

## 기계가공이 이종용접부의 잔류응력에 미치는 영향에 관한 연구

이경수<sup>\*,†</sup> · 이정근<sup>\*</sup> · 이성호<sup>\*</sup> · 박치용<sup>\*</sup> · 이승건<sup>\*\*</sup> · 박재학<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>한국전력공사 전력연구원 원자력발전연구소

<sup>\*\*</sup>한국전력기술주식회사 전력기술연구소

<sup>\*\*\*</sup>충북대학교 공과대학 안전공학과

### A Study on Machining Effects on Residual Stress at Dissimilar Metal Weld Region

Kyoung-soo Lee<sup>\*,†</sup>, Jeong-geun Lee<sup>\*</sup>, Seong-ho Lee<sup>\*</sup>, Chi-yong Park<sup>\*</sup>,  
Seung-geon Lee<sup>\*\*</sup> and Jai-hak Park<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>KEPCO Research Institute, Nuclear Power Generation Laboratory, Daejeon 305-380, Korea

<sup>\*\*</sup>KEPCO Engineering and Construction, Electric Power Technology Laboratory, Suweon 446-713, Korea

<sup>\*\*\*</sup>Chungbuk National University, Safety Engineering Department, Cheongju 361-763, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : leekys@kepri.re.kr

(Received December 3, 2010 ; Revised December 23, 2010 ; Accepted March 17, 2011)

#### Abstract

This paper aimed to understand the residual stress in the dissimilar metal welds of nuclear power plant. Two kinds of residual stress were considered, which caused by welding and machining. Residual stress due to mechanical machining was measured by hole-drilling technique and x-ray diffraction method for the SA508 and F316L. Weld residual stress at dissimilar metal weld between SA508 and F316L was evaluated by FEA. Residual stress profiles were obtained for the inside surface and through thickness of welds. Machining effect was also analyzed by FEA.

According to the residual stress measurement, it was observed that mechanical machining can generate tensile stress on the surface of the test material. However, FEA results showed that mechanical machining did not increase the tensile stress on the surface of weld region. Further study with more elaborate measurement and numerical analysis is required to identify the effect of machining on residual stress in the dissimilar metal weld region.

Key Words : Dissimilar metal welding, Stress corrosion cracking, Machining effect

#### 1. 서 론

원자력발전소의 원자로, 증기발생기, 가압기 등 주요 압력용기는 기본적으로 구조용 탄소강으로 제작되고 배관은 원자로형에 따라 스테인리스강 또는 탄소강으로 제작된다. 원전에서 기기와 배관을 연결하거나 배관과 배관의 연결에는 대부분 용접이 사용된다. 일반적으로 동일한 종류의 금속을 용접할 때보다 항복강도 및 열팽창계수가 다른 두 종류의 금속을 할 때 큰 용접잔류응

력이 생성된다. 재료물성 차이가 큰 두 종류의 금속을 용접할 경우에는 두 재료의 중간적인 성질을 보유한 재료를 용접재로 사용함으로써 용접을 용이하게 한다. 최근 Alloy 82 및 Alloy 182 용접재를 사용한 원전의 탄소강과 스테인리스강 접합 용접부에서 일차수용력부식균열로 알려진 균열이 발생하여서 이에 대한 많은 연구가 수행되고 있다<sup>1-5)</sup>. 균열발생의 주요 원인 중 하나로써 제작 중 용접잔류응력이 거론되고 있다<sup>6-7)</sup>. 균열 발생 위치가 원자로냉각재와 접촉하고 있는 노즐용접부 내면이므로 내면의 용접잔류응력 상태가 특히 중요한

의미를 가진다. 국내외에서 이중금속용접부의 용접잔류응력에 관한 많은 유한요소해석 연구가 수행되었으며<sup>8-13)</sup> 본 논문에서는 가압기 완충노즐 용접부의 용접부 및 주변의 용접잔류응력 크기 및 분포를 유한요소해석을 이용하여 평가하였다.

한편, 용접부는 용접후 외관 및 비파괴검사를 위하여 용접돌출부위를 그라인딩 등의 방법으로 제거한다. 국내 표준원전 가압기 완충노즐은 제작공정에 용접후 노즐 내면을 가공함으로써 최종 설계내경을 확보한다. 이들 기계가공은 재료에 절삭에너지를 부가하고 그에 따라 재료표면에 가공잔류응력을 생성할 수 있다<sup>14-15)</sup>. 본 논문에서는 그라인딩, 밀링 등 기계가공된 재료표면에서의 잔류응력 측정을 통해 이중용접부의 잔류응력에 미치는 기계가공의 영향을 살펴보았다.

## 2. 기계가공에 의한 잔류응력 측정실험

### 2.1 시편 제작

원자력발전소에서 널리 사용되고 있는 SA508 Gr.3 페라이트강과 F316L 스테인리스강 재료로부터 각각 시편을 제작하였다. SA508 Gr.3는 단조후 퀴칭-템퍼링된 블록으로부터 100 mm × 100 mm × 10 mm 크기로 시편이 제작되었고, F316L은 단조된 오스테나이트 스테인리스강 직경 200 mm인 블록으로부터 40 mm × 40 mm × 10 mm 크기로 시편을 제작하였다. 두 재료의 원 블록으로부터 표준시편을 제작하여 인장시험을 수행하였으며 그 결과는 다음 Table 1과 같았다.

제작된 시편에 대해 각각 밀링(M), 그라인딩(G), 방전가공(E)의 세 가지 방법으로 3mm씩 추가 가공을 수행하였으며 각각에 대한 가공조건은 다음 Table 2와 Table 3과 같다.

### 2.2 표면 잔류응력 측정

SA508 Gr.3 시편은 구멍뚫기법<sup>16)</sup>으로 잔류응력을 측정하였다. 구멍뚫기법은 구멍뚫기 전후 구멍주변의 변형을 변화를 감지하여 응력을 측정하는 방법이다. 천공장비는 Vishay사의 RS200을 사용하였고 스트레인게이지는 MM사의 CEA-06-062UL-120을 사용하였

**Table 1** Material properties of specimens at ambient temperature

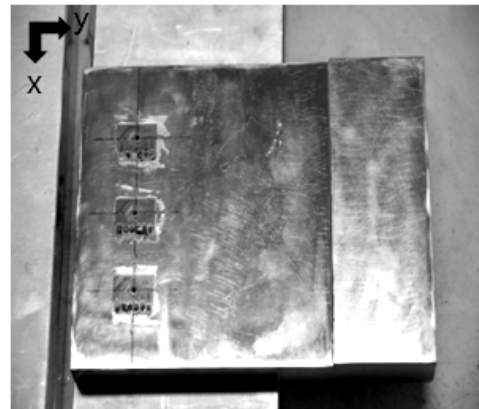
	SA508 Gr.3	F316L
Yield strength(MPa)	429.2	260
Tensile strength(MPa)	579.2	563.3
Elongation[%]	20.3	80.0

**Table 2** Machining condition for SA508 Gr.3 specimen

Type	Cutting condition
M	800rpm, oil-cooled, Φ120 cutter, cutting depth 0.3mm/cycle
G	oil-cooled, cutting depth: 0.03mm/cycle
E	oil-cooled, cutting depth: 3mm/cycle

**Table 3** Machining condition for F316L specimen

Type	Cutting condition
M	800rpm, oil-cooled, Φ60 cutter, cutting depth 1.3 or 0.2mm/cycle
G	oil-cooled, cutting depth 0.05~0.08mm/cycle
E	air-cooled, wire Φ0.09



**Fig. 1** Measuring positions of SA508 Gr.3 specimen

다. Fig. 1은 시편에 구멍을 뚫기전에 스트레인게이지가 부착된 모습이다. 세 지점의 잔류응력을 측정하였고 천공깊이는 2.06 mm 이었다.

측정결과를 Table 4와 Table 5에 나타내었다. 가공에 의해 금속표면에 형성되는 잔류응력은 내면으로 들어갈수록 그 크기가 감소한다. Table 4는 0.13 mm 지점의 값이고 Table 5는 0.26 mm 지점의 값이다. 구멍뚫기법으로는 1회의 천공으로 깊이 2.06 mm까지

**Table 4** Measured values of SA508 Gr.3 specimen at 0.13 mm depth

Type	Residual stress(MPa)					
	No.1		No.2		No.3	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_x$	$\sigma_y$
M	15.7	-20.3	-24.6	-47.8	-34.5	-24.9
G	98.0	-102	70.7	50.7	48.6	47.7
E	20.9	17.0	-11.5	16.2	16.7	-14.3

**Table 5** Measured values of SA508 Gr.3 specimen at 0.26 mm depth

Type	Residual stress(MPa)					
	No.1		No.2		No.3	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_x$	$\sigma_y$
M	0.5	-3.6	-19.3	-15.1	-4.8	-10.0
G	31.8	-47.6	22.8	30.6	24.1	23.3
E	9.9	9.2	-1.5	4.0	7.3	-4.0

0.13 mm 간격으로 각 깊이에서의 변형률 관독이 가능하다. 그림에서 x 방향이 절삭진행방향이고 y 방향은 절삭에 수직인 방향이었다.

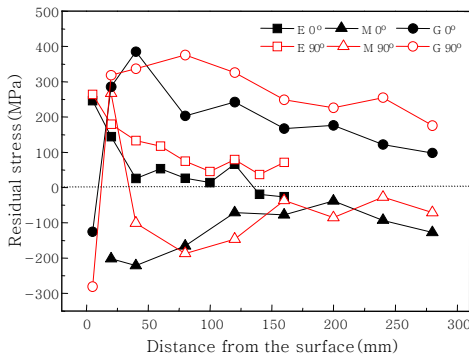
F316L 시편의 잔류응력측정은 구멍뚫기법에 비해 측정민감도가 높은 엑스선회절법을 사용하였다. 엑스선 회절법은 엑스선의 회절을 통해 금속의 원자간 격자간격을 측정하여 변형률의 변화를 계산하고 응력-변형률 관계로부터 잔류응력을 유도한다<sup>17)</sup>. 장비는 Rigaku사의 MSF-3M을 사용하였고 엑스선원은 Cr-K $\beta$ 를 사용하였다.

엑스선은 금속에 대한 투과깊이가 약 20  $\mu$ m 이내로서 엑스선회절법에 의해 측정되는 값은 20  $\mu$ m 이내의 표층에서의 잔류응력 값이다. 더 깊은 위치에서의 잔류응력을 측정하기 위해서는 전해연마로 표층을 제거한 후 측정을 반복해야 한다. 본 실험에서는 전해연마로 25  $\mu$ m 씩 표면을 제거하면서 약 0.3 mm 깊이 지점까지의 잔류응력을 측정하였다. 세 시편에 대한 측정결과를 Fig. 2에 도시하였다. 그림에서 0° 방향이 절삭진행 방향이고 90° 방향이 절삭에 수직인 방향이다.

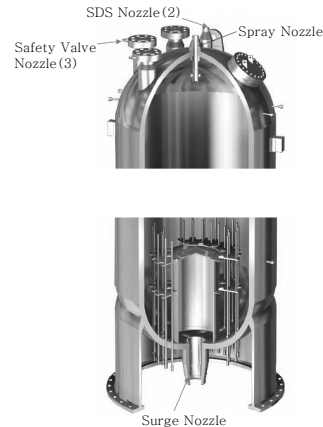
### 3. 용접잔류응력 유한요소해석

#### 3.1 해석 대상

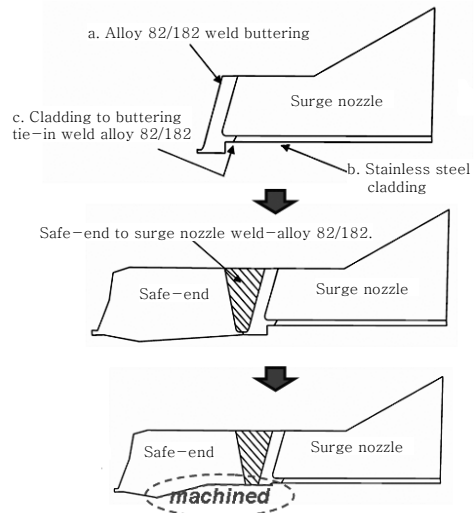
국내 표준형원전 가압기(Fig. 3) 밀립노즐(surge nozzle)의 이중용접부를 대상으로 용접잔류응력 해석을 수행하



**Fig. 2** Residual stresses on surface of F316 specimen



**Fig. 3** Typical pressurizer of nuclear power plant



**Fig. 4** The sequence of welding and machining

였다.

가압기는 원자력발전소에서 운전 중 온도가 가장 높은 기기로서 일차수용력부식발생 민감도가 상대적으로 다른 기기에 비해 높다. 가압기 노즐 이중 용접부의 재료로 노즐은 SA508 Gr.3, 노즐버터링 및 용접재는 Alloy 82/182, 안전단은 SA182 F316, 안전단과 배관의 용접에는 ER316L, 배관은 SA376 TP316이 사용되었다. 용접순서는 Fig. 4에 도시된 바와 같이 노즐과 안전단을 용접한 후 내면을 가공하여 용접부 루트를 제거하였다. 안전단과 배관은 현장에서 용접된다.

#### 3.2 유한요소해석 방법

##### 3.2.1 유한요소 모델링

용접부 잔류응력은 과도 열해석을 수행하여 얻은 시간에 따른 온도결과를 바탕으로 응력해석을 수행하여 계산할 수 있다. 잔류응력 해석을 위한 모델링 작업은

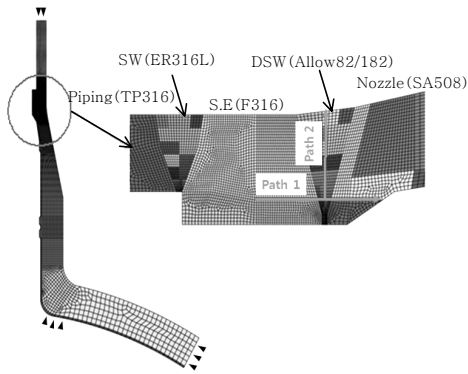


Fig. 5 FE model for analysis

상용 유한요소 모델 소프트웨어인 PATRAN<sup>18)</sup>을 사용하였고, 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS<sup>19)</sup>를 이용하여 열 및 응력 해석을 수행하였다. 모델링은 가압기 밀림노즐의 이종용접부(dissimilar weld)와 동종용접부(similar weld)를 모두 포함하였다. Fig. 5는 해석을 위해 작성된 유한요소해석 모델이다.

3.2.2 열해석

열해석에 사용된 재료물성치는 Fig. 6 ~ Fig. 9에서 제시한 바와 같이 ASME Code, Sec. II, 및 재료 공급자가 제공한 값들을 사용하였다.

열해석 시에는 8절점 축대칭(8-node axis-symmetric element) 요소인 DCAX8 요소를 사용하였으며, 용접 비드가 순서에 따라 용착되는 실제 용접 과정을 모사하기 위해 ABAQUS에서 제공하는 모델변경(model change) 기법을 사용하였다. 이때 해석시간의 단축을 위해 일괄 비드(lumped bead) 방법을 사용하였다. 용접비드의 적층 순서는 노즐에서 안전단(safe end) 방향으로, 배관에서 안전단 방향으로 용접되도록 하였다. 열해석 시 실제 용접과정을 모사하기 위하여 용접비드의 용착, 가열, 냉각의 3단계 절차로 구성되도록 입력파일을 작성

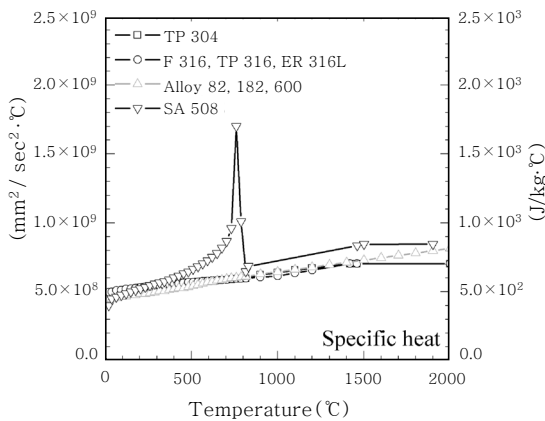


Fig. 6 Specific heat

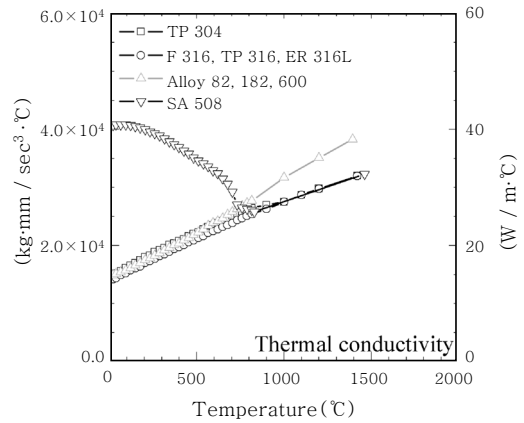


Fig. 7 Thermal conductivity

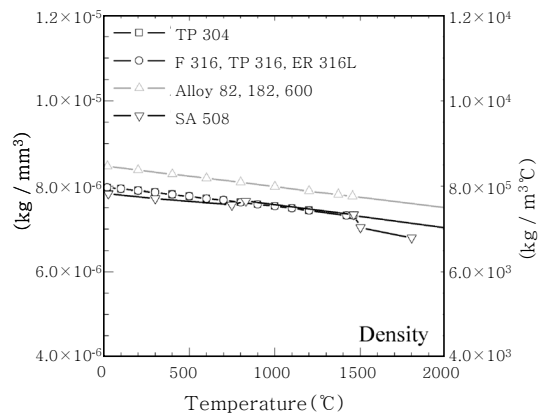


Fig. 8 Density

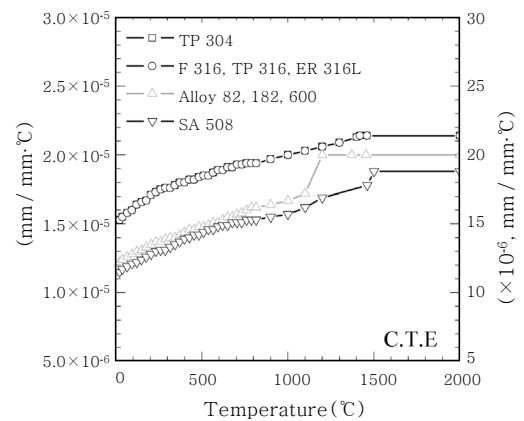


Fig. 9 Coefficient of thermal expansion

하였다. 용접시 초기온도는 예열에 의해 150°C가 유지되도록 하였고, ABAQUS의 모델변경 기법의 'Add' 명령을 사용하여 용접비드가 부착되도록 하였다. 그 다음 열유속을 통해 금속이 가열되어 용융되도록 하였는데, 이때 열유속은 체적 열유속만 고려하였고 용융부 형상이 용접선으로부터 1 mm 이내로 형성되도록 열유속을

19.9 W/mm<sup>3</sup>으로 조정하였다. 용접 시 용접비드가 부착되는 면은 단열조건이며, 그 외의 면들은 열대류계수가 28.4 W/m<sup>2</sup>인 자연대류 조건으로 설정하였다. 부착된 용접비드의 온도가 200°C 미만으로 냉각될 때까지 소요되는 시간을 반영하여 냉각시간을 설정하였다.

3.2.3 응력해석

응력해석에 사용된 재료물성치는 Fig. 10 ~ Fig. 12에서 제시한 바와 같이 ASME Code, Sec. II, 및 재료공급자가 제공한 값들을 사용하였다. 프와송비는 온도에 무관하게 일정한 값들을 갖도록 설정하였다(F316L, TP316은 0.27 및 Alloy 82/182는 0.27을, SA508 Gr.3은 0.29 사용).

응력해석 시에는 8절점 축대칭(8-node axis-symmetric element) 요소인 CAX8R 요소를 사용하였고, 보수적인 결과를 얻을 수 있도록 등방성 경화 구성방정식을 적용하였다. 용접 시 노즐의 끝단만 반경방향으로 움직일 수 있도록 구속조건을 설정하였고 나머지 부분은 모두 자유 조건으로 구속조건을 설정하였다. 용접 시 금속이 용융될 때 발생하는 응력의 풀림(annealing) 현상

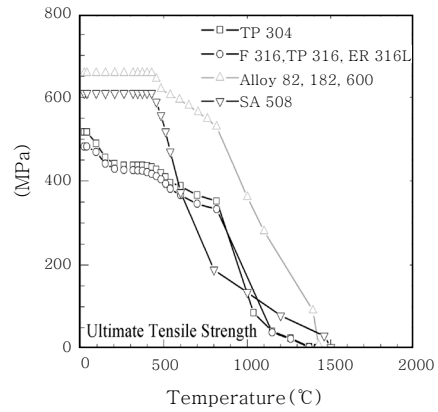


Fig. 12 Tensile strength

도 고려하였다. 이때 어닐링 온도는 SA508 Gr.3은 1501°C, Alloy 82/182은 1454°C, F316은 1460°C로 각 재료의 액상 온도(liquidus temperature)로 설정하였다.

3.2.4 해석 결과

해석결과를 Fig. 13 ~ Fig. 20에 나타내었다. 그림에서 path는 Fig. 5에 도시된 path를 의미하며, Path 1(P1)은 길이방향 경로이고 Path 2(P2)는 용접부 두께를 통과하는 경로이다. Fig. 13은 Fig. 5의

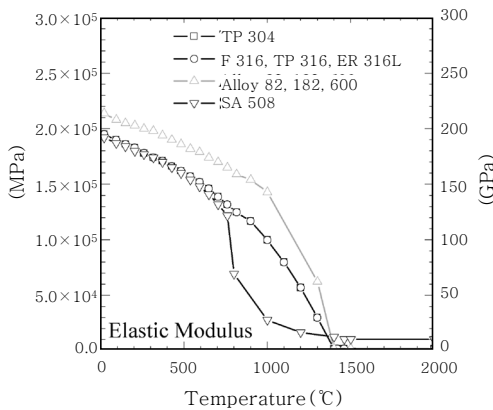


Fig. 10 Elastic modulus

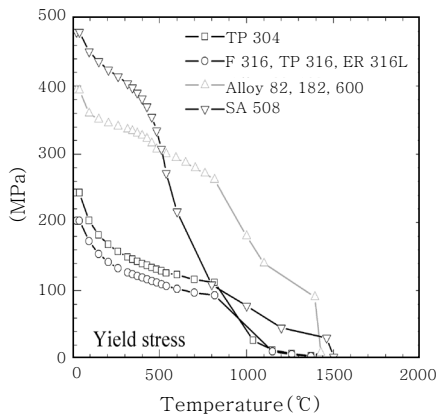


Fig. 11 Yield strength

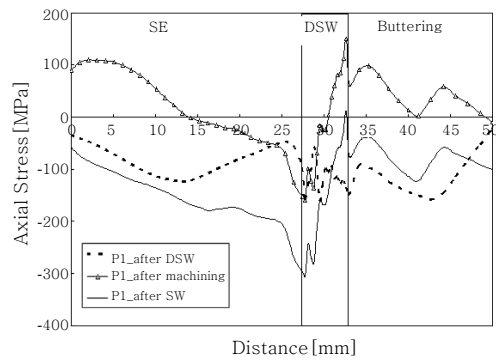


Fig. 13 Axial stress distribution(path 1)

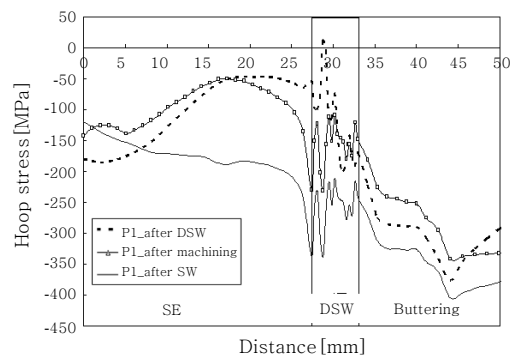


Fig. 14 Hoop stress distribution(path 1)

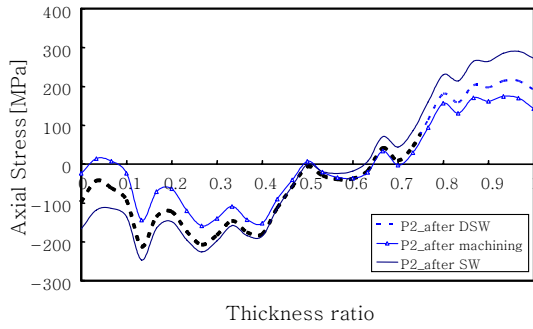


Fig. 15 Axial stress distribution(path 2)

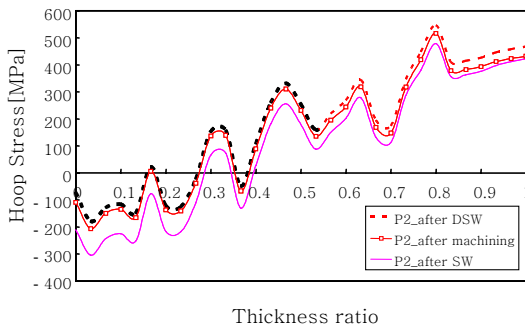


Fig. 16 Hoop stress distribution(path 2)

path 1을 따라 축방향 잔류응력분포이고 Fig. 14는 같은 부위에서 원주방향 잔류응력분포이다. 이중금속용접(DSW), 기계가공, 동종용접(SW) 각 단계별로 분포를 도시하였다.

Fig. 15는 이중금속용접부 Fig. 5의 path 2를 따른 축방향 잔류응력분포이고 Fig. 16은 같은 위치에서의 원주방향 잔류응력분포이다.

Fig. 17 ~ Fig. 20은 내면 기계가공의 영향을 고찰하기 위해 내면 기계가공 영역을 제외한 모델링에 이중금속과 동종금속 용접만을 적용하여 해석한 결과

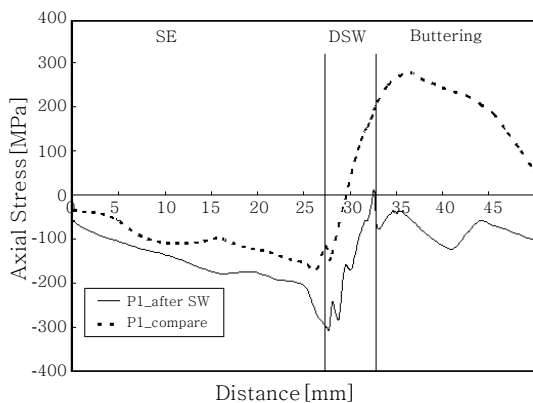


Fig. 17 Axial stress with/without machining effect (path 1)

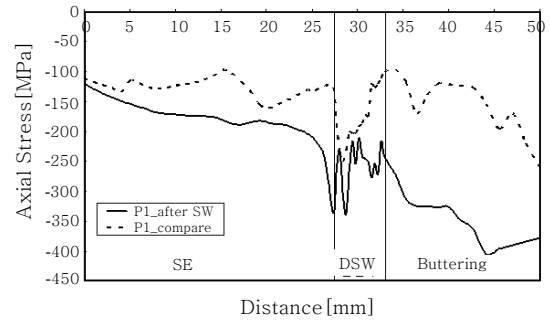


Fig. 18 Hoop stress with/without machining effect (path 1)

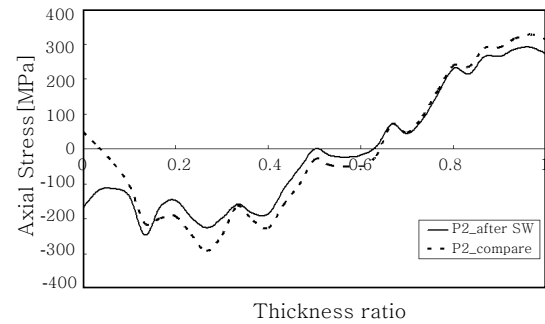


Fig. 19 Axial stress with/without machining effect (path 2)

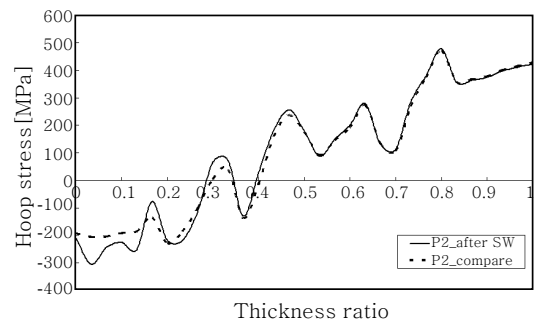


Fig. 20 Hoop stress with/without machining effect (path 2)

(“compare”)와 기계가공을 포함한 기존 모델링에 대한 해석결과(“after SW”)를 함께 나타낸 것이다. Fig. 17, 18은 path 1에서의 축방향응력 분포와 원주방향응력 분포이고, Fig. 19, 20은 path 2에서의 축방향응력 분포와 원주방향응력분포이다.

## 4. 고찰

### 4.1 기계가공 효과

SA508 Gr.3 시편의 잔류응력측정실험 결과에 의하

면 기계가공에 의해 금속표면에 부가되는 잔류응력은 -100~+100 MPa 수준이다. 밀링에 의해서는 압축응력이, 그라인딩에 의해서는 인장응력이 부가되는 것으로 확인되었다. 부가되는 응력의 크기는 그라인딩에 의한 값이 가장 크다. 일반적인 구멍뚫기법에 의한 측정 오차가 대략 20 MPa 정도<sup>20)</sup>인 것을 감안하면 방전가공에 의해서 금속표면에 부가되는 잔류응력은 무시할 수준인 것으로 판단된다. 표면으로부터 0.25 mm 정도 떨어진 지점에서 잔류응력 값은 현저히 감소하였고 0.5 mm 지점에서는 무시할 수 있는 수준이 되었다. 절삭 방향에 대한 효과는 뚜렷한 방향성을 나타내지 않았다.

F316L 시편에서 측정된 값은 -300~+400 MPa로서 이는 상온에서의 재료의 항복강도를 초과하는 매우 큰 값이다. 과연 20  $\mu$ m 이내의 표층에서는 그런 높은 잔류응력이 존재할 수 있는지 추가검토가 필요하다. 일반적으로는 오스테나이트 스테리니리스강과 같이 결정립이 조대한 경우 엑스선과 같이 짧은 파장으로는 정확한 잔류응력의 측정이 어려운 것으로 알려져 있다. SA508 Gr.3와 유사하게 재료에 부가되는 잔류응력의 크기는 그라인딩, 밀링, 방전가공 순서이었다. 방전가공에 의한 잔류응력효과는 무시할 수 있는 수준인 것으로 판단된다.

유한요소해석 결과에 의하면 기계가공효과를 모사한 경우가 기계가공을 모사하지 않은 경우보다 축방향 응력과 원주방향 응력 둘 다 내면(path 1)에서의 잔류응력 값이 전반적으로 더 낮은 인장 값을 지시하였다. 두께내부에서는 기계가공에 의한 효과는 나타나지 않았다. 유한요소해석에 의한 기계가공효과는 기계가공에 의해 부가되는 에너지를 모사한 것이 아니라 가공지역의 메쉬를 제거한 후 그에 따른 응력 재분포에 기인한 결과이므로 기계가공방법별 차이를 구분할 수 없으므로 이를 측정결과와 직접적으로 연계시키기는 곤란하다. 실제가공조건에 의한 잔류응력의 재분포에 미치는 영향을 정확하게 평가하기 위해서는 가공시 마찰열에 의한 효과와 소성변형에 대한 효과가 함께 고려되어야 할 것이다.

#### 4.2 균열발생에 미치는 영향

이종금속용접부에서의 일차수응력부식균열은 재료, 환경, 응력의 복합적인 요인에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 응력적인 관점에서 균열이 발생할 있는 최소인장응력(threshold stress)은 재료와 운전환경에 따라 가변적이다. 이에 관한 많은 연구가 진행 중에 있

으며 미국전력중앙연구소(EPRI)에서는 360°C 원자로 냉각수환경에서 Alloy 182의 threshold stress를 400 MPa로 제시한 바 있다<sup>21)</sup>. 본 연구에서 수행한 국내 표준원전 가압기 밀림노즐에 대한 응력해석결과에 의하면 기계가공 후 이종용접부에서의 최대인장응력이 축방향으로 약 150 MPa 정도로서 미국중앙전력연구소에서 제시한 400 MPa보다는 낮다. 다만, 밀링가공된 F316L 시편의 표면잔류응력 값이 최대 270 MPa로 측정되었는 바, 용접금속인 Alloy 82/182 재료에 대한 표면가공에 의한 잔류응력부가효과에 대한 추가 연구가 필요하다.

### 5. 결 론

본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) SA508 Gr. 3 및 F316L 재료의 표면에 밀링, 연삭, 방전가공의 절삭 수행 시 재료표면에 잔류응력이 형성되며 잔류응력이 형성되는 깊이는 0.5mm 이내이다.
- 2) 재료 및 가공방법에 따라 잔류응력은 인장 또는 압축응력을 형성한다.
- 3) 메쉬를 단순 제거하는 방법으로 기계가공효과에 대해 유한요소해석을 수행해 본 결과 기계가공에 의해 표면인장응력이 증가하는 현상은 예측되지 않았다.
- 4) 용접잔류응력을 측정할 경우는 재료표면에 형성되어 있는 기계가공에 의한 잔류응력을 고려하여야 한다.

### 참 고 문 헌

1. R.S. Pathania : PWSCC of Alloy 600 Materials in PWR Primary System Penetrations, EPRI TR-103696, July 1994
2. P. Scott : Experimental Program on the Effects of Surface Condition on Primary Water Stress Corrosion Cracking of Alloy 182 Welds, August 2007
3. R. Pathania : Mechanics and Mechanism of Environmentally Assisted Cracking of Alloys 132/182 in BWR and PWR Environments, October 2004
4. C. King, P. O'Regan : Alloy 82/182 Pipe Butt Weld Safety Assessment for U.S PWR Plant Designs, April 2005
5. R.H. Leggatt : Residual stresses in welded structures, IJPVP **85** (2008) 144-1511
6. K. Ahluwalia, C. King : Review of stress corrosion cracking of alloy 182 and 82 in PWR primary water service (MRP-220), EPRI, October 2007
7. P. O'Regan, Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106), EPRI, Palo Alto, CA:2004. 1009378
8. K.S. Lee, T.R. Kim, J.H. Park, M.W. Kim, S.Y. Cho : 3-D Characteristics of the Residual Stress in the

- Plate Butt Weld between SA508 and F316L SS, *KSMEA*, **33-4** (2009) 41-409 (in Korean)
9. K.S. Lee, C.Y. Park, H.D. Kim, J.S. Kim, J.H. Park : Preliminary Evaluation of Primary Water Stress Corrosion Cracking Initiation Potential on Small Penetration Nozzle Welds by Residual Stress Analysis, *Journal of KPVP*, **3** (2007) 101-108 (in Korean)
  10. Y.J. Kim., T.K. Song, H.Y. Bae, T.K. Song, H.Y. Bae, K.S. Lee, C.Y. Park, J.S. Yang, N.S. Huh, J.U. Kim, J.S. Park, M.S. Song, S.K. Lee, J.S. Kim, S.C. Yu, Y.S. Chang : Assessment of round robin analyses results on welding residual stress prediction in a nuclear power plant nozzle, *Transactions of the KSME A*, **33-1** (2009) 72-81 (in Korean)
  11. T.K. Song, H.Y. Bae, Y.B. Chun, C.Y. Oh, Y.J. Kim, K.S. Lee, C.Y. Park, Estimation of Residual Stress Distribution for Pressurizer Nozzle of Kori Nuclear Power Plant Considering Safe End, *Transactions of the KSME A* **32-8** (2008) 668-677 (in Korean)
  12. T.K. Song, H.Y. Bae, Y.J. Kim, K.S. Lee, C.Y. Park : Sensitivity Analysis of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Multi-Pass Weldment in Nuclear Power Plant, *Transactions of the KSME A* **32-9** (2008) 770-7816 (in Korean)
  13. S.B. Shin, D.J. Lee and D.H. Park : A Study on the Evaluation of Transverse Residual Stress at the Multi-pass FCA Butt Weldment using FEA, *Journal of the KWJS*, **28-4** (2010), 26-32 (in Korean)
  14. G. Parrish : Influence of microstructure on properties of case - carburised components, *Heat Treat. Met.* **4-2** (1977), 45-54
  15. W. Asano, J. Katsuyama, K. Onizawa, M. Mochizuki, M. Toyoda : Effect of Surface-Machining and Butt-Welding on Residual Stress and Hardness of Type 316L Stainless Steel Pipes, *Proceedings of PVP* 2008-61441, July 27-31, 2008
  16. ASTM, 2001, Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain gage method, *ASTM E837-01*
  17. SAE Handbook, Residual Measurement by X-Ray Diffraction, SAE J984a, 1971
  18. MSC, PATRAN, Ver. 2007, 2007
  19. HKS, ABAQUS, Ver. 6.8, 2008
  20. Jian Lu, "Handbook of Measurement of Residual Stress", The Fairmount Press Inc. 1996
  21. C. Harrington, Advanced FEA evaluation of growth of postulated circumferential PWSCC flaws in pressurizer nozzle dissimilar metal weld, *MRP-216 of EPRI*, August 2007