

철도레일 복합 압전패드의 구성 차이에 따른 전압 발생 특성 분석

조호진^{1,a}, 임유진¹, 김성수², 이종관³

¹ 배재대학교 건설환경철도공학과

² 배재대학교 나노고분자재료공학과

³ (주)대한폴리텍

Analysis of Voltage Generating Characteristics of Composite Rail Pad Composed of Piezoelectric PVDF Film and Polyurethane Bonding Materials

Hojin Cho^{1,a}, Yujin Lim¹, Sung Su Kim², and Jong Kwan Lee³

¹ Department of Civil, Environmental and Railroad Engineering, Paichai University, Deajeon 35345, Korea

² Department of Nano/Polymer Materials Engineering, Paichai University, Deajeon 35345, Korea

³ Korea Polytech Co., Ltd., Gimpo 10025, Korea

(Received June 8, 2016; Revised March 16, 2017; Accepted March 20, 2017)

Abstract: A railway track generates severe levels of vibrations. In order to reduce these vibrations and to provide structural stability, various rail pads, mats, etc., are used for vibration protection. In this study, a specially designed rail pad was developed to reduce vibration and to generate electric power simultaneously, that is, by using the vibrations generated by railway cars on the track. The newly developed rail pads were tested to evaluate the characteristics of electric power by investigating the generated voltage and the current levels and patterns. In addition, we proposed an optimal laminated structure and adhesive by comparing the voltage generated by each type of adhesive required for optimal adhesion of the rail pad and the piezoelectric device.

Keywords: Piezoelectric element, Rail pad, Electric power, Bond, Vibration

1. 서론

최근 전세계적으로 친환경적인 신재생에너지 산업의 육성에 많은 노력을 기울이고 있다. 특히, 도로에서는 미세먼지 및 CO₂를 줄이기 위하여 전기자동차 개발에 많은 관심을 보이고 있으며, 이스라엘과 미국 등 신재생에너지 개발분야의 선진국에서는 압전소자를 이용한

전기에너지 개발을 활발히 추진해 오고 있다 [1].

압전소자는 압력에 의한 진동에너지를 전기에너지로 변환할 수 있는 재료이며, 이스라엘의 이노와텍(innowttech)에서는 압전소자를 도로에 매설하여 자동차의 이동하중으로 전기에너지를 생산하는 기술을 개발한 바 있다. 또한 국내외에서 압전에 의한 에너지 하베스팅에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다 [2-12].

철도는 도로와 달리 레일 위를 이동하는 교통시스템으로 도로의 자동차보다 매우 큰 하중이 레일에 전달된다. 레일에 전달된 하중은 체결장치를 통하여 침목 및 하부 지반으로 전달된다. 또한 철도는 고속 주행시 상당한 크기의 진동 및 소음을 유발하며, 진동의 저감

a. Corresponding author; hojiny81@naver.com

효과와 궤도의 안정성을 확보하기 위하여 레일체결장치 내에 레일패드를 사용한다. 본 연구에서는 열차의 이동재하에 따른 압력과 진동 충격을 이용한 자가발전 장치 기술을 개발한 사전 단계로서, 폴리머우레탄 계열의 복합레일패드를 제작하고 레일패드 내에 압전소자를 매립하였다. 압전소자가 매립된 레일패드의 적층구조를 달리하면서 전압 발생 차이를 비교 분석하였다. 또한 레일패드와 압전소자의 적층구조 별 최적화된 부착능에 필요한 접착제의 종류별 전압 발생량을 비교하여 최적의 적층형구조 및 접착제를 제시 하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 레일패드

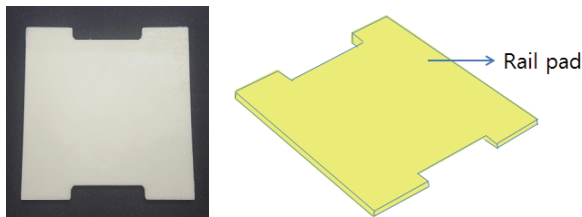


Fig. 1. Vibration-piezoelectric pad.

본 연구를 위하여 철도 공단 표준규격서인 KRSA-1001-R0에 제시된 e-클립형 레일체결장치 규격에 맞게 폴리우레탄 계열소재의 레일패드를 제작하였다. 제작된 레일패드는 고내구성의 방진과 압전기능을 가진 복합패드이다. 본 레일패드는 폴리우레탄으로 성형하되 Micro Cellular Elastomer 기술을 활용하여 고탄성체로 기능하도록 하였다. 그림 1은 폴리우레탄 재질의 레일패드이며 상세 성능은 표 1과 같다.

그림 2는 침목과 레일 사이에 개발된 레일패드를 설치하고 e-클립 체결장치로 고정한 모식도이다. 이러한 체결모형을 사용하여 반복재하시험을 실시하였다. 재하시험용 체결모형은 구성은 다음과 같다: 1) 레일은 UIC 60레일을 사용하였고, 2) 체결장치는 경부고속철도와 일반철도에 많이 사용되고 있는 영국 Pandrol社의 e-클립을 이용해 체결하였으며, 3) 침목은 UIC 60레일 전용의 콘크리트침목을 사용하였다. 운하중 재하에 의한 압전효율 분석시험이므로 한쪽 레일이 침목

Table 1. Performance objectives of vibration proof pad.

Test item	Unit	Spec.
Thickness	mm	10±0.2
Density	Kg/m ³	800 over
Tensile strength	MPa	5 over
Stretch rate	%	200 over
Longitude	(Shore A)	70~75
Static modulus of elasticity	N/mm ³	0.010~0.015
Compression reducing rate	%	25

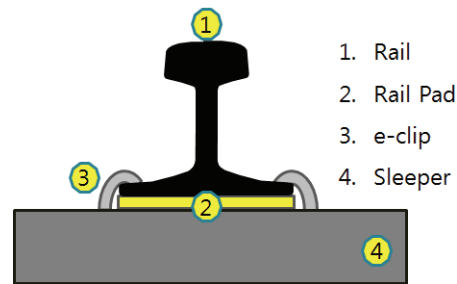


Fig. 2. Schematic design of railpad and fastening.

의 중앙에 위치하도록 콘크리트 침목의 체결부만을 절단하여 사용하였다.

2.2 압전소자 및 접착제

압전소자를 이용한 발전시스템은 압전소자의 고유 특성과 압전소자가 장착되는 환경에 의해 동작특성이 정해지므로 효율적인 자가발전을 위해서 압전소자를 이용한 자가발전 동작모델을 만들고, 이를 토대로 자가발전 시스템을 제작하여야 한다. 본 연구에서 사용한 압전소자(PVDF, polyvinylidene fluoride)의 압전상수(d_{33})는 35 pC/N이며, 압전 전압 상수(g_{33})는 0.3 Vm/N, 초전성계수(p)는 4 $\mu\text{C}/\text{m}^2\text{K}$, 비유전율(ϵ)은 13±1이다.

레일패드와 PVDF 필름의 부착은 그림 3과 같이 사전 선별된 3가지 종류의 접착제를 사용하였으며, 각각의 접착제로 부착된 압전패드의 전압 발생량을 측정하여 가장 효율적인 접착제를 결정하였다. 접착제의 성분은 폴리우레탄계열과 폴리머 재질이다. A Type 접착제는 2액형의 폴리머 재질이며 본 연구진이 현재 연구 개발중인 제품으로 접착력, 탄성력, 내구성 등 물리 화학적 성능이 우수하다. B와 C Type은 폴리우레탄계열



Fig. 3. Bond Types used for test. (a) A type, (b) B type, and (c) C type.

이며 현재 기성제품으로서 접착제 B Type은 탄성, 충격 흡수성 등에 강하고, C Type은 2액형 접착제로서 화학적 변화에 매우 안정적인 특성을 갖는다.

2.3 적층 형태 및 시험 방법

PZT 방식 압전소자의 적층형태에 따른 압전효율의 차이는 기존 문헌 등 [1,13]으로 확인할 수 있다. 그림 4는 본 연구에서 구성한 레일패드 내 압전소자 (polyvinylidene fluoride, PVDF)의 적층형태를 나타낸 것으로 PVDF의 위치에 따라 상단(①), 중간(②), 하단(③)으로 구분한다.

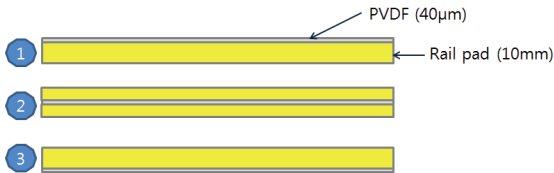


Fig. 4. Schematics of different composition array of railpad with PVDF films.

그림 4와 같이 제작된 압전소자가 부착된 레일패드의 전압 발생 특성 시험을 위하여 동적 액추에이터를 사용하여 표 2와 같이 500 kg에서 8,000 kg까지 각 하중단계에서 재회횟수 5,000회씩 반복하중을 가하였다. 시험 방법은 그림 5와 같이 H형강을 기초로 하여 수직처짐이 발생하지 않게 궤도 하부지반의 강성을 모사하고 상부에 침목과 e-클립형 체결장치, PU 재질의 레일패드, 레일 순으로 조성한 후 재하시험을 진행하였다. 압전소자가 받는 하중에 따른 전압 측정은 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 시험 결과로부터 접착제 종류에 따른 전압 발생 크기 및 반복재하에 따른

Table 2. Loading sequences.

Load (kg)	Number of load repetition
500	5,000
1,000	5,000
2,000	5,000
4,000	5,000
6,000	5,000
8,000	5,000

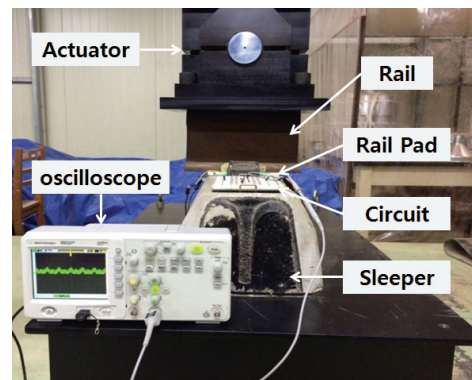


Fig. 5. Schematic test view of loading test on piezoelectric rail pad.

필름의 박리현상을 자세히 관찰하였으며 발전특성을 상호 비교, 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 PU 재질의 레일패드에 PVDF 필름을 패드의 상면, 중간, 하면에 각 3가지의 접착제를 이용하여 부착한 후 반복재하에 따른 전압의 발생크기 차이와 PVDF필름과 패드 사이의 접착효능에 미치는 접착제의 성능을 재하시험으로 분석하였다. PVDF 필름이 부착된 레일패드에 대한 반복재하를 위하여 액추에이터를 이용하였으며 표 2와 같은 하중크기별로 시험을 실시하였다. 재하시험 종료후 레일패드와 PVDF 필름의 접착상태를 확인한 결과, B형 접착제는 약 70% 정도 박리가 되었으며, C형 접착제는 약 40% 정도 박리가 되었다. 그러나 A형 접착제는 박리가 거의 발생하지 않았다. 만약 실 궤도에 압전소자가 적층된 레일패드가 설치될 경우 압전소자와 레일패드가 박리되어

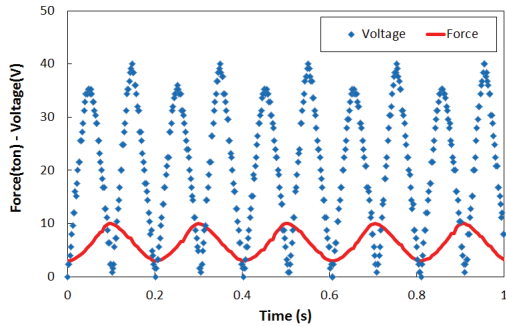


Fig. 6. Measure of voltage (V) due to repeated loading.

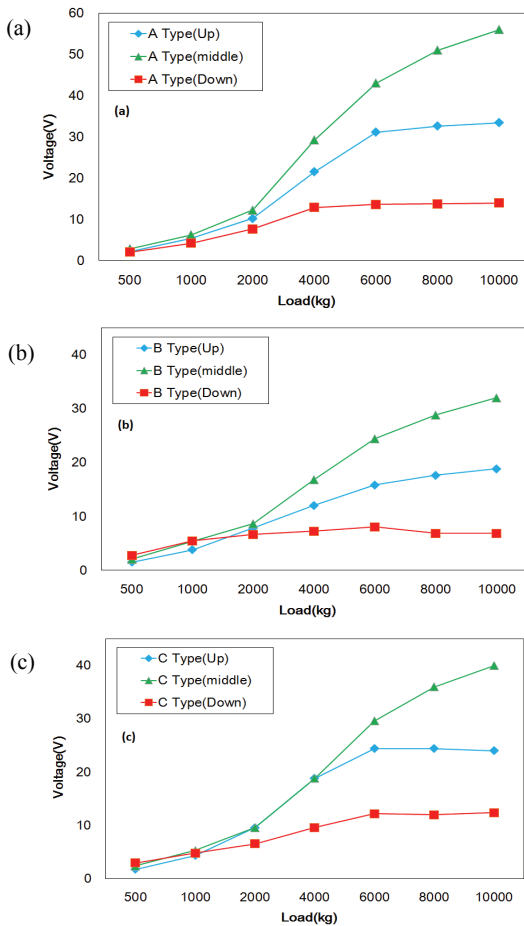


Fig. 7. Difference of voltage generation due to PVDF rail pad with change of bonding materials and pad structures: (a) A type bonding material, (b) B type bonding material, and (c) C type bonding material.

빗물 또는 분진과 같은 이물질이 침투하여 전력 생산효율이 떨어지거나 회로의 단락, 합선 등의 치명적인 문

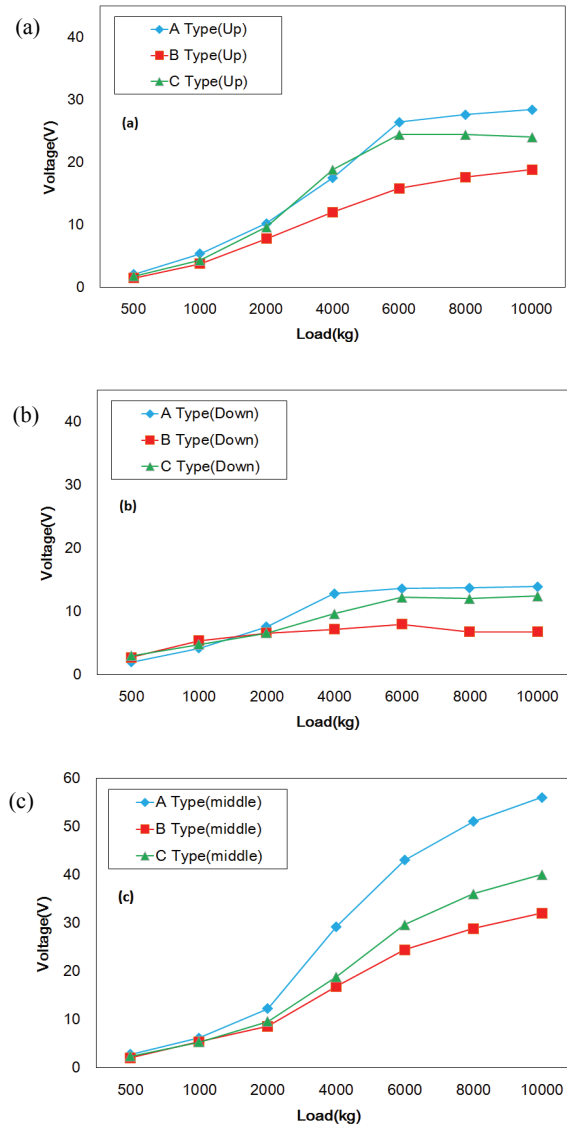


Fig. 8. Difference of voltage generation due to PVDF rail pad with change of pad structures: (a) upper bonding structure, (b) lower bonding structure, and (c) middle bonding structure.

제가 발생할 수 있기 때문에 내구성이 담보되고 박리가 발생하지 않는 접착제를 선택하여 사용하여야 한다.

그림 6은 PVDF 필름을 레일패드의 중간층에 부착한 후 최대 10 Ton의 하중을 5 Hz로 반복재하한 결과를 도시한 것이다. 전압(V)은 오실로스코프를 이용하여 RMS(root mean square)값을 측정된 것으로서 1회 하중 재하시 실효 최대값이 2회 측정되며 이중 더 큰 값을 최대 전압으로 사용하였다.

그림 7은 접착제 종류별 PVDF 압전소자가 부착된

레일패드의 적층구조에 따른 전압(V)발생량을 비교한 것이며, 그림 8은 동일한 적층구조하에서 접착제 종류별 전압 발생량을 비교한 것이다. 시험분석 결과, 재하하중의 크기가 2,000 kg 이하에서 전압 발생량은 접착제 및 적층구조에 따른 영향 없이 유사한 크기를 보였으며 2,000 kg 이상에서는 전압 발생량의 차이가 발생하였다. 또한 접착제의 종류에 상관없이 즉, A, B, C Type 접착제 모두에 있어서, PVDF 필름이 레일패드 중간에 부착된 적층구조에서 가장 큰 전압이 발생하였다. 이는 PVDF 필름이 탄성재료인 레일패드 사이에 위치하여 하중에 의한 힘발생이 상면 및 하면에 부착된 경우보다 크게 발생하였기 때문이다 [14]. 또한, 중간 적층구조의 경우 재하하중의 크기에 비례하여 전압의 발생이 증가하는 특성을 명확히 확인할 수 있었다. 특히, A Type의 접착제를 사용한 경우, 레일패드 하단에 PVDF가 부착된 경우보다 약 4배 정도 큰 56 V가 측정되었다.

PVDF가 레일패드 상단에 부착된 경우, A와 C Type의 접착제에서 6,000 kg 하중까지 전압 발생량이 유사하게 증가하였으나 6,000 kg 이상부터 C Type의 접착제를 사용한 경우에서 전압의 크기가 미소하게 감소하였다. 또한, PVDF가 레일패드 하면에 부착된 경우 전압 발생량이 최대 10 V 내외로 가장 작게 발생하는 것으로 관측되었으며, 하중재하 크기가 6,000 kg 이상에서 수렴 또는 감소하였다. 그러나 다른 적층구조에 비하여 압전 발생량이 가장 큰 중간 적층구조는 10 Ton에서도 증가율이 감소하지 않았으며, 중간적층 구조에 A Type의 접착제를 사용한 경우에 가장 발전효율이 좋고 가장 큰 전압크기를 보였다.

또한, 위의 결과와 같이 하중이 증가함에 따라 전압(전력)이 증가하는 경향은 도로의 포장에 압전소자를 매설한 후 차량속도가 증가함에 따라 전력량도 증가한 연구결과와 동일한 결과를 보였다 [15].

표 3은 각 접착제 종류별 최대 하중(10 ton)에 따른 전압 발생량과 오실로스코프(oscilloscope)를 이용하여 측정된 전류량으로부터 획득한 전력량(power)을 나타낸 것이다. 전류의 크기는 전압과 비례하였으며 압전패드 한 개에서 획득한 전력량은 A Type 접착제를 이용한 중간 적층구조에서 가장 큰 값을 보였다.

접착제 종류와 레일패드 내 PVDF 적층형태에 따른 전압 발생량을 비교, 분석한 결과 접착제 종류는 A Type, 적층형태는 중간 적층구조가 압전에 가장효과적인 것으로 나타났다.

Table 3. Power generation by pad type.

Type	Position	Voltage (V)	Current (μ A)	Power (mW)
A	Up	28.4	15.1	0.43
	Middle	56.1	30.3	1.70
	Down	13.9	7.7	0.11
B	Up	18.8	10.6	0.20
	Middle	32.4	17.7	0.57
	Down	6.8	3.8	0.03
C	Up	24.3	13.4	0.33
	Middle	40.2	21.4	0.86
	Down	12.4	6.6	0.08

4. 결론

본 논문에서는 새로 제작된 PU 재질의 레일패드와 압전소자(PVDF)의 적층형태에 따른 전압 측정시험을 실시하였다. 실물 체결구 내에 구축된 궤도구성품에 대해 반복하중을 가하여 500 kg부터 시작, 단계별로 하중을 증가하여 최대 10 ton까지 반복재하시험을 실시하였다. 하중재하시 레일 패드의 적층구조차이에 따른 전압 및 전류, 전력 발생량의 차이 및 레일패드와 압전소자(PVDF)의 적층시 사용된 접착제의 종류에 따른 압전효율을 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 화학적 조성비와 접착특성이 서로 다른 A, B, C Type 접착제 모두, PVDF가 레일패드 중간에 부착된 적층구조에서 가장 큰 전압이 발생하였다.
2. 본 연구진이 개발한 폴리우레탄계열인 A Type의 접착제를 사용한 경우가 다른 접착제를 사용한 경우보다 재하시 발전 전압이 크게 측정되었다.
3. 적층구조 및 접착제 종류에 따른 레일패드에 대한 반복재하 시험을 종료한 후 압전소자(PVDF)와 레일패드와의 박리 발생 유무를 확인한 결과 B, C Type은 박리가 발생하였으나 A Type 접착제는 박리가 발생하지 않았다. 따라서 재하하중에 의한 전압 발생량 크고 내구성 및 장기 공용성 측면에서 우수한 A Type의 접착제를 사용하는 것이 효율적인 것으로 판단되었다. 향후, 압전효율과 PVDF의 접착내구성을 효율적으로 확보할

수 있는 접착제를 개발하는 것이 압전형 복합패드의 개발에 매우 중요할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(16CTAP-CO98410-02)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] J. Lee, *J. Korean Soc. of Ro. Eng.*, **13**, 159 (2011).
- [2] A. Erturk and D. J. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting* (John Wiley & Sons, United Kingdom, 2011).
- [3] X. Gao, W. H. Shih, and W. Y. Shih, *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 233503 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3521389>]
- [4] H. Shen, J. Qiu, and M. Balsi, *Sens. Actuators A*, **169**, 178 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2011.04.043>]
- [5] W. G. Li, S. He, and S. Yu, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **57**, 868 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2009.2030761>]
- [6] H. C. Song, C. Y. Gang, and S. J. Yoon, *Bulletin of KIEEME*, **23**, 28 (2010).
- [7] S. Priya, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Con.*, **57**, 12 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1734>]
- [8] R. A. Islam and S. Priya, *J. Am. Ceram. Soc.*, **89**, 3147 (2006). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01205.x>]
- [9] I. T. Seo, Y. J. Cha, I. Y. Kang, J. H. Choi, S. Nahm, T. H. Seung, and J. H. Paik, *J. Am. Ceram. Soc.*, **94**, 1 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04210.x>]
- [10] C. I. Kim, Y. H. Jang, Y. H. Jeong, Y. J. Lee, J. H. Cho, J. H. Paik, and S. Nahm, *Appl. Phys. Express*, **5**, 037101 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/APEX.5.037101>]
- [11] I. H. Kim, H. J. Jung, B. M. Lee, and S. J. Jang, *Appl. Phys. Letters*, **98**, 214102 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3595278>]
- [12] X. Chen, S. Xu, N. Yao, and Y. Shi, *Nano Lett.*, **10**, 2133 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/nl100812k>]
- [13] J. Lee, H. Moon, S. Kwon, and S. Ryu, *J. Korea Soc. Civ. Eng.*, **31**, 689 (2011).
- [14] Y. Zhang and X. Zhang, *Piezoelectricity Acoustic Waves Device Applications Symposium* (2010).
- [15] 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: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2011.24.7.554>]