한국공작기계학회지 Vol.19 No.4 2010. 8. pp. 462~468
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

피로균열성장에 의해 파단된 CT시험편의 표면조도와 모멘트의 관계에 관한 연구

김경석[+], 정현철[+], 김경수[++], 박찬주[+++], 장호섭[++++]

(논문접수일 2010. 2. 23, 심사완료일 2010. 4. 9)

A Study on a Relationship Between the Surface Roughness of Fracture CT Specimen Broken by Fatigue Crack Growth and the Moments

Kyungsuk Kim[+], Hyunchul Jung[+], Kyungsu Kim[++], Chanjoo Park[+++], Hoseob Jang[++++]

Abstract

Fatigue crack growth caused by surface defects is one of the most important subjects for the evaluation and the assurance of safety in pressure vessels, piping systems, LPG/LNG fuel tank and other various structures. So, this paper aims to investigate the relationship between the surface roughness of fracture CT specimens and the moments on the specimen when doing fatigue test for the evaluation and the assurance of safety of structures from fatigue crack deconstruction. In this experiment, the CT specimens were loaded by a fatigue testing machine with changing loads until they are broken. The surface roughness of the fracture CT specimens was measured using 3D precise shape measuring equipment and digital holography. As a result of this study, It was identified that the average roughnesses are similar at the positions that has a same moments by comparing the results with the moments on the specimen according to the position.

Key Words : Digital holography(디지털 홀로그래피), Fatigue crack(피로균열), Surface roughness(표면조도), CT specimen (CT 시험편)

+ 조선대학교 기계설계공학과
++ 조선대학교 첨단부품소재공학과 대학원
+++ 조선대학교 기계설계공학과 대학원
++++ 교신저자, 조선대학교 산학협력단 레이저응용 신기술개발 연구센터 (hschang@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

1. 서 론

실제 구조물에서는 소재 내에 많은 노치나 개재물 등 결함의 잠재 가능성이 존재하며, 또한 사용 중에 외적환경의 부하조건에 의해 결함이 존재하게 된다. 이와 같이 재료 내부에 존재하는 결함 부분에 반복하중이 작용하게 되면 결함으로부터 균열이 생성 또는 성장하여 재료파괴로 이어지는 경우가 대부분이므로 피로균열의 원인 규명은 매우 중요하다[1,2]. 파괴는 인명이나 물적 재산에 막대한 손실을 가져다주는 현상으로 기계 설비를 취급하는 제조업에서도 광범위하게 발생되고 있다. 이러한 현상에 대한 원인을 분석하고 안전대책을 수립하기 위하여 파괴현상에 밀접하게 관여되는 균열발생원인 파악 및 균열성장에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다[3,4]. 이에 본 논문에서는 3차원 미소형상측정기와 디지털 홀로그래피를 적용하여 파단된 CT시험편의 표면조도를 측정하고 이를 시험편이 받는 모멘트와의 상관관계를 규명함으로써 균열발생 원인을 파악하고자 한다.

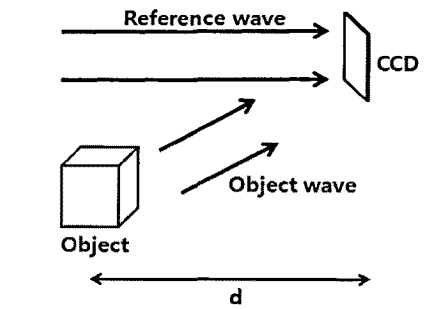
디지털 홀로그래피는 대상물의 형상에 따라 변화하는 물체파(object wave)의 위상이 기준파(reference wave)와 간섭이 생겨 CCD 상면에 물체에 대한 정보가 기록되고 이를 컴퓨터 프로그램을 통하여 수치적으로 재생하여 대상물의 형상정보를 얻어내는 기술이다[5,6]. 최근에 홀로그래피 기술이 각 분야에서 응용되면서부터 홀로그래피라는 말이 널리 알려지게 되었으나, 실제로 우리에게 소개된 것은 레이저가 개발되고 난 1960년 이후 부터이다. 이 기술은 의료진단 및 교육, 예술분야(홀로그래픽 영화, 초상화, 증명사진 등)와 보안분야(화폐 및 문서 위조방지) 등에서 사용되고 있으며, 메모리 및 패턴 인식, 직접 화상전송 등에도 응용되고 있다. 본 연구에서는 다양한 분야에서 응용되어 사용되고 있는 디지털 홀로그래피를 이용하여 파단된 CT시험편 표면 조도를 정밀측정하고, CT시험편에 피로시험을 하여 파괴한 후 파단면의 표면 거칠기와 피로시험 시 CT시험편이 받는 모멘트와의 상관관계에 대해 알아보고자 한다.

2. 이 론

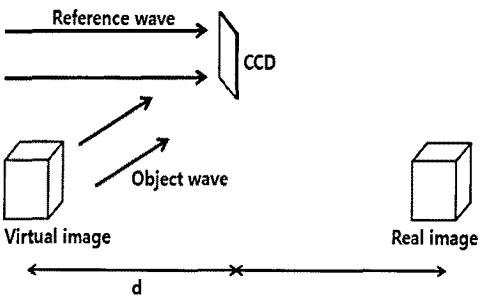
2.1 디지털홀로그래피 기록

디지털 홀로그래피는 광원에서 나온 빛을 두 개의 경로로 나누어 하나는 물체를 투과하거나 반사시켜 CCD로 입사시키고, 다른 하나는 기준이 되는 거울에 반사시켜 CCD로 입사시킨다. 물체와 기준 거울을 지나가는 각각의 빛을 물체파와 기준파라고 부른다. 여기서, CCD로 들어가는 물체파와 기준파는 CCD면 상에서 간섭무늬를 형성하는데 이 간섭무늬를 디지털 홀로그램이라 하고 이 영상은 전자적으로 기록되고 저장된다. 디지털 홀로그램의 기록 및 재생의 시스템에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 일반적으로 CCD 셀(cell)로부터 d의 거리에 위치한 물체는 3차원의 형태이며 반사된 물체의 표면의 정보는 CCD면상에 기록된다. 홀로그래피의 처리 과정은 수치적 공식을 사용하여 표현할 수 있다[7,8].

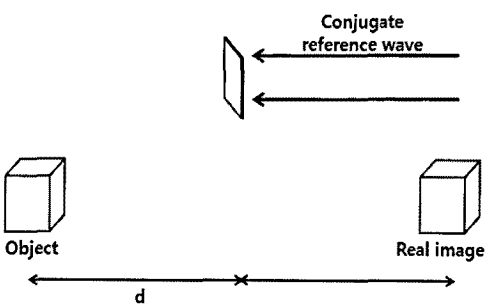
CCD에 기록된 홀로그램 함수는 참조파와 물체파의 간



(a) Recording



(b) Reconstruction with reference wave



(c) Reconstruction with conjugate reference wave

Fig. 1 Digital holography recording and reconstruction

섭에 의한 빛의 강도(intensity) 분포와 비례하여 계산되고 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I(x,y)=|A(x,y)|^2+|a(x,y)|^2 \quad (1)$$
$$+2|A(x,y)||a(x,y)|\cos|\Psi(x,y)+\Phi(x,y)|$$

여기서, $I(x,y)$는 간섭 세기, $A(x,y)$는 기준파, $a(x,y)$는 물체파, $\Psi(x,y)$는 기준파의 위상, $\Phi(x,y)$는 물체파의 위상이다. 위 식을 간단히 하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I(x,y)=|a(x,y)+A(x,y)| \quad (2)$$
$$=|a|^2+|A|^2+aA+a*A$$

2.2 디지털 홀로그램 재생

홀로그래피 재생에서, 재생을 위한 참조파의 복소진폭이 식 (2)에 곱해져야 하므로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(x,y)I(x,y)=(|a|^2+|A|^2)A \quad (3)$$
$$+|A|^2a+a*|A|^2$$

위식에서 $|A|^2$항은 참조파에 의해서 CCD에 균일하게 작용되는 정보이고, $|a|^2$은 물체의 진폭정보이다. $(|a|^2+|A|^2)A$는 빛이 통과할 때 0차 회절이므로 홀로그래피 재생에서 고려사항이 아니다. $|A|^2a$는 재생된 물체파에 의한 허상(virtual image)의 생성을 나타낸다. 그리고 $a*|A|^2$ 은 대상물의 실제 이미지의 왜곡에 의해서 나타난다. 왜냐하면 실제 이미지 상의 왜곡은 공간적인 이동 복소인자 A^2 때문이다. 따라서 왜곡되지 않은 실제의 상을 얻기 위해서 참조파 A를 conjugate 시킨다. 식 (4)와 같으며 식은 다음과 같다.

$$A'(x,y)I(x,y)=(|a|^2+|A|^2)A' \quad (4)$$
$$+A'^2a+a*|A|^2$$

2.3 각 스펙트럼(angular specturm)

각 스펙트럼 방법은 평면파 확장 방법(plane wave expansion method)이라고도 부르며 정확한 결과를 제공함과 동시에 매우 효율적이다. 홀로그램 평면에서 물체의 웨이브 필드인 $U(x,y)=u(x,y)e^{jQ(x,y)}$는 푸리에 적분의 형태로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[9-11].

$$U(x,y) \quad (5)$$
$$=\int dk_x dk_y A(k_x,k_y)\exp[i(k_x x+k_y y)]$$

이것의 2차원 푸리에 변환인 $A(k_x,k_y)=FU(x,y)$는 파수벡터인 $\vec{k}=k_x\hat{x}+k_y\hat{y}+k_z\hat{z}$ 방향으로 진행하는 평면파로 생각 할 수 있으므로 재생된 공간에서 복소 진폭은 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$U(X,Y:Z) \quad (6)$$
$$=\int dk_x dk_y A(k_x,k_y)\exp[i(k_x X+k_y Y)]\exp(ik,Z)$$

2.4 위상 분포를 높이 분포로 환산

디지털 홀로그래피 간섭계로부터 CCD에 저장된 홀로그램 정보가 컴퓨터로 수치적으로 재생되면 그로부터 물체 표면의 위상 정보를 얻을 수 있다. 정확한 높이 측정을 위해서는 초점이 맞는 각층의 위상정보를 취합하여 전체 위상도를 구해야 한다. 이렇게 측정한 전체 위상 분포로부터 높이 분포로 환산 할 수 있으며 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta h=\frac{\Delta\phi}{4\pi}\cdot\lambda \quad (7)$$

3. 시험편 및 실험 방법

3.1 시험편

본 논문의 실험을 위하여 사용한 시험편은 오스테나이트계열의 STS304로 ASTM 규격에 준하여 압연방향과 크랙의 진전방향이 직각이 되도록 하였고, 하중 제어방식에 적합한 CT시험편을 사용하였다. CT시험편 재료의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었으며, 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 2와 같다.

3.2 실험 장치 및 실험방법

모멘트(moment)에 따른 CT시험편의 표면 거칠기를 측정하기 위하여 전기유압식으로 작동하는 MTS사의 피로시험기를 Fig. 3과 같이 사용하였다. CT시험편에 하중을 인가하기 위하여 고정용 지그를 설계하였으며, 이는 피로시험기의 그립을 고려하여 제작하였다. 피로실험은 주기를 30(Hz)로 일정하게 하였으며 피로하중은 정현파형으로 20(kN)에서 40(kN)까지 5(kN)씩 증가시키면서 파단될 때까지 실험을

Table 1 Mechanical properties of specimen

Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (Mpa)	Elongation (%)
530	220	45

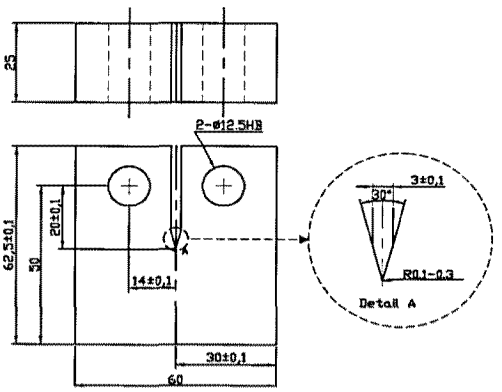


Fig. 2 Shape and dimensions of CT specimen

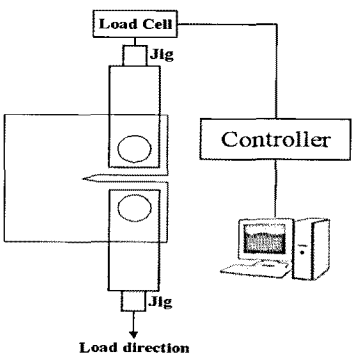


Fig. 3 Experiment setup for fatigue test

진행하여 CT시험편을 획득하였다.

피로시험 도중 각 지점에서 CT시험편에 작용하는 모멘트와 파단된 후 각 지점에서 CT시험편의 표면 거칠기의 관계를 구하기 위하여 Fig. 4의 3차원 미소형상 측정 장치를 이용하여 각 위치별 평균 표면거칠기를 측정하였다.

파단된 시험편을 측정하는 위치는 시험편의 중심축에 있으며 마이크로 스테이지를 이용하여 각 피로하중별 시험편을 같은 위치에서 일정하게 측정하였다. 분할된 구역의 위치는 노치로부터 각각 0mm, 2.5mm, 5.0mm, 7.5mm 떨어진 부분으로 Fig. 5와 같다.

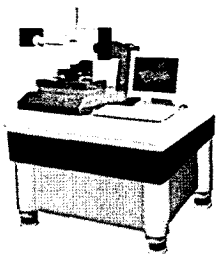


Fig. 4 3D precise shape measurement

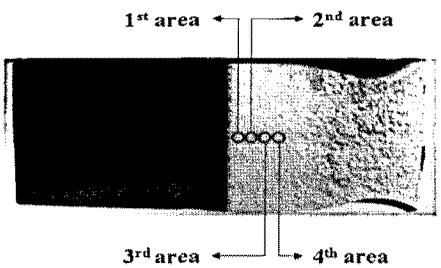


Fig. 5 Location of measurement area

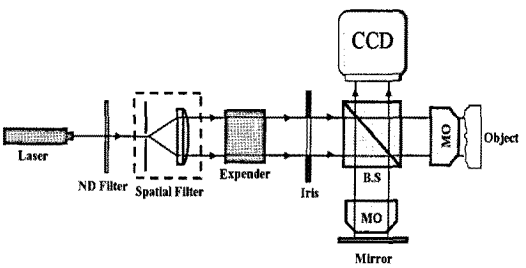


Fig. 6 Schematic of reflected Michelson interferometer

또한, 모멘트가 다른 상황에서 시험편이 파단 되었을 때 파단된 부위의 미세한 표면 구조를 관찰하기 위해 Fig. 6과 같이 반사형 디지털홀로그래피를 구성하여 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

피로하중을 20(kN)부터 40(kN)까지 5구간으로 나누어 피로실험을 하여 CT시험편의 파단면의 거칠기를 3차원 미소형상 측정 시스템(SIS1000)을 이용하여 측정하였다. 그리하여 각각 피로하중별로 파단된 부위를 각 영역별로 Table 2와 같이 측정하여 2D와 3D 이미지를 얻었다. 각각의 정보

Table 2 2D and 3D images acquired from SIS1000

2D Images (3rd position)	3D Images (3rd position)
20(kN)	20(kN)
25(kN)	25(kN)
30(kN)	30(kN)
35(kN)	35(kN)
40(kN)	40(kN)

해석을 통하여 측정영역의 평균 표면 거칠기를 추출 할 수 있었다. Fig. 5의 3rd 영역에서 3차원 미소형상 측정기로 각 피로하중 표면 거칠기를 측정한 2D와 3D 이미지를 Table 2에 나타내었다.

Table 2와 같이 각 피로하중 별 전 영역에서 측정된 이미지를 통하여 각각 위치에서의 평균 표면 거칠기를 측정하여

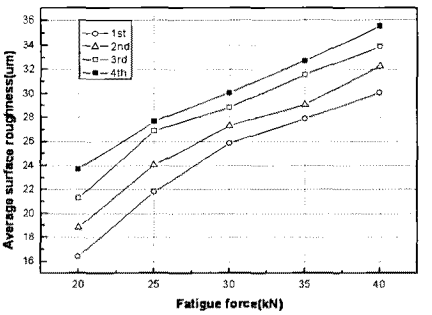


Fig. 7 Average surface roughness by fatigue force

Fig. 7에 나타내었다. 측정결과 같은 피로하중 내에서 노치부와 멀어질수록 평균 표면거칠기가 거칠어 진다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 피로하중이 다르고 같은 영역에서의 평균 표면거칠기도 피로하중이 증가함에 따라 거칠어 진다는 것을 확인할 수 있었다.

피로실험 시 CT 시험편이 파단될 때의 부분을 반사형 디지털 홀로그래피 시스템으로 측정하였다. 그로부터 피로하중별로 측정한 부위의 홀로그램을 얻어 각 스펙트럼 알고리즘을 적용하여 수치적 과정을 통해 재생하였다. 이로부터 측정부위의 진폭과 위상정보를 구하여 각각의 정보를 해석하였으며, 위상정보를 이용하여 높이 정보를 추출 하였다. 각 피로하중별 진폭과 높이의 3차원 재생 이미지를 Table 3에 나타내었다. 이를통해 파단이 급격하게 진전된 부위의 표면구조는 피로하중에 관계없이 유사함을 알 수 있었다.

피로실험 시 CT시험편에 작용한 모멘트와 파단된 시험편의 표면 거칠기의 상관관계를 알아보기 위하여, CT시험편 파단면의 위치별 모멘트를 구하였다. 모멘트를 구하기 위하여 해당영역까지의 거리 및 벡터를 Fig. 8에 나타내었다. 이때 모멘트는 $M=r \cdot F$의 수식에 의해 Table 4와 같으며 모멘트는 노치부에서 멀어질수록 또는 인가하중이 클수록 커짐을 알 수 있었다.

파단면의 거칠기와 모멘트를 비교하기 위하여 Table 4에서 모멘트가 같은 부위의 표면거칠기를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 이 그래프를 통해 모멘트 증가에 따라 평균표면거칠기가 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한, 모멘트가 비슷한 위치에서의 표면거칠기가 거의 비슷하게 나옴을 알 수 있었다. 이를 통해 표면 거칠기와 모멘트간의 상관관계가 높음을 확인 할 수 있었다. 따라서, 구조물이나 기계재료가 크랙 등으로 인하여 파괴되었을 때 파단면의 표면거칠기를 측정함으로써 파단이 일어나기 전에 어느 정도의 모멘

Table 3 Reconstruction 3D images at 2nd area according to forces

Reconstruction (Intensity)	Reconstruction (Height)
20(kN)	20(kN)
25(kN)	25(kN)
30(kN)	30(kN)
35(kN)	35(kN)
40(kN)	40(kN)

트가 발생하였는지 추정할 수 있어 파단원인 규명에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

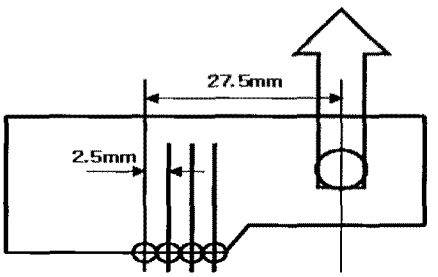


Fig. 8 Distance and vector of fracture CT specimen

Table 4 Moments by forces at each position (kN·m)

	1^{st} (20.0mm)	2^{nd} (22.5mm)	3^{rd} (25.0mm)	4^{th} (27.5mm)
20kN	0.4	0.45	0.5	0.55
25kN	0.5	0.5625	0.625	0.6875
30kN	0.6	0.675	0.75	0.825
35kN	0.7	0.7875	0.875	0.9625
40kN	0.8	0.9	1	1.1

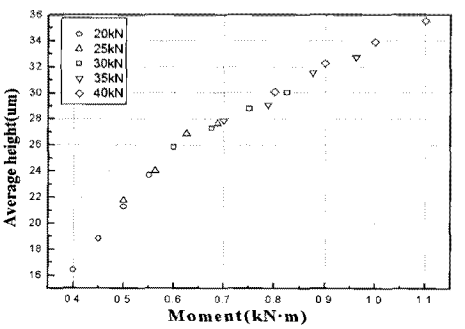


Fig. 9 Average surface roughness with same moments

5. 결 론

본 논문에서는 축 하중이 아닌 모멘트가 걸리는 부재에 대하여 부재의 파단면을 관찰하였다. 따라서 CT시험편에 외부 하중을 인가하여 모멘트를 발생시켜 파단에 이르렀을 때 대상물의 변화를 3차원 미소형상 측정기와 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하여 측정함으로써 모멘트와 파단면의 조도사이에 어떠한 관계가 있는지 알아보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 외부 하중조건에 의해 시험편은 내부에너지를 발산하며, 이는 온도나 체적, 표면의 변화로 나타난다. 이러한 변화를 측정하는데 본 논문에서는 디지털 홀로 그래피를 통하여 파단면을 관찰함으로써 상호연관 관계를 파악하였다.

(2) 3차원 미소형상 측정기를 이용하여 CT시험편의 각 모멘트 발생 부위에 따라 파단면의 거칠기와 비교하였으며, 이를 통해 모멘트가 같은 부분의 표면거칠기가 유사함을 알 수 있었다. 이로부터 모멘트가 증가함에 따라 파단면의 표면 거칠기가 선형적으로 증가하며, 또한 동일 모멘트의 대한 파단면의 표면 거칠기의 유사성을 통하여 모멘트와 파단면의 표면 거칠기의 상호 관계를 알 수 있었다.

(3) 반사형 Michelson 간섭계를 구성하여 파단 직후의 미세한 표면변화를 측정한 결과 피로하중에 관계없이 유사한 표면 구조를 가지고 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

(1) Kurihara, M., Katoh, A., and Kawahara, M., 1986, "Analysis on Fatigue Crack Growth Rates under a wide Range of Stress Ratios," *Trans. of the ASME J. of Pressure Vessel Technology.*, Vol. 108, No.2, pp. 209~213.

(2) Zhang, S., Marissen, R., and Schulte, K., 1987, "Crack Propagation Studies on Al 7475 on the Basis of Constant Amplitude and Selective Variable Amplitude Loading Histories," *Fatigue & Struct., of Eng. Mater. & Struct.*, Vol. 10, No. 4, pp. 314~332.

(3) Yoo, H. I. and Kim, Y. R., 1998, "Crack Growth Behavior of Tensile Overload for Small Load Amplitude," *J of Korea Society of Machine Tool Engineers.*, Vol. 7, No 2. pp. 54~61.

(4) An, C. B. and Choi, B. G,, 1999, "Influence of Evaluation Methods for Fatigue crack Growth Process," *J of Korea Society of Machine Tool Engineers.*, Vol. 8, No 1. pp. 119~125.

(5) Kronrod, M. A., Merzlyakov, N. S., and Yaroslavskii, L. P., 1972, "Reconstruction of a hologram with a computer," *Sov. Phys. Tech. Phys.*, Vol 17, pp. 333 ~334.

(6) Goodman, J. W. and Lawrence, R. W., 1967, "Digital image formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 11, pp. 77~79.

(7) Schnars, U. and Juptner, W., 1994, "Direct recording of hologram by a CCD target and numerical reconstruction," *Appl. Opt.*, Vol. 33, pp. 179~181.

(8) Javidi, B. and Tajahuerce, E., 2000, "Three-dimensional object recognition by use of digital holography," *Opt Lett.*, Vol. 25, No. 9, pp. 610~612.

(9) Kim, B. C. and Kim, S. W., 2003, "Absolute interferometer for three-dimensional profile 45 measurement of rough surfaces," *Opt. Lett.*, Vol. 28, pp. 528~530.

(10) Schwider, J., Burow, R., Elssner, K-E., Grnznna, J., Spolaczyk, R., and Merkel, K., 1983, "Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources," *Appl. Opt.*, Vol. 22, No 21, pp. 3421~3432.

(11) Cheng, Y. Y. and Wyant, J. C., 1985, "Phase shifter calibration in phase shifting interferometry," *Appl. Opt.*, Vol. 24, No 18, pp. 3049~3052.