



[UCI]I804:24011-200000338203



2020년 8월 석사학위논문

디지털 홀로그래피를 이용한 PTA공법이 적용된 굴착기 초경 코팅 스페이서의 마모 단차 측정

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

임 형 종



디지털 홀로그래피를 이용한 PTA공법이 적용된 굴착기 초경 코팅 스페이서의 마모 단차 측정

Measurement of Wear Step Height of Excavator Spacer Coated with Cemented Carbide by PTA Method using Digital Holographic Interferometry

2020년 8월 28일

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

임 형 종



디지털 홀로그래피를 이용한 PTA공법이 적용된 굴착기 초경 코팅 스페이서의 마모 단차 측정

지도교수 김 경 석

이 논문을 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 5월

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

임 형 종

조선대학교 대학원

2020년 6월

위원장	조	선 대	학 교	卫	수	김 재 열	(인)
위 원	조	선 대	학 교	卫	수	정 현 철	(인)
위 원	조	선 대	학 교	Ш	수	김 경 석	(인)

임형종의 석사학위논문을 인준함





목 차

LIST OF FIGURES iii
LIST OF TABLES v
Abstractvi
제 1 장 서론
제 2 장 이론적 배경
제 1 절 디지털 홀로그래피
제 2 절 홀로그램의 재생 9
제 3 절 Phase Shifting method
제 4 절 Phase Unwrapping
제 3 장 실험장치
제 1 절 반사형 디지털 홀로그래피 시스템
제 2 절 비교측정 장비 18
1. FE-ESEM
2. Alpha step
제 3 절 시험편
1. Resolution Target
2. 바모 시염기



3. 마모 시험편	3.	마모	시험편		23
-----------	----	----	-----	--	----

제 4 장 실험 결과 및 고찰
제 1 절 Negative Resolution Target
제 2 절 마모 시험편 제작 및 측정 결과
1. 마모 시험편 제작
2. 반사형 홀로그래피 측정 결과
가. SP1 측정 결과
나. SP2 측정 결과
다. SP3 측정 결과
3. FE-ESEM 측정
4. Alpha step 측정

참고	문헌	 5	1
잠고	로런	 Ľ)



LIST OF FIGURES

Fig.	2-1	Michelson Interferometer	4
Fig.	2-2	Digital Holography	5
Fig.	2-3	Coordinate system for numerical reconstruction	7
Fig.	2-4	Propagation vector	10
Fig.	2-5	Phase Unwrapping	15
Fig.	3-1	Reflection type Digital Holography	17
Fig.	3-2	FE-ESEM ·····	18
Fig.	3-3	Alpha Step	19
Fig.	3-4	Resolution Target ·····	20
Fig.	3-5	Pin on disk type wear tester (design model)	21
Fig.	3-6	Pin on disk type abrasion tester (Product)	22
Fig.	3-7	Wear test piece and pin (design drawing)	23
Fig.	3-8	Type of abrasion test piece	24
Fig.	4-1	Measuring position of Negative Resolution Target	25
Fig.	4-2	Result of Negative Resolution Target	26
Fig.	4-3	Wear test piece production	27
Fig.	4-4	Wear test piece measurement position	28
Fig.	4-5	SP1 Test piece 0° measurement result	30
Fig.	4-6	SP1 Test piece 90° measurement result	31
Fig.	4-7	SP1 Test piece 180° measurement result	32
Fig.	4-8	SP1 Test piece 270° measurement result	33
Fig.	4-9	SP2 Test piece 0° measurement result	34
Fig.	4-1() SP2 Test piece 90° measurement result	35
Fig.	4-1	SP2 Test piece 180° measurement result	36
Fig.	4-12	2 SP2 Test piece 270° measurement result	37



Fig. 4-13	SP3 Test piece 0° measurement result	38
Fig. 4-14	SP3 Test piece 90° measurement result	39
Fig. 4-15	SP3 Test piece 180° measurement result	40
Fig. 4-16	5 SP3 Test piece 270° measurement result	41
Fig. 4-17	FE-ESEM measurement result of SP1 test piece	43
Fig. 4-18	FE-ESEM measurement result of SP2 test piece	44
Fig. 4-19	FE-ESEM measurement result of SP3 test piece	45
Fig. 4-20	Alpha Step measurement result of SP1 test piece	47
Fig. 4-21	Alpha Step measurement result of SP2 test piece	48
Fig. 4-22	Alpha Step measurement result of SP3 test piece	49



LIST OF TABLES

Table 1-1 Spec	cifications of FE-ESEM	18
Table 1-2 Spec	cifications of Alpha Step	19
Table 1-3 Spec	ecifications of Negative Resolution Target	20
Table 2-1 Mea	asurement results using Digital Holography	29
Table 2-2 FE-	ESEM result of each test piece	42
Table 2-3 Alp	sha Step result of each test piece	46



ABSTRACT

Measurement of Wear Step Height of Excavator Spacer Coated with Cemented Carbide by PTA Method using Digital Holographic Interferometry

> Hyeong Jong Lim Advisor : Prof. Kim, Kyeong-Suk, Ph. D. Dept. of Mechanical System Engineering. Graduate School of Chosun University.

The spacer is mounted on the end of the arm of the excavator and is located between the bucket and the arm, and when the bucket is operated, soil is introduced to prevent damage to the excavator arm. If there is no spacer, the soil is pushed through the gap between the arm and the bucket of the excavator, gnawing the arm, causing wear, and when the wear occurs, the arm must be replaced. Since the arm of the excavator is so heavy that it can reach several tons, it is necessary to replace all the lines and grease supply lines installed in the excavator in order to replace the arm. In order to improve the lifespan of the spacer, it is intended to improve the wear resistance and increase the lifespan by using a cemented carbide coating using the PTA method. The digital holography system is a measurement method that can measure from a few micrometers to several nanometers in order to convert the height from the phase difference of light, and can draw results in a relatively quick time compared to other equipment. As a field where digital holography is applied, there are various fields of application such as medical, measurement, design, recording, and preservation. We intend to use a digital holography system to use precision measurement. We want to measure and report the wear level difference of a specimen that has been worn by using a wear tester by building a digital holography system, which is one of the non-destructive tests. In order to measure the reliability of the digital holography system, comparative



measurement was performed using another non-destructive(Alpha step and FE-ESEM) testing equipment.



제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

디지털 홀로그래피는 CCD(Charge-Coupled Device) 카메라나 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 센서 등을 활용하여 3차원 디지털 데이터를 촬영하고 획 득한 후 홀로그램을 생성하고 처리와 편집 및 저장을 할 수 있는 기술이다. 홀로그램 은 홀로그래피로 기록한 것을 말한다. 여기서 홀로그래피란 합성어인 그리스어로 전체 를 뜻하는 Holos와 그림이나 글자를 뜻하는 말인 Graphe에서 나타난 것으로 물체의 3 차원 이미지의 모든 정보를 기록하고 재생하는 방법을 뜻하는 것으로서 홀로그래피에 서 재생하는 물체의 영상은 3차원적 영상으로서 보는 방향에 따라 모양이 달라져 입체 감이 살아난다는 것이다[1].

홀로그램은 레이저에서 빛의 회절 및 반사를 이용한 것이다. 홀로그래피의 원리는 홀로그램의 기록과 재생 실험에서 레이저 광원 앞에 Beam Splitter를 두고 하나의 경 로에서 물체를 비추었을 때 물체에서 반사되는 물체 파를 생성하게 되며, 다른 하나의 경로에서는 Mirror를 통해 물체 파와 같은 각도를 이룬 참조 파가 발생하게 된다. 이 두 개의 파장이 합쳐지면서 간섭무늬를 형성하게 되며 이를 기록 및 저장하여 사용하 게 되는 것이다[1-3].

홀로그래피 기술은 Denis Gabor가 전자 현미경의 해상도를 문제를 개선하던 중 발명 하였으며 빛의 위상 현상을 이용하여 물체의 영상을 명암으로 기록하는 사진법과는 다 르게 물체에서 반사되는 파면 정보를 물체 파와 참조 파가 동일 선상에 위치하는 방법 을 제안하였다[1]. 이후 렌즈 없이 전자선의 파면을 기록하는 방법으로 고안 하였으며 전자선보다 참조 파가 긴 빛으로 확대하여 상을 재생하는 것이다. 이를 사용하여 2차 원 평면 이미지 홀로그램을 만들었다[1-3].

1950년대에 Laurence와 Goodman이 수치적 회절 계산법을 이용하여 3차원 영상 재생을 제안하였으며[5], 1960년에 가 간섭성의 빛으로 레이저를 사용할 수 있게 되어 3차 원 기록에 발전이 일어났다[2-3].

1958~1962년 Emmett Leigh와 Juris Upanieks는 레이저 전송 홀로그램을 만들기 위해

레이저를 사용하여 Off-Axis 방법을 발명 하였고[4, 6], Alexander Kronrod가 이를 컴 퓨터를 이용하여 3D 영상 재생법을 실현해 내었다[7]. Schnars Ulf와 Jupiter Werner 에 의해서 홀로그램을 CCD 카메라에 직접 기록하였으며 이것을 재생하고 저장하는 모 든 과정을 컴퓨터로 처리할 수 있게 되었다[5]. 이것을 사용하여 기존의 사진을 만드 는 방법이었던 화학적 홀로그램 생성 방법을 CCD 카메라를 이용해 처리시간 및 결과 시간을 단축하였고, 홀로그램 데이터 복원과 저장 및 후처리의 모든 과정이 컴퓨터를 사용하여 처리할 수 있게 되었다. 이후 다양한 방법의 디지털 홀로그래피가 개발되었 고 그중 1997년 Yamguchi가 위상 천이 홀로그래피를 개발하여 해상도 저하를 극복할 수 있게 되었다[8]. 이렇게 다양한 디지털 홀로그래피가 개발되었으며 이 기술은 다양 한 장비의 발전으로 인해 측정 시간의 단축, 편리, 해상도 등이 향상하여 여러 분야에 서 사용되고 있다.

스페이서는 굴착기 암 끝단에 6개의 볼트를 이용하여 장착되며, 버킷과 암 사이에 위치하여 버킷 작동 시 토사가 유입되어 발생할 수 있는 굴착기 암의 파손을 방지하는 역할을 하는 것이다. 만약 스페이서가 없다면 굴착기 암과 버킷 사이의 틈으로 토사가 밀려 들어와 굴착기 암을 갉아 먹는 토사마모 현상이 발생하여 암을 교체해야 하는 문 제가 발생할 수 있지만, 스페이서를 부착함으로써 암의 마모 현상을 줄일 수 있으며 비용적인 부분에 있어 스페이서의 수명향상을 위해 PTA 공법을 이용하여 초경 코팅한 스페이서의 마모 단차량을 측정하고자 한다. 마모된 시험편의 경우 표면에 투과가 되 지 않는 재질이기 때문에 반사형 디지털 홀로그래피를 이용하여 표면에 빛을 반사하여 측정을 할 수 있다.

본 논문은 레이저를 이용한 광 응용 계측 기술인 반사형 디지털 홀로그래피 기술 중 위상이동 이론을 사용하여 스페이서를 측정할 수 있는 시스템을 구성할 수 있었고, 반 사형 디지털 홀로그래피를 이용하여 PTA 공법으로 초경 코팅한 굴착기의 스페이서 마 모 단차를 정량적으로 측정하고자 한다. 시스템의 정확성을 확인하기 위하여 Resolution Target을 측정하여 보았고 타 장비와 비교를 하여 신뢰성을 확보하고자 하였으며 홀로그 래피 시스템의 장점을 이용하여 비파괴검사 기술 중 하나가 될 수 있음을 제시한다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 디지털 홀로그래피

홀로그래피는 광파의 진폭과 위상 정보를 기록하는 것으로 공간상에 광 정보를 재생 하는 것이 홀로그램 재생이다. 가시 광 영역에서의 광의 파장을 위상과 진폭으로 구별 하여 기록하기는 힘드나 간접적으로 참조 파와 물체 파의 간섭을 이용하여 기록한다. 즉, 이미 위상을 알고 있는 참조 파와 기록하고자 하는 물체에서 반사되어 나오는 임 의의 위상을 가지는 빛을 합하면 참조 파와 물체 파의 위상 차이에 의해 빛의 세기 변 화를 나타내는 간섭무늬가 형성되며, 이를 기록하고 빛의 간섭 현상을 이용하여 입체 정보를 기록하고 재생하는 것이 홀로그래피의 원리이다[5].

디지털 홀로그래피에서 마이켈슨 간섭계는 반사가 잘 되는 재질을 측정할 때 자주 사용된다. 마이켈슨 간섭계는 광원을 두 가지의 방향으로 나눈 다음 서로 다른 광의 경로를 통과하고 다시 결합하여 간섭무늬를 생성하는 기술이며, 마흐젠더 간섭계는 하 나의 광원으로부터 분리된 2개의 광원이 서로 다른 경로로 전송하고, 간섭 줄무늬를 생성하기 위해 다른 Beam Splitter에 의해 다시 결합하여 간섭 줄무늬를 생성하는 것 이다. 본 논문에서는 마이켈슨 간섭계를 사용하였다. 홀로그램 얻기 위해 광원을 광원 스플리터를 이용하여 참조 파와 물체 파로 나누고 물체 파는 물체에서 반사된 광이 CCD 카메라로 입사되고, 참조 파는 PZT(위상 이동자)를 이용하여 Mirror에 반사된 빛 이 CCD에 입사되어 이를 이용하여 위상을 제어할 수 있게 된다. 위상을 제어하게 되면 파동방정식에 의해 위상 조건이 제거되고 남은 변수는 실수로 만들어 계산에 있어서 용이성을 가지며 변화된 간섭무늬에 의한 변형의 정보를 획득이 쉽다. 이러한 마이켈 슨 간섭계를 이용 반사가 되는 재질의 시편을 측정할 수 있는 시스템을 구성할 수 있 게 된다.





Fig. 2-1 Michelson interferometer

디지털 홀로그래피는 기존 홀로그래피에서 홀로그램 역할을 대신하는 사진판을 사용 않고 CCD 카메라를 사용함으로써 컴퓨터를 이용해 Recording 및 Reconstruction을 가능 하고 측정 시간의 단축 및 편리성 등을 확보할 수 있게 되었다. 디지털 홀로그래피에서 의 재생과 기록 같은 개념은 Fig. 2-2과 같다. Fig. 2-2(a)처럼 참조 파와 물체에서 반 사되는 물체 파가 CCD 카메라 이미지 면에서 만나 간섭을 만들고 Fig. 2-2(b)처럼 참조 파가 들어가게 되면 실제 이미지와 같은 가짜 이미지가 나타나게 된다. 그리고 Fig. 2-3(c)처럼 이러한 간섭은 컴퓨터를 통해 정보를 수치로 재생을 할 수 있게 된다.







처리는 다음과 같은 방법으로 진행된다. 물체 파는 식 (2.1)처럼 표현 한다[9-13].

$$E_{O}(x,y) = a_{O}(x,y)e^{i\varphi_{O}(x,y)}$$
(2.1)

식 (2.1)에서 물체 파 진폭을 나타낸 것은 a_o 이고 물체 파의 위상을 나타낸 것은 φ_o 이다.

$$E_{R}(x,y) = a_{R}(x,y)e^{i\varphi_{R}(x,y)}$$
(2.2)

식 (2.2)는 참조 파를 나타내었으며, 진폭을 나타낸 것은 a_R 이며, 위상을 나타낸 것은 φ_R 이다. 참조 파와 물체 파는 CCD 카메라 이미지 면에서 간섭을 일으키고, 이러 한 간섭은 빛의 세기와 비례하고 식 (2.3)처럼 계산되어 표현된다.

$$I(x,y) = |E_O(x,y) + E_R(x,y)|^2 = |E_O|^2 + |E_R|^2 + E_O E_R^* + E_O^* E_R$$
(2.3)

식 (2.3)에서 보듯이 재생을 위하여 식 (2.3)에 참조 파가 곱해져야 하며 계산하게 되면 식 (2.4)와 같이 표현된다.

$$E_R(x,y)I(x,y) = (|E_O|^2 + |E_R|^2)E_R + |E_R|^2E_O + |E_R|^2E_O^*$$
(2.4)

식 (2.4)에서 참조 파에 의해 CCD 카메라에 작용한 정보로는 $|E_R|^2$ 이며 물체의 진 폭정보로는 $|E_O|^2$ 이다. $(|E_O|^2 + |E_R|^2)E_R$ 이 빛을 통과할 때 0번째 회절이 되어 홀로그 래피 재생에 있어 고려할 사항이 아니다. $|E_R|^2E_O$ 은 재생되는 물체 파에 의해 가짜 이미지를 생성하는데 나타내었다. 그리고 $|E_R|^2E_O^*$ 실제 이미지의 왜곡 때문에 나타나 는데 실제 이미지의 왜곡은 공간적인 이동 인자 E_R^2 이기 때문이다. 따라서 왜곡되지 않은 실제 이미지를 얻기 위해서는 참조 파를 결합하여 다음 식 (2.5)같이 표현되어 진다.



$$E_R^*(x,y)I(x,y) = (|E_O|^2 + |E_R|^2)E_R^* + |E_R^*|^2E_O + |E_R^*|^2E_O^*$$
(2.5)

식 (2.4)와 식 (2.5)에서 파면은 회절은 되지만 초점이 맞춰지지는 않았기에 파면을 재생하기 위해서는 Fig. 2-3에서 나타나듯 Hologram plane에서 Image plane과 Object plane 사이의 d의 거리가 벌어져 있을 때 광학이나 수치로 광원을 전파 시킬 때 파면 을 재생할 수 있다.



Fig. 2-3 Coordinate system for numerical reconstruction

홀로그램에 있어 광파에서의 회절은 수직으로 파가 입사할 경우 키르히호프 적분으로 묘 사되었으며, 다음 식 (2.6)과 같다.

$$U(A',B') = \frac{1}{i\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} E_R(x,y) I(x,y) \frac{1}{\rho} exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho') \delta x \delta y$$
(2.6)

식 (2.6)에서 $\rho' = \left[(x - A')^2 + (y - B')^2 + d^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ 는 Hologram plane의 한 점과 그에 해 당하는 재생될 Image plane 사이의 거리를 가리키며 λ 는 사용하는 광원의 파장을 뜻 하며, 재생 파 필드는 U(A', B')이다. 또 한 점과 점 사이의 각은 0에 가깝게 수렴하 기에 무시할 수 있다. 평면 파 E_R 의 경우 실제 진폭에 의해 간단하게 다음 식 (2.7) 과 같이 구할 수 있다.

$$E_R = a_R + i0 = a_R \tag{2.7}$$

회절 무늬는 CCD 카메라 평면 뒤의 거리 d에 의하여 계산할 수 있고 이는 실제 이미 지 면에서 복소 진폭이 재생된다. 식 (2.6)은 수치로 나타낸 홀로그램 재생을 위한 기 초수식이며 복소 함수인 재생 파 U(A', B')에 따라 위상과 세기를 계산할 수 있게 된 다[15].

제 2 절 홀로그램의 재생

반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 구성하고 있는 CCD 카메라를 통해 획득한 홀로 그램은 Scalar 회절이론들로 기초하여 각 스펙트럼, 프레스넬 회절법, 콘볼루션 방식 등 재생 거리에 따른 다양한 방법이 있으며 본 논문에서 사용한 방법은 어떠한 거리에 서도 유용한 방법인 각 스펙트럼을 적용하였다. 단색성 교란에 의한 복소 필드 분포가 어떤 평면을 가로질러 푸리에 해석 가능해지면, 여러 공간에서 푸리에 성분들이 평면 에 떨어지게 되고 반대 방향으로 진행하는 평면 파와 같은 취급될 수 있을 때 본 논문 에서 사용할 수 있게 되었다. 기존에 사용된 재생방법은 부드럽고 느리게 변화하는 대 상물은 적확히 재생된다. 그러나 Real-field에서의 재생은 한계가 있다. 따라서 회절 대상물은 Wave-field를 해석할 방법이 필요하다. 이에 평면 파 확장으로 흔히 알려있 는 방법을 사용하였고 이 방법은 현미경과 같은 영역까지의 해석이 가능하다[14].

평면 파가 직진을 한다고 가정을 하였을 때 푸리에 적분의 확정으로 하는 식의 개념을 이용하여 z=0인 평면을 가로지르는 함수를 다음과 같이 식 (2.8)로 2차원 푸리에 변환을 할 수 있다.

$$A(f_{x},f_{y}) = \iint_{-\infty}^{\infty} W(x,y,0)e^{[-i2\pi(f_{x}x+f_{y}y)]}\delta x\delta y$$
(2.8)

함수 W 스펙트럼을 역으로 나타낸다면, 다음 식 (2.9)처럼 표현할 수 있다.

$$W(x,y,0) = \iint_{-\infty}^{\infty} W(f_x,f_y,0) e^{[i2\pi(f_xx+f_yy)]} df_x df_y$$
(2.9)

전파 벡터 \vec{k} 로 간단한 평면 파가 진행한다고 고려한다면, Fig 2-4처럼 $2\pi/\lambda$ 의 크 기와 $\cos(\alpha,\beta,\gamma)$ 의 방향을 가지게 된다. 이러한 평면 파의 복소 표현은 식 (2.10)과 같이 나타난다.





Fig. 2-4 Propagation Vector \vec{k}

$$B(x,y,z;t) = e^{[i(\vec{k} \cdot - \vec{r} - 2\pi vt)]}$$
(2.10)

식 (2.10)에서 계산을 위해 시간의존도를 없애면 *z* 평면을 가로지르는 평면 파는 식 (2.10)에 의해서 다시 식 (2.11)로 표현할 수 있게 된다.

$$B(x,y,z) = e^{[i(\vec{k}\cdot\vec{r})]} = e^{i\frac{2\pi}{\lambda}(\alpha x + \beta y)} e^{i\frac{2\pi}{\lambda}}$$
(2.11)

방향은 cos, $\gamma = \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2}$ 의로 나타내고 z=0인 평면을 가로지르게 된다면 식 (2.8)에서 함수 $e^{[i2\pi(f_{x^x}+f_{y^y})]}$ 는 cos 방향으로 진행하는 평면 파를 나타낸다고 생각할 수 있게 된다.

$$\alpha = \lambda f_x \quad \beta = \lambda f_y \quad \gamma = \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \tag{2.12}$$

함수 W의 푸리에 분해에서 (f_x, f_y) 인 공간주파수를 가질 때 평면 파 성분의 복소



진폭을 간단하게 할 수 있으며, $f_x = \frac{\alpha}{\lambda}, f_y = \frac{\beta}{\lambda}$ 일 때 $A(f_x, f_y; 0)\delta f_x \delta f_y$ 을 구할 수 있다. 그러면 식 (2.8)을 식 (2.13)처럼 나타낼 수 있다.

$$A\left(\frac{\alpha}{\lambda},\frac{\beta}{\lambda};0\right) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(x,y,0)e^{\left[i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x+\frac{\beta}{\lambda}y\right)\right]}\delta x\delta y$$
(2.13)

식 (2.13)과 같은 함수를 각 스펙트럼이라 하며 본 논문에서 적용한 재생방법은 역 푸리에 변환과 고속 푸리에 변환을 기초로 한다. 이러한 방법은 기존의 평범한 방법보 다 가까운 영역까지 해석할 수 있으며 높은 분해능이 필요한 대상물에 사용하기에 적 절한 방법이다[20].

제 3 절 Phase Shifting method

간섭이 형성됨에 따라 물체의 변형에 맞춰 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 널 리 알려있는 방법이다. 위상이동 기법은 PZT(위상 이동자)에 의하여 0, π/2, π, 3π /2 위상을 이동하여 다음 식 (2.15)과 같이 4개의 방정식으로 기록하게 된다. 본 논문 에서는 대상물의 변형 측정이 가능하고 오차를 최소화하기 위해 π/2 위상이동을 사용 하였으며 전체 표면에서의 한 점에 빛의 강도로 기록된 것은 식 (2.14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_0 1 + \gamma \cos\left[\Phi + a_i\right] \tag{2.14}$$

$$I_{1} = I_{0} [1 + \gamma \cos \Phi]$$

$$I_{2} = I_{0} [1 + \gamma \cos (\Phi + \pi/2)] = I_{0} [1 - \sin \phi]$$

$$I_{3} = I_{0} [1 + \gamma \cos (\Phi + \pi)] = I_{0} [1 - \cos \phi]$$

$$I_{4} = I_{0} [1 + \gamma \cos (\Phi + 3\pi/2)] = I_{0} [1 + \sin \phi]$$
(2.15)



$$I_4 - I_2 = 2I_0 \sin \Phi$$

 $I_4 - I_2 = 2I_0 \sin \Phi$ (2.16)

$$\Phi = \tan^{-1}\left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right] \tag{2.17}$$

제 4 절 Phase Unwrapping

위상을 펼치는 표본화하기 위해 기준으로 나이 키스트 비율로 의해 최소한의 표본화 비를 만족하는 것으로 Warpped 위상과 Unwrapped 위상의 관계를 식 (2.18)로 나타내었 고 실제 위상은 $\phi(x)$ 이다[17].

$$U[\phi(a)] = \Phi(a) = \phi(a) + 2\pi k$$
(2.18)

식 (2.18)에서 Unwrapping 연산은 U 이며, U 의 위상은 Φ(x) 이며, 재생된 위상은 Φ(x) 이며, k 는 표본화 정수인 a 의 상수이다. U 연산자는 항상 Φ(x) 이 -π≤ φ(a)≤ π 을 되게 하였으며 계산으로 인해 W 위상과 실제 위상의 차이는 식 (2.19)로 나타내었다.

$$\Delta \phi(a) = \phi(a+1) - \phi(a), \ \Delta g(a) = g(a+1) - g(a)$$
(2.19)

식 (2.18)과 식 (2.19)를 이용하여 U 의 위상차를 식 (2.20)으로 표현하였다.

$$\Delta[U\langle\phi(a)\rangle] = \Delta \langle\phi(a)\rangle + 2\pi\Delta \langle g_1(a)\rangle$$
(2.20)

식 (2.20)을 다시 U 연산자에 적용을 시키면 식 (2.21)로 나타낸다.

$$U\{\Delta[U < \phi(a) >]\} = U[\Delta < \Phi(a) >] = \Delta[<\phi(a) >] + 2\pi[\Delta < g_1(a) + g_2(a)]$$
(2.21)

식 (2.21)에서 g_1 과 g_2 는 두 번의 U 연산자를 사용하여 나타난 것이며 시작은 U의 위상차가 다음에 존재할 수 있다.

$$-\pi \le \Delta < \phi(a) > \le \pi \tag{2.22}$$





(b) Unwrapped phase

Fig. 2-6 Phase Unwrapping

Fig. 2-6에 나타나듯 위상이동 기법을 통하여 얻은 변형량을 표현하는 방법으로 위 상 Arc-tangent 함수로 계산이 되기 때문에 불연속성을 가진 톱날 모양의 형상처럼 나 타나게 되고 이러한 불연속성의 해결을 위해 연속성으로 변환하고 위상 변화 정보를 획득하기 위해 Phase Unwarpping 과정을 거치게 된다. 대상물의 잡신호가 많거나 형상 이 복잡하면 위상 지도는 이미지의 왜곡 및 깨짐 현상이 심하게 발생하기 때문에 해석 에 어려움이 있다. Unwrapped의 위상을 구할 때 사용하는 Arc-tangent 함수가 가지고 있는 불연속성을 해결하기 위해서 불연속 변위 값을 연속 값으로 변환시켜 주는 과정 이다. Arc-tangent 함수는 0~π 의 주기를 통해 불연속이 되는데 그러한 주기를 0~2π 로 연장을 하고, 연속 위상으로 변환을 하기 위한 Unwrapped의 식은 (2.23)에 나타난 것으로 구하게 된다.

$$\phi_{unw} = \phi_w + 2\pi M \tag{2.23}$$

식 (2.23)에서 ϕ_{unw} 은 Unwrapped phase이며, ϕ_w 은 Wrapped phase이며, M 은



Fringe order이다. Unwrapping를 하기 위한 차수(M)의 결정은 위상 앞뒤의 값을 비교 하여 가장 높은 단차를 찾는 방법을 사용한다. 각 Pixel 전후의 위상값을 임의로 정한 값과 비교하면 조건을 만족하면 M 값을 증가 또는 감소시키는 방법으로 프린지 차수 (Fringe order)를 구할 수 있게 된다. 최종 변위 값은 간섭계의 기하학적 구성에 맞춰 감도 벡터를 생각하며 구하게 된다[18].



제 3 장 실험

제 1 절 반사형 디지털 홀로그래피 시스템

반사형 홀로그래피 시스템은 마이켈슨 간섭계를 이용하여 반사형 재질의 스페이서를 측정하기 위한 시스템을 구성하였다. 광원 532nm의 파장을 가지는 Nd:YAG Laser에서 나 오는 광원을 Pin Hole과 Objective Lens를 이용하여 이루어진 Spatial Filter를 통과시 키게 되는데 빛이 Objective Lens를 통과하면 빛이 퍼지게 되고 이를 Pin Hole을 통과시 켜 레이저의 깨끗한 부분을 사용할 수 있게 되며 Spatial Filter를 통과한 레이저는 Collimating Lens를 사용하여 평행 파를 만들게 된다. 이 빛을 Iris로 크기를 조절하고 Mirror를 통하여 Beam Splitter로 들어가 2개의 빛으로 나누어지고 하나의 빛은 PZT Mirror에 반사되어 나온 빛이 CCD 카메라로 들어가게 되고 하나는 Objective Lens 거쳐 대상물에 반사되어 Beam Splitter를 지나 CCD 카메라에 들어가게 된다. 두 개의 빛이 만 나 생성된 간섭무늬를 획득하고 이를 위상이동 기법을 이용하여 위상처리를 하게 되면 대상물의 단차에 대한 정보를 얻을 수 있다. Fig. 3-1은 위와 같이 구성된 시스템을 나 타낸다.



Fig. 3-1 Reflection type digital holography

제 2 절 비교측정 장비

1. FE-ESEM(Field Emission Scanning Electron Microscope)

신뢰성 확보를 위한 비교측정 장비로 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope) 으로 대상물 표면에 전자광원을 주사하고 이를 통해 스캔하여 이미지화하는 방법으로 고속의 전자를 발사하면 이 전자가 대상물 표면과 충돌 하면서 상호작용하여 직접 관 찰하는 기능을 가진 현미경으로 표면형상 및 적측 결함 들을 직접 측정할 수 있고 성 분 분석연구 및 개발 및 여러 분야에서 테스트에 사용된다. 본 연구에서는 마모 시험 기를 이용하여 마모시킨 시험편의 마모 단차 측정을 위해 사용되었으며, 구성된 홀로 그래피 시스템에서 측정된 데이터와 비교 및 신뢰성 확보를 하고자 한다. Fig. 3-2는 FE-ESEM이며 표 1-1에 사양을 나타내었다.



Fig. 3-2 FE-ESEM

Table 1-1 Specifications of FE-ESEM

Model	Quanta 200 FEG (FEI COMPANY)				
Maximum Load Size	50mm x 50mm				
Magnification	x30 ~ x200				
ESEM Resolution	30Kv SE : 1.5 nm, acceleration voltage : 200V \sim 30kV				

2. Alpha Step

신뢰성 확보를 위한 비교측정 장비는 알파 스텝(Alpha Step)으로 표면의 단차 측정을 하는 상용화 된 장비로 주로 수㎞ 바늘을 이용하여 박막 두께, 조도, 굴절률 등을 측 정하는 장비이다. 본 연구에서는 마모 시험기를 이용하여 마모시킨 시험편의 마모 단 차 측정을 위해 사용되었으며, 구성된 홀로그래피 시스템에서 측정된 데이터와 비교 및 신뢰성 확보를 하고자 한다. Fig. 3-3은 Alpha Step이며 표 1-2에 사양을 나타낸다.



Fig. 3-3 Alpha step

Table 1-2 Specifications of Alpha Step

Model	P-16+ (KLA Tencor)				
Specifications	Descriptions				
Maximum scan length	80mm or 200mm				
Lateral resolution	X = 25nm, Y = 1μm				
Operating Voltage (V)	220V, 3 phase				
Vertical linearity	±0.5% above 2000 Å				
vertical intearity	10 Å below 2000 Å				
	7.5 Å or 0.1% (1 σ),				
Repeat ability	whichever is greater				
	15.0 Å or 0.25% (1 σ),				
Reproducibility	whichever is greater				
Scan speed	2µm/sec to 25mm/sec				
Stylus control	Electromagnetic force compensation				



제 3 절 시험편

1. Resolution Target

본 논문에서 사용된 1951 USAF Resolution Target은 디지털 홀로그래피 시스템에서 데이터의 신뢰성을 검증하기 위해 사용되는 예비 실험 시험편이다. 측정 위치는 그룹 번호 4의 요소번호 2의 세 개의 선을 측정하였으며 사양에 나와 있는 값을 계산하여 측 정한 결과와 비교 하였다. Fig. 3-4에 Negative Resolution Target이며 표1-3에 사양을 나타내었다.



Fig. 3-4 Resolution Target

Element					Group	Number				
	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
1	0.250	0.500	1.00	2.00	4.00	8.00	16.00	32.0	64.0	128.0
2	0.280	0.561	1.12	2.24	4.49	8.98	17.95	36.0	71.8	144.0
3	0.315	0.630	1.26	2.52	5.04	10.10	20.16	40.3	80.6	161.0
4	0.353	0.707	1.41	2.83	5.66	11.30	22.62	45.3	90.5	181.0
5	0.397	0.793	1.59	3.17	6.35	12.70	25.39	50.8	102.0	203.0
6	0.445	0.891	1.78	3.56	7.13	14.30	28.50	57.0	114.0	228.0



2. 마모 시험기

Phoenix Tribology Ltd.의 Pin on Disk 타입 마모 시험기인 TE 67을 벤치마킹하여 Fig. 3-5와 Fig. 3-6 에서 보는 바와 같이 회전속도와 작동시간, 작용 하중 제어가 가 능한 마모 시험기를 자체 제작하였다. 표 1-4에 마모 시험기의 사양을 나타냈다.



Fig. 3-5 Pin on disk type wear tester (Design model)





Fig. 3-6 Pin on disk type abrasion tester (Product)

Specifications	Descriptions		
Speed (RPM)	Max. 2,000		
Force (kgf)	Max. 100		
Operating Voltage (V)	220V, 3 phase		

3. 마모 시험편

시험편은 Fig. 3-7에 나와 있는 도면과 같이, 마모시험을 위한 시험편은 높이 10mm, 지름 ϕ 30mm의 크기로 제작하였으며, Pin은 마모 시험편의 표면이 초경으로 코팅되어 있기에 표면 마모를 유발할 수 있도록 길이 30mm, 지름 ϕ 5mm인 초경 Pin을 사용하였 다.



Fig. 3-7 Wear test piece and pin (Design drawing)

Fig. 3-8은 마모 시험편으로써 총 3가지 표면형상을 갖도록 제작하였으며, 마모 시 험편 종류에는 매립형(SP1), 돌출형(SP2), 접합형(SP3)을 각각 제작하였다. 매립형 (SP1)은 WC 4 um + 자용성 분말을 6.5 : 3.5 wt 비율로 혼합한 분말을 원료로 하여 PTA 공법으로 초경 층을 모재의 평면으로부터 돌출되도록 육성 용접하였으며 후공정에 서 평면가공을 통해 평면을 구현하였으며, 돌출형(SP2)은 WC 4 um + 자용성 분말 6.5 : 3.5 wt 비율로 혼합한 분말을 원료로 하여 PTA 공법으로 초경 층 모재의 평면으로부 터 돌출되도록 제작하였으며, 접합형(SP3)은 WC 0.8 um-Ni(약 30 wt. %)계 초경 팁을 고온 확산 접합하여 제작하였다.



Buried(SP1)



Protruding(SP2)



Splicing(SP3)

Fig. 3-8 Type of abrasion test piece

제 4 장 실험 결과 및 고찰

제 1 절 Negative Resolution Target

Fig. 4-1은 Negative Resolution Target의 측정 위치를 나타낸 것이고, Fig. 4-2는 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하여 Negative Resolution Target을 측정한 결과이다. 측정 위치는 그룹 번호 4의 요소번호 2를 측정 하였다. (a)는 위상 정보 이 미지이며, (b)는 세기 이미지이며, (c)는 Unwrapped 이미지이며, (d) 크기를 조정한 이미지이며 (e),(f)는 간섭무늬의 중심이 되는 y축 기준으로 픽셀에 대한 ±20 값에 대한 Profile 데이터이다. Resolution Target의 단차 높이는 0.120 um이며 이를 측정 하였을 때 y축을 기준으로 +20픽셀만큼 더 이동한 값의 단차 높이는 0.134 um이 나왔 으며 -20픽셀만큼 더 이동한 값의 단차 높이는 0.156 um이 나옴을 알 수 있었다.



Fig. 4-1 Measuring position of Negative Resolution Target



Fig. 4-2 Result of Negative Resolution Target

제 2 절 마모 시험편 제작 및 측정 결과

1. 마모 시험편 제작

굴착기 관절에 사용되는 스페이서는 작업 도중 유입되는 토사 또는 다른 이물질과의 마찰, 케이스와의 마찰 등에 발생하며, 굽힘과 펴짐 동작의 반복이 작업 종료까지 계 속되는 경향을 나타낸다. 따라서, 이러한 작업환경을 모사하기 위해 마모시험 조건을 설정하였다. 처음에 10만 사이클 이상 반복 작업을 수행하도록 해야 하며, 마모시험 도중 일정한 힘이 마모 시험편 표면에 작용해야 하며, 시간 조절이 가능하여야 한다. 이러한 조건에서 마모시험이 진행되었으며, 설정된 시간 내에 설정된 힘이 표면에 가 해지는 동안 설정된 사이클의 마모시험이 종료되면 시스템이 정지하도록 마모 시험기 조건을 설정하였다. 10만 사이클의 반복 작업이 이루어질 수 있도록 회전수와 시간을 계산하였을 때 400rpm을 기준으로 시간은 4시간 10분 이상으로 설정을 하여야 했으며 표면에 작용하는 힘이 100kgf인 경우 이 힘으로 인하여 회전수가 7rpm 정도 감소하게 되어 실제 마모시험 시간을 4시간 30분으로 설정하였다. 4시간 30분 동안 390rpm으로 작동할 경우 반복횟수는 10만5300 사이클로 목표로 설정한 10만 사이클 이상에 관한 결과를 얻을 수 있다. 또한, Pin이 마모 시험편의 마찰로 인한 시험 도중 온도 상승이 나타났으며 이를 방지하기 위해 고온 그리스(232℃)를 사용하여 마모시험 도중 온도가 45℃를 유지하게 하였으며 Pin은 마모 시험편의 회전 중심에서 8mm 편심 위치에 놓이 도록 설정하였다. 이에 결과물은 Fig. 4-3에 나타난다.



Buried(SP1)



Protruding(SP2)



Splicing(SP3)

Fig. 4-3 Wear test piece production

2. 반사형 홀로그래피 측정 결과

마모 시험편의 마모 단차를 측정하기 위해 Fig. 4-4와 같이 0, 90°, 180°, 270° 의 네 곳에서 각각의 시험편에 대하여 측정을 진행하였으며 반사형 디지털 홀로그래피 의 CCD 카메라의 해상도는 2048 X 2048이며 픽셀의 크기는 무 배율 측정영역은 가로 9mm x 세로 9mm가 되며 시스템 구성에 측정 오차를 줄이기 위하여 10배율 렌즈를 착용 하여 1mm x 1mm 이하의 측정영역을 갖게 된다. 이에 시험편의 경우 마모가 된 부분과 마모가 되지 않은 부분의 경계 영역을 찾기 위해 Intensity 이미지를 이용하였으며 경 계 부분의 중간 점을 찾기 위해 픽셀을 ±20픽셀까지 확장하여 결과물을 획득하였다. 이후 FE-ESEM과 Alpha Step으로 측정한 결과와 비교 분석하였다.



Fig. 4-4 Wear test piece measurement position

	Step Height								
	Buried (SP1)			Protruding (SP2)			Splicing (SP3)		
각도	+20	-20	AVG	+20	-20	AVG	+20	-20	MG
	Dist	Dist		Dist	Dist		Dist	Dist	Avu
0°	2.61e-	2.16e-	2.39e-	5.42e-	5.28e-	5.35e-	2.73e-	2.37e-	2.55e-
	7	7	7	7	7	7	7	7	7
90°	1.84e-	3.90e-	2.87e-	2.95e-	4.86e-	3.91e-	2.34e-	2.81e-	2.58e-
	7	7	7	7	7	7	7	7	7
180°	2.42e-	2.53e-	2.48e-	3.58e-	3.01e-	3.30e-	2.24e-	1.71e-	1.98e-
	7	7	7	7	7	7	7	7	7
270°	2.24e-	2.11e-	2.17e-	5.66e-	4.98e-	5.32e-	2.07e-	3.80e-	2.94e-
	7	7	7	7	7	7	7	7	7
AVG		0.248			0.447			0.251	

Table. 2-1 Measurement results using digital holography (um)

Table. 2-1은 반사형 디지털 홀로그래피로 측정한 것으로 결과값은 매립형(SP1)과 접합형(SP3)의 평균값은 0.03㎞ 차이가 나지만 돌출형(SP2)은 0.199㎞ 차이가 남을 알 수 있었다. 같은 조건에서 스페이서의 마모 단차 측정을 하였을 때 사용하기 좋은 것 은 SP1> SP3 > SP2 순으로 마모 단차값이 낮아짐을 알 수 있었다. 매립형(SP1)과 접합 형(SP3)은 유사한 마모 단차값을 알 수 있었으며 SP2는 크게 차이가 남을 알 수 있었 다. 이에 스페이서를 초경 코팅을 하였을 경우 매립형(SP1) 이나 접합형(SP3)의 경우 사용하기에 적합할 수 있지만, 돌출형(SP2)은 경우 마모 단차량이 높아 사용하기에 적 합하지 않음을 알 수 있었다. 결과는 Fig. 4-4 ~ 4.15에 나타난다.

가. SP1 측정 결과

Fig. 4-5~4~8 같이 매립형(SP1)의 반사형 홀로그래피 시스템을 이용한 실험 결과는 (a)는 표면의 이미지이며, (b)는 위상에 대한 이미지이며, (c)는 복원 후 Unwarpping 한 이미지이며, (d)는 빛의 세기에 대한 이미지이며, (e),(f)는 각 간섭무늬의 중심이 되는 y축 기준으로 픽셀에 대한 ±20 값에 대한 Profile 데이터이다.



















나. SP2 측정 결과

Fig. 4-9~4-12과 같이 돌출형(SP2)의 반사형 홀로그래피 시스템을 이용한 실험 결과 는 (a)는 표면의 이미지이며, (b)는 위상에 대한 이미지이며, (c)는 복원 후 Unwarpping한 이미지이며, (d)는 빛의 세기에 대한 이미지이며, (e),(f)는 각 간섭무 늬의 중심이 되는 y축 기준으로 픽셀에 대한 ±20 값에 대한 profile 데이터이다.







80

100

20

40

Fig. 4-10 SP2 Test piece 90° measurement result









다. SP3 측정 결과

Fig. 4-13~4-16 같이 접합형(SP3)의 반사형 홀로그래피 시스템을 이용한 실험 결과 는 (a)는 표면의 이미지이며, (b)는 위상에 대한 이미지이며, (c)는 복원 후 Unwarpping한 이미지이며, (d)는 빛의 세기에 대한 이미지이며, (e),(f)는 각 간섭무 늬의 중심이 되는 y축 기준으로 픽셀에 대한 ±20 값에 대한 profile 데이터이다.

















3. FE-ESEM 측정

Table. 2-2 FE-ESEM result of each test piece (um)

Step Height				
SP1	SP2	SP3		
0.325	1.583	0.608		

Table. 2-2는 FE-ESEM로 측정한 것으로 결과값은 돌출형(SP1)과 접합형(SP3)은 0.283㎞의 차이가 남을 알 수 있었으며 SP2와는 1.258㎞의 차이가 남을 알 수 있었다. 같은 조건에서의 스페이서의 마모 측정 시 사용하기 좋은 것은 매립형(SP1)> 접합형 (SP3) > 돌출형(SP2) 순으로 마모 단차값을 알 수 있었으며 매립형(SP1)과 접합형 (SP3)은 돌출형(SP2)보다 비교적 낮은 단차값을 알 수 있었다. 결과물은 Fig. 4-17~4-19에 나타난다.







Fig. 4-17 FE-ESEM measurement result of SP1 test piece















Fig. 4-19 FE-ESEM measurement result of SP3 test piece



4. Alpha Step 측정

	Step Height					
각도 SP1		SP2	SP3			
0°	0.325	1.583	0.608			
90°	0.96	0.749	0.648			
180°	0.334	1.847	0.585			
270°	0.519	1.709	0.425			
AVG	0.5345	1.472	0.5665			

Table. 3 Alpha Step result of each test piece (um)

Table. 2-3은 Alpha Step으로 측정한 것으로 결과값은 SP1과 SP3는 0.032㎞의 차이 가 남을 알 수 있었으며 SP2와는 0.9375㎞의 차이가 남을 알 수 있었다. 같은 조건에 서의 스페이서의 마모 측정 시 사용하기 좋은 것은 매립형(SP1)> 접합형(SP3) > 돌출 형(SP2) 순으로 마모 단차값을 알 수 있었으며 매립형(SP1)과 접합형(SP3)은 돌출형 (SP2)과 비교 하였을 때 낮은 단차값을 얻을 수 있었다. 결과물은 Fig. 4-20~4-22에 나타난다.





Fig. 4-20 Alpha Step measurement result of SP1 test piece





180°

270°

Fig. 4-21 Alpha Step measurement result of SP2 test piece











180°

270°

Fig. 4-22 Alpha Step measurement result of SP3 test piece

제 5 장 결 론

본 논문에서는 광 응용 계측 방법 중 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 구성하여 PTA 공법을 이용한 굴착기의 스페이스 마모 단차 측정을 하였으며, 신뢰성 확보를 위 하여 FE-ESEM과 Alpha Step을 사용하여 비교 측정하여 보았다. 각각의 측정 결과를 얻 어 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

반사형 디지털 홀로그래피 시스템, FE-ESEM, Alpha Step과의 결과가 유사함을 알 수 있었다. 매립형(SP1)을 측정하였을 때 디지털 홀로그래피 시스템은 0.248 / , FE-ESEM 은 0.325 / , Alpha Step은 0.535 um이 나옴을 알 수 있었으며, 돌출형(SP2)을 측정하 였을 때 디지털 홀로그래피 시스템은 0.447 / , FE-ESEM은 1.583 / , Alpha Step은 1.472 / 이 나옴을 알 수 있었으며, 접합형(SP3)을 측정하였을 때 디지털 홀로그래피 시스템은 0.251 / , FE-ESEM은 0.608 / , Alpha Step은 0.567 / 이 나옴을 알 수 있었 다. 이러한 결과값으로 확인한 결과 매립형(SP1) > 접합형(SP3) > 돌출형(SP2) 순으로 결과값의 차이가 모든 장비에서 동일하게 나왔으며 매립형(SP1)과 접합형(SP3)의 결과 값이 유사하게 나왔으며 돌출형(SP2)과는 비교적 크게 차이가 났음을 알 수 있었다. 매립형(SP1)과 접합형(SP3) 비슷한 결과를 도출해 낼 수 있었지만, 돌출형(SP2)은 너 무나 큰 차이를 가지고 있어 사용에 적절하지 않다고 판단되며 매립형이 마모량은 적 어 보이나 경도를 생각하면 접합형(SP3)이 제작에 있어 더 적합해 보인다.

반사형 디지털 홀로그래피 시스템은 반사가 잘되는 대상물에 광 계측 시험에 사용되 고 있었으며 이처럼 마모가 되어 표면이 거친 물건에 측정하였을 때 위상 변화로 인한 난반사가 있었으나 Alpha Step의 결과와 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있었으며 이에 비교적 신뢰할 수 있는 장비임을 알 수 있었다



참고 문헌

- 1. D. Gabor, "A new microscopic principle," Nature. 1611 pp. 777-778
- D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefront," Proc. Roy. Soc. 197, 454-487(1949)
- 3. D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefront ||," Proc. Phys. Soc. 64, 449-469(1951)
- 4. E. N. Leith and J. Upatnieks. Reconstructed wavefronts and communication theory. JOSA, 52:1123.1130, (1962)
- 5. U. Schnars, W. Juptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms", Meas. Sci. Technol. 13, pp. R85-R101 (2002)
- 6. F. W. GOODMAN, "Introduction to fourier optics", McGRAW-HILL BOOK COMPANY, (2000)
- M. A. Kronrod, N,S. Merzlyakov, and L. P. Yaroslavskii, "Reconstruction of a hologram with a computer", Sov. Phys. Tech. Phys., vol. 17, pp. 444-334 (1972)
- Yamaguchi, T. Zhang, "phase shifting digital holography," Opt. Lett. 22, pp. 1268-1270 (1997)
- 9. J. W. Goodman, R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms", Appl. Phys. Lett, vol. 11, pp. 77-79(1967)
- M. A. Kronrod, N.S. Merzlyakov, and L. P. Yaroslavskii, "Reconstruction of a hologram with a computer", Sov. Phys. Tech. Phys, vol. 17, pp. 444-334 (1972)
- J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle", Journal of the Optical Society of America, Vol 66, pp. 1145-1150, (1976)
- 12. Ulf Schnars, Werner Jueptner, "Digital holography", Springer, pp. 18-20 (2003)
- K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres, "Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems," (2010)



- M. H. Horman, "An applicationi of wavefront reconstruction to interferometry", Appl. Opt., Vol. 4, pp. 333-336, (1965)
- 15. H. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Holographic data storage, Springer series in optical sciences", Sincerbox, (2000)
- K. Creath, "Phase-measurement interferometry techniques," Progress in Optics XXVI, pp. 349-393, (1988)
- 17. Charette P. G. and Hunter I. W. "Robust phase-unwrapping method for phase images with high noise content", Appl. Opt, Vol. 35, pp. 3506-3513, (1996)