

<기술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.4.401

### SA508/ F316L SS 맞대기 용접 판재의 3 차원 잔류응력특성

이경수<sup>†</sup> · 김태룡\* · 박재학\*\* · 김만원\*\*\* · 조선영\*\*\*\*

(2009년 1월 2일 접수, 2009년 2월 13일 수정, 2009년 2월 18일 심사완료)

### 3-D Characteristics of the Residual Stress in the Plate Butt Weld Between SA508 and F316L SS

Kyoung-soo Lee, Tae-ryong Kim, Jai-hak Park, Man-won Kim and Seon-yeong Cho

**Key Words :** Dissimilar Metal Weld(이종금속용접), Finite Element Analysis(유한요소해석), Residual Stress Measurement(잔류응력측정), Weld Residual Stress(용접잔류응력)

#### Abstract

This study is performed to check the three dimensional characteristics of residual stress in the dissimilar metal weld. Although two dimensional analysis has been widely used for the assessment of weld residual stress, it has limitations to understand the stress distribution of the third direction. 3-D analysis was done to understand residual stress distribution of the welded plate. A simple butt-welded plate was considered to show the stress variation on all direction. A mock-up plate weldment was fabricated with SA-508 and F316L, which are widely used in nuclear power plants. The analysis results were validated with the measured values in the mock-up.

#### 1. 서 론

가압경수로형 원자력발전소의 원자로 냉각재 계통에는 기기와 배관 또는 배관과 배관의 연결부에 많은 이종금속용접부가 존재한다. 대표적인 금속은 구조용 탄소강으로서 SA508 과 배관재 스테인리스강 316L이다. 이들 다른 두 종류의 금속을 용접하는 용접금속으로 Alloy 600 계열의 Alloy 82 또는 Alloy 182 가 널리 사용되어 왔다. 최근 세계적으로 가압경수로 원전의 이종금속용접부에서 응력부식균열 사례가 보고<sup>(1~3)</sup>되고 있으며 균열의 주요

원인 중의 하나로서 용접에 의한 잔류응력이 지목되고 있다.

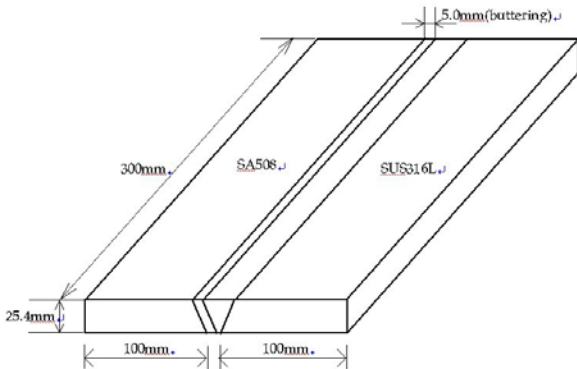
응력부식균열의 발생 가능성 및 균열성장속도를 예측하기 위해서는 용접잔류응력을 정확하게 평가할 수 있어야 하나, 용접잔류응력 특히 이종금속간의 용접에 의한 잔류응력은 용접중 물성변화, 재료의 불균일성, 재료특성차이 등으로 인하여 매우 어려운 해석 난제 중의 하나이다. 이와 관련하여 유한요소해석을 이용한 용접잔류 응력해석 연구가 세계적으로 많이 수행되고 있다.<sup>(4-8)</sup> 국내에서도 원전의 이종용접금속에 대한 재료물성평가<sup>(9-11)</sup> 및 이종금속용접부에 대한 잔류응력 해석 평가 연구<sup>(12-20)</sup>가 몇 차례 수행되었으나 해석의 복잡성 등으로 인해 3 차원 해석은 수행되지 못하였다. 또한 해석결과에 대한 검증 과정으로서 측정결과와의 제시가 미흡하였다. 본 연구에서는 이종금속용접부의 잔류응력의 3 차원해석을 통해 2 차원 해석에서 규명하기 어려운 잔류응력특성을 확인하고 모형제작 및 잔류응력측정을 통해서 해석결과를 검증하고자 하였다.

[이 논문은 2008년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2008. 5. 29.-30., 충북대) 발표논문임]

† 회원, 한전 전력연구원  
E-mail : leekys@kepri.re.kr  
TEL : (042)865-5652 FAX : (042)865-5604  
\* 회원, 한전 전력연구원  
\*\* 회원, 충북대학교  
\*\*\* 회원, GNEC(주)  
\*\*\*\* 회원, KLES(주)

**Table 1** Mechanical properties of specimen at ambient temp

	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elastic modulus strength (MPa)
SA508	609.7	479.4	192
SS F316L	482.6	203	195
A82/182	658.3	393.7	214

**Fig. 1** Dimension and material of mock-up

## 2. 이종금속용접 모형판재 제작

유한요소해석 및 측정을 위한 모형을 제작하였다. 모재로서는 원전에서 사용되고 있는 SA508 과 F316L, 용접재로서는 Alloy 82/182 를 사용하였다. 재료의 기본적인 기계적 물성값은 Table 1 과 같으며 크기는 Fig. 1 에 도시된 바와 같이 각각 폭 100mm, 길이 300mm, 두께 25.4mm 이었다.

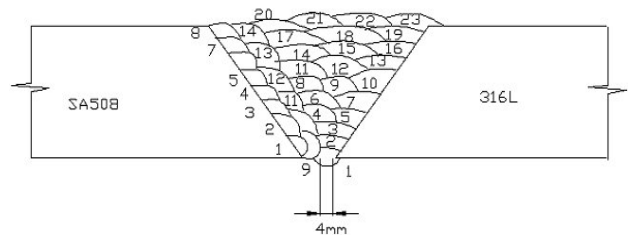
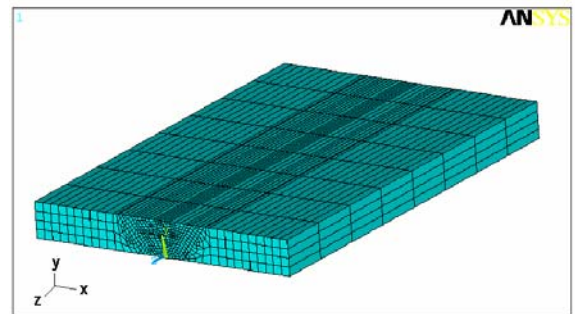
용접전 용접특성을 좋게 하기 위해서 SA508 쪽을 Alloy 82 으로서 5mm 두께의 버터링(buttering) 작업 및 버터링후 열처리를 수행하였고 주용접으로서 두 모재를 Alloy 82/182 로 맞대기용접(butt weld)을 수행하였다. 초층과 두번째 층까지는 Alloy 182 로서 가스텅스텐 아크용접(GTAW)을 수행하였고 나머지는 Alloy82 로서 차폐금속아크용접(SMAW)을 수행하였다. 용접적층순서 및 형상을 Fig. 2 에 도시하였으며 주요용접변수 및 규격은 Table 2 에 제시하였다. 용접층간온도는 최대 175℃ 미만으로 하였으며 본 용접후 사후열처리는 수행하지 않았다. 한편, 열해석결과의 비교 검증을 위해 용접도중 각 모재 하부 용접선에서 15mm, 25mm 지점에서 온도변화를 측정하였다.

## 3. 유한요소 모델링 및 해석

용접잔류응력해석은 열해석과 기계적 구조해석

**Table 2** Specification of Welding Parameters

	Method	Voltage(V)	Current(A)	Preheat/ Interpass Temp(°C)
Buttering	SMAW	20~30	110~170	121(min.)/ 175(max)
Butt Weld	GTAW	10~17	70~140	16(min.)/ 175(max)
	SMAW	20~28	80~110	175(max)

**Fig. 2** Weld passes and order**Fig. 3** 3-D finite element model

으로 대별된다. 열해석은 용접입열로 인한 열전달 및 그로 인한 온도분포를 산출하며 이 결과가 탄소성 구조해석 입력자료로 사용된다. 용접과정 중 재료에서 발생할 수 있는 상변태는 고려되지 않았다. 탄소강인 SA508 은 Alloy82 로 버터링되었으며 스테인리스강 및 Alloy 82/182 는 오스테나이트계열로서 용접도중 상변태를 수반하지 않기 때문이다. 또한 용접아크로 인한 자력효과 및 용융에 의한 부력효과 등은 해석의 단순화를 위해 고려되지 않았다. 문헌<sup>(3, 10)</sup>에 의하면 이들 효과는 거시적 관점에서의 잔류응력에는 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 유한요소해석프로그램은 ANSYS Ver. 10 을 사용하였다. 열전달 해석에는 8-node SOLID 70 요소를 사용하였고 응력해석에는 8-node SOLID 45 를 사용하였다. Ref. 13 에 의하면 20-node 요소를 사용하는 것과 해석결과에 거의 차이가 없다. Fig. 3 에 유한요소모델 결과를 도시하였다. 모델은 3304 개 요소와 4158 개 절점으로

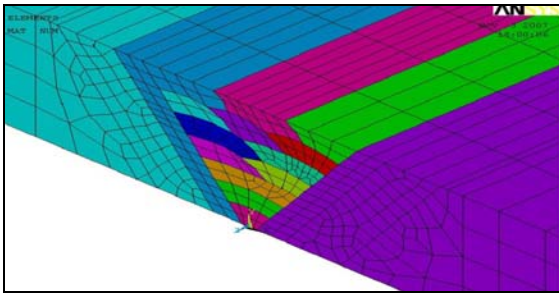


Fig. 4 Details of FE mesh for Fusion Zone and HAZ

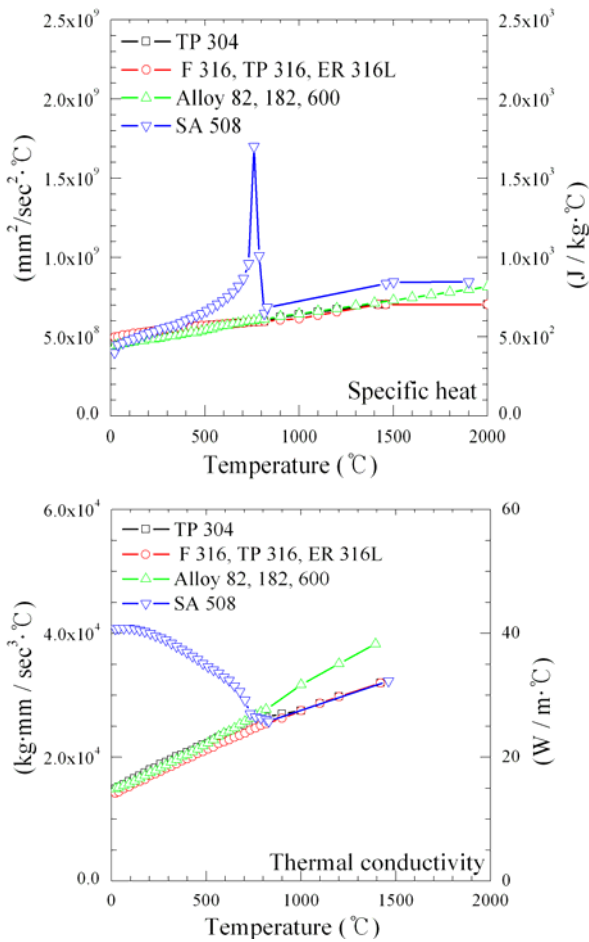


Fig. 5 Thermal properties of materials used in FE analysis; (a) thermal conductivity, (b) specific heat

구성되었으며 입열에 영향을 많이 받을 것으로 예상되는 용융부와 열영향부는 메쉬를 조밀하게, 용접부에서 멀리 떨어져 있는 부위는 메쉬를 크게 함으로써 해석의 효율성을 높였다.

Fig. 4 는 용융부위를 자세하게 도시한 것으로서 전체 용접부위를 13 개 패스로, 각 패스는 5mm 두께로 하였다. 선행연구<sup>(13)</sup>에 의하면 패스를 더 증가시킨다고 하여도 해석정밀도는 그다지 상승하지

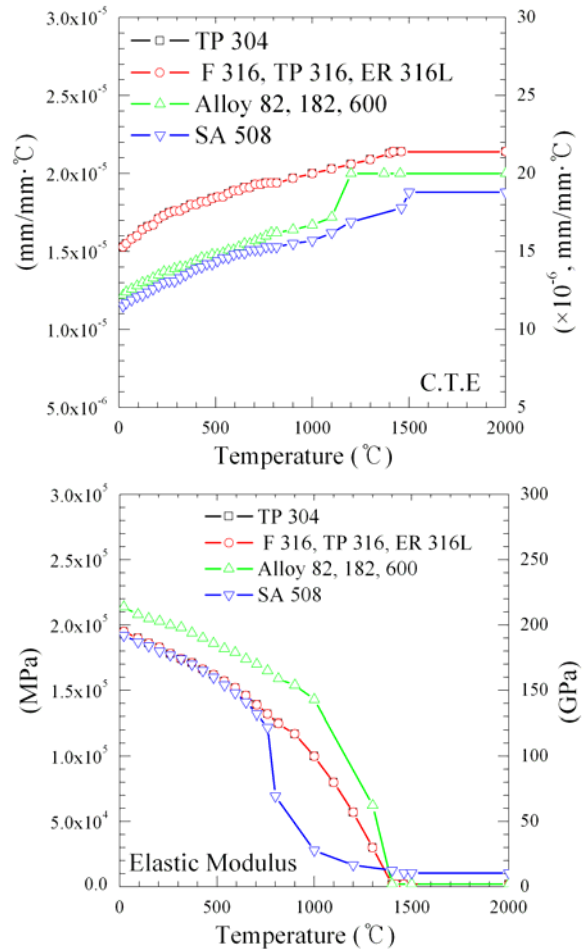


Fig. 6 Mechanical properties of materials used in FE analysis; (a) coefficient of thermal expansion, (b) elastic modulus

않는다. 버터링은 사전에 수행된 것으로 가정하여 열해석을 수행하지 않았고 재료물성치를 Alloy 82 를 적용함으로써 모재 SA508 과 구분하였다. Alloy 82 와 Alloy 182 는 용접특성을 제외한 물리적, 열적특성에는 차이가 없기 때문에 13 개 패스에는 모두 동일한 물성치를 적용하였다.

물리적으로는 용접을 수행하기 전에 두 모재 사이에는 빈 공간이기 때문에 이를 모사하기 위해서 ANSYS의 비드 생성/소멸 기능을 사용하였다. 용접개시전 모든 용접비드요소는 EKILL 명령어를 사용하여 제거하고, 용접이 수행되는 비드를 EALIVE 명령어를 사용하여 활성화시킨다. 용접도중 재료온도는 상온에서 용융온도까지 변화하기 때문에 각 온도에서의 재료물성치가 적용되어야 한다. 재료물성치는 선행연구결과<sup>(9,10,16)</sup>를 인용하였으며 Fig. 5 와 Fig. 6 에 도시하였다.

용접중 용접부 표면에서의 대류열전달계수는 온도변화가 크므로 Table 3<sup>(13)</sup>의 값을 적용하였으나

**Table 3** Equivalent convection coefficient

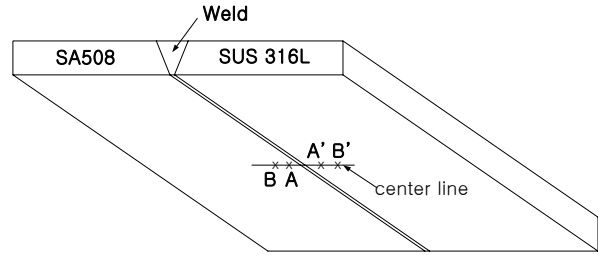
Temperature (°C)	hconv+hrad (W/m <sup>2</sup> K)
100	13.57
200	17.67
300	21.96
400	27.08
500	33.34
600	40.98
700	50.19
800	61.18
900	74.13
1000	89.21
1100	106.6
1200	126.48
1300	149.01
1400	174.37
1500	202.74
1600	234.28
1700	269.17
1800	307.57
2000	395.64
2500	689.63
4000	2407.17

나머지 부위는 10W/m<sup>2</sup>K 를 일괄 적용하였다. 각 용접패스가 완료된 후 1000 초간 자연대류에 의해 냉각되도록 하여 용접층간온도가 용접규격서에 제시된 175°C미만을 유지하도록 모사하였다. 상기에 제시한 바와 같이 용접열해석은 재료물성치가 온도에 따라 변화하는 비선형 문제이다. 본 연구에서는 비선형해석방법으로서 Newton-Raphson 반복법을 채택하였다.

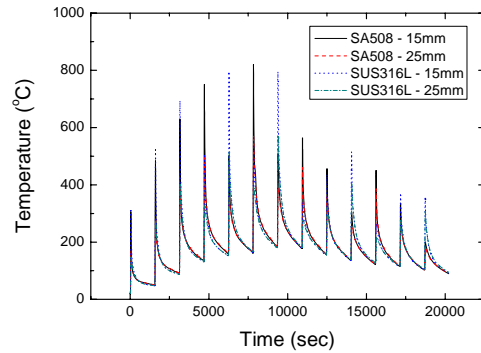
#### 4. 유한요소해석 결과 및 비교

##### 4.1 열해석

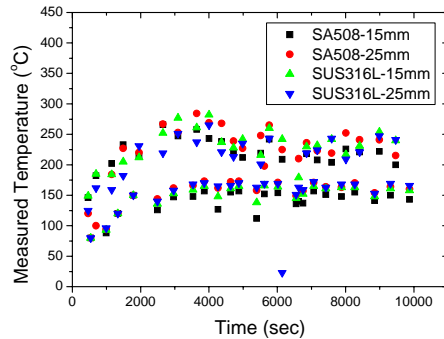
열해석결과와 모형제작 중 측정결과의 비교를 위하여 Fig. 7의 A, A', B, B' 지점에서의 시간대별 온도값을 추출한 결과를 Fig. 8에 도시하였다. Fig.7에서 A, A', B, B'는 용융선에서 각각 15mm, 25mm 지점이다. Fig. 9는 동 지점에서의 측정 결과이다. 측정값은 실제 용접 진행 중 각 패스에서 측정하였으나 해석은 모든 패스를 다 모사하지 않고 Lumped method 를 적용하였기 때문에 상호 시간을 일치시키기 어려운 관계로 한 그림으로 표시하지 못하고 각각 분리하여 도시하였다. 해석값에 의하면 최대값이 800°C까지 상승하나 측정값은 100~300°C 범위로서 많은 차이를 나타내었다. 이 같은 차이는 해석과 실험에서 층간온도를 175°C



**Fig. 7** Selected points for temperature measurement



**Fig. 8** Calculated temperature history at four locations



**Fig. 9** Measured temperatures at four locations

이하로 유지해야 하는 기본조건은 일치시켰음에도 불구하고 해석과 실험간 용접회수, 가열 및 냉각 시간 등의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 해석에서 용융경계부위의 온도는 용융온도(약 1300°C) 근처로서 실제 형상과 유사함을 확인하였다.

##### 4.2 응력해석

Fig. 10~15는 최종 잔류응력분포로서 Fig.10~12는 상면, Fig. 13~15는 하면에서의 각 방향성분별 잔류응력분포로서 평판표면 전체의 3 차원응력분포를 관찰할 수 있다. 그림에서 붉은색으로 갈수록 인장값이 큰 상태를, 남색에 가까울수록 압축값이 큰 상태를 나타낸다. 좌표의 방향성분은 Fig.

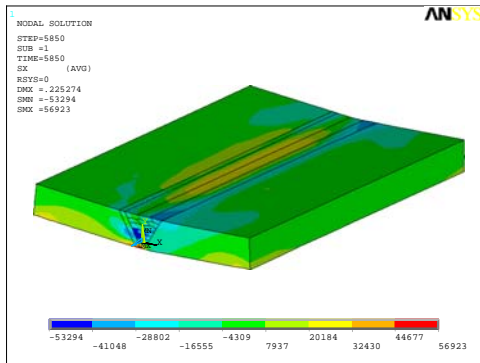


Fig. 10 X-direction stress distribution on top surface

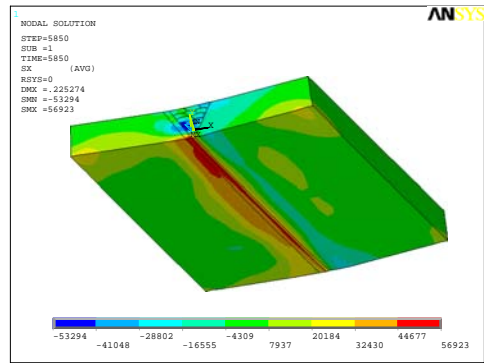


Fig. 13 X-direction stress distribution on bottom

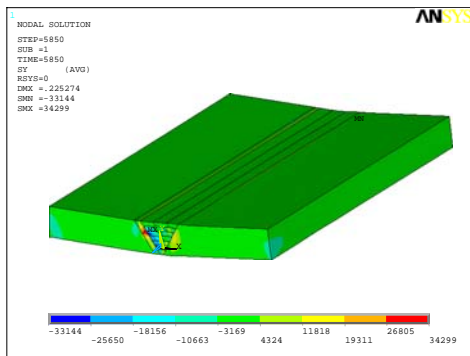


Fig. 11 Y-direction stress distribution on top surface

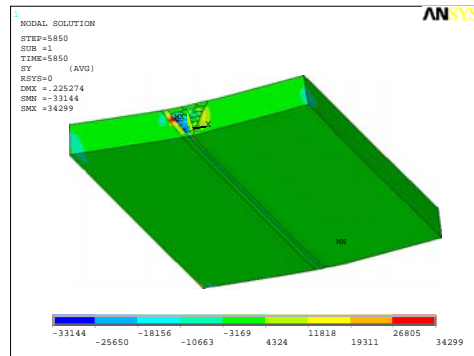


Fig. 14 Y-direction stress distribution on bottom

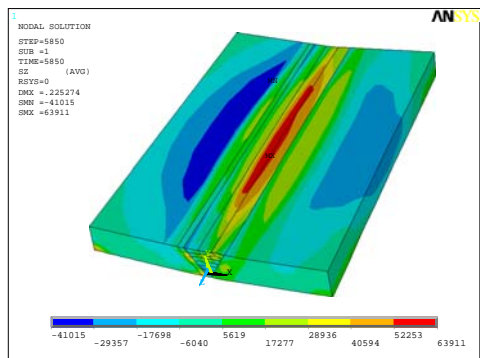


Fig. 12 Z-direction stress distribution on top surface

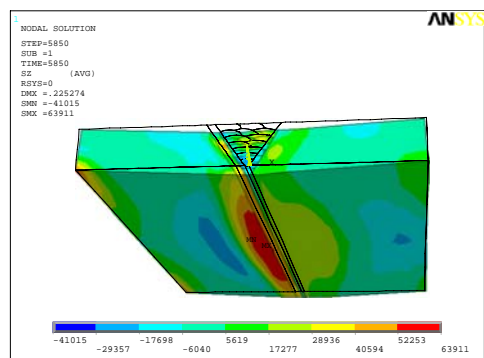


Fig. 15 Z-direction stress distribution on bottom

3 에 나타낸 바와 같이 용접선에 수직방향 (transverse)이 x, 용접선 방향(longitudinal)이 z, 두께방향이 y 이다. 3 차원 해석결과는 예상한 바와 같이 용접선을 따라 x 방향과 z 방향 응력 변화가 매우 큼을 알 수 있다. 두께방향응력은 상면과 하면 사이에 큰 차이가 없으며 응력의 크기도 매우 작았다. 전반적인 응력분포는 용접선을 중심으로 용융부위에서의 잔류응력이 최대인장값을 보이며 용접선에서 멀어지면서 점차적으로 작아져서 압축응력상태로 변하는 모습을 나타내었다. 용접

선 내에서는 중심부에서의 최대인장값을 가지며 끝으로 가면서 점차 감소하는 양상을 나타냄을 알 수 있다. 전체적으로는 인장과 압축값이 상호 평형을 이루는 일반적인 경향과 잘 일치함을 보였다.

Fig. 16 은 Fig. 7 에 표시한 하부 중심선을 따른 잔류응력분포이다. 최대값은 용접선 방향의 인장 응력으로서 440MPa (63.9ksi) 이었다. 잔류응력측정은 천공법으로 수행하였다. 천공법은 스트레인게이지를 사용하여 천공전후의 변형률 변화를 검출하여 응력-변형률 관계식으로부터 응력을 산출하

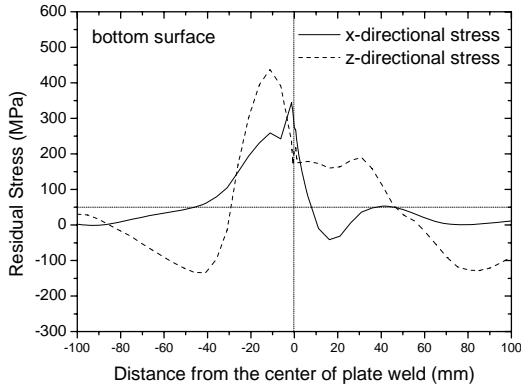


Fig. 16 Residual stress distribution in bottom center line

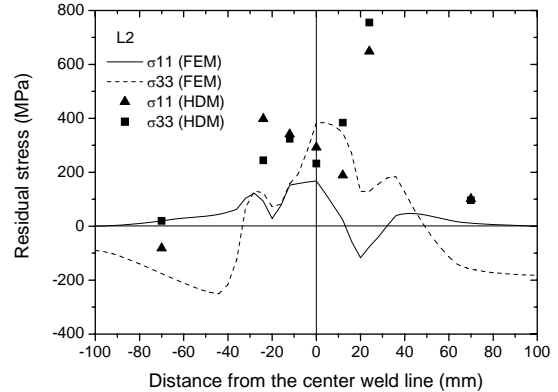


Fig. 19 Residual stresses along the L2 on top surface

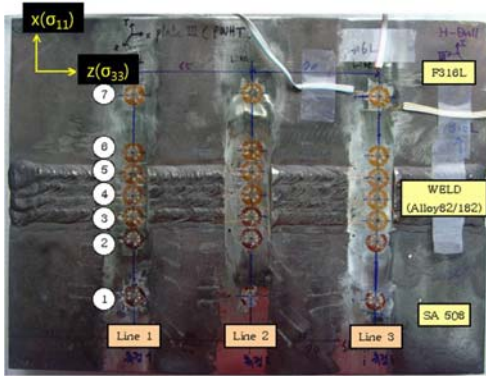


Fig. 17 Measured location

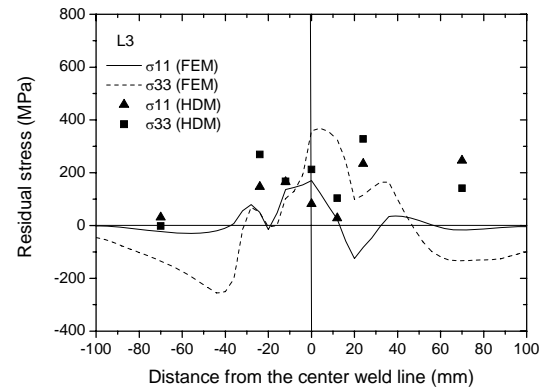


Fig. 20 Residual stresses along the L3 on top surface

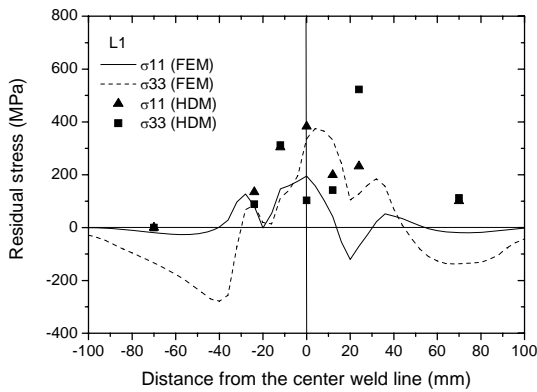


Fig. 18 Residual stresses along the L1 on top surface

산출하는 방법이다. 측정장비는 Vishay Americas 사 장비를 사용하였다. Fig. 17 은 측정위치를 나타내며 용접중심부로부터 각각 ① -70mm, ② -24mm, ③ -12mm, ④ 0 mm, ⑤ 12mm, ⑥ 24mm, ⑦70 mm 표면에서의 값을 측정하였다. 측정위치에 대한 해석결과 값을 추출하여 측정값과 함께 Fig. 18~20 에 도시하였다. Fig. 18 은 Fig.

17 에서 L1, Fig. 19 는 L2, Fig. 20 은 L3 를 따라 측정된 값이다. Fig. 10~12 에 나타난 바와 같이 Line 1,2,3 선상에서의 응력해석결과는 유사한 분포를 보인다. 이는 Line 1,2,3 의 용접조건 및 구속조건에 큰 차이가 없기 때문이며 Line 1,3 의 위치를 보다 양단으로 이동하였다면 보다 큰 차이를 나타내었을 것이다. 측정값은 전반적으로는 용접선 방향의 잔류응력이 인장최대값을 나타내었고 용접선 중심부의 응력이 큰 경향을 나타내었다. 잔류응력의 크기 및 방향, 경향이 해석결과와 대체적으로 일치함이 확인되었다.

### 5. 결론

본 연구를 통해 도출된 주요 결과는 다음과 같다.  
 (1) SA508 과 F316L SS 재료의 평판 맞대기 용접에 의해 발생한 잔류응력분포를 3 차원 유한요소 해석 및 천공법에 의한 측정으로 확인하였다.

(2) 3 차원 유한요소해석 및 측정 결과, 각 위치 별로 용접길이방향 잔류응력과 이에 대한 수직 잔류응력의 변동이 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 2 차원 해석으로는 예측하기 어려운 사항으로서 용접판재의 잔류응력을 분포를 평가하기 위해서는 3 차원 해석이 필요함을 알 수 있다.

(3) 본 연구에서 평판 맞대기 용접에 의해 발생하는 잔류응력은 용접선 방향의 크기가 용접선에 수직하는 방향보다 크며 용접선 중앙부위에서 최대 인장값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 판재의 폭 및 길이에 따라 영향이 있을 것으로 판단된다.

(4) 이종금속 판재의 맞대기 용접 수행시, 용접부의 두께방향 잔류응력은 거의 변화가 없으며 그 값 또한 무시할 정도로 작았다.

## 후 기

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 원자력중장기연구개발사업(2007-07025)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## 참고문헌

- (1) King, C. P., June 2003, "PWSCC of Alloy 600 Type Materials in Non-Steam Generator Tubing Applications," - Survey Report Through June 2002EPRI.
- (2) Brust, F. W., Zhang J. and Dong P. August 1997, "Pipe and Pressure Vessel Cracking: the Role of Weld Induced Residual Stresses and Creep Damage During Repair," SMiRT 14.
- (3) Dong, P. and Brust, F. W., August 2000, "Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components: A Millennium and Review and Beyond," *Journal of Pressure Vessel Technology*.
- (4) Friedman, E., 1975, "Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method," *Journal of Pressure Vessel Technology*.
- (5) Rybicki, E. F. and Stonesifer, R. B., May 1979, "Computation of Residual Stresses due to Multipass Welds in Piping Systems," *Journal of Pressure Vessel Technology*.
- (6) F.Iwamatsu, N.Yanagida, K.Miyazaki, "Effect of Weld Overlay Repair on Residual Stress and Crack Propagation in a Welding Pipe," PVP2007-26516
- (7) Zhang J., Dong P., Brust F.W. August 1997, "A 3-D Composite Shell Element Model for Residual Stress Analysis of Multi-Pass Welds," SMiRT 14.
- (8) Dong, Y., Hong, J. K., Tsai, C. L. and Dong, P., October 1997, "Finite Element Modeling of Residual Stresses in Austenitic Stainless Steel Pipe Girth Welds," *Welding Research Supplement*.
- (9) Woo S.W., Kwon J.D., Choi Y.H., April 2004, "A Study on Fracture Toughness with Thermal Aging in CF8M/SA508 Welds," *Journal of KSME Vol. A*, pp.1173~1178.
- (10) Lee J., Jang C.H, Kim J.S and Jin T.E, 2007, "Mechanical Properties Evaluation in Inconel 82/182 Dissimilar Metal Welds," *The Proceedings of SMiRT 19*.
- (11) Jang C.H, Kim J.S and Jin T.E, 2006, "Spatial Variation of Mechanical Properties in Alloy 82/182 Dissimilar Metal Welds," *The Proceedings of 6<sup>th</sup> Int. Workshop on Integrity of Nuclear Components*.
- (12) Park, J. S., Song, H. C., Yoon, K. S. and Choi, T. S., August 2005, "The Analysis of Dissimilar Metal Weld Joint for Fracture Mechanics Evaluations," SMiRT 18.
- (13) Kim J.S. Jin T.E., "Development of Engineering Formula for Welding Residual Stress Distributions of Dissimilar Welds on Nozzle in Nuclear Component," PVP2007-26729.
- (14) Song T. K., Kim, Y. J., Lee, K. S., Park, C. Y., Kim, J. S. and Kim, J. W., 2007, "Sensitivity Analysis of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Weld," *Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting*. pp.63~68.
- (15) Song T. K., Kim, Y. J., Lee, K. S., Park, C. Y., Kim, J. S. and Kim, J. W., 2007, "Effect of Constraint and Internal Medium on Residual Stress under Overlay Welding for Dissimilar Metal Welding," *Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting*.
- (16) Song T. K., Bae H. Y., Kim Y. J, Lee, K. S., Park, C. Y., 2007, "A Study on the Residual Stress Relieving for Dissimilar Metal Weld under Weld," *Proceedings of the KWJS Fall Annual Meeting*.
- (17) K. S. Lee, C.Y Park, H. D. Kim, J. S. Kim, J. H. Park, June 2007, "Preliminary Evaluation of Primary Water Stress Corrosion Cracking Initiation Potential on Small Penetration Nozzle Welds by Residual Stress Analysis," *Journal of KPVP Vol.3* pp.101~108.
- (18) Lee H.Y, Kim J.B., Lee J.H., Kamran M. Nikbin, March 2006, "Comprehensive Residual Stress Distributions in a Range of Plate and Pipe Components," *Journal of Mechanical Science and Technology Vol. 20 No. 3* pp. 335~344.
- (19) Park J.U, Lee H. W, March 2007, "Effects of Initial Condition of Steel Plate on Welding Deformation and Residual Stress due to Welding," *Journal of Mechanical Science and Technology Vol. 21 No. 3* pp. 426~435.

- (20) Song T.K, Bae H.Y., Kim Y.J., Lee K.S., Park C.Y., Yang J.S., Huh N.S., Kim J.W., Park J.S., Song M.S., Lee S.G, Kim J.S., Yu S.C., Chang Y.S. Jan. 2009, “Assessment of Round Robin Analyses Results on Welding Residual Stress Prediction in a Nuclear Power Plant Nozzle,” *Journal of KSME* Vol. A pp.72~81.