

태양광 발전을 위한 보도형 콘크리트 블록의 현장 적용과 유지관리

김봉균¹, 김윤용^{2*}

Field Application and Maintenance of sidewalk concrete block for PV Power Generation

Bong-Kyun Kim¹, Yun-Yong Kim^{2*}

Abstract: In order to fulfill the obligation to voluntarily reduce greenhouse gas emissions under the Paris Climate Agreement, the proportion of coal and nuclear power generation is reduced worldwide and national efforts are being made to spread renewable energy including solar power generation. Korea also intends to increase the proportion of renewable energy generation to 30~35% by 2040 by introducing laws and regulations. In addition, while the country is trying to apply solar power generation to sidewalks and roads, there is no research related to it in Korea. Therefore, as a precedent study to develop solar power generation roads, solar power generation concrete blocks applicable to sidewalks and plazas were developed and the applicability was evaluated by constructing them on the site. As a result of indoor experiment, compressive strength was measured by 25.5~35.7MPa and flexural strength was measured by 5.1~10.5MPa, which showed that all domestic standards were satisfied. However, the higher the unit cement amount, the lower the strength was measured according to the mixing of the broken fine aggregate. The absorption rate was 5.7%, which satisfied the domestic standard of 7% or less. As a result of the freeze-thawing test, the reduction rate of the compressive strength after 100 cycles was up to 6.3%. As a result of measuring the settlement amount after construction, the maximum of 2.498mm was measured and irregular settlement occurred in the overall area, which is because the resolution of the sand layer was poor during construction. Maintenance techniques of sidewalk concrete block and solar panel need to be established more efficiently through long-term operation in the further.

Keywords: solar power generation, concrete block, sidewalk, field application, maintenance

1. 서론

지구온난화에 대응하기 위한 파리기후협정에 따라 온실가스 자발적 감축 의무 이행을 위해 세계 각국은 에너지효율 증진과 신재생에너지의 보급을 확대하는 정책을 국가차원에서 추진하고 있다. 즉 석탄 사용을 피함으로써 주 에너지 수급구조를 청정에너지 중심으로 개편하는 것을 의미한다. 이와 더불어 기존의 수력 중심 신재생에너지 공급 구조에서 태양광 및 풍력의 역할을 점차 증가시키는 형태로 구조 전환이 이루어지고 있다(Cho, 2018).

따라서 우리나라도 2040년까지 재생에너지 발전비중을 30~35%로 확대하고 사용후핵연료 저장량이 곧 포화가 임박한 원자력과 석탄발전을 감축하여 부족분을 수소, 가스 및 재생에너지 확대를 통해 충당할 계획에 있다. 이에 일정규모

(500MW)이상의 발전사업자에게 태양광발전을 포함한 신재생에너지의 공급량을 2019년 기준으로 총발전량의 약 6.0%로 강제하고 있고, 2022년까지 9.0%로 증가할 계획이다. 더불어 공공기관이 신축, 증축 또는 개축하는 연면적 1,000 m² 이상의 건축물에 대하여 2019년 기준으로 27%인 신재생에너지 사용량의 공급 의무 비율을 2020년까지 30%로 확대할 계획을 갖고 있다.

국내의 통계 집계 방식과 약간의 차이는 있지만 IEA의 2018년 통계에 따르면 미국의 경우, 총발전량 대비 재생에너지의 비중은 17.0%이고, 일본의 경우 15.6%, 중국은 25.9%에 달한다고 보고한 바 있다(Kim, 2018).

우리나라의 경우 2017년 발전량 기준으로 재생에너지(43,868GWh)의 비중은 총발전량의 7.60%에 해당하며 이 중 67.2%는 폐기물(23,867GWh)과 바이오에너지(7,466GWh)를 활용한 발전이고 태양광에 의한 발전량은 총발전량의 1.22% (7,056GWh)에 불과한 실정이지만 태양광 발전량이 재생에너지 중 전년 대비 가장 큰 발전량 증가를 보였다.(Kim, 2018).

경제성 측면에서도 2010년 \$3.3/W에 달했던 태양광설치단가는 대량생산과 기술개발을 통해 매년 20%이상 하락하여 신규 수요가 생겨나고, 수요증가는 투자확대로 이어져 2025년

¹정회원, 동산콘크리트산업(주) 기업부설연구소 책임연구원

²정회원, 충남대학교 토목공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: yunkim@cnu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

에는 \$0.61/W로 감소될 것으로 예상되고 있다. (Kang, 2019)

국외의 경우도 중국의 2018년 발전원별 발전단가(\$/MWh)를 보면 석탄은 54~74, 가스 80~101, 풍력 49~72로 44~84수준의 태양광은 가스발전보다 저렴하고 석탄발전과 대등한 수준으로 하락하였으며, 미국 또한 풍력발전단가(27~61)가 가장 저렴하고 태양광 발전(42~62)의 경우 가스발전(39~66) 수준으로 발전단가 하락하였다. 또한 독일의 경우도 태양광발전단가(65)가 석탄발전 대비 20%이상 저렴한 상황이다. 반면 일본의 경우는 원전사태 이후 태양광 보급을 늘리고 있으나 여전히 석탄(60~82)에 비하여 태양광(67~279) 발전단가가 여전히 높은 상황으로 이는 토지 및 전력망 연결 등 제반비용이 여전히 높은 것이 그 이유라 보고 있다.(Kang, 2019)

이와 같이 태양광 발전의 경쟁력 향상으로 인해 태양광 설비용량 규모는 2025년 이전에 풍력을 넘어설 것으로 예상되고 2030년에는 수력, 2040년 이전에 석탄을 넘어설 것으로 전망되며 있으며 특히 신규태양광 발전의 경우 거의 대부분의 지역에서 신규 석탄발전보다 경쟁력을 가질 것으로 전망된다고 보고하고 있다.(Yang et al., 2018)

한편 기존의 평지 및 산지나 시설물 위에 설치되는 태양광 발전과 더불어 네덜란드, 프랑스, 중국 등에서는 태양광 발전을 도로에 적용하고자 하는 연구가 활발히 진행되어, 네덜란드는 2014년에 70m의 태양광 자전거도로를 개통하였고 프랑스의 경우도 1km의 태양광 자동차도로를 2016년에 개통하였다. 특히 중국의 경우 2018년에 1.12km구간의 태양광도로를 설치하는 등 2022년까지 161km구간의 태양광 고속도로를 설치할 계획에 있다.

이와 같이 태양광 발전 도로는 전기자동차의 무선전력공급 및 LED 디스플레이를 적용한 지능형 도로시스템 적용을 통해 기존도로를 대체할 수 있어 활용 가능성이 높다고 할 수 (Kim, 2017) 있으나 국내의 경우 태양광 발전을 도로에 적용하고자 하는 연구는 전무한 실정이다.

태양광 발전을 도로에 적용하고자 하는 연구는 네덜란드에서 처음 시작되었으며 보도 및 자전거 구간 또는 저속도로 구간에서부터 적용을 시작하여 고속도로의 활용에까지 진행되고 있다. 특히 보도의 경우 인터록킹 및 화강석 등 주로 블록 형태의 포장으로 이루어져 있어 일정한 크기의 태양광모듈 적용이 용이하며 자전거 및 저속도로의 경우 차량으로 인한 충격하중이 적으므로 소음과 내구성 측면에서 유리하다. 더구나 유럽의 경우 아스팔트 또는 콘크리트 포장 위주인 국내와 달리 블록으로 차량용 도로를 포장한 경우가 많아 태양광 발전을 도로에 적용함에 있어 더욱 유리한 환경이 조성되어 있다.

이와 같이 콘크리트 블록 포장공법은 심미성과 실용성 때문에 유럽에서는 보편적인 포장공법으로 보행자 도로와 차도

포장에 적용되고 있으며 네덜란드의 경우 도심지 포장의 약 55%가 블록 포장으로 시공되었다고 보고하고 있다. (Lim et al., 2014)

하지만 국내의 경우 블록포장은 차도용 인터록킹 블록에 대한 시험기준이 있으나 평탄성, 소음, 유지관리 등 우려로 인해 보도 및 광장 등 대부분 아파트, 주차장 등의 구간에만 적용하고 있어 블록 포장시공에 대한 정확한 기준과 실증사례가 부족한 실정이며 이에 대해 현재 관련 연구가 진행되고 있다. (Park et al., 2016; Park et al., 2018; Jung et al., 2008; Oh et al., 2019)

한편 2006년에 OECD에서 도시부 도로의 제한속도를 50km/h로 하향할 것을 권고하는 등 도심지 제한속도 하향조정은 국제적 권고사항이 되었으며 국외의 경우 이미 대부분의 국가가 도시부도로의 제한속도를 50km/h로 설정하여 보행자의 사망률이 12~24%정도 감소되는 효과를 보고 있고, 국내의 경우도 '15년부터 점차 도심지 감속구간을 늘려나가고 있다. (Lim, 2017) 이에 따라 그동안 소음 및 주행성 불량 등 문제로 기피되어 왔던 차도로의 블록포장 적용에 대한 유리한 환경이 조성되고 있다고 할 수 있을 것이다.

이에 본 연구에서는 최종적으로 태양광 발전용 차량도로를 개발하기 위한 선행 연구로 보도 및 광장에 적용할 수 있는 보도용 콘크리트 블록을 개발하여 태양광 패널과 모듈화한 뒤 국내 현장에 시공하여 그 적용성을 평가하고자 하였으며 태양광 패널의 그림자와 일사량 등 환경 요인에 대한 패널의 효율 분석보다 하부의 콘크리트 블록에 대한 적용성 및 6개월간의 유지관리 분석을 실시하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험 재료

2.1.1 시멘트

이 실험에서 사용한 시멘트는 국내 A사의 밀도 3.15g/cm³, 분말도 3,318cm²/g의 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였다.

2.1.2 잔골재

본 실험에서는 굵은 골재를 사용하지 않고 잔골재만을 사용하였으며 강모래와 부순모래를 사용하였다. 잔골재의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

2.1.3 혼화제

혼화제로는 시멘트 분리작용과 미세공기 연행으로 단위 수량저감, 워커빌리티(Workability) 및 내동해성을 개선시키는 국내 J사 제품의 고성능 AE감수제를 사용하였으며, 그 특성은 Table 2와 같다.

2.1.4 불포화 폴리에스테르 수지(U.P.R)

상부블록 제작에 사용된 불포화 폴리에스테르 수지는 국내 A사 제품을 사용하였다.

2.2 제조 및 설치

2.2.1 태양광 발전용 블록의 구조

태양광 발전을 위한 보도형 콘크리트 블록을 현장에 적용하기 위해서는 상부의 태양광 모듈에 연결된 케이블을 하부의 콘크리트 블록에 적용하는 구조가 중요하다. 각 태양광 모듈에는 여러개의 케이블이 연결되어 있고 이 케이블이 통과하기 위한 배선구조가 하부의 콘크리트 블록에 구현되어야 하기 때문이다.

본 연구에서는 유압프레스 압출성형방식으로 제조되는 콘크리트 블록의 특성을 고려할 때 복잡한 배선구조를 콘크리트블록에 직접 구현하지 않고 보다 적합한 재질로 제조된 상부 블록을 추가 제조하여 태양광 패널과 결합하는 방식이 더 적합하다고 판단되었다. 앞서 설명한 바와 같이 상부의 태양광 패널, 상부블록, 하부블록으로 시험용 모듈을 구성하였으며 블록간 모듈구조를 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1 Physical properties of fine aggregate

Aggregate	FM ¹⁾	SSD ²⁾ (g/cm ³)	Water absorption ratio (%)	Unit volume weight (kg/L)	#200 pass efficiency (%)
River sand	2.78	2.57	1.47	1.488	2.1
Crushed sand	3.14	2.66	2.61	1.715	6.1

*¹⁾ F.M : Finenes modulus, ²⁾ SSD : Surface dried specific gravity of aggregate

Table 2 Properties of chemical admixture

Appearance	Density (g/cm ³)	pH value
Dark brown liquid	1.08±0.3	6±1

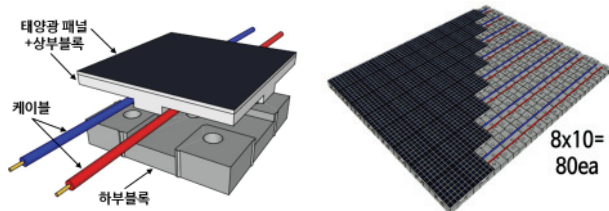


Fig. 1 Concrete block module for power PV generation

2.2.2 시험체 배합 및 제작

태양광 발전을 위한 보도형 콘크리트 블록의 현장 적용성 평가를 위한 상부블록은 불포화 폴리에스테르 수지를 이용하여 제조하였으며, 수축저감 및 균열방지를 위하여 수축저감제와 탄산칼슘, 펄라이트 골재를 적정비율로 혼합한 뒤 강제식 믹서로 2분간 혼합한 뒤 강제몰드에 투입하고 약 6시간 정도 경화하여 제조하였다.

하부의 콘크리트블록은 대량생산 및 품질관리를 위해서 국내 H사의 유압프레스를 사용한 고진동 가압방식의 콘크리트 제조설비를 이용하여 제작하였으며, 강제식믹서를 이용하여 일괄혼합방식으로 총 3분간 혼합하여 제작한 후 6시간의 증기양생 후 28일간의 기건양생을 실시하였다.

대량생산을 위한 고진동 가압방식으로 생산되는 콘크리트 블록의 경우 성형을 위한 타설 후 즉시 탈형하여 컨베이어 벨트 운송과 양생이 이루어지기 때문에 단위수량이 매우 작고 단위시멘트량 및 슬럼프, 공기량의 요인이 해당 설비특성에 맞게 거의 변화 없이 일정하게 유지된다. 따라서 물시멘트비나 단위시멘트량 등이 강도에 미치는 주요한 요인인 일반의 콘크리트와 달리 사용되는 골재의 특성이 강도에 특히 많은 영향을 주게 된다.

따라서 본 연구에서는 Table 3에 나타낸 배합표와 같이 강모래만을 사용한 경우와 부순모래를 중량비로 약 30% 치환한 배합에 대해 시멘트량을 조절하여 실험을 실시하였으며, 현장생산특성상 골재의 표건상태를 번번히 맞추어 생산하기 불가능하므로 표건상태 기준의 물시멘트비를 25%로 하고 골재의 흡수율을 고려하여 단위수량을 증가시켜 제조하였다.

상부 및 하부 블록 시험체의 크기(B×L×T)는 블록이 설치될 현장 크기 및 블록간 연결 간격을 고려하여 477×477×85mm로 제조하였으며, 상부 및 하부블록 시험체의 중량은 약 13.5kg/ea와 35.1kg/ea이다. 다음 Fig. 2와 3에 시험체의 실물모형을 나타내었다.

실내실험을 위한 공시체의 경우 제조된 시험체를 절단기로

Table 3 Mixing design of concrete

Type	W/C (%)	Unit volume weight(kg/m ³)				Ad. ⁵⁾
		C ¹⁾	W ²⁾	Fine aggregate		
				RS ³⁾	CS ⁴⁾	
A-1	32	240	77	2200	-	0.154
A-2	32	240	77	1550	650	0.154
B-1	32	340	109	2050	-	0.218
B-2	32	340	109	1450	600	0.218
C-1	32	440	141	1850	-	0.282
C-2	32	440	141	1300	550	0.282

*¹⁾ C : Cement, ²⁾ W : Water, ³⁾ RS : River sand, ⁴⁾ CS : Crushed sand, ⁵⁾ Ad. : Admixture

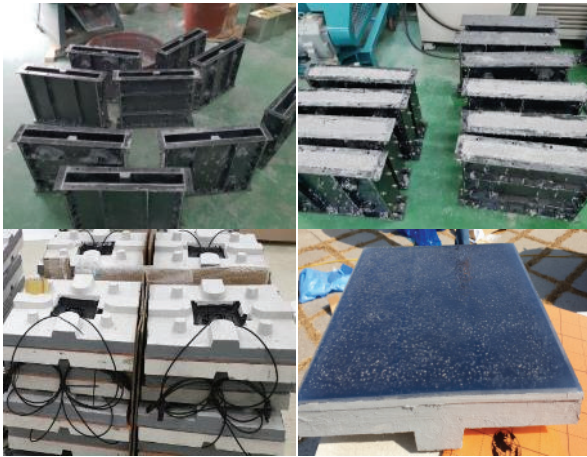


Fig. 2 Solar panel and top block

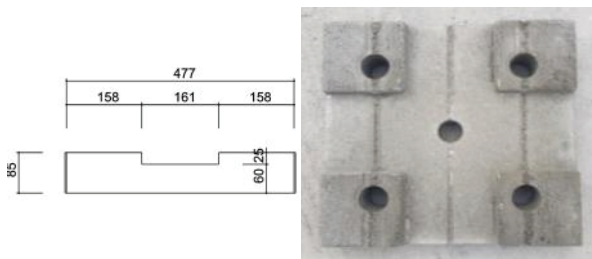


Fig. 3 Bottom concrete block

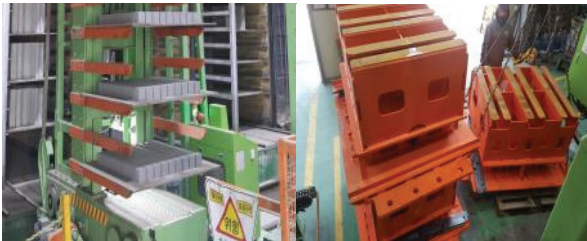


Fig. 4 Steel mould for test

절단하여 사용하여야 하나, 시험용 블록의 크기 및 두께가 실내실험에 사용하기에 부적합하여 Fig. 4와 같이 별도로 시험용공시체 몰드를 제작하되 현장적용 시형체와 같은 배합 및 양생방법으로 제작하였다.

2.2.3 현장 적용 시공

현장적용성 평가를 위한 실험 부지는 자체추산 연평균 약 12만명의 관람객이 방문하는 시설로 블록의 현장 적용성을 평가하는데 있어 적절한 장소로 판단된 국내 I시내 E파크내 광장으로 하였다.

현장 적용 규모(B×L)는 4.0×5.0m로 종방향 및 횡방향 구배가 없는 평탄한 구역에 총 80개의 블록 모듈 설치하였으며, 방문인원이 적은 시기인 11월경에 시공하여 12월경에 완공하였다. Fig. 5와 6에 대상 현장의 및 시공 전경을 나타내었다.



Fig. 5 Test site for installation of concrete block

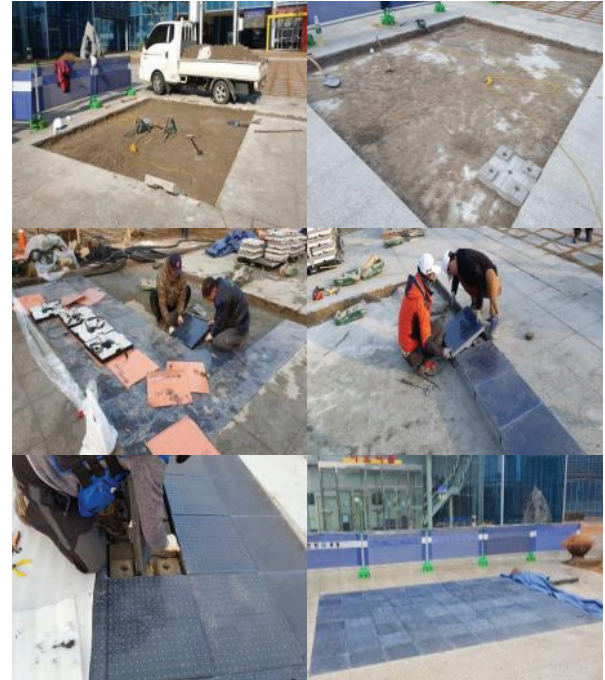


Fig. 6 Installation of concrete block module

본 태양광발전을 위한 보도형 콘크리트 블록은 기존의 보도블록 또는 석재포장 대신 태양광 패널과 콘크리트 블록이 결합되는 모듈구조로, 「외부로 노출되는 상부의 태양광 패널+상부블록+하부블록」의 형태로 구성되어 있다. Fig. 1에 태양광발전을 위한 보도형 콘크리트 블록의 구성 모식도를 나타내었다.

상부블록은 케이블의 연결작업 등 시공성과 유지관리의 편의성을 고려하여 실험실 내에서 상면의 태양광 패널과 부착한 뒤 현장에서 하부의 콘크리트 블록과 요철(凹凸) 방식으로 결합되는 구조로 계획하였다. 이는 향후 유지관리시 블록의 교체를 고려한 것으로 패널 및 상부블록과 하부블록을 분리하여 각각 교체가 가능하게 한 것이다.

시공순서는 기존의 화강판석 포장을 철거하고 계획 깊이까지 터파기 후 지반을 고르고 하부에 모래로 구성된 40mm의 기판층을 소형콤팩터를 이용하여 다짐을 실시한 뒤 레미탈을 10mm 포설하고 하부 콘크리트 블록을 설치하였으며, 하부블록간의 연결은 기하학적 형상에 의한 인터록킹(interlock)

방식으로 맞물리도록 하였다. 하부 블록의 설치가 끝난 후 상부블록과 결합된 태양광 패널을 케이블 연결과 동시에 설치하여 마무리 하였으며, 상면의 태양광 패널간 연결은 실란트로 마감하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 압축 및 휨강도 시험 방법

압축 및 휨강도 시험용 공시체는 앞서 제시한 바와 같이 압축 및 휨강도용 전용몰드를 이용하여 현장적용 시험체와 같은 배합과 방법으로 제조하였다. 압축강도용 공시체는 100×100×100mm의 정육면체 형태로 제조하였고, 휨강도용 공시체는 100×100×400mm의 직사각형 공시체를 제조하여 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법과 KS F 2408 콘크리트의 휨강도 시험방법 중 4점 재하방법에 따라 1,000kN 유압식 강도시험기를 사용하여 각 배합요인당 3회씩 실험하여 평균값을 측정값으로 하였다.

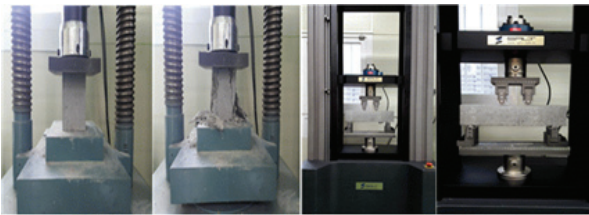


Fig. 7 Real scale experiment channel

2.3.2 흡수율 시험 방법

흡수율 시험용 공시체는 압축 및 휨강도 공시체 제작방법과 같이 100×100×100mm의 정육면체 형태로 제조하였으며, 흡수율 시험은 「KS F 4419 보차도용 콘크리트 인터로킹 블록」에 따라 표건질량과 절건질량의 차이에 대한 절건질량의 비율을 측정하여 흡수율을 계산하였으며 각 배합요인당 3회씩 실험하여 평균값을 측정값으로 하였다.



Fig. 8 Real scale experiment channel

2.3.3 동결융해 시험 방법

동결융해 등 내구성에 관한 기준은 KS F 4419에 제시되어 있지 않지만 「KS F 2456 급속 동결 융해에 대한 콘크리트의

저항 시험방법」 중 B 방법을 참고하여 앞서 언급한 바와 같이 100×100×100mm의 정육면체 시험체를 제조한 뒤 6시간 증기양생 후 28일간 기건양생하였으며 100사이클까지 동결과 융해를 반복한 후 각 배합요인별 공시체의 압축강도를 측정하여 강도감소율을 측정하였다.



Fig. 9 Real scale experiment channel

2.3.4 현장적용성 평가

현장적용성 평가는 태양광 모듈의 초기 발전량 측정과 블록의 6개월간 침하량 측정을 통해 평가하였다.

일반적으로 아스팔트나 콘크리트포장의 경우 유압 또는 장비를 이용하여 균열, 소성변형, PSI, PCI, MCI 등의 지수를 통해 평탄성과 내구성 등을 평가하고 이를 바탕으로 하여 포장의 공용성을 판단한다.

하지만 본 태양광 발전용 블록의 경우 소규모의 현장적용 실험으로 도로용 장비를 활용하여 블록의 특성을 평가하기에는 무리가 있다고 판단하였다. 따라서 해당 실험구역을 8열 10행으로 구분하고, 총 80개의 블록의 4개 모서리의 높이를 GPS측정기를 이용해 침하량을 측정하였으며 측정 간격은 시공 후 약 2개월마다 측정하여 6개월까지 총 3회를 측정하여 침하량의 증가 추이를 관찰하였다.

그리고 초기 발전량 측정의 경우 시공 직후 1개월 후에 임의의 일일 데이터로 분석하였으며, 계절 및 온도 등 환경요인에 따른 분석은 추후 충분한 데이터를 확보한 뒤 진행하는 것

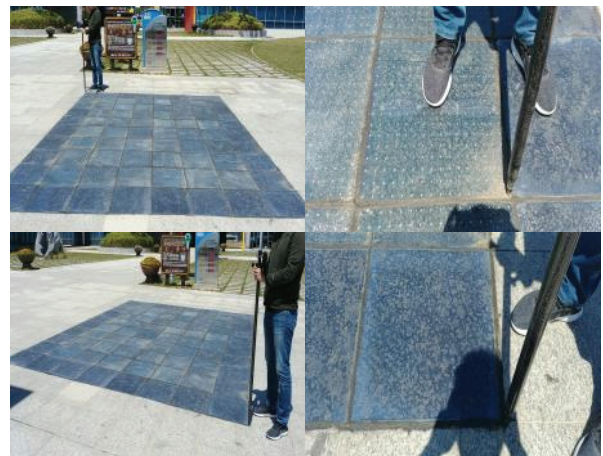


Fig. 10 Experiment for measurement of Roughness

으로 계획하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 압축강도와 휨강도

배합요인별 압축강도 및 휨강도 시험결과를 Fig. 11에 나타내었으며 결과를 살펴보면, 배합요인별로 압축강도는 25.5~35.7MPa이 측정되었으며 휨강도는 5.1~10.5MPa로 나타났고 공시체 크기에 따른 보정계수는 고려하지 않았다. 시멘트량에 따른 강도 특성을 살펴보면 당연히 시멘트량이 많을수록 압축강도 및 휨강도가 높게 측정되었으나 부순잔골재를 혼입한 경우 동일배합에서 강도가 낮게 나타났다.

특히 단위시멘트량이 많을수록 강모래만을 사용한 경우보다 부순잔골재를 치환한 배합의 강도의 감소율이 크게 나타났으며 휨강도보다 압축강도에서 이러한 경향이 뚜렷히 나타났다.

이를 분석하여 보면 동일한 물시멘트비의 경우 강모래보다 부순골재가 미립분이 많아 시멘트페이스트와 골재의 균일한 혼합이 이루어지지 않고 부순골재의 입형이 편평하고 길쭉한 형태로 입형이 좋지 않을 뿐만 아니라 골재 파쇄시 발생하는 골재 내부의 미세 균열 등으로 인해 시멘트 페이스트보다 더 빨리 파괴되므로 단위시멘트량이 많을수록 강도의 감소현상이 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다.

국내에 설치되는 보도 및 차도용 보통블록(ordinary concrete block)의 경우 두께와 치수, 휨강도, 흡수율에 대한 요구성능을 KS F 4419 「보차도용 콘크리트 인터로킹 블록」에서 제시하고 있다. 이를 살펴보면 중요 성능인 휨강도의 경우 5.0MPa 이상을 요구하고 있으며 일본의 JIS A 5371 에서도 인터로킹 블록의 휨강도를 최소 5.0MPa 이상을 요구하고 있으나 국내와 일본 모두 압축강도 기준은 제시되어 있지 않다. 다만 ASTM C936에서는 휨강도 대신 평균압축강도를 55MPa 이상으로 규정하고 있으며 시험시 콘크리트 공시체의 크기 등이 국내와 차이가 있는 것으로 조사되었다.

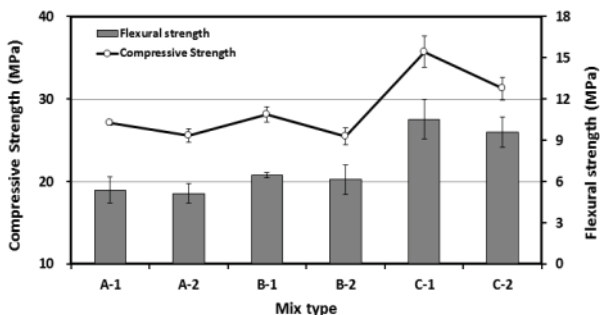


Fig. 11 Test result of compressive strength and flexural strength

따라서 부순잔골재를 사용할 경우 적정시멘트량은 240~340kg/m³사이의 시멘트량이 필요한 것으로 판단되며 휨강도 기준으로 KS와 JIS 기준은 만족하는 것으로 나타났으나 ASTM의 압축강도 기준은 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

3.2 흡수율과 동결융해시험

시험체의 흡수율 및 동결융해 시험결과를 다음 Figs. 12와 13에 나타내었다.

흡수율 시험결과를 살펴보면 배합요인별로 흡수율은 3.32~5.74%의 범위로 나타나 단위시멘트량이 많을수록 흡수율이 감소하는 경향을 나타내었으며, 부순잔골재를 치환한 경우 강모래만을 사용한 배합에 비하여 흡수율이 다소 증가하는 것으로 측정되었다. 이는 단위시멘트량과 부순잔골재의 치환여부가 흡수율 증감의 원인으로 판단된다.

흡수율은 콘크리트 내부의 공극이 클수록 증가하며, 반대로 콘크리트 내부가 치밀할수록 작아진다 할 수 있다. 따라서 단위시멘트량이 증가할수록 흡수율은 작아지며, 사용골재에 있어서도 일반적으로 잔골재의 밀도와 흡수율은 반비례 관계에 있어 밀도가 크면 흡수율이 작은 것이 보통인데, 본 연구에 사용된 부순잔골재의 경우 강모래에 비하여 밀도와 흡수율이 모두 큰 것을 고려해보면 부순잔골재 내부에 미세한 공극이 많이 있는 것으로 볼 수 있다.

다음 동결융해시험은 시험전 압축강도와 100사이클 운전 후 압축강도를 비교하였으며, 실험결과를 살펴보면 배합요인별로 0사이클일 때 압축강도는 25.5~35.7MPa로 평균 28.9MPa이며, 100사이클 운전 후 압축강도는 24.0~34.8MPa로 평균 27.7MPa로 나타나 100사이클 운전 후 압축강도가 다소 감소한 것으로 나타났다.

이를 분석하여 보면 강도 및 흡수율 시험과 같이 단위시멘트량이 클수록 동결융해 후 압축강도 감소율이 작게 나타났으며 부순잔골재의 치환의 경우 강모래만을 사용한 경우에 비하여 다소 높은 압축강도 감소율을 나타내었다.

국내의 경우 보차도용 블록에 대한 동결융해 저항성을 비롯한 내구성 기준은 KS I 3007에 동결융해 후 휨강도 5.0MPa 이상으로 규정되어 있고, 콘크리트 호안 및 옹벽 블록 단체표준 (SPS-KCIC0001-0703)에 동결융해 실험 전 압축강도에 비해 85%이상으로 규정되어 있다. 또한 ASTM, BS 등 몇몇 기준에서는 블록에 대한 동결융해 저항성을 동결융해 후 표면질량감소를 기준으로 규정하고 있으나 국내 기준의 동결융해 실험 방법과 많은 차이를 보여 단순비교는 어렵다고 판단된다.

따라서 국내 기준을 고려해보면 100사이클 후 압축강도 감소율은 최소 2.5%, 최대 6.3%로 모든 배합에서 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

3.3 태양광 블록 초기발전량 측정

본 연구에서는 약 44W급 단결정 c-si 셀 32개와 약 22.8W급 CIGS 셀 48개를 사용하여 블록을 총 80개 설치하였으며 총 설치용량은 2.50kw이다.

초기발전량을 측정하기 위하여 완공 후 약 1개월 지난 시점에서 측정하였으며 측정값을 보면 일중 최대일사량은 383W이며 이때 발전량은 532W가 측정되었고 총 일사량과 발전량은 1.86kWh, 1.91kWh가 측정되었다.

일반적으로 태양광 발전 출력의 결정 요인은 다양하지만, 일사량과 표면온도는 특히 중요한 요소로 알려져 있다. 태양광발전시스템 성능은 표준 시험조건(STC, Air Mass 1.5, 일사량 1000[W/m²], 셀표면온도 25℃)하에서 출력된 결과를 출력(W) 또는 효율(%)로 제시하지만 실제 환경 하에서는 일사

시간 및 양, 그림자의 발생, 외부오염원, 온도 등 대부분 불리한 환경조건이 발생하기 때문에 현실적인 상황에서는 발전량은 보다 작게 출력되게 된다.

국내 수평면 일사량의 연 평균치로 계산하였을 때 전국이 하루에 약 3.74kWh/m²/day 정도의 태양광에너지를 받고 있는 것으로 보면(Jo, 2009(a); Jo, 2011(b)), STC환경 조건일 때와 비교하면 작은 값이지만, 일사량 및 외부 환경조건을 볼 때 실제일사량 대비 적절한 출력이라 판단된다. 그러나 일사량과 표면온도에 따른 발전량의 변동성이 커서 태양광 발전의 효율을 분석하기에 어려움이 있으므로 추후 장기간의 운영을 통해 일사량 및 온도 등 요인에 따른 효율 분석 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3.4 블록의 침하량 측정 및 유지관리

블록의 유지관리를 위하여 완공 후 2개월 마다 침하량을 측정하는 것으로 계획하였고 침하량을 주기적으로 측정한 결과, 전 블록에 대하여 불규칙한 침하가 발생된 것으로 나타났으며 최소 1.007mm에서 최대 2.498mm의 침하량이 측정되었다. 측정 시기별로 살펴보면 완공 2개월 후에 측정된 평균침하량은 1.703mm이고, 4개월 후의 평균침하량은 1.742mm, 그리고 6개월 후의 평균침하량은 1.763mm로 나타나 완공 후 2개월 이내에 크게 발생하고, 이후 침하량은 크게 진전하지 않는 것으로 나타났다.

초기에 큰 침하량이 발생한 원인은 시험현장 규모가 작아 소형 다짐기로 다짐을 실시하였기 때문에 모래층의 다짐이 다소 부족하였고, 초기에 발생한 우수로 인하여 모래층이 일부 유실되었기 때문으로 판단된다. 또한 시간의 경과에 따른 측정결과를 볼 때 모래층이 점차 안정되고 있는 결과를 보이고 있으나 보다 장기적인 측정을 통해 점검할 필요가 있을 것으로 보인다. 또한 블록의 유지관리를 위한 2개월 점검주기의 적정성도 장기적으로 검토하여야 할 것으로 판단된다. 한편, 표준시방서 콘크리트 블록 포장편(KCS, 2018)을 보면 블록포장 평탄성은 길이 3m의 직선자로 측정하였을 때 요철면이 10mm 이내가 기준값으로 되어 있어 이 기준은 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 보도 및 광장 등에 태양광 발전용 보도 블록을 적용하기 위하여 태양광 패널과 콘크리트 블록으로 조합된 모듈구조를 개발하여 소규모 현장에 적용하여 현장 적용성을 평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

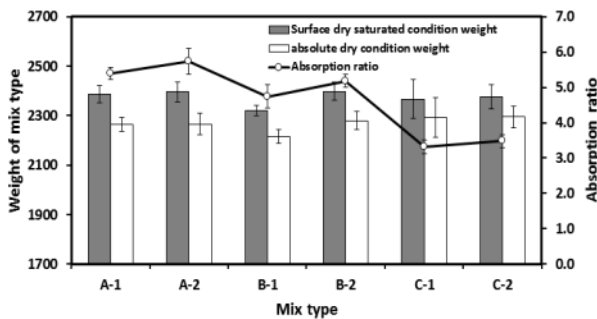


Fig. 12 Test result of absorption ratio

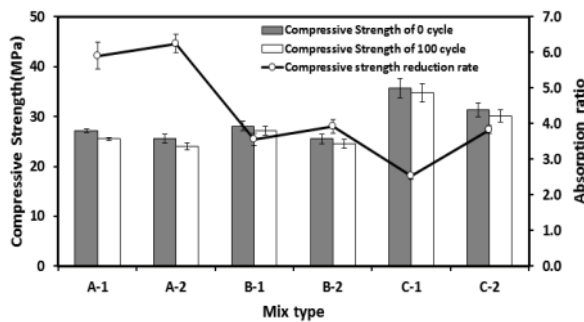


Fig. 13 Test result of freeze-thaw resistance

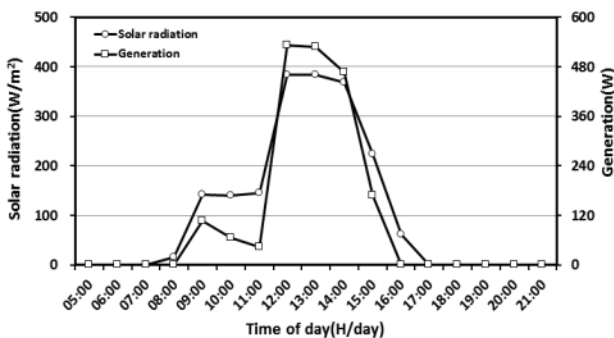


Fig. 14 Relationship between solar radiation and generation

- 1) 보도형 태양광 콘크리트 블록의 압축 및 휨강도 특성 평가 결과, 압축강도는 25.5~35.7MPa 범위를 나타내 평균 약 28.9MPa의 강도가 나타났으며 휨강도의 경우 5.1~10.5MPa의 범위를 보여 평균 7.2MPa로 나타났다. 국내 기준을 고려하여 볼 때 부순잔골재의 활용시 적정 단위시멘트량은 최소 240~340kg/m³의 범위량이 필요할 것으로 판단되며 부순골재를 치환한 경우 치환하지 않은 경우에 비하여 압축강도는 5.5~12.3%, 휨강도는 5.6~8.6%가 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 흡수율 및 동결융해 시험결과, 흡수율은 배합요인별로 3.3~5.7%로 나타나 국내 규정인 7%이하를 모두 만족하는 것으로 나타났으며 동결해시험의 경우 100사이클 후의 압축강도 감소율이 2.5~6.3%로 나타나 동결융해 후 압축강도가 감소하는 경향이 나타났다. 강도 특성과 같이 시멘트량이 많을수록 흡수율과 동결융해 후 강도감소율이 낮았으며, 부순잔골재를 치환한 경우 흡수율과 동결융해저항성이 다소 악화되는 것으로 나타났다.
- 3) 완공 1개월 후 초기 발전량을 측정된 결과, 일사량을 고려하면 적절한 수준으로 나타났다. 한편, 일사량과 표면 온도에 따른 발전량의 변동성이 크기 때문에 지속적으로 태양광 발전의 효율을 분석하는 방법에는 어려움이 있으므로 추후 장기간의 운영과 추가 연구를 통하여 효과적인 발전량 유지관리 방법을 확립하여야 할 것으로 판단된다.
- 4) 완공 후 2개월 주기로 블록의 정기점검을 시행한 결과, 6개월 침하량이 최대 2.498mm인 것으로 측정되어 국내 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 완공 후 2개월 이내에 침하량이 크게 발생하는 경향을 보였는데, 이는 모래 받침층의 다짐 부족과 우수에 의한 모래 유출 때문인 것으로 판단되며 향후 2개월마다 주기적인 점검을 통하여 블록 침하의 안정성과 점검주기의 적정성을 장기적으로 검토하여야 할 것으로 판단한다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지기술개발사업 연구과제입니다. (No. 20173010012880)

References

1. Cho, Y. S. (2018), World Energy Issue insight, Korea Energy Economics Institute, Korea, 18-2, 2-9.
2. Energy Innovation Policy Division (2019), Third Basic Energy Plan, Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea, 54-58.
3. Kim, C. S. (2018), New & Renewable Energy Statistics 2017, Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea, 19,145-146.
4. Kang, J. H. (2019), 2019 Quarterly Report Solar Industry Trend, The Export-Import Bank of Korea, Korea, 17-21.
5. Yang, Y. S., Lee, S. J., Kim, A. R. (2018), IEA World Energy Outlook 2018, Korea Energy Economics Institute, Korea, 18-43, 14.
6. Kim, K. H., Park, J. H., Yeon, T. K., Kim, J. T. (2017), A Preliminary Study to Make the Road Sector Ready for the Commercialization of Automated Vehicles : Focusing on Road Design and Planning, Korea Research Institute for Human Settlements, Korea, 49-55.
7. Lim, W. G., Ryu, S. W., Lee, B. T., Cho, Y. H. (2014), 2019 Performance Evaluation of Interlocking Block Pavement for Low Speed Highway, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, KSRE., 16(2), 1-2.
8. Park, H. M., Kim, Y. T., Lee, S. H. (2016), An Analysis on the Nonlinear Behavior of Block Pavements using Multi-Load Level Falling Weight Deflectometer Testing, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, KSRE., 18(6), 35-40.
9. Park, D. G., Kim, J. Y., Cho, Y. H. (2018), Types of Block Pavement, Failure and Its Application under Heavy Vehicle Loading, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, KCI., 30(5), 25-35.
10. Jung, J. S., Park, Y. B., Lee, K. H., Hwang, C. K. (2008), A Study on the Performance Evaluation and the Improvement of the Quality Standard of Block Pavements, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, KSRE., 10(1), 115-124.
11. Oh, H. J., Park, J. Y., Sohn, D. S., Han, E. S., Park, D. G. (2019), Performance Evaluation of Block Pavement Using Accelerated Pavement Testing, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, KSRE., 21(2), 31-37.
12. Lim, H. K. (2017), A Study on the Traffic Impact of the Limited Speed of Urban Area (5030), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, 3-4.
13. JIS (2016), Precast unreinforced concrete products, A 5371, *Japanese Standards Association*.
14. ASTM (2018), Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units, C936/C936M-18, *ASTM International USA*.
15. BS (2003), Concrete paving blocks. Requirements and test methods, EN 1338, *The British Standards Institution*.
16. Jo, D. K., Kang, Y. H. (2009), Analysis of Solar Radiation Components for the Installation of Solar Thermal System in Korea, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, KSES., 29(3), 12-18.
17. Jo, D. K., Yun, C. Y., Kim, K. D., Kang, Y. H. (2011), A Detail Survey of Horizontal Global Radiation and Hours of Bright Sunshine for the Installation of Solar Photovoltaic System in Korea, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, KSES., 31(3), 48-56.
18. Korea Construction Standards Center (2018), Korean Construction Specification-Concrete block pavement(KCS 44 70 05), Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, Korea, 4.

요 지 : 파리기후협정에 따른 온실가스 자발적 감축 의무 이행을 위해 세계적으로 석탄발전과 원자력발전의 비중을 줄이고 태양광 발전을 비롯한 재생에너지의 보급에 국가적 노력을 기울이고 있다. 우리나라도 법령을 도입하여 2040년까지 재생에너지의 발전비중을 30~35%까지 늘리고자 하고 있다. 또한 국외에서는 태양광 발전을 보도 및 도로에 적용하고자 하고 노력하고 있으나 국내의 경우 관련 연구가 전무한 실정이다. 따라서 태양광발전 도로를 개발하기 위한 선행연구로서 보도 및 광장에 적용가능한 태양광 발전 콘크리트 블록을 개발하였으며 이를 현장에 시공하여 적용성을 평가하였다. 실내실험결과 압축강도는 25.5~35.7MPa이 측정되었고 휨강도는 5.1~10.5MPa이 측정되어 국내 기준은 모두 만족하는 것으로 나타났으나 단위시멘트량이 많을수록 부순잔골재의 혼입에 따라 강도가 낮게 측정되었다. 흡수율은 최대 5.7%로 나타나 국내 기준인 7%이하를 만족하였으며 동결융해시험 결과 100사이클 후 압축강도 감소율은 최대 6.3%로 나타나 양호한 수준으로 측정되었다. 시공 후 침하량을 측정결과 최대 2.498mm가 측정되었으며 전면적에 대해 불규칙한 침하가 발생하였는데 이는 시공시 모래층의 다짐이 불량하였거나 우수에 의한 모래 유출로 인한 것으로 판단된다. 초기발전량의 경우 일사량을 고려하면 적정량이 측정되었다. 태양광 패널과 콘크리트 블록의 유지관리 기법은 추후 연구를 통하여 보다 효율적으로 확립할 필요가 있다.

핵심용어 : 태양광 발전, 콘크리트 블록, 보도, 현장 적용, 유지관리
