

전자 전단 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 측정에 관한 연구(II) (전자 전단 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 검출 시스템의 오차 분석)

A Study on Measurement of Internal Defects of Pressure Vessel by Digital Shearography(II)

강영준*[†], 박낙규**[†], 유원재**[†], 김동우***[†]

Young-June Kang*[†], Nak-kyu Park**[†], Won-Jae Ryu**[†] and Dong-Woo Kim***[†]

초 록 산업 현장에서 사용되는 배관이나 압력용기의 결함 검출은 시설의 안정적 운용에 기본적이며 중요한 문제이다. 전자 전단 간섭법은 결함 검출에 사용되고 있는 기존의 비 광학적 검사방법에 대한 여러 가지 장점들 뿐 만 아니라 전자 전단 간섭법 외의 다른 광학적 방법보다 외란에 둔감하여 산업 현장 적용성이 비교적 높다는 장점을 가지고 있다. 이에 본 논문의 전편 “전자 전단 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 측정에 관한 연구(I)”에서는 압력 용기에 내부에 존재하는 결함을 검출하는 데 전자 전단 간섭법을 적용하여 보았으며 결함부의 변형률을 3차원으로 가시화하였다. 이에 더하여 본 논문에서는 전편에서 구성한 광학계를 바탕으로 결함의 길이를 구하고 결함의 조건과 가압력 등의 변화를 주어 시스템의 오차를 분석하고 그 측정한계를 규정하기 위한 실험을 수행하였다.

주요용어: 배관, 내부결함, 전단 간섭법, 압력용기, 광학적 방법, 오차분석

Abstract Recently the necessity of study on optical measuring method using laser to detect the pipeline's defect in nuclear facilities, chemical industries and power plants has been increased. Because laser light can be delivered to a remote area without any difficulties, the application of laser in many industries can solve several difficulties from the limitation of access in danger area and reduce the risks of workers. Therefore, we applied a new experimental technique to the measurement of internal defects in pressure vessels with the combination of shearography and image processing technique and detected the internal cracks of pressure vessels in the former paper. In this paper, we used the same optical system as in the former study and found the optimum shearing magnitude by comparing the real length of specimen with experimental results. A variety of conditions were applied to certify the validity of this method. Actually, several specimens which have different lengths and depths were used in this experiment under the three diverse pressure. Consequently, we have carried out this experiment to determine the limit of measurement ability with analyzing errors.

Keywords: pipeline, internal defect, shearography, pressure vessel, optical method, error analysis

1. 서 론

배관이나 압력 용기가 사용되고 있는 시설에서 이러한

부재들의 결함을 빠른 시간에 검출하여 보수하고 시설의 안정적인 상태를 유지하는 것은 중요한 일이다. 이에 파이프의 내부결함을 검출하고 검사할 수 있는 보다 정확하고

신속한 유지보수의 방법이 날로 커져 가는 추세에서[1] 레이저를 이용한 광학적 비파괴 방법은 결함 검출에 사용되는 기존의 방법[2-4]보다 우수한 검사법에 대한 필요성에 부응할 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 전자 스펙클 간섭법(ESPI)은 그 좋은 예라 할 수 있는데 결함검출에 사용될 수 있는 방법은 in-plane ESPI(electro speckle pattern interferometry), out-of-plane ESPI, 전자 전단 간섭법 등이 있다. 본 논문에서 사용한 전자 전단 간섭법은 기존의 비 광학적 방법의 단점 뿐만 아니라 이외의 광학적 방법, 즉 in-plane ESPI나 out-of-plane ESPI에서 나타나는 외란에 민감하다는 불안정성의 단점을 극복할 수 있는 방법이므로 이를 적용하여 압력용기의 내부결함에 검출 및 분석을 하여보고자 한다[5-8].

본 연구는 두 편의 논문으로 구성되어 있다. 첫 번째 논문에서는 압력용기의 내부결함을 검출하기 위해서 전자 전단 간섭계를 구성하고 그 검출 성능을 검증하였고, 두 번째 논문인 본 논문은 (I)편의 논문에서 구성한 전자 전단 간섭계의 오차 해석과 그 측정한계 등을 알아보는데 목적을 둔 실험을 수행하였다. 이를 위해서 방전가공을 통해서 길이와 깊이가 서로 다른 축 방향의 결함과 원주 방향의 결함을 압력용기의 내부에 인위적으로 만들어 주었고, 압력용기에 변형을 여기 시키기 위해서 압력용기 내부에 질소가스를 주입함으로써 가압하여 실험을 수행하였다. 결함의 정량적 측정을 위해 라인 프로파일을 이용한 수동 측정 방법과 프로그램을 이용하여 자동으로 측정하는 방법을 사용하여 두 방법의 오차를 비교하였으며 또한 유한요소해석을 통하여 결함길이 측정 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 실험 방법 및 결과

2.1. 결함의 검출

실험에서 사용된 압력용기는 (I)편의 논문에서와 마찬가지로 ASME code section XI에 나와 있는 압력용기에 대한 규정에 따른 결함을 가진 것으로 이 결함의 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

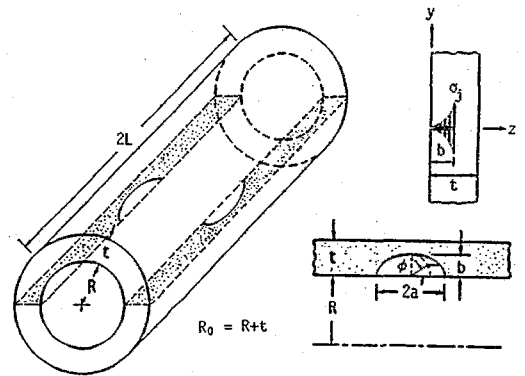


Fig. 1 Internal crack (Raju & Newman)

Fig. 2는 압력 용기의 구속 형태와 형상을 보여주는 그림으로 양끝의 덮개 부분을 앞과 뒤, 그리고 옆에서 구속하여 주었다. 압력용기의 변형을 여기 시키는 방법은 질소가스를 사용하여 압력용기 내부에 압력을 가하는 방법을 사용하였다. 여기서 가압을 해준 압력은 응력확대계수를 구하는 Raju와 Newman의 계산식인 식 (1)을 이용

Table 2 Specification of specimen and flaw(Raju & Newman)

Type of loading	b/a	0.2			0.4			1.0		
		$\frac{2\phi}{\pi}$	$\frac{b}{t}$	$\frac{a}{t}$	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
Uniform (G_0)	0	0.607	0.791	1.179	0.777	0.936	1.219	1.140	1.219	1.348
	0.25	0.740	0.932	1.284	0.810	0.948	1.164	1.068	1.126	1.200
	0.5	0.945	1.188	1.568	0.940	1.076	1.243	1.033	1.074	1.091
	0.75	1.073	1.366	1.798	1.038	1.180	1.357	1.019	1.055	1.090
	1.0	1.115	1.427	1.872	1.072	1.217	1.393	1.015	1.050	1.090
Linear (G_1)	0	0.079	0.138	0.253	0.125	0.176	0.259	0.197	0.221	0.255
	0.25	0.206	0.268	0.374	0.246	0.291	0.356	0.359	0.377	0.397
	0.5	0.422	0.503	0.619	0.442	0.487	0.538	0.541	0.554	0.555
	0.75	0.603	0.705	0.859	0.608	0.657	0.727	0.669	0.683	0.703
	1.0	0.673	0.783	0.960	0.672	0.723	0.806	0.715	0.729	0.760
Quadratic (G_2)	0	0.023	0.052	0.104	0.043	0.069	0.106	0.074	0.085	0.099
	0.25	0.075	0.105	0.154	0.097	0.119	0.149	0.153	0.162	0.170
	0.5	0.237	0.277	0.331	0.256	0.279	0.302	0.333	0.339	0.337
	0.75	0.429	0.480	0.560	0.441	0.466	0.505	0.514	0.520	0.533
	1.0	0.514	0.571	0.671	0.523	0.549	0.601	0.588	0.596	0.618
Cubic (G_3)	0	0.010	0.027	0.056	0.021	0.036	0.056	0.038	0.044	0.051
	0.25	0.032	0.049	0.077	0.044	0.058	0.074	0.075	0.080	0.085
	0.5	0.146	0.169	0.199	0.161	0.174	0.187	0.218	0.222	0.219
	0.75	0.332	0.363	0.412	0.346	0.360	0.385	0.417	0.420	0.429
	1.0	0.438	0.462	0.529	0.441	0.456	0.493	0.512	0.515	0.532

하여 압력용기의 결함 진전에 영향을 미치지 않을 만큼의 압력을 가하였다[9].

$$K_I = \frac{pR}{t} \sqrt{\frac{\pi b}{Q}} F_i \left(\frac{b}{a}, \frac{b}{t}, \frac{t}{R}, \phi \right) \quad (1)$$

여기서 p 는 내부압력이고 pR/t 는 평균 원주 응력 (average hoop stress)이다. 그리고 $F_i = \frac{t}{R} \left(\frac{R_0^2}{R_0^2 - R^2} \right)$

$[2G_0 - 2\left(\frac{b}{R}\right)G_1 + 3\left(\frac{b}{R}\right)^2G_2 - 4\left(\frac{b}{R}\right)^3G_3]$ 로 경계보정인자 (boundary-correction-factor), $Q = 1 + 1.164(b/a)^{1.65}$ 이며 a, b, t, R 은 각각 결함길이의 1/2, 결함의 깊이, 시편의 두께, 압력용기의 내경을 나타내고 있다(Fig. 1참조)[9].

Fig. 4는 본 실험을 위해 구성된 래터럴 전자 전단 간섭계로 (I)편의 논문에서 사용한 측정 시스템과 동일하게 구성되어 있고 작동 원리 또한 동일하다.

그리고, 실험에 수행하는데 적절한 전단량과 가압량을 여러 번의 실험을 통해서 시편의 모든 결함을 검출할 수 있는 최적값으로 결정하였다.

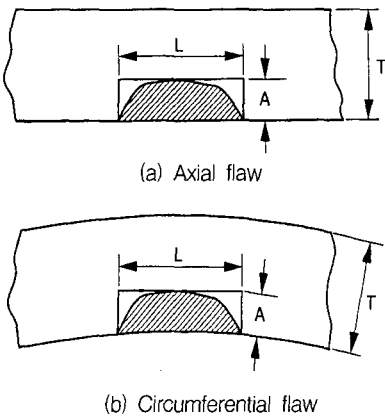


Fig. 2 Flaw of pressure vessel

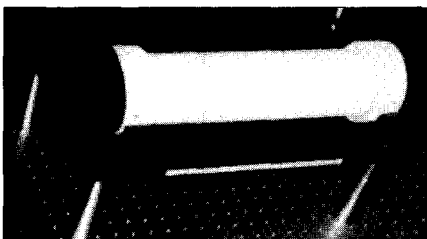


Fig. 3 The photograph of specimen (length×dia. : 33cm×10cm)

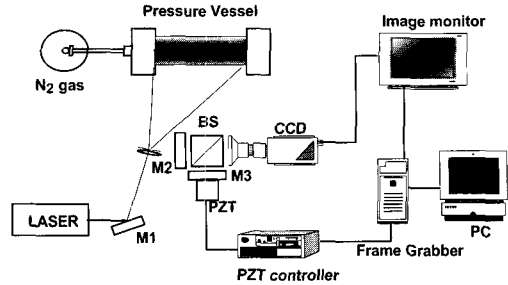
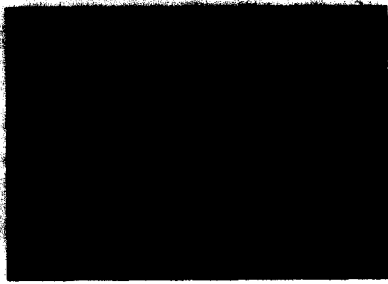
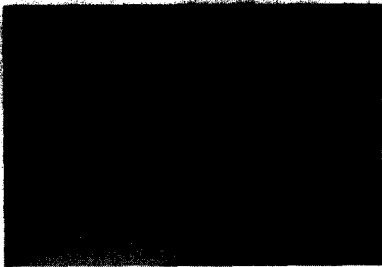


Fig. 4 Schematic diagram of lateral digital shearography

Fig. 5는 결함 길이가 25mm이고 깊이가 2mm(40%)인 경우의 실험 결과와 FEM에 의한 해석 결과를 나타내고 있다. 원주 방향의 결함의 경우 주변부에 대한 영향이 적은데도 불구하고 간섭무늬가 선명하고 크게 나타나는 이유는 전단 간섭계의 특성상 축 방향으로 전단량(10mm)만큼 떨어져 있는 두 점의 변형량의 차이를 위상정보로 표현하는데, 축 방향의 결함의 경우 인접한 두 점이 같은 결함 상에 존재하기 때문에 실제 변형 보다 변위구배가 적게 나타나는데 비해 원주 방향의 경우는 결함이 원주 방향으로 존재하기 때문에 전단량 만큼 떨어져 있는 두 점이 극단적인 경우 하나는 결함부에 존재하고 나머지는 결함이 없는 주변부에 존재하기도 한다. 이 경우에는 비록 원주 방향 결함에 의한 변형이 작더라도 두 점의 변형량의 차이는 상당히 크게 된다. 따라서 변형량의 차이를 간섭무늬로 나타내는 전단 간섭계에서는 간섭무늬가 선명하고 크게 나타난다고 추정할 수 있다. Fig. 5의 우측의 유한요소 해석 결과는 길이 33cm, 외경 10cm, 두께 0.5cm의 탄소강 압력용기에 20kgf/cm²의 내압을 가했을 때를 모델링하여 얻은 것이며 이는 같은 조건의 실험에 의해 구해진 좌측에 나타난 실험결과가 대체적으로 일치하고 있음을 확인할 수 있고 결함의 방향에 따라 나타나는 간섭무늬의 형태가 달라짐을 확인할 수 있다. 결함의 길이가 감소하면 간섭무늬의 크기도 비례하여 감소함을 실험과 유한요소해석을 통해 확인할 수 있었다. 또한 유한요소 해석 결과를 비교해 보면 같은 압력을 압력용기의 내부에 가해주었을 때 결함 부위에서의 압력용기의 변형의 정도가 축 방향의 결함이 원주방향의 결함에 비해 상대적으로 크다는 것을 알 수 있고, 이 결과를 통해서 압력용기의 안정성은 축 방향 결함에 의해 크게 영향을 받을 것이라고 예상할 수 있다.



Experimental result



FEM result

(a) Axial defect(length × depth : 25mm × 2mm)



Experimental result



FEM result

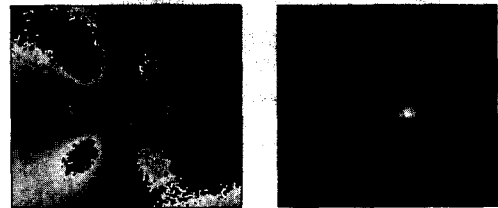
(b) Circumferential defect(length × depth: 25mm × 2mm)

Fig. 5 Experimental results

2.2. 최적 전단량의 결정

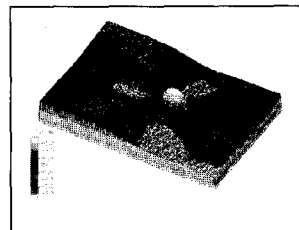
전단 간섭계에서는 측정 감도도 우수하고 오차도 작은 적절한 전단량의 결정이 결함 검출 및 길이 측정을 위해 필수 불가결한 사항이라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 결함의 양 끝단에서는 가장 큰 용력이 작용하고, 따라서 변형률의 값이 최대(최소)의 값을 가진다는 이론적 배경을 바탕으로 결함길이 측정을 수행하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 길이 25mm Flaw depth 40%의 축 방향과 원주 방향의 결함에 대한 변형률을 3차원 이미지로 나타내는 과정을 보여주고 있는데 (a)의 위상도를 demodulation하여 위상펼침도(b)를 얻고 이를 각 화소의 밝기 값으로 표현한 것이 3-D plot 이미지(c)가 된다[10-12]. 변위구배를 직접 측정하는 전단 간섭법에서는 측정된 간섭무늬의 위상펼침도(Unwrapping image)에서 라인 프로파일(Line profile)을 추출하여 최대, 최소점 사이의 거리를 측정하여 결함길이 계산을 수행하게 되는데 Fig. 8은 위의 두 점 사이의 거리를 결함의 길이로 볼 수 있다는 사실에 대한 이론적인 뒷받침해주는 유한요소 해석 결과이다.

Fig. 8의 가운데 부분에 조밀하게 메쉬된 부분이 결함이 존재하는 부분으로 간섭무늬의 양쪽 타원의 중심이 조밀한 메쉬의 끝 부분에 정확히 일치함을 볼 수 있다. 이는 조밀하게 메쉬된 부분의 양 끝단 즉, 결함의 양 끝점이 변형률의 절대값이 가장 큰 두 점 즉, 간섭무늬의 양쪽 타원의 중심과 일치하는 것을 보여주고 있다.



(a) phase map

(b) demodulation



(c) 3D plot

Fig. 6 Quantitative visualization of axial internal defect

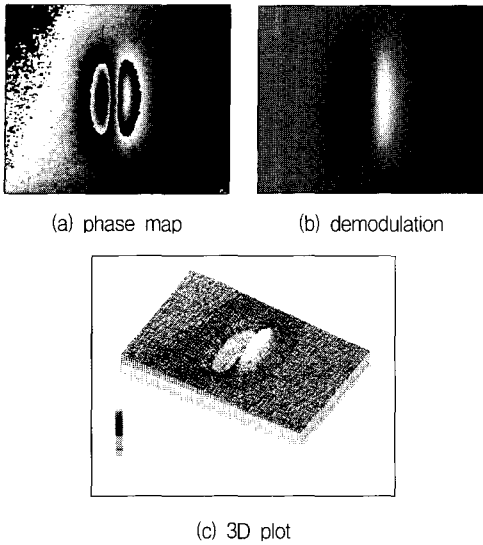


Fig. 7 Quantitative visualization of circumferential internal defect

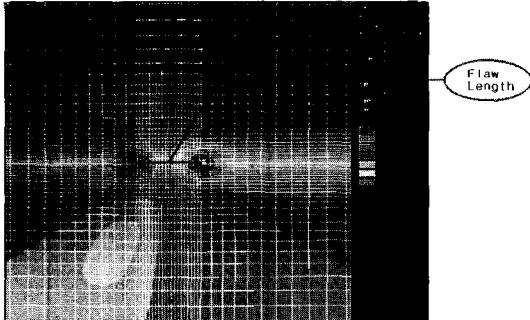


Fig. 8 FEM result that proves the theoretical principles

2.3. 결함 측정 및 오차분석

최적 전단량을 결정하기 위해서 Fig 9에 나타낸 것과 같이 전단량을 변화시켜가면서 하나의 시편(결함길이: 15mm, 결함깊이: 40%)에 대해서 결함길이를 측정하여 실제 길이와 비교하여 오차가 가장 작은 전단량을 최적 전단량으로 결정하는 방법을 사용하였다. 그림에서 보면 10mm일 때 가장 작은 측정 오차를 보이고 이보다 전단량이 감소하거나 증가하는 경우에는 측정 오차가 증가하는 양상을 보이고 있다. 따라서 전단량 10mm를 본 실험을 위한 최적 전단량으로 결정하였다.

결함길이를 측정하기 위해서 본 연구에서는 Fig. 위상평침도에서 라인 프로파일(line profile)을 추출하여 최대, 최소점 사이의 화소수를 수동으로 계산하여 길이를 측정하는 방법과 컴퓨터 프로그램을 이용하여 자동으로 결함 길이를 측정하는 방법을 이용하였다. 전단 간섭계가 변위 구배를 측정하기 때문에 이 위상평침도에서 나비모양 무늬가 존재하는 부위의 강도(위상변화량)를 컴퓨터 프로그램을 이용하여 최대, 최소가 되는 화소(pixel)의 x 좌표를 구해서 그 두 좌표의 차이를 구한 후 이 화소수에 한 화소에 해당하는 실제 거리를 곱하는 방법을 이용하여 길이를 측정하였다.

두 가지 결함측정방법으로 측정한 결함길이의 오차는 실험결과 크게 차이를 보이지 않고 유사함을 확인할 수 있었다. 결함의 길이가 작아질수록 검출 결함 길이의 오차는 증가하여 실제적으로 5mm이하의 길이를 지나는 결함의 경우 정량적인 계측은 어려움을 알 수 있었다. 검사에서 압력용기에 가하는 압력을 1960kPa(20kgf/cm²), 1470kPa(15kgf/cm²), 980kPa(10kgf/cm²), 490kPa(5kgf/cm²)

전단량 변화에 따른 측정오차 분석
(결함길이: 15mm, 결함깊이: 40%)

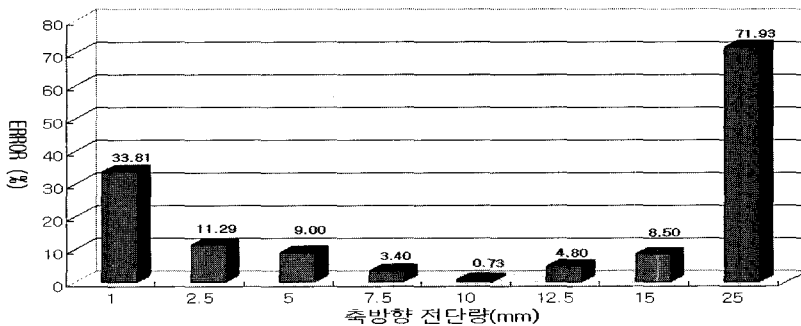


Fig. 9 Error analysis for finding proper shearing magnitude

로 다양하게 해서 각각의 압력으로 측정된 결함길이의 오차를 측정하여 보았다. 측정 결과 압력 변화에 영향을 받지 않고, 약 10%정도 내외의 오차로 결함길이를 측정할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 10은 본 방법의 타당성 여부를 확인하여 보기 위해서 위상평침도에서 추출한 라인 프로파일을 표시하여 본 것으로, 결함길이가 감소함에 따라 라인 프로파일 상의 최대점과 최소점이 점점 서로에게 접근하는 형태로 보여지고 있음을 확인할 수 있다. 결함길이에 따라서 변위 구배의 최대 최소점이 변하기 때문에 이 최대 최소점을 가지고 결함길이를 측정하는 방법이 타당함을 알 수 있다.

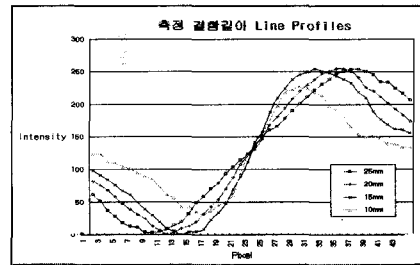
Table 2와 Table 3은 압력이 1960 kPa이고 결함깊이가 2mm로 일정할 때 결함길이에 따른 측정 결과와 그 오차를 두 가지 결함 측정 방법으로 측정하여 비교한 것이고, Fig. 11은 두 방법에 의한 측정 오차를 그래프로 나타낸 것이다. 결과에서 살펴보면 라인 프로파일을 추출해서 직접 최대, 최소점을 실험자가 찾는 방법이 프로그램에 의해서 찾는 방법보다 약간 더 정확한 값을 보임을 알 수 있다. 그러나 이 방법은 프로그램에 의해서 결함길이를 계산하는 방법에 비해서 약간 더 번거로운 것이 사실이다.

Table 2 Measured length by line profile

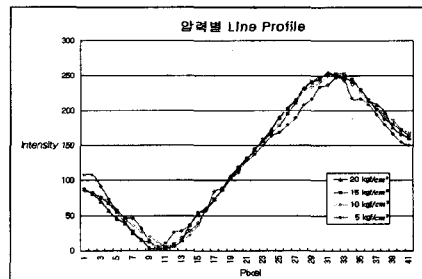
Pressure : 1960kPa (20 kgf/cm ²), Depth of flaw : 2mm				
No. of specimen	Actual Length (mm)	Measured Length (mm)	Error (mm)	Error (%)
1	5	9.470	4.470	89.40
2	10	11.587	1.587	15.87
3	15	14.890	0.110	0.73
4	20	19.398	0.602	3.01
9	25	24.180	0.820	3.28

Table 3 Measured length by program

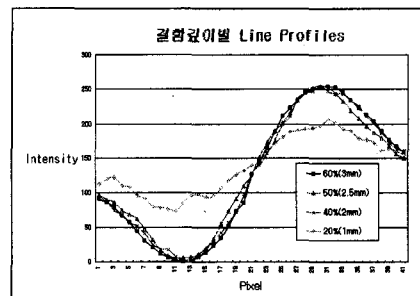
Pressure : 1960kPa(20 kgf/cm ²), Depth of flaw : 2mm				
No. of specimen	Actual Length (mm)	Measured Length (mm)	Error (mm)	Error (%)
1	5	11.033	6.033	120.66
2	10	12.043	2.043	20.43
3	15	15.112	0.112	0.75
4	20	19.303	0.697	3.49
9	25	23.923	1.077	4.31



(a) Flaw length



(b) Internal pressure



(c) Flaw depth

Fig. 10 Line profile comparison

pressure : 20 kg/cm²

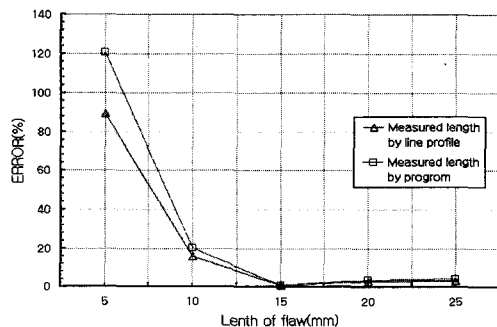
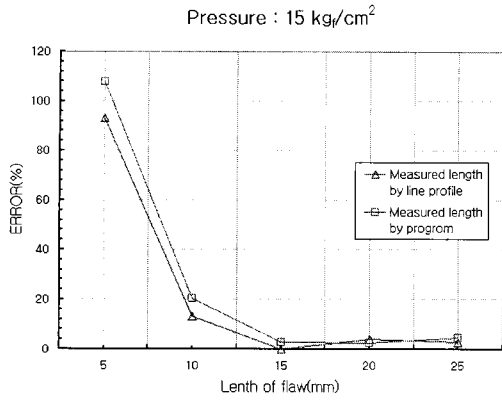
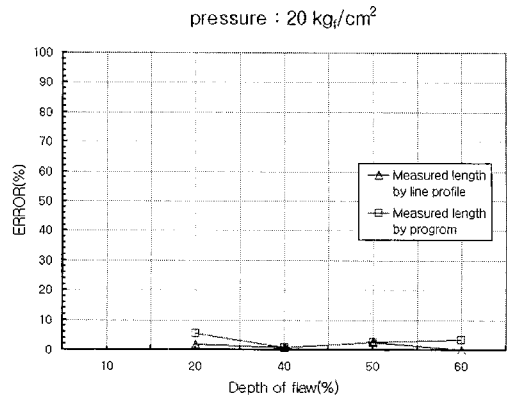


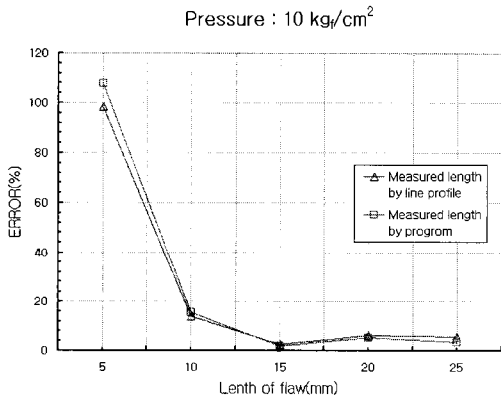
Fig. 11 Error comparison of each method



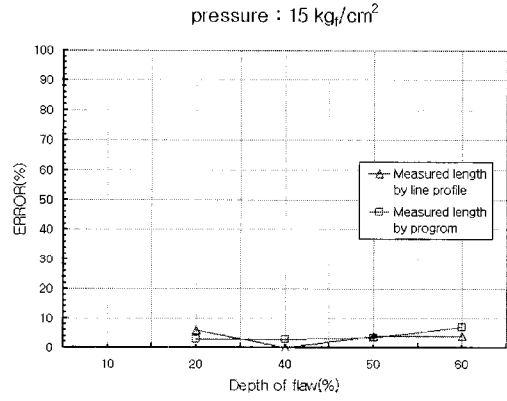
(a) pressure = 1470 kPa(15kgf/cm²)



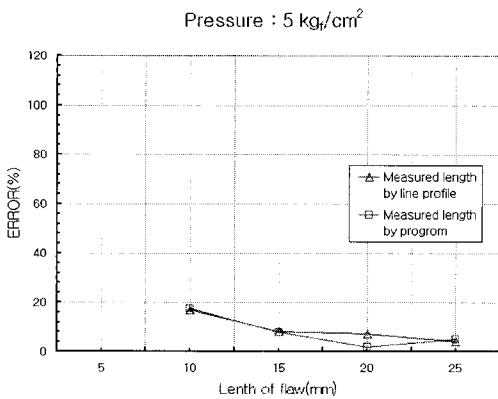
(a) pressure = 1960 kPa(20 kgf/cm²)



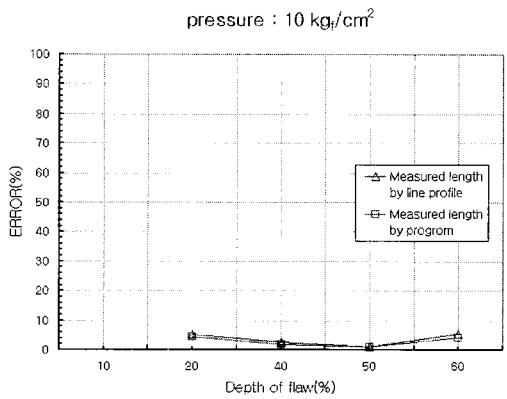
(b) pressure = 980 kPa(10 kgf/cm²)



(b) pressure = 1470 kPa(15 kgf/cm²)



(c) pressure = 490 kPa(5 kgf/cm²)



(c) pressure = 980 kPa(10 kgf/cm²)

Fig. 12 Error comparison of each method according to the flaw length

Fig. 13 Error comparison of each method according to the flaw depth

따라서 비교 결과를 통해서 보면 두 방법이 별로 차이가 나지 않기 때문에 실제 현장에서 사용할 경우는 프로그램을 이용해서 손쉽게 결함길이를 측정하는 것이 더 유용하리라고 생각된다. Fig. 12는 압력과 결함길이의 변화에 따른 측정 결과의 오차를 분석하여 비교한 그래프이고, Fig. 13은 압력과 결함길이의 변화에 따른 측정 결과의 오차를 분석하여 비교한 그래프이다. 여기서도 역시 두 방법에 의한 오차가 거의 비슷한 양으로 나타나고 있다.

2.4. 결함검출 한계

위의 실험 결과와 오차분석 결과를 통해서 본 연구를 위해 구성한 전자 전단 간섭계는 결함길이 5mm가 최소 검출 가능 길이이고 결함 최소 검출 가능 깊이는 대략 10~20% 정도 사이에 존재하고 있다. Fig. 14에 나타난 그래프를 보면 더 확실히 알 수 있다.

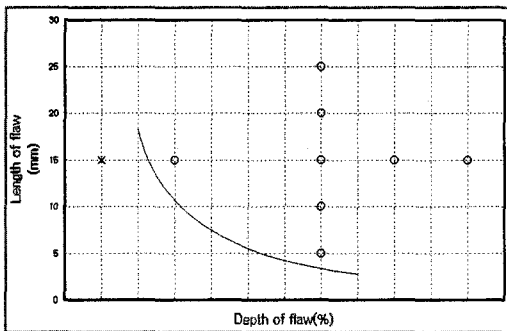


Fig. 14 Limit of flaw detection

3. 결 론

본 연구는 래터럴 전자 전단 간섭계를 이용하여 발전 소나 화학 공장 등에서 보편적으로 사용되는 파이프 배관이나 압력용기의 내부에 부식 등의 효과로 발생하는 결함을 효과적으로 검출하고 결함길이를 정량적으로 측정하는 방법에 대하여 연구를 수행하였다.

3차원 모델링 유한요소해석을 통하여 결함의 양 끝단이 변위구배를 나타내는 나비모양 무늬의 양쪽 중심에 일치함을 확인하였는데, 이를 통해서 광학계를 이용하여 측정한 간섭무늬의 최대, 최소점 사이의 거리를 결함의 길이로 계산하는 결함길이 측정 원리의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 또한 3차원 모델링을 통해서 측 방향 결함이

원주방향의 결함에 비해 상대적으로 큰 변형을 발생시키는 것을 확인할 수 있었다.

전단 간섭계와 컴퓨터를 이용한 디지털 화상처리 시스템을 이용하여 압력용기의 내부에 존재하는 결함에 대해 영역단위 실시간 계측을 수행하였다. 이 실험을 통해서 전형적인 나비모양의 변위구배 간섭무늬를 측정할 수 있었고, 검출된 결함의 정량적인 길이 측정을 위해 위상이 동방향을 이용하여 변위구배의 최대, 최소점 사이의 거리를 측정하는 방법을 이용해서 결함길이 10mm, 가압력 5kgf/cm², 결함깊이 20% 이상일 때는 약 10% 내외의 측정오차 내에서 측정이 가능함을 확인하였다.

결함 길이 검출의 경우 라인 프로파일을 추출하여 최대, 최소의 변위구배점을 찾는 방법과 프로그램을 이용하여 일정 영역에서 최대, 최소의 변위구배점을 찾는 두 가지의 방식으로 결함길이를 측정하여 그 결과를 비교함으로써 두 방법이 큰 차이를 보이지 않음을 확인하였다. 따라서, 프로그램을 이용한 결함검출을 통해 검사자의 주관을 배제하고 객관적으로 결함길이를 측정할 수 있는 방법을 개발하였다.

본 연구는 인위적으로 제작된 결함에 대해서 수행되었다. 따라서, 실제 산업현장에서 발생하는 복잡·다양한 형태의 결함에 대한 결함의 정량적 검출을 위해서는 계속적인 연구가 진행되어야 할 것이다. 그리고, 광학계의 안정성을 보증하기 위하여 광학계의 구성상 내재되는 오차에 대한 이론적 해석과 실험이 병행되어야 할 것이다.

후 기

본 논문은 과학기술부 한국과학재단 지정 전라북도 지원 우수지역협력연구센터인 전북대학교 메카트로닉스 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

[1] R. W. Nichols, "In-service inspection as an aid to steel pressure vessel reliability," Reactor Inspection Technology, Proceeding of a BNES symposium, pp. 24-37, (1975)
 [2] D. L. Mader, "Holographic and nonholographic NDT for nuclear and coal-fired power plants," SPIE, Vol. 604, Holographic Nondestructive Testing, pp. 37-56, (1986)

- [3] W. J. McGonagle, "Nondestructive testing," 2nd ed, McGraw-Hill, pp. 92-178, (1961)
- [4] Ernest O. Doebelin, "Measurement systems; application and design," 4th ed, McGraw-Hill, pp. 251-253, (1974)
- [5] A. Ettemeyer, "Nondestructive Inspection with Shearography," SPIE Vol. 2248, pp. 222-228, (1994)
- [6] W. Steinchen, L. Yang, "Nondestructive testing of micro-cracks using digital speckle pattern shearing interferometry," SPIE Vol. 3098, Holography and Shearography, pp. 528-535, (1997)
- [7] Y. Y. Hung, "Shearography: A Novel and Practical Approach for Nondestructive Inspection," Plenum Publishing Corporation, pp. 55-67, (1989)
- [8] Eugene Hecht, "Optics," Addison-Wesley, pp. 748-774, (1987)
- [9] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, An America National Standard, Section XI : Rules for Inservice Inspection and Testing of Components of Light-Water Cooled Plants, The American Society of Mechanical Engineers, (1989)
- [10] R. Jones and C. Wykes, "Holographic and speckle interferometry," Cambridge University Press, pp. 122-164, (1989)
- [11] S. Nakadate, T. Yatagai and H. Saito, "Digital speckle-pattern shearing interferometry", Reprinted with permission from Applied Optics, Vol. 19(24), pp. 4241-4246, (1980)
- [12] A. A. Aiyer, "Shearography : a potential portable on-site nondestructive evaluation inspection tool", SPIE Vol. 1212 Practical Holography IV, pp. 349-356, (1990)