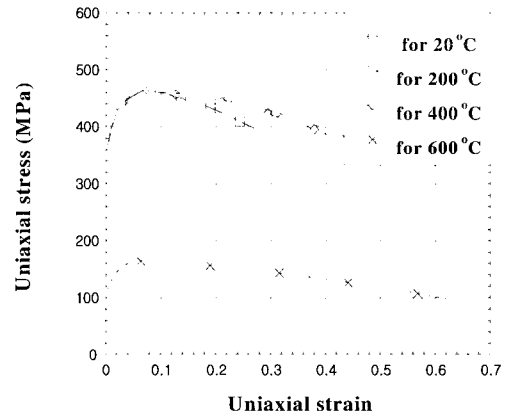


Fig. 7 Uniaxial stress-strain behavior of base material for each temperature

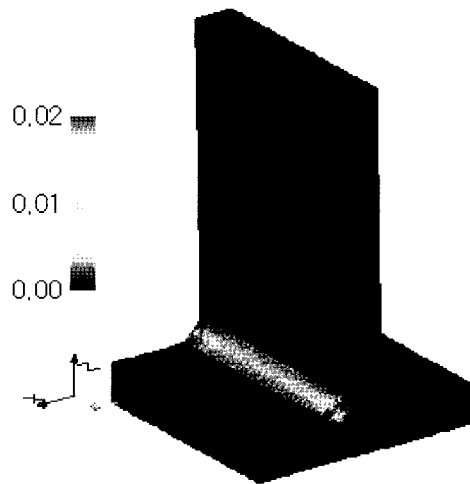


Fig. 8 Damage distribution at t=5000 sec

있게 된다. Fig. 8은 이와 같은 계산을 통하여 얻어진 손상분포를 나타내고 있다. Fig. 5와 같은 일반적인 유한요소해석 결과는

Table 1 Material properties and constants of damage evolution equation for filler material at T=20°C

Material Properties	Young's Modulus (GPa)		
			210
Material Properties	Yield Strength (MPa)		
			705
Material Constants	Viscoplastic parameters	K (MPa)	225
		N	3.5
		k (MPa)	450
		Q ₁ (MPa)	440
		Q ₂ (MPa)	80
	b	85	
	Damage Parameters	ϵ_{pd}	0.057
S ₁ (MPa)		0.35	
S ₂		0.5	

잔류응력이나 잔류변형률 등과 같은 기계적 특성치 파악에는 유용하게 사용될 수 있으나, 이로 인한 내부적인 열화 혹은 결함의 존재여부에 대해서는 아무런 정보를 줄 수 없다. 반면, Fig. 8에서는 Fig. 5와 같은 응력분포를 갖는 구조체에 대하여, 손상역학수법을 이용하여 내부결함의 정도를 정량적인 변수로 표현하고 있다.

한편, 균열이나 결함의 수량 및 크기 등과 손상변수와의 직접적인 관계를 정의하기 위해서는, 균열발생 혹은 재료파단을 의미하는 손상변수의 한계값에 대한 정의가 필요하다. 즉, 손상해석 결과에서 손상변수의 한계값에 도달한 부분은 이미 균열이 발생하여 있음을 의미하게 된다. 손상변수의 정의로부터 이론적 손상변수 한계값은 1.0이 되지만, 일반적으로 공업용 금속재료에서는 0.5~0.9을 사용한다(Lemaitre and Chaboche, 1990). 이러한 한계값 설정에 관해서는 해당재료에 대한 금속학적 분석이 필요하다.

본 연구에서는 균열발생에 관한 평가는 수행하지 않았으나, Fig. 8에 나타내고 있는 손상분포는 잠재손상량 평가로서 아주 중요한 의미를 갖는다. 이러한 분포의 잠재손상을 가진 구조체가 또 다른 외력의 환경하에 놓이게 될 때의 강도특성은, 이 영향을 무시했을 때와 비교하여 많은 차이점을 나타낼 것이다.

본 연구와 같이, 잠재손상량을 통하여 용접부의 건전성을 파악하고, 이렇게 얻어진 손상분포를 용접부 피로특성평가 등에 있어서의 초기조건, 즉

- 손상변수의 한계값에 도달하지 않은 부분에 대해서는 재료 강성의 감소효과
- 한계값에 도달한 부분에 대해서는 초기균열효과 등으로 사용한다면 보다 정밀하고 세련된 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는, 용접구조물의 건전성평가 수법개발을 목적으로 유한요소해석결과를 이용한 후처리기법을 개발하였다. 용접공정을 고려한 정밀 유한요소해석과 손상역학수법을 이용한 후처리기법을 통해 용접잔류응력과 잔류변형률을 이용한 손상평가를 수행하였다.

응력·변형률 등 기존의 유한요소해석 결과를 포함하여, 손상변수를 이용한 용접구조물의 손상량에 대한 정량적인 평가

가 가능한 수치해석시스템 prototype을 구축하였다.

응력·변형률과 같은 기계적 특성치 뿐만 아니라, 확산성수소량과 같은 용접공정 특유의 재료적 특성치를 고려할 수 있는 손상발전방정식의 개발이 정량적 해석결과의 신뢰성 향상을 위해 필요하리라고 판단된다.

본 연구와 같은 예측수법의 개발은, 기존의 수법으로는 불가능했던 시공 전 단계에서의 결함예측이 가능하게 함으로써, 대형 용접구조물의 설계 및 재료 개발에 있어 커다란 역할을 수행할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- AWS D1.1, Structural Welding Code-Steel, American Welding Society.
- Bathe, K.J. (1996). Finite Element Procedures, Prentice-Hall International, Inc.
- Chaboche, J.L. (1988). "Continuum Damage Mechanics(Part 1 & 2)", ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol 55, pp 59-72.
- Devaux, J. et al. (2000). "Numerical Study of the Plastic Behaviour of a Low Alloy Steel during Phase Transformation", Proc. of Int. Conf. on Thermal Process Modeling and Computer Simulation, Vol E-5, No 1, pp 206-212.
- Goldak, J. et al. (1984). "New Finite Element Model for Welding Heat Source", Metallurgical Transactions B, Vol 15B, pp 299-305.
- Lemaitre, J. and Chaboche, J.L. (1990). Mechanics of Solid Materials, Cambridge University Press, Cambridge.
- Lemaitre, J. and Doghri, I. (1994). "Damage 90 - A Post Processor for Crack Initiation", Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol 115, pp 197-232.
- Rabotnov, Y.N. (1969). Creep Problems in Structural Members, North-Holland.
- Skrzypek, J.J. and Ganczarski, A. (1999). Modeling of Material Damage and Failure of Structures - Theory and Applications, Springer-Verlag, Berlin.
- SYSWELD/Manual, Version 2000, Engineering Science International Inc.
- Teng, T-L. et al. (2001) "Analysis of Residual Stresses and Distortions in T-joint Fillet Welds", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol 78, pp 523-538.
- Toi, Y. and Lee, J.M. (2002). "Thermal Elasto-Viscoplastic Damage Behavior of Structural Members in Hot-Dip Galvanization", International Journal of Damage Mechanics, Vol 11, No 2, pp 171-185.
- Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. (2000). The Finite Element Method, Fifth Edition, McGraw-Hill International Inc.

2002년 7월 3일 원고 접수

2002년 8월 15일 최종 수정본 채택