태양광 발전시설의 강우 투영단면적 비율에 따른 홍수량 변동특성 연구

Study on Variations in Flooding Volume According to Ratio of Rainfall to Projected Cross-Sectional Area of Photovoltaic Facilities

송영석* · 이희섭** · 이정호*** · 박무종****

Song, Youngseok*, Lee, Heesup**, Lee, Junho***, and Park, Moojong****

Abstract

With growing global environmental concerns, attention is focused on renewable energy. Photovoltaic facilities provide infinite solar and clean energy, and are utilized in various ways. Installation of a photovoltaic facility above a certain scale should be preceded by a flood risk assessment. Recent installations of photovoltaic facilities have been utilizing piling-type construction for minimal environmental damage. In previous flood risk assessments the total area of the photovoltaic facility was classified as impervious when the anticipated flood volumes were calculated. This study analyzed variations in flooding volumes according to projected cross-sectional areas where rain falls on the installation of the photovoltaic facility. Three cases were analyzed: CASE 1 takes into account the total area of the photovoltaic facility, CASE 2 the area considering the panel installation angle, and CASE 3 the area of the circular piles. The anticipated flood volumes were calculated as 97.59 m³/s for CASE 1, 97.57 m³/s for CASE 2, and 97.26 m³/s for CASE 3, a difference of less than 1%. Therefore, it is acceptable to consider the total area as impervious in a flood risk assessment when installing a photovoltaic facility.

Key words : Photovoltaic Facility, Projected Cross Sectional, Land Use, Design Flood Discharge, Design Rainfall, Geomorphic Characteristics

요 지

전 세계적으로 환경에 대한 우려가 커지면서 신재생에너지의 관심이 집중되고 있다. 그 중 태양광 발전시설은 무한한 태양광에너지이며 청정에너지로서 최근 다양한 방법으로 활용이 되고 있다. 일정규모이상의 태양광 발전시설의 설치에 사전재해영향성 평가가 수행되어야 한다. 최근 태양광 발전시설의 설치에 최소한의 자연훼손을 위해 말뚝형식으로 시공이 되고 있다. 과거 수행된 사전재해영향성 평가에서는 설계홍수량 산정시 태양광 발전시설의 전체 면적을 불투수 면적으로 분류하였다. 본 연구에서는 태양광 발전시설의 설치시 강우가 접하는 투영단면적에 따른 홍수량 변동 특성을 분석하였다. 분석 조건은 강우 투영단면적에 따라 CASE 1은 발전시설의 전체면적, CASE 2은 설치 각도를 고려한 면적, CASE 3은 원형말뚝의 면적이다. CASE별 설계홍수량은 CASE 1이 97.59 m³/s, CASE 2가 97.57 m³/s, CASE 3가 97.26 m³/s로 1% 미만의 차이가 분석되었다. 따라서, 태양광 발전시설의 설치시 재해의 안전성을 확보하기 위해 전체면적을 불투수면적으로 고려하는 것이 적절할 것이라 판단된다.

핵심용어 : 태양광 발전시설, 투영단면적, 토지이용도, 설계홍수량, 확률강우량, 지형특성

*정회원, 한서대학교 토목공학과 박사후연구원(E-mail: kind711@hanmail.net)

Member, Ph.D. Post-doc, Department of Civil Engineering, Hanseo University

**정회원, 한서대학교 건설공학과 박사과정

Member, Ph.D. Candidate, Department of Construction Engineering, Hanseo University

***정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 부교수

Member, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

****교신저자, 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-70-8238-5646, Fax: +82-41-660-1119, E-mail: mjpark@hanseo.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University

1. 서 론

지구온난화에 따른 기후변화의 영향은 전 세계의 사회, 환경, 기후, 재난 등의 중요한 이슈로 떠오르면서 미래의 지속적인 성장을 위한 시급한 대처가 필요하다. 최근 화석연료의 사용을 줄이고 신재생에너지 사업 중 태양광 발전시설에 많은 관심과 투자가 이루어지고 있다. 국외뿐만 아니라 우리나라의 정부도 태양광 발전시설에 대한 많은 연구와 투자가 진행되고 있다. 국내외의 선행연구로 태양광 발전시설은 설치지역 선정, 발전효율, 정책효과가 홍수량 변동 특성은 강우량 증가 그리고 토지이용 특성에 대한 연구가 수행되었다.

태양광 발전시설의 입지선정에 결정적 영향을 미치는 기후, 지형, 인문, 환경, 사회 등을 고려한 최적의 설치지역을 분석하였다(Arán et al., 2008; Kim, 2010; Lee and Kang, 2010). 태양광 발전시설은 화력과 원자력 등의 발전시설보다 시설면적이 넓고 기상조건의 영향이 많아 자연조건의 문제에 따른 발전효율의 저감이나, 인근 주민들과의 갈등 그리고 환경적 및 사회적 문제의 발생 가능성을 제시하였다(Ahn et al., 2011; Kim et al., 2011; Lee and Kim, 2017). 그리고, 내륙뿐만 아니라 해상에 태양광 발전시설의 설치를 위한 설계, 시공, 기술, 기상, 입지 등을 고려한 수상 태양광 발전시설의 연구도 수행되었다(Choi and Yi, 2013; Choi, 2014; Jin, 2014; Won, 2015; Lee and Lee, 2016).

태양광 발전시설의 발전효율은 지역적 특성, 일사량, 일조시간, 운량 등의 직접적인 영향뿐만 아니라 오도와 풍습, 해발높이 등에 따라 차이가 발생한다. 태양광 발전시설의 일사량이 일정수준 이상 증가시 발전효율에 영향이 없으며 실증데이터를 기반으로 온도와 풍속의 관계와 위도와 해발높이의 관계에 따른 발전량을 예측하는 산정식이 연구되었다(Cha et al., 2014, 2015). 또한, 재생에너지의 한 종류인 가정용 태양광 발전시설에 대한 환경적, 경제적, 사회적, 정치적 요인을 분석하거나 미국의 16개 주를 대상으로 태양광 발전시설의 보급 정책 효과를 분석하는 연구가 수행되었다(Zahran et al., 2008; Kwan, 2012; Aklin and Urpelainen, 2013; Shrimali and Jenner, 2013; Li and Yi, 2014). 태양광 발전시설의 선행연구는 설치에 따른 입지선정과 피해영향, 발생효율, 정책효과에 대한 연구가 대부분이며 태양광 발전시설 설치에 따른 재해영향, 강우의 흐름, 홍수량의 영향 등의 연구는 수행되지 않았다.

홍수량 변동특성은 강우량 증가에 따른 홍수량의 변동이나, 이상기후 영향에 따른 확률강우량의 변화 특성, 강우량과 홍수량의 영향을 분석하였다(Oh et al., 2009; Kang et al., 2015). 연강우량의 변동특성을 이동평균법에 의해 1년씩 증가하여 연최대 홍수량에 대한 빈도해석이나 설계홍수량 빈도해석 분석기법 중 LH-모멘트의 차수에 따른 설계홍수량의 적정성을 분석하였다(Wang, 1997a, 1997b; Maeng and

Hwang, 2009). 선행토양함수나 미래의 기후변화에 따른 토지이용특성의 변화와 토지이용의 유출곡선 지수 영향에 따른 홍수량 변동 특성의 연구가 수행되었다(Park et al., 2005a, 2005b; Lee et al., 2008; Sharifi and Kalin, 2010; Song et al., 2018). 홍수량 변동특성의 선행연구는 토지이용도나 유출곡선지수에 대한 홍수량 변동 특성에 대한 연구가 진행되었을 뿐 태양광 발전시설의 강우 발생시 투영단면적에 따른 홍수량 변동 특성은 연구가 수행되지 않았다.

최근 재생에너지 등의 정책으로 중소규모뿐만 아니라 아파트에 까지도 태양광 발전시설이 설치되고 있는 실정이다. 기존의 태양광 발전시설 설치에 따른 사전재해영향성 평가에서는 태양광 발전시설의 전체 면적을 불투수면적으로 구분하여 설계홍수량을 산정하였다. 그러나, 본 연구의 대상유역인 제주시 가시리 일대에 위치한 태양광 발전시설은 최소한의 자연훼손을 위하여 토양에 말뚝을 설치하고 그 위에 발전시설을 거치하여 강우발생시 유출량은 모두 토양으로 유입되게 된다. 따라서, 본 연구에서는 제주시 가시리 일대에 설치된 태양광 발전시설을 대상으로 강우 발생시 태양광 발전시설의 투영단면적에 따른 홍수량 변동 특성을 분석하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 설계홍수량 산정기준

우리나라에서는 하천, 수공구조물, 다양한 설계 및 계획에서 설계홍수량 산정을 수행하고 있다. 2012년에 국내 실무에서 적용되고 있는 각종 기준 및 이론 등을 검토하고 설계홍수량 산정시 문제가 되어 왔던 주관적 판단을 최소화 하기 위해 국토해양부에서는 ‘설계홍수량 산정요령’을 공표하였다. 기존의 설계홍수량 산정시에는 지역적 특성을 고려한 다양한 산정기준이 적용되었다면 ‘설계홍수량 산정요령’ 공표 후에는 우리나라의 설계홍수량 산정시 동일한 기준으로 통일성 있는 산정이 가능해 졌다.

‘설계홍수량 산정요령’은 크게 6장으로 구분되어 있으며 각 장은 설계홍수량 산정시 필요한 매개변수에 대한 이론과 산정기준을 제시하고 있다. ‘설계홍수량 산정요령’은 1장 서론, 2장 강우분석, 3장 홍수량 산정지점 및 유역특성인자의 산정, 4장 유효우량 산정, 5장 홍수량 산정방법 채택 및 유역추적 매개변수 산정, 6장 홍수수문곡선 계산으로 구성되어 있다. 우리나라의 적합한 설계홍수량 산정시 ‘설계홍수량 산정요령’에서 제시한 매개변수별 산정방법은 Table 1과 같으며 각 매개변수별 산정식은 Eqs. (1)부터 (7)과 같이 제시하였다.

$$Y = 0.1346X^{-1.4170} + 1.0014 \quad (1)$$

Table 1. Method for Calculating Design Floods

Class		Method	Equation
Rainfall Analysis	Rainfall Data ¹⁾	Conversion Factor of Fixed Duration - Unfixed Duration	Eq.1
	Probability Distributions ¹⁾	Gumbel Distribution	Eq.2
	Rainfall Intensity Formula ¹⁾	Head count Polynomials	Eq.3
	Areal Rainfall Quantiles ¹⁾	Estimation of Thiessen Method After Areal Reduction Factor	Eq.4
	Time Distribution ¹⁾	Huff's Method of Third Quartile	
Basin Characteristics	Area	Digital Map	
	River Length	Digital Map (Length from exit of basin to starting point of basin)	
	River Slope	Digital Map (Average Basin)	
	Shape Factor	Digital Map	
Effective Discharge	Curve Number ²⁾	AMC-III	
Flood Discharge	Unit Hydrograph	Clark Unit Hydrograph Method	
	Time of Concentration	Continuous Kraven Formula	Eq.5~7
	Storage Constant	Sabol Formula	Eq.8
Flood Hydrograph	flood hydrograph	Effective Rainfall + Base Flow	
	flood routing	Muskingum method	Eq.9

Note: ¹⁾ Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011) Improvement and Supplement of Probability Rainfall,

²⁾ Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012) Guidelines for Calculating Design Floods

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)}{\sigma} - \exp\left[-\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right]\right] \quad (2)$$

$$\ln(I) = a + b \ln(t_h) + c(\ln(t_h))^2 + d(\ln(t_h))^3 + e(\ln(t_h))^4 + f(\ln(t_h))^5 + g(\ln(t_h))^6 \quad (3)$$

$$ARF(A) = 1 - M \cdot \exp\left[-(aA^b)^{-1}\right] \quad (4)$$

$$T_c = 16.667 \frac{L}{V} \quad (5)$$

$$(S>3/400): V = 4.592 - \frac{0.01194}{S}, V_{\max} = 4.5 \text{ m/s} \quad (6)$$

$$(S \leq 3/400): V = 35,151.515S^2 - 79.393939S + 1.6181818, V_{\min} = 1.6 \text{ m/s} \quad (7)$$

$$K = \frac{T_c}{1.46 - 0.0867 \frac{L^2}{A}} \quad (8)$$

$$S = K\{O + x(I - O)\} = K\{xI + (1-x)O\} \quad (9)$$

여기서, Y는 환산계수, X는 강우지속기간(hr), x는 강우자

료, μ 는 위치 매개변수와 σ 는 규모 매개변수, $I(t)$ 는 강우지속기간에 따른 강우강도(mm/hr), t 는 강우지속기간(min), t_h 는 강우지속기간(hr), a, b, c, d, e, f, g, n 등은 회귀상수, ARF(A)는 유역면적 A(km²)에 따른 면적우량환산계수, M, a, b는 면적우량환산계수 회귀식의 회귀상수, T_c 는 도달시간(min), L은 유로연장(km), S는 평균경사(무차원), V는 평균 유속(m/s), K는 유역저류상수(hr), T_c 는 도달시간(hr), L은 유로연장(km), A는 유역면적(km²), x는 가중인자이다.

2.2 태양광 발전시설의 강우 투영단면적 비율

태양광 발전시설은 신·재생에너지의 하나인 태양광을 이용하여 태양전지에 태양광에너지를 모으고 전기를 생산하는 발전시설로서 무공해이며 무제한적인 태양광 에너지를 사용하며 유지 및 보수가 간편하다. 2010년 이후로 태양광 발전시설 사업은 개인토지뿐 만 아니라 대규모 공동부지 등에도 개발 사업이 진행되고 있으며, 최근에는 아파트 베란다에도 미니 태양광 발전시설의 설치가 시행되고 있다.

다양한 태양광 발전시설 사업 중 일정한 면적 이상의 지역에서 태양광 발전시설 사업은 재해 발생을 예방하기 위해 ‘자연재해대책법’에서는 사전재해영향성 검토를 의무화하고 있다. 제주도 지역에서는 2015년 이후로 사전재해영향성 평가가 진행된 태양광 발전시설의 현황은 Table 2와 같다.

Table 2. Status of Preliminary Disaster Impact Review of Solar Energy System

Class	Preliminary Disaster Impact Review						
	Kashiri ¹⁾	Taewon Solar ²⁾	Taiho ³⁾	Haechan ⁴⁾	Shin Kwang 1th ⁵⁾	Shin Kwang 2th ⁶⁾	Wimy ⁷⁾
Business District	Seogwipo-si	Seogwipo-si	Seogwipo-si	Seogwipo-si	Seogwipo-si	Seogwipo-si	Seogwipo-si
Basin Area (km ²)	1.260	0.010	0.010	0.028	0.016	0.025	0.017
Land Use (Solar Energy System)	Power Plant	Power Plant	Power Plant	Commercial Area	Commercial Area	Commercial Area	Commercial Area
Area of Solar Energy System	Total Area	Total Area	Total Area	Total Area	Total Area	Total Area	Total Area
Evaluation Model of Design Flood Discharge	SCS	SCS	SCS	SCS	SCS	SCS	SCS
Curve Number	AMC-III	AMC-III	AMC-III	AMC-III	AMC-III	AMC-III	AMC-III

Note: ¹⁾ Kashiri Village and nine companies (2016). Preliminary Disaster Inspection for Establishment of Photovoltaic Facility in Kashiri, ²⁾ Taewon Solar (2015). Preliminary Disaster Inspection for Establishment of Photovoltaic Facility in Taewon Solar, ³⁾ Taiho Energy (2015). Preliminary Disaster Inspection for Establishment of Photovoltaic Facility in Taiho Energy, ⁴⁾ Haechan (2015). Preliminary Disaster Inspection according to Establishment of Photovoltaic Facility in Haechan, ⁵⁾ Jun Seongbae (2016). Preliminary Disaster Inspection according to Establishment of Photovoltaic Facility in Shin Kwang 1th, ⁶⁾ Jun Yonggyun (2016). Preliminary Disaster Inspection according to Establishment of Photovoltaic Facility in Shin Kwang 2th, ⁷⁾ We Daeseong (2016). Preliminary Disaster Inspection according to Establishment of Photovoltaic Facility in We Mi

(a) Design Drawing

(b) Installation Cases

Fig. 1. Installation Example of Solar Energy System in Jeju Kashiri

‘가시리 태양광 발전시설 조성사업’으로 설치된 태양광 발전시설은 폭이 약 9 m, 높이가 약 4 m이며 태양광 발전시설이 25°의 경사로 가시리 지역특성을 고려하여 설치되었다 (Fig. 1). 제주시에 설치된 태양광 발전시설은 사전재해영향성 검토에서 발전시설이나 상업지역으로 분류되어 불투수 면적에 대한 설계홍수량을 산정하였다. 또한, 태양광 발전시설의 면적은 상판 태양광 발전시설의 전체 면적을 모든 개발 사업에서 동일하게 적용되었다.

그러나, 설치된 태양광 발전시설을 보면 강우발생시 1차적으로 태양광 발전시설의 표면적에 떨어지고 경사각의

지표면을 흘러 모든 강우가 지표면으로 유입된다. 유역이 작은 사업지역에서야 안전 차원에서 태양광 발전시설을 불투수 면적으로 고려하여 산정하지만 가시리의 경우 타 사업지구의 면적보다 약 50배에서 100배 이상의 면적차이가 발생한다.

본 연구에서는 가시리에 설치된 태양광 발전시설의 유출 특성을 고려하기 위해 실제 태양광 발전시설이 접하는 강우의 투영단면적에 대한 분석 조건을 적용하고자 한다. 태양광 발전시설의 강우가 접하는 투영단면적을 태양광 발전시설의 전체 면적에 강우가 발생하는 조건을 CASE 1, 가시리

태양광 발전시설의 설치각도는 25°로서 강우가 접하는 투영 단면적만 고려한 조건을 CASE 2, 강우발생시 태양광 발전시설을 접촉하나 우수의 흐름은 토양에 떨어진 뒤 진행되므로 원형말뚝 면적만을 고려한 조건을 CASE 3와 같이 분석 조건을 수립하였다(Table 3).

3. 매개변수 산정

3.1 대상유역의 지형특성

본 연구의 대상유역은 제주도 서귀포시 표선면 가시리 산 68번지 일대에 위치하고 있으며, 가시리 마을과는 북서측으로 약 5.0 km 거리에 서측 인근에는 정석비행장이 위치하고 있다. 또한, 상류지역에는 대륙산이 위치하고 있어 강우발생시 유출량이 대상유역을 통과하여 가시천으로 유입된다. 본 연구의 대상유역에 대한 유역현황, 위치, 그리고 태양광 발전시설은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2. Study Area

가시리 태양광 발전시설의 전체 유역면적은 1.26 km²으로 A유역이 0.52 km², B유역이 0.74 km²이며 태양광 발전시설은 총 2,956개로 A유역이 1,079개, B유역이 1,877개가 설치되어 있다(Table 4).

Table 3. Analysis Condition of Projected Cross-Sectional Area of Solar Energy System

Class	Projected Cross-Sectional Area (m ²)	Content
CASE 1	35.24	Applying rainfall to the entire area of solar energy system

CASE 2	31.93	Application of projected cross-sectional area of rainfall considering slope (25°) of solar energy system

CASE 3	0.053	Applied circular pile area (Ø0.15m) of solar energy system installed on land

Table 4. General Status

Class	A Basin	B Basin	Sum
Area (km ²)	0.52	0.74	1.26
Solar Energy System	1,079	1,877	2,956
Location	Noksan-ro, Pyoseon-myeon, Seogwipo-si, Jeju-do, Republic of Korea		

설계 홍수량 산정을 위한 매개변수는 2.1절에서 이론과 산정식을 제시하였으며 대상유역의 소유역, 토양군, 표고, 경사 등의 지형특성은 Fig. 3과 같다. 수문학적 토양군은 대부분 D로 구성되어 있으며 대륙산 인근지역만 토양군 B가 위치하고 있다. 표고의 범위는 El. 240 m ~ El. 440 m로 분포되어 있으며 대륙산 지역에서 최대 표고가, 태양광 발전시설은 El. 240 m ~ El. 300 m 사이의 표고에 위치하고 있다. 경사의 범위는 0° ~ 26°로 분포하고 있으며 대륙산 지역에서 최대 경사가, 태양광 발전시설은 0° ~ 10° 사이의 경사에 위치하고 있다.

Clark 매개변수는 도달시간, 저류상수, 유출곡선지수를 산정해야 한다. 도달시간은 연속형 Kraven-II공식을 적용하고 유하시간을 10분을 설정하였으며 저류상수는 Sabol 공식을 적용하였다. 유역별 산정된 매개변수는 Table 5와 같으며 유출곡선지수는 태양광 발전시설의 강우의 투영단면적에

따른 산정으로 4.1절에 제시하였다.

3.2 확률강우량 산정

본 연구의 대상지역은 제주도에 위치한 4개의 관측소 중 Thiessen 다각형에서 성산포 관측소 인근에 위치하고 있다(Fig. 4). 성산포 관측소는 1971년 5월부터 관측을 실시하여 현재까지 46개년의 강우자료가 관측되어 강우분석을 위한 30년 이상의 관측자료를 확보하고 있다. 성산포 강우관측소에 대한 일반현황은 Table 6과 같다.

확률강우량 산정은 FARD (Frequency Analysis of Rainfall Data)를 활용하여 분석하였으며 확률분포형은 ‘설계홍수량 산정요령, 국토해양부(2012)’에서 제안하고 확률분포형 검정결과를 종합적으로 검토하여 지역적 불연속이 발생하는 현상을 방지하기 위해 Gumbel 분포형을 선정하였다. 성산포 강우관측소의 지속시간별 확률강우량은 Table 7과 같다.

Fig. 3. Basin Characteristics

Table 5. Calculation of Parameters by Basin

Class		A Basin	B Basin
Basin Characteristics	Basin Area (km ²)	0.52	0.74
	River Length (km)	1.15	1.92
	Average Slope (°)	5.58	5.90
Clark Unit Parameter	Travel Time (min)	4.39	7.30
	Inlet Time (min)	10.00	10.00
	Time of Concentration (hr)	0.24	0.29
	Storage Constant (hr)	0.19	0.28

Fig. 4. Meteorological Station in Jeju

Table 6. General Status for Sungsanpo Meteorological Station

Observatory	Location			Elevation (El.m)	Start observation period (Date)
	Address	Concentration	Latitude		
Sungsanpo	685-4, Sinsan-ri, Seongsan-eup, Seogwipo-si, Jeju-do, Republic of Korea	126°53′	33°23′	18.6	1971. 5. 1

Table 7. Duration of Probability Rainfall

Frequency (yr)	Probability Rainfall (mm)									
	10 min	60 min	120 min	180 min	240 min	300 min	360 min	720 min	1080 min	1440 min
10	25.8	83.8	114.5	134.7	155.0	173.0	200.5	223.8	247.2	268.0
20	29.1	96.0	130.2	153.4	176.8	196.6	227.3	255.0	281.7	306.1
30	31.0	103.1	139.3	164.1	189.3	210.1	242.8	273.0	301.5	328.0
50	33.4	111.9	150.6	177.6	205.0	227.1	262.1	295.4	326.2	355.4
80	35.6	119.9	161.0	189.8	219.3	242.6	279.8	316.0	348.9	380.5
100	36.6	123.7	165.9	195.7	226.1	250.0	288.1	325.7	359.6	392.4

제주도는 화산활동으로 생성된 섬으로서 지역별 표고의 차이가 있어 일반적인 육지에서의 강우량과는 공간적 특성의 차이가 있다. ‘제주도 특성에 적합한 재해영향 저감기준 연구, 제주특별자치도(2008)’에서는 제주도의 고도별 강우발생에 대한 공간적 특성을 분석하였다. 본 연구의 대상구역의 고도별 강우량비를 산정하였으며 표고별 평균 강우량비는 1.36이 산정되었다(Table 8).

대상구역의 표고별 강우량비를 적용한 지속시간별 확률강우량의 재산정 결과는 Table 9와 같다. 표고별 강우량비를

적용한 확률강우량은 지속시간 10분에서는 10년 빈도의 확률강우량이 강우량비 적용 전의 100년 빈도보다 크며, 지속시간이 증가하여도 약 50년 빈도의 강우량과 비슷하였다.

확률강우강도식은 강우강도-지속시간-재현기간의 관계를 나타내는 식으로서 확률강우량을 강우강도로 변환시킨 후 최소자승법을 이용하여 확률년도에 따른 강우강도-지속시간 관계식을 산정한다. 본 연구에서는 ‘확률강우량도 개선 및 보완 연구, 국토해양부(2011.11)’에서 제시한 전대수다항식을 적용하였으며 재현기간별 확률강우강도식은 Table 10과 같다.

Table 8. Estimation of Rainfall Ratio by Elevation in Jeju

Class	Elevation (EL.m)					
	150~200	200~250	250~300	300~350	350~400	400~450
Ratio of Rainfall	1.14	1.24	1.33	1.43	1.52	1.61
Ratio of Area (m ²)		24203.0	734256.7	352,269		
Average	1.36					

Table 9. Duration of Probability Rainfall considering Rainfall Ratio

Frequency (yr)	Duration of Probability Rainfall (mm)									
	10 min	60 min	120 min	180 min	240 min	300 min	360 min	720 min	1080 min	1440 min
10	40.2	118.3	161.8	189.0	208.7	224.1	236.7	284.2	311.8	332.1
20	45.7	136.7	187.5	218.6	240.9	258.2	272.3	326.2	358.5	382.7
30	48.8	147.0	201.8	235.2	259.0	277.4	292.4	348.8	381.9	406.3
50	52.5	159.9	219.6	256.1	282.3	302.6	319.1	380.6	416.3	442.8
80	56.1	171.8	236.2	275.4	303.3	324.8	342.3	407.1	443.8	470.4
100	57.8	177.6	244.2	284.6	313.3	335.5	353.5	420.9	460.1	489.2

Table 10. Rainfall Intensity Duration Formula considering Rainfall Ratio

Frequency (yr)	Polynomial Coefficient							
	a	b	c	d	e	f	g	R-squared
10	4.77348	-0.49000	-0.07262	0.00279	0.00328	-0.00140	0.00020	0.9996
20	4.91748	-0.49000	-0.07966	0.00059	0.00462	-0.00133	0.00015	0.9997
30	4.99048	-0.48800	-0.08184	0.00090	0.00479	-0.00147	0.00017	0.9997
50	5.07448	-0.48700	-0.08312	0.00279	0.00462	-0.00179	0.00024	0.9997
80	5.14648	-0.48400	-0.08553	0.00241	0.00500	-0.00183	0.00023	0.9997
100	5.17948	-0.48300	-0.08659	0.00223	0.00519	-0.00183	0.00023	0.9998
Equation	$\ln(I) = a + b \times \ln(hr) + c \times \ln(hr) + d \times \ln(hr) + e \times \ln(hr) + f \times \ln(hr) + g \times \ln(hr)$							

4. 설계홍수량 변동특성

4.1 태양광 발전시설의 투영단면적을 고려한 토지 이용특성

본 연구에서는 태양광 발전시설의 강우발생시 투영단면적에 따른 홍수량의 변동특성을 분석하기 위해 2.2절에서 태양광 발전시설을 3개의 CASE를 적용한 토지이용도를 분석하였다. 대상유역의 토지이용도는 태양광 발전시설에

강우의 영향이 전체 면적을 적용한 조건을 CASE 1, 태양광 발전시설의 경사를 고려하여 강우가 접촉하는 면적을 고려한 조건을 CASE 2, 강우가 태양광 발전시설을 지나 토양으로 유입되어 원형말뚝만을 적용한 CASE 3으로 구분하였다 (Fig. 5).

대상유역의 CASE별 토지이용도는 도로, 발전시설, 산지, 시설 등으로 총 8개의 종류로 나누어져 있으며 태양광 발전시설은 발전시설로 분류되었다. 발전시설의 면적을 제외하고

Fig. 5. CASE Condition According to Protected Cross Sectional Area in Photovoltaic Facility

유역면적의 약 70% 이상이 원형보전녹지와 초지로 구성되어 있다. CASE 1의 태양광 발전시설의 면적은 총 1.26 km² 중 0.11 km²에 해당하며 CASE 2는 CASE 1보다 B유역에서 0.01 km²이 감소한 0.10 km²으로 전체면적에 약 10%에 해당한다. CASE 3의 경우 원형밭둑의 면적만을 산정하여 0.02 km²로 전체 유역면적의 약 2%에 해당한다(Table 11).

CASE별 토지이용도와 3.1절에서 산정한 토양도를 고려하여 유출곡선지수를 유역별로 산정하였다. 유출곡선지수는 선행토양함수 조건에 따라 AMC-I, AMC-II, AMC-III로 구분되며 본 연구에서는 2.1절의 ‘설계홍수량 산정요령, 국토해양부(2012)’에 따라 유출률이 가장 높은 AMC-III를 적용하였다. 유출곡선지수는 CASE 1을 기준으로 A유역에서 85.85가 산정되었으며 CASE 2는 0.02 감소한 85.83, CASE 3은 0.24 감소한 85.61, B유역은 86.12가 산정되었으며 CASE 2는 0.02 감소한 86.10, CASE 3은 0.26 감소한 85.86으로 Table 12와 같다.

4.2 태양광 발전시설의 설계홍수량 변동 특성

본 연구에서는 태양광 발전시설이 강우의 투영단면적에 따른 CASE를 구분하고 ‘설계홍수량 산정요령, 국토해양부(2012)’에 따라 매개변수를 2장부터 4장까지 산정하였다. 설계홍수량 산정을 위한 설계빈도는 사전재해영향성 검토에서 개발 사업에 따른 재해의 영향을 고려할 때 적용하는 50년 빈도를 대상으로 분석하였다. 대상유역에서 산정된 홍수량은 A유역의 CASE 1은 44.20 m³/s, CASE 2는 44.19 m³/s, CASE 3은 44.05 m³/s이며 B유역은 CASE 1이 53.39

m³/s, CASE 2는 53.38 m³/s, CASE 3은 53.21 m³/s 이 Fig. 6과 같이 산정되었다. CASE별 분석결과는 태양광 발전시설의 유출곡선지수 차이에 따른 설계홍수량의 차이는 CASE 1과 CASE 2의 경우 유역면적에 상관없이 약 0.01 m³/s 이 CASE 1과 CASE 3의 경우도 약 0.15 m³/s ~ 0.18 m³/s 이 감소하였다(Fig. 6).

Fig. 6. Design Flood Discharge by CASE and Basin

대상유역에서 산정된 CASE별 설계홍수량의 임계지속시간은 A유역이 100분, B유역이 120분이며 전체 면적에 대한 설계홍수량은 CASE 1이 97.59 m³/s, CASE 2가 0.02 m³/s 감소한 97.57 m³/s, CASE 3이 0.33 m³/s 감소한 97.26 m³/s으로 분석되었다(Table 13). 토지이용도에서 발전시설 면적은 전체 면적중에 CASE 1과 CASE 2에서는 약 10%, CASE 3은 약 2%

Table 11. Land Use Status by Case

Land Use	CASE 1		CASE 2		CASE 3	
	A Basin	B Basin	A Basin	B Basin	A Basin	B Basin
Road	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
Power Plant	0.04	0.07	0.04	0.06	0.01	0.01
Forest	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
Facilities	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Green Spaces	0.18	0.14	0.18	0.14	0.18	0.14
Pond	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Greenspace Establishment	0.06	0.12	0.07	0.13	0.10	0.18
Grassland	0.18	0.36	0.18	0.36	0.18	0.36
Sum	0.52	0.74	0.52	0.74	0.52	0.74

(Unit: km²)

Table 12. Curve Number by Case

Class	Curve Number (III)			
	A Basin		B Basin	
CASE 1	85.85	-	86.12	-
CASE 2	85.83	▼0.02	86.10	▼0.02
CASE 3	85.61	▼0.24	85.86	▼0.26

Table 13. Variation of Design Flood Discharge by CASE

Case	A Basin			B Basin			Total	
	Discharge (m ³ /s)	Critical Duration (min)	Variation (m ³ /s)	Discharge (m ³ /s)	Critical Duration (min)	Variation (m ³ /s)	Discharge (m ³ /s)	Variation (m ³ /s)
CASE 1	44.20	100	-	53.39	120	-	97.59	-
CASE 2	44.19	100	▼0.01	53.38	120	▼0.01	97.57	▼0.02
CASE 3	44.05	100	▼0.15	53.21	120	▼0.18	97.26	▼0.33

이하 이지만 설계홍수량의 감소량은 CASE 2가 0.02%, CASE 3가 0.34%로 1%의 감소도 발생되지 않았다. 태양광 발전시설에 강우발생시 투영단면적에 따른 설계홍수량의 차이는 1%도 발생되지 않아 그에 따른 영향이 미미하다. 또한, 태양광 발전시설 개발 사업에서는 강우의 투영단면적에 따른 설계홍수량의 영향은 재해의 안전성 확보를 위해 전체면적을 고려한 분석이 적절할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 최근 신재생에너지 사업 중 하나인 태양광 발전시설의 설치에 따른 강우 발생시 투영단면적 비율에 대한 홍수량 변동특성은 검토하였다. 대상구역은 제주시 가시리 인근이며 유역면적은 1.26 km²으로 2015년 이후에 수행된 태양광 발전시설의 면적에서 작게는 50배, 크기는 100배의 차이가 있는 대규모 태양광 발전시설이 설치되었다.

기존의 수행된 사전재해영향성 검토에서의 태양광 발전시설은 불투수 면적으로 분류되어 설계홍수량을 산정하였다. 그러나 제주시 가시리에 설치된 태양광 발전시설을 보면 강우발생시 태양광 발전시설의 표면에 떨어지고 경사각의 지표면을 흘러 모든 강우가 지표면으로 유입된다. 태양광 발전시설의 유출특성을 고려하기 위해 강우의 투영단면적에 따라 태양광 발전시설의 전체면적에 강우가 발생하는 조건을 CASE 1, 태양광 발전시설의 설치 각도를 고려한 강우의 투영단면적만 고려한 조건을 CASE 2, 강우가 태양광 발전시설에 떨어진 뒤 우수의 흐름으로 토양에 떨어져 원형말뚝의 면적만을 고려한 CASE 3의 조건을 수립하였다.

설계홍수량 산정은 국토해양부의 ‘설계홍수량 산정요령’에 따라 매개변수를 산정하였으며 확률강우량 산정시 제주도의 표고차이에 따른 고도별 강우량비를 산정하여 확률강우량을 재산정하였다. CASE별 설계홍수량의 산정은 사전재해영향성 검토의 재해저감 설계빈도인 50년빈도를 적용하였다. CASE별 분석된 설계홍수량은 CASE 1이 97.59 m³/s, CASE 2가 0.02 m³/s 감소한 97.57 m³/s, CASE 3가 0.33 m³/s 감소한 97.26 m³/s 으로 분석되었다. 토지이용도에서 발전시설의 면적이 전체 면적 중에 CASE 1과 CASE 2는 약 10%, CASE 3는 약 2% 이하이지만 설계홍수량의 감소는 CASE

1을 기준으로 CASE 2이 0.02%, CASE 3이 0.34%으로 1%의 감소도 발생되지 않았다.

따라서, 본 연구의 결과로 보아 태양광 발전시설의 강우 투영단면적별 설계홍수량의 차이는 1% 미만의 차이가 발생되어 CASE별 재해의 영향은 미비한 것으로 판단된다. 태양광 발전시설의 사업시 재해발생의 안전성을 확보하기 위해 태양광 발전시설의 전체면적을 불투수면적으로 고려하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 한서대학교 교내 연구지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- Ahn, S.W., Joo, H.S., and Lee, H.S. (2011). Environmental assessment and environment-friendly development in mountainous area in constructing photovoltaic complex. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 20, No. 2, pp. 141-150.
- Aklin, M., and Urpelainen, J. (2013). Political competition, path dependence, and the strategy of sustainable energy transitions. *American Journal of Political Science*, Vol. 57, No. 3, pp. 643-658.
- Arán Carrión, J., Espín Estrella, A., Aznar Dols, F., Zamorano Toro, M., Rodríguez, M., and Ramos Ridao, A. (2008). Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 9, pp. 2358-2380.
- Cha, W.C., Park, J.H., Cho, U.R., and Kim, J.C. (2014). A study on solar power generation efficiency analysis according to latitude and altitude. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 28, No. 10, pp. 95-100.
- Cha, W.C., Park, J.H., Cho, U.R., and Kim, J.C. (2015).

- A study on solar power generation efficiency empirical analysis according to temperature and wind speed. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 64P, No. 1, pp. 1-6.
- Choi, Y.K. (2014). A case study on suitable area and resource for development of floating photovoltaic system. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, Vol. 8, No. 5, pp. 835-839.
- Choi, Y.K., and Yi, J.S. (2013). The technique of installing floating photovoltaic systems. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 14, No. 9, pp. 4447-4454.
- Jin, T.S. (2014). Design and analysis of state-of-the-art technologies for development of floating photovoltaic system. *Journal of The Korean Society of Industrial Application*, Vol. 17, No. 4, pp. 227-233.
- Kang, B.S., Yang, S.K., and Jung, W.Y. (2015). Analysis of flooding variation and flood inundation according to increasing rainfall. *Journal of Environmental Science International*, Vol. 24, No. 4, pp. 415-424.
- Kim, H.Y. (2010). A study on the improvement of the accuracy of photovoltaic facility location using the geostatistical analysis. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 13, No. 1, pp. 146-156.
- Kim, J.Y., Song, J.J., and Lee, J.E. (2011). Environmental assessment in the siting of solar and wind power plants. *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 141-147.
- Kwan, C.L. (2012). Influence of local environmental, social, economic and political variables on the spatial distribution of residential solar PV arrays across the United States. *Energy Policy*, Vol. 47, pp. 332-344.
- Lee, J.Y., and Kang, I.J. (2010). A study of PV system facilities using geo-spatial information system. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 18, No. 2, pp. 99-105.
- Lee, K.R., and Lee, W.H. (2016). Floating photovoltaic plant location analysis using GIS. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 24, No. 1, pp. 51-59.
- Lee, Y.J., An, S.R., Kang, B.S., and Kim, S.J. (2008). Assessment of future climate and land use change impact on hydrology and stream water quality of Anseongcheon watershed using SWAT model (II). *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 6B, pp. 665-673.
- Lee, Y.J., and Kim, Y.S. (2017). Prediction and accuracy analysis of photovoltaic module temperature based on predictive models in summer. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 37 No. 1, pp. 25-38.
- Li, H., and Yi, H. (2014). Multilevel governance and deployment of solar PV panels in U.S. cities. *Energy Policy*, Vol. 69, pp. 19-27.
- Maeng, S.J., and Hwang, J.H. (2009). Analysis on characteristics of variation in flood flow by changing order of probability weighted moments. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 10, No. 5, pp. 1009-1019.
- Oh, T.S., Kim, M.S., Moon, Y.I., and Ahn, J.H. (2009). An analysis of the characteristics in design rainfall according to the data periods. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 9, No. 4, pp. 115-127.
- Park, C.H., Yoo, C.S, and Kim, J.H. (2005a). Revised AMC for the application of SCS method: 1. Review of SCS method and problems in its application. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 11, pp. 955-962.
- Park, C.H., Yoo, C.S, and Kim, J.H. (2005b). Sensitivity analysis of runoff curve number to the rainfall conditions. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 6B, pp. 501-508.
- Sharifi, A., and Kalin, L. (2010). Effect of land use uncertainty on watershed modeling. *World Environmental and Water Resources Congress*, Vol. 6, pp. 4730-4739.
- Shrimali, G., and Jenner, S. (2013). The impact of state policy on deployment and cost of solar photovoltaic technology in the U.S.: A sector-specific empirical analysis. *Renewable Energy*, Vol. 60, pp. 679-690.
- Song, Y.S., Song, Y.H., Lee, J.H., and Park, M.J. (2018). Variational characteristics of flood discharge according to classification criteria of land use. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 395-407.
- Wang, Q.J. (1997a). LH moments for statistical analysis of extreme events. *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 12, pp. 2841-2848.
- Wang, Q.J. (1997b). Using higher probability weighted moments for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, Vol. 194, No. 1-4, pp. 95-106.
- Won, C.S. (2015). Technical trend of floating PV system. *The Magazine of Korean Solar Energy Society*, Vol. 13, No. 1, pp. 18-23.

Zahran, S., Brody, S.D., Vedlitz, A., Lacy, M.G., and Schelly, C.L. (2008). Greening local energy: Explaining the geographic distribution of household solar energy use in the United States. *Journal of the American Planning Association*. Vol. 74, pp. 419-434.

<i>Received</i>	■	July 31, 2018
<i>Revised</i>	■	September 13, 2018
<i>Accepted</i>	■	October 4, 2018