〔논 문〕 - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 32, No. 2 (2012. 4)

전자처리스페클패턴 간섭법을 이용한 평판 용접시험편의 잔류응력 측정

Residual Stress Measurement of Flat Welded Specimen by Electronic Speckle Pattern Interferometry

장호섭*, 김동수**, 정현철***, 김경석***†

Ho-Seob Chang*, Dong-Soo Kim**, Hyun-Chul Jung*** and Kyung-Suk Kim***†

초 록 용접구조물에는 외력이 부가되기 이전에 잔류응력이 걸려 있으므로 용접잔류응력 크기 및 분포 상태는 취성파괴, 피로강도, 응력부식균열, 좌굴, 시효변형과 같은 다양한 형태의 손상에 직접적으로 영향을 끼쳐 잔류응력을 정량적으로 해석하기 위한 지속적인 연구가 필요한 실정이다. 본 논문은 비파괴적인 기법 중 레이저를 이용한 전자처리스페클패턴 간섭법을 이용하여 평판 용접시험편의 외부하중에 따른 전체 거동에 잔류응력의 측정 기법을 제시하고자 한다. 용접시험편에 인장 하중을 가하였을 때, 이를 전자처리패턴스페클 기법을 이용하여 측정하였다. 측정된 결과로부터 용접시험편의 모재부와 용접부의 변형률을 측정하고, 이를 이용하여 탄성계수를 측정하였다. 본 논문은 전자처리스페클패턴 간섭법으로 용접시험편의 용접부와 모재부의 변형률의 차이를 이용하여 잔류응력 값을 산출하는 식을 제시하였고, 이를 수치적으로 계산하여 잔류응력 값을 산출하였으며 측정 결과, 모재부에 비해 용접부의 탄성계수가 약 3.7배 높은 약 8.46 MPa로 측정되었다.

주요용어: 전자처리스페클패턴 간섭법, 용접시험편, 잔류응력

Abstract The size and distribution of welding residual stress and welding deformation in welding structures have an effect on various sorts of damage like brittle failure, fatigue failure and stress corrosion cracking. So, research for this problem is necessary continuously. In this study, non-destructive technique using laser electronic speckle pattern interferometry, plate of welding specimen according to the external load on the entire behavior of residual stress are presented measurement techniques. Once, welding specimen force tensile loading, using electronic speckle pattern interferometry is measured. welding specimen of base metal and weld zone measure strain from measured result, this using measure elastic modulus. In this study, electronic speckle pattern interferometry use weld zone and base metal parts of the strain differences using were presented in residual stress calculated value, This residual stress value were calculated by numerical calculation. Consequently, weld zone of modulus high approximately 3.7 fold beside base metal and this measured approximately 8.46 MPa.

Keywords: ESPI(electronic sepckle pattern interferometry), Welding Specimen, Residual Stress

1. 서 론

용접은 종래 구조물 조립에 사용되었던 리벳 이음보다 접합강도가 높고, 구조물을 단기간에 건조할 수 있으며, 수밀성 및 기밀성이 뛰어난 장점을 가지고 있다[1]. 그러나 용접은 고열을 수

[접수일: 2012. 1. 30, 수정일: (1차: 2012. 3. 17, 2차: 2012. 4. 4) 게재확정일: 2012. 4. 13] *조선대학교 레이저응용신기술개발센터, **조선대학교 첨단부품소재공학과, ***조선대학교 기계설계공학과 †Corresponding Author: Deparment of Mechanical Design Eng., Chosun Univ., 375 Seosuk dong, Dong-Gu, Gwangju 501-759, Korea (E-mail: gsckim@chosun.ac.kr)

반하는 복잡한 금속학적 접합 방법으로 심한 재질열화, 변형, 잔류응력 또는 여러 가지의 용접결함을 일으켜 이로 인한 용접 구조물의 성능을 손상시키기 쉽다[2]. 특히, 용접 구조물의 결함 유발 및 손상에 이르게 하는 주원인은 잔류응력이라 할 수 있다. 잔류응력 측정기법은 연구가 진행되고 있지만, 측정 대상물의 형태에 따라 측정하기 어려우며, 정량적인 결과를 기대하기 어렵다. 또한 비파괴기법으로 측정하는 기법이 적으며 지속적인 연구가 필요한 실정이다.

본 논문에서 적용된 전자처리 스페클 패턴 간섭법은 비접촉·비파괴, 대면적, 복잡한 형상에 구애 받지 않으며, 용접부의 응력 측정 시 주위 환경 제약조건에 영향을 받지 않는다. 또한 외력에 따라 대상체의 거동에 따라 변형정보를 가시화할 수 있으며, 정량 측정이 가능하다.

따라서 본 논문에서는, 용접부의 잔류응력을 측정하기 위하여 비파괴적인 기법 중 레이저를 이용한 전자처리 스페클 패턴 간섭법을 이용하여 평판 용접시험편의 외부하중에 따른 전체 거동에 잔류응력의 측정 기법을 제시하고자 한다.

2. 이 론

2.1. 전자처리스페클패턴 간섭법

면내변위 전자처리스페클패턴 간섭계의 기본 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 광 분할기(beam splitter)에 의해 분리된 두 빔은 측정 대상체의 변형 축에 평행하게 같은 각도로 조사되며 물체광(object beam)과 참조광(reference beam)은 광학적으로 거친 표면에서 난반사되고 speckle field를 형성하여 중첩된 speckle들이 렌즈를 거쳐 image plane에 결상된다. 이때의 측정 대상체 표면에 대한 거칠기와 변위, 변형 정보를 포함하는 스페클 패턴은 대상체의 변형에 대한 스페클 패턴과 비교함으로써 in-plane 변위에 대한 정보만을 레이저 파장 단위로 얻어낼 수 있다[5,6].

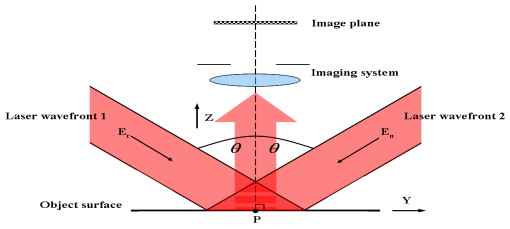


Fig. 1 Schematic of in-plane displacement interferometer

3. 실험 구성 및 방법

3.1. 실험 구성

3.1.1. 용접시험편

Fig. 3와 같이 평판을 이용하여 맞대기 용접을 시행 후 와이어 커팅을 이용하여 맞대기 용접시험편을 제작하였다. Fig. 2는 맞대기 용접시험편 제작을 위한 CAD 설계도면이다. 맞대기 용접시험편의 제작을 위한 맞대기 용접 평판의 재질은 SM490이며, 규격은 가로 350 mm, 세로 320 mm이며 두께는 6 mm이다. 평판의 맞대기 용접 후 맞대기 용접시험편을 획득하기 위하여 가로 40 mm, 세로 180 mm로 와이어 커팅을 통하여 제작하였다.

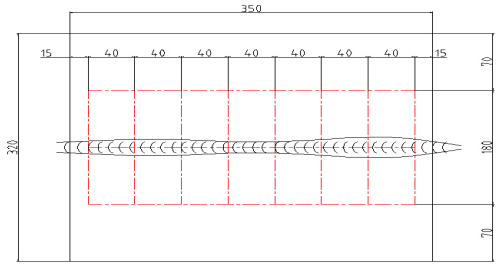


Fig. 2 CAD drawings of butt welding specimen

Fig. 3 Manufactured plate butt welding

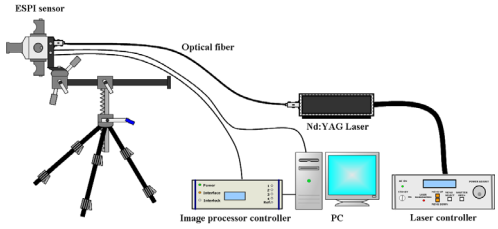


Fig. 4 Schematic of ESPI system

3.1.2. 실험 장치

ESPI 시스템은 독일 Dantec Ettemeyer사의 상용 제품(Model: Q-300)을 이용하였으며 Fig. 4와 같이 장치구성은 Nd:YAG laser(파장: 532 nm), laser controller, polarization maintaining optical fiber, ESPI sensor, controller, PC로 구성되어 있다. ESPI 센서 내부에는 x, y, z축 변위를 측정할 수 있는 3개의 간섭계가 구성되어 있다. Polarization maintaining optical fiber를 통하여 Nd:YAG laser가 ESPI sensor로 입력되면 4개의 암을 통하여 대상물에 laser 빛이 조사되는데 이를 셔터 제어를 통한 광 경로의 차단으로 사용자가 상황에 맞게 간섭계를 선택하여 사용할 수 있다.

3.2. 실험 방법

잔류응력을 측정하기 위해 용접시험편에 피로시험기(MTS Co.)를 이용하여 용접시험편을 인장시켰을 경우 시험편의 모재부 및 용접부에서 변형 및 변형률 차이가 발생하는 것을 ESPI를 이용하여 동시에 측정한 후 제시한 기법을 이용하여 용접부의 잔류응력을 측정하였다.

ESPI를 이용한 잔류응력을 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 실험장치를 구성하였다. 용접시험편에 피로시험기(MTS Co.)를 이용하여 동일한 크기의 인장하중을 인가하여 모재부 및 용접부의 변형 및 변형률을 ESPI를 이용하여 동시에 계측함으로써 본 논문에서 제시한 잔류응력 측정 방법을 실험적으로 검증 하였다. 이때 인가된 하중(5 ~ 11 kN)은 y방향으로 1축 하중만을 받을 수 있도록 하였다.

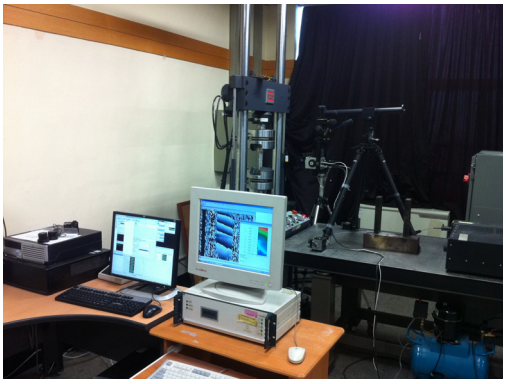
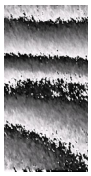
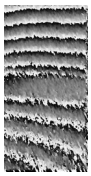


Fig. 5 Configuration of experimental device

Table 1 Phase map of butt welding specimen

	5kN	7kN	9kN	11kN
CO_2 butt weld				

3.3. 잔류응력 측정 방법

잔류응력을 측정하기 위하여 용접시험편을 인장시켰을 경우 시험편의 모재부 및 용접부에서 변형 및 변형률의 차이가 발생한다는 것에 착안하여 기법을 제안하였다. 모재부와 용접부의 변형률을 측정하고, 인장시 작용 응력의 차이를 통하여 용접부의 탄성계수 및 잔류응력을 구할 수 있다.

시험편에 인장력을 부하하여 소재에 변형을 가할 때 용접부 잔류응력을 내재한 시험편의 각 구간에 작용하는 응력을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{P_1}{A}=\sigma_{m1}=E_{m1}\epsilon_{m1}=\sigma_{w1}+\sigma_R=E_{w1}\epsilon_{wt1}+\sigma_R \quad (1)$$

$$\frac{P_2}{A}=\sigma_{m2}=E_{m2}\epsilon_{m2}=\sigma_{w2}+\sigma_R=E_{w2}\epsilon_{wt2}+\sigma_R \quad (2)$$

여기서, P_1은 제1외력, P_2는 제2외력, A는 시편의 단면적, σ_R는 잔류응력, E_{m1}은 제1외력이 인가된 시편의 비잔류응력영역에 대한 탄성계수, E_{w1}는 제1외력이 인가된 시편의 잔류응력영역에 대한 탄성계수를 나타낸다. 또한 E_{m2}은 제2외력이 인가된 시편의 비잔류응력영역에 대한 탄성계수, E_{w2}는 제1외력이 인가된 시편의 잔류응력영역에 대한 탄성계수, σ_{m1}은 제1외력에 의한 시편의 비잔류응력영역의 응력, σ_{m2}은 제2외력에 의한 시편의 비잔류응력영역의 응력을 나타낸다. 그리고, σ_{w1}는 제1외력에 의한 시편의 잔류응력영역의 응력, σ_{w2}는 제2외력에 의한 시편의 잔류응력영역의 응력, ϵ_{m1}는 제1외력이 인가된 시편의 비잔류응력영역에 대한 변형률, ϵ_{m2}는 제2외력이 인가된 시편의 비잔류응력영역에 대한 변형

률, ϵ_{wt}는 인장시험 용접부의 변형률이다.

$$E_w = \frac{\sigma_m - \sigma_R}{\epsilon_w} \approx \frac{\sigma_w}{\epsilon_w} \quad (3)$$

위 식(3)은 용접부의 탄성계수를 유도하는 식으로써, 실험을 통해 얻어낸 결과 값들을 대입하여 계산한다. 여기에서 E_w는 용접부의 탄성계수 값이고, σ_m은 모재부의 응력, σ_R은 잔류응력, ϵ_w는 용접부의 변형률 값을 의미한다. σ_R의 값은 상수로 가정하고, σ_m은 피로시험기를 통하여 획득된 하중값을 모재부 단면적으로 나눔으로써 구해진다. 식(3)을 통하여 용접부 탄성계수의 값을 도출하였다. ESPI를 이용하여 용접부의 변형률을 측정하고, 이를 식(4)에 대입하여 용접부 잔류응력 값을 제시하였다.

$$\sigma_R = \sigma_m - E_w \epsilon_w \quad (4)$$

4. 실험결과 및 고찰

Table 1의 CO_2 맞대기 용접시험편 5 kN, 7 kN, 9 kN, 11 kN의 phase map에서 확인할 수 있듯이 시험편에 인가된 하중이 증가됨에 따라 정밀 계측용 레이저 간섭계를 이용하여 측정한 각 시험편의 phase map에 나타난 간섭 줄무늬의 수가 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있었으며, Table 1의 phase map의 줄무늬는 변형이 많을수록 줄무늬의 개수가 증가하므로, 변형 및 변형량이 점점 증가함을 알 수 있었다. 또한, 같은 시험편에서 모재부에서의 변형과 용접부에서의 변형이 다르게 나타남을 확인할 수 있었으며 이때 용접부의 변형은 모재부보다 작음을 알 수 있었다.

측정된, phase map의 세로 방향으로 프로파일링을 통하여 시험편의 변형량을 측정하였다. 각 인장 하중에 따른 변형량은 Fig. 6과 같다.

인장하중이 증가함에 따라 각 용접시험편의 모재부 및 용접부의 변형이 더욱 증가함이 확인하였으며, 실제 거리에 대한 픽셀 정보(용접부 세로방향 프로파일 거리: 10 mm)를 이용하여 측정부위에 대한 변위를 측정함으로써 변형률을 계산하였다. 이때, 픽셀 거리에 따른 정보는 실제 용접시험편의 용접부 세로 방향 길이와 측정된 phase map의 용접부 거리를 환산하여 계산하였다. 또한, 용접부의 단면적은 단면 형상을 CCD 카메라를 통하여 획득하여 면적 계산 프로그램을 통하여 획득하였다. Fig. 6의 그래프와 Table 2를 통하여 인장하중이 증가함에 따라 모재부 및 용접부 모두 변형 및 변형률이 증가함을 알 수 있었다. 그리고 잔류응력을 계산하기 위해 line profile data을 통해 획득된 data로부터 변형률을 계산한 후 본 과제에서 앞서 제시하였던 식에 대입하여 탄성계수를 계산하여, 최종적으로 잔류응력 값을 획득할 수 있었다.

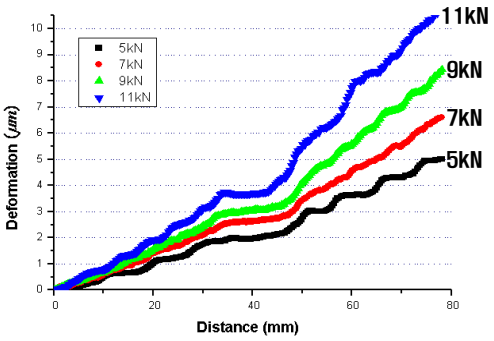


Fig. 6 Profile data of measured phase map

Table 2 The results of butt weld specimens by tensile load

Load (kN)	5	6	7	8	9	10	11
Cross section _base metal (E-04 m^2)	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
Cross section _welded zone (E-04 m^2)	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
Stress of base metal (MPa)	21	25	29	33	38	42	46
Deformation of base metal (μm)	0.609	0.761	0.888	1.0	1.112	1.249	1.394
Strain of base metal (E-05)	9.8	12	14	16	18	20	22
Deformation of welded zone (E-07 m)	1.5	1.7	1.9	2.1	2.2	2.4	2.5
Strain of welded zone (E-05)	2.4	2.7	3.1	3.3	3.6	3.8	4.0
Stress of welded zone (MPa)	10	12	15	17	19	21	23

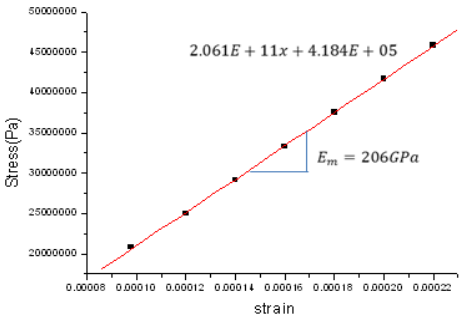


Fig. 7 Elastic modulus graph of base metal parts

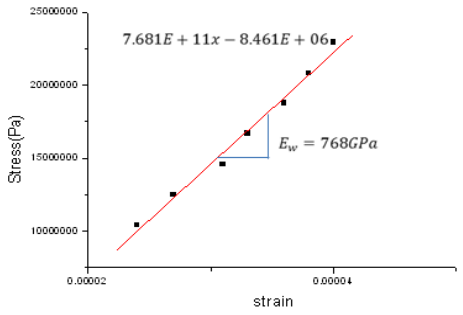


Fig. 8 Elastic modulus graph of welded zone

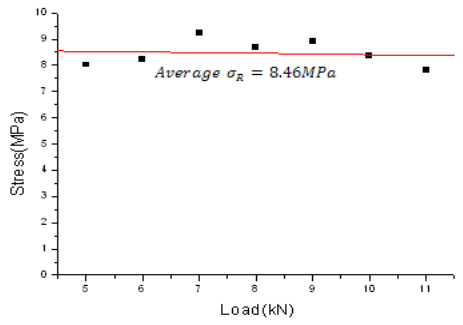


Fig. 9 Residual stress graph by tesnsile load

5 kN ~ 11 kN CO_2 용접시험편의 모재부의 변형률과 모재부의 응력 값을 이용하여 Fig. 7과 같이 모재부의 탄성계수 값을 계산하였으며, 약 206 Gpa로 측정되었다.

Fig. 8는 식(3)에 의하여, 잔류응력 값을 상수로 가정하였을 때, 탄성계수 값에는 영향을 미치지 않으므로, Table 2의 용접부 변형률 및 응력을 바탕으로 구하였으며, 그 값은 약 768 Gpa로 측정되었다.

계산 결과 CO_2 맞대기 용접시험편의 용접부 탄성계수 값을 각각 구할 수 있었다. 각각 구한 탄성계수값을 식(4)에 대입하여 Fig. 9와 같이 잔류응력을 계산할 수 있었다. 잔류응력 값은 일정한 분포를 나타났으며, 그 평균값은 8.46 Mpa로 측정되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 전자처리패턴스페클 기법을 이용하여 평판 용접시험편의 용접부 잔류응력을 측정하였다. 용접부 및 모재부의 변형을 측정함으로써 제안된 기법을 이용하여 잔류응력을 수치적으로 제안하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접시험편의 인장 하중을 가하였을 때, 이를 레이저 간섭계를 이용하여 측정하였으며, 시험편의 모재부 및 용접부의 변형 및 변형률의 차이 발생을 측정하였다.
2) 용접부의 탄성계수는 모재부의 탄성계수보다 약 3.7배로 측정되었다. 측정된 탄성계수를 통하여 잔류응력값을 산출하였으며, 그 결과는 약 8.46 Mpa의 잔류응력이 존재하였다.

레이저 간섭계 기법은 비파괴, 대면적, 복잡한 형상에 구애받지 않으므로 용접 구조물의 신뢰성 평가에 용이할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2010년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

[1] J. F. Lancaster, "Metallurgy of Welding," 3rd Edition, pp. 1-5 (1980)

[2] K. Masubuchi, "Analysis of Welded Structures-Residual Stresses, Distortion, and Their Consequences," Pergamon Press, Oxford, (1980).

[3] P. Michaleris and A. DeBiccari, "Prediction of welding distortion," *Welding Journal*, Vol. 76, No. 4, pp. 172-179 (1997)

[4] V. Madjarova, S. Toyooka, R. Widiastuti and H. Kaadono, "Dynamic ESPI with subtraction-addition method for obtaining the

phase", *Optics Communications*, Vol. 212, pp. 35-43 (2002)

[5] K. S. Kim, D. S. Kim, H. C, Jung, K. S. Kim, S. Y. Jeon and D. P. Hong, "Deformation and detection frequency according to nuclear power pipe thickness by ESPI and infrared camera", *Proceedings of the Annual Spring Conference of the KSNT*, pp. 478-483 (2010)

[6] K. S. Kim, H. M. Kim, H. S, Chang and S. P. Yang, "Thermal deformation measurement spherical glasses lens using ESPI", *Journal of the KSNT*, Vol. 28, No. 2, pp. 137-143 (2008)