

태양광 발전설비가 설치된 건물의 진화 시 주수에 의한 감전의 위험성에 관한 연구

김진선 · 권성필*[†]

유한대학교 전자정보과, *한국소방산업기술원

A Study on the Risk of Electric Shock from the Sprayed Water for Fire Suppression of the PV Installed Building

Jinsun Kim · Seong-Pil Kwon*[†]

Dept. of Electronics & Information Eng., Yuhan Univ.

*Korea Fire Institute

(Received November 11, 2014; Revised December 7, 2014; Accepted December 7, 2014)

요 약

본 연구에서는 태양광 발전설비가 설치되어 있는 건물에서 화재가 발생할 경우 분사되는 물을 통해 전류가 흐를 가능성 및 감전의 위험성에 대해 고찰하였다. 분사되는 물을 수학적 모델을 통하여 해석 하였고, 물 전도도 측정을 위한 물 분사 시스템을 제작하여 유속에 따른 물 저항값을 측정하여 수치적으로 예상한 값과 비교하였다. 실험과 수치계산의 결과로 태양광 발전설비 화재 시 고려되어야 할 사항들을 정의할 수 있게 되었다.

ABSTRACT

In this study we investigated the risk of electric shock and the possibility of current flow from the sprayed water when fire took place in a photovoltaic (PV) installed building. The sprayed water was analysed by using a mathematical model, a water spray system for water conductivity was made. With changing the initial water flow rate the water resistance was measured, and compared with the numerically expected value. As the experimental and numerical computing result, we were able to define the requirements that must be considered in the fire of PV systems.

Keywords : PV systems, Water conductivity, Electric shock, Water trajectory length

1. 서 론

일본의 후쿠시마 원전 사고 이후 신재생에너지에 대한 관심이 크게 높아져 가고 있으며, 풍력발전과 함께 태양광 발전설비가 설치된 면적도 급속도로 증가하고 있는 실정이다. 태양광 발전설비는 설치 용량이 클수록 독립적인 공간에 설치되고 있으며, 인구가 밀집된 도시 근교에 설치되고 있는 경우가 늘고 있다. 또한 건물의 창문이나 옥상에 대규모로 설치되거나 가정집의 옥상에도 많이 설치되고 있다. 그에 따라 태양광 발전설비의 화재 및 안전관리에 대한 관심도 크게 증가하고 있다^(1,2). 해외에서 보고된 태양광 발전설비의 화재 건수를 살펴보면, 일본에서는 최근 5년간 총 133건이 발생(일본 소비자청, 2014년)하였고, 독일의 경우 지난 15년간 총 220건(프라운호퍼 연구소, 2012년)이 발생한 것으로 조사되어 국내에서도 태양광 발전설

비의 증가에 따른 화재의 발생건수가 급증할 것으로 예상된다^(3,4). 태양광 발전설비가 설치되어 있는 장소에서 화재가 발생할 경우 열뿐만 아니라 빛에너지가 발생되며, 이는 태양광 발전설비에 의한 발전량의 증가로 이어져 2차 전기에너지 증폭이 예상된다. 또한 물 분사를 통한 화재진압 시 태양광 발전설비로부터 흘러나오는 전류에 의한 감전의 위험성이 높아져서 이에 대한 대응방안이 마련되어야 한다^(5,6). 본 연구에서는 태양광 발전설비의 화재 진압 시 주수로 인한 감전 가능성의 진단을 위해 태양광 발전설비의 상황을 분석하였고 감전요인과 현상을 계산과 실험을 통해 데이터를 확보 하였다. 주수 시 물 분사 모델을 구성하고 수식으로 표현 하였고, 실험 장치를 통해 감전의 상황을 구현하였다. 본 수치해석과 실험을 통해 물 전도도, 전압과 물 저항의 변화를 알아내어 태양광 발전설비전압의 크기 따른 전도도 및 감전 가능성을 수치적 방법과 실

[†]Corresponding Author, E-Mail: kwon@kfi.or.kr
TEL: +82-31-289-2953, FAX: +82-31-289-9067

ISSN: 1738-7167
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2014.28.6.047>

험적 방법으로 예측하였다.

2. 본 론

2.1 태양광 발전설비에 의한 감전 모델

태양광 발전설비의 직류부분은 비접지 방식으로 되어 있어 인체에 의해 단락될 확률은 희박하다. 하지만, 진화를 위한 주수 시 물의 높은 전도도로 인해 태양광 발전설비와 인체 간에 감전경로가 형성될 수 있다. 이 때 태양광 발전설비에서 감전경로에 따른 전압강하와 각 부분별 저항은 Figure 1과 같이 나타낼 수 있다. 발전기저항 R_G 는 PV 발전기와 전기적 연결부에 해당되는 저항이며, PV 발전기의 내부저항을 포함한다. 발전기저항 R_G 와 연결된 소방관장비 저항은 Figure 1에서와 같이 세부적으로 보호장갑 저항 R_H 와 소화장비 저항 R_W 로 나누어 나타낼 수 있으며, 이어서 인체의 총 저항 R_B 와 보호장화 저항 R_S 로 구성할 수 있다⁽⁶⁾.

- 여기서 V_{PV} : 태양광발전기 전압
- R_G : 태양광발전기 저항(PV 내부저항 포함)
- R_H : 보호장갑 저항
- R_W : 소화장비 저항
- R_B : 인체 저항 ($\geq 800 \Omega$)
- R_S : 보호장화 저항

태양광 발전설비에 감전 시 단락전류 I_S 는 식 (1)과 같이 위에서 정의한 5가지 저항 R_G, R_H, R_W, R_B , 그리고 R_S 의 합으로 태양광 발전기의 전압 V_{PV} 를 나눈 값이다.

$$I_S = \frac{V_{PV}}{R_G + R_H + R_W + R_B + R_S} \quad (1)$$

2.2 물 분사 시 이동궤적 계산

소방호스 말단에 설치된 관창을 통해 지면과 평행하게 일정한 속도로 방출되는 소화수의 비행 궤적을 계산하기 위해 수평으로 작용하는 힘과 수직으로 작용하는 힘에 대해 각각 수식을 만들면, 간단한 미분방정식으로 표현될 수 있다. 우선 수평으로 작용하는 힘에는 공기의 저항으로 인해 날아가는 방향의 반대 방향으로 작용하는 항력이 있으

며, 만일 항력이 속도에 비례한다고 가정하면 다음과 같은 선형 미분방정식으로 나타난다.

$$m \cdot \frac{dv_x}{dt} = -c \cdot v_x \quad (2)$$

여기서 m 은 물의 질량, v_x 는 물이 x 축으로 날아가는 속도, t 는 시간, 그리고 c 는 항력과 속도 간의 비를 나타내는 비례상수를 의미한다. 양변을 m 으로 나누고 c/m 을 k 로 치환하여 풀면, 물이 x 축으로 날아가는 속도 v_x 를 얻을 수 있고, 속도 v_x 는 시간의 변화에 따른 거리의 변화를 의미하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = v_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad (3)$$

여기서 v_0 는 물이 관창을 떠나는 초기속도를 의미한다. 한편, 수직으로 작용하는 힘에는 중력뿐만 아니라 공기 저항으로 발생하는 항력이 있으며, 만일 항력이 낙하 속도에 비례한다고 가정하면, 다음과 같은 선형 미분방정식으로 나타난다.

$$m \cdot \frac{dv_y}{dt} = c \cdot v_y - m \cdot g \quad (4)$$

여기서 m 은 물의 질량, v_y 는 물이 y 축으로 떨어지는 속도, t 는 시간, c 는 비례상수, 그리고 g 는 중력가속도를 의미한다. 양변을 m 으로 나누고 c/m 을 k 로 치환하여 풀면, 물이 y 축으로 낙하하는 속도 v_y 를 얻을 수 있으며, 더욱이 낙하 속도 v_y 는 시간의 변화에 따른 거리의 변화를 의미하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dy}{dt} = \frac{g}{k} \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (5)$$

더 나아가 방사되는 물이 시간이 지남에 따라 이동하는 궤적의 거리 L 의 증가는 x 축으로 날아가는 속도와 y 축으로 떨어지는 속도의 함수로서, 식 (3)과 식 (5)을 이용하면, 다음과 같이 시간의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dL}{dt} = \sqrt{(v_0 \cdot e^{-k \cdot t})^2 + \left(\frac{g}{k} \cdot (1 - e^{-k \cdot t})\right)^2} \quad (6)$$

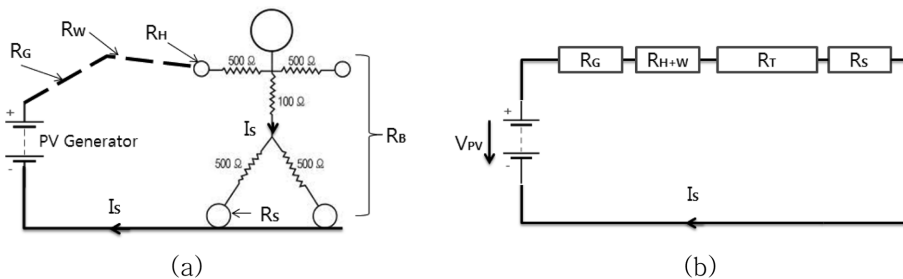


Figure 1. Current flow schematic (a) and circuit (b) at the electric shock.

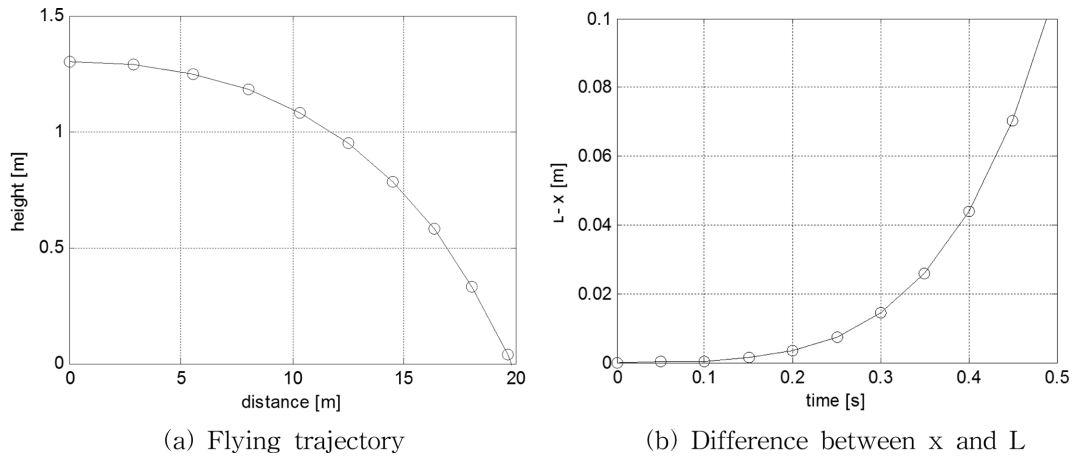


Figure 2. Simulation results of the water spray.

본 연구에서 설정한 수학적 모델을 이용하여 분사거리 x 및 높이 y 와 분사초기속도 v_0 에 따라 분사된 물이 이동한 궤적의 길이 L 를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻어 Figure 2에 나타내었다. 이 때 상미분방정식의 해를 추산하기 위하여 자동으로 단위길이가 조절되는 고차 Runge-kutta 적분법이 사용되었다⁽⁷⁾. 분사된 물이 이동한 궤적의 길이 L 은 수평 이동거리 x 에 비해 매우 커진다.

2.3 물 분사 시 저항 값

물이 방사되어 목표지점까지 도달할 때, 물의 분산에 따른 저항 R 은 발포지점으로부터 목표지점까지의 거리 L 과 고유저항 ρ 의 곱에 비례하고, 분사 면적 A 에 반비례한다.

$$R = \rho \cdot \left(\frac{L}{A}\right) \quad (7)$$

분사된 물이 도달되어 만들어지는 확산면적 A_{spread} 는 분사거리 L 에 비례하여 증가하고, 분사속도 v_0 의 지수함수로 반비례한다고 가정하여 아래 식 (8)과 같이 나타내었다.

$$A_{\text{spread}} = \pi \left\{ \frac{L}{L^*} \cdot \exp\left(\frac{-v_0}{V^*}\right) \right\}^2 \quad (8)$$

여기서 L^* 과 V^* 는 기준거리와 기준속도를 나타내는 상

수들이다. 따라서 확산저항 R_{spread} 는 식 (8)을 이용하여 다음 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{\text{spread}} = \rho_{\text{spread}} \cdot \left(\frac{L}{A_{\text{spread}}}\right) \quad (9)$$

여기서, 확산고유저항 ρ_{spread} 은 분사된 상태의 물의 저항을 말하는데, 이 저항은 확산면적에 따른 단위 면적당 고유저항 값에 의해 정해지는 값이며, 공기의 높은 고유저항 값의 영향을 받기 때문에 분사속도 v_0 의 지수함수로 증가하는 확산면적 A_{spread} 의 함수로 가정되었다. 결국 유속의 증가는 확산면적을 증가시키고, 확산거리를 감소시키지만, 확산고유저항의 증가가 기하급수적으로 증가함에 따라 확산저항이 증가하게 된다.

2.4 물 전도도 측정 실험

물 전도도 측정 및 단락전류 예측에 필요한 물 분사 시스템을 구성하기 위하여 F. Reil 등(2011)의 실험설비를 참조하였다⁽¹⁰⁾. 물 분사 시스템은 길이 50 cm의 장치에 한 편에 물 분사 할 수 있는 노즐을 설치하고 반대편에는 전도도가 높은 주석 평판을 설치하여 전선으로 Figure 3와 같이 연결하였다. 이 때 물 전압의 변화를 편리하게 계산하기 위하여 용기에 물이 정지되어 있을 때 측정된 저항

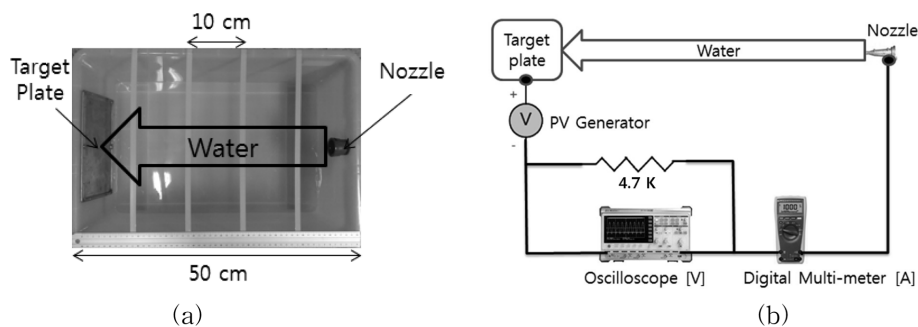


Figure 3. Measurement system (a) electric circuit (b) for the water conductivity.

값과 같은 외부 저항 $4.7\text{ k}\Omega$ 을 선택하였다. 이를 통하여 인가된 총 전압과 외부저항에서 측정되는 전압의 차이로 물의 전압강하를 쉽게 알 수 있도록 하였다. 실험 장치는 DC전원의 양극(+)-부를 목표물 주석평판에 접합하고, DC전원의 음극(-)부를 소방 호스의 노즐부에 접합하였다. 또한 전원부와 노즐부 사이에 저항 $4.7\text{ k}\Omega$ 을 연결하였다. 노즐의 타입, 물의 유속, 물 분사 거리를 측정변수로 하여 DC 입력전압 V 를 30 V에서 1 V까지 내리면서 물의 양 끝에서 전압을 측정하였다. 이때 노즐과 주석평판과의 거리는 50 cm로 설정하였으며, 그리고 유속은 16.2 [lpm], 17.4 [lpm], 19.8 [lpm]이 되도록 하였다. 우선, 정지된 물의 전도도를 측정하기 위하여 Figure 3의 (a)와 같은 실험 장치에서 일정량의 물을 채워 넣은 후 DC 입력전압 V 를 30 V에서 5 V까지 내리면서 물의 양 끝에서 전압을 측정하고, 저항 $4.7\text{ k}\Omega$ 에서의 전압강하와 전류를 측정하였다. 또한, 물 분사 시 물 전도도의 측정은 Figure 3의 (a)와 같은 장치에서 (b)와 같은 방법으로 오른쪽 노즐에서 물을 분사시켰고, DC 입력전압 V 를 30 V에서 5 V까지 내리면서 물의 양 끝에서 전압을 측정하고, 저항 $4.7\text{ k}\Omega$ 에서의 전압강하와 전류를 측정하였다.

2.5 실험결과 및 분석

우선 정지된 물 저항 값의 변화를 얻기 위해, 입력전압을 증가 시키면서 물의 양단 전압을 측정하였고, 이를 물 저항으로 환산하여 Figure 4에 나타내었다. 정지된 상태에서 물 저항은 입력전압의 크기가 커짐에 따라 기하급수적으로 작아지는 것을 알 수 있었다. 그리고 Figure 3의 (b)와 같은 방법으로 유속을 변화시키면서 물 저항을 측정하였으며, 그 결과를 Figure 5에 나타내었다. 분사된 물의 저항은 길이 50 cm에서 유속이 증가함에 따라 저항이 $3.7\text{ M}\Omega$ 에서 $3.5\text{ M}\Omega$ 으로 낮아졌다. 앞에서 유도된 식 (6)과 (9)에서와 같이 유속이 증가함에 따라 분사되는 물의 거리가 짧아지고, 목표지점의 면적이 작아져서 물 저항을 낮추

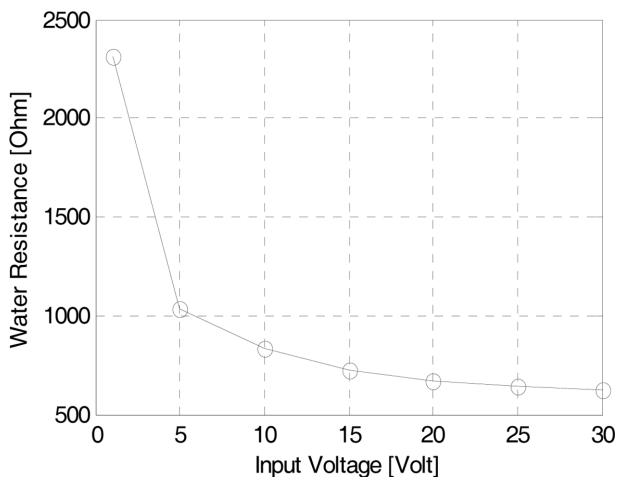


Figure 4. Water resistances vs. input voltages.

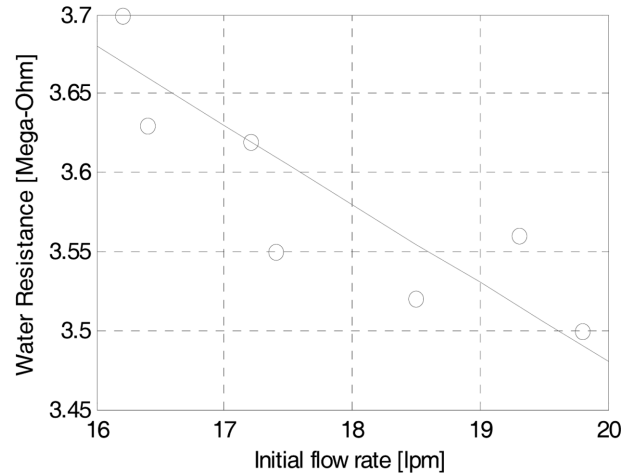


Figure 5. Water resistances vs. initial flow rates.

는 요인으로 작용하게 된다. 하지만, 상대적으로 물의 밀도가 기하급수적으로 낮아지고, 그에 따라 물의 고유저항은 높아지게 되기 때문에, 결과적으로 물의 고유저항은 분사속도에 반비례하고, 분사거리에 비례함을 알 수 있다. 그리고 실험값으로부터 물의 유속 v_0 에 따른 저항 R 은 4.48을 절편으로 하고, 기울기가 -0.05 인 선형관계식으로 얻을 수 있다.

$$R = -0.05 \cdot v_0 + 4.48 \quad (10)$$

3. 결 론

태양광 발전설비는 화재 시에 가동을 중단시킬 수 없고, 화재불꽃에 의한 발전량의 증가를 막을 수 없는 원천적으로 제어 불가능한 요인이 있어서, 이를 진화하는 방법은 일반적인 화재 진화와 달라야 한다. 또한 태양광 발전설비의 규모에 따라 다양한 전류의 단락 상황이 발생 할 수 있으며, 이런 상황이 화재 진화 시 발생할 경우 예기치 않은 전류가 인체를 통해 흐를 수 있다. 본 논문은 태양광 발전설비의 진화 시 인체를 통해 흐를 수 있는 발전전류와 분사되는 물 저항을 분석하였다. 진화 시 감전요인인 물 분사 모델을 수학적으로 해석하여 식을 세웠으며, 태양광 발전설비의 단락 시 회로를 정의하고 구성하여 예측되는 저항을 배치하였다. 또한 물 분사 시 저항을 계산하여 실제 물 진화 시 발생 할 수 있는 단락 전류를 예측 하게 하였으며, 구성된 상황을 바탕으로 실험 장치를 구축하여 태양광 발전설비의 소화 시 발생 할 수 있는 감전 시뮬레이션을 하였다. 이 실험을 통해 물 고유저항이 전압의 크기와 물 분사에 의해 변하는 값을 얻었고 앞에서 수치적으로 예상한 값과 비교하였다. 본 논문이 제시한 실험 모델, 측정 시스템 모델 그리고 수치해석의 결과를 통하여 태양광 발전설비 화재 시 고려되어야 할 사항들을 정의 할 수 있고, 여기서 제시된 각각의 주제를 바탕으로 물리적인 관점은

물론, 화재진화방법을 고려한 해석과 연구가 계속 되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 유한대학교의 “2012년 2월~2013년 1월 해외 연수지원”을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

References

1. S. P. Kwon, Y. T. Han, W. S. Lim, D. H. Kim and J. Kim, “A Study on the Risks of Solar Photovoltaic Systems Installed on the Rooftop in a Domestic Fire”, Proceedings of 2012 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 464-467 (2012).
2. H. Haberlin and M. Real “Arc Detector for Remote Detection of Dangerous Arcs on the DC Side of PV Plants”, 22nd EU PV Conf., Milano, Italy, Sept. (2007).
3. Inter Risk Report No.14-038, Japanese Inter Risk Institute Ltd. (2014).
4. Ozeki, Yoshitomi, “In relation to fire risk of solar power generation”, Japanese Safety Engineering, Vol. 52, No. 3 (2013).
5. H. Häberlin, “Photovoltaik, Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen”, VDE-Verlag, Berlin, ISBN 978-3-905214-62-8 (2010).
6. H. Häberlin, L. Borgna and P. Schärf, “PV und Feuerwehr: Keine Panik, realistische Einschätzung der elektrischen Gefahren und möglicher Gegenmassnahmen”, 26. Symposium Photovoltaische Solarenergie Staffelstein (2011).
7. I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew, “Handbook of Mathematics”, Springer (1997).
8. IEC/TS 60479, Technical Specification, “Effects of current on human beings and livestock - General aspects”, Edition 4.0 (2005).
9. Deutscher Feuerwehrverband (DFV), Handlungsempfehlungen Photovoltaik, “Vorgehensweise im Schadensfall für stromerzeugende Solaranlagen” (2010).
10. F. Reil, W. Vaassen, A. Sepanski, B. v. Heeckeren, F. Gülcenc, H. Schmidt, R. Grab, G. Bopp, H. Laukamp, S. Phillip, H. Thiem, A. Richter, A. Krutzke, R. Haselhuhn, M. Halfmann, F. Volkenborn and H. Häberlin, “Determination of Fire Safety Risks at PV Systems and Development of Risk Minimization Measures”, Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 3553-3555 (2011).