

반사시트의 메커니즘 및 설계에 관한 연구

이호연*, 권원태⁺, 정하규⁺⁺, 오영탁⁺⁺⁺
(논문접수일 2007. 8. 17, 심사완료일 2007. 10. 16)

A Study on the Mechanism and Design of Reflective Sheet

Ho Yeon Lee*, Won Tae Kwon⁺, Ha Kyu Jung⁺⁺ and Young Tak Oh⁺⁺⁺

Abstract

The shape and the material of a reflective sheet affect the amount and the range of retroreflection on incident angle of light, significantly. In this study, the method to determine the shape and the material of the reflective sheet is introduced for the maximum retroreflection. Since the microprism shape with an equilateral triangle base has been used widely, the shape optimization of the microprism shape is carried out. The path of the light within the prism is geometrically calculated to find the relationship between incoming and outgoing light to and from a microprism. The optimal shape of a microprism found by the simulation has almost same figure with the one being used in industry for the maximum retroreflection. It is also found that the refraction index of the reflective sheet is another parameter to control for maximum retroreflection and the range of retroreflection.

Key Words : reflective sheet(반사시트), microprism(마이크로 프리즘)

1. 서론

반사시트 및 교통표지판 등은 운전자에게 시선유도와 각종 규제 및 지시에 대한 다양한 정보를 제공함으로써 교통안전 및 소통에 도움을 주는 중요한 시설로써 시인성 확보가 중요하기에 반사화가 필요하다.

야간에는 교통사고가 주간에 비해서 많이 발생하므로 야간의 시인성 확보를 위해 재귀반사가 좋은 반사체를 만들 필요가 있다. 재귀반사라 하는 것은 입사 된 빛이 입사 된 빛과 같은 방향, 같은 각도로 다시 반사되는 것을 말한다. 이러한 원리는 운전자나 자전거를 탄 사람들의 헤드라이트 빛이 반사제품의 표면에 비쳐지면서 광원에서 가까이 있는 사람

* 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원
+ 교신저자. 서울시립대학교 기계정보공학과 (kwon@uos.ac.kr)
주소: 130-743 서울시 동대문구 전농동 90
++ 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원
+++ 안산공대 기계과

에게 가장 밝은 빛으로 반사되는 효과로 반사체에 응용된다. 이러한 재귀반사를 일으키는 반사체는 구형(sphere type)⁽¹⁾, 마이크로프리즘형(micropriism type)⁽²⁾의 두 종류의 형태가 주를 이룬다. 이중 구형은 투명한 유리알을 이용한 것이고, 마이크로 프리즘형은 플라스틱 성형을 이용한 것이다. 마이크로 프리즘형은 구형보다 입사각 범위가 좁지만 반사효율이 더 좋다. 반사체중에서 반사시트는 다용도로 많이 쓰이고 있는데, 고휘도 반사시트로 주로 쓰이는 밑면이 삼등변인 사면체 형상의 마이크로 프리즘형은 육각모의 모서리를 잘라 놓은 사면체형상으로써 재귀반사효율이 뛰어나다. 하지만 뛰어난 재귀반사효율에 비해 재귀반사범위가 작다는 단점이 있다. 즉, 입사하는 빛이 입사각이 커질수록 재귀반사율이 급격히 떨어지게 되는데, 이 문제점을 보완하기 위해 밑면이 삼등변인 사면체의 높이를 변화시켜 사면체형이 아닌 다른 형상의 마이크로 프리즘으로 재귀반사의 범위를 늘리거나⁽²⁾, 구와 마이크로 프리즘을 동시에 사용하려는 연구가 진행되었다⁽³⁾. 형상에 대한 연구는 많이 진행되었지만, 재질과 형상을 동시에 고려한 연구는 찾을 수 없었다.

이 연구에서는 형상과 재질을 동시에 고려한 반사시트를 설계하였다. 마이크로 프리즘에서 최적의 형상을 제시함과 동시에 재질이 바뀔 때 따른 재귀반사율을 계산하였다. 실제 사용되고 있는 반사시트의 형상을 측정하여 개발된 소프트웨어의 적정성을 증명하였으며, 보다 나은 성능을 가진 새로운 원리의 반사시트를 설계할 수 있는 가능성을 보였다.

2. 설계를 위한 기하학

반사시트의 형상으로는 주로 구형과 마이크로프리즘형이 이용되고 있다. 구형은 유리알을 이용함으로써 입사한 빛을 재귀반사 시킨다. 이것은 운전자에게 시선유도와 각종 규제 및 지시에 대한 정보를 제공하는 노면표시에 주로 이용된다. 노면표시의 반사성능은 유리알의 함량 및 종류, 용융온도, 도료의 색도 등 각 영향인자에 의해 결정되며 입사각의 범위는 넓지만 재귀반사효율이 마이크로프리즘 형보다 떨어진 다. 반사시트 및 교통표지판 등에 주로 이용되는 마이크로프리즘 형은 형상 정밀도가 반사체의 재귀반사효율에 매우 민감하다. 마이크로프리즘에 입사한 빛은 경사된 삼면에서 전 반사 된 후 투과되어 입사한 방향으로 재귀반사하게 된다.

이 논문에서는 반사효율이 좋은 마이크로 프리즘의 기하학적 형상과 재질에 따른 재귀반사율에 대하여 연구하였다.

2.1 빛의 굴절과 반사

빛이 다른 매질의 경계를 지날 때는 진로가 바뀌는 것을 빛의 굴절 현상이라고 하고 굴절된 빛을 굴절광이라고 한다. 이때 서로 다른 매질로 인해 빛의 진행방향이 바뀌어가는 정도를 그 매질에 대한 굴절률이라고 한다.

두 매질의 경계에서 입사광(Incident ray)의 진로와의 관계를 Fig. 1에서 보면 두 매질의 경계면의 법선에 대해서 입사각과 동일한 크기의 각도로 반사되는 반사광(Reflection ray)이 생기는데 외부, 내부 반사에 대해서 빛의 세기에 관한 프레넬의 전자기파 파동의 진행에 관한 이론에 의해 반사율을 구하면 다음과 같다.

두 매질 계면에서 수직입사광의 굴절률
(Reflection of vertical incident ray with interface of medium)

$$= \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad (1)$$

두 매질 계면에서 수평입사광의 굴절률
(Reflection of horizontal incident ray with interface of medium) = 1.0

수직, 수평 이외 입사광의 굴절률
(Reflection excepting vertical and horizontal incident ray)

$$= \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2)$$

여기서,

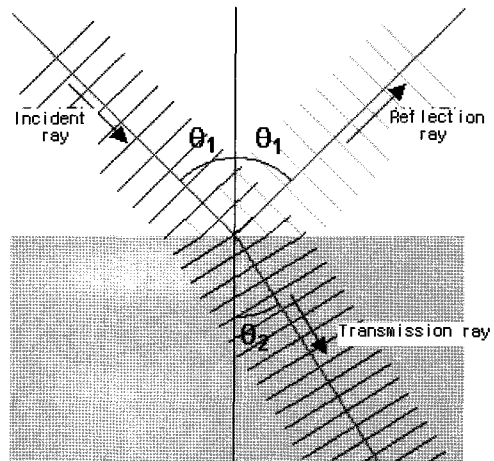


Fig. 1 Reflection and transmission of light

- θ_1 : 입사각(Incidence Angle)
- θ_2 : 반사각(Transmission Angle)
- n_1 : 매질 1의 굴절률(Refraction index of Medium 1)
- n_2 : 매질 2의 굴절률(Refraction index of Medium 2)

2.2 단위법선벡터를 이용한 입의 축에서의 회전

밀면이 정삼각형인 마이크로프리즘에 빛이 입사하여 반사되어져 나오는 경로를 찾아 반사율을 구하는 시뮬레이션을 실현하기 위한 기하학식은 다음과 같이 계산된다. 그림 2에서 밀면이 정삼각형이고 옆면은 2등변 삼각형인 사면체 마이크로프리즘의 정삼각형부분을 XY평면에 놓고, 그 중 한 점을 원점에 위치시켰다. XY평면을 제외한 3개의 경사 평면의 방정식을 구한 후 여기에서 각각의 세 평면의 단위법선벡터를, 주어진 3점의 함수로 구하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{K}1 &= (0, \frac{z_3}{y_3} \frac{1}{M1}, -\frac{1}{M1}) \\ \vec{K}2 &= (\frac{1}{M2}, -\frac{x_2}{y_2} \frac{1}{M2}, \frac{1}{z_3} (\frac{x_2 y_3}{y_2} - x_3) \frac{1}{M2}) \\ \vec{K}3 &= (-\frac{1}{x_1} \frac{1}{M3}, \frac{1}{y_2} (\frac{x_2}{x_1} - 1) \frac{1}{M3}, \frac{1}{z_3} (\frac{x_3}{x_1} + \frac{y_3}{y_2} (1 - \frac{x_2}{x_1}) - 1) \frac{1}{M3}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} M1 &= \sqrt{\left\{ \left(\frac{z_3}{y_3} \right)^2 + (-1)^2 \right\}} \\ M2 &= \sqrt{\left[1^2 + \left(-\frac{x_2}{y_2} \right)^2 + \left\{ \frac{1}{z_3} \left(\frac{x_2 y_3}{y_2} - x_3 \right) \right\}^2 \right]} \end{aligned}$$

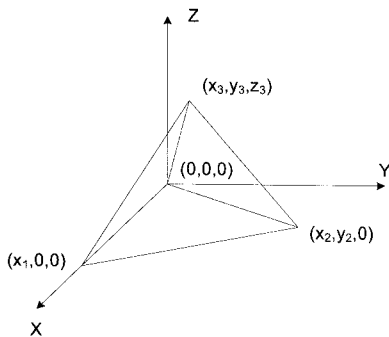


Fig. 2 Coordinate for the microprism

$$M3 = \sqrt{\left[\left(\frac{-1}{x_1} \right)^2 + \left\{ \frac{1}{y_2} \left(\frac{x_2}{x_1} - 1 \right) \right\}^2 + \left[\frac{1}{z_3} \left\{ \frac{x_3}{x_1} + \frac{y_3}{y_2} \left(1 - \frac{x_2}{x_1} \right) - 1 \right\} \right]^2 \right]}$$

2.3 빛의 반사경로 방정식

빛의 입사각과 반사각은 같고, 입사광선과 반사 광선과 법선은 같은 평면 위에 있다. 여기서 Fig. 3처럼 입의 축의 단위 벡터를 이용한 회전식을 만들고, 이식에서 같은 평면에서 입사하는 빛의 직선의 방정식으로부터 반사되는 빛의 반사경로 방정식을 구해 낼 수 있다⁽⁴⁾. 이 방법으로 마이크로프리즘의 각각의 세 경사면을 맞고 나온 빛의 직선의 방정식을 구하면 빛의 궤적을 식(4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11}(D_{z2} - D_{z1})(t - t_1) + K_{12}(D_{y2} - D_{y1})(t - t_1) + K_{13}(D_{x2} - D_{x1})(t - t_1) \\ K_{21}(D_{z2} - D_{z1})(t - t_1) + K_{22}(D_{y2} - D_{y1})(t - t_1) + K_{23}(D_{x2} - D_{x1})(t - t_1) \\ K_{31}(D_{z2} - D_{z1})(t - t_1) + K_{32}(D_{y2} - D_{y1})(t - t_1) + K_{33}(D_{x2} - D_{x1})(t - t_1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_1(D_{z2} - D_{z1}) + D_{z1} \\ t_1(D_{y2} - D_{y1}) + D_{y1} \\ t_1(D_{x2} - D_{x1}) + D_{x1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x k_x \text{vers} \theta + \cos \theta & k_y k_x \text{vers} \theta - k_z \sin \theta & k_z k_x \text{vers} \theta + k_y \sin \theta \\ k_x k_y \text{vers} \theta + k_z \sin \theta & k_y k_y \text{vers} \theta + \cos \theta & k_z k_y \text{vers} \theta - k_x \sin \theta \\ k_x k_z \text{vers} \theta - k_y \sin \theta & k_y k_z \text{vers} \theta + k_x \sin \theta & k_z k_z \text{vers} \theta + \cos \theta \end{bmatrix}$$

and $\text{vers} \theta = 1 - \cos \theta$

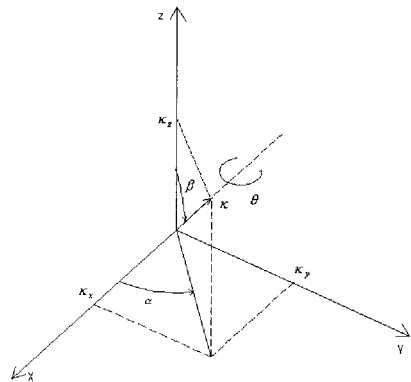


Fig. 3 Revolution of the axis in the rectangular coordinate system

3. 고휘도 반사시트를 위한 최적형상결정

2장의 기하학을 이용하여 설계 프로그램이 개발되었다. 3장에서는 이를 이용하여 마이크로 프리즘의 최적형상을 결정하고자 한다.

3.1 재귀 반사된 빛의 정도를 높이기 위한 최적의 마이크로 프리즘 형상 결정

Fig. 4에서 알 수 있듯이 빛이 마이크로 프리즘에 입사한 후, 정확하게 입사된 방향으로 반사되지 않는다. 즉, 어느 정도의 재귀반사의 정확도가 떨어지게 되는데 이 현상은 반사시트의 마이크로 프리즘의 형상을 조정함으로써 수정할 수 있다. 마이크로 프리즘의 밑면을 XY평면에 놓았을 때, 밑면이 정삼각형이므로 마이크로 프리즘의 형상은 정삼각형인 밑면과 이등변삼각형인 옆면이 이루는 각 a 에 의해 결정된다. a 가 일정하다면 마이크로 프리즘은 크기에 무관하게 닮은 꼴이 된다. 그러므로 a 가 일정한 마이크로프리즘은 크기에 무관하게 같은 입사각의 빛은 같은 반사각으로 내보내게 된다. 결국 일정한 각도로 입사한 빛을 a 의 변화에 따라 살펴보면 재귀 반사 정도가 가장 좋은 a 를 알아 낼 수 있고 이것으로 최적의 마이크로프리즘의 형상을 결정할 수 있다.

Fig. 5는 5°로 입사한 빛의 재귀반사량이 a 가 변환에 따라 어떻게 변화하는가를 나타낸다. 여기에서 XY평면과 마이크로프리즘의 세 경사면과의 각도, a 가 54.74°일 때 5°로 입사

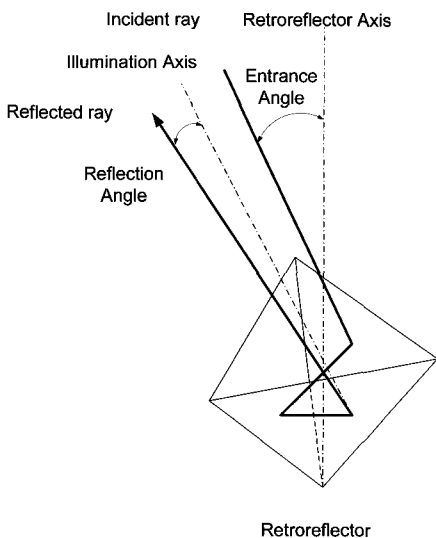


Fig. 4 Definition of entrance and reflection angle

한 빛이 재귀반사되어져 나온 반사각이 5.002°가 되고 이것이 가장 재귀반사 정도가 높음을 알 수 있다.

3.2 입사각에 따른 최적형상 결정

이번에는 입사각을 변화시켰을 때의 최적의 재귀반사율을 갖는 형상을 알아보았다. Fig. 6에서 보듯이, 입사각을 변화시키며 입사된 빛의 재귀 반사를 구하면, 여전히 54.74°를 a 로 갖는 마이크로프리즘 형상이 최적의 재귀반사율을 갖는 형상임을 알 수 있다. 여기에서 a 가 0.1°정도만 차이가 나도 재귀반사율이 현저히 떨어짐을 알 수 있다. 형상을 변화시켜 재귀반사율을 유지하며 재귀반사범위를 확대하려는 시도는 다른 방식으로 바뀌어 저야 됨을 알았다. 결국 밑면이 삼등변인 마이크로프리즘의 형상을 큐브코너 형으로 했을 때 재귀반사율이 최적이 되므로, 재귀반사범위를 확대하기 위해서는 큐브코너형상을 그대로 유지하면서 다른 방법을 고려해 보아야 한다. 여기서는 재질을 바꾸어 굴절률을 조절함으로써 재귀반사범위를 확대할 수 있음을 보였다.

4. 재귀반사 범위를 위한 굴절률과 내부 반사율

4장에서는 굴절률이 상이한 재질에서의 재귀반사율을 개발된 프로그램을 이용하여 알아본다.

4.1 굴절률과 재귀반사율

마이크로 프리즘의 각도를 각도 a 를 54.74°로 유지하며 마이크로프리즘의 재질을 바꿈으로써 굴절률이 재귀반사율에 미치는 영향을 알아본다. 재질은 Air(굴절률1.00029), Crown glass(굴절률1.52), Polystyrene(굴절률1.59), Lanthanum

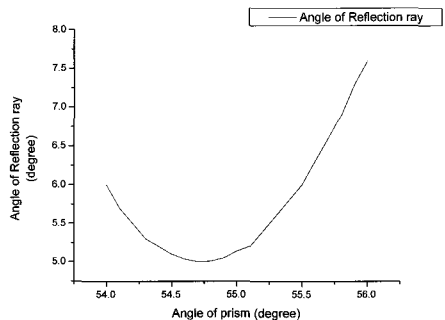


Fig. 5 Angle between the XY plane and an incline plane of microprism of retroreflector when the incidence angle is 5°

flint glass(굴절률1.80), Diamond(굴절률2.417) 다섯 가지를 가지고 재귀반사율을 조사한 결과가 Fig. 7에 주어졌다.

여기에서 굴절률이 작은 것이 입사각이 작은 곳에서는 좋은 재귀반사율을 보였지만 입사각의 범위가 커질수록 재귀반사율이 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 그래서 여기서는 굴절률이 가장 큰 다이아몬드의 재귀반사율이 가장 좋은 재귀반사율을 보였다. 하지만 내, 외부의 반사율이 고려되지 않았기 때문에 다음절에서 내, 외부의 반사율이 고려된 재귀반사율에 대하여 알아본다.

4.2 굴절률에 따른 내부반사율

Fig. 8에서처럼 마이크로프리즘에 입사하여 재귀반사된 빛은 외, 내부 반사를 하게 되고 외, 내부 반사된 만큼의 반사율이 낮아지게 된다.

5 종류의 재질의 내부반사율을 Fig. 9에 나타내었다. 외부 반사율은 내부 반사율과 같기에 실제 투과되어 재귀반사되지 못하는 반사율은 내부 반사율의 2배라고 볼 수 있다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 굴절률이 높을수록 내부반사율이 높아짐에 따라 실제 재귀반사율은 떨어진다.

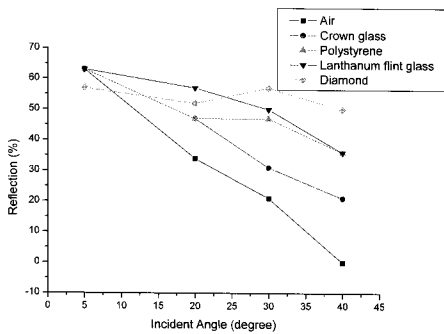


Fig. 7 Retroreflection on refraction index

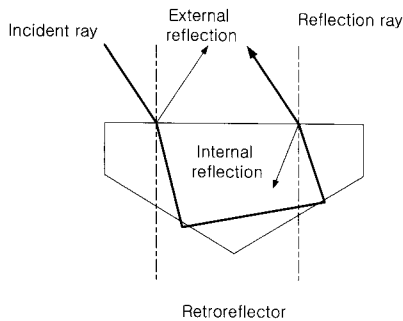


Fig. 8 External and Internal reflection on microprism

4.3 내부, 외부 반사율과 굴절률을 고려한 재귀반사율

Fig. 9에서 외부, 내부 반사율을 고려하기 전에는 다이아몬드의 재귀반사율이 좋았지만 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 외부, 내부반사율을 고려한 빛의 세기를 보면 폴리스티렌, Lanthanum flint glass가 재귀반사율과 재귀반사 범위가 좋을 수 있다. 특정입사각에서 가장 재귀반사율이 높은 반사시트를 제조하거나 재귀반사 범위를 좀더 크게 해야 할 필요가 있을 때 굴절률을 고려한 재질을 생각해 볼 수 있을 것이다. 예를 들어 입사각이 작을 때는 적절한 재귀반사율이 나왔지만 입사각이 커질수록 만족스럽지 못한 재귀반사율이 나온다면 반사시트 재질의 굴절률을 약간 높여 봄으로써 이 문제를 해결 할 수 있을 것이다.

5. 반사시트의 측정

이 연구에서 계산한 값과 현재 사용되고 있는 마이크로프

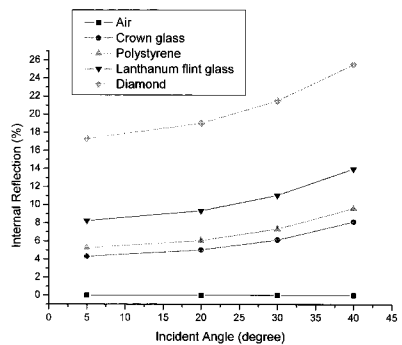


Fig. 9 Internal reflection on refraction index

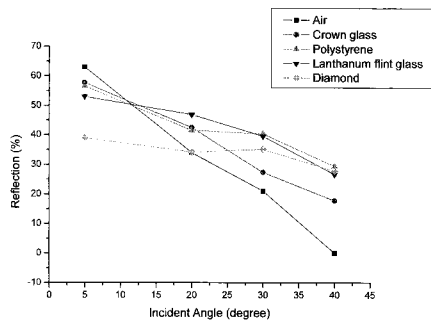


Fig. 10 Retroreflection with consideration of external and internal reflection

리즘 형상의 반사시트의 형상을 비교하기 위하여 상용반사시트를 측정하였다. 측정을 위해 테일러 홉슨 측정기(Taylor-Hopson, Form Talysurf series 2) 가 사용되었다.

측정결과가 Fig. 11과 12에 주어졌다. Fig. 12중 첫번째 그림은 반사시트의 평면도이며 높이에 따라 색깔이 달라진다. 그 그림의 검은선을 따라서 높이가 측정되고 각도가 계산되었다. 계산결과 각도는4면체 큐브코너(cube corner)의 모형($a=$ 약 54.7°)과 일치함을 알 수 있고, 이것으로 큐브코너의 재귀반사효율이 최적임을 알 수 있다. 이것으로 개발된

소프트웨어의 타당성이 증명되었고 새로운 물질로 반사시트를 제작할 때 사용될 수 있음을 보였다.

6. 결론

이 연구에서 빛의 반사,굴절 및 투과성질을 이용하여 반사시트에 입사하여 재귀 반사되는 빛이 경로를 구하는 기하학식을 정리하였다. 구해진 기하학식을 이용하여 빛의 궤적에 대한 시뮬레이션을 하여 재귀반사율이 최적이 되는 반사시트의 형상을 알아내고 이것이 큐브코너(Cube Corner)의 형상과 거의 일치 하다는 것을 밝혔다. 또한 빛의 굴절률과 외부, 내부 반사율의 관계를 고려한 재귀반사율을 알아보았고, 이것으로 특정입사각에서 최적의 재귀반사율을 구하거나, 재귀 반사 범위를 조절할 수 있음을 보였으며 이러한 요인들을 고려하여 개발한 소프트웨어가 타당함을 증명하였다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, E. H., 1994, "Analysis on Glass-Bead Type Retro-reflector's Optical Characteristics," *Jour. Korean Soc. Pre. Eng.*, Vol. 11, No. 4, pp. 165~173.
- (2) So, B. S., Jung, Y. H., and Lee, D. W., 2002, "A Study on the Shape of Efficient Retroreflective Articles," *Jour. Korean Soc. Pre. Eng.*, Vol. 19, No. 2, pp. 160~170.
- (3) Benson, 1986, *Wide-angle-reflective cube-corner retro-reflective sheeting*, United States Patent 4703999.
- (4) Paul, R. P., 1979, *Robot Manipulators*, The MIT Press, pp. 25~29.

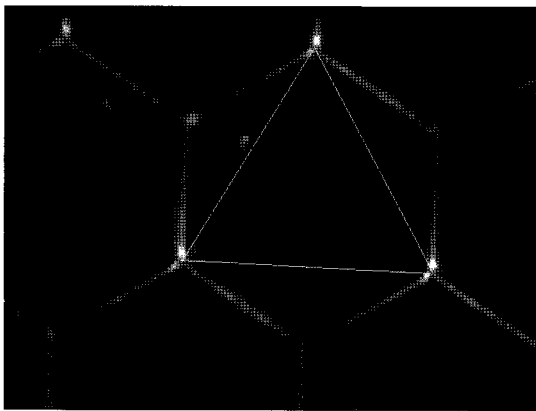


Fig. 11 Photography of the commercial microprism-reflection sheet

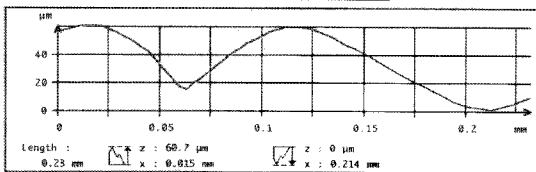
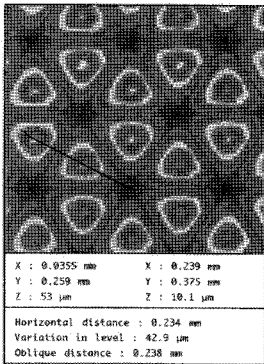


Fig. 12 Measurement result of the commercial microprismreflective sheet