

전단간섭계를 이용한 감육결함이 있는 직관시험편의 결함크기 추정

Defect size estimation for wall thinning defect in pipes by Shearography

*박종현¹, 김동수¹, 아흐터 나심¹, 정성욱², 정현철³, #김경석³

*J.H. Park¹, D.S. Kim¹, A. Nassem¹, S.W. Jung², H.C. Jung³, #K.S. Kim³(gskim@chosun.ac.kr)

¹조선대학교 대학원, ²조선대학교 LARC, ³조선대학교 기계설계공학과

Key words : Shearography, Wall thinning defect, Internal pressure

1. 서론

발전소등의 생산설비에 사용되는 배관은 생산설비의 성능이나 안전성 유지에 있어서 매우 중요한 설비의 일부이다. 배관은 사용기간의 증가에 따라 피로, 부식 등 여러 가지 종류의 열화손상을 받을 우려가 있는데, 그 중 하나가 배관 내부를 흐르는 유체에 의한 침식과 부식에 의해 발생하는 감육결함(wall thinning defect)이다. 이러한 감육결함으로 인한 국부적인 응력 집중으로 배관이 파손되는 사례가 발생하기도 하는데 국외적으로는 미국 Surry 원전의 배관 파단사고가 있었고 국내에서도 1998년 고리 2호기, 1999년 고리 3, 4호기 외에 영광 1, 2호기 등 국내 원전의 전반에 걸쳐서 배관 감육손상이 발생되고 있는 실정이다.[1]

원전 배관 감육결함에 대한 연구는 1990년대 이후 활발하게 진행되고 있으며, 1990년대 중반이후 레이저를 이용한 광학적 비파괴검사법에 대한 연구가 활발하게 진행되어, 현재는 원자력 분야를 포함한 가전, 자동차, 항공 분야 등에서 폭넓게 사용되고 있다.[2-4] 광학적인 방법으로는 HI (Holographic Interferometry)와 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry), Shearography 등이 주로 사용되고 있다. 이 중 Shearography는 ESPI에 비하여 진동이나 외부소음에 강인하며, 간섭계의 구성이 간단하여 산업 현장에 적용성이 높기 때문에 대상체의 변형과 결함을 검출하는데 주로 사용된다.

본 논문에서는 Shearography를 이용한 비파괴적인 방법을 이용하여 탄소강 배관 내부에 존재하는 감육결함의 영향부에 대한 변형률 분포를 측정하여, 감육결함부의 크기를 추정할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

2. 전단간섭법의 원리

Fig.1은 전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도로서, 전단간섭계에서는 레이저 빛이 확산되어 대상물에 조사된다. 이때 난반사된 빛이 광 분할기(Beam Splitter : B.S)에 의해 두 개의 빛으로 나누어진 후, 하나는 Mirror 1에 입사/반사되어 상면에 맺히고, 다른 하나는 Mirror 2에서 반사되어 다시 광 분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때, Mirror 2에 임의의 기울기를 주면 기울어진 거울에서 반사된 파면은 Mirror 1에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단(Shearing)되어 CCD의 상면에 맺히게 된다.

이와 같이 변형 전 물체의 정보를 가진 스펙클 패턴과 물체에 변형을 준 후 위에서의와 같은 방식으로 저장한 스펙클 패턴을 전자적으로 빼주게 되면 간섭줄무늬를 형성하게 된다. 변형전후 감산처리로 발생하는 간섭줄무늬는 대상물 표면에 발생한 면외 변형의 구배의 결과를 표현하게 된다.

Mirror 2를 전단거울이라고 부르며, Mirror 2가 기울어진 방향을 전단방향, 기울어진 각도를 전단량이라고 하고 S로 표현한다. 전단방향과 전단량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정된다. 전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭줄무늬를 해석하는 방법은 식 (1)에 표현한 것과 같다. 여기서, d 와 d' 은 임의의 점 P 에 조사된 두 점의 각각의 변형이다.[5]

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_s) \cdot (d - d') \quad (1)$$

레이저 빛이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 일치하면 식 (1)을 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2)$$

Δd 는 테일러급수에 의해 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며, x 방향의 변형, Δx 는 상면에서 전단량 S와 같고, 이 값은 매우 작기 때문에 식 (3)에서 2차 이상의 고차항은 무시할 수 있으므로, 식 (2)는 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

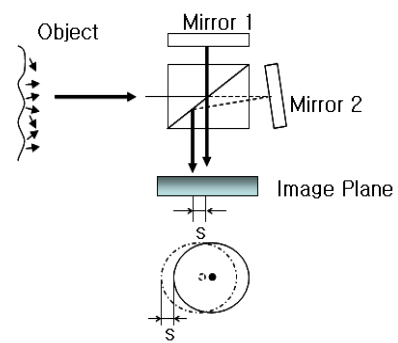


Fig. 1 Shearography interferometry

$$\Delta d = \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{1!} + \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots \quad (3)$$

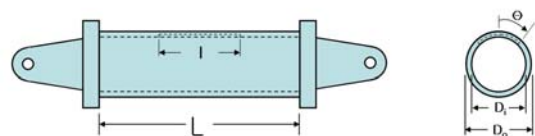
$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial d}{\partial x} \right) \quad (4)$$

3. 시험장치 및 시험편

본 연구에서는 독일 Ettemeyer사의 Shearography 상용 시스템을 이용하였으며, 최대출력이 2W, 파장이 532nm인 Nd:YAG 레이저를 광원으로 사용하였다.

Fig. 2에는 본 연구에서 사용한 시험편의 형상 및 치수를 나타내었다. 시험편의 재질은 ASTM A106 GrB로써 항복강도는 240MPa, 인장강도는 415MPa, 길이방향 연신률은 30%이다. Table 1은 각 조건별 시험편의 종류를 나타낸 것이다.

결함의 유무에 따른 측정결과를 비교하기 위하여 먼저 결함을 가공하지 않은 정상적인 직관의 실험을 수행하였고 이 결과를 기준 자료로 활용하여 실험을 실시하였다. 실험은 직관의 한쪽 끝에 유압펌프와 유압계이저를 각각 연결하고 이들을 이용하여 직관에 일정압력을 가압하면서 압력변화에 따른 직관의 면외 변형의 분포를 측정함으로써 직관 내부의 감육 결함을 검출하도록 하였다. 이때 전단량은 x, y방향으로 각각 10 pixel로 하였다.



*직관의 길이(L)=342.00mm
*외경(Do)=113.40mm *내경(Di)=99.00mm

Fig. 2 Shape and dimension of pipe specimen

Table.1 Type of Specimens

1. Specimen with no defect

ID No.	결함 길이 l (mm)	결함 폭 (2θ)	최소 두께 tp (mm)
SSP-0A	0.00	0°	7.2

2. Defect width related type

ID No.	결함 길이 l (mm)	결함 폭 (2θ)	최소 두께 tp (mm)
SSP-2D	113.40	45°	1.8
SSP-2H	113.40	90°	1.8
SSP-2L	113.40	135°	1.8
SSP-2P	113.40	180°	1.8

3. Defect length related type

ID No.	결함 길이 l (mm)	결함 폭 (2θ)	최소 두께 tp (mm)
SSP-1H	56.70	90°	1.8
SSP-2H	113.40	90°	1.8
SSP-3H	170.10	90°	1.8
SSP-4H	226.80	90°	1.8

4. 실험결과

먼저 무결함 직관 시험편에 대한 실험을 수행하여 기준 데이터를 획득하였다. 그 결과 축 방향 측정실험에서는 압력의 요동으로 인한 아주 미세한 떨림만 발생하였고, 원주방향으로는 직관의 내부압력이 증가함에 따라 관의 직경이 늘어남을 알 수 있었다. 이러한 실험결과를 기준으로 하여 결함 폭별 시험편과 결함 길이별 시험편의 측정결과를 각각 비교하였다. Fig 3은 무결함 시험편과 결함 폭별 시험편들에 대한 변형분포 측정결과를 비교하여 나타낸 것이다.

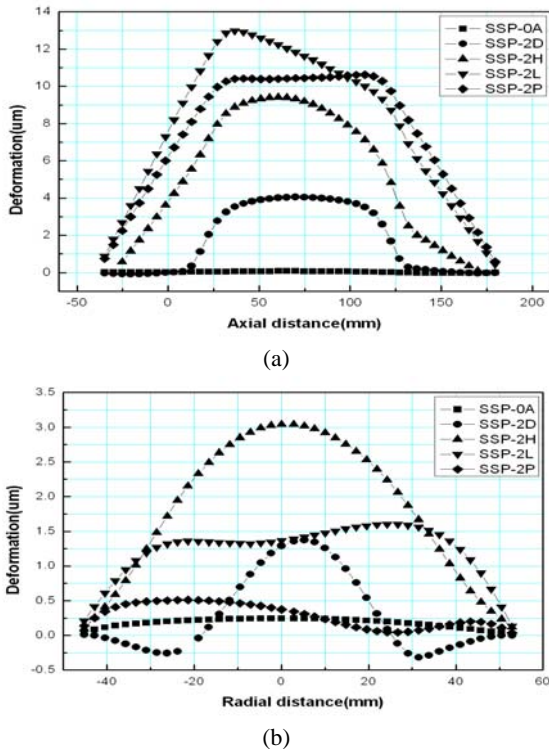


Fig. 3 Deformation results according to the defect width (a)Axial deformation and (b)Radial deformation on the center profile line in each direction

비교 결과 결함 폭이 좁을수록 결함부에 집중적으로 변형이 발생하며 결함 폭이 넓어질수록 일반평관의 변형과 같은 형태의 변형이 발생한다는 것을 알 수 있다. 축 방향 결함길이는 폭의 변화와 무관하게 100mm정도로 일정하게 측정됨을 알 수 있다. Fig 4는 무결함시험편과 결함길이별 시험편들의 변형분포 측정실험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 실험결과 시험편의 내부 결함길이를 정확하게 측정할 수 있음이 확인되었고, 원주방향의 결함크기는 결함의 길이에 따라 조금씩 다른 패턴을 보이고 있음을 알 수 있다.

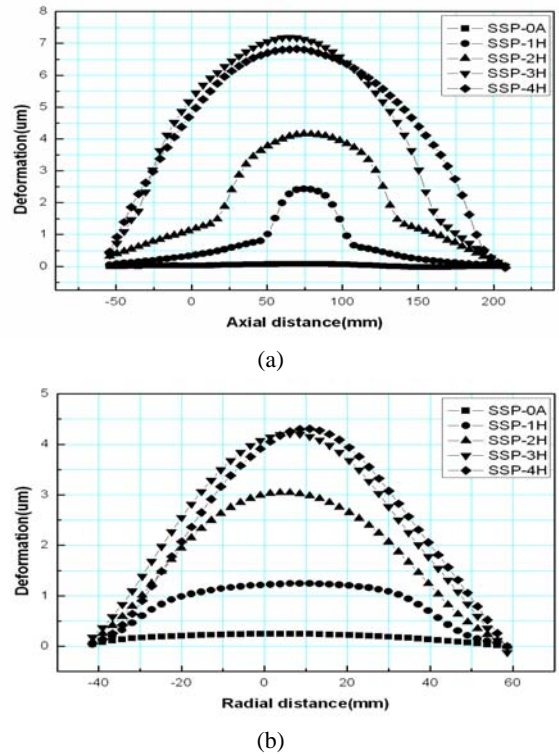


Fig. 4 Deformation results according to the defect size (a)Axial deformation and (b)Radial deformation on the center profile line in each direction

5. 결론

본 논문에서는 Shearography를 이용하여 여러 가지 조건의 내부 감육결함을 갖는 시험편들에 내압을 가하고 그에 따른 변형분포를 측정함으로써 각 시험편들의 내부결함 크기를 예측하였다. 실험결과 결함 폭별 시험편과 결함길이별 시험편들 모두 정확한 결함길이(축방향 결함크기)를 추정할 수 있었다. 또한 결함 폭별 시험편의 실험결과를 통해 결함 폭의 크기에 따라 변형분포형태가 변화하는 것을 가시적으로 확인할 수 있었으며, 결함길이별 시험편들의 실험결과를 통하여 결함 폭(원주방향 결함크기)의 변화 없이 결함길이(축방향 결함크기)만 변화하였음에도 불구하고 원주방향의 변형분포형태가 서로 조금씩 상이하게 나타난다는 것을 알 수 있었다. 따라서 향후 추가 실험을 통해 직관의 형상과 결함의 형태, 내부 압력차에 따라 변형패턴이 어떠한 상관관계를 갖는지에 대하여 명확히 연구할 필요가 있을 것으로 사료된다.

후기

이 논문은 과학기술부 지원으로 수행하는 원자력연구개발사업으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim,J.H, "Characteristic of Strength in the High Vessel pipe with Local Wall Thinning", Master Thesis, 2003.
2. Ahn, S. H., Nam, K. W., Kim, S. J., Kim, J. H., Kim, H. S. and Park, I. D., Trans. of the Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 16, No. 5, pp. 66-72.2002.
3. Shim, D. J., Lim, H., Choi, J. B., Kim, Y. J., Kim, J. W. and Park, C. Y., Trans. of the KSME A, Vol. 27, No. 5, pp. 742-749.2003.
4. Kang, S. H, "Nondestructive Evaluation of Wall-thinning in Piping System Using Laser-generated Ultrasound," Master Thesis,2005.
5. K. Creath : "Temporal Phase Measurement Method, in Interferogram Analysis, Digital Fringe Pattern Measurement Techniques", ed. Robinson, W. David and Reid, T. Graeme, London IOP Publishing, , 94~140,1993.