

고유변형도법에 의한 두께 25mm 맞대기용접부의 두께방향의 잔류응력측정

박정웅* · 안규백**† · 우완측*** · 허승민****

*조선대학교 토목공학과

**포스코 기술연구소 접합연구그룹

***한국원자력연구원 중성자과학연구부

****조선대학교 대학원 토목공학과

Measurement of Welding Residual Stress in a 25-mm Thick Butt Joint using Inherent Strain Method

Jeong-ung Park*, Gyu-baek An**†, Wanchuck Woo*** and Seung-min Heo****

*Dept. of Civil Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

**Technical Research Laboratories, POSCO, Pohang 790-300, Korea

***KAERI, Neutron Science Division, Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea

****Dept. of Civil Engineering, Graduate School of Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

†Corresponding author : gyubaekan@posco.com

(Received July 23, 2013 ; Revised August 1, 2013 ; Accepted August 7, 2013)

Abstract

Overlay welding is carried out to improve the corrosion resistance, wear resistance and heat resistance on the surface of the chemical plant and steelmaking plant structures. In overlay welding, control of the bead size and the temperature distribution of weldment are particularly important because that is directly connected to the improvement of quality and productivity. The aim of this study is to model the welding heat source that is very useful to analyze the bead size and temperature distribution of weldment. To find the welding heat source model, numerical analyses are performed by using FE software MSC-marc.

Key Words : Overlay welding, Finite element analysis, Bead size, Temperature distribution

1. 서 론

용접에 의해 발생하는 잔류응력은 강구조물의 피로성능, 파괴 등에 영향¹⁾을 준다. 따라서 구조물의 용접이음부의 안전한 설계를 하기 위해서는 용접 잔류응력²⁻⁴⁾의 분포를 정확히 예측 및 측정하여 그 영향을 평가하는 것이 중요하다. 용접잔류응력을 측정 및 예측하는 방법에는 실험적 방법과 해석적 방법이 있다. 해석적 방법은 컴퓨터 수치계산능력과 범용적인 수치해석 코드의 발달로 열탄소성해석⁵⁻⁷⁾에 의한 잔류응력을 용이하게 계산할 수 있다. 그러나 이러한 해석결과는 비교할

수 있는 측정된 결과가 없어 해석결과에 대해 신뢰성을 확인하기가 어렵다. 실험적 방법에 의한 잔류응력은 일반적으로 표면의 잔류응력을 측정할 수 있는 홀드릴링법^{8,9)}, 절단법¹⁰⁾ 그리고 X-선법¹¹⁾ 등이 사용되었다. 이러한 표면의 잔류응력의 분포는 피로 및 파괴에 미치는 영향이 크지만 두께방향의 잔류응력의 분포는 균열의 진전 방향 및 진전속도 등에 많은 영향이 준다. 따라서 두께방향의 잔류응력을 측정하는 방법은 최근 많은 연구가 이루어졌다. 제일 오래된 측정방법은 고유변형법(Inherent strain Method)¹²⁻¹⁴⁾이고, 이후 중성자회절법(Neutrons Method)¹⁵⁻¹⁸⁾, Deep Hole Drilling Method^{19,20)}, Contour Method²¹⁾ 등이 있다. 특히,

중성자법은 측정한계인 두께 25mm를 벗어나 최대 두께 70mm 까지 측정할 수 있는 기술이 최근 한국에서 개발되었다. 본 연구에서 사용하고 있는 고유변형법은 일본 오사카대학에서 개발되었으며 다년간 신뢰성있는 결과를 보여주고 있다.

따라서 본 연구에서는 고유변형도법을 이용하여 맞대기 용접부에서 다층 FCA용접하였을 때 두께방향에 분포하는 용접잔류응력을 측정하고, 그 분포특성을 규명하였다. 구체적으로는 고유변형도법에 의해 잔류응력을 측정하기 위해 시험체로부터 이완변형을 측정하고, 이것으로부터 용접잔류응력의 생성근원인 고유변형을 측정하였다. 이러한 고유변형을 절점력으로 한 탄성 유한요소해석을 실시하여 맞대기 용접부에 발생하는 두께방향의 용접잔류응력을 계산하여, 용접선방향과 폭방향의 잔류응력분포에 대한 특성을 규명하였다.

2. 고유변형도법

용접에 의해 발생되는 고유변형은 일반적으로 용접부 근방에서 발생하고, 그 범위는 용접열에 의해 열탄소성이력을 받는 영역에서 발생된다. 일부 고유변형은 용접부의 자유로운 팽창을 구속하거나 잔류응력을 발생시키지 않으나, 나머지 고유변형은 잔류응력을 유발시킨다. 이와 같이 잔류응력을 유발시키는 고유변형을 일반적으로 유효고유변형(여기서는 간단히 “고유변형”이라 함)이라 한다.

탄성변형 $\{\epsilon\}$ 과 탄성체의 임의 위치에 발생하는 고유변형 $\{\epsilon^*\}$ 그리고 응력 $\{\sigma\}$ 과의 사이에는 각각 $[H^*]$:탄성응답매트릭스, $[D]$: 탄성응력-변형매트릭스 사이에 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\{\epsilon\} = [H^*] \{\epsilon^*\} \tag{1}$$

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} = [D][H^*] \{\epsilon^*\} \tag{2}$$

고유변형이 분포하는 영역과 크기는 절단 등에 의해 새로운 소성변형이 발생되지 않으면 절단을 하여도 변화하지 않는다. 따라서 고유변형은 그 시험체로부터 측정된 탄성변형량으로부터 다음과 같이 계산될 수 있다. 먼저, 부재에 발생하는 탄성변형(잔류변형)을 절단하여 해방시켜, 이것을 스트레인게이지로 가능한 많은 탄성변형 $\{\epsilon_m\}$ 를 측정한다. 그 탄성변형에는 다양한 측정오차가 혼입될 가능성이 있어, 식(1)을 다음과 같이 측정방정식을 유도할 수 있다.

$$\{\epsilon_m\} - [H^*] \{\epsilon^*\} = \{V\} \tag{3}$$

여기서 $\{\epsilon^*\}$: 고유변형의 최확치, $\{V\}$: 오차이다.

고유변형의 최확치 $\{\epsilon^*\}$ 는 최소자승법으로부터 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\{\epsilon^*\} = ([H^*]^T [H^*])^{-1} [H^*]^T \{\epsilon_m\} \tag{4}$$

구해진 고유변형의 최확치 $\{\epsilon^*\}$ 을 식(2)의 $\{\epsilon^*\}$ 에 대입하면 용접잔류응력의 최확치 $\{\sigma\}$ 을 다음과 같이 탄성해석으로 구할 수 있다.

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} = [D][H^*] \{\epsilon^*\} \tag{5}$$

3 고유변형도에 의한 잔류응력 측정 및 고찰

3.1 실험

고유변형법에 의해 잔류응력을 측정하기 위해 실험에 사용된 맞대기 용접시험편의 치수와 형상을 Fig. 1에 보여주고 있다. 강판의 두께는 25mm이고, 개선가공 후 Fig. 2와 같이 강 백킹재를 초층의 하부에 가접하고 총 13패스 다층 FCA용접을 실시했다. 사용된 모재와 용접의 물성치는 항복강도 490MPa급강 선급용 고장력강인 EH47(table 1)이며, 용접조건은 table 2와 같다. 한편, 잔류응력의 측정 위치는 단부의 영향이 없는 중앙부에 대해 평가하였다.

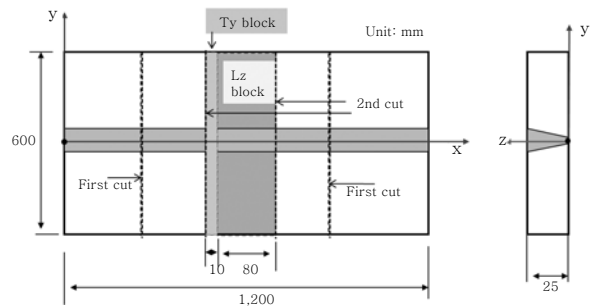


Fig. 1 Dimension of welding specimen and cutting specimens (Ty and Lz)

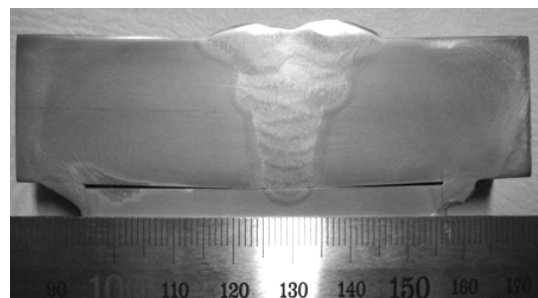


Fig. 2 Macro section and weight factors of initial stress

Table 1 Properties of base and weld metal

Material	Remarks	YP(MPa)	TS(MPa)	EI(%)
EH47	Steel	490	590	21
SF-36E	consumables	570	610	29

Table 2 welding condition

Steel	Welding process	Heat input (kJ/cm)	Consumables	Shield gas	Average Current (A)	Average Voltage (V)	Average Speed (CPM)	Pass No.
EH-47	FCAW	15~17	SF-36E	100%CO2	255	32	30	13

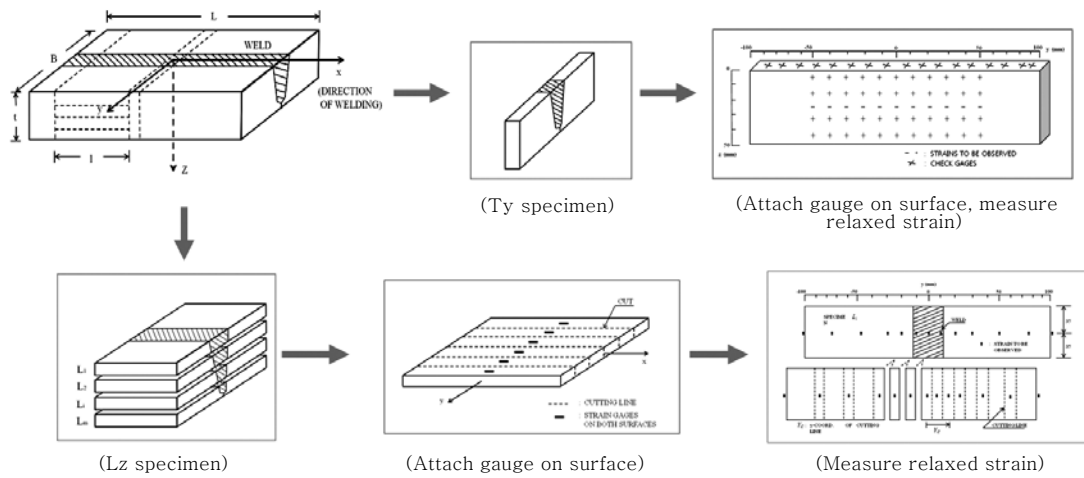
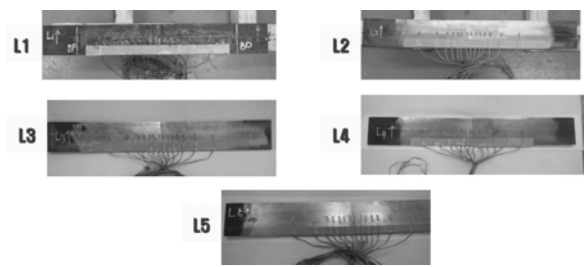


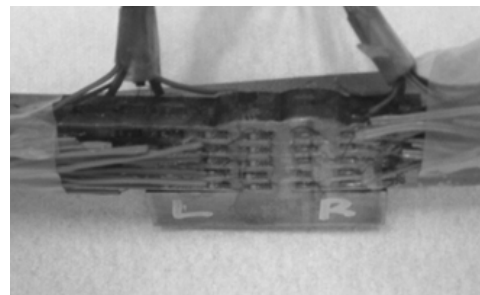
Fig. 3 Cutting and measuring process of L_z and T_y block

용접잔류응력을 측정하기 위해 Fig. 1의 본 시험체로부터 1차 절단을 실시하여 Fig. 3와 같은 순서로 방전 절단과 절단 후 새로운 절단면에 스트레인게이지를 부착을 반복하며 측정하여 이완변형을 구하고 이것을 식 (4)를 이용해서 고유변형을 계산한다. 본 시험편과 같이 용접선이 충분히 긴 경우 전단성분의 고유변형은 작은 것으로 가정하여 용접선방향의 고유변형 ϵ_x^* 과 용접선 직각방향의 고유변형 ϵ_y^* , 두께방향의 고유변형 ϵ_z^* 만 존재하는 것으로 가정하였다. 본 시험체로부터 Fig. 3 와 같이 L_z 시험편과 T_y 시험편을 절단하여 분리하면, 절단시 새로운 고유변형이 발생하지 않으며 L_z 시험편과 T_y 시험편의 고유변형은 본 시험체의 고유변형 분포는 같다. 따라서 L_z 시험편인 경우 두께방향으로 절단된 각 시험편으로부터 용접선 방향의 이완변형을 측정하여 이것을 이용하여 용접선방향의 고유변형을 계산한다. 또한 T_y 시험편인 경우 용접선 직각방향과 두께방향의 이완변형을 측정한다. 이렇게 측정된 이완변형으로부터 고유변형을 계산하고 이것을 무응력상태의 구조물에 점점력으로 작용시켜 용접잔류응력을 계산한다.

Fig. 4는 L_z 와 T_y 블록의 절단 및 스트레인 게이지 측정모습을 보여주고 있다.



(a) L_z block



(b) T_y block

Fig. 4 Cutting process of L_z and T_y block

3.2 측정 이완변형 및 고유변형도 분포

Fig. 5은 Lz block으로부터 용접선방향의 이완변형을 측정된 결과를 두께방향에 대해 보여주고 있다. 이완변형은 두께방향으로 5개 층으로 나누어 측정하였으며 최대 인장 1,300 μ 이며, 압축방향으로 -1,500 μ 가 발생하였다. 그 이완변형이 발생한 폭은 좌우 약 50mm 이며 용접부를 중심으로 거의 대칭적으로 발생하였다. 이완변형의 크기는 절대 값으로 보면 초층에서 제일 큰 폭으로 발생하였고 그 외에는 거의 비슷한 양을 보여주고 있다. 고유변형이 발생하는 영역은 Fig. 5의 이완변형의 형태로부터 용접부 중심으로부터 $y=\pm 20$ mm 이내이다. 초층($z=2.5$ mm)인 경우 용접부의 소성변형이 고유변형의 발생에 매우 큰 영향을 미치고, 이러한 소성변형에 의해 이완변형의 양상도 변화된다. 따라서 용접부의 이완변형의 인장이 압축으로 변경되는 영역까지 고유변형의 발생영역이다. 이러한 고유변형의 영역 폭은 두께방향의 위치에 따라 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 이완변형으로부터 식(4)를 이용하여 계산된 고유변형을 보여주고 있다. 고유변형의 크기는 초층

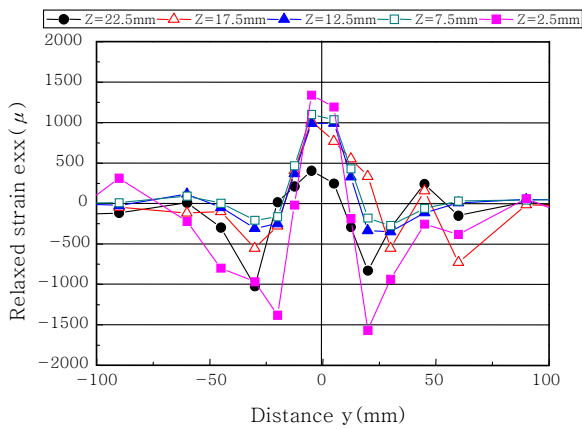


Fig. 5 Released strains (ϵ_x) along the x direction

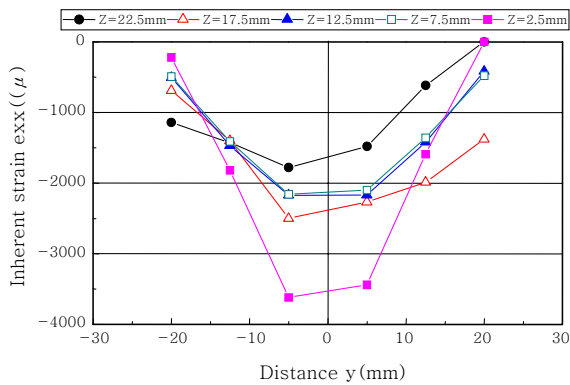


Fig. 6 Inherent strains (ϵ_x) along the x direction

에서는 -3,500 μ 이고, 최종 층에서는 최대 -1,500 μ 가 발생되었고, 그 형상은 이완변형의 형상과 유사한 형태를 가지고 있다. 본 시험체의 경우 초층에 강백킹재를 붙이고 용접을 실시하여 초층의 고유변형이 크게 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

3.3 고유변형도법에 의한 잔류응력 측정결과

Fig. 7은 고유변형을 절점력으로 하는 탄성해석에 의해 구한 용접선 방향과 용접선 직각방향의 잔류응력을 보여주고 있다. 전체적인 잔류응력의 크기는 용접선방향은 항복응력에 가까운 값을 보여주고 있으나 용접선 직각방향은 ± 200 MPa이하로 발생하여 상대적으로 작게 나타났다. 이러한 용접선 방향과 직각방향의 잔류응력의 크기는 용접에 의해 발생하는 온도분포가 자체구속으로 작용하여 잔류응력을 생성시킨 것이다. 용접선 방향의 온도구배는 급속 가열 및 냉각에 의해 발생되며 매우 크기 때문에 잔류응력도 크게 발생한다. 한편, 용접선 직각방향의 온도구배는 용접선과 평행하게 등가온도곡선이 나타나 구속이 작다.

용접선방향의 잔류응력의 발생특성은 용접부 근방에

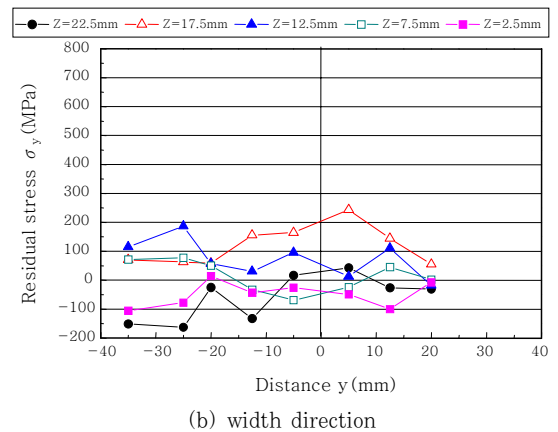
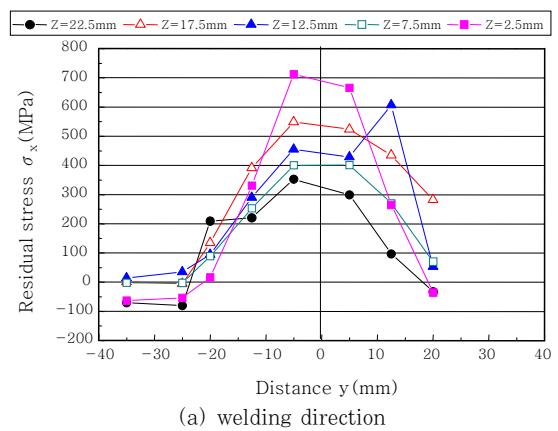


Fig. 7 Entire residual stresses along the thickness directions (z)

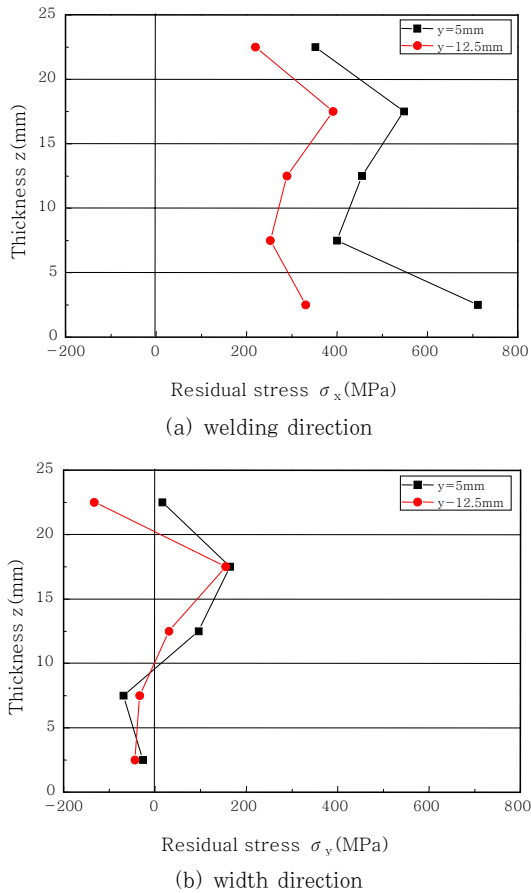


Fig. 8 Residual stresses along the thickness directions (z)

서는 인장잔류응력이 발생하고 이러한 인장응력과 평형을 맞추기 위해 압축응력이 발생하였다. 이러한 전형적인 용접선방향의 잔류응력의 분포는 두께방향에 대해서도 큰 차이는 없다. 다만, Fig. 8(a)와 같이 두께방향으로 위치에 따라 크기에 차이가 발생하였다. 제일 큰 잔류응력은 초층에서 발생하였고 제일 작게 발생한 곳은 최종층 근방에서 발생하였다. 이와같이 초층에 최대 잔류응력이 발생하는 것은 세라믹 백킹재를 사용하는 대신 강 백킹재를 사용하여 발생한 현상으로 일반적으로는 표면으로부터 5~10mm 깊이에서 발생된다.

용접선 직각방향의 잔류응력은 모두 $\pm 200\text{MPa}$ 이하로 발생하여 용접선방향의 잔류응력에 비해 작게 나타났다. Fig. 8(b)와 같이 두께방향의 잔류응력은 분포는 표면으로부터 약 8mm 깊이에서 제일 크게 발생하였으며 나머지 위치에서는 큰 차이는 없다. 이와 같이 FCA 용접 다층용접시 발생하는 두께방향의 용접잔류응력의 분포를 고유변형도법에 의해 측정할 수 있었다. 이러한 결과는 용접부의 피로 및 파괴안전성을 평가할 때 용접 잔류응력의 분포에 대한 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

두께 25mm인 맞대기 다층 용접부의 두께방향의 용접잔류응력을 측정하기 위해 고유변형도법을 이용하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 맞대기 다층용접부의 두께방향의 잔류응력을 고유변형도법을 이용하여 측정하고, 그 분포특성을 실험에 의해 규명하였다.

2) 용접선방향의 잔류응력의 분포형태는 용접부에서 인장, 용접부로 멀어짐에 따라 압축잔류응력이 발생하였다. 그리고 잔류응력의 크기는 초층에서 강 백킹재의 영향으로 제일 큰 인장잔류응력이 발생하였고, 다음으로 최종 용접층 표면으로부터 5~10mm 깊이에서 발생하였다.

3) 용접선 직각방향의 잔류응력은 용접선방향에 비해 70% 작게 발생하였으며, 이것은 외적구속이 없는 경우 온도구배에 의해 결정된다. 잔류응력이 제일 크게 발생한 위치는 표면으로부터 두께방향으로 약 8mm 깊이에서 발생하였으며 나머지 위치에서는 큰 차이가 없었다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2012-0008837)

References

- Masaoka I., Yada M., Sasaki R., Brittle fracture initiation characteristics of weld joint for 80kg/mm² high strength thick plate steel(Report3) -Effect of residual stress and repair welding on brittle fracture initiation from surface notch in fusion line of welded joints -, Journal of the Japan Welding Society (2010), 44(11)-914~9230
- Park J.U "Mechanism and Effects of Welding Residual Stress -Mechanism of Welding Residual Stress" Journal of the KWS, **22-2** (2004), 1-2 (in Korean).
- Kim J.S, Park J.S and Jin T.E, "Review on the International Joint Researches for Evaluation of Welding Residual Stresses" Journal of the KWS, **23-6** (2005), 8-17 (in Korean)
- Jin H.K, Lee D.J and Shin S.B "Effect of Distance and Restraint Degree between Fillet and Butt Weldment on Residual Stress Redistribution at each Weldment" Journal of the KWJS, **28-3** (2010), 59-64(in Korean)
- Ueda Y., Fukuda K., Nakacho K. and Endo S., A new measuring method of residual stresses with the aid of finite element method and reliability of estimated values, Trans. JWRI (1975), 52(4)-19-27
- Murakawa H. and Luo Y. and Ueda Y., Prediction of

- welding deformation and residual stress by elastic FEM based on inherent strain (first report) mechanism of inherent strain production, Journal of the Society of Naval Architects of Japan (1996), 180-739-751
7. Park J.U. and Lee S.U., Effects of residual stress of thick plate due to welding process, abstracts of the 2009 spring annual meeting of KWJS (2009), 105
 8. ASTM E 837-01: Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain gauge method, (2001)
 9. Schajer G.S., Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method, part I -stress calculation procedures-, Journal of Engineering Materials and Technology(1988), 110-338-343
 10. Masubuchi K., Analysis of welded structures, Pergamon press(1980)
 11. Birkholz M., Genzel C., Jung T., X-ray diffraction study on residual stress and preferred orientation in thin titanium films subjected to a high ion flux during deposition, Journal of Applied Physics (2004), 96-7202-12
 12. Ueda Y., Takahashi E., Fukuda K., Sakamoto K., Nakacho K., Multipass welding stresses in very thick plates and their reduction from stress relief annealing, Trans JWRI (1976), 5(2)-179-189
 13. Wang R., Zhang J., Serizawa H., Murakawa H., Study of welding inherent deformations in thin plates based on finite element analysis using interactive substructure method. Material & Design (2009), 30-3474-3481
 14. Ueda Y., Murakawa H., Ma N., Welding deformation and residual stress prevention, Butterworth-Heinemann, ISBN (2012), 978-0-12-394804-5
 15. Allen A.J., Hutchings M.T., Windsor C.G., Andreani C., Neutron diffraction methods for the study of residual stress fields, Advances in Physics (1985), 34(4)-445-473
 16. Okido S., Hayashi M., Tanaka K., Akinawa Y., Minakawa N., Mori Y., Measurement of residual stress in textured Al alloy by neutron diffraction method, 7th international conference on nuclear engineering (ICONE), Tokyo, Japan, (1999), 19-23
 17. Woo W., An G.B., Kingston E.J., De Wald A.T., Smith D.J., Hill M.R., Through-thickness distributions of residual stresses in two extreme heat-input thick welds: A neutron diffraction, contour method and deep hole drilling study, Acta Materialia (2013), 61-3564-3574
 18. Smith, D.J., Bouchard, P.J. George, D., Measurement and prediction of residual stresses in thick-section steel welds, Journal of Strain Analysis for Engineering Design (2000), 35(4)-287-305
 19. Mahmoudi A.H., Hossain S., Pavier M. J., Truman C.E., Smith D. J., A new procedure to measure near yield residual stresses using the deep hole drilling technique, Experimental Mechanics(2009), 49(4)-595-604
 20. Kingston E.J., Advances in the deep hole drilling technique for residual stress measurement, PhD thesis, University of Bristol (2003)
 21. M B Prime, 2001, "Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut", Journal of Engineering Materials and Technology (2001), Volume 123-pp.162-168