

크립 효과에 의한 용접 잔류응력의 재분포 해석 Analyses of Weld Residual Stress Redistribution by Creep Effect

이세환*, 이형연**

* 국방과학연구소

** 한국원자력연구원

1. 서 론

용접과정 중 필연적으로 발생하는 국부적인 잔류응력은 구조물의 피로와 강성을 저하시키는 원인이 된다. 그러므로 용접 잔류응력은 전체 구조물의 수명평가에 고려되어야 하는 필요성을 갖는다. 특히 현재 국내에서 개발중인 액체금속로와 같은 고온 환경하에서 사용되는 용접구조물의 경우는 이러한 잔류응력의 영향과 동시에 크립 (creep) 효과를 고려하여야 한다. British Energy의 R6[1] 절차와 British Standard의 BS 7910[2] 코드에서는 특히 고온환경하의 응력분포를 포함한 구조물의 건전성 평가 절차를 제공하고 있다.

본 연구에서는 일반적인 용접구조물의 형상에 많이 사용되는 T-plate 와 pipe-butt 용접부에 대해 유한요소법을 이용한 탄소성 용접 잔류응력 해석을 수행하였다. 이러한 잔류응력 결과를 이용하여 탄소성 크립 해석을 추가하여 일정시간 경과 후의 잔류응력의 분포변화를 계산하였다. 계산에 사용된 크립 상수는 British Energy 데이터와 프랑스의 RCC-MR[3] 코드에서 제시된 값을 사용하여 두 가지 결과를 비교 평가하였다. 잔류응력 재분포 계산에 사용된 재료는 고온 구조강도가 좋은 스테인리스강 AISI 316H와 고강도강인 SE702 두 종류를 이용하였다. 해석결과 도출된 크립 효과에 의한 재분포 잔류응력 결과는 일정시간 경과 후의 응력분포를 잘 예측할 수 있으며 향후 용접 구조물의 수명평가 예측에 사용될 수 있을 것이다.

2. 해석대상

2.1 재료 물성

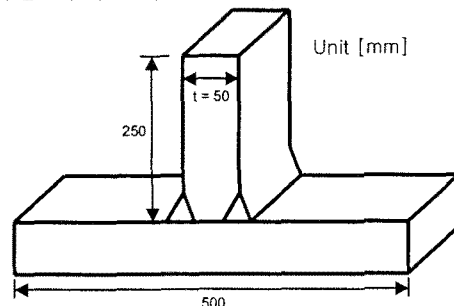
본 해석에 사용된 AISI 316H 스테인리스 강은 특히 고온환경에서 높은 강도 특성으로 고온 구조물에 널리 사용되며 현재 국내에서 개발중인 액체금속로의 주 후보재료이다. 또한 재료에 따른 잔류응력의 재분포 특성을 비교하기 위하여 고강도강인 SE702 재료에 대해서도 계산하여 두 가지 결과를 비교하였다. Table.1에는 두 재료의 인장재료 강도를 나타내고 있다. 실제 용접 잔류응력 해석시에는 온도에 따른 재료의 열적 기계적 물성치를 반영하여 계산에 사용하였다.

Table 1. Tensile material mechanical properties[4]

Material	σ_v (MPa)	σ_u (MPa)	E (GPa)
AISI 316H at 550°C	190	595	130
SE 702 at RT	700	790-940	205

2.2 용접부 형상

해석대상에 사용된 용접부 형상은 일반적으로 가장 많이 사용되는 T-plate 필렛 용접부와 pipe-butt 용접부를 선택하였으며 그 형상과 크기는 아래 그림1과 같다.



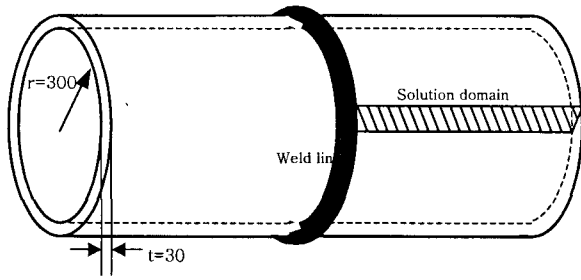


Fig.1 Schematics of welded components

3. 유한요소 해석

3.1 잔류응력 해석

크립효과에 의한 잔류응력 이완 모델에 앞서 먼저 용접에 의한 잔류응력 분포 해석을 수행하였다. 잔류응력 해석 및 응력 재분포 해석에 사용된 모델은 동일하며 2차원의 축대칭 모델을 사용하였다. Fig.2 는 두 가지 형상의 전체 해석 모델의 유한요소 형상과 경계조건을 나타내고 있다. 해석의 순서는 용접열원에 의한 온도분포 해석을 먼저 수행하고, 그 온도분포 결과를 이용하여 열응력해석을 수행하였다. 온도분포 및 응력 계산에 사용된 물성은 온도에 따라 변화하는 비선형 물성효과를 고려하여 계산하였다. 해석은 상용코드인 ABAQUS를 이용하였다.[5]

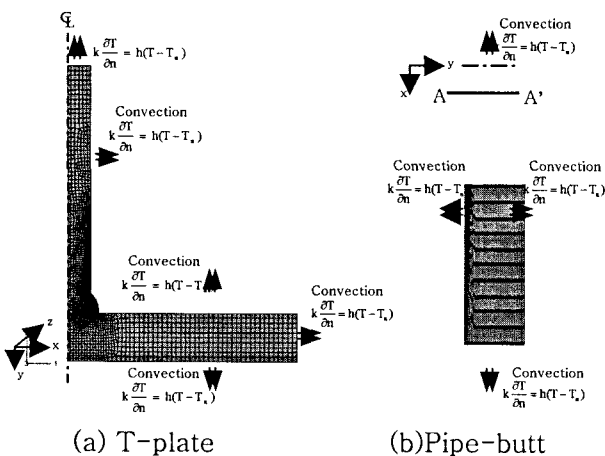
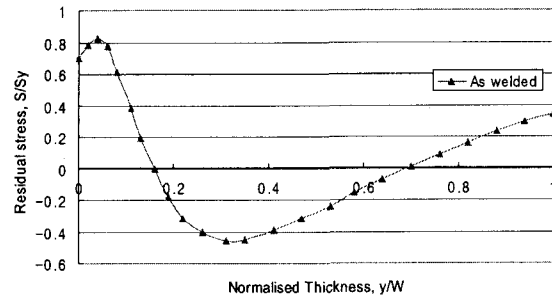


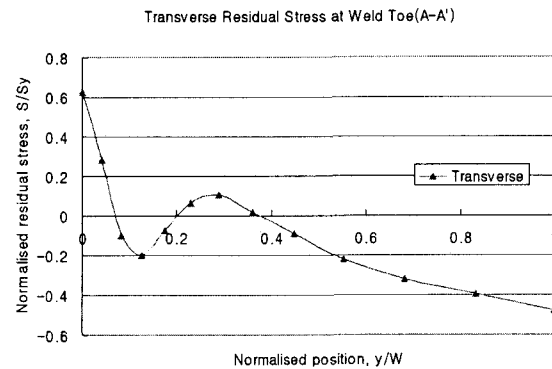
Fig.2 FE mesh generation and boundary conditions

각 형상의 횡방향 성분의 잔류응력 계산결과는 Fig.3에 나타내고 있다. 각 두께방향으로 전체길이에 대하여 보여주며 응력의 크기도 계산결과 응력값을 항복응력으로 나눈 정규화 값으로 표시하였다. T-plate의 경우 용접선 부근에서 항

복응력에 가까운 높은 인장잔류응력 값을 보였으며 두 가지 결과모두 기존 실험결과[6]와도 잘 일치한 결과를 나타내고 있다.



(a) T-plate



(b) pipe-butt

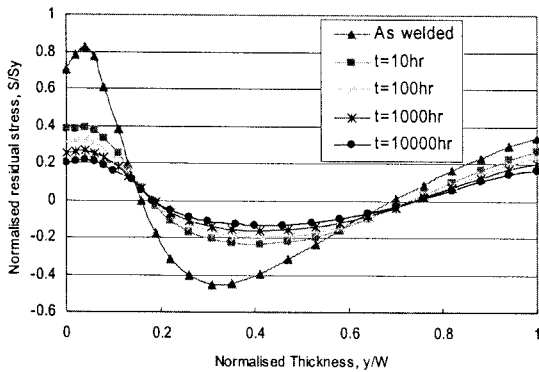
Fig.3 As welded residual stress distributions

3.2 크립 해석

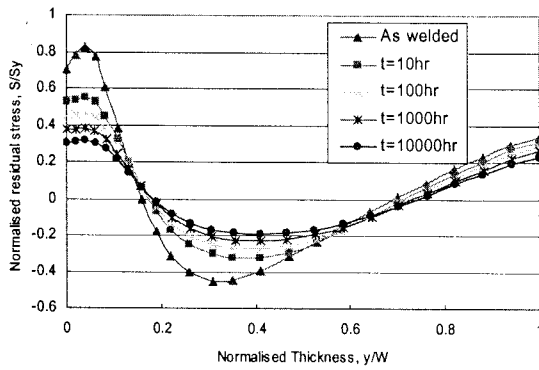
크립 효과에 의한 잔류응력 재분포 영향을 계산하기 위해 Norton's creep law를 사용하여 모사하였다. 아래 (1)식은 power-law를 적용한 크립식을 나타낸다.

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \quad (1)$$

여기서 AISI 316H의 경우 재료물성인 A와 n은 RCC-MR 코드와 British Energy (BE)에서 제공하는 데이터를 사용하였다. RCC-MR의 경우, A=5.3E-26, n=8.2이며 BE 데이터는 각각 A=7.23E-32, n=10.62를 적용하였다. 크립의 경우 hold time은 10시간에서 10000시간 경과 후 시간을 적용하였다. Fig.4는 T-plate 형상의 경우 용접잔류응력 계산 후 크립효과를 고려한 잔류응력 재분포 결과를 각 경우에 대하여 나타내고 있다.



(a) RCC-MR, T-plate



(b) BE, T-plate

Fig.4 Redistributions of residual stresses

크립 효과에 의한 잔류응력 재분포 계산 결과 RCC-MR 코드에서 제공하는 크립 상수를 사용한 경우가 잔류응력의 완화를 BE 데이터 적용 경우보다 전반적으로 크게 나타냈다. 최대 인장과 최대 압축부근이 크게 감소하는 전체적인 응력분포의 거동은 유사하였으며, 시간이 10에서 10000시간까지 증가함에 따라 잔류응력의 감소는 증가하였다.

4. 결 론

T-plate와 pipe-butt의 두 가지 일반적인 용접부에 대해 2차원 축대칭 모델을 사용하여 용접잔류응력 계산을 하였고 그 계산결과 기존 실험 데이터의 결과와 거의 동일한 잔류응력분포를 얻을 수 있었다. 크립 효과에 의한 잔류응력 재분포 정도를 정량적으로 파악하기 위하여 용접 직후의 잔류응력 분포에 비선형 열탄소성 해석을

적용하여 크립 효과를 고려하였다. 크립 해석에 사용된 상수값은 기존 RCC-MR 코드와 BE 데이터를 사용하였으며 크립에 의한 잔류응력 재분포 RCC-MR 코드 값을 사용한 경우 잔류응력의 완화폭은 크게 나타났다.

본 결과는 향후 이러한 결과를 이용하여 용접 구조물의 수명평가 및 건전성 평가에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Energy Generation Ltd, Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, R6 Rev. 4. British Energy Generation Ltd, UK, 2001
2. British Standard Institution, Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, BS7910: 1999 (Rev. March 2000) British Standards Institution, London, UK, 2000
3. RCC-MR, Design and construction rules for mechanical components of FBR nuclear islands, Technical Appendix A3, AFCEN, 1985,
4. A.D. Bettinson, The influence of constraint on the creep crack growth of 316H stainless steel, Ph.D Thesis, Imperial College London. 2001,
5. HKS Inc., ABAQUS Standard User's Manual, Version 6.4, 2004,
6. H.Y. Lee, K. Nikbin : Modelling the Redistribution of Residual Stresses at Elevated Temperature in Components, J. ASTM Int., Vol. 3 No. 1, pp. 1-15, 2006