

용접 잔류응력 평가에 관한 최근의 국제공동연구 동향

김 종 성 · 박 준 수 · 진 태 은

Review on the International Joint Researches for Evaluation of Welding Residual Stresses

Jong-Sung Kim, June-Soo Park and Tae-Eun Jin

1. 서 론

구조물을 용접할 때 용접변수, 재료의 고온거동, 국부적 가열, 냉각 수축 및 구속조건 등의 상호작용에 의해 발생하는 잔류응력은 구조물의 건전성 및 수명을 저하시킨다고 알려져 있다. 따라서 용접 구조물의 건전성 및 수명을 정확하게 예측하기 위해서는 주요 인자인 잔류응력을 보다 정확하게 평가하여야만 한다. 이러한 필요성에 기인하여 용접 잔류응력을 보다 정확하게 해석하거나 측정하려는 국내외 많은 연구들이 수행되어왔다. 이러한 연구들 중 해석의 경우는 주로 유한요소법(FEM : finite element method)에 근거하여 수행되었으며 측정은 천공법, 절단법, X-선 회절법, 중성자 회절법 등 다양한 측정법이 적용되어왔다. 또한 준 해석적 방법으로 Contour Method가 일부 적용되었다. 국내 기관에서 용접 잔류응력 평가 업무를 계획하거나 수행할 때 잔류응력 해석 및 측정과 관련된 국제공동연구의 최신 동향을 파악하는 것은 치밀한 계획 수립 및 원활한 업무 수행에 도움이 될 수 있다.

본 특집 논문에서는 잔류응력 평가와 관련된 최신 국제공동연구를 IIW(International Institute of Welding) 주관 연구, 미국의 PVRC(Pressure Vessel Research Council) 주관 연구 및 EU(European Union)에서 수행된 연구로 구분하여 요약 제시하였다.

2. IIW 주관 연구 프로그램

용접 동안 소성 변형을 모델링 하는데 있어서 적용되는 다양한 기법들의 영향을 확인하기 위해, IIW의 Commission X(용접부의 구조적 성능-파괴방지)와 XV(용접 구조물 설계/해석/제작)는 잔류응력과 변형 예측 연구를 위한 연합 워킹 그룹(Joint Working Group)을 1996년에 구성하여 X/XV RSDP(Residual Stress and Distortion Prediction) Round Robin Phase I을 1996년부터 4년간 11개 기관들(EWI, TWI, British Energy,

British Steel, Paton Institute, TU-Braunschweig, TU-Graz, SAQ Kontroll AB, Institut of Applied Mechanics-BRNO, Institut de Soudure, Ohio State University)이 참여하여 수행하였다. 그러나, 11개 기관에서 도출한 결과들의 산포도가 커서 Commission XIII(용접 기기/구조물의 피로)까지 포함된 X/XIII/XV RSDP Round Robin Phase II를 2001년부터 20여개 기관들(CETIM Senlis, ILL, National Physics Laboratory, University of Bristol, TU-Braunschweig, Mechanik Freiburg, University Stuttgart, TU-Graz, GKSS, Paton Institute, Monash University, University of Maribor, TWI, BMI, Fraunhofer-Institut, Osaka University, etc.)이 참여하여 수행하고 있다.

2.1 RSDP Round Robin Phase 1

X/XV RSDP Round Robin Phase I의 해석 대상은 탄소강 원주방향(Girth) 용접부로서 EWI(Edison Welding Institute)에서 주도적으로 아래와 같이 수행하였다¹⁾.

Fig. 1은 축대칭 유한요소 모델을 이용하여 해석된 원주방향 용접부를 나타내고 있다. Fig. 2와 3은 3-패스(Pass) 용접부에 대한 대표적인 Round Robin 결과이다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 참가기관 별로 큰 온도 차이를 보임을 알 수 있으며 이러한 이유는 주어진 입열 변수들을 이용하여 축대칭 모델의 입열량을 결

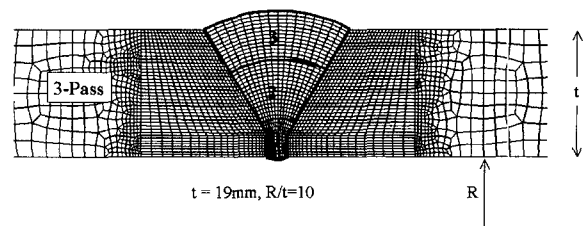


Fig. 1 FE model for IIW round robin phase I

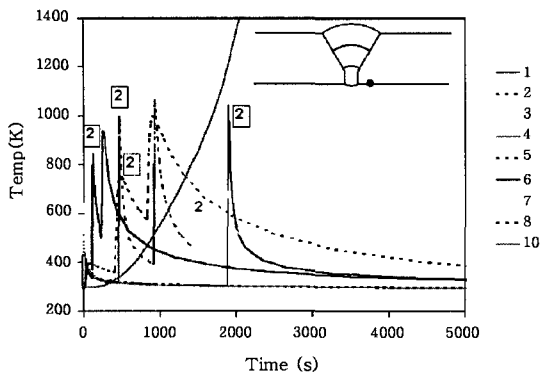


Fig. 2 Temperature histories for 3-pass weld

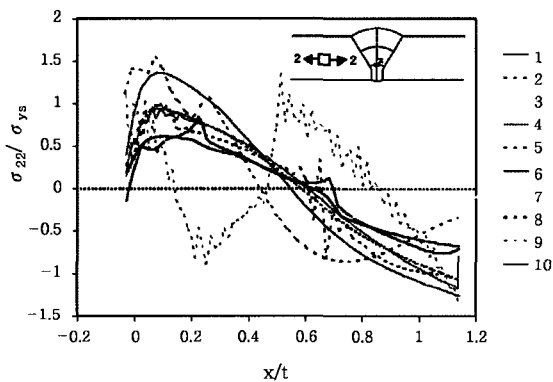


Fig. 3 Transverse residual stresses for 3-pass weld

정하는 방법에 큰 차이가 존재하였기 때문이다. 이러한 온도 예측 차이는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 참가기 관별로 잔류응력 예측에도 큰 차이를 야기시켰다.

2.2 RSDP Round Robin Phase 2

X/XIII/XV RSDP Round Robin Phase II의 해석 대상은 GTAW로 2-패스 용접된 오스테나이트 스테인리스 강판의 맞대기(Butt) 용접부로서 측정은 TU-Braunschweig에서, 해석은 BMI(Battelle Memorial Institute)에서 주도적으로 아래와 같이 수행하였다²⁾.

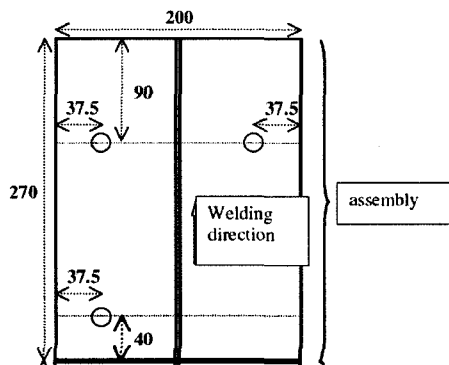


Fig. 4 Geometry of the plate

Fig. 4는 해석대상의 형상을 나타내고 있으며 Fig. 5는 각각의 용접 패스 용착후 용융부 형상이다. Fig. 6은 3차원 유한요소 해석과 열전대 측정을 통해 도출한 결과로서 첫 번째 용접 패스 용착 후 시간에 따른 온도 변화를 보여주고 있다. 참고로 Fig. 6의 결과는 온도 상승 시점을 일치시키지 않았음을 명심하여야 한다. Fig. 6에서 보이는 바와 같이, 참여자(Partner) 1의 경우 균일 체적 열유속 접근법을 사용하여 피크응력 값

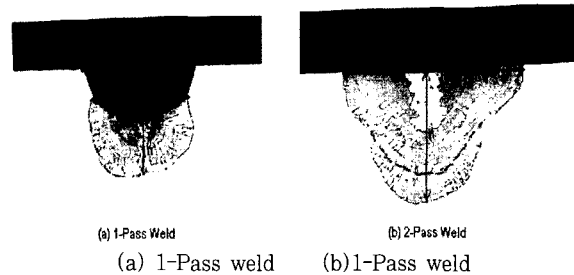
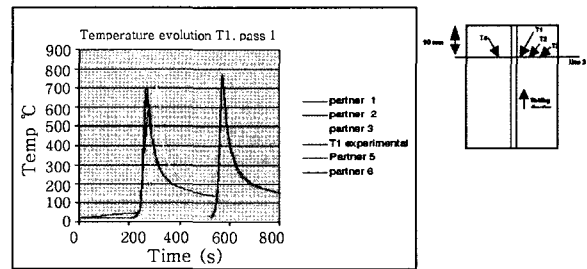
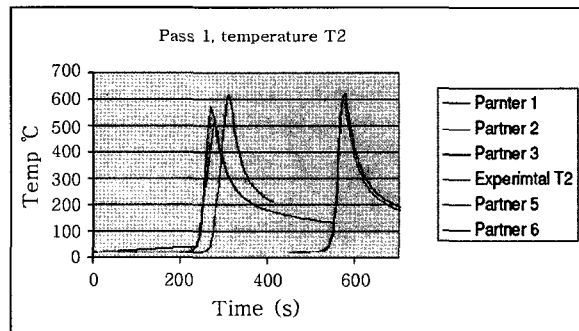


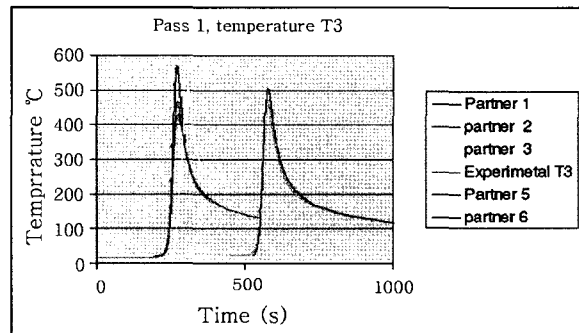
Fig. 5 Macrograph of the each deposit



(a) T1



(b) T2



(c) T3

Fig. 6 Temperature histories for 1-pass weld

에 차이를 보이거나, 다른 참여자들의 경우에는 측정치와 근사한 값을 보인다. 특히, 참여자 3과 6의 경우 측정치와 거의 일치하는 값을 보인다. Fig. 7은 X-선 회절법을 이용한 측정치와 3차원 유한요소 잔류응력 해석치를 비교 제시하고 있다. 여기서 S_{xx} 는 용접 방향에 수직인 응력성분을, S_{zz} 는 용접 방향으로의 응력성분을 의미한다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 해석치 또는 측정치들 사이에는 합리적으로 일치하고 있으나 용접금속 영역을 제외하고는 해석치와 측정치 사이에는 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 관련하여 추가적인 연구가 수행될 예정이다.

3. PVRC 연구 프로그램

용접현상의 복잡성에 기인하여 잔류응력 해석절차는 매우 복잡한 수치해석 기법에서부터 최종 잔류응력 분포의 중요한 몇몇 특징 만을 평가할 수 있는 효율적인 절차까지 변화되어질 수 있다. 또한, 잔류응력 완화 및 연성/인성 회복을 위해 수행되는 용접후열처리(PWHT : post-weld heat treatment)와 관련된 기술기준³⁾에 의하면 대상 기기의 두께가 두꺼워질수록 장시간의 후열처리 유지시간을 요구하고 있으나 만약 열처리 초기 단계에서 잔류응력이 급격히 제거된다면 장시간의 열처리는 비효율적일 수 있다. 아울러, 기술기준 상에는 국부 후열처리시 가열부와 비가열부 사이의 온도 구배를 완만하게 유지하도록 규정하고 있으나 이를 위해 사용

되는 히팅 밴드(Heating Band)와 보온재(Insulation)의 폭에 대한 구체적인 지침은 제시되지 않고 있는 실정이다.

따라서 PVRC 주관 하에 2000년부터 2년간 10개 기관(Korea Power Engineering Company, Caterpillar, British Energy, BWX, Chevron, DuPont, UOP, ExxonMobil, M&ME, BMI)이 참여하여 BMI가 주도적으로 사용적합성(FFS : fitness-for-service) 평가 측면에서의 잔류응력 해석절차를 개발하였고 후열처리시 유지시간에 따른 잔류응력 완화 정도와 국부 후열처리시 히팅 밴드/보온재 폭이 잔류응력 완화에 미치는 영향을 평가하였다⁴⁾.

3.1 FFS 평가용 잔류응력 해석절차

응력확대계수(SIF : stress intensity factor)에 대한 잔류응력의 영향을 고찰하여 사용적합성 평가 목적을 위한 잔류응력 해석절차를 제시하고자 한다.

3.1.1 잔류응력에 의한 응력확대계수 계산

두께에 따른 잔류응력 분포 $\sigma^r(x)$ 는 표면으로부터의 깊이 x 의 함수로 표시될 수 있으며, 균열크기 a 에 대한 응력확대계수 K 를 얻기 위해 가중함수법(Weight Function Method)이 이용된다.

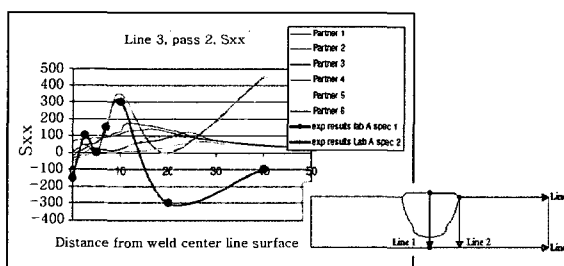
$$K(a) = \int_0^a \sigma^r(x) w(a, x) dx \quad (1)$$

여기서 $w(a, x)$ 는 가중함수로서 다양한 용접부 형상에 대하여 개발되어져 있다.

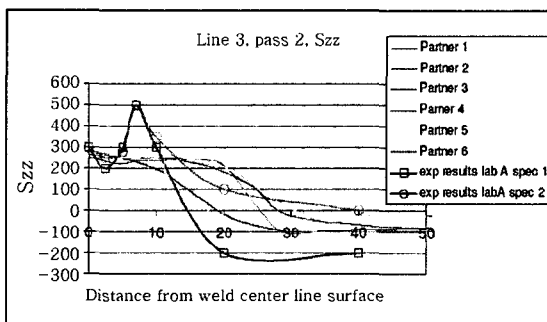
상세한 유한요소 잔류응력 해석으로부터 얻어진 잔류응력 분포 $\sigma^r(x)$ 는 응력확대계수의 용이한 계산을 위해 막 응력(Membrane Stress) 성분 σ^r_m , 굽힘 응력(Bending Stress) 성분 σ^r_b 와 자기 평형 응력(Self-Equilibrating Stress) 성분 $\sigma^r_{s.e}$ 로 분리할 수 있다. 세가지 응력성분들은 다음 아래와 같이 수식들로 표현된다.

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

식(1)의 응력확대계수는 식(2)를 통해 얻어진 잔류응력 성분들과 단순 판에 대한 가중함수 $w_b(a, x)$ 를 이



(a) Sxx along line 3



(b) Szz along line 3

Fig. 7 Comparison of residual stress analysis results with experimental results

용하여 다음 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$K(a) = \int_0^a \{ \sigma'_m + \sigma'_b(1-2x/t) + \sigma'_{s.e.}(x) \} \cdot w_p(a,x) dx \quad (3)$$

또는

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

3.1.2 응력확대계수에 대한 잔류응력의 영향

응력확대계수를 계산하기 위해 실험으로 검증된 실제적인 굽힘 형태의 배관 축방향 잔류응력 분포⁽⁵⁾가 작용하는 원주방향 용접부에 전원주 균열이 존재하는 경우가 고려되었다. 식(2)에 표현된 잔류응력 성분 분리절차를 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 에 의한 응력확대계수는 무시할 만한 크기이므로 Fig.8(b)에 나타내지 않았다. 모재의 항복응력 255.11MPa 보다 큰 최대응력을 가지는 굽힘 응력 성분 σ'_b 가 지배적인 성분이며 내부표면에서 최대값이 발생한다. 또한 자기 평형 성분

은 35MPa 보다 작은 최대응력을 가진다. 굽힘과 자기 평형 응력성분들에 기인하는 응력확대계수는 식(3)을 이용하여 Fig. 8(b)와 같이 a/t의 함수로서 도출되었다. 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, 68.95MPa의 균등한 막 응력이 배관 축방향을 따라 작용한다고 가정하였다. Fig. 8(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 a/t<0.5의 균열 깊이 범위에 걸쳐서 전체 응력확대계수에 미치는 잔류응력의 영향이 중요함을 알 수 있다.

3.1.3 잔류응력 해석 요구조건

잔류응력에 대한 깊이있는 이해와 정확한 평가를 위해 상세한 용융 형상, 미세조직과 변태소성(Transformation Plasticity) 및 템퍼링 효과(Tempering Effect) 등을 고려해야 하나, 굽힘 형태의 잔류응력 분포의 경우 사용적합성 평가를 위해서는 응력확대계수에 미약한 영향을 미치는 자기 평형 성분을 야기시키는 상세평가를 굳이 수행할 필요는 없다. 따라서 사용적합성 평가용 잔류응력 해석절차는 매우 간소화되어질 수 있으며 복잡한 용접현상의 해석을 가능케 해준다.

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

- 굽힘 형태의 잔류응력 분포에 대해 잔류응력 해석절차는 1차 함수꼴인 굽힘 응력 성분을 도출할 수 있다면 하면 된다. 해석절차가 정밀해 질수록 상세한 패스간 상호작용, 즉, 국부적 물성치 변화와 미세조직 효과 등은 작은 크기를 가지는 자기 평형 성분에 대해 보다 높은 차수 변이를 야기시킬 뿐이다. Fig. 8로부터 자기 평형 성분은 응력확대계수에 큰 영향을 미치지 않음을 명확하게 알 수 있다.
- 자기 평형 형태의 잔류응력 분포의 경우에도, 각 응력 성분들이 적절히 분리되어지지만 한다면 자기 평형 성분의 2차 함수 가정은 타당하다. 이러한 가정의 타당성을 증명하기 위해 실험으로 검증된 원주방향 용접부의 잔류응력 분포⁽⁶⁾가 Fig. 9(a)와 같이 이용되었다. Fig. 9(b)에서 보이는 바와 같이 자기 평형 형태의 잔류응력 분포의 경우에 자기 평형 성분의 2차 함수 가정을 통해 충분한 신뢰성을 가지는 응력확대계수를 계산할 수 있다.

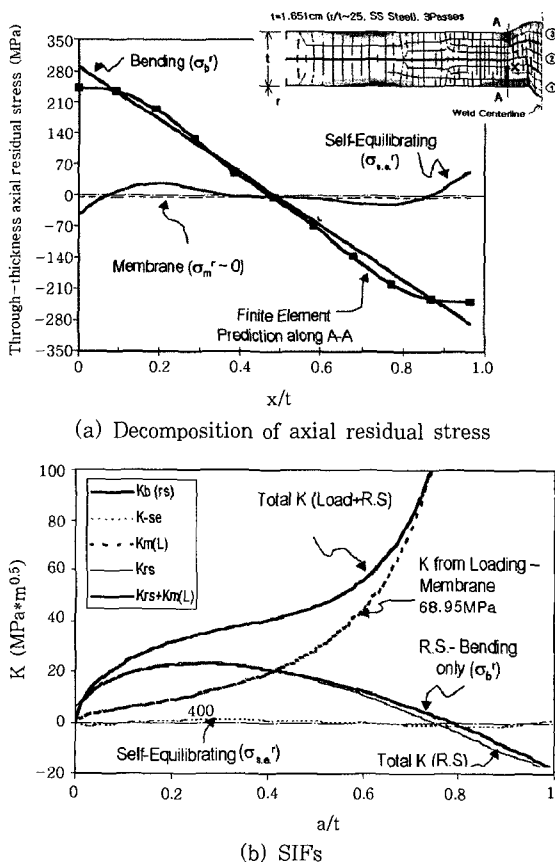


Fig. 8 Residual stress decomposition for SS girth weld

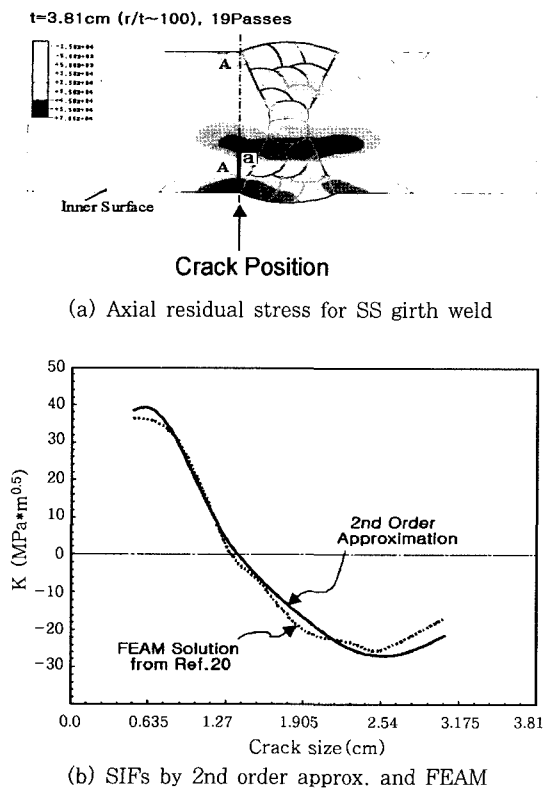


Fig. 9 Self-equilibrating dominated residual Stress and SIF using 2-Order equilibrium-equivalent Approximation

3.2 후열처리에 의한 잔류응력 완화기구

3.2.1 노내 후열처리에 의한 잔류응력 완화

Fig. 10은 노내 후열처리에 의한 잔류응력 완화기구를 확인하기 위해 사용된 2.25Cr-Mo강 배관 협개선(Narrow Gap) 용접 모델로 총 19개의 용접패스로 구성되어 있다. 후열처리 온도이력은 Fig. 11과 같다. 크리프 거동의 중요성을 확인하기 위해 크리프거동을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대해 잔류응력 완화 정도를 평가하였고, 이때 크리프 재료거동은 오메가 크

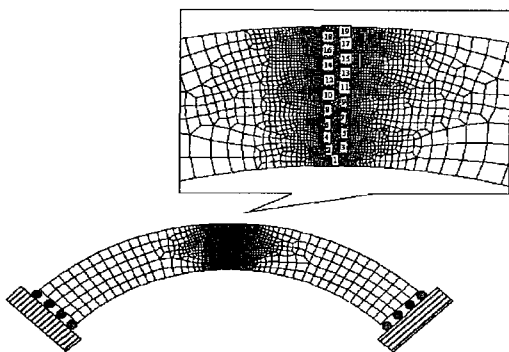


Fig. 10 FE model for 2.25Cr-Mo weld

리프 법칙⁷⁾을 사용하였다.

Fig. 12(a)는 용접 잔류응력 해석결과를 제시한 것으로 용접후 용융부 표면에는 원주방향으로 약 600MPa의 인장잔류응력이 발생되었다. Fig. 12(b)는 크리프 거동을 고려하지 않고 후열처리 해석을 수행한 결과로, 그림에서 보듯이 기 발생된 용접 잔류응력이 거의 줄어들지 않음을 알 수 있다. 반면에 크리프 거동을 고려하여 해석한 결과인 Fig. 12(c)의 경우 용융부 표면의 원주방향 잔류응력이 약 180MPa로 용접 잔류응력이 초기값 보다 약 70% 감소되었음을 알 수 있다. 따라서 노내 후열처리시 소성거동은 잔류응력 완화에 미치는 영향이 미미함을 확인할 수 있다.

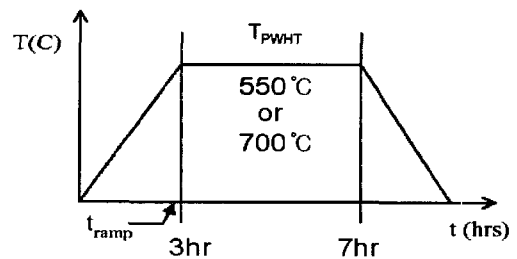


Fig. 11 Uniform PWHT procedure

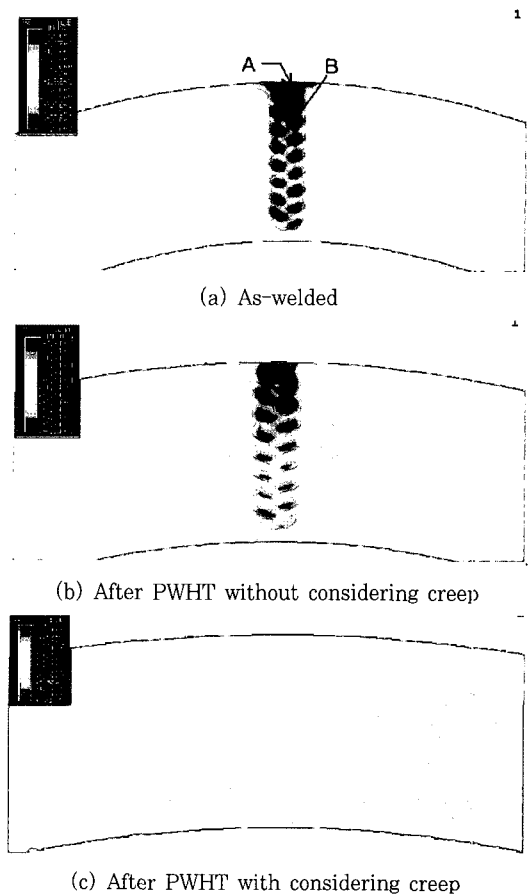


Fig. 12 Longitudinal residual stress distributions before and after PWHT(700°C)

Fig. 13은 크리프를 고려한 해석결과로서 후열처리 유지시간에 따른 잔류 유효응력의 변화 거동을 나타내며 잔류응력은 가열 후 2시간 정도까지는 선형적으로 완만히 감소하였고 이후 후열처리 목표온도에 도달할 때까지 급격히 감소하고 있다. 목표온도에 도달한 후 종료시점까지는 잔류응력의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 크리프 거동에 대한 영향을 파악하기 위하여 Fig. 14와 같이 후열처리 시간에 따른 크리프 변형률 거동을 확인하였다. Fig. 14에서 보듯이 가열후 2시간까지는 크리프 변형률이 없으며 이후 목표온도에 도달할 때까지 급격히 증가하다가 목표온도에 도달한 후에는 거의 일정한 변형률 값을 보이고 있다. Fig. 13과 14를 종합해 보면 노내 후열처리 초기 단계에서는 온도증가에 따른 재료의 항복강도 저하에 의해 잔류응력이 완화되며 이후 크리프 거동에 의해 잔류응력이 완화된다고 설명할 수 있다. 또한 크리프 거동에 의한 잔류응력 완화 정도는 후열처리 목표온도에 도달할 때까지는 매우 크나 그 이후에는 그 정도가 매우 미약하다고 할 수 있다. 따라서 노내 후열처리에 의한 잔류응력 완화는 주로 크리프 거동에 기인하며, 잔류응력의 완화가 노내 후열처리의 주요 목적이라면 후열처리 시간을 단축하여도 원하는 특성을 얻을 수 있다는 사실을 확인하였다.

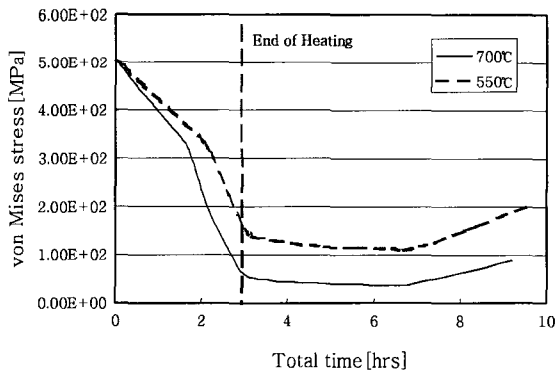


Fig. 13 von-Mises stress histories during PWHT at position B

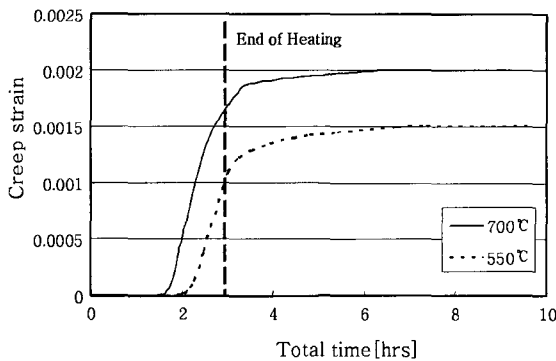


Fig. 14 Effective creep strain during PWHT at position B

3.2.2 국부 후열처리에 의한 잔류응력 완화

Fig. 15는 국부 후열처리를 시 사용된 2.25Cr-Mo강 모델형상을 나타낸 것이다. 앞에서와 마찬가지로 크리프 거동을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대하여 히팅밴드와 보온재의 폭을 변화시키면서 잔류응력 완화 해석을 수행하였다.

Fig. 16은 후열처리 이전의 잔류응력 해석 결과로 축방향 잔류응력 분포의 경우 용접부를 중심으로 국부적인 굽힘 형태를 보이고 있다. Fig. 17은 Murakawa 등의 연구결과⁸⁾에 따라 최소 히팅 밴드의 폭을 3t, 보온재의 폭을 $5\sqrt{(rt)}$ 로 설정하여 국부 후열처리를 수행한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 잔류응력이 매우 큰 폭으로 감소했음을 확인할 수 있다. 이때 작용된 완화기구를 확인하기 위해 크리프 거동을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 구분하여 해석하였다. 그림에서 보듯이 크리프를 고려하지 않은 경우에도 소성변형에 의해서 잔류응력이 현저하게 완화되므로 국부 후열처리에서는 노내 후열처리의 달리 소성변형과 크리프 거동 모두가 잔류응력을 완화시키는 인자임을 알 수 있다.

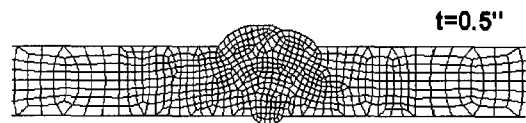


Fig. 15 FE model for 2.25Cr-Mo weld

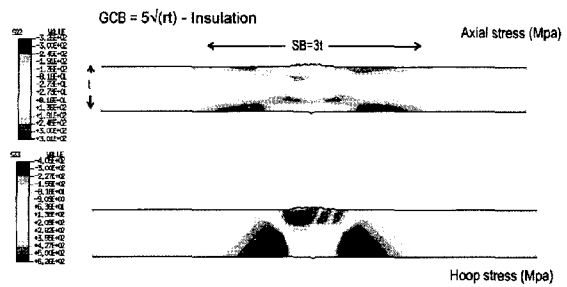


Fig. 16 As-welded residual stresses before local PWHT

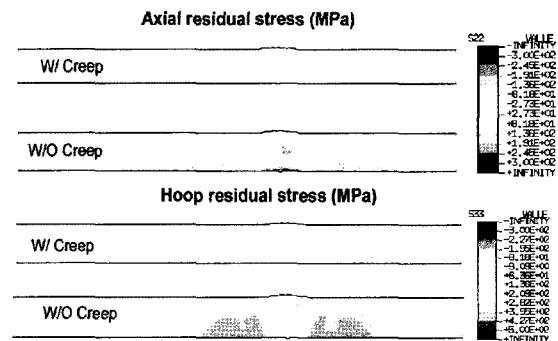


Fig. 17 Residual stresses after local PWHT : with and without considering creep

Fig. 18은 보온재의 폭은 $5\sqrt{rt}$ 로 고정된 상태에서 히팅밴드의 폭을 3t, 10t로 변화시켜 국부 후열처리 해석을 수행한 결과를 제시하였다. 그림과 같이 국부 후열처리를 수행함에 따라 상부에는 압축응력이 지배적이고 하부에는 인장응력이 지배적인 굽힘형태의 잔류응력 분포를 보인다. 또한 히팅밴드의 폭이 증가할수록 용접부에서 떨어진 지점에서 압축과 인장 응력이 발생하고 있다.

Fig. 19는 히팅밴드의 폭은 14t로 고정된 상태에서 보온재 폭을 $5\sqrt{rt}$, $10\sqrt{rt}$ 로 변화시켜 국부 후열처리 해석을 수행한 결과와 노내 후열처리 해석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 노내 후열처리 결과만큼 효과적이진 못하나 보온재 폭이 커질수록 압축 및 인장 잔류응력 정도가 점차 줄어들음을 알 수 있다. 따라서 국부 후열처리시 보온재 폭을 증가시켜 유익한 온도 구배를 형성시키는 것이 효과적인 잔류응력 완화 측면에서 중요함을 확인할 수 있다.

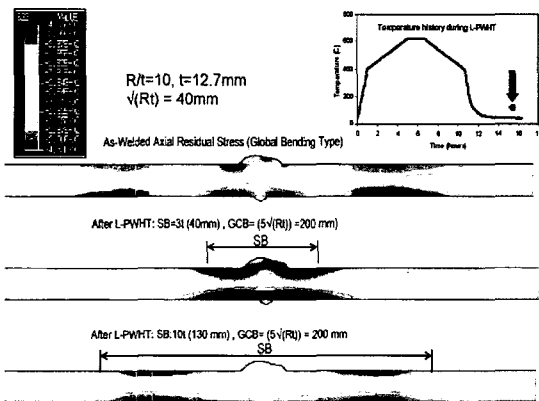


Fig. 18 Residual stresses after simulated treatment with various local PWHT parameters for global bending type of residual stresses

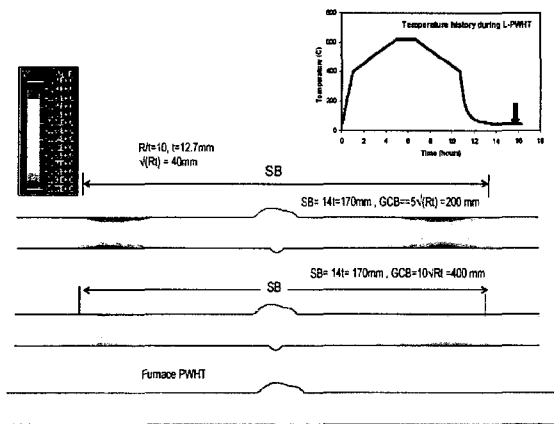


Fig. 19 Insulation band size effects on axial residual stress distributions-global bending type

4. EU 연구 프로그램

EU CEN(Comité Européen de Normalisation) 또는 JRC(Joint Research Center) IE (Institute for Energy) 주관 하에 EU내 다양한 기관들과 공동으로 표 1과 같은 국제공동연구들이 수행되어져 왔다. 이러한 연구들 중 현재 진행 중인 연구이며 잔류응력 해석 및 측정을 주 업무로 하는 NET에 대해 요약 제시하고자 한다.

4.1 NET

NET는 다음 아래와 같이 세가지 TG(Task

표 1. International Joint Researches in EU

기간	주제	참여기관	비고
BIMET(structural integrity of bi-metallic components)			
'97. 2. ~ '00. 1.	배관 이중재 용접부의 외부 원주균열에 대한 해석 방법 개발, 검증 (잔류응력 해석 및 잔류응력이 균열체의 건전성에 미치는 영향 고찰)	EdF 주도, 7개 기관 (Technical Research Centre of Finland, AEA Technology, TWI, GKSS, Framatome, Commissariat à l'Energie Atomique, EdF)	EU 4th Framework
ADIMEW(assessment of aged piping dissimilar metal weld integrity)			
'00.11. ~ '03.10.	BIMET의 후속과제로서 동일 주제를 다룸.	EdF 주도, 9개 기관 (BIMET 참가기관들 중 GKSS 제외, Serco Assurance, IE, Bay Zoltan Foundation for Applied Research 추가)	EU 5th Framework
ENPOWER(management of nuclear plant operation by optimising weld repairs)			
'01.12. ~ '04.11	보수시간 경감과 잔류응력 완화를 위한 보수용접 절차와 후열처리 대안을 개발	Institute de Soudure 주도, 6개 기관(Mitsui Bussan Energy, IE, British Energy, Framatome ANP, Industeel France SA, University of Bristol)	EU 5th Framework
INTERWELD(irradiation effects on the evolution of the microstructure, properties and residual stresses in the HAZ of stainless steel welds)			
'00. 9. ~ '05. 1.	중성자 조사취화 응력부식 균열 평가를 위한 미세조직, 재료물성, 잔류응력, 균열 개시/성장 특성 측정	NRG 주도, 7개 기관 (Ministerio, Ciemat, AREVA, PSI, IE, SCK · CEN, NRG)	EU 5th Framework
NET(network on neutron techniques standardization)			
'02. 5. ~ 현재	중성자 회절법의 표준화 (잔류응력 및 미세조직 측정)	IE 주도, 37개 기관 (HMI, GKSS, Imperial College, TU Berlin, Open Univ., Univ. of Bristol, EdF, British Energy, Korea Power Engineering Company, IE, etc.)	JRC Driven European Nuclear Networks

Group)들로 구분하여 수행하고 있는데 본 논문에서는 잔류응력과 관련이 있는 TG1과 TG2에 대해서만 제시하고자 한다⁹⁻¹¹⁾.

- TG1 : 단일 비드 용접부 잔류응력 평가
- TG2 : 보수용접부의 후열처리시 잔류응력 완화 평가
- TG3 : 주조 오스테나이트 강의 열취화 평가

4.1.1 단일 비드 용접부 잔류응력 평가

시편은 스테인리스 강 316 판재에 단일 비드를 GMAW 방법으로 MB(Mitsusi Babcock)에서 용접하였으며 Fig. 20에 기하학적 형상을 제시하고 있다.

중성자 회절, X-선 회절, Deep Hole Drilling 등 측정, FEM을 이용한 해석 및 Contour 방법 등 기타 방법으로 잔류응력을 평가하였다. FEM을 이용한 해석의 경우 열적 해석 및 기계적 해석을 구분하여 Protocol을 작성하고 이에 따라 수행하였다. 각 기관별 적용 방법을 살펴보면 다음과 같다.

- 중성자 회절법 : CEA/LLB, HMI, ISIS, IE, GKSS, NPI, NCSR
- X-선 회절법 : TU-Berlin, Open University, ENSAM
- Deep Hole Drilling법 : University of Bristol
- FEM 해석 : Bristich Energy, MB, Univeristy of West England, Korea Power Engineering Company, Serco Assurance, Imperial College, IE, UP
- Contour 방법 : Open University

Fig. 21은 중앙부에 위치한 열영향부에서의 온도 이력에 대한 결과들과 열전대를 설치하여 측정된 결과를 비교 제시하고 있다. Fig. 21로부터 해석 방법들 간 또는 해석-측정 결과 사이에 다소 차이가 존재하나, 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 22는 단일 비드 용접선을 따른 횡방향 잔류응

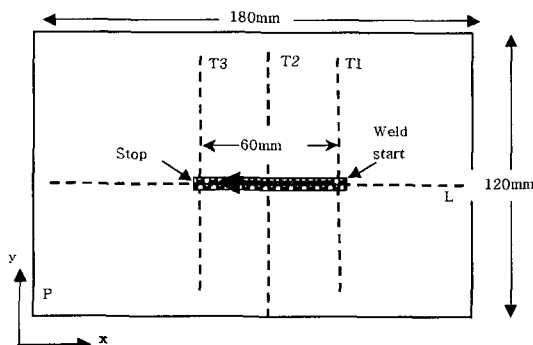


Fig. 20 Schematic of bead-on plate weld

력 분포에 대한 결과들과 측정된 결과를 비교 제시하고 있다. Fig. 22로부터 해석 방법들 간 또는 해석-측정 결과 사이에 다소 차이가 존재하나, 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

각 기관별 적용한 세부 방법들을 확인한 결과, 상기의 결과들에서 해석 결과들 간, 또는 측정결과들 간의 차이는 열적 경계조건 설정 등 세부 해석기법의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 현재 이에 대한 추가적인 분석 연구를 수행하고 있으며 분석 결과를 토대로 새로운 Round Robin Phase II를 준비 중에 있다.

4.1.2 보수용접부의 후열처리시 잔류응력 완화평가

시편은 중앙부에 폭 넓은 그루브(Groove)를 가지는 CrMo 강 판재로서 Belleli에서 용접하였으며 Fig. 23에 기하학적 형상을 제시하고 있다. Fig. 24는 횡단면의 비드 용융부 형상을 제시하고 있으며 Fig. 25는 적용되는 다양한 후열처리 선도들 중 대표적인 선도를 보여주고 있다.

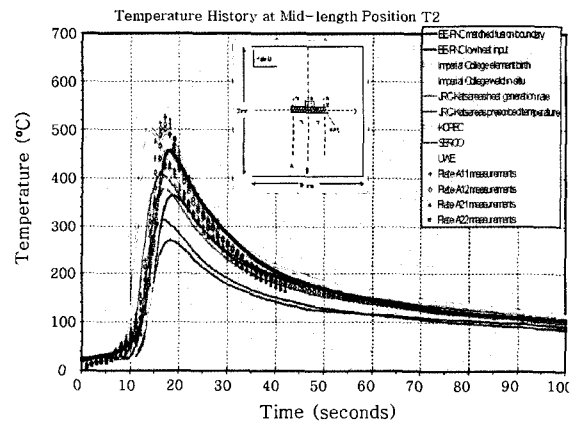


Fig. 21 Temperature histories of HAZ located on weld centerline

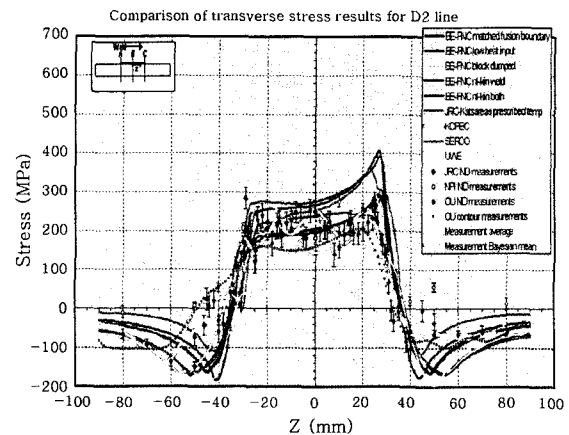


Fig. 22 Transverse residual stress distributions along welding line

중성자 회절, X-선 회절, 전자기 방법 등 측정 및 FEM을 이용한 해석으로 잔류응력을 평가하고 있다. 각 기관별 적용 방법을 살펴보면 다음과 같다.

- 중성자 회절법 : IE
- X-선 회절법 : ENSAM
- 전자기 방법 : IzfP
- FEM 해석 : Univ. of West England, Korea Power Engineering Company, UP, Serco Assurance

Fig. 26은 X-선 회절법을 통해 측정한 시편 중앙부의 횡단선을 따른 잔류변형률 분포의 예비결과를 제시하고 있다. Fig.26에서 보이는 바와 같이, 후열처리 이후 잔류 변형률은 감소하며 후열처리 온도/시간이 높고 길수록 중앙부의 잔류변형률은 더 감소함을 알 수 있다.

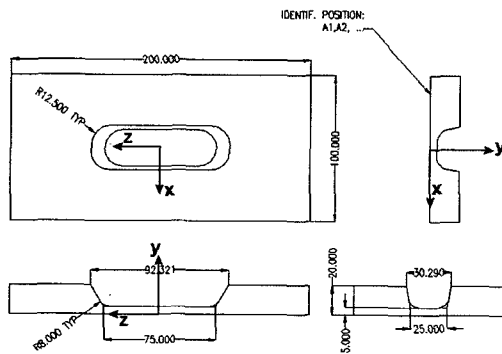


Fig. 23 Schematic of repair weld

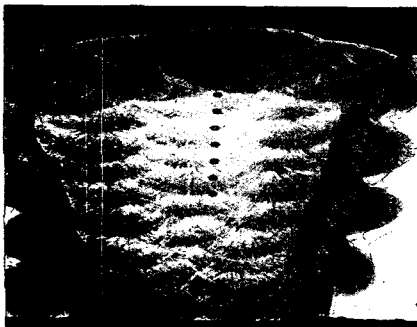


Fig. 24 Macrograph of repair weld

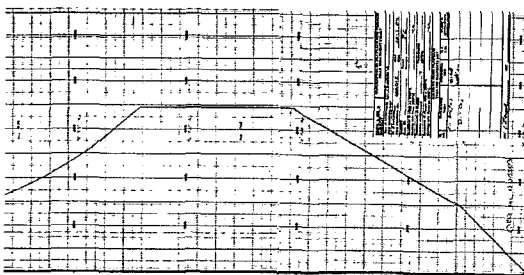


Fig. 25 PWHT curve for repair weld

Fig. 27은 2차원 평면응력 상태이며 열영향부에서 마르텐사이트가 석출된다고 가정하고 유한요소 해석을 수행한 예비적인 잔류응력 분포를 제시하고 있다. 그림에서 mht는 후열처리 온도가 300°C인 중간 후열처리를, pwht는 후열처리 온도가 620°C인 본 후열처리를 의미한다. Fig. 27로 부터 후열처리 이후 잔류응력이 감소하나, 후열처리 온도가 300°C인 중간 후열처리 경우 잔류응력 감소분이 미미함을 알 수 있다.

아직 모든 기관들이 측정이나 해석을 수행하지 못하여 결과를 비교하지 못한 상태에서 향후 각 기관별 측정 및 해석을 수행할 예정이다. 특히, 본 평가 대상을 3차원 유한요소 해석시 현실적인 어려움 때문에 용접

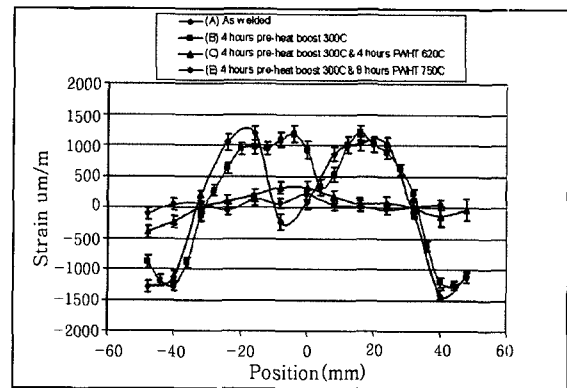
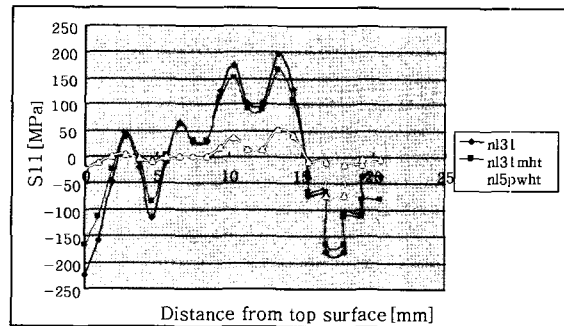
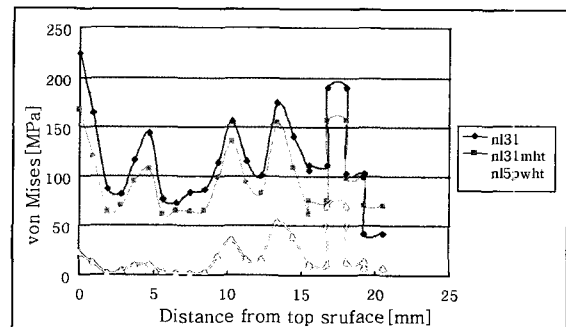


Fig. 26 Residual strain distributions along transverse line on surface of specimen center part



(a) Transverse residual stresses



(b) von-Mises effective residual stresses

Fig. 27 Residual stress distributions along thickness directional line on welding center surface

패스를 3-패스로 하는 보조 Round Robin 시편을 제작하고 있으며 향후 이에 대한 평가를 수행하고 결과를 상호 비교할 예정이다.

5. 결 론

본 특집논문에서는 용접 잔류응력에 대한 평가 결과의 신뢰성 및 일관성을 향상시키는 한편, 각 기관 별 방법 및 결과의 차이에 대한 보다 체계적인 이해를 향상시키고자 하는 목적으로 수행되었거나 수행 중인 대표적인 국제공동연구들의 내용을 개략적으로 검토 제시하였다. 이러한 검토 결과는 국내 기관에서 용접 잔류응력 평가 업무를 계획하거나 수행하고자 할 때 치밀한 계획 수립 및 원활한 업무 수행에 도움이 되는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 특집 논문은 대한용접학회 산하 용접강도연구위원회의 공동연구 활동의 일환으로 준비되었으며 참여해주신 기관들의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. K.C. Koppenhoefer and J.R. Gordan : IIW Round Robin on Residual Stress and Distortion: Phase I

Results, IIW, 2000
 2. J.J. Janosch : Round Robin Phase II - 3D Modelling Updated Results, IIW-X/XIII/XV-RSDP-114-05, 2005
 3. ASME B&PV Committee : ASME B&PV Code, Sec.VIII, Div.1&2, Rules for Construction of Pressure Vessels, 1998
 4. BMI : Investigation of Weld Residual Stresses and Local Post-Weld Heat Treatment, PVRC, June, 2002.
 5. P. Dong and F.W. Burst : Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components: a Millenium Review and Beyond, Trans. of ASME, J. of Pressure Vessel Technology, **122-3**, (2000), 329-338
 6. J. Zhang, P. Dong, F.W. Burst, J.S. Shack, M.E. Mayfield, and M. McNeil : Modeling of Weld Residual Stresses in Core Shroud Structures, Nuclear Engineering and Design, **195**, (1999), 171-187
 7. M. Prager, Omega Method - An Engineering Approach to Life Assessment, Trans. of ASME, J. of Pressure Vessel Technology, **122**, (2000)
 8. H. Murakawa, et al., Suitable Heating Conditions in Local Post Weld Heat Treatment, WRC Bulletin, No. 485, 2004
 9. J. Bouchard : Task Group 1 - A Comprehensive Presentation on the Numerical Round Robin and Its Results Overview, 6th NET Steering Committee Meeting, December 2004
 10. C. Ohms : Task Group 2 - Stress Relief Heat Treatment in Welded Steel Plates, Management Overview, 7th NET Steering Committee Meeting, June 2005
 11. J.S. Kim and T.E. Jin : Task Group 2 - Preliminary Study on Repair Weld in CrMo Steel, 6th NET Steering Committee Meeting, December 2004



- 김종성(金種聖)
- 1968년생
- 한전기술 재료기술연구그룹
- 구조/응력 해석, 피로파괴
- e-mail : kimjs@kopec.co.kr



- 진태은(陳泰殷)
- 1957년생
- 한전기술 재료기술연구그룹
- 피로파괴, 수명평가/관리
- e-mail : jinte@kopec.co.kr



- 박준수(朴俊洙)
- 1954년생
- 한전기술 기계설계처
- 구조해석, 원전기기 용접구조설계
- e-mail : js_park@kopec.co.kr