

## 용접 구조물의 사용중 적합성 평가를 위한 잔류응력 해석절차 개발

김종성\* · 진태은\* · P. Dong.\*\* · M. Prager\*\*\*  
(2002년 4월 17일 접수, 2003년 3월 21일 심사완료)

### Development of Residual Stress Analysis Procedure for Fitness-For-Service Assessment of Welded Structure

Jong-Sung Kim, Tae-Eun Jin, P. Dong and M. Prager

**Key Words:** Welded Structure(용접 구조물), Fitness-For-Service Assessment(사용중 적합성 평가), Residual Stress Analysis(잔류응력 해석), Computational Modeling(수치 모델링)

#### Abstract

In this study, a state of art review of existing residual stress analysis techniques and representative solutions is presented in order to develop the residual stress analysis procedure for fitness-for-service (FFS) assessment of welded structure. Critical issues associated with existing residual stress solutions and their treatments in performing FFS are discussed. It should be recognized that detailed residual stress evolution is an extremely complicated phenomenon that typically involves material-specific thermomechanical/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 analysis procedure for FFS purposes belongs to the latter category. With this in mind, both residual stress analysis techniques and their adequacy for FFS are assessed based on both literature data and analyses performed in this investigation.

#### 1. 서론

구조물의 용접시 용접변수, 재료의 고온거동 및 구속조건 등의 상호작용에 의해 발생하는 변형 및 잔류응력은 구조물의 건전성을 저하시켜 수명을 단축시킨다는 것은 잘 알려져 있는 사실이다. 따라서 용접 잔류응력과 관련하여 국내외 많은 연구<sup>(1~8)</sup>가 수행되었으나 용접현상의 복잡

성으로 인한 열전달 과정/고온 재료거동의 비현실적인 묘사에 기인하여 대부분의 연구 방법들은 실제 측정값과 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 용접현상의 복잡성에 기인하여 잔류응력 해석절차는 매우 복잡한 수치해석 기법에서부터 최종 잔류응력 분포의 중요한 몇몇 특징만을 평가할 수 있는 효율적인 절차까지 변화되어질 수 있다.

따라서 본 논문에서는 잔류응력 해석기술과 대표적인 선행 연구결과<sup>(8)</sup>를 사용중 적합성(FFS: fitness-for-service) 평가 측면에서 검토하여 용접구조물의 사용중 적합성 평가를 위한 최적의 잔류응력 해석절차를 도출하였다.

#### 2. 잔류응력 해석기술 검토

신뢰성 있는 잔류응력 해석을 위해서는 Fig. 1

\* 책임저자, 회원, 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

E-mail : kimjs@kopec.co.kr

TEL : (031)289-4278 FAX : (031)289-3189

\*\* 회원, 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

\*\*\* Battelle Memorial Institute

\*\*\* Pressure Vessel Research Council

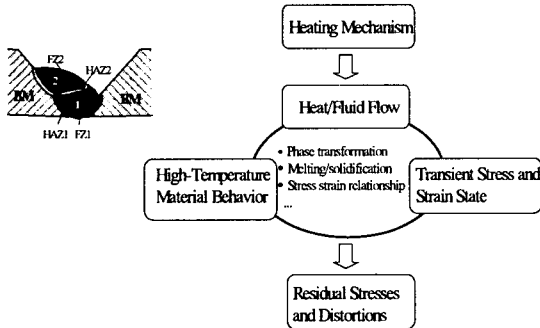


Fig. 1 Residual Stress and Distortion Evolution in Welded Joints

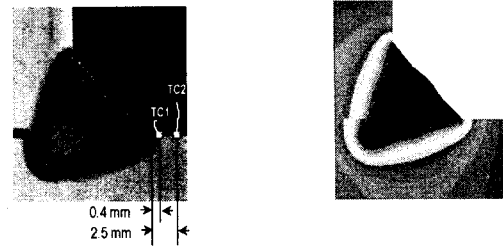
에서 제시하고 있는 세가지 현상들(열 유동, 용융으로부터 상온까지 변화하는 고온 재료거동, 연결부 구속조건 하에서의 천이상태와 변형을 상태)을 적절히 묘사할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 세가지 현상들 중 해석시 고려가 어려운 열 유동 모델링과 고온 재료거동의 두가지 분야로 분리하여 잔류응력 해석기술을 검토하고자 한다.

2.1 용접 열유동 모델링

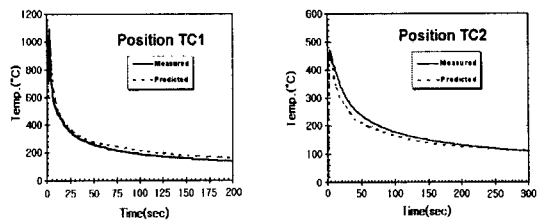
사용중 적합성 평가를 위한 잔류응력 분포를 결정하기 위해 열유동에 대한 전체적인 효과를 고려한 열전도 근거 해석(heat conduction based analysis)을 수행함으로써 용융 풀(pool) 근처와 안에서의 복잡한 열적-물리적 현상을 매우 단순화시킬 수 있다. 이러한 단순화된 등가 열유동 모사 절차들은 용접 잔류응력을 결정하는데 폭넓게 이용되어지고 있다.<sup>(2~4,9,10)</sup>

Fig. 1에서 제시한 것처럼 용접하는 도중 용융 풀 내에서 국부적으로 용융점 이상의 고온 분포를 가지며 그 결과 용융부 특성은 아크 특성 및 용융 풀 내 동적 거동과 직접적인 연관이 있다. 이러한 연관성에 근거하여 잔류응력/변형 예측시 열 해석절차의 정확성을 가름하는 양으로 용융부 형상을 고려함으로써 해석절차를 단순화시킬 수 있다. 이러한 해석절차의 단순화 예로서 실제 용융부 형상과 동일한 형상을 도출하는 열전도 근거 해석 수행결과<sup>(11)</sup>를 Fig. 2에 제시하고 있다.

용접 열유동 해석시 유용한 이차원 모델과 관련하여 두가지 문제점이 있다. 첫 번째 문제점은 실제 용접과정에서 발생하는 제 삼의 방향으로의 열전도를 이차원 모델에서 고려할 수 없다는 것이고 또 하나의 문제점은 Goldak의 Gaussian 열원



(a) Observed fusion profile/FE model prediction



(b) Temperature histories at weld toe

Fig. 2 Welding-Induced Heat Flow Modeling Using Observed Weld Profile

모델<sup>(12)</sup>이 이차원 모델에 적합하도록 재공식화되어야 한다는 것이다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 실제 용융부 형상과 동일한 형상이 나오도록 시행착오법(trial-and-error method)에 따라 시간에 따른 열원 분포를 설정하면 된다.

2.2 고온 재료거동

잔류응력 분포에 미치는 마르텐사이트(martensite) 변태 효과와 용융/재용융 효과로 분류하여 고온 재료거동을 검토 제시하고자 한다.

탄소강의 용접 잔류응력에 미치는 마르텐사이트 변태 영향을 고려한 몇몇 연구들<sup>(5,13,14)</sup>이 수행되어졌다. 한가지 예로서 제시된 Fig. 3은 상변태 효과를 고려한 일렉트로 슬래그(electro-slag) 용접 클래딩(cladding)에 대한 이차원 해석 결과이다.<sup>(14)</sup> 클래딩 용접부에 대해 페라이트(ferrite), 퍼얼라이트(pearlite)와 마르텐사이트의 체적 분율이 예측 및 측정되었으며 단순한 혼합법칙과 측정에 의한 Vickers 경도(Hv) 분포를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 또한, 냉각하는 과정에 마르텐사이트 변태와 관련된 자세한 물성치 분포와 체적 변화들을 고려한 최종 잔류응력 분포를 Fig. 3(c)와 (d)에 제시하고 있다. Fig. 3(d)에서 보이는 바와 같이 마르텐사이트 변태효과는 국부적인 상변태 영역에 국한되어지며 체적 팽창에 기인하여 국부적인

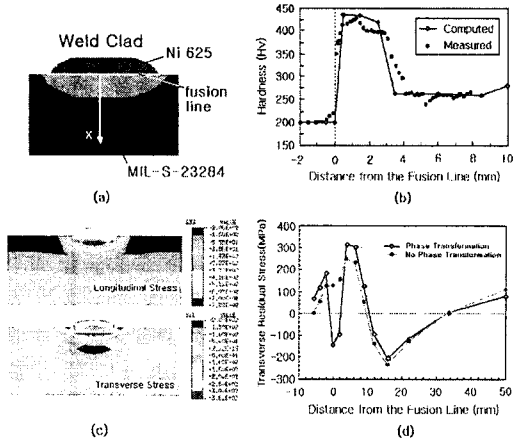
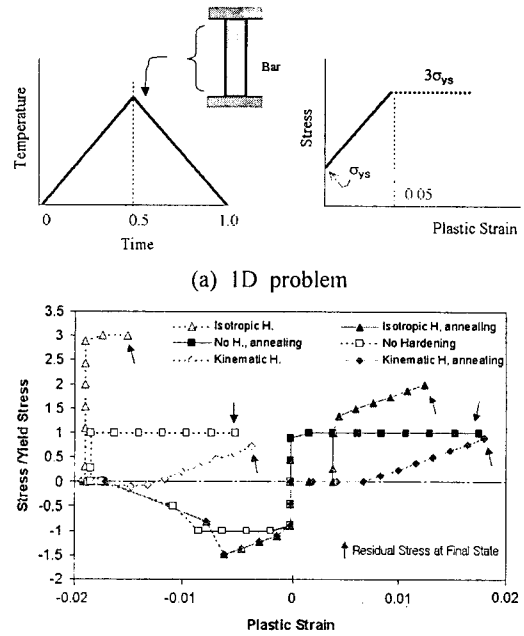


Fig. 3 Martensite Transformation Effects on Residual Stress - A Clad Weld  
 (a) Clad weld mockup (b) Hardness  
 (c) Predicted result with phase transformation(p.t.)  
 (d) Comparison between with & w/o p.t.

압축을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 전체 잔류응력 분포는 상변태 효과의 고려 여부에 무관하게 유사함을 알 수 있다.

실용적 관점에서 이러한 국부적 잔류응력 분포의 정량화는 아주 세밀한 해석을 필요로 할 뿐만 아니라 실험을 통해 달성하기도 어렵다. 또한, 구조적 건전성 평가시 흔히 잔류응력 상한치를 이용하여 잔류응력 분포를 단순화시키며 이러한 단순화는 파괴 구동력(fracture driving force)의 보수적인 평가를 야기시킨다. 따라서 보수적인 측면이 중요시되는 구조물에 대한 사용중 적합성 평가시 상변태 효과를 고려하지 않고 잔류응력을 해석하는 경우가 보다 효율적이다.

잔류응력 해석시 구체화되어야 할 가장 중요한 고온 재료거동은 용융/재용융시의 상변태이다.<sup>(2,5,13,14)</sup> 용융/재용융시 재료는 소성 변형률이 영이 되는 버진(virgin) 상태, 즉 어떠한 변형률 경화(strain hardening)도 없는 상태로 복귀되어야 한다. 대부분의 상용 유한요소법 패키지 경우, 이러한 소성 변형률 초기화 기능, 즉 어닐링(annealing) 기능을 제공하지 않으므로 특별한 고려가 필요하다. 만약 용융/재용융시 소성 변형률의 초기화가 고려되지 않고 잔류응력이 해석되진다면, Fig. 4(a)와 같은 1차원 선형 탄성-완전 소성 문제에 대해 잔류응력 해석시 Fig. 4(b)에서



(b) Comparison of residual stress prediction

Fig. 4 Comparison of Residual Stresses Using 1D Model for Isotropic & Kinematic Hardening Law with & w/o Eliminating Plastic Strain

보이는 바와 같이 어닐링을 고려하지 않은 경우, 어닐링이 고려된 실제 경우와는 다른 예측결과를 나타내며 재료 경화 법칙에 매우 민감함<sup>(5,13)</sup> 뿐만 아니라 해석해의 수렴을 어렵게 하고 계산 시간을 증가시킨다. 여기서  $\sigma_{ys}$ 는 항복응력(yield stress)을 의미한다.

### 3. 기존 연구결과 검토

기존 연구결과들 중 대표적인 최신 연구인 IIW (International Institute of Welding) X/XV RSDP (residual stress and distortion prediction) round-robin<sup>(8)</sup>에 대해 사용중 적합성 평가 측면에서 검토하고 재해석을 수행하여 기존 연구의 문제점을 도출하고자 한다. IIW의 Commission X(파괴방지)와 XV(용접설계)는 잔류응력과 변형 예측 연구를 위한 연합 워킹 그룹(joint working group)을 1996년에 구성하였다. 이러한 그룹의 주요 활동들은 1단계로서 원주방향(girth) 용접부에 대한 잔류응

력 예측의 round-robin 조사와 2단계로서 판 조합물의 잔류응력/변형 평가와 잔류응력 열람표의 작성으로 구성되어진다. 2단계 연구는 현재 준비중이므로 최근 완료된 1단계 연구만을 대상으로 한다.

3.1 결과 요약

Fig. 5는 축대칭 모델을 이용하여 해석된 두 종류의 원주방향 용접부를 나타내고 있다.<sup>(8)</sup> Fig. 6과 7은 3-패스(pass) 용접부에 대한 대표적인 round-robin 결과이다.<sup>(8)</sup> Fig. 6에서 보이는 바와 같이 참가기관 별로 큰 온도 차이를 보임을 알 수 있으며 이러한 이유는 주어진 입열 변수들을 이용하여 축대칭 모델의 입열량을 결정하는 방법에 차이가 존재하기 때문이다.<sup>(8)</sup> 이러한 온도 예측 차이는 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 참가기관 별로 잔류응력 예측에도 큰 차이를 야기시킨다.

3.2 결과 검토 및 재해석

Fig. 8은 round-robin 수행시 지정한 입열조건<sup>(8)</sup>과 동일하게 설정한 후 상용 유한요소 패키지인 ABAQUS<sup>(15)</sup>를 이용하여 재해석한 결과로서 Fig. 8(a)로부터 각 용접 패스에 대한 용융부가 실제 패스 형상보다 훨씬 큼을 알 수 있다. 또한, Fig. 8(b)에서 보이는 바와 같이 내면 용접 열영향부의 온도가 용접 패스 진행에 따라(열원으로부터 점점 멀어짐에도 불구하고) 최고 절점온도가 점점 증가하는 현상을 보인다. Fig. 8로부터 round-robin

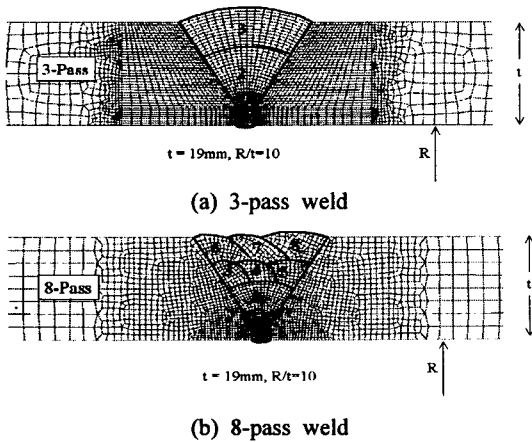


Fig. 5 FE Models for IIW Round-Robin

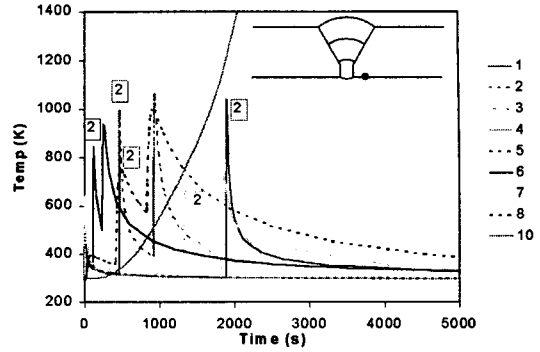


Fig. 6 Temperature History for 3-Pass Weld

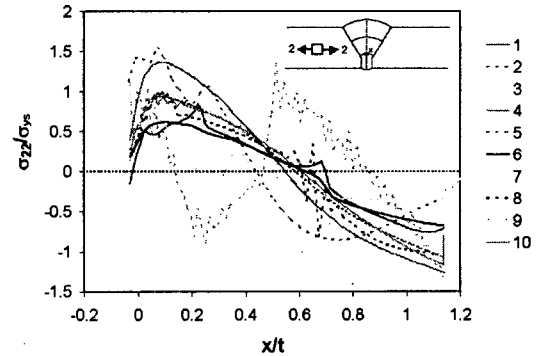
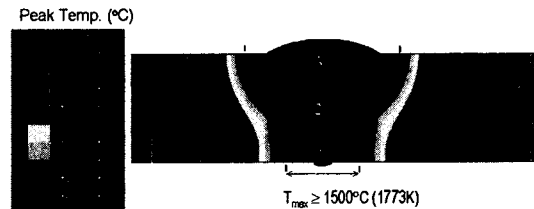
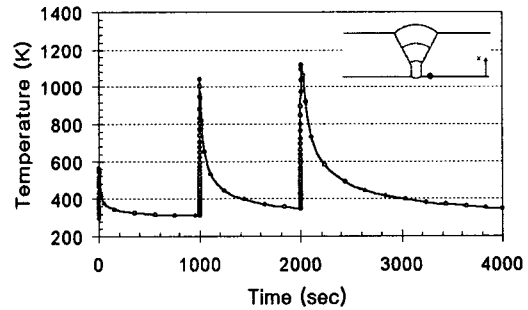


Fig. 7 Transverse Residual Stress for 3-Pass Weld



(a) Peak temp. experienced during 3-pass



(b) Temperature history at 12.7mm ID

Fig. 8 Re-Analysis Temperature Results with Same Heat Input Condition

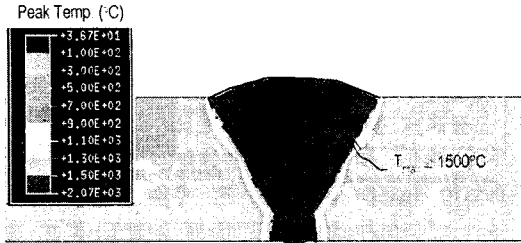


Fig. 9 Peak Temp. Experienced during 3-Pass with Realistic Heat Input Condition

수행시 지정한 단위 면적당 입열량 설정이 잘못 되어 과열되었음을 알 수 있다.

Fig. 9는 본 논문의 2.1절에서 제시한 시행착오법에 따라 실제 용융부 형상과 동일한 형상이 나오도록 실제적인 입열조건을 설정한 후 ABAQUS를 이용하여 수행한 온도해석 결과이다. Fig. 9로부터 예측된 용융부 형상이 보다 실제적임을 알 수 있다.

Fig. 10은 round-robin 수행시 사용된 응력-소성 변형률 선도<sup>(8)</sup>이다. 그러나 대부분의 탄소강 배관 재료의 경우, 인장강도  $\sigma_{UTS}$ 는 0.02와 같이 작은 크기의 소성 변형률에서 발생되지 않는다. 수치 해석시 또 다른 한가지 문제점은 유한요소 패키지에 따라 소성 변형률 컷 오프(cutt-off) 지점인 0.02 이후의 경화 거동이 Fig. 10 상의 점선과 같이 선형 경화 또는 완전 소성 거동으로 묘사되어 진다는 것이다. 재해석시에는 완전 소성 거동을 이용하였다. Fig. 11은 ABAQUS를 이용하여 계산한 무차원 원환 잔류응력 분포를 보여주고 있다. Fig. 11에서 보이는 바와 같이 과열효과와 비실제적인 소성 거동에 기인하여 인장 작용응력이 항복응력을 초과하는 영역이 용착 금속부의 약 3배에 달한다. Fig. 12는 탄소강에 대한 보다 실제적인 변형률 경화 거동을 반영하도록 수정한 응력-소성 변형률 선도이다. Fig. 13은 Fig. 9의 온도해석 결과와 Fig. 12의 응력-소성 변형률 선도를 토대로 ABAQUS를 이용하여 재해석한 무차원 원환 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 항복응력을 초과하는 영역이 Fig. 11의 약 1/2임을 알 수 있다.

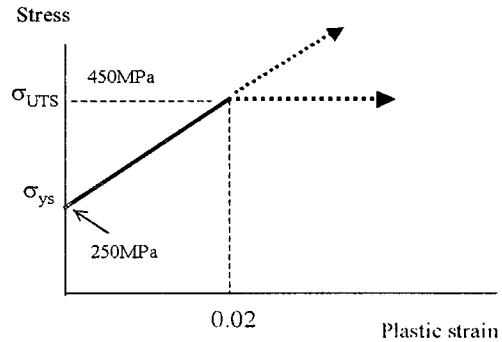


Fig. 10 Stress vs. Plastic Strain Behavior Specified in IIW Round-Robin Protocol



Fig. 11 Normalized Hoop Residual Stress in IIW Round-Robin

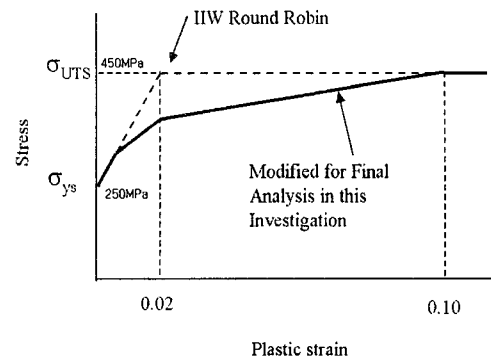


Fig. 12 More Realistic Stress vs. Plastic Strain Behavior

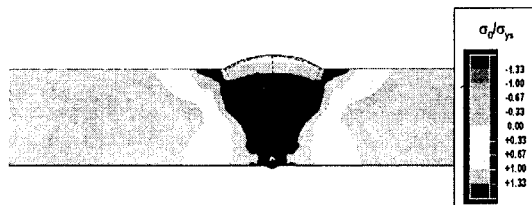


Fig. 13 Normalized Hoop Residual Stress with Realistic Heat Input & Material Behavior

상기 검토 결과로부터 IIW round-robin의 비실제적인 해석치는 해석시 설정한 과도한 입열조건과 비실제적인 응력-소성 변형을 거동 때문임을 알 수 있다. 따라서 입열조건과 응력-소성 변형을 거동을 설정할 때에는 실제 현상에 위배되지 않도록 세심한 주의가 필요하다.

#### 4. 사용중 적합성 평가용 잔류응력 해석절차

응력확대계수(SIF: stress intensity factor)에 대한 잔류응력의 영향을 고찰하여 사용중 적합성 평가 목적을 위한 잔류응력 해석절차를 제시하고자 한다. 이러한 절차는 사용중 적합성 평가를 위해 용접 구조물의 잔류응력 분포를 결정하는데 적합한 기초를 제공할 것이다.

##### 4.1 잔류응력에 의한 응력확대계수 계산

두께에 따른 잔류응력 분포  $\sigma^r(x)$ 는 표면으로부터의 깊이  $x$ 의 함수로 표시될 수 있으며, 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 용접부 형상들에 대하여 개발되어져 있다.<sup>(16)</sup>

상세한 유한요소 잔류응력 해석으로부터 얻어진 잔류응력 분포  $\sigma^r(x)$ 는 Fig. 14에 제시된 바와 같이 응력확대계수의 용이한 계산을 위해 막응력(membrane stress) 성분  $\sigma_m^r$ , 굽힘 응력(bending stress) 성분  $\sigma_b^r$ 과 자기 평형 응력(self-equilibrating stress) 성분  $\sigma_{s.e.}^r$ 로 분리할 수 있다. 세가지 응력성분들은 다음 아래와 같이 수식들로 표현되어진다.

$$\sigma_m^r = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma^r(x) dx$$

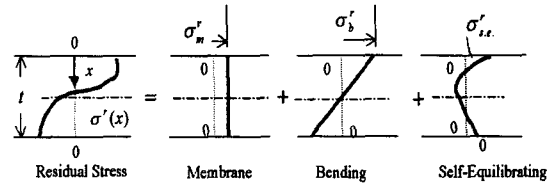


Fig. 14 Residual Stress Decomposition

$$\sigma_b^r = \frac{6}{t} \int_0^t \sigma^r(x) \left(\frac{t}{2} - x\right) dx \quad (2)$$

$$\sigma_{s.e.}^r = \sigma^r(x) - \sigma_m^r - \sigma_b^r \left(1 - \frac{2x}{t}\right)$$

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

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

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 동일한 가중함수를 사용하여 응력확대계수를 계산할 수 있다는 점에서 식 (3)은 매우 중요한 의미를 갖는다.

대부분 적용에 있어서,  $\sigma_m^r$ 은 용접 동안에 심한 구속조건이 없다면 무시될 수 있다. 따라서 굽힘 형태의 잔류응력 분포는 식 (2)와 같이 잔류응력을 각 성분들로 분리시  $\sigma_b^r$ 에 의해서 지배될 것이고 반면에 자기 평형 형태의 분포는  $\sigma_{s.e.}^r$ 에 의해 지배될 것이다.

응력확대계수 계산시 잔류응력이 미치는 영향을 고찰해 보기 위해 Fig. 15와 같이 간단한 순수 굽힘 형태( $\sigma_b^r = 206.84 \text{MPa}$ )의 잔류응력이 작용

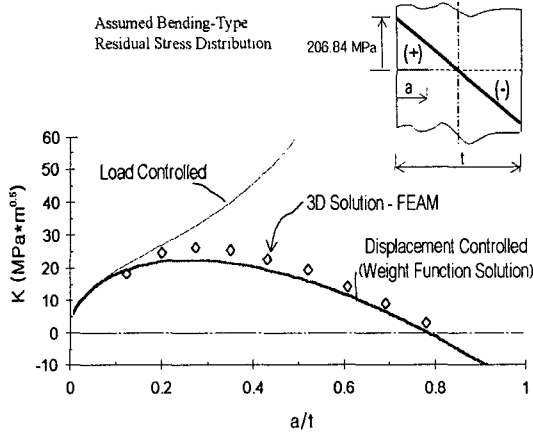


Fig. 15 SIFs for an Edge Crack

하는 경우에 대해 세가지 방법들을 이용하여 응력확대계수를 계산 비교하고자 한다. 하중제어 조건(load controlled condition)하에서 결정된 핸드북 상의 응력확대계수 계산식<sup>(17)</sup>을 이용한다면, 균열진전에 따른 잔류응력 재분배를 묘사할 수 없기 때문에 응력확대계수의 계산치는 0.2보다 큰  $a/t$ 에 대해 급격히 증가하는 양상을 나타낸다. 그러나 Fig. 15에서 보이는 바와 같이 삼차원 유한요소 교호법(FEAM: finite element alternating method)을 이용하면 균열진전에 따른 잔류응력 재분배를 묘사할 수 있으며 응력확대계수는  $a/t=0.2$  근처에서 최대값을 나타내다가 감소한다. 변위제어 조건(displacement controlled condition)에 근거하는 가중함수<sup>(18)</sup>의 사용은 FEAM 경우와 거의 동일한 결과를 도출해 낸다. 따라서 잔류응력에 의한 응력확대계수는 FEAM이나 변위제어 가중함수법을 이용하여 계산하는 것이 바람직하다.

굽힘 형태와 자기 평형 형태의 잔류응력 분포가 응력확대계수에 미치는 영향은 Fig. 16에서 제시하고 있다. 두가지 형태의 최대 잔류응력 값은 206.84MPa로 동일하나, 예상한 바와 같이 굽힘 요소가 자기 평형 요소보다 응력확대계수에 대해 더 큰 영향을 미친다. 또한, Fig. 16에서 보이는 바와 같이 자기 평형 형태에 대한 응력확대계수는 약 0.3보다 작은  $a/t$ 내에서만 양의 값을 나타내므로 균열 진전 거동에 대한 자기 평형 형태의 영향은 약 0.3보다 작은  $a/t$ 내에서만 의미를 가진다는 것을 알 수 있다.

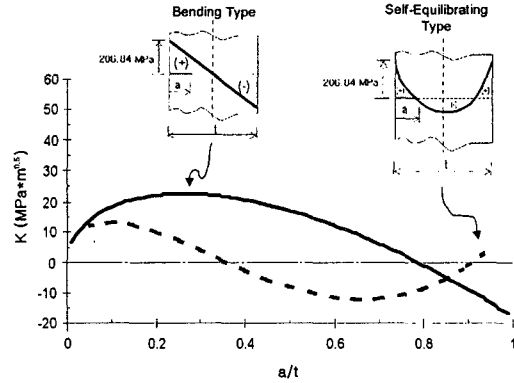


Fig. 16 Comparison of SIFs between Two Types

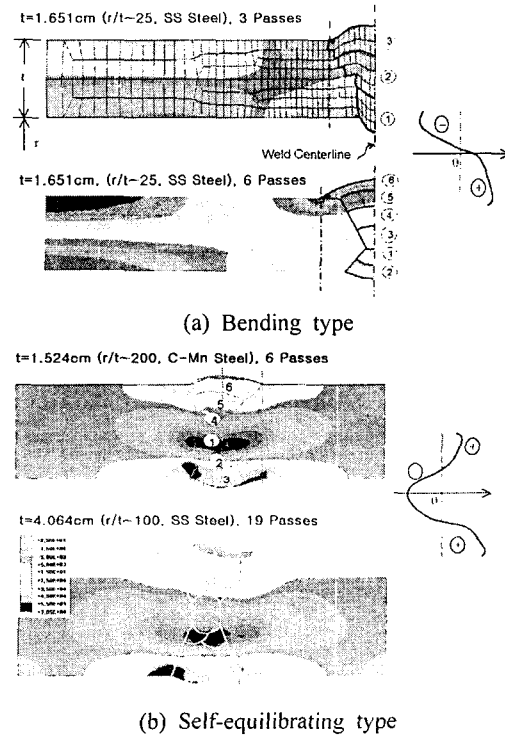


Fig. 17 Two Generalized Through-Thickness Axial Residual Stress Distributions

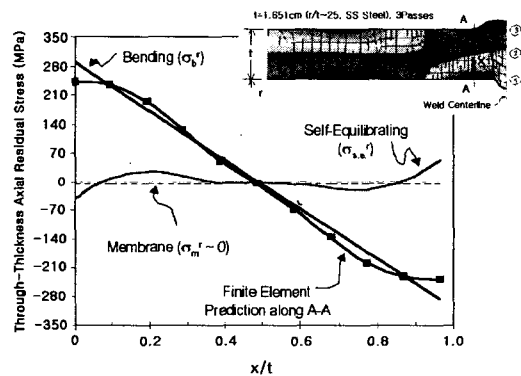
4.2 응력확대계수에 대한 잔류응력의 영향

Fig. 17에서 보이는 바와 같이 실험으로 검증된 실제적인 잔류응력 분포<sup>(5)</sup>를 고려한다면, 응력확대계수에 대한 상세 잔류응력 분포의 영향을 정량화할 수 있으며 잔류응력 해석시 요구조건들을 도출할 수 있다.

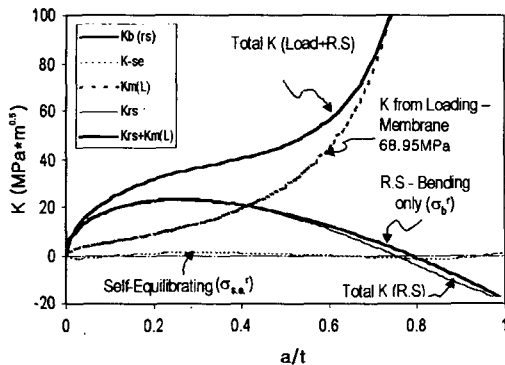
응력확대계수를 계산하기 위해 Fig. 17(a)에서 제시한 굽힘 형태의 배관 축방향 잔류응력이 작용하는 원주방향 용접부가 우선 고려되어진다. 식 (2)에 표현된 잔류응력 성분 분리절차를 통해 A-A 선상의 잔류응력 분포는 막 응력, 굽힘 응력 및 자기 평형 응력 성분들로 Fig. 18(a)와 같이 분리될 수 있다. 막 응력 성분  $\sigma'_m$ 에 의한 응력 확대계수는 무시할 만한 크기이므로 Fig. 18(b)에 나타내지 않았다. 모재의 항복응력 255.11MPa 보다 큰 최대응력을 가지는 굽힘 응력 성분  $\sigma'_b$ 가 지배적인 성분이며 내부표면에서 최대값이 발생한다. 또한 자기 평형 성분은 35MPa 보다 작은 최대응력을 가진다. 굽힘과 자기 평형 응력성분들에 기인하는 응력확대계수는 식 (3)을 이용하여 Fig. 18(b)와 같이 a/t의 함수로서 도출되어진다.

Fig. 18(b)에서 보이는 바와 같이, 응력확대계수에 대한 자기 평형 성분의 영향은 미약하며 응력 확대계수에 대한 굽힘 응력 성분의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 운전하중과 잔류응력 사이의 상호작용을 증명하기 위해, 68.95MPa의 균등한 막 응력이 배관 축방향을 따라 작용한다고 가정하였다. Fig. 18(b)에 68.95MPa의 운전 막 응력이 작용하는 경우의 응력확대계수를 제시하고 있다. 전체 응력확대계수(운전하중과 잔류응력에 의한 응력확대계수의 합)와 운전하중에 의한 응력확대계수의 비교를 통해 대부분의 균열 깊이 범위에 걸쳐서 전체 응력확대계수에 미치는 잔류응력의 영향이 중요함을 알 수 있다.

굽힘 형태의 잔류응력 분포에서 자기 평형 성분이 응력확대계수에 미치는 영향이 미약하다는 사실과 자기 평형 성분은 많은 용접 패스와 국부적인 미세조직 변화에 기인한다는 사실로부터 사용중 적합성 평가를 위한 단순화된 잔류응력 해석절차 개발이 가능하다는 것을 예상할 수 있다. 이러한 예상을 구체화하기 위해 보일러 압력용기 보수 용접부를 이용하고자 한다. 유한요소 해석으로 예측되고 실험으로 검증된 보일러 압력용기 축방향 잔류응력 분포<sup>(19)</sup>를 Fig. 19(a)에 제시하였다. Fig. 19(a)로부터 잔류응력 분포는 복잡한 높은 차수의 국부적 변이(high order local variation)를 가지는 굽힘 형태임을 알 수 있다. Fig. 19(a)에서 보이는 바와 같이, 식 (2)를 이용하여 각각의 성분들로 분리된 잔류응력 성분들 중 막 응력 성분은 무시될 만큼 작은 크기이며 굽힘 응력 성분이 지배적임을 알 수 있다. 또한, 자기 평형 성분은 많은 용접패스를 필요로 하는 보수용접의 특성에 기인하여 많은 싸이클 변화를 보여준다. 이러한 잔류응력 분포에 상응하는 응력확대계수 계산치를 Fig. 19(b)에 제시하였다. Fig. 19(b)로부터 자기 평형 성분은 국부적인 차원에서 응력확대계수에 영향을 미칠 뿐임을 알 수 있다.



(a) Decomposition of axial residual stresses



(b) SIFs

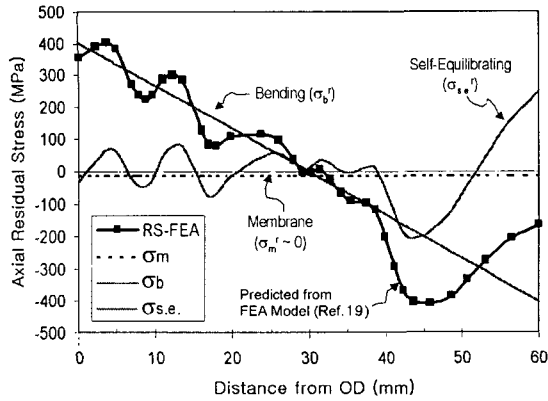
Fig. 18 Residual Stress Decomposition for SS Girth Weld and SIFs

4.3 잔류응력 해석 요구조건

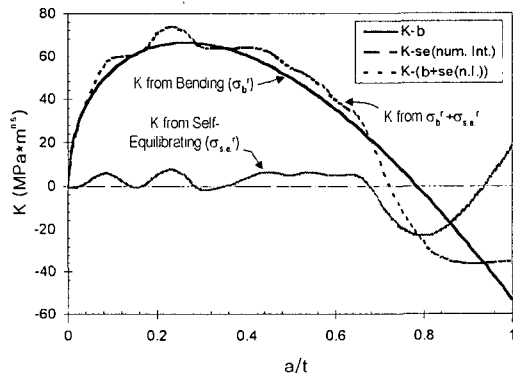
용접 잔류응력의 이용 목적이 구체화된 후 잔류응력 해석절차의 정확성 및 정밀성에 대한 요구조건이 결정되어질 수 있다.

잔류응력에 대한 깊이있는 이해와 정확한 평가를 위해, 상세한 용융 형상, 미세조직과 변태소성





(a) Decomposition of axial residual stresses



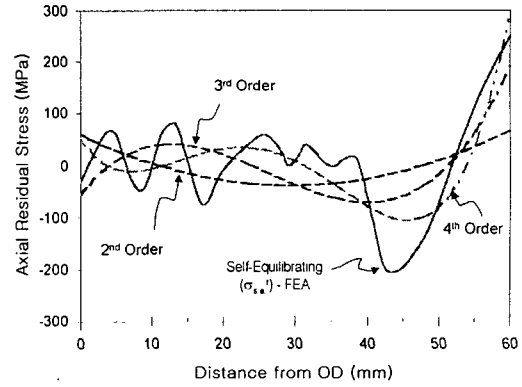
(b) SIFs

Fig. 19 Residual Stress Decomposition for Boiler Repair Weld and SIFs

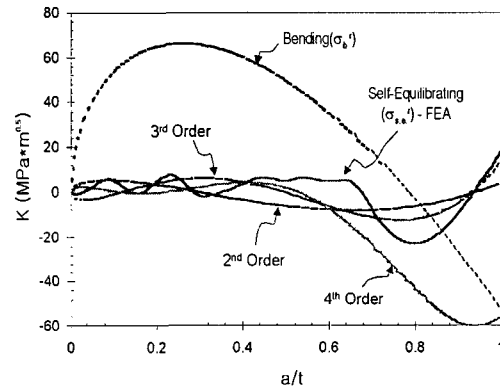
(transformation plasticity) 및 템퍼링 효과(tempering effect) 등을 고려해야 하나, 사용중 적합성 평가를 위해서는 응력확대계수에 미약한 영향을 미치는 자기 평형 성분을 야기시키는 상세평가를 굳이 수행할 필요는 없다. 따라서 사용중 적합성 평가용 잔류응력 해석절차는 매우 간소화되어질 수 있으며 복잡한 용접형상의 해석을 가능케 해준다.

사용자 적합성 평가를 위해서는 다음 아래와 같은 잔류응력 해석시 요구조건들이 용접 구조물 재질과 형상에 대해 적절히 적용되어야 한다.

- 잔류응력 해석절차는 굽힘 형태의 잔류응력 분포에 대해 1차 함수꼴인 굽힘 응력 성분을 도출할 수 있지만 하면 된다. 해석절차가 정밀해질수록 상세한 패스간 상호작용, 즉, 국부적



(a) Equilibrium-equivalent lower order approx.



(b) Comparison of SIF solutions

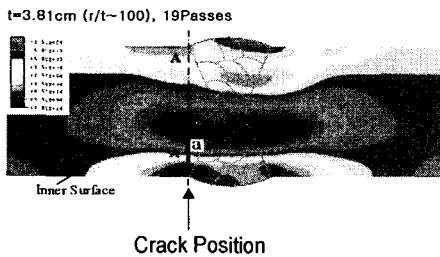
Fig. 20 High Order Effect on SIF by Self-Equilibrating Component of Bending Type

물성치 변화와 미세조직 효과 등은 작은 크기를 가지는 자기 평형 성분에 대해 보다 높은 차수 변이를 야기시킬 뿐이다. Fig. 18과 19로부터 자기 평형 성분의 높은 차수 변이들은 응력확대계수에 큰 영향을 미치지 않음을 명확하게 알 수 있다.

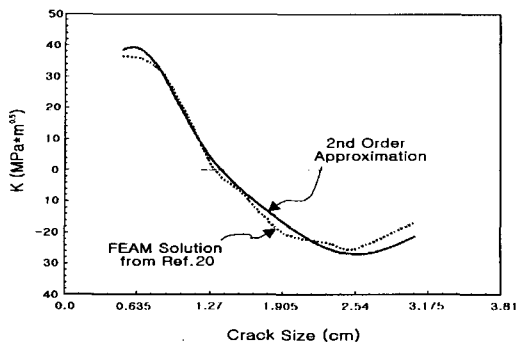
- 실제적인 문제로서, Fig. 19(a) 상의 자기 평형 잔류응력 성분은 6차 이하의 다항식으로 표현할 수 없으며 대부분의 응력확대계수 계산식에서 고려되어질 수 있는 최대 차수는 4차까지이다. 실제적으로 응력확대계수는 낮은 차수의 평형 등가 분포로 개략화 되어질 수 있다. Fig. 19(a)에 제시된 자기평형 성분에 대해 평형 등가조건을 부가함으로써 낮은 차수의 표현들을 Fig. 20(a)와 같이 나타낼 수 있다. 응력확대계수 계산치를 나타낸 Fig. 20(b)로부터 2차

까지만 고려하여도  $a/t$ 의 함수로서 응력확대계수를 충분히 표현할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 개략화 계산과 정밀한 유한요소 해석 사이의 차이는 용접부 파괴거동에 어떤 주목할 만한 영향도 줄 수 없는 매우 국부적 단계에서만 발생한다. 따라서 평형 등가 조건이 적절히 부가된다면 2차 함수로의 가정은 응력확대계수 계산에 적합할 것이다.

- 자기 평형 형태의 잔류응력 분포의 경우에도 각 응력 성분들이 적절히 분리되어지기만 한다면 자기 평형 성분의 2차 함수 가정은 타당하다. 이러한 가정의 타당성을 증명하기 위해 실험으로 검증된 원주방향 용접부의 잔류응력 분포<sup>(20)</sup>가 Fig. 21(a)와 같이 이용되어진다. Fig. 21(a)로부터 성분 분리시 막 응력과 굽힘 응력 성분은 무시할 수 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 21(b)에서 보이는 바와 같이 자기 평형 형태의 잔류응력 분포의 경우에도 자기 평형 성분의 2차 함수 가정을 통해 충분한 신뢰성을 가지는 응력확대계수를 계산할 수 있다.



(a) Axial residual stress for SS girth weld



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

**Fig. 21** Self-Equilibrating Dominated Residual Stress and SIF Using 2-Order Equilibrium-Equivalent Approximation

## 5. 결론

본 논문에서는 사용중 적합성 평가용 잔류응력 해석절차와 관련된 주요한 관찰과 결론을 얻기 위해 몇몇 예들을 상세하게 검토 제시하였으며 최종적으로 다음 아래와 같은 특성을 가진 사용중 적합성 평가용 잔류응력 해석절차를 개발 제시하였다.

- (1) 자기 평형 성분의 잔류응력을 야기시키는 상변태/템퍼링 효과 등을 고려한 상세해석을 수행 할 필요는 없다.
- (2) 해석 해의 신뢰성 뿐만 아니라 해석의 수렴성 향상과 계산시간 단축 측면에서 용융/재용융시 소성변형률의 초기화는 고려되어야만 한다.
- (3) 입열조건과 응력-소성변형률 거동은 세심한 주의를 가지고 실제 현상에 위배되지 않도록 설정되어야 한다.
- (4) 잔류응력에 의한 응력확대계수는 변위제어 가중 함수법이나 FEAM을 이용하여 계산되어야 한다.
- (5) 자기 평형 성분의 잔류응력 경우 2차 함수로의 가정을 통해 충분한 신뢰성을 가지는 응력확대계수를 계산할 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Leblond, J.B., Mattet, G., and Devaux, J.C., 1986, "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.
- (2) Brust, F.W. and Rybicki, E.F., 1981, "Computational Model of Backlay Welding for Controlling Residual Stresses in Welding Pipes," *Trans. of ASME, J. of Pressure Vessel Technology*, Vol. 103, pp. 294~299.
- (3) Janosch, J. and Lawrjanec, D., 1999, "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," *Proceedings of ASME PVP Conference, PVP Vol. 393*, pp. 215~224.
- (4) Josefson, B.L. and Karlsson, C.T., 1989, "FE-

- Calculated Stress in Multi-pass Butt-welded Pipe - a Simplified Approach," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 38, pp. 227~243.
- (5) Dong, P. and Brust, F.W., 2000, "Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components: a Millennium Review and Beyond," *Trans. of ASME, J. of Pressure Vessel Technology*, Vol. 122, No. 3, pp. 329~338.
- (6) Kim, J.W. and Im, S., 1999, "Numerical Analysis of Phase Transformation in Steel," *Proceedings of the First Int. Conf. on Advances in Structural Engineering and Mechanics*, Seoul, Aug.23-25, 1999, ASEM, Vol. 1, pp. 227~232(6).
- (7) Kim, J.S., Lee, S.G, Park, J.S., and Jin, T.E., 2001, "Computation of Residual Stress on RPV Weldment," *Proceedings of the 7th International JWS Symposium*, Vol. 2, Kobe, Japan, November 19-23, 2001, pp. 1095~1100.
- (8) Koppenhoefer, K.C. and Gordan, R., 2000, "IIW X-XV RSDP Residual Stress Round-Robin Results-Phase 1," *Presentation at IIW 2000 Annual Assembly*, Florence, Italy, IIW-X-XV-RSDP-50-2000.
- (9) Bate, S.K. and Bouchard, P.J., 2000, "Measurement and Modeling of Residual Stresses in Thick Section Type 316 Stainless Steel Welds," *Proceedings of the Sixth Int. Conf. on Residual Stresses(ICRS-6)*, Oxford, UK, July, 2000, pp. 1511~1518.
- (10) Bouchard, P.J., Holt, P., and Smith, D.J., 1997, "Prediction and Measurement of Residual Stresses in a Thick Section Stainless Steel Weld," *Proceedings of ASME PVP Conference*, PVP Vol. 347, Orlando, FL, 1997, pp. 77~82.
- (11) Cao, Z.N. and Dong, P., 1998, "Modeling of GMA Weld Pools with Consideration of Droplet Impact," *Trans. of ASME, J. of Engineering Materials and Technology*, Vol. 120, pp. 313~320.
- (12) Goldak, J., Oddy, A., McDill, M., and House, R., 1984, "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources," *Metall. Trans. B*, Vol. 15B, pp. 587~600.
- (13) Dong, P., 2000, "Modeling of Weld Residual Stresses and Distortions: Advanced Computational Procedures and Practical Applications," *Proceedings of the Sixth Int. Conf. on Residual Stresses(ICRS-6)*, Oxford, UK, July 10-12, 2000, pp. 1223~1335.
- (14) Dong, P., Zhang, J., and Li, M.V., 1998, "Computational Modeling of Weld Residual Stresses and Distortions - an Integrated Framework and Industrial Applications," *Proceedings of ASME PVP Conference*, PVP Vol.373, San Diego, CA, 1998, pp. 311~335.
- (15) HKS Inc., 1998, *ABAQUS User's Manual*, Ver. 5.8.
- (16) Anderson, T.L., 1998-2000, *MPC Project Software on Stress Intensity Factor Solutions*.
- (17) Tada, H., Paris, P., and Irwin, G., 1985, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, 2nd Edition, St Louis, MO: Paris Productions.
- (18) Owen, J. and Fawkes, A.J., 1983, *Engineering Fracture Mechanics: Numerical Methods and Applications*, Pineridge Press Ltd., pp. 23~25.
- (19) Zhang, J., Dong, P., Hong, J.K., Bell, W., and McDonald, E.J., 2000, "Analytical and Experimental Study of Residual Stresses in a Multi-Pass Repair Weld," *Proceedings of ASME PVP Conference*, PVP Vol. 410-1, Seattle, Washington, July 23-27, 2000, pp. 53~64.
- (20) Zhang, J. Dong, P., Brust, F.W., Shack, J.S., Mayfield, M.E., and McNeil, M., 1999, "Modeling of Weld Residual Stresses in Core Shroud Structures," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.195, pp. 171~187.