

## 철도 방음벽의 형상에 따른 태양복사 에너지 흡수 특성 연구

정찬호\* · 이진운\* · 장용준\*\* · 김주현\*\*\* · 유흥선† · 이성혁†

### Effect of Railway Noise Barrier Shape on Solar Radiation Energy Absorption

Chan Ho Jeong, Jin Woon Lee, Yong-Jun Jang, Jooheon Kim,  
Hong Sun Ryou and Seong Hyuk Lee

**Key Words:** Noise barrier(방음벽), Solar energy(태양에너지), CFD(전산유체해석), Azimuth angle(방위각), BIPV(Building Integrated Photovoltaic System(건물일체형 태양광 발전시스템))

#### Abstract

The present study aims to determine the optimized shape for the maximum electric energy production of building integrated photovoltaic system (BIPV) noise barrier through numerical analysis. The shape of BIPV noise barrier is one of the important factors in determining angle difference between direction vector of the sun and normal vector of the sound barrier surface. This study simulated numerically the flow and thermal fields for different angles in the range from 90° to 180°, and from the results, the amount of isolation onto noise barrier surface was estimated along the angle between ground and top side of noise barrier. The commercial CFD code (Fluent V. 13.0) was used for calculation. It was found that the maximum amount of insolation per unit area was 19.6 MJ for 105° case during a day in summer and was estimated 12.4 MJ in 150° case during a day in winter. The results of the summer and winter cases showed the different tendency and this result would be useful in determining the appropriate shape of noise barrier which can be mounted under various circumstances.

#### 1. 서 론

태양전지는 소음이나 오염, 기계적인 구동 부품 없이 입사된 태양의 복사에너지를 직접 전기로 변환시켜 주기 때문에 매우 독특하고, 안전할 뿐만 아니라 신뢰성이 높고, 수명이 긴 특징이 있다. 또한 다른 발전 기술에 비해 가장 친환경적인 기술로 주목 받고 있다<sup>(1)</sup>. 현재에는 주로 태양광 발전소로서 사용되고 있으나 점차 일반 가정으로 영역을 넓혀 가고 있다. 특히 건축물의 외벽, 지

붕자재, 창문 등과 태양광 발전시스템을 통합한 건물일체형 태양광 발전시스템(BIPV)으로 연구개발이 활발하게 진행 중이다<sup>(2)</sup>. 최근 들어 방음벽과 같이 도로변의 도로시설물을 활용할 경우 추가적인 구조물이 필요하지 않고 유휴 부지를 활용할 수 있다는 장점이 있기 때문에 국내외 태양광 발전시스템의 도로적용 사례를 쉽게 찾아볼 수 있다. 독일, 미국, 일본 등은 이미 철도, 혹은 도로의 방음벽에 태양전지를 접목시켜 기차역의 전기공급을 돕거나, 도로의 결빙을 방지하기 위한 열선의 전력원으로 사용되고 있다<sup>(3)</sup>. 이러한 BIPV 방음벽 설비의 태양전지 전력생산량은 광학적, 전기적 특성과 태양복사량에 의해 결정되며 이와 관련된 많은 연구가 진행되고 있다. 태양전지의 광 특성에 대해서는 Stuart 등<sup>(4)</sup>은 태양광모듈 표면의 반사율과 태양전지의 양자효율이 태양전지의 효율을 결정하며 최적의 표면 형상을 구하기 위해 수치해석을 진행한바 있으며, Skoplaki 등<sup>(5)</sup>은 태

(2013년 11월 15일 접수 ~ 2013년 12월 13일 심사완료, 2013년 12월 20일 게재확정)

\*중앙대학교 기계공학부

\*\*한국철도기술연구원

\*\*\*중앙대학교 화학신소재공학부

†책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : shlee89@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5254 FAX : (02)814-9476

양전지의 작동 온도가 태양전지의 광학적 전기적 특성에 어떤 영향을 주고 있는지 연구하였다. 태양전지로 조사되는 태양빛의 양에 대해서는 Abdolzadeh 등<sup>(6)</sup>은 위도가 다른 지역에선 태양의 방향벡터와 태양광모듈의 수직방향벡터가 이루는 각도가 달라지기 때문에 조사량이 달라지게 되며, 각 지역마다 최적의 형상이 달라진다고 말하고 있다. Diego 등<sup>(7)</sup>은 구름에 의한 차폐효과를 고려하여야 하며 핀란드의 Tampere에서의 월별 평균 구름의 양을 측정하고 구름에 의한 태양광 차폐를 고려하여 태양전지에 들어오는 태양복사열유량을 계산하였다. 태양전지의 성능에 관계없이 태양전지로 조사되는 태양복사량이 적다면 태양전지의 전력생산량이 적을 수 밖에 없기 때문에 태양전지의 패널 형상과 각도에 대한 많은 연구가 진행되어오고 있다. El-Sebaï 등<sup>(8)</sup>은 사우디아라비아 Jeddah지역에서 수평 및 기울어진 표면으로 조사되는 태양복사량을 계산하였고, 여러 연구자들은 각 지역별에서 지리적 위치를 고려하여 경사진 표면으로 조사되는 태양복사량을 계산하였다<sup>(9-11)</sup>. Roohollahi 등<sup>(12)</sup>은 이란의 Kerman에서 패널의 여러 형상에 대해서 태양전지 패널로 조사되는 태양복사에너지량을 월별 평균 값을 수치해석 하여 비교하였다. 이와 같이 국외에서는 지리적 위치를 고려한 태양조사량과 모듈의 최적화 연구가 많이 이루어졌으나 국내에서는 선행된 연구가 많이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 서울 (37.34° N, 126.59° E)에서 여름과 겨울에 대해 하루 동안의 태양복사에너지량을 계산하고 방음벽의 형상각도에 따른 방음벽에서 태양조사량 변화를 분석하였다.

## 2. 수치해석 방법

본 연구에서는 태양복사가 철도 방음벽에 미치는 영향을 분석하기 위해 Fig. 1과 같이 정남-북 방향으로 설치된 철도 방음벽을 포함한 평면지형을 가정하여 해석 영역을 설정하였다. 방음벽의 높이는 2 m 이고, 방음벽 윗면의 넓이는 4.5 m<sup>2</sup>이며 ANSYS ICEM-CFD 13.0을 이용하여 약 220,000개의 사면체 격자로 3차원 모델을 구성하였다. 방음벽의 형상각도에 따른 태양조사량 변화를 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 동일한 방음벽 상단 넓이를 가지는 대상에 대해 형상각도를 변화시킴으로써 7개의 케이스를 선정하였다. 열 유동 해석을 위해 상용 CFD코드인 ANSYS FLUENT 13.0을 이용하였고 연속 방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식을 이용하여 해석

을 수행하였다. 사용된 난류모델은 표준 *k-ε* 모델이며 태양에 의한 복사열전달은 구분좌법(Discrete Ordinate: DO)을 이용 하였다. 또한, 선정위치인 서울에서의 태양 복사를 적용하기 위해 상용코드 내의 solar calculator 모델을 적용하였다. 태양 복사를 고려하기 위해 날씨는 겨울철 동지(12월22일)와 여름철 하지(6월21일)를 고려하였고, 일출부터 일몰까지를 포함하기 위해 오전 5시부터 오후 20시까지 계산을 수행하였다. Fig. 3은 서울에서의 시간에 따른 태양의 위치를 나타내고 있다. 겨울철 외기온도는 12월 평균 외기온도인 0°C, 여름철 외기온도를 6월 평균 외기온도인 27°C를 적용하였다. 지표면은 벽 조건을 적용하였고 나머지 외부영역은 반투명 가

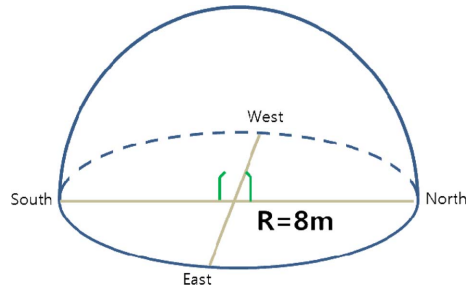


Fig. 1 The geometry scheme in this study

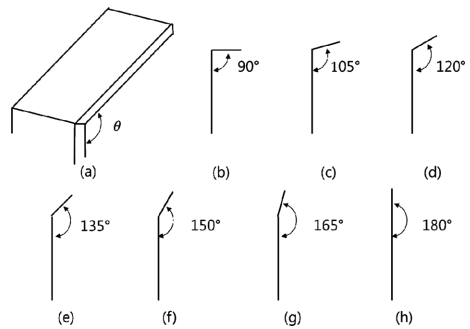


Fig. 2 Schematic and the selected geometries in this study

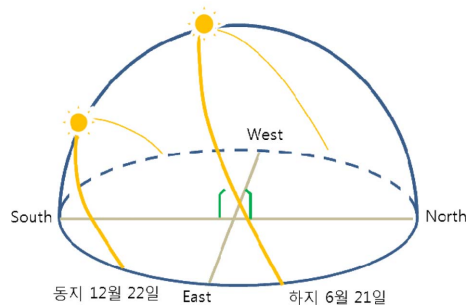


Fig. 3 The Sun path in the summer and winter

Table 1 The angle between sun direction vector and normal direction vector of noise barrier in the winter

Hour	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
7	81.5	87.5	93.7	99.7	105.2	109.6	112.8
8	92.3	100.1	107.4	113.7	118.5	121.4	121.9
9	101.5	111.3	120.1	127.2	131.9	133.2	130.9
10	109.5	121.3	131.9	140.6	145.5	145.0	139.3
11	115.4	129.0	141.9	153.0	159.2	156.1	146.3
12	118.6	133.4	148.1	162.4	172.9	164.6	150.4
13	118.6	133.4	148.2	162.5	173.1	164.6	150.5
14	115.5	129.1	142.1	153.2	159.4	156.3	146.4
15	109.6	121.4	132.1	140.8	145.7	145.2	139.4
16	101.7	111.4	120.3	127.4	132.1	133.4	131.1
17	92.4	100.3	107.6	113.9	118.7	121.6	122.0

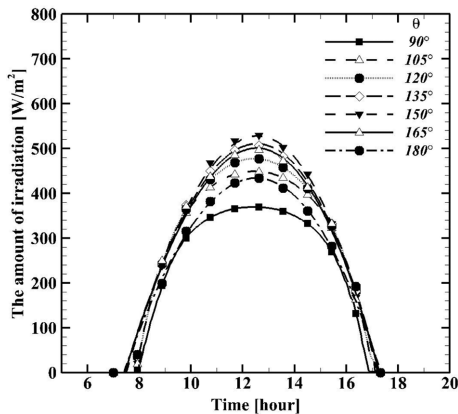


Fig. 4 The irradiation at the noise barrier in the winter

정(semi-transparent wall)을 이용하여 태양복사 조건을 적용하였다.

### 3. 결 과

본 연구에서는 여름과 겨울의 하루 동안 서울에서의 태양복사 에너지량을 계산하고 7가지의 방음벽의 형상 각도에 따른 태양조사량 변화 분석을 위해 총 14개의 케이스에 대해 수치해석을 수행하였다. 겨울철 태양고도가 제일 낮은 동지 하루 동안 방음벽 형상각도에 따라 방음벽에 조사된 태양복사 에너지량을 Fig. 4에 나타내었다. 겨울철 태양은 오전 7시 40분경 떠올라 오후 5

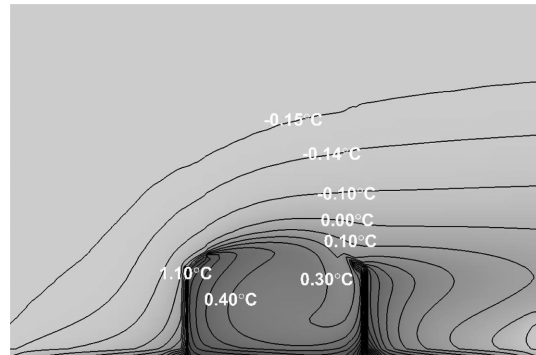


Fig. 5 The temperature contour in winter

시 40분쯤 지평선 밑으로 완전히 지게 되며 12시경 최대 태양복사 에너지를 갖는다. 수치해석 결과에 따르면 형상각도가 150°인 경우, 가장 많은 태양복사에너지가 조사되는 것을 확인할 수 있다. 태양 방향 벡터와 방음벽 수직벡터 사이의 각도가 180°를 이루는 경우, 방음벽에 수직방향으로 입사되는 태양 복사에너지량이 최대가 되며 두 벡터 사이 각도가 더 큰 둔각을 이룰수록 더 많은 태양복사에너지가 조사되는 것을 의미한다. Table 1은 동지에서 시간에 따라 달라지는 태양의 방향벡터와 방음벽의 수직벡터 사이의 각도를 나타낸 것이다. Table 1에서 태양에너지가 가장 강하게 복사되는 12시 무렵에 두 벡터가 이루는 각도는 150°방음벽에서 172.9°이고, 165°방음벽에서 164.6°로 150°방음벽이 8.3°정도 더 큰 것으로 나타났다. Fig. 4에 따르면 12시 무렵에 150°방음벽으로 조사되는 태양에너지의 양이 165°방음벽으로 더

Table 2 The angle between sun direction vector and normal direction vector of noise barrier in the summer

Hour	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
7	109.0	104.5	99.0	93.0	86.9	80.9	75.4
8	120.6	117.7	112.8	106.4	99.2	91.5	83.7
9	132.5	131.1	126.4	119.4	110.7	101.1	91.0
10	144.3	144.7	139.9	131.4	120.8	109.2	97.0
11	155.4	158.4	152.5	141.5	128.8	115.2	101.4
12	164.1	172.2	162.2	148.0	133.4	118.6	103.8
13	164.7	173.8	162.9	148.4	133.7	118.8	103.9
14	156.7	160.1	153.9	142.6	129.5	115.8	101.8
15	145.7	146.4	141.5	132.8	121.9	110.1	97.7
16	134.0	132.8	128.1	120.9	112.0	102.2	91.8
17	122.1	119.3	114.4	108.1	100.7	92.7	84.6

Table 3 The amount of insolation for a day per unit area

	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
Winter	9.9 MJ/m <sup>2</sup>	10.9 MJ/m <sup>2</sup>	11.3 MJ/m <sup>2</sup>	11.8 MJ/m <sup>2</sup>	12.4 MJ/m <sup>2</sup>	11.7 MJ/m <sup>2</sup>	9.4 MJ/m <sup>2</sup>
Summer	19.3 MJ/m <sup>2</sup>	19.6 MJ/m <sup>2</sup>	18.7 MJ/m <sup>2</sup>	17.3 MJ/m <sup>2</sup>	15.2 MJ/m <sup>2</sup>	13.1 MJ/m <sup>2</sup>	11.4 MJ/m <sup>2</sup>

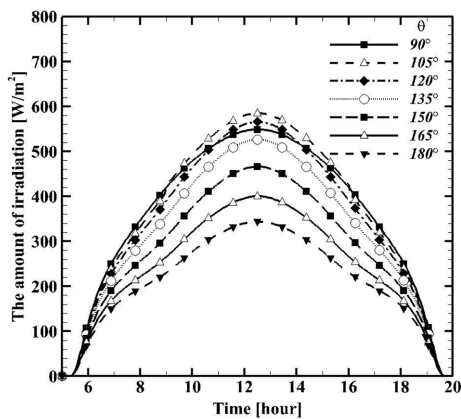


Fig. 6 The irradiation at the noise barrier in the summer

많이 조사되었다. 즉, 방음벽의 형상각도가 180°에 가까울수록 방음벽으로 입사되는 양이 더 많다는 것을 의미한다. Fig. 5는 겨울철 방음벽 단면에서의 온도 분포이다. 겨울에는 태양 복사에 의해 방음벽의 온도가 1.1°C까지 올라가지만 대류 열전달로 인해 손실되는 열이 많기 때문에 외기온도와의 차이가 크게 나타나지 않는다. 여름철 태양고도가 제일 높은 하지에서 하루 동안

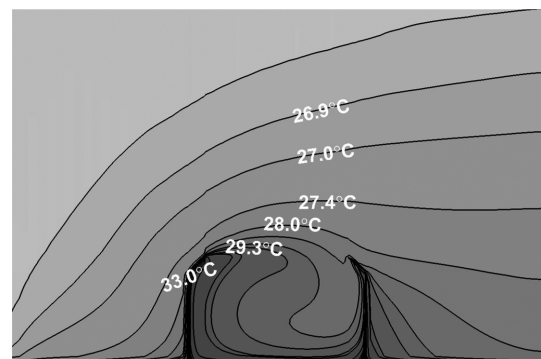


Fig. 7 The temperature contour in summer

방음벽 형상각도에 따라 방음벽에 조사된 태양복사에너지량을 Fig. 6에 나타내었다. 겨울철과 마찬가지로 가장 강하게 조사되는 시각인 12시 무렵에 두 벡터의 사이각을 구해보면 105°방음벽의 경우 172.2°도 이고, 90°방음벽의 경우 164.1°로 105°방음벽의 경우가 8.1°정도 더 큰 것으로 분석되었다. 이것은 12시의 태양빛이 105°방음벽면으로 조사되는 양이 90°방음벽 면으로 조사되는 양보다 더 많음을 의미한다. Table 2는 하지에서 시간에

따라 달라지는 태양의 방향벡터와 방음벽의 수직벡터 사이의 각도를 나타낸 것이다. Table 2에 따르면 10시에서 15시까지 105° 방음벽이 모든 형상각도의 방음벽보다 두 벡터가 이루는 각이 더 크며 하루 동안의 일사량은 105°의 경우가 가장 크게 계산되었다. 한편, 여름철 방음벽 단면에서의 온도 분포는 Fig. 7에 나타내었다. 여름에는 방음벽 판이 온도가 33°C까지 올라가며 태양 복사에 의한 열 유량이 겨울에 비해 많기 때문에 외기와 외의 온도차이가 상대적으로 많이 나타난다. Table 3은 하루 동안 방음벽 윗면으로 조사된 태양에너지의 양을 시간에 따라 적분한 결과이다. 겨울철 하루 동안 방음벽 윗면에 단위 면적당 조사된 태양에너지의 양은 방음벽 형상각도가 150°일 때 12.4 MJ/m<sup>2</sup>로 가장 크고 여름철에는 105°일 때 19.6 MJ/m<sup>2</sup>로 가장 큰 것으로 나타나며 이것은 지구의 자전축이 기울어져 Fig. 3과 같이 여름과 겨울에서 태양의 방위각(azimuth)과 고도각(altitude)이 차이가 나기 때문이다. 이때 동지에서 정오 12시의 고도각은 30°이고 하지인 경우, 정오 12시의 고도각은 76°이다. 태양의 방위각과 고도각의 차이에 의해서 겨울과 여름에 가장 많은 태양에너지를 받는 방음벽의 형상각도는 서로 다르게 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 태양전지를 접합한 철도 방음벽의 형상각도에 따른 태양복사 에너지 조사량을 분석하기 위해 수치해석을 수행하였다. 방음벽 위면 기울기가  $\theta = 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ, 165^\circ, 180^\circ$ 의 형상 각도에 대해 여름과 겨울에서의 하루 동안 태양빛의 조사량을 예측하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 방음벽에 조사되는 태양복사 에너지량은 태양의 방향벡터와 방음벽의 수직벡터가 이루는 각도와 그 시간의 태양빛의 세기에 의해서 결정된다.
- (2) 겨울철의 경우 방음벽의 윗면의 수직벡터와 태양의 방향 벡터 사이의 각도는 동지에 태양이 가장 강하게 조사되는 시각인 12시 무렵에 150° 방음벽이 다른 형상각도의 방음벽 보다 더 크게 계산되었고 더 많은 에너지가 조사되었다.
- (3) 방음벽 윗면에 조사되는 태양복사에너지량은 여름철에는 형상각도가 105°인 방음벽이 가장 높았고, 겨울에는 형상각도가 150°인 방음벽이 가장 크게 계산되었다. 이것은 여름과 겨울의 태양의 방위각과 고도각의

차이에 의해서 발생하며, 추가적으로 지역과 계절에 따른 최적의 형상각도 설계에 대한 연구가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원(신재생 에너지 철도 활용 및 에너지 절감 기술 개발: PK13003C)의 지원을 통해 수행되었습니다. 또한, 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20114030200020).

#### 참고문헌

- (1) C. Honsberg, S. Bowden, "PV CDROM", <http://www.pveducation.org/pvcdrom>.
- (2) 강정욱, 손찬희, 조광섭, 유진혁, 김정식, 박창균, 차성덕, 권기청, "광 입사각이 BIPV에 적용되는 단결정 또는 비정질 실리콘 태양전지의 양자효율에 미치는 영향", 한국진공학회지, 제 21권, 1호, 2012, 62-68.
- (3) 김성모, 김인구, "국내의 방음벽 관련 연구동향 분석 및 개발 방향", 국제지역연구, 제 16권, 2호, 2012, pp. 295-316.
- (4) A. B. Stuart, M. B. Darren, "Optimization of moth-eye antireflection schemes for silicon solar cells", Progress in Photovoltaics, Vol. 18, No. 3, 2010, pp. 195-203.
- (5) E. Skoplaki, J. A. Palyvos, "Operating temperature of photovoltaic modules", Renewable Energy, Vol. 34, No.1, 2009, pp. 23-29.
- (6) M. Abdolzadeh, M. A. Mehrabian, "Obtaining maximum input heat gain on a solar collector under optimum slope angle", International Journal of Sustainable Energy, Vol. 30, No. 6, 2011, pp. 353-366.
- (7) D. L. Torres, S. Valkealahti, "Dynamic thermal model of solar PV systems under varying climatic conditions", Solar Energy, Vol. 93, 2013, pp. 183-194.
- (8) A. A. El-Sebaii, F. S. Al-Hazmi, A. A. Al-Ghamdi, S. J. Yaghmour, "Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia", Applied Energy, Vol. 87, No. 2, 2010, pp. 568-576.
- (9) C. Hachem, A. Athienitis, P. Fazio, "Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units", Solar Energy, Vol. 85, No. 9, 2011, pp. 1864-1877.

- (10) E. Vartiainen, "A new approach to estimating the diffuse irradiance on inclined surfaces", *Renewable Energy*, Vol. 20, No. 1, 2000, pp. 45~64.
- (11) A. George, R. Anto, "Analytical and experimental analysis of optimal tilt angle of solar photovoltaic systems", *International Conference on Green Technologies*, 2012, pp. 234~239.
- (12) E. Roohollahi, M. A. Mehrabian, M. Abdolzadeh, "Prediction of solar energy gain on 3-D geometries", *Energy and Buildings*, Vol. 62, 2013, pp. 315~322.