

# 서로 다른 열환경에 노출된 고분자 소재의 열팽창계수 측정 측정에 관한 연구

김동주\*, 박설현\*\*,#

\*조선대학교 기계시스템·미래자동차공학과, \*\*조선대학교 기계공학과

## A study on the Measurement of the Coefficient of Thermal Expansion of Polymer materials Exposed to Different Thermal Environments

Dong-Ju Kim\*, Seul-Hyun Park\*\*,#

\*Dept. of Mechanical System & Automotive Engineering Graduate School of Chosun University.,

\*\*Department of Mechanical Engineering, Chosun University.

(Received 04 November 2020; received in revised form 21 December 2020; accepted 07 January 2021)

### ABSTRACT

Plastics are widely used in mechanical and other fields due to their light weight, design flexibility, and molding processability. In processing plastics, defective products are mixed and reprocessed to improve production efficiency and reduce costs. In this study, an experiment was conducted to confirm the coefficient of thermal expansion of HDPE during this reprocessing. The coefficient of thermal expansion was measured at different measurement directions and heating rates. As a result, we observed that the coefficient of thermal expansion in the direction perpendicular to the injection direction is greater than that in the horizontal direction.

Key Words : High Density Poly Ethylene(고밀도 폴리에틸렌), Coefficient of Thermal Expansion(열팽창계수), Strain Gauge(스트레인게이지), Anisotropic(이방성), Heating Rate(승온속도)

### 1. 서 론

현대사회에서 플라스틱은 경량성, 디자인 유연성 및 성형 가공성 등의 장점으로 인해 일상생활 속에서 사용되는 플라스틱 용기 및 병부터 자동차,

전자제품까지 다양한 분야에서 활용되고 있는 소재이다<sup>[1]</sup>. 이러한 플라스틱 중 가열하면 유체화되고 온도가 낮아지면 다시 고화되는 열가소성 특성을 활용하여, 압출성형, 사출성형, 중공성형 등 다양한 방법으로 열가소성 플라스틱을 활용하게 되며 폴리에틸렌(Polyethylene), 폴리프로필렌(Polypropylene) 등이 가장 많이 사용되고 있으며 폴리에틸렌의 경우는 2018년 기준으로 약 4,888,123 M/T

# Corresponding Author : isaac@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7174, Fax: +82-62-230-7171

생산 및 사용되고 있다<sup>[2-3]</sup>.

폴리에틸렌의 경우 크게 밀도에 따라 HDPE(High Density Polyethylene)와 LDPE(Low Density Polyethylene) 등으로 분류되어 사용되고 있으며 HDPE의 경우 분자구조의 규칙성이 우수하여 폴리에틸렌 중 가장 우수한 내열성, 우수한 인장 특성, 충격성, 내한성, 내화학성 등의 특성을 활용하여 압출성형, 사출성형, 중공성형 등에 사용되고 있다<sup>[4]</sup>.

HDPE의 원료가 중공성형에 사용될 때 성형과정에서 발생하는 찌꺼기(Scrub) 및 불량품이 발생하게 되는데, 생산효율성 및 원가절감을 고려하여 찌꺼기 및 불량품을 분쇄하여 펠렛 형태로 원료와 섞어 재사용하게 된다. 재처리 공정에서 1차 성형된 HDPE는 다시 한번 열 및 폐리슨 압력을 받게 되는데<sup>[5]</sup>, 이때 발생하는 열이력 차이는 HDPE의 물성변화를 야기할 수 있다. 열이력 차이에 따른 물성 변화를 확인하기 위해 Dan Weckström<sup>[6]</sup>은 14번의 재성형과정을 통해 Polypropylene의 인장강도, 탄성계수 등을 확인하였고, Kuan-hua et al.<sup>[7]</sup>은 Polyamide 소재에 가해진 열이력 차이에 따른 인장항복응력, 탄성계수, 충격강도 등을 관찰하였다.

본 연구에서는 재처리 공정을 통해 성형된 HDPE 플라스틱 소재의 열팽창계수를 스트레인 게이지를 활용하여 측정하였다. 이를 위해서 순수 HDPE와 중공성형 과정에서 발생한 찌꺼기와 혼합된 HDPE, 그리고 순수 찌꺼기만으로 제작된 시편을 사출성형을 통해 제작하였다. 제작된 3가지 종류의 시편을 서로 다른 열환경(승온 및 감온 환경)에 노출시켜 시편에 가해진 열이력의 차이에 따라 달라지는 열팽창계수(Coefficient of thermal expansion, CTE)를 측정해보고자 하였다.

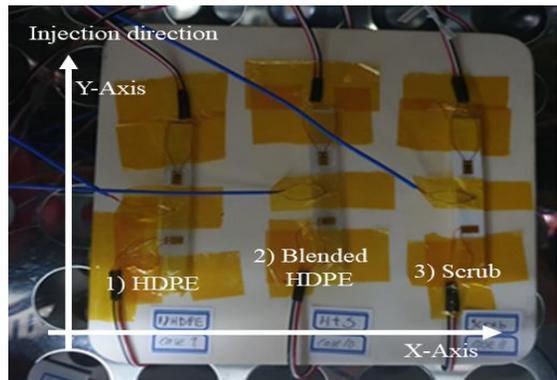
## 2. 실험장치 및 분석 방법

D사의 순수 HDPE 원료(5502HS)을 80×10×4 mm의 크기로 사출성형 하여 HDPE 100% 시편 제작하였고, Table 1에 정리되어있는 바와 같이 HDPE (80 wt. %)와 찌꺼기 (20 wt. %), 순수 찌꺼기로 구성된 시편을 HDPE 100% 시편과 동일한 크기로 제작하였다. 제작된 시편의 열변형을 확인하기 위해 Fig. 1과 같이 우선 시편의 중앙부에 K-Type

열전대를 부착하였다. 사출 방향과 수평인 방향을 Y축으로 수직인 방향을 X축으로 분류하고, 각 축으로 열팽창계수를 측정하였다. 사포(#300)를 사용하여 스트레인 게이지의 부착부위를 연마하고, 스트레인 게이지 전용 본드를 사용하여 MM(Micro-Measurements)사의 C2A-06-062LW-120 스트레인 게이지를 X와 Y축 방향으로 각각 부착하였다.

**Table 1 Summary of compositions for polymer specimen**

Specimen	HDPE (wt. %)	Scrub (wt. %)
HDPE	100	0
Blended HDPE	80	20
Scrub	0	100



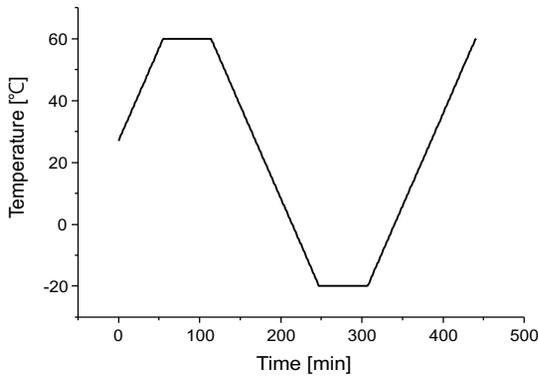
**Fig. 1 Image of strain gauges attached on different specimens**



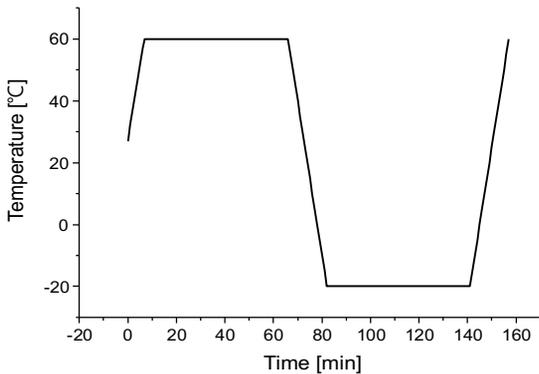
**Fig. 2 Thermal chamber used in this study**

**Table 2 Specifications of the thermal chamber used in this study**

Thermal Chamber	
Temperature Range	-35 ~ 100 [°C]
In size (W, D, H)	500, 500, 600 [mm]
Heater	4 [kW]
Freezer	1Hp, R404a



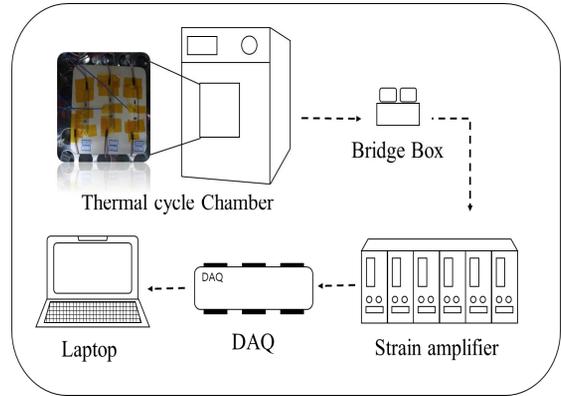
(a) Thermal cycle at the heating and cooling rate of 0.6°C



(b) Thermal cycle at the heating and cooling rate of 5°C

**Fig. 3 Heat and cooling cycle used to measure CTE of specimen**

서로 다른 열이력(열환경)에 노출된 시편의 열팽창계수 측정을 위해 열환경챔버를 사용하여 승온 구간, 정온 구간, 감온 구간을 갖는 열사이클을



**Fig. 4 Schematics for CTE measurement apparatus**

구성하였다. 실험에 사용한 열환경챔버의 사진 및 사양은 Fig. 2와 Table 2에 정리하였다.

서로 다른 열환경에 노출된 시편의 열팽창계수의 차이를 확인하기 위해 Fig. 3과 같이 -20°C부터 60°C까지 승온 과정과 60°C부터 -20°C까지 감온 과정을 갖는 사이클을 구성하여 측정을 수행하였다.

아울러 승온 및 감온 속도에 의해 발생하는 열이력 차이에 따른 열팽창계수 변화를 확인하기 위해 0.6°C/min, 5°C/min으로 승온과 감온을 각각 2씩 반복하여 측정을 진행하였다. 또한 기기 설정 및 주변 온도 등의 실험 오차를 최소화하기 위해 3개의 시편을 동시에 열사이클에 노출시킨 뒤 5회 반복 실험을 진행하고 이를 평균하여 열팽창계수를 계산하였다.

시편의 열변형과 온도 변화는 데이터 수집장치(DAQ)를 통해 1초 간격으로 수집하였으며 시편의 열변형은 스트레인게이지를 통해 측정되는 저항변화를 휘스톤 브릿지 박스를 통해 전압값으로 변환하고, 이를 스트레인 앰프(Kyowa DPM 311A)를 통해 증폭하여 출력하였다. Fig. 4는 서로 다른 열환경에 노출된 시편의 열팽창계수를 측정하기 위해 사용된 실험장치의 구성도를 보여준다.

### 3. 실험결과 및 고찰

스트레인게이지는 피 측정물의 변형율(strain)을

저항의 변화로 바꾸어 주는 센서<sup>[8-9]</sup>이다. 피 측정 물의 온도가 변화할 때 저항의 변화율  $\frac{\Delta R}{R}$ 은 스트레인게이지마다 고유하게 갖고 있는 스트레인게이지 상수 K와 스트레인 게이지의 열변형률  $\epsilon_T$ , 그리드의 저항 온도 계수  $\beta$ , 시편의 열팽창계수  $\alpha_s$ , 그리드의 열팽창계수  $\alpha_G$ 의 관계를 통해 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon_T = [\beta + K(\alpha_s - \alpha_G)]\Delta T^{[10]} \quad (1)$$

식 (1)에서 온도의 변화에 의해 발생하는 스트레인 게이지의 열변형률  $\epsilon_T$ 은 식 (2)로 표현할 수 있으며, 이를 열팽창계수를 측정하고자 하는 시편의 열변형률  $\epsilon_s$ 과 열팽창계수를 알고 있는 기준물질의 열변형률  $\epsilon_R$ 에 대해 식 (3)과 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_T = \left[\frac{\beta}{K} + (\alpha_s - \alpha_G)\right]\Delta T \quad (2)$$

$$\epsilon_s = \left[\frac{\beta}{K} + (\alpha_s - \alpha_G)\right]\Delta T \quad (3)$$

$$\epsilon_R = \left[\frac{\beta}{K} + (\alpha_R - \alpha_G)\right]\Delta T \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에서 측정하고자 하는 시편의 열변형률  $\epsilon_s$ 와 기준시편의 열변형률,  $\epsilon_R$ 을 연립하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있고 기준물질의 열팽창계수와 기준물질의 열변형률 알고 있다면 시편의 열팽창계수  $\alpha_s$ 를 계산할 수 있다.

$$\alpha_s = \frac{\epsilon_s - \epsilon_R}{\Delta T} + \alpha_R \quad (5)$$

기준물질의 열팽창계수,  $\alpha_R$ 은  $11.5 \times 10^{-6} \text{mm/m} \text{m}^\circ\text{C}$ 로 잘 알려져 있고<sup>[11]</sup> 실험에 사용한 C2A-06-062LW-120 스트레인게이지의 열변형률,  $\epsilon_R$ 은 식 (6)에 제시된 4차 항의 온도 함수로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_R = -46.9 + 3.55T + (-7.70 \times 10^{-2})T^2 + (4.98 \times 10^{-4})T^3 + (-1.30 \times 10^{-6})T^4 + (1.67 \times 10^{-9})T^5 \quad (6)$$

Fig. 6은 Gauge Factor 2.0에서 온도에 변화에 따라 식(6)으로 계산된 기준 물질 1018 Steel의 열변형률 도시한 결과이다.

식 (5)에서 시편의 열변형률,  $\epsilon_s$ 은 앞서 언급한 실험 장치를 사용하여 승온과 감온 과정 중에 발생하는 저항 변화를 스트레인 앰프를 사용하여 측정하였으며, Fig. 6에 도시된 바와 같이 온도 변화에 따라 선형적으로 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

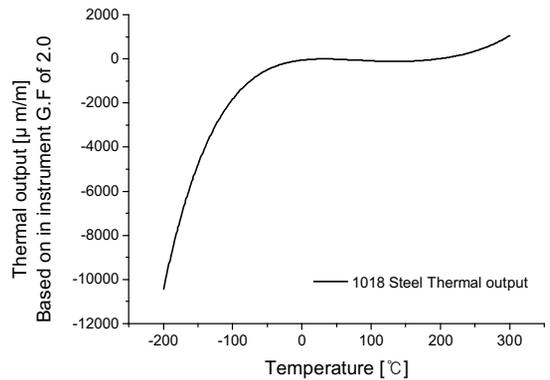


Fig. 5 Thermal output measured as a function of temperature

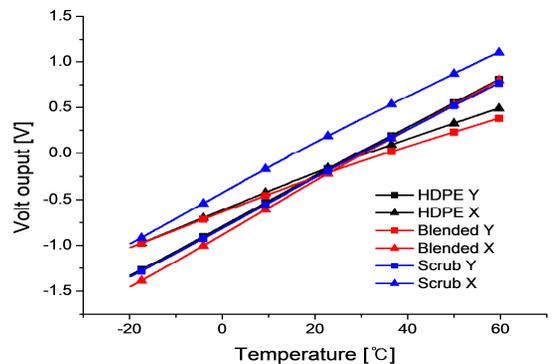
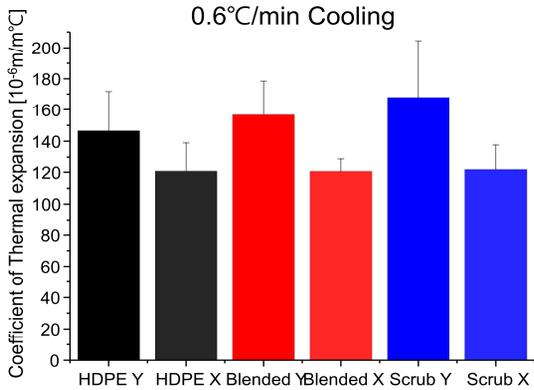
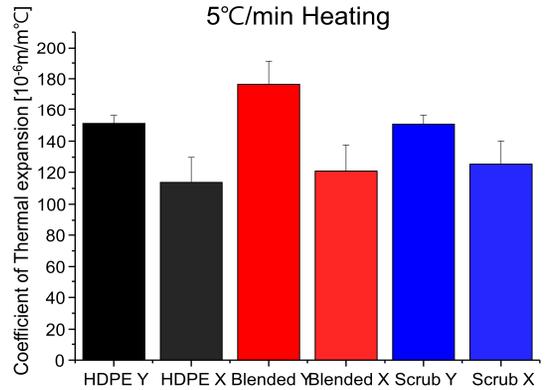


Fig. 6 Voltage Variations due to according to thermal deformation of specimens

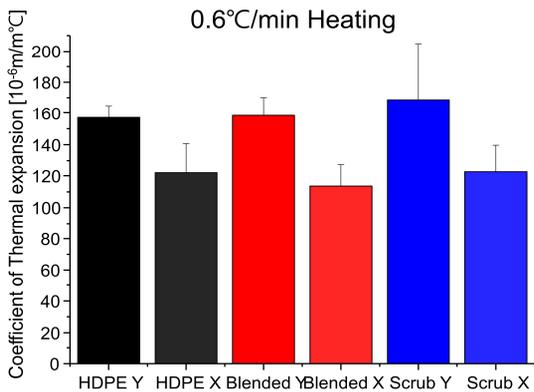


(a) Coefficient of thermal expansion for each axis at cooling rate of 0.6 °C/min

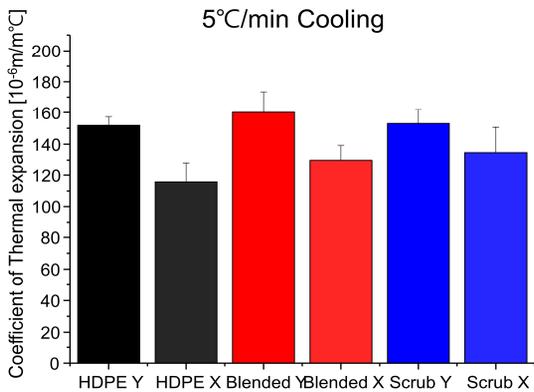


(d) Coefficient of thermal expansion for each axis at heating rate of 5 °C/min

**Fig. 7 Measured coefficient of thermal expansion for each axis at given condition**



(b) Coefficient of thermal expansion for each axis at heating rate of 0.6 °C/min



(c) Coefficient of thermal expansion for each axis at cooling rate of 5 °C/min

이때 스트레인 게이지를 사용하여 얻은 전압 값과 측정에 사용한 앰프 전압 감도를 곱하면 측정하고자 하는 시편의 열변형율,  $\epsilon_s$ 을 계산할 수 있다. 측정을 통해 계산된 각 시편의 열팽창율은 Fig. 7에 도시하였고 Table 3에 각각 정리하였다. 선행연구에서 측정된 HDPE의 열팽창계수를 살펴보면  $90 \mu\text{mm}/\text{mm}^\circ\text{C}$ 에서  $120 \mu\text{mm}/\text{mm}^\circ\text{C}$ <sup>[14-15]</sup>사이 분포하고 있고, 본 연구에서 X축 방향으로 측정된 열팽창계수와 비교적 잘 일치한다. 아울러 본 연구를 통해 측정된 결과를 살펴보면 순수 HDPE 원료의 시편에 비해 HDPE와 찌꺼기가 배합된 시편과 순수 찌꺼기 시편의 열팽창계수가 더 높음을 확인할 수 있다. 이는 선행 연구<sup>[16-17]</sup>를 통해 보고된 바와 같이 고분자 재료의 기본구조 단위인 라멜라 사슬 구조의 차이 때문인 것으로 판단된다. 즉, 가공 초기 중공 성형과정에서 이미 열변형이 가해진 HDPE 찌꺼기가 배합되어 재처리되는 과정에서 고분자 재료의 라멜라 사슬의 폭과 길이가 달라지고, 이에 따라 열팽창계수의 변화가 초래된 것으로 유추해 볼 수 있다<sup>[18,19]</sup>.

특히, 본 연구에서와 같이 사출성형을 통해 시편이 제작된 경우, 사출 성형 과정 중 시편에 전달되는 응력의 방향과 직각인 방향으로 라멜라 사슬이 발달되는 것으로 보고되고 있다<sup>[20-21]</sup>.

**Table 3 Coefficient of thermal expansion measured for each axis at 0.6°C / min**

	HDPE	Blended	Scrub
Y-axis Cooling 0.6°C / min	145.98 ± 25.11	156.10 ± 21.81	167.37 ± 36.48
Y-axis Heating 0.6°C / min	156.48 ± 7.69	157.79 ± 11.64	168.08 ± 36.00
X-axis Cooling 0.6°C / min	120.09 ± 18.31	119.93 ± 8.49	121.12 ± 16.06
X-axis Cooling 0.6°C / min	121.27 ± 18.80	112.95 ± 13.98	121.90 ± 17.20
Y-axis Cooling 5°C / min	151.23 ± 5.42	159.53 ± 13.39	152.39 ± 9.15
Y-axis Heating 5°C / min	150.52 ± 5.06	175.78 ± 14.75	149.95 ± 5.68
X-axis Cooling 5°C / min	115.11 ± 12.48	129.31 ± 9.31	134.06 ± 16.02
X-axis Cooling 5°C / min	113.37 ± 16.23	120.03 ± 17.04	125.04 ± 14.44

이러한 현상에 의해 본 연구를 통해 측정된 Y 축 방향의 열팽창계수가 X축 방향으로 측정된 열팽창계수에 비해 약 20~40% 정도 더 높은 것으로 판단된다. 이 결과는 열변형이 가해지는 시편의 사출 방향에 따라 X축과 Y축의 열팽창계수가 차이가 발생할 수 있음을 의미한다. 한편 승온과 감온 속도가 각각 0.6°C/min, 5°C/min 으로 다른 경우 측정된 열팽창계수는 시편의 종류와 상관없이 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 열이력 및 재처리 공정에 따른 HDPE의 열팽창계수를 분석하기 위해 스트레인게이지를 사용하여 HDPE와 재처리 공정을 통해 제작된 HDPE의 열팽창계수를 분석하기 위한 실험을 진행하였다.

1. 실험을 통해 HDPE의 열팽창계수를 분석한 결과 X축에서 측정된 HDPE의 열팽창계수의 값에서 일반적으로 HDPE의 열팽창계수 값으로

알려져 있는 HDPE의 열팽창계수의 범위 내에 위치하는 것을 확인할 수 있었다.

2. HDPE와, HDPE와 Scrub을 배합한 시편, Scrub을 가공하여 만든 시편의 열팽창계수를 비교한 결과 승온 속도 5°C/min에서 측정된 Y 축을 제외한 나머지 결과에서 Scrub을 배합함에 따라 HDPE의 열팽창계수가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 재처리 공정에 의한 열팽창 계수 경향을 보다 명확히 하기 위해서는 더 많은 반복 실험이 필요할 것으로 판단된다.
3. 사출 방향을 기준으로 하여 각 시편의 열팽창계수의 차이를 확인한 결과 사출 방향에 따라 열팽창계수의 차이가 발생함을 확인할 수 있었으며, 사출 방향과 수평인 방향의 열팽창 계수가 사출 방향과 수직인 방향에 비해 더 높음을 확인할 수 있었다.
4. 승온과 감온 속도를 0.6 °C/min, 5°C/min으로 다르게 하여 각 시편의 열팽창계수를 측정 한 결과 승온 및 감온 속도를 다르게 하여도 열팽창계수의 차이가 크지 않음을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

“이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0002092, 2020년 산업혁신인재성장지원사업)”

#### References

1. Choi, K. D., "Engineering Plastics Technology Trend", Polymer Science and Technology, Vol. 20, No. 1, pp. 3-7, 2009.
2. Lee, J. G., Hwang, D. G., and Cho, D. H., "Effect of Recycled Resin Content on the Tensile Properties of Polyethylene Resins with Different Densities" Abstract of research papers at The Polymer Society of Korea, Vol. 42, No. 1, pp. 124-124, 2017.

3. "Mining industry production, shipment, inventory, domestic demand, export volume by item"(2018) <http://kosis.kr>(accessed 31, Jan., 2018)
4. Lee, J. G., Hwang, D. G., and Cho, D. H., "Effect of processing conditions on the properties of various polyethylene resins." Abstracts of research papers at the Polymer Society of Korea, pp. 126-126, 2016.
5. Kim, D., H., Seol, S. S., "Study on the Effect of Gas Pressure on Bottle Wall Thickness in the Blow Molding Process", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 4, pp. 36-44, 2020.
6. Weckström, Dan., "Changes in mechanical properties of recycled polypropylene.", A Thesis for a Bachelor, Arcada University, Finland, 2012.
7. Su, K. H., Lin, J. H., and Lin, C. C., "Influence of reprocessing on the mechanical properties and structure of polyamide 6," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 192, pp. 532-538, 2007.
8. Bae, J. I., Ryu, C. K., "On Study for Digital Load Cell using Zig-Bee", The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Proceedings of the KSMPE Conference Vol. 6, pp. 218-221, 2007.
9. Im, S. H., Kim, J. S., Park, M. K., "A Design and Analysis of Anemometer using Strain Gauge", The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Proceedings of the KSMPE Conference, pp. 42-43, 2015.
10. Yang, H. G., and Joo J. W., "Measurement of Thermal Expansion Coefficient Using Strain Gage", The Korean Society of Mechanical Engineers, Proceedings of the KSMPE Conference, pp. 354-366, 2015.
11. Micro-Measurements, V., "Strain gage thermal output and gage factor variation with temperature.", Strain Gauges and Instruments, Vishay Micro-Measurements, 2010.
12. Micro-Measurements, V. "Measurement of thermal expansion coefficient using strain gages", Technical Note tn-513-1, 2007.
13. Joo, J. W., Kim, G. S., "The Apparent Strains of Strain Gages in Cryogenic Environment", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 16 No. 16-6, pp. 1099-1107, 1992.
14. Brown, E. N., Willms, R. B., Gray, G. T., Rae, P. J., Cady, C. M., Vecchio, K. S., and Martinez, M. Y., "Influence of molecular conformation on the constitutive response of polyethylene: a comparison of HDPE, UHMWPE, and PEX", Experimental mechanics, Vol. 47(3), pp. 381-393, 2007.
15. Awad, A. H., Abd El-Wahab, A. A., El-Gamsy, R., and Abdel-latif, M. H., "A study of some thermal and mechanical properties of HDPE blend with marble and granite dust." Ain Shams Engineering Journal, Vol. 10(2), pp. 353-358, 2019.
16. Halpin, J. C., and Kardos, J. L., "Moduli of crystalline polymers employing composite theory", Journal of Applied Physics, Vol. 43, No.5, pp. 2235-2241, 1972.
17. Halpin, J. C., and Karoos, J. L., "Strength of discontinuous reinforced composites: I. Fiber reinforced composites", Polymer Engineering & Science, Vol. 18, No.6, 496-504, 1978.
18. Kardos, J. L., Raisoni, J., Piccarolo, S., and Halpin, J. C., "Prediction and measurement of the thermal expansion coefficient of crystalline polymers." Polymer Engineering & Science, Vol. 19, No.
19. Nielsen, L. E., "Mechanical properties of particulate-filled systems" Journal of composite materials, Vol. 1, No. 1, pp. 100-119, 1967.
20. Kim, K. C., "High-density polyethylene", Polymer Science and Technology Vol. 4, No. 1, pp. 12-22, 1993.
21. Kim, J. S., Kim, Y. S., and Kim Y. C., "A study on the effect of crystallization behavior and carbon fiber orientation on properties of nylon 66/carbon filler composites" Polymer, Vol. 43, No. 4, pp. 547-552, 2019.