

ESPI 방법들을 이용한 압력용기 내부 결함 측정에 관한 연구

이정식*(전북대 대학원), 강영준(전북대 기계항공시스템공학부, 메카트로닉스 연구센터)
백성훈(한국원자력연구소)

A study on the Measurement of Internal Defects of Pressure Vessel by using ESPI Methods

J. S. LEE(Mech. Design. Dept., CBNU), Y. J. Kang(Mech. Eng. Dept., CBNU),
S. H. Baik(KAERI)

ABSTRACT

The pipe which it uses from the nuclear power plant or factory by a long period use and a corrosive action the inside defect occurs on the inside. abstract here. The ESPI method is in order to investigate the laser light in the measurement object it will be able to measure the wide territory whole in once, does not receive an effect in direction of defect not to be, has the strong point it will be able to measure a change of place arrowhead real-time defect. It measured a inside defect of pressure vessel by using Out of plane ESPI and In plane of ESPI. It compared a each method result.

Key Words : 압력용기(Pressure Vessel), 내부 결함(Internal Defects), Out of plane ESPI, In plane of ESPI

1. 서론

원자력 발전소나 일반 공장 시설 등에 많이 사용되는 부재인 일반 배관이나 압력 배관 등은 장기간 사용 및 부식 작용에 의하여 내부에 결함이 발생하는데, 파괴가 일어나기 전에 이러한 결함들을 발견하는 것에는 많은 어려움이 있다. 이러한 내부 결함을 쉽게 검출, 검사할 수 있는 방법에 대한 필요성이 날로 커지고 있다.

내부 결함에 대한 주기적인 검사에 사용되고 있는 방법 중 비파괴 검사 방법으로 초음파(Ultrasonic Wave)를 이용하거나, X선(X-ray), 또는 와전류(Eddy current) 등을 이용한 방법들이 있다. 초음파 측정법은 초음파의 주사를 면밀히 하지 않으면 탐상이 안되는 부분이 생기는 단점을 가지고 있다. X선법은 결함의 방향성에 민감해서 투과방향과 수직면을 형성하는 결함을 찾기가 어렵다. 와전류 법은 비자성체에 한하여 측정하는 것이 일반적인데, 그 이유는 자성체인 경우 자장을 제거해도 잔류자기가 남아 정

상적인 측정이 어렵기 때문이다. 그리고 홀로그래피 방법은 필름이나 플레이트를 기록 매체로 암실이라는 공간적 제약과 필름을 현상 및 인화해야 하는 시간적인 단점을 가지고 있다.

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

이러한 장점을 가지고 있는 ESPI 방법에는 여러 가지 방법이 있는데, 그 중에서 압력 용기의 내부 결함 측정에는 Out of plane ESPI, In plane of ESPI, Shearography 등의 방법들이 사용되고 있다. 하지만 각각의 방법들에 대한 시스템 안정성 및 결과 DATA의 오차에 대한 분석이 안되고 있다. 본 논문은 이들 방법 중 Out of plane ESPI와 In plane of ESPI 방법의

로부터 압력 용기 내부 결함 측정의 결과 DATA 값을 비교, 분석함으로써 어떠한 측정 방법이 압력 용기의 내부 결함 측정에 더 효율적인 지를 비교하는데 목적을 두고 있다.

2. 제목

2.1 ESPI의 원리

홀로그래피간섭법은 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, 화상처리과정과 후처리과정을 완벽히 수행하는데 많은 시간이 소요된다. 이러한 제한을 극복하기 위하여 CCD카메라를 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 간섭 무늬(fringe image)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

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

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

위 식들에서 물체의 면외방향 변형량과 간섭무늬와의 관계식이 다음과 같이 표현된다.

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

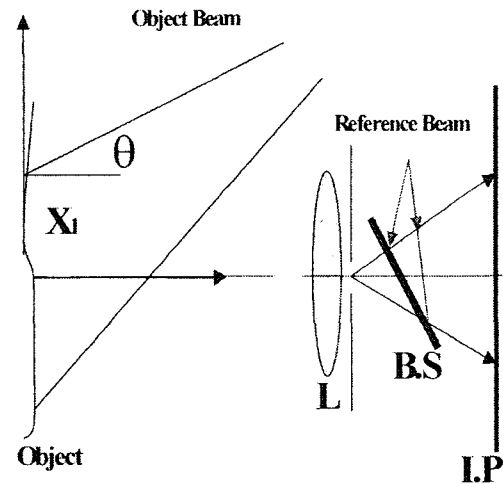


Fig 1 An optical arrangement giving fringe representing out of plane displacement

2.1.2 In plane of ESPI의 기본 원리

변위의 방향은 간섭계의 광학적 구성에 의해 결정되는 Fig 2의 민감도 벡터(sensitivity vector)에 의해 결정된다. 일반적인 간섭계에서 물체를 비추는 빛의 벡터 k_1 과 물체에서 관측자에게 오는 빛의 벡터 k_2 에 대한 민감도 벡터는 아래 식과 같다.

$$\vec{K} = k_1 + k_2 \quad (7)$$

따라서 간섭무늬를 영상처리해서 물체 영상의 각 위치에서 원하는 위상정보가 얻어지면, 변위의 양은 민감도 벡터에 의해 결정된다. 그림에서 평면의 어느 한점이 변위 d 만큼 이동한 빛의 강도 분포는 아래식으로 표현된다.

$$I = I_O^2 + I_R^2 + I_O I_R \cos[\Psi_O - \Psi_R + \Delta\Psi] \quad (8)$$

위 식에서 $\Delta\Psi$ 가 두 빔에 의한 위상 변위를 나타내므로 그에 따른 식을 전개해 나가려면, 변위 d 만큼 이동하기 전과 후 두 빔의 위상을 각각 벡터형으로 구해야 한다. 구해진 각각의 벡터 방정식들은 위상 변화에 의한 위상차들로 나타나면서 스칼라량으로 표현된다. 그리고 면내 변위에 의한 최종 위상차는 아래의 식과 같이 표현된다.

$$\Delta\Psi = \delta_1 - \delta_2 \quad (9)$$

이 위상차는 각각 아래의 두 식 (10)과 식 (11)로 표현되며, In plane of ESPI에서 구하고자 하는 변위 값인 식(12)을 구할 수 있다.

$$\Delta\Psi = \frac{4\pi}{\lambda} d \sin\theta \quad (10)$$

$$\Delta\Psi = 2\pi N \quad (11)$$

$$d = \frac{N\lambda}{2 \sin\theta} \quad (12)$$

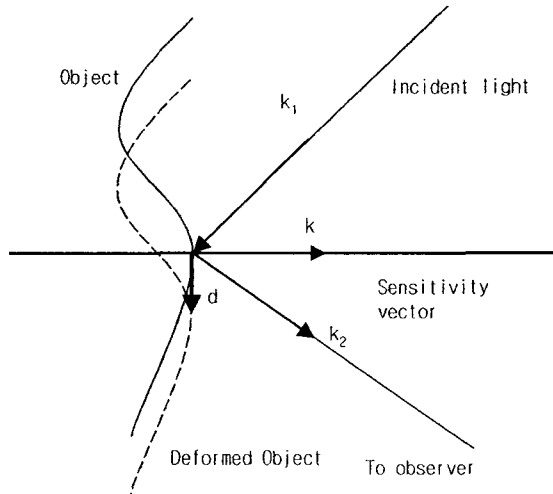


Fig 2 Vector diagram showing sensitivity to displacement in ESPI

3. 실험장치 구성 및 실험

3.1 실험장치 구성

3.1.1 Out of plane ESPI 실험장치 구성

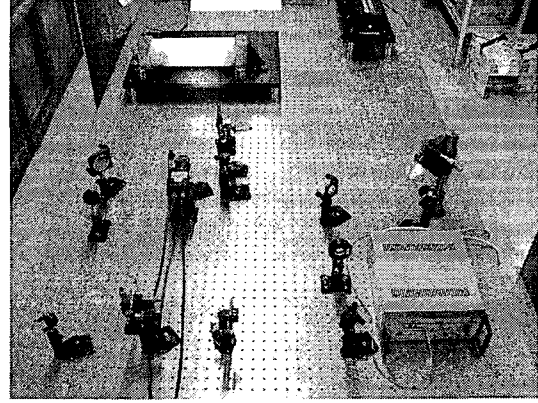


Fig 3 Out of plane ESPI setting

Fig 3은 Out of plane ESPI의 실험 구성을 보여주고 있다. Yag laser에서 laser가 나와서 beam splitter에서 빔이 분할되어 하나의 빔은 spatial filter를 통과해서 압력용기 표면에 조사되어 반사하여 beam combiner를 통하여 CCD 카메라로 들어간다. 이 beam을 Object beam이라 한다. beam splitter에서 분할된 또 다른 beam은 pzt와 spatial filter를 거쳐 beam combiner를 통하여 CCD 카메라에 입력된다. 본 시스템에서는 532 nm의 wave length를 가진 Yag laser를 사용하였다.

3.1.2 In plane of ESPI 실험장치 구성

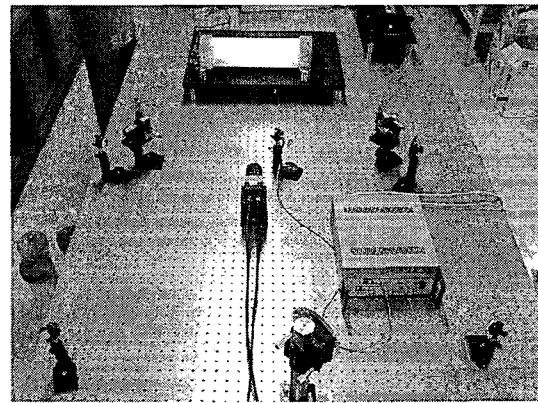


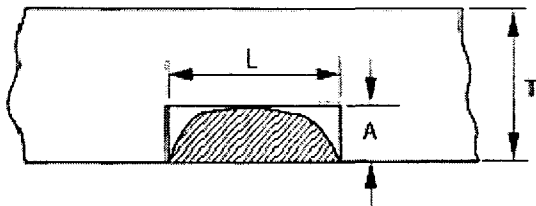
Fig 4 In plane of ESPI setting

Fig 4는 In plane of ESPI의 실험 구성을 보여주고 있다. 여기에서도 beam splitter에서 beam이 분할되어 spatial filter에 의해 분산되어 각각 압력 용기에 조사되고 이때 압력용기에서 반사되어 CCD 카메라에 정

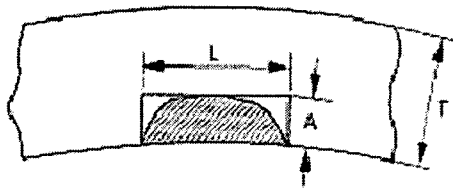
보가 입력된다.

3.1.3 실험 방법 및 결과

실험에서 사용된 압력용기는 ASME code section XI에서 나와 있는 압력용기 대한 규정에 의거한 결함을 가진 것으로, 결함의 생성은 방전가공법을 이용하여 압력용기의 내부에 축방향과 원주 방향의 결함을 결함길이를 다르게 해서 가공하였다. 이 결함의 형상과 내용이 Fig 5 와 Table 1에 표시되어 있다.



(a) Axial flow



(b) Circumferential flow

Fig. 5 Flaw of Pressure vessel.

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

Table 1 Specification of defects

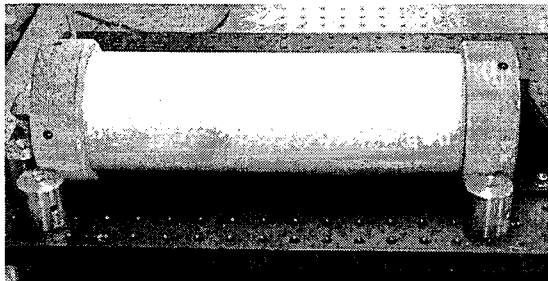


Fig 6 The shape of specimen(33cm×10cm)

Fig 6은 압력 용기의 구속 형태와 형상을 보여주는 그림으로 압력용기의 재질은 탄소강이고 시험의 길이는 33 cm, 외경은 10 cm, 두께는 0.5 cm로 되어

있으며, 그림에서 보듯이 실험을 위해서 양끝의 덮개 부분을 앞과 뒤 그리고 옆에서 구속하여 주었다. 압력용기의 변형을 여기 시키는 방법은 질소가스를 사용하여 내부를 가압하는 방법을 사용하였다. 각 5개의 시험편에 2, 4, 6, 8, 10 kg/cm²의 압력으로 가압하고 축방향과 원주방향의 내부크랙에 대하여 측정하였다.

결함방향과 결함길이에 따른 실험 결과가 Fig 7에서부터 Fig 10 까지 나와 있다. Fig 7은 Out of plane ESPI를 이용하여 축방향 내부 결함에 대하여 각각의 압력을 가압하여 얻은 Image를 보여주고 있다. 맨 윗줄에 있는 것이 첫 번째 압력용기이고, 다음이 두 번째 압력용기의 순서로 되어 있다. 하나의 압력용기에 압력 증가 순서로 나열되어 있다. 여기서 보면 5mm의 결함길이에 2 kg/cm²의 압력을 가압할때부터 25mm 10 kg/cm²의 압력을 가할때까지 모든 경우에서 축방향 내부 결함의 위치가 나타나며, 내부 결함이 클수록 그리고 압력이 높을수록 더 뚜렷하게 나타남을 보여주고 있다.

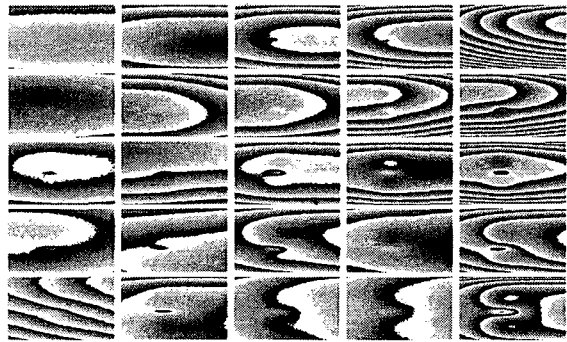


Fig 7 Out of plane ESPI results of axial defect

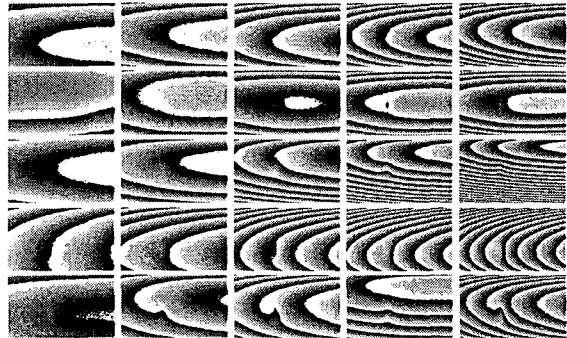


Fig 8 Out of plane ESPI results of circumferential defect

Fig 8은 Out of plane ESPI를 이용하여 원주방향의 내부 결함에 대한 실험 결과이다. 축방향 내부 결함과는 다르게 5mm의 내부 결함길이에 8kg/cm²의 압력을 가하였을 때부터 내부 결함이 보이기 시작하

지만, 10mm의 내부 결함에 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압력을 가압하였을 때에는 측정이 안되고 있는 모습을 보이고 있다.

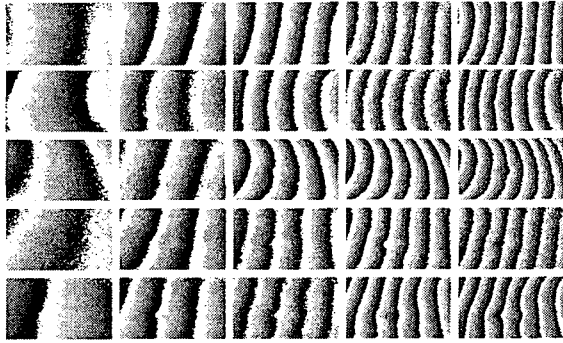


Fig 9 In plane of ESPI results of axial defect

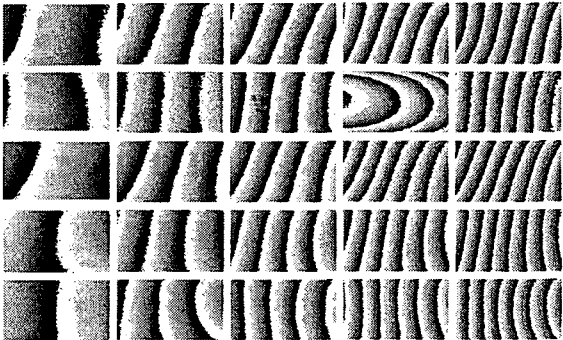


Fig 10 In plane of ESPI results of Circumferential defect

Fig 9는 In plane of ESPI를 이용하여 압력용기의 축방향 내부 결함을 측정한 결과이다. Out of plane ESPI를 이용하여 측정한 결과에 비하여 높은 압력과 더 큰 내부 결함에서 나타나고 있다. 15mm의 내부 결함 길이와 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 내부 결함이 나타나고 있다. Fig 10은 In plane of ESPI를 이용하여 압력용기의 원주방향 내부 결함을 측정한 결과이다. 결과에서 보듯이 내부 결함이 잘 보이지 않고 있다.

4. 결론

본 연구는 ESPI 방법 중 Out of plane ESPI와 In plane of ESPI 방법을 이용하여 원자력 발전소와 일반 공장 시설 등에 사용되는 파이프 배관이나 압력 배관의 내부에 장기간 사용 및 부식작용에 의하여 발생하는 내부 결함을 효과적으로 검출하는 방법으로 두 가지 ESPI방법을 적용하여 비교하였다. 결론은 첫 번째로, 두 가지의 ESPI 방법을 이용하여 내부 결함을 실시간으로 계측하였다. 둘째로, Out of plane ESPI 방법이 In plane of ESPI 방법에 비하여 보다 낮은 압력, 보다 짧은 내부 결함 길이에서 측정이 가능

하였다. 세 번째로, 축방향의 내부 결함 측정이 원주 방향의 내부 결함 측정에 비하여 측정이 쉬움을 보였다. 이후 또 다른 ESPI 방법과 FEM 해석을 통하여 보다 많은 비교해 보면 보다 좋은 결과가 나올 것이다.

후기

본 연구는 원자력기반확충사업의 연구비로 지원되었다.

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(3), pp. 400-406, 1982.
3. Moore, A. J. and Tyrer, R. "An Electronic Speckle Pattern Interferometer for complete In-plane Displacement Measurement", Measurement Science and Technology, Vol. 1, pp. 1024-1030, 1990.
4. P. K. Rastogi, "Holographic Interferometry", Springer Series in Optical Science, pp. 27-31, 1994.
5. 강영준, 강형수, 채희창, "전자 진단 간섭법과 유한요소법을 이용한 압력용기의 내부결함 측정에 관한 연구", 한국공작기계학회논문집, Vol. 10 No.2, 2001.