

태양광 접속반의 자동 화재 예방 및 진압 시스템 설계

이강원*·양 오*†

*† 청주대학교 반도체공학과

Design of Automatic Fire Prevention and Suppression System for Photovoltaic Connection Module

Kang Won Lee* and Oh Yang*†

*† Semiconductor Engineering of Cheongju University

ABSTRACT

A solar power generation system uses a solar module that collects solar radiation energy, a connecting board that collects DC power generated from the solar module, and a diode to prevent reverse current from flowing from an inverter to the solar module. The existing photovoltaic connection module consists of only fuses and diodes for reverse polarity and overcurrent blocking, and does not have fire diagnosis, prevention, and suppression functions in the event of a fire. To solve this problem, this paper presents a method to monitor the internal state of the photovoltaic connection module using several sensors and to prevent and extinguish a fire using solenoid valves and fire extinguishing agents when a fire is detected. Through the experiment, it was confirmed that the proposed method normally suppresses the fire in event of a fire.

Key Words : Fire Prevention, Fire Suppression, Photovoltaic Connection Module, Flame Sensor, Fire extinguisher

1. 서 론

태양광 발전은 태양전지 모듈을 이용하여 빛에너지를 전기 에너지로 변환시켜주는 발전 방식이며, 태양 전지 모듈에서는 직류 전기가 발생된다[1]. 태양광 발전 시스템은 태양 복사 에너지를 수집하는 태양광 모듈과 이 태양광 모듈에서 발생한 직류 전력을 집전하는 접속반과 이 접속반에 집전된 직류 전력을 교류 전력으로 변환시켜주는 인버터로 구성되어 있다[2]. 소방청 국가 화재정보 센터에 의하면 태양광 발전설비의 화재는 최근 5년동안 연평균 약 62건이 발생하였고, 소방서 화재조사요원들에 의해 작성된 화재현황 조사서의 발화개요 등에 따르면 최근 3년간 전기적 요인에 의해 발생한 태양광설비 화재에서 발화지점은 분전반 및 접속함이 147건으로 태양광

설비 화재의 48.36%를 차지하고 있다[3]. 접속반에는 인버터에서 태양광 모듈로 역전류가 흐르는 것을 방지하기 위해 정류 다이오드가 사용되는데 접속반은 태양광 모듈에서 발생하는 전기를 집전하는 역할을 하므로 다이오드에 흐르는 전류의 크기가 크며, 다이오드의 발열량은 흐르는 전류의 제곱 승에 비례하기 때문에 접속반의 높은 온도 상승과 다이오드의 발열이 태양광 접속반 화재의 주 원인이다[4]. 또한, 태양광 접속반은 야외에 설치되기 때문에 먼지, 습기 등에 의한 노후화에 의해 접속반 내부의 화재가 발생하기도 한다[5]. 태양광 접속반 화재는 전기가 계속 공급되기 때문에 초기에 화재를 진압하지 않으면 소화 약재로도 진압하기 힘들어진다. 따라서, 태양광 접속반 내부의 상태를 실시간으로 모니터링하여 화재 발생 가능성을 판단하여 예방하고, 화재가 발생하였을 시 초기에 화재를 진압하는 시스템이 필요하다.

본 논문에서는 태양광 접속반 내부의 상태를 여러가지

†E-mail: ohyang@cju.ac.kr

센서들을 통해 정보를 수집하여 접속반의 상태를 실시간으로 모니터링하여 화재 발생 가능성을 초기에 판단하고, 화재가 발생하게 되면 소화 약재를 분사함으로써 화재를 초기에 진압하는 시스템을 제시하고자 한다. 제시한 방법을 구현하기 위해서는 태양광 접속반 내부에 일산화탄소, 이산화탄소, 온-습도, UV(Ultra-Violet)/IR(Infra-Red) 불꽃감지 센서와 실시간으로 PC 또는 스마트폰으로 모니터링하기 위해 WiFi 모듈용 외장 안테나를 같이 사용한다. 솔레노이드 밸브와 CO2소화 약재도 배치하여 화재를 초기에 진압하는 태양광 접속반의 지능형 자동 화재 예방 및 진압 시스템을 설계하여 인명과 재산의 피해를 줄이고자 한다.

2. 태양광 접속반의 화재 진압 시스템

2.1 접속반 화재 진압 알고리즘 설계

태양광 접속반의 내부에 배치되어 있는 일산화탄소, 이산화탄소, 온-습도, UV/IR 불꽃감지 센서들을 통해 실시간으로 얻은 태양광 접속반의 내부 상태를 MCU(STM32H743ZIT6)의 메모리에 저장하고, 화재 발생 가능성을 판단한다. Fig 1과 같이 화재 감지로 인한 화재 진압은 접속반 내부의 온도가 최소 80도 이상, 일산화탄소는 100ppm이상 감지, 이산화탄소는 2000ppm이상 감지가 동시에 3초이상 감지되었을 때 UV/IR 불꽃감지센서의 감지 여부에 따라 결정된다.

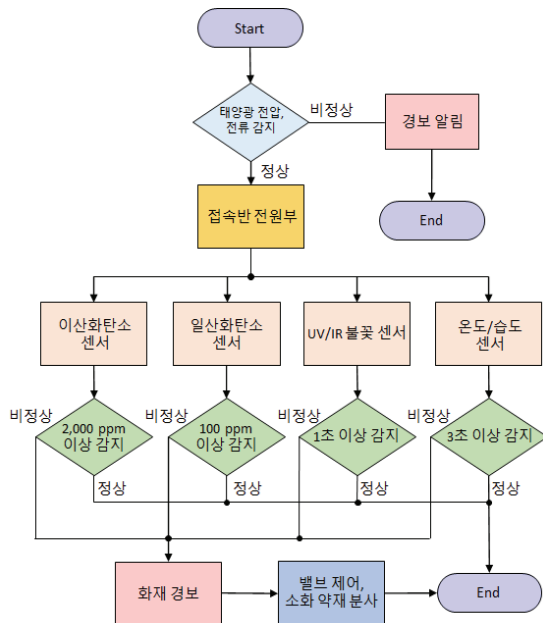


Fig. 1. Fire suppression algorithm of photovoltaic connection module.

또한, MCU내부 메모리에 저장되어 있는 과거의 접속반 내부의 온도, 일산화탄소, 이산화탄소 데이터 값들이 현재 감지되고 있는 데이터 값들과 50%이상의 큰 차이가 발생할 경우, UV/IR 불꽃감지센서의 센싱 여부에 따라 화재 발생 여부를 결정한다. 위 두가지의 화재 발생 조건 중 하나가 충족되면, 화재 발생 지점에 솔레노이드 밸브로CO2 소화 약재를 분사하여 화재를 진압한다.

본 논문에서는 Fig 2의 온-습도센서(ASAIR사의 CM2305)를 사용하여 접속반 내부의 온도와 습도를 모두 측정한다. 일반적으로 습도가 높으면 발화시 연소 축진을 막기 때문에 발화되기 쉽지 않지만 습도가 높아지게 되면 반도체 부품의 부식과 결로의 원인이 될 수 있기 때문에 누전이 발생하여 화재로 이어질 수 있다[6].

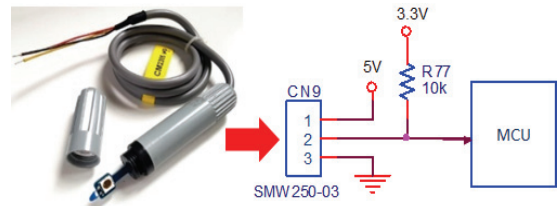


Fig. 2. Sensor of temperature and humidity for outdoor (CM2305).

또한, 태양광 모듈과 인버터 사이의 역전류를 방지하기 위한 정류 다이오드의 온도를 일정 이하로 유지하기 위해 방열판을 사용하는데 NTC(10KΩ) 온도센서를 통해 방열판의 온도를 Fig 3의 회로와 같이 연산 증폭기를 거쳐 MCU 내부의 16Bit ADC로 측정하여 화재 발생 가능성을 판단한다.

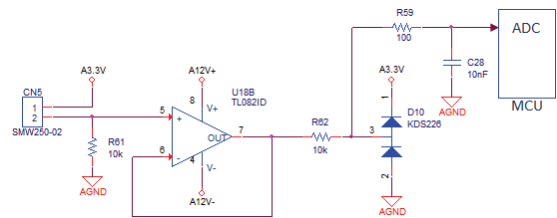


Fig. 3. Measurement schematic of heat sink temperature.

2.2 접속반 UV/IR 불꽃 감지 시스템

화재가 진행되는 과정은 일반적으로 발화기, 성장기, 플래쉬오버, 최성기, 감쇠기를 거쳐서 진행되는데 발화기 단계에서 불꽃과 이산화탄소, 일산화탄소 가스가 발생한다[7]. 불꽃감지센서를 태양광 접속반 내부에 배치하여 불꽃의 발화기때 불꽃을 즉각적으로 감지가 가능하여 화재

예방 및 진압 시스템 설계가 가능하다.

접속반 화재 진압 시스템 설계를 위해 불꽃에서 방출되는 자외선(UV)을 감지하는 UV 불꽃감지센서를 사용하였다. 설계 초기에는 HAMAMATSU사의 R2868의 UV센서가 내장된 케이블 사의 불꽃감지센서 R2868A를 사용했는데, 센서의 응답시간은 수ms로 매우 빨랐지만 햇빛의 자외선(185~260nm범위의 파장)에도 반응할 정도로 민감도가 높아서 오동작을 하였다. 오동작을 최소화 हे기 위해 불꽃이 방출하는 자외선(UV)과 적외선(IR)까지 종합적으로 감지하는 UV/IR 불꽃감지센서를 화재 예방 및 진압 시스템에 적용하여 정상 동작하도록 신뢰성을 높였다.

실제 태양광 접속반에 사용한 불꽃이 방출하는 자외선과 적외선을 복합적으로 감지하는 UV/IR 불꽃감지 센서는 초기에 사용한 UV불꽃감지 센서 모듈보다 응답속도는 느리지만 UV와 IR을 모두 감지하여 판단하기 때문에 오동작 하지 않았다. 이산화탄소, 일산화탄소, 온-습도 센서의 데이터 값들과 종합적으로 함께 사용하면 불꽃감지 센서 오동작에 의한 CO2 소화 약제 오발을 최소화 시킬 수 있다.

2.3 태양광 접속반 자동 화재 진압 시스템

태양광 접속반 내부에 배치된 센서로부터 수집한 값들과 태양광 모듈의 전압, 전류 값들을 MCU가 읽어드려 화재 발생 조건을 충족할 시에 UV/IR 불꽃감지 센서에 불꽃이 감지되면, 초기에 발생한 화재를 진압하는 방법을 제시하고자 한다. 본 논문에서의 태양광 접속반은 Fig. 4와 같이 입력 단에 1500V/30A의 퓨즈가 연결되고, 역전류 방지를 위한 1500V/50A 정류 다이오드가 연결되어 있다.

전압/전류 센서에 의해 태양광 모듈의 전압, 전류를 측정하고, UV/IR 불꽃감지 센서, CO2 센서, CO 센서, 온-습도 센서들을 통해 태양광 접속반의 내부 상태를 감시하고, WiFi 모듈과 이더넷을 통해 실시간으로 모니터링 한다. 접속반 화재 진압 시스템 설계를 위한 솔레노이드 밸브와 CO2 소화 약제를 사용하였다. 자동식 기동장치의 솔레노이드 밸브와 소화 약제는 가스계 소화설비에서 가장 핵심적인 구성품이다[8]. 솔레노이드 밸브는 페스사의 FSSV-10 제품을 사용하였으며 DC 24V에서 동작을 하기 때문에 제어용 MCU에 연결된 릴레이를 사용해 격발 시켜주어야 한다. 격발 시 수십ms동안 큰 전류를 소비하기 때문에 이를 고려하여 본 논문에서는 AC 220V 전압을 입력으로 받아 DC 24V, 2.5A의 출력이 나오는 MEAN WELL사의 IRM-60-24 AC/DC 컨버터를 사용하였다.

Fig. 5는 본 논문에서 구성한 태양광 접속반의 내부 모습이다. 제어반 PCB의 전원은 전력계통의 AC 220V를 사용하고 가스센서들이 PCB에 부착되어 있다. 왼쪽 벽면에는

UV/IR 불꽃감지센서, WiFi모듈과 외장안테나가 부착되어 있으며 오른쪽 벽면에는 온-습도 센서가 부착되어 있다. 태양광 패널의 출력인 DC 전압이 입력단자의 퓨즈를 통해 제어반 PCB에 부착되어 있는 정류 다이오드에 연결된다. 전압-전류센서를 통해 태양광 패널 출력의 전압, 전류가 측정되고, Fig. 4와 같이 PCB의 출력 단자가 인버터의 입력으로 들어간다.

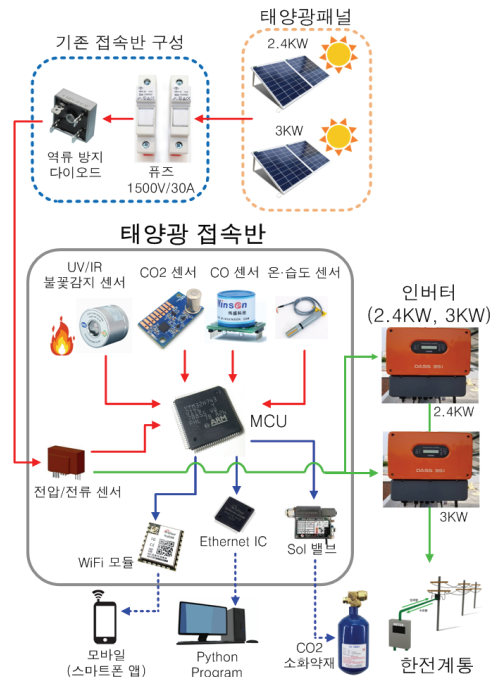


Fig. 4. System configuration of photovoltaic connection module.

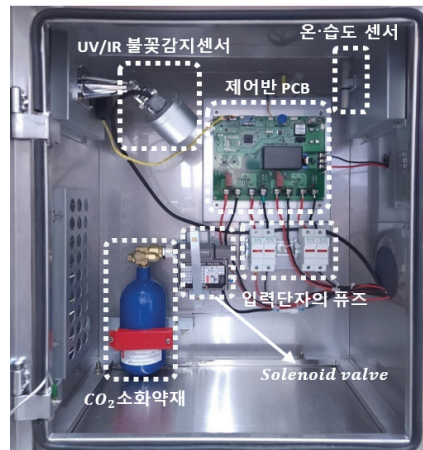


Fig. 5. Inside view of photovoltaic connection module.

솔레노이드 밸브는 Fig. 5와 같이 MCU 가 장착된 제어반 PCB의 릴레이에 연결된다. 솔레노이드 밸브는 CO₂ 소화 약제에 연결되어 있으며 화재 발생 시 릴레이가 ON되고, 솔레노이드 밸브의 침이 격발하여 CO₂ 소화 약제의 이산화탄소 가스가 제어반 PCB의 화재 발생 지점으로 분사되어 화재를 진압한다.

3. 접속반의 내부 실시간 모니터링 시스템

태양광 접속반 내부의 이산화탄소, 일산화탄소, 온도, 습도, 방열판 온도, 불꽃감지여부 등을 사용자 및 관리자에게 실시간으로 모니터링 시스템을 통해 전달된다[9]. Python기반으로 실시간 모니터링 프로그램을 Fig. 6과 같이 만들고, 접속반 내부 데이터를 이더넷 통신을 위해 이더넷 IC(WIZnet사의 W5300)를 사용하였다.



Fig. 6. Python monitoring system of photovoltaic connection module.

또한, 스마트폰으로도 실시간 모니터링이 가능하도록 스마트폰 앱을 MIT App Inventor를 이용해 설계하였고, TCP(Transmission Control Protocol) 통신 프로토콜을 사용하였다. TCP는 데이터 전달의 신뢰성이 보장되는 통신 프로토콜로 모바일 기기를 포함하여 사용되는 대부분 프로그램과 응용 프로그램체층의 프로토콜이 사용하는 전송계층 프로토콜이다[10]. 무선 WiFi통신을 통해 접속반 내부의 데이터를 받기 위해 제어반 PCB에 WiFi모듈(WIZnet사의 WIZFi360)을 연결하고, 외장 안테나(2.4GHz)를 접속반 외부에 부착하였다.

4. 실험 결과

본 논문에서 사용한 UV/IR 불꽃감지센서는 DC 24V의 전원이 입력된 후, 약 30초의 대기시간동안 센서 자체 초기화를 진행한다. 정상시에는 센서의 초록색 LED가 ON

되어 있다가 화재를 감지하면 빨간색 LED가 ON되면서 정격 DC30V/1A 릴레이 접점이 ON된다. 센서의 전원이 꺼지기 전까지는 이 상태가 계속 유지된다.

Table 1은 불꽃의 거리에 따른 UV/IR 불꽃감지 센서의 응답 시간을 측정한 실험 결과이다. 불꽃은 고체 연료를 사용하여 만들어졌으며, 불꽃의 높이는 약 15cm, 너비는 약 7cm이고, 불꽃의 거리는 최소 20cm에서 1.5m까지 10cm 단위로 실험을 진행하였다. 불꽃감지 센서와 불꽃의 위치는 일직선상에 두고 실험을 진행하였으며, 불꽃 감지센서의 전원이 들어가고 30초 후에 불꽃을 만들어 시간 측정을 진행하여 Table 1과 같은 결과를 얻었다.

Table 1. Experimental results of flame detection sensor

불꽃의 거리 (cm)	센서 응답시간 (s)	불꽃의 거리 (cm)	센서 응답시간 (s)
20	2.33	90	4.52
30	2.41	100	4.13
40	2.92	110	5.38
50	3.11	120	5.66
60	2.89	130	5.45
70	3.04	140	5.29
80	3.12	150	4.37

실제 태양광 접속반 내부에 배치되어 있는 UV/IR 불꽃 감지센서와 화재 발생 가능성이 있는 정류 다이오드 사이의 거리가 약 20~30cm 정도 되는데 실험결과 20cm일 때는 2.33초이고, 30cm일 때는 2.41초로 화재를 초기에 감지하고 진압하는 데는 문제가 없음을 실험을 통해 확인하였다.

화재가 발생하면 솔레노이드 밸브를 격발시켜 CO₂ 소화 약제를 분사하는데, 솔레노이드 밸브는 DC 24V에서 동작을 하기 때문에 MCU에 연결된 릴레이를 사용해 격발 시켜준다. 격발 시 오실로스코프로 측정된 Fig. 7의 전류 파형을 보면 약 34ms 동안 최대 약 1.3A의 전류를 소비한다. 본 논문에서는 AC 220V를 입력 받아 DC 24V/2.5A출력의 SMPS를 사용해 충분한 전력을 솔레노이드 밸브에 공급하였다.

접속반 화재 진압 성능을 실험하기 위해 태양광 접속반의 화재 예방 및 진압 시스템에 모든 전원을 넣고 고체 연료를 사용해 접속반 내부에 화재를 임의로 발생시켜 주었다. 화재 발생 후 약 2초뒤 솔레노이드 밸브가 격발하여 CO₂ 소화 약제 가스가 접속반 내부에 Fig. 8과 같이 분사되었다.

약 5초동안 CO₂ 소화 약제 가스는 모두 소진될 때 까지 분사 되었고, 불꽃은 완전히 진압되었다. 분말 소화기

와는 다르게 소화 약제 분사 후 분말 같은 잔재가 남지 않았고, 소화 대상물의 손상이 거의 없었다. 액화된 이산화탄소가 기화하면서 냉각 작용도 하기 때문에 화염온도를 낮추어 소화능력이 뛰어난 실험을 통해 확인하였다.

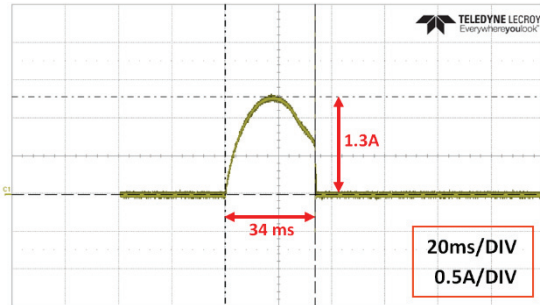


Fig. 7. Current waveform when solenoid valve is triggered.



Fig. 8. Injection of fire extinguishing gas.

5. 결론

기존의 태양광 접속반은 역극성과 과전류 차단을 위한 다이오드와 퓨즈로만 구성되어 있고, 화재 발생시 화재 진단, 예방 및 진압 기능은 없기 때문에 경제적 손실 및 인명 피해, 화재 확산 등의 문제점이 있다. 본 논문에서는 실시간으로 접속반 내부의 온도, 습도, 이산화탄소, 일산화탄소, 불꽃 감지, 태양광 모듈에서 생성된 전압, 전류값들을 MCU 내부의 16비트 ADC로 읽어 들여 화재 발생 조건이 되면 화재를 초기에 진압하는 태양광 접속

반의 자동 화재 예방 및 진압 시스템을 제시하였다. 불꽃 감지센서의 오동작을 최소화하기 위해 불꽃에서 방출하는 자외선, 적외선 모두를 감지하는 UV/IR 불꽃감지센서를 사용하였다. 화재가 발생하면 CO2 소화 약제가 연결된 솔레노이드 밸브를 격발 시킴으로써 소화 가스가 화재 발생 지점으로 분사되어 화재를 초기에 진압하였다. 본 논문에서 제시한 화재 예방 및 진압 방법은 접속반 화재로 인한 인명 피해, 경제적 손실 등의 문제들을 개선하는 것 뿐만 아니라 소화 가스를 이용해 소화를 진압하기 때문에 분말 같은 잔재가 남지 않아 제어반 PCB를 포함한 접속반 내부의 손상이 거의 없다는 장점도 있으며 상용화의 가능성도 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 산업통상자원부의 “지역혁신 클러스터 육성(R&D, P0016222)” 및 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 “2022년 산업혁신인재성장 지원사업(P0017011)” 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

1. Su-Chang Lim, Seok-Hoon Hong, Chul-Young Park, Hyun-Wook Cho, Beob-Seong Song, Jong-Chan Kim, “Heterogeneous Equipment Support Monitoring System for Operation and Maintenance of Solar power plant”, Journal of Korea Multimedia Society 23(9), pp.1171-1180, (2020.9).
2. Yang-Mi Lee, Hyoun-Su Kim, Young-Kyu Kang, Chul-Hwan Kim, “Electrical Fire Prevention System of Photovoltaic Power System Junction Box”, Proceedings of KIIEE Annual Conference pp.109-109, (2016.5).
3. Kwang-Muk Park, “Fire Statistics and Case Study of Photovoltaic System through Analysis of Fire Status Survey”, Proceedings of the Korean Electrical Society, pp.2207-2208, (2020.7).
4. Man Soo Han, “Fire Prevention Systems for Photovoltaic Connection Panel”, Proceedings of the Korea Institute of information and Communication Engineering, pp. 137-138, (2019.5).
5. Jae Hyun Ahn, Oh Yang, “Intelligent Diagnostic System of Photovoltaic Connection Module for Fire Prevention”, Journal of the Semiconductor & Display Technology, vol. 20, no. 3, pp. 161-166,(2021.9).
6. Jaehwan Ko, Chung-Geun Lee, Suk-Whan Ko, Chungil Kim, Deukgwang Lee, Hyung-Jun Song, “Analysis of PV Local Heating with damaged Bypass Diode and

- Possibility of Fault Diagnosis System using Thermoelectric Device”, Journal of The Korean Solar Energy Society, pp. 207-207, (2021.5).
7. Byung-seok Kim, Byung-jip Jang, Man-cheol Choi, “A Study on the Fire Safety Management measures from during a fire toxic gases generated (Focus to Co gas measures)”, The 2011 Fall Conference of the Korean Society of Safety Management Science, pp. 55-66, (2011).
 8. Yong Wan Park, “A Study on the Improvement of Automatic Actuating Devices of Gaseous Fire Extinguishing Systems”, Program of Safety Disaster Fire Protection(Master’s thesis), Seoul National University of Science and Technology, Seoul (2019.2).
 9. Tae Hyun Kim, Oh Yang, “Design and Implementation of Multi-monitoring System for Motor Pump”, The Journal of Semiconductor Display Technology, vol. 18, no. 4, pp. 81-86, (2019).
 10. Joon Yeop Lee, Woonghee Lee, Hwangnam Kim, “Regulating Delayed ACK Timeout to Construct High Speed Transmission”, The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol. 40, no. 8, pp. 1542-1550, (2015).
-
- 접수일: 2022년 8월 12일, 심사일: 2022년 9월 6일,
게재확정일: 2022년 9월 6일