

## 산불에 노출된 강심알루미늄연선 송전선 알루미늄 선재의 기계적 및 전기적 특성 거동

이원교<sup>1,a</sup>, 이정원<sup>1</sup>, 김병걸<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소

<sup>2</sup> 한국전기연구원 재료응용연구단

## Mechanical and Electrical Properties of Aluminum Wires of ACSR Conductors due to Forest Fire

Won-Kyo Lee<sup>1,a</sup>, Jung-Won Lee<sup>1</sup>, and Byung-Geol Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Transmission and Distribution, Korea Electric Power Corporation Research Institute, Daejeon 305-380, Korea

<sup>2</sup> Advanced Materials and Application Research Laboratory, Korea Electrotechnology Research Institute,  
Changwon 641-120, Korea

(Received July 26, 2010; Revised August 17, 2010; Accepted August 20 2010)

**Abstract:** Forest fire can cause a serious damage to overhead conductors. Therefore, detailed investigation on the changes of mechanical and electrical properties of damaged conductors should be carried out to understand the effect of forest fires on conductors. This is of critical importance in maintaining transmission line safely. This paper examines the changes of mechanical and electrical properties of flame exposed conductor. Tensile strength (TS) decreased according to increase of forest fire temperature and conductivity changed according to forest fire temperature. Specimens were aluminum conductors of aluminium conductor steel reinforced (ACSR) 410, 240, 480 mm<sup>2</sup>. In this paper, the electrical and mechanical characteristics of forest fires exposed overhead conductors depending on the diameter of aluminum conductors are presented. It was possible to estimate the degree of deterioration caused by forest fires. The detailed results are given in the paper.

**Keywords:** Mechanical and electrical properties, Forest fire,  
Aluminium conductor steel reinforced (ACSR) 410 mm<sup>2</sup> conductor

### 1. 서 론

우리나라는 지형 특성상 많은 송전선로가 산에 매설되어 있다. 따라서 산불 발생 시 가공송전선은 직, 간접 적으로 산불에 의한 피해에 노출되어 있다. 통계결과에 따르면 한해 평균 산불은 약 6,000건이 발생하고 있고 이것은 송전설비 전체 고장의 약 25%를

차지하고 있다. 이러한 수치는 결코 간과할 수 없는 수치이다. 산불이 발생하여 송전설비가 손상되는 것은 1차 피해이다. 이러한 1차 피해는 안정적인 전력 공급을 저해하는 2차 피해를 유발한다. 2차 피해를 최소로 줄이기 위해서는 산불에 의한 송전설비 피해를 정확히 파악해야 한다. 하지만 현재까지 산불에 의해 송전설비가 받는 영향에 대한 체계적인 연구는 이루어 진적이 없다. 따라서 산불에 의한 송전설비의

정확한 피해정도 역시 체계적으로 확인된 바 없고 명확한 대처방안도 확립 되어진 적이 없다. 산불은 다양한 인자들에 의해 특성이 약간씩 달라진다. 이러한 특성 변화에 따라 송전설비 피해도 달라진다. 송전설비에 영향을 미치는 산불의 특성을 예로 들면 화염에 의한 열화, 진화를 위한 소화약제에 의한 영향, 화염에 동반되는 분진 등이 있다. 이러한 각각의 인자에 의한 영향을 파악하는 것은 대단히 중요하다 할 수 있다 [1,2]. 본 연구에서는 국내 산불 환경에 대한 정확한 자료 조사를 토대로 실제 산불의 온도 범위를 모의하여, 산불이 발생하였을 때 가공송전선의 Al (aluminium, 알루미늄) 도체가 받는 기계적, 전기적 특성의 변화에 대해서 확인하였다. 또한 전선의 종류에 따라 발생하는 직경차이에 의해 어떠한 차이가 발생하는지 ACSR (aluminium conductor steel reinforced, 강심 알루미늄 연선) 410, 240, 480 mm<sup>2</sup> 3종류 송전선의 Al 도체에 대해서 각각 결과를 비교해 보았다.

## 2. 실험

### 2.1 온도 및 시험

선행 연구 결과에 따르면, 국내 수목 지역 산불 환경에서 가공송전선이 화염에 노출될 경우 화염의 온도는 약 900~1,200℃이며, 이 때 가공송전선의 온도는 최대 600℃로 조사되었다. 이러한 결과를 반영하여 본 실험에서는 전선의 노출 온도 범위를 300~800℃로 설정하였다. 하지만 ACSR 410 mm<sup>2</sup> 가공송전선을 대상으로 한 실험에서 500℃ 보다 높은 노출 온도에서는 송전선의 수명이 너무 빨리 감소하여, 온도에 따른 영향을 조사하는 것이 큰 의미가 없다고 판단되었다 [3,4]. 따라서 ACSR 240, 480 mm<sup>2</sup> 가공송전선은 최대 500℃까지 온도에 따른 특성 변화를 확인하였다. 각각의 노출온도에 따른 열화 시간은 60분 안에 대부분 특성 변화에서 포화가 발생하였으므로 최대 60분 까지로 제한하였다 [5].

시험편은 국내에서 많이 사용되고 있는 가공송전선인 ACSR 410, 240, 480 mm<sup>2</sup>의 Al conductor를 사용하였다. 시험편 길이는 도전을 시험에서의 규정과 인장강도 시험의 규정에 적합하게 하기 위해 80 cm로 선정하였다.

### 2.2 기계적 특성 시험 방법

ACSR 가공송전 구성소재의 인장강도와 연신율을 측정하기 위하여 사용된 인장 시험기는 전선 전용 인장시험기인 3톤 용량 Zwick사의 Z030시험기 (Zwick Roell AG, Germany)를 이용하였다[6].

시험편은 JIS Z 2201시험편규정을 따라 전체길이는 약 350 mm이며 시험편의 중심부에 100 mm의 extensor meter를 부착하였다. 시험실의 온도는 25℃로 일정하게 유지하였다. 시험은 7회 반복하여 인장강도와 연신율을 평균적으로 산출하였다. 시험의 진행과 결과는 컴퓨터에 의해 자동적으로 제어가 되고 시험이 진행되는 동안의 하중과 시험편의 길이변화는 자동적으로 저장된다.

### 2.3 전기적 특성 시험 방법

화염에 의해 열화 된 전선의 도전을 시험은 KSC 3002, IEC 1232 시험규정을 준하였으며, 300℃~800℃의 열화온도에서 각 시간대별로 시험편을 채취하여 도전을 시험을 실시하였다. 도전을 더블브리지 또는 전위차계를 사용하였으며 시험편의 측정 길이는 규정에 따라 50 cm로 하였다. 측정 시 시험실 온도는 25℃로 일정하게 유지하였으며 9회 반복하여 평균을 산출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 ACSR 410 mm<sup>2</sup> Al conductor의 기계적 전기적 특성

그림 1은 알루미늄 도체에 대하여 300℃부터 800℃까지 각 100℃단위로 인공열화 한 시험편에 대하여 상온 인장시험을 실시한 결과이다. 각 열화온도에서 열화시간에 따라 알루미늄도체의 인장강도는 민감하게 반응하여 급격하게 감소하기 시작하였다. 800℃에서 1분 인공열화 한 경우 인장강도는 약 7.8 kgf/mm<sup>2</sup>로 신전선 알루미늄도체의 최소 인장강도(16.2 kgf/mm<sup>2</sup>)의 40%수준이다. 선행연구에 따르면 동일한 조건의 화염에 노출되어진 시험편의 외관은 전혀 변화가 없어, 외관 검사 상으로는 건전하다는 결과가 나타났지만 실질적으로 상당한 인장강도의 저하가 발생하여 알루

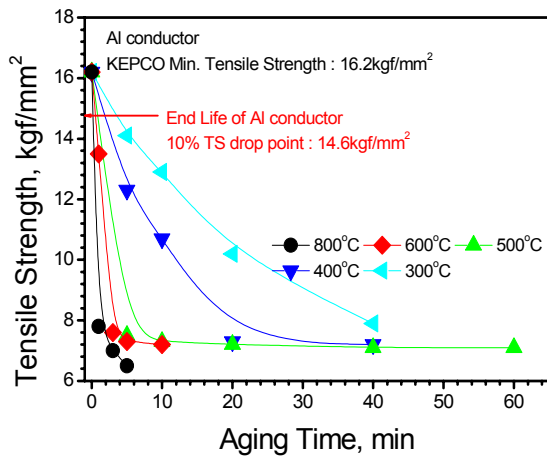


Fig. 1. Tensile strength (TS) changes of Al conductor ACSR 410 mm<sup>2</sup> by fire temperature.

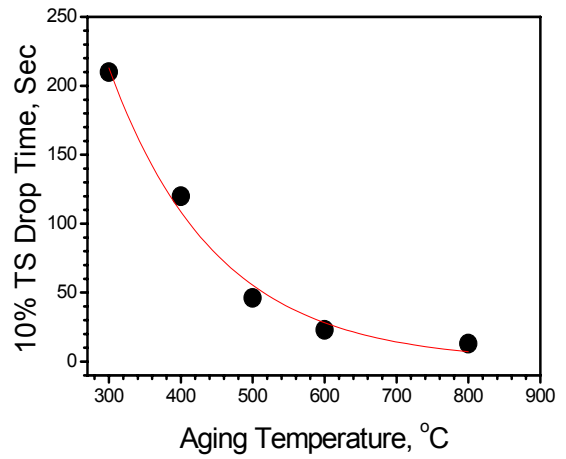


Fig. 2. 10% TS drop time in fire temperature.

미늄 도체의 수명이 다했다는 상이한 결과가 나타났  
다[7].

따라서 알루미늄도체가 산불에 노출될 경우 급격한  
가열열화가 발생하여 강도 적으로 취약해질 가능성이  
있으며 이러한 알루미늄의 급격한 열화는 아연도금강  
선의 하중부담의 증가를 유발한다.

ACSR 410 mm<sup>2</sup> 가공전선의 하중분담은 일반적으로  
60:40정도로 강심과 알루미늄 도체가 분담하지만 산  
불로 인하여 알루미늄도체가 급격하게 열화하면 알루  
미늄도체의 하중분담이 감소하고 강심의 하중분담이  
증가하여 전체적으로 전선의 단선 및 수명을 감소시  
킬 요지가 있다.

그림 2는 그림 1을 참고로 하여 전선 수명의 경계  
가 되는 인장강도 10% 감소시간을 나타낸 것이다. 인  
공열화온도가 증가하면 알루미늄의 10% 인장강도 저  
하시간이 급격하게 빨라지게 된다. 약 800°C에 약 13  
초 정도만 노출되어도 알루미늄도체의 인장강도는 최  
소인장강도의 10%가 저하하게 된다.

전선의 최저점과 산림과의 이격거리는 약 3.2 m이  
며 산불이 발생할 경우 화염의 높이가 20~30 m이다.  
따라서 송전선 주위에서 산불이 발생한 경우 전선은  
화염에 노출될 확률이 상당히 높다. 이처럼 화염에  
노출될 경우 노출시간을 측정하게 되면 전선의 건전  
성유무를 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

전선 온도 300°C에서 10% 인장강도 감소시간은  
3.5분으로 나타났다. 그림 2로부터 열화온도와 10%  
최소인장강도저하에 소요되는 시간을 실험식으로 도출  
하면 다음과 같다.

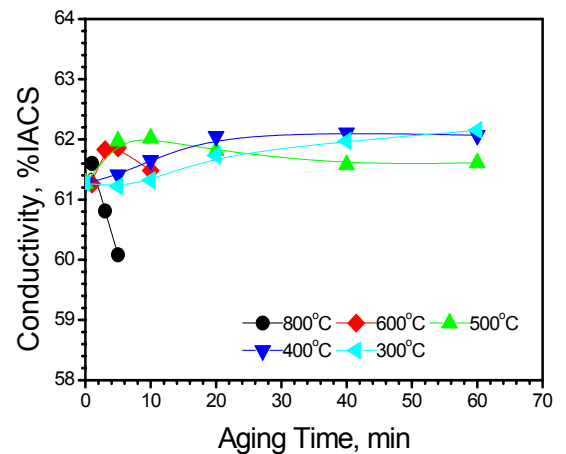


Fig. 3. Conductivity changes of Al conductor ACSR 410 mm<sup>2</sup> by fire temperature.

$$Time_{Al} = 1600 \times e^{-\frac{T_{Al}}{148.8}} - 0.263 \text{ (Sec)} \quad (1)$$

그림 3은 300°C~800°C 인공열화 온도에서 열화시간  
에 대한 알루미늄도체의 전기전도도 변화를 나타낸 것  
이다. 건전한 알루미늄도체의 전기전도도는 61.3%IACS  
(International annealed copper standard, 국제구리협회  
에서 제정한 도전을 표기방식)로 한전규정 61.0%IACS  
를 충족하였다 [8]. 전반적으로 800°C열화 이외의 열화  
온도에서 전기전도도는 약 0.3% IACS 정도 증가한  
후 변화를 나타내지 않았다.

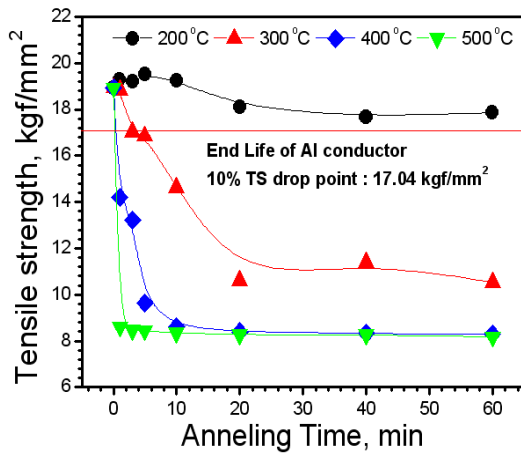


Fig. 4. Tensile strength changes of Al conductor ACSR 480 mm<sup>2</sup> by fire temperature.

높은 열에도 불구하고 한전규정인 61%IACS 도전율을 만족하여 비교적 우수한 전기전도도 특성을 나타내었다. 다만 800°C 1분 이상의 열화에서는 전기전도도가 감소하였다. 외관상으로 화염에 의한 피해는 나타나지 않았지만 알루미늄도체 내 국부 용융과 같은 결함에 의해 전기전도도가 감소한 것으로 보인다. 일반적으로 금속은 신선공정과 같은 가공에 의해 도입된 가공잔류 등의 결함이 인공화염에 의해 급속히 소멸하여 전기저항이 낮아졌기 때문인 것으로 추측된다.

### 3.2 ACSR 전선종류에 따른 Al conductor의 기계적 전기적 특성비교

그림 4는 ACSR 480 mm<sup>2</sup>전선의 알루미늄 도체(3.7 Φ)에 대하여 200°C~500°C 까지 각 100°C단위로 인공 열화 한 시험편에 대하여 상온 인장시험을 실시한 결과이다.

각 열화온도에서 열화시간에 따라 알루미늄도체의 인장강도는 민감하게 반응하여 급격하게 감소하기 시작하였다. 500°C에 노출된 알루미늄 도체의 경우, 인장강도 10%가 감소하여 수명이 다하기까지 걸리는 시간은 약 11초였다. 그리고 400°C의 경우, 약 24초가 소요되었으며 300°C의 경우는 약 188초가 소요되었다. 시험에 적용한 가장 낮은 온도인 200°C의 경우 ACSR 480 mm<sup>2</sup>의 알루미늄 도체는 열화시간이 약 1시간이 경과해도 수명이 유지되는 특성을 확인할 수 있었다.

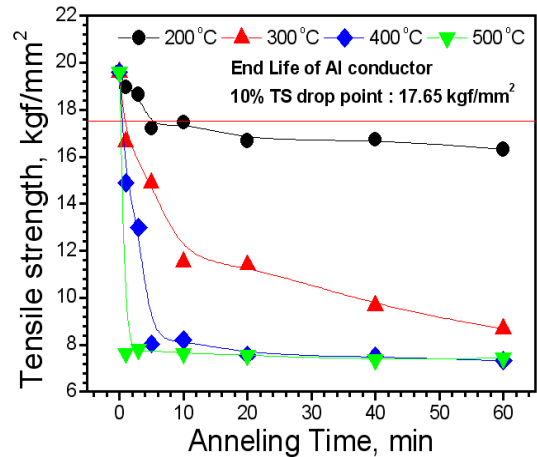


Fig. 5. Tensile strength changes of Al conductor ACSR 240 mm<sup>2</sup> by fire temperature.

그림 5는 ACSR 240 mm<sup>2</sup>전선의 알루미늄 도체(3.2 Φ)에 대하여 ACSR 480 mm<sup>2</sup>의 알루미늄도체와 동일한 조건에서 상온 인장시험을 실시한 결과이다. 500°C에 노출된 경우, 수명이 다하기까지 약 9.8초가 소요되었다. 그리고 400°C의 경우 약 25초, 300°C의 경우 약 188초가 소요되었다. 이러한 결과는 앞의 ACSR 480 mm<sup>2</sup>과 거의 유사한 결과임을 알 수 있다. 하지만 ACSR 240 mm<sup>2</sup>의 알루미늄 도체는 200°C에 노출된 경우 약 300초가 경과한 후 수명이 다하는 결과를 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 앞의 ACSR 480 mm<sup>2</sup>의 알루미늄 도체가 약 1시간의 열화시간동안 수명이 유지되는 결과와 비교 할 때 상당한 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

그림 6은 그림 1, 4, 5에서 각각의 ACSR Al conductors의 인장강도가 10% 감소하는 시간을 나타낸 것이다.

열화온도가 증가하면 알루미늄 도체의 10% 인장강도 저하시간이 급격하게 빨라짐을 알 수 있다. 전체적인 수명감소 거동은 ACSR 480 mm<sup>2</sup>과 ACSR 240 mm<sup>2</sup>은 거의 유사한 거동을 보였고 ACSR 410 mm<sup>2</sup>은 400, 500°C의 높은 온도에서 수명유지 시간이 월등히 긴 것을 확인할 수 있었다. 표 1은 알루미늄도체의 수명이 다한 교체시기를 열화 온도에 따라 나타낸 것이다.

그림 7은 ACSR 480 mm<sup>2</sup> 전선의 알루미늄 도체 전기전도도를 200~500°C의 열화온도 분위기에서 최대 60분까지 열화시간에 따라 나타낸 것이다.

전기전도도는 열화 온도에 따라 저온과 고온에

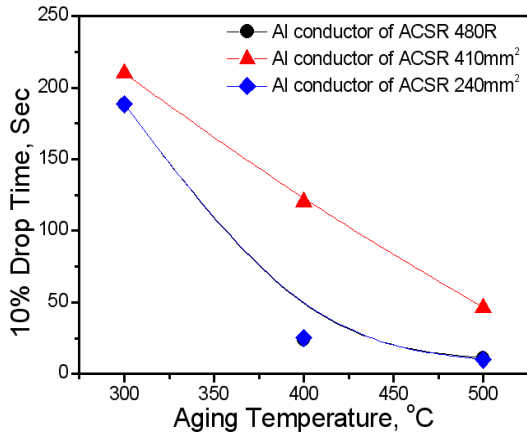


Fig. 6. Life drop properties of Al conductor by fire temperature.

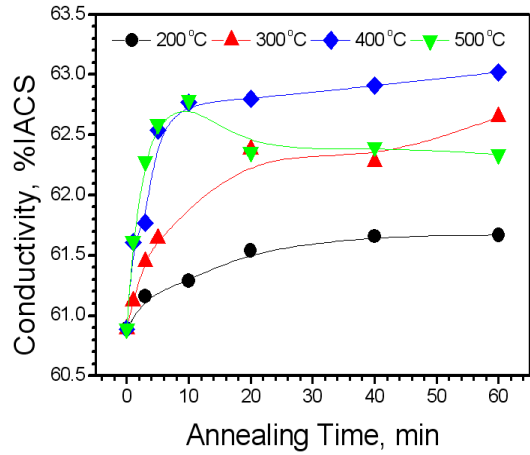


Fig. 7. Conductivity changes of Al conductor ACSR 480 mm<sup>2</sup> by fire temperature.

Table 1. Life end time of Al conductors by fire temperature.

Temperature, °C	300	400	500
Al conductor(4.5 Φ) TS 10% drop time	210	120	46.2
Al conductor(3.7 Φ) TS 10% drop time	188.4	24	11
Al conductor(3.2 Φ) TS 10% drop time	188.4	25.2	9.8

노출된 경우 2가지 상이한 거동을 나타내었다. 저온에 노출된 경우, 열화시간에 따라 지속적인 상승만이 나타난다. 하지만 고온에 노출된 경우, 열화시간에 따라 상승을 나타내다가 약 10분이 경과하면서 전기전도도가 감소하는 거동을 보인다.

일반적으로 생각 할 때, 전선이 산불에 노출된 경우 첫 번째와 같이 상승거동만을 보인다면 전기전도도는 아무런 문제가 될 것이 없지만 두 번째와 같은 감소거동은 문제를 야기할 수도 있다고 볼 수 있다. 하지만 두 번째 감소거동이 나타나기 위해서는 ACSR 480 mm<sup>2</sup> 전선의 경우 약 500°C에 10분 이상 노출이 되어야 한다. 이러한 화염 노출 조건은 인장강도 측면에서 이미 전선이 수명을 다 하였다고 판단이 되는 조건이다. 따라서 도전을 감소가 나타나는 전선은 교체되어야 한다고 볼 수 있다.

그림 8은 ACSR 240mm<sup>2</sup> 전선의 알루미늄 도체 전기전도도 변화이다.

이 경우 역시 ACSR 480mm<sup>2</sup> 전선과 동일하게 2가지 거동이 나타났다. 감소거동은 열화온도가 약 400°C

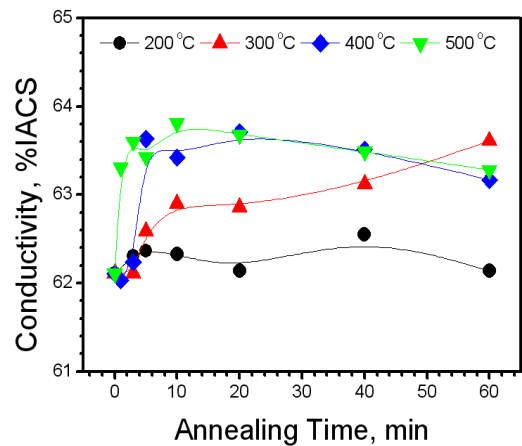


Fig. 8. Conductivity changes of Al conductor ACSR 240 mm<sup>2</sup> by fire temperature.

를 넘어서면서 나타났으며, 열화시간은 약 10분을 경과하면서부터 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 열화조건은 이미 인장강도 측면에서 충분히 수명이 다하는 조건임을 미리 확인하였다.

#### 4. 결론

1. Al 도체가 300°C이상의 산불에 노출된 경우, 외관상으로 건전하더라도 실제 인장강도는 상당히 감소한 경우를 확인하였으며 이러한 강도 감소는 가공용 전선의 하중 분담에 영향을 주어 전선 단선 및 수명 감소에 많은 영향을 줄 것이라 판단된다.

2. AI 도체가 산불에 노출된 경우, 도전율은 증가하는 거동과 증가 후 감소하는 거동을 나타내는데 도전율이 감소하는 거동이 나타났다면 그 전선은 수명이 다 한 것으로 판단된다.

3. AI 도체의 직경에 따라 산불에 노출되었을 때 기계적 특성에 대한 영향을 살펴본 결과, ACSR 410 mm<sup>2</sup> 송전선의 AI 도체의 인장강도 특성과 다른 ACSR 480, 240 mm<sup>2</sup> 송전선의 AI 도체의 인장강도 특성이 많은 차이를 나타냈지만, ACSR 480 mm<sup>2</sup>과 ACSR 240 mm<sup>2</sup> 송전선의 AI 도체의 인장강도 특성은 큰 차이가 발생하지 않은 것을 확인 할 수 있었다.

4. AI 도체의 직경에 따라 산불에 노출되었을 때 전기적 특성에 대한 영향을 살펴본 결과, 기계적 특성과는 상이하게 ACSR 410, 480 mm<sup>2</sup> 송전선의 AI 도체의 도전율 특성과 ACSR 240 mm<sup>2</sup> 송전선의 AI 도체의 인장강도 특성이 많은 차이를 나타냈지만, ACSR 410 mm<sup>2</sup>과 ACSR 480 mm<sup>2</sup> 송전선의 AI 도체의 도전율 특성은 큰 차이가 발생하지 않은 것을 확인 할 수 있었다.

## REFERENCES

- [1] Y. H. Jang, B. G. Kim, S. S. Kim, S. W. Han, and J. H. Kim, *Trans. KIEE* **58**, 242 (2009).
- [2] KEPCO Research Center Technical Paper, 3rd Report, 2008.
- [3] S. S. Kim, B. G. Kim, S. K. Hyun, D. I. Lee, and B. U. Min, *J. KIEEME* **19**, 486 (2006).
- [4] Y. D. Kim, S. D. Kim, J. M. Shim, D. H. Jeong, and J. W. Kang, *Journal of the KIEE* **14**, 26 (2000).
- [5] B. G. Kim, S. S. Kim, and J. H. Park, *J. KIEEME* **18**, 1152 (2005).
- [6] S. S. Kim, B. G. Kim, T. I. Jang, J. W. Kang, D. I. Lee, and B. U. Min, *J. KIEEME* **19**, 287 (2006).
- [7] B. G. Kim, S. S. Kim, S. W. Han, and J. H. Kim, *J. KIEEME* **20**, 1105 (2007).
- [8] B. G. Kim, S. S. Kim, and J. H. Park, *J. KIEEME* **18**, 1159 (2005).