

## 직렬 아크 및 코로나 방전의 주파수 스펙트럼 분석

길경석<sup>1,a</sup>, 정광석<sup>1</sup>, 박대원<sup>1</sup>, 김선재<sup>1</sup>, 한주섭<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국해양대학교 전기전자공학부

<sup>2</sup> 한국해양대학교 산업기술연구소

### Frequency Spectrum Analysis of Series Arc and Corona Discharges

Gyung-Suk Kil<sup>1,a</sup>, Kwang-Seok Jung<sup>1</sup>, Dae-Won Park<sup>1</sup>, Sun-Jae Kim<sup>1</sup>, and Ju-Seop Han<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

<sup>2</sup> Research Institute of Industrial Technology, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

(Received May 18, 2010; Revised June 18, 2010; Accepted June 22, 2010)

**Abstract:** In this paper, we analyzed the frequency spectrum of radiated electromagnetic pulses generated by series arc- and corona- discharges as a basic study to develop an on-line diagnostic technique for power facilities installed inside closed-switchboards. To simulate series arc and corona discharges, five types of electrode system which consists of needle and plane electrodes were arranged. The experiment was carried out in an electromagnetic shielding room, and the measurement system consists of an ultra log antenna and an EMI receiver. From the experimental results, the frequency spectrum exists in ranges from 30 MHz to 2 GHz for a series arc discharge and 30 MHz to 1.2 GHz depending on defects for a corona discharge. The peak frequency of the series arc- and corona- discharges were 100 MHz to 160 MHz and 40 MHz to 80 MHz, respectively.

**Keywords:** Electromagnetic wave, Series arc discharge, Corona discharge, Frequency spectrum, Electromagnetic shielding room, Closed-switchboard

### 1. 서론

전력수요의 증가와 고품질 전력공급의 요구로 전력 설비가 초고압·대용량화 되면서 예방진단기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 절연은 전력설비의 성능과 수명에 직접적 관련이 있으며 전기적, 열적, 화학적 스트레스로 인해 열화가 진행된다 [1,2]. 특히 폐쇄배전반에서 사고가 발생하면 수리나 교체에 막대한 비용이 소요되는 등 기술적·경제적 손실이 발생하므로 안정적인 전력공급을 위해 주기적인 진단과 온라인 모니터링이 필요하다 [3].

폐쇄배전반은 계전기, 계측기, 제어기와 같은 감시

제어용기와 차단기, 단로기 및 고압변압기 등의 전력기기로 이루어져있고 각각의 기기는 지지구조물에 유지 및 보수가 용이하도록 설비되어있다. 전력계통의 전 구간에서 사용되는 폐쇄배전반의 내부에서 전기사고가 발생하면 전력공급의 중단은 물론 전기화재 및 인명사고와 같은 2차 사고를 발생시키므로 신뢰성 있는 운전이 요구된다.

그러나 폐쇄배전반 내에서 접촉 불량, 절연물의 절연내력 저하 등으로 인해 발생하는 방전현상은 각종 사고로 이어져 전력공급에 치명적인 영향을 미치고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고전압 전력기기의 절연상태를 감시하고 배전반 내 전력기기의 이상 유무를 진단할 수 있는 기술개발이 필요하다.

a. Corresponding author; kilgs@hhu.ac.kr

방전현상은 고주파 펄스전류, 진동, 빛, 가스, 초음파, 방사전자파 등과 같은 현상을 동반하므로 이들 현상을 검출하면 폐쇄배전반 내부의 이상상태를 판단할 수 있다 [4,5].

특히, 방사전자파를 이용한 방법은 센서의 소형화 및 경량화가 가능하므로 전력기기가 밀집되어있는 폐쇄배전반의 상태진단에 적합하며, 방전의 형태에 따라 특징적인 주파수 스펙트럼을 나타내므로 결합의 판단도 가능하다.

본 논문에서는 폐쇄배전반에 설치되어있는 전력기기의 온라인 상태 진단기술을 개발하기 위한 기초 연구로써 직렬아크 및 코로나방전에 의해 발생하는 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 분석하였다.

## 2. 실험 방법

폐쇄배전반내 전력기기의 절연열화를 발생시키는 주요 요인에는 열적, 전기적, 기계적, 환경적 요인이 있으며 각각의 기기에서 발생하는 열과 불완전한 냉각에 의한 온도상승은 절연물의 열분해 및 산화반응을 가속화시켜 기계적 강도 및 절연내력을 약화시킨다. 이러한 현상으로 인해 전기적, 기계적 성능이 저하되고 최종적으로 사고로 진전된다 [6-8].

폐쇄배전반의 사고는 상기의 요인 중 단일 요인으로 발생하는 것이 아니라 여러 요인이 복합적으로 작용하여 진행되며 제조상의 문제나 노후화로 인한 코로나 및 직렬 아크 방전을 발생시키므로 이들 신호를 검출함으로써 폐쇄배전반의 상태를 진단할 수 있다.

### 2.1 코로나 방전

기기를 구성하는 절연물에 이상이 생기면 내부방전, 연면방전 및 코로나 방전 등이 발생한다 [9].

코로나 방전은 그림 1과 같이 전계가 집중되는 곳에서 발생하는 국부방전으로, 빛과 소리를 동반하고 이에 의해 전자파를 방사하며 폐쇄배전반내의 전력기기의 접속부위나 변압기 탭 등의 돌출부에서 발생할 수 있다.

연면방전은 부적절한 절연설계에 의한 누설거리의 부족이나 절연체 표면의 오손에 기인한 유효 누설거리 감소로 인해 발생하며 폐쇄배전반내의 변압기 및 애자 표면에서 발생한다. 내부방전은 보이드 및 전기트리 방전으로 구별할 수 있으며, 초기 보이드방전이 진전되면 절연물 내에 전기트리가 발생하고 최종적으로 절연파괴에 이르게 된다.

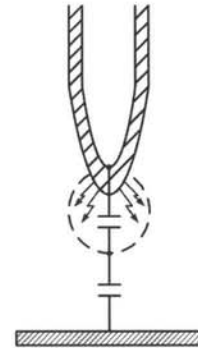


Fig. 1. Corona discharge.

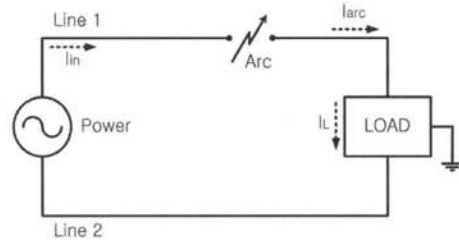


Fig. 2. Series arc discharge.

### 2.2 직렬 아크 방전

아크는 절연물질을 통해서 연속적으로 빛을 내는 방전현상으로 발생 메커니즘에 따라 직렬 아크와 병렬 아크 방전으로 구별할 수 있다 [10-13].

직렬 아크 방전은 전력기기간의 접속불량 및 내부선로의 손상과 같이 단일도체의 불완전한 접속부위에서 발생하며 그림 2와 같이 부하와 직렬로 연결되기 때문에 아크전류가 부하전류와 비례하여 증가하고 주위 절연물을 산화 및 열분해하여 탄화도전로를 발생시킨다. 지속적인 탄화도전로의 형성은 병렬 아크 방전을 발생시켜 화재나 기기파손과 같은 사고로 진전된다.

### 2.3 전극계

폐쇄배전반내의 전력기기에서 발생할 수 있는 코로나 방전을 모의하기 위해 그림 3과 같이 평판-평판, 침(0.2 mm)-평판, 침(10 μm)-평판 전극계를 제작하였으며, 직렬 아크 방전을 모의하기 위해 그림 4와 같이 침(10 μm)-침(0.2 mm), 침(10 μm)-침(10 μm) 전극계를 제작하였다.

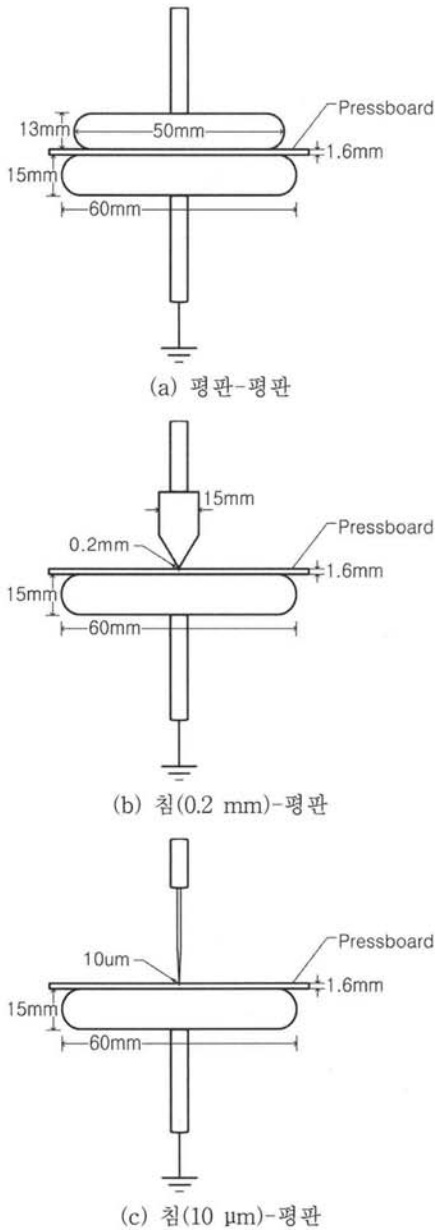


Fig. 3. Electrode system for corona discharge.

그림 3은 폐쇄배전반 내부에 설치된 전력기기에서 발생하는 코로나 방전을 모의하기 위한 전극계로서 전극 간격을 1.6 mm로 일정하게 유지하고 결합의 형태를 달리하여 제작하였으며 전극사이에는 절연지를 삽입하였다.

평판전극은 텅스텐과 구리의 합금 재질이며 가장자리를 둥글게 제작하여 전계의 집중이 발생하지 않도록 하였고 침전극의 곡률반경을 작게 하여 침 전극에서의 방전을 유도하였다.

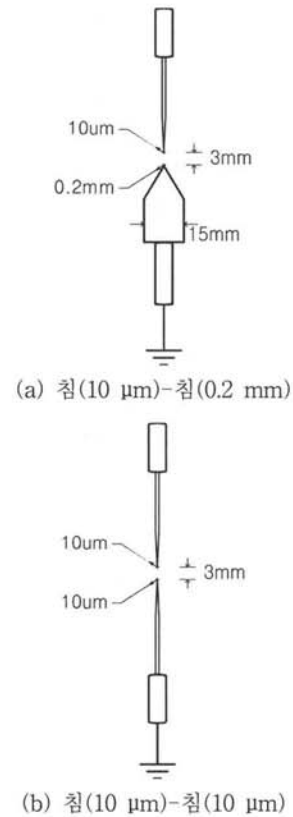


Fig. 4. Electrode system for series arc discharge.

그림 4는 폐쇄배전반 전력기기간의 단일도체의 불완전한 접속으로 인한 직렬 아크 방전의 발생을 모의한 전극계로서 그림 3에 나타낸 전극계와 마찬가지로 전극 간격을 3 mm로 일정하게 유지하고 구조를 달리하여 제작하였다. 전극사이에는 코로나 방전 전극계와 달리 절연지를 삽입하지 않고 방전 후 아크현상이 지속적으로 발생되도록 하였다.

### 2.4 측정 시스템

직렬 아크 및 코로나 방전의 발생에 의한 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 분석하기 위해 그림 5와 같이 실험계를 구성하였다. 고압변압기(0~50 kV)를 이용하여 직렬 아크 및 코로나 방전의 발생을 모의하였으며 ultra log antenna(30 MHz~3 GHz) 및 스펙트럼 분석기 (EMI receiver, 3 Hz~3 GHz)를 사용하여 전극계에 따른 방사전자파의 전계강도를 측정하였다.

실험은 전파암실(15 m × 28 m × 10 m)에서 수행하였으며 제작한 전극계를 위치시키고 안테나는 지표면에서 1 m 높이에 수직상태로 고정시켰으며 안테나와 전극계와의 거리는 3 m로 이격하였다.

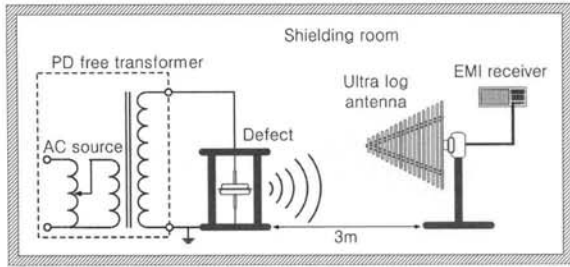


Fig. 5. Configuration of the experimental apparatus.

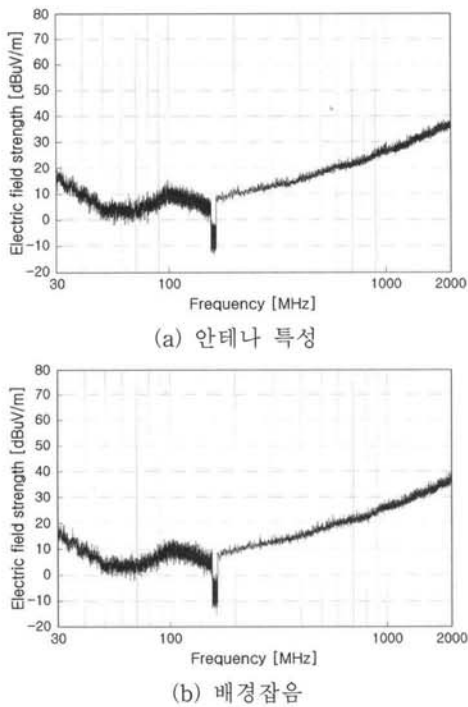


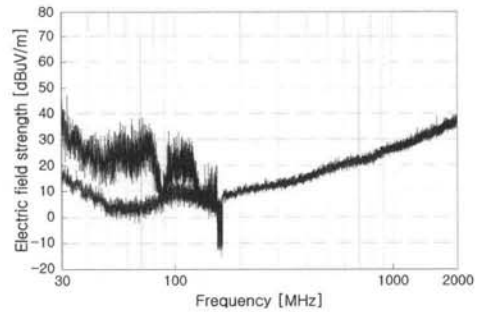
Fig. 6. Antenna factor and background noise.

### 3. 결과 및 고찰

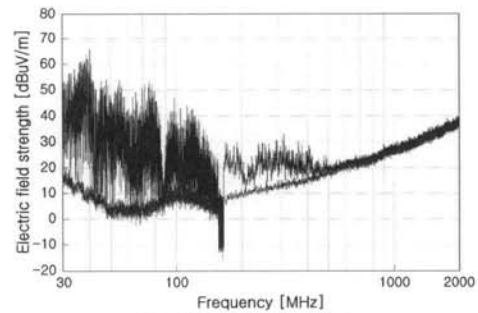
#### 3.1 배경잡음

전극계에 따른 주파수 스펙트럼 분석에 앞서 전파 암실에서 안테나 특성과 측정 시스템에 의해 발생하는 배경잡음을 평가하였으며, 측정결과를 그림 6에 나타내었다.

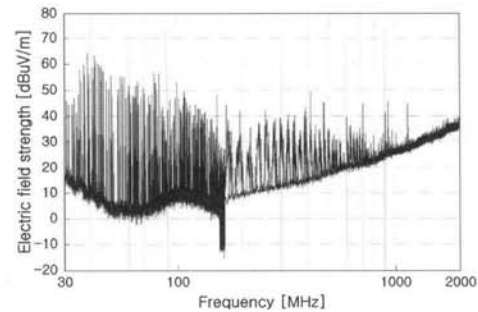
안테나의 특성은 그림 6(a)와 같으며 30 MHz~2 GHz에서 -10 dB $\mu$ V~40 dB $\mu$ V의 전계강도를 나타내었다. 실험계에서 발생하는 배경잡음은 그림 6(b)와 같으며 30 MHz~2 GHz에서 -10 dB $\mu$ V~40 dB $\mu$ V로 안테나



(a) 평판-평판



(b) 침(0.2 mm)-평판



(c) 침(10  $\mu$ m)-평판

Fig. 7. Frequency spectrum of the corona discharges.

특성과 동일하게 나타났다. 상기의 결과로부터 고압 변압기 내부에서는 어떠한 전자파도 발생하지 않음을 확인하였다.

#### 3.2 코로나 방전

코로나 방전을 모의하기 위해 그림 3의 전극계에 3.5 kV의 상용주파수 고전압을 인가하여 결합에 따른 주파수 스펙트럼을 측정하였으며 측정결과를 그림 7에 나타내었다.

그림 7(a)는 평판-평판 전극계의 주파수 스펙트럼 분포를 나타낸 것으로 방사전자파에 의한 주파수 스펙트럼은 30 MHz~150 MHz 대역에 분포하였으며 50 MHz~80 MHz 대역에서 높은 전계강도를 나타내

있고 150 MHz 이상의 주파수 범위에서는 방사전자파가 존재하지 않았다. 그림 7(b)는 침(0.2 mm)-평판 전극계에서의 측정결과로서 30 MHz~500 MHz 대역에 주파수 스펙트럼이 분포하였고 40 MHz~80 MHz 대역에서 높은 전계강도를 나타내었다.

그림 7(c)는 침(10 μm)-평판 전극계의 측정결과로 주파수 스펙트럼은 30 MHz~1.2 GHz 대역에 분포하였고 40 MHz~80 MHz 대역에서 높은 전계강도를 나타내었다.

유사한 전극형태를 가진 그림 3(b)와 그림 3(c)와 같은 전극계의 경우 방전의 발생으로 인한 주파수 스펙트럼 분포는 상이하나 높은 전계강도를 나타내는 주파수 대역은 40 MHz~80 MHz로 동일하였으며, 침-평판 전극계에서 발생한 전자파가 평판-평판 전극계에 비해 20 dBμV 높은 전계강도로 측정되었다.

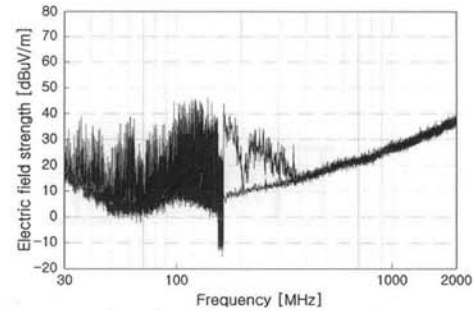
그림 3(a)와 같은 평판-평판 전극계에서는 150 MHz 이상의 주파수 범위에서 방사전자파가 존재하지 않았지만 그림 3(b) 및 그림 3(c)와 같이 전계분포가 불평등한 침-평판 전극계에서는 150 MHz 이상의 주파수 범위에서 스펙트럼이 분포함을 확인하였다.

**3.3 직렬 아크 방전**

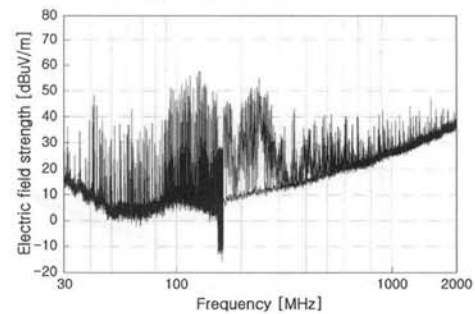
직렬 아크 방전을 모의하기 위해 그림 4에 나타난 전극계에 4.8 kV의 상용주파수 고전압을 인가하여 결합에 따른 주파수 스펙트럼을 측정하고 이를 그림 8에 나타내었다.

그림 8(a)는 침(10 μm)-침(0.2 mm) 전극계에서의 주파수 스펙트럼 분포를 나타낸 것이다. 방사전자파의 주파수 스펙트럼은 30 MHz~350 MHz 대역에 분포하였으며 100 MHz~160 MHz 대역에서 높은 전계강도를 나타내었다. 침(10 μm)-침(10 μm) 전극계에서의 주파수 스펙트럼 분포는 그림 8(b)와 같으며 30 MHz~2 GHz의 전 범위에서 스펙트럼이 분포하였으며 100 MHz~160 MHz 대역에서 높은 전계강도를 나타내었다. 그림 4와 같은 전극계의 경우에서도 방전으로 인한 주파수 스펙트럼은 상이하였으나 높은 전계강도를 나타내는 주파수 대역은 100 MHz~160 MHz로 동일하게 나타났다.

상기와 같은 측정결과로부터 전극형태 및 방전과정의 차이에 따라 주파수 스펙트럼의 분포가 상이함을 확인하였다. 코로나 방전의 경우 40 MHz~80 MHz 대역에서 높은 전계강도를 나타냈었고 직렬 아크 방전의 경우 100 MHz~160 MHz 대역에서 높은 전계강도를 나타내었다.



(a) 침(10 μm)-침(0.2 mm)



(b) 침(10 μm)-침(10 μm)

Fig. 8. Frequency spectrum of the series arc discharges

따라서 그림 7(a)~그림 7(c)와 같은 주파수 스펙트럼이 측정될 경우 전력기기의 접속부위나 변압기 탭 등의 돌출부위에서 발생하는 코로나 방전이므로 장치의 절연이상으로 판단할 수 있으며 그림 8(a) 및 그림 8(b)와 같은 경우 전력기기간의 접속불량 및 내부 선로의 손상과 같이 단일도체의 불완전한 접속부위에서 발생하는 직렬 아크 방전이므로 장치연결부의 접속불량이나 배선문제로 판단할 수 있을 것으로 생각된다.

**4. 결론**

본 논문에서는 폐쇄배전반에 설치되어있는 전력기기의 온라인 상태 진단기술 개발을 위해 직렬 아크 및 코로나 방전으로 인한 방사전자파를 측정하고 주파수 스펙트럼을 분석하였다.

폐쇄배전반내의 전력기기에서 발생할 수 있는 직렬 아크 및 코로나 방전을 모의하기 위해 5가지 종류의 전극계를 제작하였으며 전파암실에서 고압변압기, ultra log antenna, 스펙트럼 분석기를 사용하여 결합에 따른 방사전자파의 전계강도를 측정하였다.

코로나 방전의 경우 40 MHz~80 MHz 대역에서

높은 전계강도를 나타내었으며 직렬 아크 방전의 경우 100 MHz~160 MHz 대역에서 높은 전계강도를 나타내었다.

따라서 이들 대역에서의 방사전자파를 검출하면 직렬 아크 및 코로나 방전의 발생을 알 수 있기 때문에 효과적으로 이상상태 진단이 가능하며 폐쇄배전반 내부에서 발생하는 사고를 미연에 방지할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

### REFERENCES

- [1] S. Tenbohlen, D. Uhde, and J. Poittevin, *CIGRE Session 2000* (CIGRE, Paris, 2000) Paper 12-204.
- [2] P. Agoris, P. Cichecki, S. Meijer, E. Gulski, and J. J. Smit, *Proc. 15th Int. Symp. High Volt. Eng.* (ISH, Ljubljana, Slovenia, 2007) Paper T7-737.
- [3] T. Leibfried and K. Feser, *IEEE Int. Symp. Electr. Insul.* (IEEE, Montreal, 1996) p. 34.
- [4] A. Denat, *IEEE Intern. Conf. Dielectr. Liquids(ICDL)*, (IEEE Coimbra, Portugal, 2005) p. 57.
- [5] R. Tobazeon, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **1**, 1132 (1994).
- [6] L. A. Dissado and J. C. Forthergill, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers* (Redwood Press, Wiltshire, UK, 1992) p. 242.
- [7] J. C. Fothergill, L. A. Dissado, and P. J. J. Sweeney, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **1**, 474 (1994).
- [8] L. A. Dissado, S. J. Dodd, J. V. Champion, P. I. Williams, and J. M. Alison, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **4**, 259 (1997).
- [9] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment* (Butterworth & Co Ltd, London, 1989) p. 1.
- [10] Standards Coordinating Committee 10 (Terms and Definitions) Jane Radatz (Chair), *The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms* (IEEE Publishing, 1996) IEEE Std 100-1996.
- [11] W.-J. Li and Y.-C. Li, *Proc. 2005 4th Int. Conf. Mach. Learn. Cybern.* **3**, 1783 (2005).
- [12] I.-K. Kim, D.-W. Park, S.-Y. Choi, C.-Y. Park, H.-K. Kim, and G.-S. Kil, *J. KIEEME* **21**, 182 (2008).
- [13] S.-J. Kim, K.-S. Jung, D.-W. Park, and G.-S. Kil, *Proc. 2010 Spring Conf. KIEEME* (Kor. Inst. Elec. Electr. Mater. Eng., Changwon, Korea, 2010) p. 24.