

# Digital Shearography 에서 Unwrapping 이미지와 FEM 을 이용한 압력용기의 내부결함 측정

## Measurement of Internal Defects of Pressure Vessels using Unwrapping images in Digital Shearography

김성종<sup>1</sup>, 강영준<sup>2,✉</sup>, 성연학<sup>1</sup>, 안용진<sup>1</sup>

Seong Jong Kim<sup>1</sup>, Young June Kang<sup>2,✉</sup>, Yeon Hak Sung<sup>1</sup> and Yong Jin Ahn<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 전북대학교 대학원 기계설계학과 (Department of Mechanical Design, Graduate school of chonbuk Univ.)

<sup>2</sup> 전북대학교 기계설계공학부 (Department of Mechanical Design Engineering, Chonbuk Univ.)

✉ Corresponding author: yjkang@chonbuk.ac.kr, Tel: 063-270-0453

Manuscript received: 2011.7.26 / Accepted: 2011.9.16

*Pressure vessels in vehicle industries, power plants, and chemical industries are often affected by flaw and defect generated inside the pressure vessels due to production processes or being used. It is very important to detect such internal defects of pressure vessel because they sometimes bring out serious problems. In this paper, an optical defect detection method using digital shearography is used. This method has advantages that the inspection can be performed at a real time measurement and is less sensitive to environmental noise. Shearography is a laser-based technique for full-field, non-contacting measurement of surface deformation (displacement or strain). The ultimate goal of this paper is to detect flaws in pressure vessels and to measure the lengths of the flaws by using unwrapping, phase images which are only obtained by Phase map. Through this method, we could decrease post-processing (next processing). Real length of a pixel can be calculated by comparing minimum and maximum unwrapping images with shearing angle. Through measuring several specimen defects which have different lengths and depths of defect, it can be possible to interpret quantitatively by calculating gray level.*

Key Words: Shearography (전단간섭법), Unwrapping (결렬침), Pressure Vessel (압력용기), Defect (결함), Measurement (측정), Nondestructive Inspection (비파괴 검사)

### 1. 서론

급속한 산업발달과 더불어 산업발달의 기반이 되는 에너지에 대한 수요가 급격히 증가함에 따라서 안정적인 에너지 공급은 이제 필수 불가결한 사항이 되어가고 있다. 이러한 요구에 부응해 발전소, 자동차 천연가스 용기, 에너지의 공급의 대부분을 담당하는 화력발전소나 원자력 발전소에는 많은 배관부재가 사용되고 있다. 이러한 곳에서

보다 안정적이고 지속적으로 에너지를 공급하기 위해서는 이러한 발전소의 유지 보수 체계를 보다 확실히 정립하고 발전소 설비에 대한 검사를 보다 정확하게 수행할 수 있는 방법이 요구된다.<sup>1</sup>

전자 전단간섭법(digital shearography)을 이용한 광학적인 결함 검출 방법을 도입할 경우에는, 광원으로 사용되는 레이저 빔이 확산, 조사되는 넓은 범위에 걸쳐 원거리에서 검사가 가능하고, 전단 간섭법의 특성상 변위의 미분 값인 변위 구배

(displacement derivatives)를 직접 측정하기 때문에 결함뿐만 아니라 부재에 가해지고 있는 고응력의 영역을 쉽게 판단할 수 있도록 하여, 보다 빠르고 효율적으로 검사를 수행할 수 있게 된다.<sup>2,3</sup>

이 방법은 이전에 시도되었던 홀로그래픽 검사 방법에 비해서 환경적 외란에 상당히 둔감하고, 광학계의 구성이 매우 간단하기 때문에 실제 산업 현장에 적용 가능성이 대단히 높은 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 압력용기에 대하여 정량적인 결함 길이 검출을 위해서 시편을 방전가공으로 내부에 다양한 길이와 깊이를 가진 결함을 생성시킨 압력용기를 제작하였고, 전단간섭법을 이용하여 검사 도중에 가해지는 압력에 의하여 위상맵이 형성되도록 하였다. 최종적으로 본 실험을 통해서 압력용기의 내부에 존재하는 결함을 위상맵을 통해서 얻어지는 결편침 이미지만을 이용하여 Pixel 단위 계산법을 수행하여 결함 측정을 목표로 하였다. 이 방법을 사용함으로써 이미지 후처리 과정을 줄임으로 측정 효율성을 높이고자 했다.

물체와 시편의 길이에 해당하는 초점거리에 따라 1pixel 에 해당하는 실제 길이가 달라진다. 이에 일반적으로는 기준 영상 (실제 길이 값을 알고 있는 물체 포함)을 저장하여 1pixel 당 실제 길이를 계산한다. 하지만 본 논문에서는 결편침 이미지에서 최대 최소점에 해당하는 gray level 값의 좌표를 읽어서 전단량과 비교하는 방법으로 1pixel 당 실제 길이를 계산하였다. 이 방법을 적용하면 기준 영상 없이 실제 결함 길이 계산이 가능하기 때문에 보다 향상된 방법이라 하겠다.

결편침 이미지에 나타난 결함은 조건(압력, 결함크기)에 따라 gray level 값이 달라진다. 이에 일정한 조건 하에서 일정한 gray level 값을 읽어서 실제 결함 길이를 찾았다. 이 방법을 사용하면 line-profile 같은 후처리 과정을 줄일 수 있고 측정 시에 해당 pixel 값을 읽어서 결함을 바로 수치화할 수 있는 장점이 있다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 Shearography 의 원리

Fig. 1 은 홀로그래피와 전단간섭법의 간섭무늬를 비교한 것이다. 그림에서 보이듯이 전단간섭법으로 측정된 간섭무늬는 변위 구배를 나타내기 때

문에 변형을 측정하는 홀로그래피와 같은 동심원이 아닌 나비(butterfly) 무늬로 불리는 특유의 형태가 측정되어진다.

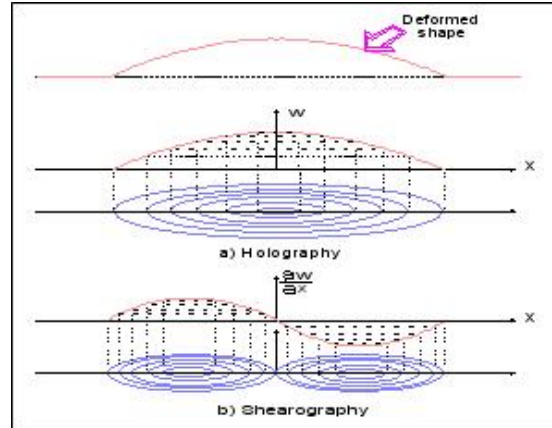


Fig. 1 Holographic & shearographic fringe

Fig. 2 는 레터럴 전자 전단 간섭계의 개략도이다. 레이저에서 나온 빛이 물체면에 조사된 후 반사되어 나와서 광 분할기에서 두 개의 빔으로 나누어진 후 하나는 위에 있는 거울에 반사되어 상면에 맺히고, 나머지 하나는 옆에 있는 거울에서 반사되어 다시 광 분할기로 들어가서 상면에 맺히게 된다. 이때 그림에서 보듯이 옆에 있는 거울을 살짝 회전시켜주면 회전된 거울에서 반사된 파면은 회전하지 않은 거울에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단되어 상면에 맺히게 된다. 이렇게 변형 전 물체의 정보를 가진 스펙클 패턴과 물체에 변형을 준 후 위에서의와 같은 방식으로 저장한 스펙클 패턴을 전자적으로 빼주게 되면 Fig. 1 에서 보이듯이 나비 모양의 간섭무늬가 형성된다.

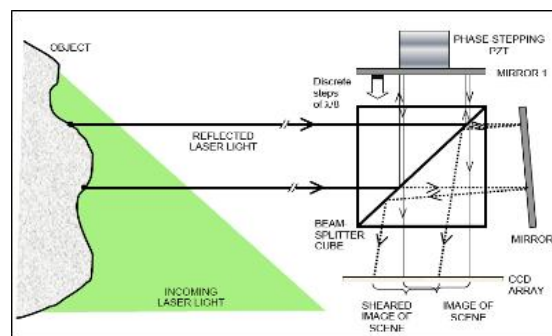


Fig. 2 Schematic diagram for a lateral digital shearography

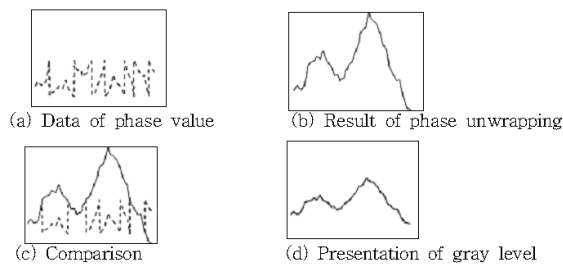


Fig. 3 Sequence of phase unwrapping

### 2.2 Unwrapping(결필침)

위상결필침 기본원리는 데이터 경로를 따라  $2\pi$  단위 내에서 톱니 과를 가지는 위상값  $\phi$ 를 통합시키는 것이다. 각 픽셀에서 위상의 기울기를 계산하는데, 이때 위상차의 절대값이  $2/3\pi$ 와 같은 일정한 한계치를 초과한다면 위상 줄무늬 경계라고 가정한다. 이 위상 도약은 위상차의 부호에 따라서  $2\pi$ 를 가산 또는 감산하여 정확하게 한다. 임의의 점에서 위상을  $\phi + 2\pi N$ 으로 계산하기 위하여 현재 프린지 차수  $N$ 은 저장하여야 한다.

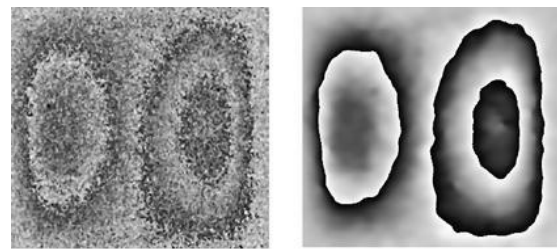
위상이동법을 적용해서 구해진 위상은 Arctangent의 함수로부터 계산되었으므로 0과  $2\pi$  사이의 값만 가지게 되며  $\phi(x, y) = 2N\pi$ 인 점에서 불연속점이 발생한다. 불연속구간을 연속구간으로 변환하여 위상 변화에 따른 변형 정보를 획득하기 위하여 위상값의 차가 임계값 이상일 경우 불연속으로 가정하여 modulo  $2\pi$  계수, 차수를 구하고 연속된 위상으로 변환하는 결필침(Phase Unwrapping) 단계를 거친다. Fig 3은 이러한 결필침 과정을 나타낸다.

### 2.3 일반적인 길이 측정방법

일반적인 길이 측정방법의 과정은 은 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a) Phasemap을 이용하여 Fig. 4(b) Filtering 이미지를 얻고, Fig. 4(c) Unwrapping 과정을 거친 후 Fig.4(d)와 같이 Lineprofile을 작성하게 된다.<sup>4,6</sup>

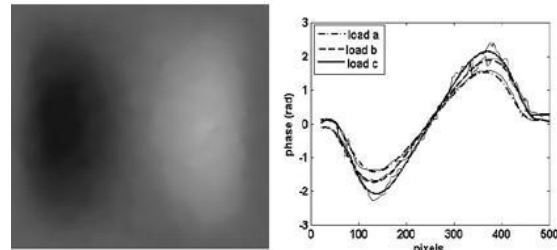
그러나 (a)-(d)는 시편과 CCD와의 초점 거리에 따라 그 크기가 달라지므로 실제 거리 계산을 위한 방법이 필요하다. 그 방법으로 (e)와 같은 실제 길이에 해당되는 픽셀 값을 저장하는 방법 등을 쓴다.<sup>7</sup>

가압력과 같은 변형 여기 방법에 따라 Lineprofile 상의 결함의 기울기가 달라지며 결필침 상의 민감도가 달라진다. 이에 기준이 필요한데



(a) Phasemap

(b) filtering



(c) Unwrapping

(d) Lineprofile

Fig. 4 General images processing

FEM 값과 비교하여 일정 값 이상의 변형여기가 필요함을 증명하고자 했으며 결함깊이와 깊이에 따라 측정 민감도가 달라지는 것을 FEM 값과 비교하여 설명하고 보완하기 위한 방법을 제시했다.

일반적인 방법인 Lineprofile을 이용한 방법은 계측 기준에 따라 기울기가 달라지므로 최대 결함을 측정하기 위해서 다른 방법이 필요하다.

## 3. 실험 및 결과

### 3.1 시편의 제작

시편은 Fig. 5과 같은 형태로 제작되었고 탄소강 재질이며 길이 330 mm, 외경 110 mm, 두께 5 mm이다. 시편내부에는 Table. 1과 같이 깊이별, 길이별 인공적인 결함을 주었다.

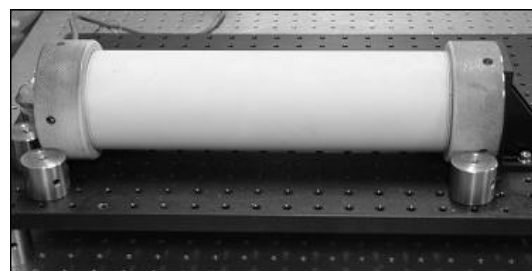


Fig. 5 A specimen

Table 1 Specification of axial defects

Specimen	Length of defect(mm)	Depth of defect(mm)	Width(mm)
1	10	2	1
2	15	2	1
3	20	2	1
4	10	0.5	1
5	10	1	1
6	10	2	1

### 3.2 광학계의 구성

본 연구에서 사용된 광학계의 개략도는 Fig. 6 과 같으며, 광원으로는 532 nm 의 파장을 지니는 COHERENT 사의 DPSS Nd:YAG 레이저가 사용되었다. 레이저에서 나온 빛이 M1 거울과 Expander filter 를 지나 압력용기에 조사된 후 광 분할기에서 두 개의 파로 나누어진다. 다시 전단량을 가해 주기 위해 약간 기울어진 M2 와 M3 로 입사하고 다시 CCD 카메라로 반사된다. CCD 에 들어온 빛의 강도 분포가 CCD 카메라를 통해 화상을 저장하는 프레임 그래버(frame grabber)에 저장된다.

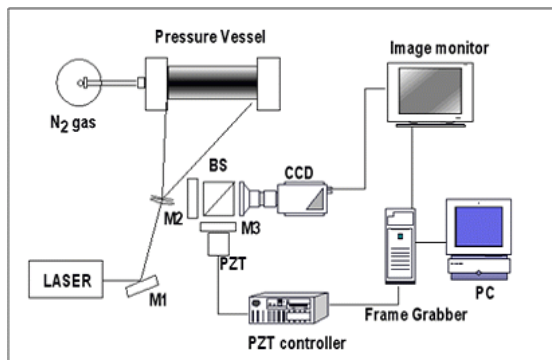
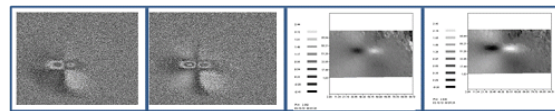


Fig. 6 Schematic diagram of digital shearography

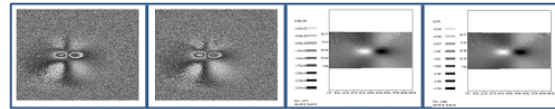
### 3.3 실험 결과

Fig. 7 (a) ~ (c) 는 결함의 길이별 위상도 및 결편침 이미지이고, (좌측부터 각각 가압력이 1.6 MPa, 1.8 MPa) Fig. 8 (a) ~ (c) 는 결함의 깊이별 위상도 및 결편침 이미지다 (좌측부터 각각 가압력이 1.6 MPa, 1.8 MPa).

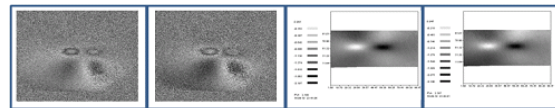
이 검출을 위해 사용된 전단량은 시편결함의 50%로 이 값은 결함 길이 검출을 위해 최적 전단량 결정 실험을 통해 결정된 값이다. 결함 검출 면적은 가로 98.9 mm×세로 92.7 mm 이다.



(a) Specimen No. 1 (defect length 10mm)

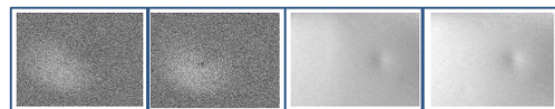


(b) Specimen No. 2 (defect length 15mm)

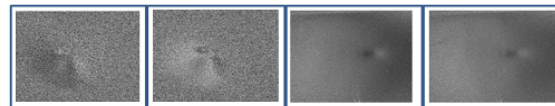


(c) Specimen No. 3 (defect length 20mm)

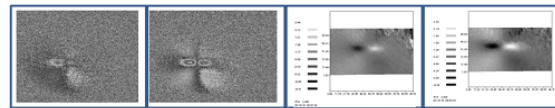
Fig. 7 Phase map and Unwrapping images along defect length



(a) Specimen No. 4 (defect depth 0.5mm)



(b) Specimen No. 5 (defect depth 1mm)



(c) Specimen No. 6 (defect depth 2mm)

Fig. 8 Phase map and Unwrapping images along defect depth

Fig. 7 에서 시편의 결함 길이별로 측정된 데이터를 보면 시편 길이가 감소함에 따라서 전단량의 최대 Gray level 값과 최소 Gray level 값과의 사이가 멀어짐을 확인할 수 있고 위상도와 결편침 이미지가 육안상으로 흐려짐을 볼 수 있었다. 가압력은 Gray level 값이 0-255 까지 잘 표현되는 가압력을 기준으로 1.6 MPa 과 1.8 MPa 으로 가압량을 정했다.

Fig. 8 은 깊이별로 측정된 데이터이다. 5, 6 번 시편의 위상도와 결편침 이미지가 희미한 것을 볼 수 있는데 이는 뒤에서 설명하게 될 변형률(Strain) 값의 변화에 때문이라 생각된다. 깊이별 시편에 대해 가압한 압력도 길이별과 마찬가지로 1.6 MPa 과 1.8 MPa 로 실험에 임했다.

4. 실험결과분석

4.1 결함길이의 계산방법

정확한 결함 길이를 측정하기 위해 본 논문에서 제안하는 결함검출 이미지에서 전단량에 해당하는 픽셀값과 실제 전단량을 비례해서 1pixel 당 실제 길이를 계산하고 결함무늬의 센터(Gray level 의 최대 혹은 최소값이 되는 부분)에서 실제 결함 길이에 해당하는 pixel 만큼 이동해 gray level 값을 읽었다. 그 과정은 다음과 같다.

Gray level 값이 '0' 인 x 좌표값: 348, y 좌표값: 177, gray level 값이 '255' 인 y 좌표값: 280, y 좌표 값: 177. 따라서 348-280=68 pixel.

전단량이 Fig 9 에서 빨간 부분으로 7.5 mm 전단량이므로 1pixel 당 실제 길이는 0.110529 mm 에 해당된다.

2 번 시편의 경우 x 좌표값 348 에서 실제 방전 가공한 길이인 15 mm, 한쪽 결함의 길이가 7.5 mm 에 해당하므로 그에 해당하는 픽셀 수만큼 이동해서 Gray level 값을 읽었다.

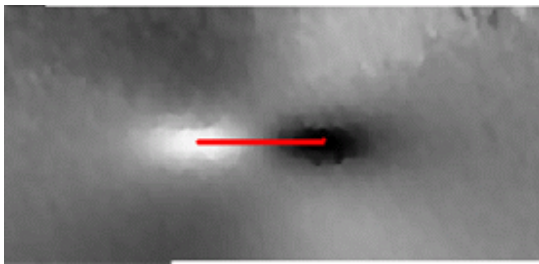


Fig. 9 reference phasemap to calculate defect length

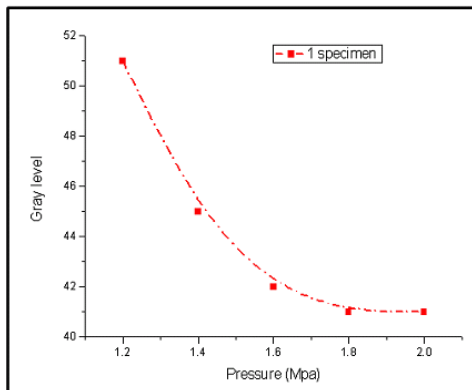


Fig. 10 Gray level change along the pressure change

위의 과정을 압력별로 반복한 결과 Gray level 을 압력별로 정리할 수 있었고 그에 해당하는 그래프가 Fig 10 이다.

Fig. 10 에서 보이듯 압력별로 거의 비슷한 값을 갖지만 점차적으로 Gray level 값이 줄어든다는 것을 볼 수 있다. Gray level 값이 측정이 가능한 압력에서 Gray level 값이 41-51 값은 pixel 로 계산하면 3-4pixel 에 해당하는 값으로 0.331585 mm ~ 0.442116 mm 이다. 0.110531 mm 정도의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 단 1.6 MPa 이상의 압력에서는 거의 일정한 Gray level 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

1 MPa 이하의 압력에서 얻은 결함검출 이미지는 선명하지 못했고 선명함의 기준을 최대 최소가 되는 Gray level 값이 잘 표현되는가(0-255 값)로 결정하였다.

4.2 FEM 해석 결과 값과 비교

Shearography 는 abstract 에서도 설명 되어 있듯이 surface deformation (displacement or strain)을 반영한다. 다시 말해 가압으로 행해진 인위적인 변위에 대해 가압전의 변위와 가압 후의 변위를 표시한다. 결함에 대해서 변위가 결함이 없는 부분에 비교해서 클 때 나비무늬가 형성되는 것이다.<sup>6</sup> 이에 대해 변형량 해석을 FEM 으로 시뮬레이션 해보고 난 후 그 값과 결함검출 이미지의 Gray level 값과 비교하여 상관관계를 찾곤 하였다.

시편은 1/4 모델을 이용하였고 대칭 부분에 Fractionless support, x 축 끝부분에 Fixed 조건을 줬다. Mesh 조건은 결함부분에만 refinement 3 을 적용했다. 첫째로, 가압별로 변형량과 변위 데이터를 구했다.

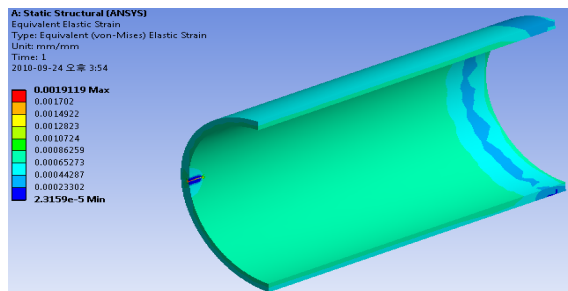


Fig. 11 FEM modeling to analysis

Table 2 Strain and Stress along the pressure changes for specimen No. 2

Pressure (MPa,Max)	Strain (mm, Max)	Stress (MPa, Max)
1.2	0.0013841	29.066
1.4	0.0016148	33.911
1.6	0.0018455	38.755
1.8	0.0020762	43.599

둘째로, 결함 길이 별 데이터인 3 번 시편과 1 번시편에 대한 FEM 해석값을 구했다.

Table 3 Strain and Stress along the pressure changes for specimen No. 1

Pressure (MPa, Max)	Strain (mm, Max)	Stress (MPa, Max)
1.2	0.001596	33.533
1.4	0.001863	39.122
1.6	0.002129	44.711
1.8	0.002395	50.300

Table 4 Strain and Stress along the pressure change for specimen No. 3

Pressure (MPa, Max)	Strain (mm, Max)	Stress (MPa, Max)
1.2	0.001188	24.967
1.4	0.001387	29.129
1.6	0.001585	33.290
1.8	0.001783	37.451

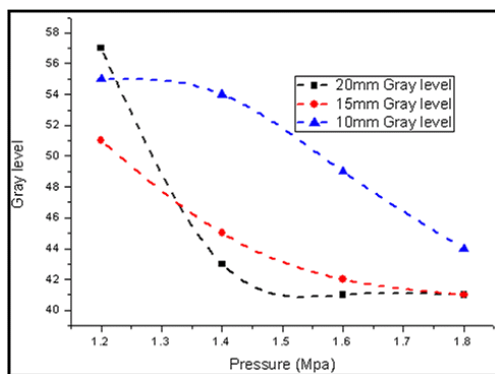


Fig. 12 Strain and Deformation along the pressure change and length change

(2 번 시편(길이 15 mm 깊이 2 mm)에 대한 결과는 Table 2 참조)

위의 Table 2 ~ Table 4 에서도 확인할 수 있듯이 결함길이가 10 mm, 15 mm, 20 mm 로 증가했을 경우 변위값과 변형량값이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

이에 대해, 4.1 절에서 했던 결함 길이를 측정하는 방법에 따라서 Fig. 10 과 같이 그래프를 만들되, 압력은 1.2 MPa 이상의 데이터를 썼고 결함길이 10 mm, 15 mm, 20 mm 의 데이터를 그래프화 했다. 압력을 1.2 MPa 이상의 데이터만 사용한 이유는 255 까지 Gray level 최대값이 잘 표현되는 변형량을 얻기 위해서이고 1.4 MPa 이하에서는 252-249 의 최대값에 대해서도 값을 이용했다.

여기에 대한 Pixel 계산 방법에 의한 Gray level 값은 Fig. 11 과 같다. 전체적으로 압력이 증가할 때 Gray level 값이 감소함을 확인할 수 있었다. 단, 길이별로 조금씩 다른 값을 갖는데 이는 FEM 해석 값에서도 확인할 수 있듯이 변형량이 각각의 길이에 따라 다르기 때문이라 생각된다.

압력이 낮을수록 Gray level 값에서 오차가 컸으며 결함의 길이가 작을수록 또한 오차가 컸다. 이는 FEM 값에서 변형량이 약 50%정도의 압력에 따른 변형량의 차이 때문이라 생각된다.

마찬가지로, 시편의 길이별로 FEM 해석과 Gray level 값을 Table 5 와 같이 작성하였다.

깊이 4(20 mm)번 시편, 5(10 mm), 6(5 mm)번 시편을 사용하였다.(길이 10 mm)

FEM 결과 값을 살펴보면 길이별로 큰 차이를 보임을 확인할 수 있었는데 길이별 변형량을 비교했을 때 내압을 받는 원통 용기일 경우 원주 방향의 응력이 축 방향 응력에 비해 2 배의 응력이 작용하는 원리에 따라 상대적으로 큰 차이를 보임을 알 수 있었다.

Gray level 값은 4 번 시편에 해당하는 결과 값은 위상도 자체가 육안상으로도 매우 희미하고 위상도 이미지 역시 Gray level 값을 Pixel 단위로 계산하는 방법으로는 불가능하며 Gray level 분포 또한 완전치 못한(41-154, 6 번 시편) 현상을 보였기 때문에 픽셀 계산하는 범위에서 제외하였다. 5 번 시편은 Gray level 값의 분포가 54-167 를 보였는데 이는 Pixel 계산이 4 번 시편과 마찬가지로 불가능했다.



Table 5 Strain and Stress along the pressure change (D=depth)

	Pressure (MPa, Max)	Strain (mm, Max)	Stress (MPa,Max)
Specimen No. 6(D0.5mm)	1.6	7.138×10 <sup>-5</sup>	1.4922
Specimen No. 6(D0.5mm)	1.8	8.031×10 <sup>-5</sup>	1.6865
Specimen No. 5(D1mm)	1.6	1.309×10 <sup>-4</sup>	2.7485
Specimen No. 5(D1mm)	1.8	1.472×10 <sup>-4</sup>	3.0921
Specimen No. 4(D2mm)	1.6	2.307×10 <sup>-3</sup>	48.441
Specimen No. 4(D2mm)	1.8	2.595×10 <sup>-3</sup>	54.496

4.3 결함 정량화 결함 검출 한계

본 실험의 결과를 통해 볼 때 결함의 검출은 1~6 번 시편 모두 적용이 가능하나 본 연구에서 제시하는 Gray level 분포를 통해 정량적 결함 검출 조건은 1) 압력은 1.4 MPa ~ 1.6 MPa 이상, 2) 길이는 준비한 시편 모두 가능, 3) 깊이는 두께 기준으로 20%이상이어야 했다.

이를 통해 볼 때 FEM 결과값으로 비교하면, 1.5 MPa 이상의 변형량이 발생해야 정략적 측정이 가능함을 보였다.

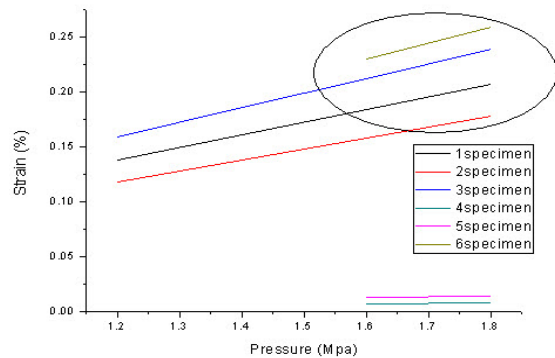


Fig. 13 Limitation of defect detection

5. 결론

본 연구에서는 전자 진단 간섭법을 이용하여 물체에 변형 여기를 시켰을 때 그 변형을 가시화

할 수 있었고, 물체 내부의 결함으로 인한 국부적인 변형의 검출을 통하여 물체 내부의 결함을 가시화하고 정량적인 비교가 가능함을 확인하였다.

정량적인 측정을 위해 기준 픽셀을 따로 정하고 본 논문에서 사용한 진단량 자체를 이용한 방법을 통해 보다 빠르고 정확한 방법을 제시하였다.

전자 진단 간섭법의 민감도에 영향을 줄 수 있는 본 실험에 사용된 1)가압력 2)결함길이 3)결함 깊이에 대한 위상도와 결핍침 이미지의 영향을 볼 수 있었다. 결핍침 이미지의 최대 최소의 Gray level 값을 확인하여 Pixel 별로 계산하여 결함을 정량 측정할 수 있었다.

FEM 으로 실제 모델에 대한 모델링과 해석 값을 통하여 변형율에 따라서 결과 값의 민감도가 달라지는 것을 확인 할 수 있었고 본 시스템을 통하여 결함 검출한계가 정해지는 이유를 설명할 수 있었다.

최적의 변형여기 조건과 정량측정을 위한 조건은 Gray level 값의 분포가 0-255 까지 잘되는 결핍 침 이미지에서 얻을 수 있었고 일정 Gray level 값이 변형에 따라 변하지 않는 조건에서 측정해야 함을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 내부에 존재하는 결함에 대해 측정 시간을 향상할 수 있음을 보였다. 실험은 단순한 형태의 인공 결함에 대해 수행되었지만 이후 복잡, 다양한 형태의 결함에 대하여 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Nichols, R. W., "In-service inspection as an aid to steel pressure vessel reliability?" Conference on Reactor Inspection, pp. 24-37, 1975.
2. Hung, Y. Y., "Shearography: A Practical Nondestructive Testing Method, Edited by McGonnagle, W. J., International Advances in Nondestructive Testing, Vol. 14," pp. 95-124, 1989.
3. Andreas, E., "Nondestructive Inspection with Shearography," Proc. SPIE, Vol. 2248, pp. 222-228, 1994.
4. Kim, K. S., Jung, H. C., Chang, H. S., Kim, H. S. and La, S. W., "Defect Detection of Wall Thinned Straight Pipe using Shearography and Lock-in Infrared Thermography," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26 No. 11, pp. 55-61,

- 2009.
5. Chang, H. S., Jung, S. W., Kim, K. S. and Jung, H. C., "Quantitative Measurement of Out-of-plane Deformation Using Shearography," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 131-137, 2007.
  6. Dávila, A., Kaufmann, G. H. and Pérez-López, C., "Transient deformation analysis using a carrier method of pulsed electronic speckle-shearing pattern interferometry," Appl. Opt., Vol. 37, No. 19, pp. 4116-4122, 1998.
  7. Steinchen, W., Kupfer, G. and Yang, L., "Nondestructive testing of micro-cracks using digital Speckle pattern shearing interferometry," Proc. SPIE, Vol. 3098, pp. 528-535, 1997.
  8. Steinchen, W., Yang, L. X., Schuth, M. and Kupfer, G., "Electronic Shearography(ESPI) for direct Measurement of Strains," Proc. SPIE, Vol. 2248, pp. 210-221, 1994.
  9. McGonagle, W. J., "Nondestructive testing 2<sup>nd</sup> Ed.," McGraw-Hill, pp. 92-178, 1961.
  10. Doebelin, E. O., "Measurement systems; application and design, 4th Ed.," McGraw-Hill, pp. 251-253, 2003.
  11. Ennos, A. E., "Speckle Interferometry, Edited by Dainty, J. C., Laser Speckle and Related Phenimena," Springer Germany, pp. 203-207, 1975
  12. Goodman, J. W., "Statistical properties of laser speckle patterns, Edited by Dainty, J. C., Laser Speckle and Related Phenomena," Springer Germany, pp. 9-13, 1975.
  13. Jones, R. and Wykes, C., "Holographic and Speckle Interferometry," Cambridge University Press, pp. 146-148, 1989.
  14. Hung, Y. Y., "Shearography for Non-destructive Evaluation of Composite Structures," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 24, No. 2-3, pp. 161-182, 1996
  15. Hung, Y. Y., "Shearography : A Novel and Practical Approach for Nondestructive Inspection," Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 8, No. 2, pp. 55-67, 1988.
  16. Mader, D. L., "Holographic and nonholographic NDT for nuclear and coal-fired power plants," Proc. SPIE, Vol. 604, pp. 37-56, 1986.
  17. Jones, R. and Wykes, C., "Holographic and Speckle Interferometry: A discussion of the theory, practice and application of the techniques, 2nd Edition," Cambridge University Press, 1989.
  18. Creath, K., "Temporal Phase Measurement Methodes, in Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques, Ed. Robinson, David W. and Reid, Graeme T.," IOP Publishing, pp. 94-140, 1993.
  19. Mader, D. L., "Holographic and nonholographic NDT for nuclear and coal-fired power plants," Proc. SPIE Vol. 604, pp. 37-56, 1986.