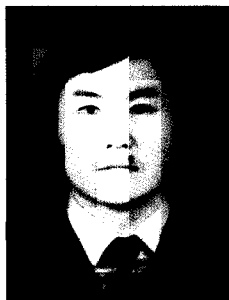


# 레이저 측정기술의 활용



**윤 경 구**  
(가공기술실 선임연구원)

- '81 서울대학교 공과대학 기계설계학과 졸업
- '83 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)
- '83-현재 한국기계연구소 선임연구원



**이 성 국**  
(가공기술실 연구원)

- '83 아주대학교 기계공학과 졸업
- '85 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)
- '85-현재 한국기계연구소 연구원

## 1. 서 론

레이저는 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation의 약자로 1960년에 개발되어 수많은 과학자들의 노력에 힘입어 현재는 측정용에서 수십 KW의 가공용 및 핵융합용으로 사용되고 있다. 특히 레이저는 코히어런스 (coherence), 단파장 특성 (monochromatic), 낮은 확산특성 (low divergence)에 의해 어떤 다른 광학적 방법보다 정확한 결과를 얻을 수 있고 조작성이 용이하다. 레이저를 이용한 측정의 가장 큰 특징은 비접촉식 측정으로써 측정하고자 하는 물체에 어떤 힘이나 압력을 가하지 않으므로 측정후 물체에 측정흔을 남기지 않고 또한 비접촉식이므로 On-Line Real-time 계측이 가능하여 공정의 연속성을 보장하는 장점이 있다. 레이저로 측정 가능한 물리량은 길이, 변위, 각도, 두께, 표면조도, 속도, 진동등 일반적으로 공학에서 사용하는 대부분의 측정값을 포함하고 있으며 [9], 레이저 측정에서는 홀로그래피(holography), 스펙클현상 (speckle effect), 간섭현상(inteference), 반사현상 (reflection)등을 이용한다.

여기서는 언급된 여러가지 활용중 가장 기본적인 그리고 널리 이용되는 몇가지에 대해서 기본적인 광학이론과 광학적 현상들을 재고해 봄으로써 레이저를 이용한 정밀계측에 대한 이해를 돕고자 한다.

## 2. 레이저 측정의 원리 및 응용

### 2.1. Laser interferometry

비교적 많이 이용되고 있는 레이저 간섭계의

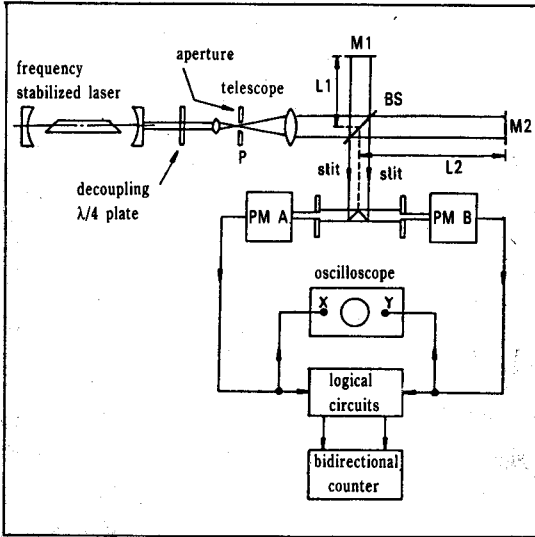


그림 1) 거리측정용 레이저 간섭계의 구조

원리 및 구조와 그의 응용법에 대해서 설명하고자 한다.

그림 1의 간섭계는 Michelson 간섭계의 원리를 이용한 것으로 거리의 변화를 위상의 변화와 관

련시켜 빛의 강도변화를 측정하므로써 거리를 측정한다. [2].

그 원리를 설명하면 다음과 같다. 거울  $M_1$ 과  $M_2$ 로 부터 반사되는 레이저 광선은 광분할기 (BS)에서 간섭무늬를 만들고 그 위상의 차이는  $\phi = 2\pi d/\lambda_{vac} = 2\pi [L_2 \langle n \rangle_2 - L_1 \langle n \rangle_1] / \lambda_{vac} = 2\pi d / \lambda_{vac}$  이다.

여기서  $L_1, L_2$ :  $M_1, M_2$ 까지의 거리  
 $\langle n \rangle_1, \langle n \rangle_2$ : 광학경로 1, 2에서의 굴절률  
 $\lambda_{vac}$ : 진공중에서의 레이저 광원의 파장  
 그러므로 간섭무늬의 강도는

$$I = I_1 + I_2 + 2 I_1 I_2 \cos 2\pi d / \lambda_{vac} \text{ 이고}$$

거울  $M_2$ 가  $\Delta L_2$ 만큼 이동하는 경우, 대응하는 간섭무늬의 갯수의 변화  $\Delta N$ 은  $\Delta N = 2\Delta L_2 \cdot \langle n \rangle_2 / \lambda_{vac}$ 가 된다.

즉  $\Delta N$ 의 갯수를 광전소자(PM)를 이용하여 측정하므로써  $\Delta L_2$ 의 변화를 정확하게 계산할 수 있다. 그림 2는 Frequency offset method에 의한 거리의 측정방법을 설명한 그림이다[3].

Zeeman split를 이용하여 진동수  $f_1, f_2$ 의 He-Ne

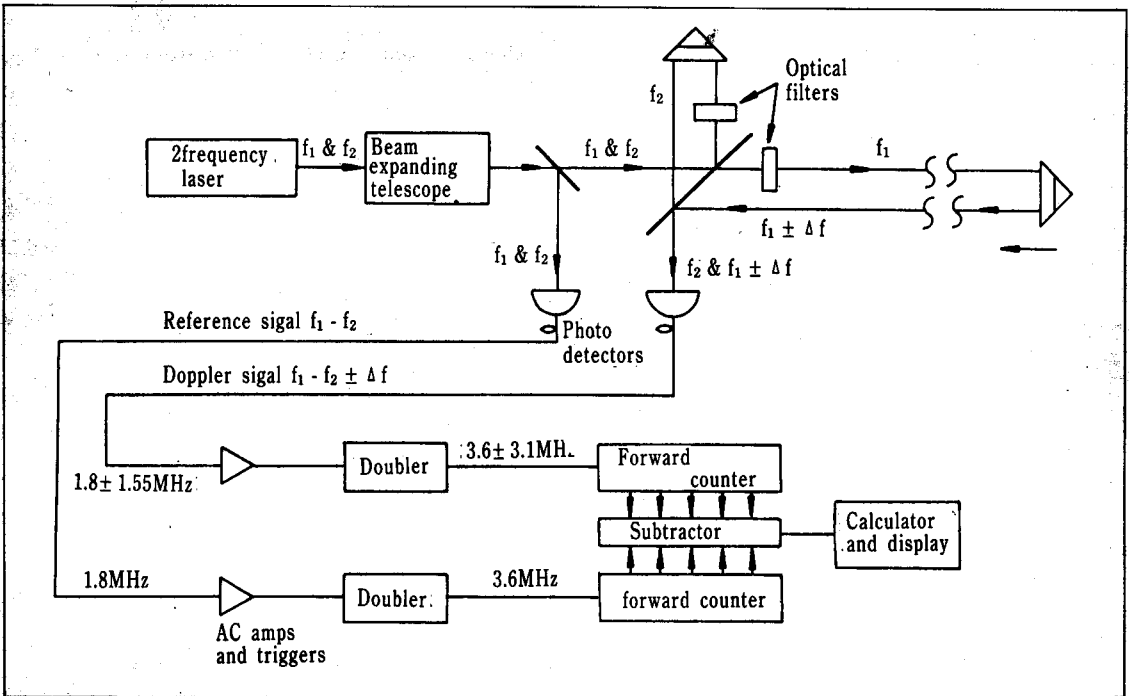


그림 2) Hewlett-Packard Model 5525A에서 채용하고 있는 Dual frequency 레이저 간섭계의 Block Diagram

laser를 만들고  $f_2$ 를 reference beam으로 사용하고,  $f_1$ 이 이동하는 거울의 거리측정에 이용한다. 속도  $v$ 로  $\Delta S$  만큼 이동하는 경우 도플러효과는  $\Delta f_1 = f_1 \pm \frac{v}{C}$  가 되며 결과적으로 beat frequency는  $f_1 + \Delta f_1 - f_2$  이 되며 이것은 광전소자(PD)에 의해 검출된다. 그리고 반사경의 실제 이동거리  $\Delta S$ 는 자동적으로 역환산되어 계기판에 표시된다. 이 방식의 정밀도는  $\pm 0.01\text{mm}/60\text{m}$ 로써 측정 한계는 약 400m 정도이다. 응용분야는 ①거리의 측정 ②공작기계의 조정 ③진동감지 및 측정 ④지진 감진 및 대륙이동측정등에 활용된다. 다음의 그림은 상기의 방법을 이용한 각종 물리량의 측정 기술을 설명한 것이다.

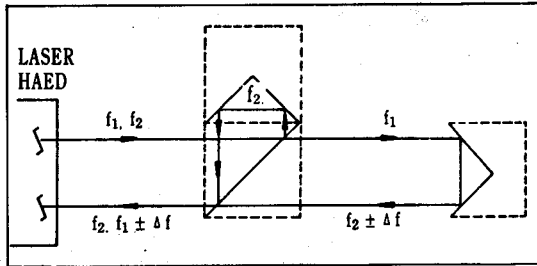


그림 3) 거리의 측정

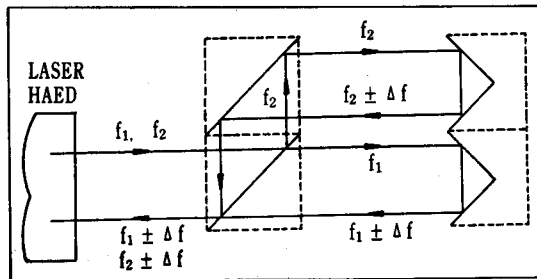


그림 4) 각도의 측정

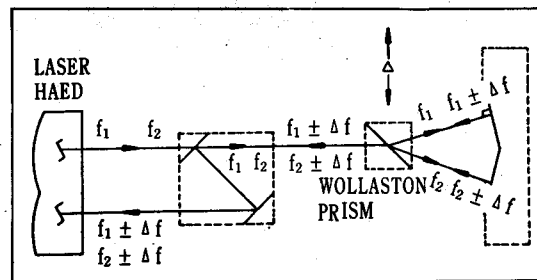


그림 5) 진직도의 측정

## 2.2. Speckle interferometry

그림 6에서와 같이 물체의 표면에 레이저빔을 조사한 후 반사되는 빛을 렌즈로 집광하여 image plane에 투영시키면 밝고, 어두운 점들의 집합체가 생긴다. 이런 현상을 speckle이라 하고 각종 변위측정 및 진동측정등에 이용된다[1].

그림 6에서  $M_2$ 가  $\Delta S$  만큼 이동하여 위상변화가  $\delta$ 만큼 변하는 경우 speckle pattern은  $F(x, y)$ 에서  $F(x, y) + F(x + \delta x, y)$ 로 된다.

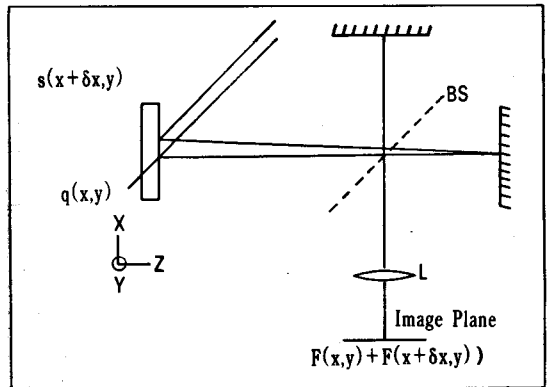


그림 6) Speckle correlation을 이용한 간섭계

즉 Speckle pattern의 강도는  $I(O) = I_1 + I_2 + 2 I_1 I_2 \cos\theta$ 에서  $I(\delta) = I_1 + I_2 + 2 I_1 I_2 \cos(\theta + \delta)$ 로 되며  $\delta = 2\pi n$ 인 경우 모든 speckle은 원래의 모습으로 되돌아간다. 즉 이러한 현상을 이용하여 변위를 측정할 수 있다.

그림 7은 평면 변형 (In-plane displacement)을 측정하는 기술을 설명한 것이다[5].

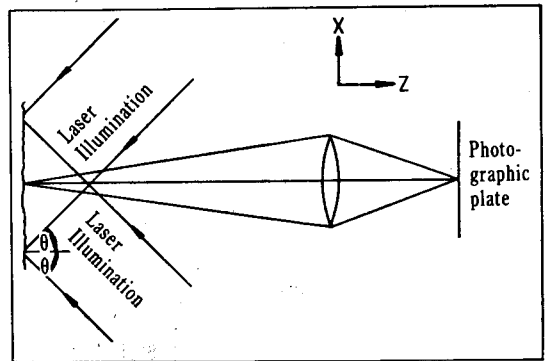


그림 7) 평면 변형을 측정하는 원리

경사각  $\theta$ 로 양쪽에서 레이저 광선을 조사시킨후 반사되는 광선의 간섭현상은 평면 변형 성분에 대해서만 작용을 하게 된다.

x방향의 변위를  $d_x$ 라 하면 레이저 광선의 경로차는  $2d_x \sin\theta$ 가 된다. 그러므로 간섭무늬가 생기는 조건은  $2d_x \sin\theta = n\lambda$  이고, 간섭무늬의 간격은  $\frac{\lambda}{2\sin\theta}$  가 된다. 즉 일정한 x방향의 변위들의 궤적을 나타내는 간섭무늬가 형성되게 된다.

그림 8은 Michelson interferometer 형식의 경사각도 측정용 간섭계의 구조를 나타낸 것이다. 평면의 변형성분을 (U, V, W)라 하면 전단변형  $\delta x$ 에 의한 speckle의 위상변화  $\Delta$ 는  $\Delta = \frac{2}{\lambda} (\sin\theta \frac{\partial U}{\partial X} + (1+\cos\theta) \frac{\partial W}{\partial X}) \cdot \delta x$  이고,  $\theta=0$ 이면 speckle pattern은  $\frac{\partial W}{\partial X}$  즉, 기울기를 표시하게 된다.

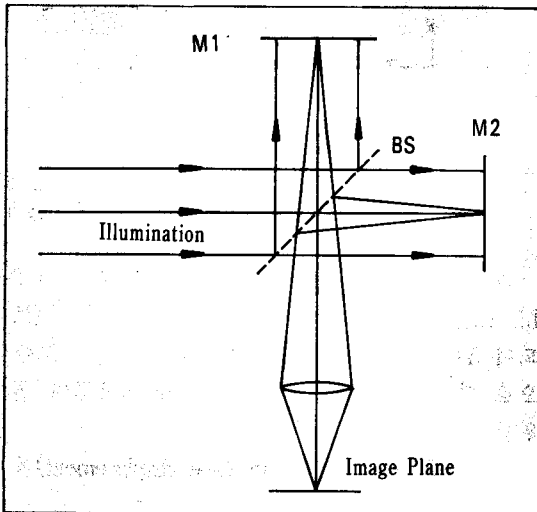


그림 8) Speckle Shearing Interferometer의 구조

마지막으로 Video camera 와 TV를 이용하여 진동을 측정하는 방법에 대해서 설명하기로 한다. 이 방법은 일명 ESPI (Electronic Speckle Interferometry)라고도 불리운다.

그림 9는 ESPI system의 개략도이다. 이러한 방법을 이용하면 nodal area 뿐만 아니라 진동의 최대값  $J_0^2 (\frac{4\pi d_z}{\lambda})$ 을 나타내는 간섭무늬도 표시 된다. ( $d_z$ 는 진동의 폭) ESPI system에서는 변형전의 형태를 자기테이프에 수록한 후, 물체가

변형했을 때 얻어지는 신호를 동기적으로 빼어 변위를 측정하는 데에도 사용된다.

이 시스템의 장점은

- ① 대형화면에서 실제시간 (real-time)으로 관찰이 가능하고
- ② TV 신호를 전기, 전자적으로 처리하는 것이 가능하고
- ③ 변형계산이 실제시간으로 행해질 수 있다. 그러나 단점으로는
- ④ 비용이 많이 들고, 기술적으로 high technology가 필요하게 되는 것을 들 수 있다.

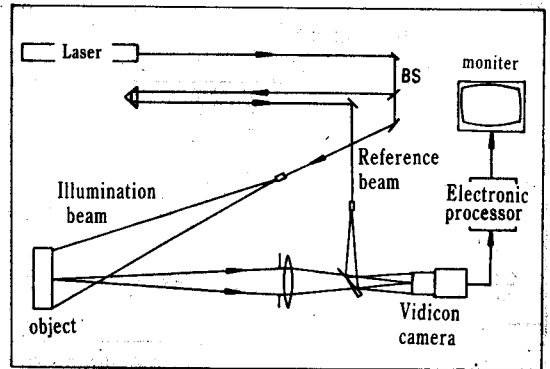


그림 9) 진동측정용 ESPI system 구조

그림 10은 구멍이 뚫어진 얇은 평판을 잡아당긴 경우 생기는 변형을 실제시간 (real-time)으로 관찰한 것이다. 여기에 생긴 간섭무늬는 장력의 방향으로 변형이 같은 점들의 집합이다.

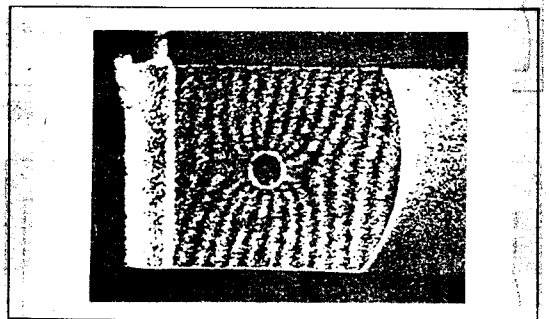


그림 10) 구멍이 뚫어진 평판에 장력을 가한 경우의 변형

### 2.3. Hologram Interferometry

1971년 물리학자인 Dennis Gabor가 Holography에

관한 연구로 노벨상을 받은 후 Holography는 진폭과 위상을 간단하게 동시에 기록하는 방법으로 각광을 받고 있다[6].

(Holo=완전한, graphy=그림 ; 희랍어원) 다음의 그림 11은 Holography를 이용하여 평면 변형률(In-plane displacement)을 측정하는 원리를 설명한 것이다.

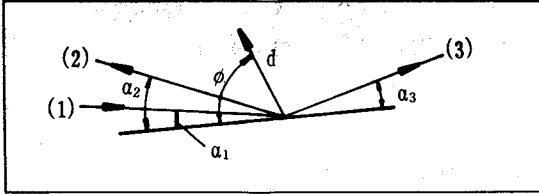


그림 11) 변형에 대응하는 레이저 광선의 기하학

어떤 평면과 각도  $\phi$ 의 방향으로 변형이  $d$  만큼 일어나는 경우 (2)의 방향에서 관찰하는 경우 레이저 광선의 경로차  $\Delta_{12}$ 는

$$\Delta_{12} = 2d \cos \left\{ \phi - \frac{1}{2} (\alpha_2 + \alpha_1) \right\} \cdot \cos \frac{1}{2} (\alpha_2 - \alpha_1)$$

여기서  $\alpha_1, \alpha_2$ 는 광선 (1), (2)와 평면과의 사이 각이다. 같은 방법으로 (3)의 방향에서 관찰하는 경우  $\Delta_{13} = 2d \sin \left\{ \phi + \frac{1}{2} (\alpha_1 - \alpha_3) \right\} \sin \frac{1}{2} (\alpha_1 + \alpha_3)$ 이다.

그리고 평면 변형량은  $d_0 = d \cos \phi$ 이고, 여기서  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 를 알 수 있다면 상기의 두식을 이용하여  $d_0$ 를 구할 수 있다.

우선  $\alpha_1 = \alpha_3$ 인 경우를 생각하면  $\Delta_{13} = 2d \sin \alpha_1 = N_{13}\lambda$ 이고

여기서  $N_{13}$ 는 (3)의 방향에서 관찰한 간섭무늬의 차수(order of number)이다. 그러므로  $d_0 = d \cos \phi = \frac{1}{\cos \alpha_2 + \cos \alpha_1} \left\{ \Delta_{12} - \frac{1}{2} \Delta_{13} \left( 1 + \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} \right) \right\}$ 이 된다.

상기의 식에서  $N_{12}, N_{13}$ 를 선후  $\Delta_{12}, \Delta_{13}$ 를 구하고  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 를 대입하면  $d_0$ 를 구할 수 있다. 그리고  $\alpha_2 = \alpha_3$ 인 경우를 살펴보면  $\Delta_{12} - \Delta_{13} = 2d \cos \phi \cos \alpha_2$ 이므로

$$d_0 = d \cos \phi = \frac{\Delta_{12} - \Delta_{13}}{2 \cos \alpha_2} \text{ 가 된다.}$$

즉 간섭무늬의 차수를 서로 빼고  $\alpha_2$ 를 대입 하

므로써  $d_0$ 를 구할 수 있다.

상기의 방법을 이용하여 실제로 변형을 측정하는 방법을 다음 그림 12에 설명하였다.

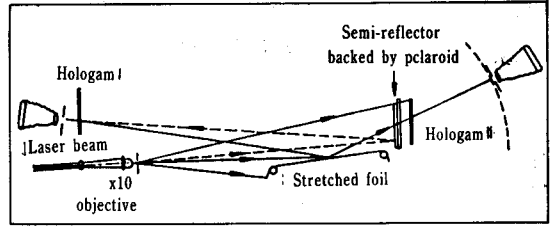


그림 12) Holography를 만들기 위한 광학시스템

그림 12와 같은 광학계에서 시편의 수직방향 변형성분은 hologram I과 II를 서로 빼는 경우(간섭무늬의 차수를 서로 빼는 경우) 없어지고, 평면 변형성분만이 간섭무늬에 영향을 주게 된다. 이런 방법으로 A. E. Ennos가 한 실험결과를 그림 13에 나타내었다.

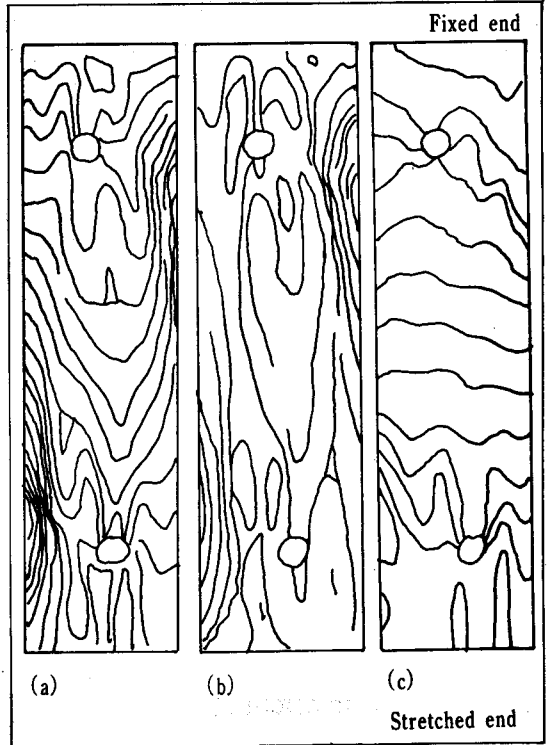


그림 13) Foil 평면에 있어서 간섭무늬의 형상

(a) hologram I, (b) hologram II, (c) hologram I에서 II를 빼어서 얻은 평면 변형성분에 해당하는 간섭무늬의 형상

이상으로 Holography 현상을 이용하여 변형을 측정하는 기술을 간단하게 설명하였고, Holography는 이뿐만 아니라 image processing 및 image correction등에 활용되어 전송사진 및 인공위성 촬영, 항공사진 등을 noise를 제거하여 원래형태로 재생하는데 활용되며, 특히 형상인식기능은 레이저 광학의 응용가운데서 중요한 부분이 되었으며, 전자계산기와 결합으로 광통신, 언어해석등과 연관되어 이용되어, 앞으로 mechanoptics (mechanics+optics)발전의 일익을 담당할 것으로 예상된다. 다음의 그림 14는 holography에 저장된 정보를 자동으로 읽어내는 시스템의 구조도이다.

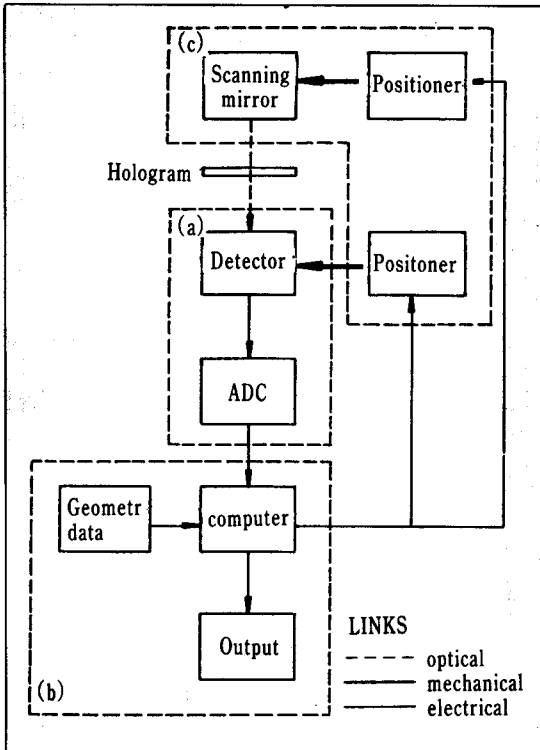


그림 14) Holography 자동 판독 장치의 block diagram

2.4. Fourier transform

그림 15와 같이 렌즈 앞에 진폭 물체 (amplitude object)를 놓고 평면파를 비추는 경우 빛의 분포를 분석해 보면 다음과 같다[8].

진폭물체를  $U(X)$ 라하고, 레이저 광선의 진폭을  $a$ 라하면 물체를 통과한 다음의 진폭은  $aU(X)$ 가 된다. 그러므로  $a=1$ 이라 하면 회절 위상은 0점을 통과하는 광선의 위상에 비하여  $x\sin\theta = X \frac{\xi}{f}$  만큼 빠르다.  $U(X)$  위의 모든 점에서 연속적으로 파동이 나가므로  $\xi$ 에서의 파동  $U(\xi)$ 는

$$U(\xi) = U(X)e^{i \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x\xi}{f}} dx$$

$$= U(X)e^{i \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x\xi}{f}} dx$$

여기서 물체의 크기는  $2x_0$ 이다.

그리고,  $(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\xi}{f}) \cdot x = \omega \cdot x$

$$\omega = 2\pi \frac{\xi}{\lambda f} = 2\pi \cdot v$$

$$U(W) = U(x)e^{-i\omega x} dx$$

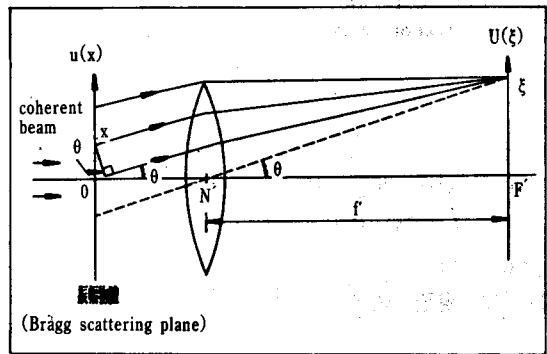


그림 15) 공간 주파수 분석 방법

상기의 원리를 이용하여 고체역학에서 널리 이용되는 응력 확대계수(stress intensity factor)  $K_I$ 를 구하는 방법을 소개하기로 한다[7]. 이 방법의 특징은 움직이지 않는, 고정된 하나의 광전소자(photo defector)를 이용하여 성장하고 있는, 움직이는 균열 선단의 응력 확대계수를 연속적으로 real-time 으로 측정하는 것이다.

이것은 성장하고 있는 균열선단이 레이저 광선이 조사되고 있는 focal plane 안에 존재하기만 하면, 모든 빛은 초점에 모아지는 현상을 이용한 광학기구로 system의 구조는 다음 그림 16과 같다.

평행광선을 시편에 비추후 통과한 광선을 렌

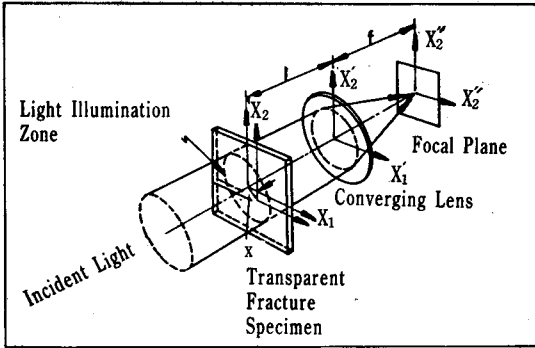


그림 16) Stress Intensity Factor 측정용 광학시스템의 구성도

즈를 이용하여 focal plane에 비춘다. 이 focal plane에서 균열의 slit에 의한 회절현상의 영향을 제거하고,  $K_I$ -dominant field의 영향에 의한 광선의 굴절만을 채집하기 위해 그림 17의 (e)와 같은 기구를 이용한다. Mapping을 이용하여 최종 광선의 강도  $I$ 를 구하면

$$I = \int_r \Omega ds = B K_I^{4/3}$$

여기서  $\Gamma$ 는 aperture(e)를 통과한 빛의 경계부분  $B$ 는 aperture에 의해 결정되는 shape factor.

상기의 식을 이용하여 균열전단의 운동에 관계없이 고정된 광전소자를 이용하여 빛의 강도를 측정하여 응력확대계수를 구할 수 있다.

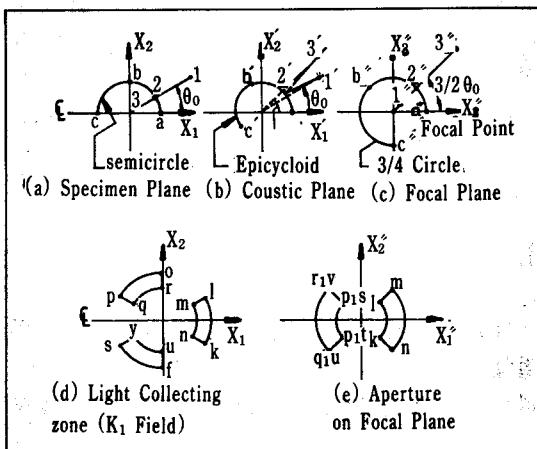


그림 17) Mode I crack의 optical-shadow mapping (a-b)과 focal plane mapping (a-c)과  $K_I$ -field의 최적 광학적 필터링

### 3. 결 론

레이저를 이용한 측정기술은 기계공학, 전자공학, 광학이 결합된 기술으로써 nano technology ( $10^9$ )를 추구하는 첨단기술의 발달과 더불어 그 활용도가 급격히 증대할 것으로 예상된다. 특히 이 분야는 반도체 가공 및 제조, 광통신, 원자로 등의 극한 환경에서의 측정, 각종 정밀계측, 형상인식등 응용분야가 다양한 고부가가치 산업이므로 집중적인 연구노력이 필요한 분야이다. 그리고 이 분야는 본질적으로 기계공학+전자공학+광학의 복합체로 협동적 연구가 필요하다. 또한 중소기업의 자동화, 또는, 간이 자동화에 그 활용도가 매우 큰 기술로써 출연연구소에서 종합적, 체계적으로 연구개발하여 업체에 기술이전을 하는 것이 바람직할 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] A. E. Ennos, "Coherent Optical Engineering" edited by F. T. Arecchi and V. Degiorgio, 129~149, 1977.
- [2] A. Sona, "Coherent Optical Engineering" edited by F. T. Arecchi and V. Degiorgio, 151~169, 1977.
- [3] S. Terentiev, "Coherent Optical Engineering" edited by F. T. Arecchi and V. Degiorgio, 197~206, 1977.
- [4] V. F. Bellani, "Coherent Optical Engineering" edited by F. T. Arecchi and V. Degiorgio, 237~243, 1977.
- [5] J. A. Leendertz, "Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect", J. of Physics E: Sci Instrum. Vol. 3, 214~218, 1970.
- [6] A. E. Ennos, "Measurement of In-plane Surface Strain by Hologram Interferometry", J. of Physics E: Sci Instrum. Vol. 1, 731~734, 1968.
- [7] K. S. Kim, "A Stress Intensity Factor Tracer", J. of Applied Mechanics, Vol. 107, 291~297, June 1985.
- [8] 이상수저, "파동광학", 159~162, 1989.
- [9] 윤경우, "신기공기술 work shop", 134~159, 1989.