

# 커튼월 고층 건물 빛 반사에 의한 운전자 눈부심 가능성

송형준\*<sup>†</sup> · 서영교\*\*

## A Case Study on the Driver's Glare Hazard Assessment by Light Reflection of Curtain Wall Type Buildings

Hyung-Jun Song\*<sup>†</sup> · Young Kyo Seo\*\*

### <sup>†</sup>Corresponding Author

Hyung-Jun Song

Tel : +82-2-970-6387

E-mail : hj.song@seoultech.ac.kr

Received : February 4, 2021

Revised : March 18, 2021

Accepted : April 9, 2021

Copyright©2021 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Abstract** : Buildings with glass curtain walls have become popular due to their appealing aesthetics and ability to let in natural light. However, light reflection from the glass surface is unavoidable in these buildings. In particular, the reflection of light from the glass envelope can create afterimage glare, a hazard to nearby drivers and pedestrians. Despite this potential danger, glare from buildings with curtain walls has not been well-studied. Hence, we analyzed the effect of light reflection on glare around a glass-enclosed skyscraper, depending on its surface reflectance. We investigated the potential hazard of glare to drivers using a commercially available software program. The results indicate that the direction of light reflection is distinctive when the incident angle of solar light increases. Moreover, this light reflection is high enough to induce an afterimage to drivers and pedestrians near the building. We found that keeping the reflectance of the building surface under 3% is required to minimize the afterimage hazard to drivers. Consequently, we recommend managing glass reflectance and installing additional traffic safety systems to reduce traffic accidents near curtain wall buildings.

**Key Words** : glare hazard assessment, building light reflection, traffic safety

## 1. 서론

커튼월 (Glass curtain wall) 방식은 유리로 건물 외벽을 감싸는 방식으로, 건물 내부 채광을 극대화하고 건물 입주자들이 주변 풍경을 즐길 수 있어서 건물에 많이 적용되고 있다. 특히 초고층 빌딩의 심미성을 높이기 위해 사용된다. 하지만 일부 사례에서 나타나듯이, 초고층 커튼월 빌딩의 표면을 덮고 있는 유리의 입사 태양광 반사에 의해 주변 건물 입주자 및 이용자들에게 피해를 미치는 사례가 급증하고 있다<sup>1-3)</sup>. 비 커튼월 건물의 경우 빛 반사가 일어나는 유리로 덮혀 있는 영역이 제한되어 있지만, 커튼월 건물의 경우 건물 전체에서 입사광이 반사 될 수 있어서 눈부심에 의한 피해 범위가 넓고 피해 정도도 심한 수준이다<sup>1-3)</sup>. 기존 연구에서는 특정 건물에서 주변 건물에 영향을 줄 수 있는

정도를 전산모사와 실제 측정을 통해 경기도 성남시의 대형 커튼월 건물, 부산시 해운대구의 커튼월 타입 고층 아파트 등에 대해서 심도 깊게 연구하였다. 특히 빛 공해에 의한 특정 지점에서 눈부심 (glare) 현상을 시간대에 따른 태양 고도 변화를 고려해서 분석하였다. 하지만 다수의 연구가 주변 건물의 광공해 혹은 눈부심 피해에 집중되어 있었고, 건축물로 인해 발생할 수 있는 교통 안전 이나 주변 안전 측면에서는 많은 연구가 이루어지지 못하였다.

고층 건물에 의한 빛 반사는 넓은 영역에 영향을 줌으로 주변 도로를 운행하는 차량 및 보행자에게 위험을 초래할 수 있다. 기존 연구에서 보고된 바에 의하면 강한 빛이 운전자의 눈으로 들어오는 경우, 운전자는 눈부심으로 인해 시야 확보가 어려워지고, 이로 인해 사고 위험성이 높아질 수 있다<sup>4-5)</sup>. 특히 태양광이 차량

\*서울과학기술대학교 안전공학과 조교수 (Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

\*\*서울과학기술대학교 안전재난소방방재프로그램 석사 (Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

의 진행 방향 정면으로 들어오는 경우나, 어두운 공간에서 갑자기 밝은 공간으로 이동시 위험도가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 보행자 역시 다른 물체나 빛에 의해 시야가 방해 받는 경우 위험성이 교통 사고의 위험성이 높아지는 문제점이 지적되었다<sup>6-8)</sup>. 즉 눈부심은 운전자나 보행자의 시야를 순간 잃게하고, 주변 상황을 인식하지 못해 교통 사고로 연결될 가능성을 높인다. 특히 강한 빛이 인간의 눈으로 인가 되어 4-12초 정도 앞에 있는 사물을 인식하지 못하는 상황이 벌어진다<sup>8-9)</sup>. 이를 잔상(after-image)이라고 한다.

잔상에 의한 위험을 방지하기 위해 대부분의 고층 커튼월 건물의 경우 반사방지 표면처리가 적용된 유리를 도입하고 있다<sup>10)</sup>. 하지만 유리 표면에 있는 반사 방지막의 경우 사용기간이 증가하면서 열화 가능성이 높아진다. 특히 고층 건물의 경우 가혹한 자연 환경으로 인해 특성 저하가 가속된다<sup>11-13)</sup>. 강한 바람과 함께 오는 먼지와 낮은 기온 등으로 인해 지상보다 빠른 시간 내에 반사방지막의 특성이 저하 될 수 있다. 이 경우 건물 표면 반사가 증가하게 되고, 주변 건물 및 교통환경에 영향을 미칠 수도 있다. 이런 위험성에도 불구하고 아직까지 커튼월 건물의 반사가 교통 안전에 미칠 수 있는 영향성에 대한 체계적인 연구는 이루어지지 않았다. 이에 따라 본 연구에서는 국내에서 가장 높은 커튼월 빌딩 주변에서 일어날 수 있는 운전자 눈부심 위험성을 분석하였다. 특히 반사방지막 손상으로 인해 유리 표면의 반사율 변화할 경우를 대비하여 건물 표면 태양광 반사도에 따른 운전자의 영향성 분석 및 특정 위치의 위험성을 전산모사를 이용하여 체계적으로 계산하고 위험성을 도출하였다. 이를 통해 커튼월 건물 주변에서 발생할 수 있는 교통안전 위험성을 분석하고 및 이를 방지하기 위한 관리방안에 대해 제시하고자 한다.

## 2. 연구 방법

본 연구에서는 국내에서 가장 높은 초고층 커튼월 구조에서 발생할 수 있는 빛 반사와 이로 인한 운전자 시야 마비에 관련된 연구를 전산모사를 통해 분석하였다. 먼저 본 연구에 사용된 건물은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 서울시 송파구 소재한 국내 최대층 높이인 건물이다. 본 건물은 높이 554 m이고 4면이 모두 고단열 유리 구조의 강화유리로 덮여 있는 커튼월 구조 건물이다. 건물은 정남향 방향에서 20도 틀어져 있어서, 남남서 방향이다. 계산의 편의를 위해 건물을 4개의 면으로 나누어서 각각 면에서 발생할 수 있는 눈부심을 비

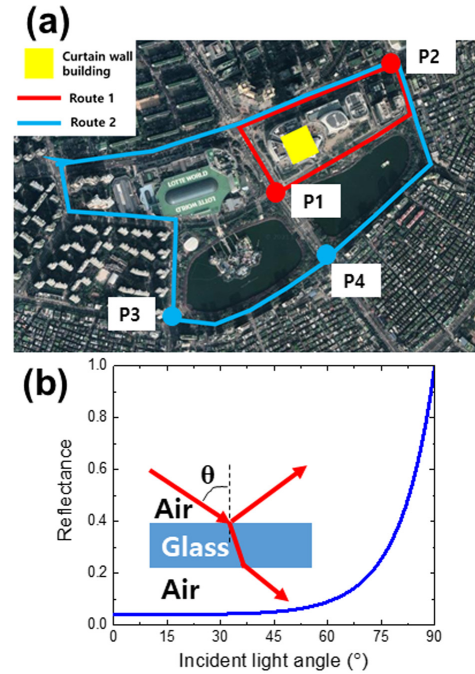


Fig. 1. (a) Sight map for glare analysis (source: map, google.com), (b) Angular dependence of air/glass/air interface reflectance. The inset of (b) is schematic of light path in the air/glass/air interface.

교하여 보았다. 현재는 저반사를 위한 필름이 부착되어 있지만, 향후 필름이 경년 열화에 따라 건물 반사도가 변화 할 수 있는 상황을 가정해서 분석하였다. 운전자의 미치는 영향을 건물 주변의 두 개 경로 (route 1, 2)와 4개 교차로 (P1, P2, P3, P4)에서 계산하였다.

전산모사는 미국 Sandia National Lab에서 개발한 Solar Glare Hazard Analysis Tool (SGHAT)을 이용하여 연간 발생할 수 있는 빛 반사에 대해 분석하였다. SGHAT의 장점은 특정 위도와 경도에서 계절과 시간에 따라 변화하는 태양광의 높이와 각도 등을 고려하여 시간대 별로 어느 위치에 어떤 정도의 눈부심이 발생할 수 있는지 확인할 수 있다<sup>14,15)</sup>. 따라서 안전성 평가에 많이 사용된다. 예를 들어 미국 항공국 (Federal Aviation Administration)의 규정에 (78 FR 63276, 2013년 10월 23일 제정) 의하면 공항 주변에 빛이 반사될 수 있는 건물이나 태양광 발전 설비가 설치되기 전 이 프로그램을 이용하여 활주로에서 발생할 수 있는 눈부심 정도를 비교하도록 규정되어 있다<sup>16)</sup>. 이 프로그램에서는 반사광에 의한 눈부심 정도를 반사체 면과 눈의 망막(Retina) 사이의 대응각 (Subtended source of angle)과 망막에 들어오는 빛의 세기 (Retina Irradiance,  $W/cm^2$ )로 계절, 시간, 위치에 따라 나타낸다. 눈에 입사되는 빛의 강도가 특정 강도를 넘어가는 경우 연구

적인 각막 손상 (Permanant retinal damage), 일시적인 시각 손상 (Potential for after-image), 시각 손상이 거의 없는 영역 (Low potential for after-image)으로 구분된다. 이를 이용하여 커튼월 건물의 표면 반사도가 변화할 경우 나타날 수 있는 운전자 눈부심 정도를 정량화하고, 위험이 발생할 수 있는 반사도를 찾아서 건물 표면 빛 반사도 관리 방안을 도출하고자 한다. 단, 본 프로그램의 경우 대상 건물 이외에 다른 건물에 의한 반사 빛 차단 효과 및 음영에 대한 부분이 고려되지 못해 실제보다 넓은 범위에서 반사 위험성이 평가 될 수도 있다. 하지만 주변 건축물의 재개발로 인해 사라지거나, 겨울철 가로수에 의한 반사빛 차단 효과가 약해지는 경우도 발생하기에 이를 고려하여 본 프로그램을 사용하였다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 커튼월 고층 빌딩 빛 반사 방향 분석

Fig. 2는 대상 커튼월 초고층 빌딩의 4면에서 연간 발생할 수 있는 빛 반사의 방향을 나타낸다. 연중 입사 태양광의 반사 방향을 서울지방의 태양의 방위각 (Azimuthal angle)과 고도각 (Elevation angle)을 고려하여 계산하였다. Fig. 2의 Y 축은 남북 방향 (음수: 남쪽, 양수: 북쪽), X 축은 동서 방향(음수: 서쪽, 양수: 동쪽)을 나타내며, 빌딩은 원점에 존재한다고 가정하였다. 유리 와 공기 계면에서 일어나는 빛 반사는 Fig. 1과 같이 주로 입사하는 빛의 각도 크기가 큰 경우 입사광의 대부분이 반사되기에 태양광이 건물면의 측면에서 입

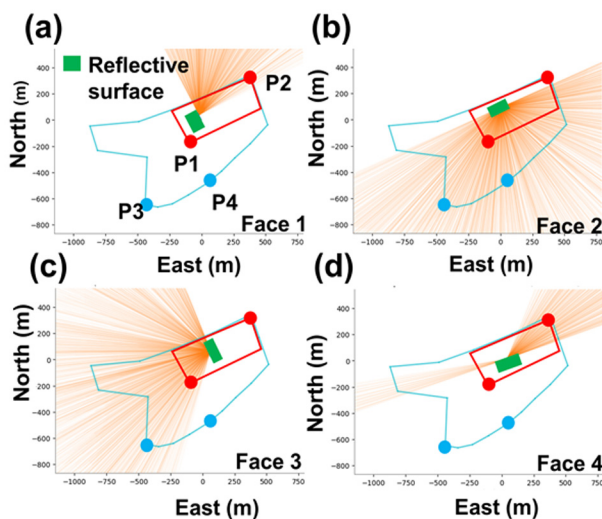


Fig. 2. Direction of reflected light with cross-section and possible driving routes caused by glass wall building surface : (a) face 1, (b) face 2, (c) face 3, and (d) face 4.

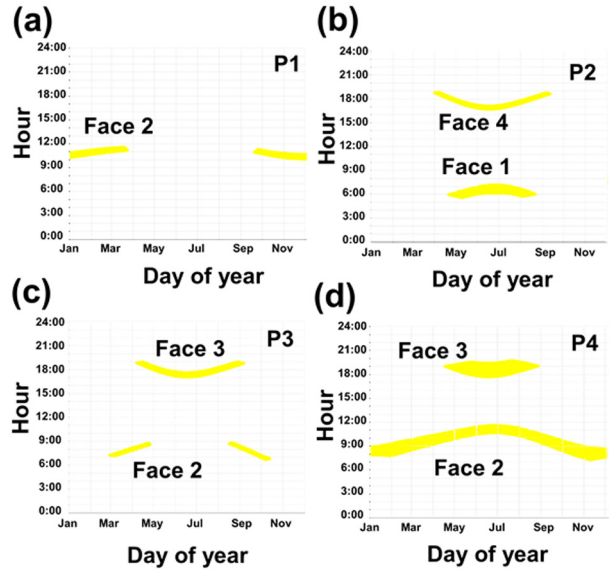


Fig. 3. Predicted annual glare analysis at cross-sections of (a) P1, (b) P2 (c) P3, and (d) P4. Exact position of each cross-section is shown in Fig. 1.

사되거나, 여름철에 태양 고도가 높은 경우 건물에 의한 반사가 뚜렷하게 나타난다<sup>17)</sup>. 본 시뮬레이션에서 실행된 건물에 의한 반사광의 경로 및 범위는 건물 표면의 반사도와 무관하게 발생하였고, 반사도가 변화하는 경우 눈부심 정도의 차이는 발생하였다.

건물의 4면 중 동, 남, 서, 북쪽을 주로 바라보는 면을 Face 1, 2, 3, 4라고 정의하면, Face 1번의 경우 주로 오전 이른 시간대에 남동쪽에서 들어오는 빛을 북동쪽으로 반사한다. 이로 인해 북동쪽에 있는 도로 및 교차로에 영향을 줄 수 있다. Face 2의 경우 남쪽에서 다양한 시간대에 입사되는 태양광을 건물 남쪽 방향으로 넓게 반사한다. 오전에 남동쪽에서 들어오는 입사광의 경우 건물 유리면에 의해 남서쪽으로 반사된다. 또한 정오 이후 남서쪽에서 입사되는 빛은 동쪽으로 반사된다. 그리고 여름철의 높은 고도로 입사되는 태양광의 경우 유리 건물에 의해 바로 아래에 있는 도로나 교차로로 반사될 수 있다. Face 3는 주로 오후 3시 이후에 나, 늦은 오후시간에 입사되는 빛을 건물 서쪽 사면으로 반사한다. 마지막으로 Face 4의 경우 주로 북쪽을 보고 있어서 건물 외면에 의한 입사광 반사가 적은 영역에서 나타난다. 오후 늦게 서편에서 입사하는 빛에 의해 동쪽으로 빛 반사가 일어날 수 있다. 이 결과는 커튼월 건물 북쪽 일부를 제외한 주변영역에 건물을 둘러싸고 있는 유리표면에 의한 빛 반사의 영향을 받을 수 있다는 것을 알려준다. 또한 주변 도로 및 교차로를 이용하는 운전자 및 보행자가 커튼월 건물의 빛 반사의 영향권 아래 있을 수 있다는 것을 보여준다.



구체적으로 건물의 반사가 건물 주변의 교차로에 영향을 미칠 수 있는 시간대를 알아보기 위해 4개의 교차로 (P1, P2, P3, P4)에서 반사가 영향을 주는 시간과 계정을 Fig 3과 같이 분석해 보았다. 태양의 고도는 기울어진 자전축에 의해 연중 변화한다. 여름철의 경우 고도각이 높아지고 (서울 하지 기준 76°), 반대로 겨울철의 경우 고도가 낮아진다(서울 동지 기준 29°). 따라서 같은 위치에서도 계절에 따라 건물에 의해 반사되어 오는 태양광의 양이 변화할 수 있다. 또한 낮 시간 동안 태양이 동쪽에서 서쪽으로 이동하기 때문에, 시간에 따라 변화할 수 있다. 따라서 연중 태양의 고도 변화와 낮 시간 동안 변화하는 방위각을 고려하여 반사빛이 영향을 주는 시간대를 분석하였다.

건물 남서쪽 120 m에 위치한 P1에서는 주로 겨울철 오전 시간대에 남동쪽에서 Face 2번에 입사하는 빛의 일부가 반사되어 전달된다. 이 경우 입사광의 고도각은 낮은 반면, 방위각은 커서 반사되는 빛의 양이 크게 나타날 수 있다. 한편 건물로부터 동북쪽 420 m에 위치한 P2 교차로에서는 여름철 오전 이른 시간에 Face 1면에 입사한 빛이 강하게 반사될 수 있다. 또한 여름 오후 6시경 남서쪽에서 입사되는 빛이 교차로로 반사될 수 있다. 그리고 남서쪽에 입사한 두 개의 교차로인 P3와 P4에서는 오전 이른 시간대에 건물 Face 2로 남동쪽에서 입사되는 태양광이 반사되어 영향을 줄 수 있으며, 오후 5시경 서쪽에서 입사되는 태양광이 Face 3번에서 의해 반사되어 영향을 미칠 수 있다. 이를 통해 커튼월 건물의 빛 반사는 주변 도로와 교차로에 영향을 줄 수 있고, 계절과 시간의 변화에 따라 변화하는 태양광의 각도 특성상 특정 시간대에 위험도가 집중될 수 있다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 건물 표면 반사도에 따른 운전자 눈부심

3.1절에서 제시된 것처럼 대형 커튼월 건물은 입사광을 반사하여 주변부에 영향을 미친다. 반사에 의한 문제점을 최소화하기 위해 대부분의 고층 건물의 경우 반사 방지 필름이 적용되어 입사되는 빛을 여러 방향으로 산란시키거나, 박막층을 이용하여 반사의 절대량을 줄이고 있다<sup>10,18)</sup>. 본 연구에서 분석대상인 건물 역시 반사방지막이 도입되어, 현재 3.1절에서 시뮬레이션과 같이 넓은 영역에 빛 반사 피해를 주지 않는다. 하지만 이 반사 방지층은 오염, 기후 조건 등에 의해 쉽게 손상될 수 있고, 이 경우 표면에서 빛 반사도가 상승할 수 있다. 이처럼 건물 표면의 반사도가 변화함에 따라 발생할 수 있는 문제점을 알아보기 위해 유리의 정면 반사도를 1-9%까지 변화시키면서 눈부심 강도를 비교

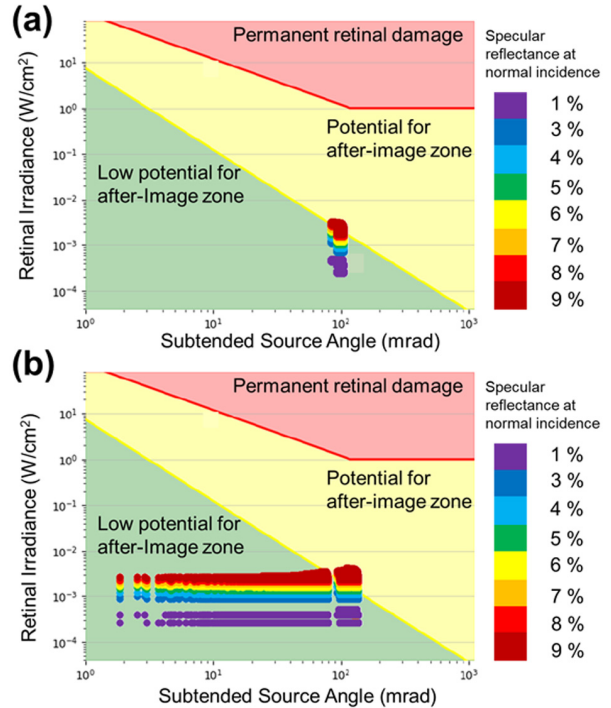


Fig. 4. Glare hazard plot of glass wall building for drivers rotating (a) route 1 and (b) 2 caused by face 1 and 2, respectively.

해 보았다.

Fig. 4는 대상 건물 주변에 Route 1, 2번을 돌고 있는 운전자에게 발생할 수 있는 눈부심 위험도 (Glare hazard plot)를 Face 1과 2의 반사도에 따라 각각 표시하였다. Ho의 연구 결과에 의하면 사람의 눈부심은 망막 입사되는 빛의 양(Retinal Irradiance)과 눈과 광원이 반사되는 면과 이루는 각도 (Subtended angle)에 따라서 결정된다<sup>8)</sup>. 이때 반사면과 눈사이의 각도가 넓으면서 강도가 강한 경우 눈부심을 초래한다. Fig. 4의 초록색 영역에 건물 반사가 속한 경우 눈부심의 강도가 약해 순간 눈부심이 발생하지만, 망막이 손상되어 눈에 잔상이 남을 가능성은 매우 낮아진다. 하지만 빛의 강도가 강해지거나, 넓은 영역에서 반사되는 빛이 눈으로 들어오는 경우 (Fig. 4의 노란색 영역) 눈에 잔상이 발생하여 잔상을 발생시킬 수 있다. 가장 강한 빛이 넓은 영역에서 들어오는 붉은색 영역의 경우 망막이 영구 손상되어 시력을 잃는 문제가 발생한다. 아무 처리 되지 않은 유리 와 공기 계면의 경우 거울과 같은 높은 반사도가 아닌 약 8-9% 내외이기에, 건물 주변을 운전하는 운전자의 경우 영구 망막 손상의 문제는 발생하지 않는다. 하지만 Fig. 4에 나타난 것처럼 반사율이 높아짐에 따라 망막에 전달되는 빛의 강도가 더 강해지고, 이로 인해서 운전자가 잔상이 남을 가능성이 높아진다.

Route 1에서는 표면 유리의 반사도가 6% 이상으로 높아지는 경우 운전자의 망막에 잔상을 남기는 눈부심이 발생할 수 있다. 즉 건물 표면 유리 반사율이 6%가 넘어가는 경우 운전자에게 잔상을 남겨 위험한 상황을 초래 할 수 있다. Route 2에서도 반사도가 5% 이상으로 높아지는 경우 운전자의 순간 시력을 마비시킬 수 있는 가능성이 있다. 특히 Route 2의 경우 건물 남쪽에 있는 호수 구간을 운전하는 경우 건물과 운전자 사이의 반사빛을 막아 줄 수 있는 건물과 구조물이 없기 때문에 매우 위험한 상황으로 연결될 수 있다.

이를 기반으로 자동차의 정지가 필요하고, 보행자의 이동이 있어 가장 위험한 교차로를 중심으로 반사도에 따른 위험도를 추가적으로 분석해 보았다. Fig. 5는 건물 주변 4개의 교차로에서 건물 반사도에 따른 연간 눈부심 시간 변화이다. 4개의 그래프에서 나타나듯이, 전체 반사에 의한 눈부심 시간은 반사도 변화에 따라 크게 변화하지 않는다. 하지만 반사도가 높아짐에 따라 운전자에게 잔상을 주어 순간 눈부심으로 위험을 줄 수 있는 시간의 비율이 높아진다. 건물 표면 반사율이 3% 이하인 경우 큰 문제로 야기되지 않지만, 4%가 넘어감에 따라 특정 시간에 잔상을 줄 수 있는 시간이 길어지기 시작하고, 모든 교차로에서 건물 표면 반사율이 6% 이상 되는 경우 심각한 눈부심을 초래할 수 있다. 따라서 커튼월 건물의 경면 반사도를 3% 이하로 줄이면 운전자의 위험 가능성이 현저히 줄어든다.

앞에서 지적한 바와 같이 본 계산에서는 대상 건물 주변에 있는 건물에 의한 반사빛 차단 효과가 반영되지 않아서 실제보다 눈부심 반사에 의한 피해가 높게 평가되었을 수도 있다. 하지만 교차로의 경우 넓은 영역이 주변 구조물 없이 열려 있기에, 눈부심에 의한 피해가 예상된 결과와 유사하게 나타날 것이다. 또한 여름을 제외하면 가로수로 인해 반사광 차단 효과가 미비하기에, 호수 주변이나 교차로 주변을 이동하는 경우 위험한 눈부심을 초래할 수 있다. 이제까지 연구된 바에 의하면 눈부심 발생하여 잔상이 남겨진 최악의 경우 4-12초 정도 운전자의 시각이 마비될 수 있다. 이를 30 km/h로 달리는 자동차에 대비한 경우 30-100 m 정도 제동거리가 증가할 수 있어 사고 위험이 급증하게 된다. 따라서 대형 커튼월 건물 주변 교통안전 확보를 위해 건물의 반사도 지속적인 관리를 통해 눈부심 발생이 예상되는 수치 이상으로 증가시 조치를 취해야 한다. 한편 고층 건물에 사용되는 유리 표면의 반사방지막의 열화 문제를 근본적으로 해결하기 위해 제품에 대한 신뢰성 기준이 필요하다. 아직 반사 방지막에 대한 신뢰성 규정은 없지만, 타 분야 표준 및 연구 결과를

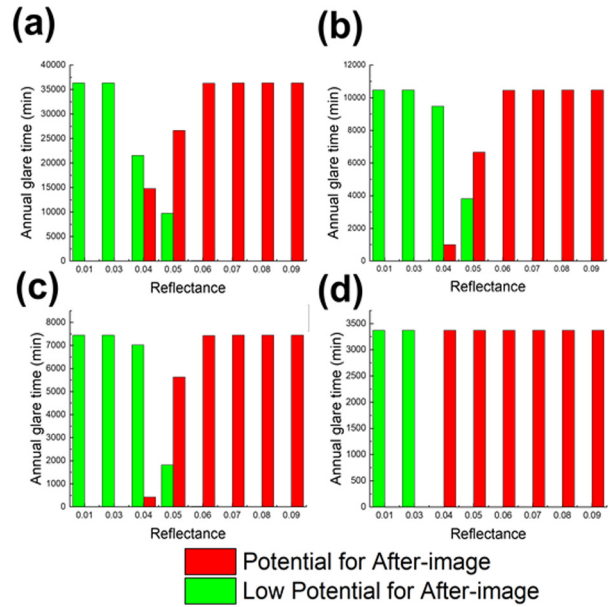


Fig. 5. Predicted annual glare time at the cross-sections of (a) P1, (b) P2, (c) P3, and (d) P4. In the graph, the green bar represents duration of low potential for after-image, while the red bar indicates duration of potential for after-image.

고려한다면 아래 항목들이 내구성 시험 항목에 들어가는 것이 바람직하다<sup>19,21)</sup>. 고온고습 환경에서 표면 반사도 특성 변화, 산성 용액에 대한 부식 방지성, 먼지나 모래에 대한 내구성 등을 통과한 반사방지막을 고층 건물의 커튼월로 설치하는 방식으로 안전성을 향상시킬 수 있다. 또한 위험이 예상되는 교차로 이전에 추가적인 보조 신호등 설치, 눈부심 발생 위험 구간 최고 속도 제한 등과 같은 조치가 이루어져야 한다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 커튼월 건물의 태양광 반사로 인해 주변 교통 위험성에 대해, 건물 반사도에 따라 분석하였다. 건물 유리에 적용된 반사 방지 혹은 저감 막은 시간이 지남에 따라 그 성능이 저하될 수 있기에, 커튼월 건물에 의한 반사 문제는 심각해 질 수 있다. 전산 모사로 빛 반사 형태를 분석한 결과 높은 각도에서 입사되는 태양광이 유리/공기 표면에서 반사를 통해 주변 도로 및 교차로로 전달 될 수 있다. 건물 표면의 반사도가 낮은 경우 (3% 이하) 반사된 빛은 약해서 운전자의 눈부심을 야기시키거나 위험한 상황으로 연결될 가능성이 낮다. 하지만 경년 열화에 의해 반사막이 손상된 경우 건물에 의해 반사된 태양광의 세기가 증가하게 되고(정면 입사광 반사도 4% 이상), 운전자의 눈에 입사되어 잔상을 일으킬 수 있을 만큼 강해진다. 이

를 방지하기 위해서는 건물 표면의 반사도에 대한 지속적인 측정 및 관리가 필요하며, 위험성이 높은 교차로에서는 보조 신호등 설치 및 속도 제한과 같은 조치들이 이루어져야 한다.

**Acknowledgment:** This study was supported by the Research Program funded by the Seoul National University of Science and Technology.

## References

- 1) J. -H. Kim, I. -T. Kim, K. D. Song and A. -S. Choi, "A Study on the Evaluating Method for Daylight Glare due to Solar Specular Reflection from a High-rise Buildings using the RADIANCE Program", J. Korean Soc. Living Environ. Sys., Vol. 20. No. 1, pp. 64-71, 2013.
- 2) W. K. E. Osterhaus, "Discomfort Glare Assessment and Prevention for Daylight Applications in Office Environments", Sol. Energy, Vol. 79 No. 2, pp. 140-158, 2005.
- 3) Y. -G. Chung, "The Sunlight Reflection Lighting Cases and Light Pollution Possibility", J. Korea Inst. Ecol. Archit. And Environ. Vol. 18, No. 1, pp. 113-118, 2018.
- 4) F. Zhang, J. Lu, X. Hu and X. Hao, "Investigating Safety Impact of Sun Glare in Urban Tunnels Based on Cellular Automata Approach", Accid. Anal. Prev., Vol. 148, p. 105821, 2020.
- 5) S. Mitra, "Sun Glare and Road Safety: An Empirical Investigation of Intersection Crashes", Safety Science, Vol. 70, pp. 246-254, 2014.
- 6) S. Yoo and S. Kang, "A Study on the Risk of Traffic Accidents using Smart Devices while Walking", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 3, pp. 74-82, 2017.
- 7) M. A. Babizhayev, "Glare Disability and Driving Safety", Ophthalmic Res. Vol. 35, pp. 19-25, 2003.
- 8) C. K. Ho, C. M. Ghanbari and R. B. Diver, "Methodology to Assess Potential Glint and Glare Hazards From Concentrating Solar Power Plants: Analytical Models and Experimental Validation", J. Sol. Energy Eng., Vol. 133, No. 3, p. 031021, 2011.
- 9) D. H. Sliney and B. C. Freasier, "Evaluation of Optical Radiation Hazards," Appl. Opt., Vol. 12, No. 1, pp. 1-24, 1973.
- 10) E. Hammarberg and A. Roos, "Antireflection Treatment of Low-emitting Glazings for Energy Efficient Windows with High Visible Transmittance", Thin Solid Films, Vol. 442, No. 1-2, 222-226, 2003.
- 11) G. K. Chinyama, A. Roos and B. Karlsson, "Stability of Antireflection Coating for Large Area Glazing", Sol. Energy, Vol. 50, No. 2, pp. 105-111, 1993.
- 12) W. Glaubitt and P. Löbmann, "Antireflective Coatings Prepared by Sol-gel Processing: Principles and Applications", J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 32, No. 11, pp. 2995-2999, 2012.
- 13) M. Sakhujia, J. Son, H. Yang, C. S. Bhatia and A. J. Danner, "Outdoor Performance and Durability Testing of Antireflecting and Self-cleaning Glass for Photovoltaic Applications", Sol. Energy, Vol. pp. 231-238, 2014.
- 14) S. Sreenath, K. Sudhakar, A. F. Yusop, E. Cuce and E. Solomin, "Analysis of Solar PV Glare in Airport Environment: Potential Solutions", Results in Engineering, Vol. 5, p. 100079, 2020.
- 15) J. A. Jakubiec and C. F. Reinhart, "Assessing Disability Glare Potential of Reflections from New Construction: Case Study Analysis and Recommendations for the Future", Transp. Res. Rec., Vol. 2449 No. 1, pp. 114-122, 2014.
- 16) U. S. Federal Aviation Administration "Interim Policy, FAA Review of Solar Energy System Projects on Federally Obligated Airports", 2013.
- 17) T. A. Germer, Angular Dependence and Polarization of Out-of-plane Optical Scattering from Particulate Contamination, Subsurface Defects, and Surface Microroughness, Appl. Opt., Vol. 36, No. 33, pp. 8798-8805 1997.
- 18) L. Yao and J. He, "Recent Progress in Antireflection and Self-cleaning Technology - From Surface Engineering to Functional Surfaces", Prog. Mater. Sci., Vol. 61, pp. 94-143, 2014.
- 19) ASTM, Standard Test Method for Accelerated Acid Etch Weathering of Automotive Clearcoats Using a Xenon-Arc Exposure Device, ASTM D7356/D735, 2006.
- 20) British Standards Institution, Glass in Building, Coated Glass. Requirements and Test Methods for Class A, B and S Coatings," Bs En 1096-2, 2012.
- 21) G. Womack K. Isbilir, F. Lisco, G. Durand, A. Taylor and J. M. Walls, "The Performance and Durability of Single-layer sol-gel Anti-reflection Coatings Applied to Solar Module Cover Glass", Surf. Coat. Technol., Vol. 358, pp. 76-83, 2019.