

유한요소해석을 이용한 다층 FCA 맞대기 용접부의 횡 방향 잔류응력 평가에 관한 연구

신 상 범^{*†} · 이 동 주^{*} · 박 동 환^{**}

^{*}현대중공업 산업기술연구소

^{**}울산대학교 자동차전박대학원

A Study on the Evaluation of Transverse Residual Stress at the Multi-pass FCA Butt Weldment using FEA

Sang-Beom Shin^{*†}, Dong-Ju Lee^{*} and Dong-Hwan Park^{**}

^{*}Hyundai Industries Co., Ltd., Ulsan 682-060, Korea

^{**}Ulsan University, Institute of E-vehicle Technology, Ulsan 682-192, Korea

†Corresponding author : str@hhi.co.kr

(Received December 16, 2009 ; Revised February 11, 2010 ; Accepted May 20, 2010)

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the residual stresses at the multi-pass FCA weldment using the finite element analysis (FEA). In order to do it, an H-type specimen was selected as a test specimen. The variable used was in-plane restraint intensity. The temperature distribution at the multi-pass FCA butt weldment was evaluated in accordance with the relevant guidance recommended by the KWJS. The effective conductivity for the weld metal corresponding to each welding pass was introduced to control the maximum temperature below the vaporization temperature of weld metal. The heat flux caused by welding arc was assumed to be applied to the weld metal corresponding to welding pass. With heat transfer analysis results, the distribution of transverse residual stresses was evaluated using the thermo-mechanical analysis and compared with the measured results by XRD and uniaxial strain gage. In thermo-mechanical analysis, the plastic strain resetting at the temperature above melting temperature of 1450°C was considered and the weld metal and base metal was assumed to be bilinear kinematics hardening continuum. According to the comparison between FEA and experiment, transverse residual stresses at the multi-pass FCA butt weldment obtained by FEA had a good agreement with the measured results, regardless of in-plane rigidity. Based on the results, it was concluded that thermo-mechanical FE analysis based on temperature distribution calculated in accordance with the KWJS's guidance could be used as a tool to predict the distribution of residual stress of the multi-pass FCA butt weldment.

Key Words : Transverse residual stress, Restraint degree, FCAW, Multi-pass butt weldment, Heat input, FEA, XRD

1. 서 론

용접시 용접부에는 용접 아크(arc)에 의한 불 균일한 온도 구배에 의하여 열 변형률의 차이가 발생하고, 이로 인하여 변형(distortion) 및 잔류응력(residual

stress)이 유발된다. 실제 용접 구조물에서 변형과 잔류응력은 용접 구조물의 역학 거동 특성에 미치는 영향이 매우 크므로, 이의 거동 특성을 평가하기 위한 매우 다양한 연구가 진행되어 왔다¹⁻⁸⁾. 특히 최근에는 컨테이너 운반선이나 해양 구조물의 대형화 및 사용 조건이 가혹화됨에 따라 극후 부재의 사용이 증가함에 따라 용

접 잔류응력의 거동 특성 및 영향을 정량적으로 평가하기 위한 방안에 대한 요구가 점점 증가하고 있다. 용접부의 잔류응력을 평가하기 위한 가장 보편적인 해석 방법은 고유변형률 개념을 이용한 해석적 방법(analytical method)과 유한요소해석을 이용한 수치적 방법(numerical method)으로 대별된다. 여기서, 부적합도 개념의 고유변형률(inherent strain)를 이용한 해석적 방법의 경우 초기에는 주로 판 두께 방향의 응력 성분을 무시할 수 있는 박판에 대해 수행되었다. Watanabe 등은 무한 평판에 슬릿(slit) 인근에 일정 크기의 고유변형률이 분포하는 경우 잔류응력에 대한 해를 제시하였고¹⁾, Satoh 등은 박판의 파이프를 대상으로 일정한 크기의 고유변형률의 분포에 따른 응력분포를 평가하였다²⁾. 그러나 초기에 고유변형률을 이용한 용접부의 잔류응력 평가는 잔류응력을 평면응력(plane stress)으로 가정함으로써 판 두께 방향으로 잔류응력의 구배가 존재하지 않는 박판에만 국한되어 적용되었다. 이에 Ueda 등은 고유변형률과 탄성 유한요소해석을 이용하여 후판 다층 용접부의 잔류응력의 분포를 평가할 수 있는 기법을 제안하고 이를 다층 맞대기 용접부에 적용하여 타당성을 검증하였다^{3,4)}. 이후 Ueda는 고유변형률의 분포를 정확히 평가하기 위하여 실험적인 방법 외에도 열 탄소성 해석을 이용한 방법 등을 통하여 고유변형률의 분포를 정의하는 방안을 제안하였다⁵⁾. 그러나 이러한 접근 방법들은 용접부의 내외적 구속이 작업 조건에 따라 매우 다양한 선체와 같은 대형 용접 구조물의 다층 용접부에 적용하기는 매우 어렵다. 이와 같이 선체 블록간 용접부와 같이 구속에 대한 정의가 단순 실험이나 해석적인 방법으로 평가하기 힘든 경우 가장 쉽게 적용될 수 있는 방안이 유한요소해석을 이용한 수치 해석적 방법이다. 유한요소해석을 이용한 용접부의 잔류응력 평가는 용접 아크에 의하여 용접부에 유발되는 온도 분포를 평가하기 위한 열 전달 해석과 온도 분포의 차에 의한 열 변형률을 평가하는 열 탄소성 해석으로 이루어진다. 그러나 이러한 수치 해석적인 접근을 이용한 잔류응력 평가 방법 또한 용접부가 가지는 물리적 복잡성과 함께 해석에서 발생할 수 있는 다양한 오류 즉, 해석 모델이나, 온도에 의존하는 물성치 등의 차이로 인하여 해석 결과의 신뢰성에 많은 문제점을 유발할 수 있다. 이에 IIW(International Institute of Welding)는 1999년에 용접부 잔류응력 평가를 위한 joint working group을 결성하고, 1 단계 사업으로 축 대칭 요소를 이용한 원주 용접부의 잔류응력 예측에 대한 라운드로빈(RR: round-robin) 테스트를 수행하였으며⁶⁾, 현재 잔류응력에 관한 2 단계 RR 테스트를

진행 중이다. 그러나 최근 Dong 등의 연구 결과에 따르면 IIW의 1 단계 RR 테스트에서 수행된 원주 용접부에 대한 참여 기관별 잔류응력 해석 결과에는 매우 큰 차이가 발생한 것으로 보고하고, 이의 주요인이 참여 기관별 온도 분포에 대한 해석 결과의 차이임을 밝혔다⁷⁾. 이에 대한용접접합학회(KWJS) 용접강도연구위원회는 IIW의 RR 테스트와 유사한 방법으로 다층 맞대기 용접부에 대한 온도 분포를 실험 및 해석적 방법으로 평가하고, 아크 용접부의 온도 분포를 정량적으로 평가하기 위한 해석 규약을 제안하였다⁸⁾. 이에 본 논문에서는 극후 다층 FCA 맞대기 용접부의 잔류응력 거동 특성을 KWJS에서 제안한 온도 분포 해석을 위한 표준 규약에 따라 평가하고, 이에 따른 잔류응력의 거동 특성을 평가하고자 하였다. 그리고 이를 계측 결과와 비교 평가함으로써 유한요소해석을 이용한 다층 용접부의 해석 기법의 타당성을 검증하고자 하였다

2. 유한요소해석 및 실험 방법

극후 FCA 맞대기 용접부의 잔류응력 및 평균구속응력 평가를 위하여 본 논문에서 사용한 시편은 Fig. 1 과 같이 용접부의 저온균열의 감수성 평가를 위하여 제안된 “H-type” 시험편이다. 시험편 제작시 사용된 모재는 80mm두께의 선급용 강재 EH40이며, 시험편의 폭(W)과 시험 용접장의 길이(Lw)는 각각 800mm와 400mm이다. 여기서 용접부 구속도의 변화를 위한 시편 길이(L)와 구속 용접부와 거리(Ls)는 식(1)과 같이 정의되는 면내 구속도(Ks)와 유한요소해석을 이용하여 결정하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

$$K_s = \frac{\sigma_o}{\bar{u}} \tag{1}$$

where,

K_s : In-plane restraint degree [MPa/mm]

σ_o : Mean stress in the weldment [MPa]

\bar{u} : Mean displacement [mm]

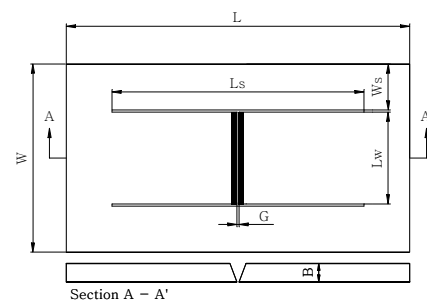


Fig. 1 Configuration of H-type test specimen

Table 1 Dimensions of H-type test specimen with restraint degree

K_S [MPa/mm]	L [mm]	L_s [mm]
100	1,500	1,100
200	1,100	500

H-type 시험편의 온도 분포는 대한용접접합학회의 강도연구위원회에서 제안한 해석 규약에 따라 수행하였다. 즉, 시험 용접부의 각 위치에서 용접 아크의 진행 속도가 일정하고 용접 시·종단부에서 용접 아크에 의한 입열 세기가 일정하다고 가정함으로써 3차원 열 전달 문제를 준 정상상태(quasi-state stationery state)의 2차원 열 전달 문제로 축소 가정하여 평가하였다. 이때, 사용된 요소망은 Fig. 2와 같이 용접부와 용접부 근처의 열 영향부(heat affected zone)에서 발생하는 급격한 온도변화를 고려하기 위하여 이 영역에서 요소(element) 크기가 최대 0.5mm × 0.5mm를 초과하지 않도록 하였으며, 각 용접 패스(pass)에 따른 단계적인 적층을 위하여 용착금속 내의 모든 요소는 생성 후 최초 해석 모델로부터 이를 제거한 후 각 패스에서 해당하는 입열이 가해지는 시점에서 순차적으로 다시 요소를 생성하는 기법을 적용하였다. 그리고 각 용접 패스에서 용착금속의 단면적은 용접 입열량에 따른 FCA 용접부의 용착금속의 단면적에 대한 실험 결과를 토대로 결정하였다⁹⁾. Table 2는 시험 및 해석시 사용된 용접 입열량을 나타낸 것이다. 유한요소해석을 위한

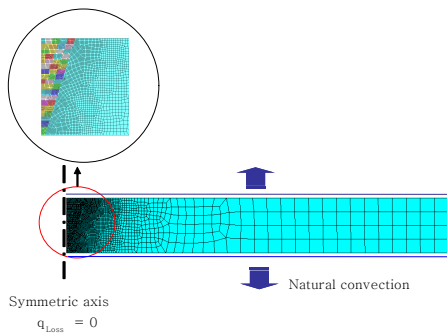


Fig. 2 Mesh design and thermal boundary condition used for heat transfer analysis

Table 2 Welding conditions and deposit sequence

Pass	Heat Input	
1	194 kJ/mm	
2	135 kJ/mm	
3 ~ 53	174 kJ/mm	
Others	131 kJ/mm	

열 전달 해석시 FCA 용접 아크의 효율은 2차원 열 전달 특성을 고려하여 0.7로 가정하였으며, 이때 용접시 아크에 의한 열속은 균일 분포 체적 열원으로 각 용접 패스의 용착 금속에 해당하는 요소에만 작용하는 것으로 가정하였다. 이때, 아크 열속의 변화를 위한 램프비(ramp ratio)는 0.6, 용접 아크가 해석 영역을 통과하는데 소요되는 총 시간은 5초로 가정하였다. 그리고 해석시 용접부에서 과도한 소성변형의 발생을 방지하기 위하여 용착금속(weld metal)의 온도가 용점(1450°C)을 초과하는 용접 개선면내에 위치한 요소에 대하여 유효 열전도계수(effective thermal conductivity)를 적용함으로써 용착금속의 최대 온도가 기화온도(vaporization temperature, 3,000°C)를 초과하지 않도록 하였으며, 상 변화(phase change)에 대한 효과는 잠열(latent heat)을 이용하여 고려하였다. 다층 용접시 후행 용접은 용접부의 온도가 층간온도(250°C)이하에서 생성되도록 하였다. 냉각시 열 손실은 공기와의 경계면에서 자연대류와 복사에 의한 열 손실이 발생하는 것으로 가정하였다. Fig. 4는 열 전달 해석시 사용된 열적 물성치의 온도 의존성을 나타낸 것이다.

잔류응력 평가를 위한 열 탄소성 해석시 H-type 시험편 시험 용접부의 구속도를 2차원 해석 모델에서 구현하기 위하여 Fig. 5와 같이 동일 크기($L_s/2=550\text{mm}$)

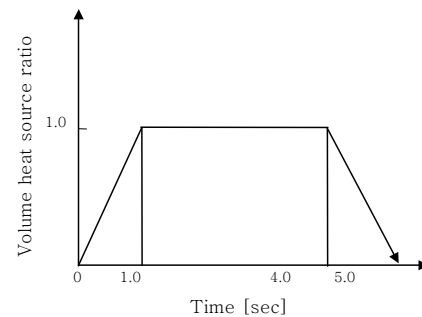


Fig. 3 Ramp ratio of volume heat source

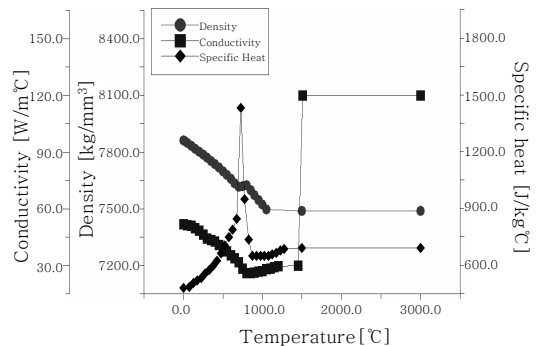


Fig. 4 Physical and thermal properties of FE analysis model

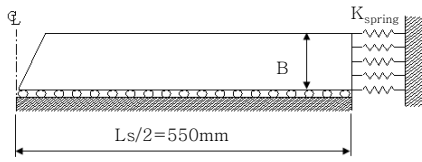


Fig. 5 Spring element for in-plane restraint at test weldment

의 해석 모델의 끝단에 구속도에 따라 식(2)로 정의되는 강성(stiffness)을 가진 스프링 요소(spring element)로 고려하였다.

$$K_{spring} = \frac{F}{\bar{u}} = \frac{\sigma_o B}{\left(\frac{\sigma_o}{K_s} - \frac{\sigma_o L_s}{E}\right)} = \frac{B}{\left(\frac{1}{K_s} - \frac{L_s}{E}\right)} \quad (2)$$

where,

K_{Spring} : Spring constant corresponding in-plane rigidity [N/mm]

F : Shrinkage force [N]

\bar{u} : Mean displacement [mm]

K_s : Restraint degree [MPa/mm]

A : Cross-sectional area of weldment[mm²]

L_s : Restraint length of test specimen[mm]

E : Elastic modulus [MPa]

B : Weldment thickness [mm]

잔류응력 평가시 사용된 요소망은 용접선 방향으로 과도한 잔류응력의 생성을 제어하기 위하여 일반화된 평면변형률요소를 이용하여 Fig. 6과 같이 구성하였으며, 변위 경계 조건으로는 해석 모델의 대칭 축(symmetric axis)에 위치한 절점에 대칭 조건을 부여하고, 용착금속의 생성 및 인근 용접부의 가열시 발생하는 용접 하부면 방향으로의 각 변형을 제어하기 위하여 “on-die” 조건을 적용하였다⁹⁾. 잔류응력 해석시 모재 및 용접부의 온도가 용점(1450℃)이상인 경우 용접부에서 발생하는 소성변형률을 리셋팅(resetting)하였으며, 모재

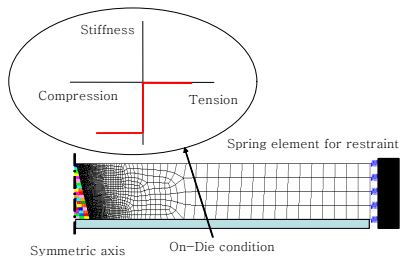


Fig. 6 Mesh design used for residual stress analysis

및 용접부의 기계적 물성은 등방성이고, 온도에 의존하는 이동경화연속체(kinematics strain hardening continuum)로 가정하였다. 그리고 항복 개시 조건으로 von-Mises 조건을 적용하였다. Fig. 7은 FEA 해석시 용접부의 온도에 따른 항복강도 및 탄성계수의 거동을 나타낸 것이다.

유한요소해석을 이용한 다층 FCA 맞대기 용접부의 잔류응력 평가에 대한 타당성은 구속도에 따른 용접 시험편을 Fig. 8과 같이 제작한 후 Fig. 9와 10에 도시한 바와 XRD와 1축 스트레인게이지를 이용하여 용접부의 표면에 작용하는 잔류응력 분포와 평균 구속 응력을 계측하여 해석 결과와 비교함으로써 검증하였다.

여기서, 평균 구속 응력은 Fig. 10과 같이 용접 시험편의 상 하부에서 계측된 결과의 평균치로 정의하였다.

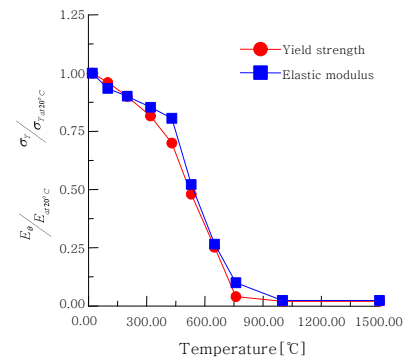


Fig. 7 Temperature dependent Mechanical properties for FEA

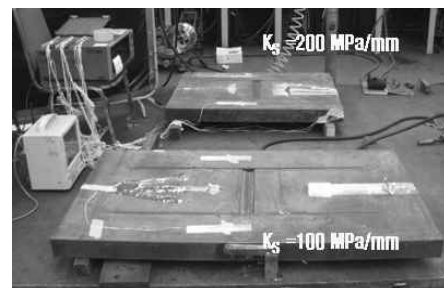


Fig. 8 H-type test specimen with Ks



Fig. 9 XRD measuring equipment

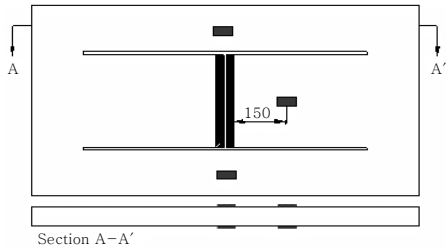


Fig. 10 Locations of 1 axis strain gage

3. 해석 및 실험 결과

3.1 온도 분포

Fig. 11은 EH40 용접부의 두께가 80mm이고, 용접조건이 Table 2와 같은 경우 각각 첫 번째와 마지막 용접 패스에서 용접 아크가 해석 영역을 지나고 난 후 용접부의 온도 분포를 도시한 것이다. Fig. 11과 같이 용접부의 최대온도는 기화 온도 (3000℃)를 초과하지 않으나, 첫 패스와 마지막 패스에서 용접 아크가 해석 영역을 지나고 난 직후 최대 온도는 각각 2630℃와 1493℃로 다소 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 온도차는 Table 2와 같이 각 용접 패스에서 입열량의 차이 외에도, 용접 아크가 해석 영역을 지나가는 동안 생성된 용접부에서 열 손실의 발생 기구의 차이에 기인한 것이다. 즉, 첫 패스에서 열 손실은 주로 폭 방향으로의 1차원 열 전도에 지배 받는 반면에 Fig. 11의 (b)와 같이 마지막 용접 패스에서는 두께 및 폭 방향의 2차원 열 전도에 의하여 열 손실이 발생함으로써 상대적으로 냉각속도가 증가하기 때문이다. Fig. 12는 용접 중 용접부의 각 위치에서 용접부의 온도 분포에 대한 계측 및 해석 결과를 서로 비교하여 도시한 것이다. Fig. 12와 같이 해석 및 실험 결과가 매우 유사한 천

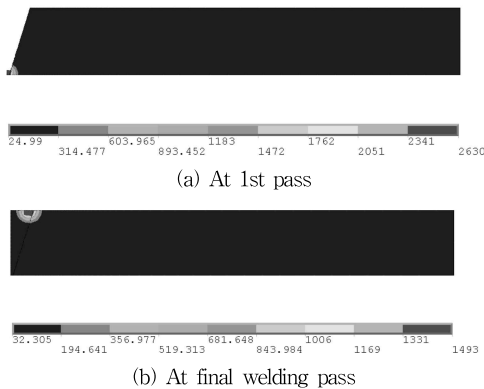


Fig. 11 Contours of temperature distribution at multi-pass FCA butt weldment after welding arc pass over analysis zone

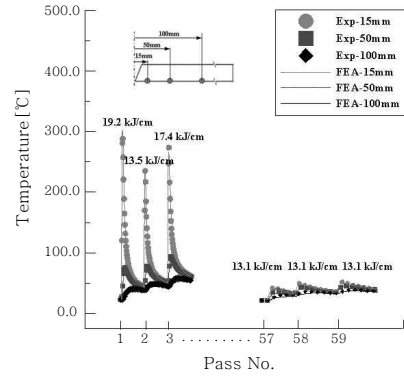


Fig. 12 Variations of temperature at a multi-pass FCA butt weldment obtained by FEA and experiment

이 거동 특성을 보여주고 있다. 이는 본 논문에서 사용한 다층 용접부의 온도 분포 해석 조건이 타당함을 의미한다.

3.2 잔류응력

Fig. 13은 구속도가 100MPa/mm인 다층 맞대기 FCA 용접부가 상온으로 완전히 냉각된 후의 횡 방향 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 여기서 사용된 모재는 80mm 두께의 EH40이다. Fig. 13과 같이 용접선과 수직인 방향의 잔류응력은 용접부 상하부 표면에서 인

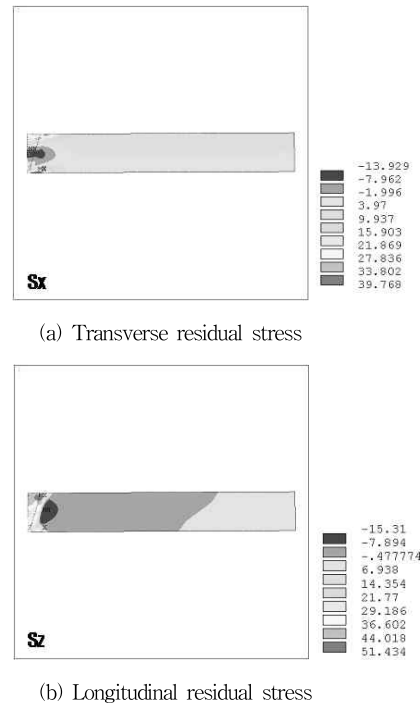


Fig. 13 Contours of residual stress distribution at H-type test specimen with 100MPa/mm after cooling down to 20℃ (unit: MPa)

장으로 작용하는 반면, 중앙 내부에서는 압축으로 작용하고 있다. 그리고 용접선 방향인 z축 방향의 잔류응력은 용접부에는 모재의 항복응력(400MPa)을 초과하는 인장 잔류응력이 작용하는 반면에 용접부와 바로 인접한 영역에서 다시 압축으로 천이됨을 알 수 있다. 유한요소해석으로 평가된 다층 맞대기 용접부의 잔류응력의 분포는 구속이 낮은 경우 발생하는 잔류응력의 분포와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 14는 H-type 시험편의 용접부 구속도가 각각 100MPa/mm과 200MPa/mm인 경우 용접부의 상부 및 하부 표면에서 각각 용접선에 수직한 방향으로 작용하는 잔류응력에 대한 유한요소해석과 XRD를 이용하여 평가한 결과를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 14와 같이 유한요소해석 및 XRD를 이용하여 평가된 전반적인 잔류응력 분포가 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 용접부의 구속도가 증가함에 따라 용접부와 인접한 영역에서 발생하는 최대 잔류응력의 차이는 미미하나, 용접부로부터 일정거리 이상 떨어진 영역에서 잔류응력 즉, 평균 구속응력은 구속도에 비례하여 증가

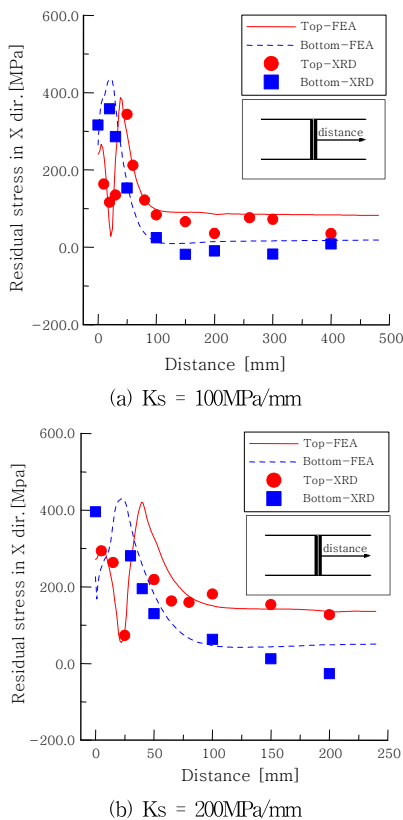


Fig. 14 Comparison results of transverse residual stress at multi-pass FCA butt weldment restraint degree obtained by both FE analysis and XRD

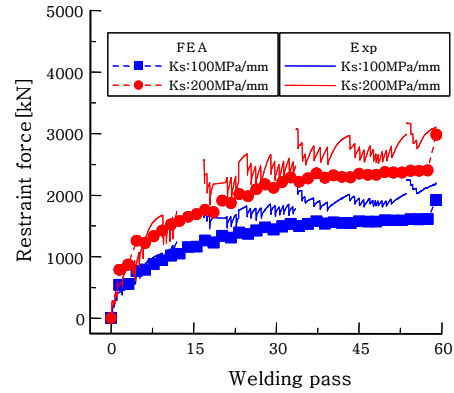


Fig. 15 Comparison results of restraint stress at H-type test specimen with restraint degree obtained by both FE analysis and strain gage measurement

함을 알 수 있다.

Fig. 15는 1축 스트레인게이지를 이용하여 H-type 시험편의 용접부에서 용접 및 냉각시 용접선에 수직한 방향으로 작용하는 구속력에 대한 계측 결과를 유한요소해석 결과와 비교하여 도시한 것이다. 여기서 구속력은 시험편에 부착된 스트레인게이지에서 계측된 평균값이다. Fig. 15와 같이 용접이 진행됨에 따라 용접부의 구속력은 증가하며, 용접부의 구속도에 비례하여 증가한다. 그리고 용접부가 완전히 상온으로 냉각된 후 용접부에 최종적으로 잔류하는 구속응력에 대한 실험 및 해석 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

유한요소해석을 이용하여 다층 FCA 맞대기 용접부의 잔류 응력 거동 평가에 대한 타당성을 검토하기 위한 연구를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) KWJS의 용접강도위원회에서 규정한 용접부 온도 분포 해석 규약을 따른 다층 FCA 맞대기 용접부의 온도 분포 해석 결과는 실험 결과와 잘 일치하였다.
- 2) 용착 금속의 용점 이상의 영역에서 소성 변형률의 리셋팅(resetting) 그리고, 모재와 용착 금속을 이동경화연속체로 가정하고 유한요소해석을 이용한 잔류응력 분포와 평균 구속력의 크기는 XRD와 1축 스트레인게이지를 이용한 계측 결과와 비교적 잘 일치하였다.
- 3) 다층 맞대기 용접부에서 구속도의 크기가 증가함에 따라 용접부에 작용하는 최대 잔류응력의 크기에 미치는 영향은 미미한 반면에 용접부의 전 영역에 걸쳐 작용하는 평균 잔류 응력 즉, 구속응력의 크기는 용접부의 구속도에 비례하여 증가하였다.

참 고 문 헌

1. Watanabe, M. and Satoh, K : Effect of Restraint on Root Cracking of Steel Welds, Journal of the Japan Welding Society, 33-6(1964), 446-457 (in Japanese)
2. Satoh, K., Matsui, S.: Development of Reaction Stress and Weld Cracking under restraint, Journal of JWS, 36-10(1964), 1096-1109 (in Japanese)
3. Ueda, Y., You Chul, K., and Yuan, M. G. : A Predicting Method of Welding Residual Stress Using Source of Residual Stress, Quarterly Journal of JWS, 6-1, 59-64 (in Japanese)
4. Ueda, Y., Yuan, M. G. : Theoretical Determination of the Sizes of Standard Model and Effect of Changes in Heat Input and Kind of Steel on Inherent Strain -A Predicting Method of Welding Residual Stress Using Source of Residual Stress (Report 2), Journal of JWS, 6-3(1988), 349-353 (in Japanese)
5. Ueda, Y., Yuan, M. G. : Prediction of Residual Stress in T- and I-Joints Using Inherent Strain-A Predicting Method of Welding Residual Stress Using Source of Residual Stress (Report 3), Journal of JWS, 9-3(1991), 337-343 (in Japanese)
6. Gordon, R. : IIW X/XV JWG RSDP round-robin Phase 1 : Revised Protocol, Nov., 1999
7. Dong, P. and Janosch, J.-J. : Residual Stress Compendium Compilation : Draft Protocol and Call for Participation, IIW Doc. IIW-X-XII-XV-RSDP-43-02, 2002
8. Commission of Design, Analysis and Structural Strength of Welded Structures : Standardization for Temperature Distribution Prediction of the Arc Weld using FEA, Journal of KWJS, 23-6(2005), 1-7 (in Korean)
9. S. B. Shin and J. G. Youn: A Study on the Angular Distortion Prediction of Double Sided Multi-pass Butt Weldment, Journal of KWS, 25-1(2007), 37-41 (in Korean)