특 집 : 용접산업의 시뮬레이션기법 활용

외력이 작용하는 용접구조물에 용접잔류응력이 미치는 영향

방희선 · 박창수 · 노찬승 · 오종인 · 방한서

Influence of Welding Residual Stress on the Externally Loaded Welded Structure

Hee-Seon Bang, Chang-Soo Park, Chan-Seung Ro, Chong-In Oh and Han-Sur Bang

1. 서 론

자동차, 조선, 항공, 철도, 토목, 건축, 기계 등 용접구조물에 대한 신뢰성 확보 및 최적설계 구현을 위하여 수치해석 및 실험을 통한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 현재 용접 구조물에 대한 외력 해석에 있어서 용접으로 인하여 필연적으로 수반되는 제반현상, 즉 용접잔류응력에 대한 효과를 고려하지 않거나 또는 용접잔류응력 값을 이상화하여 구조물에 적용하고 외력해석을 실시하고 있는 실정으로, 용접구조물의 안전성에 직접적으로 영향을 미치는 인자인 용접잔류응력을 고려하여 해석한 사례는 거의 찾아 볼 수 없다.

따라서, 본 보고에서는 용접구조물의 실제 제반현상을 고려한 최적용접 설계 및 용접강도해석을 위하여 먼저 수치해석에 의한 용접부의 열 및 역학적 특성을 파악하고, 아울러 용접구조물의 신뢰성을 향상시키기 위하여 용접잔류응력 해석결과를 상용 프로그램에 적용하여 실용접구조물에 대한 외력 구조해석시 용접 시공시에 발생하는 초기결함, 즉 용접잔류응력이 용접구조물 강도에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 외력에 의한 용접잔류응력 평가

용접잔류응력을 고려한 외력해석을 수행하기 위해 먼저 해석모델의 작성과 이에 따른 요소형상 관련 데이터의 작성은 MSC사의 PATRAN을 이용하여 작성하고, 여기에서 작성된 모델 데이터 값은 개발된 열전도 및 열탄소성 프로그램 해석에 사용하였다. 그리고 열해석과 열탄소성 해석후에 얻은 용접잔류응력 해석결과 값들은 상용프로그램 ANSYS에 초기응력(initial stress)으로 적용되고 상용프로그램 ANSYS에서 추가적인 외력에 대한 구조해석을 수행하였다. 따라서 용접잔류응력 성분이 초기응력으로 작용하고 외력(인장력, 압축력, 굽힘력)이 작용 시 용접구조물의 잔류응력의 재분포 특성을 확인할 수 있었다.

상기의 이러한 자체개발한 프로그램의 데이터 작성 및 원활한 상용의 전후처리기와 데이터 호환 작업개요의 흐름을 Fig. 1에 나타내었다.

먼저 MSC.PATRAN에서 작성된 모델을 개발된 열전도 및 열탄소성 프로그램에 적용하기 위하여 PATRAN과 개발된 프로그램사이에 인터페이스가 될 수 있도록 PATRAN Command Language(PCL)을 사용하여 3가지 PCL 프로그램을 작성 하였다.

첫 번째 WELD.pcl은 Nodal coordinate와 Element connectivity를 PATRAN에서 개발된 열전도 및 열탄소성 프로그램에 전송되고 두 번째 BC.pcl은 Surface

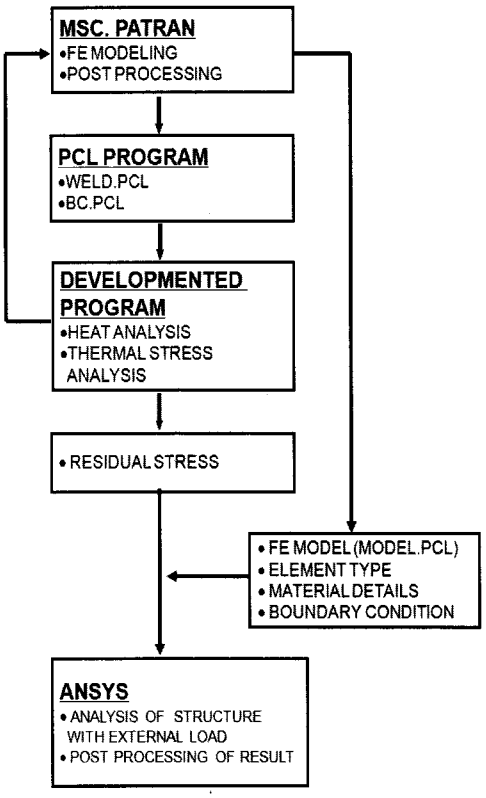


Fig. 1 Schematic diagram for externally loaded welded structure analysis

element를 보내는데 사용된다. 마지막으로 MODEL.pcl은 외력을 포함하여 상용프로그램 ANSYS에 결과값을 Export 하는데 사용된다.

또한 상용프로그램 ANSYS에 해석모델은 PATRAN으로부터 전송된 해석모델 파일을 사용하고, ANSYS에 열탄소성 프로그램 해석에서 얻어진 용접잔류응력을 초기 응력(initial stress), 즉 Input 파일(Istress.ist)로 입력하여 ISTRESS Commond을 사용하는 요소평균값으로서 ANSYS의 요소에 적용하였다.

3. 용접잔류응력 해석

3.1 열분포 해석

외력 해석을 하기 위해 앞서 먼저 용접열원의 효과를 고려한 비정상 열전도 및 열탄소성 이론을 도입하고, 이들을 유한요소식으로 정식화 한 후 아이소-파라메트릭 요소를 이용하여 수치해석용 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 그리고 이를 이용하여 용접시험편에 대한 수치시뮬레이션을 수행하였다. 해석에 사용된 모델은 폭 400(mm), 길이 400(mm), 두께 15(mm)를 사용하였으며, 용접 Pass 수는 5pass이고 용접조건은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 2는 해석 시험편 전 영역에 걸쳐 입열 후 냉각 시간별 온도 분포도이다. 이 온도 분포를 살펴보면 최고 온도는 2초에서 나타나고 있으며, 용접부를 중심으로 대칭을 이루면서 냉각되는 모습을 보여 주고 있다.

Fig. 3은 해석 시험편의 온도이력으로, 용접선에 근접한 부분은 온도의 변화가 급격하게 나타나고 용접선에서 멀어질수록 온도변화가 완만해짐을 알 수 있다. 또한 온도 구배는 시간의 경과와 함께 점차 감소하여 온도구배가 완만하게 나타남을 보이고 있다.

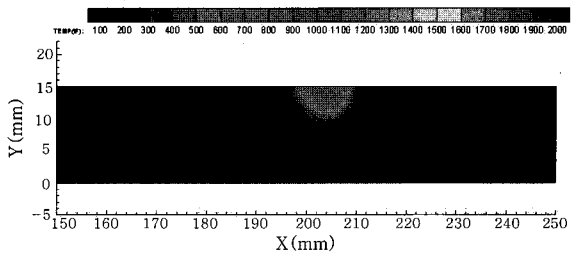
3.2 열탄소성 해석

용접열원의 크기 및 분포를 열하중으로 간주하여 용접체에 발생하는 역학적 메커니즘을 해석 하였다.

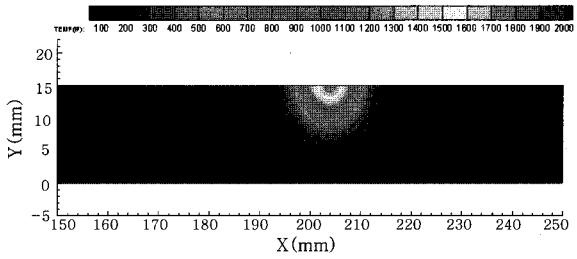
Fig. 4는 열탄소성 해석에 의하여 얻어진 전 영역의 두께 방향에 대해 용접잔류응력 σ_z를 나타내었다. 잔류응력의 특징을 살펴보면, 용접금속에 발생된 잔류응력

Table 1 Welding condition of specimen

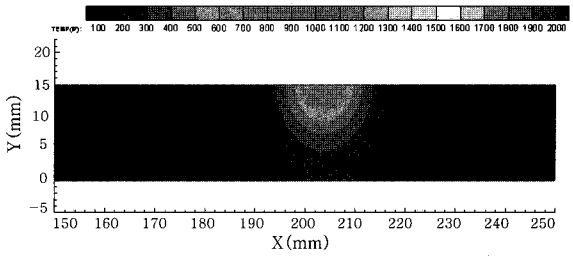
Material	Welding process	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)
SS400	MIG	AC 120	24	25



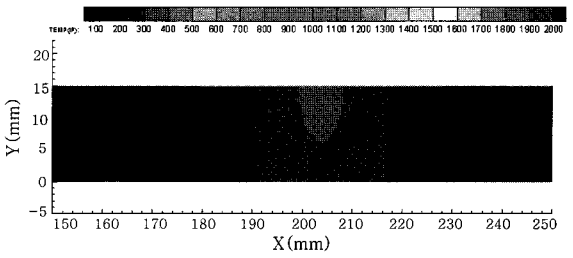
a) Transient temperature distribution after 1 sec.



b) Transient temperature distribution after 2 sec.



c) Transient temperature distribution after 4.22 sec.



d) Transient temperature distribution after 10.35 sec.

Fig. 2 Temperature fields in the xy plane

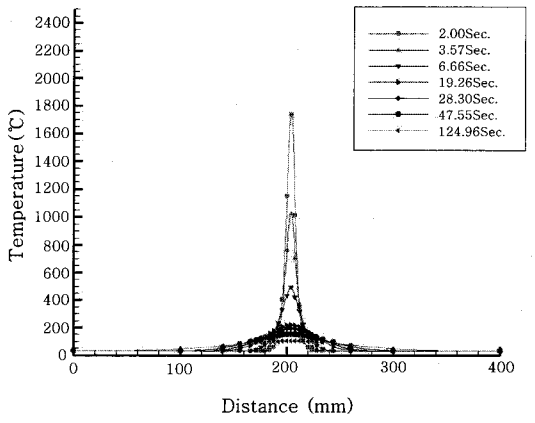


Fig. 3 Temperature history(W.M.,H.A.Z.,B.M.)

은 용접후 용접금속이 온도 냉각과정임에도 불구하고 역학적 강성회복 온도(700℃)이하로 냉각되어지면 자체의 강성을 회복함과 더불어 용접금속의 수축을 온도가 낮은 모재가 구속하기 때문에 용접금속에 응력이 발생되어진다. 따라서 Fig. 4에 도시한바와 같이 용접금속 및 열영향부에서 인장을 나타내고 열영향부에서 최대가 되며 열영향부에 인접하는 모재에서 압축으로 변화한다.

또한 용접부의 잔류응력값의 크기를 각 성분별로 살펴보면, Fig. 5에서 도시한바와 같이 각 성분별 서로 다른 역학적구속의 영향으로 잔류응력이 $\sigma_z \rangle \sigma_x \rangle \sigma_y$순으로 나타남을 확인 할 수 있다.

4. 외력에 의한 용접잔류응력 거동

용접 구조물의 외력 작용시 용접구조물의 안정성을 평가하기 위해, 앞에서 해석한 용접잔류응력을 상용 프로그램 ANSYS에 초기응력으로 적용하고 외력(인장력, 압축력, 굽힘력)을 주어 용접구조물의 잔류응력의 재분포 특성을 고찰하였다.

Fig. 6 ~ Fig. 8은 용접부에 외력 작용시 외력의 변화에 따라 응력의 변화를 도시한 것으로, Fig. 6은 인장력, Fig. 7은 굽힘력, Fig. 8은 압축력을 각각 적용한 그림이다. 그림에서 도시한바와 같이 외력이 변화

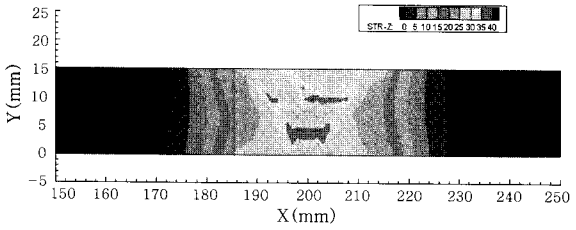


Fig. 4 Distribution of welding residual stress(σ_z) in the xy plane of the welded joint

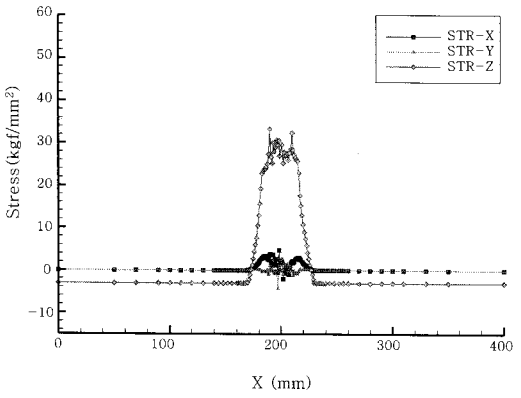
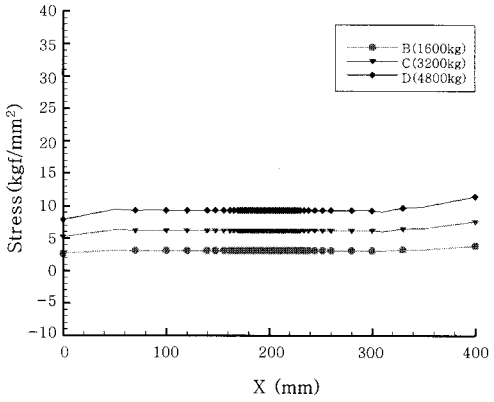
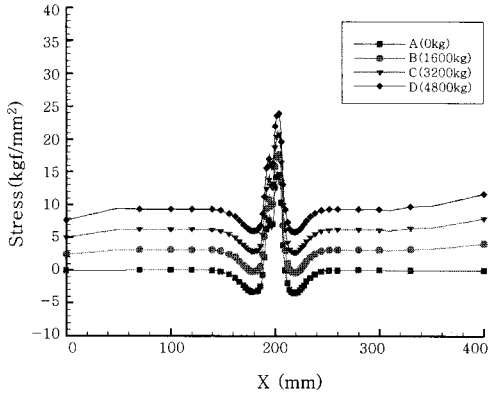


Fig. 5 Distribution of welding residual stress in the welded joint

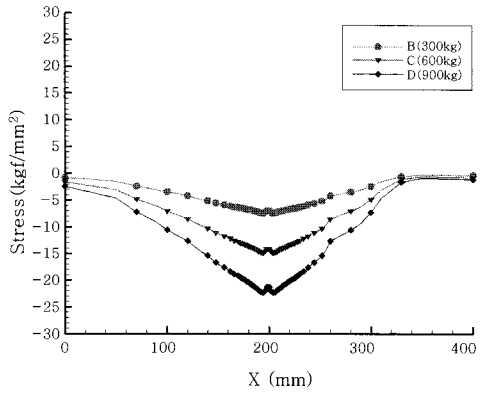


a) Stress distribution without welding residual stress

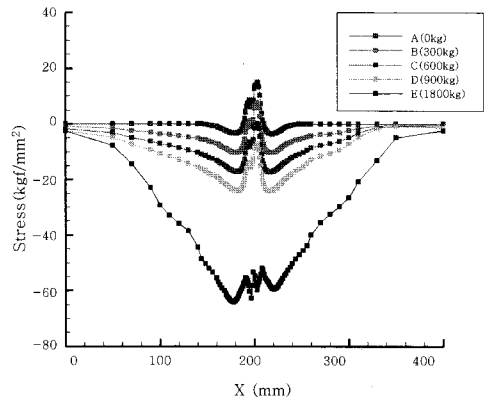


b) Stress distribution with welding residual stress

Fig. 6 Stress distribution with tensile load

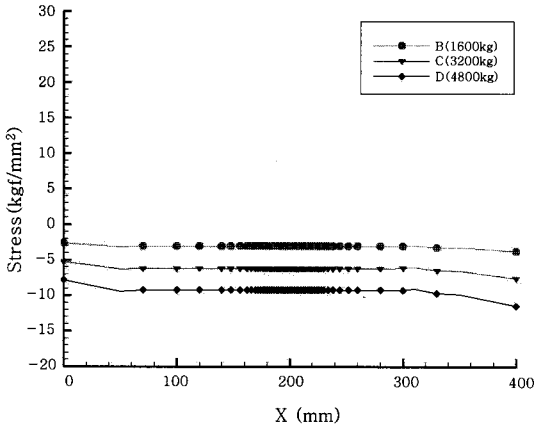


a) Stress distribution without welding residual stress

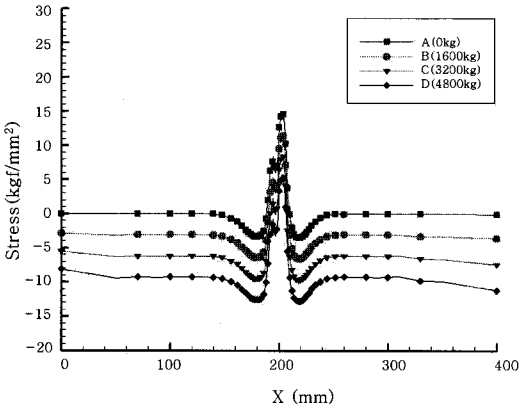


b) Stress distribution with welding residual stress

Fig. 7 Stress distribution with bending load



a) Stress distribution without welding residual stress



b) Stress distribution with welding residual stress

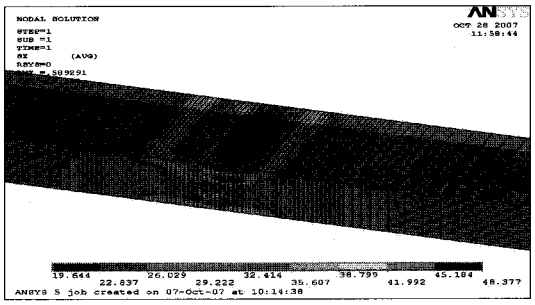
Fig. 8 Stress distribution with compression load

하면서 용접구조물의 용접잔류응력이 외력의 영향을 받아 응력이 변화함을 알 수 있다.

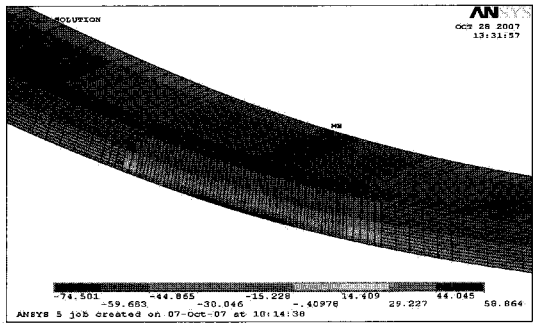
Fig. 6과 Fig. 8의 인장력 및 압축력 작용 시 외력이 1600kg씩 증가할 때마다 응력은 잔류응력의 20% 씩 증가하여 잔류응력이 재 분포하는 것을 알 수 있다. 그리고 잔류응력을 고려하지 않은 해석과 비교를 해보면 특히 용접부 영역에서 잔류응력의 차이가 확실히 나타나고 있다.

특히 Fig. 7의 굽힘력 작용의 경우 외력이 300kg씩 증가 할 때마다 용접부의 응력은 잔류응력의 56% 씩 증가하여 잔류응력이 재 분포하는 것을 볼 수 있었고, 하중을 급격하게 증가 시키면 용접부에서 잔류응력의 영향은 거의 사라지는 것을 볼 수 있었다.

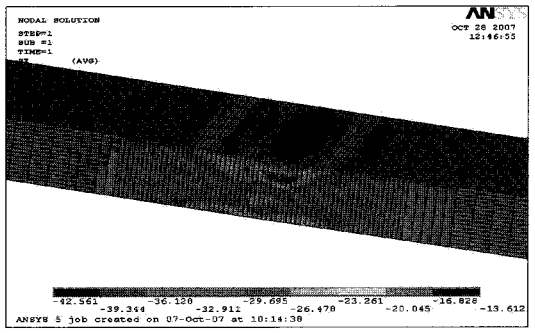
Fig. 9는 용접잔류응력이 상용프로그램 ANSYS에 초기응력(initial stress)으로 적용되고 상용프로그램 ANSYS에서 추가적인 외력(인장력, 압축력, 굽힘력)에 대한 구조해석을 수행한 결과로, 용접구조물의 잔류응력의 재분포 특성을 확인할 수 있었다.



a) Stress distribution under tensile load



b) Stress distribution under bending load



c) Stress distribution under compression load

Fig. 9 Stress distribution for externally loaded welded structure

5. 결 론

본 보고에서는 용접구조물에 대한 신뢰성 확보 및 최적설계 구현 방법에 대해 간략히 소개하고자 하였다. 구조물 조립시 용접 시공시에 발생하는 초기결함, 즉 용접잔류응력은 용접구조물의 안정성에 직접적으로 영향을 미치는 인자중의 하나이다. 그런데 이러한 용접잔류응력을 고려한 구조물 외력 구조해석에 대한 연구가 거의 이루어지고 있지 못한 실정이어서, 본 기술보고에서 보고하였듯이 용접잔류응력을 고려한 용접구조물의 외력 구조해석을 수행하기 위해, 먼저 유한요소 해석에 의한 용접 시 발생되는 열 이동현상과 이에 따른 응력의 발생 메카니즘을 고찰하였다. 아울러 상용프로그램에 용접잔류응력을 적용하여 외력 작용 시 용접구조물의 역학적 특성을 살펴보았다.

따라서 이러한 용접구조물에 대한 신뢰성 확보에 대한 산업 현장의 요구와 그 중요성이 더욱 증대됨에 따라, 향후 이에 대한 활발한 연구가 전개되고 아울러 용접구조물에 대한 최적설계 구현 방법에 보다 현실적 결과를 제공할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. H.S. Bang. "Study on the mechanical behaviour of welded part in thick plate by three-dimensional thermal elasto-plastic analysis based on finite Element Method." Journal of the Korean Welding Society, **10-4**(1992), 37-43
2. H.S. Bang, H.S. Bang, S.M. Joo, "Numerical simulation of Al-SPCC weldment", Key Engineering Materials, (2006), 1738-1744
3. Rajesh S.R, H.S. Bang, S.M. Joo, I.S. Kim, "Study on the effect of residual stress on the externally loaded welded structure", Korean Welding Society, **43-12**(2004), 58-60
4. H. Hiraga, K. Fukatsu, K. Ogawa, M. Nakayama, Y. Mutoh, "Nd-YAG laser welding of pure titanium to stainless steel", Transaction of the Japan Welding Society, **19-4**(2001), 717-726

• 방희선(房熙善)
• 1971년생
• 조선대학교 선박해양공학과
• 구조 및 용접
• e-mail: banghs@chosun.ac.kr

• 박창수(朴昌洙)
• 1973년생
• 로이드 선급 아시아
• 구조 및 용접
• e-mail: chang-soo.park@lr.org

• 노찬승(盧贊承)
• 1966년생
• 조선대학교 접합가공기술연구소
• 구조 및 용접
• e-mail: cs715@hanmail.net

• 오종인(吳鍾仁)
• 1974년생
• 조선대학교 선박해양공학과
• 구조 및 용접
• e-mail: chong1015@hotmailcom

• 방한서(房漢瑞)
• 1951년생
• 조선대학교 선박해양공학과
• 구조 및 용접
• e-mail: hsbang@chosun.ac.kr