

전단간섭법을 이용한 배관 순환 시스템에서의 압력용기 내부결함 및 면외변형 측정

Measurement of Inner Defects and out of Plane Deformation of Pressure Vessel in Piping of Circulation System Using Shearography

강찬근*, 김현호**, 정현일**, 최태호**, 정현철***, 김경석***†

Chan-Geun Kang*, Hyun-Ho Kim**, Hyun-Il Jung**, Tae-Ho Choi**, Hyun-Chul Jung***
and Kyeong-Suk Kim***†

초 록 다양한 산업분야에서 사용되는 압력용기는 발전설비의 70~80%를 구성하는 설비구조물로서 유속에 의한 감속결함 현상이 발생할 수 있으며 내부결함 측정이 설비의 안전진단 평가에 중요한 요소가 된다. 본 논문에서는 광계측 응용 비파괴검사 기술인 전단간섭법을 이용하여 압력용기의 비접촉 비파괴평가를 통한 발전설비의 안정성 확보와 신뢰성 향상에 있다. 이를 검증하기 위하여 압력용기에 임의의 결함을 가공하여 배관 순환 시스템을 적용한 내부의 온도 변화와 압력 변화에 따른 내부결함 계측 및 면외 변형량 계측에 대하여 실험과 해석을 수행하였다. 본 연구를 통한 결함의 존재 유무를 구분할 수 있도록 하는 가장 중요한 요소는 결함 두께, 폭 및 결함길이라 할 수 있으며 결함 두께, 폭, 길이가 커질수록 변형량도 커짐을 확인할 수 있었다. 따라서 전단간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함을 사전에 측정하여 배관의 신뢰성과 건전성을 확보하는데 주요할 것으로 보인다.

주요용어: 전단간섭법, 압력용기, 배관 순환 시스템, 내부결함, 면외변형

Abstract Wall thinning defects can occur in the pressure vessels used in a variety of industries. Such defects are related to the flow velocity. Considering the fact that such vessels constitute up to 70 or 80% of the plant structures in a power plant, it is important to measure internal defects as part of a safety evaluation. In this study, optical measurement were applied in a non-destructive evaluation using shearography to ensure the safety and improve the reliability of a power plant through the non-contact, non-destructive evaluation of pressure vessels. In order to verify whether the pressure vessels contained faults, experimental and analytical investigation were conducted to measure any internal defects and out-of-plane deformation from inner temperature changes and pressure changes in the piping of the circulation system. The most important factors in this research were the thickness, width, and length of a defect. An increase in these could confirm an increase in the deformation. Thus, internal defects in a pressure vessel were measured using shearography, which made it possible to ensure the reliability and integrity of the pipe.

Keywords: Shearing Interferometry, Pressure Vessels, Piping Circulation System, Inner Defect, Out-of-Plane Deformation

1. 서 론

원자력 설비의 결함 검사는 매우 중요한 기술이나 검사기법에 관한 연구가 많이 부족하다.

고온과, 방사선의 위험, 매우 복잡한 형상 등의 원인으로 그간 사용되어온 검사기법들은 실제적인 해결방법을 제시하지 못하여 왔다. 또한 국내 광계측 분야는 단순 구조물의 계측이라는 실험실

[접수일: 2014. 4. 28, 수정일: (1차: 2014. 8. 3, 2차: 2014. 10. 1) 게재확정일: 2014. 10. 16] *조선대학교 대학원 기계시스템공학과, **조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과, ***조선대학교 기계시스템공학과, † Corresponding Author: Dept. of Mechanical System Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea (E-mail: gskim@chosun.ac.kr)

차원의 연구에 국한되어 해외 연구에 비하여 그 활용성이 떨어졌다. 이를 탈피하기 위하여 새로운 비접촉 레이저 결함 검사를 통한 결함 형상 측정에 관한 연구가 진행 되었지만, 정량적 크기 측정과 두께 측정 부분을 만족하지 못하였다.

최근 다양한 구조물을 안전하게 관리하기 위한 비파괴검사 기술은 원자력발전 설비, 석유화학 플랜트 등 거대 설비 기기들에서부터 반도체 등의 소형 제품에 이르기까지 다양한 분야로 많이 사용되어지고 있다. 본 검사 기술을 통한 산업설비의 부재 결함을 신속하고 정확하게 검출하여 산업시설물에 대한 제품 수명성, 경제성, 건전성 등을 확보하여 산업 전반에 중요한 역할을 담당할 것이다. 그에 따른 비파괴 안전진단을 통해 대형 사고의 사전예방에서부터 검사 대상의 신뢰성 평가까지 얻어 기업 경쟁력 강화에 큰 기반을 둘 것이다. 비파괴검사에 있어서 내부검사법에는 초음파탐상검사, 방사선투과검사를 들 수 있으며 외부검사로는 육안검사, 자분탐상검사, 침투탐상검사, 와류탐상검사 등을 들 수 있겠다[1].

이러한 비파괴검사 방법들은 접촉식이거나 측정 대상물에 전처리 과정을 거치는 문제점이 있으나 레이저를 이용한 검사 방법은 비접촉식이며 특정한 전처리 과정없이 검사를 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다. 대상물의 변형을 측정하는데 있어서 접촉식과 비접촉식으로 분류되며 접촉식 변형측정 방법은 스트레인게이지와 가속도계 등이 있으며 비접촉식 변형 측정 방법은 레이저를 이용하여 계측하는 방법이 있다[2,3].

전단간섭계는 전자처리스펙클 간섭법과 유사한 간섭신호처리 알고리즘이 있으면서도, 간섭계 구성의 차이로 면외변위의 1차 미분값을 직접 측정할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점은 외부환경의 진동외란에 둔감하면서 면외변위의 변화를 측정함으로써 변형을 해석과 진동해석을 할 수 있으며, 결함의 정량화, 기계구조물 해석 등의 비파괴검사 분야에서 매우 유용한 방법으로 활용되고 있다[4,5].

본 논문에서는 전단간섭법을 이용한 원자력 압력용기 결함의 비접촉 비파괴평가를 통한 원자력 기기의 안정성 확보와 신뢰성 향상에 있다. 또한 광계측 비파괴검사 기술의 원자력 압력용기계열 현장 적용을 위한 기초기술 확보 및 광

계측 검사기술의 선진화 및 표준화에 연구 목표를 두고 있다.

이를 검증하기 위하여 압력용기에 임의의 결함을 가공하여 압력용기 내부의 온도 변화와 압력 변화에 따른 결함부 면외변형의 계측에 대하여 실험과 해석을 수행하였다.

2. 이 론

2.1. 전단간섭계의 원리

전단간섭계에서 사용되는 간섭계는 마이켈슨(Michelson) 간섭계의 변형된 형태가 많이 사용된다. Fig. 1은 전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도로써 하나의 확산광이 대상물에 조사된다. 이때 스펙클의 난반사된 빛이 광분할기에 의해 두 개의 빛으로 나누어진 후, 하나는 Mirror 1에 입사/반사되어 상면에 맺히고, 다른 하나는 Mirror 2에서 반사되어 다시 광분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때 Mirror 2에 임의의 기울기를 주면 기울어진 Mirror 2에서 반사된 파면은 Mirror 1에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단(shearing) 되어 CCD의 상면(image plane)에 맺히게 된다. Mirror 2를 전단거울이라고 부르며, Mirror 2가 기울어진 방향을 전단방향, 기울어진 각도를 전단량이라고 하고 δx 로 표현한다. 전단방향과 전단량 등에 영향을 받아 간섭 줄무늬 형태가 결정된다.

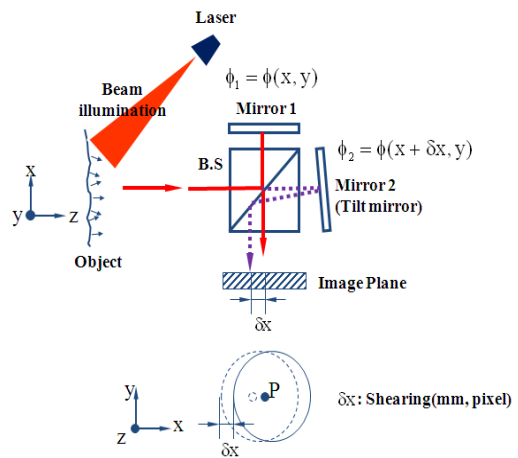


Fig. 1 Shearing interferometry principle

2.2. 전단간섭계를 적용한 변형 측정

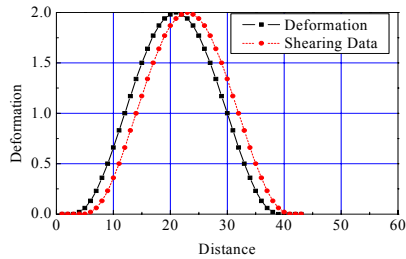
전단간섭계의 전단거울이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라에 전단이미지가 형성되는데 이는 Fig. 2(a)의 점선과 같이 일정 거리 즉, 화소수만큼 평행이동 되어 나타난다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)에 표현된 두 값을 감산한 결과로써, 전단간섭법으로 표현되는 변형 전과 변형 후 상태의 비교 결과와 동일하며, 이는 임의의 두 점 사이의 평균 기울기의 연속적인 표현이라고 할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 내용은 Fig. 2(b)의 결과를 평행 이동시킨 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이는 Fig. 2(c)와 같으며, 전단간섭법만을 이용하여

대상물에 발생하는 면외변형을 측정할 수 있음을 나타낸다.

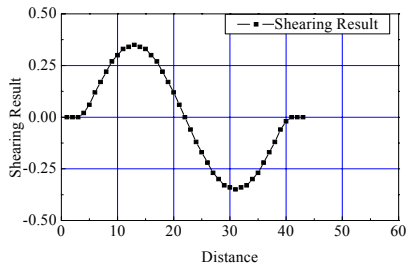
3. 실험

3.1. 시험편

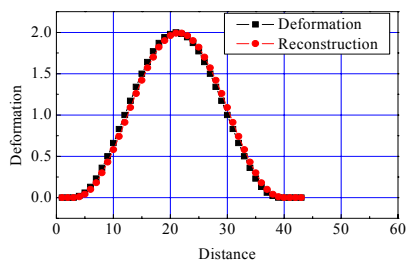
압력용기 시험편을 인공적으로 90° 결함 각도로 임의의 결함을 축방향인 길이방향의 2중씩 가공하여 총 8개의 결함을 가공하였으며 감속결함을 가공할 때 결함의 끝단이 각이 지도록 가공하고자 하였으나 가공 시 정확한 가공이 힘들어 원주방향으로 공구의 직경에 해당하는 곡률반경 250 mm를 갖는 형상으로 원자력 배관 모사 압력용기 시험편을 제작하였다. Fig. 3는 시험편의 형상과 치수를 보여주고 있으며 시험편의 재질은 ASTM A53 Gr.B Type F로써 항복강도는 240 MPa, 인장강도는 415 MPa, 길이방향의 연신율은 30%이다. Table 1과 2는 시험편에 대한 성질과 정보를 보여주고 있으며 Table 3은 각 시험편의 결함 깊이, 결함 폭, 결함 길이 조건별 종류를 보여주고 있다.



(a) Deformation and shearing data



(b) Shearing result



(c) Deformation and reconstruction

Fig. 2 Measurement result of surface deformation by shearography

Table 1 Mechanical properties of pipe material

| Yield strength (MPa) | Tesile strength (MPa) | Longitudinal elongation (%) |
|----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 240 | 415 | 30 |

Table 2 Date of pressure vessel specimen

| Description | Specimen Data |
|--------------------------|---------------|
| Length of pipe (L) | 400 mm |
| Outside diameter (Do) | 76.4 mm |
| Inside diameter (Di) | 69 mm |
| No Defect thickness (tp) | 3.7 mm |

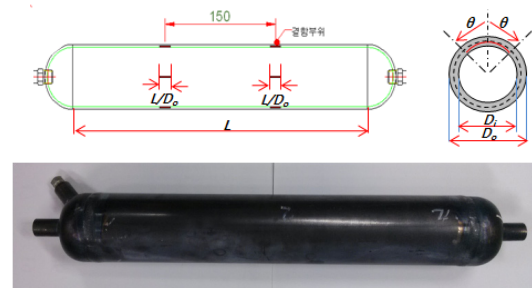


Fig. 3 Shape of pressure vessel specimen

Table 3 Type of specimen and defect shape

| Specimen No. | Min. thickness (mm) | Width of defect (mm) | Length of defect (mm) | |
|--------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----|
| PVS-1 | 1.387 (3/8 t) | 10 | 1 | 5 |
| | | | 2 | 10 |
| | | | 3 | 20 |
| | | | 4 | 40 |
| | | 20 | 5 | 5 |
| | | | 6 | 10 |
| | | | 7 | 20 |
| | | | 8 | 40 |
| PVS-2 | 1.85 (4/8 t) | 10 | 1 | 5 |
| | | | 2 | 10 |
| | | | 3 | 20 |
| | | | 4 | 40 |
| | | 20 | 5 | 5 |
| | | | 6 | 10 |
| | | | 7 | 20 |
| | | | 8 | 40 |

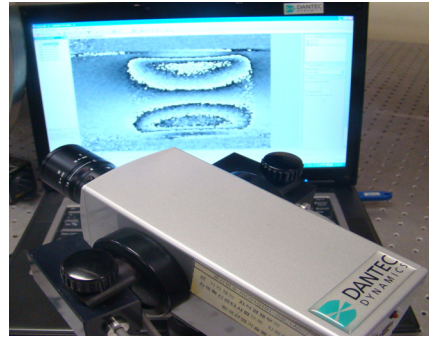


Fig. 4 Shearography system

Table 4 Specification of Q-800 shearography system

| | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| CCD resolution | 1392 × 1040 px |
| Inspection Speed | 300 mm × 300 mm / 20s |
| Shear Distance | up to 1/20 FOV |
| Measuring Sensitivity | 0.03 μm/shear distance |
| Sensor Head Dimension | W×H×D = 70×70×160 mm ³ |
| Laser Diode | 2 × 70 mW |

3.2. 실험장치

3.2.1 전단간섭계 시스템

Fig. 4는 비파괴검사 방법중의 하나로 재료의 표면 정보를 제공해주는 측정시스템으로 Dantec Dynamics(덴마크)사의 상용 shearography(Q-800) 제품을 사용하였다. 이 시스템의 기술은 비접촉식이며 재료의 내부 품질에 대한 신속하고 정확한 정보를 제공하는 비파괴 테스트를 위한 휴대용 소형 측정 시스템으로서 shearography 센서, 고해상도 CCD 카메라, 센서 내부에 장착된 diode laser, controller로 구성이 되어 있다. Table 4는 shearography 장비에 대한 재원을 보여주고 있다.

레이저는 diode laser(파장: 780 nm, 출력: 50 mW)를 사용하며, 센서 양측면의 arm에 장착된 2개의 diode를 통해 확산된 레이저 광을 직접적으로 물체에 조사된다. 센서 내부 모터 제어를 통한 전단광과 전단방향, 전단각도를 조절할 수 있으며 PZT 제어를 통한 4단계 위상이동기법을 적용하여 위상지도(phase map)를 얻게 된다. 전체 시스템은 ISTRA 4D 소프트웨어 플랫폼을 이용하여 노트북 PC에서 제어된다.

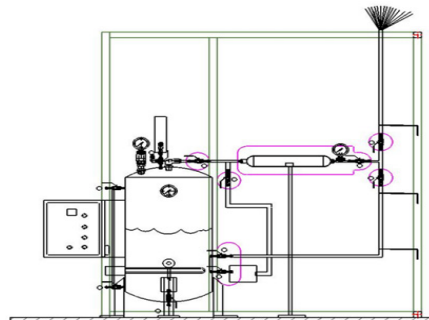


Fig. 5 Pipeline circulation system 2D Image

3.2.2 배관 순환 시스템

원자력발전소나 플랜트 산업 현장에서 결함이 존재하는 압력용기를 모사하기 위한 mock-up 시스템을 제작하였다. Fig. 5는 배관 순환 시스템의 2D 이미지를 보여주고 있으며 밀폐된 압력용기 내 전열코일로 물을 가열하여 내부의 증기를 발생시키며 발생한 증기는 내부 관을 따라 원전 배관을 거쳐 다시 압력용기내로 순환하는 시스템이다. 압력용기내 발생하는 최대압력은 0.2 MPa 이며 압력배관 내부 최대온도는 125~130℃ 이다. 또한 고온 고압으로 인한 용기 내부의 압력을 유지하기 위한 안전장치를 설치하였으며 시스템 온도 제어는 온도 컨트롤 박스에서 제어를 한다.

3.3. 실험 방법

배관 순환 시스템을 이용하여 압력용기의 내부 결함을 측정하기 위하여 Fig. 6과 같이 실험을 구성하고 시험편은 난반사를 제거하기 위해 표면에 현상액(developer)을 도포하였다. 압력용기의 내부 온도는 실온 상태 16℃ 시작으로 하여 밸브 개방 시 배관의 내부 온도를 125℃까지 올렸으며 이때 내부 압력은 0.2 MPa 이다. 압력배관의 온도와 압력이 더 이상 변화를 보이지 않은 시점에서 송풍기를 이용하여 순간적으로 100℃까지 냉각을 시켰으며 밸브를 개방하여 내부 압력을 0.1 MPa까지 압력차를 주어 시험편 내부결함 부위를 측정하였다. 압력용기와 계측기와의 거리는 0.85 m이며 송풍기는 함수발생기에 연결하여 sin 파형(frequency=0.1 Hz)으로 제어를 하였다. Fig. 7은 전단간섭계를 이용한 압력용기 시험편에 대한 측정 결과 위상 지도(phase map)를 보여주고 있다. 획득한 위상지도를 해석하여 변형을 정량화하기 위해서 결렬침을 수행하는데 노이즈가 포함된 위상지도는 정량화 결과값에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 결렬침 전에 반드시 위상지도에 포함된 노이즈를 제거하는 필터링 단계를 걸친다. 결렬침은 필터링된 위상지도의 위상값을 읽어들이고 전 후 화소에 대한 위상차를 계산하여 대상물에 발생한 변형량 값을 획득할 수 있다.

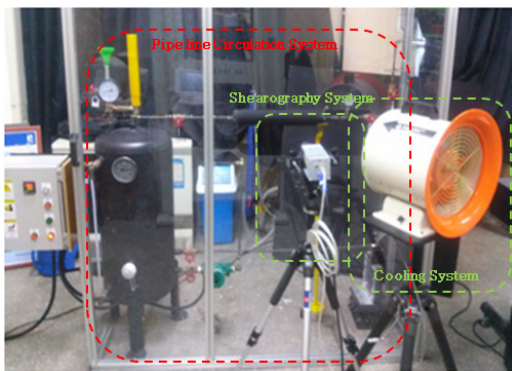


Fig. 6 Constructed shearography system

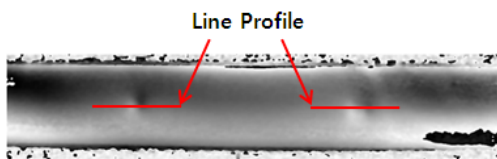


Fig. 7 Specimen of line profile

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 8과 9는 전단간섭계 시스템을 이용한 시험편의 내부결함 두께, 폭, 결함 길이에 따른 위상 지도와 결함부의 변형량을 보여주고 있다. 압력용기 시험편의 내부 온도차와 압력 변화에 따른 내부결함을 위상지도를 통해 눈으로 확인할 수 있었으며 획득한 위상지도에 라인 프로파일을 그어 면의 변형량을 획득할 수 있었다. Table 5에서 보는 바와 같이 결함 폭과 결함 길이가 큰 시험편의 변형량이 크다는 것을 확인할 수 있었다.

| Specimen No. | Phase Map | |
|--------------|-----------|--|
| PVS-1 | 1 | |
| | 2 | |
| | 3 | |
| | 4 | |
| | 5 | |
| | 6 | |
| | 7 | |
| | 8 | |
| PVS-2 | 1 | |
| | 2 | |
| | 3 | |
| | 4 | |
| | 5 | |
| | 6 | |
| | 7 | |
| | 8 | |

Fig. 8 Defect measurement results phase map with shearography for PVS-1,2 specimen

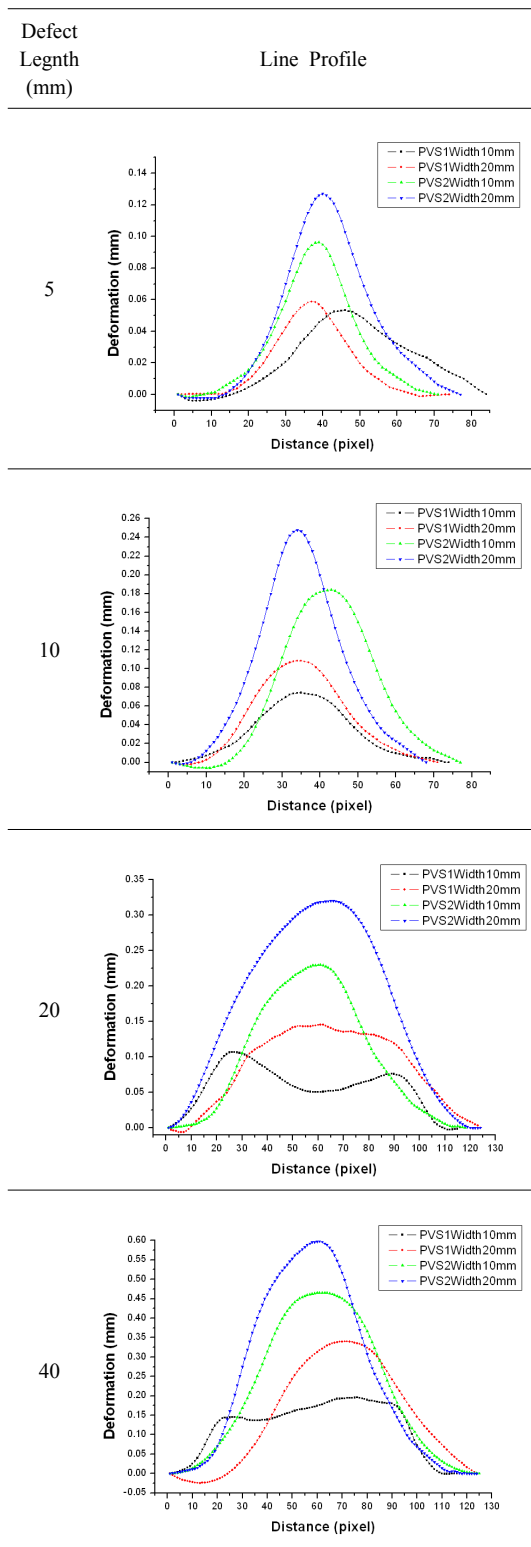


Fig. 9 Line profile of defect measurement results with shearography for PVS-1,2 specimen

Table 5 Maximum deformation amount results for PVS-1,2 specimen

| Specimen No. | Min. thickness (mm) | Width of defect (mm) | Maximum Deformation Amount (mm) | |
|--------------|---------------------|----------------------|---------------------------------|-------|
| PVS-1 | 1.38 (3/8 t) | 10 | 1 | 0.053 |
| | | | 2 | 0.074 |
| | | | 3 | 0.105 |
| | | | 4 | 0.145 |
| | | 20 | 5 | 0.058 |
| | | | 6 | 0.108 |
| | | | 7 | 0.145 |
| | | | 8 | 0.340 |
| PVS-2 | 1.85 (4/8 t) | 10 | 1 | 0.096 |
| | | | 2 | 0.184 |
| | | | 3 | 0.230 |
| | | | 4 | 0.465 |
| | | 20 | 5 | 0.126 |
| | | | 6 | 0.247 |
| | | | 7 | 0.320 |
| | | | 8 | 0.598 |

5. 결론

본 논문에서는 조건별 결함을 가공한 압력용기를 제작하여 배관 순환 시스템에 적용하여 압력용기의 내부 온도 변화와 압력 변화에 따른 내부 결함 계측 및 면의 변형량 결과를 획득하였으며 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 연구를 통하여 결함의 존재 유무를 구분할 수 있도록 하는 가장 중요한 요소는 결함의 두께, 폭 및 결함길이라 할 수 있다.
- 2) Table 5에 나타난 바와 같이 각각의 압력용기 결함부에 대한 면의 변형량은 결함 두께, 폭, 길이가 클수록 커짐을 알 수 있다.
- 3) 배관시스템은 원자력발전 설비의 2차계통에 해당하며 주로 냉각 방식의 중요한 역할을 담당하므로 보다 높은 안정성을 필요로 하고 있다. 따라서 비파괴검사중 레이저 광원을 이용한 광계측 기법인 진단간섭법을 통하여 압력용기의 내부결함을 사전에 측정하여 배관의 신뢰성과 건전성을 확보하는데 주요할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 사업(No. 2013-1520100760)과 원자력연구개발사업(원자력선진기술연구센터, No. 2012-0668) 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] I. K. Park, "Non-destructive Testing Introduction," Node Media, Seoul, pp. 24-25 (2012)
- [2] J. N. Butters and J. A. Leendertz, "Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology," *Optics & Laser Technology*, Vol. 3, pp. 26-30 (1971)
- [3] H. Chang, "Quantitative measurement of out-of-plane deformation using the shearography," Chosun Univ. Doctorate thesis, pp. 1-2 (2006)
- [4] Y. Y. Hung, R. E. Rowlands and I. M. Daniel, "Speckle-shearing interferometric technique: A full-field strain gauge," *Applied Optics*, Vol. 14, Issue 3, pp. 618-622 (1975)
- [5] Y. Y. Hung, "A speckle-shearing interferometry: A tool for measuring derivatives of surface displacement," *Optics Communication*, Vol. 11, No. 2, pp. 132-135 (1974)