

유리구슬형 재귀반사기의 광학적 특성 해석

이 은 호

Analysis on Glass-Bead Type Retroreflector's Optical Characteristics

Lee Eun Ho

ABSTRACT

Retroreflector is different from other reflecting surfaces as it makes reflection in which radiation is returned in directions close to its incoming direction. Because of this characteristics, retroreflectors find many applications in traffic safety related areas. Retroreflectors are usually made using corner cubes, or partially coated glass beads. These glass beads can be made very small, so that they can be coated on sheets or mixed with paints. The design of glass type retroreflector depends on glass bead's shape and material, and its optical characteristics are related to the refractive index of glass. In this paper, a method of analyzing glass bead type retroreflector's optical characteristics with respect to shape and optical property of the glass, is presented. First, the coefficient of retroreflection, which is a measure of retroreflector's optical characteristics, is derived analytically using geometrical optics method. And the result is plotted using numerical methods. The results show good match with those obtained experimentally, which were supplied from a commercial retroreflector manufacturer.

1. 서 론

재귀반사(retroreflection)는 흔히 접할 수 있는 정반사(specular reflection)나 난반사(diffuse reflection)와는 달리 반사광의 대부분이 입사광과 같은 방향으로 발생하는 광학적 특성을 갖고 있다.(Fig.1 참조)[1,2,3,4] 재귀반사특성을 갖는 반사체를 재귀반사기(retroreflector)라고 하며 재귀반사에서는 관측자와 광원, 그리고 재귀반사기가 이루는 각도가 작아질수록 관측자에게 도달하는 빛 에너지의 양이 급격히 증가하게 된다. 이같은 특성은 교통안전 표시에서 자동차의 전조등으로 조명된 표지판이 운전자에게 다른 물체보다 훨씬 밝게 보일 수 있게 하며 도로의 차선, 야간작업자의 의복, 기타 야간에 멀리서도 쉽게 보여야 할 필

요가 있는 물체의 도장에 재귀반사기를 사용하게 한다. 근래에 들어서는 머신 비전 분야에서 많은 물체가 섞여있는 중에서도 원하는 표적의 식별을 쉽게 하거나 처리 속도를 빠르게 하려는 목적을 위해 재귀반사기가 이용되고 있다 [5,6,7,8]

재귀반사를 발생시키는 물체는 다른 반사에서의 경우와는 달리 자연상태에서 흔히 찾기 어려우며 인공적으로 제조된다. 대표적인 재귀반사기의 형태는 corner cube mirror로서 삼차원적으로 서로 직각을 이루는 세개의 반사면으로 구성된다.(Fig.2 참조) 대부분의 경우 반사면으로는 완전 내부반사(total internal reflection, TIR)면이 이용되며 유리나 플라스틱 등을 이용하여 제작된다. corner cube형 재귀반사기는 정밀한 재귀반사를 요구하는 분야

* 서울대학교 제어계측신기술연구소

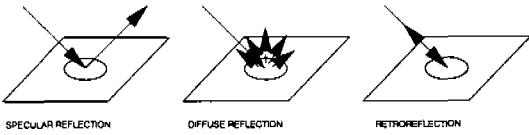


Fig. 1 TYPES OF REFLECTION

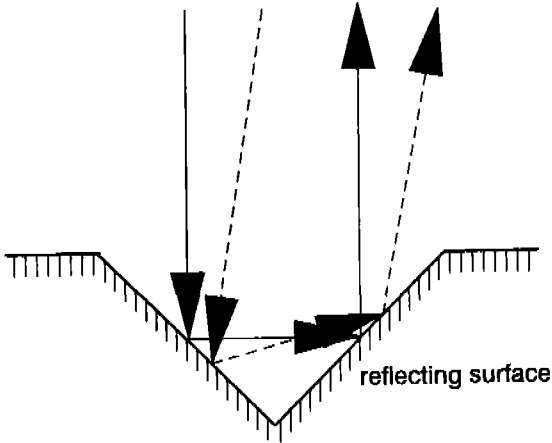


Fig. 2 CORNER CUBE TYPE RETROREFLECTOR

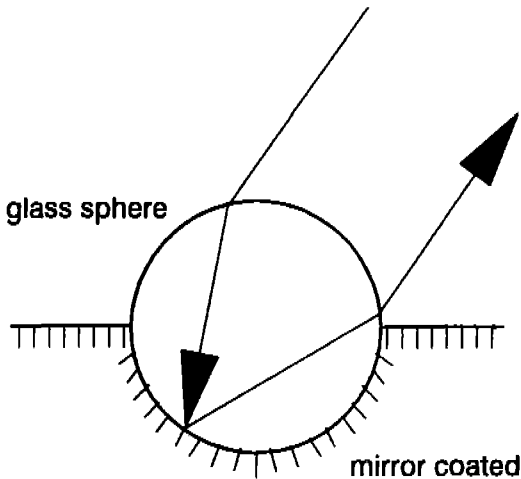


Fig. 3 GLASS BEAD TYPE RETROREFLECTOR

(예를 들어 간섭 이용 위치 측정장치 등)이거나 높은 재귀 반사효율을 요구하는 경우 등에서 사용된다. 정밀 측정분야에서는 재귀반사기를 사용할 경우 정밀한 정렬작업의 수고를 덜 목적으로 많이 사용하며 주로 3차원 직각 프리즘의 내부반사를 이용한 것이 쓰인다. 높은 재귀반사효율을 원하는 교통안전 분야에서는 정밀 금형을 이용하여 미세한 corner cube 형태를 플라스틱으로 성형해낸 후 자전거 등에서 사용되는 반사판이나 표지판에 접착하는 시트 형태로서 제작하여 사용한다.

다른 한가지 제작 방식에서는 유리구슬에서의 빛의 굴절을 이용한다.(Fig.3 참조) 유리구슬의 반쪽 표면은 거울면으로 처리되어 입사광이 유리구슬표면에서 굴절되고 반대편 내부면에서 반사된 후 유리구슬 밖으로 나갈 때 다시 한번 굴절되어 입사광과 같은 방향으로 나갈 수 있게 되어 있다. 유리구슬은 매우 작게(직경 <math>< 100 \mu\text{m}</math>) 제작될 수 있으며 이 경우 종이표면에 부착한 후 시트 형태로 사용되거나 페인트 등에 섞은 후 도포하여 사용한다. 대표적인 제품에는 3M에서 생산되는 Scotchlite가 있다[8.9]

유리구슬 형태 재귀반사기(glass bead type retroreflector)를 제작하려면 그 광학적 성능을 해석할 수 있는 능력이 필요하다. 지금까지 유리구슬형 재귀반사기의 광학적 특성은 실험에 의한 자료에만 기초하여 연구되어 왔으나 본 논문에서는 이를 해석적으로 구하는 방법을 제안하고 이를 이용하여 소재 유리의 굴절율이 성능에 미치는 영향을 구하였다. 해석은 기하학적 광학식(geometric optics)을 사용하여 이루어 졌으며 표면에서의 반사로 인한 손실을 고려하였고 거울면 코팅을 해야하는 이유에 대하여도 고찰하였다. 결과를 재귀반사계수로서 나타내었으며 이를 유리의 굴절율과 관측각의 함수로 구하였다. 마지막으로 해석적으로 구한 결과를 실험 데이터와 비교하여 그 타당성을 입증하였다.

2. 본 론

이번 장에서는 재귀반사 특성의 표시방법에 대하여 서술한 후 유리구슬형 재귀반사기의 광학적특성을 해석적 방법으로 구하고 그 결과를 실험치와 비교한다.

2. 1 재귀반사 특성의 표시 방법

재귀반사의 성능은 재귀반사기에 가해진 빛의 에너지와

관측점에서 측정된 반사광의 에너지사이의 비율로 표시하며 여기에 사용되는 계수로는 다음과 같은 것이 있다[1,2,3,4]

- 1) 광도계수(光度係數), coefficient of luminous intensity, R (또는 specific intensity)
retroreflector 에서 관측점 방향으로의 luminous intensity(I , watts/sr)를 retroreflector 표면에서 입사광선에 수직인 평면에서의 illuminance(E_{\perp} , watts/m²) 로 나눈 값이다.

$$\left(\frac{\text{watts/sr}}{\text{watts/m}^2}, \text{ 또는 } \text{cd} \cdot \text{lx}^{-1} \right)$$

$$R = \frac{I}{E_{\perp}} \quad (1)$$

- 2) 재귀반사계수, coefficient of retroreflection, R' (또는 specific intensity per unit area)
coefficient of luminous intensity R 을 재귀반사표면의 넓이 A 로 나눈 값이다. (sr^{-1} 또는 $\text{cd} \cdot \text{lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)표면의 광학특성을 표시하며 특히 sheet형태의 retroreflector의 특성표시에 사용된다.

$$R' = \frac{R}{A} = \frac{I/E_{\perp}}{A} \quad (2)$$

그리고 재귀반사 성능을 설명하는데 사용되는 변수들로서 관측각(observation angle), 입사각(entrance angle)등이 있으며 이들의 기하학적 의미는 Fig.4에 나타난 바와 같다.

2. 2 유리구슬형 재귀반사기의 광학적 성능 해석

2. 2. 1 거울면처리 해석

본 절에서는 유리구슬형 재귀반사기의 반쪽면이 반드시 거울면 처리되어야 하는 이유에 대하여 해석한다. 이를 위하여 유리구슬형 재귀반사기를 Fig.5 에서와 같이 2차원으로 모델링 한다. 입사광선은 Z축과 평행하게 내려와서 A 점에서 유리구슬 표면과 만나며 여기서 굴절된 빛이 밑의 반사면에 닿는 위치를B, 반사광이 다시 유리구슬 표면과 만나 굴절을 일으킨 후 밖으로 나가는 점을 C라고 가정한다. 관측점이 반사광선 방향에 존재한다고 가정하면 반사

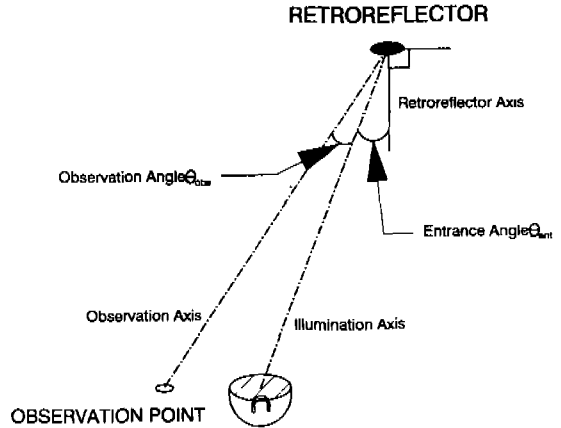


Fig. 4 ELEMENTS IN THE RETROREFLECTION ANALYSIS

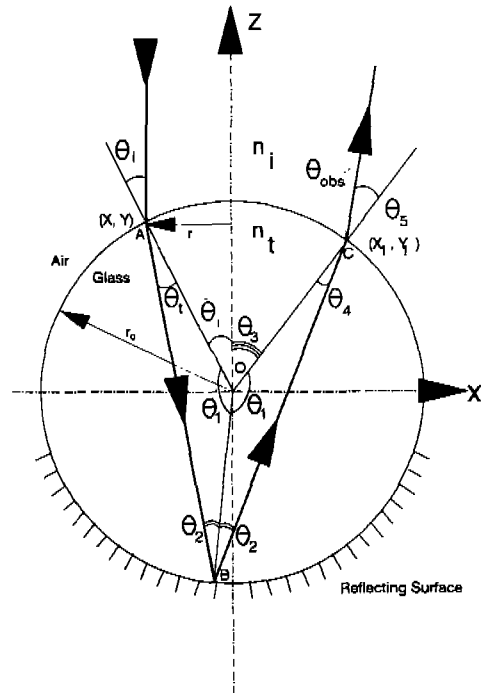


Fig. 5 GLASS BEAD RETROREFLECTOR

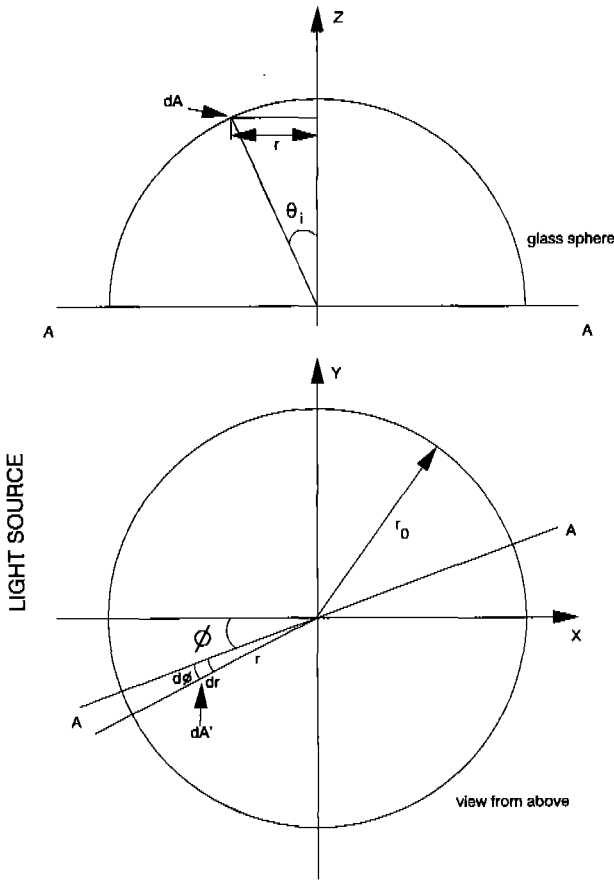


Fig. 6 SPHERICAL RETROREFLECTOR

광선이 Z축과 이루는 각도가 관측각(θ_{obs} , observation angle)이 된다. 공기의 굴절율을 n_i , 유리의 굴절율을 n_t 라고 하면 A점에서 빛의 굴절에 대한 Snell의 법칙[10]에 의해 다음 관계가 주어진다.

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (3)$$

삼각형 OAB가 이등변삼각형이라는 기하학적 관계를 이용하면 $\theta_2 = \theta_t$ 가 얻어지며, 바닥의 반사면에서 정반사가 일어나는 것과 따라서 삼각형 OAB와 삼각형 OBC가 합동이라는 결과를 이용하면 다음 결과들을 얻는다.

$$\theta_1 = \pi - 2\theta_t \quad (4)$$

$$\theta_4 = \theta_2 = \theta_t \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \theta_3 &= 2\pi - \theta_i - 2\theta_1 \\ &= 2\pi - \theta_i - 2(\pi - 2\theta_t) \\ &= 4\theta_t - \theta_i \end{aligned} \quad (6)$$

또한 점 C에서 굴절이 일어나므로

$$n_i \sin \theta_4 = n_t \sin \theta_5 \quad (7)$$

따라서 관측각 θ_{obs} 는 다음과 같이 구하여 진다.

$$\begin{aligned} \theta_{obs} &= \theta_3 - \theta_5 \\ &= 4\theta_t - \theta_i - \theta_5 \\ &= 4\theta_t - 2\theta_i \end{aligned} \quad (8)$$

완전내부반사가 일어나려면 비사면에서의 입사각 θ_2 가 다음과 같이 주어지는 임계각도(critical angle) θ_c 보다 커야 한다[10].

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_i}{n_t} \quad (10)$$

이 조건과 식(3)의 결과를 이용하면 완전 내부반사가 일어날 때의 입사각 $(\theta_i)_{critical}$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} (\theta_i)_{critical} &= \sin^{-1} \left(\frac{n_t}{n_i} \sin \theta_c \right) \\ &= \sin^{-1} \left(\frac{n_t}{n_i} \cdot \frac{n_i}{n_t} \right) \\ &= \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

이로부터, 완전 내부반사가 일어나려면 입사각이 소재 유리의 굴절율에 무관하게 90도 보다 커야하며, Fig.4에서 볼 수 있듯이 입사각은 항상 90도 보다 작을 수 밖에 없으므로 완전내부반사는 불가능하다는 것을 알 수 있다. 따라서 유리구슬형 재귀반사기는 항상 아랫면이 거울면으로 처리되어야 한다.

2. 2. 2 재귀반사계수의 기하학적 광학을 이용한 해석

기하학적 광학(geometric optics)방법을 이용하여 재귀반사계수를 해석적으로 구하기 위하여 Fig.6에서와 같이 유리구슬형 재귀반사기 위로 Z축에 평행하게 조명이 내려온다고 가정한다. 빛이 대기에서 유리구슬 속으로 들어가거나 반대로 나올 때에는 에너지를 표면에서의 반사 때문에 약간 잃게 되며 이 때의 투과율 T와 반사율 R은 다음 식으로 주어진다[10].

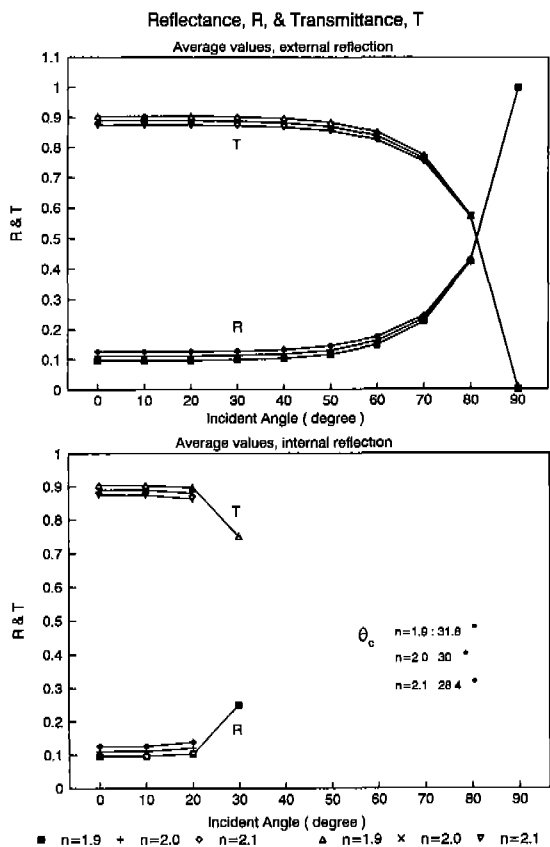


Fig. 7 REFLECTANCE AND TRANSMITTANCE

$$\text{TE mode : } r = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad (11)$$

$$\text{TM mode : } r = \frac{n^2 \cos \theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}{n^2 \cos \theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad (12)$$

$$R = r^2 \quad (13)$$

$$T = 1 - R \quad (14)$$

where

$$n = \frac{n_2}{n_1}$$

n_1 = refractive index before the boundary layer

n_2 = refractive index after the boundary layer

본 연구에서는 TE mode와 TM mode의 평균값을 이용하였다. 이 결과를 이용하여 Fig.7에 투과율과 반사율을 소재유리의 굴절율에 대하여 도시하였다. 여기서 유리구슬의

바깥쪽으로 빛이 도달 할 수록 입사각이 커져서 투과율이 급격히 떨어짐을 알 수 있으며 이로부터 유리구슬형 재귀 반사기의 유효면적(재귀반사가 일어나는 면적)은 유리구슬의 중심부분에 집중된다는 것을 예측할 수 있다.

유리구슬형 재귀반사기의 광학적 성능을 해석하기 위하여 재귀반사계수(R' coefficient of retroreflection)를 구하는 과정은 다음과 같다[11]. 우선 Fig.6에서 유리구슬 표면위의 미세면적 dA 위로 도달하는 빛이 재귀반사되어 Fig.8에 표시된 관측공간에서 반구표면 위의 dA'' 로 도달한다고 가정한다. 이 경우 dA 위의 빛의 양은 dA 를 X-Y 평면위로 투사시킨 dA' 위에 도달하는 양과 같으며, dA'' 에서의 빛의 양은 dA 에서의 빛의 양에 유리구슬에서의 투과

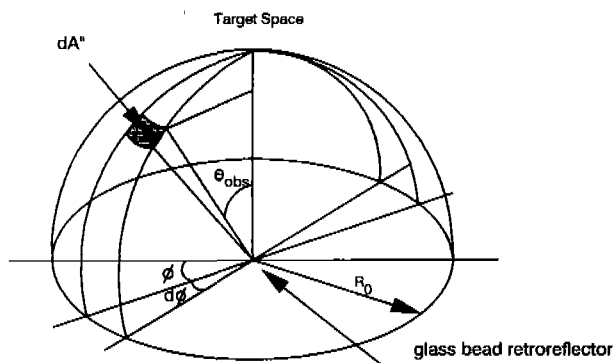


Fig. 8 SMALL AREA dA'' IN TARGET SPACE

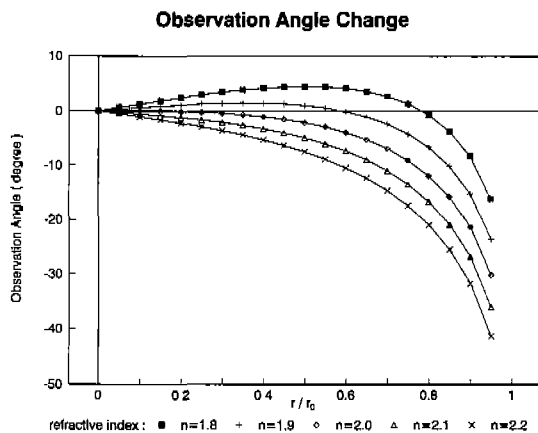


Fig. 9 OBSERVATION ANGLE CHANGE BY VARIOUS REFRACTIVE INDICES

을 두번(유리구슬로 들어갈 때와 나올 때) 곱한 양과 같으므로 다음 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \text{Light energy on } dA'' &= T_{in} \cdot T_{out} \cdot \text{Light energy} \\ \text{on } dA' &= T_{in} \cdot T_{out} \cdot \text{Light energy on } dA \\ d\phi'' &= T_{in} \cdot T_{out} \cdot d\phi' = T_{in} \cdot T_{out} \cdot d\phi \quad (15) \end{aligned}$$

여기서

T_{in} : 빛이 유리구슬로 들어갈 때의 투과율

T_{out} : 빛이 유리구슬로부터 나올 때의 투과율

$d\phi''$, $d\phi'$, $d\phi$: 각각 dA'' , dA' , dA 에서의 빛의 강도

식 (11), (12)에서의 같이 투과율은 굴절율과 입사각의 함수로 표시할 수 있으므로 T_{in} 과 T_{out} 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{in} &= T_{in}(n_i, \theta_i) \\ T_{out} &= T_{out}(n_t, \theta_t) \end{aligned}$$

그리고 미세면적 dA'' , dA' 는 Fig.6과 Fig.8에서 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} dA' &= r \cdot dr \cdot d\phi \\ dA'' &= R_0 \sin \theta_{obs} d\phi \cdot R_0 d\theta_{obs} \\ &= R_0^2 \sin \theta_{obs} \cdot d\phi d\theta_{obs} \quad (17) \end{aligned}$$

여기서 $\theta_{obs} = |4\theta_t - 2\theta_i| = \text{observation angle}$

그리고 θ_i 와 θ_t 는 Fig.5에서의 기하학적 관계와 식 (3)으로 부터 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \theta_i &= \sin^{-1} \frac{r}{r_0} \quad (18) \\ \theta_t &= \sin^{-1} \frac{n_i}{n_t} \cdot \frac{r}{r_0} \end{aligned}$$

식 (1)에서 광도계수(光度係數, coefficient of luminous intensity, R)은 $R = \frac{I}{E_{\perp}}$ 로 정의되었다.

여기서 I (intensity)는 다음과 같이 정의된다[12].

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (19)$$

여기서 ϕ : light power, Ω : solid angle

그리고 미소면적 dA' 위의 빛의 강도는 다음 식으로 표시

된다.

$$\begin{aligned} (d\phi)_{dA'} &= E_{\perp} \cdot dA' \\ &= E_{\perp} \cdot r dr d\phi \\ &= \frac{1}{T_{in} \cdot T_{out}} (d\phi)_{dA''} \quad (20) \end{aligned}$$

관측공간 위의 면적 dA'' 과 유리구슬이 이루는 solid angle $d\Omega''$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d\Omega'' &= \frac{dA''}{R_0^2} \\ &= \frac{R_0^2 \sin \theta_{obs} \cdot d\phi d\theta_{obs}}{R_0^2} \\ &= \sin \theta_{obs} \cdot d\phi d\theta_{obs} \quad (21) \end{aligned}$$

식 (17), (18)과 (19)로부터 관측 공간에서 관찰되는 유리구슬로부터의 광량을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I &= \frac{(d\phi)_{dA'}}{d\Omega''} \\ &= \frac{T_{in} \cdot T_{out} \cdot E_{\perp} \cdot r dr d\phi}{\sin \theta_{obs} \cdot d\phi d\theta_{obs}} \\ &= T_{in} \cdot T_{out} \cdot \frac{E_{\perp}}{\sin \theta_{obs}} \cdot \frac{r dr}{d\theta_{obs}} \quad (22) \end{aligned}$$

이를 식 (1)의 정의에 대입하면 유리구슬형 재귀반사기의 광도계수 R을 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R &= \frac{I}{E_{\perp}} \\ &= T_{in} \cdot T_{out} \cdot \frac{r}{\sin \theta_{obs}} \cdot \frac{dr}{d\theta_{obs}} \quad (23) \end{aligned}$$

이 식은 유리구슬형 재귀반사기의 광도계수(coefficient of luminous intensity) R을 해석적 방법으로 구한 결과이다. 여기서 $\frac{dr}{d\theta_{obs}}$ 는 소재유리의 굴절율과 유리구슬의

크기에 대한 함수로 표시될 수 있으며 이를 위하여 θ_{obs} 를 식 (18)을 식 (6)에 대입하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\theta_{obs} = 4 \sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_t} \cdot \frac{r}{r_0} \right) - 2 \sin^{-1} \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (24)$$

Fig.9는 θ_{obs} 를 여러가지의 소재유리 굴절율에 대하여 도시한 결과이다. 이 그림에서 소재 유리의 굴절율이 2.0

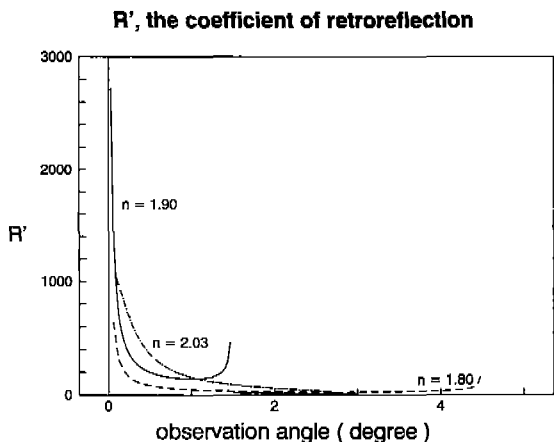


Fig. 10 R' CURVE BY DIFFERENT REFRACTIVE INDICES

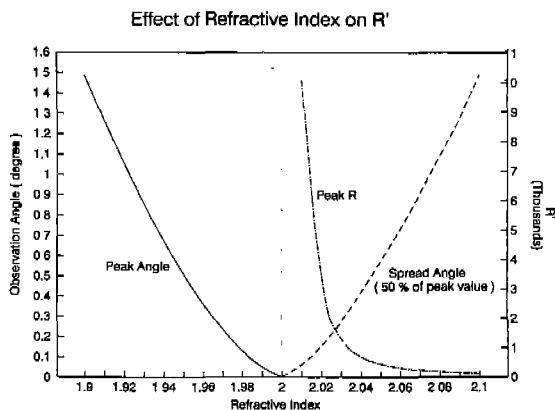


Fig. 11 EFFECT OF REFRACTIVE INDEX ON R' CURVE

보다 작아지면 $\frac{dr}{d\theta_{obs}}$ 의 값이 한변은 유한한 값에서 무

한대로 발산함을 알 수 있다. 식 (24)에서 $\frac{dr}{d\theta_{obs}}$ 를 구하

면 그 결과는 다음과 같다.

$$\frac{dr}{d\theta_{obs}} = \left(\frac{4}{\sqrt{\left(\frac{n_t}{n_i} r_0\right)^2 - r^2}} - \frac{2}{\sqrt{r_0^2 - r^2}} \right)^{-1} \quad (25)$$

이 식을 식(23)에 대입하면 광도계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

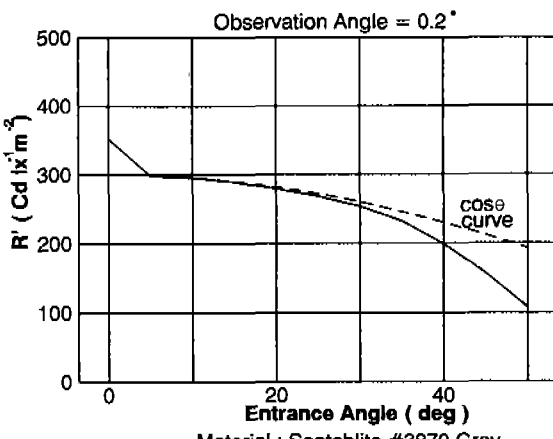
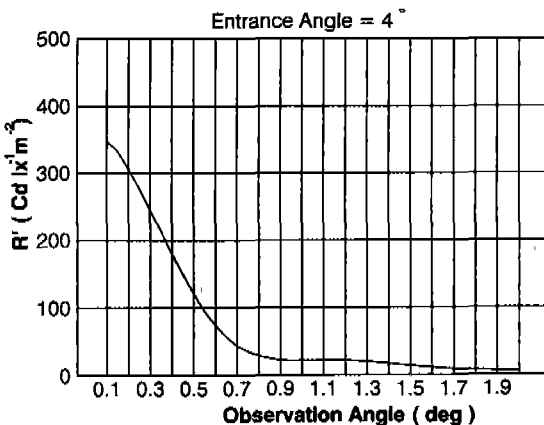


Fig. 12 COEFFICIENT OF RETROREFLECTION CHANGE DUE TO OBSERVATION ANGLE AND ENTRANCE ANGLE
Material : Scotchlite #3870 Grey

$$R = T_{in} \cdot T_{out} \cdot \frac{r}{\sin \theta_{obs}}$$

$$\left(\frac{4}{\sqrt{\left(\frac{n_t}{n_i} r_0\right)^2 - r^2}} - \frac{2}{\sqrt{r_0^2 - r^2}} \right)^{-1} \quad (27)$$

2. 3 결과 및 실험 데이터와의 비교

식 (27)의 R'을 관측각 θ_{obs} 과 소재유리의 굴절율 n_t 에 대하여 도시한 결과를 Fig.10에 도시하였다. 굴절율이 2.0보다 작을 경우 R'의 값이 무한대로 발산하는 현상은 식 (25)의 조건으로부터 관측각 θ_{obs} 이 다음 조건을 만족

시킬 때 발생한다.

$$\theta_{obs} = 4 \sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_t} \frac{r}{r_0} \right) - 2 \sin^{-1} \left(\frac{r}{r_0} \right)$$

when $\frac{r}{r_v} = \sqrt{\frac{4-n^2}{3}}$ and $n = \frac{n_t}{n_i}$ (28)

그리고 굴절율이 2.0 일 때에는 R' 의 값이 관측각이 0도 일 때 무한대로 발산하게 되며, 굴절율이 2.0 보다 커지면 급격하게 최대값이 감소하고 관측각의 변화에 따른 R' 값의 피침현상이 커짐을 알 수 있다. 이 결과를 Fig.11에 다시 도시하였다. 여기서 굴절율이 2.0보다 작은 구간에서의 peak angle은 R' 이 무한대로 발산할 때의 관측각이다. 그리고 굴절율이 2.0보다 큰 구간에서는 R' 의 최대값이 감소하는 현상과 피침현상이 커지는 것을 알 수 있다. 실제에 있어서는 유리구슬의 불완전성으로 인하여 R' 의 값을 무한대로 얻을 수는 없다.

상업적으로 판매되는 유리구슬형 재귀반사기의 광학적 성능은 제조회사에서 실험으로 구한 데이터로부터 알아보았다. 1943년에 미국 3M에서 출원한 미국 특허 2,326,634 [9]에는 유리구슬형 재귀반사기의 제작방법에 대하여 서술되어 있고 몇몇 제품에 대한 R' 값의 실험 데이터를 제시하였다. Fig.12에는 동일회사에서 제공한 Scotchlite™ #3870의 R' 을 관측각에 대하여 나타내었다.[13]. 이 제품에서 사용된 소재유리의 굴절율은 공개되지 않았다.

해석적 방법으로 유리구슬형 재귀반사기의 광학적 성능을 구하고 소재 유리를 제시하는 연구는 지금까지 행하여지지 않았다. 앞서의 특허[9]에 의하면 유리구슬형 재귀반사기를 제작할 때 사용하는 소재유리의 굴절율은 1.7에서 1.9사이이다. 식 (27)에 의하면 소재유리의 굴절율이 1.7에서 1.9사이에 있을 경우 유리구슬형 재귀반사기의 R' 은 Fig.10에 도시된 바와 같으며 이는 Fig.12의 실험 결과와 근사함을 알 수 있다. 앞서 서술한 바와 같이 굴절율이 2.0보다 작을 경우에는 R' 의 값이 무한대가 되는 관측각이 존재하는데, Fig.12의 실험결과에서도 R' 의 값이 증가하는 곳의 관측각을 1.1도라고 하면, 이것을 식 (28)의 조건식에 대입하여 유리의 굴절율을 얻을 수 있으며 이로부터 Scotchlite #3870은 굴절율이 약 1.92인 유리로 제작되었다고 추정할 수 있다.

본 논문에서 식 (28)로 제시한 해석 결과에 따르면, 일반적으로 사용되는 유리에서보다(굴절율 = 1.4~1.6) 훨씬

높은 2.0에 가까운 굴절율을 가진 유리를 사용해야 양질의 유리구슬형 재귀반사기를 제작할 수 있는 것으로 나타난다. 이는 3M社의 특허[9]에서 나타난 소재유리의 굴절율이 1.7에서 1.9사이라는 것에서 입증된다. 앞서 살펴본 Scotchlite #3870은 미국 3M에서 생산되는 유리구슬형 재귀반사기 중에서 성능이 가장 높은 편이다. 실제로 굴절율이 2.0에 더가까운 유리를 사용하지 않는 이유는 가격 문제와 굴절율이 매우 높은 유리들의 취성(brittleness)때문이라고 생각된다.

3. 결 론

재귀반사기는 빛을 그 광원방향으로 다시 반사하는 특성 때문에 정밀 측정이나 교통안전, 산업용 머신 비전 등의 영역에서 사용된다. 재귀반사기의 종류 중에서 유리구슬형 재귀반사기는 그광학적 성능이 소재유리의 굴절율에 크게 좌우되므로 제작하기 전에 광학적 성능을 해석할 수 있는 능력을 갖는 것은 매우 중요하다.

본 논문에서는 유리구슬형 재귀반사기의 광학적 성능을 기하학적 광학을 이용한 해석적 방법을 사용하여 광도계수와 재귀반사계수로서 수식으로 유도하고, 이로부터 소재유리의 굴절율의 변화에 따라서 광학적 성능이 관측각에 대해 어떻게 변화하는지를 구하였다. 해석 결과 소재유리의 굴절율이 2.0일 때 0도의 관측각에서 무한대의 재귀반사계수를 가짐을 알았으며 굴절율이 2.0보다 작을 경우 유한한 값의 관측각에서 재귀반사계수를 가짐을 알 수 있었다. 굴절율이 2.0보다 커지면 재귀반사의 효율은 급격하게 감소함 역시 밝혀 내었다. 따라서 최적의 재귀반사 성능을 얻으려면 굴절율이 2.0 이하로서 가능한한 2.0에 가까워야 함을 보였다. 아울러 유리구슬형 재귀반사기의 경우 바닥면에 꼭 거울면 처리를 해야 하는 이유에 대하여도 유도하였다.

본 논문에서 제시된 결과는 상업적으로 판매되는 재귀반사기의 제조회사에서 실험으로 구한 재귀반사계수 데이터와 비교되었다. 그 결과로서 해석적 방법으로 구한 재귀반사계수가 실험 결과와 유사함을 관찰하였고, 특히 관측각이 커짐에 따라 재귀반사계수가 감소하다가 다시 약간 증가하는 현상이 본 논문의 해석방법에서 유도되는 재귀반사계수를 무한대로 하는 관측각에서 발생함을 보였다.

결과로서 본 논문에서는 임의의 굴절율을 가진 유리를 소재로 하는 유리구슬형 재귀반사기에서 그 광학적 성능을

예측하는 이론적 수식을 유도하고 그 타당성을 검증하였으며 유리구슬형 재귀반사기를 제작할 경우 일반적으로 사용되지 않는 2.0에 가까운 높은 굴절율의 유리가 사용되어야 함을 입증하였다.

참 고 문 헌

1. Rennilson, J.J., "Retroreflection Measurements : a review," 外 다섯 편의 논문, Applied Optics, Vol.19, No.8, pp.1234-1273, 15 April 1980
2. Johnson, N.L., "Accuracy in the Photometry of Retroreflectors," SPIE Vol.196, Measurement of Optical Radiations, pp.136-146, 1979
3. Federal Test Method Standard 370, March 1, 1977
4. Stephenson, H.F. "The Photometry of Retroreflectors," SPIE Vol.146, Light Measurement in Industry, London, Sep. 1978
5. Wargocki, F.E., Ray, A.J., and Hall, G.E., "Retroreflector Field Tracker," SPIE Vol.501, State-of-the-Art Imaging Arrays and Their Applications, 1984
6. Aviation Week & Space Technology, pp.100-102, June 5, 1989
7. McKinney, W.S., "A low cost vision system for landmark tracking," M.S. Thesis (in M.E.), Georgia Institute of Technology, 1987
8. Lee, E.H., Li, D., and Dickerson, S.L., "A Landmark Tracking Sensor for Manufacturing control," Proc. of the IIE Integrated System Conference, Atlanta, GA, pp.651-656, Nov. 1989
9. Reflex Light Reflector. United States Patent 2,326,634, aug.10, 1943
10. Pedrotti, F.L. & Pedrotti, L.S.. Introduction To Optics, Prentice Hall, 1987
11. Lee, E.H., "Illumination, Optics, and Retroreflectors for Efficient Landmark Tracking," Ph.D. Thesis, Georgia inst. of Technology, March 1991
12. O'Shea, D.C., Element of Modern Optical Design, John Wiley & Sons, 1985
13. 3M에서 제공된 Scotchlite #3870에 대한 기술데이터 자료