기 술 해 설

LASER를 이용한 비접촉식 외경측정기

권영중* · 이상훈**
(*대한전선기술연구소 제5연구부장 **연구원)

차 례

1. 서 론
2. 비접촉식 외경측정기의 특징
3. 측정원리
4. 비접촉식외경 측정기의 구성
5. 회전다면경 주사광학계 이론
6. F-THETA LENS의 왜곡수차 특성
7. 측정오차
8. 맺음말

1. 서 론

최근 기계공업의 진보에 따라 자동측정 자동검사 자동계측 SYSTEM에 대한 요구가 높아지고 있읍니다. 그중 광학적 측정법은 비접촉 고속 고정밀 측정이 가능한 것으로 주목되고 있읍니다.

광학적 측정 장비인 비접촉식 외경 측정기는 선재, 봉재, PIPE 기계가공 등 많은 분야에서 원자재의 절감, 제품의 정밀도, 품질관리 등의 목적으로 그 중요성이 더욱 고조되고 있읍니다.

일본 유수의 비접촉식 외경 측정기 제조업체의 판매실적을 보면 85년도 기준으로 연간 약 700대 정도의 판매실적을 보였으며 그 수요는 해마다 증가하는 추세에 있읍니다.

국내에서의 외경측정기 시장도 현재는 전선업체 및 금속분야 등에만 국한되어 있으나 점차 MECHANICAL DEVICE, OA기기 및 민생용 전자기기 등에 사용범위가 확대되고 있읍니다.

본고에서는 대한전선 기술연구소에서 개발되어 양산되고 있는 비접촉식 외경 측정기인 LASER MICROTEK X 8700을 중심으로 비접촉식 외경 측정기의 특징, 측정원리, 구성, 광학계의 이론, 오차요인등에 관해서 논하기로 하겠읍니다.

2. 비접촉식 외경 측정기의 특징

비접촉식 외경 측정기는 측정물체의 길이를 비접촉으로측정 함으로 고온의 측정물, 연질재료, 접촉에 의하여 파괴 변형 오염이 문제가 되는 측정물, 이동하고 있는 측정물 등 종래의 방법으로는 측정이 곤란한 경우에도 용이하게 측정할 수 있으며 LASER BEAM으로 매초 고속 주사하여 측정함으로 측정중 측정물체가 이동하거나 진동하여도 측정이 용이하며 LASER BEAM을 측정 수단으로 하므로 고정밀 측정이 가능합니다.

비접촉식 외경 측정기는 측정 DATA가 전자적으로 처리됨으로 개인에 따른 측정오차가 없고 RS232C 등의 입출력을 이용하면 외부기기와 송수신이 가능하므로 원격 측정, COMPUTER CONTROL, 측정 DATA의 자동기록 및 FEED BACK CONTROL이 가능합니다.

3. 측정원리

비접촉식 외경 측정기는 LASER BEAM을 측정 대상물

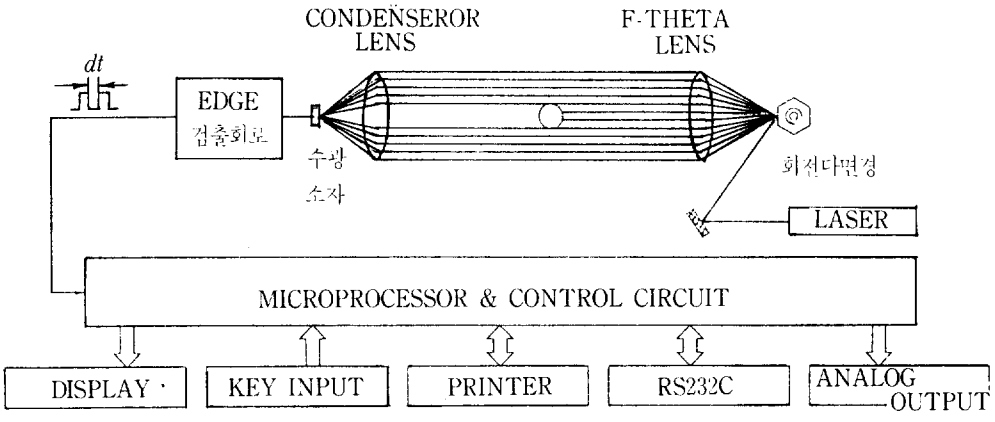


그림 1. 측정원리도

에 주사하여 측정 대상물에 의하여 차단된 LASER BEAM의 명암상태를 측정하는 것으로 측정대상물의 길이를 구하게 됩니다.

본고에서는 LASER BEAM 주사방식의 대표적인 예인 회전다면경을 이용한 방식에 대한 원리만을 논하기로 하겠읍니다.

그림 1에서와 같이 LASER GUN으로부터 나온 LASER BEAM은 등속으로 회전하는 MOTOR 회전축에 부착된 다면경(POLYGON MIRROR)으로 반사되어 회전주사광선으로 전환된 후 주사 LENS인 F-THETA LENS로 보내져서 평행 등속주사광선으로 됩니다. 이때 LASER BEAM의 경로와 회전 다면경이 일치하는 점은 언제나 F-THETA LENS의 촛점상에 있어야 합니다.

F-THETA LENS로 부터 투사된 평행 등속주사광선은 측정 대상물에 주사되어 측정 대상물의 크기에 비례하여 일정 시간간격동안 일부 차단되게 됩니다. 측정 대상물에 의하여 일부 차단된 평행 등속주사 광선은 CONDENSER LENS를 통하여 수광소자에 집속되게 됩니다.

수광소자로부터의 명암신호는 신호처리 회로로 보내어져 평행 등속주사광선이 측정 대상물에 의하여 차단된 시간의 시작단(START EDGE)과 끝단(END EDGE)을 검출하고(EDGE 검출), 검출된 EDGE와 EDGE사이를 CLOCK PULSE로 계수하여 길이로 환산하게 됩니다.

측정 대상물의 길이로 환산된 DATA는 CPU를 이용하여 연산처리되고 외부 INTERFACE 회로를 통하여 외부 제어기기와 DATA를 주고 받게 됩니다.

4. 비접촉식 외경측정기의 구성

비접촉식 외경 측정기는 LASER BEAM을 측정 대상물에 주사시키는 투광부(SCANNING PART)와 주사된 광속을 집속시켜 측정 대상물에 의하여 나타난 그림자의 명암을 측정하는 수광부(DETECTING PART), 측정된 명암신호에서 물체의 길이를 측정하고 여러개의 측정 DATA에서 평균 및 표준편차 등을 계산하여 주고 다른 생산설비의 제어장치에 정보를 줄 수 있는 기능을 가진 제어부(CONTROL PART)로 구성되어 있읍니다.

4.1. 투광부(SCANNING PART)

LASER BEAM을 BEAM SCANNER와 LENS를 이용하여 측정대상물에 투사시키는 부분으로 각부분은 다음과 같읍니다.

a). LASER GUN : LASER공진기는 저출력 HeNe LASER나 반도체 LASER가 사용되고 있는데 일반적으로 LASER POWER가 5%(PEAK TO PEAK)정도의 오차를 보이고 있어 이 오차를 상쇄시킬 수 있는 회로가 채택되고 있읍니다.

b). SCANNER : SCANNER는 LASER BEAM을 부채살 모양으로 펴주는 역할을 하는 부분으로 국내 개발 제품 및 대부분의 제품이 회전다면경(POLYGON MIRROR)을 이용한 방식을 채용하고 있으나 일부 제품에는 음차를 이용하여 LASER BEAM을 편향시키는 방식도 응용되고 있읍니다.

c) 주사LENS : 주사LENS는 SCANNED LASER B

EAM을 평행으로 주사시키는 특성이 있어야 합니다. 음차 편향식인 경우에는 ARCSINE LENS가 사용되고 회전다면경 주사방식인 경우에는 F-THETA LENS가 사용됩니다.

국내에서 개발된 제품에 채택되고 있는 회전다면경 주사방식에 사용되는 F-THETA LENS의 경우에는 다음의 두 가지 특성이 있읍니다. (1) LASER BEAM을 F-THETA LENS의 광축에 대하여 평행한 BEAM으로 하는데 통상의 LENS는 광축과 θ의 각도로 광선이 입사할 때 출사 위치는 TANθ에 비례하는데 반하여 F-THETA LENS는 출사위치가 θ에 비례합니다. 그결과 회전다면경의 등속회전(BEAM SCANNING)에 대응하여 LENS의 광축에 평행한 방향으로 등속주사되는 주사광선의 광속이 형성됩니다. (2) LASER BEAM을 F-THETA LENS의 촛점위치에서 집광 BEAM경이 최소가 되도록 합니다. (약 0.8㎜의 BEAM이 0.1－0.2㎜로 됩니다.) 이때 피측정물은 BEAM경이 최소가 되는 촛점위치 부근에 SET 시키는 것이 요망됩니다.

4. 2. 수광부(DETECTING PART)

투광부로부터 주사된 LASER BEAM이 측정대상물에 의하여 차단됨으로서 생기는 명암을 감지하여 전자적으로 처리가능한 신호로 바꾸어 주는 부분으로 그 주요구성은 다음과 같읍니다.

a) CONDENSER LENS:주사된 LASER BEAM을 PHOTO DIODE로 집속 시켜 주는 역할을 합니다. 이때 일반적으로 주사LENS와 CONDENSER LENS를 합한 전체광학계는 POWER가 ZERO인 촛점이 없는 광학계(A FOCAL SYSTEM)로 됩니다.

b) PHOTO DIODE:주사된 LASER BEAM이 측정대상물에 의하여 차단됨으로서 생기는 명암을 감지하는 소자로서 LASER BEAM의 주사속도를 고려하여 적절한 RESPONSE TIME을 갖는 소자이어야 합니다.

c) EDGE 검출회로 : PHOTO DIODE로 검출된 측정대상물에 의하여 발생한 LASER BEAM의 명암 시작단(START EDGE)과 끝단(END EDGE)을 검출하는 회로로 광전변환전압 BEAM경의 중심전압을 참조하는 방식과 광전변환전압파형을 2회 미분하는 방식 두 가지가 있으나 국내에서 개발된 제품에는 전자의 방식이 채택되고 있는데 이 방식은 투과광의 광전변환 신호전압의 반분전압치를 참조하는 것에 의하여 LASER BEAM이 피측정물을 횡으로 절단하는 순간을 검출합니다. 이것에 의하여 비접촉식 외경측정기의 분해능은 F-THETA LENS에 의해 집광된 BEAM경에 한정되지 않고 0.001㎜ ORDER가 될 수 있읍니다.

4.3. 제어부(CONTROL PART)

수광부로부터 측정대상물의 시작단과 끝단을 표시하는 신호를 전달받아 측정대상물의 길이를 측정하고 그 DATA로 필요한 작업을 행하는 제어부는 다음과같이 구성됩니다.

a) 계수회로 : 수광부로부터 검출된 두 EDGE(START EDGE, END EDGE)사이를 표준 CLOCK으로 동기시키고 측정대상물의 길이에 해당하는 동기된 두 EDGE 사이의 CLOCK수를 계수하여 DATA처리 회로로 전달합니다.

b) DATA처리 회로 : 계수된 CLOCK PULSE수를 길이로 변환 표시하고 CPU를 이용하여 반복측정 하는 경우 평균, 편차 등의 양을 연산 처리합니다. 뿐만아니라 실제 측정중에 생기는 LASER POWER의 변동, SCANNING MOTOR의 회전 속도의 불안정, OP AMP의 불안정등 계측시 나타나는 변동요인을 예상하여 측정의 통계적처리를 하기도 합니다.

c) 외부 INTERFACE회로 : 측정된 DATA를 측정대상물을 생산하고 있는 장비의 제어장치에 주거나 COMPUTER등 외부제어장치로 부터 DATA를 받읍니다.

5. 회전다면경 주사광학계 이론

비접촉식 외경 측정기의 핵심이 되는 투광부는 일종의 주사광학계 입니다. 회전다면경을 이용하는 주사광학계 에서 회전다면경의 회전 각속도를 w라 하면 회전다면경에서 반사되어 나오는 LASER BEAM과 F-THETA LENS의 광축이 이루는 각도는 Θ는

$$\theta = 2wt \qquad (1)$$

(우변의 2는 MIRROR에서의 반사를 고려한 것임)

가 됩니다.

그림 2에서 1은 OBJECT PLANE과 F-THETA LENS계의 물체측 주평면(H)까지의 거리이며, 1'은 F-THETA LENS계의 상측 주평면(H')과 IMAGE PLANE까지의 거리가 됩니다. 또한 s는 OBJECT PLANE과 편향기(회전다면경)까지의 거리이며 광학계의 원점을 F-THETA LENS의 주요점(H,H')을 기준으로 정의하면 s, 1 은 음의 부호로 1' 은 양의 부호를 가지게 됩니다.

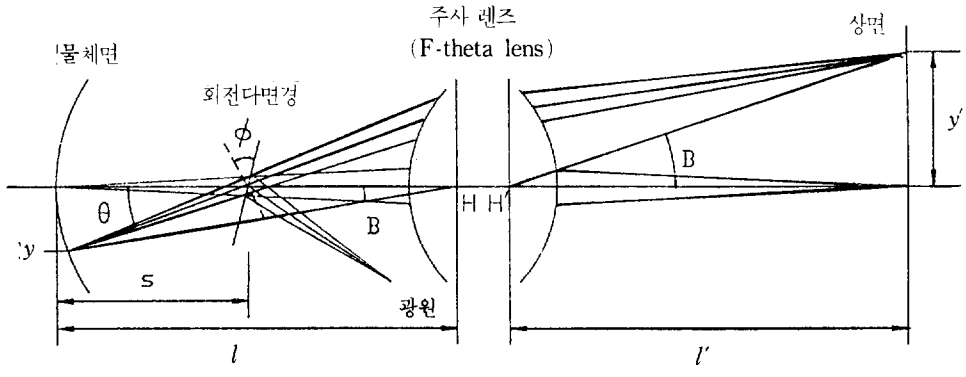


그림 2. 주사광학계

이때 F-THETA LENS의 이상적인 상높이 y' 은회전다면경이 회전함에 따라 시간에 따라서 등속으로 변화해야 함으로

$y' = kt$ (여기서 k 는 비례상수) (2)

가 되어야합니다. 그런데 (1)식에서

$t = \theta / 2w$ (3)

이므로 (2)식은

$y' = (k/2w)\ \theta$ (4)

으로 주어집니다.

그림 2에서 상점 y'의 OBJECT PLANE 상의 공액점 (CONJUGATE POINT) y는

$y = s * \tan\ \theta = l * \tan B$

의 관계가 있으므로

$\tan B = (s/l)\ \tan\ \theta$ (5)

로 주어집니다. 또한 일반적인 광학계의 상높이 y'은

$y' = l' * \tan B = (sl'/l)\ \tan\ \theta$ (6)

로 주어지는데 F-THETA LENS의 광학계의 상높이 y' 은 유효 주사각도에서 일반적인 광학계에서 θ 가 ZERO로 수렴할 경우처럼 설계가 되므로

$y' = (sl'/l)\ \theta$ (7)

가 됩니다. (4)식과 (7)식을 비교하면 비례상수 k는

$k = 2w\ (sl'/l)$

로 주어지게 됩니다.

평행 광선이 입사하는 경우 (광원으로 HeNe laser등을 사용하는 경우)에는 s와 1이 $-\infty$로 수렴 하고 l'은 F-THETA LENS의 유효촛점거리(EFFECTIVE FOCAL LENGTH)가 됩니다. 따라서 (7)식은

$y' = f * \theta$ (8)

(f는 F-THETA LENS의 유효촛점거리)

로 됩니다. 이 때문에 회전다면경을 편향기로 사용하는 주사 LENS는 F-THETA LENS라 한다.

(8)식을 잘 만족시키는 F-THETA LENS를주사광학계에 사용 하였을 경우 측정대상물의 길이를 D,계측용 CLOCK의 주파수를 F, 측정대상물이 평행 등속주사된 LASER BEAM이 차단된 시간을 T, T시간동안 계수된 CLOCK PULSE의 수를 N이라하고, 측정대상물의 START EDGE 일때 회전다면경의 각도가 $\theta 1$, END EDGE 일때 $\theta 2$ 라 하면 (8)식으로 부터

$D = y'_2 - y'_1 = f * (\theta 2 - \theta 1)$ (9)

이 되고 (1)식으로 부터

$\theta_2 - \theta_1 = 2wt$

$= 2w * (N/F)$ (10)

이므로 (9)식과 (10)식으로 부터 측정대상물의 길이 D는

$D = f * 2w * (N/F)$

으로 구해집니다.

6. F-THETA LENS의 왜곡 수차(DISTORTION) 특성

왜곡 수차란 주광선(광학계의 조리계 중심을 지나가는 광선)의 상높이(y'pr)가 그광학계의 이상적인 상높이 y'과 일치하지 않는 정도를 나타내는 광학계의 수차로서 수직적으로 표현하여 보면

$\text{Distortion}(\%) = (y'_{pr} - y')/y' * 100$ (11)

으로 나타납니다.

일반적인 LENS계의 이상적인 상높이인 y'은 (6) 식에서와 같이 주광선의 입사각도 Θ에 따라서 $\tan\Theta$에 비례하게 됩니다. 어떤 LENS계가 이상적으로 되기 위해서는 광학계가 결상을 할때 그 ERROR를 표시하는 모든 수차(ABE

RRATION)들이 ZERO가 되어야 하므로 왜곡수차도 ZERO가 되어야 합니다.

그러나 주사광학계용 LENS로 사용하는 F-THETA LENS는 주광선의 상높이 y'이 (7)식에서와 같이 주광선의 입사각도 θ에 비례하여야 하므로 (11)식에서 표현한 왜곡수차가 일반적인 LENS계에서 처럼 ZERO가 되어야 하는 것이 아니고 주사각도 θ에 따라 어떤 특정한 값들을 가져야 하는 것을 의미합니다.

본 절에서는 주사광학계용 LENS로 사용되는 F-THETA LENS가 (7)식을 만족시키기 위하여 SEIDEL 1,2차 수차 이론에서 왜곡 수차계수가 어떠한 값이 되어야 하는가를 알아보기로 하겠읍니다.

SEIDEL 1,2차 수차 이론에서 왜곡수차 이외의 다른수차가 모두 보정 되었다고하면 그림 2에서 상면에서의 상높이 y'은

$y' = l' \tan B\ (1 - (1/2)\, S_1 \tan^2 B - (1/8)\, S_2 \tan^4 B + \cdots)$

S1 : SEIDEL 1차 왜곡 수차계수

S2 : SEIDEL 2차 왜곡 수차계수

**SEIDEL수차론 참조

로 주어진다. (5)식을 이용하여 위식의 B를 θ로 바꾸어주면

$$y' = (Sl'/l)\ \tan\theta\ (1 - S_1/2)\ S/l)\ \tan^2\theta - (S_2/8)\ (S/l)^2 \tan\theta + \cdots) \quad (12)$$

이 얻어집니다.

주사광학계용 LENS로 사용되는 F-THETA LENS의 이상적인 상높이 y'은 (7)식으로 부터

$y' = (S1'/1)\ \theta$

이 식을 (12)식과 비교할 수 있게 하기 위하여 θ를 $\tan\theta$의 POWER SERIES로 전개하면

$$y' = (Sl'/l)\ (\tan\theta - (1/3)\ \tan^3\theta + (1/5)\ \tan^5\theta + \cdots\cdots) \quad (13)$$

가 됩니다. (12)식과 (13)식을 비교하면

$S_1 = (2/3)\ (l/S)^2$

$S_2 = -(8/5)\ (l/S)^4$

으로 주어짐을 알 수 있읍니다.

평행 광선이 입사하는 경우 (광원으로 HeNe laser등을 사용하는 경우)에는 s와 1이 $-\infty$로 수렴 하므로 (1/s)=1됩니다. 따라서 F-THETA LENS의 SEIDEL 1,2차 왜곡 수차계수 S1, S2는

$S_1 = 2/3 \qquad S_2 = -8/5$ 이 됩니다.

7. 측정오차

비접촉식 외경 측정기의 측정오차는 내부적 요인으로 주사광학계용 LENS (F-THETA LENS)의 성능, 회전다면경의 회전 각속도 불안정 및 LASER공진기의 BEAM POWER의 변동등 구성부품의 결함에 기인하는 것, LASER BEAM자체가 회절에 의하여 주사LENS의 촛점면인 측정면에서 광학계의 N.A.(NUMERICAL APERTURE)에 반비례하는 크기를 갖기 때문에 그에 따라 분해능한계가 존재한다는 것 과 각 광학부품간 ALINEMENT의 오차에 의한 것이 있고, 외부적 요인으로 피측정물의 형태, 경사, 진동, 표면의 오염 등 피측정물의 상태와 측정시의 온도변화, 측정시 측정자의 주의사항 불이행등 측정환경에 의한 것이 있읍니다.

본 절에서는 비접촉식 외경 측정기의 분해능(RESOLUTION)을 결정해주는 EDGE 검출(피 측정물의 START EDGE와 END EDGE의 검출)에 중요한 영향을 주는 LASER BEAM의 크기, LASER BEAM POWER의 불안정이 줄 수 있는 오차와 피측정물의 형태에 의하여 LAAER BEAM이 반사되어서 발생할수 있는 오차에 관하여 논하기로 하겠읍니다.

LASER GUN으로부터 나와 회전다면경으로 반사된 다음 주사LENS(F-THETA LENS)를 통과하여 피측정물에 평행등속으로 주사되고 있는 LASER BEAM은 주사LENS의 촛점(20cm정도를 기준)부근에서 0.1—0.2㎜정도 크기의 GAUSS분포를 합니다. (LASER MICROTEK X8700의 경우 0.15㎜)또한 LASER 공진기는 순간순간의 상태에 따라 LASER POWER의 PEAK 자체가 변화하기 때문에 이에따라 BEAM SIZE는 커지거나 작아지기도 합니다. 이러한 변화는 EDGE 검출회로에서 피측정물의 EDGE(START EDGE와 END-EDGE)를 검출해내는데 ERROR을 유발시킵니다.

그림 3는 LASER BEAM이 피 측정물의 EDGE를 지나갈 때 시간에 따른 수광부의 수광소자(PHOTO CELL)에 걸리는 전압을 표시한 그림입니다. 그림 3에서 처럼 LASER BEAM의 직경이 작은경우 d1과 큰경우 d2에 대하여 비교하여 보겠읍니다. d1, d2가 주사되어 피 측정물의 EDGE를 지나갈때 수광소자에 발생하는 전압은 그림에서 처럼 각각 E1, E2가 됩니다. 보통 비접촉식 외경 측정기는 그전압을 THRESHOLD LEVEL EO/2와 비교하여 일치 하는 위치가 BEAM의 1/2의 위치로 CLOCK PULSE의 CO-

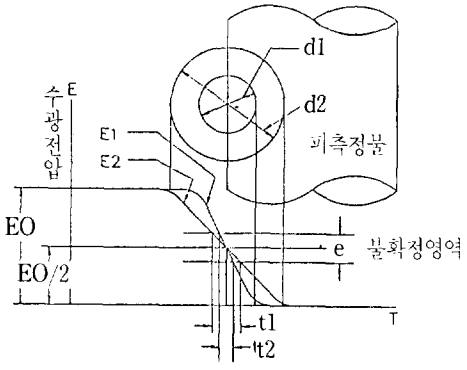


그림 3. Beam 직경에 따른 측정오차

UNTING을 개시하고 종료하는 구성으로 되어 있읍니다.

그런데 전압 비교회로의 THRESHOLD LEVEL EO/2는 일정한 크기의 불확정영역 e을 가지고 있기 때문에 그림 3에서 처럼 직경이 작은 d1의 직경을 같는 BEAM의 경우 불확정영역 e에 해당되는 시간 t1이 직경이 큰 d2 의 직경을 같는 BEAM일때의 시간 t2보다 짧게됩니다. 이 것은 COUNTING 되는 CLOCK PULSE수의 변동이 LASER BEAM의 직경이 작을수록 작아진다는 것 즉 측정치의 ERROR가 작아진다는 것을 의미합니다.

따라서 측정분해능을 높이기 위하여 LASER BEAM의 직경 d가 가장 작아지는 촛점 부근에서 측정하여 EDGE검출 회로에 있는 전압비교회로의 THRESHOLD LEVEL의 불확정 영역 e에 해당하는 시간을 줄이는 것이효과적입니다.

피측정물의 EDGE검출시 ERROR가 개입되는 또다른 원인으로 LASER POWER의 변동도 포함됩니다. 그림 4에서처럼 LASER BEAM POWER가 어떤 순간 E3로 떨어질 경우 수광소자에 발생되는 전압파형은 E0에서 E3로 됩니다. 그런대 EDGE검출회로에 있는 전압비교회로의 THRESHOLD LEVEL의 위치는 변화하지 않으므로 E3가 E0/2와 일치 되는 위치는 그림 4에서처럼 LASER BEAM의 중심을 표시하지 않고 te 정도의 시간만큼 빨라지게 됩니다. 이때 CLOCK PLUSE수를 COUNTING하는 계수회로는 te정도의 시간만큼 CLOCK수를 많이 COUNTING하게 되어 측정치는 실제보다 크게 출력이 됩니다. 마찬가지 방법으로 LASER BEAM의 POWER가 높아지는 경우에는 측정치는 이와 반대의 현상이 일어나 측정치는 실제보다 작게 출력이 됩니다. 이러한 오차요인의 해소방안으로 국내에서 개발된 LASER MICROTEK X8700의경우에는 LASER BEAM POWER의 변화를 회로상의 NOISE로 취급하여 일종의 NOISE제거회로로 제거하기도 하고 여러개의 측정 DATA를 평균하여 그평균치를 측정값으로 하는 것으로 이에 대처하고 있읍니다. 비접촉식 외경 측정기는 LASER BEAM을 측정도구로 하기 때문에 광특성상 피측정물의 EDGE 상태에 따라 오차가 발생할 수 있읍니다. 예를 들어 봉재(CYLINDRICAL OBJECT)의 EDGE를 측정할 경우 극히 미소한 범위에서라도 반사를 일으키기 때문에 측정치에 차가 생깁니다. 그림 5에서처럼 a 점까지 피측정물에 의하여 광선이 가려져야 하는데 표면반사가 있는 경우 b점에서도 LASER BEAM이 반사되어 수광소자로 들어갈 수 있읍니다. 따라서 그간의 거리 e는 오차로 출력하게 됩니다.

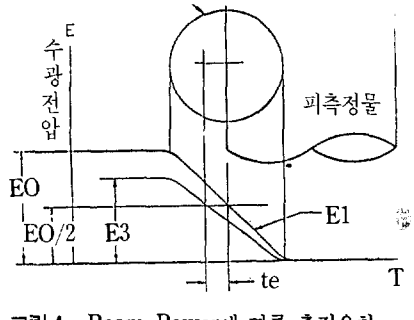


그림 4. Beam Power에 따른 측정오차

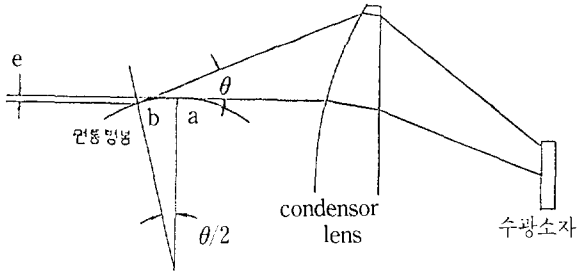


그림 5. 피측정물 표면에 의한 Beam의 반사

피측정물이 봉재인경우 표면반사에 따른 측정오차를 수식적으로 나타내보면 θ 를 수광소자에 입사될 수 있는 각도라 하고, D를 피측정물의 직경, e를 그 오차라하면,

$e = (D/2) - (D/2)\cos(\theta/2) = (D/2)(1-\cos(\theta/2))$

실제 읽혀지는 직경 D^0는 EDGE가 2개(START EDGE END EDGE)있으므로

$D^0 = D - 2e = D * \cos(\theta/2)$

가 됩니다. 따라서 피측정물의 실제 직경 D는

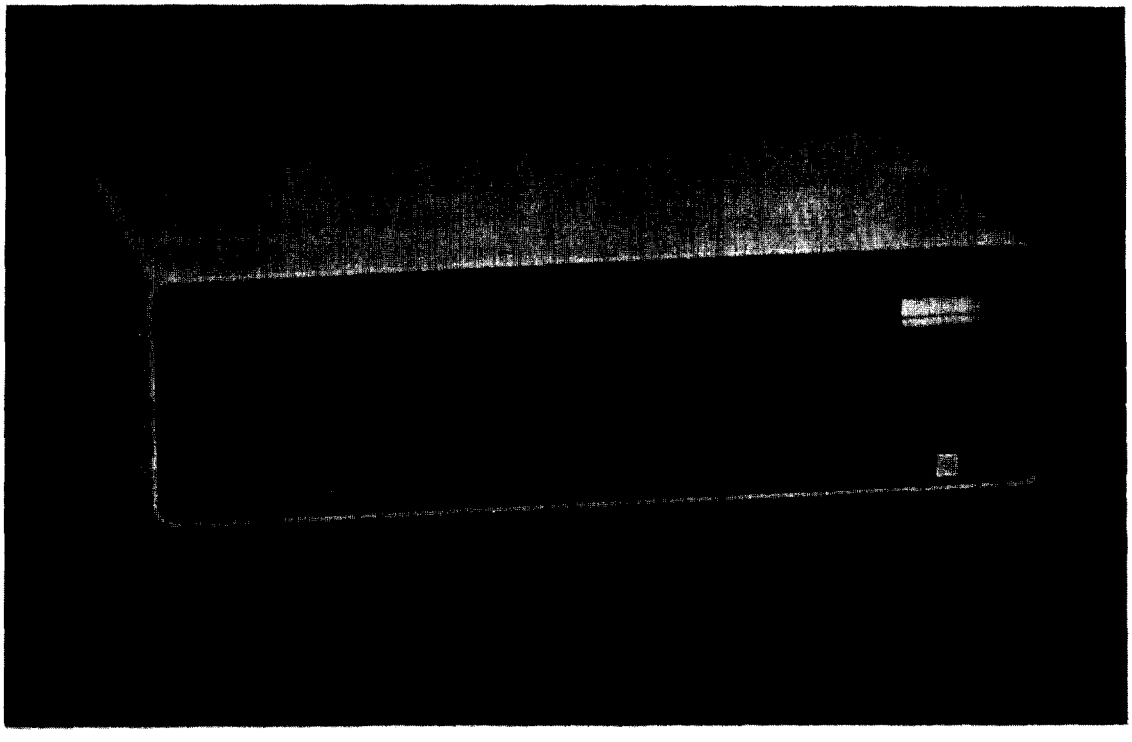
$D = D^0/\cos(\theta/2)$

로 됩니다. 그런데 θ는 피측정물의 직경에 관계없이 일정한 값이 될 수 있기때문에 (θ는 주로 CONDENSER LENS와 PHOTO CELL의 크기에 따라 결정됨) $1/\cos(\theta/2)$ 비례상수로 하면 그 오차를 교정하여 출력할 수가 있읍니다.

8. 맺음말

지금까지 비접촉식 외경 측정기의 특징, 측정원리, 구성, 광학계의 이론, 오차요인등에 관해서 논의 하였읍니다. 마지막으로 이 측정기가 현장에 적용될 때에 현장조건에 따라서 고려되어야 할 점에 관하여 논하겠읍니다.

예를 들면 비접촉식 외경 측정기는 측정수단으로 LASER BEAM을 사용하기 때문에 먼지가 무수히 떠다니는 공장의 생산LINE에 설치되어 사용될 경우에 그 먼지중 일부가 이 측정기의 LASER BEAM이 지나가는 경로상에 존재할 경우 (특히 우연히 피측정물의 EDGE와 일치될경우)에는 수광부의 수광소자에 도달하는 LASER BEAM의 POWER 에 변화가 생겨 측정오차가 발생하게 됩니다. 이러한 문제점은 CLEAN AIR LASER BEAM이 지나가는 경로에 불어주어 먼지가 접근을 못하게하여 제거 될수 있읍니다. 이와 같이 비접촉식 외경측정기의 우수한 성능을 활용하기 위해서 이 측정기가 가지고있는 특징에 의하여 현장 적용시 나타날수 있는 문제점들을 고려하여 적절히 제거해 준다면 이 측정기는 적용범위가 넓어 질수 있고 신속 정확하고 편리한 측정의 자동화를 이룩하는 수단으로서 공장자동화의 일부를 담당할 수 있을 것 입니다.

참 고 문 헌

1) 이상수, 기하광학, 교학연구사, (1985)
2) 이상수, 파동광학, 교학연구사, (1983)
3) H.H. Hopkins, Wave Theory of Aberration,Oxford at Clarendon Press, London, (1950)
4) 松居吉哉, レンズ設計法, 共立出版, 東京, (1972)
5) K. Minoura, 光學, Vol. 10, No. 5, 348, (1981)
6) 桑原義治, ヒンサ技術, Vol. 6, No. 2, 39(1986)
7) Mitutoyo MFG. Co., Laser Scan Micrometer Technical Report.
8) 대한전선(주), Laser Scan Micrometer用 광학계의 설계 및 제작 Technical Report