creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

**저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.**

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:21028-200000105248

工學博士 學位論文

# 저압 배선계통에서 직렬아크의 검출과 판별에 관한 연구

A Study on the Detection and Discrimination of Series Arc in Low Voltage Wiring Systems

指導敎授 吉 暻 碩

2018年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

池 弘 根

本 論文을 池弘根의 工學博士 學位論文으로 認准함

委員長 : 工學博士 金 潤 植 ㊞

委 員 : 工學博士 吉 暻 碩 ㊞

委 員 : 工學博士 張 樂 元 ㊞

委 員 : 工學博士 李 永 植 ㊞

委 員 : 工學博士 朱 玧 魯 ㊞

2018年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

池 弘 根

Collection @ kmou

# 목 차

목 차 ····· i
그림 및 표 목차 ····· iii
Abstract ····· vi

제 1 장 서 론 ····· 1
1.1 연구 배경 ····· 1
1.2 연구 동향 및 내용 ····· 6

제 2 장 이 론 ····· 9
2.1 아크 방전 ····· 9
2.2 직렬아크에 의한 발화 ····· 18

제 3 장 실험 및 분석 ····· 27
3.1 실험계 ····· 27
3.2 측정 및 분석 ····· 30
3.3 직렬아크의 부하 의존성 ····· 55

Collection @ kmou

제 4 장 판별 알고리즘 ····· 71
4.1 알고리즘 설계 ····· 71
4.2 적용 평가 ····· 76

제 5 장 결 론 ····· 86

참 고 문 헌 ····· 88



Collection @ kmou

# 그림 및 표 목차

## <그림 목차>


그림 1.1 화재 통계 ····· 3
그림 1.2 전기화재 발생원인(2010~2017) ····· 5
그림 2.1 대기압에서 온도에 따른 공기의 분해 및 이온화 ····· 10
그림 2.2 아크의 종류 ····· 12
그림 2.3 차단기 시간-전류 특성 ····· 14
그림 2.4 직렬아크의 전압 파형 예 ····· 15
그림 2.5 직렬아크의 전압 신호 예 ····· 16
그림 2.6 직렬아크의 전류 파형 ····· 18
그림 2.7 불완전 접속 상태의 온도변화 ····· 19
그림 2.8 아크방전의 진전 메커니즘 ····· 20
그림 2.9 아산화동의 사진 ····· 22
그림 2.10 아산화동의 온도-저항 곡선 ····· 23
그림 2.11 아산화동의 SEM/EDS 분석 ····· 23
그림 2.12 직렬아크에 의한 화재 사례(전선-전선) ····· 24
그림 2.13 직렬아크에 의한 화재 사례(전선-단자) ····· 25
그림 2.14 직렬아크에 의한 화재 사례(콘센트-플러그) ····· 26
그림 3.1 아크발생장치 ····· 28
그림 3.2 실험계 구성 ····· 29
그림 3.3 아크 결함의 종류 ····· 29
그림 3.4 시간-주파수 영역 분석 ····· 30
그림 3.5 MRA를 이용한 신호의 3층 분해 ····· 32




Collection @ kmou

그림 3.6 웨이블렛 모함수의 예 ····· 33
그림 3.7 상관계수 산출(전열기, 전선-전선 결함) ····· 35
그림 3.8 상관계수 산출(SMPS, 전선-단자 결함) ····· 36
그림 3.9 상관계수 산출(전동기, 전선-단자 결함) ····· 37
그림 3.10 이산 웨이블렛 변환 알고리즘 ····· 39
그림 3.11 이산 웨이블렛 분석과 각층의 주파수 대역 ····· 40
그림 3.12 아크 전류 분석 ····· 43
그림 3.13 아크 전류 신호의 분해(전열기 부하) ····· 46
그림 3.14 아크 전류 신호의 분해(SMPS 부하) ····· 49
그림 3.15 아크 전류 신호의 분해(전동기 부하) ····· 52
그림 3.16 대역통과필터 ····· 54
그림 3.17 아크 신호와 에너지 스펙트럼(전열기) ····· 58
그림 3.18 아크 신호와 에너지 스펙트럼(컴퓨터) ····· 59
그림 3.19 아크 신호와 에너지 스펙트럼(선풍기) ····· 60
그림 3.20 아크 신호와 에너지 스펙트럼(LED 등기구) ····· 61
그림 3.21 PRSA 알고리즘 ····· 65
그림 3.22 부하에 따른 위상분포 패턴 ····· 68
그림 3.23 부하에 따른 위상분포 ····· 69
그림 4.1 신호의 폭 ····· 72
그림 4.2 아크판별 알고리즘 ····· 75
그림 4.3 실험계의 구성 ····· 76
그림 4.4 병렬부하 시험 결과 ····· 79
그림 4.5 오동작시험 결과 ····· 82
그림 4.6 선로길이에 따른 신호의 감쇄 ····· 85



Collection @ kmou

<표 목차>

표 1.1 전기화재 발생원인(2010~2017) ····· 4
표 3.1 최적의 웨이블렛 모함수 선정 ····· 38
표 3.2 아크 전류의 성분 분포 ····· 53
표 3.3 신호의 에너지 분석 ····· 62
표 3.4 아크 신호의 위상분포 ····· 70
표 4.1 신호 에너지의 증가율 ····· 73
표 4.2 오동작시험 방법 ····· 80
표 4.3 길이에 따른 저항(R) 및 인덕턴스(L) 값 ····· 84
표 4.4 선로길이 및 주파수에 따른 신호의 감쇄비 ····· 85



Collection @ kmou

# A Study on the Detection and Discrimination of Series Arc in Low Voltage Wiring Systems

*by Hong Keun, Ji*

Department of Electrical & Electronics Engineering
The Graduate School of Korea Maritime and Ocean University
Busan, Republic of Korea

## Abstract

Although research institutes and industrial manufactures have made great efforts to prevent electrical fires in low-voltage wiring system, it still accounts for a large part of fire accidents. Especially, the series arc, which can not be protected by the existing circuit breaker and leakage current circuit breaker, is investigated in attempts to achieve better detection algorithm and the interruption technology. However, the related techniques have not been adopted in Korea. Therefore, this thesis dealt with the detection method, characteristics and analysis algorithm of series arc that can cause the electrical fires.

An arc generator was designed according to UL1699 and electrodes were selected as cord-cord, cord-terminal, and outlet-plug to simulate the actual incomplete connections in an indoor wiring system. The series arc current was detected using a wide band current transformer



Collection @ kmou

with a frequency range of 1 Hz - 20 MHz. Signals were acquired using a digital storage oscilloscope with a sampling rate of 5 GS/s and a bandwidth of 1 GHz, and using a data acquisition unit with a sampling rate of 100 MS/s and a bandwidth of 50 MHz. The arc detection and analysis algorithms were developed based on LabVIEW program.

The detected arc current signal was analyzed by the discrete wavelet transform. By calculating the correlation coefficient between the signal arc pulses and the wavelets, db13 was selected as the optimal mother wavelet. The arc signals in 6 sinusoidal cycles were further decomposed into 8 levels using the multi-resolution analysis method to analyze the signal frequency range. From the results, arc signals were distributed in the detail components D5, D6, D7, and D8, corresponding to the frequency range of 2.4 kHz - 39 kHz(-3 dB), based on which the optimal arc detection band-pass filter (BPF) was designed.

The BPF was used to analyze the arc signal energy and phase distribution. It was confirmed that the signal energy of an arc condition was more than 30 times of that of normal condition without arc discharge. In addition, the arc signal in the heater load distributed in 0°~120° and 150°~270°, and distributed in 0°~90° and 180°~240° in the computer load. In the refrigerator and air conditioner, most arc signal distributed in 0°~120° as well as 210°~300°, and 30°~180° as well as 210°~360°, respectively.

After analyzing the arc pulse count and arc signal energy, it was confirmed that the signal energy of an arc condition was more than 30



Collection @ kmou

times of that of normal condition and the arc occurred at least twice in 6 sinusoidal cycles. Therefore, the arc discrimination algorithm was developed by LabVIEW program. From the case studies, the proposed algorithm could identify arcs accurately. Results from this thesis is expected to be applied in the low-voltage wiring system for preventing arc-caused electrical fires.



Collection @ kmou

# 초 록

전기화재 예방을 위한 학계 및 산업계의 다양한 노력에도 불구하고 저압 배선계통에서 아크에 의한 전기화재는 높은 비율을 차지하고 있으며, 많은 인명 및 재산 피해가 발생하고 있다. 특히 직렬아크는 현재의 누전 및 배선용 차단기로는 보호가 불가능하기 때문에, 전 세계적으로 검출 알고리즘과 차단기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 국내의 경우 아크 차단 기술의 상용화는 미미한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 전기화재의 주요 원인이 되는 직렬아크의 특성, 검출 방법 및 분석 알고리즘 등에 대한 연구를 수행하였다.

직렬아크에 의한 화재사례의 분석을 통해 대표적으로 화재가 발생하는 결함으로 전선-전선, 전선-단자 및 콘센트-플러그 접속부를 선정하였으며, UL1699 및 IEC62606에 규정된 아크발생장치를 제작하여 아크발생을 모의하였다. 1 Hz～20 MHz 대역의 광대역 변류기, 오실로스코프(샘플링 속도 : 5 GS/s, 주파수대역 : 1 GHz) 및 DAQ(샘플링 속도 : 100 MS/s, 주파수대역 : 50 MHz)를 통해 측정하였으며, LabVIEW 기반의 알고리즘을 설계하여 분석에 적용하였다.

아크 전류의 분석에는 이산 웨이블렛 변환을 적용하였으며, 검출된 아크 펄스와 웨이블렛 모함수의 상관계수 계산을 통해, db13을 최적의 웨이블렛 모함수로 선정하였다. 부하별, 결함별로 발생하는 아크 신호의 이산 웨이블렛 분석을 통해 D5, D6, D7 및 D8 대역을 최적의 주파수 대역으로 선정하고, 2.4 kHz～39 kHz(-3 dB)인 대역통과필터를 설계 및 제작하였다.

부하별 아크 신호의 특성 분석을 위해 아크 신호의 에너지와 방전 위상 을 측정하였다. 신호 에너지는 정상 동작시보다 아크가 발생할 경우,



Collection @ kmou

전열기는 30배 이상, 컴퓨터와 선풍기는 90배 이상, LED 등기구는 8,000배 이상 증가하는 것으로 분석되었다.

방전 위상의 경우, 전기히터 사용 시 대부분 0°~120°와 150°~270°에서 방전이 발생하였으며, 컴퓨터 부하는 0°~90°와 180°~240°, 냉장고 부하는 30°~120°와 210°~300°에서 발생하였다. 에어컨의 경우 0°~30°와 180°~210°를 제외한 부분에서 고르게 발생함으로서, 부하에 따라 직렬아크 방전이 발생하는 위상 분포가 달라지는 특성을 도출하였으며, 이는 아크가 발생하는 선로의 추정에 적용이 가능하다.

단위 구간별(100 ms) 아크 펄스 수와 신호 에너지의 크기를 비교하여 직렬아크 상태와 정상 상태를 판별하는 알고리즘을 LabVIEW 기반으로 개발하였으며, 최소 아크 펄스 폭은 2 $\mu$s로 선정하였다. 설계한 대역통과 필터와 알고리즘의 선로 적용 시험 및 오작동 시험과 선로 임피던스의 영향 분석을 통해, 저압 배선계통에 직렬아크 발생을 오동작 없이 판별함을 검증하였으며, 제안된 검출 및 판별 방법은 전기화재 예방을 위한 방법으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.



Collection @ kmou

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

현대 사회에서 전기는 일상생활에서 없어서는 안될 만큼 중요한 에너지이다. 신속·정확한 공급이 가능하고, 공해가 발생하지 않기 때문에 전기에너지의 사용은 증가하고 있으며, 주거 및 사무공간의 편리와 쾌적한 환경을 위한 전기제품의 보급이 일반화되고 있는 가운데 화재, 폭발 및 감전 등 전기와 관련된 사고가 꾸준히 발생하고 있다.

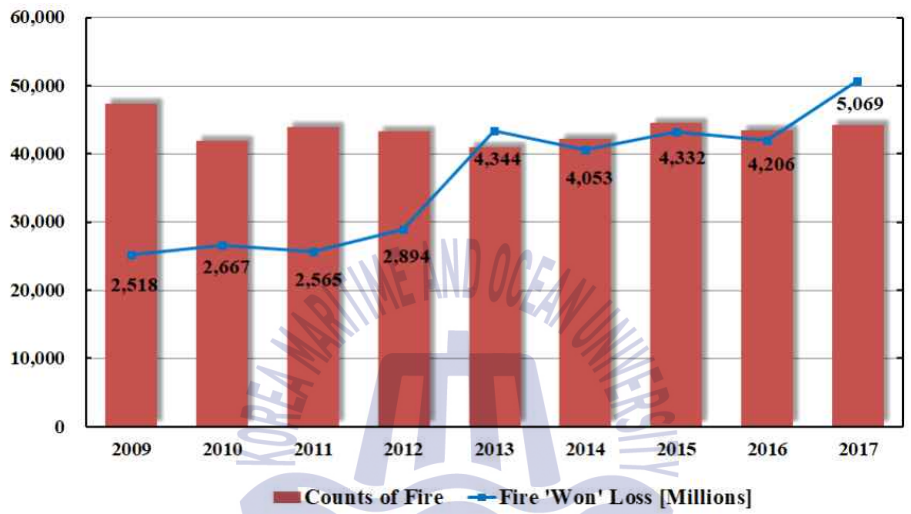
국가화재정보센터의 통계에 따르면 최근 10년간 국내의 화재사고는 2009년에 약 47,000건이 발생하였다가 이후 조금씩 감소하고 있으나, 2017년 까지 매년 40,000여건 이상이 꾸준히 발생하고 있다. 최근 10년간 화재 발생 건수는 비슷하나 화재에 의한 재산피해는 2009년 2,500억 원에서 점점 증가하여 2017년도에는 5,000억 원을 넘은 상태로서, 8년 동안 약 100%의 증가율을 보였으며, 재산피해 뿐만 아니라 매년 300여명의 사망자와 1,700여명의 부상자가 발생하고 있는 실정이다[1],[2].

이 같은 인명 및 재산피해를 가져오는 화재사고의 원인으로는 전기적 요인, 기계적 요인, 화학적 요인, 방화 및 부주의 등이 있으며, 최근 10여년간 전기화재 통계를 볼 때 매년 9,000~10,000건 정도의 전기화재가 발생하며 이는 전체 화재의 20% 이상을 차지한다. 그림 1.1 (d)에는 2017년도 화재 발생원에 대하여 나타내었다. 부주의에 의한 화재가 전체 화재의 53%로 가장 높은 비율을 차지하며, 다음으로 누전, 지락, 단락, 과전류, 접촉불량 및 트래킹(Tracking) 등을 포함하는 전기적 요인에 의한 화재가 21%, 기기과열, 오일 및 연료 누설, 제어 실패 및 정비 불량 등이 포함된 기계적 요인에 의한 화재가 10%를 차지하였다. 그 외에 화학적 요인에



Collection @ kmou

의한 화재, 방화 및 교통사고에 의한 화재 등이 있으며 이들은 모두 합쳐도 약 5% 정도로서, 인적인 요인을 제외한 화재 중 가장 높은 비율을 차지하는 화재원인은 전기적 요인으로 볼 수 있다.

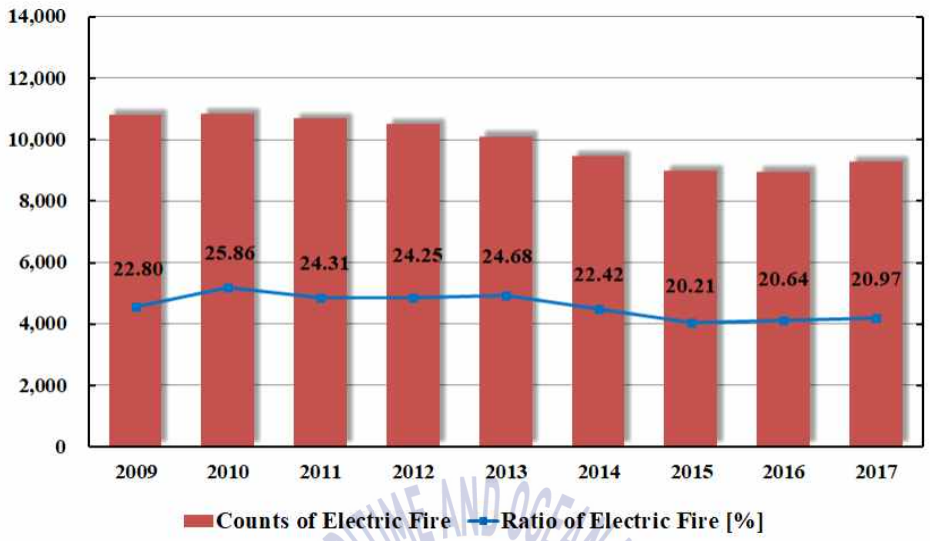



(a) 10년간 화재발생 및 재산피해

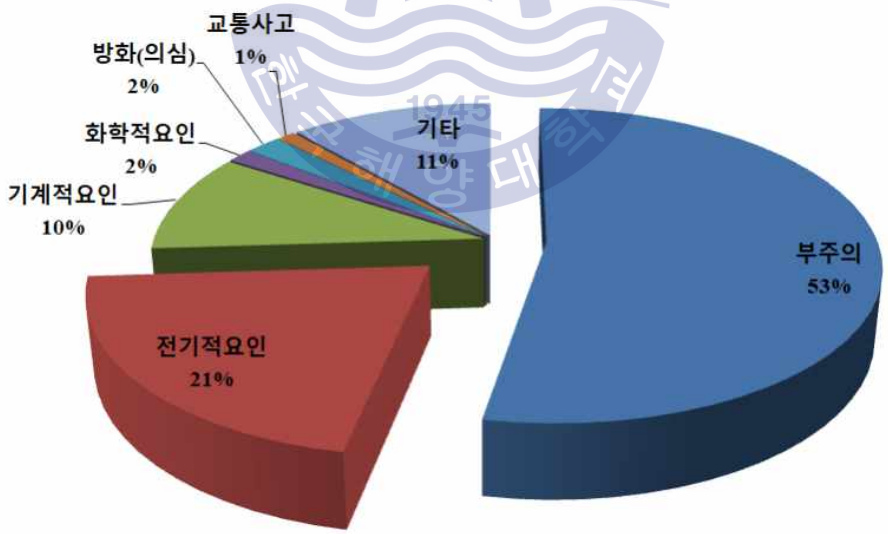
(b) 화재사고에 의한 인명피해 현황



Collection @ kmou




(c) 전기화재 발생건수 및 비율




(d) 화재 발생원인(2017)

그림 1.1 화재 통계[1]
Fig. 1.1 Statistics of fires



Collection @ kmou

표 1.1 및 그림 1.2에는 국가화재정보센터에서 발표한 2010년부터 2017년까지 8년 동안 발생한 78,733건의 전기화재를 원인별로 정리하여 나타내었다. 전기화재의 발생 요인으로 누전/지락, 접촉불량, 절연열화, 과부하/과전류, 압착손상, 층간단락, 트래킹, 반단선, 미확인 단락, 기타로 나누었으며, 절연열화에 의한 발생이 19,917건(25.3 %)으로 가장 많았다. 과부하/과전류 8,439건(10.7 %), 접촉불량 7,836건(9.9 %), 트래킹 6,147건(7.8 %), 압착손상 5,247건(6.6 %), 반단선 1,312건(1.6 %)이며, 미확인 단락도 19,289건(24.5 %)으로 나타났다.

표 1.1. 전기화재 발생원인(2010~2017)[1]
Table 1.1 Causes of electrical fires(2010~2017)

| 원인 / 년도 | 접속불량 | 트래킹 | 압착손상 | 반단선 | 절연열화 | 누전, 지락 | 과부하/과전류 | 층간단락 | 미확인 | 기타 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2010 | 1,128 | 649 | 790 | 161 | 2,756 | 597 | 1,294 | 164 | 2,307 | 981 |
| 2011 | 957 | 691 | 743 | 176 | 2,665 | 509 | 1,259 | 125 | 2,608 | 931 |
| 2012 | 954 | 726 | 717 | 153 | 2,457 | 486 | 1,196 | 112 | 2,722 | 965 |
| 2013 | 981 | 715 | 670 | 138 | 2,561 | 415 | 1,094 | 111 | 2,540 | 878 |
| 2014 | 892 | 750 | 568 | 176 | 2,492 | 386 | 926 | 96 | 2,396 | 763 |
| 2015 | 950 | 799 | 606 | 151 | 2,290 | 326 | 872 | 97 | 2,170 | 719 |
| 2016 | 980 | 923 | 571 | 173 | 2,334 | 329 | 928 | 96 | 2,091 | 537 |
| 2017 | 994 | 894 | 582 | 184 | 2,362 | 317 | 870 | 92 | 2,455 | 514 |
| 합계 | 7,836 | 6,147 | 5,247 | 1,312 | 19,917 | 3,365 | 8,439 | 893 | 19,289 | 6,288 |



Collection @ kmou

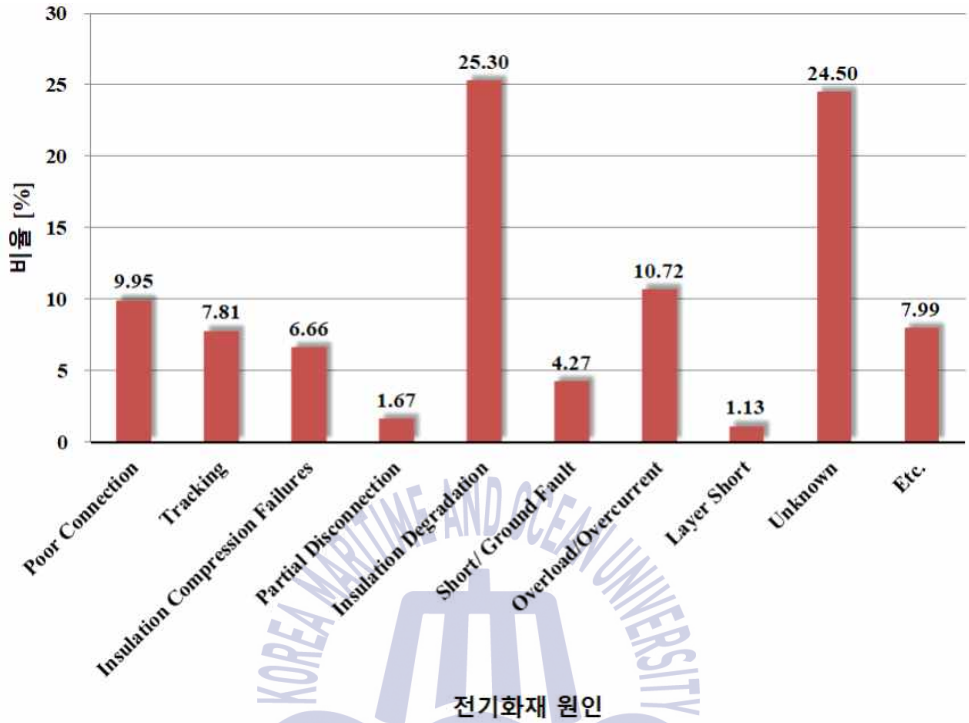



그림 1.2 전기화재 발생원인(2010～2017)[1]
Fig. 1.2 Causes of electrical fires(2010～2017)

접촉불량, 압착손상 및 반단선과 같은 직렬아크를 동반하는 사고는 14,395건으로 전체의 18.3％를 차지하고 있으나, 전기화재의 특성상 직렬아크가 진행되는 과정에서 2차 단락을 유발하여 용융되거나, 소화과정에서 유실될 수 있으며, 동 경우에는 남아있는 2차 단락흔 또는 미상의 원인으로 인해 발화된 것으로 판단될 수 있는 바, 직렬아크에 의한 화재의 점유율은 더욱 증가할 것으로 예측된다[3].

국내에서는 수용가에서의 전기사고 예방을 위해 누전차단기(ELB : Earth Leakage Breaker), 배선용 차단기(MCCB : Mold Case Circuit Breaker) 및 퓨즈 등이 적용되고 있다. 누전차단기는 누전에 의한 감전위



Collection @ kmou

험을 감지하여 감전사고를 예방을 위한 기기로서, 영상변류기(ZCT) 통해 인입/인출 전류의 차이를 검지하여 회로를 차단한다. 배선용 차단기는 전선의 과부하를 보호하기 위한 기기로서 일반적으로 동작방식에 따라 열동식과 자기식으로 나뉜다. 퓨즈는 선로에 규정 값 이상의 과도한 전류가 지속적으로 흐르지 못하도록 차단하며, 과전류가 흐를 경우 전류에 의해 발생하는 열로 내부의 가용체가 끊어지면서 회로를 차단하지만, 이들 장치들이 아크가 원인이 되어 발생하는 전기화재를 보호할 수는 없다[4]~[7].

따라서 아크에 의한 화재를 예방할 수 있도록 직렬아크에 의한 화재의 발생 메커니즘을 이해하고, 국내 배선계통 환경에 맞는 검출방법과 판별 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

## 1.2 연구 동향 및 내용

직렬아크에 의한 화재를 예방하기 위한 연구는 국내·외적으로 활발히 수행되고 있다. 미국에서는 1990년대 전기화재의 주요 원인이 아크라는 사실이 발표되면서 연구가 시작되었다. 이후 1999년 AFCI(Arc Fault Circuit Interrupter)에 관한 규격이 UL(Underwriters Labratories) 규격으로 등록되었고, 2002년 NEC(National Electric Code)규정으로 인해 모든 침실에 아크차단기의 사용이 의무화되었으며, 2008년에 모든 거주공간으로 확대적용 되었다[8]~[13].

국제표준규격인 IEC(International Electrotechnical Commission)에서도 전기화재 예방을 위한 AFDD(Arc Fault Detection Device)에 관한 연구가 진행되면서 2013년에 IEC 62606 규격이 제정되었으며, 국내에는 2014년에 KS C IEC 62606(사고아크 검출장치에 대한 일반조건)이 제정되어 시행되고 있다[14]~[16]. 이처럼 아크에 의한 전기화재 예방을 위해 규격이



Collection @ kmou

제정되고, 관련 연구가 진행되고 있으나, 국내의 경우 아크차단기가 일부 유통되고 있을 뿐이며, 실제 적용사례는 미미한 실정이다.

국내의 전기화재는 과부하/과전류, 누전, 접촉불량 및 아크/스파크 등의 원인으로 인한 것이며, 배선 및 배선기구 상에서 화재를 유발하는 이상 신호는 전압, 전류, 온도 및 빛 등 다양한 형태로 발생한다. 이 같은 다양한 파라미터의 검출 및 분석을 통한 직렬아크에 관한 연구가 이루어지고 있으며, 이중 아크전류 분석에 관한 연구가 가장 많이 수행되고 있다.

국내에서 진행되고 있는 직렬아크와 관련된 연구로는 아크 전류 신호를 분석하여 아크 발생을 판단하고, 고속도로 차단하는 연구가 많이 진행되고 있다. 아크 전류 신호의 최대치, 실효치, 고조파, 순시값, 실효값, 왜형률, 주파수, shoulder 유지시간 등 다양한 파라미터의 검출하며, FFT, 웨이블렛 변환 및 퍼지로직 등을 사용하여 정상 상태와 아크 상태를 구별하고 있다[17]~[22]. 그 외 아크 발생 시 나타나는 고주파 노이즈의 수신전파감도를 이용하는 검출법, 전압강하 검출법 등에 관한 연구가 진행되고 있으나, 국내의 경우 아직 실생활에의 적용은 미미한 실정이며, 아크 유사 신호의 오검출을 위해 다양한 선로 및 부하조건에 대한 실험이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다[23]~[24].

국외에서도 국내와 비슷하게 다양한 전류 파라미터 검출 및 분석을 통한 AFCI와 AFDD 개발에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 가정에서 사용하는 다양한 부하의 특성을 neural network를 이용하여 학습시켜 아크사고 발생을 감지한 연구도 진행되고 있으며, 최근에는 AC 뿐만 아니라 DC 태양광 설비 및 스마트 그리드 설비에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다[8],[9],[25]~[27].

이와 같이 국·내외 적으로 직렬아크 검출 및 전기화재를 예방하기 위



Collection @ kmou

하여 이상전압, 이상전류, 방사 고주파 노이즈 등을 다양한 센서로 측정하고 분석하는 연구가 진행되고 있으나, 대부분 UL1699의 아크발생장치를 사용하여 구리전극과 탄소전극의 접촉부에서 아크를 발생시켜 분석하였다.

본 연구에서는 국내의 저압 배선계통 발생하는 화재원인 중, 직렬회로에서 발생하는 전기사고의 사례 분석을 통해 실제 발생할 수 있는 결함으로 직렬아크 방전을 모의하였으며, 신호의 분석을 통해 최적의 아크 검출 필터를 설계하였다.

저압 배선계통에서 부하의 영향으로 발생하는 유사 아크 신호의 분석을 통해 효과적으로 아크 방전을 판별할 수 있는 방법을 제시하였으며, 병렬 부하사용에 따른 적용시험, 오동작 시험 및 선로 임피던스의 영향에 따른 특성분석을 수행하였다. 또한 부하에 따른 직렬아크 방전의 위상특성을 분석하였다. 연구 결과는 저압 배선계통에서 직렬아크 방전에 의한 화재예방을 위한 감지기법 개발과 계통에서 직렬아크 방전이 발생하는 선로의 추정 등에 활용이 가능하다.



Collection @ kmou

# 제 2 장 이 론

## 2.1 아크 방전

아크 방전이란 양극과 음극을 대립시킬 때 양 전극의 전위차로 인해 공기 중에 발생하는 방전의 일종으로서, 직류 30 kV/㎝, 교류 21 kV/㎝와 같은 공기의 절연내력 이상으로 전위경도(V/㎝)를 가하는 경우 발생한다.

아크가 발생하면 두 전극 사이의 분자들은 부분적으로 또는 전체적으로 해리되어 이온화가 되며, 전자들은 고속으로 이동하고 에너지를 얻는다. 다른 입자들과 탄성충돌을 일으켜 에너지를 전달하여 지속적으로 발생하게 되며, 전압·전류의 크기, 지속시간 등에 따라 온도와 기하학적인 특성이 변하기 때문에 동일한 형태를 가지지 않는 특징이 있다[25].

아크가 발생할 때 전극 사이에는 $i^2Rt$와 같은 주울열이 발생하며, 중심온도는 5,000~15,000 ℃ 정도이다. 아크 발생 시 질소($N_2$)와 산소($O_2$)가 4:1 의 비율로 존재된 공기의 비율도 변하게 된다. 아크 발생 시 수반된 고온의 에너지에 따라 온도가 점차 증가하면서 2,000 K~3,000 K의 범위에서는 $O_2 \rightarrow 2O$, 4,000 K~5,000 K 범위에서는 $N_2 \rightarrow 2N$으로 반응이 일어나고, 2000 K~6,000 K 범위에서는 질소 분자와 산소분자로부터

$$N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO \tag{2.1}$$

$$2NO + O_2 \leftrightarrow 2NO_2 \tag{2.2}$$

의 화학반응이 발생하며, 3,000K에서 $NO$는 대략 14 %가 발생한다. 이후 약 9,000 K에서

$$N \rightarrow N^+ + e^- \tag{2.3}$$



Collection @ kmou

$$O \rightarrow O^{+} + e^{-} \tag{2.4}$$

와 같이 첫 번째 이온화가 발생하고, 약 20,000 K에서는 아래 식 2.5와 같이 두 번째 이온화가 발생하며, $N^{+}$의 수는 감소하고, $N^{++}$ 이온이 형성되며, $e^{-}$ 전하가 추가 방출된다[31].

$$N^{+} \rightarrow N^{++} + e^{-} \tag{2.5}$$

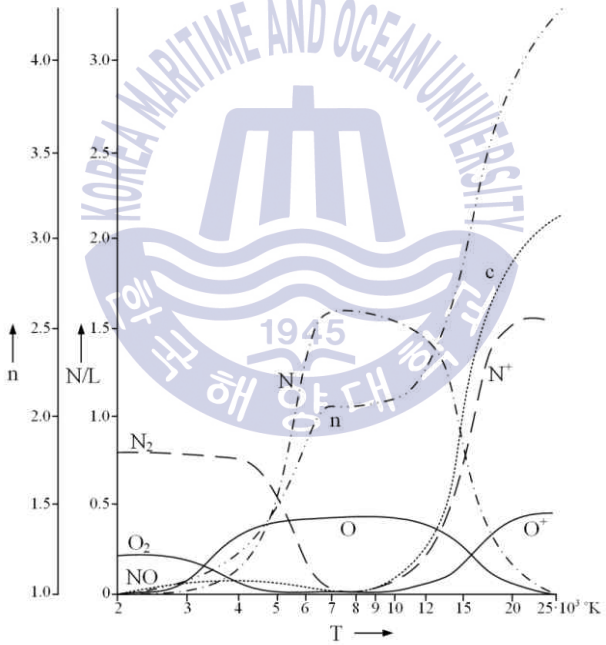


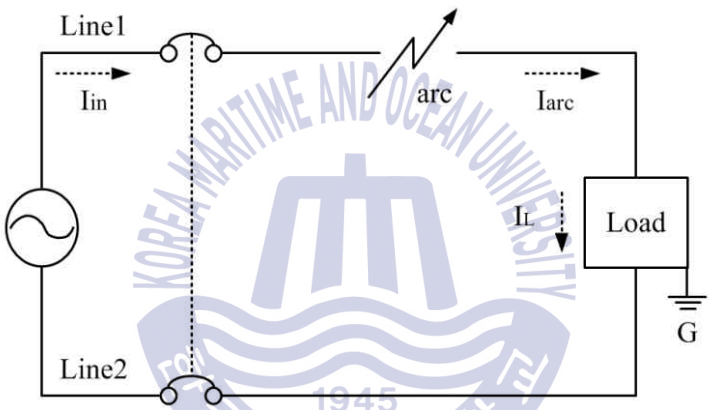

그림 2.1 대기압에서 온도에 따른 공기의 분해 및 이온화[31]
Fig. 2.1 Decomposition and ionization of air depending on temperature at one atmosphere pressure

전기회로에서 발생하는 아크는 고장전류의 경로에 따라 크게 직렬아크 방전과 병렬아크 방전으로 나눌 수 있다[25]~[29]. 직렬아크는 노화된 전선

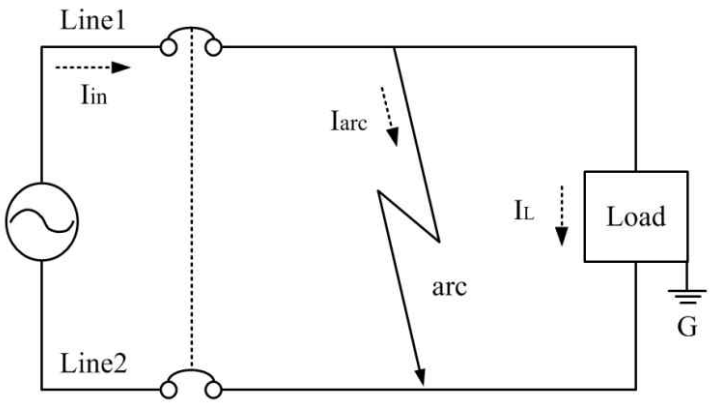


Collection @ kmou

을 잡아당기거나 콘센트·터미널의 접속이 느슨하게 고정된 경우 또는 금속성 물체에 전선이 찢겨지거나 잦은 진동에 의해 전선의 소선이 일부 절단된 경우와 같이 단일 도체의 불완전한 연결부위에서 발생한다[8]~[14]. 이는 그림 2.2(a)와 같이 부하와 전기적으로 직렬로 연결되기 때문에 아크전류가 부하에 의해 제한되므로 병렬아크에 비해 에너지 레벨이 작은 특징이 있다.



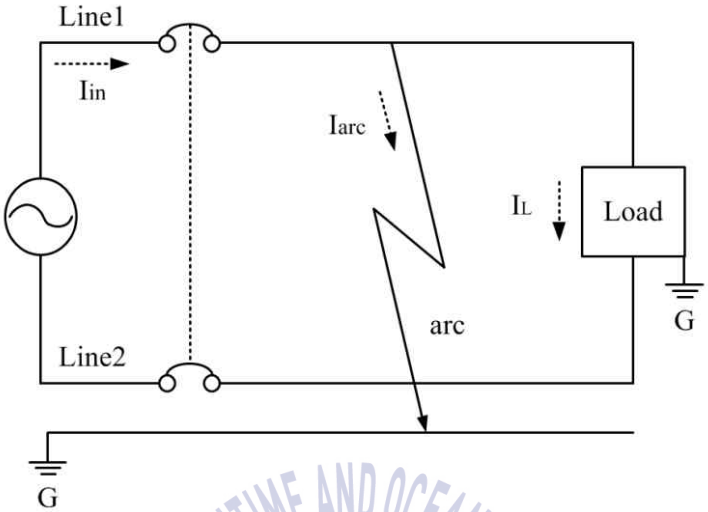

(a) 직렬아크




(b) 병렬아크



Collection @ kmou




(c) 접지아크

그림 2.2 아크의 종류
Fig. 2.2 Types of arc

직렬아크 발생 시 선로에 흐르는 전류는 식 2.6에서와 같이 부하전류와 동일하며, 전류의 크기가 작아 현재 일반적으로 사용되는 그림 2.3의 특성을 갖는 과전류 차단기 및 누전 차단기로는 보호하지 못하는 특징이 있다. 또한 부하기기의 동작 특성으로 아크가 발생하지 않을 경우에도 아크 신호와 유사한 신호가 발생하며, 오인되는 경우가 많아 아크고장 발생 시 정확한 차단에 한계가 있다.

$$I_{in} = I_{\mathrm{arc}} = \frac{V_{in} - V_{\mathrm{arc}}}{Z} = I_L \tag{2.6}$$

여기서, $I_{in}$은 입력전류, $I_{\mathrm{arc}}$는 아크전류, $I_L$은 부하전류, $V_{in}$은 입력전압, $V_{\mathrm{arc}}$는 아크전압, $Z$는 회로의 임피던스이다.



Collection @ kmou

병렬아크는 배선이나 전원 코드에서 눌림, 꺾임 등이 발생하여 절연피복이 손상되거나, 내부 절연체가 열화 또는 외열에 의해 소실되어 다른 극성을 갖는 상도체와 중선선(Line - to - neutral)이 접촉하는 경우에 발생하는 아크로서, 그림 2.2(b)와 같이 나타낼 수 있다. 병렬아크 발생 시 선로에 흐르는 전류는 단지 선로의 임피던스와 아크 발생점의 아크 임피던스에 의해 결정되며, 직렬아크와는 대조적으로 수 십 암페어의 대전류가 흘러 상대적으로 발화 위험성이 크다. 하지만 아크의 지속시간이 짧아 현재 일반적으로 사용되는 그림 2.3의 특성을 갖는 과전류 차단기 및 누전 차단기로는 보호하지 못하는 특징이 있으며, 병렬아크 및 접지아크에 대한 아크차단기도 꾸준히 연구되고 있다[30]. 다만 식 2.7에서와 같이 입력전류 $I_{in}$이 $I_L$에 비해 크기가 상당히 크기 때문에 전류를 검출 파라미터로 이용하면 직렬아크에 비해 비교적 쉽게 검출할 수 있다.

$$I_{in} = I_{arc} + I_L \tag{2.7}$$

그림 2.2(c)는 병렬아크의 일종인 접지아크를 나타낸 것으로서, 상도체의 절연피복이 손상되어 접지(Line - to - ground)나 금속구조물 등과 접촉하여 의도하지 않은 도전경로가 형성되었을 경우 발생하는 지락사고이다.

접지아크 발생 시 선로에 흐르는 전류는 병렬아크와 같이 선로의 임피던스와 아크 발생점의 임피던스에 의해 결정되며, 일반적으로 주택 내부에서 발생하는 경우 누전차단기에 의해 대부분 보호될 수 있으나, 상도체에서 접지측으로 Tracking과 같은 미소방전이 발생하여 접지아크가 진행되는 경우에는 기존의 차단기로 보호하지 못하는 특징이 있다.



Collection @ kmou

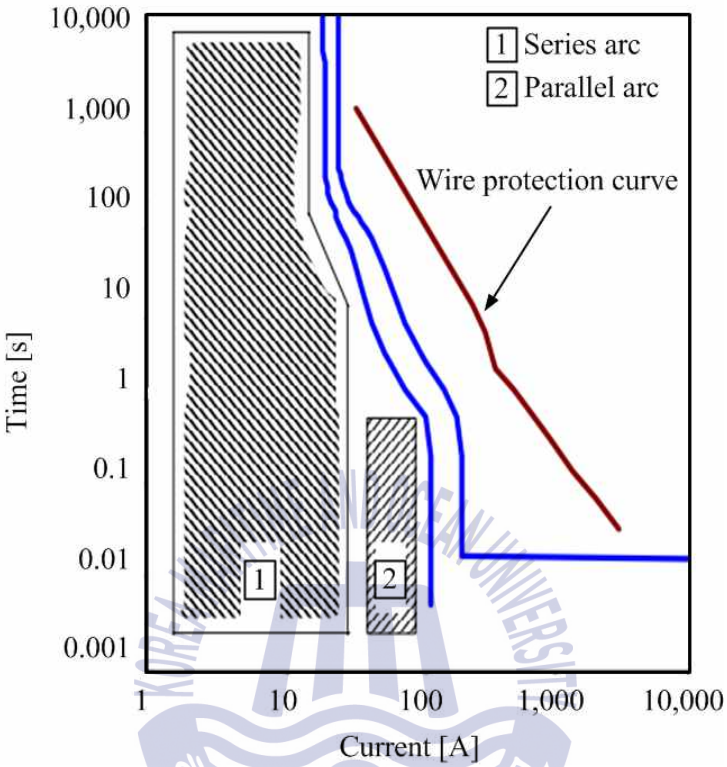
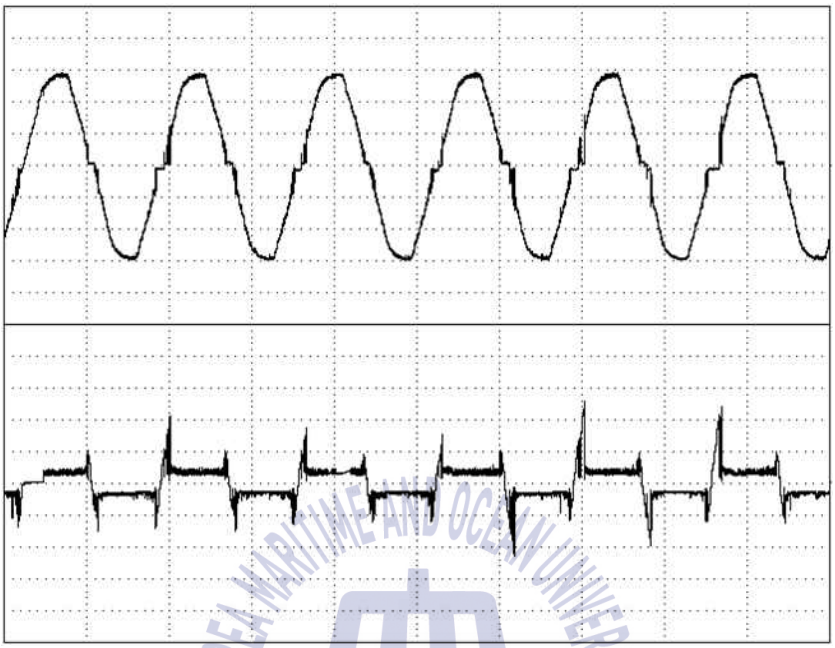



그림 2.3 차단기의 시간-전류 특성
Fig. 2.3 t-I characteristics of circuit breakers

그림 2.4는 일반적인 저항성 부하에서 직렬아크 방전 발생 시 부하양단의 전압 파형과 아크양단의 전압 파형을 나타낸 것이다. 아크 발생 시 부하양단 전압은 60 Hz 전원전압 신호의 영점 부근에서 지연(Shoulder)이 발생하며, 영점지연 시작과 끝 지점에서 아크 신호가 중첩되어 나타난다. 아크양단에서 측정한 전압 파형은 아크 발생 시 임피던스의 급격한 변화로 순간적으로 상승, 감소하는 구형파 형태를 나타내며, 이와 같은 순간적인 전압의 변화에 의해 아크의 고주파 성분이 발생하게 된다.



Collection @ kmou



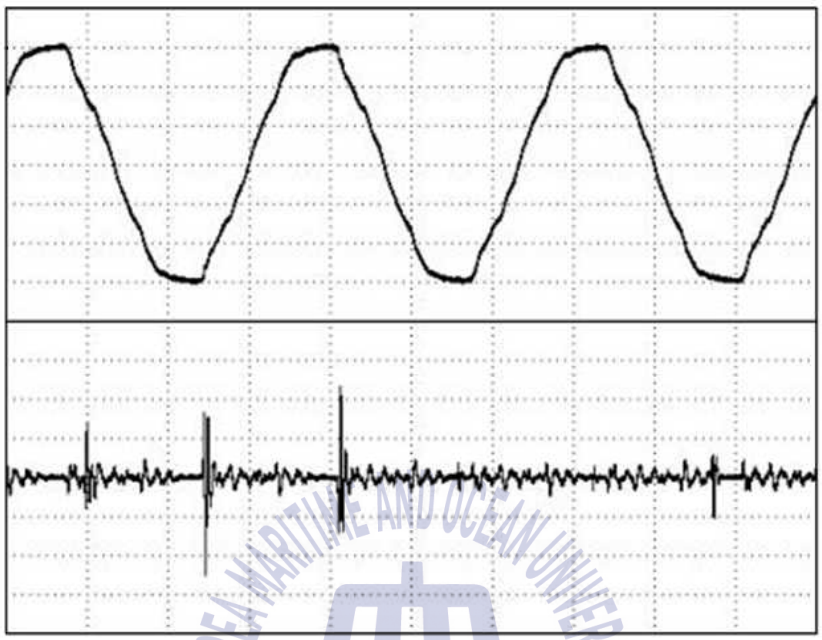
상 : 부하 양단 [100 V/div, 10 ms]
하 : 아크 양단 [ 50 V/div, 10 ms]

그림 2.4 직렬아크의 전압 파형의 예
Fig. 2.4 Typical voltage waveform of a series arc

그림 2.5는 대표적인 저항성 부하인 1 kW 전열기 부하에서의 직렬아크 발생 시, 전원전압 신호와 전원전압 신호를 제외한 직렬아크 전압 신호의 측정결과를 나타낸 것이다. 220 V 전압 파형에서는 상대적으로 미세한 직렬아크 신호를 확인하기 어려우나, 적절한 주파수 대역의 필터를 적용하여, 60 Hz 전원전압 신호를 제외하면 펄스 형태의 직렬아크 전압 신호를 검출할 수 있다. 전압검출 방법은 부하의 용량에 관계없이 아크 신호를 검출 할 수 있는 장점이 있으나, 선로에 직접 접속해야 하므로 선로와 검출장치 사이의 절연문제와 선로와 검출장치의 접지문제를 고려해야 하는 단점이 있다.



Collection @ kmou



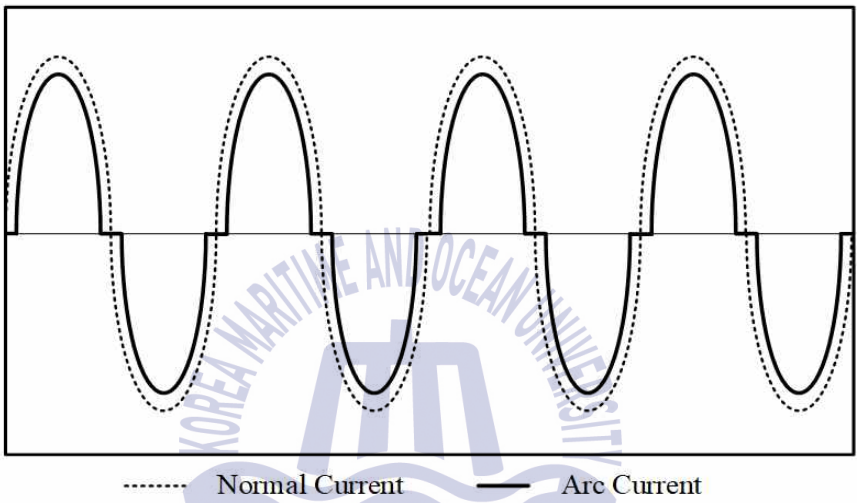
상 : 전원 전압 [100 V/div, 5 ms/div]
하 : 필터 출력 [ 10 V/div, 5 ms/div]
그림 2.5 직렬아크의 전압 신호 예
Fig. 2.5 An example of voltage signal of a series arc

그림 2.6은 전형적인 직렬아크 방전의 전류 파형과 부하를 다르게 하여 실제 측정한 전류 파형의 예를 나타낸 것으로, 직렬아크가 발생하는 동안은 전압강하에 의해 정상전류보다 작은 특징이 있다. 또한 아크전류는 방전의 개시 및 소멸로 인하여 영점부근에서 약 200~300 μs의 영점지연(Shoulder)이 발생하며, 부하에 따라서 영점지연이 발생하는 시작점과 끝점에서 급격히 전류가 변화하는 부분이 발생하고, 동 부분에 고주파 성분이 포함되는 특징이 있다. 이 같은 직렬아크 방전의 전류검출방법에는 고주파 변류기(HFCT)를 이용하여 한 선에 흐르는 전류변화를 측정하는 방법과 영상변류기(ZCT)를 이용하여 아크 발생 시 고주파 변화분만 측정하는 방법이 있으며, 전류검출방법은 비접촉식 검출방법으로 전압 신호

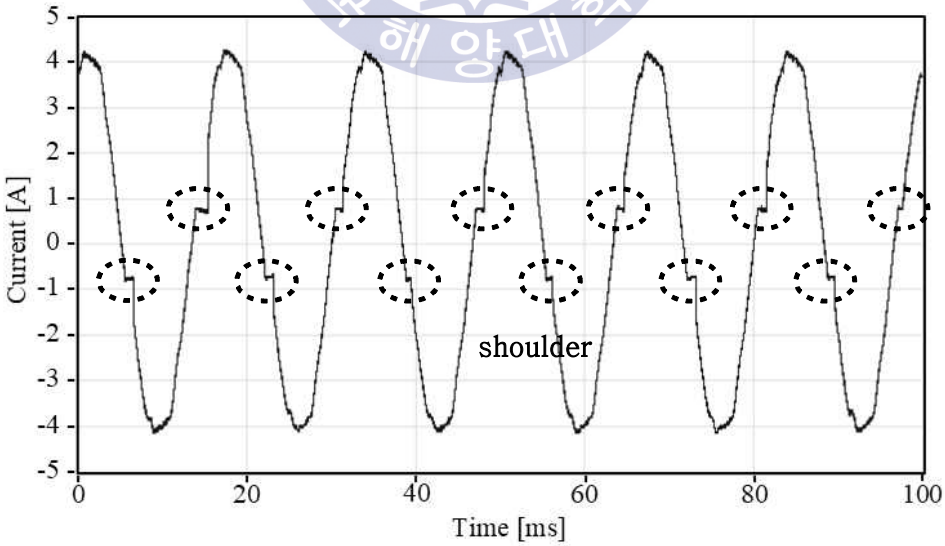


Collection @ kmou

검출방법과 비교해 절연에 신경을 쓰지 않아도 되는 장점이 있으나, 실제 검출장치를 개발할 경우, 고주파 변류기와 같은 전류센서의 크기, 가격 등을 고려할 필요가 있다.



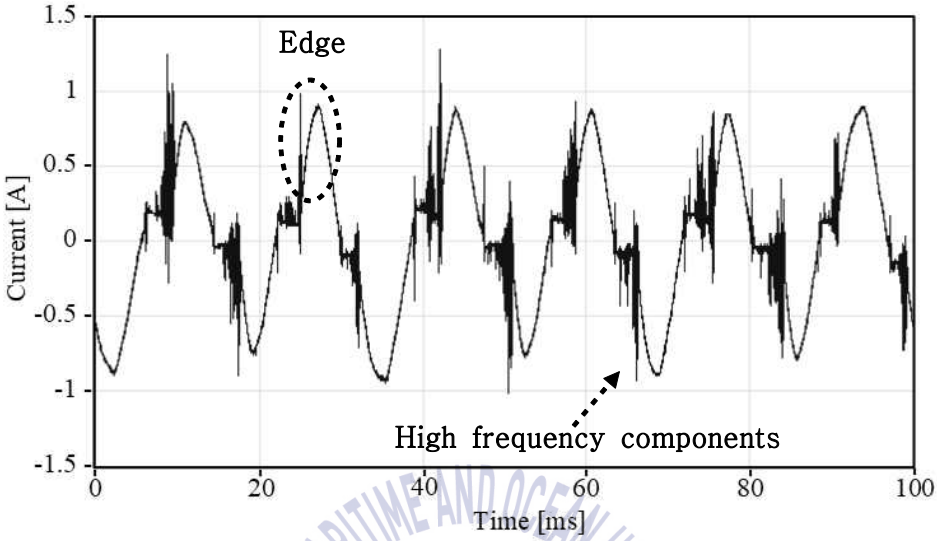

(a) 정상 전류와 아크 전류




(b) 저항부하에서 아크 발생 시



Collection @ kmou




(c) SMPS에서 아크 발생 시

그림 2.6 직렬아크의 전류 파형
Fig. 2.6 Current waveforms of a series arcs

## 2.2 직렬아크에 의한 발화

직렬아크는 부하와 직렬로 연결된 하나의 선로에서 압착불량, 부분 단선 및 접속부의 느슨해짐 등으로 인하여 발생하며, 전선에서 아크가 발생하면 방전시 발생한 고온의 열에 의해 표면이 탄화되고 주위의 산소와 반응하여 산화물을 형성한다.

그림 2.7은 전선과 단자 접속부에서 불완전한 접속을 모의하여, 방전의 형태와 발생시의 온도변화를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 전선과 단자의 접속부에서 접촉불량이 발생하게 되면 접촉저항이 증가하여 수 초~수십 초 동안 미소방전이 발생하면서 접촉부의 온도가 증가한다. 미소방전이 지속적으로 반복되면 주변의 온도가 점점 증가하며, 동 과정에서 접촉부 표면 및 주변에서 국부적으로 탄화가 발생하고, 이후 국소적인 열점



Collection @ kmou

(Hot-spot)이 발생하여 산화물 증식 과정이 발생하기도 한다. 온도가 지속적으로 증가하여 약 300 ℃ 이상에서는 전선의 절연피복에서 열분해가 진행되며, 이후 절연피복 등 주변의 가연물에 직접 발화되거나, 절연피복이 소실되면서 병렬아크 및 접지아크가 발생하여 화재가 발생하게 되며, 이 같은 불완전한 접촉에 의한 화재 발생 메커니즘을 그림 2.8에 정리하였다.

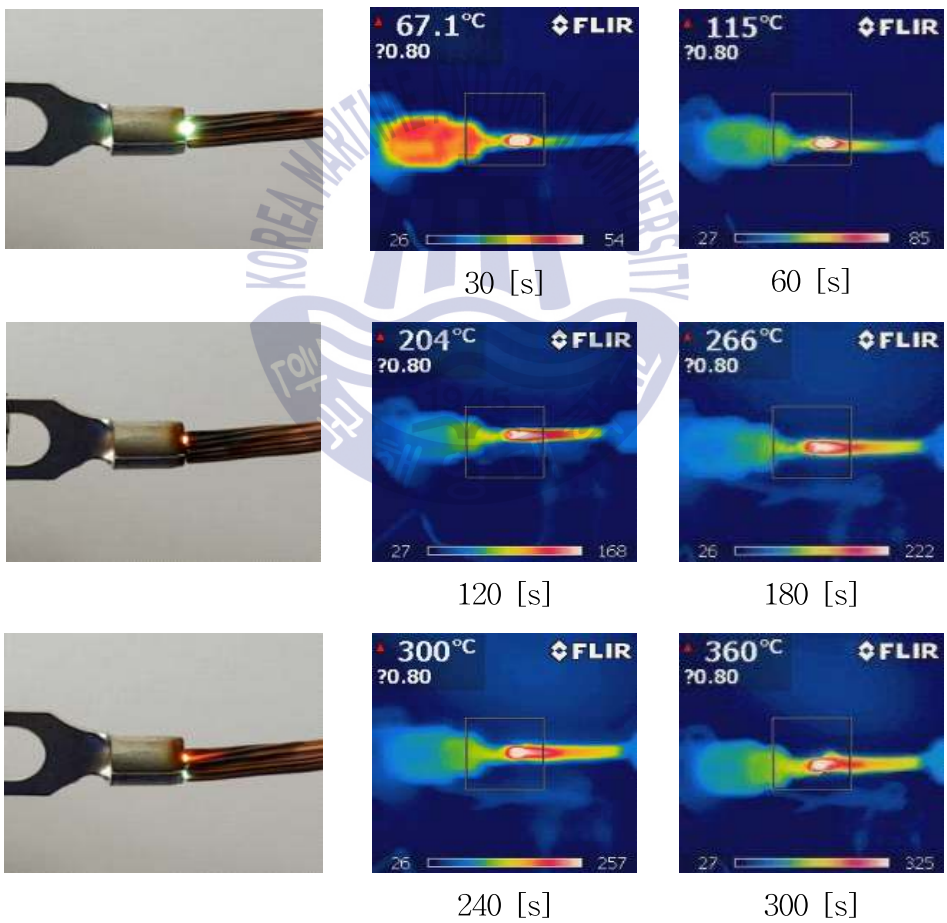



그림 2.7 불완전 접속 상태의 온도변화
Fig. 2.7 Temperature changes at poor connections



Collection @ kmou

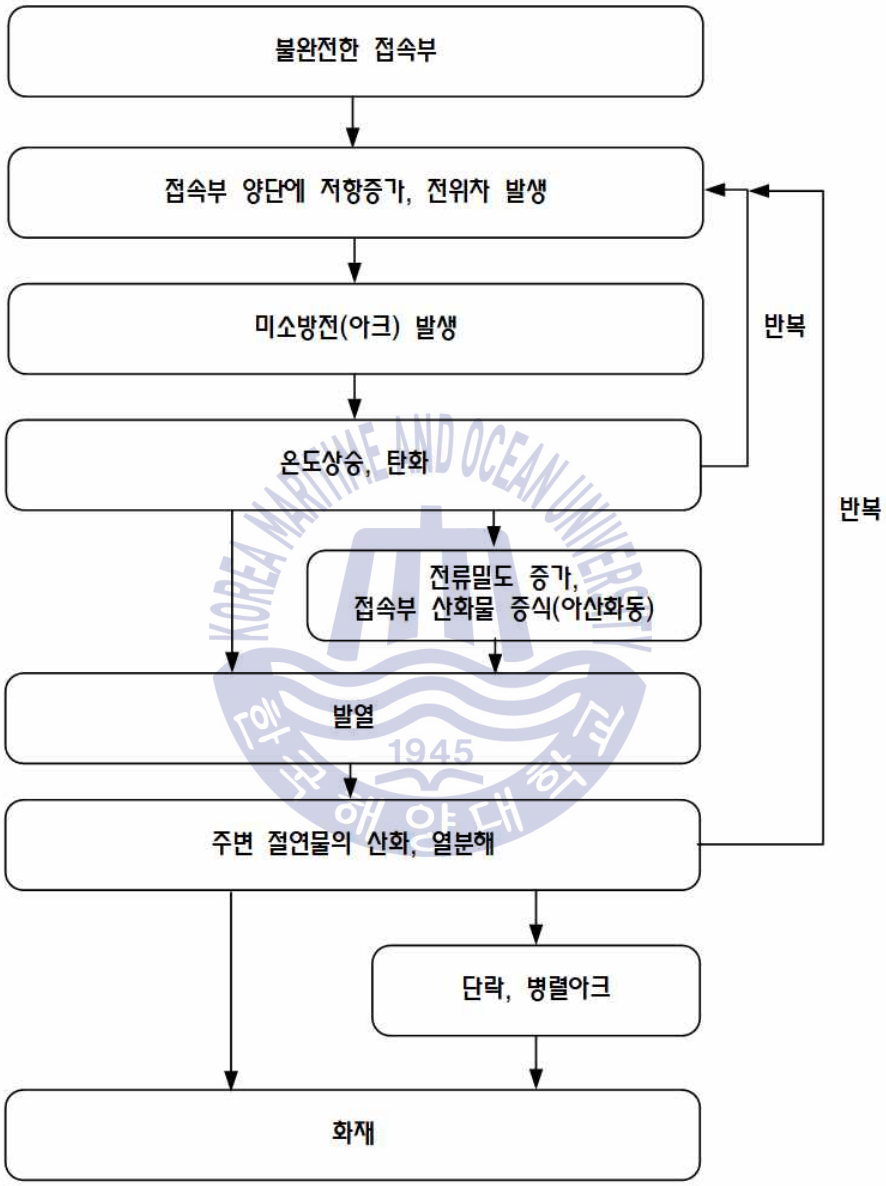



그림 2.8 아크방전의 진전 메커니즘
Fig. 2.8 Progress mechanism of arc discharge



Collection @ kmou

직렬아크에 의해 화재가 발생하는 과정 중, 산화물 증식이 발생하면 산화제이구리($CuO$)가 형성된다. 산화물 증식 발열 현상이 장시간 지속될 경우에는 산화제일구리(아산화동, $Cu_2O$)가 형성되며, 이처럼 루비와 같은 유리형상의 결정 성장이 진행되면서 발열하는 현상을 아산화동 증식(발열) 이라 한다. 아산화동이 형성되는 과정은 식 2.8과 같이 나타낼 수 있다.

$$2Cu + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow Cu_2O \tag{2.8}$$

그림 2.9에는 전선과 전선 접속부에서 접촉불량이 발생하여 형성된 아산화동의 외부 및 내부의 형태를 나타낸 것으로 일반적으로 외부는 검은 빛을 띠고, 내부는 적갈색을 띈다. 분해 시 전선 고유의 소선 형태 등이 나타나지 않으며, 쉽게 부스러지는 특징이 있다.

이와 같은 아산화동 증식 현상은 직렬아크가 발생했다고 해서 항상 일어나는 것은 아니지만 일단 증식이 시작되면 지속적으로 증식이 발생하는 특성이 있으며, 아산화동은 그림 2.10과 같이 상온에서 큰 저항 특성을 가짐으로써, 미소전류에서도 발열이 발생하여 화재로 진행될 위험성이 크다[32]~[34]. 따라서 아산화동 증식이 발생되기 이전 단계에서 아크를 검지하여 경보 및 차단할 필요가 있다.

그림 2.11은 산화물의 증식 발열현상이 발생한 시료를 주사형전자현미경/에너지분산형 X-선 분석기(SEM/EDS)를 통해 분석한 결과이며, 시료에서 결정형태, 구리(Cu)와 산소(O)의 함량비율 등을 비교하여 아산화동 증식 발열 현상이 발생하였는지를 판단한다.



Collection @ kmou

그림 2.9 아산화동의 사진
Fig. 2.9 Photographs of cuprous oxide



Collection @ kmou

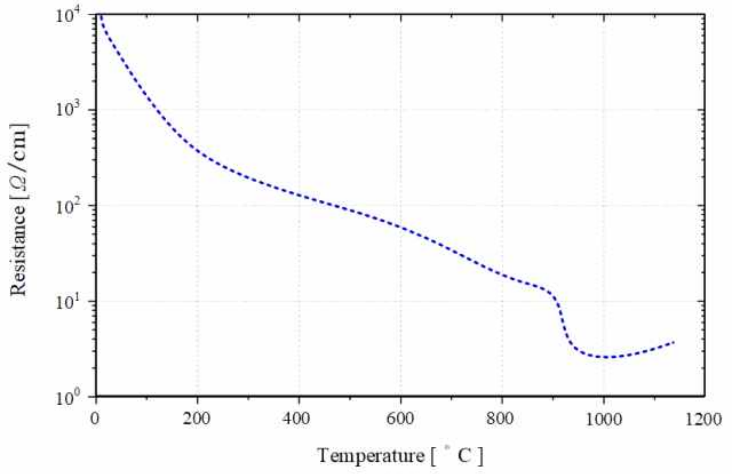
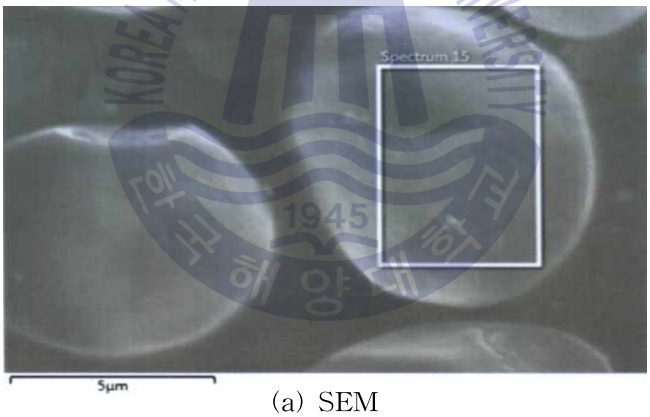
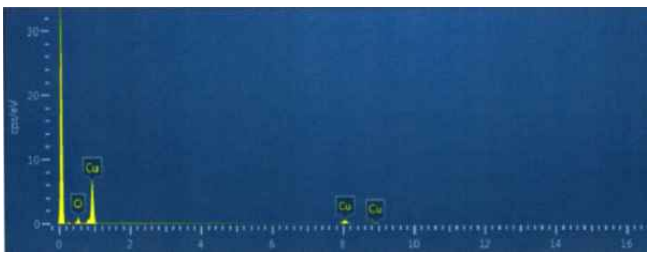



그림 2.10 아산화동의 온도-저항 곡선[33]
Fig. 2.10 Temperature-resistance curve of cuprous oxide




(a) SEM




(b) EDS

그림 2.11 아산화동의 SEM/EDS 분석
Fig. 2.11 SEM/EDS analysis of cuprous oxide



Collection @ kmou

이와 같이 전원과 부하사이에서 접속불량, 접촉불량 및 부분 단선 등이 발생할 경우, 직렬아크가 발생하여 화재로 전전될 수 있으며, 화재 조사 과정에서 확인되는 특이점의 분석을 통해서도 발생원인을 추정할 수 있다.

그림 2.12는 화재현장에서 수거한 직렬아크가 발화원인으로 작용한 사례를 나타낸 것이다. 그림 2.12(a)는 전선과 전선 사이에서 아크가 발생하여 발화원인으로 작용한 사례를 정리한 것으로서, 전선 접속부에서 불완전한 접촉이 발생하는 경우 아크가 발생하여 발화원으로 작용한다.

(a) 전선의 불완전 접속부

(b) 코드의 부분 단선

그림 2.12 직렬아크에 의한 화재 사례(전선-전선)

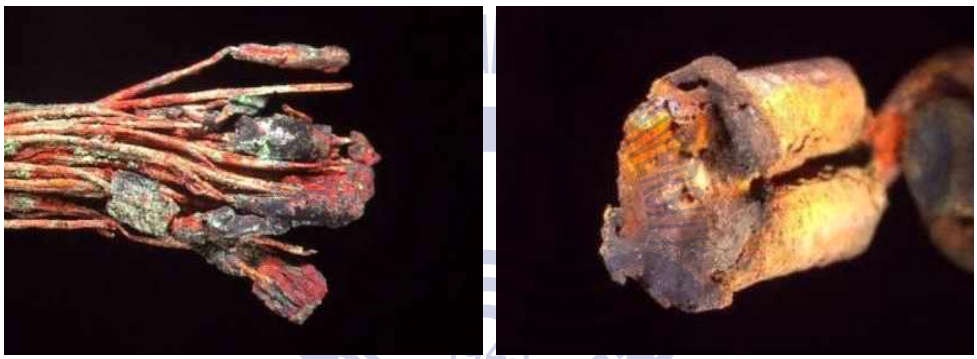
Fig. 2.12 Fire cases by series arc(cord-cord)



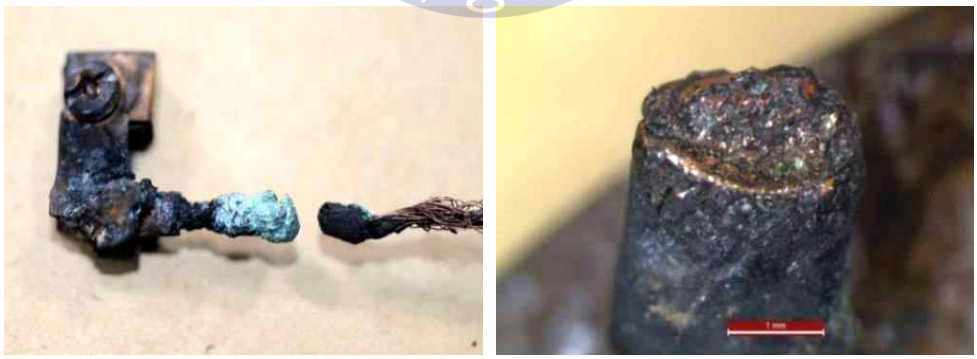
Collection @ kmou

그림 2.12(b)는 코드의 소선이 완전히 단선된 후 단면의 일부가 접촉 상태로 남거나, 구부러짐 및 펴짐이 반복되는 과정에서 소선이 끊어진 경우에 부분 단선이 발생하여 국부적으로 아크가 발생하고 발열량이 증가하여 발화원으로 작용한 사례이다.

그림 2.13(a)와 그림 2.13(b)는 전선-단자와 전선-플러그 접속부에서 아크가 발생한 사례로서, 압착불량, 사용중에 헐거워짐 등에 의한 불완전한 접속부분에서 아크와 국부적인 발열이 발생하여 주변의 가연물을 착화시킨 사례이다.



(a) 전선-단자



(b) 전선-플러그

그림 2.13 직렬아크에 의한 화재 사례(전선-단자)

Fig. 2.13 Fire cases by series arc(cord-terminal)



Collection @ kmou

그림 2.14(a)와 그림 2.14(b)는 단자-단자의 접속부에서 화재가 발생하는 사례의 하나로 콘센트와 플러그의 접속부분에서 접촉불량이 발생한 사례이다. 제조불량 및 반복적인 사용으로 인한 헐거워짐 등으로 인해 접촉부에서 아크와 국부적인 발열이 발생하며, 발생한 열에 의해 주변의 절연물이 열분해하여 화재가 발생한다.

그림 2.12~2.14와 같이 실제 저압 배선계통에서 직렬아크에 의한 발화부위는 크게 3가지로 나눌 수 있으며, 동 논문에서는 전선-전선, 전선-단자 및 콘센트-플러그 접속부에서 아크를 모의하여 직렬아크의 특성을 분석하였다.

(e) 플러그 단자의 전기적 용융흔

(f) 콘센트 칼받이의 전기적 용융흔

그림 2.14 직렬아크에 의한 화재 사례(콘센트-플러그)

Fig. 2.14 Fire cases by series arc(outlet-plug)



Collection @ kmou

# 제 3 장 실험 및 분석

본 연구에서는 저압 옥내 전기설비에서의 사고 원인이 되는 직렬아크 방전 신호를 측정 및 분석하기 위해, 실제 저압 전기설비에서 대표적으로 아크가 발생하는 부위인 전선-전선, 전선-단자 및 콘센트-플러그 접속부를 3가지 결함으로 선정하고, 동 결함에서 직렬아크를 모의하였다. 전극별 및 부하별 실험으로는 이산 웨이블렛 변환을 이용하였으며, 최적의 주파수 대역을 선정하여 대역통과필터를 설계 및 제작하였다. 또한 부하에 따른 신호 에너지와 방전 위상을 분석하였다.

센트-플러그 접속부에서 아크를 발생시켰다. 부하는 일반적으로 저압 배선계통에서 사용하는 전열기, 인버터 및 전동기를 사용하였다.

## 3.1 실험계

일반적으로 직렬아크 실험은 UL1699 및 IEC62606에서 규정된 아크발생장치를 사용한다. 아크발생장치는 고정된 전극과 이동하는 전극으로 구성되어 있으며, 전극은 6 ㎜±0.5 ㎜의 흑연봉과 구리봉을 사용한다[13],[14].

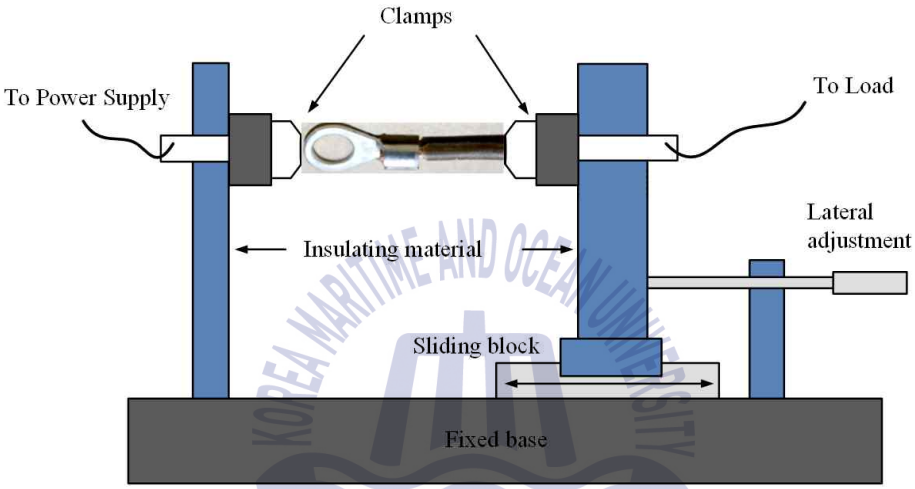
본 논문에서는 전선-전선, 전선-단자 및 콘센트-플러그 접속부에서 발생하는 아크를 모의하기 위하여, 그림 3.1과 같이 결함 접속부를 클램프 형태로 제작하였다. 클램프에 접속된 결함은 마이크로미터를 통해 미세한 거리조절이 가능하며, 전원이 공급된 상태에서 분리시키면 접촉부분에서 순간적 및 지속적 아크가 발생한다.

직렬아크 발생 시 전류 신호를 검출 및 분석하기 위하여 그림 3.2와 같은 실험계를 구성하였다. 부하로 연결되는 전원선에 아크발생장치가 직렬로 연결되며, 아크를 발생시키는 결함으로는 실제 선로에서 아크가 발



Collection @ kmou

생하는 것을 모의하기 위해 그림 3.3과 같이 전선-전선, 전선-단자, 콘센트-플러그 접속부에서 아크를 발생시켰다. 부하는 일반적으로 저압 배선 계통에서 사용하는 전열기, 인버터 및 전동기를 사용하였다.




(a) 구조

(b) 사진

그림 3.1 아크발생장치
Fig. 3.1 Arc generator



Collection @ kmou

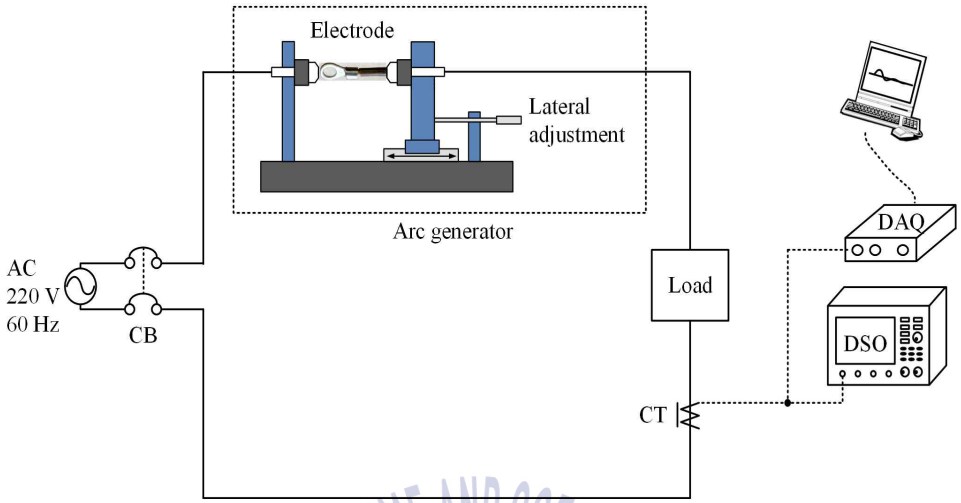



그림 3.2 실험계 구성

Fig. 3.2 Configuration of the experimental setup

직렬아크 신호의 측정은 1~20 MHz의 주파수 대역을 갖는 광대역 변류기, 오실로스코프(샘플링 속도 : 5 GS/s, 주파수대역 : 1 GHz) 및 DAQ (샘플링 속도 : 100 MS/s, 주파수대역 : 50 MHz)를 이용하였으며, LabVIEW 기반의 알고리즘을 설계하여 분석에 적용하였다.

(a) Cord-cord (b) Cord-terminal (c) Outlet-plug

그림 3.3 아크 결함의 종류

Fig. 3.3 Types of arc defects

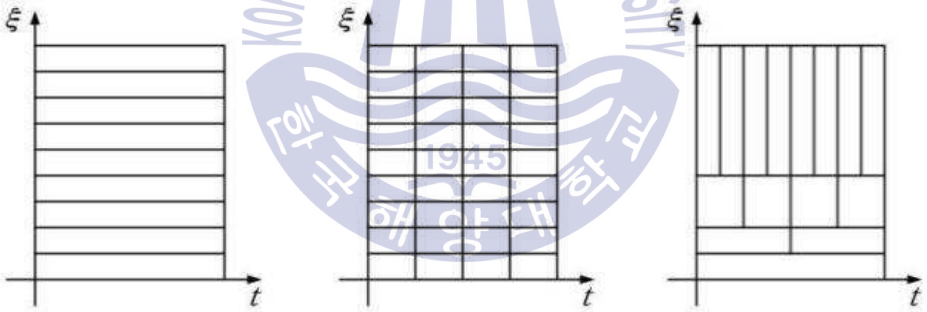


Collection @ kmou

## 3.2 측정 및 분석

### 3.2.1 웨이블렛 변환

일반적으로 전기신호를 분석함에 있어서 적용할 수 있는 알고리즘은 sin과 cosin 함수로 된 지수함수를 기저함수로 하여 시간상의 정보를 주파수 상으로 변환하는 푸리에 변환(Fourier Transform)이나, 푸리에 변환은 f(t)에 대한 전체적인 변환으로서, 아크 신호와 같이 정현파 신호에 국부적인 임펄스, 부하의 노이즈 및 아크 고주파가 포함된 신호에서 부분적인 정보에 대한 주파수 특성을 알 수 없는 한계가 발생한다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 제안된 알고리즘으로 국소 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform)이다.




(a) 푸리에 변환 (b) 국소 푸리에 변환 (c) 웨이블렛 변환

그림 3.4 시간-주파수 영역 분석

Fig. 3.4 Analysis in T-F domain

국소 푸리에 변환은 주어진 신호에 창(Window) 함수를 이용하여 신호의 부분적인 주파수 특성을 표현하는 시간-주파수 변환으로서, 푸리에 변환의 한계를 극복할 수 있는 장점이 있으나, 한번의 연산으로 표현할 수 있는 스케일의 크기가 제한되기 때문에 여러 번에 나누어서 연산을 해야



Collection @ kmou

하는 번거로움이 따르고, 고주파 영역에서 신호의 성분 분리 특성이 취약한 제약이 있으며, 이 같은 한계를 극복하기 위한 알고리즘이 웨이블렛 변환이다.

웨이블렛 변환은 웨이블렛 모함수(Mother Wavelet)를 이용하며 연속 웨이블렛 변환(CWT : Continuous WT)과 이산 웨이블렛 변환(DWT : Discrete WT)으로 나누어진다. 연속 웨이블렛 변환은 식 3.1과 같이 정의된다[35]~[39].

$$CWT_{\Psi}f(a,b) = |a|^{-1/2}\int f(t)\Psi(\frac{t-b}{a})dt \tag{3.1}$$

위 식에서 f(t)는 주어진 신호, Ψ(t)는 웨이블렛 모함수, a는 스케일 파라미터, b는 천이 파라미터로서, 연속 웨이블렛은 스케일되고 천이된 웨이블렛 모함수를 이용하여 신호를 분해한다. 그러나 연속 웨이블렛은 매 순간마다 웨이블렛 계수를 계산하므로 과도한 중복성과 집중적인 계산이 필요하여, 본 논문에서는 다중 해상도 분석(MRA : Multi-resolution Analysis)을 사용하는 이산 웨이블렛 변환을 적용하여 분석하였다.

그림 3.5는 신호를 3층으로 분해하는 다중 해상도 분석의 예로서, 신호는 고역통과필터(HPF)와 저역통과필터(LPF)에 의해 다운 샘플링(Down-sampling) 되며, 상세계수(D : Detail Coefficient)와 근사계수(A : Approximation Coefficient)로 나타난다. 분해된 근사성분(A1)은 다운 샘플링을 사용하여 다음 층의 필터를 다시 통과하여 상세계수(D2)와 근사계수(A2)로 분해되며, 근사계수(A2)는 다음 층에서 다운 샘플링되고, 분해는 최대 분해 레벨까지 계속된다[40]~[44].



Collection @ kmou

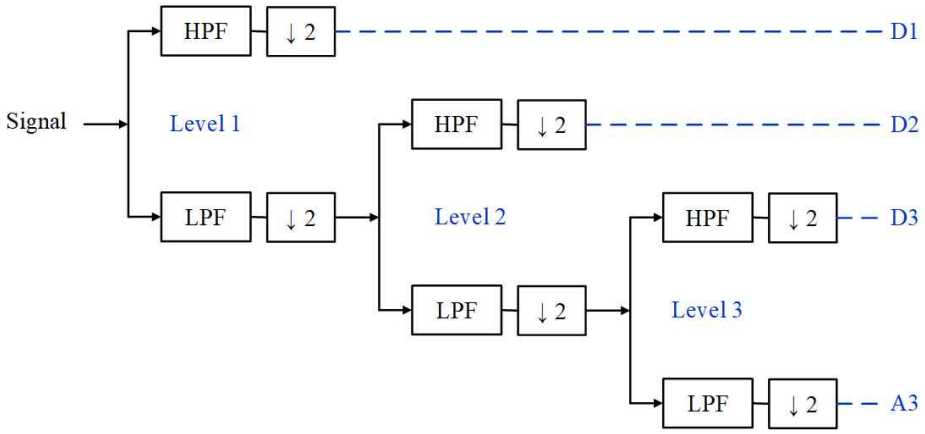



그림 3.5 MRA를 이용한 신호의 3층 분해
Fig. 3.5 Decomposition of a signal into three levels using MRA.

웨이블렛 변환은 신호를 일련의 웨이블렛으로 분해하기 때문에 정확한 분석을 위해 적절한 웨이블렛 모함수의 선택이 중요하다. 본 논문에서는 최적의 웨이블렛 모함수를 선정하기 위해 상관계수(Correlation Coefficient)를 이용하여 검출된 아크 전류 펄스와 웨이블렛의 유사성을 비교하였다. 상관계수는 식 3.2와 같이 정의된다[43]~[45].

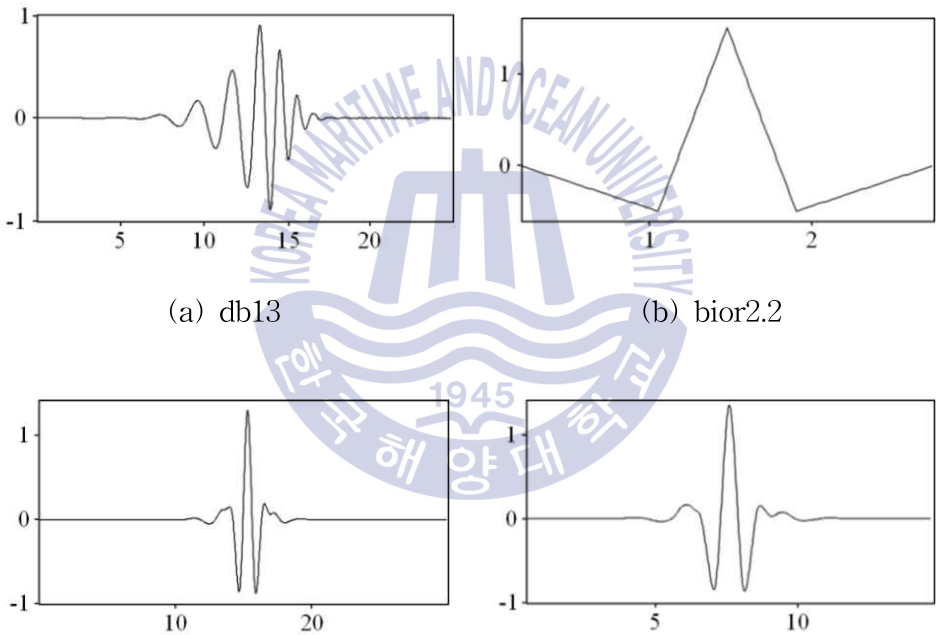
$$CC = \frac{\sum_{i=1}^{N-1}[X(i)-\overline{X}][Y(i)-\overline{Y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-1}[X(i)-\overline{X}]^2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1}[Y(i)-\overline{Y}]^2}} \tag{3.2}$$

여기서 $X(i)$은 단일 아크 펄스이고, $Y(i)$은 웨이블렛 모함수이며 $\overline{X}$와 $\overline{Y}$는 각각의 평균값이다. 상관계수의 값은 0~1 사이로 계산되며, 값이 크면 클수록 두 신호의 유사성이 크다고 판단할 수 있다.



Collection @ kmou

일반적으로 아크 신호 분석에 사용되는 웨이블렛 모함수로는 그림 3.6과 같은 Daubechies (db), Biorthogonal (bior), Coiflet (coif) 및 Symlet (sym) 등이 있다. 본 논문에서는 3가지 결함별, 3가지 부하별로 총 9가지 경우에 검출된 아크펄스와 일반적으로 아크 신호분석에 사용되는 웨이블렛 모함수와의 상관계수를 계산하여 가장 유사성이 큰 웨이블렛 모함수를 선정하였다.




(a) db13 (b) bior2.2

(c) coif5 (d) sym8

그림 3.6 웨이블렛 모함수의 예
Fig. 3.6 Examples of mother wavelet

그림 3.7(a)는 전열기 부하, 전선-전선 결함에서 직렬아크를 발생시켰을 때 검출된 아크 전류 펄스이며, 각각의 웨이블렛 모함수(db2~db14,



Collection @ kmou

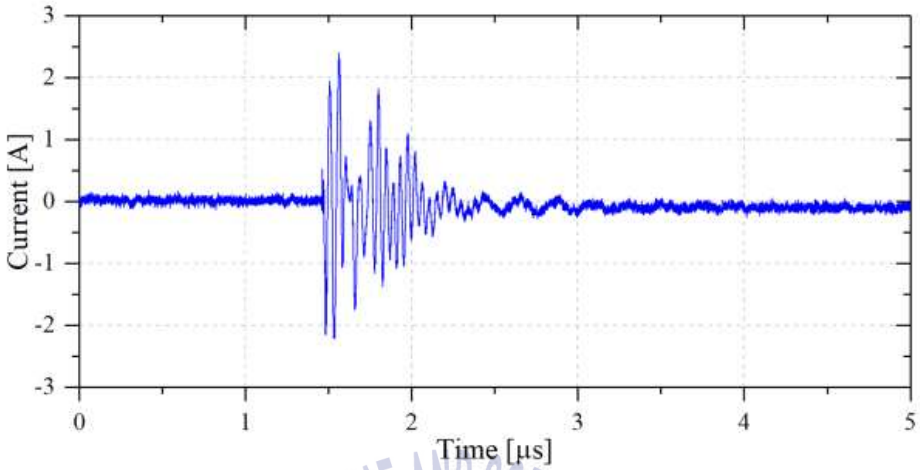
bior1.3~bior6.8, coif1~coif5 및 sym2~sym8)와 아크 펄스와의 상관계수는 그림 3.7(b)에 나타내었다. db12, db13 및 db14에서 전체적으로 높은 상관계수가 계산되었으며, db13이 상관계수가 0.204로 가장 높게 계산됨으로서, 전열기 부하, 전선-전선 결함의 경우 db13이 아크 신호와의 유사성이 가장 높은 것으로 판단되었다. 전열기 부하시, 전선-단자, 콘센트-플러그 접속부에서 직렬아크를 발생시켜 각각의 웨이블렛 모함수와의 상관계수 계산 시, 두 경우 모두 db13이 아크 신호와 유사성이 가장 높은 것으로 나타났다.

동일한 방법으로 SMPS 부하시의 3가지 결함, 전동기 부하시 3가지 결함에서 실험 및 분석을 진행하였으며, 그 결과는 표 3.1과 같다. SMPS 부하시 전선-전선 결함에서는 db12가 상관계수 0.181로서 유사성이 가장 높게 계산되었으며, 그 외 전선-단자, 콘센트-플러그 접속부의 결함에서는 db13이 각각 0.232와 0.236으로서 아크 신호와의 유사성이 가장 높게 계산되었다. 전동기 부하시 전선-전선, 전선-단자 결함의 경우 db13이 각각 0.247, 0.258로 계산되면서 가장 유사성이 높은 것으로 나타났으며, 콘센트-플러그 접속부의 경우 db14가 0.204로서 아크신화와의 유사성이 가장 높은 것으로 나타났다.

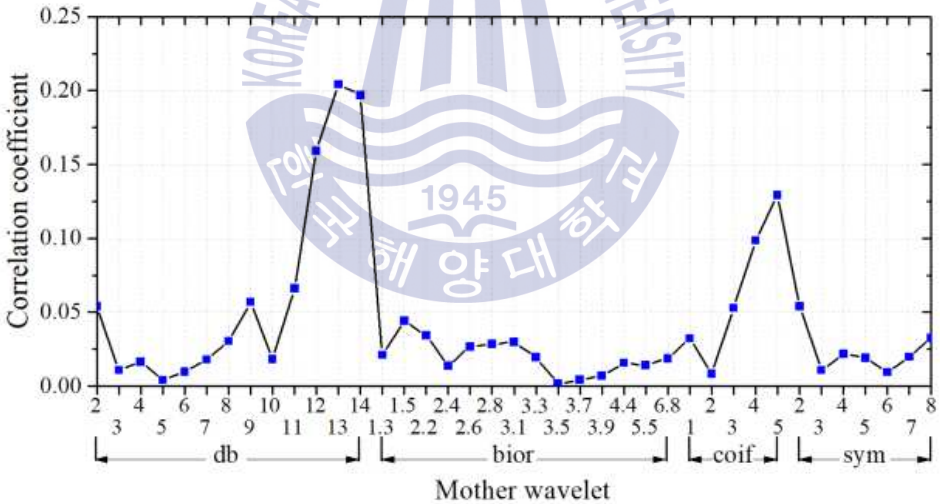
이상의 측정결과, SMPS 부하의 전선-전선 결함과 전동기 부하의 콘센트-플러그 결함에서는 각각 db12, db14의 유사성이 가장 높게 나타났지만, 두 경우 모두 db13의 상관계수도 다른 웨이블렛 모함수에 비해 상대적으로 높은 값을 보였으며, 나머지 7가지의 경우 아크 펄스와의 유사성이 db13에서 가장 크게 나타나는 바, 본 논문에서는 최적의 웨이블렛 모함수로 db13을 선정하였다.



Collection @ kmou




(a) 단일 아크 전류 펄스



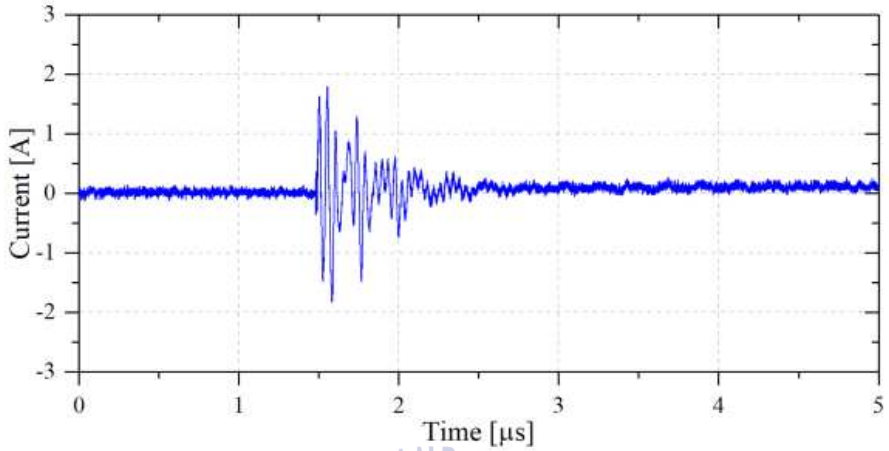

(b) 상관계수 계산 결과

그림 3.7 상관계수 산출(전열기, 전선-전선 결함)

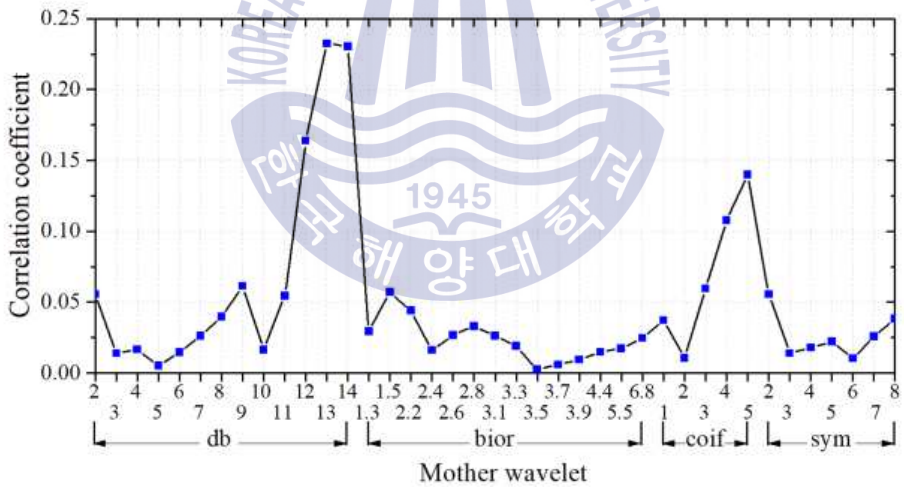
Fig. 3.7 Calculation of correlation coefficient (Resistive load, cord-cord defect)



Collection @ kmou




(a) 단일 아크 전류 펄스



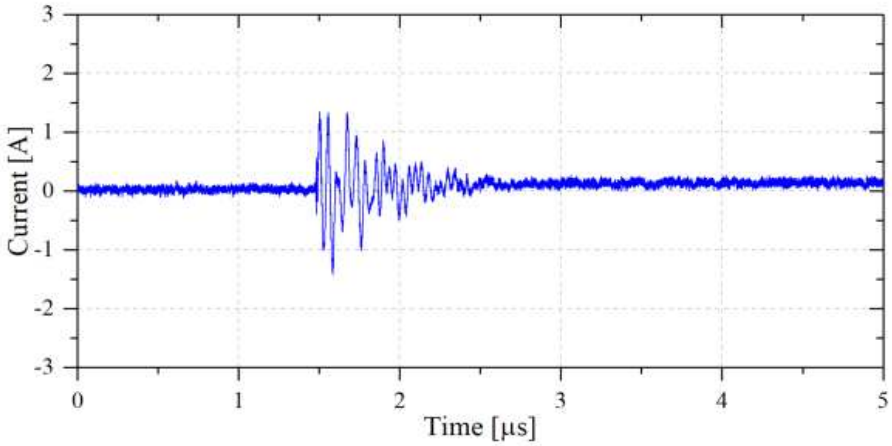

(b) 상관계수 계산 결과

그림 3.8 상관계수 산출(SMPS, 전선-단자 결함)

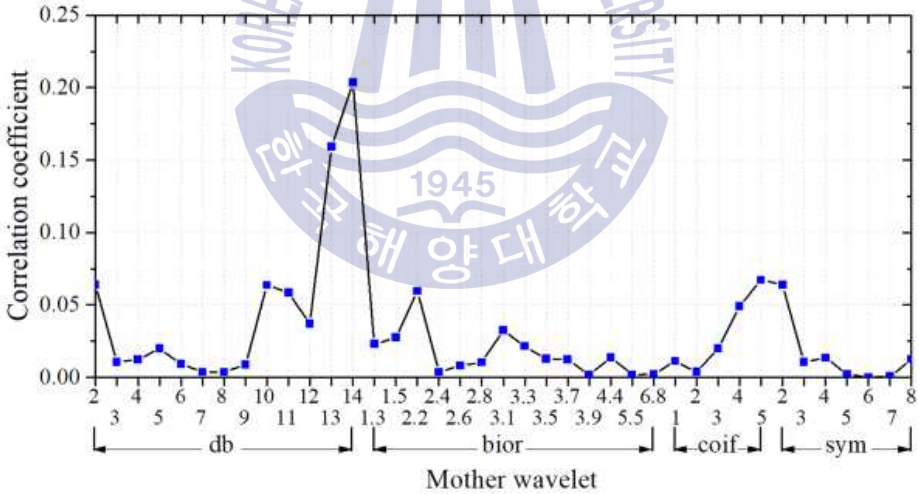
Fig. 3.8 Coefficient calculation of correlation (SMPS load, cord-terminal defect)



Collection @ kmou




(a) 단일 아크 전류 펄스




(b) 상관계수 계산 결과

그림 3.9 상관계수 산출(전동기, 전선-단자 결함)

Fig. 3.9 Calculation of correlation coefficient (Motor load, outlet-plug defect)



Collection @ kmou

표 3.1 최적의 웨이블렛 모함수 선정
Table 3.1 Selection of the optimal mother wavelet

| Load | Arc fault | Optimal mother wavelet | Correlation Value |
|---|---|---|---|
| Resistive load | Cord-Cord | **db13** | 0.204 |
| | Cord-Terminal | **db13** | 0.291 |
| | Outlet-Plug | **db13** | 0.227 |
| SMPS | Cord-Cord | db12 | 0.181 |
| | Cord-Terminal | **db13** | 0.232 |
| | Outlet-Plug | **db13** | 0.236 |
| Motor | Cord-Cord | **db13** | 0.247 |
| | Cord-Terminal | **db13** | 0.258 |
| | Outlet-Plug | db14 | 0.204 |

표 3.1의 결과를 통해 선정한 db13을 웨이블렛 모함수로 이용하여 아크 전류의 분석을 위해 그림 3.10과 같은 이산 웨이블렛 알고리즘을 설계하였다. LabVIEW 기반으로 구성하였으며, 원하는 대역의 신호만을 재구성 할 수 있도록 분해부, 재배열부 및 복원부로 구성하였다. 신호 입력시 분해부에서는 상세계수와 근사계수로 분해되고, 재배열부에서는 각 층의 상세계수와 마지막 층의 근사계수가 추출되며, 추출된 계수를 통해 복원부에서 각 층의 신호를 재구성하여 표시하게 된다.



Collection @ kmou

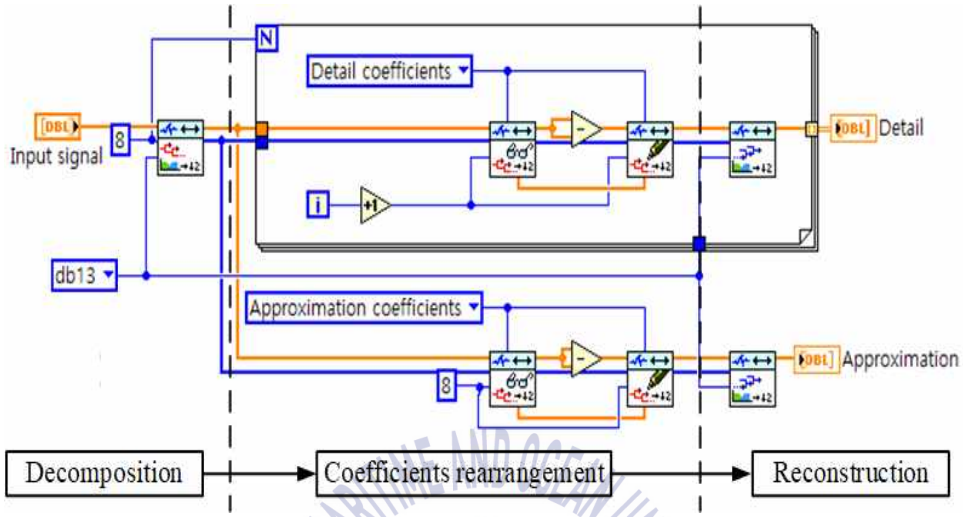



그림 3.10 이산 웨이블렛 변환 알고리즘
Fig. 3.10 DWT algorithm

그림 3.11은 측정한 직렬아크 전류 신호를 이산 웨이블렛을 이용하여 분석하는 과정과 각층 필터의 주파수대역을 나타내었다. 측정한 신호의 샘플링 속도는 1.25 MS/s로서, 1층에서 분석하는 주파수 대역(D1)은 312.5 ~625 kHz이며, 2층에서 분석하는 주파수 대역(D2)은 156.25~312.5 kHz, 3층의 주파수 대역(D3)은 78.125 kHz~156.25 kHz, (D4)는 39.063~78.125 kHz, (D5)는 19.531~39.063 kHz, (D6)은 9.766~79.531 kHz, (D7)은 4.883 ~9.766 kHz이며, 마지막 8층의 주파수 대역(D8)은 2.441 kHz~4.883 kHz 이다. D1~D8, A8의 구성 요소는 다중 해상도 분석법의 최종 결과이며, A1~A7은 분석의 중간 과정이다[46]~[47].



Collection @ kmou

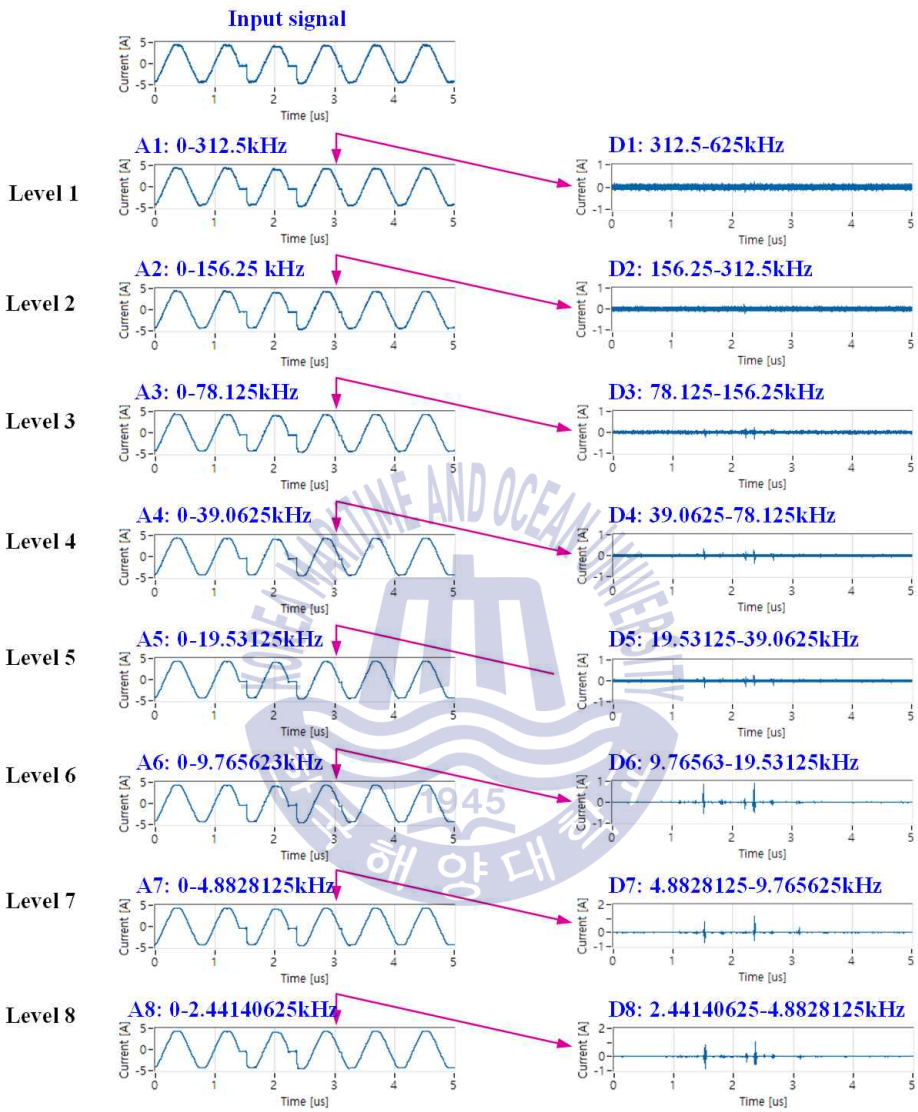



그림 3.11 이산 웨이블렛 분석과 각층의 주파수 대역

Fig. 3.11 Analysis of the DWT and the frequency ranges each level



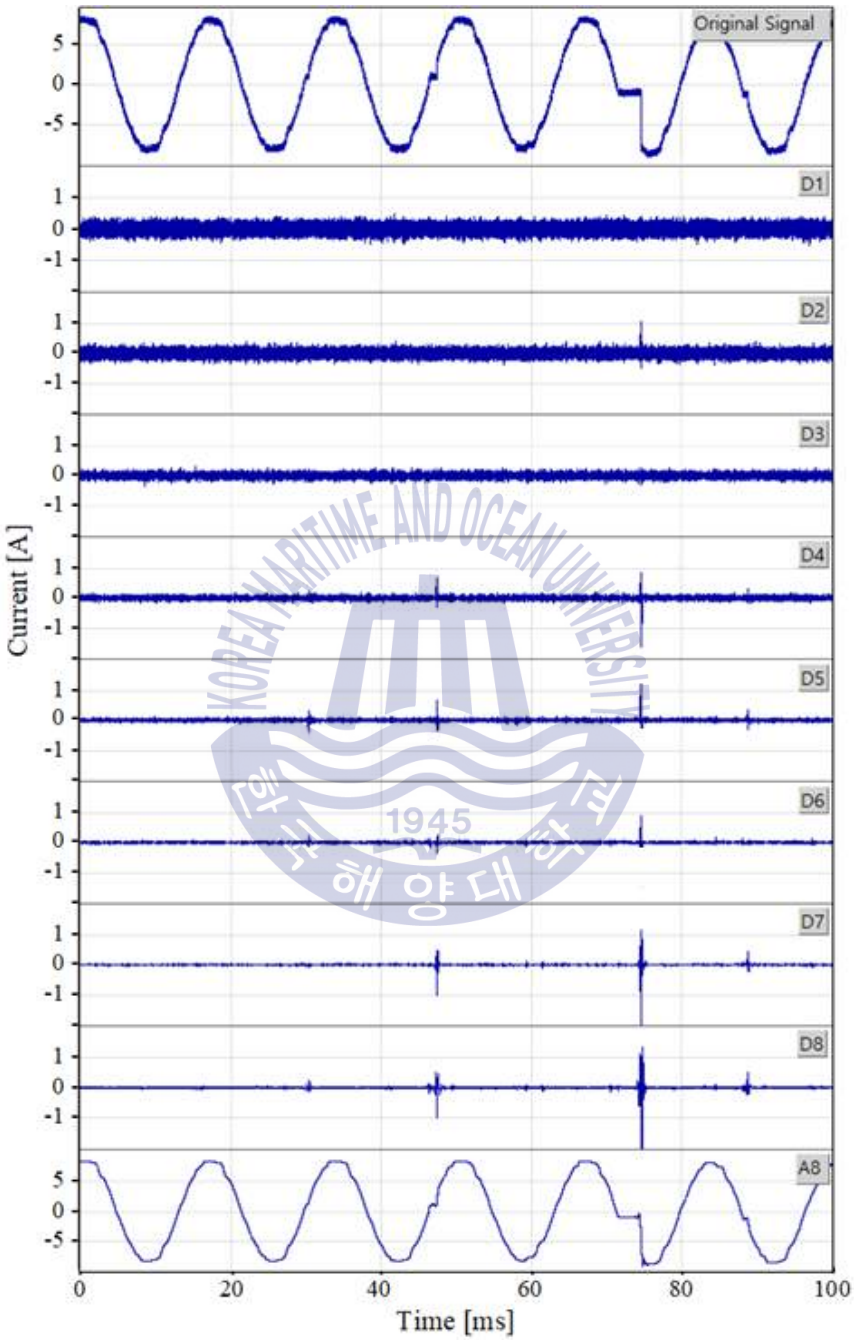
Collection @ kmou

그림 3.12 (a)에는 전열기(부하전류 6A)부하, 전선-전선 결함에서 직렬 아크를 발생시켜 측정한 전류 파형과 이산 웨이블렛을 통해 분석한 파형을 나타내었다. 그림 3.12 (a)의 최상단에는 광대역 변류기를 이용하여 측정된 아크 전류 신호가 나타나며, 그 아래로 상세계수 D1~D8 대역의 아크 신호가 나타난다. 최하단의 A8은 60 Hz 전원 주파수 성분에 D8 대역 이하의 고주파 성분(1 Hz~2.4 kHz)이 중첩되어진 신호이다. D1~D8은 신호의 크기 비교를 위해 동일한 스케일로 설정하였으며, 각각의 아크 신호별로 가장 큰 신호가 검출되고 다른 대역의 신호를 포함할 수 있는 대역을 비교한다. 그림 3.10에서 설계한 알고리즘을 통해 원하는 대역의 신호만을 재구성 할 수 있으며, 그림 3.12 (b)는 3.12 (a)에서 분석한 신호 중, D4, D5, D6, D7 및 D8 대역의 신호를 재구성한 신호이다. 재구성을 통해, 아크 발생 위상, 신호의 형태 및 크기 등을 비교하며, 최적의 주파수 대역을 선정한다.

전열기 부하, 전선-전선 결함에서의 분석 결과, D1과 D3 대역에서는 신호가 포함되지 않거나, 매우 작아 구별이 어려웠으며, D2와 D4~D8 대역(2.4 kHz-39 kHz)에 아크 신호가 포함되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 각각의 아크 신호별로 가장 큰 신호가 포함된 대역은 D5, D7 및 D8 대역이며, D7 및 D8 신호의 재구성 결과 D5 대역 신호의 포함 여부와 크게 차이가 없어 최적의 주파수 대역은 D7과 D8로 선정하였다.



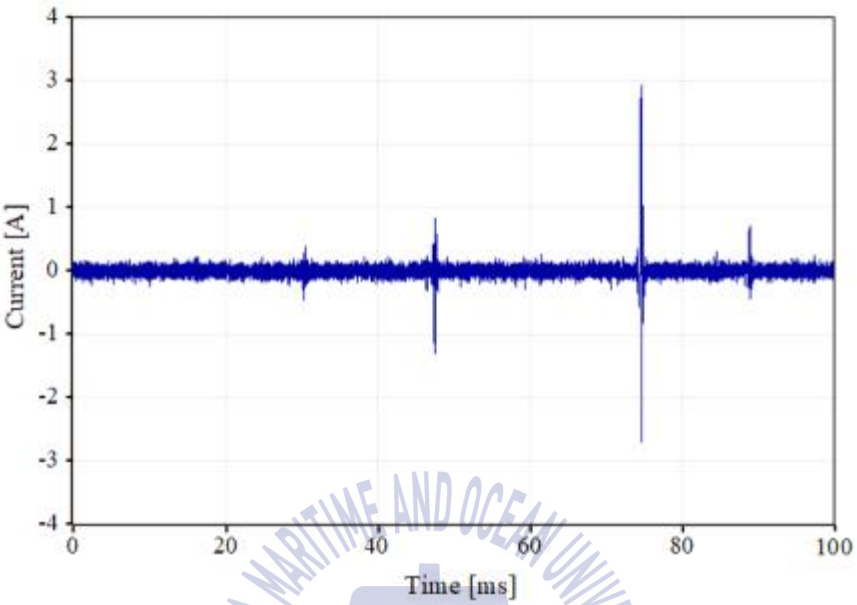
Collection @ kmou




(a) 아크 전류 신호 분해(전선-전선)



Collection @ kmou




(b) D4~D8 신호 재구성

그림 3.12 아크 전류 분석

Fig. 3.12 Analysis of arc current

그림 3.13 (a)에는 전열기 부하(부하전류 6A)가 연결된 상태에서 전선-단자 결함에서 직렬아크 발생을 모의하여 측정된 전류 파형의 이산 웨이블렛 분석 결과를 나타내었다. D5~D8 대역에 대부분의 아크 신호가 포함되어 있으며, 각각의 아크 신호별로 가장 큰 신호가 포함되는 대역은 D6, D7 및 D8 이다. D5 대역에도 일부 큰 아크 신호가 포함되어 있으나, 대부분 D6~D8 대역의 신호에 중첩되어 있으며, 신호 재구성 결과 D5대역의 포함 여부가 크게 차이가 없어 검출 대역의 선정에서 제외하였다. 전열기 부하, 콘센트-플러그 결함에서의 측정 및 분석 결과를 그림 3.13 (b)에 나타내었으며, D1과 D3대역에서는 아크 신호가 거의 포함되지 않고, 가장 큰 신호가 포함되는 대역은 D6, D7 및 D8이다.



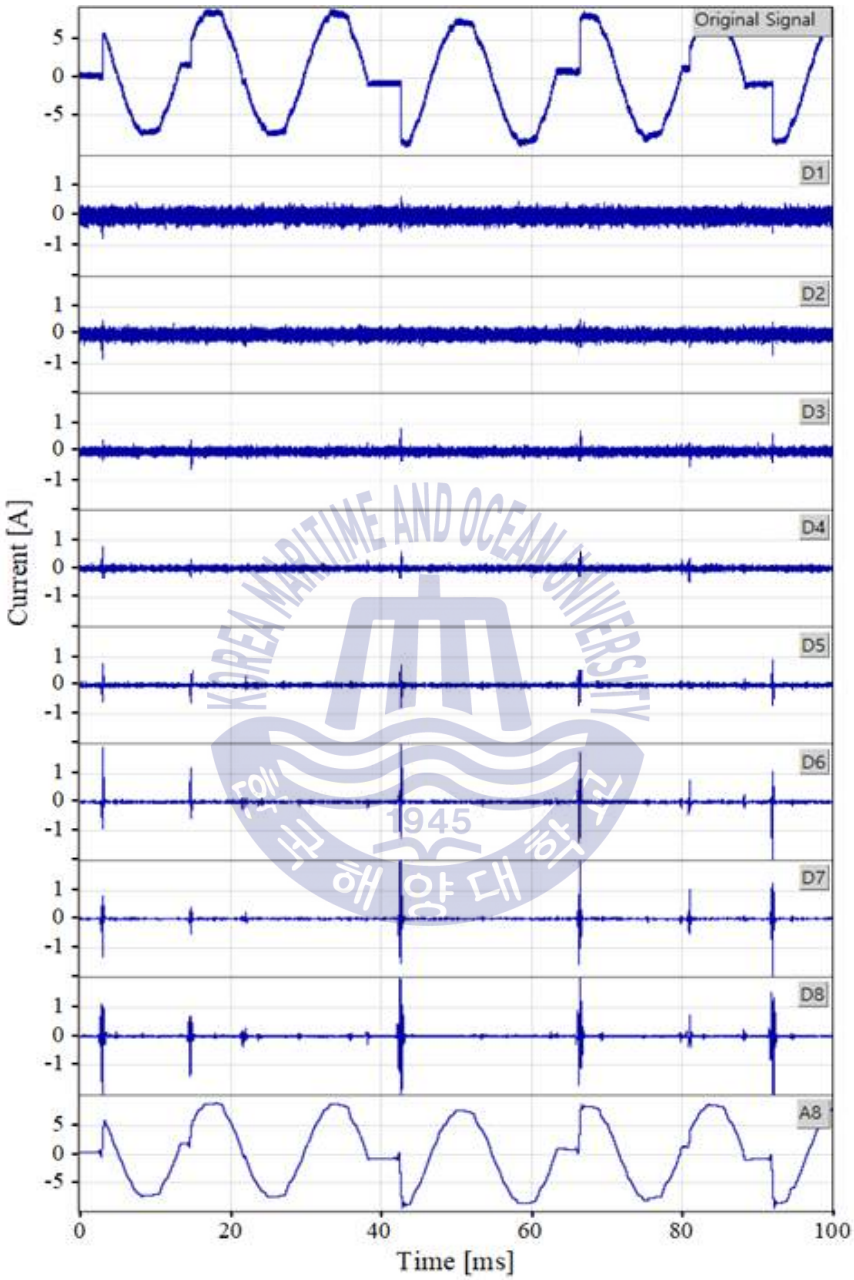
Collection @ kmou

그림 3.14에는 SMPS 부하가 연결된 상태에서 각각의 결함별로 직렬아크 발생을 모의하여 분석한 전류 파형을 나타내었다. 전선-전선 결함의 경우, 각각의 대역별로 아크 신호가 포함된 부분은 D3~D8이며, 아크 신호별로 가장 큰 신호가 포함된 대역은 D5, D6 및 D7이다. 전선-단자 결함에서의 측정 및 분석결과를 그림 3.13(b)에 나타냈으며, 가장 큰 신호가 포함되는 대역은 전선-전선 결함과 같이 D5, D6 및 D7 이다. 그림 3.13(c)에는 콘센트-플러그 접속부에서 아크 발생시의 측정 및 분석 결과를 나타냈으며, 동 경우 대부분의 아크 신호는 D3~D7에 포함되어 있고, 가장 큰 신호가 포함되는 대역은 D5, D6 및 D7 이다.

그림 3.15에는 전동기 부하가 연결된 상태에서 각각의 결함별로 직렬아크 발생을 모의하여 전류 파형을 분석하였다. 그림 3.15(a)는 전선-전선 결함에서 아크를 모의하였을 경우의 측정 및 분석 결과를 나타낸 것으로, D1~D8 대역에 아크 신호가 포함되어 있으며, 아크 신호별로 가장 큰 신호가 포함되는 대역은 D6, D7 및 D8 이다. 전선-단자 결함에서의 측정 및 분석 결과는 3.15(b)에 나타냈으며, 전선-전선 결함의 결과와 유사하게 D6, D7 및 D8 대역에서 가장 큰 신호가 포함되어 있으며, D6~D8 대역의 신호를 재구성한 결과 나머지 대역의 신호의 포함 여부와 큰 차이가 없었다. 콘센트-플러그 접속부의 경우 D1~D8 전 대역에 아크 신호가 분포되어 있으며, 가장 큰 신호가 포함되는 대역은 D6, D7 및 D8 이다.



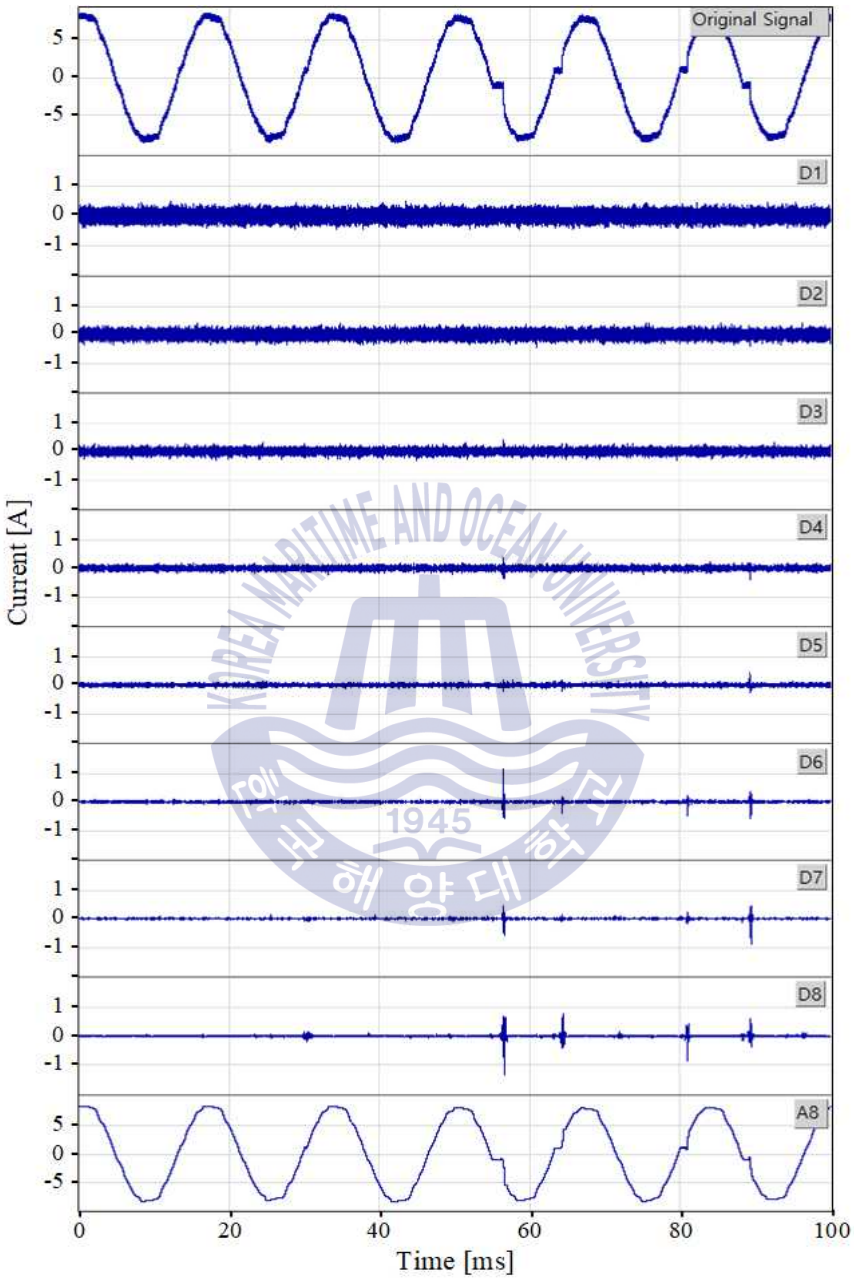
Collection @ kmou




(a) 전선-단자



Collection @ kmou



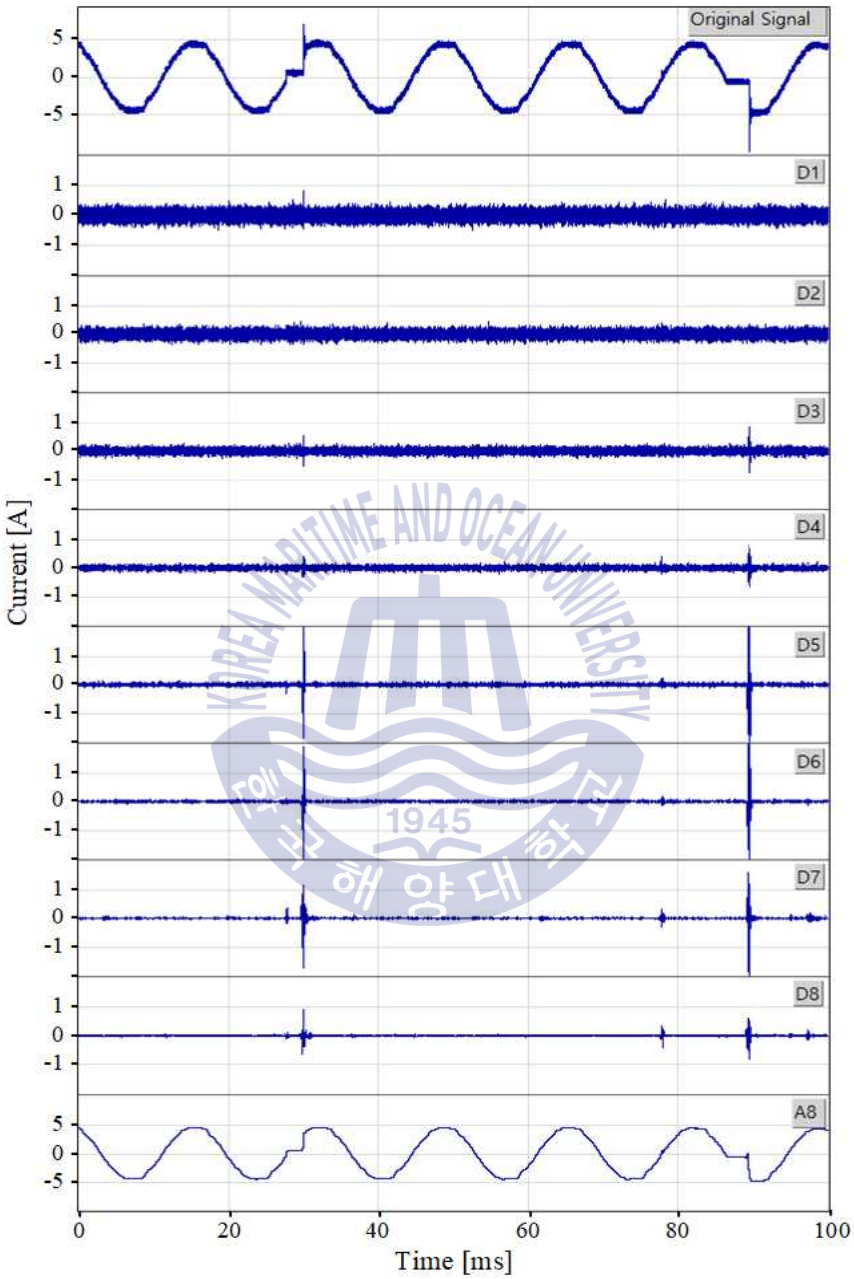

(b) 콘센트-플러그

그림 3.13 아크 전류 신호의 분해(전열기 부하)

Fig. 3.13 Decomposition of arc current signal(Resistive load)



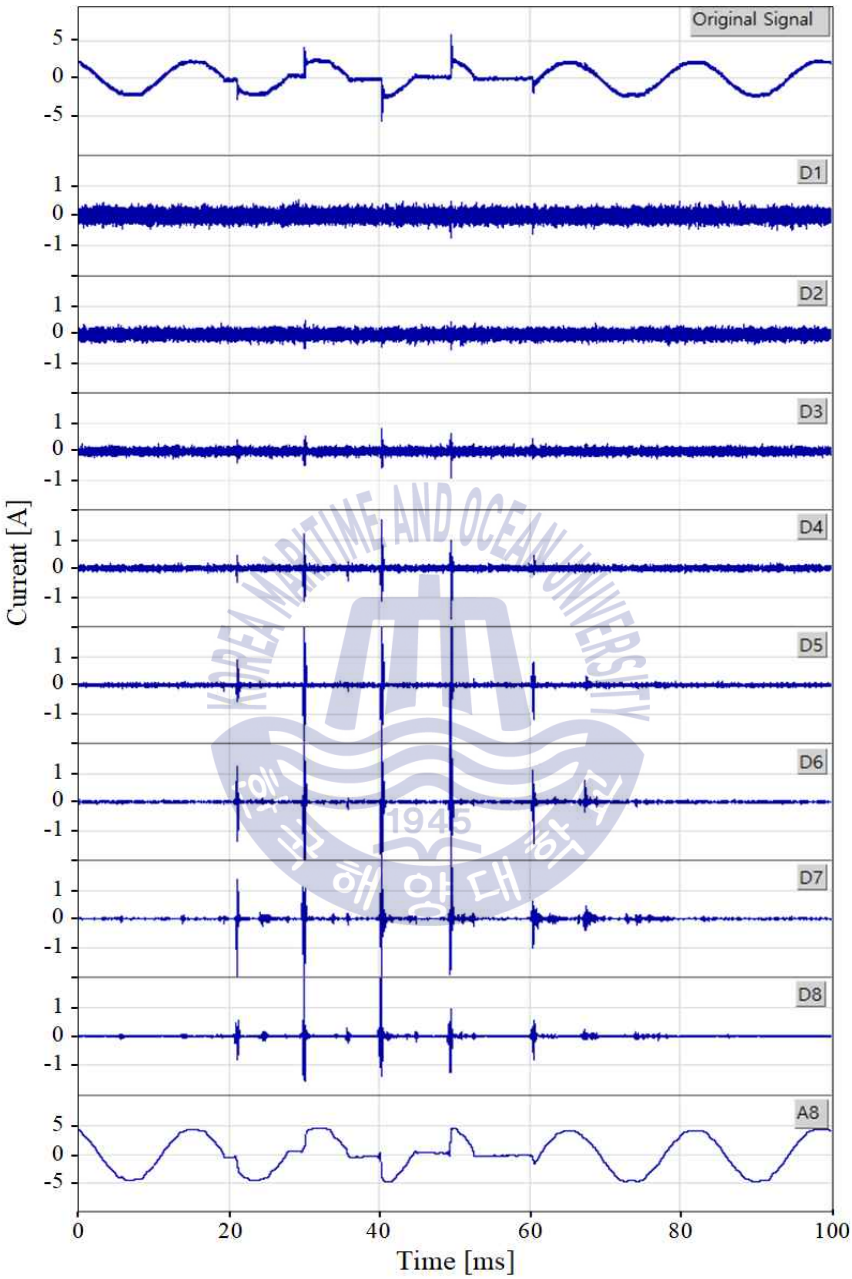
Collection @ kmou




(a) 전선-전선



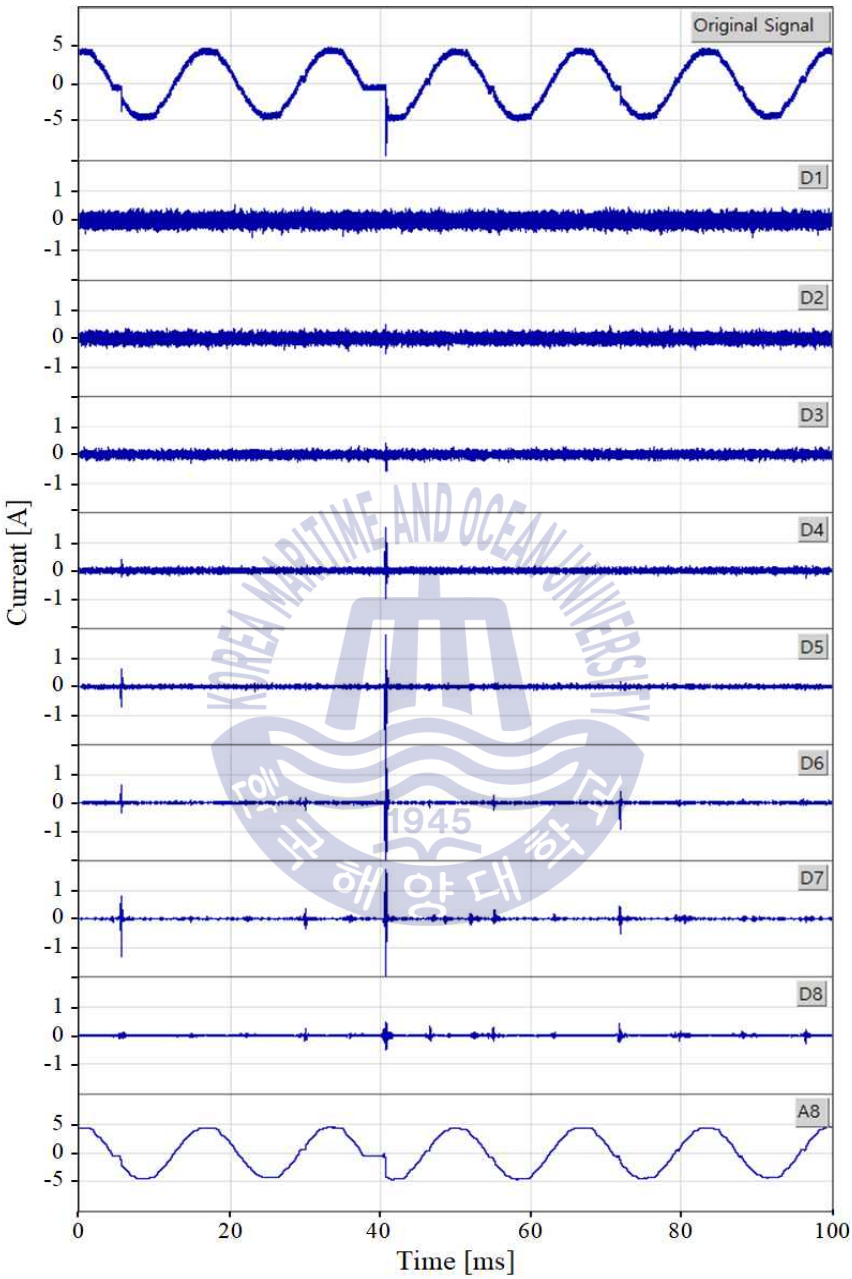
Collection @ kmou




(b) 전선-단자



Collection @ kmou



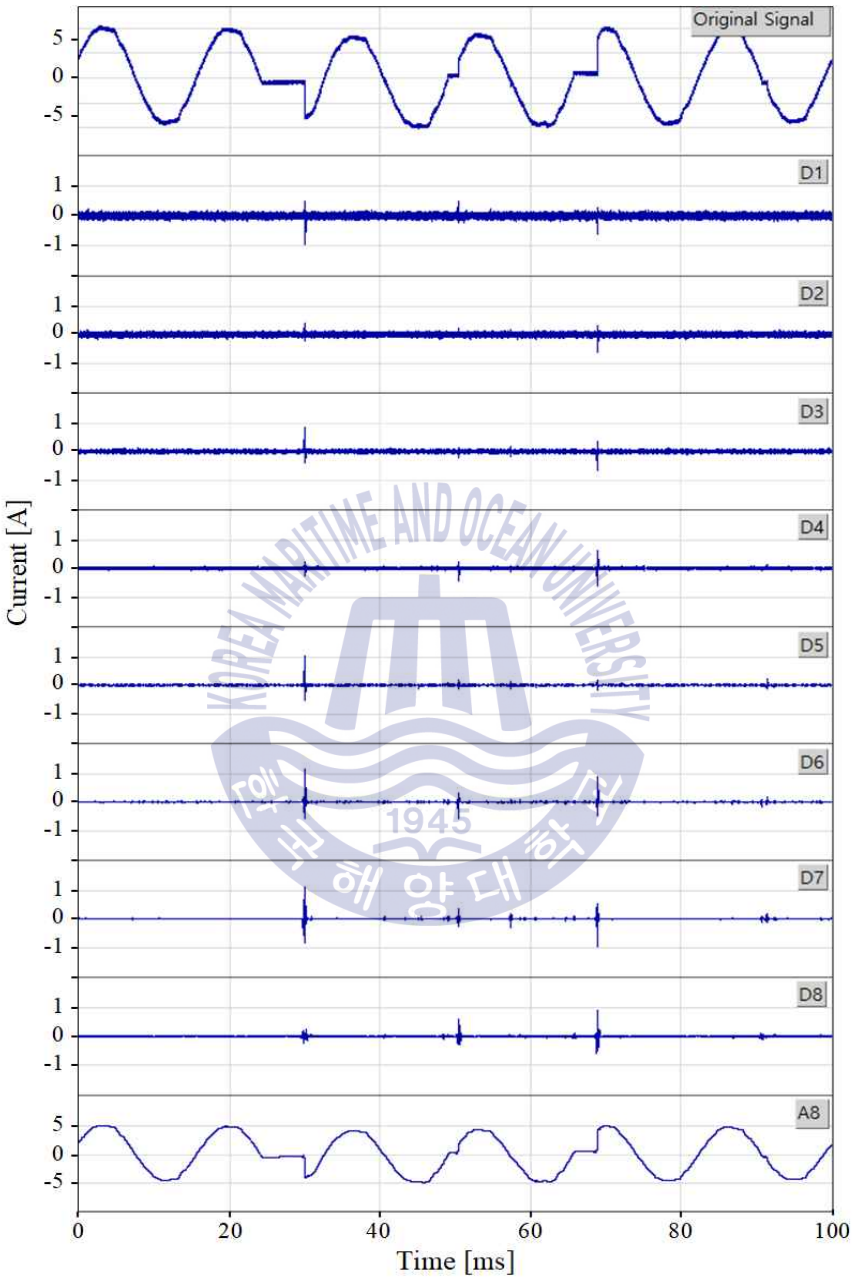

(c) 콘센트-플러그

그림 3.14 아크 전류 신호의 분해(SMPS 부하)

Fig. 3.14 Decomposition of arc current signal(SMPS load)



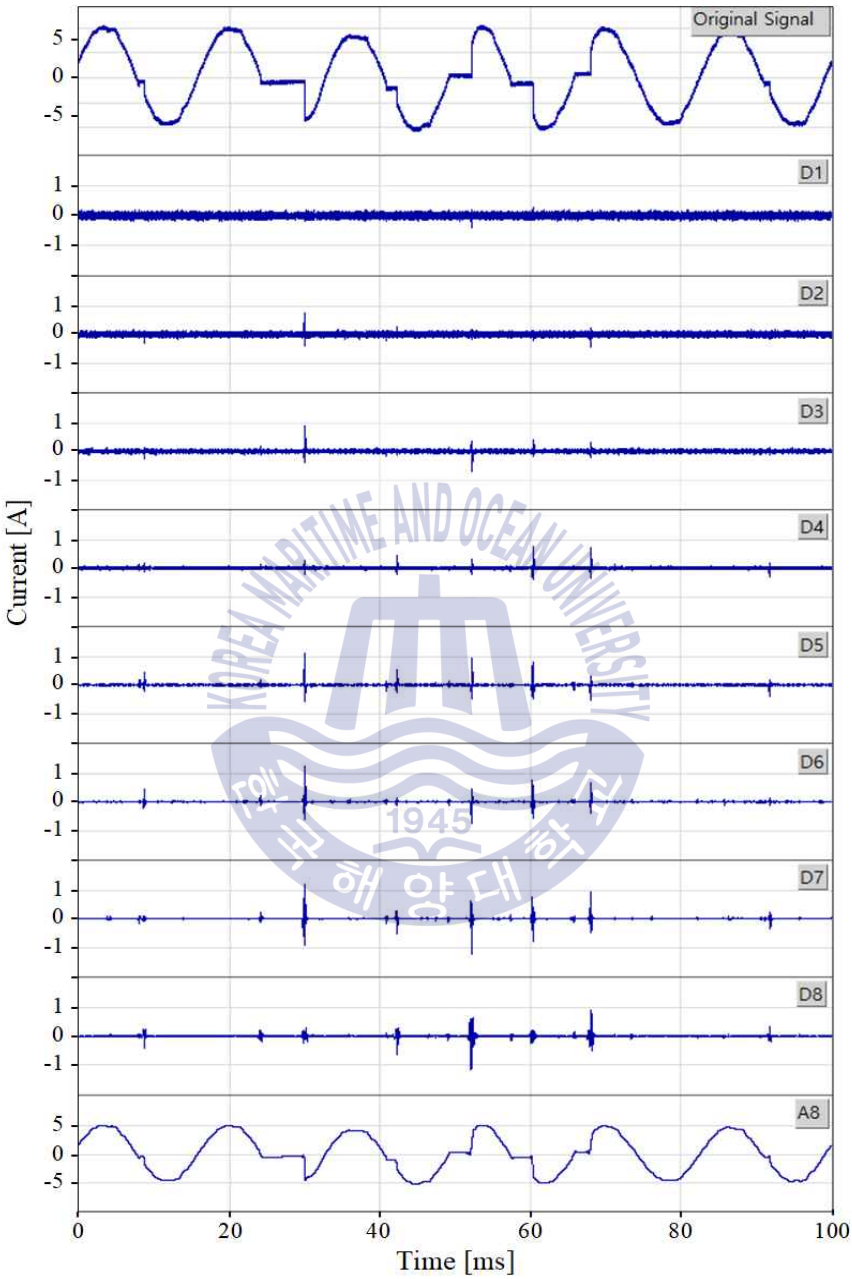
Collection @ kmou




(a) 전선-전선



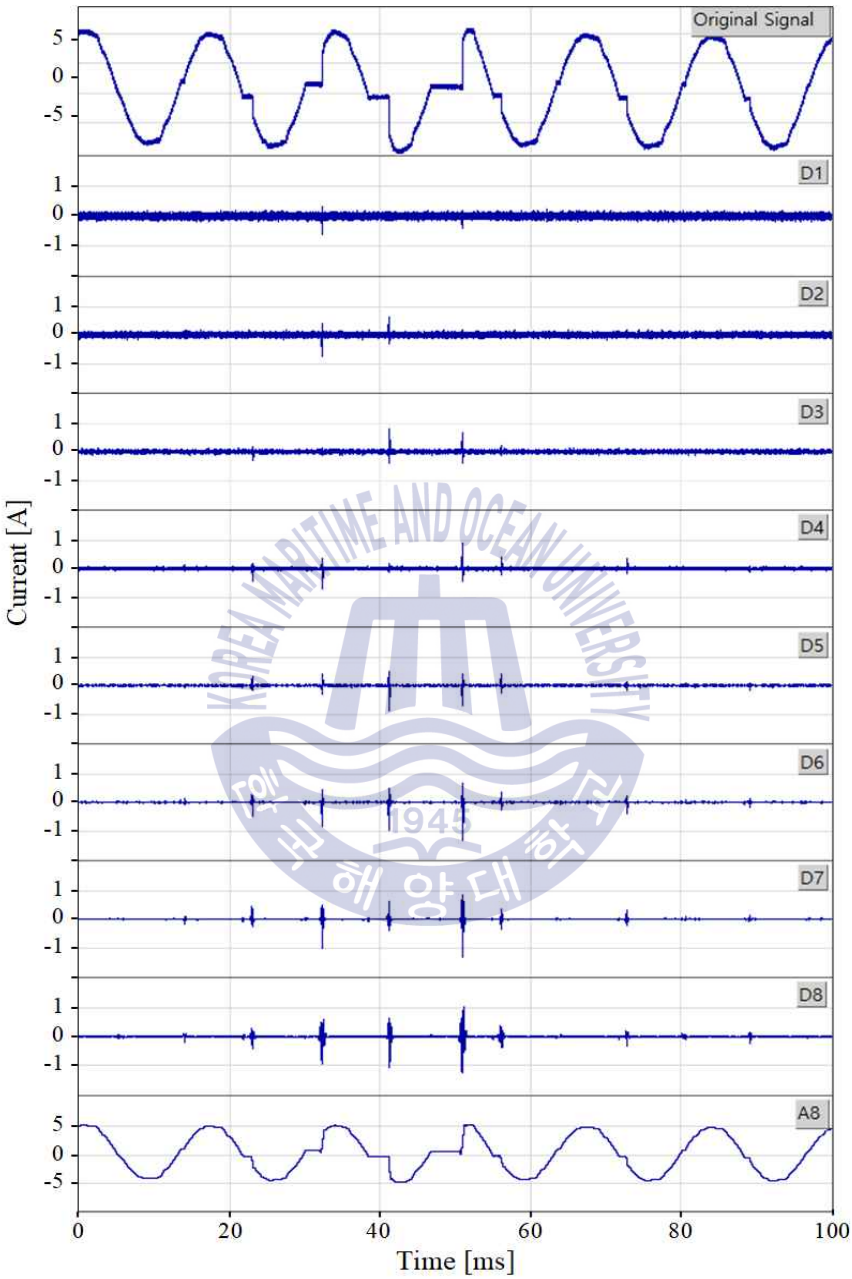
Collection @ kmou




(b) 전선-단자



Collection @ kmou




(c) 콘센트-플러그

그림 3.15 아크 전류 신호의 분해(전동기 부하)

Fig. 3.15 Decomposition of arc current signal(Motor load)



Collection @ kmou

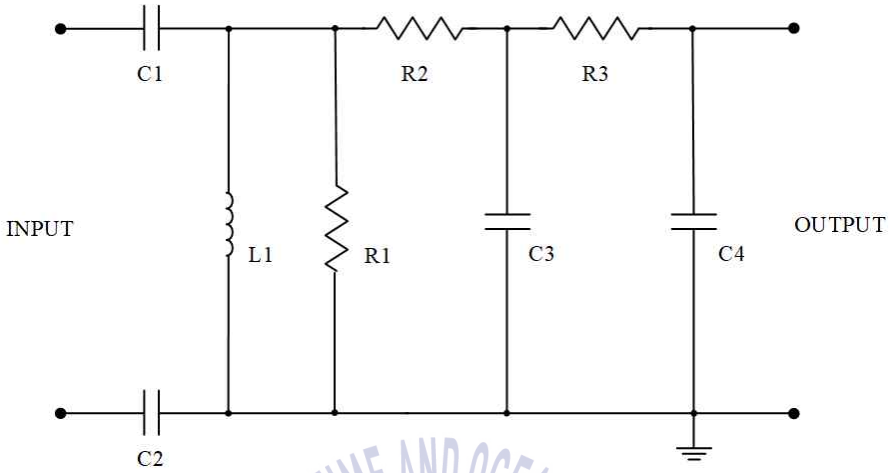
표 3.2 아크 전류의 성분 분포
Table 3.2 Components distribution of arc current

| Load | Arc fault | Arc signal distribution |
|---|---|---|
| Resistive load | Cord-Cord | D7, D8 |
| | Cord-Terminal | D6, D7, D8 |
| | Outlet-Plug | D6, D7, D8 |
| SMPS | Cord-Cord | D5, D6, D7 |
| | Cord-Terminal | D5, D6, D7 |
| | Outlet-Plug | D5, D6, D7 |
| Motor | Cord-Cord | D6, D7, D8 |
| | Cord-Terminal | D6, D7, D8 |
| | Outlet-Plug | D6, D7, D8 |

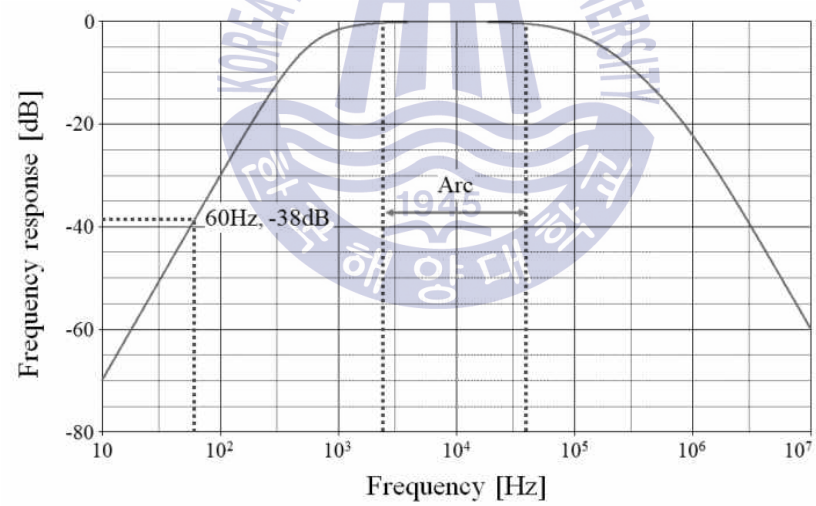
부하 및 결함에 따른 분석 결과를 표 3.2에 정리하였으며, 전열기 부하는 D6~D8 대역에 가장 큰 아크 신호가 포함되고, SMPS 부하는 D5~D7, 전동기 부하는 D6~D8 대역에 가장 큰 아크 신호가 포함되며, 부하별로 비슷한 대역이 확인됨으로써, 아크 신호의 주파수 대역은 결함의 종류 보다는 부하의 영향을 받는 것으로 판단된다. 분석 결과를 바탕으로 아크 신호의 검출대역은 D5~D8(2.4 kHz~39 kHz)로 선정하였으며, 이를 바탕으로 수동소자를 이용한 그림 3.16(a)와 같은 대역통과필터를 설계하였다. 필터는 R, L 및 C로 구성된 고역통과부와 R과 C로 구성된 저역통과부로 구성되며, 주파수 특성은 그림 3.16(b)와 같다.



Collection @ kmou




(a) 회로도




(b) 주파수 응답특성

그림 3.16 대역통과필터
Fig. 3.16 Band-pass filter



Collection @ kmou

## 3.3 직렬아크의 부하 의존성

### 3.3.1. 에너지 스펙트럼

저압 배선계통에는 다양한 전기전자기기 및 기구가 사용되며, 기기 및 기구 사용과정에서 고주파 노이즈가 발생한다. 특히 스위치 On/Off, SMPS, 위상제어, 브러시 모터 및 램프 등의 사용 시 고주파 노이즈가 발생하며, UL1699 및 IEC62606에서는 고주파에 의해 아크차단기가 동작하지 않도록, 오동작 시험법을 적용하고 있다.

이와 같이 선로에서 발생하는 고주파 노이즈에 의한 오동작을 방지하기 위해 본 논문에서는 광대역 변류기와 대역통과필터를 통해 검출한 아크 신호의 에너지를 분석하였다.

신호의 에너지는 아래 수식과 같이 시간대별 전류 신호의 제곱의 합으로 구할 수 있다.

$$Signal\,energy = \sum_{t=0}^{N} i(t)^2 \tag{3.3}$$

여기서 $i(t)$는 각 시간대별 전류의 크기, $N$은 신호의 길이로 본 논문에서는 100 ms동안 측정한 신호를 분석한다.

직렬아크 방전은 접촉저항에 따라 방전의 크기 및 주기 등이 달라진다. 동일한 방법으로 반복적인 실험을 하더라도 아크 발생시의 접촉저항이 다르며, 이로 인해 방전의 크기가 달라진다. 따라서 본 논문에서는 각각의 직렬아크 신호의 특성 비교 보다는 구간별 에너지의 변화량을 비교하는 분석법을 적용하였으며, 1구간은 6 사이클(100 ms)로 하였다. 부하로는 저압 배선계통에서 일반적으로 사용하는 전열기, 컴퓨터, 선풍기 및 LED 등기구를 사용하였다.



Collection @ kmou

그림 3.17~그림 3.20은 아크가 발생하지 않는 정상 상태와 아크 발생시, 광대역 변류기와 대역통과필터를 통해 측정한 신호와 신호의 에너지 분포를 나타낸 것이며, 정상 상태는 청색, 아크 발생시는 적색으로 표시하였다.

전열기(600 W)부하의 경우 정상 상태에서 대역통과필터를 통과하는 고주파 신호는 거의 없었으며, 아크 발생시에는 최대 1.2 A 크기의 아크 신호가 검출되었다. 직렬아크 방전 신호는 주기성의 띄며 짧은 시간동안 생성되고 소멸되는 특성을 보였다. 각각의 부하별로 20회의 반복실험을 진행하였으며, 대역통과필터를 통한 신호의 에너지를 측정한 결과, 정상 상태의 신호 에너지는 평균 8.4로 측정되었고, 아크 상태에서는 284~457까지 측정되었다. 이는 실험시마다 발생한 직렬아크의 크기와 구간당 발생한 횟수가 변함에 따라 달라진 것으로 판단된다.

컴퓨터 부하는 일반적으로 가정에서 사용하는 최대소비전력 500 W급을 사용하였으며, 그 결과를 그림 3.18에 나타내었다. 아크가 발생하지 않는 상태에서도 SMPS 동작 과정에서 발생하는 고주파 신호가 반복적으로 발생하였으며, 최대 크기는 약 0.2 A로 측정되었다. 아크 발생 시 주기별로 수 십~수 백 개의 아크 신호가 검출되고, 아크 신호의 크기는 4 A 이상까지 측정되었다. 20회 동안 동일한 방법으로 직렬아크를 발생시켰으며, 신호의 에너지는 정상 상태에서 42, 아크 상태에서 3861~7400으로 측정되었다. SMPS 동작과정에서 발생한 고주파 신호에 의해 다른 부하와 비교하여 정상 상태에서도 신호의 에너지량이 높게 측정되었으며, 아크 상태에서는 수 십~수 백 개의 아크 신호에 의해 에너지량이 높게 측정되는 특징이 있다.

선풍기 부하는 일반적으로 가정에서 많이 사용하는 55 W급을 사용하였으며, 그 결과는 그림 3.19에 나타내었다. 정상 상태에서는 대역통과필터



Collection @ kmou

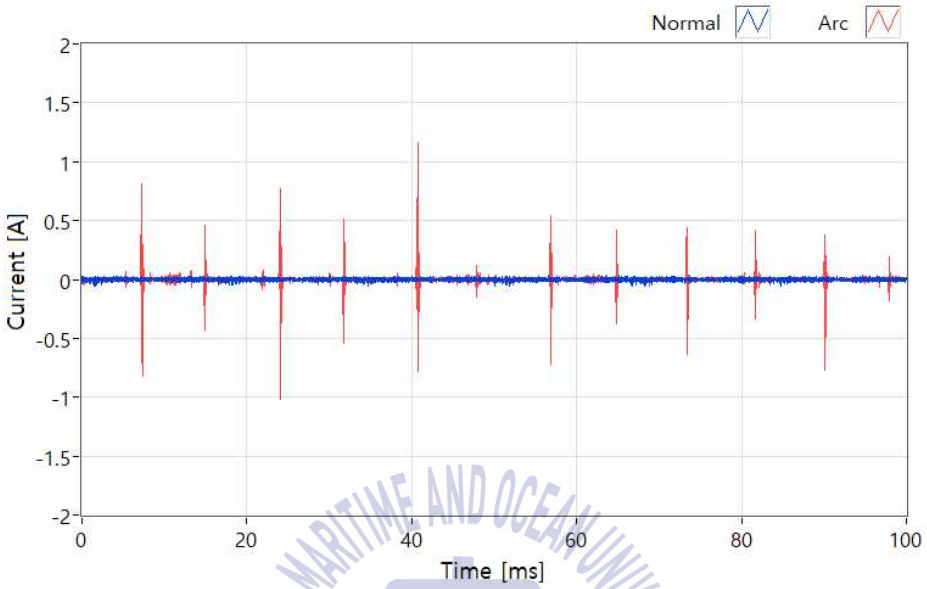
를 통과하는 고주파 신호는 거의 발생하지 않았다. 직렬아크 발생 시 전열기 부하와 같이 짧은 시간동안에 개시되고 소멸되는 것이 아니라, 상대적으로 긴 시간동안 아크 신호가 발생하는 특징이 있다. 아크 신호의 크기는 최대 0.12 A까지 측정되었으며, 20회 동안 동일한 방법으로 직렬아크를 발생시켰을 때, 대역통과필터를 통한 신호의 에너지는 정상 상태에서 0.066, 아크 상태에서는 최소 6.8~최대 7.1로 나타났다.

그림 3.20에는 최근 가정에서 많이 사용하는 50 W급 LED 등기구를 사용하였다. 직렬아크 발생 시 한번의 아크방전이 개시되고 소멸될 때, 수십~수백 개의 아크 신호가 발생하는 특징이 있으며, 아크 신호의 크기는 다른 부하에 비해 상대적으로 큰 최대 7 A까지 측정되었다. 20회 동안 동일한 방법으로 직렬아크를 발생시켰으며, 대역통과필터를 통한 신호의 에너지는 정상상태에서는 2.646, 아크상태에서는 최소 21,829~최대 53,820로 측정되었다. 정상상태에서도 인버터 동작 시 발생하는 고주파 신호가 대역통과필터를 통해 일부 검출되며, 아크가 발생하면 신호의 크기가 큰 수십~수백 개의 방전 신호가 발생하여 에너지량은 매우 높게 측정되는 특징이 있다.

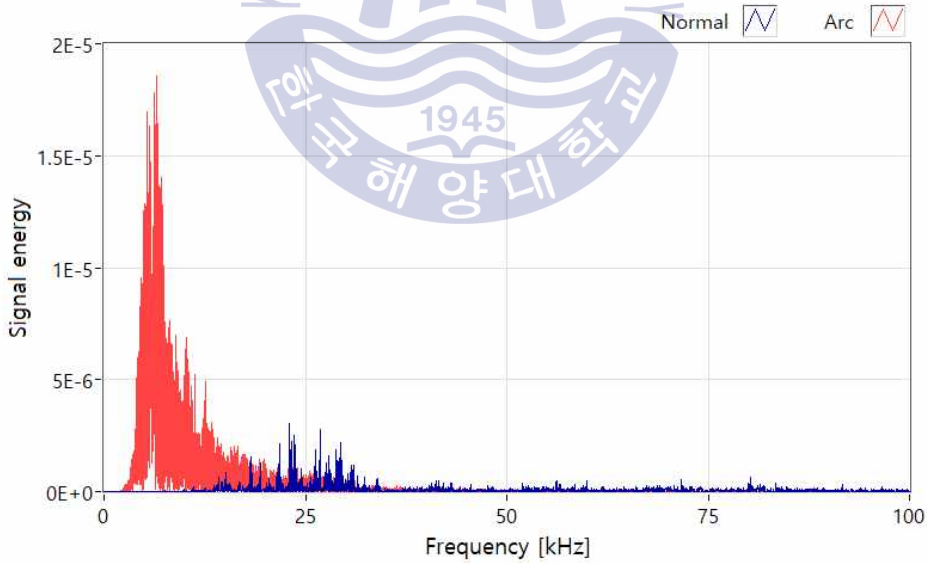
부하에 따른 정상 상태와 직렬아크 발생시의 최소 신호 에너지 값을 표 3.3에 나타내었다. 아크 발생횟수, 접촉저항 변화 등에 따라 에너지량이 달라질 수 있는 점을 고려하여 측정된 신호 에너지 값 중, 최소값을 기준값으로 선정한다면 아크판별시 적용이 가능할 것으로 판단된다.



Collection @ kmou




(a) 필터 출력



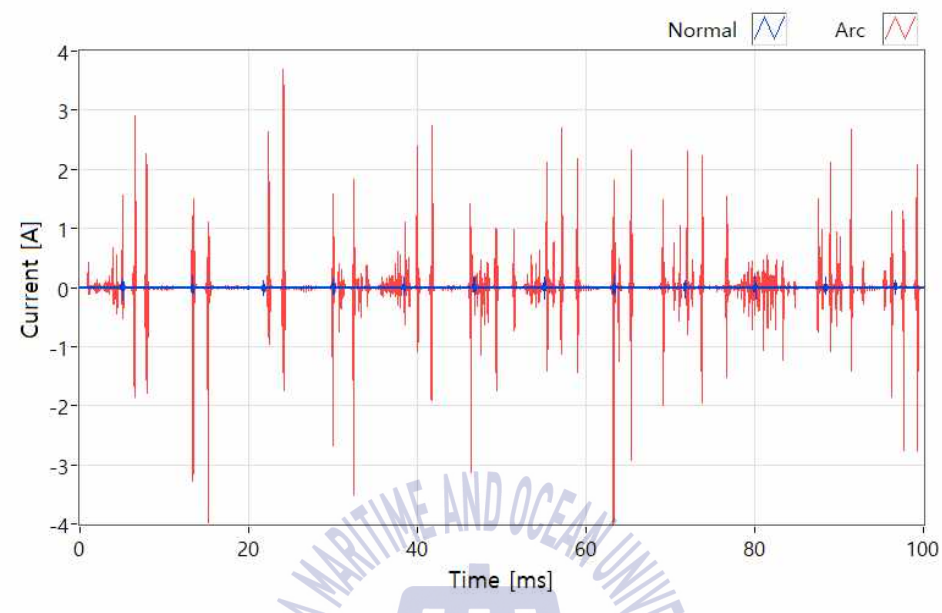

(b) 에너지 스펙트럼

그림 3.17 아크 신호와 에너지 스펙트럼(전열기)

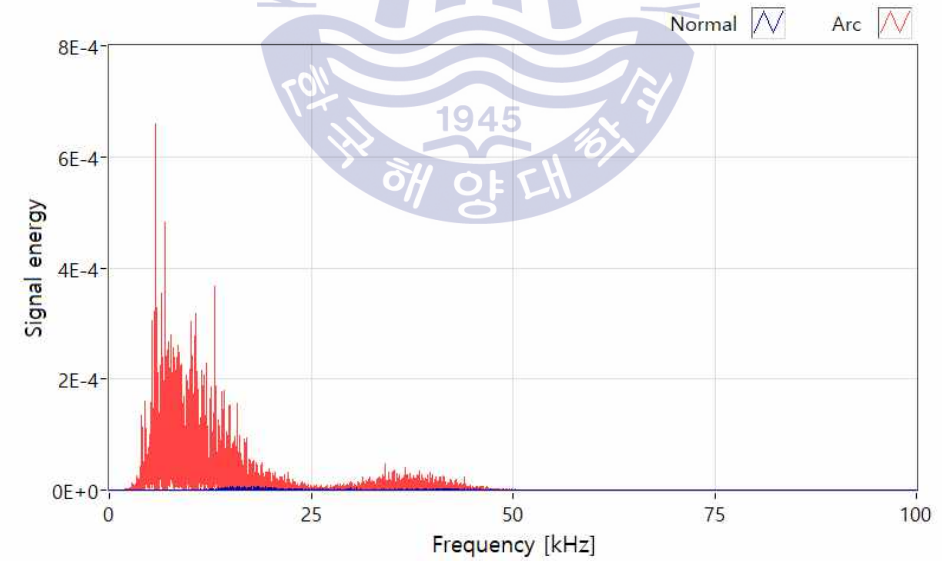
Fig. 3.17 Arc signal and energy spectrum(Electric heater)



Collection @ kmou




(a) 필터 출력



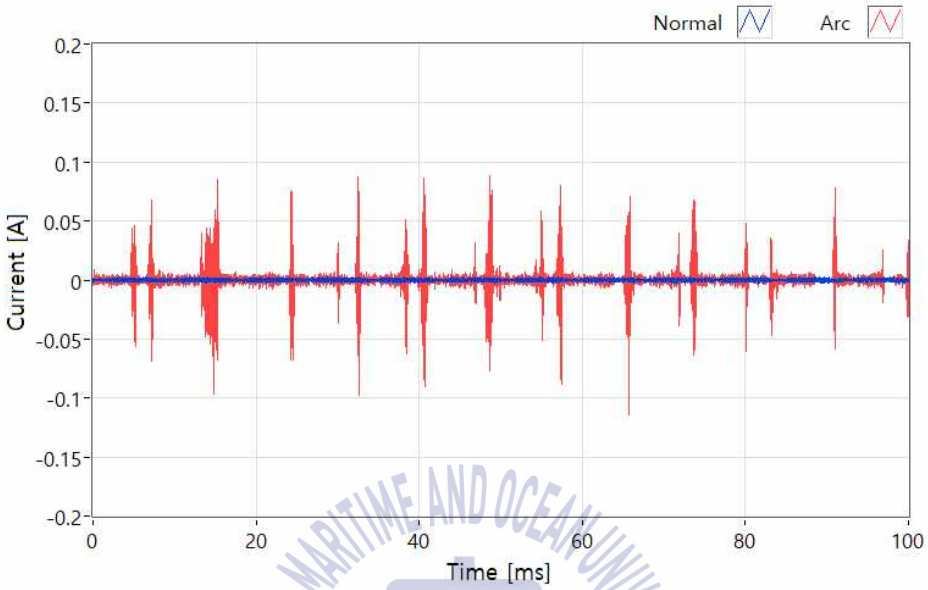

(b) 에너지 스펙트럼

그림 3.18 아크 신호와 에너지 스펙트럼(컴퓨터)

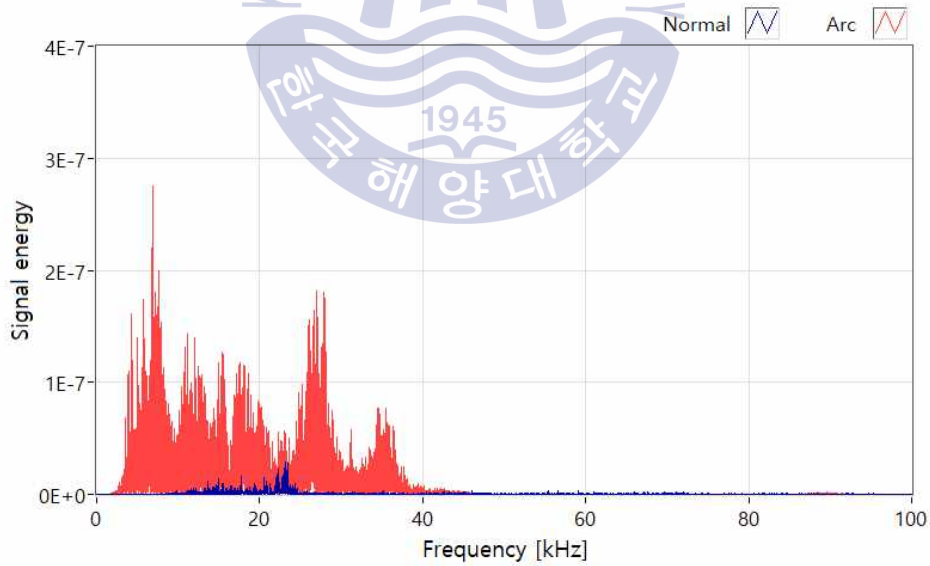
Fig. 3.18 Arc signal and energy spectrum(PC)



Collection @ kmou




(a) 필터 출력



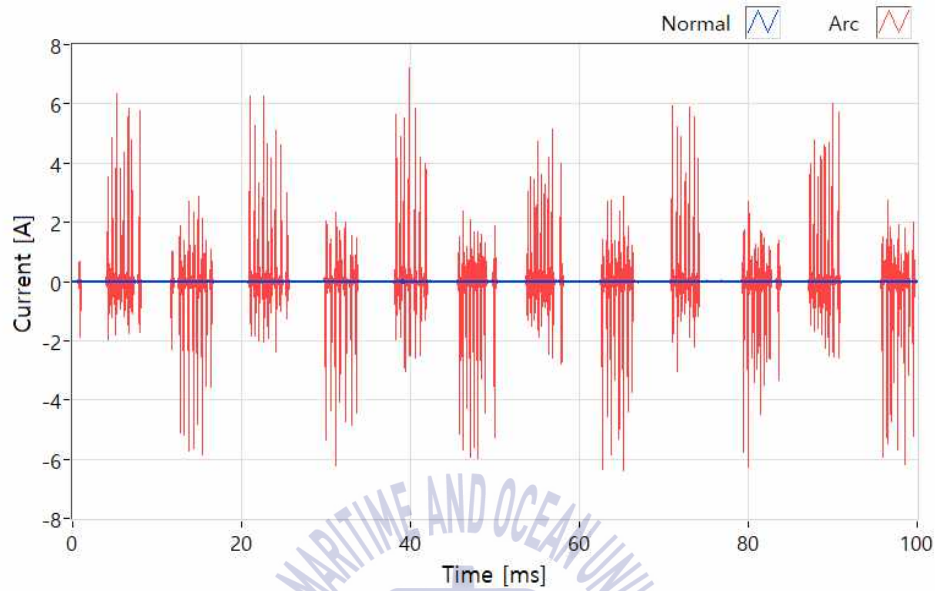

(b) 에너지 스펙트럼

그림 3.19 아크 신호와 에너지 스펙트럼(선풍기)

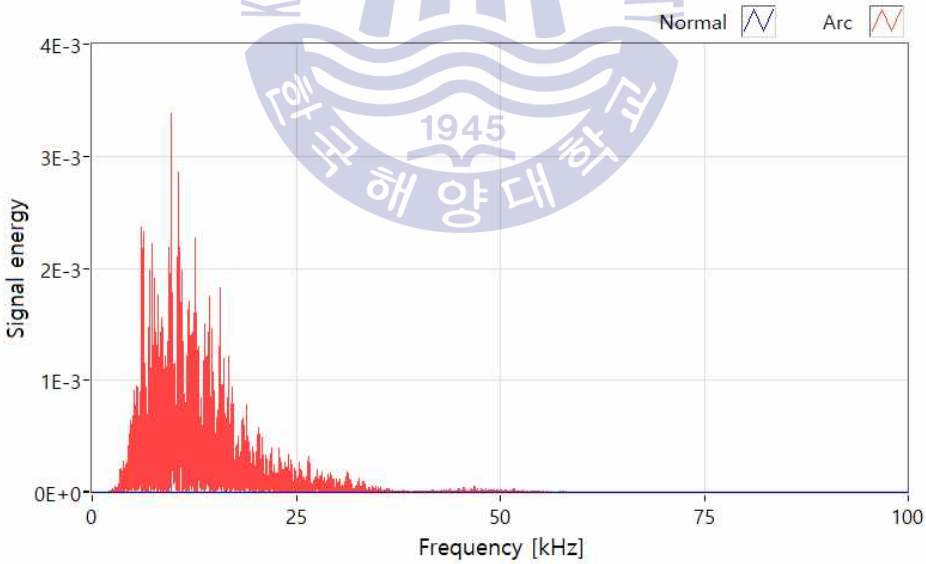
Fig. 3.19 Arc signal and energy spectrum(Electric fan)



Collection @ kmou




(a) 필터 출력




(b) 에너지 스펙트럼

그림 3.20 아크 신호와 에너지 스펙트럼(LED 등기구)

Fig. 3.20 Arc signal and energy spectrum(LED lamp)



Collection @ kmou

표 3.3 신호의 에너지 분석

Table 3.3 Analysis of signal energy

| Load | Energy of signal | |
|---|---|---|
| | Normal status | Series arc status(Minimum) |
| Electric heater (600 W) | 8.41 | 284 |
| PC (500 W) | 42 | 3,861 |
| Electric fan (55 W) | 0.07 | 6.8 |
| LED lamp (60 W) | 2.65 | 21,829 |

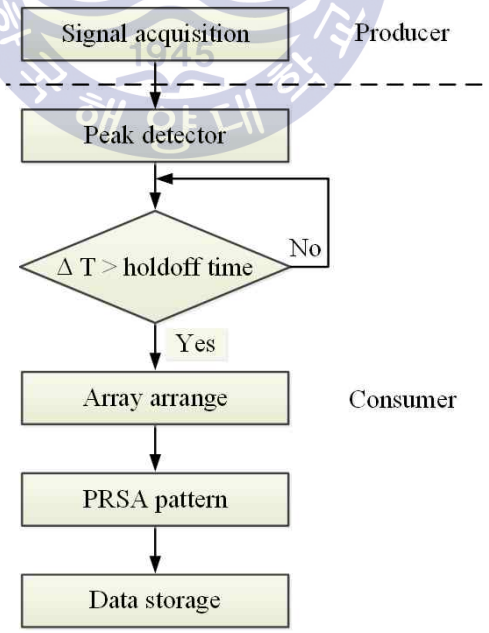


Collection @ kmou

### 3.3.2. 위상분포

직렬아크 신호는 선로에 연결된 부하의 영향을 받으며, 3.3.1.의 에너지 분석을 위한 실험을 통해 직렬아크가 발생하는 위상이 부하에 따라 달라진다고 판단되었다. 이점을 분석하기 위해 본 논문에서는 직렬아크 방전 신호를 측정하고 방전 위상에 따른 PRSA(Phase Resolved Series Arc) 분석을 위하여 알고리즘 및 VI(Virtual Instrument)를 설계하였다.

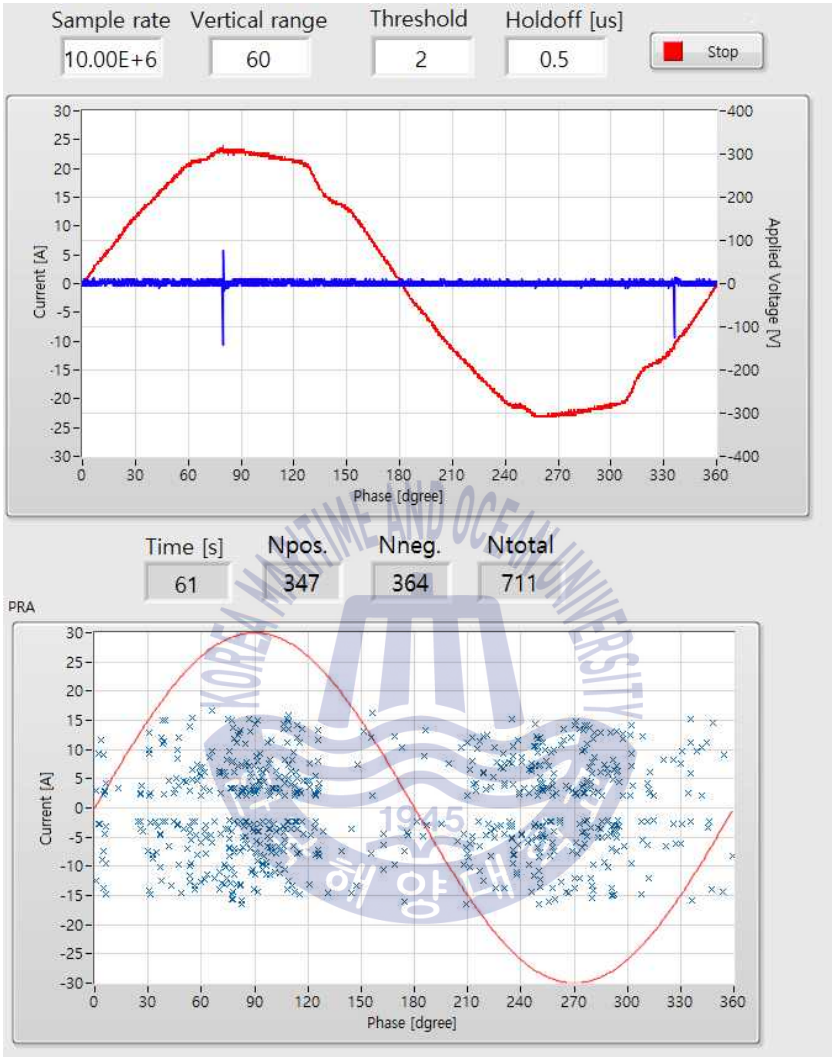
전열기 및 선풍기와 같이 직렬아크 방전시 발생하는 신호의 수가 적을 경우에는 검출된 아크 신호를 입력받아 위상, 크기 및 횟수 등을 실시간으로 처리하는 것이 어렵지 않으나, 컴퓨터 및 LED 등기구와 같이 한 주기당 폭이 좁은 신호가 수십 개에서 수백 개가 발생하는 경우에는 입력되는 신호를 실시간으로 처리하는 것은 불가능하다. 따라서, 설계한 PRSA 분석 알고리즘은 그림 3.21과 같이 Multi-threading 기능을 가지는 'Producer- Consumer' 구조를 적용하였다.




(a) 순서도



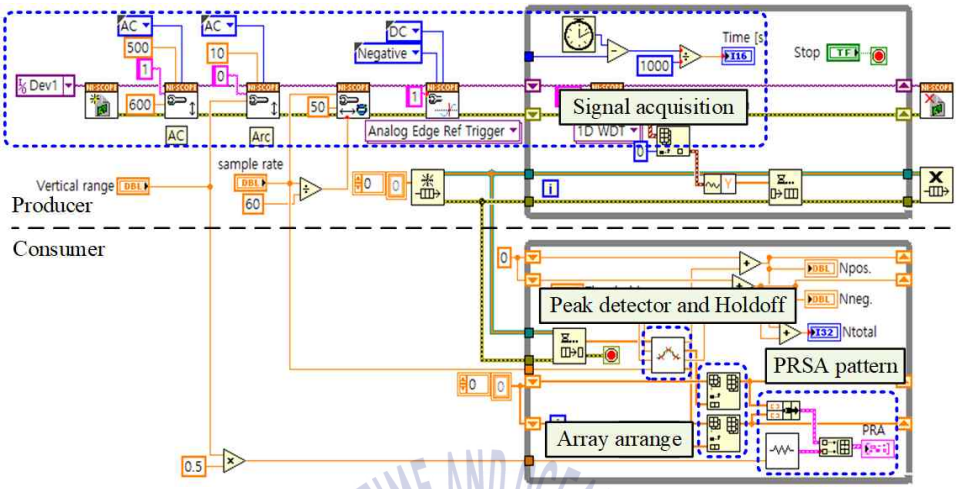
Collection @ kmou




(b) 연산 처리부



Collection @ kmou




(c) 블록다이어그램

그림 3.21 PRSA 알고리즘
Fig. 3.21 PRSA algorithm

다수의 아크 신호가 연속적으로 측정되면 실시간으로 신호를 처리하는 과정에서 처리되지 못한 신호는 데이터베이스에 축적하며, 아크가 소멸되어 측정이 끝난 후 축적되었던 신호를 불러와 인가전압의 위상, 아크 신호의 크기 그리고 발생 횟수에 대해 빠르고 일률적으로 처리한다. PRSA 분석 알고리즘은 신호 측정부에 의해 0°~360° 위상의 한 주기 동안 발생한 아크 신호를 수집하며, Peak detector와 Holdoff 기법을 이용하여 실시간으로 프런트패널의 그래프에 표현하고, 연산된 데이터는 누적하여 PRSA 패턴을 생성한다.

각각의 데이터는 배열로 저장되며 잡음 제거 과정(Threshold)을 거쳐 위상별로 최댓값을 저장하게 된다. 위상은 전압위상을 기준으로 저장되며, 전압위상과 동기화를 위해 차동프로브로 전압 신호를 함께 측정한다. 부



Collection @ kmou

하별 위상 패턴의 분석을 위해 부하별로 각각 2,000개의 직렬아크 신호를 저장하였으며, 분석된 부하에 따른 위상 및 크기의 패턴은 그림 3.22와 같다. 그림 3.23은 아크가 발생한 위상 및 크기 분포를 클러스터로 구분한 것이다. 적색은 전열기, 청색은 컴퓨터, 녹색은 냉장고, 분홍색은 에어컨이다.

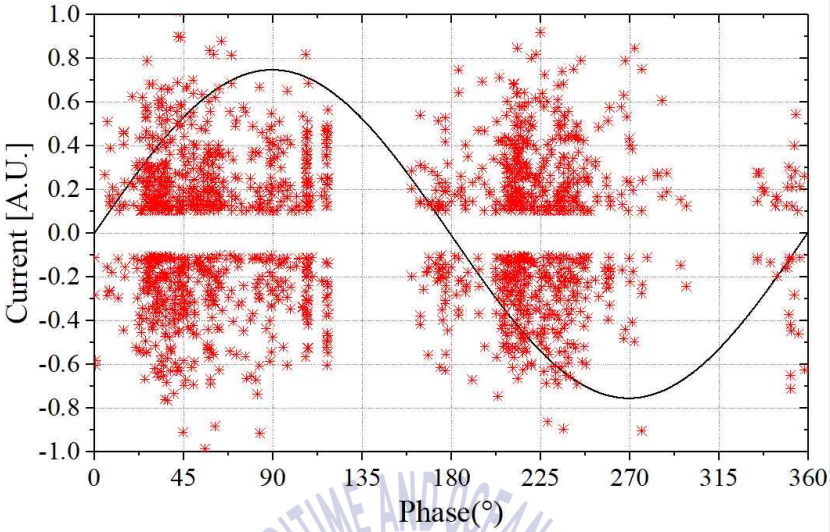
표 3.4는 부하별 위상 분포를 30° 간격으로 나누어 분석한 결과를 표 3.5에 나타내었다. 전열기 사용 시 직렬아크는 대부분 0°~120°와 150°~270°에서 발생하였고, 120°~150°와 270°~360°에서는 아크 발생이 전체의 3% 미만이었다. 특히 30°~60°와 210°~240°의 경우 전체의 20~25%로서 절반 가까이가 이 위상에서 발생하였다.

컴퓨터 사용하여 아크 발생 시 0°~90°와 180°~240°에서 대부분의 아크가 발생하였으며, 90°~180°와 240°~360°에서는 전체의 3% 미만이었다. 특히 30°~60°와 210°~240°에서는 각각 25%이상으로서, 전체의 절반 이상의 동 위상에서 발생하였으며, 전열기와 비슷한 위상특성을 보였다.

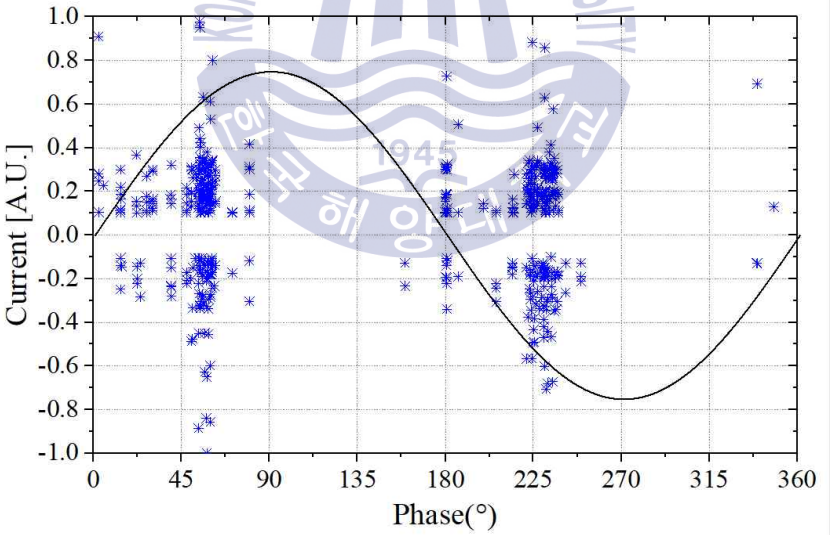
냉장고를 부하로 사용하였을 경우 30°~120°와 210°~300°에서 대부분의 방전이 발생하며, 0°~30°, 120°~210° 및 300°~360°에서는 전체의 3% 미만이었다. 또한 60°~90°와 270°~300°에서는 각각 25% 이상으로서 절반 가까이가 이 위상에서 발생한다. 에어컨의 경우 0°~30°와 180°~210°를 제외한 부분에서 아크가 발생하며, 그 외 위상에서 대체적으로 고르게 발생하였다.



Collection @ kmou



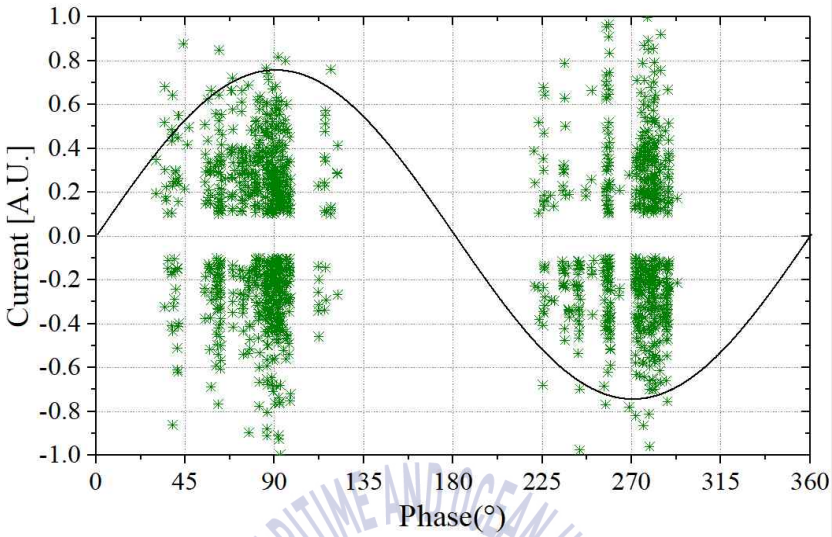

(a) 전열기



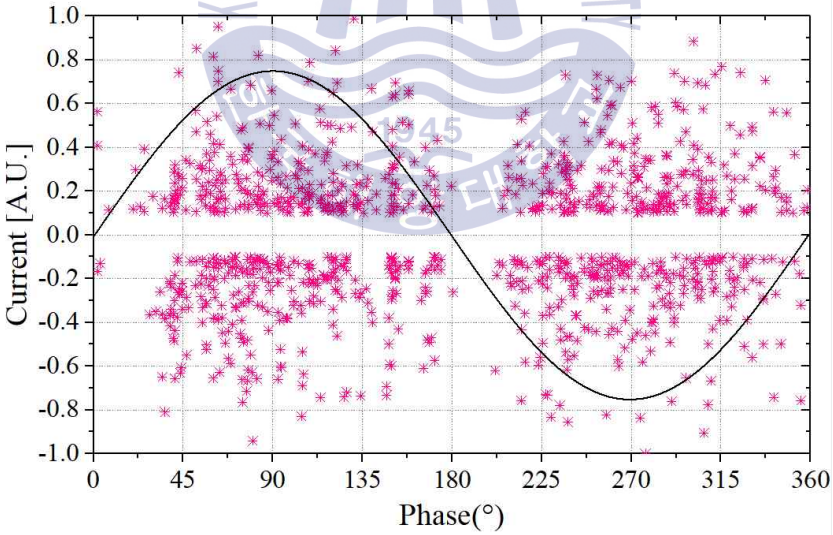

(b) 컴퓨터



Collection @ kmou




(c) 냉장고




(d) 에어컨

그림 3.22 부하에 따른 위상분포 패턴

Fig. 3.22 PRSA patterns depending on loads



Collection @ kmou

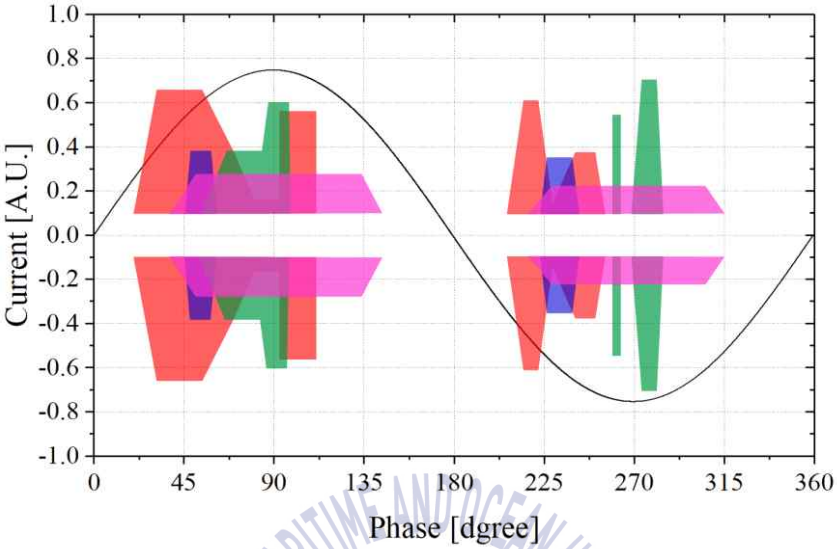



그림 3.23 부하에 따른 위상분포
Fig. 3.23 Clusters of PRSA patterns depending of loads

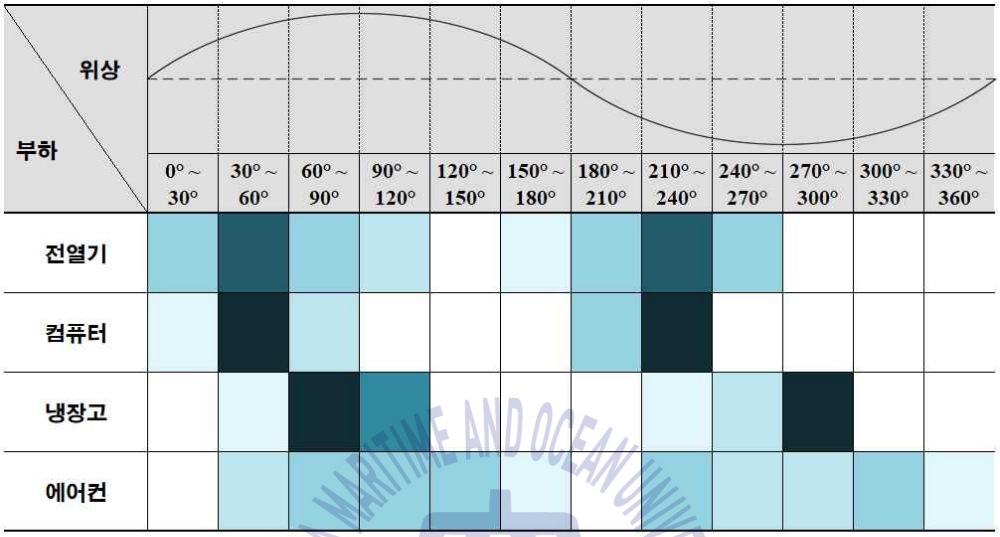
이와 같이 아크 발생 시 부하의 종류에 따라 방전 신호의 위상분포가 달라지며, 이는 부하의 임피던스, 동작 특성 및 정상 동작 시 발생하는 노이즈의 영향 등에 의한 것으로 추측되나, 뚜렷한 원인의 확인은 불가하였다. 하지만 아크 발생 시 부하의 종류에 따라 방전이 발생하는 신호의 위상분포가 달라지는 점을 활용한다면 아크가 발생하는 부하 및 선로의 추정이 가능할 것으로 기대한다.



Collection @ kmou

표 3.4 아크 신호의 위상분포

Table 3.4 Phase distribution of arc signal




| 색상 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 비율 | 0 ~ 3% | 3 ~ 6% | 6 ~ 10% | 10 ~ 15% | 15 ~ 20% | 20 ~ 25% | 25% 이상 |



Collection @ kmou

# 제 4 장 판별 알고리즘

본 논문에서는 실제 화재의 원인이 되는 결함들로 직렬아크를 모의하고 분석하였으며, 최적의 검출 주파수 대역을 선정하여 직렬아크 검출에 적용하였다. 하지만 선로에는 다양한 전기전자기기 및 기구 등에 의한 고주파가 발생하며, 아크 검출 시 고주파 신호로부터 오동작 하지 않는 대책이 필요하다.

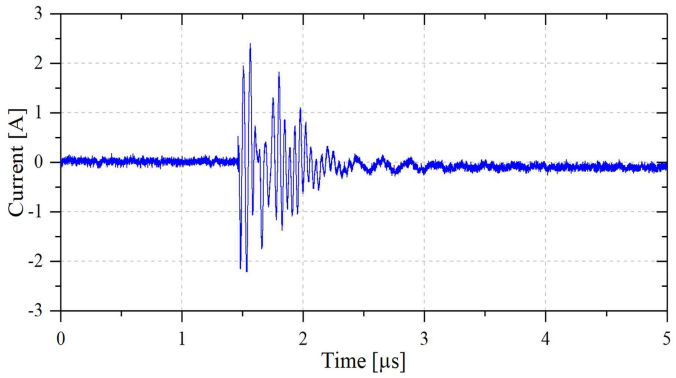
## 4.1 알고리즘 설계

저압 배선계통에서 아크 신호로 오인할 수 있는 고주파 신호는 인버터 및 SMPS와 같은 위상제어 부하를 사용할 때, 브러시 모터를 사용할 때 및 스위치 On/Off시 등의 경우로 알려져 있다. 이러한 유사 아크 신호의 발생 패턴과 아크 신호의 에너지 분석 결과를 통해 판별 알고리즘을 제안하였으며, 아크 방전 수와 신호 에너지의 변화를 아크판단에 이용한다.

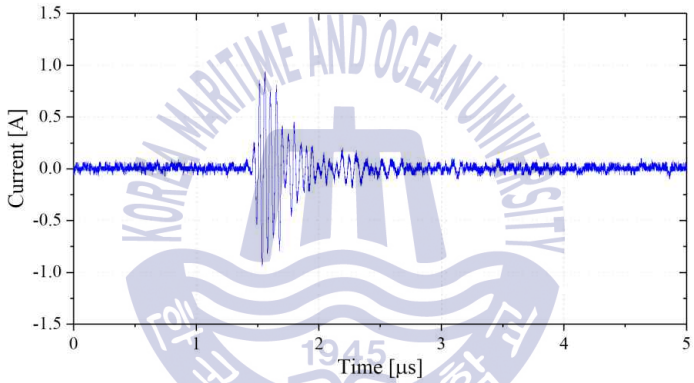
판별 알고리즘은 광대역 변류기와 대역통과필터를 통해 검출한 아크 신호의 개수와 에너지를 100 ms 구간마다 반복적으로 분석하며, 정상 상태의 에너지를 저장한다. 우선 구간 당 발생하는 아크 신호의 개수를 확인하며, 전기전자기기 및 기구의 On/Off 과정에서 발생하는 스위칭 서지는 1회성으로 발생하는 점을 고려하여, 아크 신호가 2회 초과 발생할 경우 신호 에너지를 비교하도록 설계하였다. 아크 신호의 개수 확인 시 하나의 아크 신호를 중복하여 측정하지 않기 위해서는 신호의 폭 선정이 중요하다. 아크 펄스 및 개폐서지 펄스의 폭을 측정한 결과, 아크 펄스의 폭은 약 0.5 $\mu$s ~ 1.5 $\mu$s, 개폐서지의 펄스 폭은 약 0.5 $\mu$s ~ 1.2로 측정됨으로써, 본 논문에서 최소 아크 펄스 폭은 2 $\mu$s로 설정하였다.



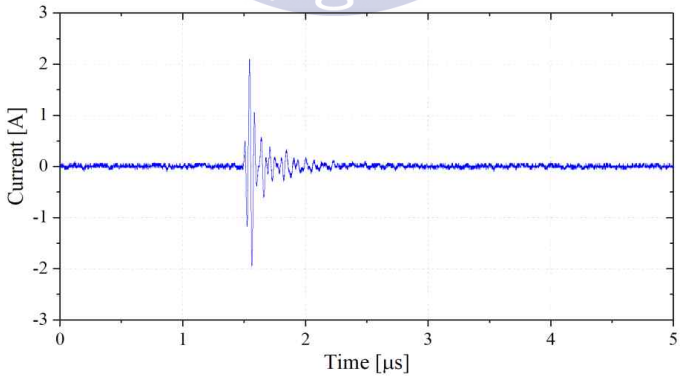
Collection @ kmou




(a) 아크 펄스




(b) 스위치 개폐서지




(c) 전동드릴 개폐서지

그림 4.1 신호의 폭

Fig. 4.1 Pulse width



Collection @ kmou

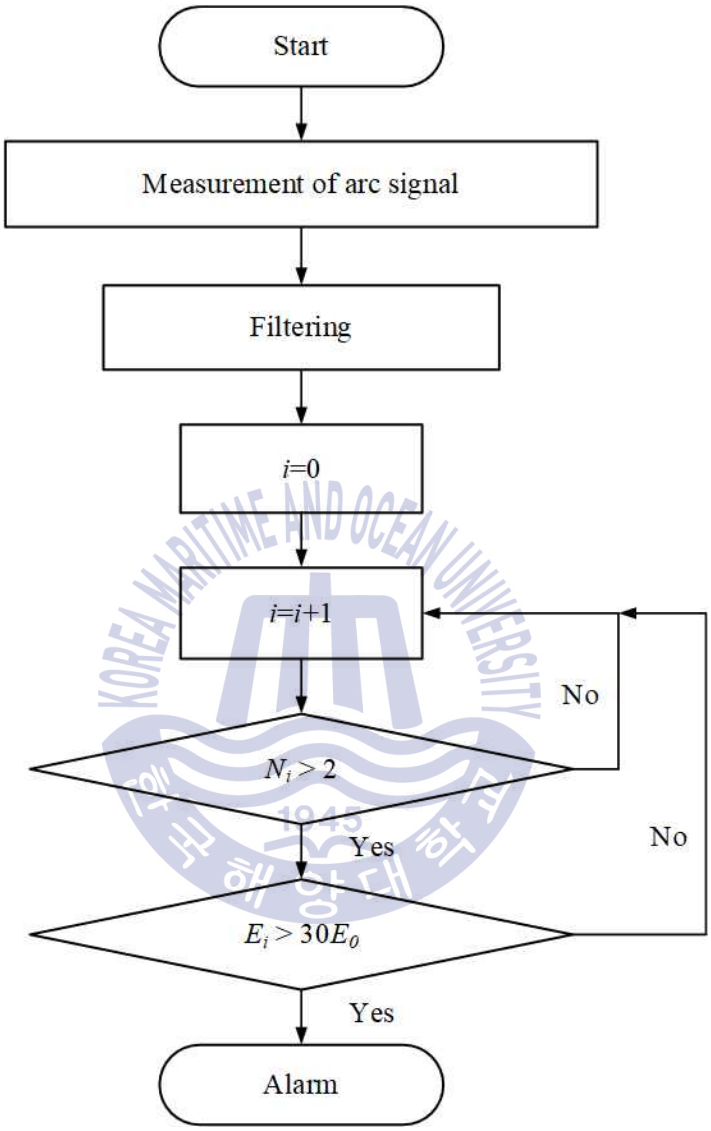
표 3.3에서 분석한 아크 발생 시 부하에 따른 신호의 에너지 변화 결과를 고려하여 정상 상태와 아크 발생시의 최소 에너지 증가율을 표 3.4에 나타내었다. 전열기의 경우 최소 33.7배, LED 등기구의 경우 8,249.8배까지 증가함으로서, 한 구간에서 정상 상태 에너지 보다 30배 이상 커질 경우를 아크가 발생하고 있음을 판단하도록 설계하였다. 그림 4.2(a)에 아크판별 알고리즘의 순서도를 나타내었으며, LabVIEW를 이용하여 설계한 VI의 프런트패널과 블록다이어그램을 그림 4.2(b)와 4.2(c)에 나타내었다. 순서도에서 Ni는 구간당 검출된 아크 펄스 수, Ei는 100 ms당 계산된 아크 신호의 에너지 값을 나타낸다. 프런트패널에는 비교되는 정상 신호와 실시간 측정되는 아크 신호를 나타내며, 100 ms마다 측정된 아크 신호 수와 신호의 에너지가 기록되며, 아크를 판별한다.

표 4.1 신호 에너지의 증가율
Table 4.1 Increase ratio of signal energy

| Load | Increase ratio of energy |
|---|---|
| Electric heater | 33.7 |
| PC | 91.9 |
| Electric fan | 97.1 |
| LED lamp | 8249.8 |



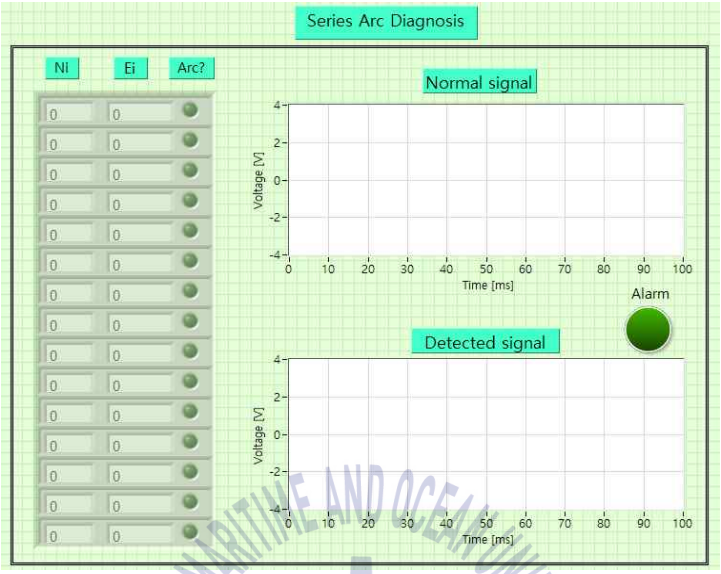
Collection @ kmou



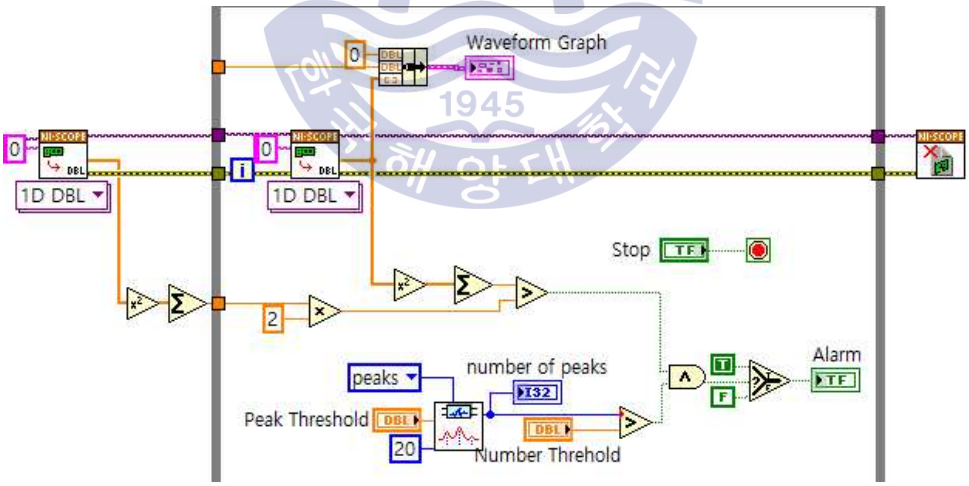

(a) 순서도



Collection @ kmou




(b) 프런트패널




(c) 블록다이어그램

그림 4.2 아크판별 알고리즘
Fig. 4.2 Arc discrimination algorithm



Collection @ kmou

## 4.2 적용 평가

### 4.2.1 아크판별

설계한 대역통과필터와 판별 알고리즘을 적용하여 실제 부하가 연결된 옥내배선 선로에서 직렬아크를 발생시켜 아크의 정상판별 여부를 확인하는 실험을 수행하였다. 실험계는 그림 4.3과 같이 저압 배선계통에서 일반적으로 사용되는 전기히터, TV, 컴퓨터, 정수기 및 LED 등기구를 부하로 연결하여 동시에 작동시키고, 이때 부하가 연결된 선로에서 각각 직렬아크를 발생시킨다. 아크 신호는 분전반의 차단기 부하측 부분에서 광대역 변류기, 대역통과필터 및 DAQ를 통해 검출하고, 알고리즘을 통해 판별한다.

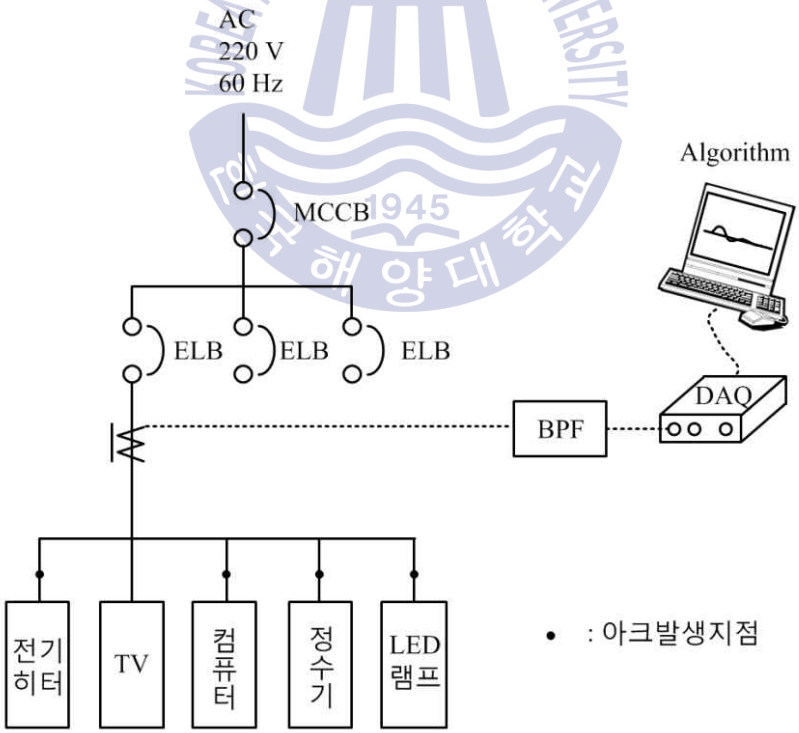



그림 4.3 실험계의 구성

Fig. 4.3 Configuration of the experimental setup



Collection @ kmou

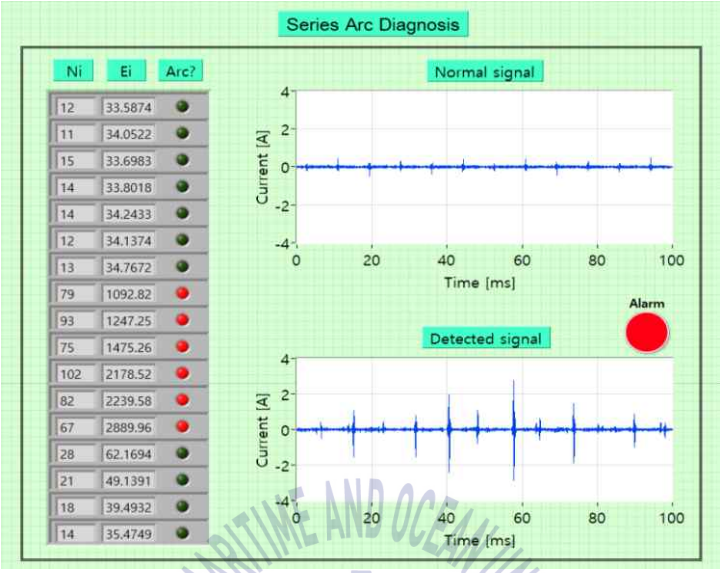
각각의 부하가 연결된 선로에서 아크 발생시의 측정결과는 그림 4.4와 같다. 그림 4.4(a)는 전열기가 연결된 선로에서 아크 발생시의 측정 결과로서, 아크가 발생하지 않은 정상 상태에서 5가지 부하의 동작 과정에서 발생한 아크와 유사한 대역의 신호가 최대 0.4 A 크기로 측정되고, 이때의 100 ms당 아크 펄스 수는 11~16, 신호 에너지는 33~37로 측정되었다. 아크 발생 시 아크 펄스 수는 67~102로 측정되고, 이때의 신호 에너지는 1092~2899까지 측정됨으로서, 정상 상태에 비해 30배 이상 신호 에너지가 증가하여 정상적으로 아크를 판별함을 확인하였다.

컴퓨터 부하가 연결된 선로에서 아크 발생시의 측정 결과는 그림 4.4(b)와 같으며, 아크 발생 시 아크 펄스 수는 325~632, 신호 에너지는 3248~6325까지 측정됨으로서, 정상적으로 아크를 판별하였다.

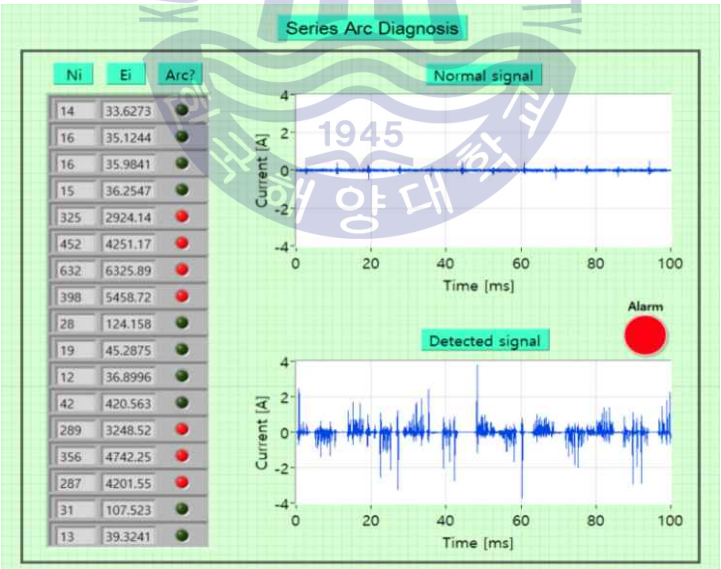
정수기 및 LED 등기구 부하의 경우에도 그림 4.4(c) 및 그림 4.4(d)와 같이 아크 발생 시 아크 펄스 수와 신호 에너지의 분석을 통해 정상적으로 아크를 판별하였으며, 이를 통해 다수의 부하가 연결된 실제 계통에서 아크 발생 시, 정상적으로 아크 신호를 측정 및 판별할 것으로 판단된다.



Collection @ kmou



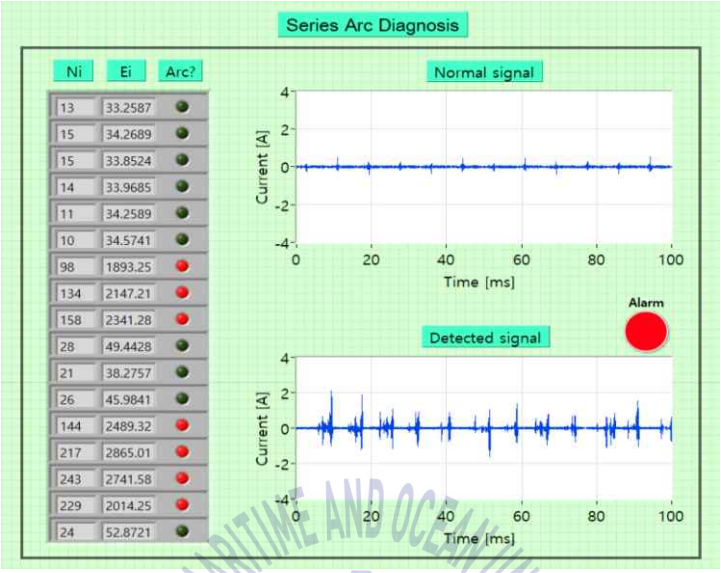

(a) 전기히터



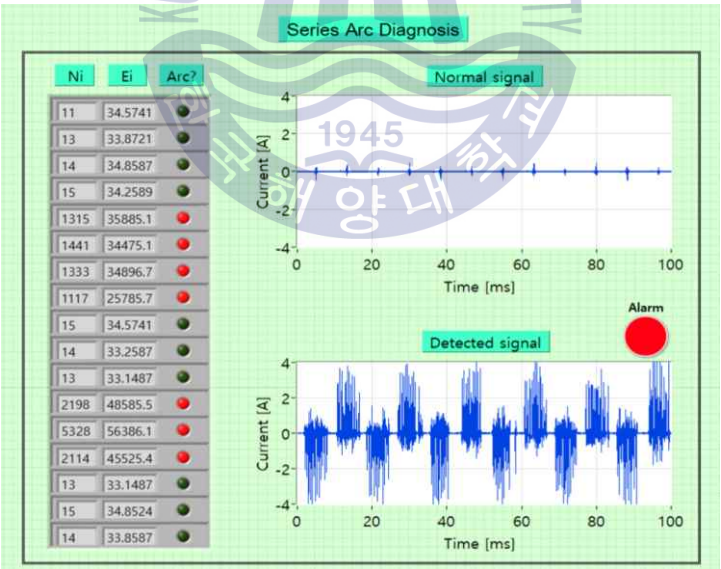

(b) 컴퓨터



Collection @ kmou




(c) 정수기




(d) LED 등기구

그림 4.4 병렬부하 시험 결과

Fig. 4.4 Results of parallel road test



Collection @ kmou

### 4.2.2 오동작 분석

저압 배선계통에서 사용하는 전기기기 중, 기기 동작중에 직렬아크 방전 과정에서 발생하는 고주파 신호와 유사한 고주파 신호가 발생하는 경우가 있다. UL1699 및 IEC62606에서는 이 같은 고주파 신호에 아크차단기가 동작하지 않도록 다양한 분기 부하시험을 수행하도록 규정하고 있으며, IEC62606의 시험 부하 및 시험 방법은 표 4.2와 같다.

표 4.2 오동작시험 방법
Table 4.2 Methods of unwanted tripping test

| | |
|---|---|
| 시험 부하 | · 5 A~7 A 용량의 진공청소기 또는 직교류 겸용 모터 부하<br>· 2.5 A 이상의 SMPS 부하<br>· 컴프레서 모터<br>· 600 W 램프 조광기<br>· 40 W 형광등 2개 + 5 A 저항 부하<br>· 300 W 할로겐 램프 + 5 A 저항 부하<br>· 드릴과 같은 600 W 급 전기도구0.1 V/A ± 1 % |
| 시험 방법 | 5초 동안 전원 인가, 5번의 Start/Stop 동작 실시 |

7가지의 오동작 시험 중, 3장과 4장에서의 실험과 중복되는 부하는 제외하고 1,200 W 진공청소기, 조광기 및 600 W 전동드릴 부하에서 오동작 시험을 진행하였다. 진공청소기의 시험 파형은 그림 4.5(a)에 나타내었다. 청소기 스위치의 켜짐 동작 시 개폐서지에 의한 유사 아크 신호가 검출되나, 작동중에는 아무 신호도 검출되지 않았으며, 정상 상태에서의 에너지

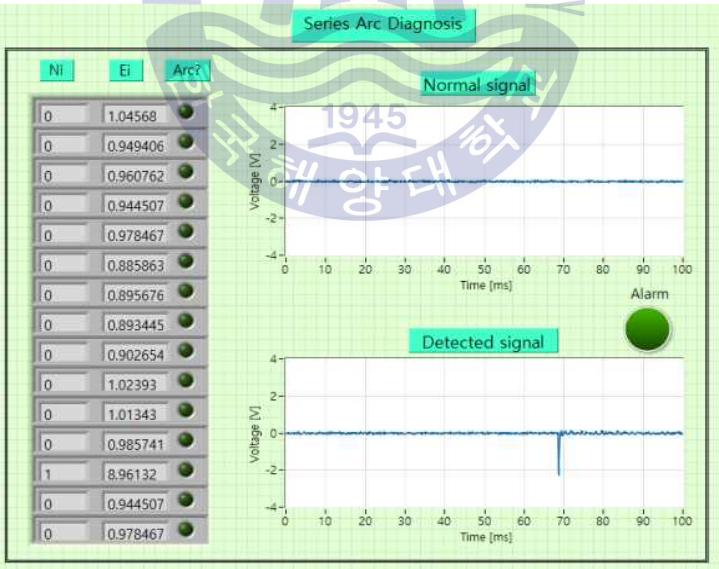


Collection @ kmou

는 약 0.94이고 전원 켜짐 시 8.96으로서, 아크로 판별하지 않았다.

조광기 사용시의 시험 파형은 그림 4.5(b)에 나타내었다. 조광기가 동작하지 않는 정상 상태에서 아크 펄스 수 0, 신호 에너지는 0.94로 측정되었다. 조광기는 작동 시 위상제어 과정에서 고주파 신호가 발생하며, 작동 시 아크 펄스 수는 5로 측정되나, 신호 에너지는 1.57로 측정되어 아크로 판별하지 않았다. 이는 조광기 작동 시 발생한 고주파 신호는 대역통과필터를 통해 대부분 감쇄된 것으로 판단된다.

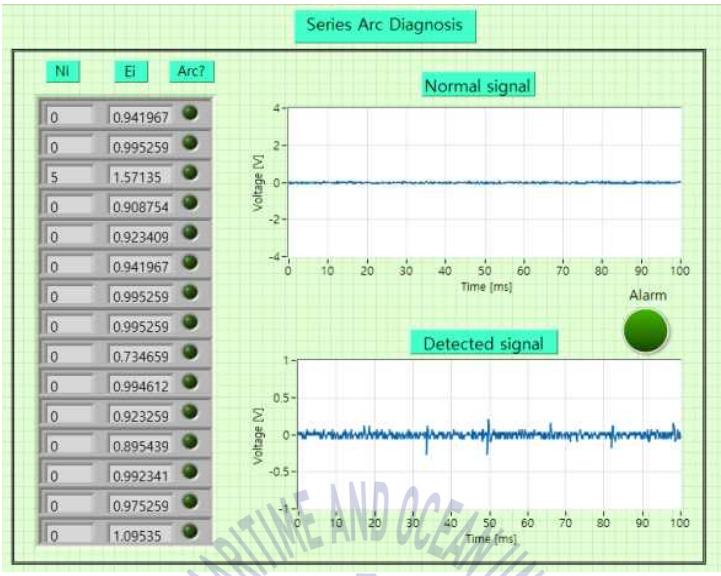
전동드릴 사용시의 시험 파형은 그림 4.5(c)에 나타내었다. 전동드릴 기동 시 상대적으로 큰 약 6 A정도의 전류가 대역통과필터를 통해 검출되었으나, 반복시험결과 최대 22의 신호 에너지가 측정되며, 단일 펄스로서, 아크의 판별없이 정상적으로 동작함을 확인하였다.



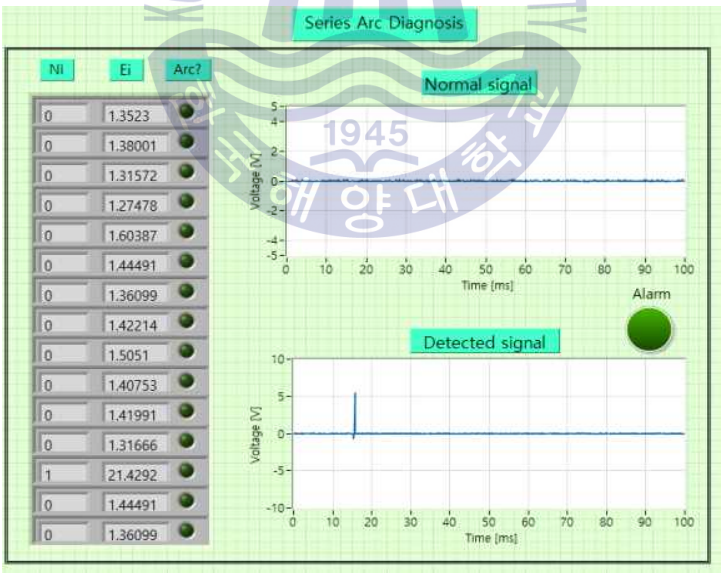

(a) 진공청소기 동작 시



Collection @ kmou




(b) 조광기




(c) 전동드릴

그림 4.5 오동작시험 결과

Fig. 4.5 Results of unwanted tripping test



Collection @ kmou

### 4.2.3 선로정수의 영향

저압배선 계통에서는 전원이 인입되면 분전반의 메인 차단기 및 분기 차단기를 통해 콘센트, 전등 및 전열용 등으로 나누어 전원이 공급된다. 분기 차단기의 부하측에는 수 미터에서 수 십 미터까지의 거리에 다수의 부하가 병렬로 연결되며, 설치된 전선의 굵기, 종류, 배치 형태 등에 따라 저항, 인덕턴스, 정전용량 및 누설 컨덕턴스와 같은 선로정수가 정해지며, 선로정수의 영향에 따라 신호의 감쇄가 발생할 수 있다. 선로의 저항은 식 4.1과 같이 나타낼 수 있으며, 도체의 길이에 비례하고, 단면적에 반비례하는 특성이 있다.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \, [\Omega] \tag{4.1}$$

여기서, $\rho$는 고유저항, $l$은 선로길이, A는 단면적을 나타낸다.

왕복 2도선 단도체 선로의 인덕턴스는

$$L = 0.05 + 0.4605 \log_{10} \frac{D}{r} \, [mH/km] \tag{4.2}$$

이며, 단도체의 정전용량은

$$C = \frac{0.02413}{\log_{10} \frac{D}{r}} \, [uF/km] \tag{4.3}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 r은 전선의 반지름, D는 등가 선간거리이



Collection @ kmou

다.

국내에서 옥내 배선으로 사용되는 2.5㎟ 비닐 절연 전선(연선 도체)의 저항은 케이블 제조사의 제품 카탈로그를 참고하였으며, km당 도체의 저항을 7.41 Ω으로 했을 때, 길이에 따른 선로의 저항과 인덕턴스는 표 4.3과 같다(r : 1.01 mm, D : 1 mm)[48]. 30 m 거리에서 선로의 임피던스는 2.223 Ω, 인덕턴스는 1.470 μH로 계산되었다.

일반적인 아파트의 옥내 배선을 최대 30 m 라고 가정하였을 경우, 단거리 선로로써 정전용량은 무시할 수 있으며, 길이 및 주파수에 따른 감쇄비율의 시뮬레이션 결과를 표 4.4와 그림 4.5에 나타내었다. 인가 신호의 주파수는 아크검출 대역을 고려하여 2.4 kHz, 20 kHz 및 39 kHz로 하였다. 측정결과 거리가 증가함에 따라, 주파수가 높아짐에 따라 감쇄량은 증가하였으나, 신호의 감쇄는 주파수의 영향보다는 거리의 영향을 더욱 받는 것으로 나타났다. 하지만, 30 m 거리, 39 kHz 신호의 입력시 0.2 %만 감쇄함으로서, 본 논문에서 제안한 검출 방법은 30 m 까지는 선로 길이에 대한 영향 없이 적용이 가능할 것으로 판단된다.

표 4.3 길이에 따른 저항(R) 및 인덕턴스(L) 값
Table 4.3. R and L value according to line length

| 거리 [m] | 5 | 10 | 20 | 30 |
|---|---|---|---|---|
| R [Ω] | 0.371 | 0.741 | 1.482 | 2.223 |
| L [μH] | 0.245 | 0.490 | 0.980 | 1.470 |



Collection @ kmou

표 4.4 선로길이 및 주파수에 따른 신호의 감쇄비

Table 4.4 Attenuation ratio of signal against line length and frequency

| 거리 [m] / 주파수 [kHz] | 5 | 10 | 20 | 30 |
|---|---|---|---|---|
| 2.4 | 0.037 | 0.074 | 0.148 | 0.222 |
| 20 | 0.037 | 0.074 | 0.149 | 0.223 |
| 39 | 0.038 | 0.075 | 0.150 | 0.225 |

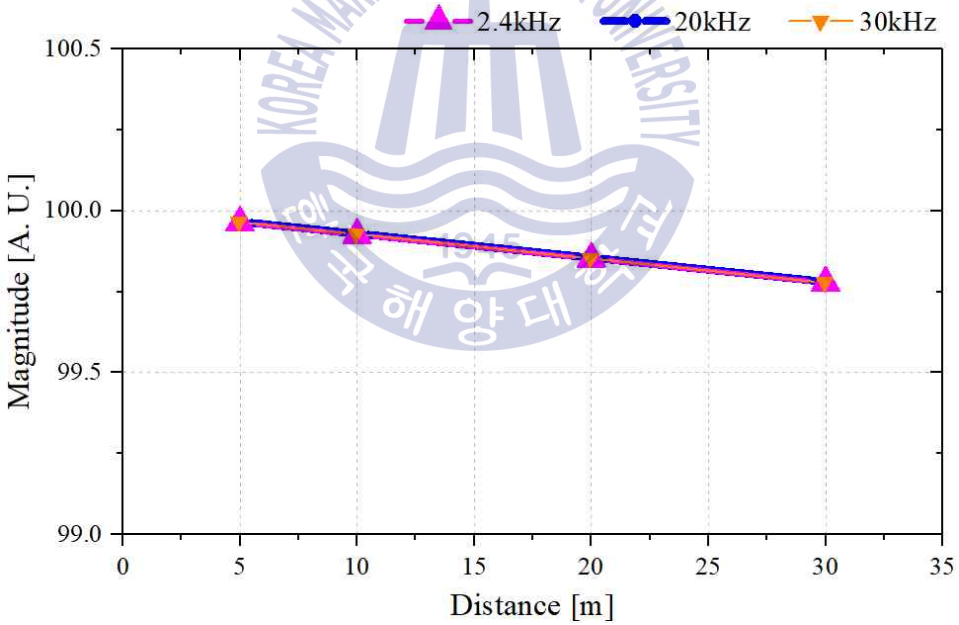



그림 4.6 선로길이에 따른 신호의 감쇄

Fig. 4.6 Attenuation of signal against line length



Collection @ kmou

# 제 5 장 결 론

본 논문에서는 저압 배선계통에서 화재원인으로 작용하는 직렬아크 방전 신호를 검출 및 판별하기 위해 직렬아크 검출 필터를 설계하고 부하에 따른 아크 방전 신호의 특성을 분석하였으며, 유사 아크 신호로부터 아크 신호를 판별할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

저압 배선계통에서 발생하는 화재원인 중, 접속·접촉불량, 부분 단선 등 직렬회로에서 발생하는 국내 화재사례를 분석한 후 대표적인 결함 3가지를 선정하여 아크 발생을 모의하였으며, 아크 전류 신호와 웨이블렛 모함수의 상관계수 계산을 통해 최적의 웨이블렛 모함수로 db13을 선정하였다. 부하별, 결함별 발생하는 아크 신호의 이산 웨이블렛 분석을 통해 2.4 kHz～39 kHz 대역의 대역통과필터를 설계 및 제작하였다.

아크 신호의 부하에 따른 특성을 분석하였으며, 신호 에너지는 정상 동작시보다 아크 발생 시 전열기는 30배 이상, 컴퓨터와 선풍기는 90배 이상, LED 등기구는 8,000배 이상 증가하는 것으로 분석되었다. 방전 위상은 4개의 부하 조건에서 분석하였으며, 전열기 사용 시 대부분 0°～120°와 150°～270°, 컴퓨터는 0°～90°와 180°～240°, 냉장고는 30°～120°와 210°～300°에서 방전이 발생하였다. 에어컨의 경우 0°～30°와 180°～210°를 제외한 부분에서 고르게 발생하였으며, 부하의 종류에 따라 직렬아크 방전이 발생하는 위상 분포가 달라지는 특성을 도출하였다.

단위 구간별로 아크 펄스 수와 신호 에너지 크기를 비교하여 직렬아크



Collection @ kmou

를 판별할 수 있는 알고리즘을 제시하였으며, 아크 펄스폭과 개폐서지 펄스 폭을 기준으로 측정하는 최소 아크 펄스 폭은 2 $\mu$s로 선정하였다. 설계한 대역통과필터와 알고리즘을 적용하여 병렬 부하 선로에서 아크판별 시험, IEC62606의 오작동 시험을 수행하였으며, 아크와 유사한 고주파 신호에 대한 오동작 없이 정상적으로 판단됨을 검증하였다. 또한 선로 임피던스에 의한 신호의 감쇄 특성을 분석한 결과, 본 논문에서의 검출대역인 2.4 kHz~39 kHz 신호의 경우 30 m 거리에서 약 0.23 %가 감쇄함으로서, 선로 길이에 대한 영향 없이 적용 가능할 것으로 판단된다.

본 논문에서 제안한 대역통과필터 및 판별 알고리즘의 적용 시 저압배선계통에서 직렬아크의 발생을 오동작 없이 판별할 수 있을 것으로 판단되며, 실시간 화재예지장치, 계통진단장치 및 아크차단장치 등의 개발에 적용할 수 있을 것으로 기대한다. 이와 더불어 아직까지 직렬아크 발생위치를 추정하는 연구는 활발히 이루어지지 않고 있는데, 부하에 따라 방전이 발생하는 위상의 경향이 다른 점은 아크가 발생하는 선로를 추정하는데 중요자료로 활용될 수 있을 것이다.



Collection @ kmou

# 참 고 문 헌


[1] National Fire Data System. http://www.nfds.go.kr/fr_base_0001.jsf

[2] John, J.S., “Condition for series arcing phenomena in PVC Wiring”, IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf., 2007, 30, 532 - 537.

[3] 한국전기안전공사, “화재발화점 조사 및 잔존물 수거지침 제정 : 접촉불량 및 반단선에 의한 화재의 원인분석 및 판정”, 2008.

[4] George, D.G., Gary, W.S., “The arc-fault circuit interrupter: An emerging product”, IEEE Trans. Ind., Appl. 1998, 34, 928 - 933.

[5] Moon,W.S, Kim, J.C., Jo, A., Bang, S.B., Koh,W.S., “Ignition characteristics of residential series arc faults in 220-V HIV wires”, IEEE Trans. Ind. Appl. 2015, 51, 2054 - 2059.

[6] KS C 4621, “주택용 누전차단기”, 2018.

[7] KS C 8332, “주택용 배선용차단기”, 2018.

[8] Gregory G. D., Kon Wong, Dvorak, R. F., "More about arc-fault circuit interrupters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, Issue 4, pp.1006～1011, 2004.

[9] Gregory, G. D., Sott, G. W., "The arc-fault circuit interrupter: an emerging product", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, Issue 5, pp.928～933, 1998.

[10] Parise G., Martirano L., Grasselli U., Benetti L., "The arc-fault circuit protection", Thirty-Sixth IAS Annual Meeting Conference Record of the 2001 IEEE, Vol. 3, pp.1817～1822, 2001.

[11] Restrepo, C. E., "Arc Fault Detection and Discrimination Methods", The 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp.155～122, 2007.

[12] Shea J. J., "Conditions for series arcing phenomena in PVC wiring", Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference of Electrical Contacts, pp.167～175, 2005.

[13] Underwriters Laboratories. UL 1699 Standard for Arc-Fault Circuit-Interrupters, 3rd ed.; UL: Northbrook, IL, USA, 2017.




Collection @ kmou

[14] International Electrotechnical Commission. IEC 62606 General Requirements for Arc Fault Detection Devices, 1st ed.; IEC: Geneva, Switzerland, 2013.
[15] KS C IEC 62606, “사고아크 검출장치에 대한 일반 조건”, 2014.
[16] Wu, C.J.; Liu, Y.W. Smart detection technology of series arc fault on low-voltage indoor power lines. Int. J.Electr. Power Energy Syst. 2015, 69, 391 - 398.
[17] 방선배, 김종민, 박종연, 정영식, “이산 웨이블렛 변환을 이용한 직렬 아크고장 신호 검출 방법 분석”, 대한전기학회, Vol. 58P, No. 3, pp.362～368, 2009.
[18] 박종영, “전기회로에서의 직렬아크 신호특성 연구”, 충북대학교, 석사학위논문, 2010
[19] 김영관, “저압부하시 전기화재 예방을 위한 Sputtering Arc 검출에 관한 연구, 가천대학교, 석사학위논문, 2012.
[20] 김기욱, “전기 접속부의 산화물 증식 및 개시 전류 감지기법에 관한 연구”, 인천대학교, 박사학위논문, 2014.
[21] 김은진, “옥내배선에서 이상전류 분석을 통한 퍼지로직 기반 전기화재 예측 시스템 개발”, 충북대학교, 박사학위논문, 2016.
[22] 황진권, “전기화재 징후 감지를 위한 아크 전류 파형 분석에 관한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.33, No.1, pp.7-14, 2009.
[23] 양승국, 이주, “고주파 노이즈의 RSSI신호를 이용한 Arc검출방법”, 한국조명전기설비학회, 2015, 29(3), pp.102～106.
[24] 최정규, “전기화재 예방을 위한 전압센싱형 아크차단기 개발)”, 강원대학교, 석사학위논문, 2014.
[25] G. Artale, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio, D. Di Cara, G. Tine, G. Privitera, “A set of indicators for arc faults detection based on low frequency harmonic analysis”, Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2016 IEEE International.
[26] Chi-Jui Wu, Yu-Wei Liu, “Smart detection technology of serial arc fault on low-voltage indoor power lines”, Electrical Power and



Collection @ kmou

Energy System, Vol. 69, pp.391-398, 2015.
[27] Jay Johnson, Kenneth M. Armijo, Modi Avrutsky, Daniel Eizips, Sergey Kondrashov, “Arc-Fault Unwanted Tripping Survey with UL 1699B-Listed Products”, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 1, February 2016.
[28] IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, IEEE Std. 100-1996.
[29] Wen-Jun Li, Yuan-Chun Li, "Arc Fault Detection Based on Wavelet Packet", In Proc. 2005 Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Vol.3, pp.1783～1788, 2005.
[30] 길경석, 박대원, 지홍근, 조영진, 김영일, “병렬아크의 고속차단에 관한 연구”, 한국조명전기설비학회 논문지, 제22권 제12호, pp.95～100, 2008.
[31] L. Ghezzi, A. Balestrero, “Modeling and Simulation of Low Voltage Arcs”, Technische Universiteit Delft, 2010
[32] 최충석, 김향곤, 김동욱, 김동우, “직렬아크에 따른 도체의 산화물 증식 및 전압 파형”, 대한전기학회, Vol. 55P, No. 3, 2006
[33] 한국전기안전공사, “Prevention technique research of electrical fire by cause”.
[34] “電氣火災 原因分析 및 豫防對策 硏究”, 한국전기안전공사
[35] Wang, G.M., Kim, S.J., Kil, G.S., Kim, S.W., “Optimization of wavelet and thresholding for partial discharge detection under HVDC”. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2017, 24, 200 - 208.
[36] Moula, B., Mekhaldil, A., Teguar, M., Haddad, A., “Characteristics of discharge on non-uniformly polluted glass surface using a wavelet transform approach”. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2013, 20, 1457 - 1466.
[37] Ucar, F.; Alcin, O.F., Dandil, B., Ata, F., “Power quality event detection using a fast extreme learning machine”. Energies 2018, 11, 145.
[38] Antonino-Daviu, J., Riera-Guasp, M., Roger-Folch, J.,



Collection @ kmou

Martinez-Jimenez, F., Peris, A., “Application and optimization of the discrete wavelet transform for the detection of broken rotor bars in induction machines”. Appl. Comput. Harmon. Anal. 2006, 21, 268 - 279.

[39] Hernandez, J.C., Antonino-Daviu, J., Martinez-Jimenez, F., Peris, A., “Comparison of different wavelet families for broken bar detection in induction motors”, In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Seville, Spain, 17 - 19 March 2015; pp. 3220 - 3225.

[40] Chang, H.H., Linh, N.W., “Statistical feature extraction for fault locations in nonintrusive fault detection of low voltage distribution systems”, Energies 2017, 10, 611.

[41] Xu, Z., Tang, J., Sun, C., “Application of complex wavelet transform to suppress white noise in GIS UHF PD Signals”. IEEE Trans. Power Deliv. 2007, 22, 1498 - 1504.

[42] C.S. Chang, J. Jin, C. Chang, T. Hoshino, M. Hanai, N. Kobayashi, “Separation of corona using wavelet packet transform and neural network for detection of partial discharge in gas-insulated substations”, IEEE Trans. Power Del., Vol. 20, pp.1363-1369, 2005.

[43] Wang, G.M., Kil, G.S., Ji, H.G., Lee, J.H., “Disturbance elimination for partial discharge detection in the spacer of gas-insulated switchgears”. Energies 2017, 10, 1762.

[44] Hong-Keun Ji, Guoming Wang, Woo-Hyun Kim, Gyung-Suk Kil, “Optimal Design of a Band Pass Filter and an Algorithm for Series Arc Detection”, Energies, 2018, 11, 992.

[45] Hong-Keun Ji, Young-Jin Cho, Guoming Wang, Seong-Cheol Hwang, Gyung-Suk Kil, “Extraction of Series Arc Signals Based on Wavelet Transform in an Indoor Wiring System”, TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 18, No. 4, pp. 221-224, August 25, 2017.



Collection @ kmou

[46] Imoru, O., Bhaskar, M.A., Jimoh, A.A.-G., Hamam, Y., “Diagnosis of stator shorted-turn faults in induction machines using discrete wavelet transform”, Afr. J. Sci. Technol. Innov. Dev. 2017, 9, 349 - 355.

[47] Gritli, Y., Lee, S.B., Filippetti, F., Zarri, L., “Advanced diagnosis of outer cage damage in doublesquirrel-cage induction motors under time-varying conditions based on wavelet analysis”, IEEE Trans. Ind. Appl. 2014, 50, 1791 - 1800.

[48] 대원전선 종합카다로그, www.daewoncable.co.kr



Collection @ kmou

# 연구논문 발표실적

◎ 국제전문학술지

[1] “Optimal Design of a Follow Current Disconnector for DC Arresters in Traction Vehicles”, TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 17, No. 5, pp. 289-292, October 25, 2016.

[2] “A Ferris wheel accident at a movable amusement park”, Journal of Forensic Sciences, Vol. 62, No. 3, 2017. 5.

[3] “Extraction of Series Arc Signals Based on Wavelet Transform in an Indoor Wiring System”, TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 18, No. 4, pp. 221-224, August 25, 2017.

[4] “Disturbance Elimination for Partial Discharge Detection in the Spacer of Gas-Insulated Switch”, Energies, Vol. 10, No. 11, 1762, November 02, 2017.

[5] “Optimal Design of a Band Pass Filter and an Algorithm for Series Arc Detection”, Energies, Vol. 11, No. 4, 992, April 19, 2018.

[6] “Analysis of PD Signal for Condition Monitoring of MV Switchboards by the Measurement of Transient Earth Voltage”, TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 19, No. 3, pp. 195-200, 2018

[7] “Detection and Analysis of Series Arc using Non-conventional Methods in Low-voltage Switchboards”, Journal of Electrical Engineering, Under Review.



Collection @ kmou

◎ 국내전문학술지

[1] “직렬아크신호의 검출방법”, 한국철도학회논문집, 제11권 제5호, pp.477~481, 2008. 10.

[2] “병렬아크의 고속차단에 관한 연구”, 한국조명전기설비학회 논문지, 제22권 제12호, pp.95~100, 2008. 12.

[3] “직렬아크현상의 검출기술 및 장치”, 한국마린엔지니어링학회, Vol.34, No.2, pp.332-338, 2010. 3.

[4] “저압용 소형 관형퓨즈의 용단특성에 관한 실험적 연구”, 한국안전학회지, Vol.28, No. 5, pp.15-20, 2013. 9.

[5] “차종에 따른 항력특성”, 과학수사학회지, Vol.7, No.4, pp.260-264, 2013. 12.

[6] “옥내배선계통에서 직렬 아크의 검출과 판별”, 한국전기전자재료학회, 2018. 9.

◎ 국제학술회의 발표

[1] "Design and Fabrication of a Wideband Ground Impedance Meter", Proceedings of The 5th Asia Lightning Protection Forum, pp.149~151, 2008. 4.

[2] "Series Arc Detection in Inverter-Driven Air Conditioners", Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2009, pp.157.1~157.5, 2009. 7.

[3] "Application of High Brightness LED for Shipboard Light Source", Proceeding of the 2th International Conference on Maritime and Naval Science and Engineering (MN'09), pp.82~86, Brasov, Romania, 2009. 9. 24.



Collection @ kmou

[4] “THE FAILURE OF A BUNGEE DROP IN AN AMUSEMENT PARK”, International Association of Forensic Sciences 2014(WFF2014), Seoul, Korea, 12-18 Oct., 2014

[5] “Study on the Series Arc Detection causing Electrical Fire in Interior Wiring System”, The International Conference on Electrical Engineering, Hong Kong, 5-9 July, 2015



Collection @ kmou