

## 판상형 충전제의 함량과 배향에 따른 PP복합체의 열팽창계수 영향 연구

이용현 · 정선경\* · 황효연 · 이승구\*\* · 이기윤†

충남대학교 고분자공학과, \*자동차부품연구소, \*\*충남대학교 유기소재 · 섬유시스템공학과  
(2011년 8월 22일 접수, 2011년 10월 28일 수정, 2011년 10월 29일 채택)

### Empirical Study on Effects of Disk Shape Filler Content and Orientation on Thermal Expansion Coefficient of PP Composites

Yong Hyun Lee, Sun Kyoung Jeoung\*, Hyo Yeon Hwang, Seung Goo Lee\*\*, and Kee Yoon Lee†

Department of Polymer Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

\*Korea Automotive Technology Institute, Chonan 330-912, Korea

\*\*Department of Advanced Organic Materials & Textile System Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received August 22 2011; Revised October 28, 2011; Accepted October 29, 2011)

**초록:** 두 가지의 종횡비( $\rho_\alpha = a_1/a_3$  and  $\rho_\beta = a_1/a_2$ )에 의해 특징지어진 3차원 타원체( $a_1 > a_2 > a_3$ )를 사용하여 polypropylene 복합체의 판상형 충전제 함량과 배향이 열팽창률에 미치는 영향에 대해 실험적인 연구를 수행하였다. 측정된 실험적인 값은 Lee와 그의 연구자들이 제안한 이론적인 모델에 의한 계산 값과 비교분석되었다. 판상형 충전제로는 운모와 탈크가 사용되었다. 실험 결과로 운모의 경우 종횡비는  $\rho_\alpha = 13.5$ ,  $\rho_\beta = 1.8$ 이 사용되어, 20 wt% 함량일 때  $\alpha_{11}/\alpha_m$ 는 약 0.56으로 감소하였으나,  $\alpha_{33}/\alpha_m$ 는 오히려 1.018로 증가함을 보였다. 탈크의 경우의 종횡비는  $\rho_\alpha = 3.7$ ,  $\rho_\beta = 1.4$ 이었고  $\alpha_{11}/\alpha_m$ 는 0.63으로 감소하였다. 결국 운모와 탈크 모두 그 함량증가에 따라 종단방향과 횡단방향에서 열팽창률은 감소하였으나 수직방향에서는 초기 낮은 충전제 함량에서는 오히려 증가하는 경향을 보였다.

**Abstract:** Experimental study was performed regarding the effects of disc-like filler orientation and contents on the coefficient of thermal expansion (CTE) of polypropylene composites using the three dimensional ellipsoids ( $a_1 > a_2 > a_3$ ) analyzed by two aspect ratios( $\rho_\alpha = a_1/a_3$  and  $\rho_\beta = a_1/a_2$ ). Measured data were compared with the theoretical approaches proposed by Lee *et al.* Mica and talc were used as disk-like fillers in the composites. As experimental results,  $\alpha_{11}/\alpha_m$  decreased down to ca. 0.56 with mica content of 20 wt% and the aspect ratios,  $\rho_\alpha = 13.5$ ,  $\rho_\beta = 1.8$ . However,  $\alpha_{33}/\alpha_m$  increased to more than 1. In the case of talc,  $\alpha_{11}/\alpha_m$  decreased to ca. 0.63 with 20 wt% and  $\rho_\alpha = 3.7$ ,  $\rho_\beta = 1.4$ . Finally, the longitudinal CTEs ( $\alpha_{11}$ ) of polypropylene composites decreased as filler contents increased, but normal CTE ( $\alpha_{33}$ ) increased in the low filler contents like the theory.

**Keywords:** coefficient of thermal expansion, aspect ratio, composite, PP, filler.

## 서 론

고분자 복합체란 고분자의 기지체에 다양한 형태와 물리 화학적 특성을 가지는 충전제를 균일하게 분산시켜 놓은 복합물질이다. 이것은 충전제의 특성뿐만 아니라 그의 형상 및 함량에 따라 복합체 전체의 기계적 물성과 열적 거동에 의해 영향을 받는다. 특히 첨단산업에서의 부품에서는 기계적 강도도 중요하지만 소재의 팽창계수가 제품의 완성도 및 내구성을 보증하기 위해서는 무엇보다 중요한 항목

이다. 모든 물질은 온도의 변화에 따라서 고유한 팽창과 수축특성을 가지며 이를 열팽창(thermal expansion)이라 한다. 이에 대한 구분은 열팽창계수(thermal expansion coefficient)로 나타낸다. 선팽창계수는 고체 열팽창에 따른 길이의 변화의 비율로 온도가 1°C 변화할 때 재료의 단위 길이당 길이의 변화이다. 온도의 상승에 따라 팽창하려는 힘과 고체의 기계적 강도가 저항하는 힘의 균형으로 나타나는 결과이다. 고분자와 충전제의 복합체로서는 두 물질이 접촉하는 정도, 질량, 배향 및 자체 물성에 따라 팽창계수가 달라진다. 이러한 복합체의 열적 물성을 예측하기 위한 이론적인 연구와 실험이 많은 연구자들에 의해 지난 수십 년간 지속적으로 진행되어 왔다.<sup>1-5</sup>

†To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: kylee@cnu.ac.kr

일관성 있게 발전한 이론들은 다음과 같다. 충전제들에 Eshelby 등가전이변형률, Hill에 복합재료의 효율적인 물리적인 특성을 위한 상한과 하한제한, Hill에 응력과 변형률에 놓도 텐서, Mori-Tanaka 평균응력, 많은 실험적이고 수치해석 접근이 배열된 충전제들에 물리적인 특성을 예측하기 위해 제안되었다. 전형적인 예로 간단한 식을 사용하여 복합재료의 물리적인 거동을 표현한 Halpin-Tsai 식이다.<sup>1-5</sup>

복합재료의 이론적 발전과<sup>1-5</sup> 더불어 열적 특성을 예측하기 위해 Schapery는<sup>6</sup> 에너지 고찰에 중점을 둔 열탄성 원리를 사용하였다. Wakashima는<sup>7</sup> 충전된 고분자의 기계적인 특성과 열팽창에 유한함량과 함께 입자 모양의 영향을 고찰하고자 하였고, Chow는<sup>8</sup> 유리섬유 충전제를 포함하는 고분자에서 선형 및 부피 열팽창계수의 중형비(길이/두께)와 충전제의 함량에 따른 열팽창계수의 영향을 보았다.

Eshelby의<sup>1</sup> transformation tensor 이론과 Mori & Tanaka의<sup>3</sup> 평균 이론을 이용하여 이 논문에서는 기본적인 이론을 제시한 Lee and Paul과 그 외 연구자들의<sup>9-11</sup> 복합체의 3차원 해석에 의한 열팽창 현상을 고찰하였다. 등방성 복합재료의 2차원적 열팽창특성을 고찰한 Chow와는 달리 이 논문에서는 Figure 1에서와 같이 2개의 중형비(1차 중형비,  $\rho_\alpha$ 와 2차 중형비,  $\rho_\beta$ )에 의해 특징지어진 판상형에 가까운 충전제를 포함하는 복합체의 열팽창 거동을 이론적인 값과 실험적인 결과값을 비교하였다.<sup>15</sup> 이는 Lee와 그의 연구자들에 의해 이론적인 고찰과<sup>9-11</sup> polypropylene(PP)을 연속상의 기지체로 사용한 실험적인 고찰이 발표되었으며,<sup>12,13</sup> 본 연구에서는 판상 무기 충전제인 운모와 탈크를 사용하여 충전제의 함량과 배향에 따라 열팽창계수가 어떤 영향을 나타내는지에 대해 연구하였다.

## 이 론

복합체에서 기지체의 탄성영률은  $C^m$ 으로 표기하며 타원형의 충전제는  $C^f$ 로 주어진다. 복합체의 응력과 고분자 매트릭스의 응력을 transformation strain tensor의 보정으로 동일하게 아래의 식으로 나타낼 수 있다.<sup>9-12</sup>

$$\bar{\sigma}^m + \bar{\sigma}^f = C^f(\epsilon^m + \xi^m + \xi^f) = C^m(\epsilon^m + \xi^m + \xi^f - \epsilon^t) \quad (1)$$

기지체와 충전제의 변형률 모두가 포함된 복합체의 변형률은  $\bar{\epsilon}$ 으로 나타내며  $\bar{\epsilon}$ 은 volume fraction  $\phi$ 와 transformation strain tensor  $\epsilon^t$ 의 관계식으로 나타내면 식 (2)와 같다.<sup>9-12</sup>

$$\bar{\epsilon} = \epsilon^m + \phi\epsilon^t \quad (2)$$

순전히 온도의 변화에 의해 균질의 동종 기지체에서 외부의 어떤 힘에 의해 열팽창이 발생하며 3가지 방향으로 내부의 변형률을 야기하게 된다면, 세 방향의 변형률과 팽창률은 다음과 같이 동일해야 할 것이다.

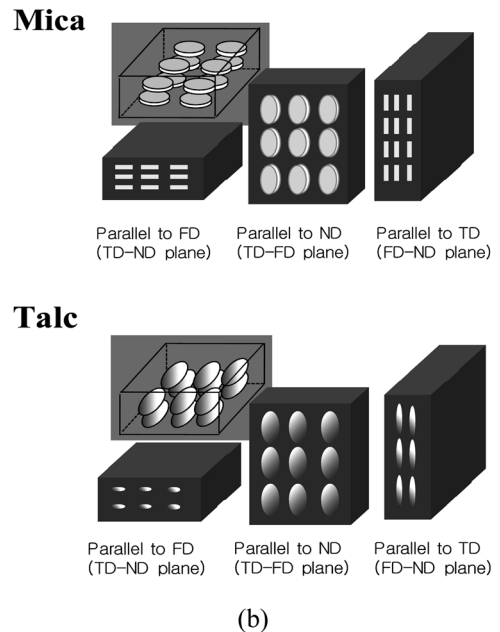
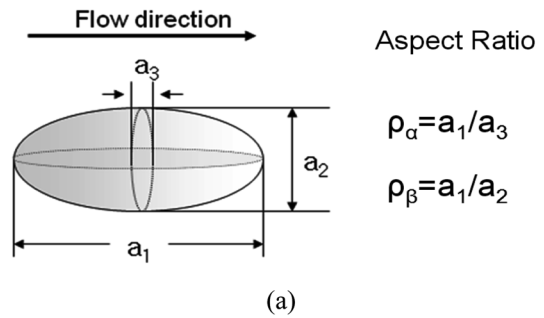


Figure 1. Aspect ratio views of inclusion with the shape of ellipsoid.

$$\epsilon^m = \epsilon_{11}^m = \epsilon_{22}^m = \epsilon_{33}^m$$

$$(\alpha_m)_{11} = (\alpha_m)_{22} = (\alpha_m)_{33} = \alpha_m \quad (3)$$

또한, 열팽창계수에 관한 식은 식 (5)와 식 (6)으로 나타낼 수 있다.<sup>9-12</sup>

$$\frac{\alpha_{ij}}{\alpha^m} = \frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon^m} \quad (4)$$

$$\frac{\alpha_{ij}}{\alpha_m} = 1 + \phi \frac{\epsilon_{ij}^t}{\alpha_m \Delta T \delta_{ij}} = 1 + \phi A_{ij}^t \quad (5)$$

$$A_{ij}^t = \frac{\epsilon_{ij}^t}{\alpha_m \Delta T \delta_{ij}} \quad (6)$$

식에서 변수  $A_{ij}^t$ 는 Eshelby에<sup>1</sup> 의해 얻어진 transformation strain tensor  $\epsilon^t$ 와 대응된다. 식 (6)의 기지체의 열팽창계수  $A_{ij}^t$ 는 식 (1)의 3차원 확장에 의한 행렬식으로부터 결정할

수 있다. 결국 복합체 물질의 열팽창  $\alpha_{ij}$ 는 순수한 기지체로  $\alpha_m$ 의 열팽창 값과 복합체 구성요소의 영률, volume fraction ( $\phi$ )의 형태에 의한 tensor로부터 유도되는 식 (5)로부터 계산할 수 있다. 또한  $\alpha_{ij}$ 는 온도의 변화로부터 복합체의 평균 변형율과 비례적인 것을 식 (4)를 통해서 볼 수 있다.<sup>9,12</sup>

이론식의 유도 과정은 Lee와 그의 연구자들에 의해 2차원과 3차원의 모델의 경우로 나누어 참고문헌 10과 11번에 자세히 서술되어 있다.

### 실 험

이 실험에 사용된 PP는 대한유화공업의 CB5230이었고, 충전제는 Suzorite M200S 운모와 Luzenac에서 만들어진 Jetfine 3CA 탈크를 사용하여 실험하였다. 실험에 사용한 각 물질의 밀도와 열팽창계수 등의 물성을 Table 1에 나타내었다. Figure 1(a)에서는 1차 종횡비  $\rho_\alpha = a_1/a_3$ 와 이차 종횡비  $\rho_\beta = a_1/a_2$ 를 타원형 모델로 하여 그림으로 도식화하였다. 이는 Kim과 연구자들의<sup>12</sup> 영률 논문에 제시된 것과 동일하다.

각각의 충전제와 기지체 PP를 혼합하기 위해 이축 압출기(L/D=40)를 사용하였다. 압출조건은 공급 부에서 압출기 헤드까지 균일하게 50에서 200 °C로 변화시켰다. 다 이 온도는 220 °C로 스크류 회전속도는 300 rpm로 고정하였고 이때의 전체적인 토출량은 약 30 kg/h로 이었다. 시편은 응고된 복합체 pellet을 Engel사 70 ton 직압식 사출기를 사용하여 제작하였다. 사출온도는 200 °C로 하였고 사출압력 및 보압은 40 bar, 사출속도는 40 mm/sec로 설정하였다. 본 실험에서는 압출과 사출의 조건을 일정하게 유지하여 그 변화를 최소화하였다.

시편의 형상 분석을 위해 앞서 발표한 Kim과 연구자들의<sup>12</sup> 영률 논문에서처럼 HVIS(high velocity impact strength) 시편 중앙부분을 취했다. 그 시편들은 흐름방향 즉 flow direction(FD,  $x_1$ 방향), 평면으로는 transverse direction(TD,  $x_2$ 방향)-normal direction(ND,  $x_3$ 방향)으로 표현 가능하다. 횡단방향은 TD와 FD-ND 평면으로, 수직방향은 ND와 FD-TD 평면으로 표현할 수 있다.<sup>14,17,18</sup>

Figure 1(b) 에서는 보는 것과 같이 복합체 내에서 탈크는 2가지 종횡비에 의해 특징지어지고 전체적으로 타원체의 형상이었다. FD방향으로 배열된 것을 확인할 수 있었다. 즉, FD 또는 TD와 평행한 관점에서는 선 모양과 같은 형상

**Table 1. Material Properties of Polymer Matrix and Various Fillers<sup>19-21</sup>**

Materials	Density Kg/m <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	Linear CTE × 10 <sup>-6</sup> (K <sup>-1</sup> )	Poisson's ratio
PP	910(0.91)	105	0.38
Mica	2760(2.76)	8.0	0.25
Talc	2700(2.70)	8.2	0.23

을 ND 관점에서는 타원체 형상을 관찰할 수 있었다. 복합재료 내에서 운모는 탈크와 유사한 형태이나 FD와 TD방향에서 섬유상으로 배열된 관상형태를 확인할 수 있었다. 또한 운모와 탈크는 다른 종횡비를 가짐을 알 수 있었다.

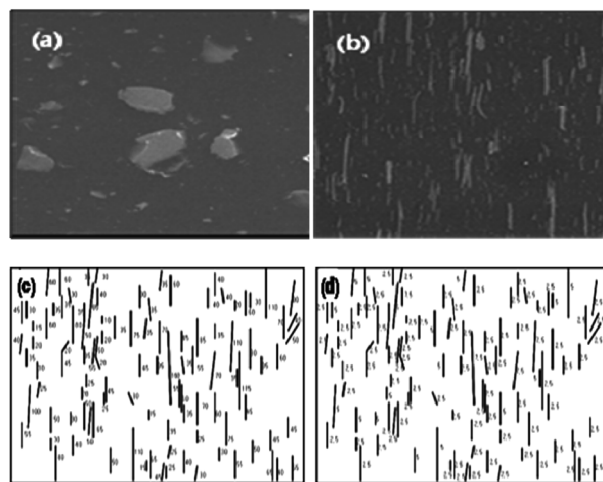
### 결과 및 토론

충전제의 종횡비는 충전제의 형상을 결정하는 가장 중요한 인자로<sup>16</sup> 복합체 물성에 지대한 영향을 주므로 복합체 내에서 충전제의 두께와 길이에 대한 통계적인 분석이 세 방향(FD, TD와 ND)에서 실험적으로 진행되었다. Table 2는 PP/mica, PP/talc 복합체의 충전제 함량에 따른 volume%와 종횡비를 나타낸 것이다.

Figure 2(a)는 ND 방향에 평행한 PP와 운모의 복합체를 SEM 사진으로 나타내었고, 종횡비를 계산하기 위해, FD 방향에 평행한 PP/mica SEM(scanning electron microscopy) 사진(Figure 2(b))을 이용하였다. Figure 2(c)로 충전제의 길이를, Figure 2(d)로 보강제의 두께를 측정하였고 통계

**Table 2. Aspect Ratios of Various Fillers**

Materials	Aspect ratio	Filler content (wt%)				Average
		5	10	20	30	
Mica	Vol%	1.71	3.53	7.62	12.38	
	Primary	14.9	13	15.7	10.3	13.5
	Secondary	1.5	1.7	2.1	2.1	1.8
Talc	Vol%	1.74	3.61	7.77	12.62	
	Primary	3.9	3.4	3.9	3.5	3.7
	Secondary	1.4	1.6	1.3	1.2	1.4



**Figure 2.** Images of SEM for the PP/mica composites parallel to ND (a); parallel to FD (b); schematic illustration of the length(μm) (c); thickness(μm) (d) of filler particles of 10 wt% of mica.

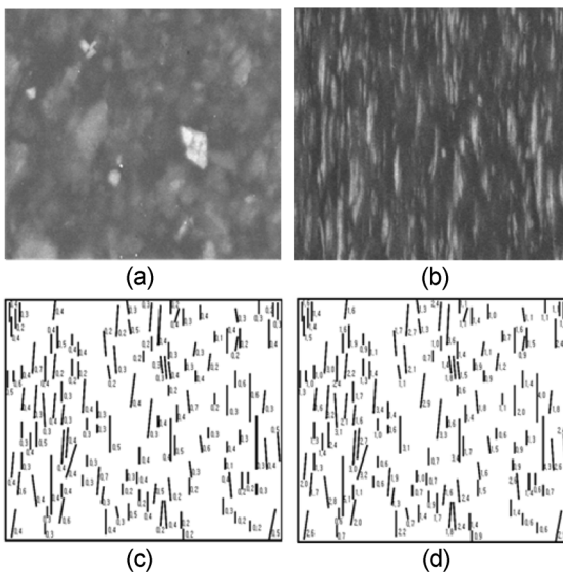
적인 방법에 의해서 수평균, 가중평균, 표준편차를 각각 계산할 수 있었다.<sup>12</sup>

Figure 3(a)에서도 운모의 경우와 같이 PP와 탈크의 복합체 시편사진 중 ND 방향에 평행한 부분을 SEM 사진으로 촬영하여 나타내었고 탈크 충전제가 PP 기지체에 잘 배향되어 있어 3차원의 형상의 탈크 3면 중 판상의 모양을 잘 보여주고 있음을 알 수 있다. 복합체 내에 탈크의 종횡비를 계산하기 위해, FD 방향에 평행한 PP/talc SEM 사진(Figure 3(b) 위에 투명한 비닐 필름을 이용하여 실제 크기를 측정하였다. Figure 3(c)은 충전제의 길이를 표시하며 그렸고, Figure 4(d)는 충전제의 두께를 측정하여 수평균, 가중평균, 표준편차를 각각 계산할 수 있었다.<sup>14</sup>

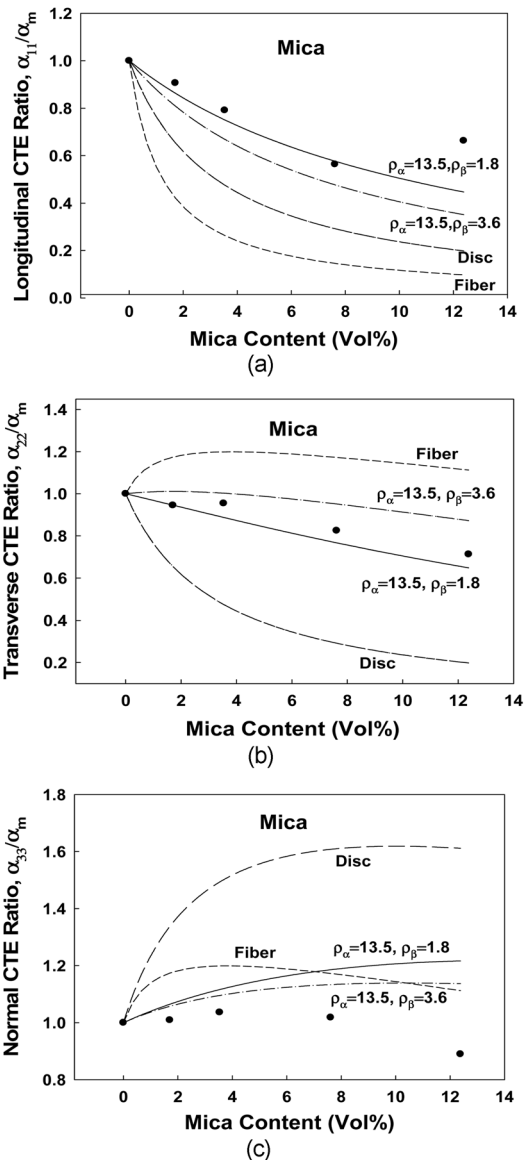
이론적인 모델은 Lee와 Paul이<sup>9</sup> 제시한 것으로 열팽창율에 적용되어 발표된 문헌을<sup>9-11</sup> 토대로 계산되었으며, 3차원의 타원체를 적용하였으므로 충전제의 형상에 의한 효과가 잘 나타난다.

Figure 4는 PP 기지체에 대한 운모가 충전된 복합체의 열팽창계수를 운모 함량에 따른 함수로써 나타낸 그림이다. 운모는 판상이나 2차 종횡비( $\rho_\beta$ )가 1이 아니므로 3차원 해석이 필요했다. 형상분석에 의해 측정된 종횡비가 1차 종횡비는 13.5, 2차 종횡비는 1.8이었다.<sup>14</sup> 이론 모델은 1차 종횡비를 12.5의 공정된 값에 2차 종횡비는 1.8과 3.6을 적용하여<sup>14</sup> 그래프로 나타내었다.

Figure 4(a)는 PP 기지체에 대한 운모가 충전된 복합체의 종단방향(LD) 열팽창계수(longitudinal direction의 열팽창계수와 수지의 열팽창계수의 비율로 표시,  $\alpha_{11}/\alpha_m$ )를 나타내었다. 운모 함량 증가에 따라 운모 20 wt%일 경우에는 약 41%정도 감소하는 경향을 보이며 종횡비가  $\rho_\alpha = 12.5$



**Figure 3.** Images of SEM for the PP/talc composites parallel to ND (a); parallel to FD (b); schematic illustration of the length( $\mu\text{m}$ ) (c); thickness( $\mu\text{m}$ ) (d) of filler particles of 10 wt% of talc.



**Figure 4.** Comparison of longitudinal CTE ratio,  $\alpha_{11}/\alpha_m$ (a); transverse CTE ratio,  $\alpha_{22}/\alpha_m$ (b); normal CTE ratio,  $\alpha_{33}/\alpha_m$ (c) of experimental data with theoretical prediction as a function of the content of mica.

$\rho_\beta = 1.8$ 일 경우가 이론 값과 실험 값이 유사함을 볼 수 있다.

Figure 4(b)는 PP 기지체에 대한 운모가 충전된 복합체의 횡단방향(TD) 열팽창계수(transverse direction의 열팽창계수와 수지 열팽창계수의 비율로 표시,  $\alpha_{22}/\alpha_m$ )를 운모함량 증가에 따라 이론적으로 증가하기도 하지만 종단 열팽창계수보다 좀 더 완만하게 감소함을 나타내고 있다. 또한 판상형상을 갖는 운모의 특성상 2차 종횡비가 1.8로 그 값이 운모 10 wt%일 경우에는 1인 판상에 가까운 실험값을 얻었다.

Figure 4(c)는 PP 기지체에 대한 운모가 충전된 복합체의 수직방향(ND) 열팽창계수(normal direction의 열팽창계

수와 수지 열팽창계수의 비율로 표시,  $\alpha_{33}/\alpha_m$ )를 운모함량에 따른 함수로써 나타낸 그림이다. 운모함량이 증가함에 따라 열팽창률은 증가한 후에 다시 감소하는 경향을 보인다. 운모 함량이 20 wt%일 경우 1.018로 1보다 큰 실험값을 얻었다. 이는 상대적으로 열팽창계수 값이 매우 작은 충전제가 온도의 증가에 따라 팽창하려는 수지를 방해하고 그 팽창을 억제하는데 억제된 팽창은 반대로 이를 보상하기 위해 수직방향으로는 팽창하려는 성질을 나타내기 때문이다. 따라서 복합체의 수직방향 열팽창계수는 오히려 증가하는 경향을 보이며 심지어 기지체 수지의 열팽창계수보다 더 크게 증가하는 현상을 일시적으로 보이는 것이다. 실험값과 이론 값의 차이는 있었으나 기지체인 고분자 연속상의 열팽창률보다 더 증가하는 것을 10과 20 wt%에서 뚜렷이 볼 수 있었다. 일반적으로, 1차 중형비,  $\rho_\alpha$ 의 열팽창률에 대한 영향이 2차 중형비,  $\rho_\beta$ 의 영향보다 크나 그 정도를 무시할 수는 없으므로 3차원의 해석이 필요하다.

Figure 5는 운모 함량에 따른 부피열팽창계수( $\gamma/3\alpha_m$ )를 나타낸 그림이다. 운모 함량증가에 따라 일률적으로 감소하는 경향을 보인다. 또한 부피 열팽창계수는 중단방향과 횡단방향의 감소하는 경향과 수직방향의 증가하는 경향의 합인 선형 열팽창계수이므로 서로 상쇄되어 중형비에 따른 효과는 상대적으로 작은 값으로 나타난다.

Figure 6은 PP 기지체에 대한 탈크가 충전된 복합체의 열팽창계수를 탈크 함량에 따른 함수로써 나타낸 그림이다. 운모와 마찬가지로 관상형태이므로 3차원 해석을 사용하였다. 형상분석을 사용해 측정된 중형비는 1차 중형비는 3.7, 2차 중형비는 1.4이었다. 이론모델에는 1차 중형비를 3.7로 고정하고 2차 중형비를 1.4와 2.8을 적용하여 실험적인 값과 비교하였다. Figure 6(a)는 PP 기지체에 대한 탈크가 충전된 복합체의 중단방향 열팽창계수( $\alpha_{11}/\alpha_m$ )를 나타내었다. 운모와 마찬가지로 함량증가에 따른 감소 경향을 보인다. 이 경우에  $\rho_\beta=1.4$ 와 2.8일 때의 이론 값이 실험에서의 오차범위 안에 있어 실험데이터가 두 조건 분포되어 있음을 볼 수 있었다. 탈크 20 wt%를 함유한 복

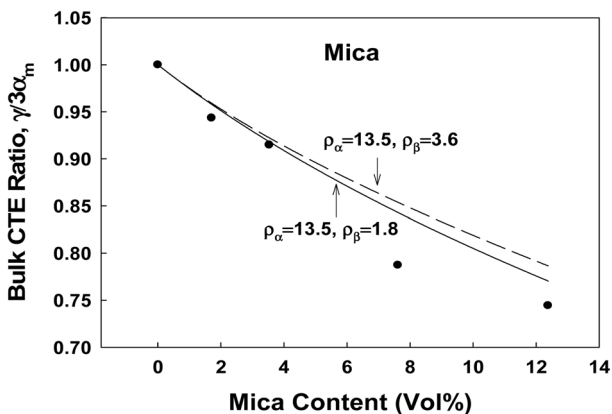


Figure 5. Bulk CTE ratio,  $\gamma/3\alpha_m$  of experimental data with theoretical prediction as a function of the content of mica.

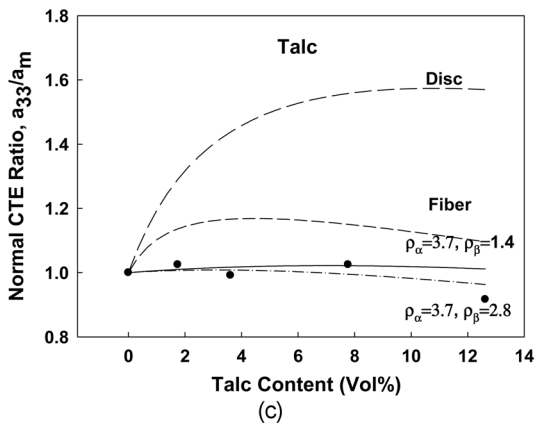
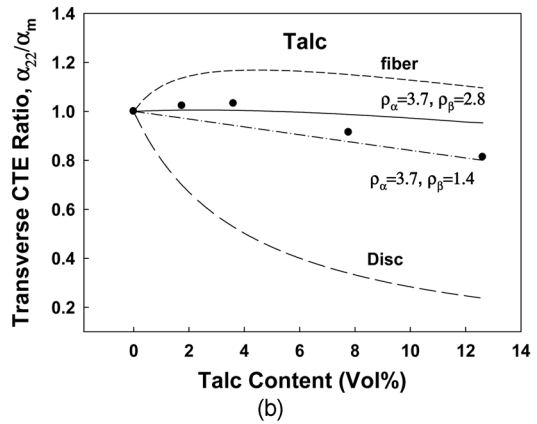
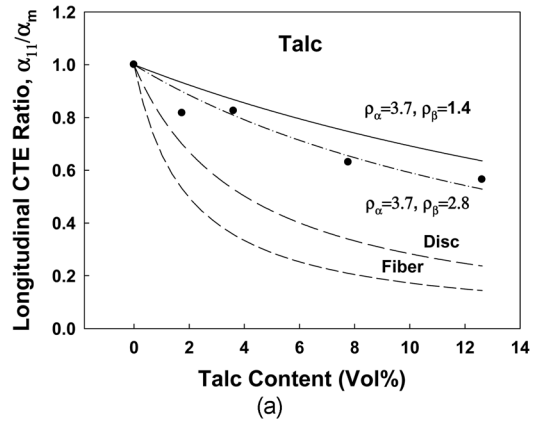
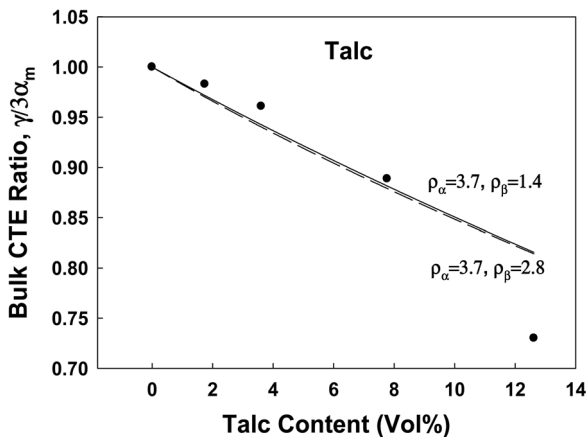


Figure 6. Comparison of longitudinal CTE ratio,  $\alpha_{11}/\alpha_m$ (a); transverse CTE ratio,  $\alpha_{22}/\alpha_m$ (b); normal CTE ratio,  $\alpha_{33}/\alpha_m$ (c) of experimental data with theoretical prediction as a function of the content of talc.

합체의 경우 중단방향 열팽창률은 약 37% 정도 감소하였고 탈크 30 wt%를 함유한 복합체의 경우 중단방향 열팽창계수 비는 약 44%정도 감소하였다. Figure 6(b)는 PP 기지체에 대한 탈크가 충전된 복합체의 충전된 횡단방향 열팽창률( $\alpha_{22}/\alpha_m$ )을 나타낸 그림이다. 중형비 영향으로 중단방향에서 보다 함량에 따른 영향이 적기 때문에 열팽창률이 탈크 30 wt%일 경우에 약 0.81로 좀 더 완만한 감소를



**Figure 7.** Bulk CTE ratio,  $\gamma/3\alpha_m$  of experimental data with theoretical prediction as a function of the content of talc.

보이고 있다. Figure 6(c)는 PP 기지체에 대한 탈크가 충전된 복합체의 수직방향 열팽창계수( $\alpha_{22}/\alpha_m$ )를 탈크 함량에 따른 함수로써 나타낸 그림이다. 탈크 함량이 5와 20 wt%일 경우에는 1보다 큰 값을 보이고 10과 30 wt%일 경우에는 각각 약 0.991, 0.932로 거의 감소하지 않는 경향을 보였다. 이는 운모의 수직방향 경우와 같이 기지체의 높은 열팽창계수 값을 보이다 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만 탈크의 경우 운모보다 실험적인 값과 이론적인 값이 좀 더 일치하는 경향을 보이는데 이는 운모의 크기가 더 크고 거칠기 때문에 기지체의 접촉면과 떨어져 실험적인 값이 이론적인 값보다 떨어졌을 것으로 판단된다.

Figure 7은 탈크 함량증가에 따른 부피열팽창계수( $\gamma/3\alpha_m$ )를 나타내었다. 운모와 같이 탈크 함량증가에 따라 감소하는 경향을 나타내며 실험값이 이론 값과 흡사하다. 탈크의 함량이 20 wt%일 경우에는 열팽창률이 0.88의 값을 갖는다. 이는 실험값이 이론 값과 비슷하다는 것을 잘 보여주고 있다.

## 결론

이 논문에서는 판상형에 충전제를 함유하는 복합체의 열팽창계수를 Lee와 Paul의 3차원 이론적 모델값과 측정된 실험값을 비교 분석하였다. 운모의 경우 판상형상의 타원체로 형상 분석에서 1차 중횡비는 13.5, 2차 중횡비는 1.8의 값으로 측정되었다. 함량증가에 따라 종단방향에서의 열팽창계수의 비는 20 wt%에서 0.56로 감소하는 경향을 나타내었고 수직방향에서는 종단방향에서 억제된 열팽창계수가 수직방향으로는 반대로 보상효과에 의하여 팽창하려는 성질을 나타내기 때문에 낮은 함량에서 일시적으로 증가하여 수직자체의 열팽창률보다 더 큰 값을 갖는 경향을 보였다. 탈크의 경우 운모와 마찬가지로 판상형태의 타원체로 중횡비는 1차 중횡비 3.7, 2차 중횡비 1.4로 측정되었다. 같은

형태를 갖는 특성상 운모의 경우와 같이 종단방향에서 열팽창률은 30 wt%일 경우 약 0.56으로 감소하는 경향을 보였고 횡단방향에서는 20 wt%일 경우에 약 0.91로 감소하는 경향을 나타내었다. 수직방향에서는 탈크 함량이 5와 20 wt%일 경우에 열팽창계수의 비는 1보다 큰 값을 보이고 10과 30 wt%일 경우에는 각각 약 0.991, 0.932로 거의 감소하지 않는 경향을 보였다. 실험장치의 한계 때문에 이론 값과 실험값이 완전히 일치하지는 않았지만 충전제의 함량과 배향성이 열팽창효과에 미치는 효과에 대해 큰 차이를 보여주는 실험결과였다.

## 참고 문헌

1. J. D. Eshelby, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A241**, 376 (1957).
2. R. Hill, *J. Mech. Phys. Solids*, **12**, 199 (1964).
3. T. Mori and K. Tanaka, *Acta Metall.*, **21**, 571 (1963).
4. J. C. Halpin, *Primer on Composite Materials Analysis*, Technomic Pub. Co. Inc., Lancaster, 1992.
5. G. P. Tandon and G. J. Weng, *Polym. Compos.*, **5**, 327 (1984).
6. R. A. Schapery, *J. Compos. Mater.*, **2**, 380 (1968).
7. K. Wakashima, M. Otsuka, and S. Umekawa, *J. Compos. Mater.*, **8**, 391 (1974).
8. T. S. Chow, *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, **16**, 967 (1978).
9. K.Y. Lee and D. R. Paul, *Polymer*, **46**, 9064 (2005).
10. K. Y. Lee, K. H. Kim, S. K. Jeoung, S. I. Ju, J. H. Shim, N. H. Kim, S. G. Lee, S. M. Lee, J. K. Lee, and D. R. Paul, *Polymer*, **48**, 4174 (2007).
11. K. Y. Lee, S. R. Hong, S. K. Jung, N. H. Kim, S. G. Lee, and D. R. Paul, *Polymer*, **49**, 2146 (2008).
12. J. M. Kim, S. K. Jung, J. H. Shim, H. Y. Hwang, and K. Y. Lee, *Polymer(Korea)*, **34**, 346 (2010).
13. H. Y. Hwang, S. K. Jung, J. H. Shim, J. M. Kim, and K. Y. Lee, *Polymer(Korea)*, **34**, 352 (2010).
14. S. B. Seo, Y. H. Lee, S. K. Jung, S. G. Lee, and K. Y. Lee, *Polymer(Korea)*, **36**, 229 (2012).
15. T. Mura, *Micromechanics of Defects in Solids*, 2nd Ed., The Hague, Martinus Nijhoff, p 74 (1987).
16. C. L. Tucker and E. Liang, *Compos. Sci. Technol.*, **59**, 655 (1999).
17. P. J. Yoon, T. D. Fornes, and D. R. Paul, *Polymer*, **43**, 6727 (2002).
18. H. S. Lee, P. D. Fasulo, W. R. Eodgers, and D. R. Paul, *Polymer*, **46**, 11673 (2005).
19. D. V. Howe and J. E. Mark, *Polymer Data Handbook*, Oxford University Press, 1998.
20. G. Mavko, T. Mukerji, and J. Dvorkin, *The Rock Physics Handbook*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
21. J. M. Margolis, *Advanced Thermoset Composites Industrial and Commercial Applications*, Van Nostrand Reinhold Co., NY, 1986.