

ESPI와 FEM을 이용한 압력용기 결함 측정에 관한 연구

강영준[#], 이정식^{*}, 백성훈^{**}, 박승규^{**}, 이동환^{***}

A Study on Evaluation of Defects of Pressure Vessel by Using ESPI and FEM

Young-June Kang[#], Jung-Sik Lee^{*}, Sung-Hoon Baik^{**}, Seung-Kyu Park^{**} and Dong-Hwan LEE^{***}

ABSTRACT

Internal defects are mainly caused by a corrosive action and degradation in the pipe used in a nuclear power plant or factory. The ESPI method have the many advantages when compared with conventional method. The advantage are the area measurement ability at one time and non-contact measurement ability in the real-time. In this paper, we studied on the measurement of a internal defect by using out of plane ESPI technique. Here, we compared the experimental results using out of plane ESPI with the FEM results.

Key Words : ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry; 전자기적 스펙클 패턴 간섭법), Pressure Vessel (압력용기), Internal Defect (내부 결함), FEM (Finite Element Method; 유한요소법)

1. 서론

일반 배관이나 압력 배관 등의 부재를 많이 사용하여 장시간 사용하는 원자력 발전소나 일반 공장 시설들은 그 배관들이 장시간 사용 및 내용물에 의한 부식 작용에 의하여 내부에 결함이 발생하는 데, 배관의 파괴가 일어나기 전에 내부 결함을 발견하는 것에는 상당한 어려움이 있다.

지금까지 원전 설비의 특성상 고온, 방사선의 위험, 매우 복잡한 형상의 신뢰성과 수명 평가에 난해한 요소를 많이 포함하고 있는 기기들의 평가를 위해서 초음파(Ultrasonic Wave), 와전류(Eddy Current) 탐상, X선(X-ray), 스트레인지지 등의 여

러 방식을 이용하여 내부 결함 검출 방식이 제안되어 왔지만, 접촉방식이거나 검출 방법이 어렵고 숙련자가 아닌 경우 더 검출이 쉽지 않는 등의 문제점으로 더 쉽고 정확한 검출 방법에 대한 필요성이 날로 커지고 있다.

이 연구에서는 기존의 여러 방법을 대신하여 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) 방법은 사용하였다. ESPI 방법은 측정 대상 물체에 레이저광을 조사하기 때문에 넓은 영역 전체를 한 번에 측정할 수 있으며, 결함의 방향에 영향을 받지 않고, 비접촉 실시간 결함을 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 장점을 가지고 있는 ESPI

☞ 접수일: 2007년 3월 13일; 게재승인일: 2007년 10월 4일

전북대학교 공과대학 기계항공시스템공학부

E-mail: yjkang@chonbuk.ac.kr Tel. (063) 270-2453

* 전북대학교 공과대학 기계설계 대학원

** 한국원자력연구소 양자광학기술개발부

*** 전북대학교 공과대학 기계항공시스템공학부

방법 중 Out of Plane ESPI를 이용하여 압력용기 내부 결함을 유무를 측정하고 결함에 의하여 함몰되는 부위의 길이를 측정한다. 함몰부위의 길이를 측정하는 것은 결함에 의하여 배관을 교체할 때 교체 길이를 결정하는데 도움이 유용한 기준이 될 것이다. 유한 요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 압력용기 내부 결함에 대하여 해석하고 해석하여 얻은 결과에 대하여 Out of Plane ESPI 방법을 이용하여 얻은 압력 용기 내부 결함 부위 함몰 부위의 길이와 비교하였다.

2. 원 리

2.1 ESPI 원리

기존 간섭법은 물체에 하중이 가해지면 물체 표면의 변위를 간섭무늬(fringe) 형태로 나타내고 이러한 간섭무늬 형상은 물체의 변형과 관계가 있다 그러나 이 방법은 우수한 장점을 가지고 있음에도 불구하고 폭넓게 사용되지는 못하고 있는데, 그 주된 이유는 화상처리과정(image processing)과 후처리과정(post processing)을 만족시켜야 하고 광학적 기술에 숙련되지 않은 사용자가 만족할만한 간섭무늬를 만들어내기가 쉽지 않기 때문이며, 화상처리 과정과 후처리과정을 완벽히 수행하는데 많은 시간이 소요된다. 이러한 제한을 극복하기 위하여 CCD 카메라를 이용하여 기록된 영상을 컴퓨터를 통해 이미지 처리과정을 거쳐 간섭무늬를 생성하여 표면 변위 분석과 형상의 측정을 실시간으로 측정할 수 있는 ESPI 기법이 개발되었다.

2.1.1 Out of Plane ESPI의 기본 원리

ESPI 기법을 이용한 면외변위(Out of Plane Displacement)의 측정은 물체가 외력을 받기 전의 상태를 기록하고 물체가 변형을 일으킨 후의 상태를 기록하여, 변형전 파면(wave front)과 변형 후 파면을 중첩시켜 나타난 간섭무늬(fringe pattern)를 이용하여 변위 값을 계산한다.

물체가 변형하기 전의 빛의 강도(Intensity)는 다음과 같다.

$$I_1 = I_O^2 + I_R^2 + I_O I_R \cos [\Psi_O - \Psi_R] \quad (1)$$

여기서 I_O , I_R 은 물체빔(object beam)과 기본빔(reference beam)의 진폭(amplitude)이고, Ψ_O, Ψ_R 은

물체광과 기본광의 위상(Phase)이다.

물체가 외력에 의해 변형되었을 때의 빛의 강도(intensity)는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$I_1 = I_O^2 + I_R^2 + I_O I_R \cos [\Psi_O - \Psi_R + \Delta\Psi] \quad (2)$$

여기서 $\Delta\Psi$ 는 물체가 변형함으로써 유발되는 물체광(object beam)의 위상변화를 의미한다. I_1 과 I_2 의 관계에서 $\Delta\Psi$ 는

$$\Delta\Psi = 2\pi N \quad (3)$$

일 때 최대값이 되고

$$\Delta\Psi = (2N + 1)\pi \quad (4)$$

일 때 최소값이 되며, 여기서 N은 정수이다.

Fig. 1에서 변형전후의 물체광의 위상차는 다음과 같이 표현되고

$$\Delta\Psi = \frac{2\pi}{\lambda} \{d_1(1 + \cos\theta) + d_2\sin\theta\} \quad (5)$$

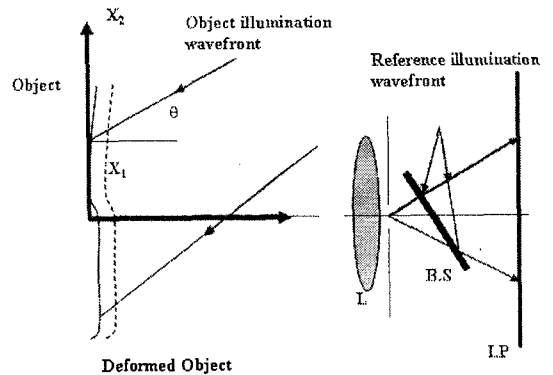


Fig. 1 An optical arrangement giving fringe represent -ing out of plane displacement

여기서 d_1 은 물체의 방향의 변형량, d_2 는 z방향의 변형량, λ 는 레이저의 파장(wave length)이다

위 식들에서 물체의 면외 방향 변형량과 간섭무늬와의 관계식이 다음과 같이 표현된다.

$$d_1 = \frac{n\lambda}{(1 + \cos\theta)} \quad (6)$$

3. 실험장치 구성 및 실험

3.1 광학계구성

Fig. 2은 Out of Plane ESPI의 실험 구성을 보여주는 그림으로 ND:Yag 레이저에서 레이저 빔이 나와서 Beam Splitter에서 Reference Beam과 Object Beam으로 분할되어 Object Beam은 공간 필터(Spatial Filter)를 통과해서 압력용기 표면에 조사한 후, 표면에서 반사하여 Beam Combiner를 통하여 CCD 카메라로 들어간다. 그리고 Reference Beam은 PZT Actuator에 결합된 거울, $\lambda/2$ plate(Half Wavelength Plate), 편광필터(Polarization Filter), 공간 필터(Spatial Filter)를 거쳐 역시 Beam Combiner를 통하여 CCD 카메라에 입력된다. 본 실험 구성에서는 광원으로 532 nm의 파장을 가진 ND:Yag 레이저, 위상이동을 위하여 10 μ m를 이동할 수 있는 PZT Actuator와 PZT Drive를 사용하였고, 압력용기에 가압하기 위하여 99.9%의 질소 가스를 사용하였다. Fig. 3은 Out of Plane ESPI의 실제 실험장치 사진이다.

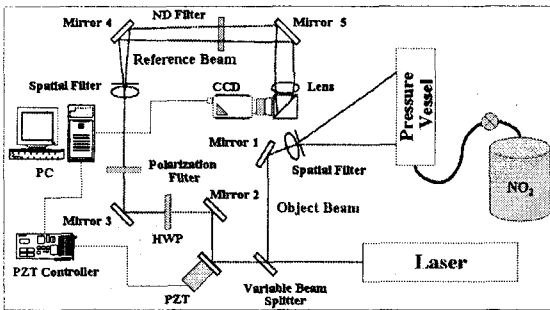


Fig. 2 Schematic Diagram of Out of Plane ESPI



Fig. 3 Photo of Out of Plane ESPI Setup

3.2 시편 및 실험 방법

ASME Code Section XI은 원자력 발전소 구성 요소의 운전 중 정밀 검사에 관한 규정에 대하여 기술하고 있다.^{2,7} 결함의 차원은 결함의 길이, 그리고 용기의 두께에 대한 결함 깊이의 비로써 정의되어 있다. 그리고 결함의 방향에 따라 축방향 결함(Axial Flaw)과 원주 방향 결함(Circumferential Flaw)으로 분류하고 있다. 실험에서 사용된 압력용기는 ASME Code Section XI의 규정에 의거한 결함을 가진 것으로, 방전가공법을 이용하여 압력용기의 내부에 축방향의 결함에 대하여 결함길이는 다르고 깊이는 2mm로 하여 가공하였다. 각 시편의 축방향 결함의 길이에 대하여 Table 1에 나타내고 있다. ASME Code Section XI의 규정에 의거한 축방향의 결함 형상에 대하여 Fig. 4에 나타내고 있다.

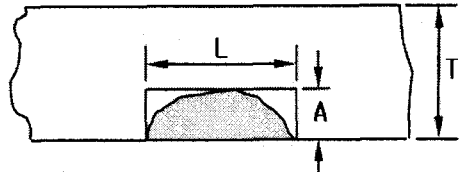


Fig. 4 Defects of Pressure vessel of ASME code

Table 1 Specification of Defects

Specimen	Length of defect (mm)
1	5
2	10
3	15
4	20
5	25

Fig. 5은 압력 용기의 구속 형태와 형상을 보여주는 그림으로 압력용기의 재질은 탄소강(탄성계수 $E = 2.1 \times 10^{10}$, Poisson's ratio 0.27, 밀도 : 7.84×10^3)이고, 시편의 길이는 330 mm, 외경은 100 mm, 두께는 5 mm로 되어 있으며, 양단에 나사산을 가공하여 캡을 부착시킬 수 있도록 하였고, 한 쪽 캡의 중앙에는 구멍을 낸 뒤 나사산을 가공한 후 유니언을 부착시켜 압축가스를 압력용기 내부로 공급할 수 있도록 하였다. 그리고 압력 용기의 표면은 확산, 조사되는 레이저빔이 균일하게 반사될 수 있도록 하기 위하여 무광택 백색 도료를 도포하였다.

그림에서 보듯이 실험을 위해서 양끝의 덮개 부분을 앞과 뒤 그리고 옆에서 구속하여 주었다. 압력 용기의 변형을 여기 시키는 방법은 질소 가스를 사용하여 내부를 가압하는 방법을 사용하였다. 각 5개의 시편에 2, 4, 6, 8, 10 kgf/cm²의 압력으로 가압하고 축방향의 내부결함에 대하여 측정하였다.

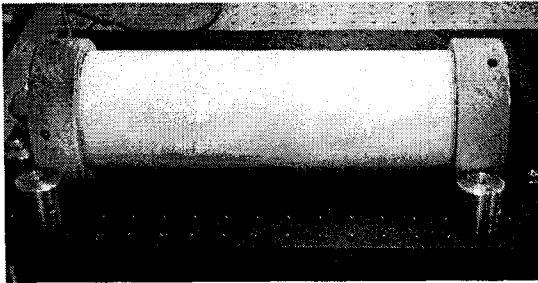


Fig. 5 Specimen(33cm×10cm)

4. 실험 결과

4.1 ESPI를 이용한 실험 결과

Fig. 6은 Out of plane ESPI를 이용하여 축방향 내부 결함에 대하여 각각의 압력을 가압하여 얻은 Phase map 영상을 보여주고 있다. 맨 윗줄에 있는 것이 5 mm의 내부 결함이 있는 압력용기에 2 kgf/cm²의 압력을 가압하여 얻은 결과이고, 그 아랫줄에는 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm 순으로 배열하였고, 우측으로는 4, 6, 8, 10 kgf/cm² 순으로 내압을 걸어 주었을 때의 결과 사진들이다. 영상을 보면 5 mm의 결함길이에 2 kgf/cm²의 압력을 가압할 때부터 25mm 10 kgf/cm²의 압력을 가압할 때까지 모든 경우에서 축방향 내부 결함의 위치가 나타나

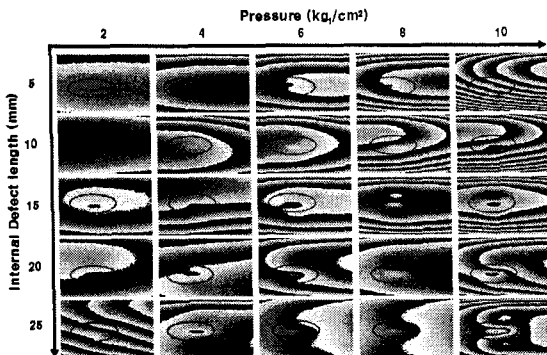


Fig. 6 Out of plane ESPI results of axial defect

는데 내부 결함의 길이가 길수록 그리고 압력이 높을수록 더 뚜렷하게 나타남을 보여주고 있다.

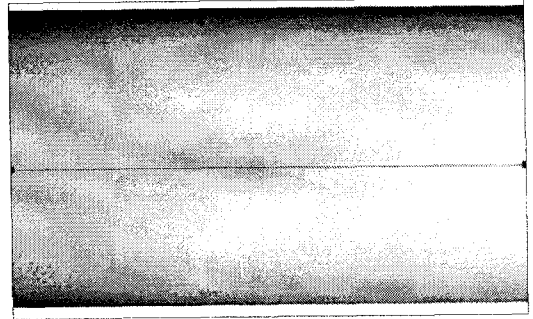


Fig. 7 Unwrapping image calculated from the phase map (Internal Defect Length 25mm, 10Kgf/cm²)

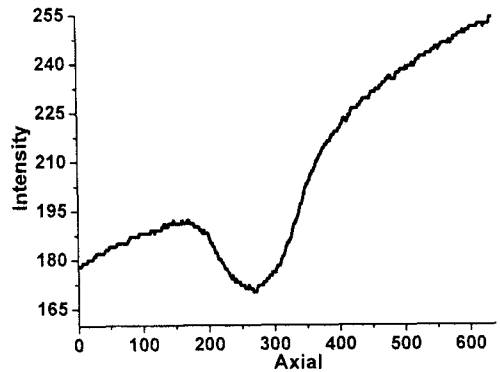


Fig. 8 Line profile of vessel surface

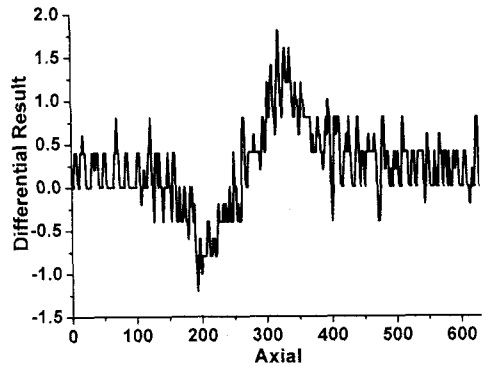


Fig. 9 Differential of the Line profile (defect length: 25 mm, Pressure : 10kgf/cm²)

Fig. 7은 25mm의 내부 결함을 가지고 있는 압력용기에 10 Kg/cm²의 압력을 가압하였을 때 측정된 Phase Map에 대하여 Unwrapping한 영상이다. 내부 결함의 길이를 계산하기 위하여 결함의 중심의 선을 정하고 선의 각 픽셀(Pixel)에 대하여 세기(intensity)를 측정하였다. Fig. 8은 각 픽셀(Pixel)에 대한 Intensity를 그래프로 보여 주고 있는 것으로 내부의 결함이 없다면 0 Pixel에서 640 픽셀(Pixel)까지 Line Profile이 선형적으로 보여야 하지만 중간 부분에 내부 결함이 존재하여 선형적으로 보이지 않고 있다. Fig. 9는 Fig. 8에서 나타난 선형적이지 않은 부분의 시작 픽셀(Pixel)과 끝 픽셀(Pixel)을 얻기 위해 Fig. 8의 그래프를 미분한 결과이다.

Fig. 9의 최소와 최대 사이의 거리가 내부 결함에 의하여 생기는 함몰 부분의 축방향 길이가 된다. Table 2는 Fig. 9에서 미분하여 얻은 최소, 최대 값 사이의 Pixel 수를 이용하여 Pixel 당 길이를 곱하여서 압력을 가한 후 압력용기 내부 결함의 길이에 대하여 계산한 값들을 표로 제시하였다.(1 Pixel = 0.2475 mm)

Table 2 Defect Length calculated from experimented data

Specimen	1	2	3	4	5
Pressure					
2 kgf/cm ²	10.395	15.345	18.81	24.503	30.938
4 kgf/cm ²	10.643	13.86	20.295	23.513	27.968
6 kgf/cm ²	9.158	13.613	19.553	22.523	29.453
8 kgf/cm ²	9.158	14.85	19.8	24.998	32.423
10 kgf/cm ²	10.395	15.098	20.048	25.245	31.185

4.2 FEM 해석 결과

축 방향 결함을 지닌 압력용기에 대한 3차원 모델링은 압력용기 전체가 아닌 1/2 모델링을 하였다. 모델링에 사용한 Element는 20개의 노드를 가지는 SOLID 95를 이용하였다. SOLID 95는 3차원 공간 상에서 20개의 절점을 지니며 각 절점에 대하여 x, y, z의 3방향의 자유도를 갖는 Element이다.

Fig. 10은 25 mm의 내부 결함 길이를 가지는 압력용기에 10 kg/cm²의 압력을 가하였을 때의 해석한 결과에 대한 3D Plot한 것으로 축 방향 결함에 의하여 가운데 부분에 타원형으로 함몰된 영역이

나타나게 된다. 다른 내부 결함길이를 가지고 있는 시편에 대하여 해석을 하였을 때에도 Fig. 10에서 보이는 것과 같이 가운데 부분에 타원형으로 함몰된 영역이 나타난다.

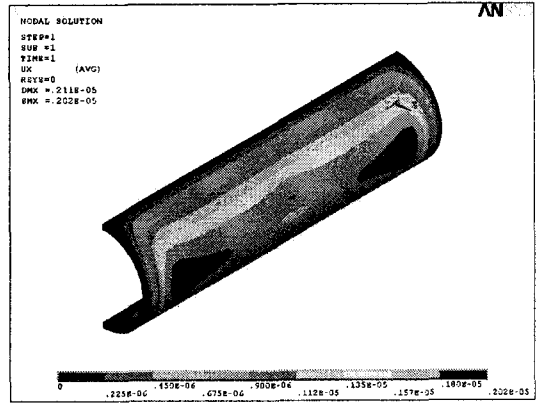


Fig. 10 FEM Result

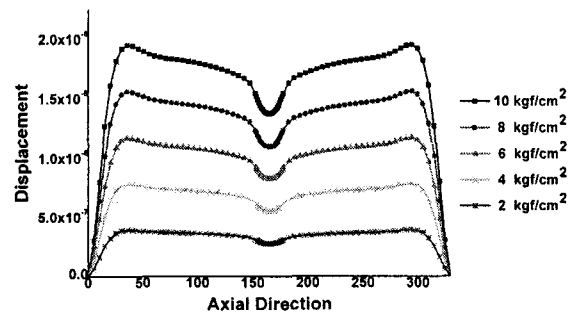
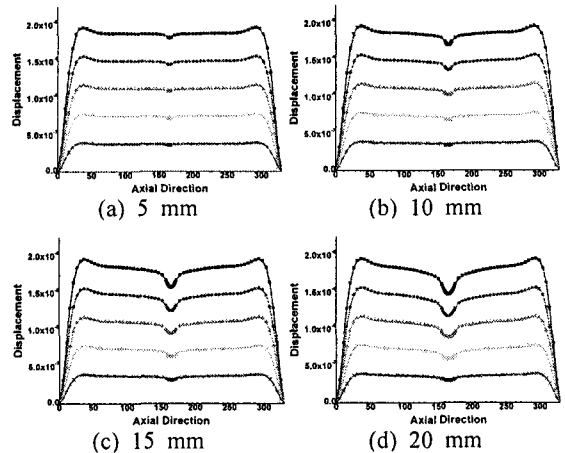


Fig 11 Axial Section Line profile of FEM Results

Fig. 11은 각각의 결함길이와 내압들에 대하여 FEM 해석을 한 후, 내부 결함 중심선의 외부 표면의 면의 변위에 대한 그래프이다. Fig. 11의 (a)는 결함의 길이 5 mm, 내압이 2 ~ 10 kgf/cm² 가압하였을 때의 그래프를 나타내고 있다. 그래프에서 내부 결함이 있는 부분이 결함이 없는 부분보다 면의 변위량이 적고 내부 결함에 의하여 결함 주위도 면의 변위량이 적음을 보여주고 있다. 그래프 양단의 급격한 변화를 보여주는 것은 해석상 양 끝단을 3축에 대하여 고정하였기 때문에 발생하는 것으로 결과와는 상관이 없는 부분이다. 나머지 그림은 각 결함의 길이에 대한 것으로 그림(a)에서와 같이 결함이 있는 부분이 없는 부분과 다름을 보여주고 있으며, 결함의 길이에 의하여 그 폭이 결정되는 것을 보여 주고 있다.

이와 같은 FEM 해석 결과를 통해서 압력용기의 내부 축방향 내부 결함이 있을 때에는 결함이 있는 부분이 함몰되는 것을 볼 수 있다. 따라서 ESPI로 측정된 것과 똑같은 경향을 보이고 있다.

Table 3 Defect from Length FEM Results

결함길이 (mm)	5	10	15	20	25
결과 값 (mm)	10.42	15.33	20.25	25.17	30.07

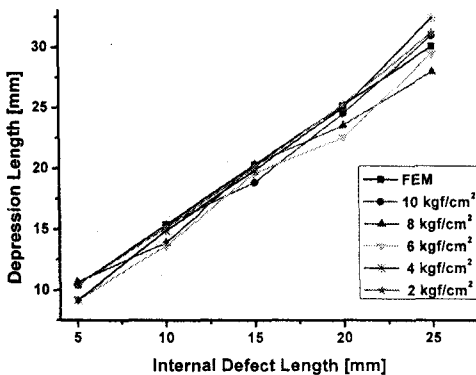


Fig. 12 Comparison between ESPI Results and FEM Results

이렇게 얻은 data를 이용하여 결함에 의하여 생성된 함몰된 부분의 양 끝단 사이의 거리를 구하였다. Table 3은 그 결과를 보여 주고 있는 것으로 결

함길이에 의하여 생성되는 함몰된 부분의 길이는 원래 길이보다 각각 약 5 mm 가량 증가함을 보여 주고 있다.

Fig. 12는 측정 결과와 FEM 결과를 비교한 그래프이다. 함몰부위의 길이는 압력에 의한 영향보다는 결함길이에 영향을 받고 있다. FEM 결과를 기준으로 하여 ESPI 결과에 대하여 측정 오차를 구하였다. 전체적으로 약 5%의 측정 오차를 나타낼 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 압력배관의 내부에 장기간 사용 및 부식작용 등에 의하여 발생하는 내부 결함을 표현하기 위하여 압력용기를 시편으로 제작하였다. Out of plane ESPI와 유한요소 해석 프로그램(ANSYS)을 이용하여 내부 결함의 길이와 압력에 따라 내부결함에 의한 함몰부위의 길이를 측정과 해석을 하여 각각의 결과를 비교하였다. 결론은 첫 번째로, Out of plane ESPI 방법을 이용하여 내부 결함의 위치를 찾을 수 있었다. 두 번째로, 압력용기 내부 결함은 압력에 의하여 내부로 함몰되는 것을 실험결과와 FEM 해석의 결과에서 같은 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 세 번째로, 내부 결함이 있는 압력용기에 압력을 가함으로 발생하는 함몰부위의 축 방향 길이를 측정하고 비교한 결과 약 5%의 측정 오차를 나타낸다. 압력용기에 가압할 때 함몰 되는 부분의 이상을 배관 교체할 때에 참고가 될 것이다. 추후 곡관이나 복잡한 형상의 압력용기의 내부 결함의 길이를 측정하는 연구를 진행해야 한다.

후 기

본 논문은 지역혁신 인력양성 사업(GJ-05-015)의 연구비로 지원되었습니다.

참고문헌

1. Lekberg, O. J. and Maimo, J. T., "Detection of Defects in Composite Material by TV Holography," NDT International, Vol. 21, No. 4, pp. 223-228, 1988.
2. Wykes, C., "Use of Electronic Speckle Pattern Interferometry in the Measurement of Static and

- Dynamic Surface Displacement,” Optical Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 400-406, 1982.
3. Rastogi, P. K., “Holographic Interferometry,” Springer Series in Optical Science, pp. 27-31, 1994.
 4. Kang, Y. J., Chae, H. C. and Kang, H. S., “A Study on Measurement of Internal Defects of Pressure Vessel by Digital Shearography and Finite Element Method,” Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 10, No. 2, pp. 29-37, 2001.
 5. ANSYS Introduction Training Manual, “Introduction to ANSYS,” TAE SUNG SOFTWARE&ENGINEERING, INC., Ver 7.0., 2002.
 6. Kang, Y. J., Bae, J. K., Ryu, W. J. and Park, N. K., “A Study on Measurement of Crack Length by using Laser Speckle Interferometry,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 34-41, 2001.