

SA508 탄소강 및 오스테나이트 스테인리스강의 표면잔류응력에 미치는 기계가공효과[§]

이경수^{*†}·이성호^{*}·박치용^{*}·양준석^{*}·이정근^{*}·박재학^{**}

^{*} 한전 전력연구원 원자력발전연구소, ^{**} 충북대학교 공과대학

Effects on Machining on Surface Residual Stress of SA 508 and Austenitic Stainless Steel

Kyoung-soo Lee^{*†}, Seong-ho Lee^{*}, Chi-yong Park^{*}, Jun-seok Yang^{*}, Jeong-geun Lee^{*} and Jai-hak Park^{**}

^{*} Nuclear Power Generation Laboratory, KEPCO Research Institute,

^{**} Safety Engineering Dept. of Chungbuk Nat'l Univ.

(Received December 10, 2010 ; Revised February 21, 2011 ; Accepted February 21, 2011)

Key Words: Surface Machining(표면가공), Residual Stress(잔류응력), Hole Drilling Methods(구멍뚫기법), X-ray Diffraction Method(엑스선회절법)

초록: 원자력발전소의 이중용접부에서 일차응력부식균열이 발생하고 있으며 용접부의 잔류응력이 균열발생 및 성장에 기여할 수 있다. 용접부의 잔류응력은 기본적으로 용접에 의해 형성되지만 기계가공에 의해 표면잔류응력상태가 변화할 수 있다. 본 논문에서는 기계가공이 원전재료인 SA508 과 오스테나이트 스테인리스강에 표면잔류응력에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 SA508, TP304, F316L 재료를 연마, 연삭, 방전가공으로 가공한 후 표면에 형성되는 잔류응력을 측정하였다. 측정방법은 구멍뚫기법과 엑스선회절법을 사용하였다. 기계가공방법에 따라 각 재료에 미치는 잔류응력의 크기 및 방향, 잔류응력이 형성되는 깊이 등의 특성을 확인하였다.

Abstract: Primary water stress corrosion cracking has occurred in dissimilar weld areas in nuclear power plants. Residual stress is a driving force in the crack. Residual stress may be generated by weld or surface machining. Residual stress due to surface machining depends on the machining method, e.g., milling, grinding, or EDM. The stress is usually distributed on or near the surface of the material. We present the measured residual stress for machining on SA 508 and austenitic stainless steels such as TP304 and F316. The residual stress can be tensile or compressive depending on the machining method. The depth and the magnitude of the residual stress depend on the material and the machining method.

1. 서 론

원자력발전소의 원자로냉각재계통에는 탄소강과 스테인리스강이 상호 용접되어 있는 용접부가 많다. 탄소강과 스테인리스강은 항복강도, 열전도도, 열팽창계수 등 재료물성이 다르기 때문에 이 두 금속을 용접하면 용접부 및 용접부 주변에 재료불

일치에 의한 미세조직의 변화 및 잔류응력이 발생하게 된다. 최근 이들 이중금속용접부에서 일차수 응력부식균열이 발생하고 있다. 일차수응력부식균열의 생성메커니즘은 아직 정확히 밝혀지지 않은 상태이다. 공통적인 현상은 노즐 용접부 또는 열 영향부 내부표면에서 균열이 시작되는 것이다. 내면은 고온의 원자로냉각재에 접촉되어 있어서 환경적으로 대기에 접촉되어 있는 외부 표면에 비해서 균열발생민감도가 높다고 할 수 있다. 또한 균열이 생성하기 위해서는 인장응력이 존재해야 하는데 내압과 용접잔류응력이 인장응력을 발생시키

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, leekys@kepri.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

는 주요 인자이다. 내압은 설계조건으로서 설계와 제작에 반영되어 있으나 용접잔류응력은 용접의 복잡한 현상 때문에 정확한 해석이 쉽지 않아 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.⁽¹⁻⁶⁾

본 연구는 용접모형의 잔류응력해석 및 측정연구과정에서 해석값과 측정값 사이에 편차가 발생하는 것을 발견하고 그 원인을 규명하기 위한 작업의 일환으로 수행되었으며 본 논문에서는 용접 후 표면처리를 위한 기계가공과정에서 발생하는 응력과 일차수응력부식균열 생성간의 상관관계를 고찰하였다. 이를 위해 원자력발전소의 노즐 및 배관재료로 사용되는 SA508 탄소강과 TP304, F316L 오스테나이트 스테인리스강으로 시편을 제작하고 밀링(milling), 연마(grinding), 방전가공(EDM: electric discharge machining)의 다른 기계가공작업을 부가하여 각각의 기계가공이 재료표면에 부가하는 잔류응력을 측정하였다.

2. 시편제작 및 잔류응력측정

2.1 SA 508

원자력발전소의 압력용기재료인 SA508 강 시편 3 개를 Fig. 1, 2 와 같이 100 mm x 100 mm x 10 mm 로 제작하여 밀링(M), 연마(G), 방전가공(E)을 수행하고 가공 전후의 잔류응력을 측정하였다. 측정은 Vishay 사의 RS200 천공장비와 엔드밀을 사용하였고 스트레인게이지는 MM 사의 CEA-06-062UL-120 을 사용하였다. 천공깊이는 2.06 mm 이었고 시편당 3 지점을 측정하였다. 각 시편은 스트레인 게이지 부착을 위하여 시편표면에 핸드폴리셔와 사포를 이용하여 Gr.400, Gr.600, Gr.1000 의 순서로 표면처리되었다. 기계가공조건은 Table 1 에, 측정 결과는 Table 2 와 Table 3 에 나타내었다. 측정값은 표면으로부터 0.13 mm 지점의 값이다.



Fig. 1 Specimen before machining

시편은 제작당시 밀링으로 가공되었으므로 Table 2 는 사실상 밀링에 의한 값으로 보아도 무방하다. 밀링에 의해 SA508 탄소강 표면에 부가되는 잔류응력은 약 -60~+50 MPa 정도 수준임을 알 수 있다. Table 3 의 결과에 의하면 SA508 탄소강을 밀링, 연마, 방전가공으로 가공하였을 때 표면에 -100~100 MPa 정도의 잔류응력을 부가할 수 있는 것으로 생각된다. 일반적인 천공법에 의한 측정오차가 대략 20 MPa 정도⁽⁷⁾인 것을 감안하면 방전가

Table 1 Machining condition on SA508

Type	Cutting condition
M	Milling, 800 rpm, oil cooling, Φ 120 cutter, cutting depth 0.3 mm/cycle,
G	Grinding, oil cooling, cutting depth 0.03 mm/cycle
E	EDM, oil cooling, cutting depth 3 mm/cycle

Table 2 Residual stresses before machining at 0.13 mm depth

Type	Position					
	No.1		No.2		No.3	
	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]
M	-42.5	-39.3	-22.8	-42.7	-35.3	21.0
G	-30.0	-53.9	-33.8	-59.1	-37.6	-27.9
E	10.7	3.9	23.3	-8.7	15.9	48.4

Table 3 Residual stresses after machining at 0.13 mm depth

Type	Position					
	No.1		No.2		No.3	
	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]
M	15.7	-20.3	-24.6	-47.8	-34.5	-24.9
G	98.0	-102.2	70.7	50.7	48.6	47.7
E	20.9	17.0	-11.5	16.2	16.7	-14.3

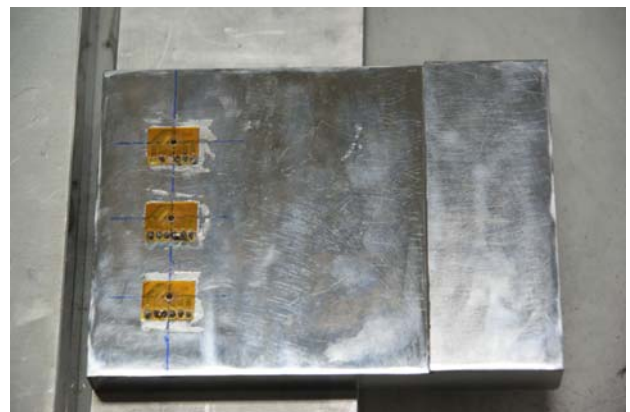


Fig. 2 Specimen after machining (milling)

Table 4 Residual stresses after machining at 0.25 mm depth

Type	Position					
	No.1		No.2		No.3	
	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]
M	0.5	-3.6	-19.28	-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

Table 5 Residual stress on surface of cold-rolled 304 (IIT)

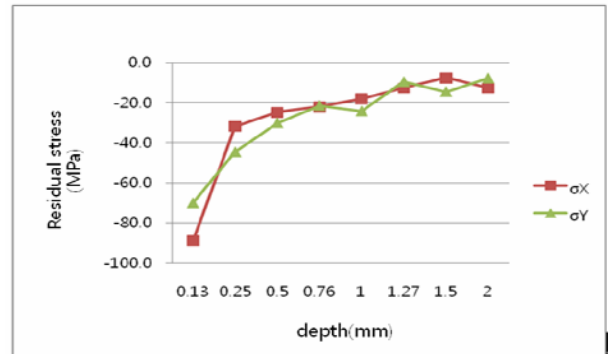
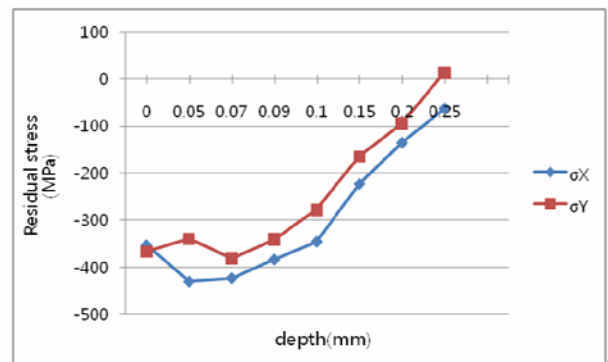
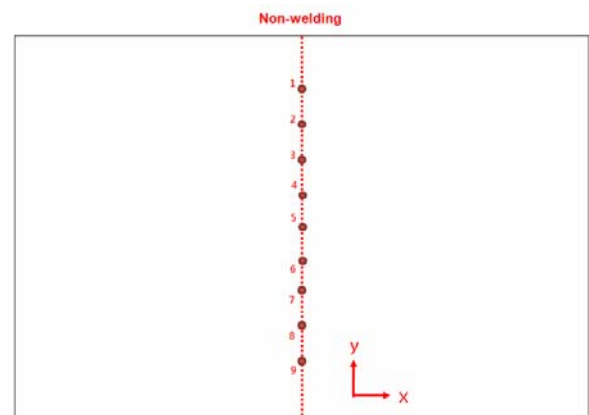
No.	Position(mm)	Residual stress(MPa)	
		σ_x	σ_y
1	40	-23.4	-32.3
2	30	-25.5	-33.8
3	20	-28.2	-35.7
4	10	-15.7	-27.0
5	0	-12.5	-27.7
6	-10	-18.2	-28.8
7	-20	-23.1	-32.2
8	-30	-9.2	-22.4
9	-40	-23.2	-32.2
평균		-20.0	-30.2

공을 수행할 경우 재료에 부가되는 표면잔류응력은 무시할 수 있는 수준인 것으로 판단된다. 연마가공의 경우가 재료표면에 부가되는 잔류응력의 크기가 다른 가공방법에 비해 상대적으로 큰 것으로 측정되었다.

기계가공에 의한 잔류응력이 미치는 깊이를 관찰하였으며 Table 4에 0.25 mm 깊이에서의 측정값을 나타내었다. 밀링과 방전가공의 경우는 0.25 mm 지점의 잔류응력은 거의 무시할 수 있는 수준이며 연마의 경우에는 현저히 감소한 것이 관찰되었다. 연마의 경우도 0.5 mm 깊이에서는 무시할 수 있는 수준으로 감소하였다.

2.2 TP304

원자력발전소 배관재료인 TP304 오스테나이트 스테인리스강을 냉간압연한 판재를 180 mm x 120 mm x 16.1 mm 로 절단한 시편에 대해서 구멍뚫기법, 엑스선회절법, 계장압입법의 세 가지 방법으로 표면잔류응력을 측정하였다. 구멍뚫기법으로는 SA508의 경우와 동일하게 Vishay사의 RS200 천공장비와 엔드밀을 사용하였고 스트레인게이지는 MM사의 CEA-06-062UL-120을 사용하였다. 엑스선회절식 잔류응력 측정장비는 Stresstech사의 XSTRESS 3000을, Target은 망간을 사용하였다. 계장압입법 잔류응력 측정장비는 프론틱스사의 AIS 3000을 사용하였다. 구멍뚫기법으로는 2 mm

**Fig. 3** Residual stress on surface of cold-rolled 304 (HDM)**Fig. 4** Residual stress on surface of cold-rolled 304 (XRD)**Fig. 5** Measured Location of cold-rolled 304 (IIT)

깊이까지 천공한 상태로 약 0.25 mm 깊이마다 데이터를 취득하였고 엑스선회절식은 0.25 mm 깊이까지 50 μ m 깊이씩 전해연마를 수행하면서 데이터를 취득하였다. 계장압입법은 약 0.2~0.3 mm 정도로 압입된 상태에서의 단일값이다. 계장압입법으로는 9개 지점의 평균값이다. 구멍뚫기법에 의한 측정결과는 Fig. 3에, 엑스선회절법에 의한 측정결과는 Fig. 4에 나타내었다. 압입법의 측정위치와 결과는 각각 Fig. 5와 Table 5에 나타내었다.

측정값에 의하면 압연된 오스테나이트 TP304

스테인리스강에는 표면에서 구멍뚫기법에 의하면 약 -100 MPa 의 압축응력이, 엑스선회절법에 의하면 약 -400 MPa 의 압축응력이, 압입법에 의하면 약 -30 MPa 의 압축응력이 부가됨을 알 수 있다. 잔류응력이 미치는 깊이는 약 0.25 mm 정도이다. TP304 스테인리스강의 항복강도가 약 200~260 MPa 임을 고려하면 엑스선회절법에 의한 측정값은 오차가 매우 큰 것으로 판단된다. 구멍뚫기법에 의한 값이 0.25 mm 깊이에서의 값이 σ_x 가 -30 MPa, σ_y 가 -43 MPa 로서 압입법의 값과 비슷하였다.

2.3 F316L

오스테나이트 F316L 스테인리스강은 원자력발전소 가압기 노즐의 안전단 및 배관재료로 사용된다. 3 개의 F316L 시편을 방전가공으로 40 mm x 40 mm x 10 mm 로 1 차 가공한 후, 다시 밀링, 연마, 방전가공으로 각각 3 mm 를 추가 가공하여 표면에서의 잔류응력을 측정하였다. 잔류응력측정은 엑스선회절법을 이용하였고 측정장비는 RIGAKU 사의 MSF-3M 를 사용하였다. Target 은 Cr-K β 을 사용하였다. 가공조건 및 측정결과를 Table 6 과 Fig. 6 에 나타내었다.

Table 6 Machining condition on F316L

Type	Cutting condition
M	Milling, 800 rpm, oil cooling, Φ 60 cutter, cutting depth 1.5, 1.3, 0.2 mm/cycle,
G	Grinding, oil cooling, cutting depth 0.05~0.08 mm/cycle
E	EDM, wire Φ 0.09, air cooling, wire speed 10V _h

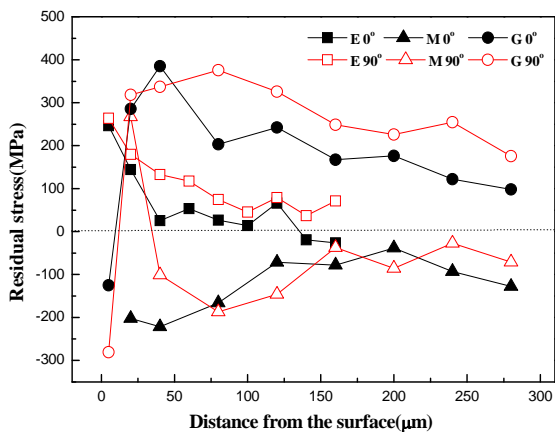


Fig. 6 Residual stress on the surface of F316L

엑스선은 금속에 대한 투과깊이가 약 20 μ m 이 내로서 엑스선에 의한 회절법은 20 μ m 이내의 표층에서의 잔류응력값을 지시한다. TP304 의 경우와 유사하게 F316L 에 대해서도 표층에서 -300 ~400 MPa 의 매우 큰 잔류응력값을 나타내었으며 이는 재료의 항복강도를 초과하는 값이다. 과연 20 μ m 이내의 표층에서는 그런 높은 잔류응력이 존재할 수 있는지 추가 검토가 필요하다. 일반적으로는 오스테나이트 스테인리스강과 같이 결정립이 조대할 경우 엑스선과 같이 짧은 파장으로는 정확한 잔류응력을 측정하기가 어려운 것으로 알려져 있다. 전해연마로 약 25 μ m 씩 표면을 제거하면서 내면의 잔류응력을 측정할 결과 방전가공의 경우는 약 0.05 mm 지점에서 잔류응력이 거의 사라졌으며 밀링의 경우는 약 0.15 mm 깊이에서, 연마의 경우는 약 0.3 mm 지점에서 잔류응력이 사라지는 것으로 측정되었다.

방전가공은 표층에서 큰 인장응력이 작용하여 내부로 갈수록 점차로 감소한 반면 연마의 경우는 표층에서는 큰 압축응력이 작용하다가 내부에는 인장응력이 천이하는 특성을 나타내었다.

3. 결론

원자력발전소의 압력용기재료인 SA508 탄소강과 노즐안전단 및 배관재료인 TP304, F316L 스테인리스강의 기계가공에 의한 표면잔류응력을 측정하였고 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) SA508 을 일반적인 밀링, 연마, 방전가공으로 가공할 경우 잔류응력이 작용하는 깊이는 0.5 mm 이내이고 0.25 mm 이후의 잔류응력은 무시할 수 있는 수준이다. 연마가 가장 큰 잔류응력을 부가하였고 그 크기는 -100~100 MPa 정도이다.

(2) TP304 스테인리스강을 냉간압연할 경우 재료에는 압축잔류응력이 작용하며 압축응력이 작용하는 깊이는 약 0.5 mm 정도이다.

(3) F316L 스테인리스강을 일반적인 밀링, 연마, 방전가공으로 가공할 경우 잔류응력이 작용하는 깊이는 0.3 mm 이내이다. SA508 의 경우와 동일하게 잔류응력이 작용하는 깊이는 연마, 밀링, 방전가공순이다.

(4) 엑스선 회절법에 의해 측정된 TP304 및 F316L 스테인리스강의 잔류응력값은 표면에서 항복강도를 초과하는 높은값이 지시되었는 바, 과연 20 μ m 이내의 표층에서는 그런 높은 잔류응력이 존재할 수 있는지 추가 검토가 필요하다.

(5) 기계가공에 의한 잔류응력만으로는 재료에 균열이 생성되지 않겠지만, 용접잔류응력과 같은 인장응력이 작용하고 있는 상태에서는 기계가공에 의해 인장잔류응력값이 추가되므로 균열생성에 영향을 줄 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Lee, K.S., Kim, T.R., Park, J.H., Kim, M.W. and Cho, S.Y., 2009, "3-D Characteristics of the Residual Stress in the Plate Butt Weld Between SA508 and F316L SS," *Trans. of the KSME A Vol. 33*, No. 4, pp. 401~409.
- (2) Lee, K.S., Park, C.Y., Kim, H.D., Kim, J.S. and Park, J.H., 2007, "Preliminary Evaluation of Primary Water Stress Corrosion Cracking Initiation Potential on Small Penetration Nozzle Welds by Residual Stress Analysis," *Journal of KPVP No. 3*, pp. 101~108.
- (3) Kim, Y.J., Song, T.K., Bae, H.Y., Song, T.K., Bae, H.Y., Lee, K.S., Park, C.Y., Yang, J.S., Huh, N.S., Kim, J.U., Park, J.S., Song, M.S., Lee, S.K., Kim, J.S., Yu, S.C. and Chang, Y.S., 2009, "Assessment of Round Robin Analyses Results on Welding Residual Stress Prediction in a Nuclear Power Plant Nozzle," *Transactions of the KSME A Vol. 33*, No. 1, pp. 72~81.
- (4) Song, T.K., Bae, H.Y., Chun, Y.B., Oh, C.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S. and Park, C.Y., 2008, "Estimation of Residual Stress Distribution for Pressurizer Nozzle of Kori Nuclear Power Plant Considering Safe End," *Transactions of the KSME A Vol. 32*, No. 8, pp. 668~677.
- (5) Ahluwalia, K. and King, C., 2007, "Review of Stress Corrosion Cracking of Alloy 182 and 82 in PWR Primary Water Service (MRP-220)," *EPRI*.
- (6) Song, T.K., Bae, H.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S. and Park, C.Y., 2009, "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 Vol. 32*, No. 9, pp. 770~781.
- (7) Lu, J., 1996, "Handbook of Measurement of Residual Stress," The Fairmount Press Inc.