

# 전자전단 간섭법을 이용한 플랜지 용접부 내부 결함 측정에 관한 연구

## A Study on the Measurement of the Internal Crack in Flange Welding Zone by Digital Shearography

김정필<sup>1</sup>, 강영준<sup>2</sup>, 박상규<sup>3</sup>  
Jeong Pil Kim<sup>1</sup>, Young June Kang<sup>2</sup> and Sang Kyu Park<sup>3</sup>

1 전북대학교 대학원 기계설계학과(Department of Mechanical Design, Graduate school of Chonbuk Univ.)

2 전북대학교 기계설계공학부(Department of Mechanical Design Engineering, Chonbuk Univ.)

3 우석대학교 자동차공학과 (Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Woosuk Univ.)

✉ Corresponding author: yjkang@chonbuk.ac.kr, Tel: 063-270-2453

Manuscript received: 2008.5.27 / Revised: 2008.11.25 / Accepted: 2008.11.26

*There is a many kinds with nondestructive testing such as RT and UT representatively. Referred before two testing methods there is a limit which is spatial such as nuclear pipe, small vessel, sealing up vessel. So a new technique needs to overcome the limit which is spatial. shearography will be able to overcome the limit which is spatial. This paper introducing shearography which was known as non-contact full-field testing method and It is an interferometric technique for measurement of surface deformation such as displacement or displacement gradient. Also, a research about internal defect of the flange welding zone was accomplished. About variation with method pressurized with the Gaseous Nitrogen. Phase map where is various were measured according to changing a sheared direction, size of crack and loaded pressure. Consequently, crack quantitatively to be detected qualitatively was measured by using shearography.*

Key Words: Shearography (전자전단 간섭법), Interferometer (간섭계), ESPI (전자 스페클 간섭법), Flange Welding Zone (플랜지 용접부)

### 기호설명

$I$  = Intensity of beam  
 $\phi, \psi$  = Phase of wave  
 $\lambda$  = Wave length  
 $\gamma$  = Visibility  
 $T$  = thickness of pipe  
 $L$  = length of crack  
 $A$  = deepness of crack

### 1. 서론

여러 압력용기의 신뢰성 향상과 유지보수측면에서 용접부에 대한 검사가 필수적이다. 압력용기의 용접부분의 검사방법으로 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 크게 구분되며 비파괴적인 방법으로 내부결함에 대한 검사방법으로 초음파 탐상법(Ultrasonic Wave), 와전류(Eddy current) 검사법, 방사선 투과시험(Radiographic Testing) 등이 있지만 각각 검사 적용의 제약을 가지고 있다.<sup>1</sup> 특히 UT과 RT은 접촉식으로 물체의 동체 이음과 둘레이음에만 적용될 뿐 동체와 노즐의 용접부 및 플랜지 접합 부분 등에는 적용하기 어렵다. 노즐의 용

접부 및 플랜지 용접부의 경우 용접시 고온의 용접과정을 거치면서 열 영향부에 물성 변화가 발생하게 된다. 이에 따라서 결함이 쉽게 발생하는 부분이며 정기적인 검사가 필요한 부분이라 할 수 있다. 따라서 기존 UT 와 RT 의 한계를 극복할 수 있는 비 파괴, 비 접촉식 검사 방법이 요구된다.<sup>2</sup>

이런 점에서 레이저의 간섭원리를 이용하여 물체의 내부 결함을 검출 할 수 있는 ESPI(electronic speckle pattern interferometer)를 적용할 수 있다. 하지만 ESPI 는 외부환경에 민감하여 실외적용이 어려운 점과 정량화의 어려움 때문에 전자전단 간섭법(shearography)이 이용될 수 있다. ESPI 와 전자전단 간섭법을 이용한 검사를 통해서 대상체의 동체이음과 둘레용접부에 대한 정성적 내부 결함 검출은 많은 연구가 진행되었다.<sup>3</sup>

따라서 본 논문에서는 전자전단 간섭법을 이용하여 대상체의 동체와 노즐부분의 용접부와 같은 UT 와 RT 의 적용이 어려운 부분에 대해서 내부 결함을 검출하고 내부 결함에 대한 정량화를 통하여 용접부 검사 방법으로 전자전단 간섭법의 정확성과 실용성을 검증하는 것에 목적을 두었다.

2. 이론

2.1 스페클 패턴(Speckle pattern)

레이저빔이 물체에 조사되어 굴절률이 일정하지 않은 매질을 통과할 때 고온 입자 형태의 밝고 어두운 무늬가 무질서하게 나타난다. 이것을 스페클 패턴이라고 한다.

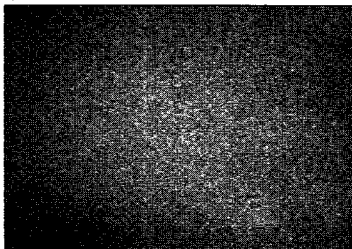


Fig. 1 Speckle pattern image

Fig. 1 은 전형적인 스페클 패턴이다. 이러한 스페클은 자체적으로 물체의 높낮이 정보를 가지고 있기 때문에 이 스페클을 이용하여 측정하고자 하는 물체의 변위나 변형을 정보를 알 수 있다.

2.2 스페클 상관 간섭

스페클 상관 간섭은 기준빔(Reference beam)과 물체빔(Object beam)의 간섭을 기록한다. 기본 광학계를 구성하고 물체의 변형 전후의 상관관계에 따라 발생하는 간섭무늬를 해석하는 방법이다. Fig. 2 는 면의변위 ESPI 의 개략도이다. 최초의 빔을 기준빔과 물체빔으로 분리하고 물체빔은 물체에 난반사되어 CCD 에 입사되고 기준빔은 난반사되지 않고 CCD 에 직접 입사된다. 이렇게 하여 물체빔과 기준빔 간의 간섭이 발생 하게 되고 새로운 강도를 가지는 스페클 패턴을 생성하게 된다.

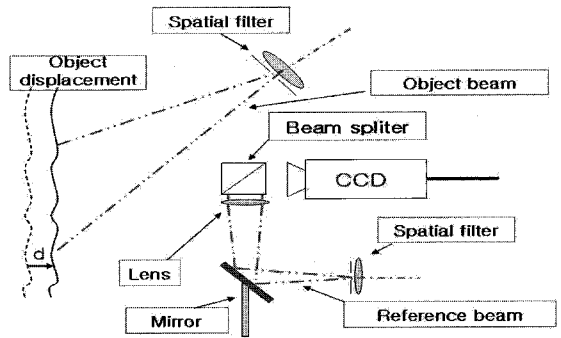


Fig. 2 Schematic diagram of a Out-of-plane ESPI

변형전 물체광과 참조광의 간섭에 의한 광강도 분포는 다음과 같다.

$$I_A = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\psi \quad (1)$$

이 물체 표면에서 수직방향으로  $d$  만큼 이동했다면 이러한 영향으로 상면에서의 변형 후 광강도 분포는 다음과 같이 변화 된다.

$$I_B = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\psi + \Delta\phi(d)) \quad (2)$$

따라서 물체의 가간섭의 정도는 물체의 변위  $d$  직접관계 됨을 알 수 있다.

2.3 전자전단 간섭법

광학적인 검사 방법에는 간섭성 광원을 이용하는 홀로그래피, ESPI 등이 있고 비 간섭성 광원을 이용하는 무아레 등이 있다. 간섭성 광원을 이용하는 방법 중 정렬이 쉽고, 진동 등 외란에 둔감한 전자전단 간섭법이 산업현장에서 널리 쓰이고 있다. 전자전단 간섭계는 Shearing speckle interfe-

rometer 를 나타내며 홀로그래피나 ESPI 처럼 조사 부위 전체의 검사가 가능하다. 나타나는 간섭무늬는 표면 변위의 미분치 이다. 이 방법은 전단 (shearing)되는 두 개의 영상이 같은 장치에서 이루어지므로, 광학적인 구성이 간단하다. 이 전단간섭계는 스펙클 간섭계뿐 만 아니라 광학 빔의 파면의 검사 등 일반적인 광학적 검사법(Optical testing)에 이용된다.

**2.3.1 전자전단 간섭법의 원리**

전자전단 간섭법으로 측정된 무늬는 변위 구배를 나타내기 때문에 홀로그래피와 같은 동심원 무늬가 아닌 나비(Butterfly)모양의 무늬와 같은 독특한 모양을 나타낸다. Fig. 3 은 레터럴 전자 전단 간섭계의 개략도이다. 레이저에서 빔이 물체에 조사되고 반사된 빛이 광 분할기를 거쳐 하나는 위쪽은 거울을 통해 CCD 에 상이 맺히고 다른 하나는 오른쪽 거울을 통해 반사된 후 CCD 에 상이 맺히게 된다. 이때 그림에 나와 있듯이 오른쪽 거울을 살짝 회전시켜 CCD 에 맺히는 두 개의 상을 전단시키게 된다. 이 상태에서 변형 전 물체의 정보를 가진 스펙클 패턴과 변형 후 물체의 정보를 가진 스펙클 패턴을 전자적으로 빼주게 되면 나비모양의 무늬가 생기게 된다.

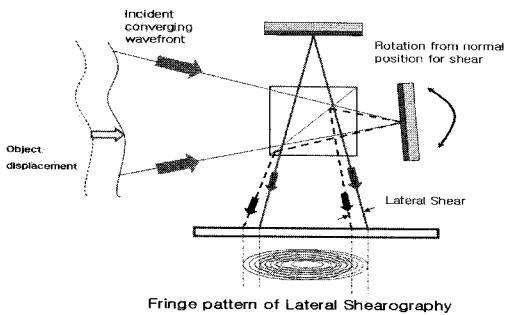


Fig. 3 Schematic diagram for a lateral digital Shearography

Fig. 4 를 보면, 정적인 변위 구배 미분 (Displacement gradient derivative)을 측정하기 위한 레터럴 간섭계에서는 전단량  $S_x$  만큼 두 점 P, Q 가 상면에서 간섭을 일으킨다. 즉, CCD 화면상으로 두 점을 겹쳐 보이게 된다. 따라서 레터럴 전자간섭계에서는 변형량이 아닌 변형 후 두 점의 변형량의 차이인  $\Delta d$  의 위상차가 간섭무늬의 정보로 표시된다. 두 점 사이의 거리  $S_x$  를 전단량이라 한다.

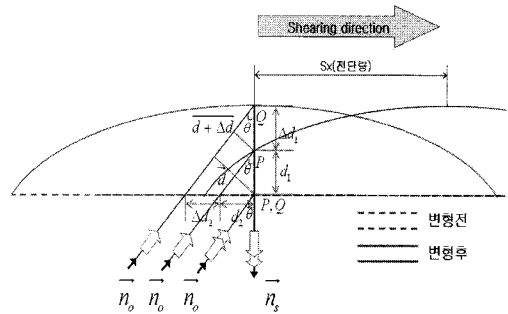


Fig. 4 Vector diagram to calculate Phase difference

P 점과 Q 점에서 변형 전과 변형 후의 위상차를 구해보면 다음과 같다.

P 점에서의 위상차는

$$\Delta\phi_p = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_o - \vec{n}_s) \cdot (\vec{d}) \tag{3}$$

Q 점에서의 위상차는

$$\Delta\phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_o - \vec{n}_s) \cdot [(\vec{d} + \Delta\vec{d})] \tag{4}$$

레터럴 전자 전단 간섭계는 두 점 P 와 Q 사이의 변형의 차이를 계측하기 때문에 간섭계에서 간섭무늬가 나타내는 위상차  $\Delta\phi$  는 식 (4)에서 (3)을 뺀 것과 같다.

$$\Delta\phi = \Delta\phi_Q - \Delta\phi_p = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos\theta) \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x \tag{5}$$

$$\Delta\phi \cong \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x \tag{6}$$

간섭계에 의해 측정되는 간섭무늬는 인접한 두 점에서의 변형인  $\partial d_1 / \partial x$  의 값이 일정한 등고선을 나타냄을 알 수 있다. 또 식에서 알 수 있듯이 전단량  $S_x$  의 값이 0 에 가까울수록 식 (6)는 오차가 작은 정확한 식이 되지만, 결함을 검출 할 수 있는 간섭계의 민감도는 떨어진다고 할 수 있다.<sup>4,5</sup>

**2.3.2 위상이동법에 의한 변형구배의 정량화**

전자전단 간섭방법에서 위상정보를 정량적으로 측정하기 위해서 PZT(Piezo-electric transducer, 압전 소자)를 이용한 위상이동법을 사용한다. 여기서 사용된 위상이동법은 물체의 변위 구배에 따른 간섭

위상 값을 구하는 방법이다. 일반적으로 4 frame 을 많이 사용한다. 그 이유는 식 (1) 에 미지수가 3 개 ( $I_1, I_2, \psi$ )이므로 3 개 이상의 방정식이 필요하기 때문이다. 식 (7)~ (10)과 같이 상대적인 위상 차를 지나는 4 개의 광 분포도를 화상처리 장비에 입력한 후 이를 아래의 식 (11)에 대입하여 물체의 각 지점에서의 위상 값을 구하면 변위 구배의 크기와 부호를 알 수 있게 되는 위상도(Phase map)를 계산해 낼 수 있다. 그리고 위상도는  $\arctan$  함수의 특성상  $2\pi$  마다 불연속성을 지니게 되는데, 이 불연속성은 위상 펼침(unwrapping)에 의해 해소되어 물체 표면에서 발생된 변위 구배의 양이 연속적으로 나타나게 된다.

$$I_1 = I_0[1 + \gamma \cos \phi] \tag{7}$$

$$I_2 = I_0[1 + \gamma \cos(\phi + \frac{\pi}{2})] = I_0[1 - \gamma \sin \phi] \tag{8}$$

$$I_3 = I_0[1 + \gamma \cos(\phi + \frac{2\pi}{2})] = I_0[1 - \gamma \cos \phi] \tag{9}$$

$$I_4 = I_0[1 + \gamma \cos(\phi + \frac{3\pi}{2})] = I_0[1 + \gamma \sin \phi] \tag{10}$$

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \tag{11}$$

**2.4 결함의 정의**

ASME code section XI 은 원자로에 관련되는 압력용기에 대한 규정으로서 이 내용에 의한 결함의 차원은 결함의 길이, 그리고 용기의 두께에 대한 결함 깊이의 비로써 정의되어 있다. 그리고 결함의 방향에 따라 축 방향 결함(axial crack)과 원주 방향 결함(circumferential crack)으로 분류하고 있다. 원주방향 결함의 경우 직선이 아니지만 길이를 평가할 때는 Fig. 5(b)와 같이 직선을 평가하게 된다.(A: 결함 깊이, L: 결함 길이, T: 모재 두께)

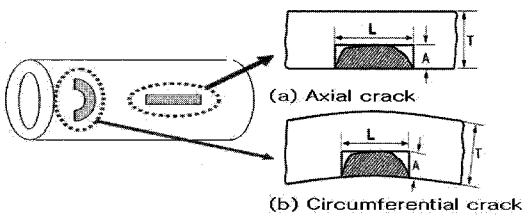
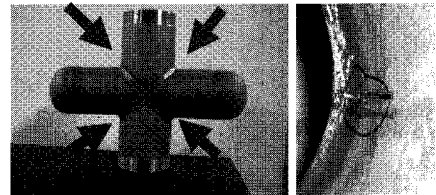


Fig. 5 Definition of the cracks

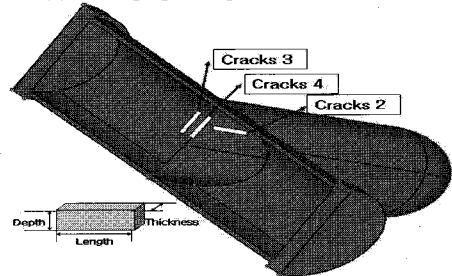
**3. 장치구성 및 실험결과**

**3.1 시험용기 제작**

시험용기는 Fig. 6(a)와 같이 제작되었다. 재질은 SUS-304 이며 외경은 110mm 이며 두께는 5mm 이다. 양단에 나사산을 가공하여 캡을 부착시킬 수 있게 하였다. 표면은 확산, 조사되는 레이저빔이 균일하게 반사될 수 있도록 무광택 백색 도료를 도포하였다. 내부 결함은 축방향과 원주방향으로 정하였다.



(a) Photograph of specimen and crack



(b) Location of cracks

Fig. 6 Shape and location of the specimen

Crack 은 Fig. 6(a) 왼쪽 사진의 화살표위치에 하 나씩 방전 가공되었다. Fig. 6(b)는 Crack 의 가공 위치를 나타낸다. Crack 4 는 Crack 3 과 다르게 용접 부분에 가공되었다.

Table 1 Specification of cracks

Crack	Direction	Length(mm)	Depth(mm)
1	Crack free	0	0
2	Axis	20	4
3	Circumference	20	4
4	Cricumference	20	4

**3.2 전자전단간섭계 구성**

광원으로는 Coherent 사의 모델명 DPSS 532 로서 레이저의 세기는 Max 500mW 이며, 파장은 532nm 인 Nd:YAG 레이저이다. Fig. 3 과 Fig. 8 처럼 레이저

에서 나온 빛이 물체면에 조사되어 반사된 빛이 광 분할기를 거쳐 두 개로 나뉘져 하나는 M1 을 거쳐 CCD 에 들어오고 다른 하나는 M2 에 반사되어 광 분할기를 거쳐 CCD 에 들어온다. 이 때 M2 는 반사각을 조정하여 전단량을 주게 된다. 간섭계의 면의변위 정밀도는 다음과 같다.

$$d = \frac{N\lambda}{1 + \cos\phi} \cong \frac{N\lambda}{2} \quad (12)$$

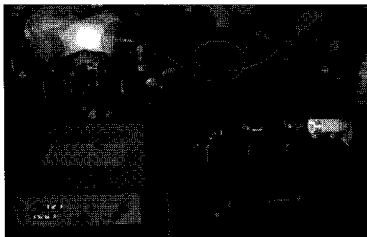


Fig. 7 Experiment using the shearography

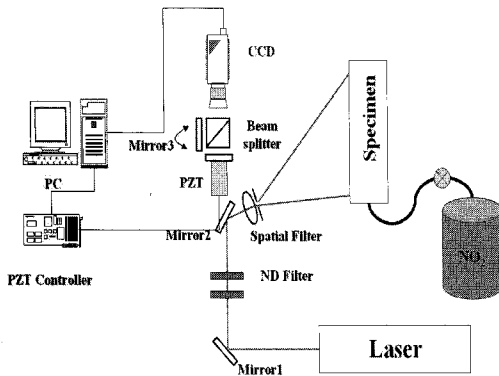
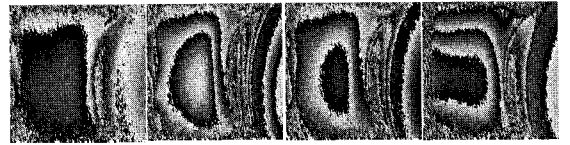


Fig. 8 Schematic diagram of shearography testing system.

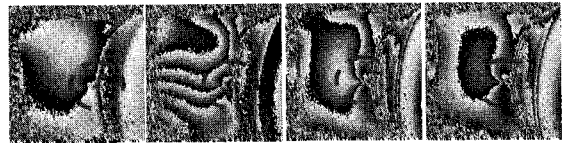
### 3.3 내부결함 검출 및 결과 분석

#### 3.3.1 결함의 검출

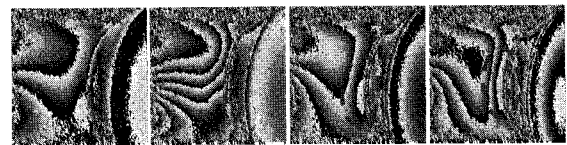
변형여기 방법으로 질소 가압을 선택하였다. 가압은 P1 : 9.8Pa 에서 P4 : 39.2Pa 까지 가압하였다. P2 : 19.8Pa, P3 : 29.4Pa 이다. 전단량은 10mm 를 x, y 방향으로 하였다. CCD 와 물체까지의 거리는 43cm 였고 결함 검출 면적은 가로 20cm×세로 20cm 였다. 전자 전단 간섭계의 위상에 가장 영향을 주는 것이 대상체의 변위이다. 대상체에 가압을 하여 변위를 발생시켰다. 가압을 달리하여 대상체의 변위에 따라서 결함을 검출 하였다. 전단 방향은 CCD 화면상 좌우방향을 x 방향으로 상하방향을 y 방향이라 정의 한다.<sup>5</sup>



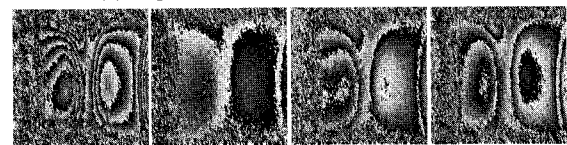
(a) Experimental results of the Crack 1



(b) Experimental results of the Crack 2

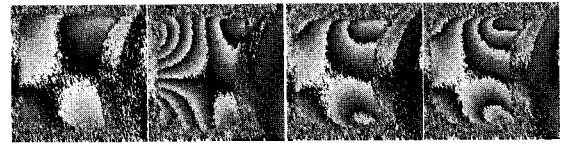


(c) Experimental results of the Crack 3



(d) Experimental results of the Crack 4

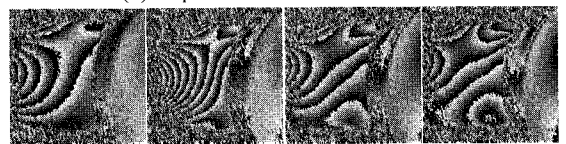
Fig. 9 Experimental results of x-direction shearing from the left, P1, P2, P3, P4 to the pressurization



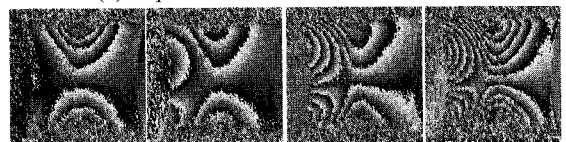
(a) Experimental results of the Crack 1



(b) Experimental results of the Crack 2



(c) Experimental results of the Crack 3



(d) Experimental results of the Crack 4

Fig. 10 Experimental results of y-direction shearing from the left, P1, P2, P3, P4 to the pressurization

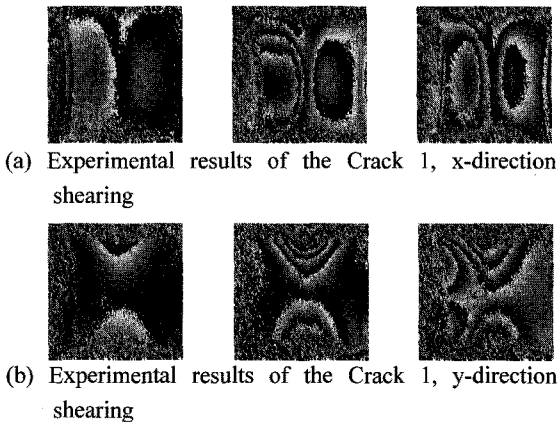


Fig. 11 Experimental results of the Crack 1, Symmetrical measurement from the left, P1, P2, P3 to the pressurization

Fig. 9~Fig. 11 은 전자 전단 간섭계를 이용하여 결함의 유무, 결함의 방향, 결함의 위치에 따른 위상도를 나타내고 있다. 이 검출을 위해 사용된 전단량은 10mm 로서 이 값은 실험을 통해 결함의 정확도와 민감도 등을 고려하여 결정하였다.

먼저 Fig. 9는 전단량을 x 방향으로 10mm 로 하고 변형 여기를 위해서 내부 압력을 P1, P2, P3, P4 로 하여 나타난 결과 이다. Fig. 9(a)는 결함이 존재하지 않는 곳이다. 위상도가 보여주는 것처럼 시험용기의 전체적인 변화가 나타날 뿐 결함으로 인한 응력집중 부분은 찾아 볼 수 없다. Fig. 9(b)는 결함이 축 방향으로 존재 하는 결과이다. P1 부터 P4 까지 변화를 시켜 측정할 때 P3 와 P4 일 때 결함의 왼쪽 편에 응력집중을 나타내는 무늬가 선명하게 생성됨을 알 수 있다.<sup>7</sup> 실제 결함 오른쪽의 응력집중을 나타내는 무늬는 용접부의 영향으로 계측이 어려움을 알 수 있다. Fig. 9(c)는 원주방향 결함의 결과이다. 위상도에서 보여주는 것처럼 결함 부근에서 시작된 무늬가 퍼져 가는 것으로 보여지나 결함의 유무를 판단하기에는 어려움이 있다고 생각된다. 이는 결함이 용접방향과 나란하게 생성되어 용접부의 영향으로 결함에 의한 응력집중을 나타내기 어렵기 때문이라 생각된다. Fig. 9(d)는 결함이 용접 부에 위치한 것으로 용입 불량을 표현한 것이다. Fig. 11(a)와 비교하여 위상도가 비슷한 모양을 가지는 것으로 볼 때 결함의 검출이 어려웠다고 판단된다. x 방향 전단에서는 축 방향 결함일 때 가장 선명하게 결함을 검출 할 수 있었다. 이는 용접부의 물성변화와 강도의 증가로 인

하여 용접 부에서의 변형이 시험용기 전체적인 변형에 비하여 극히 작기 때문이라고 판단된다.

Fig. 10 은 전단량을 y 방향 10mm, 변형 여기를 위해 내부압력을 P1, P2, P3, P4 로 하여 나타난 결과이다. Fig. 10(a)는 결함이 존재하지 않는 곳이다. 위상도가 보여주는 것처럼 시험용기의 전체적인 변화가 나타날 뿐 결함으로 인한 응력집중 부분은 찾아 볼 수 없다. Fig. 10(b)는 결함이 원주 방향으로 존재 하는 결과이다. P1 부터 P4 까지 변화를 시켜 측정할 때 P3 와 P4 일 때 응력집중을 나타내는 무늬가 선명하게 생성됨을 알 수 있다. 결함의 오른쪽 끝 부분과 용접부가 맞닿은 부분에서 위상도의 무늬가 끊기는 것을 볼 때 용접부의 변형은 없다고 판단 된다. Fig. 10(c)는 원주방향 결함의 결과이다. 위상도에서 보여주는 것처럼 결함 부근에서 시작된 무늬가 퍼져 가는 것으로 Fig. 10(a)와는 다른 패턴으로 보여지나 결함의 유무를 판단하기에는 어려움이 있다고 생각된다. Fig. 10(d) 는 결함이 용접 부에 위치한 것으로 용입 불량을 표현한 것이다. Fig. 11(b)와 비교하여 위상도가 비슷한 모양을 가지는 것으로 볼 때 결함의 검출이 어려웠다고 판단된다. y 방향으로 전단을 주고 나타난 결과에서도 축 방향 결함에서 정확한 검출이 가능하였다. 내부 압력이 커지면 변형 여기가 커지기 때문에 식(12)에서 변위  $d$ 의 값은 커지게 되고 fringe 무늬의 수가 증가한다. 또한 식(6)은 간섭계의 민감도를 나타내는 것으로 최적의 전단량을 정하는데 사용되며 이 연구에서는 많은 실험과정을 거쳐서 10mm 상태에서 실험이 진행되었다.

결함의 축 방향과 원주방향의 결과를 비교하여 보면 결함의 위치가 용접 부에 근접할수록 변위 발생이 작아 응력집중이 나타나지 않음을 알 수 있었다. 또한 압력용기에서 결함에 가해지는 힘은 원주방향 면적이 크면 클수록 커진다는 것을 실험적으로 알 수 있었다.

### 3.3.2 FEM 해석과 경향파악

FEM 해석은 ANSYS 10.0 을 이용하였고 SOLID 45 를 이용해서 생성하였다. 결함의 방향에 따른 응력집중의 경향을 단순하게 보여주기 위해 실시하였다. 내부 압력은 P4 로 하였고 캡 부분 양단을 고정하였다. 물성은 SUS-304 의 것으로 하였다. Modulus of Elasticity = 200GPa, Poisson's Ratio = 0.290, Density = 8.00g/cc 이다. 모델은 CATIA V5 로 모델링 하였으며 용접은 표현하지 않았다.

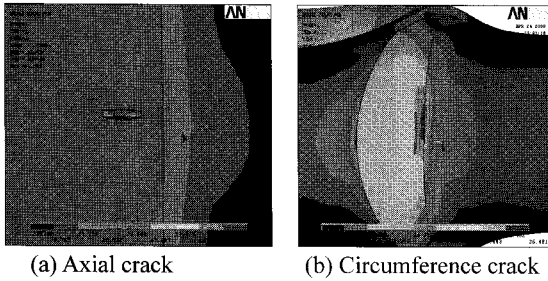


Fig. 12 Results of FEM

Fig. 12(a) 를 보면 결함의 양 끝에서 응력집중이 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 12(b) 에서도 결함을 중심으로 응력집중이 되는 것을 볼 수 있다. 이 부분은 구조적으로도 응력이 집중되는 부분이다.

3.3.3 축방향 결함의 길이 측정

결함 길이를 측정하기 위해서 본 연구에서는 위상 필름도에서 라인 프로파일(line profile)을 추출하여 최대, 최소점 사이의 화소수를 계산하여 길이를 측정하는 방법을 이용하였다. 화소수를 계산하고 한 화소에 해당하는 실제 거리를 곱하는 방법을 이용하여 결함 길이를 측정하였다.

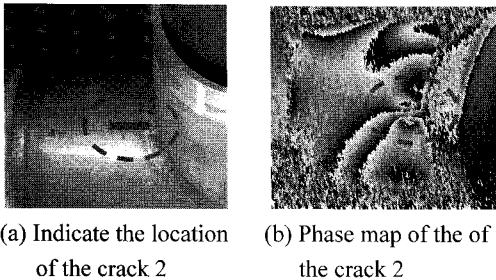


Fig. 13 Detection of the crack 2

Fig. 13(a)는 Crack 2 의 위치를 나타내고 Fig. 13(b)와 Fig. 14(a)는 이를 검출한 Phase map 을 나타낸 것이다. Fig. 14(a) ~ (d) 는 Crack 2 에 대한 결함 길이의 측정의 과정을 나타낸 것이다. Fig. 14(c) 는 Fig. 14(b) 의 흰 줄의 위상도의 높이 값을 나타낸다. 결함의 끝 단에서 응력집중이 발생한다. Fig. 14(c)의 line profile 에 나타나듯이 급격한 변화를 나타내는 지점이 결함의 끝이라고 판단된다.

Table 2 는 압력에 따라 변형 여기를 가하고 측정된 결함의 길이와 실제 길이와의 오차율을 계산한 것이다. 가압 P3 일 때 가장 낮은 오차율을 보였다. 결함 길이를 측정하기 위해서 Fig. 14 와 같

이 위상도에서 line profile 을 추출하여 최대, 최소점 사이의 화소수를 계산하여 길이를 측정하는 방법을 이용하였다. 축 방향 결함에 대해 전단 방향을 x 방향으로 측정한 결과 결함의 길이를 구할 수 있었다. 이를 통하여 결함의 길이가 20mm 정도임을 알 수 있다. 용접부에 비 대칭으로 가공된 결함으로 인하여 결함 길이 측정에 부정적인 영향을 주었다고 판단된다. 그 이유는 용접부의 물성이 모재에 비해 단단하여 변형 여기에 의한 변위 발생이 거의 없었기 때문이다. 측정 가능한 결함의 크기는 물체의 제질, 결함 모양, 위치, 전단량, 레이저, CCD 해상도, 측정거리 등 다양한 조건이 복합적으로 작용한다고 생각된다. 기공과 같은 작은 크기의 결함 정량화에 대한 연구는 아직 진행되지 않았다.

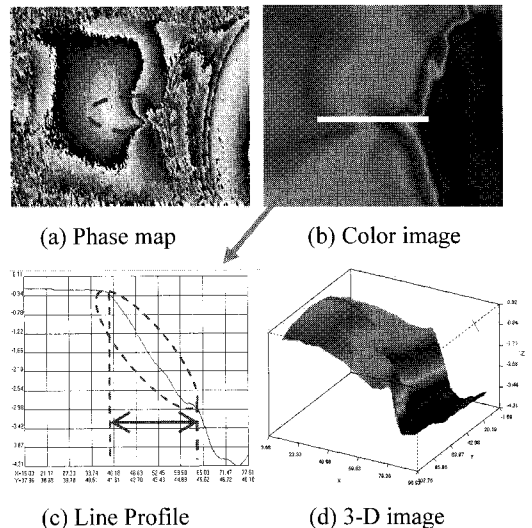


Fig. 14 Measurement Method of the crack 2's length

Table 2 Experimental Results of Measured Crack 2

Pressure (N/Cm <sup>2</sup> )	Actual Length (mm)	Measured Length (mm)	Error(%)
9.8	20	X	X
19.6	20	16.5	17.5
29.4	20	21.5	7.5
39.2	20	21.85	9.25

4. 결론

축 방향 결함의 원주방향 파면넓이가 원주방향

결합의 것에 비해 크다. 결합이 받는 힘은 파면의 원주방향 넓이가 크면 비례하여 커진다. 즉, 축방향의 결합이 원주 방향 결합에 비하여 같은 크기의 결합일 경우 상대적으로 위험하다는 것을 알 수 있다. 일반적인 압력용기에서 전자 전단 간섭계의 내부결합 길이 측정오차가 1%대였던 것과 비교해볼 때 용접부에 위치한 결합에 대한 검출과 정량적 측정이 쉽지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 5mm 크기의 내부 결합까지 정량화할 수 있었던 전자전단 간섭계가 용접부에서는 작은 크기의 결합은 검출이 어려움을 나타내었다. 추후 논문에서는 결합의 다양한 종류와 크기를 측정하여 결합 정량화에 대한 연구를 진행해 나갈 것이다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임.

## 참고문헌

1. Lobanov, L. M., Pivtorak, V. A., Kyyanets', I. V. and Savvyts'ka, O. M., "Nondestructive testing of composite and metallic pipes by the method of electronic shearography," *Materials Science*, Vol. 43, No. 4, pp. 522-527, 2007.
2. Mader, D. L., "Holographic and nonholographic NDT for nuclear and coal-fired power plants," *SPIE*, Vol. 604, pp. 37-56, 1986.
3. Hung, Y. Y., "Shearography: A Practical Nondestructive Testing Method," *International Advances in Nondestructive Testing*, Vol. 14, 1989.
4. Steinchen, W., Yang, L. X., Kupfer, G. and Maeckel, P., "Nondestructive testing of micro-cracks using digital speckle pattern shearing interferometry," *Proc. of SPIE*, Vol. 3098, pp. 528-535, 1997.
5. Steinchen, W., Yang, L. X., Schuth, M. and Kupfer, G., "Electronic Shearography(ESPI) for direct measurement of Strains," *Proc. of SPIE*, Vol. 2248, pp. 210-221, 1994.
6. Kang, Y. J., Lee, J. S. and Baik, S. H., "A Study on Evaluation of Defects of Pressure Vessel by Using ESPI and FEM," *J. of the KSPE*, Vol. 24, No. 12, pp. 104-110, 2007.
7. Lomov, S. V., Ivanov, D. S., Verpoesta, I., Zakob, M., Kurashikib, T., Nakaib, H., Molimardc, J. and Vautrin,

A., "Full-field strain measurements for validation of meso-FE analysis of textile composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 9, Issue 8, pp. 1218-1231, 2008.