

레이저 간섭계를 이용한 배관 용접부 잔류응력 평가

Evaluation of Residual Stress on Pipe Welded Joints Using Laser Interferometry

장호섭*†, 나만균**, 김경석***

Ho-Seob Chang*† Man-Gyun Na* and Koung-Suk Kim

초 록 용접 잔류응력은 용접공정에서 발생하는 하는데, 용접 구조물의 결함 유발 및 파괴의 주요 원인이 된다. 본 논문에서는 전자 처리 레이저 스펙클 간섭법을 이용하여 원전 배관의 용접부 잔류응력을 측정하였다. 인장시험기를 이용하여 용접된 배관에 압축 하중을 가하였으며, 면내 변형 측정 간섭계를 이용하여 용접부와 모재부의 변형을 측정하였고, 제안된 수식에 의하여 탄성계수를 측정하였다. 용접 배관에 가해지는 하중에 따라 변형이 일정하게 증가하며, 용접 배관의 모재부와 용접부에 발생한 변형을 비교하였을 때, 모재부의 변형이 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 용접 배관 모재부의 탄성계수는 202.46 GPa, 용접부의 탄성계수는 212.14 GPa, 잔류응력은 6.29 MPa로 측정되었다.

주요용어: 전자처리 스펙클 간섭법, 용접, 변형, 탄성계수, 잔류응력

Abstract Residual stresses that occur during the welding process, are the main cause of failure and defects in welded structures. This paper, presents the use of an electronic processing laser speckle interferometer to measure the residual stress of a welded pipe for a nuclear power plant. A tensile testing machine was used to evaluate a welded pipe that failed in compression. The in-plane deformation and modulus of elasticity of the base metal and welds were measured using an interferometer. Varying the load on the welded pipe had a larger effect on the deformation of the base metal than the other properties of the base metal and welds. The elastic moduli of the base metal and weld of the welded pipe were 202.46 and 212.14 GPa, respectively, the residual stress was measured to be 6.29 MPa.

Keywords: Electronic Speckle Pattern Interferometry, Welded, Deformation, Young's Modulus, Residual Stress

1. 서론

용접은 접합하고자 하는 2개 이상의 재료의 접합부를 가열, 용융시켜 서로 결합시키는 방법으로, 선박, 자동차 분야에서 필수적인 가공 기술이다[1]. 하지만 용접은 단시간에 고열을 수반하는 금속접합이므로 심한 재질열화, 용접 변형, 잔류응력 등의 용접 결함을 일으켜 재료에 매우 큰 손상을 일으키며 특히 잔류응력은 용접 구조물의

결함 유발 및 파괴의 주원인이 된다[2]. 용접 잔류응력은 모든 용접 이음부에서 필연적으로 발생하지만 이음부에 따라 발생하는 용접 잔류응력의 분포는 서로 다르다. 따라서 이러한 잔류응력을 정량적으로 해석하기 위한 지속적인 연구가 필요한 실정이다[3,4].

용접 잔류응력은 용접부재의 형상이나 재질, 용접조건, 구속조건 등의 편차가 심하기 때문에 정확한 추정이 매우 어렵다. 그러므로 직접적 측정

[접수일: 2013. 3. 21, 수정일: 2013. 8. 9, 게재확정일: 2013. 8. 13] *조선대학교 레이저응용신기술개발센터, **조선대학교 원자력공학과, ***조선대학교 기계설계공학과 †Corresponding Author: Department of Mechanical Design Eng., Chosun Univ., 375 Seosuk dong, Dong-Gu, Gwangju 501-759, Korea (E-mail: hschang@chosun.ac.kr)

을 통해 잔류응력을 구하는 방법이 사용되며 크게 파괴 시험과 비파괴 시험으로 구분된다. 파괴 시험은 비교적 정확한 응력 측정이 가능하나 구조물에 손상을 입히고 측정 시간이 많이 소요된다. 반면 비파괴 시험은 재료에 손상을 입히지 않고 짧은 시간에 측정이 가능하다는 장점이 있다[5,6].

비파괴 계측법은 대상체의 물리·화학적 상태나 운전 조건을 변화, 파손시키지 않고 물리적 특성을 측정하는 기술로써 대형 구조물의 안전 진단에서부터 소형 제품의 신뢰성 평가 분야까지 산업 전반에 걸쳐 중요한 역할을 담당하고 있다[7-9].

전자처리 스펙클 간섭법을 이용하여 평판 용접부의 잔류응력을 측정하기 위한 이론적 방법을 제시하여 연구를 수행하였다[10].

본 논문에서 제안하는 배관 용접부 잔류응력 측정법은 잔류응력 측정에 대한 연구로써 용접구조물의 안전성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있는 기반 확립에 기여할 것으로 기대된다.

2. 이론

2.1. 면내 변위 측정 간섭계의 원리

면내 변형 측정 간섭계의 개념도는 Fig. 1과 같다. 대상물을 중심으로 동일한 각도로 조사되는 물체광과 참조광은 광학적으로 거친 표면에서 난반사되고 스펙클을 형성하며, 렌즈를 거쳐 상면에 결상된다. 이 스펙클은 대상물에 대한 위상 정보를 포함하고 있어 대상물의 변형을 레이저 파장 단위로 측정할 수 있다.

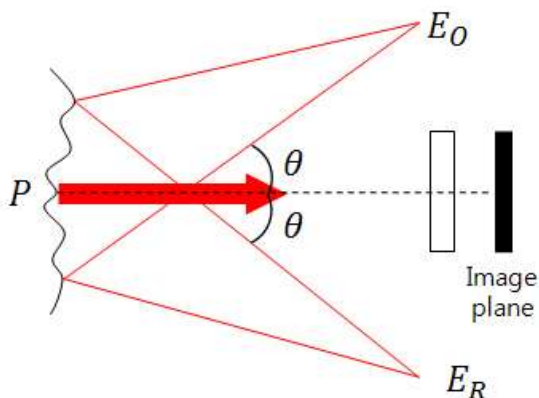


Fig. 1 In-plane displacement interferometry

2.2. 면내 변위 측정 간섭계를 이용한 잔류응력 측정법

Fig. 2는 용접된 배관의 용접부 잔류응력을 측정하고자 배관 용접 시험편에 압축하중이 가해졌을 때 모재부와 용접부의 변형량과 변형률을 배관의 위치에 따라 변화함을 개념적으로 나타내고 있다.

용접부를 중심으로 좌우측 모재부의 변형과 변형률의 기울기는 동일하고, 용접부의 변형과 변형률은 다음 세 가지 중 하나의 경우에 해당할 것이다. 모재부보다 변형이 작거나, 변형이 동일하거나 클 경우를 예상할 수 있다. 이때 변형량에 따라 변형률이 다르고 이를 이용하여 용접부의 탄성계수를 측정할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_m = \frac{P}{A_m} = \sigma_w + \sigma_R = \frac{P}{A_w} + \sigma_R \quad (1)$$

$$\sigma_m = E_m \epsilon_m = E_w \epsilon_w + \sigma_R \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_m &= E_m \epsilon_m = E_m \frac{\delta_m}{l_m} \\ &= E_w \epsilon_w + \sigma_R = E_w \frac{\delta_w}{l_w} + \sigma_R \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 하첨자 m 은 모재부를 나타내고, w 는 용접부를 나타내며, σ_R 은 잔류응력이다.

위의 식들에서 하중은 장치에서 입력값으로 알

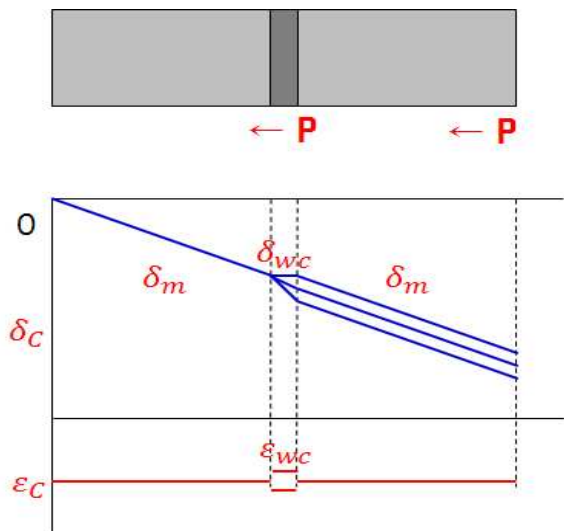


Fig. 2 Diagram of deformation and strain

수 있으며, 단면적, 길이 등은 최초 형상정보로 알 수 있다. 변형량은 레이저 스펙클 간섭계를 이용하여 측정한다. 탄성구간에서 변형률은 응력과 비례하므로 탄성계수는 측정된 변형량과 인장시험기의 작용 하중을 통해 알 수 있는 응력과 변형률선도의 기울기를 통해 계산할 수 있다.

위의 모든 변수는 최초의 정보나 측정을 통하여 계산되며, 미지수는 잔류응력 만이므로 이를 계산할 수 있게 된다.

3. 실험

3.1. 실험장치 및 구성

3.1.1. 면내 변형 측정 시스템

본문의 실험에서 잔류응력 측정 시 용접시험편에 하중을 인가하기 위해 미국 MTS 사의 상용제품(MTS 793)을 사용하였으며, 대상물에 발생하는 변형을 측정하기 위하여 독일 Ettmeyer 사의 상용제품(ESPI)시스템을 사용하였다. Fig. 3은 잔류응력 측정 시스템의 구성이다.



Fig. 3 In-plane deformation measurement system

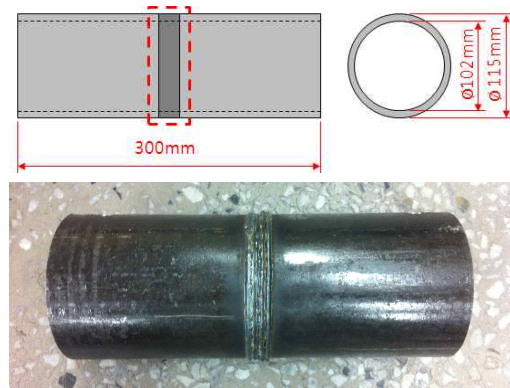


Fig. 4 Pipe welded specimen

3.1.2. 용접 시험편

배관 용접부 잔류응력을 측정하기 위해 Fig. 4와 같은 배관 용접 시험편을 제작하였다. 재질은 ASTM 106 Gr.B이고, 내경 102 mm(4"), 길이 150 mm의 2개의 배관을 groove 가공된 면을 맞대기 용접하여 하나의 용접 배관으로 제작하였다.

용접 방법은 CO₂ 용접법으로 50 cm/min의 속도로 용접하였다. 사용된 용접기는 Austria Frunius 사의 CMT(cold metal transfer) 저입열 용접기이며, CO₂ 가스와 ER70S 연강용 와이어를 사용하여 CMT mode로 용접하였다.

3.2. 실험 방법

본 논문에서 제시하는 방법으로 잔류응력을 측정하기 위하여 인장시험기로 압축하중을 인가하여 모재부와 용접부의 변형 및 변형률을 측정하였다. 면내 변형 측정 간섭계를 이용하여 면내 변형을 계측하고 본 논문에서 제시한 잔류응력 측정 방법을 통하여 잔류응력을 계산하였다.

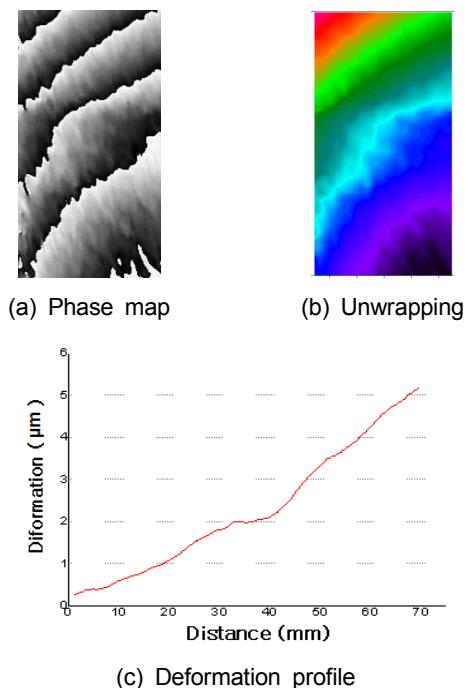


Fig. 5 Deformation measurement result of pipe welded specimen

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5(a)는 배관 용접시험편에 발생한 변형에 대한 위상지도이고, (b)는 위상지도를 결핍침한 결과이다. (c)는 (b)의 결핍침된 결과를 중앙에서 세로로 프로파일을 획득하여 면내 변형을 선도로 표현하였다.

Fig. 5(c)에서 나타난 바와 같이 선도의 중앙의 용접부는 변형이 상대적으로 거의 발생하지 않았으며, 모재부의 변형량과는 현저한 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 하중 증가에 대한 변형량 증가를 나타내고 있으며, 모든 하중영역에서 용접부의 변형이 모재부보다 작음을 알 수 있으며, 하중이 증가할수록 용접부와 모재부의 변형량 기울기가 확연히 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 1에 모재부 및 용접부의 면내 변형 측정 결과를 정리하였다. 응력과 변형률 결과를 이용하여 계산된 모재부의 탄성계수는 202.46 GPa이고 용접부의 탄성계수는 212.14 GPa로 용접부의 탄성계수가 약간 더 높게 측정 되었다. 그리고 각각의 탄성계수를 토대로 배관 용접부의 잔류응력을 계산하였으며 Fig. 7은 용접부의 잔류응력을 측정 한 그래프이다. 이렇게 하여 측정된 잔류응력 값은 6.29 MPa이다. 모재부와 용접부의 탄성계수 및 잔류응력을 Table 2에 정리하였다.

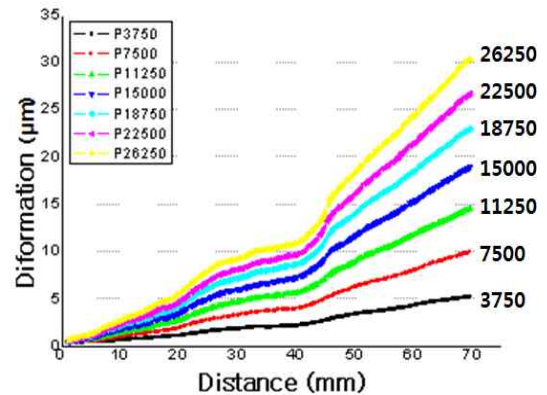


Fig. 6 Deformation graph of pipe welded specimen

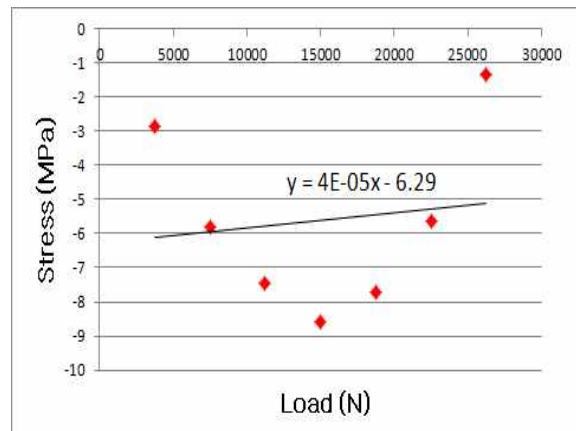


Fig. 7 Residual stress of pipe welded specimen

Table 1 Residual stress measurement result of pipe welded specimen according to the load change

Loading variation(N)	3,750	7,500	11,250	15,000	18,750	22,500	26,250
Base metal cross-section(m ²)	4.54E-04						
Base metal stress(MPa)	8.26	16.53	24.79	33.05	41.32	49.58	57.84
Base metal deflection(μm)	1.0796	2.2223	3.1876	4.1741	5.0063	5.6786	6.4621
Base metal distortion	4.92E-05	1.01E-04	1.45E-04	1.90E-04	2.28E-05	2.59E-04	2.95E-04
Base metal Young's modulus(GPa)	202.46						
Welding cross-section(m ²)	6.6E-04						
Welding stress(MPa)	5.68	11.36	17.03	22.71	28.39	34.07	39.75
Welding deflection(μm)	0.5790	1.1679	1.6655	2.1292	2.4570	2.6994	2.7928
Welding distortion	3.94E-05	7.95E-04	1.45E-04	1.45E-04	1.67E-04	1.45E-04	1.90E-04
Welding Young's modulus(GPa)	212.14						

Table 2 Residual stress measurement result of pipe welded specimen

Base metal Young's Modulus	202.46 GPa
Welding Young's Modulus	212.14 GPa
Residual Stress	6.29 MPa

5. 결론

본 논문에서는 여러 산업분야에서 사용되고 있는 용접구조물의 용접부의 잔류응력을 측정하기 위하여, 전자 처리 스펙클 간섭법을 이용하여 면내 변형을 측정하여 용접 잔류응력을 계산하는 새로운 잔류응력 측정법을 제안하고, 실험 및 데이터 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 배관 용접 시험편에 압축하중을 가하였을 경우 모재부와 용접부에서 변형의 차이가 발생함을 알 수 있었다.
- 2) 면내 변위 측정 간섭계를 통해 측정된 변형을 이용하여, 변형률을 계산하였고, 이 데이터를 잔류응력 계산식에 대입한 결과 모재부 및 용접부의 탄성계수를 측정할 수 있었고, 측정된 탄성계수를 토대로 용접부의 잔류응력을 측정할 수 있었다.

본 논문에서 제안하는 용접부 잔류응력 측정법은 잔류응력 예측에 대한 건전성 평가와 기술 개발의 이론과 실험이 결합된 기초연구로서 용접구조물의 안전성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있는 기반 확립에 크게 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 방사선기술개발사업(2012M2A2A9035705) 및 원자력연구개발사업(원자력선진기술연구센터, No.2012-0668) 지원을 받아 수행된 것임.

참고문헌

- [1] W. H. Kearns, "Welding Handbook," American Welding Society, 7th Edition, Vol. 5, pp. 276-311 (1984)
- [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] A. J. A. Parlane, "Residual stresses in thick weldments (A review of contemporary measurement techniques)," The welding institute, Abington, Cambridge, England (1977)
- [5] An editorial department of The Korean Welding and joining Society, "A guide of welding joining," The Korean welding and joining society (1998)
- [6] J. Y. Park, "Welding production engineering", pp. 333-335 (2010)
- [7] G. Groh, "The Engineering Uses of Laser Produced Speckle Pattern: Edited by E. Robertson and J. M. Harvey," Cambridge Univ. Press, pp. 483-494 (1970)
- [8] K. S. Kim, H. J. Jung, C. J. Park, D. S. Kim, D. W. Jung and H. S. Jang, "A study on measuring the temperature and revising the result when measuring the temperature of NPP pipes using infrared thermography," *Journal of the KSNT*, Vol. 29, No. 5, pp. 421-426 (2009)
- [9] J. W. Kim, K. W. Yun, H. C. Jung and K. S. Kim, "Determination of an test condition for IR thermography to inspect a wall-thinning defect in nuclear piping components", *Journal of the KSNT*, Vol. 32, No. 1, pp. 12-19 (2012)
- [10] H. S. Chang, D. S. Kim, H. C. Jung and K. S. Kim, "Residual stress measurement of flat welded specimen by electronic speckle pattern interferometry", *Journal of the KSNT*, Vol 32, No. 2, pp. 149-154 (2012)