

디지털 이미지 상관법을 이용한 PPS/GF 복합재의 금형 온도 의존적 변형 및 충격특성 연구

조범곤[†]

Study on Mold Temperature-Dependent Deformation and Impact Behavior of PPS/GF Composites using Digital Image Correlation

Beom-Gon Cho[†]

ABSTRACT: In this study, the impact resistance properties and strain behavior under static compressive load according to the mold temperature (80, 100, 120, 140, and 160°C) of the PPS/GF 65 wt.% composites applied to the housing part of an electric vehicle film capacitor were quantitatively evaluated using 3D digital image correlation analysis (DIC). The Izod impact strength increased by approximately 30% at 160°C compared to 80°C, and the drop-weight impact energy absorption improved by approximately 70% in the range of 80-160°C. The static compression test on each component was conducted by injection molding the component under mold temperature conditions of 120, 130, and 140°C. As a result, the 140°C mold condition showed the highest stiffness, toughness, and energy resistance, with an average maximum load of 28.4 kN and a principal strain of 4.5%. The DIC strain field revealed that strain concentration occurred at the lower left corner of the part during the loading phase prior to fracture initiation. Lower mold temperatures resulted in increased strain deviation and crack propagation variability due to non-uniform heat transfer along the thickness gradient. Accordingly, 140°C was identified as the optimal processing condition for uniform glass fiber orientation, maximizing unit impact resistance and energy absorption.

초 록: 본 연구에서는 전기차 필름 커패시터 하우징 부품에 적용되는 PPS/GF 65 wt.% 복합재를 사출 성형하여, 금형 온도(80, 100, 120, 140, 160°C)에 따른 내충격 특성과 정적 압축 하중 하 변형률 거동을 3D 디지털 이미지 상관분석(DIC)으로 정량 평가하였다. Izod 충격강도는 80°C 대비 160°C에서 약 30% 증가하였고, drop-weight 충격흡수에너지는 80-160°C 구간에서 약 70% 향상되었다. 부품 단위 정적 압축 시험은 120, 130, 140°C 금형 온도 조건으로 부품사출하여 진행하였고, 그 결과, 140°C 금형 조건에서 평균 최대하중 28.4 kN과 주 변형률 4.5%를 나타내며 가장 높은 강성, 인성 및 에너지 저항성을 보였다. DIC 변형률장은 파괴 개시 이전 하중 단계에서 부품 좌측 하단 부에서 변형 집중이 발생하였고, 금형 온도가 낮을수록 두께 구배에 따른 열전달 비균일로 인해 변형률 편차와 크랙 전파 변동성이 증가하였다. 최종적으로 140°C는 유리섬유 배향의 균일화를 유도하여 부품 단위 충격 저항성과 에너지 흡수 능력을 극대화하는 최적 공정 조건으로 확인되었다.

Key Words: 폴리페닐렌설파이드(Poly(phenylene sulfide)), 복합재료(Composites), 필름커패시터(Film capacitor), 금형온도(Mold temperature), 디지털 이미지 상관법(Digital Image Correlation)

1. 서 론

PPS(Poly(phenylene sulfide))는 고온 안정성, 난연성, 전기 절연성, 낮은 흡습성, 화학적 저항성, 치수 안정성을 동시에 충족하는 반결정성 엔지니어링 고분자로서, 전기차 전력전자 하우징 구조 부품에 요구되는 성능 균형을 제공한다[1,2]. 유리섬유 65 wt.%로 강화된 PPS/GF 복합재는 높은 하중 지지 강성과 초기 탄성 저항성을 확보할 수 있으나, 단 섬유 고충전 복합재의 가공 특성상 성형 중 유동 전단에 의해 섬유 토우가 정렬되는 과정에서 배향의 공간적 편차가 발생할 수 있으며, 부품의 비대칭 형상과 두께 구배는 금형 내부 열전달의 시간적·공간적 차이를 유도하여 냉각 속도 구배, 잔류응력장의 불균일성, 결정 성장 시간의 국소적 차이를 동시에 형성한다[3-5]. 이러한 구조 불균일은 외부 충격 인가 시 균열 개시점의 위치적 편차뿐 아니라, 충격 에너지 소산 과정에서 다중 피크 하중 진동성, 매트릭스 미세 파손, 섬유-매트릭스 계면 상의 응력 집중, 섬유 pull-out 및 계면 박리, 그리고 관통 파괴와 같은 복합 파손 모드를 동반하며, 이러한 파손 과정의 에너지 흡수 안정성은 부품의 실제 적용 신뢰성을 좌우하는 핵심 성능 지표가 된다[6-8]. 특히, 높은 GF 비율을 갖는 PPS 복합재는 성형 중 유동 방향을 따라 섬유가 길이 방향으로 정렬되는 경향이 강하지만, 두께 구배가 큰 하우징 부품에서는 상부와 하부, 체결부, 코너부, 게이트 유동 경로 주변에서 섬유 배향 각도와 배향 안정화 시간이 다르게 형성될 수 있고, 이러한 배향 각도 편차는 충격 및 압축 하중 하에서 주 변형률의 방향성과 크랙 전파 에너지 저항성에 직접적인 이방성 기여도를 만든다[9-11]. 또한, PPS는 금형 온도가 높아질수록 표면과 섬유 인접 영역에서 transcrystalline 결정층이 안정적으로 형성될 가능성이 높아지고, 이러한 결정층은 (i) 계면 응력 집중 완화, (ii) 섬유 정렬의 고정 안정화, (iii) 크랙 개시 지연, (iv) 파단 경로의 예측 가능성 증가, (v) 파괴 단계별 에너지 저항성의 균일화에 기여하며, 이는 하우징 부품 수준의 충격-에너지 지지 능력 향상으로 연결된다[12,13]. 그러나 기존 연구 흐름은 이러한 결정 morphology와 섬유 배향, 계면 응력, 좌굴 안정성, 충격 에너지 저항성의 다중 구조 인자 간 직접 상관을 실제 부품 단위에서 동시에 정량 연계 해석하기보다는, 주로 평판 시편 수준의 평균 충격강도나 단일 변수 상관 해석에 머물렀고, 하우징 부품과 같이 형상 비대칭, 노치, 두께 구배, 체결 응력 집중부가 공존하는 구조 부품에서의 3차원 변형률장, Z축 변형 집중, 좌굴 개시, 균열 개시-전파-완전 파단 순서 및 충격 에너지 소산 안정성을 DIC 기반 3D strain field로 직접 mapping하고, 이를 충격-압축 시험과 상호 연계하여 공정창(window)을 제안하는 연구 접근은 매우 제한적이었다[14]. DIC 기반 3차원 변형률 mapping은 시편 내부 구조가 성형 공정 조건에 따라 어떻게 고정되고, 외부 하중 인가 시 구조-에너지 저항성이 어디에서 개

시되고 어떤 경로로 확장되는지를 직접적으로 시각-정량 해석할 수 있는 유효 프레임이지만, PPS/GF 65 wt.% 기반 전력전자 하우징 구조 부품에서 금형 온도 변화가 이러한 3차원 strain field, 좌굴 개시 에너지, 크랙 개시 순서, z-변위 기반 파괴 안정성 및 충격 에너지 소산 재현성에 미치는 영향을 직접 상관 해석하여 실차 적용 가능한 최적 공정창을 제시한 접근은 여전히 기술적 갭으로 남아 있었다.

본 연구는 이러한 갭을 해소하기 위해, PPS/GF 65 wt.% 복합재를 적용한 전기차 필름 커패시터 하우징 부품과 사출 평판 시편을 80-160°C의 금형 온도 조건으로 성형하고, 금형 온도 상승이 Izod 충격강도 향상률, drop-weight 충격 에너지 흡수 및 소산 안정성, 정적 압축 하중 하에서의 최대 하중, strain, z 변위, 좌굴 개시, 균열 개시 위치 및 전파 경로의 예측 가능성, 파단 순서 안정성에 미치는 영향을 DIC 기반 3D strain field mapping과 시편-부품 간 직접 상관 해석을 통해 정량 규명하고, 실제 전기차 전력전자 하우징 구조 설계와 성형 공정 최적화를 동시에 만족할 수 있는 최적 금형 온도 공정창을 제안하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 본 연구는 금형 온도를 단순 냉각 조건 비교가 아닌, 섬유 배향, 계면 응력 균일화, 좌굴 안정화 에너지, 균열 개시 지연 및 경로 재현성, 파괴 단계별 에너지 저항성의 균형 동시 제어 변수로 재해석하고, 실제 부품 단위의 파손 안정성과 충격 에너지 흡수 능력을 예측·설계·검증 가능한 공정 최적화 및 데이터베이스 구축을 목표로 한다.

2. 본 론

2.1 PPS/GF 복합재 제조

본 연구에 사용된 소재는 전기차용 커패시터 하우징 부품에 적용되고 있는 PPS/GF 65 wt.% 컴파운드로, 일본 도쿄에 소재한 Toray Advanced Composites Corporation으로부터 공급받아 사용하였다. 시편은 사출 성형 공정을 통해 평판 형태로 제조하였으며, 가공 중 수지의 충분한 용융과 유동성을 확보하기 위해 배럴 온도를 300°C로 고정하였다. 금형 온도 변화에 따른 PPS/GF 복합재의 내충격 거동을 분석하기 위해 사출 금형 온도를 80, 100, 120, 140 및 160°C 등 다섯 가지 조건으로 설정하였다. 또한, 실험 과정에서 외부 열 손실로 인한 금형 온도 편차를 최소화하고 재현성 있는 성형 조건을 유지하기 위해 단열 플레이트와 정밀 온도 제어 시스템을 금형에 적용하여 금형 온도를 안정적으로 유지하였다.

2.2 PPS/GF 복합재 내충격 거동

PPS/GF 복합소재의 내충격성능을 비교 분석하기 위해 낙하 충격 시험과 아이조드(Izod) 충격 시험을 수행하였다(Fig. 1). Izod 충격테스트는 소재의 인성과 취성에 따른 충격 특성을 측정하는 장비로 ASTM D 256 규격에 따라 QM700L

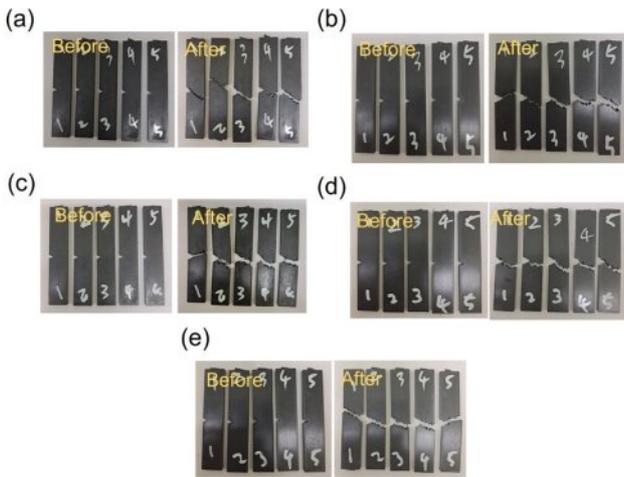


Fig. 1. Fractured specimen photographs after Izod impact test for PPS/GF 65 wt.% composites with different mold temperature: (a) 80°C, (b) 100°C, (c) 120°C, (d) 140°C, and (e) 160°C, respectively

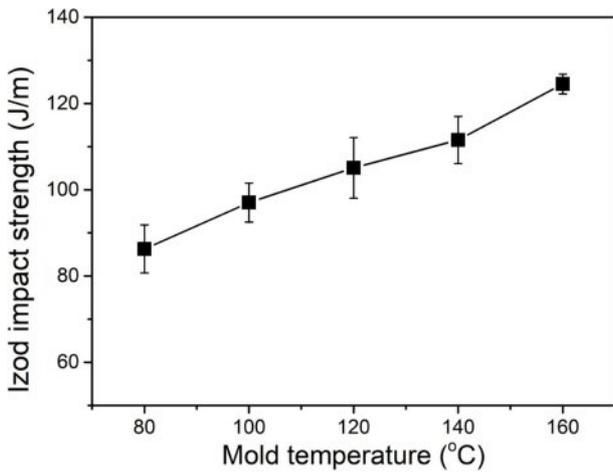


Fig. 2. Izod impact strength of PPS/GF 65 wt.% composites with different molding temperature

(QMESYS, Korea)장비를 활용하여, 130^l hammer 충돌각으로 시험을 진행하였고, 조건 당 7개의 샘플을 측정하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, Izod 충격 강도는 금형 온도가 증가함에 따라 크게 증가하는 경향을 보였다. 80°C의 금형 온도 대비 160°C 조건에서 약 30 % 향상되었음을 확인하였다. Fig. 3에서는 Izod 충격 시험 후의 시편의 파단면을 SEM 이미지로 보여주고 있다. 65% GF case의 파단면의 SEM 분석 결과, 80°C, 100°C의 낮은 사출 조건에서 PPS의 복합재는 냉각시간이 상대적으로 짧아 수지가 냉각되면서 결정화될 수 있는 시간이 상대적으로 짧기 때문에 결정화 구조가 느슨하게 형성되며, 또한 GF 배향성도 낮은 것을 확인할 수 있고 수지 함침 상태가 상대적으로 좋지 않기 때문에 섬유 pull out을 확인할 수 있다. 사출 금형 온도가 증가할 수록 chopped GF의 배향성이 증가하는 것을 확인할 수 있고, 수지 함침

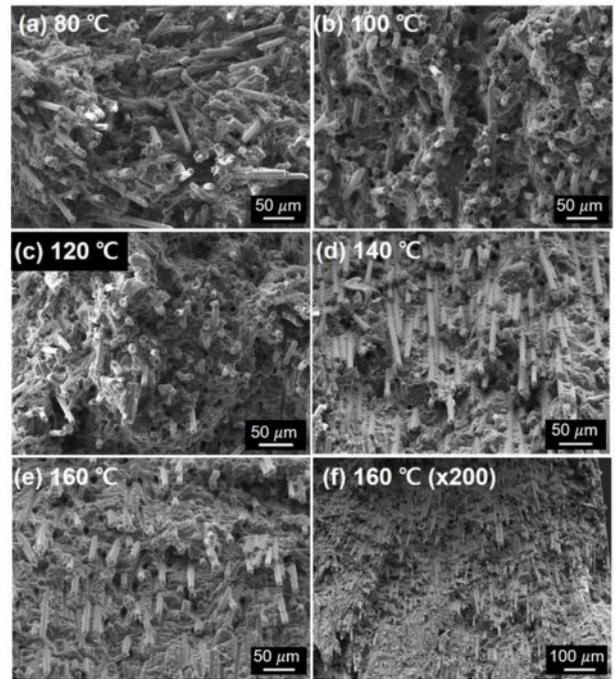


Fig. 3. SEM analysis of the fracture surface after Izod impact of PPS/GF 65 wt.% composites with different mold temperatures; (a) 80°C, (b) 100°C, (c) 120°C, (d) 140°C, (e) 160°C, and (f) 160°C, low magnification (X200)

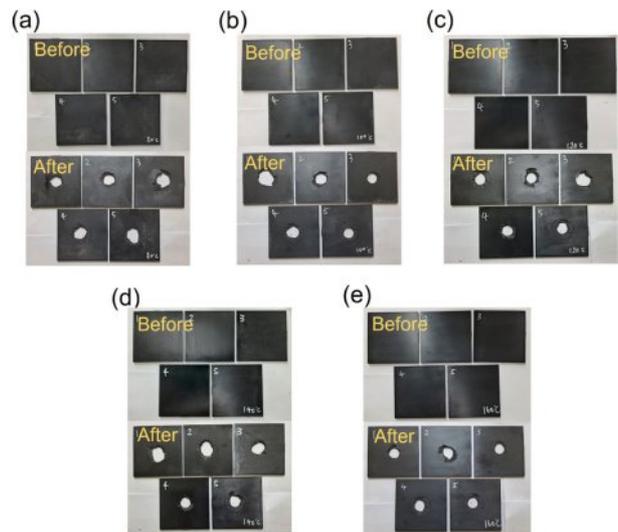


Fig. 4. Fractured specimen photographs after drop impact test for PPS/GF 65 wt.% composites with different mold temperature: (a) 80°C, (b) 100°C, (c) 120°C, (d) 140°C, and (e) 160°C, respectively

상태가 향상되고 PPS의 결정화가 상대적으로 느리게 진행되며 고분자 사슬이 결정화할 수 있는 시간이 충분히 제공되기 때문에 복합재의 물성 증가, 즉 섬유와 수지간 계면 강화에 기여할 수 있다고 판단하였다[15-17]. 특히 160°C 조건의 샘플은 다른 샘플 대비 뛰어난 섬유 배향성을 볼 수 있다.

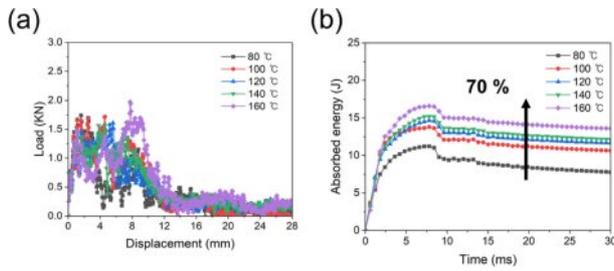


Fig. 5. Impact test results of PPS/GF 65 wt.% composites with different molding temperature after drop impact test; (a) impact load vs. displacement, (b) impact absorption energy vs. time

Table 1. Impact strength after Izod impact test and absorbed impact energy after drop weight impact test of PPS/GF 65 wt.% composites with different mold temperature

Mold temperature (°C)	Impact strength (J/m)	Absorbed energy (J)	Force @break (kN)
80	86.27±5.56	7.92±1.74	1.73±0.06
100	97.04±4.53	10.76±1.18	1.70±0.10
120	105.08±7.03	11.75±0.30	1.64±0.96
140	111.54±5.45	12.24±0.62	1.67±1.01
160	124.54±2.30	13.69±0.73	2.06±0.15

또한 충격에너지 흡수 거동을 비교하고자 낙하 충격 테스트를 진행하였다. ISO 6603 규격에 따라, CEAST 9450 (INSTRON, USA) 장비를 활용하여 80 J의 충격에너지, 5.38 m/s의 충격속도로 시험을 진행하였다. Fig. 4에서 보면, 낙하 충격 결과, 필러보다 매트릭스 영역이 적은 PPS 복합재는 80°C부터 160°C까지 모든 조건에서 강한 취성을 보여주었다. 취성이 강한 복합재 특성으로 관통된 시편의 파단면이 파괴된 것으로 보아 하중 피크가 여러 번 나타날 것으로 예측해볼 수 있다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, drop weight impact test 결과 PPS의 복합재는 모든 케이스의 시편에서 관통이 발생하였으며, 높은 GF 비율에 의한 elastic portion과 PPS matrix와의 계면, matrix 자체의 파손 메커니즘이 복합적으로 작용하면서 fluctuation curve를 확인할 수 있다. 금형 온도가 증가할수록 흡수 에너지가 증가하는 경향을 보였으며, 80°C에서 160°C 조건까지 약 70% 가량 증가하는 것을 확인하였다. 사출 금형 온도가 160°C까지 올라감에 따라 전체적인 에너지 거동이 향상됨을 확인하여 사출 불량 없이 안정적인 PPS 사출을 위해 높은 금형 온도를 선정하는 것이 필요한 것으로 판단되었다.

2.3 PPS/GF 복합재 정적하중 하 변형을 분석

PPS 복합소재 실제 사출물에 적용되는 영향성을 확인하

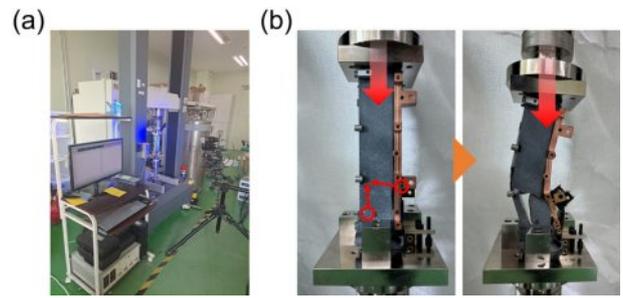


Fig. 6. Strain analysis of a film capacitor housing component with a PPS/GF 65 wt.% composite under static load through DIC: (a) experimental setup, (b) component failure

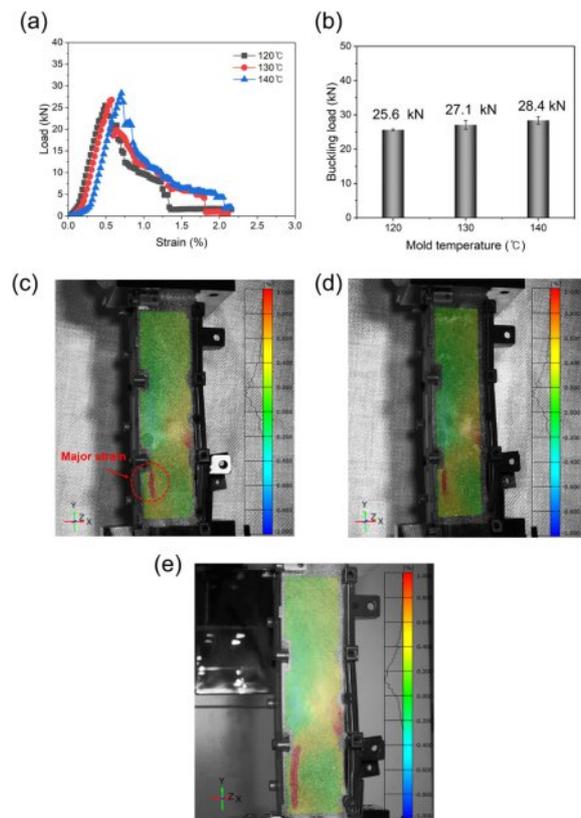


Fig. 7. Digital image correlation (DIC) analysis of strain evolution in film capacitor housing parts with PPS/GF 65 wt.% under static compressive loading: (a) compressive load-strain curves, (b) variation of maximum buckling load with different mold temperatures, and (c-e) full-field strain distribution at mold temperatures of 120, 130, and 140°C, respectively

기 위하여 PPS/GF 65 wt.% 복합소재 적용 필름 커패시터 하우징 부품의 정적하중에 대한 변형을 해석을 위한 압축 시험 및 DIC 분석을 진행하였다. DIC는 미국의 GOM사의 ARAMIS and Pontos 3D 제품을 이용하여, 50 kN load cell, 압축 속도 2 mm/min로 정적하중 하 변형을 분석을 수행하

Table 2. Impact strength after Izod impact test and absorbed impact energy after drop weight impact test of PPS/GF 65 wt.% composites with different mold temperature

Mold temperature (°C)	Maximum load (kN)	Major strain (%)	Z displacement (mm)	Major strain at points (%)
120	25.6±0.24	0.953	-1.751, +1.1278	0.012~0.504
130	27.1±1.28	1.037	-1.748, +1.431	0.057~0.511
140	28.4±1.11	4.515	-1.541, +1.445	0.088~0.584

었다. 부품은 금형온도 조건(120°C, 130°C, 140°C)에 변화를 주어 사출하고 그에 따른 부품의 강성 변화를 확인하였다. 부품 사출의 경우 시편 사출과 달리 부품의 두께 및 구조가 매우 상이하므로 사출 간 냉각 속도 구배가 발생할 수 있다. 압축 하중이 가해지면 buckling이 발생하고 bus bar 체결부, PPS 하단부 순서로 파단이 시작되고, 화살표 진행 방향으로 crack propagation이 일어나 파괴되었다(Fig. 6).

정적하중 분석결과, Fig. 7, Table 2에서 보듯이, 금형온도가 120°C에서 140°C로 증가할수록 최대 하중이 증가하는 경향을 보였으며, 금형온도 140°C 조건에서 성형한 제품의 평균 강도 값이 28.4 kN으로 가장 높은 값을 보였다. 가장 낮은 값을 보인 120°C 조건의 25.6 kN보다 약 11% 향상된 물성값을 보였다. DIC 측정을 통한 변형률 분석 결과, 압축 하중 인가 후 1차 파단이 발생하기 이전의 최대 변형률은 부품 좌측 하단부에서 측정되었으며, 실차에 적용되는 금형 온도인 140°C에서 4.5%의 가장 높은 변형율을 보였고, 그보다 낮은 120°C, 130°C 조건에서 사출된 부품의 경우 약 1%의 변형율을 보였다. 또한 Fig. 8에서 보면, z축 방향으로의 최대 변위의 경우, 빨간 영역이 + 변위 영역, 파란 영역이 - 변위 영역으로 발생하였으며, 금형 온도 120°C에서 -1.751mm, +1.278mm, 130°C에서 -1.748mm, +1.431mm, 140°C에서 -1.541mm, +1.445mm 값을 보였다. 부품에 가해지는 하중에 따른 변형을 관찰하기 위하여 변형이 발생할 것으로 예상되는 x, y 축 16부위를 등간격으로 지정하여 DIC로 1차 파단이 발생하기 이전의 최대 strain 값을 측정하였으며, 각 부위별 strain은 140°C의 금형 온도에서 제조된 부품이 상대적으로 높은 strain (0.088~0.584%)을 보였으며, 최소 strain은 120°C 금형 온도에서 0.012~0.504 %범위에서 분포하고 있는 것을 알 수 있었다. 다만 일부 point에서 금형 온도에 따른 strain 거동이 다른 이유는 사출물의 형상, 두께에 따라 금형의 열전달이 균일하게 일어나지 않아 열 구배가 발생하게 되고 이는 수지가 금형에서 채워지는 시간, 냉각되는 시간의 차이를 만들기 때문이라고 판단된다(Fig. 9)[18-20].

또한 Fig. 10에서는 각 금형 온도에 따른 하우징 부품의 정적하중에 대한 파괴거동을 파단 단계별로 분석한 결과이며, 부품 하단 부부터 크랙이 발생하며, 버스바 체결부 크

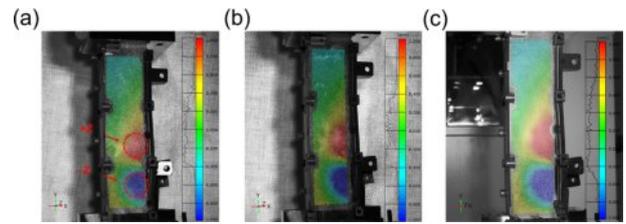


Fig. 8. Changes in z-displacement under static load of PPS/GF 65 wt.% film capacitor housing parts according to mold temperature using DIC analysis: (a) 120°C, (b) 130°C, and (c) 140°C, respectively

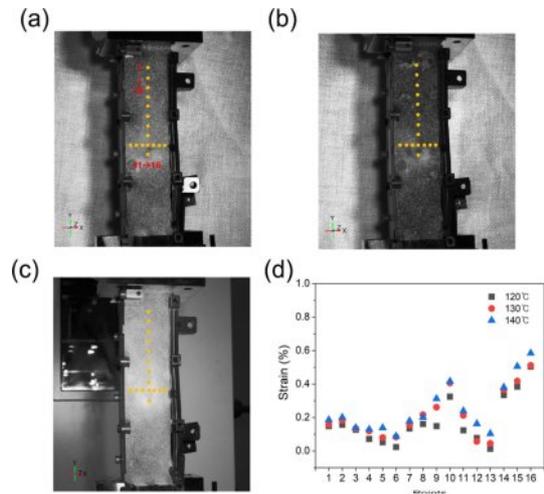


Fig. 9. Full-field major strain distribution measured at equally spaced locations in PPS/GF 65 wt.% film capacitor housing components at maximum compressive load using DIC: (a) 120°C, (b) 130°C, (c) 140°C mold temperatures, and (d) comparison of peak major strain values at each measurement point

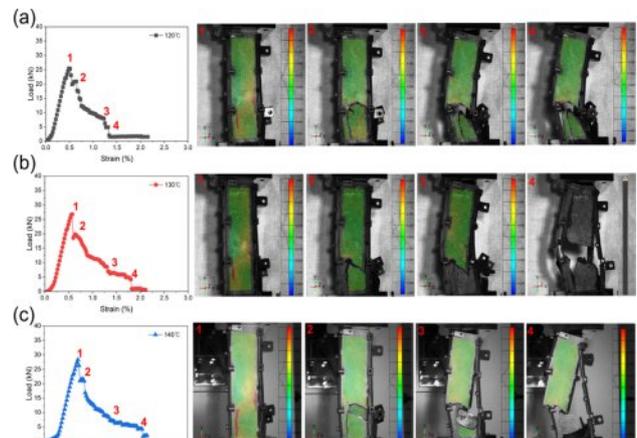


Fig. 10. Progressive failure behavior of film capacitor housing parts with PPS/GF 65 wt.% under static compressive loading analyzed by DIC at different mold temperatures: (a) 120°C, (b) 130°C, and (c) 140°C, respectively

랙과 연결되면서 국부 파단이 완성되고, 이어서 냉각플레이트 체결부가 전체 파단이 발생하게 됨을 알 수 있었다. 결과적으로 금형 온도 변화에 따른 시편 사출물과 부품 사출물 간 유사한 기계적 강도 거동이 확인되었으며, 커패시터하우징 부품 단위 실험을 통해서 실차에 적용되는 140°C의 금형 온도에서 가장 높은 압축하중과 변형율을 보임으로써 높은 toughness와 energy absorption을 가지는 것을 예측할 수 있으며, 이는 PPS/GF 소재 내 금형 온도에 따른 PPS 결정거동과 GF 배향에 따른 결과라고 예측된다.

3. 결 론

본 연구는 PPS/GF 65 wt.% 필름 커패시터 하우징 부품의 금형 온도에 따른 충격 및 압축 파손 거동을 3D DIC 변형률장과 충격시험으로 정량 연계 해석하였다. 금형 온도의 상승에 따라 Izod 충격강도는 약 30%, drop-weight 충격흡수에너지는 약 70% 향상되었다. 정적 압축 하중에서는 140°C 조건이 평균 최대하중 28.4 kN과 가장 안정적인 좌굴 및 균열 전파 거동을 나타내며 충격 에너지 균형이 최적화된 사출 조건으로 확인되었다. 두께 구배에 의한 열전달 불균일은 저온 금형 조건에서 변형을 편차와 크랙 경로 변동성을 증가시켰으나, 140°C에서는 충분한 결정 성장 시간과 균일 섬유 배향 고정, 계면 응력 완화가 동반되어 부품 단위 충격 에너지 저항성과 파괴 안정성이 극대화되었다. 본 결과는 금형 온도가 내부 구조 형성 시간, 배향 고정, 계면 응력 균일화, 좌굴 개시 에너지, 균열 개시·전파 안정성을 동시에 지배하는 성형 인자임을 입증하며, 140°C를 실제 하우징 부품 적용에 적합한 최적 금형 온도로 제안한다.

후 기

본 연구는 국립금공과대학교 대학 연구과제비(2024~2025)와 2025년도 교육부 및 경상북도의 재원으로 경북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)-지역성장 혁신LAB의 결과입니다.(2025-rise-15-105)

REFERENCES

- Choi, M.S., Lee, J.R., Ryu, S.W., and Ku, B.C., "Fabrication and Application of Polyphenylene Sulfide(PPS) Composites: A Short Review," *Composites Research*, Vol. 33, No. 3, 2020, pp. 91-100.
- Heo, K.Y., Park, S.M., Lee, E.S., Kim, M.S., Sim, J.H., and Bae, J.S., "A Study on Properties of the Glass Fiber Reinforced PPS Composites for Automotive Headlight Source Module," *Composites Research*, Vol. 29, No. 5, 2016, pp. 293-298.
- Kulhan, T., Kamboj, A., Gupta, N.K., and Somani, N., "Fabrication Methods of Glass Fibre Composites: A Review," *Functional Composites and Structures*, Vol. 4, No. 2, 2022, pp. 022001.
- Isaincu, A., Micota, M., and Mardavina, L., "On the fracture toughness of PPS and PPA reinforced with Glass Fiber," *Procedia Structure Integrity*, Vol. 41, 2022, pp. 646-655.
- Barbosa, L.C.M., de Souza, S.D.B., Botelho, E.C., Cândido, G.M., and Rezende, M.C., "Fractographic Evaluation of Welded Joints of PPS/Glass Fiber Thermoplastic Composites," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 102, 2019, pp. 60-68.
- Hong, C.Y., Kim, J.A., Kim, G.C., and Ji, W.S., "Effect of Stacking Sequence on Impact Resistance Performance of Hybrid Composites Laminated with Continuous and Discontinuous Fiber-Reinforced Layers," *Functional Composites and Structures*, Vol. 3, No. 2, 2021, pp. 02LT01.
- Mulla, M.H., Norizan, M.N., Abdullah, C.K., Rawi, N.F.M., Kassim, M.H.M., Abdullah, N., Norrahim, M.N.F., and Elahi, M.S.M., "Low Velocity Impact Performance of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites: A Review," *Functional Composites and Structures*, Vol. 5, No. 3, 2023, pp. 035004.
- Saleh, M., Tooski, M.Y., Khorshidvand, A.R., and Javadi, M., "Experimental Study of the Effect of Carbon Nanotubes and Nano-silica on the Impact Resistance of FML Sheets Under Low Velocity Impact," *Functional Composites and Structures*, Vol. 7, No. 3, 2025, pp. 035001.
- Solfiti, E., Solberg, K., Gagani, A., Landi, L., and Berto, F., "Static and Fatigue Behavior of Injection Molded Short-fiber Reinforced PPS Composites: Fiber Content and High Temperature Effects," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 126, 2021, pp. 105429.
- Oshima, S., Higuchi, R., Kato, M., Minakuchi, S., Yokozeki, T., and Aoki, T., "Cooling Rate-dependent Mechanical Properties of Polyphenylene Sulfide (PPS) and Carbon Fiber Reinforced PPS (CF/PPS)," *Composites Part A*, Vol. 164, 2023, pp. 107250.
- Vieille, B., Ernault, E., Delpouve, N., Gonzalez, J.P., Esposito, A., Dargent, E., Le Pluart, L., and Delbreilh, L., "On the Improvement of Thermo-mechanical Behavior of Carbon/polyphenylene Sulfide Laminated Composites Upon Annealing at high Temperature," *Composites Part B*, Vol. 216, 2021, pp. 108858.
- Jeong, D.Y., Jung, C.G., Lee, J.Y., Kim, S.H., Lee, P.C., Lee, H.W., and Ha, J.U., "Comparison of Polyphenylene Sulfide Composites Having Different Processing Temperatures and Glass Fibers," *Elastomers Composites*, Vol. 54, 2019, pp. 308-312.
- Hong, S.H., and Cho, B.G., "Effect of Cooling Temperature on Crystalline Behavior of Polyphenylene Sulfide/Glass Fiber Composites," *Polymers*, Vol. 15, No. 15, 2023, pp. 3179.
- Lee, S.Y., and Ji, W.S., "Digital-image-based Analysis of Fiber-Reinforced Composites: A Review," *Functional Composites and Structures*, Vol. 7, No. 2, 2025, pp. 022003.
- Batista, N.L., Rezende, M.C., and Botelho, E.C., "Effect of Crystallinity on CF/PPS Performance under Weather Exposure: Moisture, Salt Fog and UV Radiation," *Polymer Degradation Stability*, Vol. 153, 2018, pp. 255-261.
- Lee, M.P., Kim, Y.C., and Choe, C.R., "Crystallization Behavior of Polyphenylene Sulfide (PPS) and PPS/carbon Fiber Composites," *Polymer Bulletin*, Vol. 30, 1993, pp. 469-475.
- Liu, P., Dinwiddie, R.B., Keum, J.K., Vasudevan, R.K., Jesse, S.,

- Nguyen, N.A., Lindahl, J.M., and Kunc, V., "Rheology, Crystal Structure, and Nanomechanical Properties in Large-scale Additive Manufacturing of Polyphenylene Sulfide/carbon Fiber Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 168, 2018, pp. 263-271.
18. Shadmehri, F., and Hoa, S.V., "Digital Image Correlation Applications in Composite Automated Manufacturing, Inspection, and Testing," *Applied Science*, Vol. 9, 2019, pp. 2719.
 19. Holmes, J., Sommacal, S., Das, R., Stachurski, Z., and Compton, P., "Digital Image and Volume Correlation for Deformation and Damage Characterisation of Fibre-Reinforced Composites: A Review," *Composites Structures*, Vol. 315, 2023, pp. 116994.
 20. Tekieli, M., Santis, S.D., Felice, G.D., Kwiecien, A., Roscini, F., "Application of Digital Image Correlation to Composite Reinforcements Testing," *Composites Structures*, Vol. 160, 2017, pp. 670-688.