

Trend in glass bead and regulation of road marking, and suggestions for preparing an autonomous vehicle age

Byeongguk Kang and Seunggu Kang[†]

Department of Advanced Material Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

(Received August 14, 2019)

(Revised October 14, 2019)

(Accepted October 14, 2019)

Abstract For maintaining high visibility of lane, the high refractive index glass beads with excellent retro-reflectivity are usually applied on the road marking paint. The retro-reflectivity standard of general road marking is different in each country; it is defined as 240 mcd/m²·lux based on white light in Korea and 250~300 mcd/m²·lux in developed countries. In this paper, the recent trends on the manufacturing technology of glass beads suitable for autonomous driving age as well as the road marking regulations has been reviewed. Also, in preparation for the commercialization of autonomous vehicles in the future, the necessity of raising the standard value and improving the glass bead properties were proposed.

Key words Glass bead, Refractive index, Retro-reflectivity, Lane recognition, Road marking regulation, Autonomous vehicle

도로표시 규정 및 글라스비드 동향과 자율주행차량 시대를 대비한 제언

강병국, 강승구[†]

경기대학교 신소재공학과, 수원, 16227

(2019년 8월 14일 접수)

(2019년 10월 14일 심사완료)

(2019년 10월 14일 게재확정)

요 약 야간이나 악천후에서도 높은 도로의 차선인식률을 유지하기 위해, 통상 재귀반사(retro-reflectivity) 특성이 뛰어난 고 굴절률의 글라스비드(glass bead)를 도로표시 페인트 위에 도포한다. 국가별로 일반 도로표시의 재귀반사 기준이 다르며, 국내는 백색광 기준으로 240 mcd/m²·lux, 선진국들은 250~300 mcd/m²·lux로 규정되어있다. 본 논문에서는 도로표시 관련 규정과 글라스비드에 대한 동향에 대하여 고찰하고, 향후 자율주행차량 상용화에 대비하여 규정 기준치 및 글라스비드 물성 향상 필요성에 대하여 논의하였다.

1. 서 론

일반적으로 도로차선의 시인성은 빛을 입사된 방향으로 재반사시키는 '재귀반사성(retro-reflectivity)'에 의해 좌우된다[1]. 도로표시나 차선의 재귀반사성은 그 안에 도포되어 있는 글라스비드(glass bead)의 특성에 좌우된다. Fig. 1 및 2에 글라스비드 이미지 및 차선에 글라스비드를 도포하는 공사 모습을 각각 나타내었다[2,3]. 글라스비드의 재귀반사도에 영향을 주는 인자로는 표면성질, 조성, 굴절률, 투명도 등이 있다[4]. 이중 굴절률이 매우 중요한데, 건조상태에서 도로차선이 최대 재귀반사

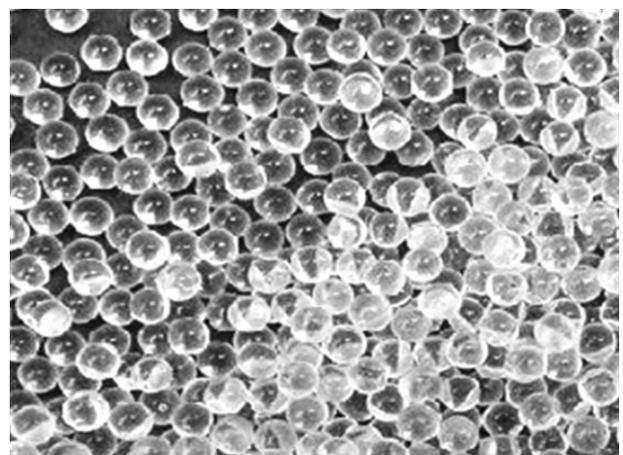


Fig. 1. Glass beads image [2].

[†]Corresponding author

E-mail: sgkang@kgu.ac.kr

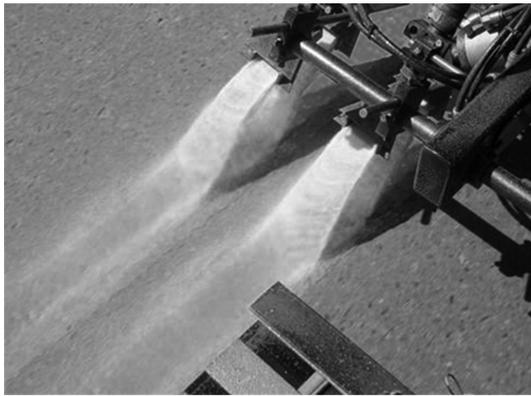


Fig. 2. Construction photo for coating glass beads on road marking paint [3].

을 나타내기 위해서 도포된 글라스비드의 굴절률이 1.93 이상이어야 하고, 우천 시에는 굴절률이 2.2 이상이어야 한다고 보고되어 있다[1,5,6]. 우천 시에는 수막(water film) 현상에 의해 글라스비드의 복굴절률이 감소하고 따라서 재귀반사 기능이 감소하기 때문이다[5].

Zwahlen 등은 약 113 km/h의 주행속도에 요구되는 적절한 노면표시 반사성능은 $620 \text{ mcd/m}^2 \cdot \text{lux}$ 이라고 하였는데, 이는 현재 국내의 규정에 비해 2배 이상 높은 값이어서, 자율주행차량 시대에 대비한 도로표시의 반사성능에 대해 시사하는 바가 크다[7]. 현재 노면표시 반사성능에 대한 국내규격은 여타 OECD 국가들의 기준에 비하여 비슷하거나 낮은 수준이다. 따라서 국내 규정만을 만족시킨다면 굳이 고 굴절률의 글라스비드를 사용하지 않아도 되므로 실제 고 굴절률 글라스비드가 아닌 일반 제품들도 도로표시 공사에 종종 사용되고 있다. 만약 굴절률이 1.5인 소다-라임-규산염(soda-lime-silicate) 계열의 글라스비드를 사용하면, 야간 및 우천 시 도로 시인성 확보가 어려울 수 있다. 일부에서는 고 굴절률(1.9~2.4)의 글라스비드와 일반 글라스비드를 혼합하여 시공하는데, 이는 고 굴절률 글라스비드의 높은 가격(Table 1 참조) 때문이다[8]. 이 경우 역시 재귀반사율이 충분히 높지 않기 때문에 안전을 완전히 담보했다고는 볼 수 없

Table 1
Cost for glass beads and road marking lane construction [8]
(unit: Won)

	Refractive index		
	1.5	1.93	2.2-2.4
Unit price per kg	700	10,500	14,000
Unit price per km/line	6,563	98,438	131,250

다. 차선에 도포된 글라스비드는 자동차 바퀴와의 마찰에 의해 마모되거나 눈이나 비에 의해 탈락되기 쉬우므로, 글라스비드의 적정 함침률 또는 도료와 글라스비드 복합물의 내마모성 또한 중요하다.

한편 자율주행차량 상용화 시대를 앞두고 관련된 기술과 장치들이 속속 개발되고 있다. 그러나 사람의 개입이 필요하지 않은 자율주행 기술 수준인 ‘레벨 4’에 도달하기에는 아직도 해결해야 할 문제들이 많다[9,10]. 자율주행차량 차선인식은 카메라가 주행하는 도로의 화면을 캡처하고 밝기 조절을 통해 차선의 흰색과 도로의 검정색을 대비 및 비교하는 과정을 통해 이루어진다. 따라서 도로차선은 야간이나 악천후에도 높은 시인성(visibility)을 갖추어야 자율주행의 안전이 담보될 수 있다. 그러나 국내외적으로 자율주행차량 시대에 적합한 도로표시 기준이나 글라스비드 물성에 대해 규정된 바 없어 관련 연구가 시급히 요구되는 상황이다.

본 논문은 도로 표지용 글라스비드 및 도로 표시의 재귀반사도 기준에 대한 국내의 규정을 고찰하고 글라스비드에 관한 최근 동향을 살펴보았다. 더불어 자율주행차량 시대에 대비하여 도로표시 규정과 글라스비드의 물성에 대하여 제언하고자 한다.

2. 국내의 도로표시 재귀반사도 기준

국내의 경우, 안전에 관한 관심이 높아지고 관련기술이 발전함에 따라 노면표시의 반사성능이 지속적으로 상향 조정되고 있다. Table 2는 2005년에 제정된 ‘노면표시 설

Table 2
Domestic retro-reflectivity standard of road marking paint in 2005 [11]
(unit: $\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lux}$)

Incident angle	Observation angle	Time	Kind of light		
			White	Yellow	Blue (8 % of White)
86.5°	1.0°	Installation	150	120	12
		Repaint	70	55	5
86.5°	1.5°	Installation	120	100	9
		Repaint	55	40	4
88.76°	1.05°	Installation	80	60	6
		Repaint	35	25	2

Table 3

Domestic retro-reflectivity standard of road marking paint in 2012 [12]

(unit: mcd/m²·lux)

Incident angle	Observation angle	Time (or condition)	Kind of light			Note
			White	Yellow	Blue	
88.76°	1.05°	Installation	240	150	80	Standard
		Repaint	100	70	40	Recommend
		Wet	100	70	40	Recommend

Table 4

Regulation of retro-reflectivity for road marking paint in USA [17]

(unit: mcd/m²·lux)

	ASTM E 1710	State					
		Kansas	Iowa	Ohio	Montana	Missouri	Kentucky
Enactment year	2004	2007	2002	2004	2003	2005	2008
White light	250	250	250	250	275	300	300
Yellow light	175	175	165	170	180	225	225

Table 5

Regulation of retro-reflectivity for road marking paint in Europe at day time [16]

(unit: mcd/m²·lux)

	Pavement type	Grade	Retro-reflectivity
White light	Asphalt	Q2	> 100
		Q3	> 130
	Cement concrete	Q3	> 130
		Q4	> 160
Yellow light	-	Q1	> 80
		Q2	> 100

Table 6

Regulation of retro-reflectivity for road marking paint in Europe at night time [14]

(unit: mcd/m²·lux)

	Light color	Grade	Retro-reflectivity
Permanent	White	R2	> 100
		R4	> 200
		R5	> 300
	Yellow	R1	> 80
		R3	> 150
		R4	> 200
Temporary	-	R3	> 150
		R5	> 300

치 관리 매뉴얼'에 제시된 노면표시 반사성능 기준이며 [11], Table 3은 2012년에 제정된 기준이다[12]. 2005년에 제정된 기준을 보면, 도로형 노면표시의 반사성능은 입사각에 따라 백색광 기준으로 80~150 mcd/m²·lux이고, 재도색이 필요한 경우는 35~70 mcd/m²·lux로 규정되어 있다. 측정조건은 'CEN(Comite Europeen de Normalisation) EN 1436'에 의거, 노면표시로 부터 거리 30 m에서 자동차의 전조등 높이 65 cm, 운전자의 눈높이 1.2 m, 입사각은 88.76°, 그리고 관찰각은 1.05°이다. 이후 2012년에 제정된 기준에서는 최소 재귀반사성능이 백색광 기준으로 240 mcd/m²·lux, 재도색 시기는 100 mcd/m²·lux으로 상향조정 되었다. 특히 우천 시 기준을 도입한 것이 눈에 띈다. 다만 그 기준값은 100 mcd/m²·lux로 크게 높지는 않다. 국내 차선용 도로표시 규정이 2012년 기준으로 2005년도에 비해 많이 상승하였지만 일부 OECD 국가들의 최대 기준인 300 mcd/m²·lux임을 고려한다면 아직 상승 조정할 여지는 있다고 판단된다.

'ASTM'(American Society for Testing Materials)에서 권장하는 재귀반사도는 백색광에 대하여 250 mcd/m²·lux, 황색에 대하여 175 mcd/m²·lux이지만, 미국에서는 Table 4에 나타난 바와 같이 주(state) 별로 기준이 약간씩 다르다. 이 외에도 미국 규정에는 우천상태에서 노면표시

의 재귀반사성능 측정기준(ASTM E2176), 습윤상태에서 노면표시의 재귀반사성능 측정기준(ASTM E2177) 등이 있다[13-15]. 유럽의 경우, 'CEN'에 최하 재귀반사도 값이 규정되어 있다[16]. Table 5 및 6을 보면 유럽 규격의 특징은 주야간이 다른 방식으로 규정되어 있다는 것이다. 재도색 시기 및 설치 시 반사성능에 대한 규정은 없으나 노면표시의 작용수명 기간에 해당하는 최소 재귀반사성능 기준이 있어 재도색시기에 대한 가이드라인 역할을 한다[17,18].

일본의 경우, 노면표시의 최하 재귀반사도에 대한 자체 규정은 없으나 ASTM을 기준으로 정기점검을 통해 체계적으로 관리되고 있다. 평가는 1~5등급으로 분류되는데, 5등급은 '시공초기와 다름없이 양호'를 뜻하며 1등급은 '원형이 없어지고 더러워 식별성이 나뻐'를 의미한다. 검사는 육안으로 점검하며, 5인 이상의 검사자가 3 m 거리에서 평가한다. 또한 글라스비드의 박리상태도 평가하는데, 1~5등급으로 나뉘고 5등급은 3% 이하, 1등급은 40% 미만의 박리상태를 의미한다. 또한 야간의 시인성은 Table 7에 보인 바와 같이 ASTM-D1011-52에 의하여 규정된 측정기를 사용하여 1~5등급으로 나뉘어

Table 7
Regulation of retro-reflectivity for road marking paint in Japan at night time [17]
(unit: mcd/m²·lux)

Grade	Reflectivity (%)	Retro-reflectivity
5	8%	> 247
4	6~8	186~247
3	4~6	126~186
2	2~4	65~126
1	2	< 65

평가한다[17,18].

3. 글라스비드 기술 동향

3.1. 글라스비드와 재귀 반사 효과

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 자동차 전조등에서 나온 빛이 노면표시에 도포되어 있는 글라스비드 내로 입사되면 굴절 및 반사를 통해 운전자에게 되돌아가는 것을 재귀반사(retro-reflectivity)라 한다. 고 굴절률의 글라스비드를 도로표시에 사용하면 Fig. 4와 같이 도로표시가 확연하게 인식된다[8]. 재귀반사율은 입사되는 빛의 각도 및 높이 외에도 관측하는 거리, 높이 그리고 각도에 따라 변동되므로 일정한 기준에 따라 측정해야 한다.

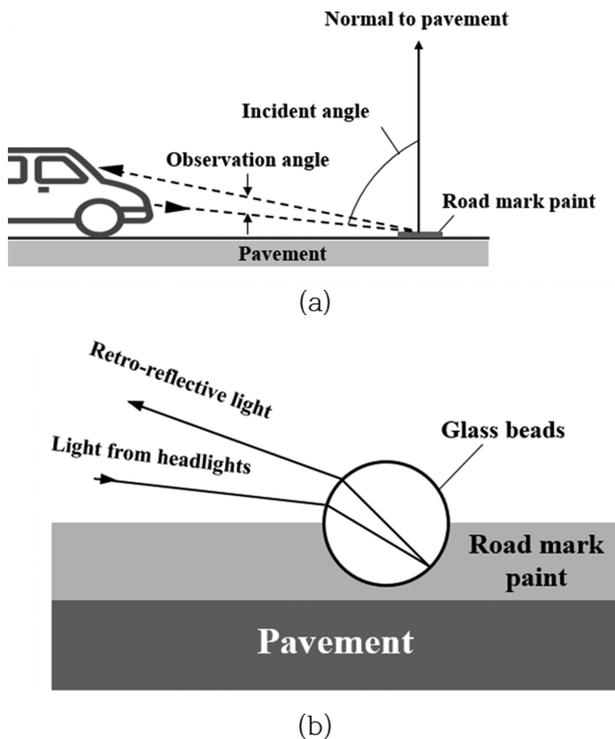


Fig. 3. (a) Observation principle of road marking paint with high retro-reflectivity, (b) Retro-reflective path of light from glass beads impregnated on road marking paint.



Fig. 4. Very good recognition of road marking and sign owing to high retro-refractivity of glass beads [20].

재귀반사도 단위는 ASTM E 808에 정의되어 있는데, 도로표시에서 나오는 빛의 휘도계수(Coefficient of retro-reflected luminance)로서 식(1)과 같이 표면 반사휘도(Luminance observed, L)와 표면에 비취진 법선조도(Illuminance perpendicular to source, E_L)의 비율로서 구한다[19].

$$\text{재귀반사도, } R_L = \frac{L}{E_L} \tag{1}$$

여기서 L과 E_L의 단위는 각각 mcd/m² 및 lux 이므로 재귀반사도(R_L)의 단위는 mcd/m²·lux이다.

3.2. 글라스비드 제조방법

글라스비드는 고온에서 유리의 점성과 표면장력 특성을 이용하여 제조한다. 예를 들어, 분쇄된 유리 frit 입자를 점도가 4.5 × 10⁷ poise(연화점, softening point)일 때까지 가열하면 유리 입자는 표면장력에 의해 구(sphere) 형태로 변형되는데, 이를 급냉하여 글라스비드를 제조한다. 글라스비드 제조기술은 크게 유리 슬러리를 고온으로 분사시키거나 유리 용체를 대기 중에 분사시켜 제조하는 분사방식과, 특정 입도로 선별된 유리 frit를 가열하여 제조하는 가열방식으로 나눌 수 있다.

분사방식 중 한 가지는 여러 성분이 조합된 유리 슬러리를 유리형성온도로 유지된 원통형 로 내부로 분사하는 방법으로, Fig. 5에 나타낸 것과 같이 예열존(zone)에서 액적(liquid droplet) 내의 수분을 증발시키고 구형의 유리를 형성시킨 뒤, 이를 냉각존에서 냉각시킨 뒤 분급기를 통해 글라스비드를 포집하는 제조법이다[20]. 이 방식은 장치구성이 복잡한 반면, 글라스비드의 조성을 제어하기가 쉽다는 장점이 있다. 또 다른 분사방식은 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 탱크에 담긴 고온의 용융유리를 유출구(orifice)를 통해 천천히 흘러주면서 흘러나온 용

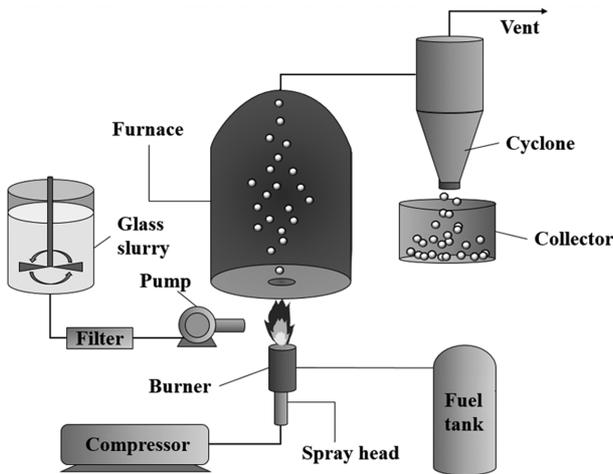


Fig. 5. Manufacturing method of glass beads by spraying glass slurry to high temperature furnace.

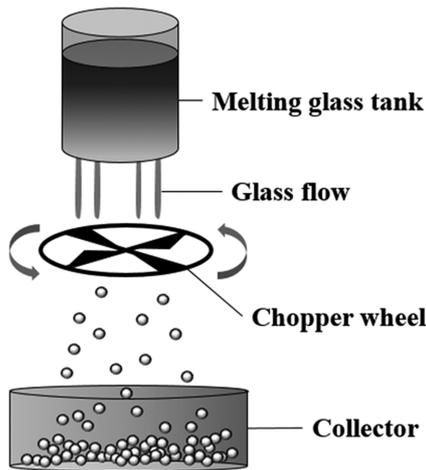


Fig. 6. Manufacturing method of glass beads by surface tension at high temperatures.

체 줄기를 회전 칼(rotating knife wheel)로 절단하면, 작게 절단된 용체 덩어리가 낙하하면서 표면장력에 의해 구형으로 되고, 이를 연화점 이하까지 냉각시킨 후 포집하는 방법이다. 이 방법은 장치원리가 간단하며, 소규모 생산에 적합하다.

한편, 가열방식 중 대표적 방법은 유리입자들을 고온의 연소가스 기류에 부유시킨 다음, 가열존에서 표면을 용융시켜 유리입자들을 구형으로 만들고 이를 냉각존에서 연화점 이하로 냉각시킨 후 분급기를 통해 포집하는 방법이다. 류해운 등은 유리분말을 연화점 이상의 가열구역과 상온의 냉각구역으로 구분된 성형로를 따라 하부에서 상부를 향하여 압축공기로 분사해 글라스비드를 제조하였다[21]. 제조공정 모식도는 Fig. 5에 나타난 공정과 유사하며 다만 유리 슬러리 대신 유리 frit를 사용하였으므로 하단에서 글라스비드를 포집한 것이 다르다. 이

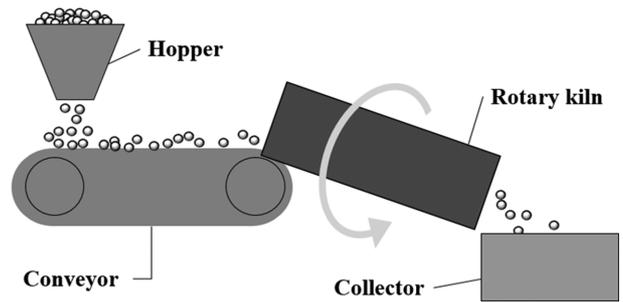


Fig. 7. Manufacturing method of glass beads using rotary kiln.

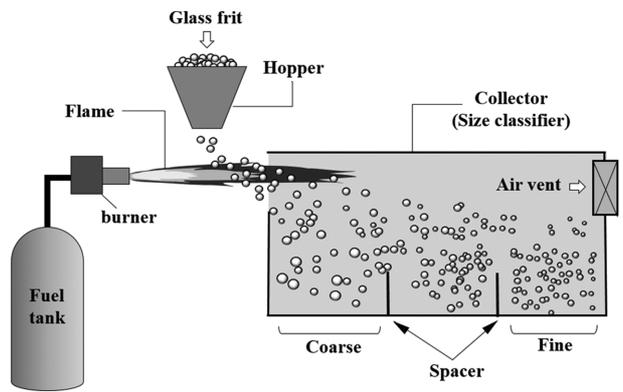


Fig. 8. Flame method for glass bead fabrication.

제조법은 글라스비드 생산에 가장 많이 사용되는 것으로 알려져 있으나, 공정조건을 안정화시키는 기술적 난이도가 높다는 특징이 있다.

또한 Fig. 7에 나타난 것과 같이 유리 frit 입자를 rotary kiln에서 재용융 및 구상화시킨 뒤 대기 중으로 자유낙하 및 냉각시켜 제조하는 방법이 있다[20]. 이 때 유리 입자와 rotary kiln 벽 사이의 용착을 방지하기 위해 카본블랙, 질화붕소 등으로 코팅하는 것이 중요하다. 또한 유리 입자끼리 용착될 경우, 덩어리(lump)를 형성하게 되므로 로타리 킬른의 경사각도, 회전수, 구역(zone)별 온도 등을 엄밀하게 제어해야 한다. 더욱 간단한 가열방식으로는 유리분말을 화염에 뿌리는 방법이 있다. 이 경우 Fig. 8에 나타난 것과 같이 유리분말은 순간적으로 표면만 가열되면서 구형으로 변화되는데, 장점은 장치가 매우 간단할 뿐 아니라 글라스비드가 낙하거리에 따라 자연히 크기 별로 분급된다는 것이다. 이 제조법은 정밀한 물성제어가 어렵기 때문에 실험실이나 소규모 파일럿 수준의 연구에 적합하다.

이외에도 유리 frit 입자를 연속적인 유동층에서 유동시키면서 재용융 및 구형화 과정을 거쳐 글라스비드를 제조하는 연속유동층법이 있다. 이 방법은 유동층을 생성하고 제어하는 고도기술이 필요하나, 일단 공정조건이 안정화되면 대량생산이 가능하다는 장점을 갖는다.

3.3. 고 굴절률 글라스비드 제조

재귀반사도가 높은 글라스비드를 제조하기 위해서는 글라스비드의 굴절률을 높이는 것이 중요하다. 그 이유는 차선 재료의 시인성은 광학적 거동과 직결되기 때문이다. 매질에 따른 빛의 굴절률과 속도에 대해 나타낸 Snell의 법칙은 ‘두 점을 지나는 빛의 경로는 진행시간이 최소가 되는 경로이다’라는 페르마의 원리로 유도되었다. 굴절률 n_2 가 n_1 보다 클 때, n_1 의 매질을 지나는 빛이 n_2 의 매질로 진행할 경우, 빛의 속도가 v_1 에서 v_2 로 감소하면서 최단 경로로 굴절이 일어난다. Snell의 법칙에 의한 상대 굴절률(relative refractive index, RRI)을 식 (2)로 나타낼 수 있다[22].

$$\text{상대굴절률, RRI} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2)$$

여기서 θ_1 은 입사각, θ_2 는 굴절각, n_1 은 매질 1의 굴절률, n_2 은 매질 2의 굴절률, v_1 은 매질 1에서의 속도, v_2 은 매질 2에서의 속도이다.

만약 자동차 헤드라이트에서 나온 빛이 굴절률이 1.0인 공기 중으로 진행하다가 굴절률이 공기보다 높은 글라스비드에 입사되면, 매질 변화에 의해 빛의 속도가 Snell의 법칙에 따라 저하되면서, 재귀반사광은 본래의 헤드라이트 위치보다 약간 상향으로 반사되어 운전자 시야로 들어간다(Fig. 3 참조). 그런데 우천 시에는 글라스비드 표면에 수막이 형성되어 Fig. 9에 보인 것처럼 재귀반사된 빛이 운전자 시야보다 높은 방향으로 진행되므로 그 결과 차선표시 시인성이 감소된다. 즉 수막이 형성된 경우, 전조등 빛은 굴절률이 1.0인 공기에서 굴절률이 1.3인 수막을 거쳐 글라스비드로 입사되는데, 여러 매질을 지나면서 재귀반사된 빛이 운전자 시야보다 더 높은 방향으로 진행하여 시인성이 급감하는 것이다. 따라서 우천과 같은 상황에서는 더 높은 굴절률의 글라스

비드를 사용해야 한다. 물론 글라스비드 표면에서 확산 반사(diffuse reflection)와 분산(scattering)도 발생할 수 있다. 그러나 재귀반사된 주광(main light)이 운전자 시야로 들어가는 각도 즉, 관측각도(observation angle)를 분석할 땐(Fig. 3 참조) 확산반사나 분산 현상이 큰 영향을 주지 않을 것이어서 본고에서는 고려하지 않고 설명하기로 한다.

글라스비드의 굴절률을 높이는 일반적인 방법은 굴절률이 높은 $\text{TiO}_2(2.1)$, $\text{ZnO}(1.61)$, $\text{BaO}(1.88)$, $\text{ZrO}_2(2.16)$, $\text{PbO}(1.88)$, $\text{La}_2\text{O}_3(2.57)$, $\text{Bi}_2\text{O}_3(3.15)$ 등의 산화물을 첨가하는 것이다[21,23]. 이 방법은 굴절률 조정이 쉽다는 장점이 있으나, 성분들 간에 여러 화학작용이 발생하며, 제조공정에서 실투, 굴절률 불균일, 결정 생성 등이 나타날 우려가 있다. 따라서 발생될 현상을 예측하고, 성분배합을 세밀히 조절해야만 투명한 고 굴절률 글라스비드를 제조할 수 있다[24]. 특히 고 굴절 산화물 함량이 증가하면 실투발생 가능성이 높는데[21], 이 때 SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 등 함량을 높여야 한다. 더구나 굴절률이 2.0~2.5인 고 굴절률 유리를 제조하는 경우, La_2O_3 , Bi_2O_3 , Li_2O , SrO , B_2O_3 등의 산화물을 추가적으로 첨가하거나 함량을 높여야 한다[7].

이와 같이 고 굴절의 글라스비드를 제조하는 방법은 공정상 어려움은 물론 원료가격이 비싸다는 문제가 있다. 이를 극복하는 방안으로 저 굴절률 글라스비드 표면에 고 굴절률 물질을 코팅하는 방법이 있다. Ti, Zn, Ba, Zr 등 고 굴절률 이온이 포함된 염 또는 sol 용액에 저 굴절률 글라스비드를 함침시켜, 표면에 고 굴절 용액을 코팅하는 것이다[25-27].

또 다른 방법으로 이온교환법이 있다. 이온교환법은 유리 내에 존재하는 작은 크기의 이온을 큰 크기의 이온과 교환시키는 것이다. 즉 Na, Ca 등과 같은 작은 이온을 K, Ag 같은 큰 이온으로 교환하는 것으로, 원래는 유리의 강도증진 목적으로 사용되는 공정이다. 김선욱 등은 저 굴절률 글라스비드를 KNO_3 , AgNO_3 등의 용액에 함침시킨 후 330~375°C의 온도에서 1~8시간 열처리 하여 이온교환을 유도함으로써 강도는 물론 굴절률도 증가시킬 수 있다고 하였다[28].

국내 글라스비드 규격인 ‘KS L 2521: 도로표지 도료용 유리알’을 Table 8에 나타내었다[29]. Table 8을 보

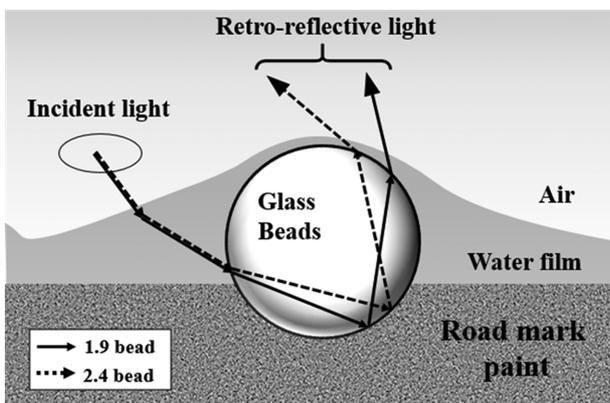


Fig. 9. Two different paths of retro-reflective light as a function of refractive index of glass beads in rainy day.

Table 8 Standard for glass bead performance in Korea [29]

	Refractive index	Retro-reflectivity (mcd/m ² ·lux)
1	1.5~1.64	-
2	1.64~1.80	-
3	> 1.80	< 180
4	> 1.80	> 180

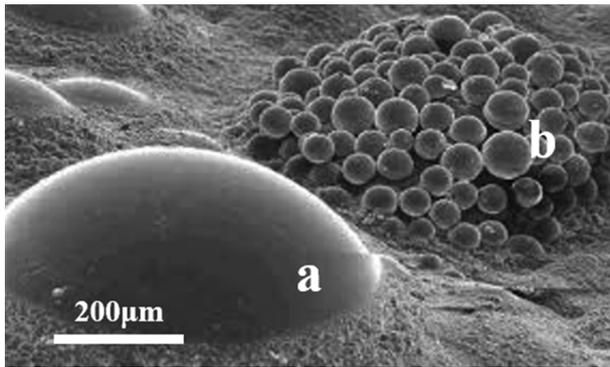


Fig. 10. SEM image of glass beads. 'a' and 'b' indicate the bare- and the microcrystalline shell-bead, respectively [6].

면, 글라스비드를 1~4호로 분류하였으며, 비드의 굴절률이 4호인 경우 1.8 이상, 1호인 경우 1.5~1.64로 정의하였다. 미국 'T'사에서는 저 굴절률 조성의 글라스비드 표면에 고 굴절률 조성의 작은 결정화 글라스비드를 붙여 소위 '코어-셸(core-shell)' 형태의 재귀반사도가 높은 글라스비드를 제품화하였다(Fig. 10 참조). 'T'사가 제조한 글라스비드는 국내의 도로표시 규정보다 높은 굴절률 및 재귀반사율을 갖고 있어, 국내에서 일반 글라스비드와 혼합 사용되고 있다[6].

국내에서도 코어-셸 구조의 글라스비드에 관한 연구결과가 있다[1]. 이는 굴절률이 1.5이고 직경이 약 600 μm 인 코어 글라스비드 표면에 비반응성 접착제를 코팅한 후, 그 위에 굴절률이 1.93~2.2이고 직경이 약 70 μm 인 셸 글라스비드를 부착시켜 제조한 것으로 그 미세구조는 Fig. 10의 'T'사 글라스비드와 유사하다. 그러나 고굴절물질 코팅은 계면에서 박리가 발생하여 내구성이 낮아질 우려가 있다. 이를 보완하기 위해 보호액을 추가로 코팅하기도 한다[1]. 표면 개질이나 고굴절 물질이 코팅된 글라스비드의 경우, 입사광이 굴절되는 계면이 그만큼 늘어나므로 확산반사나 산란에 의한 광손실이 증가될 수 있다. 따라서 이러한 글라스비드가 사용된 도로표시의 정확한 재귀반사도 값은 현장실험을 통해 측정되어야 할 것이다.

3.4. 도로표시의 내구성

도로표시의 내구성은 'KS M 6080: 노면 표시용 도료' [30]에 의거하여 측정한다. 이 시험에서 글라스비드가 함침된 도료 표면에 물을 뿌리면서 약 10 km/h 속도로 회전판을 3시간 회전한 다음, 60 km/h 속도로 회전수가 10만, 20만, 40만, 60만 회전에 도달할 때 측정한다. 백색 5종 도료의 국내 규정은 100 회전 후 마모 감량이 300 mg 이하이고 20만 회 기준 300 $\text{mcd}/\text{m}^2 \cdot \text{lux}$ 이상이다.

Park 등[1]은 바인더와 비드를 여러 종류로 조합하여

마모 저항성을 비교 평가한 결과를 발표하였다. 즉 (a) 코어-셸 글라스비드 + 용착식 바인더, (b) 미국 'T'사 코어-셸 글라스비드 + 용착식 바인더, (c) 일반 글라스비드 + 용착식 바인더, (d) 일반 글라스비드 + 상온형 바인더의 4종류를 평가한 결과, 내마모성이 우수한 순서는 $d > a > c > b$ 였다. 이러한 이유는 상온형 바인더가 용착식 바인더에 비해 시공 시 점도가 낮게 나타나 글라스비드가 충분히 함침되었기 때문이라고 하였다. 또한 미국 'T'사 코어-셸 글라스비드는 셸과 비드 계면에 공극이 있고 무게가 가벼워 글라스비드 함침이 잘 되지 않았기 때문이라고 판단하였다. 따라서 글라스비드의 도료 내 함침특성은 도로표시의 내마모성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Lee 등은 글라스비드 굴절률과 최적 함침율을 연구하였다. Lee 등은 글라스비드의 도료 내 함침율은 굴절률이 1.5인 비드는 약 60%, 굴절률이 1.9인 경우는 50%, 굴절률이 2.2인 경우는 30%일 때 도로표시의 재귀반사효율이 가장 높다고 발표하였다[31]. 하지만 국내 글라스비드 규격 'KS L 2521'[29]은 글라스비드의 종류에 상관없이 50~60% 함침률과 450~900 g/m^2 살포량을 권장하고 있다.

글라스비드의 기계적 내마모성 또는 내파괴성 등 내구성에 대한 구체적인 국내기준은 아직 규정되어 있지 않지만 'KS L 2521'[29]에는 타원, 각진 형태, 불투명, 이물 및 입자간 용착 등 결점이 있는 글라스비드 총계가 전체 글라스비드의 20% 이하여야 된다는 조항이 있다. 한편 영국 글라스비드 규격인 'BS EN 1423: Road marking materials. Drop on materials. Glass beads, antiskid aggregates and mixtures of the two'[32]에서는 글라스비드의 구형율이 80% 이상이어야 한다는 규정이 있다. 이를 통해 글라스비드의 구형률이 내구성에 영향을 미치는 것으로 생각되며 따라서 향후 글라스비드의 구형률과 내구성의 상관관계를 정량적으로 고찰하는 연구가 필요하다고 판단된다.

한편 'KS L 2521'에는 글라스비드의 내화화성에 대해 규정되어 있는데, 도로표시용 글라스비드가 물, 염산, 염화칼슘, 황화나트륨과 접촉했을 때 표면이 희뿌옇게 되거나 흐려지는 현상을 보이면 사용할 수 없다고 되어 있다. 또한 표면의 변화를 20 내지 50배 확대 현미경을 이용하여 표면의 변경사항을 기록하고, 변화 유무에 따라 합격 또는 불합격으로 판단해야 한다고 명시되어 있다.

3.5. 현 규정과 자율주행차량 시대 적합성 고찰

자율주행차의 라이더(LiDAR)(Light Detection And Ranging)는 레이저를 사용하므로 매우 작은 물체 식별과 야간 대응성이 매우 우수하기 때문에 카메라 센서보다

월등한 차선식별 성능을 갖는다[33]. 국내에서도 라이다를 탑재하여 야간 자율주행에 성공한 바 있다[34]. 이는 라이다 없이는 야간 주행시 차선 인식이 낮다는 것을 의미한다.

그러나 라이다 센서는 높은 가격 때문에 자율주행차량에 채택될지 여부가 업체별로 입장이 다른 것으로 알려져 있다. 만약 여러 센서가 사용된다면, 자율주행차가 상용화되기 위해서는 기존 차량 인식 센서로도 야간 및 우천 상황에서 충분한 차선 인식이 담보되어야 한다. 하지만 현재 자율주행차량의 다양한 센서에 대응하여 도로표시의 재귀반사도 기준이 마련되어 있지 않으며, 관련 연구도 찾아보기 어려운 실정이다.

최근 국내 국토연구원[35]와 한국건설기술연구원[36]에서 진행된 연구결과를 보면, 국내 자율주행차의 상용화에 대비하여 차선인식 성능 향상 요소를 검토하였고, 이에 맞는 재귀반사성능 관련 기준의 검토 필요성을 언급하고 있다. 그러나 자율주행차량과 관련된 기준이 마련되기 위해서는 더 많은 연구가 필요한 상황이며, 특히 현재 사용되고 있는 차선인식 센서들의 수준에 맞춘 도로표시 재귀반사율 기준을 정하는 것이 시급하다고 판단된다.

4. 결 론

높은 차선인식률은 자율주행차량 상용화에 필수적인 요소이다. 도로표시나 차선의 재귀반사도는 페인트에 도포된 글라스비드의 굴절률 증가와 함께 높아진다. 국내 도로표시의 재귀반사 기준은 백색광에 대해 240 mcd/m²·lux인데, 선진국 기준에 비해 다소 낮은 편이어서 야간이나 우천 시 안전성 담보는 물론, 자율주행 상용화에 대비하여 더욱 높여야 할 것으로 사료된다.

글라스비드는 유리 슬러리 또는 용체를 고온로 또는 대기 중에 분사시키거나 유리 frit를 화염속에서 표면만 급속히 녹여 구형화하여 제조한다. 고 굴절률 글라스비드는 소다-라임-실리케이트 조성 유리(굴절률 1.3~1.5)에 TiO₂, BaO, Bi₂O₃ 등의 고 굴절 산화물을 첨가하여 제조하는데, 공정과정에서 실투 등의 결합발생은 물론 가격상승의 문제점이 있다. 이를 극복하는 방안으로 고굴절 물질을 일반 글라스비드 표면에 코팅하는 방법이 있다. 즉 일반 글라스비드 표면에 고 굴절률 성분의 유기 금속 sol 또는 염 용액을 코팅하거나, KNO₃, AgNO₃ 등 용융액을 사용하여 표면부위 만 이온교환을 시키는 것이다. 이 외에도 일반 글라스비드 표면에 미세한 크기의 고 굴절률 비드를 코팅하여 코어-셸 형태로 제조하는 방법도 있다. 다만 이러한 제품은 표면 박리 등이 발생할 가능성이 높으므로 내마모도 증진 방안이 필요하다. 도

로표시 페인트에 도포된 글라스비드는 차량 바퀴로부터 받는 압축 및 비틀림 응력이나 악화된 기상상태에 의해서 마모되거나 탈락된다. 따라서 도로와 글라스비드 복합물의 내마모성과 적정 함침률을 고려해야 할 인자이다.

현재 국내에서 자율주행차량 시대를 대비하여 교통안전 인프라 구축을 계획하고 있고, 차선인식 성능을 향상시키는 요소들을 검토하고는 있으나, 자율주행차량 센서의 수준을 기준으로 규정되는 도로표시의 재귀반사성능에 대한 연구는 시급히 필요한 상황이다. 더불어 고내구성을 갖으며 제조공정이 간단하여 저렴한 비용으로 대량 생산이 가능한 고굴절 글라스비드 개발도 함께 이루어진다면 안전한 자율주행차량 시대를 앞당길 수 있다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2019년 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

References

- [1] D.H. Park, Y.K. Kim, J.S. Choi and S.H. Ma, "Development of high durability road marking paint using high reflective glass beads", Report of Research by Korea Conformity Laboratories (2011) p. 21.
- [2] Glass bead, internet site at http://hanatechno.com/front/php/image_zoom.php?product_no=506&main_cate_no=111&display_group=1.
- [3] Reflective glass beads. Traffic Supplies and Distribution, internet site at <https://tsdist.com/product/pavement-marking-materials/reflective-glass-beads/reflective-glass-beads>.
- [4] J.-I. Kim, "The preparation of glass beads", J. Korean Chem. Soc. 17 (1973) 198.
- [5] S.K. Lee, "Optimal mixtures of roadway pavement marking beads under various weather conditions", Korean Soc. Road Eng. 14 (2012) 131.
- [6] 3M innovative properties company, "Transparent microspheres", United states patent 6245700 B1 (2001).
- [7] H.T. Zwahlen and T. Schnell, "Visibility of new center-line and edge line pavement markings", Transportation Research Records, J. Transportation Research Board 1605 (1997) 491.
- [8] S.K. Lee, "Optimal mixtures of roadway pavement marking beads under various weather conditions", Ajou University graduate school Master's Thesis (2012) 31.
- [9] M.M. Matthew and L. Beverly, "Autonomous vehicles for personal transport: a technology assessment", working paper series (2011) 13.
- [10] D.H. Lee, "Fully autonomous Hyundai car, Drive in Moscow", joongangnews (2019.07.12.) p. 4.
- [11] Korean National Police Agency, "Traffic Road Marking

- Installation·Management Manual” (2005).
- [12] Korean National Police Agency, “Traffic Road Marking Installation·Management Manual” (2012).
- [13] ASTM E1710, “Standard Test Method for Measurement of Retroreflective Pavement Marking Materials with CEN-Prescribed Geometry Using a Portable Retro-reflectometer” (2018).
- [14] ASTM E2176, “Standard Test Method for Measuring the Coefficient of Retroreflected Luminance of Pavement Markings in a Standard Condition of Continuous Wetting (RL-Rain)” (2008).
- [15] ASTM E2177, “Standard Test Method for Measuring the Coefficient of Retroreflected Luminance (RL) of Pavement Markings in a Standard Condition of Wetness” (2019).
- [16] CEN EN 1436, “Road Marking Materials” (1997).
- [17] Road Traffic Authority, “Research on securing road marking reflection performance” (2017).
- [18] D.H Joo, H.W. Lee and C.S. Hyeun, “A study on road marking reflective performance standards, road traffic authority”, Report of Research (2012) 2012-0118-121.
- [19] ASTM E 808, “Standard Practice for Describing Retro-reflection” (2016).
- [20] Y.J. Jo, “Development of glass beads manufacturing equipment”, Report of Research by KITECH (1990).
- [21] H.Y. Ryu and S.J. Jo, “High refractive index glass beads and manufacturing method with excellent retroreflectivity”, Korean Patent (2013) 10-1424912.
- [22] R.A. Serway and J.S. Faughn, “College Physics” (Brooks Cole, Boston, 2012) p. 598.
- [23] G.W. Morey, “The properties of glass”, 2nd ed. (Reihold, New York, 1954) p. 591.
- [24] C.G. Lee, H.S. Lee and H.U. Oh, “High performance glass beads for traffic marking in wet water”, J. Korean Soc. Road Eng. 14 (2012) 9.
- [25] B.S. Dunn and M. Yamane, “Sol - Gel Optics IV”, Proceeding of SPIE Inter. Soc. Opt. Eng. 36 (1997).
- [26] Asahi glass, “Manufacturing method of high refractive index micro spherical glass”, Japan patent (1998) 9-150888.
- [27] S.W. Kim and M.C. Jeon, “Manufacturing method of high refractive glass beads by coating”, Korea patent (2000) 2002-0017667.
- [28] S.W. Kim and S.C. Hwang, “Manufacturing method of high refractive index glass beads by ion exchange”, Korea patent (2000) 10-0463586.
- [29] KS L 2521, “Standard for glass beads for road marking paints” (2015).
- [30] KS M 6080, “Road marking materials” (2014).
- [31] C.G. Lee, “A Study of Quality control for 4-5 Type Road marking material”, Report of Research (2016) p.72.
- [32] BS EN 1423, “Road marking materials. Drop on materials. Glass beads, antiskid aggregates and mixtures of the two” (2018).
- [33] M.H. Han, G.D. Choi, H.S. Seo and B.K. Mheen, “Analysis of eye-safe LIDAR signal under various measurement environments and reflection conditions” Korean J. Opt. Photon. 29 (2018) 204.
- [34] Hyundai Motor Group, internet site at <https://news.hmg-journal.com/Tech/night-highway-autonomous> (2018).
- [35] G.H Kim, “A Preliminary Study to Make the Road Sector Ready for the Commercialization of Automated Vehicles: Focusing on Road Design and Planning” Report of KRIHS (Korea Research Institute for Human Settlements) (2018) p. 27.
- [36] H.S. Kim and Y.M. Kim, “The elements to affect lane marking recognition in automated driving”, J. Korea Inst. Intell. Transp. Syst. (2018) 109.