

용접부의 균열발생에측을 위한 해석적수법 개발

이 제 명 · 윤 동 렬

Development of Numerical Method for Assessment of Crack Initiation in Welded Joint

Jae-Myung Lee and Dong-Ryul Yoon

1. 서 론

선박, 해양구조물, 교량, 압력용기 등, 대형 강구조물의 조립에 사용되는 용접은, 조립의 간편함, 수밀 및 기밀성의 확보 등의 다양한 이점을 가지고 있다. 그러나 다른 한편으로는, 용접부에 존재하는 결함들이 구조물의 강도유지에 큰 영향을 미친다는 이유로 조립단계에서 까다로운 조건들을 많이 요구한다¹⁾. 이는 구조물의 붕괴 등을 유발하는 치명적인 결함들이 용접부에서 실제로 많이 발생하고 있기 때문이며, 따라서 용접부의 건전성평가에 대한 엄격한 관리가 행해지고 있다.

강의 용접균열은 발생시기, 발생위치, 발생형태 등에 따라 다양한 종류로 나눌 수 있으며, 일반적으로 가장 많은 비율로 발생하는 것은 비교적 구속의 정도가 높은 필릿이음 혹은 십자이음부에서의 저온균열이다²⁾. 그리고 이러한 종류의 균열에 영향을 미치는 인자로는, 구속도, 예열온도, 확산성수소량 등을 들 수 있으며, 실험적인 연구 등을 통해 균열방지를 위한 경험식들이 다수 제안되어 있으며 실제로도 적용되고 있다³⁾.

그러나, 최근 각종 신공법의 도입 및 신강재의 개발에 부합하는 기존연구의 확장이 체계적으로 이루어지지 않고 있으며, 이러한 현실은 설계나 시공상의 많은 변화가 있음에도 불구하고 강도평가에 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 것

을 감안한다면, 용접부의 결함파악을 위한 예측수법개발은 재시공 또는 보수공사에 천문학적 비용을 필요로 하는 대형용접구조물에 아주 유용한 수단으로 사용될 것은 자명한 일이다.

본고에서는, 이러한 용접부의 강도평가 그리고 균열발생에 대한 예측수법개발에 관한 연구의 일환으로 유한요소해석을 이용한 해석적수법개발에 관한 내용을 소개하고자 한다.

2. 유한요소해석과 용접 시뮬레이션

2.1 열탄소성해석

유한요소법(Finite Element Method)이란 외력의 작용하에 놓인 구조물의 역학적 상태를 파악하기 위해 사용되는 수치해석수법의 하나이며, 여러 가지 공학분야에서 가장 많이 사용되는 수치해석방법이다³⁾. 유한요소법을 이용하면, 입열에 의한 효과를 외력항으로 바꾸어 줌으로서, 용접을 포함하는 어떠한 종류의 열이력이 작용하는 구조물의 변형문제에 대해서도 기존의 해석수법과 동일한 방법으로 변형, 응력, 변형률 등을 계산할 수 있다⁴⁾.

용접관련 문제에 대해서는, 실제의 용접현상을 얼마만큼 충실히 계산에 고려하는지의 여부가 해석결과와의 신뢰성향상에 중요한 인자로서 작용한다. 용접시의 입열조건으로부터 구해지는 열하중에 의해 국부적인 소성변형을 포함하는 변형이 발생하고 이로 인해 잔류응력이나 잔류변형률이 발생한다. 즉, 역학적으로 인장 혹은 압축응력을 발생시키는 원인이 다르다는 것만 제외하면, 일반 재료역학 혹은 구조역학적으로 이해되는 잔류응력발생기구와 크게 다르지 않다.

따라서 용접시뮬레이션을 수행하기 위해서는, 보통의 열응력문제 혹은 초기치문제 해법과 동일한 과정을 거치게 된다. 즉, 용접열원에 의한 열전도해석이 수행되

고, 해석모델내부의 전 위치에서 얻어진 온도구배에 의해 변형해석을 수행한다^{5,6)}. 단지, 열전도해석에 있어 용접이라는 비교적 특수한 공정적인 상황을 고려하기 위하여, 용접아크의 이동을 수학적으로 표현하는 등 여러 가지 기법들을 채용하게 된다^{7,8)}. 또한 상변태에 따른 역학적 특성변화 및 재료물성치의 온도의존성 등의 고려도 해석결과의 정밀화를 위하여 행해지고 있다. 이러한 다양한 접근을 통하여, 보다 효율적인 해석수법의 확립에 관한 연구가 끊임없이 이루어지고 있으며^{9~11)}, 이러한 연구결과들을 이용하여 용접시뮬레이션을 위한 범용해석코드가 개발되어 있기도 하다¹²⁾.

이상에서 간단히 설명한 열탄소성 유한요소해석을 이용한 용접잔류응력 및 기타 역학적 현상들을 파악하고자 하는 연구들은 지금 현재도 꾸준히 시도되고 있다¹³⁾. 그러나 과도한 계산량, 해석결과의 신뢰성 등의 몇 가지 문제점들은 아직 미해결인 채로 남아있다.

2.2 간이탄성해석

2.1 절에서 설명한 열탄소성해석과 대비되는 해석방법으로, 응력이나 변형을 등, 비교적 정밀한 결과가 요구되는 문제가 아닌 경우에 대해서는, 용접에 의한 효과를 표현할 수 있는 간이해석법¹⁴⁾을 이용하여 용접변형문제에 적용하는 방법도 있다. 대표적인 것으로서, 등가 하중을 가하여 용접변형을 해석하는 고유변형도법 등이 있으며, 거시적인 변형상태 등을 알고자 하는 경우에 주로 사용된다. 간단히 설명하면, 몇 가지 전형적인 구조물에 대하여 용접에 의해 발생한 변형을 조사, 분석하여 동일 변형을 일으키는 기계적 등가하중을 구해 놓은 후, 유사한 구조물 혹은 용접조건일 경우에 미리 구해 놓은 기계적 등가하중을 가하여 용접변형을 해석하는 방법이다. 열탄소성해석이 과도한 계산량을 필요로 하는 반면, 이 해석법은 탄성해석만을 수행하므로 비교적 계산량이 적고 계산이 수월하다는 장점을 갖는다.

그러나 탄성계산을 주로 수행하는 간이해석이기에 때문에, 보다 정밀한 해석결과가 요구되는 용접균열이나 파괴해석분야에는 적용되지 않는다.

3. 균열예측을 위한 후처리 기법

구조물의 균열문제에 관한 여러 가지 사항들을 예측하기 위해서 다양한 방법들이 사용되고 있지만, 무수한 종류의 균열발생원인을 불문하고 공통적으로 사용되는 방법은, 응력이나 변형을 등, 균열발생에 영향을 미치는 역학변수들을 구하고 이렇게 얻어진 값들을 이용하

여 균열발생을 예측하는 방법이다. 그리고 그러한 역학 변수들을 얻어내는 가장 일반적이고 편리한 방법이 유한요소해석이다. 이 경우, 무엇보다 중요한 것은 유한요소해석결과에 대한 신뢰성을 확보할 수 있어야 하므로 대개의 경우, 어느 정도 신뢰성에 대한 검증을 거친 범용해석코드를 이용하게 된다^{15,16)}.

일부 범용 비선형 유한요소해석코드의 경우는, user subroutine 등을 이용하여 균열의 발생부터 그 진전까지 해석할 수 있도록 개발되어진 것¹⁵⁾도 있으나, 용접 균열문제에도 적용할 수 있도록 개발되어 있지는 않다. 이것은 유한요소해석에 의한 용접 시뮬레이션 기법 자체가 아직 확립되어 있지 않은 이유와 함께, 기존 용접 균열문제에 대한 연구의 대부분이 야금학적, 실험적인 수법¹⁷⁾에 의존하고 있는 탓에 균열발생에 대한 역학적 기구구명이 미비되어 있는 까닭이다. 이러한 기술적 장애를 해결하기 위해서는, 용접부 건전성평가를 위한 수치해석수법개발에 관한 연구가 지속적으로 수행되어야 한다.

용접부 뿐만 아니라 구조물의 균열발생평가를 위해 자주 사용되는 것들로서, 파괴역학변수인 J적분, 응력 집중계수 등이 있다¹⁸⁾. J적분 등에 사용되는 변수들은 보통 유한요소해석결과로부터 얻어지며, 일련의 계산이 범용코드를 이용하여 동시에 수행되는 경우도 있고, 결과를 추출하여 독립적으로 계산되어 질 수도 있다^{19,20)}. 이렇게 유한요소해석결과를 이용하여, 균열발생평가를 수행하는 기법을 후처리기법으로 부르고 있다²¹⁾. 파괴역학 수법에서는 균열선단에서의 변위장을 바탕으로 모든 계산을 수행하고 있으며, 따라서 어떠한 형식으로도 해석대상물에는 균열이 존재하여야 한다. 그러나 실제 대부분의 구조물은 균열이라고 정의할 수 있는 초기결함을 갖고 있지는 않으므로, 적용상의 제한을 지니고 있다.

한편, 파괴역학과 비슷한 개념으로, 최근 다양한 분야에서 점차 적용의 범위를 넓히고 있는 손상역학이라는 수법도 파괴 및 균열문제에 유용성을 보이고 있다²²⁾. 전술한 바와 같이 파괴역학이 비결함상태에 대한 적용상의 제한을 갖는 반면, 손상역학은 비결함상태부터 균열의 발생 그리고 진전에 이르기까지의 전 과정을 파악할 수 있다는 장점이 있다^{23,24)}. 그리고, 단순한 응력, 변형률의 조합만이 아닌 여러 가지 재료적인 사항까지도 계산에 고려할 수 있다는 점에서 재료비선형문제에서 탁월한 효과를 얻고 있다²⁵⁾.

다음 절에서는, 대표적인 강재료비선형 문제인 용접 균열문제에 대하여 유한요소해석과 손상역학을 이용하

여 균열발생을 예측하는 방법을 설명한다.

4. 수치해석 예

4.1 유한요소해석

본 절에서는 몇 가지 전형적인 형상의 용접구조물 중에서 용접균열사례가 가장 많이 보고되고 있는 필렛이음부에 대한 3차원 용접시뮬레이션 및 손상해석수행결과를 간단히 설명한다. 유한요소해석은 범용해석코드 SYSWELD¹²⁾를 이용하였으며, 상변태 및 이동열원의 효과 등 용접공정 고유의 특성들을 고려한 과도해석을 수행하였다. 용접영향을 고려한 유한요소해석결과로부터 용접이음부의 손상예측을 수행하기 위한 것이 목적이므로, 단층용접을 고려한 간단한 용접조건을 해석조건으로 설정하였다.

Fig. 1에는 온도의존형의 각 재료별 물성치를 나타내며, Fig. 2에는 요소분할도를 나타낸다. 실제 해석에 있어서 3차원 이동열원에 대한 고려를 위하여, Double

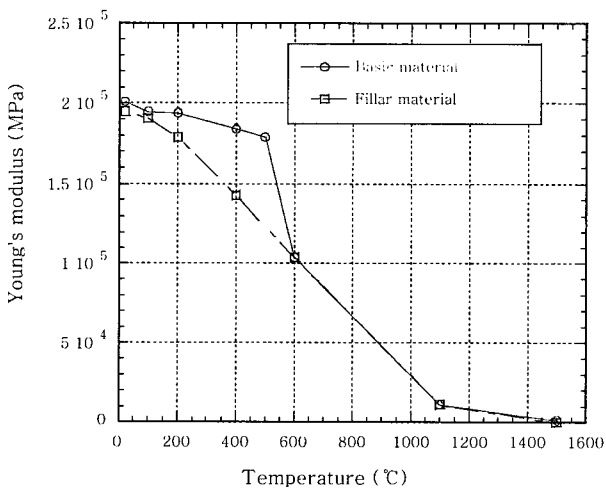


Fig. 1 Temperature dependence of Young's modulus



Fig. 2 Finite element subdivision of T-joint

Ellipsoid형의 해를 사용하였다. Fig. 3, 4에는 용접시작직후와 끝난 직후에서의 온도분포를 나타낸다. Fig. 5에는 전체구조가 충분히 냉각되었다고 판단되는 시간에서의 von Mises 등가응력 분포를 나타낸다. 다음 절에서는, 본 절에서 얻어진 응력 및 변형률분포를 사용하여 손상분포에 관한 예측을 수행한다.

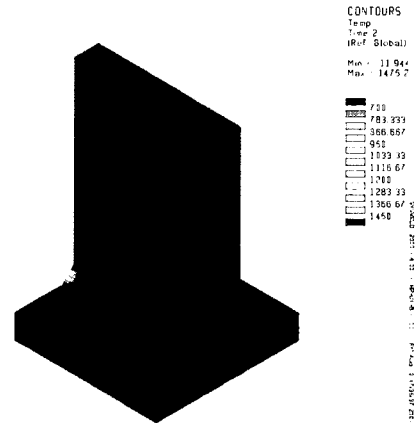


Fig. 3 Temperature distribution at t = 2 sec

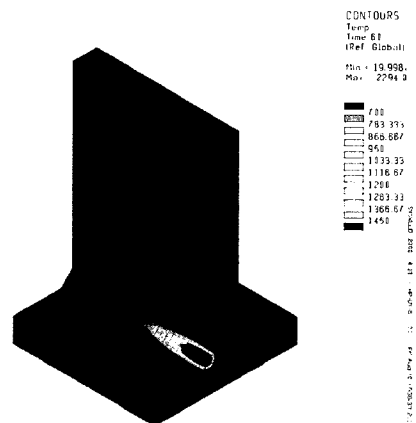


Fig. 4 Temperature distribution at t = 60 sec

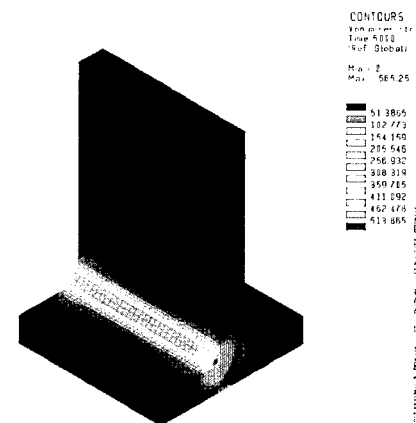


Fig. 5 Equivalent stress distribution at t = 5000 sec (MPa)

4.2 손상해석

재료 및 구조물이 외력의 작용을 받아 그 내부에 미소결함이 발생/성장하여 균열에 이르는 과정을 수치적으로 파악하는 수법으로서 손상역학수법이 제안된 후, 크리프, 피로 등 과거 해석상의 난점으로 여겨지던 여러 공학문제에 실용적인 수법으로 이용되어 왔다²²⁻²⁵⁾. 즉, 재료내부의 손상 역시 하나의 역학현상임에 착안하고, 변형률-응력관계와 동일한 공역관계 개념으로 손상변수-에너지해방률의 관계를 정의한 후, 이 과정에서 손상발전방정식을 유도해 내는 방법이 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 상기의 수법에 따라 정의된 다음과 같은 손상발전방정식을 사용한다²⁵⁾.

$$\dot{D} = \left(-\frac{Y}{S}\right)^s \dot{p} \tag{1}$$

$$-Y = \frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1-D)^2} R_v^2 \tag{2}$$

$$R_v = \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right]^{0.5} \tag{3}$$

여기서, Y는 에너지해방률(Energy release rate)이며, ν는 프와송비, σ_H는 정수압응력을 나타낸다. s와 S는 재료정수이다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 손상발전률 \dot{D} 는 에너지해방률 Y와 \dot{p} 의 값에 의존하는 함수이므로, 결과적으로는 응력, 변형률등의 모든 내부역학변수의 이력에 의존하면서 발전하게 된다. R_v는 3차원응력효과를 표현하는 3축계수(triaxiality factor)이다.

SYSWELD를 이용한 유한요소해석결과 즉, 응력/변형률이력을 식 (1)~(3)에 직접 대입하는 후처리기법에 의한 손상해석을 수행한다. 이를 위해서는, 식 (1)~(3)으로 표현하는 후처리용의 각 식들의 재료정수를 구할 필요가 있다. 식 (1)~(3)에서 알 수 있듯이 균열발생에 영향을 미치는 것은 응력/변형률과 같은 기계적 특성치이다. 실제로 균열발생에 영향을 미치는 인자는 확산성수소량 등과 같은 재료적인 사항도 있으며, 이 경우 식(1)로 나타내는 손상변수를 다른 형태로 취하면 된다²⁶⁾.

본 해석에서는 적용대상재료인 모재와 용접재료에 대한 단축인장시험에 대한 유한요소해석을 통해 식 (1)~(3)의 계 정수들을 결정한다. 유한요소해석은 소성변형률을 초기변형률로 두는 초기변형률법에 바탕을

둔 정식화기법을 이용하였다²⁵⁾. 즉,

$$\{\Delta F\} + \{F_r\} + \int_v [B_0]^T [D_e] (\{\Delta \epsilon_\theta\} + \{\Delta \epsilon_{vp}\}) dV = [K_o] \{\Delta u\} \tag{4}$$

여기서, {ΔF}, {F_r}, {Δu}는 각각, 외력증분벡터, 불평형력증분벡터, 절점변위증분벡터를 나타낸다. 온도구배가 존재하는 문제에서는 온도변형률증분이 존재하게 되며, 점소성변형률증분은 다음식에 의해 계산되어진다.

$$\epsilon_{ij}^{vp} = \frac{3}{2} \left\langle \frac{\sigma_{eq}/(1-D) - R - k}{K} \right\rangle \frac{s_{ij}}{\sigma_{eq}} \tag{5}$$

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

여기서, R은 등방경화를 나타내는 함수이며, s_{ij}, p (= ((2/3) ε_{ij}² ε_{ij}²)^{0.5}), σ_{eq}는 각각 편차응력, 누적소성 변형률, von Mises상당응력을 나타낸다. Q₁, Q₂, b, k, K, N는 재료상수이며 이 값들은 각각 온도범위에 맞게 정의되어질 수 있다. 식(5)에 나타나는 손상변수 D(0 ≤ D < 1)는 식(1)~(3)을 통하여 계산되는 량이다.

식(1)~(3)을 통하여 계산되어진 손상분포를 Fig. 6에 나타낸다.

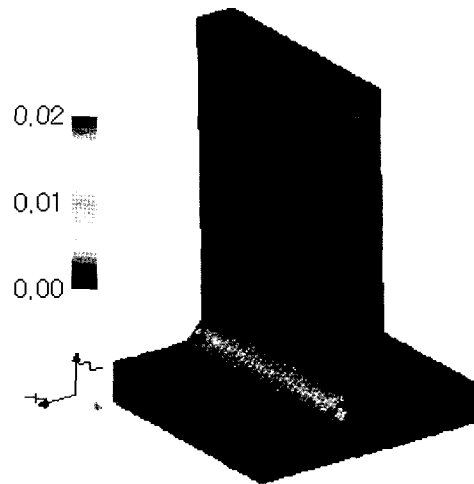


Fig. 6 Damage distribution of T-joint at t=5000 sec

5. 맺 음 말

본고를 통해서, 용접이음부의 균열예측수법개발의 일환으로 유한요소해석코드와 손상역학수법을 결합하는 손상해석 수행내용을 소개하였다. 해석내용 및 결과는 용접잔류응력과 누적소성변형률만으로 용접균열을 예측한 내용이다. 본고에서의 소개내용을 토대로, 용접부의

고유특성인 확산성수소 등, 기타 재료적인 영향들에 대한 체계적인 검토를 통해, 보다 정밀한 후처리기법 확립에 관한 연구를 수행해 나갈 예정이다. 여러 관련 분야 연구자들의 관심이 필요한 연구이며, 용접구조물에 있어서의 잠재손상을 예측하는데 많은 도움이 될 것이라 생각되어진다. 그리고 지속적인 연구를 통한 연구성과는 구조물의 수명예측 및 성능평가수법개발에 있어서도 커다란 역할을 수행하리라고 판단된다.

참 고 문 헌

1. AWS D1.1, Structural Welding Code-Steel
2. K. Satoh et al. : 溶接工學, 理工學社(1983)
3. K.J. Bathe : Finite Element Procedures(1996), Prentice-Hall International, Inc.
4. O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor : The Finite Element Method, Fifth Edition(2000), McGraw-Hill International Inc.
5. Y. Ueda et al. : Applicability of Substituting Plane-Deformation Problems for Three-Dimensional Thermal Elasto-Plastic Problems, Transactions of the Japanese Welding Society, 6-1(1988), 47-59
6. N.X.Ma et al : FEM Analysis of 3D Welding Residual Stresses on Significance of Defects in Various Types of Welded Joint, Transactions of JWRI, 24-2(1995), 305-312
7. D. Rosenthal : Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting, Welding Journal, 20-5(1941), 2205-2345
8. J. Goldak et al. : New Finite Element Model for Welding Heat Source, Metallurgical Transactions B, Vol. 15B(1984), 299-305
9. J.B. Leblond and D.Dubois : A General Mathematical Description of Hydrogen Diffusion in Steels-1. Derivation of Diffusion Equations From Boltzman-Type Transport Equations, Acta Metallurgica, 31-10(1983), 1459-1469
10. J. Devaux et al. : 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(2000), 206-212
11. Z.Cao et al. : A New Comprehensive Thermal Solution Procedure For Multiple Pass and Curved Welds, PVP-Vol. 410-1(ASME 2000), Assessment Methodology for Preventing Failure : Deterministic and Probabilistic Aspects and Weld Residual Stress, Vol. I(2000), 37-42
12. SYSWELD/Manual, version 2000, Engineering Science International Inc.
13. Tso-Liang Teng et al. : Analysis of Residual Stresses and Distortions in T-joint Fillet Welds, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 78(2001), 523-538
14. K. Gotoh, T. Toyosada, S. Takechi : A Practical

- Estimation Method of th Skin Plate Distortion Derived from Fillet Weld, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 189(2001), 291-298(in Japanese)
15. ABAQUS/Theory Manual, version 5.7, Hilbert-Kalsen-Sorensen Inc.
16. MARC Version K7.1. Palo Alto : MSC.Software Corporation
17. H.W.Lee et al : A Study on Transverse Weld Cracks in Thick Steel Plate with the FCAW Process, Welding Journal, 77-12(1998) 503-510
18. J.R. Rice : A Path-independent, Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 35(1965), 379-386
19. S. Kim et al. : Residual Stress and Fracture Analysis of Thick Plate for Partial Penetration Multi-pass Weldment, Journal of KWS, 19-6(2001), 636-642(in Korean)
20. A. Khodadad Motarjemi et al. : Comparison of the Stress Intensity Factor of T and Cruciform Welded Joints with Different Main and Attachment Plate Thickness, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 65(2000), 55-66
21. J. Lemaitre and I Doghri : Damage 90 - A Post Processor for Crack Initiation, Comp. Meth. Appl. Mech. Engng., Vol 115(1994), 197-232
22. J. Lemaitre and J.P. Sermage : One Damage Law for Different Mechanism , Computational Mechanics Vol. 20(1997), 84-88
23. J.L.Chaboche : Continuum Damage Mechanics(Part 1 & 2), ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 55(1988), 59-72
24. J.C. Simo and J.W. Ju : Strain and Stress Based Continuum Damage Model, International Journal of Solids & Structures, Vol. 23(1987), 821-840
25. Y. Toi and J.M.Lee : Thermal Elasto-Viscoplastic Damage Behavior of Structural Members in Hot-Dip Galvanization, International Journal of Damage Mechanics, 1-1 (2002)(in print)
26. J.J. Skrzypek and A. Ganczarski : Modeling of Material Damage and Failure of Structures - Theory and Applications, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1999



• 이제명 (李帝明)
 • 1969년생
 • 부산대학교 조선해양공학과
 • 선체구조역학, 계산고체역학, 용접강도
 • e-mail : jaemlee@pusan.ac.kr



• 윤동렬 (尹東烈)
 • 1965년생
 • 삼성중공업 조선플랜트연구소
 • 해양, 플랜트부문 용접기술
 • e-mail : geesung@samsung.co.kr