

전단간섭계와 적외선열화상을 이용한 감육 직관의 결함검출

Defect Detection of Wall Thinned Straight Pipe using Shearography and Lock-in Infrared Thermography

김경석^{1,✉}, 정현철¹, 장호섭², 김하식³, 나성원⁴
 Kyeong Suk Kim^{1,✉}, Hyun Chul Jung¹, Ho Seob Chang², Ha Sig Kim³ and Sung Won La⁴

1 조선대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chosun Univ.)

2 조선대학교 레이저응용 신기술 개발 연구센터 (Laser Center, Chosun Univ.)

3 조선이공대학 선박해양기계과 (Department of Naval Architecture & Mechanics, Chosun College Univ.)

4 조선대학교 첨단부품소재공학과 (Department of Advanced parts and Materials Engineering, Graduate School, Chosun Univ.)

✉ Corresponding author: gskim@chosun.ac.kr, Tel: 062-230-7213

Manuscript received: 2009.3.25 / Revised: 2009.6.3 / Accepted: 2009.8.25

The wall thinning defect of nuclear power pipe is mainly occurred by the affect of the flow accelerated corrosion (FAC) of fluid. This type of defect becomes the cause of damage or destruction of in carbon steel pipes. Therefore, it is very important to measure defect which is existed not only on the welding part but also on the whole field of pipe. This study use dual-beam Shearography, which can measure the out-of-plane deformation and the in-plane deformation by using another illuminated laser beam and simple image processing technique. And this study proposes Infrared thermography, which is a two-dimensional non-contact nondestructive evaluation that can detect internal defects from the thermal distribution by the inspection of infrared light radiated from the object surface. In this paper, defect of nuclear power pipe were, measured using dual-beam shearography and infrared thermography, quantitatively evaluated by the analysis of phase map and thermal image pattern.

Key Words: Shearography (이중 빛 전단간섭계), Defect Detection (결함검출), Infrared Thermography (적외선열화상), Wall Thinned Pipe (감육관)

1. 서론

현대산업에서의 각종 구조물은 급속히 대형화, 고압화, 고속화되고 있으며, 아울러 안전성에 대한 신뢰도가 중요한 문제로 대두되고 있다. 모든 재료는 완전무결할 수 없기 때문에 가공 및 사용 중에도 결함이 발생하고 성장함으로써 재료의 수명에 영향을 준다. 따라서 비파괴 검사를 통하여 불량품을 조기에 발견하고 조치함으로써 노동력과 재료, 시간을 절약하게 되어 원가 절감효과를 가져온다. 특히 발전소 등의 생산설비에 사용되는 배

관은 생산설비의 성능이나 안전성 유지에 있어서 매우 중요한 설비의 일부이다. 원자력 배관은 사용기간의 증가에 따라 피로, 부식 등 여러 종류의 열화손상을 받을 우려가 있는데, 그 중 하나가 원자력 배관에서의 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion, FAC)에 의한 감육결함(wall thinning defect)이다.¹ 이러한 감육결함으로 인한 국부적인 응력 집중으로 배관이 파손되는 사례가 발생하였다. 따라서 탄소강 배관에서 감육결함은 원전 배관의 건전성 확보 측면에서 중요한 관리 항목으로 대두되고 있으며, 배관계통에서 감육 결함을 예측

하고 검출된 결함을 평가할 수 있는 적절한 절차와 방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 원자력 배관에서의 요구들을 해결하기 위해 이중 빛 전단간섭계(Dual-Beam Shearography)와 적외선열화상기법을 이용하여 효과적인 결함검출 방법을 제시하고자 한다.

2. 원리

2.1 이중 빛 전단간섭계 원리

Fig. 1 은 x 축 변형을 계측하기 위한 이중 빛 전단간섭계의 좌표구성이다. 광 분할기(Beam splitter:B.S)에 의해 나누어진 두개의 레이저빔을 동일한 각도로 번갈아 조사한다. 빔의 방향은 측정의 변형성분에 달려있다. 변형성분의 측정은 x 방향과 평행하고, 두 빔의 입사는 각각 y, z 평면에 대칭이다. 위상변화는 +θ beam 과, -θ beam 이 각각 조사하는 동안의 물체의 변형에 기인한다. +θ 에 기인하는 위상변화 Δ+θ 은 식(1)과 같다.^{2,3}

$$\Delta_{+\theta} = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ [1 + \cos(+\theta)] \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + \sin(+\theta) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \delta x \quad (1)$$

-θ 에 의한 위상변화 Δ-θ 은 다음으로 주어진다.

$$\Delta_{-\theta} = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ [1 + \cos(-\theta)] \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + \sin(-\theta) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \delta x \quad (2)$$

여기서 λ는 레이저의 파장이고, δx 는 게이지 길이에 상당하는 전단량이다. 측정은 대상체에 한번에 하나의 빔만 조사되고, +θ beam 의 조사와 함께 위상이동에 대응하는 4 개의 스펙클 이미지는 연속적으로 저장된다. 식(1)과, 식(2)의 감산은 식(3)과 같다.

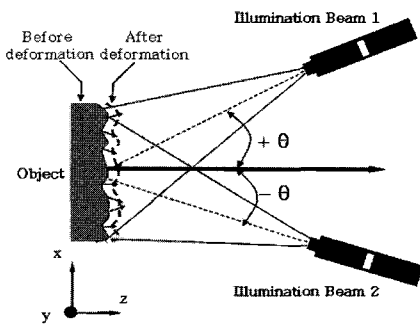


Fig. 1 Dual-beam interferometer geometry

$$\Delta_{+\theta} - \Delta_{-\theta} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \sin \theta \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \delta x \quad (3)$$

면의변위의 도함수 또한 (Δ+θ + Δ-θ)의 합의 계산에 의해서 결정할 수 있다.

$$\Delta_{+\theta} + \Delta_{-\theta} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2(1 + \cos \theta) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta x \quad (4)$$

2.2 Lock-in Thermography

위상잠금 적외선 열화상 기법은 자극원을 조화 함수로 하여 대상체에 입사하고 이때 대상체의 응답신호를 처리하여 위상, 진폭 등의 변화를 구하는 방법이다. 외부 자극원으로는 결함의 종류와 대상체의 재질에 따라 조화함수로 제어가 용이한 광, 초음파, 진동 등이 사용된다. 이 기법은 Fig. 2 와 같이 조화함수로 입사되는 열원에 적외선 검출 소자를 동기화시켜 대상체의 응답신호를 획득하게 된다. 식(5)로 표현되는 고체 내의 1 차원 열전도방정식에서 외부 자극원으로서 광을 사용하여 대상체에 조화함수로 가열하고, 이때 대상체로 침투한 열원의 변화를 관찰하여 결함을 검출하는 방법이 다.^{4,5}

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5)$$

여기에서 T는 온도, t는 시간, k는 열전도계수, ρ는 밀도, Cp는 비열, x는 열유동 방향으로의 거리이다. 식(5)의 해는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(x, y) = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \quad (6)$$

여기서 μ = √(α/πf)는 침투깊이, α = k/(ρcp)는 열확산계수 T는 온도, t는 시간, x는 열유동 방향으로의 거리, f는 광원의 주파수, k는 열전도계수, ρ는 밀도, Cp는 비열을 나타낸다.

식(6)의 측정결과로부터 위상을 추출함으로써 검출 민감도를 향상시킬 수 있으며, 표면 방사율의 불균일성에 의한 결함 검출 오류를 최소화 할 수 있다. 식(6)에서 위상은 외부 자극원과 적외선 검출소자를 동기시켜 자극원의 λ/4 주기 간격으

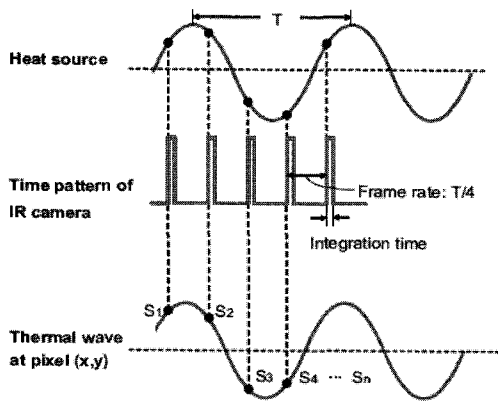


Fig. 2 Principle of Lock-in thermography

로 연속하는 적외선 검출신호 I_1, I_2, I_3, I_4 를 식 (7) 과 같이 획득하고, 식(8)을 사용하여 추출할 수 있다.^{5,6}

$$\begin{aligned}
 I_1 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \\
 I_2 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi/2) \\
 I_3 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi) \\
 I_4 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - 3\pi/2)
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\phi = x/\mu = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (8)$$

3. 시험장치 및 시험편

3.1 시험편

본 실험에서 사용한 시험편의 형상은 Fig. 3 과 같다. 시험편의 길이(L)=342mm, 외경(D_o)=113.4mm, 내경(D_i)=99mm 이고 시험편의 재질은 ASTM A106 GrB 로써 항복강도는 240MPa, 인장강도는 415MPa, 길이방향 연신률은 30%이다. Fig. 3 에서 l 은 결함의 길이를 나타내며, 결함의 폭은 2θ 로 나타내었

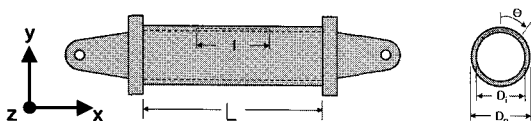


Fig. 3 Shape of pipe specimen

Table 1 Type of specimen

ID No.	Defect Length (mm)	Defect Width (2θ)	Minimum Thickness (mm)
SSP-0A	No defect	No defect	7.2
SSP-2G	113.40	90°	3.6
SSP-2H	113.40	90°	1.8
SSP-4H	226.80	90°	1.8

다. 시험편 내부의 인공 감옥결함 가공은 선반가공을 통하여 결함의 길이별, 두께별로 가공하였다. Table 1 은 각 조건별 시험편의 종류를 나타낸 것이다. 직관시험편에 가압을 위한 가압장치를 설치하였고, 정밀한 압력 제어를 위해 정밀 압력계지를 부착하여 압력을 제어하였다. 각 실험에 앞서 무결함 시험편(SSP-0A)에 대한 실험을 수행하여 기준 데이터를 획득하였다.

3.2 이중 빛 전단간섭계

Fig. 4 는 이중 빛 전단간섭계 시스템을 나타내고 있다. 레이저는 Nd:YAG 레이저를 사용하였고 셔터를 이용하여 각 방향으로 레이저를 조사하여 각 방향에 따른 데이터를 획득하였다.

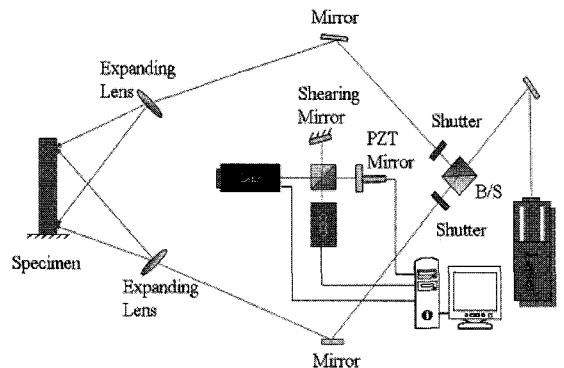


Fig. 4 Schematic of Dual-Beam Shearography system

3.3 적외선열화상

위상잠금 적외선 열화상 시스템의 구성을 Fig. 5 에 나타내었으며, 프랑스 Cedip 사의 Silver 480 상용제품을 사용하였으며, 시스템은 함수발생기에 의해 할로겐 램프의 주파수를 조절하고 이와 동기화하여 적외선 검출소자로부터 위상이미지(Phase map)를 사용자에게 제공한다.

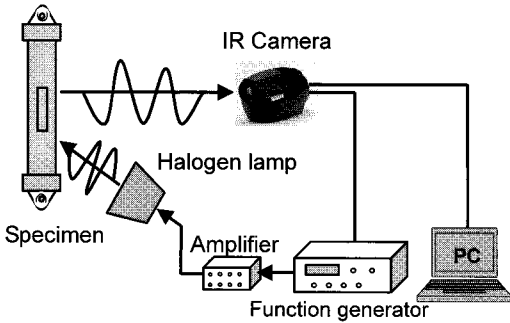


Fig. 5 Schematic of lock-in photo-infrared thermography

4. 실험결과 및 고찰

4.1 이중 빛 전단간섭계를 이용한 측정

결합의 종류에 따라 결합의 원주방향 길이를 측정하였다. 결합의 종류는 총 3 가지이며 결합을 가공하지 않은 정상적인 직관에 대해 압력차의 변화에 따른 결과를 기준 자료로 하여 실험을 행하였다. 감육결합이 있는 직관시험편의 결합을 측정하기 위하여 직관에 압력의 변화를 0.02MPa 씩 증가하여 0.1MPa 까지 변화하였고, y 방향으로 5mm 전단량을 주었고, 압력에 의한 원자력 배관의 내부 결합을 이중 빛 전단간섭계를 이용하여 측정하였다. Fig. 6 에 무결합 시험편인 SSP-OA 시험편에 대한 측정결과인 위상지도를 나타내었다. 모든 시

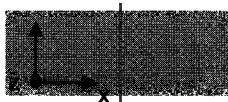


Fig. 6 Phase map of SSP-OA

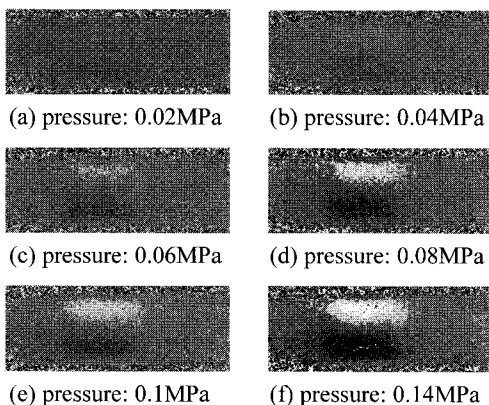


Fig. 7 Phase map of SSP-2G as the change of pressure amount

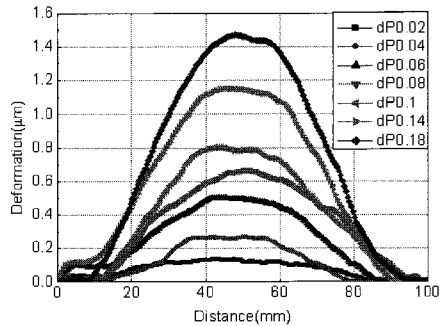


Fig. 8 Deformation of SSP-2G as the change of pressure amount

험편의 측정결과는 y 축방향의 프로파일을 이용하여 결과를 획득하였다. Fig. 7 과 Fig. 8 은 SSP-2G 시험편의 위상지도(Phase map)와 그에 따른 변형량의 측정된 결과를 나타내었다.

Fig. 9 와 Fig. 10 은 SSP-2H 시험편의 위상지도(Phase map)와 그에 따른 변형량의 측정결과를 나타내었다. 두 시험편의 위상지도에서 볼 수 있듯이 감육결합부의 영향이 압력차가 0.04MPa 일 때부터 두드러지게 나타나며, 압력차가 증가할수록 감육결합부가 확실히 드러남을 알 수 있다. 또한, 최소두께가 줄어들수록 적은 압력차에서도 감육결합의 형상이 명확해지는 것을 알 수 있다. 두 시험편의 Line profile로부터 얻은 변형값을 살펴보면 최소두께가 줄어들수록 동일한 압력차에서 변형값이 크게 나타난 것을 알 수 있으며 동일한 압력차에서 변형값이 약 2 배정도 차이가 나는 것을 알 수 있다.

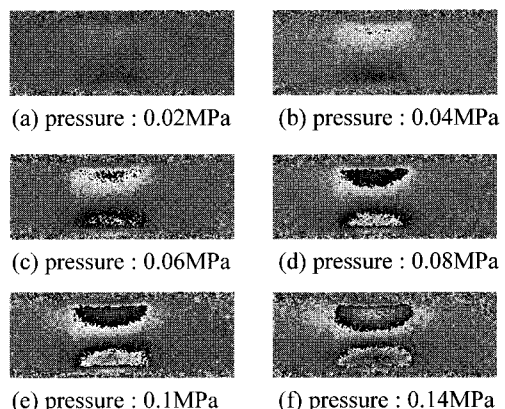


Fig. 9 Phase map of SSP-2H as the change of pressure amount

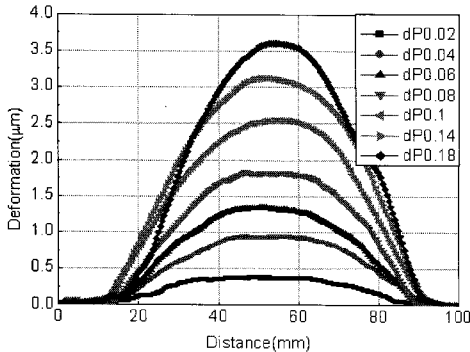


Fig. 10 Deformation of SSP-2H as the change of pressure amount

Fig. 11 과 Fig. 12 는 SSP-4H 의 위상지도와 그에 따른 변형량의 측정결과를 나타내었다. 이는 SSP-2G, SSP-2H 의 위상지도와 비교하여 볼 때, 결함

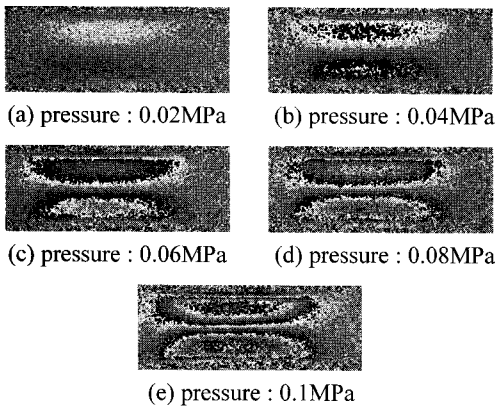


Fig. 11 Phase map of SSP-4H as the change of pressure amount

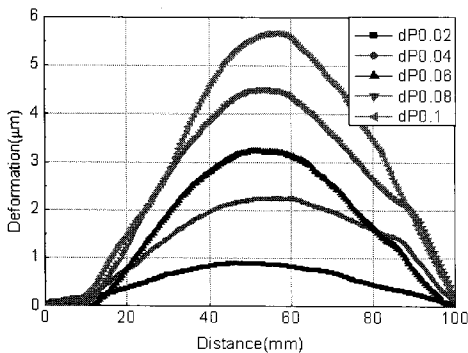


Fig. 12 Deformation of SSP-4H as the change of pressure amount

길이 가 길어짐에 따라 위상지도의 형태, 즉 변형의 형상이 커짐을 알 수 있었다. 또한 결함의 길이가 클수록 낮은 압력차에서 변형이 크게 발생함을 확인하였다. 원주방향의 line profile 로 부터 얻은 각각의 변형량을 비교하였을 때 결함의 길이가 2 배씩 증가할 경우 변형량이 약 2 배씩 증가하는 것을 알 수 있다.

4.2 적외선열화상을 이용한 측정

시험편의 표면에 방사페인트를 도포하여 방사율을 0.95 로 유지하였고, 위상잠금기법을 이용하여 열원과 검출소자를 동기화시켜 주파수(50MHz)를 주어 위상이미지(Phase map)를 신호처리를 통하여 결함검출을 행하였다. 결함의 유무에 따른 측정결과를 비교하기 위하여 먼저 결함을 가공하지 않는 직관의 실험을 수행하였고, 이 결과를 기준으로 하여 두께와 길이별로 결함을 비교하였다. 감속결함이 있는 직관시험편의 결함을 측정하기 위하여 주변의 온도를(20±0.5℃) 일정하게 유지하고, 방사된 에너지를 적외선열화상(IRT)을 이용하여 온도를 검출하였다. 측정된 결함부의 온도가 결함부의 최소두께에 따라 다르고, 결함의 길이에 따라 측정되는 결함의 길이가 다를 것이라는 가정하에 실험을 진행하였다. 각 조건에 따른 적외선열화상 이미지를 Fig. 13 에 나타내었다. Fig. 14 는 SSP-2G, SSP-4H 시험편의 결함부의 최소두께에 따른 온도를 비교하였으며, Fig. 15 는 SSP-2H, SSP-4H 시험편의 결함의 길이에 따른 온도를 비교하여 나타내었다. Table 2 는 이중 빔 진단간섭계와 적외선열화상기법을 이용한 원자력 배관 결함의 길이를 측정된 결과를 나타내었다.

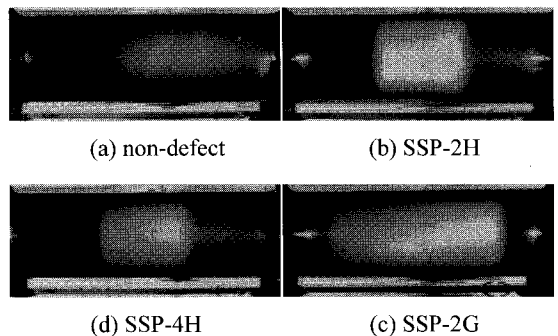


Fig. 13 Infrared thermography images according to the defect thickness

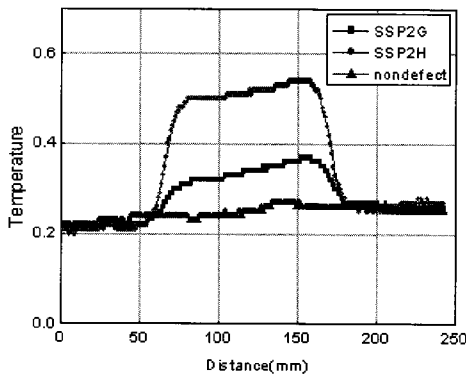


Fig. 14 Data comparison by defect thickness

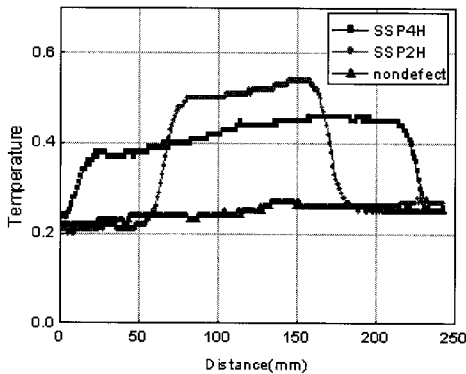


Fig. 15 Data comparison by defect length

Table 2 Comparison of measured defect length

	SSP-2H	SSP-4H
Real Defect Length	113.40mm	226.80mm
Shearography	114.24mm	230.88mm
Error	0.7%	1.8%
Infrared hermography	118.17mm	230.33mm
Error	4.0%	1.4%

실험결과 무결합시험편(SSP-0A)을 기준으로 최소두께별로 비교하였을 때 SSP-2H와 SSP-2G 시험편의 온도변화가 약 2 배 증가함을 알 수 있었다. 또한 결함길이별 시험편의 측정결과 SSP-2H는 약 120mm, SSP-4H는 약 230mm로 인공 결함길이와 약 5%이내의 오차를 얻을 수 있었다. 두 조건 모두 시험편의 방사페인트 도포의 불균일성에 따른 실험상의 오차가 발생했지만 대체적으로 정확한 결함길이(측방향 결함크기), 위치를 측정할 수 있었다. 본 연구를 통해 위상잠금 광-적외선 열화상 기법을 이용하여 인공으로 가공된 결함에 대한 적

용가능성을 검증하였다. 향후 높은 정확도를 가질 수 있도록 오차를 보정하기 위한 방법에 대한 연구가 필요하며, 적외선 열화상을 이용하여 내부결합의 두께측정이 가능할 것으로 예상된다.

5. 결론

(1) 이중 빛 전단간섭계의 측정결과 중 결함 최소두께별 시험편에서 최소두께가 줄어들수록 적은 압력차에서도 감육결합의 형상이 명확해지는 것을 알 수 있었다. 또한, 최소두께가 줄어들수록 동일한 압력차에서 변형값이 크게 나타난 것을 알 수 있었으며 동일한 압력차에서 변형값이 약 2 배 정도 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

(2) 이중 빛 전단간섭계의 측정결과 중 결함 길이별 시험편에서 결함 길이가 길어짐에 따라 위상지도의 형태, 즉 변형의 형상이 커지는 것을 알 수 있었으며, 결함의 길이가 클수록 낮은 압력차에서 변형이 크게 나타난 것을 알 수 있었다. 또한, 결함의 길이를 측정해본 결과 실제 결함의 길이와의 오차가 5%이내임을 알 수 있었다.

(3) IRT의 측정 결과 중 결함 두께별 시험편에서 결함의 최소두께에 따라 온도가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, 실험결과 무결합 시험편을 기준으로 최소두께별로 비교하였을 때 온도변화가 약 2 배씩 증가하는 것을 알 수 있었다.

(4) IRT의 측정 결과 중 결함 길이별 시험편에서 결함길이별 시험편의 측정결과 이중 빛 전단간섭계와 동일하게 결함 길이가 클수록 변형의 형상이 커진 것을 알 수 있었으며, 결함의 길이를 IRT로 측정한 결과 실제결합의 길이와의 오차가 약 6%이내의 오차를 얻을 수 있었다.

후 기

이 논문은 2007년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

1. Frank, M., Hans, R. and Helmut, S., "Experience with piping in German NPPs with Respect to Ageing-Related Aspects," Nuclear Engineering and Design, Vol. 207, No. 3, pp. 307-316, 2001.

2. Steinchen, W. and Yang, L., "Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing interferometry," SPIE Press, pp. 149-154, 2003.
3. Hung, Y. Y., "Speckle-shearing interferometric technique: A full-field strain gauge," Applied Optics, Vol. 14, No. 3, pp. 618-622, 1975.
4. Kim, M. K. and Kim, K. S., "Defect detection of Aluminum 6061-T1 using Lock-in Photo-infrared thermography technique," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 523-524, 2008.
5. Wu, D. and Busse, G., "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," Revue Generale de Thermique, Vol. 37, No. 8, pp. 693-703, 1998.
6. Busse, G., "Technique of Infrared Thermography in Infrared and Thermal Testing, NDT Handbook, Vol. 3, 3rd Edition," ASNT, pp. 318-328, 2001.
7. Bai, W. and Wong, B. S., "Evaluation of defects in composite plates under convective environments using lock-in thermography," Measurement Science and Technology, Vol. 12, No. 2, pp. 142-150, 2001.