

## 연속 구배형 전도성 표면 구현을 위한 탄성중합체 코팅에 관한 연구

라문우<sup>1</sup> · 윤길상<sup>2</sup> · 박성제<sup>†</sup>

한국기술교육대학교 기계공학부<sup>1,†</sup>

한국생산기술연구원 금형기술그룹<sup>2</sup>

### A study on elastomer coating technology for continuous gradient conductive surface

Moon-Woo La<sup>1</sup> · Gil-Sang Yoon<sup>2</sup> · Sung-Jea Park<sup>†</sup>

Korea University of Technology & Education, School of Mechanical Engineering<sup>1,†</sup>

Korea Institute of Industrial Technology, TMolds & Dies R&D Group<sup>2</sup>

(Received June 19, 2019 / Revised September 26, 2019 / Accepted September 30, 2019)

**Abstract:** Recently, studies on the development of flexible electronic devices by combining flexible materials and a conductor have been actively performed as interest in wearable devices. Especially, carbon nanotubes (CNT) or graphene coating have been used to construct a circuit to induce improvement in flexibility and rigidity. Various technologies have been developed in the surface coating of conductive materials, which are key to the manufacture of flexible electronic devices. Surface coating products with 3D coating and micro-patterns have been proposed through electrospinning, electrification, and 3D printing technologies. As a result of this advanced surface coating technology, there is a growing interest in manufacturing gradient conductive surfaces. Gradient surfaces have the advantage that they are adapted to apply a gentle change or to inspect optimum conditions in a particular region by imparting continuously changing properties. In this study, we propose a manufacturing technique to produce a continuous gradient conductive surface by combining a partial stretching of elastomer and a conductive material coating, and introduce experimental results to confirm its performance.

**Key Words:** Carbon nanotubes, Continuous gradient conductive surface, Elastomer, Wearable devices

## 1. 서 론

최근, 웨어러블 장치(wearable devices)에 대한 관심이 증대되면서, 유연성과 전도성을 동시에 지니는 유연전자장치(flexible electronics) 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 일반적으로, 실리콘과 같은 탄성체(elastomer)나 고분자 필름 위에 금속패이스트를 선택적으로 코팅하여 회로를 구성함으로써 유연전자장치를 구현하고 있으며, 이와 더불어 최근에는 장치의 유연성, 강성 등의 향상을 위해 카본나노튜브(CNT), 그래핀(graphene) 등의 소재를 코팅하는 시

도가 이루어지고 있다<sup>1,2)</sup>. 더 나아가, 휘어지는 수준을 넘어서서 늘어나거나 접히는 유연전자장치 개발에 대한 연구도 활발히 보고되고 있다. 장치가 늘어나거나 접히는 극한의 작동 환경에서도 전극 형성 및 유지가 용이한 기판 및 회로 소재 개발이 중요하다. 또한, 미세패터닝 기술을 도입함으로써 복잡한 회로의 집적을 통하여 기능적으로 우수한 장치 개발이 가능하다<sup>3-5)</sup>.

이와 같은 장치 개발을 위한 뿌리 기술로, 표면에 다양한 구조, 물질 등을 코팅하는 기술은 매우 중요하다<sup>6,7)</sup>. 최근에는 고기능성 구현을 위한 미세패터닝(micro-patterning) 기술과 연속적 기능 구현을 위한 농도구배(density gradient) 형성 기술에 대한 관심이 높아지고 있다<sup>8-10)</sup>. 특히, 농도구배 표면은 연

1. 한국기술교육대학교 기계공학부  
† 교신저자: 한국기술교육대학교 기계공학부  
E-mail: psj7517@koreatech.ac.kr

속적으로 변화하는 성질을 부여함으로써 특정 영역 내 최적의 조건을 검사(screening)하거나 온화한 자극(mild stimulation)을 인가하는데 적용할 수 있다는 특징이 있다<sup>11,12)</sup>. 기존에 발표된 농도구배 표면 형성 방법은 대체로 전기 방사 혹은 전기 분무 방식을 골자로 하고 있다. 영역별로 코팅 횟수나 방사 시간을 조절하여 단계적인 농도구배 표면을 구현하는 방식이나, 구배의 정도를 인위적으로 조절해야하기 때문에 완전히 연속적인 구배(continuous gradient)를 형성하기 어려운 단점이 있고, 공정 과정에 있어서 반복적인 작업이 필요하기에 구배표면 구현 시간이 길어지는 문제가 있다. 이 밖에 기능성 섬유를 이용하여 선택적인 직물 짜기를 수행함으로써 농도구배 표면을 구현하는 방식이 있다<sup>13,14)</sup>. 이 역시 직물 소재만 가능하다는 한계와 직물 짜기 과정이 오래 걸린다는 단점을 나타낸다. 따라서 기존의 방법 대비 연속적인 농도구배 구현이 가능하면서도, 그 방법에 있어서 보다 경제적인 방식으로 코팅할 수 있는 방법이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 연속 구배형(continuous gradient) 전도성 표면(conductive surface) 구현을 위해 인장 가능한(stretchable) 탄성중합체 기관(elastomeric template)을 이용한다. 기관을 등방향(isotropic) 혹은 비등방향(anisotropic)으로 인장한 상태에서 표면에 전도성 물질을 균일하게 코팅한 후, 기관의 인장을 해제한다. 이로 인해 초기 기관의 인장 정도에 따라 코팅의 농도가 달라진다. 즉, 인장이 많이 된 부분일수록 농도가 짙어지는 것이다. 또한, 탄성중합체 기관의 비등방향성 인장은 자연적으로 연속적인 형태를 지니므로, 코팅의 농도 차이도 연속적인 형태를 나타내게 된다. 이러한 연속 구배형 전도성 표면은 연속적인 온도구배 조절이 가능한 구배형 히터 (gradient heater)나, 세포 혹은 생화학 물질의 전기적/열적 특성을 도출하는 스크리닝 역할을 하는 바이오 센서(bio-sensor) 개발에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 실험

### 2.1. 연속 구배형 전도성 표면 구현 개요

연속 구배형 전도성 표면 구현을 위한 탄성중합체 코팅 방법의 개요는 Fig. 1과 같다. 탄성중합체 기관의 일부분을 인장하여, 전체 기관 상에서 인장 정도의 차이가 연속적으로 나타나게 한다. 인장을

Table 1 Materials preparations and Processing states

Elastomer templates	Silicone sheet
Coating material	carbon nanotube 3.98 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$
Coating method	filtration and contact printing
Processing temperature	room temperature (20°C)
Surface measurement	resistance

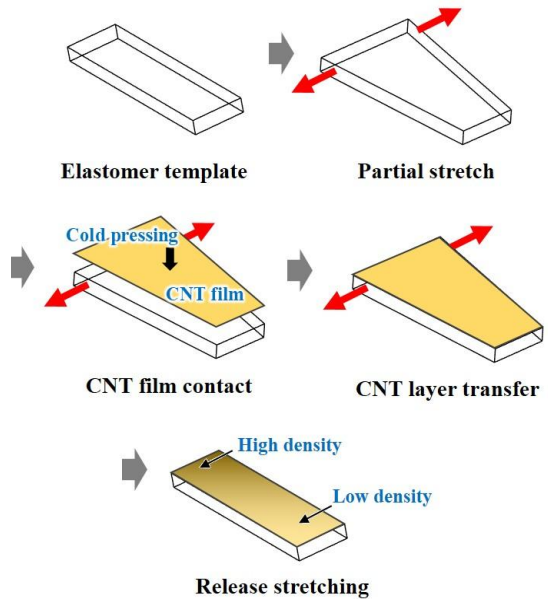


Fig. 1 Schematic diagrams of elastomer coating technology for continuous gradient conductive surface.

유지한 상태에서, 사전에 준비한 균일 농도의 전도성 물질 필름(예, CNT, 그래핀 등)을 냉간 압착(cold press) 방식으로 전사한다. 고르게 전사된 상태에서 부분 인장을 해제하면, 결과적으로 인장이 적게 되었던 부분에서 많이 되었던 부분으로 점점 농도가 짙어지는 구배를 나타내며 코팅이 완료된다. 이러한 원리를 바탕으로 탄성중합체를 어떻게 인장하는가에 따라 농도 구배의 형태가 달라진다. Fig. 1에서는 1차원의 선형 인장을 나타내었지만, 점(point)형 인장 및 면(surface)형 인장에 의해서 각각 0차원의 집중형 코팅 패턴, 2차원의 확산형 코팅 패턴을 유도할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 연속 구배형 전도성 표면 구현을 위한 탄성중합체 코팅의 기본 원리 및 효과 확인을 위해 1차원의 선형 인장에 대해서 검증해 보았다.

## 2.2. 재료 준비 및 공정 환경 설정

연속 구배형 전도성 표면 구현을 위한 탄소중합체 코팅을 위해 탄소중합체 기판은 실리콘 고무 (silicone elastomer sheet,  $(C_2H_6OSi)_n$ , 2.0 mm thickness, Goodfellow)를 이용하였다. 전도성 코팅 물질은 종이 필터면에  $3.98 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ 의 농도로 분배된 CNT 필름을 사용하였다. 일반적으로 CNT가 종이 필터 보다는 실리콘 표면에 더 잘 붙기 때문에 contact printing 방식으로 쉽게 전사될 것이라 예측하였다. 재료 준비에서 코팅 공정 전반은 room temperature ( $20^\circ\text{C}$ )에서 수행되었다.

## 2.3. 코팅 공정 및 표면 저항 측정

Fig. 2는 연속 구배형 전도성 표면 구현을 위한 탄소중합체 코팅 공정 및 전도성 표면 저항 측정 과정을 나타낸다. 연속 구배형 전도성 표면 특성 확인 및 비교를 위해 2가지 경우의 샘플을 준비하였다.

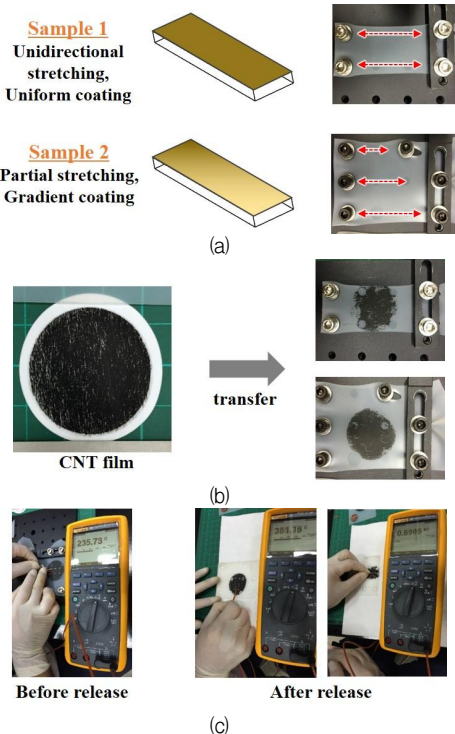


Fig. 2 (a) Preparation of sample 1 with unidirectional stretching and sample 2 with partial stretching. (b) Uniform coating and gradient coating on sample 1 and 2, respectively by means of CNT film contact printing. (c) Measurement of surface electrical resistance before and after release of the stretched templates.

Sample 1은 실리콘 시트를 가로 방향으로 균일하게 인장하여 균일한 코팅을 유도한(unidirectional stretching, uniform coating) 경우이며, sample 2는 가로 방향으로 인장하되 수직방향으로 인장을 차이나도록 하여 구배형 코팅을 유도한 (partial stretching, gradient coating) 경우이다 (Fig. 2(a)). Fig. 2(b)에는 종이 필터상에 균일하게 분배된 CNT 필름과 이를 sample 1, 2에 각각 전사한 상태를 보여준다. 이때에도 샘플의 인장을 계속 유지하고 있다. 각각의 샘플을 동일한 조건에서 3개씩 제작하여 결과의 신뢰성을 확인하고자 하였다. 연속 구배형 전도성 표면의 특성을 확인하기 위하여 표면 저항을 측정하였다. Multimeter (FLUKE - 289 True-rms logging digital multimeter, FLUKE)를 이용하여 코팅 표면의 고정된 거리(10 mm) 사이의 저항을 측정하였다. 인장을 유지한 상태에서 먼저 측정을 하고, 이후 인장을 해제하여 같은 거리 사이의 저항을 측정하였다. 각각의 측정은 동일 조건에서 3회 이상 측정된 값을 평균하여 정리하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1. 단일 방향 인장, 균일 코팅 결과 (unidirectional stretching, uniform coating)

Fig. 3에는 sample 1, 2 상의 표면저항 측정 위치를 나타낸다. Sample 1에서는 단일 부분(P0)을, sample 2에서는 상중하 3 부분(P1, P2, P3)을 측정하였다. Sample의 구조적 상태 및 코팅 상태, 코팅 전후 표면 저항에 대한 결과를 종합하여 Table 2, 3에 표기하였다.

Sample 1을 이용한 단일 방향 인장, 균일 코팅의 결과 실리콘 시트의 인장율은 20% ( $62.5 \text{ mm} \rightarrow 75.0 \text{ mm}$ )이며, 이에 따른 최종 코팅 농도는  $4.78 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ 으로 나타났다. 코팅 전후 표면 저항은  $709 \Omega$ 에서  $670 \Omega$ 으로 약 5.5%가 감소된 것으로 측정되었다. 인장 후 해제하게 되면 기존의 CNT 입자간의 거리가 축소되기 때문에 전류 이동이 더욱 원활한 환경이 되어 결과적으로 저항이 감소되는 것으로 확인되었다.

### 3.2. 부분 인장, 구배형 코팅 결과 (partial stretching, gradient coating)

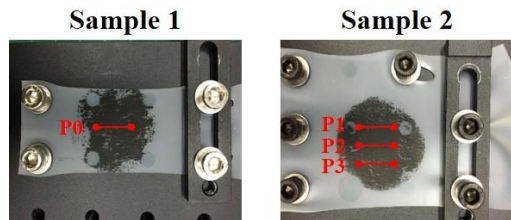
Sample 2에서는 부분 인장으로 인해 P1, P2, P3에서 각각 10, 14, 18%의 인장율을 나타내었다(각각의

길이 변화는 초기 62.5 mm에서 P1 68.75 mm, P2 71.25 mm, P3 73.75 mm). 인장율에 의존하여 해당 위치의 농도는 각각 P1 4.38  $\mu\text{g}/\text{mm}^2$ , P2 4.54  $\mu\text{g}/\text{mm}^2$ , P3 4.70  $\mu\text{g}/\text{mm}^2$ 으로 확인되었다.

위치에 따른 인장 전후 저항 변화율은 각각 P1 23.9% (473  $\Omega$   $\rightarrow$  360  $\Omega$ ), P2 31.0% (436  $\Omega$   $\rightarrow$  301  $\Omega$ ), P3 35.6% (483  $\Omega$   $\rightarrow$  311  $\Omega$ )의 감소율을 나타내었다. 초기 인장율이 높을수록 인장 해제 후 단위 면적당 CNT의 농도가 증가하여, 즉 입자간의 거리가 감소되어, 일정 간격 사이의 표면 저항이 더 많이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

**Table 2** Results of silicone templates.

Position	P0	P1	P2	P3
Initial length (mm)	62.5			
Stretched length (mm)	75.0	68.75	71.25	73.75
Stretched ratio (%)	20	10	14	18
Initial coating density ( $\mu\text{g}/\text{mm}^2$ )	3.98			
Final coating density ( $\mu\text{g}/\text{mm}^2$ )	4.78	4.38	4.54	4.70
Density variation ratio (%)	20	10	14	18
Resistance before release ( $\Omega$ )	709	473	436	483
Resistance after release ( $\Omega$ )	670	360	301	311
Resistance variation ratio (%)	-5.5	-23.9	-31.0	-35.6



**Fig. 3** Measurement positions of sample 1 and sample 2.

### 3.3 연속 구배형 전도성 표면 구현을 위한 탄성중합체 코팅 결과 정리 및 비교 분석

Sample 1은 sample 2에 비하여 더 큰 농도 변화율을 나타내지만, 이에 따른 저항 변화율은 상대적으로 작게 나타난다. 이는 기본적으로 코팅에 의한 초기 저항이 상대적으로 높기 때문일 것으로 예상된다. 인장 상태에서의 저항 자체가 낮아서 즉, CNT 입자간의 거리가 상대적으로 멀기 때문에, 인장이 해제되더라도 저항이 감소되는 정도가 작게 나타난 것이다. 차후 sample 1, 2의 초기 코팅 상태를 일정하게 하여 비교할 필요가 있다. 이러한 상황을 차치

하더라도, sample 1 자체에서도 큰 의미를 확인할 수 있다. 탄성중합체 표면에 전도성 코팅을 한 후 이에 대한 인장을 달리하면 저항이 변하는 일종의 가변저항으로 이용할 수 있다는 것이다. 이러한 특성은 유연소재를 활용하는 유연 디스플레이(flexible display)나 인공 피부 등에 적용하는데 주요 고려사항이 될 수 있을 것이다. 물론 한계 이상의 인장이 가해지는 경우에는 저항이 급격히 증가하는 비전도 상태가 될 수 있다. 이러한 상태를 이용하면, 전류의 흐름을 제어하는 on/off 스위치로 활용할 수 있다. 상기 예시 모두 전자기적 제어가 아닌 물리적 제어를 통해 전자기적 성질을 제어한다는 점에서 의미가 있을 것이다.

Sample 2의 결과에서 위치 P1과 P2를 비교해보면, 농도 변화율은 10%에서 14%으로 1.4배 증가하였으나, 저항 변화율을 23.9%에서 31.0%으로 약 1.3배 증가하였다. 또한 위치 P1과 P3를 비교하면 농도 변화율은 1.8배 증가하였으나, 저항 변화율은 약 1.5배 증가하였다. 두 가지 경우 모두 농도 변화에 비교하여 저항 변화가 다소 낮게 나타났다. 하지만 그 차이 그다지 크지 않고, 선형(proportional)의 의미 있는 관계를 보여준다고 할 수 있다. 이러한 데이터를 바탕으로 좀 더 폭 넓은 제어 데이터를 확보 한다면 (초기 코팅 저항 차이, 인장율 차이 등) 차후 연속 구배형 전도성 표면 활용에 있어서 중요한 백그라운드 데이터가 될 것으로 사료된다.

## 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 탄성중합체 기판을 인장한 상태에서 전도성 물질을 코팅하고, 인장 전후의 표면 저항 상태 변화를 확인하는 연구를 수행하였다. 인장 및 코팅 형태에 따라 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(단일 방향의 인장, 균일 코팅) 탄성중합체를 단일 방향으로 인장하고 표면에 균일한 코팅을 한 뒤 인장을 해제하면, 기존의 CNT 입자간의 거리가 축소되어 표면 전류 이동을 원활하게 함으로써 기판의 표면 저항을 감소시킬 수 있다는 현상을 확인하였다. 이를 바탕으로 향후 기판의 길이 변화, 코팅 농도와 같은 물리적 변수 제어를 통해 전자기적 특성을 변화시킬 수 있을 것이라는 가능성을 확인하였다.

(부분 인장, 구배형 코팅) 탄성중합체 기판을 부

분적으로 인장하고 CNT를 표면에 코팅함으로써 연속 구배형 전도성 표면을 구현할 수 있었다. 기관의 인장율에 비례하여 농도 구배가 나타나며, 또한 저항 감소율도 이에 비례하는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 탄소중합체의 부분인장과 전도성 물질 코팅을 접목하여 전도성 연속 구배 표면을 성공적으로 구현할 수 있었다.

이러한 전도성 연속 구배 표면은 표면저항이 연속적으로 변하기 때문에 전류를 가했을 때, 표면 상의 온도 분포가 구배를 이루는 즉, 구역별로 서서히 증가하거나 감소하는 특성을 나타내기 때문에, 필요한 영역에 열을 집중하거나, 급격한 온도변화를 방지하는 기능을 지닌 히터나 전도성 전류 집전체로 응용될 수 있을 것이다. 이 밖에도 생화학물질의 연속 구배형 코팅을 통해서 구역별로 서로 다른 생화학 자극으로 인해 세포의 특이성이 발휘되는 생화학적 조건을 추적하고, 세포 혹은 생체 인자의 최적 환경을 모색하는 생체 스크리닝 등에 활용 가능할 것으로 사료된다. 결과적으로 본 연구에서 제시하는 탄소중합체 상의 연속 구배 표면 코팅 기술을 비단 전도성 표면에 의한 전자기, 열유체적 특성 구현 뿐만 아니라, 생화학 물질 표면에도 적용하여 기계, 전자, 열유체 및 의학, 바이오 응용 기술에도 접목 될 수 있으리라 전망한다.

## 후기

본 연구는 한국생산기술연구원 기관주요사업(EO190033)의 지원과 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2018R1A6A1A03025526)의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.

## 참고문헌

- 1) Bradley, K., Gabriel, J. C. P., and Gruner, G. Flexible nanotube electronics. *Nano Lett.*, Vol. 3, pp. 1353-1355, 2003.
- 2) Lay, M. D., Novak, J. P., & Snow, E. S. Simple route to large-scale ordered arrays of liquid-deposited carbon nanotubes. *Nano Lett.*, Vol. 4, pp. 603-606, 2004.
- 3) Zhou, Y., Hu, L., and Gruner, G. A method of printing carbon nanotube thin films. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, p. 123109, 2006.
- 4) Jung, H. C., Moon, J. H., Baek, D. H., Lee, J. H., Choi, Y. Y., Hong, J. S., and Lee, S. H. CNT/PDMS composite flexible dry electrodes for long-term ECG monitoring. *IEEE T, BIO-MED ENG.*, Vol. 59, pp. 1472-1479, 2012.
- 5) Lee, W.-S. and Kim, Y.-D. A study on the effect of binder properties on feedstock and micro powder injection molding process, *J. D&M Eng.*, Vol. 11, pp. 1-7, 2017.
- 6) Jeon, Y.-H., Kim, N.-J. Effect of nanoparticle material for heat transfer enhancement, *J. D&M Eng.*, Vol. 13, pp. 42-47, 2019.
- 7) Kim, B. J. and Meng, E. Review of polymer MEMS micromachining. *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 26, p. 013001, 2015.
- 8) La, M., Choi, J., Choi, J. Y., Hwang, T., Kang, J., and Choi, D. Development of the Triboelectric Nanogenerator Using a Metal-to-Metal Imprinting Process for Improved Electrical Output. *Micromachines*, Vol. 9, p. 551, 2018.
- 9) Mohan, G., and Gallant, N. D. Surface chemistry gradients on silicone elastomers for high throughput modulation of cell adhesive interfaces. *J. Biomed. Mater. Res. A*, Vol. 103, pp. 2066-2076, 2015.
- 10) Wei, Y., Qi, X., He, S., Deng, S., Liu, D., and Fu, Q. Gradient Polydopamine Coating: A Simple and General Strategy toward Multishape Memory Effects. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 10, pp. 32922-32934, 2018.
- 11) Morgenthaler, S., Zink, C., and Spencer, N. D. Surface-chemical and-morphological gradients. *Soft matter*, Vol. 4, pp. 419-434, 2008.
- 12) Green, A. A., and Hersam, M. C. Solution phase production of graphene with controlled thickness via density differentiation. *Nano Lett.*, Vol. 9, pp. 4031-4036, 2009.

# 사출성형 중 높은 전단속도에서 용융 수지의 점도 측정에 대한 연구

이준한<sup>1</sup> · 김종선<sup>†</sup>

한국생산기술연구원 금형기술그룹<sup>1,†</sup>

## A study on the measurement of melt viscosity at the range of high shear rate during injection molding

Jun-Han Lee<sup>1</sup> · Jong-Sun Kim<sup>†</sup>

Molds & Dies R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology<sup>1,†</sup>

(Received September 17, 2019 / Revised September 26, 2019 / Accepted September 30, 2019)

**Abstract:** In this study, a mold for measuring melt viscosity was fabricated with a slit of 10 mm in width, 0.5 mm in thickness and 200 mm in length. Two pressure sensors was installed in the slit to measure the viscosity of melt resin during injection molding. four different grades of PETG were used and the viscosity was measured in the injection molding machine with a screw diameter of 40 mm by setting the melt temperature to 220, 240, 260 ° C, and the injection speed of 10, 20, 30, 40 mm/s. The viscosity was calculated by the shear stress and shear rate, respectively, using the pressures measured at the pressure sensors during injection molding and the injection flow rate. The result showed that all four PETGs has a tendency of decreasing viscosity with increasing melt temperature and shear rate. This tendency was confirmed to be similar to that of PETG measured by general rheometer and the measured values were similar. Therefore, when the viscosity of the melt resin is measured with the injection rheometer, it was confirmed that reliable results of similar tendencies and levels as those of actual resins can be obtained at the range of high shear rate.

**Key Words:** High shear rate, Injection molding, Slit die, Mold, Viscosity

### 1. 서 론

사출성형공정에서 용융 수지의 유동성 혹은 점도로 대표되는 유변학적 특성은 수지의 충전 거동 및 제품의 품질에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 용융 수지의 점도는 성형온도, 압력, 속도와 같이 공정 특성을 나타내는 인자들과 밀접한 관련이 있으며, 공정 조건 설정 시 이를 고려하여 사출성형을 진행해야 한다.

일반적으로 용융 수지의 점도는 점도계를 이용하여 측정한다. 점도계는 액체나 유동성이 있는 물질의 유변학적 물성을 측정하기 위해 사용하는 장비로 대표적으로는 점도, 모듈러스(Modulus), 완화시

간 등이 있다. 이러한 유변물성들은 재료의 구조적 변화를 수반한 응력이나 변형률, 또는 시간에 따라 변하며 이를 점도계에서 측정한다. 점도계는 측정 방식에 따라 회전형과 모세관으로 구분되며 모세관 점도계는 10에서 10,000 s<sup>-1</sup> 정도의 높은 전단속도에서 용융 수지의 유변특성을 측정하기 위해 사용된다. 이 기기에 적용되는 모세관 형상은 일반적으로 원형 형태이나 슬릿 형태가 사용되기도 한다.

그러나 모세관 점도계가 10,000 s<sup>-1</sup>의 높은 전단속도에서 용융 수지의 점도를 측정할 수는 있지만 실제 사출성형 시 용융 수지가 받는 전단속도는 이보다 더 큰 값을 가진다. 사출속도 등 조건에 따라 값이 다르겠지만 일반적으로 사출성형 중 100,000 s<sup>-1</sup> 이상의 전단속도를 나타낸다. 따라서, 점도계를 이용하여 측정한 점도를 사출성형에 적용할 때는 점도 데이터를 Cross-WLF 등의 수학적 모델로 피팅(fitting)하여 사용한다<sup>1,2)</sup>. 그러나 보다 정확한 점도

1. 한국생산기술연구원 금형기술그룹  
† 교신저자: 한국생산기술연구원 금형기술그룹  
E-mail: libra74@kitech.re.kr

데이터를 확보하여 적용하기 위해서는 실제 사출성형공정의 전단속도 범위에서 측정된 용융 수지의 점도 값이 필요하다.

본 논문에서는 사출성형기와 모세관 점도계의 구조적 유사점에서 착안하여 점도 측정용 슬릿 금형을 제작하고 사출성형기에서 고 전단속도의 용융 수지 점도를 측정하는 방법으로 사출점도계(injection rheometer)를 제작하고 검증하였다. PETG 수지를 사용하였으며, 고 전단속도 범위에서 사출속도와 사출 온도에 단계를 부여하여 점도를 측정하고 모세관 점도계로 측정된 데이터와 비교 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 슬릿 점도 이론<sup>3-5)</sup>

사출성형 중 용융 수지의 점도 측정에 슬릿 점도 이론을 적용하기 위해 Isothermal, Incompressible, Steady state, Fully developed, neglecting gravitational force으로 가정하였다. 일반적으로 용융 수지는 비뉴턴 유체(non-newtonian fluid)이지만 뉴턴 유체(newtonian fluid) 가정을 사용하면 사출성형공정의 특성에 대한 기본적인 모델을 시간소모적인 계산 없이 얻을 수 있다. Figure 1과 같이 고정된 두 평판 사이를 흐르는 유체에 대해 벽 전단응력(wall shear stress)와 벽 전단속도(wall shear rate)를 구하면 식(1)과 식(2)와 같다. 따라서, 용융 수지의 점도는 식(3)의 형태로 나타난다.

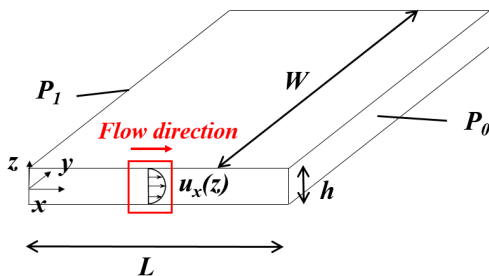


Fig. 1 Fluid flow in a slit made of two fixed walls

$$\sigma_w = \frac{\Delta P}{L} \frac{h}{2} \quad (\text{at } z = \frac{h}{2}) \quad \dots (1)$$

$$\gamma_w = \frac{6Q}{h^2 w} \quad (\text{at } z = \frac{h}{2}) \quad \dots (2)$$

$$\eta = \frac{\sigma_w}{\gamma_w} = \frac{h^3 w}{12Q} \frac{\Delta P}{L} = \frac{h^2}{12L} \frac{\Delta P}{v_{injection}} \quad \dots (3)$$

$$(Q = hw \cdot v_{injection})$$

### 2.2. 재료

실험에서 사용된 재료는 PN100, 400 (SK chemical)과 GN400, 401 (Eastman)의 4가지 그레이트(grade)의PETG (glycol modified polyethylene terephthalate)이다. 4종의 PETG는 유사한 수준의 유동지수(melt flow index)를 가지는 수지이다.

### 2.3. 점도 측정용 슬릿 금형

용융 수지의 점도 측정은 Fig. 2의 점도 측정용 슬릿 금형을 제작하여 사출성형기를 이용하여 진행하였으며 본 측정 방법 및 장치를 사출점도계(injection rheometer)로 정하였다.



Fig. 2 Scheme of slit mold

점도 측정용 금형은 Fig. 3과 같이 내부에 너비 10 mm, 두께 0.5 mm, 길이 200 mm의 슬릿을 가지고 있다. 슬릿에는 게이트로부터 50 mm, 150 mm 지점에 직경이 2.5 mm인 압력 센서(6189A, Kistler)를 Fig. 4과 같이 설치하였다. 사출성형 시 두 센서 사이의 거리 100 mm를 유동거리 L, 센서에서 측정되는 압력을 각각 P1, P2라 하면 용융 수지에서 유동 거리에서 측정되는 압력 차이는 P2 - P1이며 이를 슬릿 점도 산출 이론에 적용하여 점도를 산출한다.

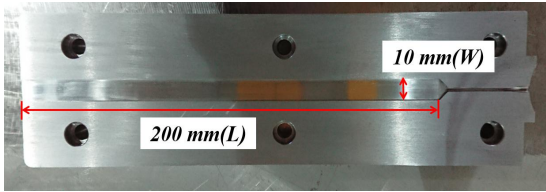


Fig. 3 Scheme of slit cavity

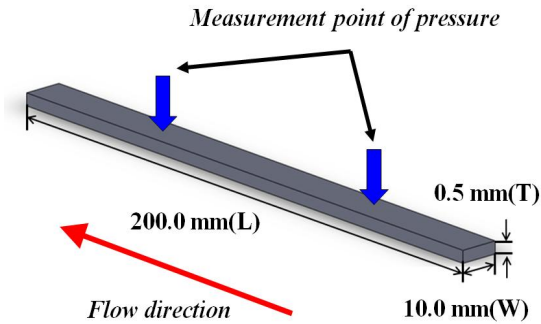


Fig. 4 Measurement point of melt pressure

사출성형 중 금형 내 슬릿을 지나는 용융 수지의 온도를 사출온도와 같은 온도로 일정하게 유지하기 위해 Fig. 5와 같이 슬릿 형상을 기준으로 위와 아래에 각각 8 mm 떨어진 위치에 히터 카트리지를 9개씩 설치하였다.

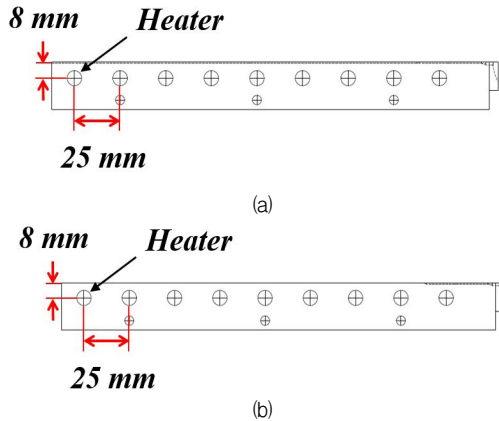


Fig. 5 Heater cartridge of (a) upper and (b) lower core

### 2.3. 측정 방법

본 실험에서는 Fig. 6의 220톤 사출성형기 (WIZ-220, LSMtron)을 사용하였으며 Table 1은 측정에 사용한 성형조건을 나타낸다. 성형조건은 4종의 PETG에 모두 동일하게 적용하여 비교하였다.



Fig. 6 Injection molding machine used this study(WIZ-220)

Table 1 Injection molding conditions for measurement of viscosity

Conditions	Value	Unit	Note
Melt temperature	220, 240, 260	℃	
Mold temperature	220, 240, 260	℃	% Heater control
Injection velocity	10, 20, 30, 40	mm/s	40 mm of screw diameter
Packing pressure/time	-	-	% Not apply

금형 내 압력 센서의 신호는 차지 증폭기(charge amplifier, Kistler)를 사용하여 전압 신호로 변환한 후 DAQ(data acquisition) 보드(National Instrument)에 신호를 연결하여 LABVIEW 프로그램으로 데이터를 획득하였다. 획득한 데이터를 이용하여 측정된 압력 차이  $\Delta P$ 와 사출속도  $v_{injection}$ 를 식(3)에 적용하여 점도를 계산하였다. Figure 7에는 차지 증폭기와 DAQ 보드 등으로 구성된 DAQ 모듈과 LABVIEW 소프트웨어로 구성된 DAQ 시스템을 나타낸다.

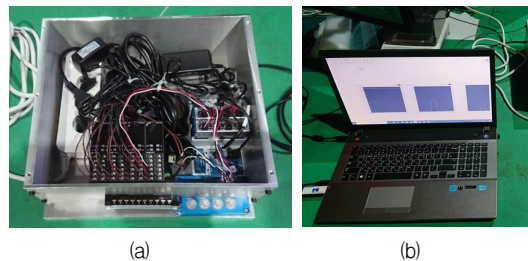


Fig. 7 Scheme of DAQ system : (a) DAQ module, and (b) LABVIEW software

## 3. 결과

Table 2, 3, 4, 5는 4종의 PETG에 대해 사출점도계



로 측정된 점도를 나타낸다. 전단속도의 측정범위는 30,159.29 s<sup>-1</sup>부터 120,367.20 s<sup>-1</sup>까지로 일반적인 모세관 점도계의 측정범위보다 높은 전단속도에서의 점도 데이터를 획득하였다. PN100, GN400, GN401은 모두 용융 온도를 260℃까지 상승시켜도 사출성형이 가능하여 점도를 측정하였으나 PN400의 경우, 260℃에서 사출성형이 용이하지 않아 220, 240℃의 용융온도에 점도를 측정하였다. 측정 결과를 살펴보면, 4종의 PETG에서 용융온도와 사출속도(전단속도)가 증가할수록 점도가 작아지는 경향을 확인하였다. 이는 일반적으로 알려진 PETG의 점도 경향과 일치하며 4종의 PETG의 점도 그래프를 나타낸 Fig. 8, 9, 10, 11에서도 그 경향을 확인할 수 있다.

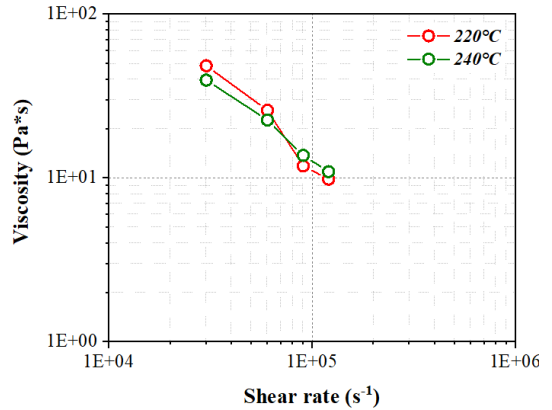


Fig. 9 Measured viscosity vs shear rate graph of PN400

Table 2 Measured viscosity of PN100 using injection rheometer

Injection velocity [mm/s]	Shear rate [1/s]	Viscosity [Pa*s]		
		220℃	240℃	260℃
10	30,159.29	36.96	36.36	39.64
20	60,318.36	22.18	19.91	21.03
30	90,477.87	14.68	12.52	13.31
40	120,637.20	10.40	9.26	10.03

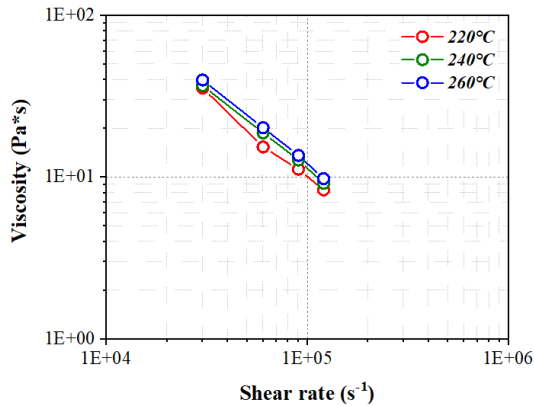


Fig. 8 Measured viscosity vs shear rate graph of PN100

Table 3 Measured viscosity of PN400 using injection rheometer

Injection velocity [mm/s]	Shear rate [1/s]	Viscosity [Pa*s]		
		220℃	240℃	260℃
10	30,159.29	48.38	39.51	-
20	60,318.36	25.86	22.55	-
30	90,477.87	11.81	13.72	-
40	120,637.20	9.81	10.91	-

Table 4 Measured viscosity of GN400 using injection rheometer

Injection velocity [mm/s]	Shear rate [1/s]	Viscosity [Pa*s]		
		220℃	240℃	260℃
10	30,159.29	37.89	36.75	39.80
20	60,318.36	20.59	18.76	20.57
30	90,477.87	11.71	12.53	13.46
40	120,637.20	6.30	8.75	10.14

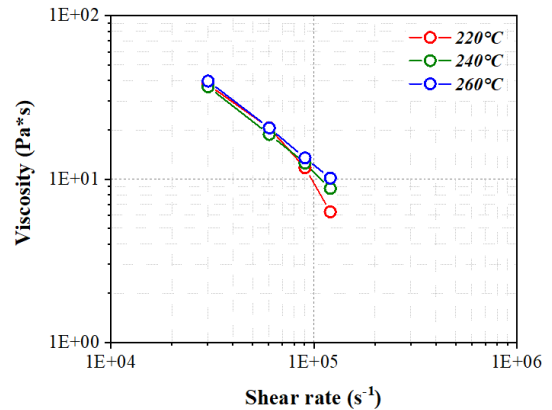


Fig. 10 Measured viscosity vs shear rate graph of GN400

Table 5 Measured viscosity of GN401 using injection rheometer

Injection velocity [mm/s]	Shear rate [1/s]	Viscosity [Pa*s]		
		220℃	240℃	260℃
10	30,159.29	35.50	36.71	39.72
20	60,318.36	15.32	18.72	20.16
30	90,477.87	11.17	12.73	13.60
40	120,637.20	8.32	9.12	9.77

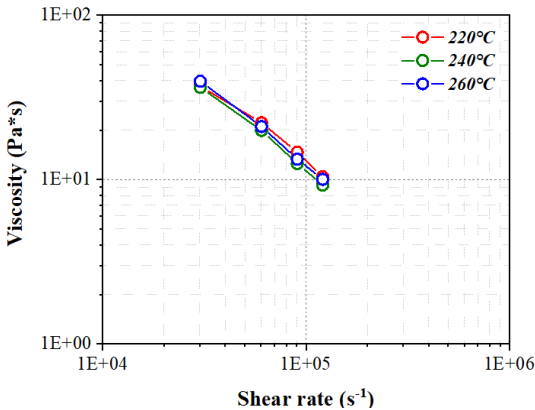


Fig. 11 Measured viscosity vs shear rate graph of GN401

사출점도계로 측정된 점도 데이터를 검증하기 위해 일반적인 점도계로 측정된 점도와 비교하였으며 Fig. 12에 비교 결과를 나타내었다. Figure 12의 점선을 기준으로 왼쪽의 데이터가 점도계로 측정된 데이터이고 오른쪽의 데이터가 사출점도계로 측정된 데이터이다. 두 데이터를 비교해보면, 사출점도계로 측정된 점도가 일반 점도계로 측정된 점도의 경향과 수준을 따르는 것을 확인할 수 있다. 일반 점도계에서 측정된 점도에서  $5,000 \text{ s}^{-1}$ 에서  $7,000 \text{ s}^{-1}$ 까지 전단속도 증가에 따른 점도의 감소비가  $220^\circ\text{C}$ 에서  $-0.59 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{s}^{-1}$ ,  $240^\circ\text{C}$ 에서  $-0.61 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{s}^{-1}$ 이다. 그리고 일반 점도계의 최대 전단속도와 사출점도계의 측정 데이터 중 최소 전단속도 사이의 점도 감소비는  $220^\circ\text{C}$ 에서  $-0.56 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{s}^{-1}$ ,  $240^\circ\text{C}$ 에서  $-0.57 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{s}^{-1}$ 로 나타났으며 이는 사출점도계의 점도 데이터가 실제 용융 수지의 점도와 유사한 경향과 수준을 가지고 측정되었다는 것을 의미하며 이는 Fig. 12의 전체 데이터에서도 확인할 수 있다.

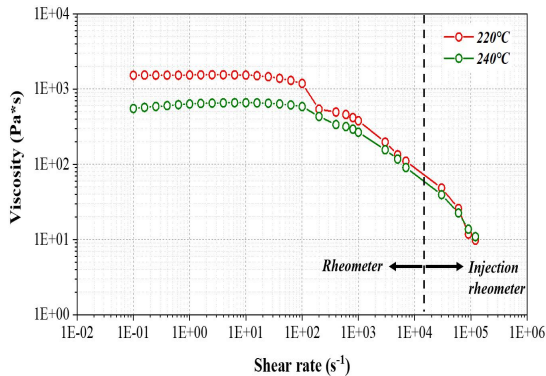


Fig. 12 Measured viscosity vs shear rate graph of PN400 by injection rheometer and rheometer

## 4. 결론

본 논문에서는 가로 10 mm, 두께 0.5 mm, 길이 200 mm의 슬릿 형상을 가지는 점도 측정용 금형을 제작하고 사출성형기를 이용하여 기존 점도계의 전단속도 범위보다 높은 전단속도 범위, 즉 실제 사출성형 시 용융 수지에 적용되는 전단속도에서 점도 측정을 진행하였다. 서로 다른 4종의 PETG에 대해 점도 측정을 진행하였으며 용융온도 220, 240, 260°C에서 각각 10, 20, 30, 40 mm/s의 사출속도(스크류 직경 40 mm) 조건에서 성형하였고 보압 조건은 적용하지 않았다. 추가로 PN400에 대해 일반 점도계에서 점도를 측정하였으며 사출점도계의 점도와 비교하여 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 4종의 PETG를 이용하여 사출점도계에서 점도를 측정된 결과, 일반 점도계의 전단속도 범위를 넘어서는  $120637.20 \text{ s}^{-1}$ 의 전단속도까지 점도를 측정하였으며, 용융온도와 전단속도가 증가할수록 점도가 감소하는 것을 확인하였으며 이는 일반적으로 알려진 PETG의 점도 경향과 일치한다.

2) 4종의 PETG 중 PN400에 대해 일반 점도계로  $0.10 \text{ s}^{-1}$ 에서  $7,000 \text{ s}^{-1}$ 범위까지 측정하였을 때,  $100 \text{ s}^{-1}$ 까지는  $220^\circ\text{C}$ 와  $240^\circ\text{C}$ 에서 각각 일정한 점도 값을 보였으나  $100 \text{ s}^{-1}$  이후부터는 전단속도가 증가함에 따라 점도가 감소하였으며 사출점도계로 측정된 점도의 경향과 유사함을 확인하였다.

3) PN400에 대해 일반 점도계로 측정된 점도와 사출점도계로 측정된 점도를 비교하였을 때, 일반 점도계에서  $5,000 \text{ s}^{-1}$ 과  $7,000 \text{ s}^{-1}$  사이의 점도 감소비(기울기)는  $220^\circ\text{C}$ 에서  $-0.59 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{s}^{-1}$ ,  $240^\circ\text{C}$ 에서  $-0.61 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{s}^{-1}$ 이고 일반 점도계의 최대 전단속도와 사출점도계의 측정 데이터 중 최소 전단속도 사이(경계)의 점도 감소비는  $220^\circ\text{C}$ 에서  $-0.56 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{s}^{-1}$ ,  $240^\circ\text{C}$ 에서  $-0.57 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{s}^{-1}$ 로 유사한 경향과 수준을 가지고 측정된 것을 확인하였다.

따라서, 점도 측정용 금형을 이용하여 사출성형기에서 용융 수지의 점도를 측정하는 사출점도계로 용융 수지의 점도를 측정하였을 때, 실제 수지의 점도와 유사한 경향과 수준의 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있으며 일반 점도계에서 측정할 수 없는 실제 사출성형 시의 용융 수지에 적용되는 고 전단속도에서의 점도 데이터를 확보할 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과를 활용하면 사출성형공정의

해석이나 실제 성형에서 보다 정확한 결과와 공정을 진행할 수 있을 것으로 판단된다.

### 후기

본 연구는 산업통산자원부의 기계산업핵심기술개발사업(Project No. KM190170, 10067766)의 지원으로 진행되었습니다.

### 참고문헌

- 1) Shi, X., Huang, M., Zhao, Z., and Shen, C., "Nonlinear Fitting Technology of 7-Parameter Cross-WLF Viscosity Model", *Adv. Mater. Res.*, Vol. 189-193, pp. 2103-2106, 2011.
- 2) Jung, T. S., Kim, J. S., Ha, S. J., and Cho, M. W., "Measurement of Viscosity and Numerical Analysis of High Speed Injection Molding for Thin-Walled LGP", *Trans. Mater. Process.*, Vol. 23, No. 1, pp. 41-48, 2014.
- 3) Han, C. D., "On Silt- and Capillary-Die Rheometry", *Trans. Soc. Rheol.*, Vol. 18, pp. 163-190, 1974.
- 4) Gao, R. X., Tang, X., Gordon, G., and Kazmer, D. O. "Online product quality monitoring through in-process measurement", *CIRP Annals-Manuf. Technol.*, Vol. 63, pp. 493-496, 2014.
- 5) Chen, J. Y., Yang, K. J., and Huang, M. S. "Online quality monitoring of molten resin in injection molding", *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol. 122, pp. 684-693, 2018.