

방전신호 검출에 의한 히팅 케이블의 상태감시기술

김동언, 김남훈, 임승현, 길경석 

한국해양대학교 전기전자공학과

Condition Monitoring Technique for Heating Cables by Detecting Discharge Signal

Dong-Eon Kim, Nam-Hoon Kim, Seung-Hyun Lim, and Gyung-Suk Kil

Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

(Received January 19, 2021; Revised February 7, 2021; Accepted February 8, 2021)

Abstract: Heating cables, widely used in office buildings, factories, streets and railways, deteriorate in electrical insulation during operation. The insulation deterioration of heating cables leads to electric discharges that can cause electrical fires. With this background, this paper dealt with a condition monitoring technique for heating cables by the analysis of discharge signals to prevent electrical fires. Insulation deterioration was simulated using an arc generator specified in UL1699 under AC operation, and the characteristic and propagation of discharge signals were analyzed on a 100 meter-long heating cable. Discharge signals produced by insulation deterioration were detected as a voltage pulse because they are as small as a few mV and they are attenuated through propagation path.

The frequency spectrum of discharge signals mainly existed in the range from 70 kHz to 110 kHz, and the maximum attenuation of the signal was 84.8% at 100 meters away from the discharge point. Based on the experimental results, a monitoring device, which is composed of a high pass filter with the cut-off frequency of 70 kHz, a comparator, a wave shaper and a microprocessor, was designed and fabricated. Also, an algorithm was designed to discriminate the discharge signal in the presence of noise, compared with the pulse repetition period and the number of pulse counts per 100ms. In the experiment, the result showed that the prototype monitoring device could detect and discriminate the discharge signals produced at every discharge point on a heating cable.

Keywords: Heating cable, Insulation deterioration, Electric fire, Pulse repetition, Pulse count, Monitoring device

1. 서론

히팅 케이블은 동절기 유체이송배관의 동파방지와 철로 및 도로 등에서 결빙방지를 위해 광범위하게 사용되고 있으나, 이로 인한 화재 발생이 빈번하고 인명과 막대한 재산피해를 발생시키고 있다.

소방청 국가화재정보센터의 화재통계자료에 따르면

✉ Gyung-Suk Kil; kilgs@kmou.ac.kr

그림 1과 같이 최근 5년(2016~2020년) 동안 히팅 케이블로 인한 화재는 총 1,632건으로 연 평균 320건 발생하였으며, 26명이 다치고 약 119억의 재산피해를 초래하였다. 히팅 케이블은 동절기에 사용하기 때문에 12월 337건, 1월 358건과 2월 317건으로 12월~2월에 화재가 집중적으로 발생하고 있다. 화재원인은 전기적 요인이 780건(47.83%)으로 가장 많았으며, 다음으로 외부 손상과 같은 기계적 요인이 669건(41%)을 차지하였다 [1].

히팅 케이블은 시공 시 결침 현상, 주기적인 절연 측정 부재 및 전원의 포설 문제로 인한 온도 센서의 실내 부착 등 시공 및 관리의 부주의가 화재의 원인이 되고

있다. 따라서 본 논문에서는 히팅 케이블로 인한 전기화재를 예방할 목적으로, 방전검출에 의한 히팅 케이블의 온라인 상태진단기술에 대하여 연구하였다 [2-4]. 운전 중 히팅 케이블에서의 절연열화를 모의하고 방전신호의 특성과 전파에 대해 분석하였다.

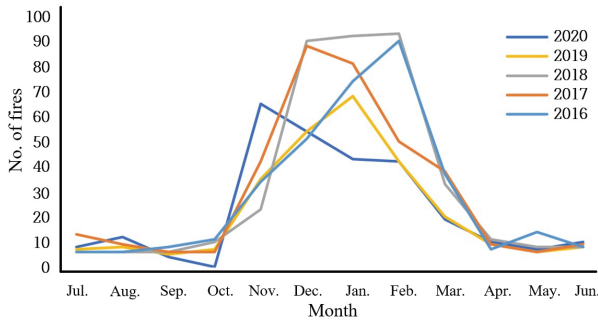


Fig. 1. Fire events caused by heating cables.

연구 결과로부터 고역통과필터, 비교기, 파형정형회로 및 마이크로프로세서로 구성된 상태 감시장치를 시제작하였다. 산업현장에서 사용되는 최대 길이 100 m의 히팅 케이블에서 적용실험 결과, 초기 절연열화 시 발생하는 미소 방전에 대해서도 충분히 검출이 가능하였다.

2. 실험 방법

2.1 히팅 케이블과 전기방전

히팅 케이블의 구조와 전기적 등가회로를 그림 2(a)와 그림 2(b)에 각각 나타내었다. 등가회로는 무한 분포정수회로이며, 주위온도에 대응하여 발열량을 조절하는 자기 온도 제어형으로, 발열체로 반도체성 폴리머를 사용한다. 구조적 특징에 따라 CR형, CT형 및 BARE형으로 구분하며, 별도의 온도제어기가 필요 없고 히팅 케이블 고유 설정온도 이상을 초과하지 않는다.

주위온도의 변화에 따라 발열량이 증감되기 때문에 에너지 절감 효과가 우수하고 국부적 과열이나 소손 현상이 발생하지 않는 특징이 있다. 또한 임의로 길이를 절단하여 사용할 수 있는 장점과 유연성이 뛰어나 시공이 편리하고 수명도 반영구적이다. 그러나 피복의 경년 절연열화나 외부적 충격에 의한 소손 등으로 전기화재의 원인이 되고 있다.

히팅 케이블에서 발생하는 방전은 열선의 높은 임피던스를 통한 그림 2(c)의 직렬방전이며, 절연 파괴 시 미소 방전이 발생하고 지속되면 국부적 온도가 상승으로 발열에 의해 열선부는 탄화되고 방전전류의 증가와 반복 현상으로 탄화 도전로가 형성되어 발화로 진전되게 된다 [5-8].

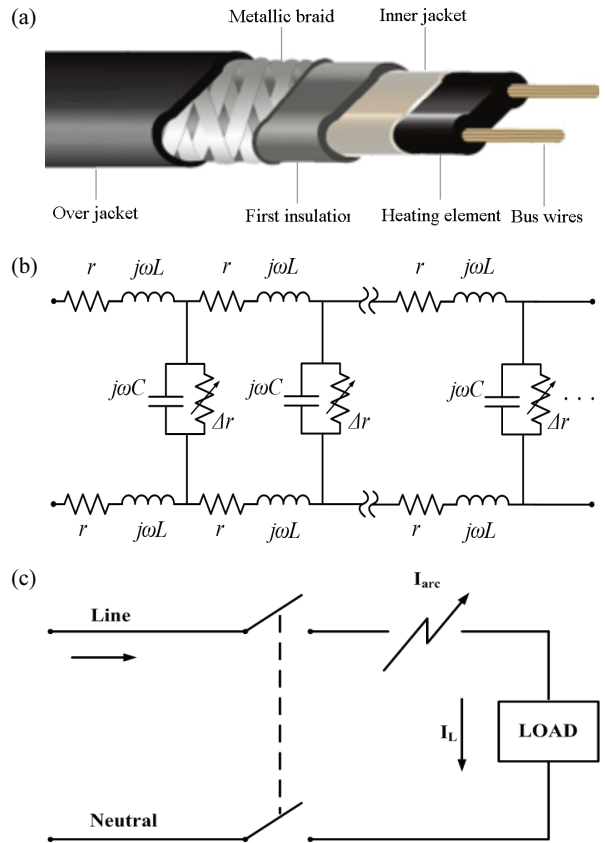


Fig. 2. Heating cable. (a) Structure, (b) electrical equivalent circuit, and (c) discharge mode.

2.2 방전신호

방전신호의 크기 및 주파수, 히팅 케이블에서의 전파특성을 분석하기 위하여 그림 3과 같은 실험계를 구성하였으며, 절연열화로 인한 방전현상은 UL 1699에 규정된 아크발생장치를 이용하여 모의하였다 [8].

히팅 케이블에서 방전 모의 시 발생한 전압의 특징은 그림 4(a)와 같다.

일반적인 부하에서 방전 발생 시 전원주파수 60 Hz의 전원전압은 영점지점에서 지연이 발생하게 된다.

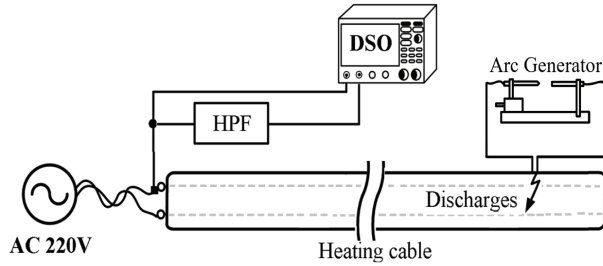
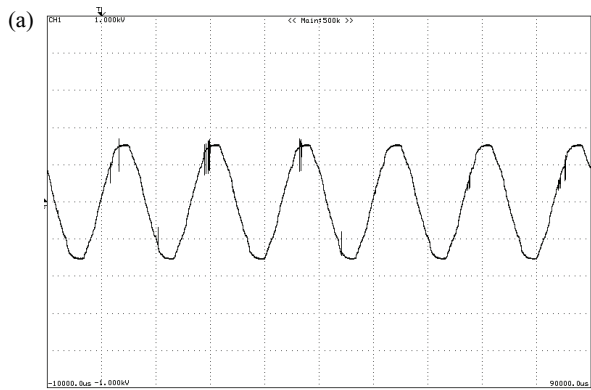


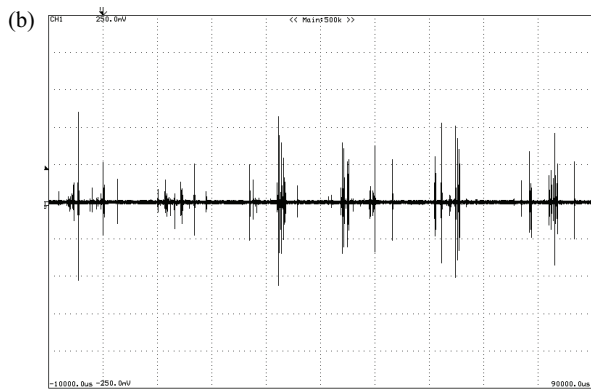
Fig. 3. Configuration of the experimental apparatus.

히팅 케이블의 경우 케이블의 일종으로 전파특성에 의해 거리에 따라 전압의 크기 및 위상이 변하게 되며, 영점이 아닌 위상 지연이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 전원전압에 중첩된 방전신호만을 검출하기 위해 고역통과필터를 적용하였다. 그림 4(b)는 전원주파수가 제거된 방전 신호만을 나타낸 것이다.

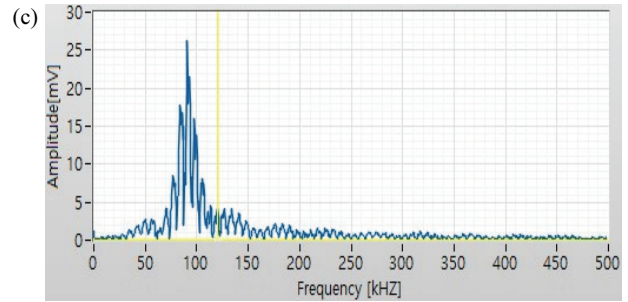
LabVIEW 기반으로 설계한 FFT (fast fourier transformation) 알고리즘을 적용하여 히팅 케이블에서 발생하는 방전신호의 주파수를 분석한 결과, 그림 4(c)와 같이 70~110 kHz에 분포하고 있다.



[200 V/div, 10ms/div]



[50 mV/div, 10ms/div]



[5 mV/div, 100 kHz/div]

Fig. 4. Typical discharge pulses. (a) Discharge pulse imposed on AC mains, (b) discharge pulse, and (c) frequency spectrum of discharge pulse.

2.3 방전신호의 전파

히팅 케이블은 그림 2(b)에 나타낸 바와 같이 무한 분포 정수회로이며, 절연 열화로 발생하는 방전신호는 수 십 kHz 이상의 주파수 성분을 갖기 때문에 방전신호의 전파 경로에서 크기와 위상의 변화가 발생하므로 거리에 따른 전파 특성을 분석하였다. 그림 2의 등가회로에서 방전신호가 발생하게 되면 전압 신호 $v(x, t)$ 와 전류 신호 $i(x, t)$ 가 히팅 케이블을 따라 전파하게 되며, 전파 특성은 식 (1)과 같다 [9].

$$\dot{\gamma}(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} = \sqrt{z \cdot y} \quad (1)$$

여기서, $\gamma(\omega)$ 는 전파 정수, $\alpha(\omega)$ 는 감쇠 정수, $\beta(\omega)$ 는 위상 정수이며, ω 는 각 주파수(rad/sec)이다.

본 논문에서는 100 m 길이의 히팅 케이블에서 방전신호의 전파특성을 분석하였다. 펄스발생기(Agilent, 50 MHz, 33250A)로 전원단에 펄스(100 mV_{peak}, t_r: 100ns, t_w: 3us)를 주입하였으며, 거리에 따른 펄스파형을 그림 5에 나타내었다.

그림 5(a)는 펄스 입력단으로부터 25 m 거리에서 검출된 펄스를 비교한 것이며, 그림 5(b)는 25 m, 50 m, 75 m 및 100 m 위치에서 검출된 파형을 중첩시켜 비교한 것이다. 거리에 따라 크기가 감소하고 위상 지연이 있음을 알 수 있다. 100 m 지점에서 검출된 펄스는 크기에 있어 약 84.8%의 감쇄를 보였다.

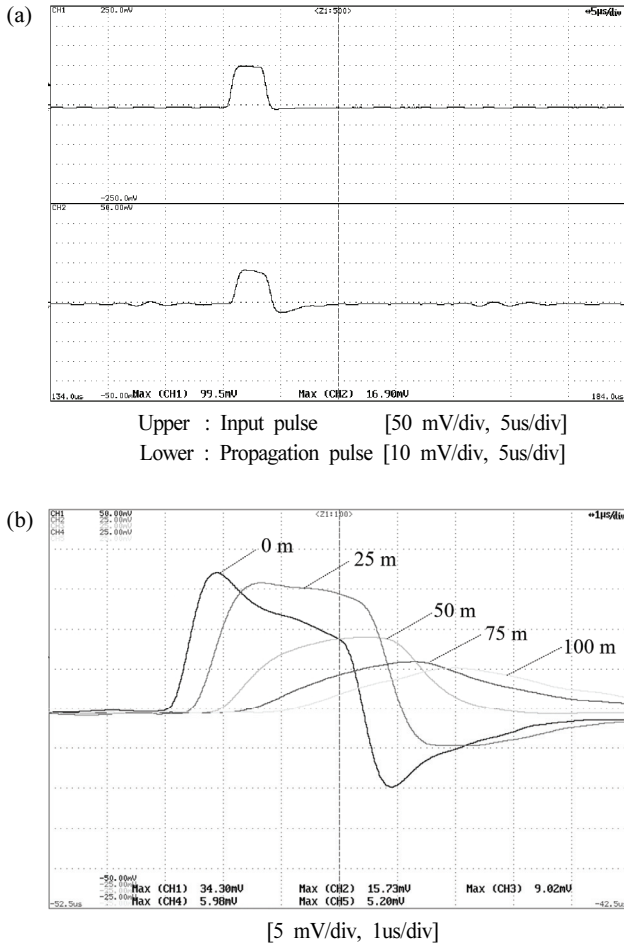


Fig. 5. Changes of waveforms depending on the distance from discharge point. (a) Input pulse and propagation pulse at 25 m and (b) comparison of propagation pulse waveforms.

3. 결과 및 고찰

운영 중 히팅 케이블에서 방전 발생 시 방전신호만을 검출하기 위하여 고역통과필터, 비교기, 파형정형회로 및 방전판별회로로 구성되는 방전신호 감시장치를 제작하고 성능을 평가하였다.

3.1 고역통과필터

히팅케이블에서의 방전신호는 전원전압에 비해 크기가 매우 작고 70 kHz 이상의 고주파성분이므로, 60 Hz 전압성분은 완전히 차단하고 70 kHz 이상의 방전신호만을 검출하기 위하여, 그림 6(a)와 같은 4차 고역통과필터를 설계하였다 [10]. 이를 기반으로 제작한 고역

통과필터의 주파수 응답 특성은 그림 6(b)와 같이 60 Hz 전압성분은 180 dB 이상으로 감쇄시키고, 70 kHz 이상의 고주파 성분 즉, 방전신호는 감쇄 없이 통과시킨다.

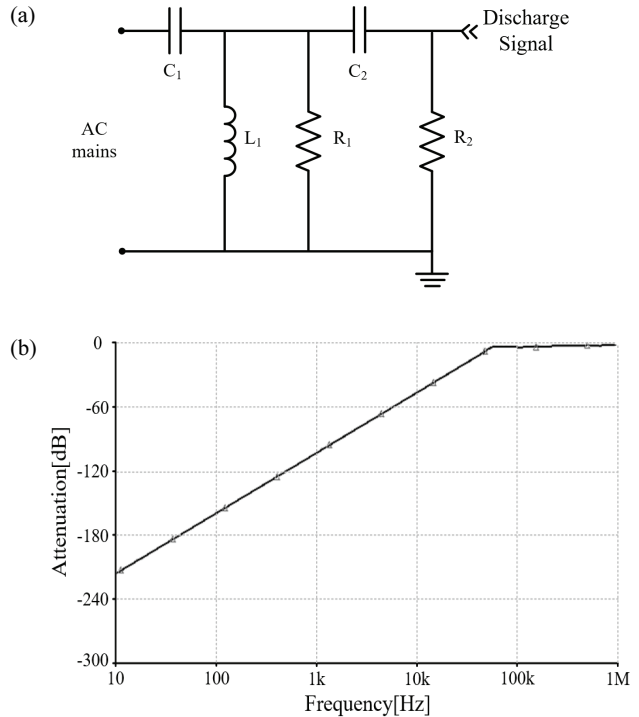


Fig. 6. High-pass filter. (a) Configuration and (b) frequency response.

3.2 파형정형회로

방전신호의 판별을 위해 마이크로프로세서 입력단에 아날로그 방전신호를 디지털 펄스로 정형화하기 위한 고역통과필터의 후단에 파형정형회로가 필요하다.

본 논문에서는 정·부극성의 방전신호를 정극성으로 변환하고, 그림 7(a)와 같이 비교기 U1의 일정 레벨 이상의 아날로그 방전신호에 대해 5 V 디지털 펄스로 정형화하도록 설계하였다.

가변저항 VR1에 의해 설정값 이상의 방전신호가 입력되면 U1의 출력은 5 V에서 0 V로 변화되어 부극성 펄스를 출력하며, U2에서 U1의 펄스를 반전시켜 정극성의 정형된 펄스를 출력한다. 정형 펄스의 폭은 VR1의 설정값을 초과하는 시간에 비례하여 발생한다.

그림 7(b)는 히팅 케이블에서 아크발생장치에 의해 발생시킨 방전신호와 이에 대응하여 정형화된 펄스가 출력되는 것을 보여주고 있다.

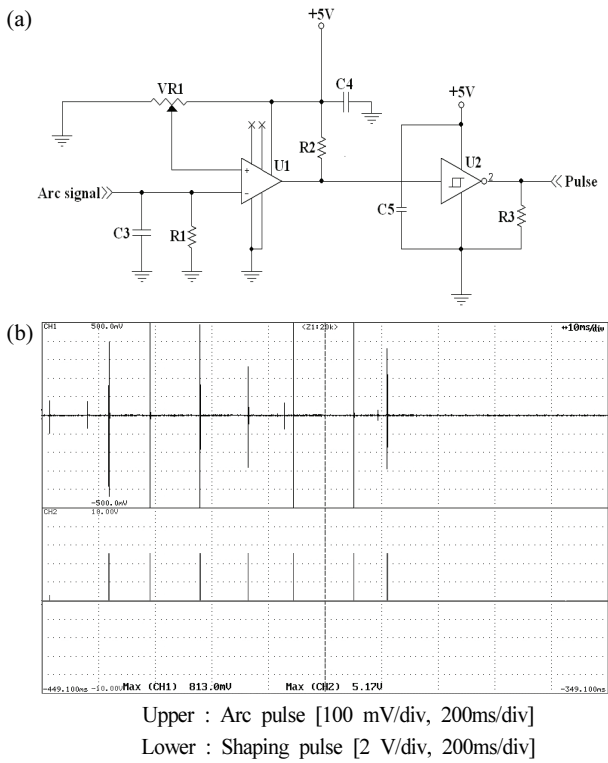


Fig. 7. A waveform shaping. (a) Circuit diagram and (b) typical waveforms.

제작한 고역통과필터와 파형정형회로의 성능을 분석하기 위하여, 히팅 케이블에서 아크발생장치에 의해 방전을 발생시키고 100 m 케이블에서 25 m마다 고역통과필터의 출력에서 검출된 방전신호와 파형정형회로의 출력펄스를 비교하여 그림 8에 나타내었다.

방전 발생지점으로부터 멀어짐에 따라 방전신호의 크기가 감소하고 있으나, 100 m 말단에서도 미소 방전신호를 검출하고 파형정형이 이루어짐을 알 수 있다.

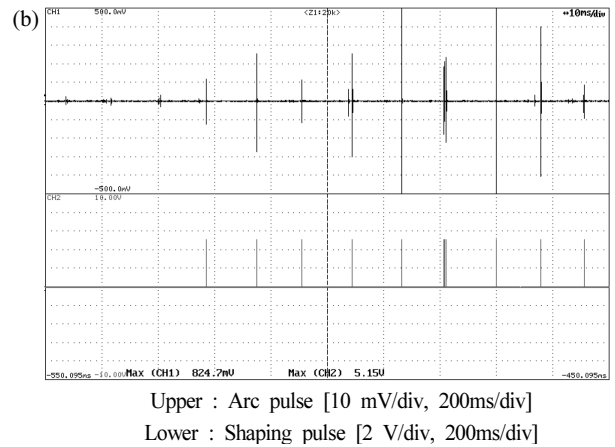
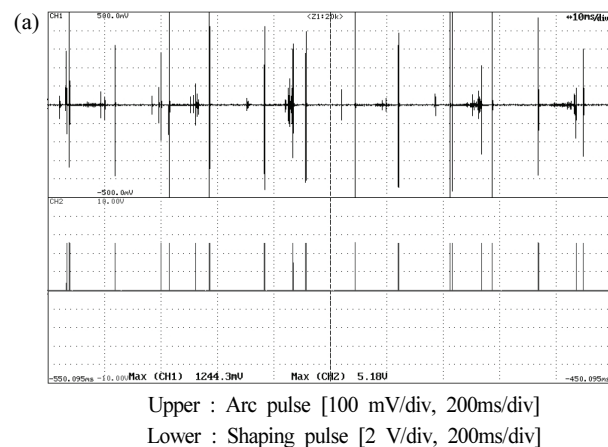


Fig. 8. Detection of discharge pulse at a distance. (a) 25 m and (b) 100 m.

3.3 방전신호 감시장치

히팅케이블의 상태감시기술로 방전신호 감시장치는 방전신호의 크기 및 주파수 성분, 전파 특성에 대한 실험적 연구를 통해 그림 9(a) 및 (b)와 같이 고역통과필터, 비교기, 파형정형회로, 출력부 및 마이크로프로세서로 시제작하였다. 또한 본 장치에 입력되는 펄스가 방전신호인지 아니면 노이즈에 의한 것인지 식별하고, 방전신호에 대해서만 결과를 출력할 수 있도록 그림 9(c)의 판별 알고리즘을 설계하여 탑재하였다.

본 논문에서는 방전신호와 노이즈를 구분하고 방전신호에 의한 이상상태를 판별하는 알고리즘을 설계하기 위하여 많은 현장실험에서 초당 펄스 개수와 펄스간의 주기성이 중요한 판단 변수임을 도출하였다. 마이크로프로세서에 입력되는 제1 펄스와 제2 펄스 및 후속 펄스의 주기성이 없고, 1,000ms마다 15개 이상의 펄스 검출 시에는 방전신호로 식별하며, 펄스간 주기성이 있는 경우는 인버터기 사용에 의한 노이즈로 판단한다.



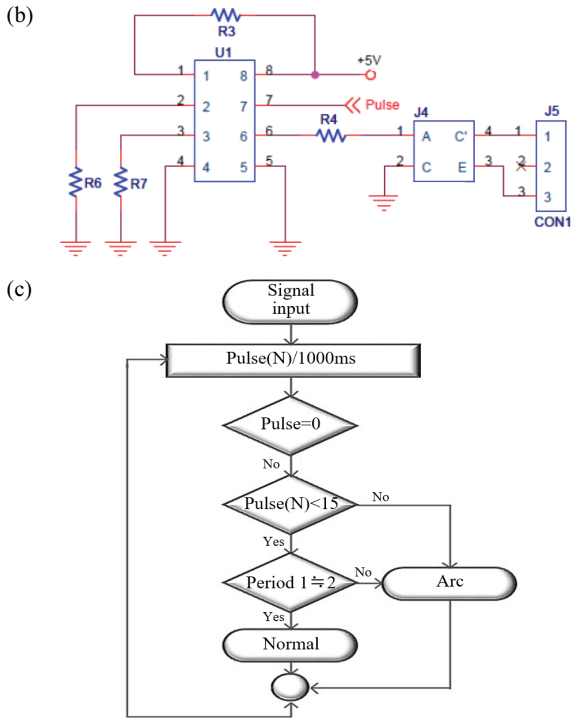


Fig. 9. A prototype monitoring device. (a) Photograph, (b) circuit, and (c) algorithm for identification.

장치의 출력부에서는 정상 시 b접점(high)에서 방전 신호 시 a접점(low)으로 전환되어 자동화재경보장치에 신호를 보낸다. 감시장치의 출력신호를 정상 시 b접점으로 한 이유는 fail-safe를 고려하여 검출장치가 동작하지 않을 시에도 a접점이 되어 신호를 출력하게 한 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 히팅 케이블의 손상이나 경년 절연열화에 의한 전기화재를 예방하기 위한 기술과 장치에 대한 연구를 수행하여 다음의 결론은 얻었다.

히팅 케이블에서 방전 발생 시 방전신호의 주파수와 전파 특성을 분석하여, 고역통과필터, 비교기, 파형정형회로 및 마이크로프로세서로 구성되는 방전신호 감시장치를 제작하였다.

방전신호의 주파수는 70~110 kHz이므로, -3 dB의 차단주파수가 70 kHz인 고역통과필터를 설계 적용하여 60 Hz 전원전압은 180 dB 이상 감쇄시키고, 70 kHz 이상의 방전신호는 감쇄없이 검출할 수 있었다. 마이크로세서에서 방전신호 검출에 의한 히팅 케이블

의 상태감시를 위해 고역통과필터의 출력단에 파형정형회로를 설계하고, 아날로그 방전신호를 디지털 펄스로 변환시켜 방전신호의 발생과 주기성을 분석할 수 있도록 하였다.

100 m 길이의 히팅케이블 어느 위치에서나 방전신호를 정확히 검출하였으며, 펄스의 주기성과 펄스 수로부터 정상상태와 방전발생을 정확히 판별하였다. 적용 실험 결과로부터 본 논문에서 제안하는 방전신호 감시장치와 판별알고리즘의 산업적용으로 히팅 케이블에 의한 전기화재를 예방하는 데 크게 기여할 것으로 기대한다.

ORCID

Gyung-Suk Kil

<https://orcid.org/0000-0002-1672-2812>

REFERENCES

- [1] National Fire Data System, <http://www.nfds.go.kr> (2020).
- [2] G. S. Kil, K. S. Jung, D. W. Park, S. J. Kim, and J. S. Han, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **23**, 554 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2010.23.7.554>]
- [3] H. E. Jo, C. H. Jin, D. W. Park, G. S. Kil, and C. H. Ahn, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 147 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.2.147>]
- [4] W. H. Kim, G. Wang, G. S. Kil, and H. K. Ji, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 412 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.6.412>]
- [5] H. K. Ji, *Ph.D. Thesis*, p. 9-18, Korea Maritime and Ocean University, Busan (2018).
- [6] G. D. Gregory, K. Wong, and R. F. Dvorak, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **40**, 1006 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2004.831287>]
- [7] C. Li, F. Dawson, H. Kojori, C. Meyers, and E. Yue, *Proc. World Aviation Congress & Exposition (SAE Technical Paper Series, Montreal, 2003)* p. 590. [DOI: <https://doi.org/10.4271/2003-01-3037>]
- [8] Underwriters Laboratories, UL1699-Standard for Arc-Fault Circuit-Interrupters, 2006.
- [9] Y. H. Md Thayoob, A. M. Ariffin, and S. Sulaiman, *Proc. 2010 International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (IEEE, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010)* p. 665. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCAIE.2010.5735018>]
- [10] H. W. Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1988) p. 129.