

## 고온 롤 라미네이터용 멤브레인 구조 필름형 압력 센서 개발

### Development of Membrane Film Pressure Sensor for Hot Roll Laminator

김도연<sup>1\*</sup>, 이태경<sup>1</sup>, 강필식<sup>1</sup>

Do-Yeon Kim<sup>1\*</sup>, Tae-Kyung Lee<sup>1</sup>, Pil-Sik Kang<sup>1</sup>

#### 〈Abstract〉

Demand for pressure sensors is increasing in various fields such as machinery, healthcare and medical care. A recent study is being conducted to create sensors that are more sensitive and have longer linear sections based on measurement principles. In this paper, a film-type sensor with a membrane structure was developed to measure the pressure distributed in the axial direction of a hot roll laminator. Performance of sensors was evaluated by resistance and durability according to membrane diameter. The resistance of the membrane sensor varies according to the contact state and contact area of the electrode. Therefore, the membrane diameter selection is important. Experiments showed the most pronounced variation in resistance under pressure at 8 mm in diameter of membrane. Reliability evaluation of sensors was carried out at room temperature and high temperature. The pressure on the sensor was pressurized 1000 times to measure the initial resistance and the resistance after the evaluation to analyze the change. Sensors showed stable results with low resistance changes of 5.15% and 6.27%, respectively. A large area sensor manufactured using the developed sensor also showed reliable results.

*Keywords : Pressure sensor, Hot roll laminator, Flexible sensor, Polyimide film*

---

<sup>1\*</sup> 정희원, 김도연, 한국생산기술연구원 동남지역본부 정<sup>1\*</sup> Precision Mechanical Process and Control R&D Group, 밀기계공정제어연구그룹, 연구원  
E-mail: kdykim@kitech.re.kr  
Dongnam Division, Korea Institute of Industrial Technology

### 1. 서론

물리량을 측정하는 압력센서에 대한 관심과 수요가 기계, 헬스 케어, 의료 등 다양한 분야에서 증가되고 있다[1-4]. 현재 사용 중인 압력센서는 측정 원리에 따라 압저항, 정전용량, 압전 등으로 분류된다[5-8]. 최근 연구는 측정원리에 기반하여 더욱 민감하고, 선형 구간이 긴 센서를 만들기 위한 노력들이 진행되고 있다[9]. 이를 위하여 소재 개선, 3차원 구조, 다공성 구조 등을 활용한 시도가 이루어지고 있다[10-13]. 그러나 실제 산업에 적용되는 압력센서는 사용처에 따라 민감도나 선형성 보다는 반복 내구성 및 온도 내구성이 중요한 경우가 많다. 산업에서는 정해진 압력 범위가 넓지 않고, 인가 압력 범위에서의 오차를 확인하고자 하는 경우가 대부분이기에 넓은 선형성을 요구하는 경우가 적다. 반면 산업 현장 특성상 반복 내구성 확보 및 온도 내구성에 대한 필요성은 매우 크다. 본 논문에서는 산업현장에서 많이 쓰이는 고온(100 °C) 롤 라미네이터 (roll laminator)의 축 방향 압력 분포 측정을 위한 멤브레인 구조의 필름형 센서를 개발하고 성능 및 내구성 평가를 진행하였다. 또한 축 방향으로 7개의 센서를 배열하고 실제 고온 롤 라미네이터에 적용하여 압력 분포를 측정함으로써 양산 적합성을 확인했다.

### 2. 압력센서의 구동원리 및 제작방법

멤브레인 구조의 필름형 압력 센서는 Fig. 1과 같이 3개의 필름으로 구성된다. 첫 번째 필름과 세 번째 필름은 전도성 잉크인 실버잉크와 카본 잉크로 2도 인쇄하고, 전도성 잉크로 제작된 두

전극은 2번째 필름으로 전기가 흐르지 않도록 떨어져있다. 상기 상태는 압력이 없는 경우로 저항이 무한대가 되며, 상기 결과를 통해 인가 압력이 없거나, 인가 압력이 두 전극의 접촉 압력 이하 상태임을 나타낸다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 저압 인가의 경우 상부 폴리이미드 (PI, Polyimide) 필름이 압력에 의해 쳐지게 되고 하부 전극과 만나게 되어 저항이 발생하게 된다. 저압의 경우 전극이 만나는 면적이 고압대비 상대적으로 작아 높은 저항을 가지게 되고, 반대로 고압의 경우는 접촉 면적이 커지게 되어 낮은 저항을 가지게 된다. 접촉 면적의 변화에 따른 저항 변화를 인식하여 압력을 보정할 경우 저항 값을 통하여 압력을 인식 할 수 있다.

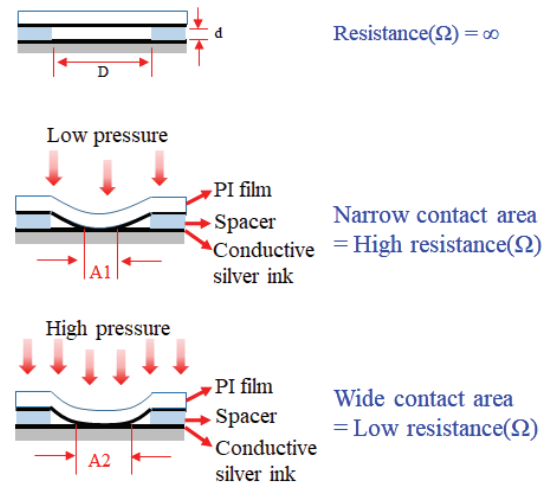


Fig. 1 Membrane film pressure sensor feature

압력 센서의 감도와 인식범위를 결정하는 요소는 전극을 분리하는 중간층의 두께 d와 멤브레인의 직경 D에 의해 결정된다. d 값이 커질수록 최초 인식 압력 값이 크게 되고 작아질수록 최초 인식 압력 값이 작아지게 되어 상대적으로 낮은 압력을 인식 할 수 있게 된다. 그리고 직경 D가 커

질수록 최초 인식 압력 값이 작아지게 되어 저압 인식이 가능하며, D가 작아질수록 최초 인식 압력 값은 커지게 된다.

본 연구에서는 d는 고정 변수로써 100  $\mu\text{m}$ 로 설정하고, D변화를 통하여 적용하고자 하는 압력 범위에서 구동 가능한 센서를 개발 하였다. 고온에서 물리적 성질이 변하지 않고 반복 구동 신뢰성을 확보하기 위하여 폴리이미드를 선정하였다. 폴리이미드의 유리전이 온도는(glass transition temperature) 400  $^{\circ}\text{C}$ 로 본 압력센서의 구동 환경인 100  $^{\circ}\text{C}$ 보다 높은 유리전이 온도를 가지고 있어서 열적 영구변형 가능성이 없다. 또한 폴리이미드는 내화학성과 전도성 잉크와의 접합력이 우수하여 스크린 프린팅 후 잉크가 폴리이미드 표면에 박리되는 불안정한 요소가 없다. 폴리이미드에 전도성 패턴을 형성하기 위해 스크린 프린팅 장비 (반자동 스크린프린팅 머신/한국미노)를 사용하였고, 전도성 잉크는 실버잉크(CI-1001 ECM)를 인쇄하고 부식방지를 위해 전도성 카본 잉크(Fujikura XC-3050)를 2도 인쇄 하였다. 각 필름층을 접합하기 위해서 전사용 본드를 사용하고, 롤 라미네이터에 입출시 필름간의 박리 원인인 기포가 발생하지 않도록 접합하였다.

### 3. 센서 성능 평가

압력 센서의 멤브레인 크기에 따른 압력 인식 구간 변화 및 압력별 인식능력을 확인하기 위해 멤브레인 직경 D를 6 mm, 8 mm, 10 mm로 제작하였다. 롤 라미네이터의 구동 압력인 0.4 MPa를 기준으로 아래 위 0.04 MPa씩 두 단계 인식 가능 여부를 확인하기 위해 0.3 MPa에서부터 0.05 MPa씩 0.5 MPa까지 압력에 대한 저항 변화를 측정하였다.

정확한 하중인가를 위해 Fig. 2에 나타난 것과

같이 만능재료 시험기 (Shimadzu, AGS- 1kNX)를 사용하였다. 롤 라미네이터의 형상과 재료를 고려하여 동일한 형태의 지그를 제작하여 하중 평가를 진행하였다.

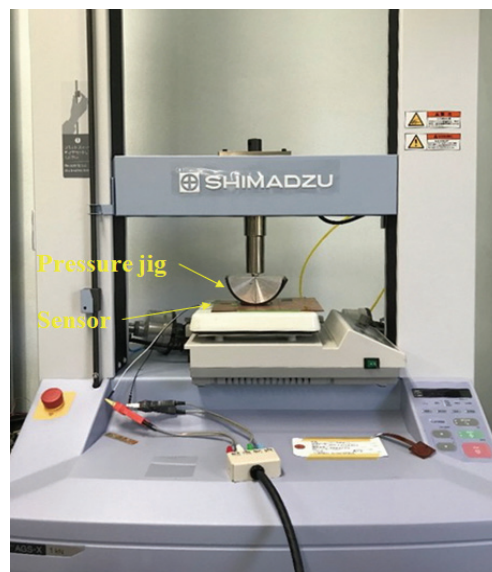


Fig. 2 Experimental setup for sensor test

멤브레인 직경 6 mm의 경우 Fig. 3에서 나타난 것처럼 0.3 MPa에서 저항 값이 검출 되지 않았다. 저항이 측정되는 0.35 MPa에서 두 전극이 접촉하며, 이 후 조건에서 일정한 저항값을 나타냈다. 직경 8 mm는 0.3 MPa부터 압력이 0.05 MPa씩 증가함에 따라 저항 값이 감소하였다. 직경 10 mm는 직경에 따른 센서 민감도 예측 결과와 유사하게 직경 8 mm 보다 더 높은 민감성을 보였으며, 0.3 MPa부터 두 전극이 접촉하여 저항 값을 나타냈다.

그러나 Fig. 3(c)와 같이 압력이 0.05 MPa씩 증가할 때 저항 값의 감소량은 직경 8 mm의 결과와 비교할 때 뚜렷한 편차를 보이지 않았다. 상기 결과는 0.3 MPa 압력이 인가될 때 발생하는 접촉면적의 크기가 압력이 커짐에 따라 증가하지 않아 발생하는 것으로 판단된다. 직경 10 mm의 압력 센서

는 0.4 MPa 조건의 사용 환경보다는 다소 낮은 압력 조건에 적합할 것으로 사료된다. 본 실험 결과를 바탕으로 반복 정밀도 평가, 대면적 물 라미네이터 센서 제작 및 평가를 진행하였다.

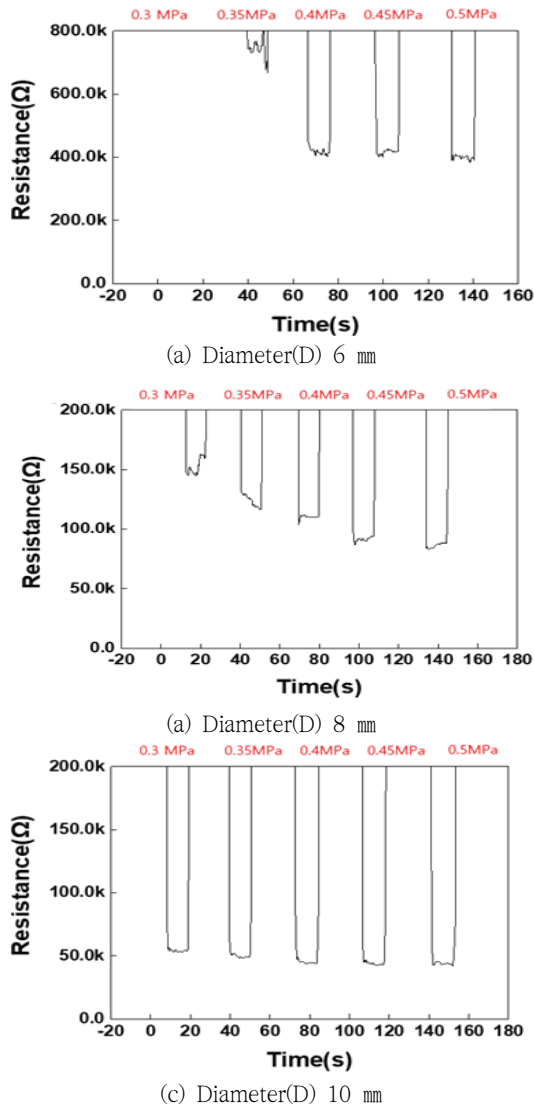


Fig. 3 Resistance variation as a function of

압력 센서와 같은 물리량을 측정하는 센서는 반복적인 물리량에 대한 내구성이 보장되어야 한

다. 일회성으로 사용되는 센서는 유지비용이 지속적으로 발생함과 동시에 평가간 편차로 인하여 센서 신뢰성에 악영향을 미치게 된다. 센서 신뢰성 확보를 위해 반복 내구성을 평가를 진행하였다. Fig. 4는 상온에서 0.4 MPa의 압력으로 1,000회 반복 내구성을 평가한 결과이다. 초기 저항은 899 Ω이고 1,000회 평가 후 측정된 저항은 855 Ω으로 초기 저항대비 5.15%의 저항 변화로 매우 높은 내구성을 보였다.

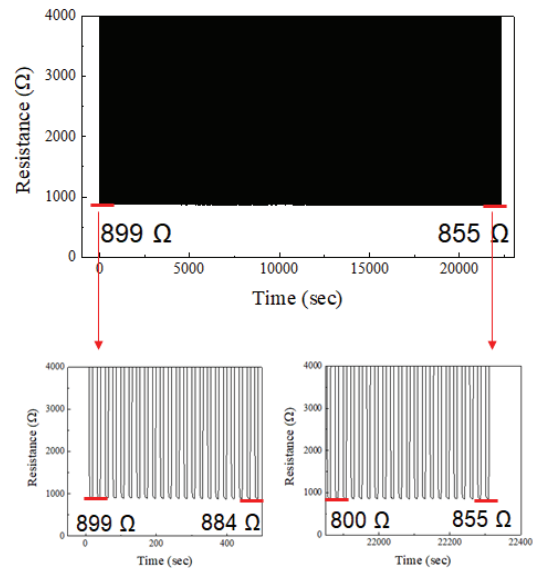


Fig. 4 Results of repeated durability evaluation at 25°C

반복 하중에 의한 필름의 영구변형, 전도성 잉크로 제작 된 전극의 표면 박리 등이 발생 할 경우 저항 값이 매우 불안정하고 급격한 변화를 보인다. 그러나 평가 중 급격한 저항의 감소나 상승이 없는 것으로 비춰 볼 때 높은 안정성을 갖는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 개발 센서가 실제 동작되는 100 °C에서의 반복 하중 신뢰성 평가 결과이다. 100 °C 평가를 위해 만능재료시험기 하부에 핫 플레이트

(hot plate)를 두고 온도를 100 °C로 설정 후 센서의 반복 내구성을 평가하였다.

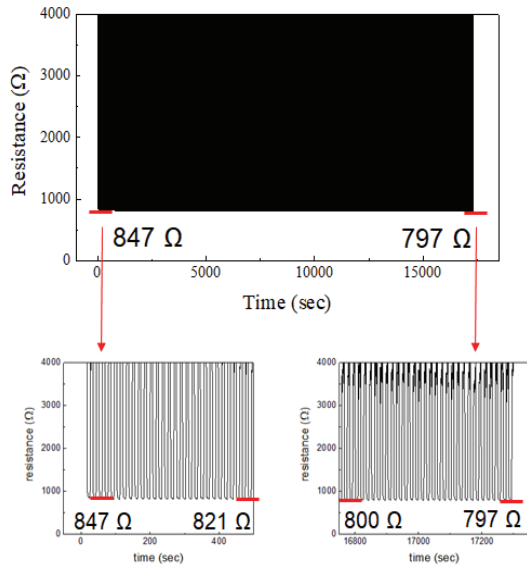


Fig. 5 Results of repeated durability evaluation at 100 °C

센서가 핫 플레이트의 온도와 열적 평형 상태가 되도록 1시간 가열 후 실험을 진행하였다. 센서의 초기 저항은 847 Ω으로 온도 영향으로 상온 보다 다소 낮은 저항 값을 보였다. 이는 압저항 방식의 센서가 가지는 특징으로 온도변화에 따라 저항이 변화하는 현상이다.

본 개발 센서가 사용되는 환경은 100 °C를 유지하는 분위기이므로 온도변화에 따른 저항 변화는 센서 성능에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 100 °C에서 최종 센서의 저항은 797 Ω으로 초기 저항대비 6.27 %로 상온보다는 다소 높은 변화율을 나타내지만 실제 사용 환경을 고려할 때 센서 신뢰도에 영향을 미치지 않는 결과이다. 실제 사용 환경은 짧은 시간 동안 반복 하중을 가하는 방식이 아닌 평가와 평가 사이에 긴 시간을 가지는 것을 고려할 때, 실제 환경에서는 상기 내

구성 평가 결과보다 더 안정적인 내구성을 보일 것으로 판단된다.

Fig. 6은 롤 라미네이터 압력 센서에 적용되는 센서의 모식도이다. 롤 라미네이터 외부를 감싸고 있는 폴리머가 하중으로 인해 변형하여 센서 내부를 누르게 되고 이때 저항 값을 통해 롤 라미네이터의 축 방향 압력을 측정하는 방식이다. 1번부터 7번까지 길이 700 mm 롤 라미네이터의 축 방향으로 센서를 일정한 간격으로 배치하여 롤 라미네이터의 압력 불균일도 및 형상 불균일도를 저항으로 확인 할 수 있다.

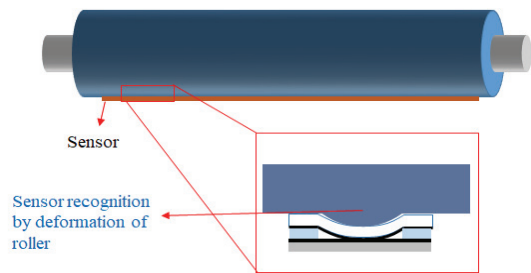


Fig. 6 Schematic of membrane film pressure sensor for hot roll laminator

최종적으로 7개의 센서가 배열되고 ADC(Analog to Digital Converter) 회로 및 데이터 송수신 부가 결합된 롤 라미네이터 압력 센서는 Fig. 7과 같다. 각 센서의 하부 전극은 그라운드로 하나의

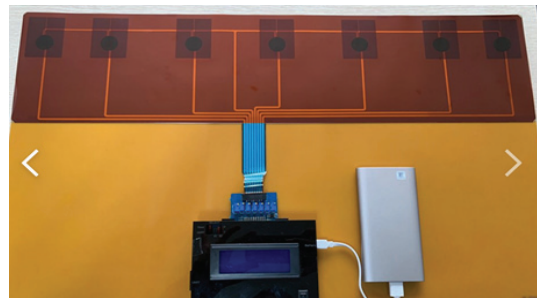


Fig. 7 Membrane film pressure sensor for hot roll laminator

전극으로 연결되며, 상부 전극은 개별적으로 인쇄하여 제작하였다. 통신부와 연결된 전극은 FPCB (Flexible Printed Circuit Board) 표준 전극으로 프린팅하여 결합하였다.

제작된 대면적 롤 라미네이터용 압력센서의 반복 재현성 성능 평가를 위해 700 mm 고온 롤 라미네이터에 0.4 MPa 하중을 인가하여 롤 압착 공정을 진행하였을 때 ADC를 통해 변환된 값의 5회 반복 측정하였다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 5회 반복 실험에서 5번 센서에서 높은 ADC 값을 나타냈으며, 반복실험 결과에서는 유사한 형태의 압력 분포를 보였다. 상기 결과를 비취볼 때, 양산 공정에서도 충분한 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

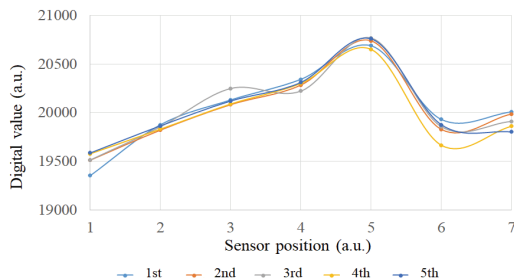


Fig. 8 Result of PMAS(Pressure Measurement Analysis System) value

## 4. 결론

고온 고압 롤 라미네이터의 압력 분포 확인을 위해 멤브레인 구조의 필름형 압력 센서에 대한 연구를 수행하였다. 멤브레인 압력 센서에서 멤브레인의 크기를 조절하여 측정하고자 하는 압력범위에 대한 최적 크기를 도출 하였으며, 이를 바탕으로 상온 반복 내구성 및 고온 반복 내구성을 평가 하였다. 1,000회 반복 내구성 평가 결과 초기

저항 대비 7% 이내의 매우 우수한 결과를 보였다. 또한, 개발한 개별 센서를 대면적 센서 제작에 적용하여 실제 700 mm 롤 라미네이터의 압력을 측정하였으며, 반복 측정에서 유사한 압력 분포 결과를 보였다. 본 연구를 통해 멤브레인 구조의 필름형 압력센서가 타이어 트레드 압력 분석, 고압 프레스 밸런스 측정 등 다양한 분야에 적용 가능할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] T. Gong, H. Zhang, W. Huang, L. Mao, Y. Ke, M. Gao and B. Yu, "Highly responsive flexible strain sensor using polystyrene nanoparticle doped reduced graphene oxide for human health monitoring," *Carbon*, vol. 140, pp. 286-295 (2018).
- [2] K. Kim, J. Choi, Y. Jeong, I. Cho, M. Kim, S. Kim, Y. Oh and I. Park, "Highly sensitive and wearable liquid metal-based pressure sensor for health monitoring applications: Integration of a 3D-printed microbump array with the micro-channel," *Adv. Healthcare Mater.*, vol. 9, no. 7, pp. 1-10 (2019).
- [3] W. Honda, S. Harada, T. Arie, S. Akita, K. Takei, "Wearable, human-interactive, health-monitoring, wireless devices fabricated by macroscale printing techniques," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 24, pp. 3299-3304 (2014).
- [4] S. Jung, J. Kim, J. Kim, S. Choi, J. Lee, I. Park, T. Hyeono and D. Kim, "Reverse-micelle-induced porous pressure-sensitive rubber for wearable human-machine Interfaces," *Adv. Mater.*, vol. 26, pp. 4825-4830 (2014).
- [5] J. Ge, L. Sun, F. Zhang, Y. Zhang, L. Shi, H. Zhao, H. Zhu, H. Jiang and S. Yu, "A stretchable electronic fabric artificial skin with pressure-, lateral strain-, and flexion-sensitive properties," *Adv. Mater.*, vol. 28, pp. 722-728



- (2016).
- [6] Z. Ma, W. Wang and D. Yu, "Highly sensitive and flexible pressure sensor prepared by simple printing used for micro motion detection," *Advanced Materials Interfaces*, vol. 7, no. 2, pp. 1-7 (2020).
- [7] L. Pan, A. Chorotos, G. Yu, Y. Wang, S. Isaacson, R. Allen, R. Dauskardt and Z. Bao, "An ultra-sensitive resistive pressure sensor based on hollow-sphere microstructure induced elasticity in conducting polymer film," *Nature communications*, vol. 5, pp. 1-8 (2014).
- [8] X. Li, W. Huang, G. Yao, M. Gao, X. Wei, Z., Liu, H. Zhang, T. Gong, B. Yu, "Highly sensitive flexible tactile sensors based on microstructured multiwall carbon nanotube arrays," *Scripta Materialia*, vol. 129, no. 1, pp. 61-64 (2017).
- [9] O. Atalay, A. Atalay, J. Gafford, C. Walsh, "A highly sensitive capacitive-based soft pressure sensor based on a conductive fabric and a microporous dielectric layer," *Adv. Mater. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 1700237 (2018).
- [10] B. Tee, A. Chortos, R. Dunn, G. Schwartz, E. Eason, Z. Bao, "Tunable flexible pressure sensors using microstructured elastomer geometries for intuitive electronics," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 24, pp. 5427-5434 (2014).
- [11] C. Pang, J. Koo, A. Nguyes, J. Caves, M. Kim, A. Chortos, K. Kim, P. Wang, J. Tok, Z. Bao, "Highly skin-conformal microhairy sensor for pulse signal amplification," *Adv. Mater.* vol. 27, pp.634-640 (2015).
- [12] J. Lee, K. Lee, H. Kim, "Development of direct printed flexible tactile sensors," *The Korea Society of Industry Convergence*, vol. 20, no. 3, pp. 233-243 (2017).
- [13] S. Byun, I. Jang, K. Park, R. Sohn, W. Lee, "Study on method for correcting unbalanced sitting posture by force-sensing resistors," *The Korea Society of Industry Convergence*, vol. 17, no. 4, pp. 203-210 (2014).

---

(접수: 2020.11.16. 수정: 2020.12.04. 게재확정: 2020.12.11.)