

## 가로등 제어용 다층패드형 압전 하베스터의 개발 및 평가

김창일<sup>1</sup>, 정영훈<sup>1</sup>, 박운익<sup>1</sup>, 조정호<sup>1</sup>, 장용호<sup>2</sup>, 최범진<sup>2</sup>, 박신서<sup>2</sup>, 백종후<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 한국세라믹기술원 전자융합소재본부

<sup>2</sup> (주)센볼

### Development and Evaluation of Rack Type Piezoelectric Harvester for Smart Street Lamps Control

Chang-Il Kim<sup>1</sup>, Young-Hun Jeong<sup>1</sup>, Woon Ik Park<sup>1</sup>, Jeong-Ho Cho<sup>1</sup>, Yong-Ho Jang<sup>2</sup>, Beom-Jin Choi<sup>2</sup>,  
 Shin-Seo Park<sup>2</sup>, and Jong-Hoo Paik<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Electronic Convergence Materials Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Jinju 52851, Korea

<sup>2</sup> Senbool Inc., Incheon 21639, Korea

(Received September 26, 2016; Revised October 6, 2016; Accepted October 10, 2016)

**Abstract:** In this study, to increase output of road piezoelectric energy harvester, it was made into rack type in which many piezoelectric materials can be installed and load transfer device of the leverage type to transfer vehicle load was made. By paving it in the road, the output characteristics depending on vehicle load and speed were evaluated. Changing vehicle load, harvester output characteristics depending on speed changes were evaluated at the interval of 10 km/h from 10 km/h to 100 km/h. Also, by making a wireless switch and sending wireless signal with output of rack type harvester, whether to receive it was evaluated by distance. It was checked that all switches work up to front-to-back 100 m from harvester.

**Keywords:** Piezoelectric transducer, Energy harvesting, Vehicle, Paving, Road

#### 1. 서론

사람의 움직임[1-6]이나 건축물의 진동[7,8]을 이용한 압전 에너지 하베스팅 기술과 차량 하중을 이용한 압전 에너지 하베스팅 기술에 대한 연구가 있었다. 또한, 스마트한 도로 환경을 제공하기 위해 도로에 에너지 하베스팅 기술을 접목하고 특히 압전체를 이용하는 방안이 연구되고 있다 [9-12]. 압전 에너지 하베스터를 도로에 설치하여 평가하는 것은 다양한 변수가 발생하

여 예측이 힘들고 실험실에서의 실험과 비교하면 비용이 많이 들며 실생활에 본 기술을 접목한 사례가 드물다.

본 연구에서는 압전 하베스터를 도로 가로등의 밝기를 제어할 수 있는 스마트한 가로등 제어시스템에 실증하고자 하였다. 차량의 통행이 줄어드는 야간시간에 차량 통행이 있을 때에만 가로등 밝기를 100% 증가시키고 통행이 없으면 밝기를 70%로 낮추어 조절한다면 전기 에너지를 절약 할 수 있다. 단층 패드 형태의 압전 하베스터의 경우 매설이 용이하고 공간 제약이 적은 장점이 있지만 발전량이 높지 않고[12] 유지 보수시 재공사를 해야하는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하고자 다층패드(rack) 형태의 압전 하베스터를 제작하고자 하였다. 다층패드 형태는 압전 모듈을 도로 가장자리로 이동시켜 유지보수가 용

a. Corresponding author; [jhpaik@kicet.re.kr](mailto:jhpaik@kicet.re.kr)

이하며, 압전 패드를 증가시켜 발생 에너지를 증가시키기 용이한 구조이다. 본 연구에서는 도로용 압전 하베스터의 발전량을 높이기 위해 다량의 압전체를 설치할 수 있는 다층패드(rack) 형태로 제작하고 차량 하중을 전달할 수 있는 지렛대 형태의 하중 전달 기구를 제작하였다. 이를 도로에 매설하여 차량 하중과 속도에 따른 발전특성을 평가하였으며 또한 무선 스위치를 제작하여 다층패드형 압전 하베스터의 발전량으로 무선 신호를 송출하여 거리별로 수신여부를 평가하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 도로용 다층패드형 압전 하베스터 제작

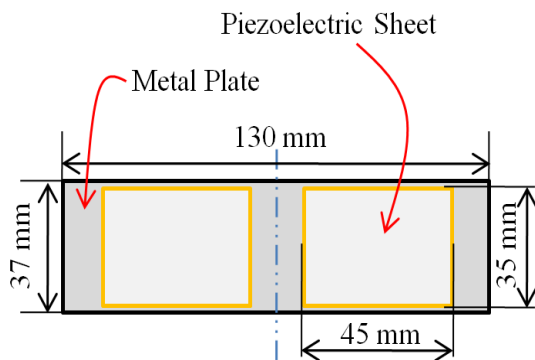


Fig. 1. Schematic diagram of the piezoelectric cantilever.

그림 1은 압전 시트 소자 2개가 금속판에 붙여진 압전 캔틸레버이다. 테이프 캐스팅하여 적층한 압전 소자 (45 mm × 35 mm × 0.2 mm) 2개를 SUS 재질의 금속판(130 mm × 37 mm × 0.2 mm)에 부착하였으며, 이와 같은 캔틸레버를 30개 제작하였다. 압전 시트의 압전 상수( $d_{33}$ )는 419 pC/N이며, 압전 전압 상수( $g_{33}$ )는 22 Vm/N, 전기기계결합계수( $k_p$ )는 71%, 품질계수( $Q_m$ )는 80이다.

그림 2는 다층패드형 압전 모듈의 모습이다. 단층패드는 압전 캔틸레버 6개를 결합하여 구성하였고, 5개 단층패드를 서랍식으로 결합하여 다층패드를 제작하였다. 압전 하베스터를 이물질 삽입 방지를 위하여 모듈 보호 케이스를 제작하였으며 제작된 다층패드형 압전 하베스터 크기는 가로 297 mm, 세로 200 mm, 높이 200 mm이다.



Fig. 2. Photograph of the rack type piezoelectric module.

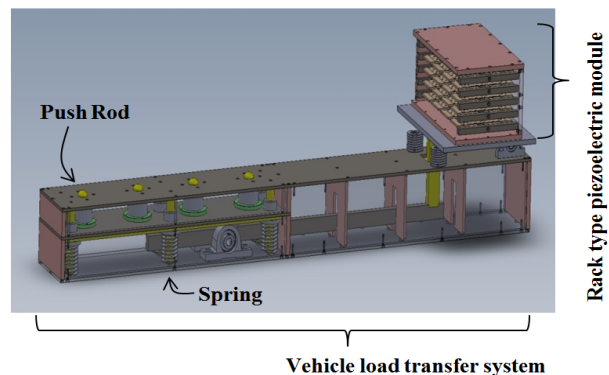


Fig. 3. Schematic diagram of the rack type piezoelectric harvester.

그림 3은 다층패드형 압전 하베스터의 내부 구조물과 차량 하중 전달 장치를 나타낸다. 차량 하중을 전달하는 장치는 차량 바퀴가 밟을 수 있는 누름 막대(push rod), 스프링 등으로 구성되어 있다. 누름 막대 4개를 사용하였고 틈새를 줄여 차량 하중 전달 장치 내부로 이물질이 삽입되지 않도록 하였다.

차량 하중 전달방식은 다음과 같다. 차량하중에 의해 누름 막대가 눌러지면 지렛대를 통해서 압전 모듈의 밑단을 지면의 수직방향으로 타격하게 된다. 이때 압전 모듈 전체가 들려졌다가 떨어지면서 하단 부분과 충돌 후 캔틸레버가 진동하게 되고 이에 압전 시트가 변형되어 전하가 발생하게 된다.

### 2.2 무선 센서노드 제작

그림 4는 압전 발전 모듈 무선 스위치 개념도를 나타낸다. 압전체를 이용한 압전 모듈의 전기신호를 정류

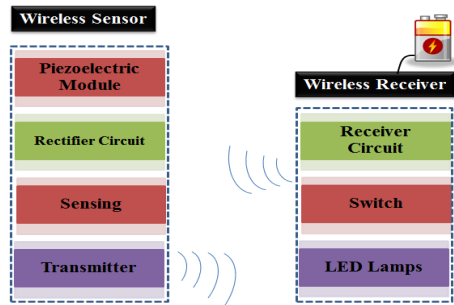


Fig. 4. Schematic diagram of the wireless sensor node.

회로를 통하여 정류하고(rectifier circuit) 차량을 감지(sensing)하여 이를 무선송출(transmitter)한다. 이를 수신회로(receiver circuit)가 신호를 받아 LED 가로등의 스위치(switch)를 켜서 LED 가로등의 밝기를 조절하는 구조이다. 이를 통해 차량의 통행이 줄어드는 야간시에 통행량에 따라 도로의 가로등을 제어하여 전기 에너지를 절약 할 수 있다.

### 2.3 도로용 다층패드형 압전 하베스터의 도로 매설 및 평가방법

그림 5는 도로용 다층패드형 압전 하베스터를 도로에 매설하는 모습이다. 다층패드형 압전 발전 모듈의 구조물이 옆으로 솟아 있는 형태이기 때문에 도로의 가장자리에 매설한다. 차량 하중 전달 장치의 크기에 맞게 전기 톱날과 드릴을 사용하여 도로를 절단하고 바닥면은 차량 하중 전달 장치의 높이에 맞춰 시멘트로 평탄 작업을 하였다. 차량 하중 전달 장치와 다층패드형의 압전 하베스터를 삽입하고 도로와 다층패드형 압전 하베스터의 틈새를 아스콘으로 메워 도로상에 고정하였다.

압전 하베스터의 발생에너지를 평가하기 위해 47  $\mu\text{F}$ 의 커패시터와 10 k $\Omega$ 의 저항을 병렬로 연결하였다. 외부 충격으로 압전 캔틸레버가 진동하게 되고 이때 발생하는 전압을 오실로스코프(WaveJet 322, LeCroy, United State)로 측정하고 시간에 대해서 적분하여 발생에너지를 계산하였다. 발생에너지를 계산은 식 (1)에 의해 계산하였다.

$$\text{Output Energy} = \int_{t_0}^t \frac{V^2}{R} dt \quad (1)$$

이때,  $R$ 은 저항이며,  $V$ 는 커패시터 양단의 전압이다.



Fig. 5. Photograph of the rack type piezoelectric harvester.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 도로용 다층패드형 압전 하베스터의 발생에너지 평가

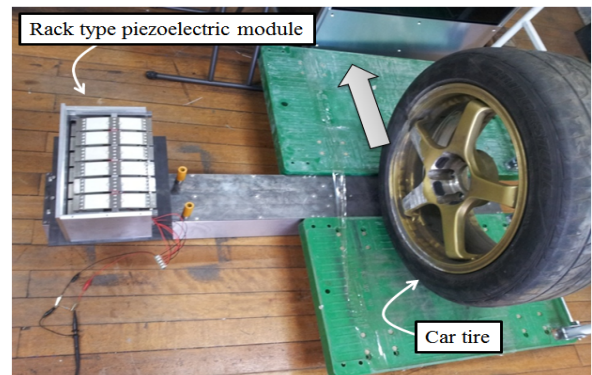


Fig. 6. Photograph of experimental set-up.

그림 6은 다층패드형 압전 모듈을 실험실에서 평가한 모습이다. 발전량 평가는 다층패드형 압전 모듈을 차량 하중 전달장치 기구물에 올려놓은 뒤 타이어 바퀴를 굴러 평가하였다. 바퀴를 굴러 다층패드형 압전 모듈에 힘이 전달되면 압전 모듈은 지면에서 수직방향으로 기구물이 5~6 cm 상승한 뒤 하강하여 바닥면에서 부딪히게 된다. 이때 압전 캔틸레버가 진동하여 압전 시트의 변형으로 전하가 발생한다.

그림 7은 압전소자가 장착된 패드 개수를 증가시키기에 따른 발전량을 측정한 결과이다. 삽입되는 단층 패드의 개수가 증가하면 비례적으로 발전량이 증가하였

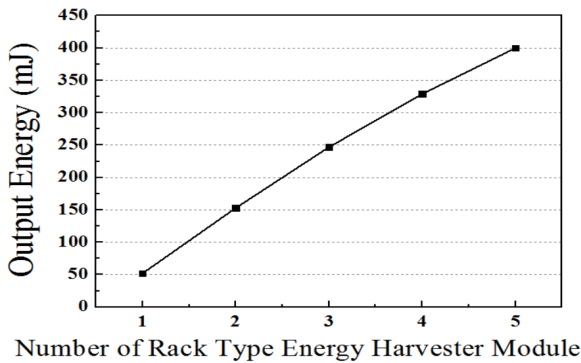


Fig. 7. Output energy as a function of rack type harvesters.

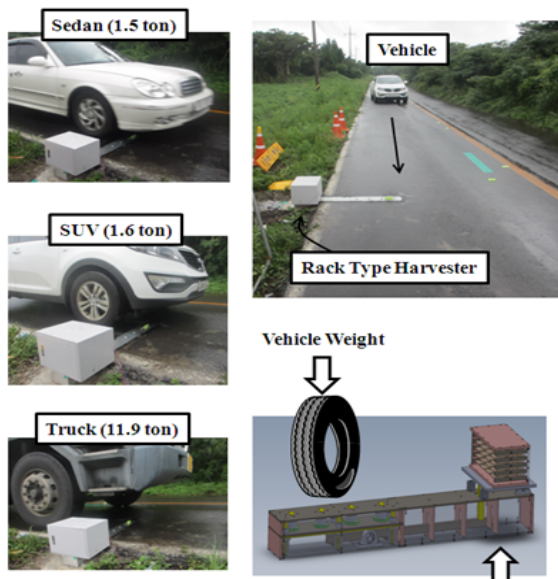


Fig. 8. Schematic diagram and photograph of experimental set-up.

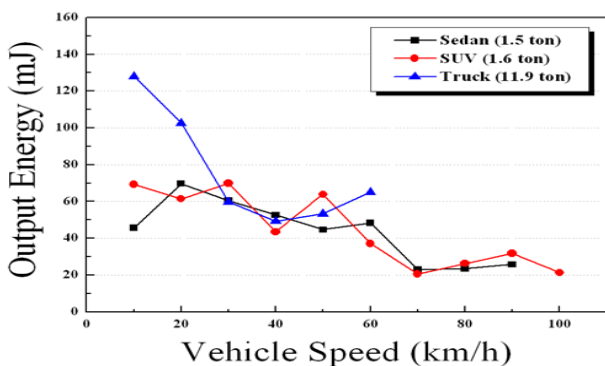


Fig. 9. Output energy as a function of vehicle speed at 10 kΩ.

으며, 단층패드 5개를 삽입시 400 mJ의 에너지를 얻을 수 있었다. (1층부터 5층 까지 각각 52, 153, 247, 329, 400 mJ) 시뮬레이션 결과를 바탕으로 압전 모듈을 설계하여 외부 힘 인가시 진동을 위한 mass의 층간 간섭은 없는 것으로 판단된다.

그림 8은 도로용 압전 하베스터의 발생에너지를 측정하는 실제 모습이다. 차량은 트럭(11.9 ton), SUV (1.6 ton), 세단(1.5 ton)을 사용하였으며 차량 속도는 10 km/h에서 100 km/h까지 10 km/h 간격으로 등속 주행하였을 때 발생에너지를 평가하였다. 차량의 한쪽 면 앞, 뒷바퀴에 의해 연속 2회 하중이 인가되었을 때 커패시터 양단에 발생한 전압을 오실로스코프로 측정하였다.  $P=V^2/R$  식 (1)을 사용하여 시간에 대한 전력 그래프를 그린 뒤 이를 시간에 대하여 적분하여 발생에너지를 계산하였다.

그림 9는 차량 하중과 속도에 따른 발전특성을 나타낸다. 세단, SUV, 트럭의 경우 모두 속도가 증가함에 따라 발생 에너지는 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 차량 하중 전달 장치의 구조적 문제로 판단된다. 차량 속도가 낮을 때에는 push rod를 끝까지 충분히 밟게 되어 다층패드를 타격하게 되지만, 차량 속도가 증가하게 되면 누름 막대(push rod)를 끝까지 밟기 전에 통과하게 되어 결과적으로 다층패드 모듈에 가하는 타격 힘이 줄어들게 되어 발생 에너지 또한 줄어드는 것으로 보여진다.

### 3.2 도로용 압전 하베스터 무선 송수신 평가

그림 10은 압전 하베스터를 이용한 스마트한 도로 가로등 제어 시스템의 개념도를 나타낸다. 도로에 압전 하베스터를 매설하고 차량이 통과하게 되면 차량하중에 의해 압전체가 변형되어 전기에너지가 발생한다. 발생한 전기에너지로 무선신호를 송출하고 가로등의 수신부는 신호를 받아 LED 가로등을 점등하게 된다. 일정한 시간이 흐른 뒤에도 추가신호가 수신되지 않으면 가로등 밝기를 줄여 전기 에너지를 절약하는 시스템이다.

본 연구에서 제작한 무선 송수신 시스템은 압전 하베스터에서 생산된 전기 에너지가 8.4 V 이상에서 30 msec 이상 유지될 때 송신기(wireless transmitter)는 무선 신호를 1회 송출하도록 설계되었다. 송출된 신호가 수신기(wireless receiver)에 전달되면 스위치 ON 상태가 되고 LED light를 점등하게 된다. 점등된 LED light는 10초를 유지하고 스위치 OFF 되도록 설계하였다.

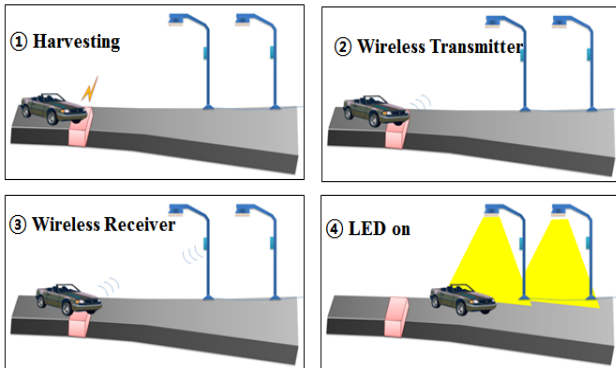


Fig. 10. Schematic diagram of smart street lamps control system.

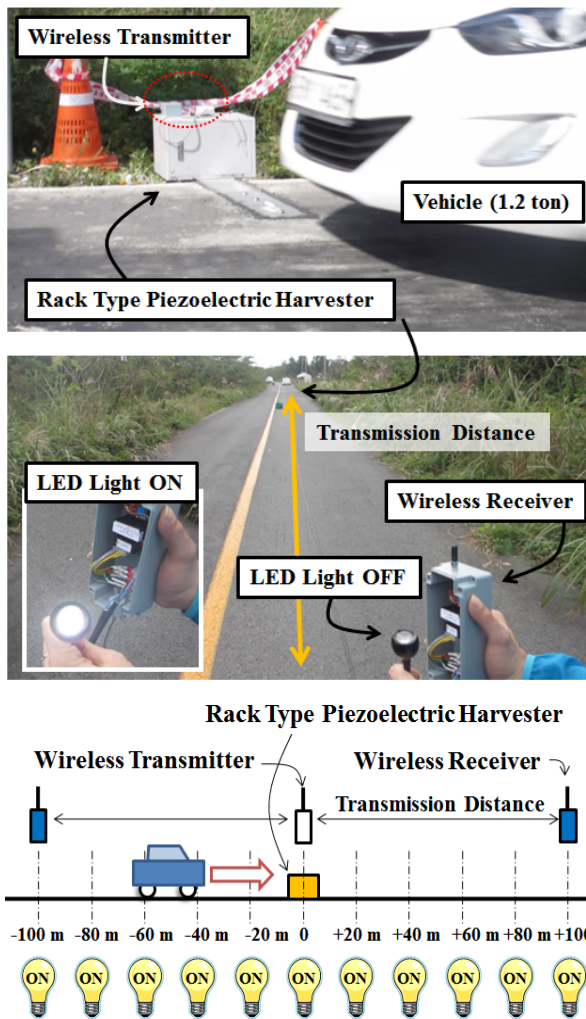


Fig. 11. Schematic diagram and photograph of experimental set-up.

그림 11은 거리에 따른 무선 송수신 동작 특성을 나타내었다. 송신기와 수신기의 거리(transmission distance)를 20 m 간격으로 증가시켜 차량 진행방향 100 m와 반대방향 100 m까지 거리별 동작특성을 평가 하였다. 이때 차량 하중은 1.2 ton이었으며 속도는 30 km/h로 고정하였다. 무선 송수신 시스템은 20 m 간격으로 전후방 100 m 거리까지 모두 작동되는 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 압전 하베스터를 도로 가로등의 밝기를 제어할 수 있는 스마트한 가로등 제어시스템에 실증하였다. 발전량을 높이기 위해 다층패드형 압전 하베스터와 차량하중 전달 장치를 만들어 차량 하중과 차량 속도 변화에 따라 발생에너지를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 다층패드형 압전 모듈의 패드 수량을 1층부터 5층까지 증가시킬 때 바퀴 굴림에 의해 발생하는 에너지는 각각 52, 153, 247, 329, 400 mJ 이었다.
2. 매설된 다층패드형 압전 하베스터는 차량의 속도가 증가함에 따라 발생에너지는 감소하는 경향을 보였으며, 11.9 ton의 차량으로 10 km/h 속도로 주행 시 최대 128 mJ의 발생 에너지를 얻었다.
3. 차량의 속도가 20~100 km/h이고 차량의 하중이 1.5~11.9 ton일 때 발생하는 전기 에너지로 100 m 거리에서 무선 송신과 수신에 가능했으며 앞, 뒤 100 m의 거리에서도 무선신호를 받아 LED Light를 작동시킬 수 있었다.

#### REFERENCES

[1] E. Romero, R. O. Warrington, and M. R. Neuman, *Physiological Measurement*, **30**, R35 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0967-3334/30/9/R01>]

[2] S. Roundy, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **16**, 809 (2005). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X05054042>]

[3] T. Starner, *IBM Systems Journal*, **35**, 618 (1996). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1147/sj.353.0618>]

- [4] N. S. Shenck and J. A. Paradiso, *IEEE*, **21**, 30 (2001).
- [5] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, and N. Gershenfeld, *Proc. Second IEEE International Symposium on Wearable Computers* (Washington, USA, 1998) p. 132.
- [6] J. A. Paradiso and M. Feldmeier, *Proc. the 3rd International Conference on Ubiquitous Computing* (eds. G. Abowd, B. Brumitt, and S. Shafer) (Atlanta, US, 2001) p. 299.
- [7] K. Chebrolu, B. Raman, N. Mishra, P. K. Valiveti, and R. K. Brimon, *Proc. the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services* (Colorado, US, 2008) p. 2.
- [8] R. G. Lee, K. C. Chen, S. S. Chiang, C. C. Lai, H. S. Liu, and M. S. Wei, *Proc. the 4<sup>th</sup> Annual Communication Networks and Services Research Conference* (IEEE, Moncton, New Brunswick, Canada, 2006) p. 161.
- [9] C. I. Kim, J. H. Lee, K. B. Kim, Y. H. Jeong, J. H. Cho, J. H. Paik, Y. J. Lee, and S. Nahm, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **24**, 554 (2011). [DOI:10.4313/JKEM.2011.24.7.554]
- [10] C. I. Kim, K. B. Kim, J. H. Jeon, Y. H. Jeong, J. H. Cho, J. H. Paik, I. S. Kang, M. Y. Lee, B. J. Choi, Y. B. Cho, S. S. Park, S. Nahm, and Y. J. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 511 (2012). [DOI: 10.4313/JKEM.2012.25.7.511]
- [11] C. I. Kim, K. B. Kim, Y. H. Jeong, Y. J. Lee, J. H. Cho, J. H. Paik, I. S. Kang, M. Y. Lee, B. J. Choi, S. S. Park, Y. B. Cho, and S. Nahm, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 773 (2012). [DOI: 10.4313/JKEM.2012.25.10.773]
- [12] C. I. Kim, Y. H. Jeong, J. S. Yun, J. H. Cho, J. H. Paik, Y. H. Jang, B. J. Choi, S. S. Park, and Y. B. Cho, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 274 (2016). [DOI: 10.4313/JKEM.2016.29.5.274]