

가

Effect of Weld Residual Stress Analysis Variables on Fitness-For-Service Assessment

() , WINS

P.Dong
Battelle Memorial Institute

M.Prager
Pressure Vessel Research Council

요 약

본 논문에서는 우선적으로 기존의 잔류응력 해석 기술들에 대해 사용중 적합성 평가의 측면에서 검토를 수행하였다. 상세 잔류응력 분포를 도출하기 위해서는 재료에 종속적인 열-기계적/야금학적 반응, 용접 과정 물리, 용접되는 기기내의 구조적 상호작용 등의 매우 복잡한 현상을 고려하여 해석하여야만 한다. 결과적으로 해석절차는 상세 잔류응력 분포 도출을 위한 매우 복잡한 수치해석 절차로부터 최종적인 잔류응력 분포의 중요한 특징을 적절히 도출하기 위한 효율적인 해석절차까지 해석목적에 따라 변화되어 질 수 있다. 사용중 적합성 평가를 위한 잔류응력 해석은 효율적인 해석절차에 기반을 두고 있으며 사용중 적합성 평가를 위한 잔류응력 해석기술의 타당성과 해석변수의 영향을 기존의 연구들과 수치해석을 통해 평가하였다.

Abstract

In this study, the existing residual stress analysis techniques are reviewed within the context of fitness-for-service (FFS) assessment. It should be recognized that detailed residual stress evolution is an extremely complicated phenomenon that typically involves material-specific thermo-mechanical/metallurgical response, welding process physics, and structural interactions within a component being welded. As a result, computational procedures can vary significantly from highly complicated numerical techniques intended only to elucidate a small part of the process physics to cost-effective procedures that are deemed adequate for capturing some of the important features in a final residual stress distribution. Residual stress estimate techniques for FFS purposes belong to the latter category. With this in mind, both the adequacy of residual stress analysis techniques and the effect of residual stress analysis variables on FFS are assessed based on both literature data and analyses performed in this investigation.

1.

/

(1-8)가

가

(FFS: fitness- for-service) 가

가

2.

Fig.1

가

가

2.1

가

가

(2-4,9-11)

Fig.1

가

가

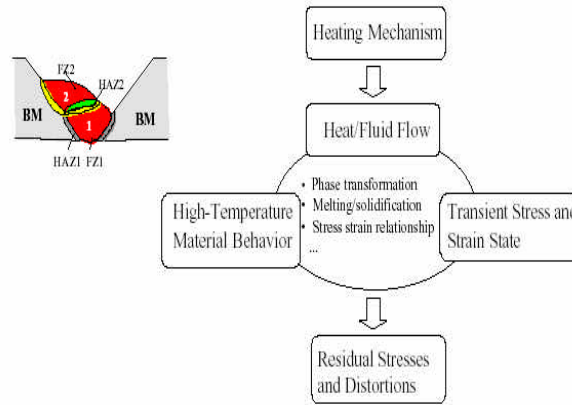


Fig.1 Residual Stress and Distortion Evolution in Welded Joints

가

Goldak Gaussian

(12)

2.2

(martensite)

(3,13-14)

가

Fig.2

(14)

(electroslag)

(cladding)

(ferrite),

(pearlite)

Fig.2(b)

Fig.2(c) (d)

Fig.2(d)

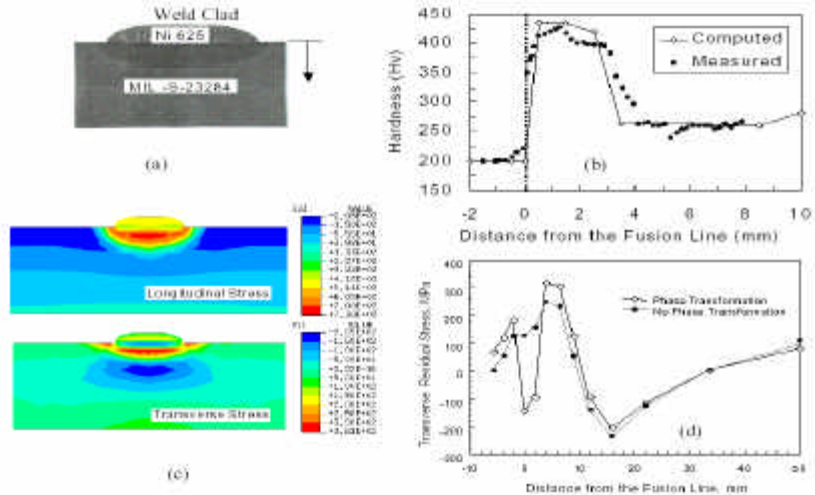


Fig.2 Martensite Transformation Effects on Residual Stress - A Clad Weld

- (a) Clad weld mockup
- (b) Hardness
- (c) Predicted result with p.t.(phase transformation)
- (d) Comparison between with & w/o p.t.

가
 (fracture driving force) 가
 가
 가
 (2,5,13,14) / (virgin) , (strain hardening)
 (annealing) 가
 가 , Fig.3(a) 1
 Fig.3(b) (11,13)

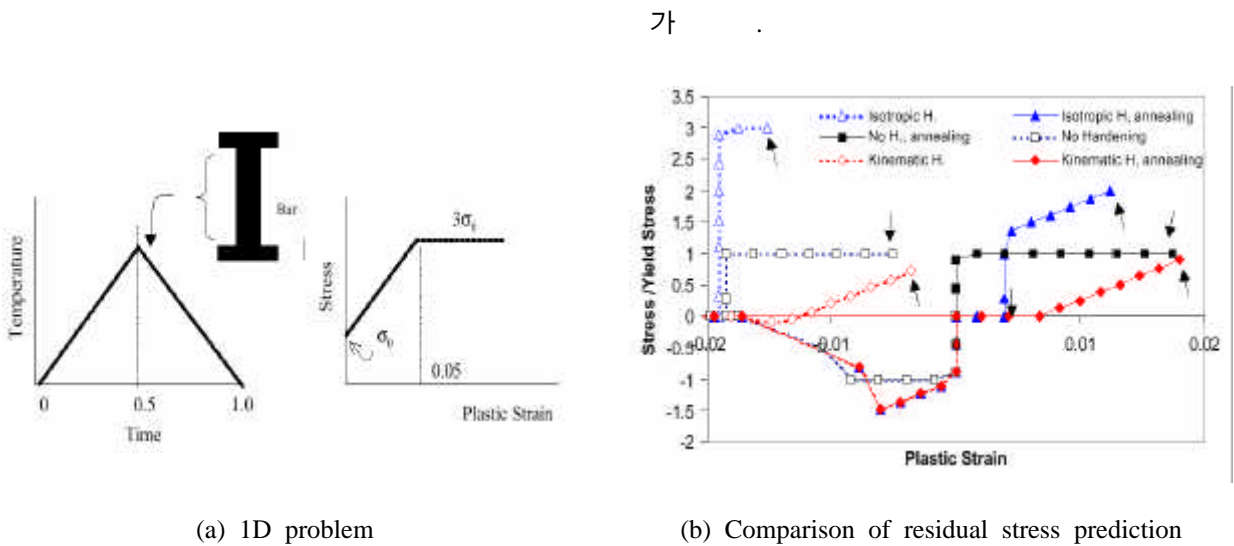


Fig.3 Comparison of Residual Stresses Using 1D Model for Isotropic & Kinematic Hardening Law with & w/o eliminating plastic strain

3.

응력확대계수(SIF: stress intensity factor)에 대한 잔류응력과 잔류응력 해석변수의 영향을 고찰하여 사용중 적합성 평가 목적을 위한 잔류응력 해석절차를 제시하고자 한다. 이런 절차는 사용중 적합성 평가를 위한 다양한 기기 용접부의 잔류응력 분포를 결정하는데 적합한 기초를 제공할 것이다.

3.1 잔류응력에 의한 응력확대계수 계산

두께에 따른 잔류응력 분포는 표면으로부터 깊이 x 의 함수로서 $\sigma^r(x)$ 의 형태로 표시되었고, 균열 크기 a 에 대한 응력확대계수 K 를 얻기 위해 가중함수법(weight function method)이 이용되어진다.

$$K(a) = \int_0^a \sigma^r(x) w(a, x) dx \quad (1)$$

여기서 $w(a, x)$ 는 가중함수로서 다양한 압력기기의 용접 형상들에 대하여 개발되어져 있다.⁽¹⁵⁾

상세한 유한요소 잔류응력 해석으로부터 얻어진 잔류응력 분포 $\sigma^r(x)$ 는 Fig.4에 제시된 바와 같이 막 응력성분, 굽힘 응력성분과 응력확대계수의 용이한 계산을 위한 자기 평형 성분(self-equilibrating component)으로 분해할 수 있다. 세가지 응력성분들은 다음 아래와 같이 수식들로 표현되어진다.

$$\begin{aligned} \sigma_m^r &= \frac{1}{t} \int_0^t \sigma^r(x) dx \\ \sigma_b^r &= \frac{6}{t} \int_0^t \sigma^r(x) \left(\frac{t}{2} - x\right) dx \\ \sigma_{s.e.}^r &= \sigma^r(x) - \sigma_m^r - \sigma_b^r \left(1 - \frac{2x}{t}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

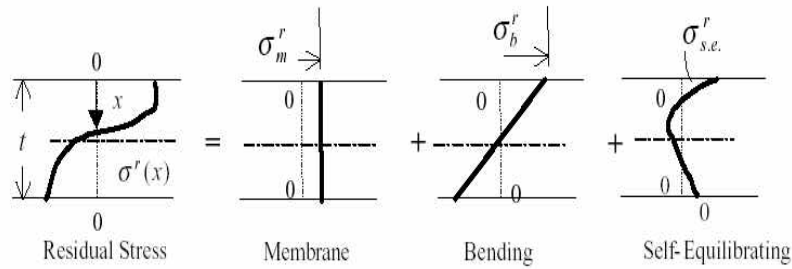


Fig. 4 Residual Stress Decomposition

식(1)의 응력확대계수는 식(2)를 통해 얻어진 잔류응력 성분들과 단순 판에 대한 가중함수 $w_p(a, x)$ 를 이용하여 다음 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$K(a) = \int_0^a \{ \sigma_m^r + \sigma_b^r (1 - 2x/t) + \sigma_{s.e.}^r(x) \} \cdot w_p(a, x) dx \quad (3)$$

또는

$$K(a) = K_m(a/t) + K_b(a/t) + K_{s.e.}(a/t) \quad (4)$$

식(2)에 제시된 잔류응력의 세가지 성분들에 대한 식들은 주어진 용접형상에 대한 용접 잔류응력의 기하학적 영향을 포함하고 있으며 단순 판에 대한 동일 가중함수를 사용하여 응력확대계수를 계산할 수 있다는 점에서 식(3)은 매우 중요한 의미를 갖는다.

대부분 적용에 있어서, σ'_m 은 용접 동안에 심한 구속조건이 없다면 무시될 수 있다. 따라서 굽힘 형태 분포는 σ'_b 에 의해서 지배될 것이고 반면에 자기 평형 형태 분포는 식(2)와 같이 잔류응력을 각 성분들로 분해시 $\sigma'_{s,e}$ 에 의해 지배된다.

응력확대계수 계산시 잔류응력이 미치는 영향을 고찰해 보기 위해 Fig.5와 같이 간단한 순수 굽힘 형태($\sigma'_b=30ksi$)의 잔류응력 작용 경우에 대해 세가지 방법들을 이용하여 응력확대계수를 계산 비교하고자 한다. 하중제어 조건하에서 결정된 단일 균열 시편에 대한 가중함수 또는 동일 시편에 대한 핸드북상의 응력확대계수 계산식을 이용한다면, 응력확대계수의 계산치는 0.2보다 큰 a/t에 대해 급격히 증가하는 양상을 나타낸다. 이러한 방법들에서는 응력상태가 균열 크기에 대해 일정한 것으로 가정된다. 그러나 굽힘 형태의 잔류응력 분포는 Fig.5에서 보이는 바와 같이 삼차원 유한요소 교호법(FEAM : finite element alternating method)을 이용하면 균열 진전에 따른 잔류응력의 재분배를 모사할 수 있으며 응력확대계수는 a/t=0.2 근처에서 최대값을 나타내다가 감소한다. 변위제어 조건에 근거하는 가중함수의 사용은 FEAM의 경우와 거의 동일한 결과를 도출해 낸다. 따라서 잔류응력에 의한 응력확대계수는 변위제어 가중함수법이나 FEAM을 이용하여 계산되어지는 것이 바람직하다.

굽힘 형태와 자기 평형 형태의 잔류응력 분포가 응력확대계수에 미치는 영향은 Fig.6에서 제시하고 있다. 두가지 형태의 최대 잔류응력 값은 30ksi로 동일하나, 예상한 바와 같이 굽힘 요소가 자기 평형 요소보다 응력확대계수에 대해 더 큰 영향을 미친다. 또한, Fig.6에서 보이는 바와 같이 자기 평형 형태에 대한 응력확대계수는 약 0.3보다 작은 a/t내에서만 양의 값을 나타내므로 균열 진전 거동에 대한 자기 평형 형태의 영향은 약 0.3보다 작은 a/t내에서만 의미를 가진다는 것을 알 수 있다.

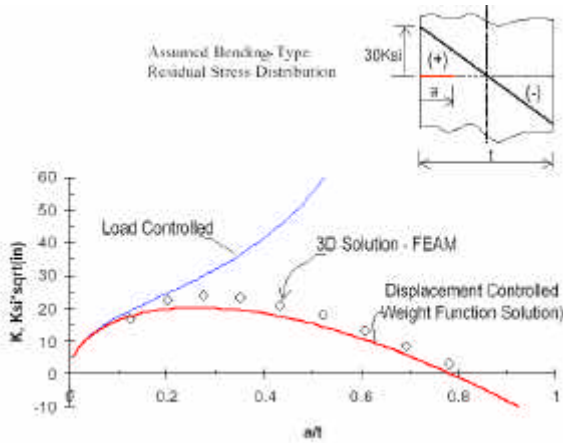


Fig.5 SIF for an Edge Crack

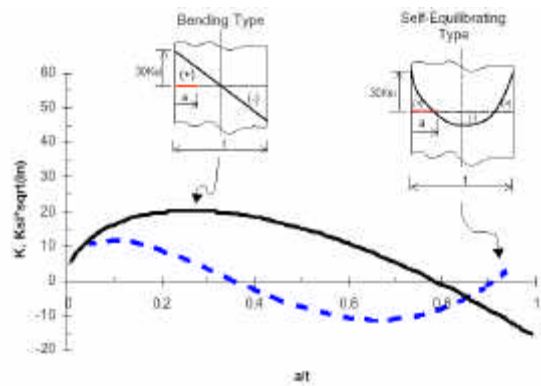


Fig.6 Comparison of SIF between Two Types

3.2 응력확대계수에 대한 잔류응력의 영향

Fig.7과 같은 실제적인 잔류응력 분포⁽⁵⁾를 고려한다면, 응력확대계수에 대한 상세한 잔류응력 분포의 영향이 정량화될 수 있으며, 잔류응력 평가시 요구조건들이 응력확대계수와 관련하여 도출되어질 수 있다.

응력확대계수를 계산하기 위해 우선 굽힘 형태의 축방향 잔류응력이 작용하는 원주방향(girth) 용접부가 고려되어진다. 식(2)에 표현된 잔류응력 성분 분해절차를 통해 A-A 선상의 잔류응력 분포는 막 응력, 굽힘 응력 및 자기 평형 응력 성분들로 Fig.8(a)와 같이 분리될 수 있다. 막 응력 성분 σ'_m 은 무시할 만한 크기이므로 그림 8(b)에 나타내지 않았다. 모재의 항복강도 37ksi 보다 큰 최대응력을 가지는

굽힘 응력 성분 σ'_b 가 지배적인 성분이며 내부표면에서 최대값이 발생한다. 또한 자기평형 성분은 5ksi 보다 작은 최대응력을 가진다. 굽힘과 자기 평형 응력 성분들에 기인하는 응력확대계수는 식(3)을 이용하여 Fig.8(b)와 같이 a/t 의 함수로서 도출되어진다. Fig.8(b)에서 보이는 바와 같이, 응력확대계수에 대한 자기 평형 성분의 영향은 미약하며 응력확대계수에 대한 굽힘 응력 성분의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 운전하중과 잔류응력 사이의 상호작용을 증명하기 위해, 10ksi의 균등한 막 응력이 배관 축방향을 따라 작용한다고 가정하였다. Fig.8(b)에 10ksi의 운전 막 응력이 작용하는 경우의 응력확대계수를 제시하고 있다. 전체 응력확대계수(운전하중과 잔류응력에 의한 응력확대계수의 합)와 운전하중에 의한 응력확대계수의 비교를 통해 대부분의 균열 길이 범위에 걸쳐서 전체 응력확대계수에 미치는 잔류응력의 영향이 중요함을 알 수 있다.

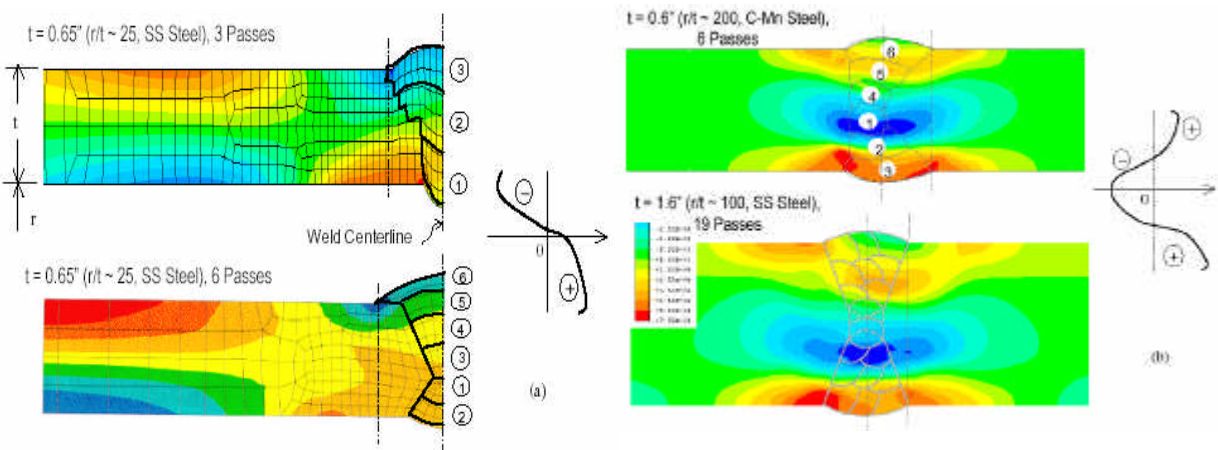


Fig.7 Two Generalized Through-Thickness Axial Residual Stress Distributions
 (a) Bending (b) Self-equilibrating

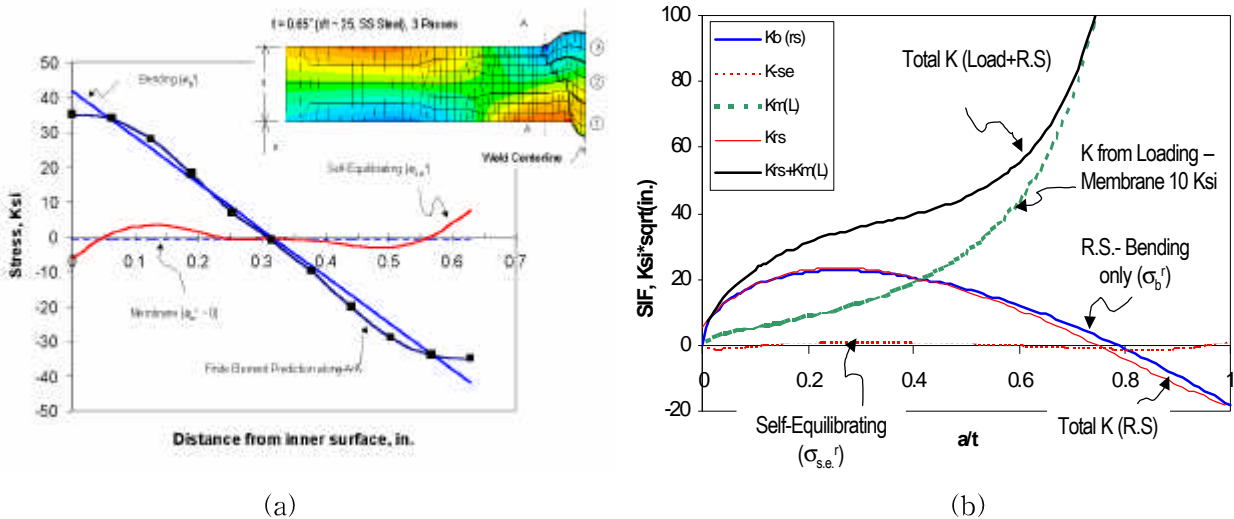


Fig.8 Residual Stress Decomposition for SS Girth Weld and SIF
 (a) Residual stress components after decomposition
 (b) Comparison to K due to residual stress components and a remote membrane loading of 10ksi

가

가

(16)가 Fig.9(a)

Fig.9(a)

(high order local variation) 가

가

Fig.9(a)

(2)

가 Fig.9(b)

Fig.9(b)

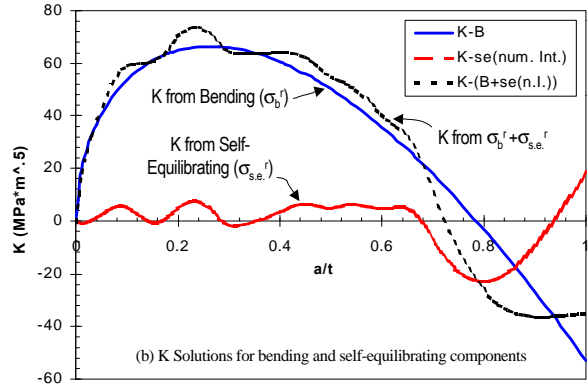
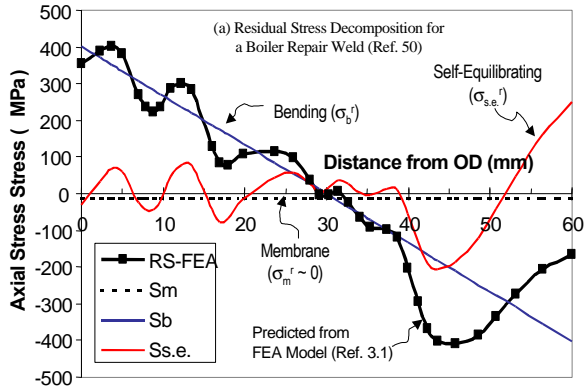


Fig.9 Residual Stress Decomposition for Boiler Repair Weld and SIF

3.3

가

가

가

(transformation plasticity)

(tempering effect)

가
가

가

가

가

Fig.4

1

가

가

Fig.8 9

, Fig.9(a)

6

4

Fig.9(a)

가
가

Fig.10(a)

Fig.10(b) 2

a/t

가

2

가

(2)

2

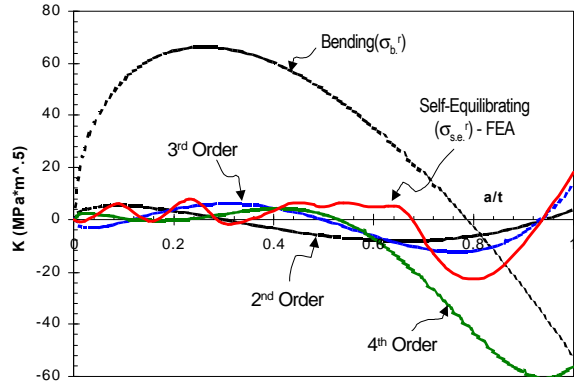
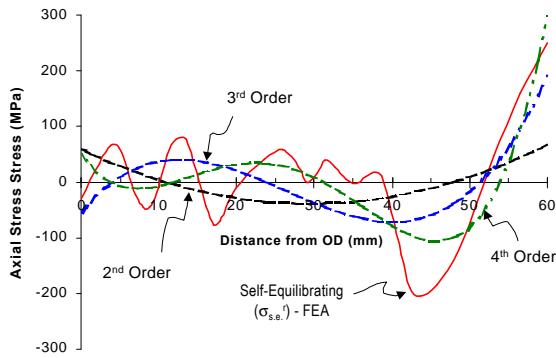
가

가

(17)가 Fig.11
 . Fig.11(b)

. Fig.11

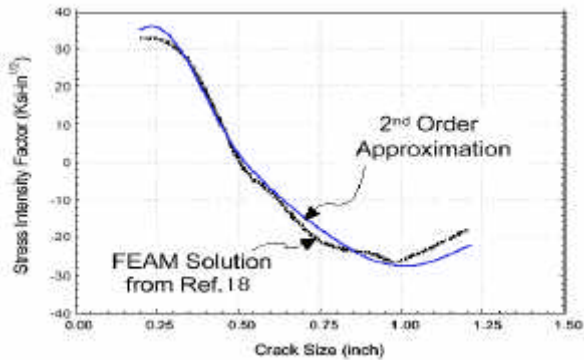
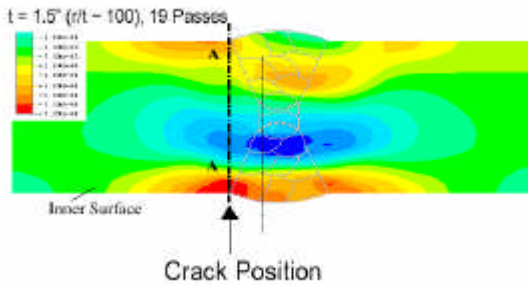
2 가 가



(a) Equilibrium-equivalent lower order approx.

(b) Comparison of SIF. solutions

Fig.10 High Order Effect on SIF by Self-Equilibrating Component of Bending Type



(a) Axial residual stress for SS girth weld

(b) SIFs by 2nd order approx. and FEAM

Fig.11 Self-Equilibrating Dominated Residual Stress and SIF Using 2-Order Equilibrium-Equivalent Approx.

4. 결론

본 논문에서는 사용중 적합성 평가에 미치는 잔류응력 해석변수의 영향과 관련된 주요한 관찰과 결론을 얻기 위해 몇몇 예들을 상세하게 검토 제시하였으며 최종적으로 사용중 적합성 평가에 미치는 잔류응력 해석변수의 영향을 다음 아래와 같이 도출 제시하였다.

- / 가 .
- /
- 가
- 가 FEAM
- 2 가 가

- (1) Leblond, J.B., et al., "A theoretical and numerical approach to the plastic behavior of steels during phase transformations-II. study of classical plasticity for ideal-plastic phases," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.34, no.4, pp.411-432, 1986.
- (2) Brust, F.W. and Rybicki, E.F., "Computational model of backlay welding for controlling residual stresses in welding pipes," *J. of Pressure Vessel Technology*, Vol.103, pp.294-299, 1981.
- (3) Janosch, J. and Lawrjaniec, D., "Study of the material properties of thin pipe butt welds (C-Mn and stainless steel) on the welding of residual stress distribution by using numerical simulation," *ASME PVP-Vol.393*, pp.215-224, 1999.
- (4) Josefson, B.L. and Karlsson, C.T., "FE- calculated stress in multi-pass butt-welded pipe-a simplified approach," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, Vol.38, pp.227-243, 1989.
- (5) Dong, P. and Brust, F.W., "Welding residual stressess and effects on fracture in pressure vessel and piping components: a millennium review and beyond," *ASME Transactions, J. of Pressure Vessel Technology*, Vol.122, No.3, pp.329-338, 2000.
- (6) Kim, J.W. and Im, S., "Numerical analysis of phase transformation in steel," *The First Int. Conf. on Advances in Structural Engin- eering and Mechanics*, Seoul, Aug.23-25, 1999, *ASEM*, Vol. 1, pp.227-232(6)
- (7) Kim, J.S., et al., "Computation of residual stress on RPV weldment," *The 7th International JWS symposium*, Kobe, Japan, November 19-23, 2001.
- (8) Koppenhoefer, K.C. and Gordan, R., "IIW X-XV RSDP residual stress round-robin results-pahse 1," *Presentation at IIW 2000 Annual Assembly*, Florence, Italy, IIW-X- XV-RSDP-50-2000.
- (9) Koppenhoefer, K.C., et al., *Incorporation of Residual Stresses into Fracture Assessment Models*, Project Report to The MPC, September, 1998.
- (10) Bate, S.K., et al., "Measurement and modeling of residual stresses in thick-section type 316 stainless steel welds," *Proceedings of Sixth International Conference on Residual Stresses (ICRS-6)*, Oxford, UK, July, 2000, pp.1511-1518.
- (11) Bouchard, P.J., et al., "Prediction and measurement of residual stresses in a thick section stainless steel weld," *ASME PVP-Vol.347*, pp.77-82, 1997.
- (12) Goldak, J., et al., "A new finite element model for welding heat sources," *Metall. Trans. B*, 15B, 299-305, 1984.
- (13) Dong, P., "Modeling of weld residual stresses and distortions: advanced computational procedures and practical applications," *Proceedings of the Sixth International Conference on Residual Stresses(ICRS-6)*, Oxford, UK, July 10-12, 2000., pp.1223-1335.
- (14) Dong, P., et al., "Recent progress in analysis of welding residual stresses," *WRC Bulletin 455*, September, 2000, WRC, Inc., New York, NY.
- (15) T.L. Anderson, *MPC K Solution Techniques*.
- (16) Zhang, J., et al., "Analytical and experimental study of residual stresses in a multi-pass repair weld," *ASME PVP-Vol.410-1*, *The 2000 ASME PVP Conference*, Seattle, Washington, July 23-27, 2000.
- (17) Zhang, J. et al., "Modeling of weld residual stresses in core shroud structures," *Nuclear Engineering and Design*, 195, pp.171-187, 1999.