

유한요소법을 이용한 하이브리드 용접부의 열 및 용접잔류응력 해석

방희선 · 오종인 · 노찬승 · 박창수 · 방한서

Analysis of Thermal and Welding Residual Stress for Hybrid Welded Joint by Finite Element Method

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

1. 서 론

최근 산업화의 급속한 발달로 각종 화학플랜트, 원자로, 선박, 항공, 자동차 및 산업기기 등의 구조부재를 결합하는 가공공정에서 용접은 가장 일반적이며 범용적으로 사용되고 있는 접합방법이다.

이러한 구조물들의 용접시 용접열원에 의하여 발생된 열에 의하여 용접부의 온도변화를 일으키게 되고 이렇게 발생하는 용접 열은 열영향부의 조직변화로 인한 인성의 저하, 부분적인 열처리 효과에 의한 강도의 저하 등의 문제점들이 발생하게 된다. 또한, 이와 같이 용접을 할 경우 국부적으로 집중적인 열이 가해짐에 따라 부재는 급속한 열팽창 및 수축으로 인하여 구조물에 열변형이 발생하게 되는데 이러한 부재의 자유로운 열변형이 주위의 구속력에 의해 구속되어 열응력이 생성되며 용접 종료 후에는 용접 열이 불균일하게 분포함에 따라 부재 각 부분에 걸쳐서 팽창, 수축정도가 달라서 발생하는 즉, 내적구속에 의해 용접잔류응력 및 변형이 필연적으로 발생하게 된다. 이와 같은 용접잔류응력은 용착금속이나 모재의 균열 등의 저온균열의 원인이 됨과 동시에 취성과파괴, 부식파손 및 좌굴 등을 유발하는 원인이 되어 구조물의 안전성을 현격하게 손상시키고 구조물의 강도에도 악영향을 미친다. 따라서 용접수행 전에 용접부에 발생하는 열적 거동 및 용접잔류응력을 정도 높게 예측할 필요가 있다.

지금까지 용접구조물의 잔류응력을 예측하기 위하여 많은 실험적 연구가 보고되고 있지만, 실험에서 계측되어지는 변형도 중에는 응력에 무관한 자유 팽창변형과 응력 발생의 원인이 되는 기계적 변형도가 포함되어 있으므로 각기 분리할 필요가 있으며 용접에서처럼 높은 온도로 가열된 경우에는 자유팽창 변형도가 기계적 변형도보다 크게 될 경우가 있으므로 신뢰할 수 있는 답을 얻기는 힘들다. 따라서 이러한 복잡한 형상의 용

접구조물의 열적 거동 및 용접잔류응력 분포를 예측하여 구조물의 신뢰성 및 안정성을 확보하기 위한 방법으로 유한요소법을 이용한 수치해석법을 많이 이용한다. 특히 최근에는 컴퓨터의 발달에 의하여 용접중의 온도변화나 열응력, 잔류응력 등의 계산에 대한 NASTRAN 및 ANSYS 등의 상용 프로그램 등의 개발이 이루어지고 있으며 현재 이동열원의 효과 및 재료의 온도 의존성을 고려한 열전도, 용접잔류응력 등의 수치해석 방법은 일본을 비롯하여 미국, 러시아, 영국, 스웨덴, 캐나다 등 선진국의 다수 학자들에 의해 활발한 연구와 좋은 논문이 발표되고 있으나 아직까지 우리나라에서는 그 연구가 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 용접 열전도 및 잔류응력을 해석하기 위한 열 및 열탄소성 이론을 정립하고 그 이론을 바탕으로 본 연구실에서 개발한 2차원 열전도 및 열탄소성 해석 프로그램에 대하여 간략히 설명하고 해석의 예로서 개발된 프로그램을 이용하여 레이저의 장점과 아크의 장점을 접목시켜 좋은 용접부와 용접속도를 얻음으로써 전 세계적으로 주목받고 있는 하이브리드 용접부에 대한 열전도 및 용접 잔류응력 해석 결과를 보여주고자 하였다.

2. 유한요소법에 의한 해석 이론

2.1 유한요소법에 의한 열 해석 이론

용접열원 분포의 명확한 해석을 위하여 열원의 이동 효과를 고려하였으며, 해석의 정도를 높이기 위해 자연 좌표계를 이용하여 요소좌표와 변위를 동일한 보간 함수로 하여 절점 및 요소에서 뿐만 아니라 임의의 적분점에서도 필요한 값을 알 수 있는 4절점 아이소-파라메트릭 요소를 도입하였다. 또한 용접의 경우 시간에 따라 온도가 변화하므로 Fig. 1에서 나타낸 그림과 같

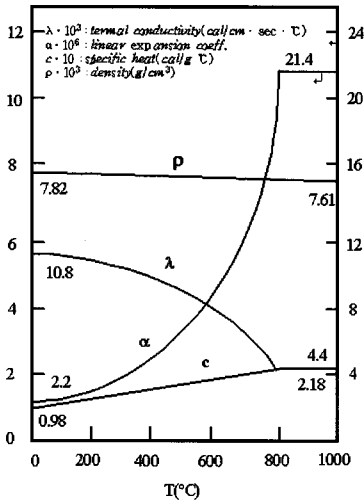


Fig. 1 Physical properties of mild steel

이 재료의 물리 정수(비열, 밀도 및 열전도도 등)가 변화하게 되므로 이를 고려하여 열분포 해석용 프로그램을 개발하였다.

2.1.1 2차원 비정상 열전도 방정식의 유한요소 정식화 온도의 시간 및 공간의 분포는 식 (1)과 같이 2차원 비정상 열전도 지배방정식을 만족하며 경계조건으로서는 해석대상인 모델 내부로의 열전도와 대기 중으로의 열전달이 있는 것으로 하였으며, 고체에서의 열전도 문제를 갈라킨법을 이용하여 식 (2)와 같이 유한요소 정식화를 하였다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q} \quad (1)$$

$$[K]\phi + [C] \frac{\partial \phi}{\partial t} = F \quad (2)$$

여기서, [K]: 열전도 matrix, [C]: 열용량 matrix {F}: 절점에서의 열유속 벡터

2.1.2 개발된 열전도 해석 프로그램 구성

용접 열원은 열원이 이동하는 이동열원이나 용접재의 시단부 및 종단부의 10mm~20mm 구간을 제외하고는 용접시 동일한 온도이력(온도상승 및 냉각)을 경험하는 준 정상역 이므로 이동열원과 순간열원을 동시에 수행할 수 있는 2차원 열분포 해석용 프로그램을 구성하였다. 재료의 등방성을 고려하였고 비열 열전달계수 열전도 및 밀도 등은 재료의 온도변화에 따라 그 값이 변화하므로 이들의 온도의존성을 적용하였다. 또한 용접시험체의 표면에 있어서는 외부로 열전달이 발생하므로 이를 고려하였으며 열복사등도 고려하였다. 또한 용

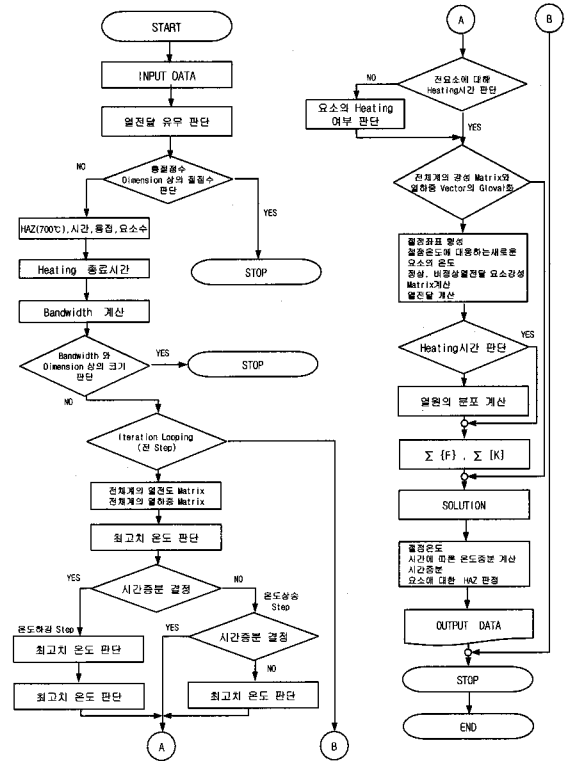


Fig. 2 Flow-chart of heat conduction analysis

작금속부 및 열영향부에서는 동일한 열 유속을 갖도록 하였으며 요소의 온도가 700°C가 넘을 경우 유동적으로 HAZ(열영향부)요소로 판별하도록 구성하였다.

2.2 유한요소법에 의한 열탄소성 해석 이론

용접잔류응력 해석을 위하여 재료의 등방성(Isotropic)을 고려하여 탄성 및 소성 전영역에 걸쳐 Fig. 3에 나타난 그림과 같이 재료정수의 온도 의존성을 고려하였

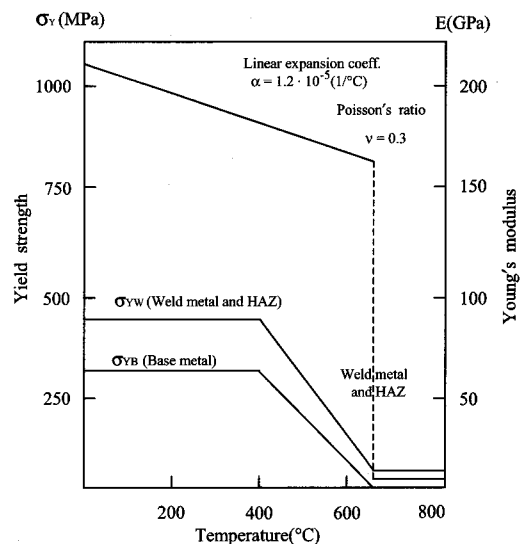


Fig. 3 Material properties of mild steel

으며, 변형을 및 응력의 관계를 소성유동(Plastic flow) 이론에 입각하여 증분으로 나타내었다.

2.2.1 열탄소성 이론의 유한요소 정식화

열탄소성 해석을 위해서는 소성역에서는 선형 등방경화 법칙을 고려한 Von-mises의 항복조건을 항복함수로 사용하였다. 즉, 소성유동 동안에 초기 항복곡면은 일정하게 팽창한다고 가정하여 식 (3)에 보인 것과 같이 전변형률(ϵ)에 탄성변형률(ϵ^e)과 소성변형률(ϵ^p) 그리고 열응력에 의한 변형률(ϵ^t)이 포함되도록 하였다.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^t \quad (3)$$

2.2.2 개발된 열탄소성 해석 프로그램 구성

프로그램은 용접체의 중앙단면(준정상역)은 외부로 구속되어 있는 평면변형 문제이므로, 이를 고려하여 3차원적 2차원 프로그램으로 구성하였다. 즉 준정상역의 단면은 평면을 일정하게 유지하면서 각 변형을 일으키므로 평면응력, 평면변형률의 문제에서 각기 σ_x, ϵ_x 를 도출하여 y, z의 함수로써 x값(용접선 길이방향)을 도출 가능하도록 구성하였다.

해석모델 형상의 전 절점에 대해 요소좌표를 자동적으로 정의하여 형상함수 및 야코비안 매트릭스를 구성하고 열 분포 이력을 열 하중으로 하므로 용접이 수행되는 과정의 온도상승 및 냉각에서의 온도이력을 입력

하여 온도를 하중으로 치환하고, 요소의 강성 매트릭스를 구성한다. 또한 재료의 항복응력, 소성경화계수, 열팽창을 등을 온도의 변화에 따라 계산하고, 요소의 강성 Matrix를 중첩하고 평형방정식을 계산하여 응력, 소성변형률 등을 계산하며 재료의 탄성, 소성여부를 폰미세스 항복함수를 토대로 판단하여, 온도, 변위, 응력, 소성변형률 및 상당응력 등을 출력하게 된다.

3. 하이브리드 용접부의 유한요소 해석

3.1 해석 모델 및 조건

사용된 강재 및 해석모델은 조선용 강재 A-grade (일반 연강) 200mm×400mm×15mm 시험편으로 하이브리드 용접을 이용하여 시험편을 제작하였으며 그 그림과 단면 사진을 Fig. 5에 나타내었다.

해석시 용접열원을 순간열원으로 가정하였으며 4절점 Isoparametric 요소를 사용하여 수치 해석하였고 이때 사용된 용접조건은 실제 시험편을 제작하기 위해 사용되었던 조건을 고려하였으며 이는 Table 1에 나타낸 것과 같다. 또한 용융지의 유동, 킥내부의 증발현상, 잠열 및 금속상변태는 고려하지 않았으며 재료의 실제 온도 의존성 물리정수 및 기계적 물성치를 Fig. 1과 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 고려하였다. 또한, 모델의 열 및 열탄소성 해석을 위하여 자체 개발한 유한요소

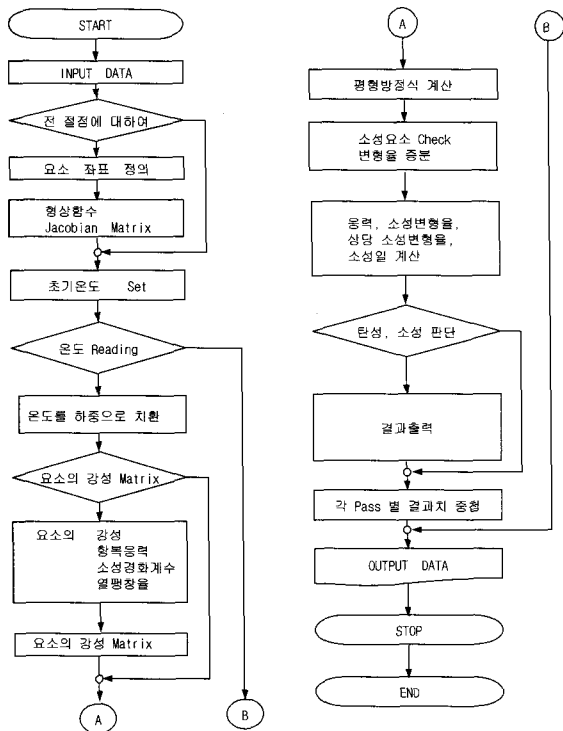
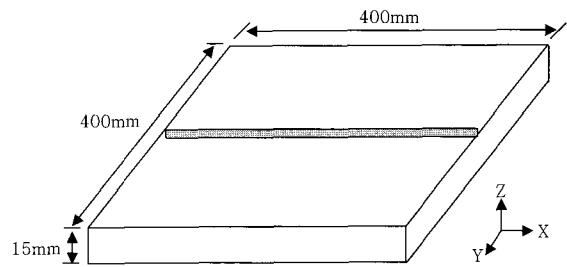
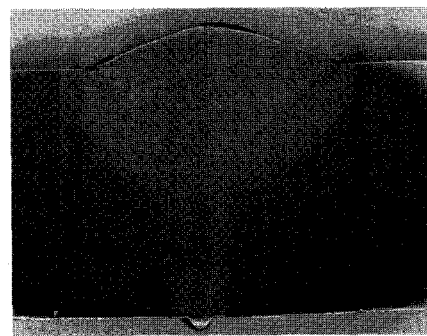


Fig. 4 Flow-chart of thermal elasto-plastic analysis



(a) Dimension of hybrid welded specimen



(b) Cross section of hybrid welded specimen

Fig. 5 Configuration of hybrid welded specimen and coordinate

Table 1 Hybrid welding condition

CO ₂ laser welding	Power	12 kW
GMAW	Voltage	29 V
	Current	300 A
	CTWD	20 mm
Wire feeding speed		9.9 m/min
Welding speed		1.5 m/min
Interspacing		4 mm
Gap		0 mm
Shielding gas		He50%, Ar38%, CO ₂ 12%
Material		Mild steel(A-Grade)
Joint type		Butt

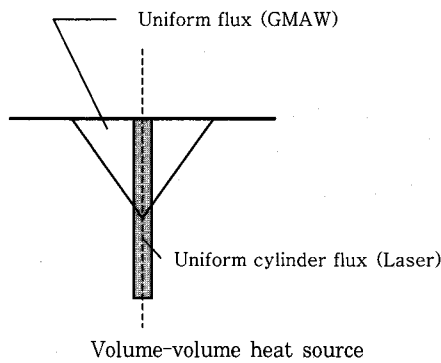


Fig. 6 Schematic diagram of heat source

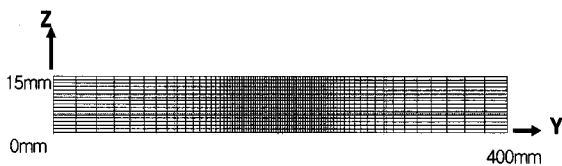


Fig. 7 FE model for numerical analysis

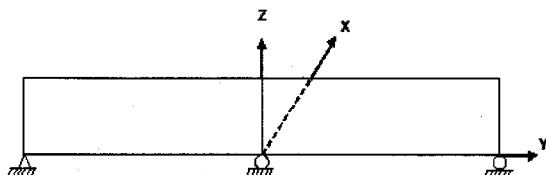


Fig. 8 Boundary condition for thermal elasto-plastic analysis

프로그램을 사용하였고 기존 열 해석을 통해 가장 좋은 결과를 보여준 분리형(Split type) Volume-volume heat source를 용접열원 모델로 선정하였으며 Fig. 6와 같다.

용접열원모델에 대한 입열량을 계산하기 위해 다음의

식 (4)와 식 (5)를 사용하였으며, 각 용접법에 따른 용접효율은 CO₂ laser welding의 경우 35%, GMAW의 경우 80%로 하였다.

○ CO₂ laser welding(Uniform cylinder flux)

$$Q = \eta_L \frac{P}{W_s} \tag{4}$$

여기서, Q: 용접입열(KJ/cm), η_L : 레이저 용접효율
P: 레이저 출력(kW), W_s : 용접속도(cm/sec)

○ GMAW(Uniform flux)

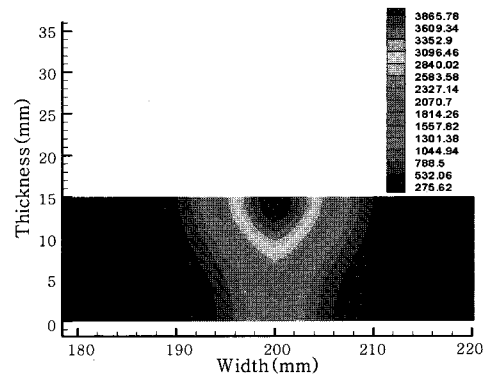
$$Q = \eta_A \frac{V \cdot I}{W_s} \tag{5}$$

여기서, η_A : 아크용접효율, V: 용접전압(V)
I: 용접전류(A)

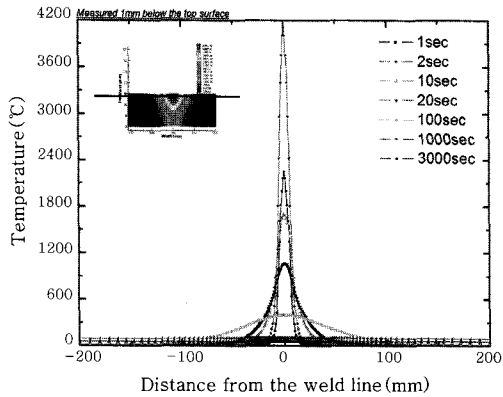
해석을 위한 유한요소 모델은 Fig. 7에 나타난 것과 같고 전체 모델(총 요소수 2,070개, 총 절점수 2,224개, 최소 요소크기 0.2mm×0.5mm)를 이용하였으며, 열탄소성 해석을 위한 경계조건은 Fig. 8과 같다.

3.2 용접 열분포 해석 결과

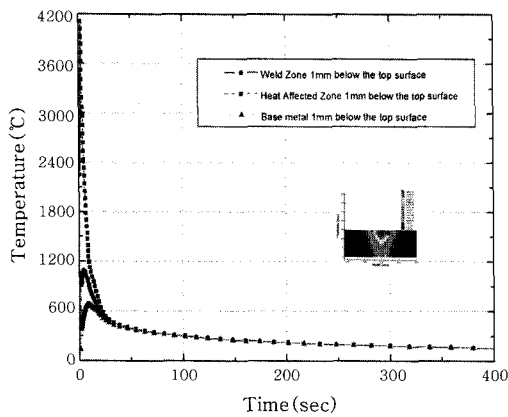
유한요소법을 이용하여 개발된 2차원 비정상 열전도 해석 프로그램을 통해 하이브리드 용접부에 대한 해석을 수행한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 결과를 살펴보면 Fig. 9 (a)에서 용접열원을 중심으로 폭 방향으로 선 열원 형태를 유지하며 열전달이 되는 것을 볼 수 있는데 이는 레이저 용접의 영향을 받는 하이브리드 용접의 열원 특성을 잘 보여주고 있는 결과라 할 수 있겠다. 또한 Fig. 9 (b)의 시간에 따른 온도분포를 살펴보면 최고 온도분포는 용접 시작 후 2초일 때 나타났으며



(a) Temperature fields in the yz plane



(b) Temperature variation with time



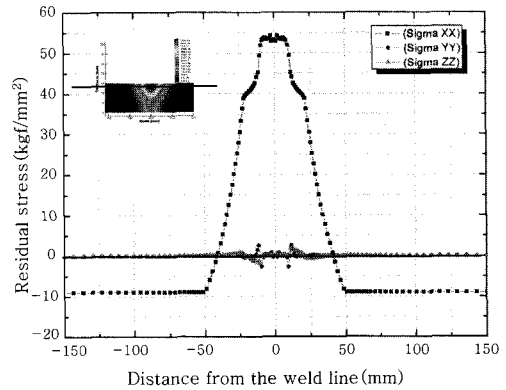
(c) Thermal history(W.M., H.A.Z., B.M.)

Fig. 9 Result of heat conduction analysis

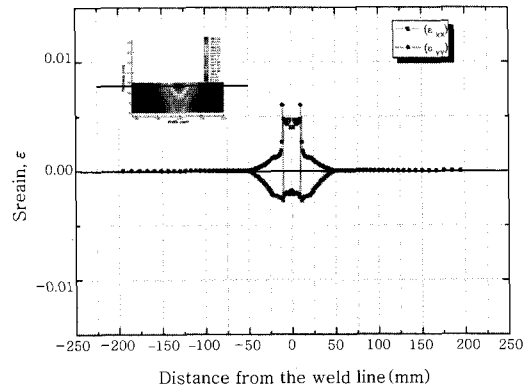
고온의 영향을 받는 용착금속부와 열영향부의 영역과 크기를 예측할 수 있었다. Fig. 9 (c)의 열 이력 곡선을 볼 때 그 냉각 속도가 매우 빠르게 진행되어 냉각 구배가 큰 현상을 볼 수 있었는데 이는 용접잔류응력의 생성과 경도 분포 및 생성될 조직 등을 예측할 수 있다.

3.3 용접잔류응력 해석 결과

해석된 열적 거동의 해석 결과를 이용하여 개발된 2차원 비정상 열탄소성 유한요소 해석 프로그램을 통해 용접잔류응력 및 소성변형률에 대하여 해석한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 용접부의 잔류응력값의 크기를 각 성분별로 살펴보면, $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타나고 있으며 용접선 길이 방향 σ_x 에서 가장 큰 인장과 압축값을 볼 수 있고 σ_y, σ_z 방향에서는 작은 응력 분포를 볼 수 있다. 또한 용접부의 소성 변형률 분포는 역학적으로 구속이 가장 큰 X방향(용접선 방향)에 인장의 소성변형이 발생되며 소성변형이 비압축성 즉, 체적불변의 조건을 만족하여 역학적 구속이 약한 y, z방



(a) Distribution of welding residual stress (Z=14mm)



(b) Distribution of plastic strain (Z=14mm)

Fig. 10 Result of thermal elasto-plastic analysis

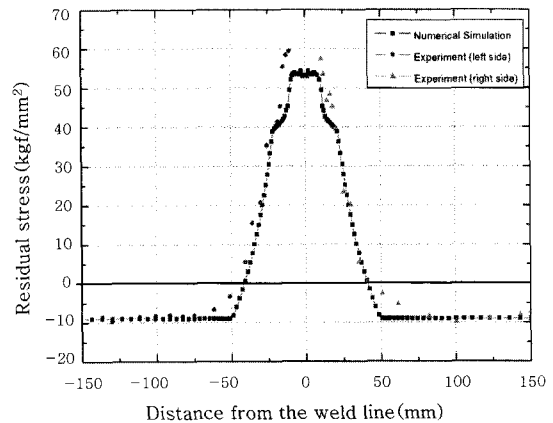


Fig. 11 Comparison of welding residual stress

향에서 압축의 소성변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 분포 양상은 열영향부와 모재 사이에서 인장과 압축 성분이 급격히 교차함을 보이고 있다.

Fig. 11에 잔류응력 측정 실험값과 유한 요소 해석 결과를 나타내었는데 그 값이 정성적 및 정량적으로 거의 유사한 형태를 보임으로써 수치해석 결과의 재현성에 좋은 결과라 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 용접구조물의 열적 거동 및 용접잔류 응력 분포를 예측하여 구조물의 신뢰성 및 안정성을 확보하기 위한 방법으로 유한요소법을 이용한 수치해석 방법에 대하여 알아보았다. 또한 2차원 비정상 열전도 및 열탄소성 문제를 아이소파라메트릭 유한요소법을 이용하여 수치해석이 가능하도록 프로그램을 개발하였으며, 그 개발된 프로그램을 이용하여 하이브리드 용접부에 대한 시험체를 해석하여 해석결과와 실험치를 비교하여 그 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

1. 대한용접학회편 : 용접·접합편람, 대한용접학회, 1998, 365-399
2. 방한서, 김유철 : 유한요소법에 의한 후판용접시의 3차원 비정상열전도 해석, 대한용접학회지, 제9권 2호, 1991, 37-43

3. 방한서 : 후판 용접부의 역학적 특성-유한요소법에 의한 3차원 열탄소성 해석-, 대한용접학회지 제10권 4호, 1992, 250-258
4. 방한서, 김종명 : 후판 강구조물 용접이음부의 열분포 특성에 관한 연구, 대한용접학회지 제13권 1호, 1995, 138-144
5. 방한서, 김영표 : 유한요소해석을 위한 하이브리드 용접 입열 모델 선정에 관한 기초적 연구, 대한용접학회 추계학술대회, 2003, 36-38
6. 오종인, 김영표, 박호경, 방한서 : 선체구조용 A급 강재의 하이브리드 용접에 대한 열 및 역학적 특성에 관한 연구, 한국해양공학회 제21권 1호, 2007, 64-68
7. 오종인, 방한서, 김영표, 이진욱 : 수치해석을 이용한 하이브리드 용접부의 열분포 및 용접잔류응력 분포에 관한 연구, 대한용접학회 추계학술대회, 2004, 61-63
8. Kaplan, A.F.H., Jurgen Zimmerma, Dieter Schuocker and Walter Spruzina : Laser beam welding of aluminium alloys, International Conference Welding Technology, Materials and Materials Testing, Fracture Mechanics and Quality Management, Vienna University of Technology, 1997, 147-156



- 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



- 오종인(吳鍾仁)
- 1974년생
- 조선대학교 선박해양공학과
- 구조 및 용접
- e-mail: chong1015@hotmail.com



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



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