

ESS의 운용환경 데이터를 고려한 화재 발생 전·후의 위험도 진단 알고리즘에 관한 연구

최형석*, 황소연*, 왕중용*, 신하은*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:elroi91@tfactory.kr

A Diagnosis Algorithm for Risk Degree of Fire Case Based on the Operation Environment Data in Energy Storage System

Hyoung-Seok Choi*, So-Yeon Hwang*, Jong-Yong Wang*,
Ha-Eun Shin*, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

2017년 8월 이후 현재까지 총 58건의 ESS 화재사고에 따른 산업 전반의 심각한 피해가 보고되고 있어, ESS의 안전성에 대한 우려가 증가하고 있다. 특히, 리튬이온배터리 기반의 ESS 화재는 배터리의 열폭주 특성으로 인해 급격한 온도 상승과 인접 셀·모듈로 확산될 가능성이 있어, ESS 운용환경 데이터에 따른 화재 발생 전·후의 위험도를 정량적으로 평가하는 기술이 요구됨을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 온도, 습도, 산소, 오프가스, 압력, 분진, 연기 등의 주요 운용환경 데이터를 바탕으로, ESS 화재 발생 전·후의 위험도 진단 알고리즘을 제시하고, 검출장치부, 계측장치부, 보조장치부 등으로 구성된 ESS 화재 진단장치를 구현한다. 여기서, ESS 화재 진단 알고리즘은 화재 발생 전·후의 위험도를 구분하고, ESS의 환경 데이터와 운용환경 요인에 따른 가중치를 적용함으로써, 화재 발생 시나리오에 따른 위험도를 체계적으로 평가한다. 상기에서 제시한 ESS 화재 발생 전·후의 위험도 진단 알고리즘을 바탕으로 화재 진단특성을 평가한 결과, 배터리 및 비(非) 배터리의 화재 발생 전·후의 위험도를 효과적으로 판단할 수 있어, 본 논문에서 제안한 ESS 화재 발생 전·후의 위험도 진단 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있다.

1. 서론

전 세계적으로, 파리기후협약 이후 온실가스 배출을 감축시키기 위한 신재생에너지의 도입이 증가하고 있으며, 신재생에너지의 출력 안정화를 위하여 대용량 에너지저장장치(ESS, energy storage system)의 설치가 함께 급증하고 있다. 또한, 국내에서도 ESS의 보급이 활성화되고 있지만, 2017년 8월 이후 현재까지 60건 정도의 ESS 화재 사고에 따른 산업 전반의 심각한 피해가 보고되고 있어, ESS의 안정성에 대한 우려가 증가하고 있다. 특히, 리튬이온배터리 기반의 ESS 화재는 배터리의 열폭주 특성으로 인해 급격한 온도 상승과 인접 셀·모듈로 확산될 가능성이 있다. 하지만, 기존 ESS 화재 감시 시스템은 연기 감지기에 의한 화재 발생 여부만을 판별하기 때문에, 화재 전·후의 위험도를 판단하지 못하는 문제점을 가지고 있다[1]. 즉, ESS 환경 데이터와 운용환경에 따라 화재 전·후의 위험도를 정량적으로 평가하는 연구가 요구됨을 알 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 ESS 화재의 위험도를 정량적으로 평가하기 위하여, 온도, 습도, 산소, 오프가스, 압력, 분진, 연기, 등의 주요 환경 데이터를 바탕으로, ESS 화재 발생 전·후의 위험도 진단 알고리즘을 제시한다. 여기서, ESS 화재 진단 알고리즘은

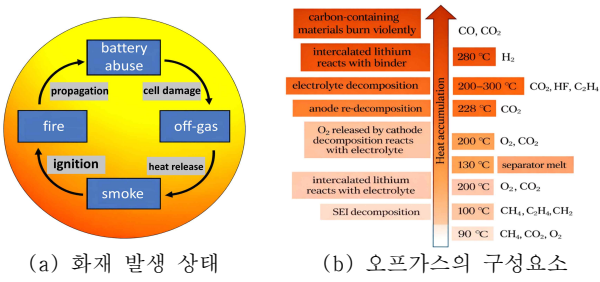
화재 발생 전·후의 위험도를 분류하고, ESS의 환경 데이터와 운용환경 요인에 따른 가중치를 적용함으로써, 시나리오에 따른 화재 발생 전·후의 위험도를 체계적으로 평가한다. 또한, 시나리오별 화재 진단 특성을 평가하기 위하여, 검출장치부, 계측장치부, 보조장치부 등으로 구성된 ESS 화재 진단장치를 구현한다. 즉, ESS 화재 진단장치는 배터리 화재와 비(非) 배터리 화재의 유형별 상정 시나리오를 바탕으로, ESS의 환경 데이터와 운용환경 요인의 임계조건에 따라 화재 발생 상황을 모의한다. 상기에서 제시한 ESS 화재 발생 전·후의 위험도 진단 알고리즘을 바탕으로 ESS 화재 진단 특성을 평가한 결과, 배터리 및 비(非) 배터리의 화재 발생 전·후의 위험도를 시나리오별로 효과적으로 판단할 수 있어, 본 논문에서 제안한 ESS 화재 발생 전·후의 위험도 진단 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있다.

2. ESS의 화재 발생 메커니즘

2.1 리튬이온배터리의 화재 발생 메커니즘

ESS용 리튬이온배터리의 화재는 그림 1과 같이, 단전지의 셀 손상(battery abuse), 오프가스 방출(off-gas), 연기(smoke), 발화(fire)형성의 순서로 진행되며, 인접 셀로 전파(propagation)

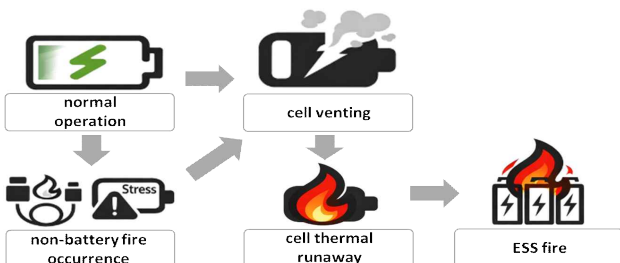
되는 순환적 특성을 가지고 있다. 또한, 지속적인 열적·전기적·기계적 충격은 리튬이온배터리의 내부 온도를 상승시켜, 전해질 기화 및 내부 압력 상승을 초래하고, 배터리 내부 압력이 일정 수준을 초과하면, 벤팅(Venting) 현상이 발생할 수 있다. 이 과정에서 전해질 증기와 분해 가스가 외부로 배출되는데, 이를 통칭하여 오프가스(off-gas)라 하며, 이는 다량의 가연성 성분을 포함하고 있다. 즉, 리튬이온배터리의 내부 온도 상승에 따라 발생하는 단계별 열분해 과정과 이에 따른 오프가스의 상태를 나타내면 그림 2와 같다.



(a) 화재 발생 상태 (b) 오프가스의 구성요소
[그림 1] 리튬이온배터리의 화재 발생 메커니즘

2.2 ESS의 화재 발생 단계

ESS용 리튬이온배터리의 화재는 정상 동작, 비(非) 배터리 화재, 배터리 벤팅, 배터리 열폭주, 배터리 화재 확산의 5가지 상태로 구분된다. 먼저, ESS의 비(非) 배터리 화재는 케이블 및 부스바의 과열과 장치 결함, 등에 의하여 배터리에 열적 스트레스를 가한 상태를 나타낸다. 여기서, ESS의 배터리 벤팅은 내부 온도 및 압력 상승에 따라 오프가스를 방출하는 초기 상태이며, 이는 조기에 검출하고 시스템 비상정지·냉각·강제배기 등의 조치를 통해 열폭주 발생을 억제할 수 있다. 또한, 배터리 열폭주는 벤팅 이후 열 생성 반응에 따라 인접 셀과 모듈에 열을 확산시키는 상태이며, 이는 연기 감지 및 불활성 가스 소화 시스템을 통해 산소 농도를 낮추고, 배터리를 냉각시킴으로써 인접 셀로 확산되는 것을 억제하거나 지연시킬 수 있다. 마지막으로, ESS의 화재 확산 상태는 열폭주에 따른 배터리 모듈 및 랙 단위의 확산으로, 시스템 전반의 화재 발생 전 위험도가 매우 높은 상태를 나타낸다. 따라서, ESS의 화재를 예방하기 위하여, ESS의 환경 데이터를 바탕으로 화재를 진단하는 방안이 필요함을 알 수 있다.

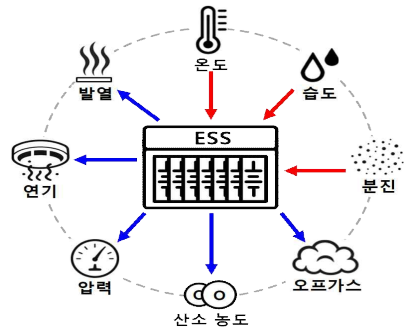


[그림 2] ESS용 리튬이온배터리의 화재 발생단계

3. ESS 운용환경 데이터를 이용한 화재 발생 전·후의 위험도 진단 알고리즘

3.1 ESS 환경데이터 정의

일반적으로, ESS는 온습도 유지나 연기 감지를 통한 화재 발생 여부만을 판단하는 개별 센서를 설치하고 있는데, 센서 간의 상호 연관성을 통해 화재 징후를 사전에 포착하거나 화재 발생 후 위험도를 정확하게 진단하는 방법은 쉽지 않은 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 그림 3과 같이, ESS용 리튬이온배터리의 화재 진행단계와 밀접한 연관성을 가지는 설치공간의 온도와 습도, 분진을 포함하여, 배터리의 이상징후에 의한 오프가스와 산소 농도, 압력, 연기, 고열의 8가지 요소를 ESS 운용환경 데이터로 정의한다. 따라서 본 논문에서는 8개의 환경 데이터를 바탕으로, ESS 화재 발생 메커니즘에 미치는 영향도에 따른 가중치를 도입하여, 화재 발생 전·후의 위험도를 정량적으로 산정한다.



[그림 3] ESS 운용환경 데이터의 분류

3.2 ESS의 화재 발생 전·후 위험도 진단 방안

3.2.1 화재 발생 전 위험도 진단 방안

ESS의 화재 발생 전 위험도를 정량적으로 평가하기 위하여, 현장의 경험을 바탕으로 상기에서 제시한 환경 데이터의 가중치를 고려하면 표 1과 같다. 여기서, 주변 온도는 시스템에 열적 스트레스를 발생시키는 간접적인 요인 중의 하나로, 고온은 배터리의 내부저항 증가 및 열 축적(thermal accumulation)을 생성시킬 가능성이 있으므로 가중치의 값을 2로 산정하고, 저온은 고온에 비해 화재 위험성이 낮아 가중치를 1로 적용한다. 또한, 주변 습도는 다습 환경에서 절연파괴의 가능성이 매우 높으므로 가중치를 4로 상정하고, 건조 상태는 아크 발생에 취약하지만 비교적 화재 위험성이 낮아 가중치 1을 적용한다. 한편, 분진은 장기간 적층되면 시스템의 고장 및 폭발 위험성을 증가시키므로, 가중치를 3으로 산정하고, 배터리의 내부 압력 상승에 따라 발생하는 오프가스는 열폭주의 직접적인 징조 현상이므로, 다른 환경 데이터와 달리 가장 높은 최대 가중치(α)를 적용한다.

[표 1] ESS 화재 발생 전 위험도 진단을 위한 환경 데이터의 가중치

화재 발생 전	항 목	가중치	내 역	
환경 데이터	온도	고온	2	<ul style="list-style-type: none"> 정상 범위 외 온도 : 시스템의 고장 유발 높은 온도 : 시스템에 열적 충격을 전달
		저온	1	
	습도	다습	4	<ul style="list-style-type: none"> 건조 상태 : 아크 발생 가능성 다습 상태 : 시스템 절연 파괴 유발
		건조	1	
	분진	3	<ul style="list-style-type: none"> 분진 적층 : 시스템 고장 및 폭발 가능성 	
오프가스	a	<ul style="list-style-type: none"> 벤딩 발생 : 열폭주 발생 		

3.2.2 화재 발생 후 위험도 진단 방안

ESS의 화재 발생 전 위험도를 정량적으로 평가하기 위하여, 현장의 경험을 바탕으로 ESS 화재 발생 후 위험도 진단을 위한 5개 요인의 가중치는 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 연기는 화재 발생 여부를 판단하는 직접적인 요인 중 하나이고, 산소 농도는 저농도에서 연소의 상태 및 폭발 위험성을 나타내므로, 가중치의 값을 각각 1로 상정한다. 또한, 압력은 가연성 가스의 팽창으로 인한 고압 상태에서 폭발 위험성이 높으므로 가중치를 2로 적용하고, 오프가스는 주변 점화원과 결합하여 화재를 확대시킬 수 있으므로, 가중치를 5로 상정한다. 한편, 고열은 ESS 설치 공간 내에서 주변 모듈 및 랙으로 화재를 전파하고, 대규모 화재로 확산될 가능성이 있으므로, 다른 환경 요인과 달리 특수 가중치(β)를 적용한다.

[표 2] ESS 화재 발생 후 위험도 진단을 위한 운용환경 요인 가중치

화재 발생 후	항 목	가중치	내 역
운용환경 요인	연기	1	연기 : 화재 발생 여부를 판단요소
	산소 농도	1	저농도 산소 : 폭발 위험성
	압력	2	고압 상태 : 폭발 위험성
	오프가스	5	고열 : 대규모 화재 확산
	고열	β	벤딩 : 열폭주에 의한 화재 확산

3.2.3 ESS 화재 발생 전·후 위험도의 평가 기준

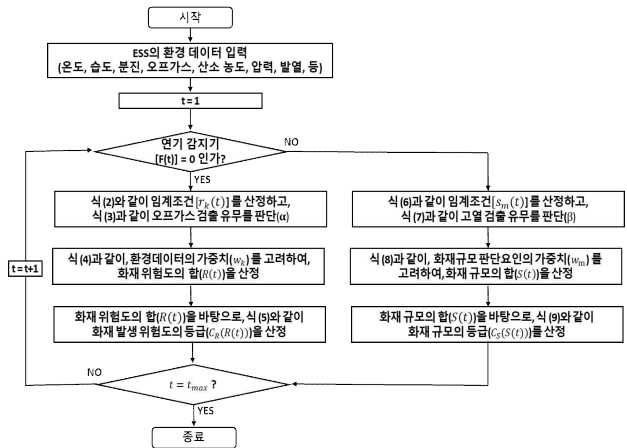
리튬이온배터리의 화재 진행단계와 밀접한 연관성을 가지는 ESS의 환경 데이터에 대한 각 항목별 가중치를 산정한다. 또한, ESS 화재의 위험도 판단조건 및 관련 기술기준, 현장의 경험, 등을 바탕으로 산정된 가중치 합을 통해 ESS 화재 발생 위험도 평가 기준을 나타내면 표 3과 같다.

[표 3] ESS 화재 발생 위험도 평가 기준

ESS 운용 환경 데이터	가중치 합	내 역		
화재 발생 전	H_1	1~2	ESS용 배터리에 스트레스를 유발	
	H_2	3~5	ESS용 배터리에 이상징후 발생 가능성	
	H_3	6~9	ESS용 배터리의 화재 발생 가능성	
	H_4	a	ESS용 배터리의 열폭주 가능성 높음	
화재 발생 후	비(非) 배터리 화재	N_1 1~2 N_2 3~4 N_3 1~4 and β	비(非)배터리 화재 발생 화재 확산 → 인접 시스템에 피해 가능성 있는 상태 배터리 개입은 없는 상태 → 대규모의 화재 발생	
	배터리 화재	I_1	6	배터리 열폭주 발생
		I_2	7~9	인접 시스템에 피해 가능성 있는 상태
		I_3	6~9 and β	대규모의 화재 발생

3.3 ESS 화재 발생 전·후의 위험도 진단 알고리즘

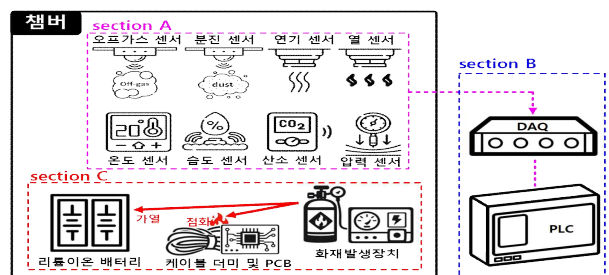
상기의 3.1절에서 제시한 ESS의 운용환경 데이터와 3.2절에서 제시한 화재 위험도 진단 방안을 바탕으로, ESS의 설치공간과 배터리의 이상징후를 고려하여, 화재 발생 전·후의 위험도에 따른 화재 진단 알고리즘을 구체적으로 나타내면 그림 4와 같다.



[그림 4] ESS의 화재 발생 전·후의 위험도 진단 알고리즘

4. ESS 화재 진단장치의 구현

상기의 3장에서 제시한 ESS 화재 발생 전·후의 위험도 진단 알고리즘의 운용특성을 평가하기 위하여, ESS 화재 진단장치의 전체 구성도를 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, section A는 온도, 습도, 먼지, 오프가스, 산소, 압력, 연기, 열 센서 등으로 구성된 검출 장치부이며, section B는 데이터 수집장치(DAQ)와 PLC로 구성된 계측장치부이며, section C는 챔버, 화재발생장치, 환기구 등으로 구성된 보조장치부를 나타낸다. 단, 압력 신호장치는 고압 상황을 모의하기 위하여, 신호에 따라 전압이 출력되는 형태로 구현한다.



[그림 5] ESS 화재 진단장치의 구현

5. 시험 조건 및 분석

5.1 시험 조건

상기의 3장에서 제시한 ESS 화재 발생 위험도의 진단 알고리즘에 따른 운용특성을 평가하기 위하여, 표 4와 같이, 화재 유형별 상정 시나리오는 배터리 화재와 비(非) 배터리 화재로 분류한다. 먼저, 절연파괴에 의한 배터리 화재는 배터리 표면에 분진 적층과 챔버 내부의 습도를 상승시켜 절연 저하 상태를 모의하고, 배터

리 외부에 열원을 인가하여 벤팅, 화재, 열폭주 등의 상태를 단계적으로 구현한다. 한편, 케이블의 절연 열화에 의한 비(非) 배터리 화재는 챔버 내부의 온도와 습도를 상승시켜 절연 저하 상태를 모의하고, 케이블 터미를 강제로 발화시켜 배터리의 고압, 고열, 열폭주 등의 확산상태를 단계적으로 구현한다. 단, 상정 시나리오별 배터리와 비(非) 배터리 화재 시험은 모든 상태에 대하여 센서부의 출력에 따른 DAQ 값을 바탕으로 평가한다.

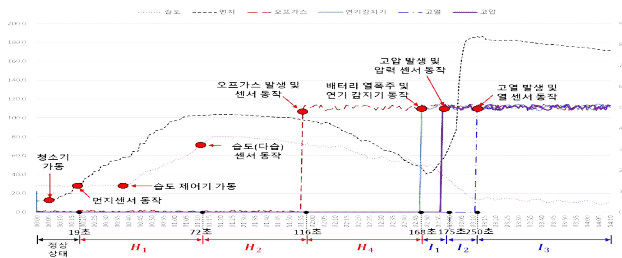
[표 4] 화재 유형별 상정 시나리오

항목	내역
배터리 화재	절연과피 열적 스트레스
비(非) 배터리 화재	케이블 절연열화 PCB 분진

5.2 배터리 화재의 시나리오별 화재진단 특성

5.2.1 절연과피에 의한 배터리 화재

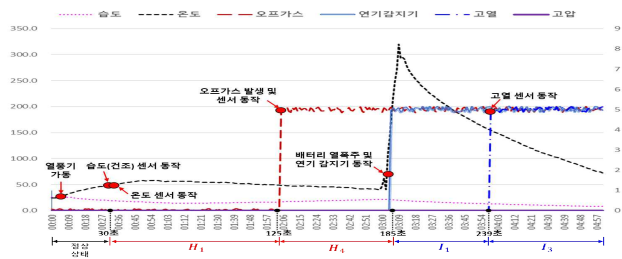
상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 절연과피에 의한 배터리 화재 시험과 이에 따른 ESS 화재 발생 위험도의 진단 평가 특성을 종합하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 화재진단장치는 연기 감지기의 동작 여부에 따라 화재 발생 전 위험도(H_1, H_2, H_4)와 화재 발생 후 위험도(I_1, I_2, I_3)로 분류한다.



[그림 6] 절연과피에 의한 배터리 화재의 위험도 평가

5.2.2 열적 스트레스에 의한 배터리 화재

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 열적 스트레스에 의한 배터리 화재 시험과 이에 따른 ESS 화재 발생 위험도의 진단 평가 특성을 종합하면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 화재진단장치는 연기 감지기의 동작 여부에 따라 화재 발생 전 위험도(H_1, H_4)와 화재 발생 후 위험도(I_1, I_3)로 나타낼 수 있다.

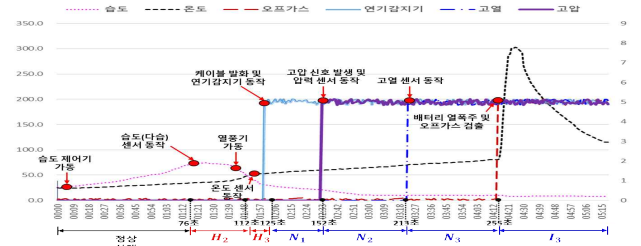


[그림 7] 열적 스트레스에 의한 배터리 화재의 위험도 평가

5.3 비(非) 배터리 화재의 시나리오별 화재진단 특성

5.3.1 케이블 절연 열화에 의한 비(非) 배터리 화재

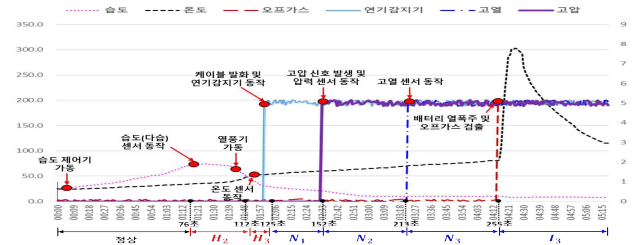
상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 케이블 절연 열화에 의한 비(非) 배터리 화재 시험과 이에 따른 ESS 화재 발생 위험도의 진단특성을 종합하면, 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 화재진단장치는 연기 감지기의 동작 여부에 따라 화재 발생 전 위험도(H_2, H_3)와 화재 발생 후 위험도(N_1, N_2, N_3, I_3)를 분류한다.



[그림 8] 케이블 절연열화에 의한 비(非) 배터리 화재의 위험도 평가

5.3.2 PCB 분진에 의한 비(非) 배터리 화재

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, PCB 분진에 의한 비(非) 배터리 화재 시험과 이에 따른 ESS 화재 발생 위험도의 진단특성을 종합하면, 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 화재진단장치는 연기 감지기의 동작 여부에 따라, 화재 발생 전 위험도(H_2)와 화재 발생 후 위험도(N_1, N_3, I_3)로 나타낼 수 있다.



[그림 9] PCB 분진에 의한 비(非) 배터리 화재의 위험도 평가

5. 결 론

본 논문에서는 온도, 습도, 산소, 오프가스, 압력, 분진, 연기 등의 주요 운용환경 데이터를 바탕으로, ESS 화재 발생 전·후의 위험도 진단 알고리즘을 제시하고, 검출장치부, 계측장치부, 보조장치부 등으로 구성된 ESS 화재 진단장치를 구현한다. 이를 바탕으로 화재 진단특성을 평가한 결과, 배터리 및 비(非) 배터리의 화재 발생 위험도를 효과적으로 판단할 수 있어, 본 논문에서 제안한 ESS 화재 발생 위험도 진단 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있다.

참고문헌

[1] 황소연, 최성문, 신건, 최형석, 노대석, "ESS용 리튬이온전지의 열폭주 방지용 오프가스 검출 알고리즘에 관한 연구", 대한전기학회지, vol. 71, no. 12, pp. 1787-1795, 2022.