

유전적 알고리즘을 이용한 용접변형 해석에 관한 연구

김일수^{*,†} · 김학형^{*} · 장한기^{**} · 김희진^{***} · 광성규^{**} · 유희수^{***} · 심지연^{****}

^{*}목포대학교 기계공학과

^{**}두산인프라코어 예측설계기술팀

^{***}한국생산기술연구원 금속소재신뢰성평가센터

^{****}한국생산기술연구원 친환경부품소재센터

A Study about Analysis of Weld Distortion using Genetic Algorithm

Ill-Soo Kim^{*,†}, Hak-Hyoung Kim^{*}, Han-Kee Jang^{**}, Hee-Jin Kim^{***},
Sung-Kyu Kwak^{**}, Hoi-Soo Ryoo^{***} and Ji-Yeon Shim^{****}

^{*}Department of Mechanical Engineering, Mokpo National University, Mokpo 534-729, Korea

^{**}Design Optimization Technology Team, Doosan Infracore, Changwon 641-791, Korea

^{***}Reliability Center for Metallic Materials, KITECH, Cheonan 330-825, Korea

^{****}Environmentally Materials & Components Center, KITECH, Jeonju 561-841, Korea

[†]Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received February 22, 2009 ; Revised March 5, 2009 ; Accepted July 20, 2009)

Abstract

In the process to manufacture for metallic structures, control of welding deformation is one of an important problems connected with reliability of the manufactured structures so that welding deformation should be measured and controlled with quickly and actively. Also, welding parameters which have as lot of effects on welding deformation such as arc voltage, welding current and welding speed can also be controlled. The objectives for this study were to develop a simple 2-D FEM to calculate not only the transient thermal histories but also the sizes of fusion and heat-affected zone (HAZ) in multi pass arc welds including the butt and fillet weld type with dissimilar thickness, and to concentrate on a developed model for the finding the parameters of Godak's moving heat source model based on a GA. The developed model includes a GA program using MATLAB and GA toolbox, and a batch mode thermal model using ANSYS software. Not only the thermal model was verified by comparison with Goldak's work but also the developed model was validated with molten zone section experimental data.

Key Words : Weld distortion, Genetic algorithm, Double-ellipse heat input model, Finite element method

1. 서 론

전 세계적으로 에너지자원 고갈에 대한 우려가 높아지고, 특히 중국 등 신흥 공업국의 급속한 산업화에 따른 에너지 선점경쟁으로 국제유가가 급속히 치솟고 있으며 이러한 고유가의 상황은 그대로 연료를 다소비하는 수요자에게 부담으로 작용하게 되는 현실에 직면하고 있다. 한편, 1990년대부터 기계구조물의 고강도강의

사용이 증가함에 따라 용접부의 피로파괴 평가시 잔류응력 및 변형 등의 초기 결함을 고려한 설계에 대한 요구가 점차 증가하고 있다 이러한 경향은 기계구조물의 신뢰성 및 효율 향상을 위한 사용·운전 조건의 가혹화 그리고 환경문제 등에 기인하여 점점 더 강화될 것으로 예상된다.

용접부에서는 용접 열에 의한 용융 및 응고과정에서 수축이 일어나기 때문에 용접 후 변형과 잔류응력이 발생한다. 용접부의 변형은 용접구조물의 치수 정밀도에

영향을 미칠 뿐만 아니라 제품의 가치를 저하시킨다.

따라서, 실제 용접구조물의 생산설계시 용접변형을 예측하여 설계에 반영하거나 변형을 제어함으로써 막대한 비용을 절감할 수 있으므로 용접변형의 예측에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔다⁵⁾. 용접변형의 예측과 관련된 연구는 상용패키지 또는 자체적으로 개발한 시뮬레이터를 이용하여 열탄소성해석을 수행하는 연구 및 용접종류에 따른 간이에측모델을 이용하고 각각의 변형형상에 등가하중 또는 등가변위를 작용시켜서 해석하는 연구로 구분될 수 있다 하지만, 용접은 복잡한 열탄소성 과정을 겪게 되므로 정확한 입열모델을 기반으로 한 이론 해석해를 구하기가 매우 어렵다 이러한 어려움 때문에 수치적 방법으로 유한요소해석을 통한 열탄소성 시뮬레이션이 다양한 방법으로 수행되고 있다

본 연구에서는 기존 굴삭기에 사용되어지는 부품용 소재인 SM490A강의 용접시 발생하는 용접변형을 예측하기 위하여 유전적알고리즘(GA, Genetic Algorithm) 기반의 입열모델을 개발하여 용접공정 중 용접조건에 따른 열전달 및 용접변형 해석을 통해 소재의 변형거동을 평가하였다.

2. 용접변형특성 분석을 위한 실험

시편은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 SM490A 재질의 400×500mm이고 판 두께는 16mm로 초기변형을 줄이기 위해 레이저 절단으로 가공하였으며 개선각은45°로 일정하게 유지하였다. 500A급 용접전원에 직경 1.2mm의 솔리드 와이어(solid wire)와 3축 로봇을 이용하였다. 맞대기이음(butt joint) 및 필릿이음(fillet joint) 2가지 종류의 용접변형 형상을 측정하기 위해 용접선 방향과 용접선에 수직인 방향으로 50mm 간격으로 격자를 그리고 가접한 다음 시편에 구속이 없는 상태에서 용접실험을

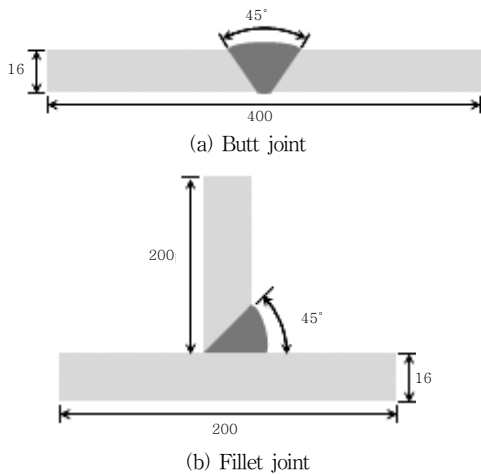


Fig. 1 Dimension of welding specimen for measuring welding deformation

수행하였다.

Tables 1-2는 용접실험에 사용된 모재의 기계적 성질 및 화학적 성분을 나타내며 Table 3은 용접실험에 사용된 용접조건을 나타낸다 맞대기이음의 경우 5패스, 필릿이음의 경우 2패스로 용접실험을 수행하였다

용접후 변형이 일어난 시험편은 정반에 올려놓은 다

Table 1 Mechanical properties of base metal

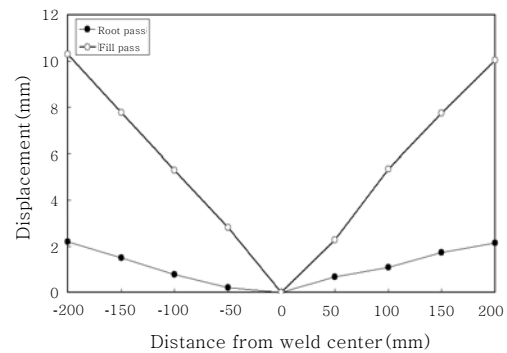
Material	Yield strength (MPa)	Tension strength (MPa)	Elongation (%)
SM490A	347	537	26.4

Table 2 Chemical composition of base metal

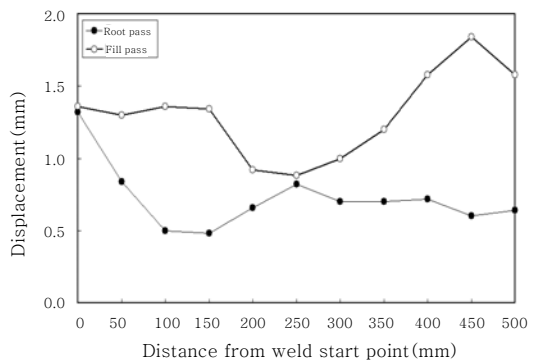
Material	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti
SM490A	0.17	0.4	1.5	0.015	0.008	0.3	0.01

Table 3 Welding conditions employed in experiment

Level	-1	1
Welding current(A)	320	380
Arc voltage(V)	32	40
Welding Speed (mm/min)	270	300

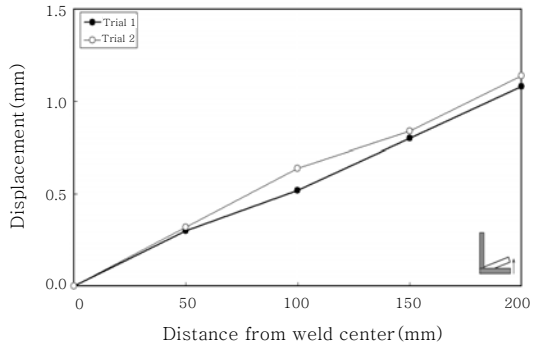


(a) Transverse deformation

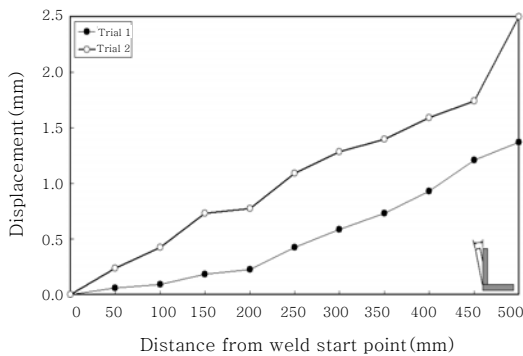


(b) Longitudinal deformation

Fig. 2 Deformation of butt joint(320A, 28V, 270mm/min)



(a) Transverse deformation



(b) Longitudinal deformation

Fig. 3 Deformation of fillet joint(380A, 36V, 300mm/min)

음 각 격자점에서의 변위를 높이게이지(height gauge) 및 디지털게이지를 사용하여 각변형량을 산출하였다

실험 후 변형량 계측을 통하여 용접조건 및 용접이음 변화에 따른 용접변형 특성분석을 수행하였다 Fig. 2는 맞대기이음에서의 용접선방향 및 용접선 직각방향의 변형량을 초층(root pass)과 완전용입(fill pass)으로 나누어 계측한 결과를 나타낸다 용접선을 기준으로 좌우 대칭적인 변형이 발생함을 확인할 수 있었고 용접시작점과 끝단부에서의 변형량이 매우 크고 중간영역에서의 변형량은 거의 변화하지 않음을 확인할 수 있었다 Fig. 3는 필릿이음에서 용접선 평행방향 및 직각방향의 변형량을 2회 반복 실험하여 계측한 결과로 맞대기이음의 경우와 마찬가지로 모재 윗면을 기준으로 변형이 대칭적으로 이루어진 것을 알 수 있었지만 2 pass로 용접 실험을 수행한 관계로 변형량은 5 pass로 용접된 맞대기이음보다 용접변형량의 변화가 미미함을 알 수 있었다. 결론적으로 용접 후 나타나는 변형은 용접대상물의 역학적 및 열적 구속과 관련 있음을 확인할 수 있었다

3. FEM을 이용한 용접변형 해석모델 개발

FEM을 이용하여 용접 잔류변형을 예측하기 위해서는 유한요소법을 이용하여 열전달해석 및 열탄소성 해

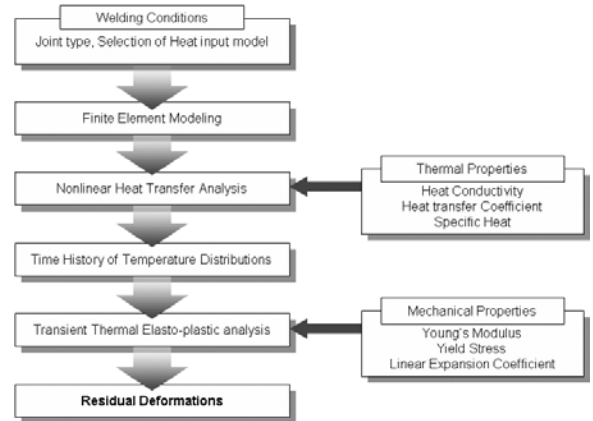


Fig. 4 Flow diagram of finite element analysis for welding deformation

석이 필수적이다 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 유한요소법을 이용하여 열전달 해석을 하기 위한 최적 아크입열모델 선정 및 열전달 해석을 통하여 용접을 시작할 시점에서 완전히 냉각이 끝나기까지의 각 시간에 따른 온도분포를 얻어낸 후 이 온도분포로부터 계산된 열영력을 이용하여 잔류변형 해석절차를 구현하였다

맞대기 및 필릿이음에서 용접변형을 예측하기 위하여 열전달 해석과 열탄소성 해석의 연성(coupling)을 통한 FEM 기법을 이용하여 시물레이션을 수행하였다 이를 위해 열전달방정식 및 열변형을 고려한 응력변형률의 지배방정식을 구성하였다

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = \rho C \dot{T} \tag{1}$$

$$\epsilon = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} + \epsilon_{th} \tag{2}$$

여기서, $T = T(x, y, z)$ 는 온도, k 는 열전도계수, ρ 는 밀도, C 는 비열, ϵ 는 전체변형률, ϵ_{el} 는 탄성변형률, ϵ_{pl} 는 소성변형률 그리고 ϵ_{th} 는 열변형률을 나타낸다

아크입열은 온도분포와 그에 따른 냉각속도 그리고 용융부와 열영향부의 크기에 직접적으로 영향을 주기 때문에 이를 모델링하는 작업은 매우 중요하다 따라서 본 연구에서는 Goldak 등⁽⁶⁾이 제안한 이중타원형(double-ellipse) 입열모델을 사용하였으며 입열모델에 관한 식은 아래와 같다

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c_f^2}\right)} \tag{3}$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c_r^2}\right)} \tag{4}$$

여기서, $Q = \eta VI$ 는 아크효율 η , 용접전류 I , 아크전압 V 로 이루어진 단위시간당의 용접 입열량을 의미하며, f_f 와 f_r 은 각각 입열모델의 중심에서부터 앞과 뒤의 입열강도를, a, b, c_f, c_r 은 타원형의 입열분포 형상 및 크기를 결정하는 형상계수를 나타낸다

입열모델의 최적형상계수를 결정하는 일은 용접공정의 열해석에서 매우 중요한 과정 중의 하나이다 입열모델에서 최적형상계수를 결정하기 위해 유전적 알고리즘(GA, Genetic Algorithm)을 도입하였고 Fig. 5에서 보는 바와 같이 MATLAB의 GA Toolbox를 이용하여 최적 입열모델을 선정하기 위한 시스템을 구현하였다 유전자 알고리즘의 파라메타 설정은 유전자 알고리즘의 성능을 좌우하며 Table 4는 본 연구에서 사용한 유전자 알고리즘의 파라미터를 나타낸다

Fig. 6은 구현된 입열모델의 최적용접조건 선정 예를 나타낸다. 한편 개발한 시스템을 다양한 용접작업에 적용하기 위해서는 GA를 이용하여 최적의 형상계수를 예측하는데 필요한 입열분포 형상 및 크기에 관한 데이터베이스가 요구된다 열전달 해석시 대류 복사 및 잠열(latent heat)효과를 고려하였으며 해석에 사용된 재료의

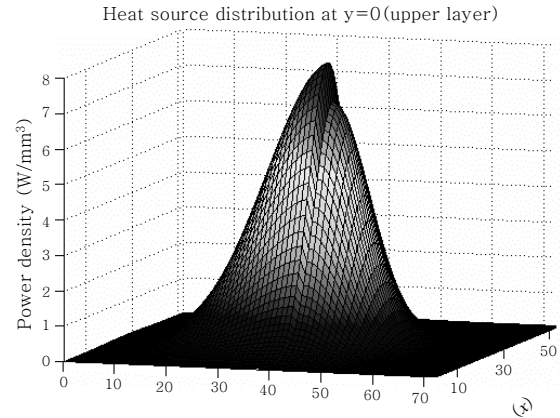


Fig. 6 Decision of optimized heat input model (170A, 32.9V, 300mm/min)

물성치는 수집된 기존의 문헌들을 참고하여 온도에 대한 함수 형태로 입력하여 변형해석을 수행하였다(7-10).

굴삭기에 사용될 고강도 볼 암 부품 용접 시 발생하는 용접부 열변형을 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 변형예측을 위한 시스템을 구축하기 위하여 용접변형 해석을 FEM을 이용한 맞대기이음과 필릿이음에서의 용접변형 분석을 위해 2차원 모델의 용접변형 해석을 수행하였다 FE mesh는 non-uniform를 선정하였으면 맞대기 용접에 대해 1943 2D thermal solid요소의 2069개 절점들과 필릿 용접에 대해선 1180 2D thermal solid요소의 1283개 절점들로 구성하였다

해석을 위해 사용된 Solver는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였고 용접공정의 특성상 용입속도가 용접패스를 기준으로 모재에 첨가되는 특징이 있으므로 유한요소법의 요소생성법(element birth and death method)을 이용하였다¹¹⁾.

4. 해석결과 및 고찰

GA 알고리즘을 이용한 용접 입열모델의 정확도를 확인하기 위해 실제 용접시편 조직과 유한요소모델의 열전달해석을 통해 얻어낸 용접비드부의 온도분포 결과를 비교하였다. Figs. 7-8은 각각 맞대기 및 필릿이음 용접비드부의 각 패스별 비드형상 및 추출된 비드형상을 나타낸 것이며 용융점인 1465°C를 기준으로 각 용융부(fusion zone)와 열영향부(heat affect zone)를 패스별로 구분하여 해석결과를 도시하였으며 최종적인 비드형상과 매우 일치함을 확인할 수 있었다

Fig. 9는 각 이음별 용접부의 중앙부 표면에서 각 위치의 시간에 대한 패스별 온도분포를 나타낸다 Fig.

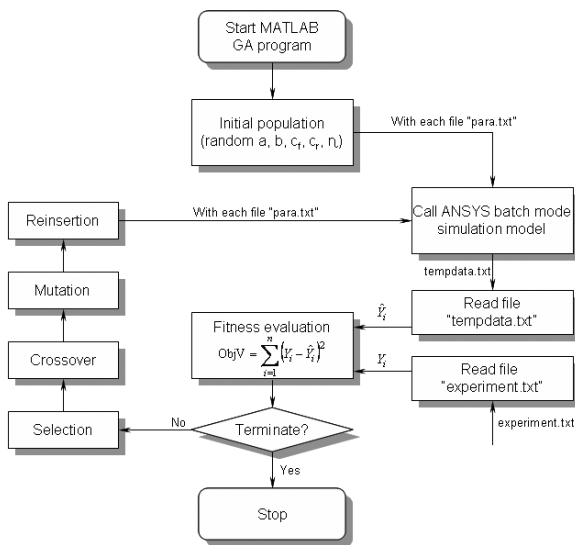


Fig. 5 Schematic diagram of genetic algorithm for selecting the optimal shape parameters using heat input model

Table 4 GA parameters and values

Parameter	Value
Population size	40
Generation gap	0.8
Crossover rate	1
Mutation rate	1/12
Insertion rate	0.9

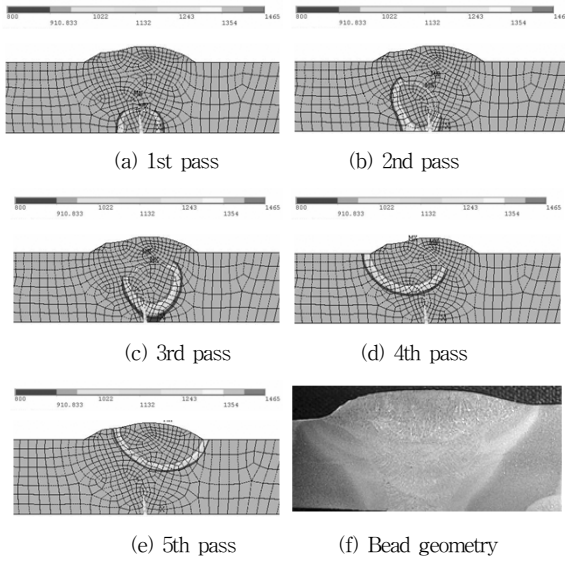


Fig. 7 Heat transfer analysis for butt joint

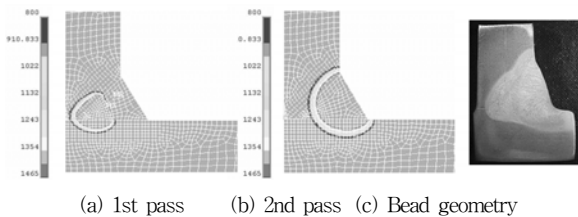


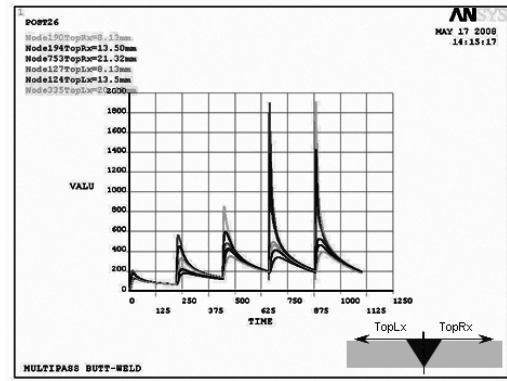
Fig. 8 Heat transfer analysis for butt joint

9(a)는 맞대기이음부의 경우로 1-3 pass의 경우 모재 윗면은 용융이 되지 않은 관계로 해석상의 결과로는 850°C 이하로 나타나는 것을 알 수 있으며 2-3 pass 및 4-5 pass의 경우 이전 패스의 용융부의 일부분이 다음 패스의 용접에 의해 재 용융됨으로 다음 패스에서 이전 패스의 열영향부의 크기가 결정되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9(b)는 필릿이음부의 경우에는 1 pass의 경우 필릿 용접부의 왼쪽 벽면을 기준으로 8mm, 2 pass는 16mm 이내에서 용융부가 결정됨을 확인할 수 있었다

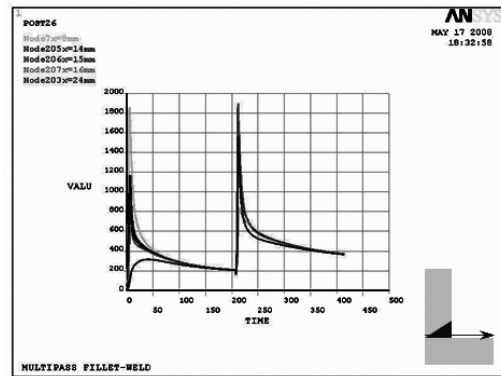
앞서 도출된 각 용접열전도 해석결과를 토대로 맞대기이음과 필릿이음에서 용접변형 분석을 위해 2차원 모델의 용접변형 해석을 수행하였다. 용접변형 해석 수행 결과 Fig. 10에서 보는 바와 같이 맞대기 및 필릿이음 실험으로부터 측정된 측정값과 해석을 통해 계산된 변형량이 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 굴삭기에 사용되어지는 붐 압 부품용 소재인 SM490A강의 용접 시 발생하는 용접변

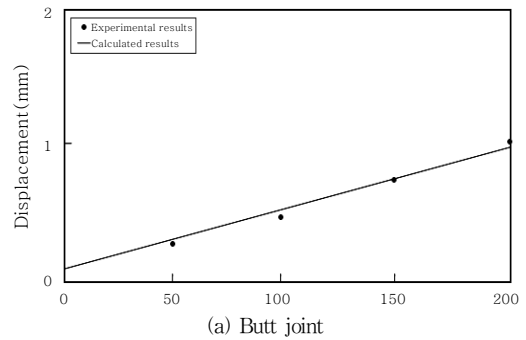


(a) Butt joint

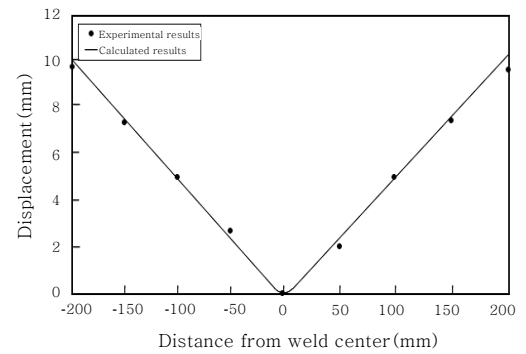


(b) Fillet joint

Fig. 9 Temperature variation at each joints from weld surface center



(a) Butt joint



(b) Fillet joint

Fig. 10 Comparison Experimental and calculated welding deformation at each joints

형을 예측하기 위한 수치해석용 유한요소 모델을 개발하여 용접공정 중 용접조건에 따른 열전달 및 용접변형 해석을 통해 기존 용접공정 중에 소재의 열적 특성 규명 및 변형거동을 평가하고자 하였고 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 굴삭기용 부품용 소재 제작 관련 WPS를 기준으로 용접변형 특성 분석을 위한 용접실험 수행을 통해 용접 변형량을 산출하였으며 용접변형에 대한 경향이 용접물의 열 및 역학적 구속조건에 영향을 미침을 확인하였다
 - 2) FEM을 이용한 용접변형 예측을 위해 열전달해석 및 열탄소성 해석절차를 수립하였고 해석의 정확도를 높이기 위해 유전적알고리즘을 이용한 입열모델 선정시스템을 구축하였다
 - 3) 해석을 통해 나타난 결과를 통해 입열모델의 정확도 및 최종 변형량의 비교 분석을 통해 각 용접이음별 용접조건별로 적용 가능한 최적 입열모델 개발 및 용접 변형예측시스템을 구현하였으며 실험데이터와의 비교분석을 통해 우수한 예측성능을 확인하였다
- 향후에 산업현장에 개발된 시스템을 적용하기 위해서는 다양한 용접자세 및 용접방법을 포함한 추가적인 실험 및 연구가 요구된다

후 기

본 연구는 교육인적자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업 및 중기거점기술개발사업으로 수행된 연구결과이며, 관계자 여러분께 감사드립니다

참 고 문 헌

1. 대한용접·접합학회 : 용접·접합편람-III 공정 및 열가공 2007, 460 (in Korean)
2. Commission of Design, Analyses and Structural Strength of Welded Structures, Standardization for Temperature Distribution Prediction of the Arc Weld using FEA, Journal of KWS, 23-6 (2005), 497-503 (in Korean)
3. S.I. Seo, J.G. Noh and J.S. Lee, Development of a Program for Prediction and Visualization of Weld Deformation, Journal of KWS, 20-5 (2002), 689-695 (in Korea)
4. L.E. Lindgren, Finite Element Modeling and Simulation of Welding Part 1: Increased Complexity, Journal of Thermal Stresses, 24 (2001), 141-192
5. P. Mollicone, T. Comlekci, T.G.F. Gray and D. Camilleri, Simple Thermo-elastic-plastic Models for Welding Distortion Simulation, Journal of Materials Processing Technology, 2006
6. J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, A New Finite Element Model for Welding Heat Source, Metall. Trans. B 15B (1984), 299 - 305
7. B.N. Park, K.H. Kim and H.K. Kim, An Evaluation Method of Fatigue Strength and Reliability in a Railway Wheel with an Application of Strength- Stress Interference Model," KSR, 5-2 (2002), 118- 124 (in Korean)
8. DV 952. Vorschrift fur das Schwei ben metallischer Werkstoffe in Privatwerken, 1977
9. JIS E4207, Truck Frames for Railway Rolling Stock-General rules for Design, 1992
10. M.F. Rothman, High-temperature property data: ferrous alloys. American Society for Metals, USA., 1988
11. ANSYS Thermal Analysis Guide Revision 11, Swanson Analysis System, Inc., 2008