

# ESPI 를 이용한 곡관 감육 결함부의 변형률 분포 측정

아흐터 나심<sup>†</sup> · 김경석<sup>\*</sup> · 정성욱<sup>\*\*</sup> · 박종현<sup>\*\*\*</sup> · 최정석<sup>\*\*\*\*</sup> · 정현철<sup>\*</sup>

## Strain Distribution Measurement for Wall Thinning Defect in Pipe Bends by ESPI

Akhter Naseem, Koung-Suk Kim, Sung-Wook Jung, Jong-Hyun Park,  
Jung-Suk Choi and Hyun-Chul Jung

**Key Words :** ESPI(전자처리 스페클 패턴 간섭법), Flow-accelerated corrosion(유동가속부식), Internal pressure(내압), Pipe bend(곡관), Strain distribution(변형률 분포), Wall thinning defect(감육 결함)

### Abstract

Put Abstract text here The strain distribution measurement for wall thinned pipe bends by ESPI is presented. Defect types observed in the steel piping in the nuclear power plants (NPP) are the crack at the weld part and the wall thinning defect in the pipe bends. Especially, the wall thinning defects in the pipe bends due to the flow-accelerated corrosion (FAC) is a main type of defects observed in the carbon steel piping system. ESPI is one of the optical non-destructive testing methods and can measure the stress and the strain distribution of the object subjected by the tensile loading or the internal pressure. In this paper, the strain distribution of the wall thinned pipe bends due to the internal pressure will be measured by ESPI technique and the results are discussed. From the results, the size of the wall thinning defect can also be measured approximately.

### 1. 서 론

발전소 또는 화학공장을 포함한 생산설비의 배관은 주로 탄소강을 사용한 배관으로 구성되어 있다. 탄소강 배관은 사용 연수가 증가함에 따라 배관 내부에 흐르는 유체에 의한 침식과 부식에 의해 배관 벽 두께가 얇아지는 현상(배관감육)이 발생한다. 따라서, 설치 초기에 탄소강 내부 표면에 화학처리를 하여 산화피막을 강제로 형성시켜 부식이 일어나지 않도록 한다. 그러나

발전설비의 가동중 배관의 두께가 얇아져서 배관이 파손된 사례가 발생하였다.

특히 2004년 8월 9일에 발생한 일본의 미하마 원전 3호기에서 터빈축 배관이 파열되어 고온·고압의 응축수가 터빈건물 내부에 분출되는 사고가 발생하였다. 이 사고의 원인은 복수기와 증기 발생기 사이의 탄소강 재질의 배관이 감육되어 파열된 것으로 추정되었다.

따라서 국내 원전은 이와 같은 사례를 통해 감육배관의 점검을 중요시하여 모든 배관의 두께가 설계값의 90% 이상을 유지하도록 하고 있으며, 기존의 용접부만 대상으로 점검하던 것과는 달리 초음파검사 등 비파괴검사 방법을 이용하여 배관 전체에 대한 감육 정도를 확인하고 있다.

원전 배관 감육결함에 대한 연구는 1990년대 이후 활발하게 진행되고 있으나, 대부분 직관에 대한 연구에 머물러 있다<sup>(1-3)</sup>. 실제 배관계통에는

---

<sup>†</sup> 회원, 조선대학교원

E-mail : naseemalig@gmail.com

TEL : (062)230-7213 FAX : (062)230-7838

\* 조선대학교 기계설계공학과

\*\* 조선대학교 레이저센터

\*\*\* 조선대학교원

\*\*\*\* 목포과학대학 자동차공학과

곡관부에 주로 감육결함이 발생하며, 따라서 직관 뿐만 아니라 곡관에 대한 연구도 함께 수행되어야 한다. 또한 최근의 곡관에 대한 연구<sup>(4)</sup>는 주로 파괴적인 방법을 이용하여 수행되므로 안전성, 경제성 등에서 많은 주의와 보완이 필요한 실정이다.

1990 대 중반 이후 레이저를 이용한 광학적 비파괴검사법에 대한 연구가 활발하게 진행되어, 현재는 원자력 분야를 포함한 가전, 자동차, 항공 분야 등에서 폭넓게 사용되고 있다. 광학적인 방법으로는 HI (Holographic Interferometry)와 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry), SSI (Speckle Shearing Interferometry) 등이 주로 사용되고 있다. 이 중 ESPI 는 대상체의 면내변위와 면외변위를 모두 측정할 수 있기 때문에 응력, 변형률 해석과 진동 해석 등에 주로 사용된다.

따라서, 본 논문에서는 ESPI 를 이용한 비파괴적인 방법을 이용하여 곡관 내부에 존재하는 감육결함의 영향부에 대한 변형률 분포를 측정하여, 감육결함의 위치와 내압의 변화에 따른 영향을 파악하였다. 또한, 이와 같은 변형률 분포 측정을 통해 감육결함부의 크기를 추정할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

## 2. ESPI 의 측정원리

### 2.1 변위측정

레이저를 광학적으로 거친 표면에 조사를 하면 회고 검은 반점 형상을 볼 수 있는데 이것을 스페클이라고 한다. 레이저를 이용한 ESPI 계측은 이 스페클을 이용하여 대상체의 변형에 따른 변위를 측정하게 된다<sup>(5)</sup>.

Fig.1 은 면내변위 측정을 위한 간섭계의 개략도이다. 조사되는 두 개의 레이저광은 조사면에 대해 같은 각도  $\theta$  로 두 방향에서 조사하게 되며, 조사된 레이저광은 각각 물체표면에서 스페클패턴을 형성하고 각 스페클패턴은 다시 간섭하여 제 2의 스페클패턴을 형성하게 된다. 제 2의 스페클패턴은 조사된 레이저광의 위상차에 의해 형성되며, 조사광의 광경로를 추적함으로써 물체 변위와 레이저광의 위상과의 상관관계를 규명할 수 있다.

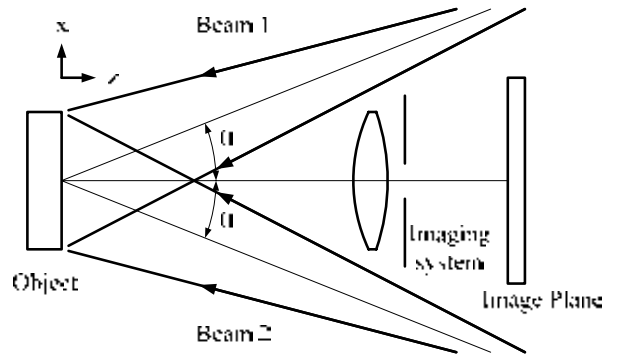


Fig. 1 Schematic of in-plane displacement sensitive interferometer

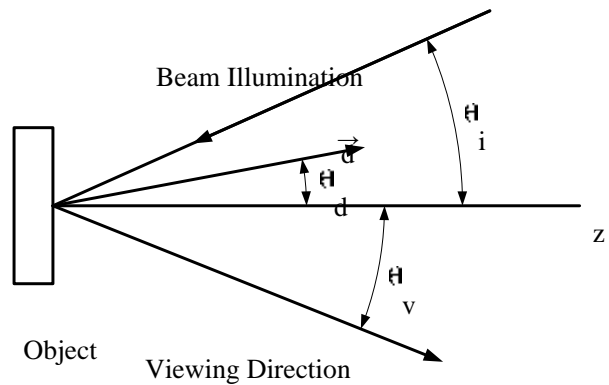


Fig. 2 Optical path tracing

Fig.2 는 레이저로 부터 결상면(Image plan, CCD camera)까지의 조사광의 광경로를 나타낸 것이다. 두 조사광의 광경로  $\delta_1$  와  $\delta_2$  에 의해 제 3의 스페클이 형성되며, 이 때의 위상차  $\Delta\phi$  를 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta\phi = \delta_1 - \delta_2 = \frac{4\pi}{\lambda} d_x \sin \theta_i \quad (1)$$

즉, 면내변위 측정간섭계에서 변위 벡터  $\vec{d}$  의 면외변위 성분  $d_z$  는 제거되며 면내변위 성분  $d_x$  만을 측정할 수 있게 된다. 변위성분에 대해서 식(1)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$d_x = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\Delta\phi}{\sin \theta_i} \quad (2)$$

## 2.2 위상추출

식(2)에서 물체의 변위에 따른 광 위상차는 조사빔 1 과 2 의 스페클간의 간섭에 의해 제 3 의 스페클이 형성되면서 나타나게 되며, 이때 간섭현상을 수식으로 나타내면 식(3)과 같다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi \quad (3)$$

여기서  $I$  : 간섭에 의한 광강도분포,  $I_1$  : 조사빔 1 의 광강도 분포,  $I_2$  : 조사빔 2 의 강도분포이다.

식(3)으로부터 위상차를 추출하기 위해서는 미지수가 3 개( $I_1, I_2, \phi$ )이므로, 식(3)으로부터 직접 위상차를 구할 수 없다. 즉, 위상을 추출하기 위해 최소한 3 개의 방정식이 필요하게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 Piezo-electro transducer(PZT)를 이용한 위상변조 기법을 사용하고 있다<sup>(6)</sup>. 본 연구에서는  $\pi$  간격으로 위상을 변조하여 4 개의 방정식을 얻어 위상을 추출하는 4-bucket phase shifting method 를 이용하였다. PZT 에 의해 위상변조된 4 개의 광강도분포를 식(4)와 같이 쓸 수 있으며, 각 이미지는 PC 에 기록이되고 식(5)와 같은 처리를 통하여 위상차를 추출할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{dc} + I_m \cos \phi \\ I_2 &= I_{dc} + I_m \cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \\ I_3 &= I_{dc} + I_m \cos(\phi + \pi) \\ I_4 &= I_{dc} + I_m \cos\left(\phi + \frac{3\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $I_{dc} = I_1 + I_2$  이고,  $I_m = 2\sqrt{I_1 I_2}$  이다.

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right] \quad (5)$$

ESPI 에서 물체의 변형 측정은 변형 전후의 레이저의 광로 변화를 구함으로써 가능하다. 즉 물체의 변형에 의한 위상차를  $\Delta\phi$  라고 할 때, 물체변형 후에 형성된 제 3 의 스페클 패턴은 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$I_{def} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (6)$$

물체의 변형에 의한 최종 위상변화량  $\phi + \Delta\phi$  는 식(4)와 식(5)를 적용하여 추출할 수 있다. 물체의 변형에 의한 위상변화  $\Delta\phi$  는 식(7)로부터 구할 수 있다.

$$\Delta\phi = I_{def} - I = (\phi + \Delta\phi) - \phi \quad (7)$$

최종적으로 식(7)에 의해 구하여진 변형위상을 이용하여 식(2)에 대입함으로써 물체의 변형을 구할 수 있다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

인위적으로 감육결함을 가공한 감육 곡관 시험편의 형상 및 크기를 Fig.3 에 나타냈다. 곡관의 재질은 Butt 용접용 연강인 A234 WPB (SCH XS80S)이며, 두께는 8.56 mm, 직경은 114.3 mm 이다. 직관과 곡관은 용접이음을 하였으며, 직관과 곡관은 동일한 재질을 사용하였다. A234 의 허용응력은 240 MPa, 인장응력은 415-585 MPa, 세로방향 연신율은 25%이다. 감육 곡관 시험편을 고정하기 위해 Bed 를 제작하였다. 내압을 가하기 위해, 수동 가압장치를 이용하여 최대 표시영역이 2.5 MPa 인 압력계의 값을 기준으로 내압을 조절하였다.

변형률 분포를 측정하기 위해, 본 연구에서는 독일 Ettemeyer 사의 3D ESPI 시스템을 사용하였다. 레이저는 Coherent 사의 최대 출력이 2W, 파장은 532 nm 인 DPSS-CW Laser Verdi V2 를 사용하였다.

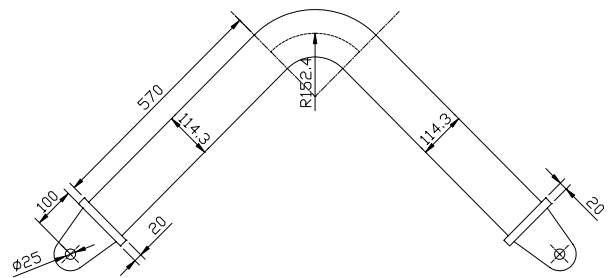
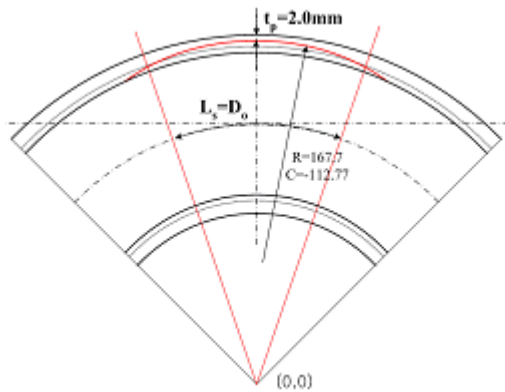


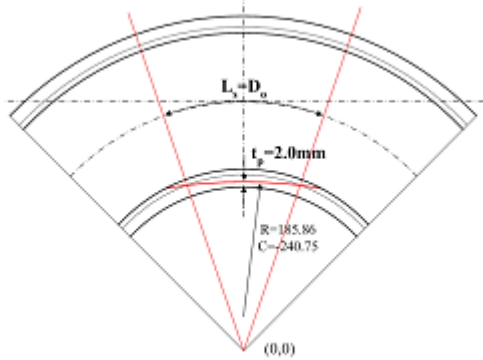
Fig. 3 Shape and dimension of pipe bend specimen

**Table 1** Type of specimen

ID No.	Defect length ( $L/D_0$ )	Defect width ( $\theta/\pi$ )	Minimum thickness $t_p$ (mm)	Defect location
SP-4	1	0.25	2	Extrados
SP-5	1	0.125	2	
SP-15	1	0.25	2	
SP-16	1	0.125	2	Intrados



(a) Extrados



(b) Intrados

**Fig. 4** Shape and location of wall thinning defect

Fig.4 에 Table 1 에 나타낸 감육결함의 길이 ( $L/D_0$ ) 와 최소 두께  $t_p$  에 대한 정의를 표시하였다. Table 1 의 결함 폭을 표현하는데 사용된  $\theta$  는 원주방향에서의 각도를 나타내며,  $\theta/\pi = 0.25$  는  $90^\circ$  를 의미한다.

### 3.2 실험방법

본 연구에서는 총 4 개의 감육 곡관 시험편에 대해 변형률 분포를 측정하였으며, 시험편 구분을 Table 1에 나타냈다.

Fig.5 는 외호면(extrados)에 감육결함이 가공된 시험편에 대한 ESPI 센서의 설치 위치를 나타내고 있다. 삼각대를 이용하여 위쪽에서



**Fig. 5** ESPI Sensor and pipe bend position for extrados wall thinning defect

내려다보면서 측정할 수 있도록 하였다. 내호면 (intrados) 감육결함에 대해서는 ESPI 센서를 시험편 아래쪽에 설치하였다.

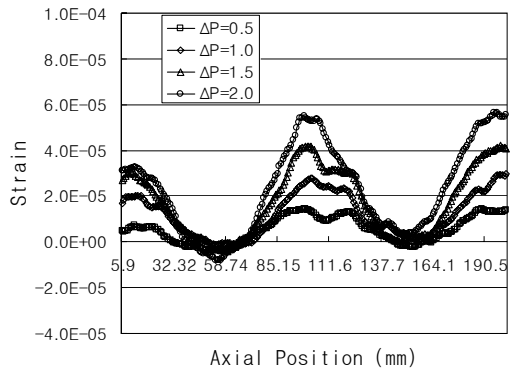
내압 변화량을 외호면 감육결함 시험편에 대해서는 0.5 MPa, 1.0 MPa, 1.5 MPa, 2.0 MPa 로, 내호면 감육결함 시험편에 대해서는 1.0 MPa, 1.5 MPa, 2.0 MPa 로 설정하였다. 내호면 감육결함의 경우, 0.5 MPa 의 압력변화에 대해서는 변형 정도가 작아서 차이를 구분하기 어려워 제외하였다.

외호면 감육결함 시험편과 내호면 감육결함 시험편에 대해서 각 압력변화에 대한 축방향과 원주방향 변형률을 측정하였다. 각각의 시험편에 대해 압력변화별 변형률 분포 측정 결과를 이용하여 결함 폭에 따른 압력변화별 변형률을 비교하였다. 또한, 동일한 압력변화에 대하여 결함 위치에 따른 변형률 분포를 비교하였다. 최종적으로 변형률 분포 측정 결과를 이용하여 결함의 형상을 예측하고자 하였다.

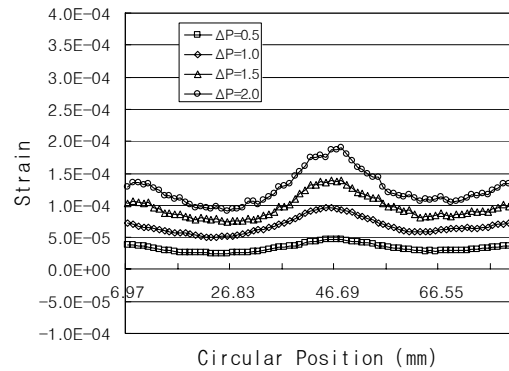
## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 압력변화에 따른 변형률

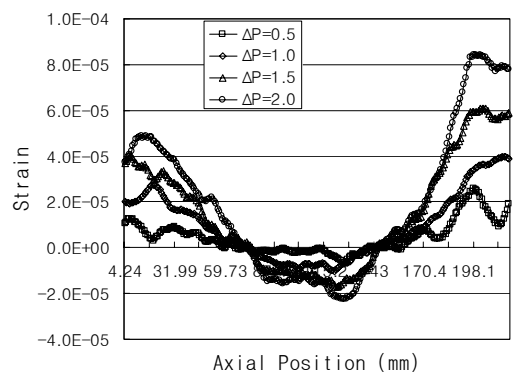
4 가지 시험편에 대해 축방향과 원주방향의 변형률 분포를 측정하였다. Fig.6 에 압력 변화에



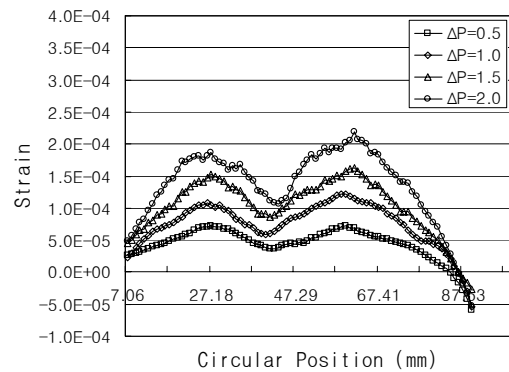
(a) SP-4



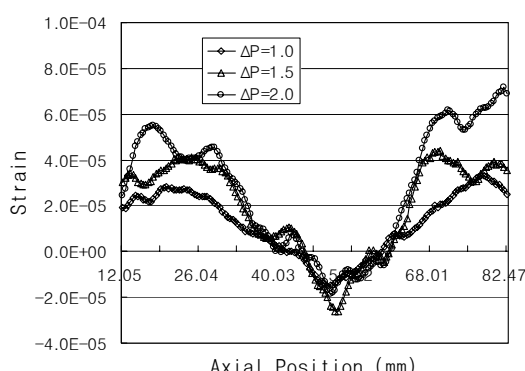
(a) SP-4



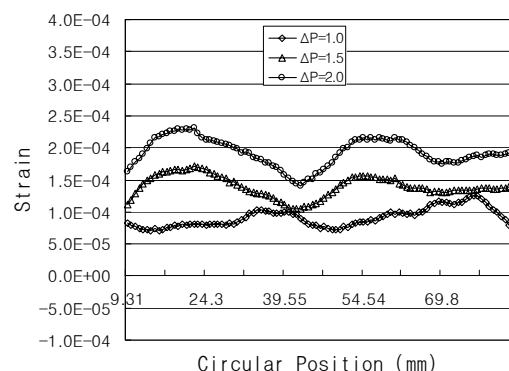
(b) SP-5



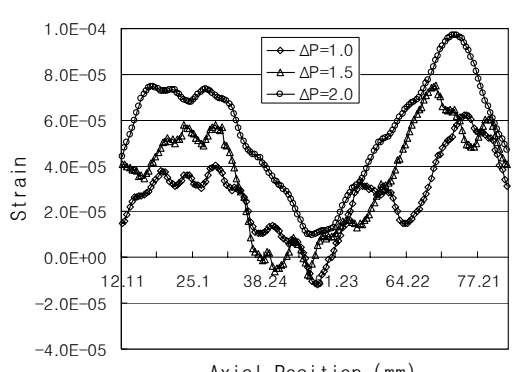
(b) SP-5



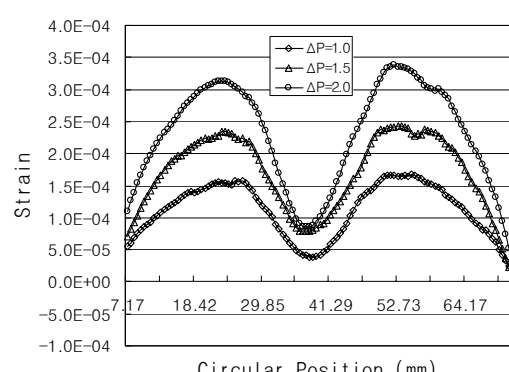
(c) SP-15



(c) SP-15



(d) SP-16



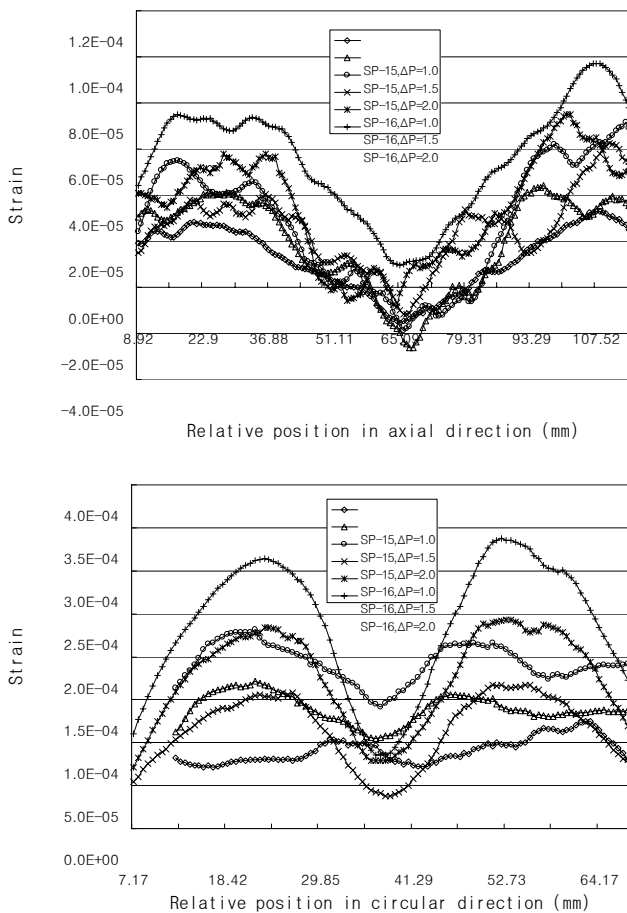
(d) SP-16

**Fig. 6** Strain distribution results on the axial center line of specimen

**Fig. 7** Strain distribution results on the circular center line of specimen

따른 축방향 변형률 분포를 나타냈다. Fig.6(a)는 감육결합의 폭이 90°일 때의 실험결과이다. 결합 폭이 90°일 때는 45°일 때와 다른 패턴을 보여주고 있다. 결합 폭이 상대적으로 클 경우 내압에 의한 결합부의 거동이 다른 형태로 나타나고 있음을 알 수 있으며 이 부분에 대해서는 계속적인 실험을 통해 원인 규명을 하고자 한다. Fig.6(c)와 Fig.6(d)에서 보는 바와 같이, 결합 폭이 상대적으로 작은 경우 변형률 분포가 약간 더 큰 폭을 보이고 있음을 알 수 있었다.

Fig.7 에는 원주방향의 변형률 분포를 나타냈다. 원주방향 변형률 분포 역시 축방향 변형률 분포와 동일하게 SP-4 의 경우 다른 패턴을 보이고 있음을 알 수 있다. 축방향 변형률 분포에 있어서는, Fig.7(a)~(d)에서 볼 수 있듯이 SP-5 와 SP-16 과 같이 결합 폭이 상대적으로 작을 경우 그래프의 끝부분이 말려들어감으로써 결합의 폭이 작음을 예측할 수 있었다.



(b) Circular direction  
**Fig. 8** Strain distribution for Intrados specimen

#### 4.2 변형률 분포에 의한 결합 크기 예측

Fig.8 에 내호면에 대한 축방향과 원주방향 변형률 비교 결과를 나타냈다. Fig.8(a)에서는 축방향 결합 길이가 동일하므로 그래프 양 옆의 최고값이 동일한 위치에서 나타나며, 그래프의 양 끝이 모두 모아지는 경향을 보였다. 그러나 Fig.8(b)에서는 SP-15 의 결과는 끝이 퍼져있는 반면, SP-16 의 결과는 끝이 모아지는 경향을 보였다. 따라서 이상의 변형률 비교를 통해 결합의 크기를 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 감육결합을 갖는 곡관의 결합 주변의 변형률을 측정하였다. SP-4 시험편에 대한 실험 결과는 다시 특이한 경향을 보였으나, 변형률 측정을 통하여 감육결합의 크기를 예측할 수 있음을 확인하였다. 외호면의 경우와는 달리 내호면 감육결합의 경우, 결합 폭에 따라 결과 그래프의 양쪽 끝부분의 결과가 달라짐을 알 수 있었다. 추후 실제 배관의 감육결합에 대한 적용을 통해 적용 가능성을 확인하고자 한다.

### 후기

이 연구(논문)은 과학기술부 지원으로 수행하는 원자력연구개발사업으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Ahn, S. H., Nam, K. W., Kim, S. J., Kim, J. H., Kim, H. S. and Park, I. D., 2002, *Trans. of the Korean Society of Ocean Engineers*, Vol. 16, No. 5, pp. 66-72.
- (2) Shim, D. J., Lim, H., Choi, J. B., Kim, Y. J., Kim, J. W. and Park, C. Y., 2003, *Trans. of the KSME A*, Vol. 27, No. 5, pp. 742-749.
- (3) Kang, S. H., 2005, "Nondestructive Evaluation of Wall-thinning in Piping System Using Laser-generated Ultrasound," Master Thesis.
- (4) Kim, J. W., Kim, T. S and Park, C. Y., 2003, *Journal of the KIIS*, Vol. 18, No. 4, pp. 28-34.
- (5) Jung, H. C., 2004, "Vibration analysis of structures using stroboscopic phase shifting ESPI", Doctor Thesis.
- (6) Creath, K., 1985, "Phase-shifting speckle interferometry," *Applied Optics*, Vol. 24, No. 18, pp. 3053-3058.