

TP 316L 스테인리스강의 기계가공 및 열처리에 의한 표면잔류응력 특성 측정 연구[§]

이경수*† · 이정근* · 송기오* · 박재학**

* 한전 전력연구원 원자력발전연구소, ** 충북대학교 공과대학 안전공학과

Study on Effect of Mechanical Machining and Heat Treatment on Surface Residual Stress of TP316L Stainless Steel

Kyoung-soo Lee*†, Jeong-keun Lee*, Ki-o Song* and Jai-hak Park**

* Nuclear Power Generation Laboratory, KEPRI

* Dept. of Safety Engineering, Chungbuk Nat'l Univ.

(Received December 17, 2009 ; Revised February 11, 2011 ; Accepted February 14, 2011)

Key Words: Residual Stress(잔류응력), X-ray Diffraction Method(엑스선회절법), Mechanical Machining(기계가공), Heat Treatment(열처리)

초록: 본 논문은 TP316L 스테인리스강 재료에 대한 표면 기계가공 및 열처리에 의한 잔류응력의 생성 및 변화에 대해 연구한 것이다. 연구를 위해서 TP316L 시편에 대해 방전가공, 밀링, 연마의 3 가지 기계가공을 수행하고 표면의 잔류응력을 측정하였다. 동일한 방법으로 기계가공한 다른 시편은 열처리를 수행한 후에 표면잔류응력을 측정하여 열처리를 수행하지 않은 시편과의 차이를 비교하였다. 잔류응력측정은 엑스선회절법을 사용하였다. 또한 각 시편에 대해 비커스경도를 측정하여 열처리 수행전과 수행후의 경도를 비교하였다. 본 연구를 통해서 기계가공 방법에 따라 잔류응력의 형태가 달라지며 열처리에 의해서 대부분의 잔류응력이 제거됨이 확인되었다. 경도는 잔류응력의 인장 또는 압축의 방향에는 관계없이 크기에만 관련성이 있는 것으로 관찰되었다.

Abstract: We study the effect of mechanical machining and heat treatment on the surface residual stress of TP 316L stainless steel. Electrical discharge machining (EDM), milling and grinding were applied to TP 316L plate specimens. The residual stress and hardness were measured and the effect of heat treatment on the surface residual stress was examined. The residual stress was measured by the X-ray diffraction method, which showed that the surface residual stress was related only to the stress magnitude and was independent of the compressive or tensile component. The surface residual stress was greatly decreased by the heat treatment, but it was not removed completely.

1. 서론

원자력발전소의 원자로, 증기발생기, 가압기 등 주요 기기는 구조용 탄소강으로 제작되고 이들 기기를 연결하는 배관은 배관용 스테인리스강 또는 탄소강으로 제작된다. 주기와 배관 사이는 용접으로 연결되어 있다. 최근 주기와 배관 사이의 용접부에서 일차수응력부식균열이 발생하고 있으

며 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 일차수응력부식균열 발생 원인 중 하나로서 용접 중 발생하는 과도한 인장잔류응력이 지목되고 있으며 용접잔류응력을 정확하게 평가하기 위한 해석 및 측정에 관한 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 수행되었다. 용접잔류응력해석에서는 용접과정만을 고려하고 기계가공효과는 고려하지 않는 반면, 용접시편은 제조과정에서 용접뿐만 아니라 기계가공작업이 수반되므로 이로 인해 해

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회(2009.

11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author : leekys@kepri.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

석결과와 측정결과 사이에 편차가 있을 수 있는 것으로 추정되었다. 이를 위해 원자력발전소의 배관 및 노즐재료로 널리 사용되는 TP 316L 오스테나이트 스테인리스강으로 시편을 제작하고 제작 및 잔류응력측정 과정에 수반되는 기계작업을 추가하여 기계작업이 재료표면에 미치는 잔류응력의 영향을 평가하고자 하였다. 잔류응력측정방법은 연구의 일관성을 위해 기존 연구에서 사용하였던 엑스선회절법을 사용하였다. 잔류응력과 경도간의 상관관계 및 열처리 효과에 대해서도 함께 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 시편제작

실험을 위하여 원자력발전소의 압력용기 노즐 안전단 또는 배관재료로 사용되는 TP 316L 스테인리스강으로 40(l)×40(w)×10(t) mm 크기의 시편 6 개

Table 1 Chemical composition of TP 316L stainless steel (wt.%)

C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	Si	S	Fe
0.03	17	2.0	2.5	12	0.045	1	0.03	65

Table 2 Mechanical processing condition

Milling	
Tip dia.	Cutter Ø 60
Tip speed	800 rpm
Work speed	200 mm/min
Depth of cut	1.5, 1.3, 0.2 mm/cycle
Environment	Cutting fluid(tapping)
Grinding	
Wheel dia.	Ø 150 (O.A #46)
Wheel speed	3600rpm
Work speed	9m/min
Depth of cut	0.05~0.08mm/cycle
Environment	Cutting fluid (water-soluble)
EDM	
Wire dia.	Ø 0.09
Power	4P
Off-time	9µm
Servo, GAP	30V
Wire speed	10 V _h
Voltage	38V
Feed rate	1.8
Cutting time	0.05mm/min
Offset	0mm
Limit	1.2mm/min
Environment	dry

를 제작하였다. 절단은 방전가공을 사용하였다. TP 316L의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다.

기계가공 방법별 차이를 알아보기 위해 밀링, 연삭, 방전가공으로 각 2 개씩 시편의 상부표면을 3mm 추가 가공하였다. 제작과정을 Fig. 1에 도시하였으며 가공조건은 Table 2에 나타내었다. 밀링은 가공 깊이를 3 단계로 하여 가공하였고, 연삭과 방전가공은 일정 깊이로 반복 가공하였다.

2.2 잔류응력 측정

엑스선회절법을 이용하여 각 시편 표면에서의 잔류응력을 측정하였다. 장비는 RIGAKU사에서 제작한 MSF-3M를 사용하였으며 측정조건은 Table 3과 같았다.

각각의 기계가공에 의해 생성되는 잔류응력이 어느 깊이까지 영향을 주는 지를 확인하기 위해 시편 표면으로부터 일정 깊이씩 전해연마를 수행한 후 해당 깊이에서의 잔류응력을 측정하였다. 응력방향은 가공방향을 0°, 이에 수직한 방향을 90°로 하였다.

2.3 경도측정

잔류응력과 경도간의 상관관계를 확인하기 위해 비커스 경도를 측정하였다. Figure 2와 같이 고속 절단기로 시편을 절단하였으며 절단 후 두 개의 수직표면에서 경도를 측정하였다. 가장자리 영향을 고려하여 표면으로부터 5µm 지점부터 측정을 시작하였고 깊이 방향은 50µm 간격으로 측정하였다. 동일 깊이에 대해서는 5 지점을 측정하여 평균 경도 값을 구하였다.

Table 3 X-ray diffraction condition

γ-Fe(austenite stainless steel)	
Target	Cr-Kβ
Diffraction plan	(311)
Diffraction angle	148.52°
Divergence & Receiving slit	1°
Tube voltage	30KV
Tube current	10mA
Analysis method	Iso-inclination

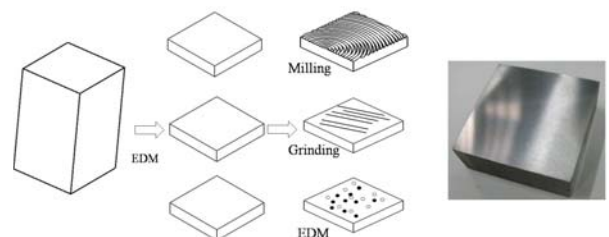


Fig. 1 Manufacturing process of specimens

2.4 열처리

각 가공방법에 의해 발생한 잔류응력이 열처리에 의해 제거되는 정도를 확인하기 위해 동일 방법으로 가공된 나머지 시편에 대해 고용화 열처리 (solid solution annealing)를 수행하였다. 열처리 방법은 진공 열처리로를 이용하여 고진공 상태에서 1150℃로 30 분간 유지 후 액화질소를 이용하여 상온까지 냉각하였다. 가열 및 냉각과정은 Fig. 3 과 같았다. 열처리 수행 후 동일한 방법으로 잔류응력 및 경도를 측정하여 열처리를 수행하지 않은 경우와 결과를 비교하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 가공 잔류응력분포

밀링, 연삭 및 방전가공으로 가공된 각 시편에서의 측정된 잔류응력분포를 Fig. 4 에 나타내었다. Figure 4 에서 M 은 밀링, G 는 연삭, E 는 방전가공을 나타낸다.

밀링 시편에서는 표면으로부터 5μm 이내에서는 엑스선 회절신호를 검출할 수가 없었다.

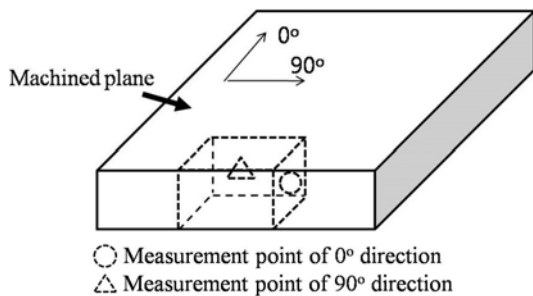


Fig. 2 Hardness measurement point

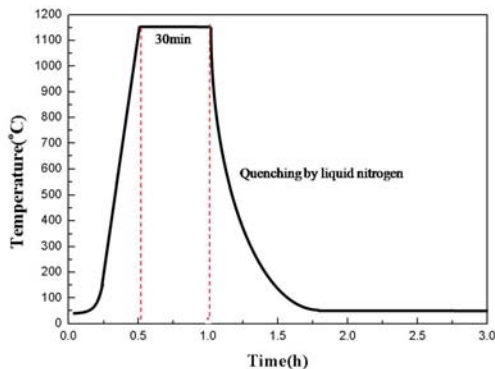


Fig. 3 Solid solution annealing condition for TP 316 stainless steel

이의 확인을 위해 표면 거칠기를 측정하였으며 5μm 전해연마상태에서의 표면 거칠기(Ra)값이 커터진 행방향으로는 2.72μm, 수직방향으로는 2.65μm 로 확인되었다(Fig. 5). 표면 거칠기가 크면 엑스선의 산란이 심하여 수집되는 신호의 강도가 약하여 정상적인 회절신호를 얻는 것이 불가능하다. 20μm 정도 전해연마를 수행한 이후부터 엑스선 신호로부터 잔류응력 측정이 가능하였다. 20μm 전해연마상태에서의 표면 거칠기는 0.1~0.93μm 이었다.

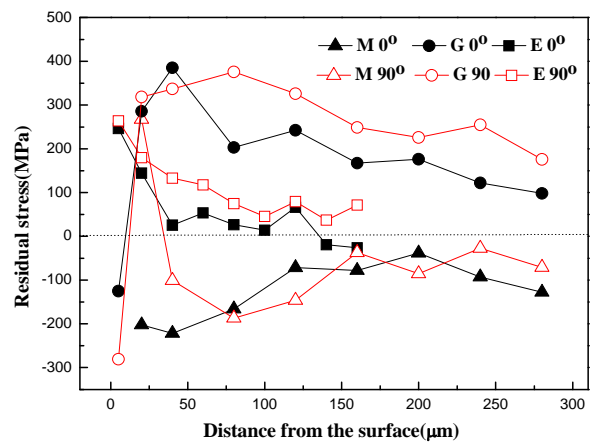


Fig. 4 Residual stress profiles along depth

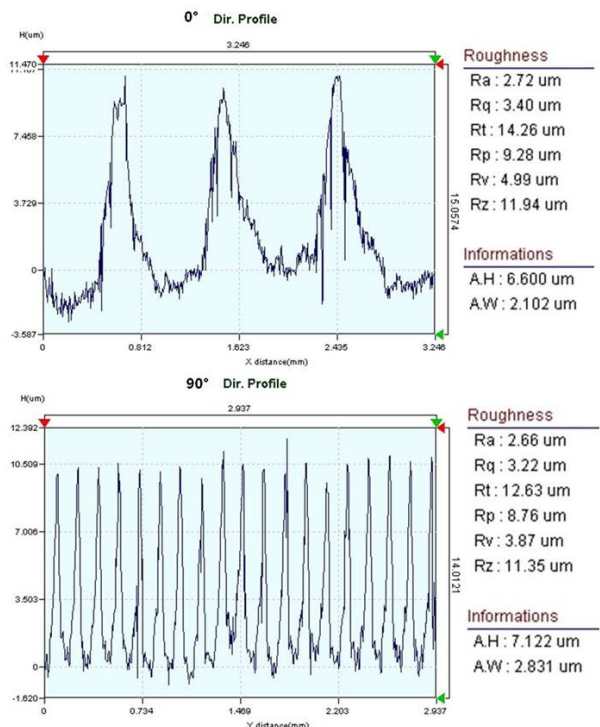


Fig. 5 Roughness of milled specimen at 5μm

20 μm 지점에서 0° 방향으로 200MPa 정도의 압축응력이, 90° 방향으로 280MPa 정도의 압축잔류응력이 측정되었다. 약 40 μm 지점에서는 두 방향 모두 압축응력상태를 나타내었고 약 75 μm 이후에서는 두 방향의 값이 서로 비슷한 값을 나타내었으며 150 μm 이후에서는 잔류응력이 거의 없는 것으로 확인되었다. 엑스선회절법의 측정경험상 100MPa 이내는 계속오차로 간주하였다. 본 결과에 의하면 밀링에 의한 표면가공효과는 약 75 μm 깊이 정도까지 잔류응력을 생성시키며 절삭방향에 따라 인장 또는 압축 잔류응력을 형성하는 것을 알 수 있다. Figure 5의 표면 거칠기 측정사진에 의하면 방향별 재료 절삭량(첨두값 사이의 거리)이 차이를 보여주며 이러한 차이로 인해 인장 또는 압축 잔류응력값을 갖는 것으로 추정된다. 이를 Fig. 6의 Parrish가 제시한 기계가공에 의한 표면잔류응력 형태와 비교하면 가공진행방향(0°)응력은 Type III 형태와 유사하고, 이에 수직인 방향(90°)의 응력은 Type I 형태와 유사하다. Figure 6의 잔류응력형태는 재료에 따라 기계가공 과정에서 발생하는 열과 절삭공구에 의해 재료에 가해지는 힘의 상관관계에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

연삭시편은 연삭기의 진행방향과 수직방향 모두 동일한 경향을 나타내었다. 표면에서는 -100~300MPa의 압축잔류응력을 나타내고 20 μm 지점부터는 급격하게 인장상태로 전환 후 서서히 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Fig. 6의 Type II와 유사하다.

방전가공시편은 Fig. 6의 Type I과 유사한 잔류응력분포를 보였다. 표면에서 250MPa 정도의 인장잔류응력을 나타내며 서서히 감소하여 약 150 μm 지점에서 사라지는 경향을 나타내었다.

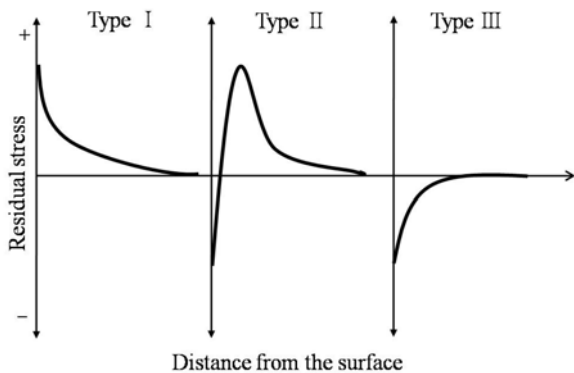


Fig. 6 Types of machining stress distribution according to Parrish⁽⁷⁾

연삭시편과 방전가공시편은 표면과 5 μm 지점에서도 잔류응력측정이 가능하였으며 표면 거칠기를 측정된 결과 표면에서도 0.4~0.5 μm 정도의 매우 낮은 거칠기를 나타내었다. 또한 두 시편 모두 밀링시편과는 달리 연삭공구 및 방전와이어의 진행방향과 같은 방향과 수직인 방향의 재료 절삭량이 비슷한 것으로 나타났다. 잔류응력이 미치는 깊이는 방전가공이 가장 작고 밀링, 연삭의 순서로 증가하였다.

3.2 경도분포

Figure 7에 3가지 가공법에 의해 형성된 경도분포를 나타내었다. 밀링시편과 연삭시편은 가공방향과 평행한 평면(0°)의 표층으로부터 5 μm 지점에서 각각 310Hv, 335Hv의 최대값을 나타내었고 55 μm 깊이에서는 각각 220Hv, 252Hv이었으며 깊이가 더할수록 서서히 감소하여 255 μm 이후에서는 200Hv 이하의 안정된 값을 나타내었다. 가공방향과 수직인 평면(90°)에서는 표층으로부터 5 μm 깊이에서 각각 220Hv, 270Hv를 나타내었고 205 μm 깊이 이후에서 200Hv 이하의 안정된 값을 나타내었다. 밀링시편에서 55 μm , 105 μm 지점에서 경도가 증가하는 현상을 나타내었으며 이에 대해서는 원인이 필요하므로 보인다. 방전가공시편은 양 표면 모두 뚜렷한 가공경화현상이 관찰되지 않았다. 종합적으로 표면가공경화현상은 연삭의 경우가 가장 큰 것으로 나타났다. Figure 4의 잔류응력분포와 비교해 볼 때, 잔류응력의 인장 또는 압축방향 여부와 관계없이 표면근처에서 높은 경도를 지시하는 것으로 보아 경도는 잔류응력의 크기에만 관계가 있는 것으로 추정된다.

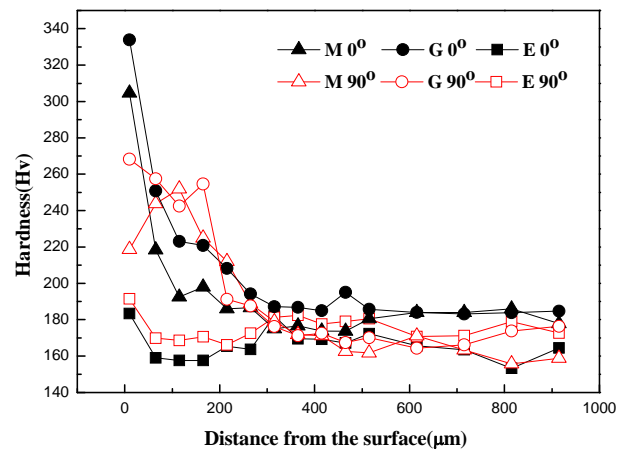


Fig. 7 Hardness profiles along depth

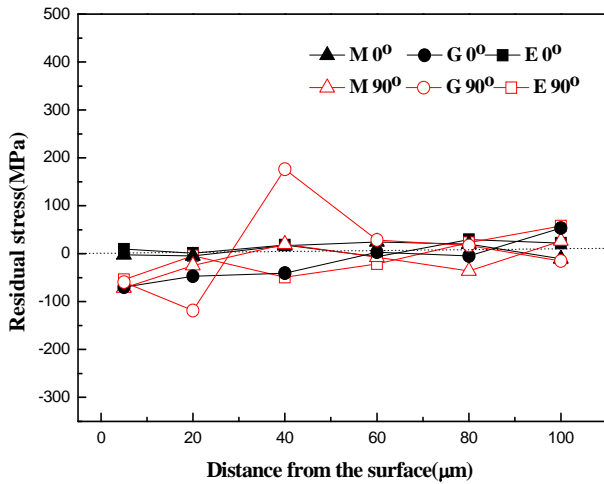


Fig. 8 Residual stress profiles after heat treatment

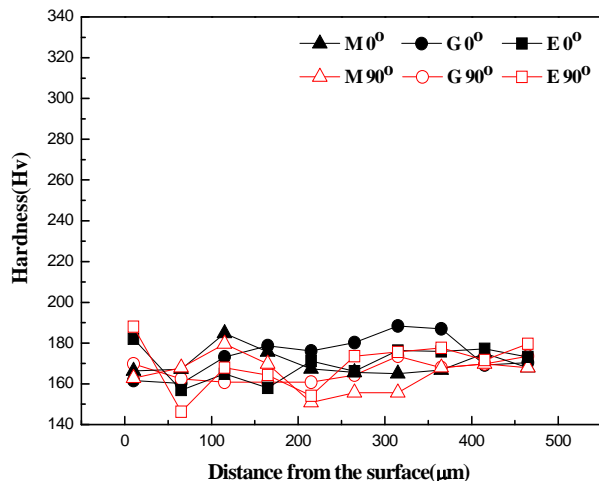


Fig. 9 Hardness profiles after heat treatment

3.3 열처리 효과

열처리 후 잔류응력과 경도분포를 Fig. 8, 9 에 나타내었다.

3 가지 가공법의 종류 및 가공방향에 관계 없이 열처리 후 시편표면에서의 잔류응력이 완전하게 제거되지는 않았지만 약 $0\pm 50\text{MPa}$ 로 가공에 의한 잔류응력이 현격하게 감소됨을 확인하였다. 경도 역시 $170\pm 20\text{Hv}$ 범위로서 본래의 TP316L 스테인리스강이 가지는 모재 경도와 비슷한 경도분포를 보였다. 이러한 특성변화는 열처리에 의해 재료가 재결정됨으로써 가공경화의 요인이 되는 전위밀도가 높은 소성 변형층이 제거됨에 따른 것으로 사료된다.

4. 결론

원자력발전소의 배관재인 TP 316L 스테인리스강

에 대해 평판시편을 기계가공하여 각 가공방법이 재료의 표면잔류응력 및 경도에 미치는 영향과 열처리 효과를 실험한 결과, 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 기계가공작업에 의해 재료표면에 잔류응력이 형성되며 잔류응력의 방향 및 잔류응력이 미치는 깊이는 가공방법에 따라 다른 양상을 나타낸다.

(2) 밀링, 연삭 및 방전가공 중에서 가공잔류응력이 미치는 깊이는 방전가공이 가장 작고, 연삭이 가장 큰 것으로 확인되었다. 가공경화현상도 이와 유사한 경향을 나타내었다.

(3) 경도는 잔류응력의 압축 또는 인장방향에는 관계없이 크기에만 상관성이 있는 것으로 나타났다.

(4) 기계가공에 의해 형성된 잔류응력 및 가공경화는 고용화 열처리를 통해 제거 또는 감소함이 확인되었다.

(5) 용접잔류응력에 대한 해석결과를 엑스선회절법에 의한 측정결과와 비교할 경우는 표면가공 잔류응력의 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 원자력중장기 연구개발 혁신분과의 ‘이종금속용접부의 균열관리를 위한 기계적 해석기술 개발 (M207AE030001-08A0503-00110)’ 과제의 지원으로 수행되었습니다.

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* 33(4), pp. 41~49.
- (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* (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,” *Trans. of the KSME A* 33 (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,”
Trans. of the KSME A 32(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*, October
- (6) Song, T.K., Bae, H.Y., Kim, Y.J., Lee, K.S. and Park, C.Y., 2008, “Sensitivity Analysis of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Multi-Pass Weldment in Nuclear Power Plant,”
Trans. of the KSME A 32(9), pp. 770~781
- (7) Parrish, G., 1977, “Influence of Microstructure on Properties of Case-Carburised Components,” *Heat Treata. Met.* Vol. 4, No. 2, pp. 45~54