



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2023년 2월
석사학위 논문

섬유강화 고분자 복합 재료의
사출성형시 금형 형상에 따른
고온 크립 특성

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 유 정

섬유강화 고분자 복합 재료의
사출성형시 금형 형상에 따른
고온 크립 특성

High-temperature creep characteristics according to
mold shape during injection molding of fiber
reinforced polymer composites

2023년 2월 24일

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

김 유 정

섬유강화 고분자 복합 재료의 사출성형시 금형 형상에 따른 고온 크립 특성

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 유 정

김유정의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 조 교 수 손윤철 (인)

위 원 조선대학교 교 수 방희선 (인)

위 원 조선대학교 조 교 수 박철호 (인)

2022년 12월

조선대학교 대학원

목차

List of Figures	III
List of Tables	III
Abstract	V
제1장 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 국내외 기술 동향	3
1.3 이론적 배경	5
1.3.1. 재료	5
1.3.2. 고온 크립	6
1.3.3. 사출성형 공정	12
제2장 연구 방법	13
2.1 사출성형 해석 조건 및 방법	13
2.2 고온 크립의 점탄성 효과 반영	13
2.3 기하학적 형상에 따른 해석	17
2.4 리브 배치에 따른 해석	20

제3장 연구 결과 및 고찰	22
3.1 고온 크립의 점탄성 효과 검증	22
3.2 기하학적 형상에 따른 특성	24
3.2.1. 섬유 배향 텐서	24
3.2.2. 잔류응력	26
3.3 리브 배치에 따른 특성	27
3.3.1. 섬유 배향 텐서	27
3.3.2. 잔류응력	31
 제4장 결론	 34
 참고문헌	 35

List of Figures

Fig. 1.1	Heat equation graph of CTS P6635	5
Fig. 1.2	Strain variation with time by creep compliance phenomenon ..	7
Fig. 1.3	Stress-strain curve of basic direction, (a) primary, (b) secondary, (c) shear stress-strain curve for primary and secondary basic directions	8
Fig. 1.4	Semi crystalline polymer and Stiffness - temperature for semi crystalline polymer	9
Fig. 1.5	Analysis of stress by thermal load for transversely isotropic material	10
Fig. 1.6	Stress-strain curve with temperature for primary and secondary of the CTS P6635	11
Fig. 2.1	Compliance matrix of transversely isotropic material	15
Fig. 2.2	Stiffness matrix of transversely isotropic material	15
Fig. 2.3	Reduced stiffness of orthotropic material	16
Fig. 2.4	Graph of the equation of state for CTS P6635	17
Fig. 2.5	Placement of the ribs parallel to flow direction	21
Fig. 2.6	Placement of the ribs perpendicular to flow direction	21
Fig. 2.7	Placement of the ribs parallel and perpendicular to flow direction	21
Fig. 3.1	Deformation distribution of the product with Elastic modulus and Shear modulus	23
Fig. 3.2	Average fiber orientation tensor outside the products with different geometries	25
Fig. 3.3	Average fiber orientation tensor inside the products with different geometries	25
Fig. 3.4	Mises-hencky stress inside the products with different geometries	26

Fig. 3.5 Fiber orientation tensor for rib arrangement parallel to flow direction 27
 Fig. 3.6 Deformation caused by orientation effect for rib arrangement parallel to flow direction ; in view of A direction 28
 Fig. 3.7 Fiber orientation tensor for rib arrangement perpendicular to flow direction 28
 Fig. 3.8 Deformation caused by orientation effect for rib arrangement perpendicular to flow direction ; in view of A direction 29
 Fig. 3.9 Fiber orientation tensor for rib arrangement parallel and perpendicular to flow direction 29
 Fig. 3.10 Fill time contour line for rib arrangement parallel and perpendicular to flow direction 30
 Fig. 3.11 Deformation caused by orientation effect for rib arrangement parallel and perpendicular to flow direction ; in view of A direction 30
 Fig. 3.12 Mises-Hencky stress for rib placement parallel to flow direction 32
 Fig. 3.13 Mises-Hencky stress for rib placement perpendicular to flow direction 32
 Fig. 3.14 Mises-Hencky stress for rib placement parallel and perpendicular to flow direction 33

List of Tables

Table. 1.1 Mechanical properties of CTS P66335	6
Table. 2.1 Comparison of products A and B of the same function with different geometries	19

ABSTRACT

High-temperature creep characteristics according to mold shape during injection molding of fiber reinforced polymer composites

Kim Yu Jung

Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D.

Department of Welding and Joining
Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

These days, field of polymer composite materials application expanded. So, high-level deformation compensation measures were developed. However, there is a problem of high-temperature viscoelasticity that occurs over time after completion of the injection molding process.

In this study, changing the mechanical properties of the Moldflow program for injection molding analysis for verify the viscoelasticity phenomenon through deformation analysis. In addition, the deformation analysis of plastic injection molded products according to the

arrangement of three ribs and two products with different geometric shapes of the same function was compared.

As a result, it was possible to reflect the viscoelastic effect by reducing the Young's modulus and shear modulus of the material data. It was confirmed that the geometric shape with thick ribs formed in multiple longitudinal directions was a problem. On the surface of the product where the rib arrangement was parallel and perpendicular to the flow direction, the orientation was orthogonal to the linear direction, and the maximum residual stress was 81.17MPa, the largest value. In this case, it was judged that viscoelastic phenomena were predicted, and the arrangement of parallel and perpendicular ribs intersect should be avoided.

제 1 장. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

고분자 복합재료는 과거 주로 항공, 스포츠카, 카누 등 고강도 경량 소재가 요구되는 분야에 비교적 단순한 형상의 제품에 대해 다품종 소량생산 방식으로 적용되어 왔다. 최근에는 사출성형 공법을 통해서 복잡한 형태의 제품을 대량생산 하는 방식으로 기존 다이 캐스팅 공법 등으로 생산되던 제품을 대체하며 그 적용 분야가 확대되고 있다. 그중에서도 섬유 강화 플라스틱(Fiber Reinforced Plastics : FRP)은 높은 비강도와 비탄성을 갖는 장점이 있어 여러 산업 분야에서 널리 응용되고 있다.[1-5]

이러한 고분자 복합재료 적용 분야의 확대로 인해 제품에 대한 다양한 강도, 성능, 기능적 조건들이 새롭게 요구되었다. 예를 들어 기계적 강도, 내구성, 사용온도 범위, 소음 성능 등 다양한 특성이 요구되었으며, 그중 특히 사출성형제품에 대한 정밀 기하 공차 요구는 제품 내 수축 편차 발생이 불가피한 사출성형 공법 특성상 기술적 어려움이 매우 많은 과제이다.

이러한 환경에서 지난 수년간 CAE, Morphing, Reverse engineering 기술 등을 활용한 높은 수준의 변형 보완 대책들이 개발되었다.

최근의 변형 보완 업무 flow는, 먼저 CAE software를 활용하여 변형 최소화를 위한 gate 선정 및 racetrack effect 등을 이용한 제품 수정 방안을 도출한다. 기능 부위에 대한 변형을 computer simulation을 통해 최소화하고, 이를 통한 변형 해석 결과의 inverse warpage data로부터, 기능 부위에 대한 역 변형 데이터를 금형에 적용한다. 이로부터 생산된 제품을 3차원 측정기에서 가능한 모든 측정 부위를 동일한 set-up 상태에서 동시 측정하여, 측정 data와 modeling data를 reverse engineering 기술을 이용 최적 조건에서 data fitting을 수행한다. 이후 필요 부분에 대해 morphing 기술을 활용해 modeling data를 추가 수정하여 금형을 미세

조정하는 작업을 반복하는 일련의 복잡한 과정을 통해 기하 공차를 만족시키고 있다.[6,7]

이러한 현실에서 사출성형 공정 완료 후에 상온에서 냉각 중인 제품에서 변형 해석 결과와 달리 매우 큰 변형이 시간이 경과함에 따라 나타나는 경우가 있다. 이는 고온 점탄성 효과에 의한 것으로 판단되며, 이 경우 앞서 언급한 warpage 보완 대책에 중대한 차질을 초래하기도 한다.

일반적인 수지로 사출할 경우 CAE S/W로 해석한 변형 결과는 실제와 거의 일치하나, 유리섬유나 탄소섬유가 보강된 수지의 경우에는 유동 과정에서 수지의 흐름 방향으로 섬유들이 많이 배향된다. 섬유의 배향은 수축과 재료의 물성 측면에서 이방성이 나타나 성형된 제품의 기계적 성질이나 특성 등에 큰 영향을 미친다. 이와 같이 섬유강화 고분자 복합재료 내에서의 섬유배향 상태가 강도, 강성등의 역학적 특성에 큰 영향을 끼친다는 것은 널리 알려져 있다.[8,9]

정확한 해석을 위해서는 소성 영역이 고려된 온도 별 stress-strain data는 물론 시간에 따른 점탄성 변형이 고려되어야 하나, 재료 data 확보 등 현실적인 문제로 Moldflow에서는 이방성 재료의 선형 정적 해석을 통하여 변형해석을 수행하고 있다.[10]

따라서, 이러한 고온 점탄성 현상을 고려한 변형해석을 체계적으로 고찰하고자 한다.

1.2 국내외 기술 동향

섬유강화 고분자 복합재료는 수지 단일체에 비하여 비강성 비강도 내열성 등의 기계적 강도와 생산성이 뛰어나기 때문에, 고강도 제품의 정밀성 및 경량화가 요구되는 자동차나 기타 산업용 부품 등의 구조부재로 널리 이용되고 있다.

섬유강화 플라스틱의 기계적 물성은 섬유의 양, 종횡비, 분산, 배향 등에 영향을 받는다. 특히, 매트릭스 내의 섬유의 배향성은 이를 향상시키는 중요한 요소로 작용하여, 현재까지도 가공 중 섬유의 배향 상태를 예측하기 위한 이론적, 실험적 연구뿐만 아니라 다양한 가공 방법이 제시되고 있다.

사출성형의 충전 과정에서 용융 상태의 수지가 금형 내부로 사출되는 동안에 금형과 고온의 수지가 접촉함에 따라 냉각되는 비정상 상태의 유동이 이루어진다. 이때 분수 유동과 분자 배향이 이루어지고, 높은 성형 압력이 밀도의 변화에 주도적으로 기여하며, 마지막까지 성형품이 일정하지 않은 수축을 하게 된다. 이는 성형품에 변형을 유발하는 원인이 된다. 즉, 불균일한 냉각온도, 불균일한 분자의 정렬 상태, 잔류응력 등의 요인으로 인하여 사출품은 성형품은 원래의 모양과 비교하여 뒤틀린 형태를 가지게 되는데 이것을 휨(Warpage)이라고 한다.

성형공정에 있어 이러한 요인들을 고찰한 예로써 KamaI과 Kenig[14]는 최초로 보압과정에 대한 수학적 해석을 시도하였으며, Wang[15]등은 보압 및 냉각 과정을 함께 다룰 수 있는 후 충전 과정에 대한 모델을 유도하여, 전단률, 온도 및 압력이 점성에 미치는 영향에 관한 연구를 통하여 수정된 Cross모델을 제시하였다. Kikuchi와 Koyama[16,17]는 사출품에 대하여 뒤틀림, 이방성, 제품 두께 사이에서의 관계에 대하여 수치적으로 연구를 하였으며, Dupret[18]등은 사출성형시, 충전 동안의 이방성 효과를 수치적으로 나타내었다. Yu[19]등은 사출품과 그 금형 사이에서의 열접촉 저항을 얻기 위한 방법을 설명하였으며 Chang[20]등은 사출품의 수축, 변형률과 Sink Marks에 대한 실험 및 이론적인 해석을 하였다.[13]

또한, 임순호[22]는 고성능 열가소성 플라스틱을 사용하여 제조된 열가소성 플라스틱 복합재료의 물성 및 특성에 대하여 연구하였으며, 신익재[23]등은 패브릭 형태의 유리섬유를 이용한 열가소성수지 복합재료의 성형성에 대한 연구를 하여 섬유 배향 각도에 따른 복합소재의 강도에 대하여 평가하였다. 김진우[24]등은 섬유배향상태의 적도인 섬유배향함수를 이론적으로 계산하여 섬유배향 시 변화를 주고, 섬유함유량을 변화시켜 복합재료를 제작한 후 섬유강화 열가소성수지 복합재료의 섬유함유율과 섬유배향이 인장강도에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 연구하였다.[21]

사출성형 시 발생하는 잔류응력과 사출성형 후 제품의 휨을 예측하는 연구는 많이 시도되고 실제 설계상에 적용이 많이 되고 있다. 하지만 제품 성형 후의 변형과 내/냉열 시험에 대한 제품의 변형은 연구가 진행되고 있으나, 충분한 재료 data를 확보하는 데 어려움이 있으므로 정확한 예측이 불가하여 실제 제품 설계에 있어 크게 적용 되지 못하고 있는 실정이다.[11]

이에 대해 사출성형 후의 변형 특성을 반영한 체계적인 연구가 요구된다.

1.3 이론적 배경

1.3.1. 재료

본 연구에서 사용된 소재는 MSC사의 Poweron CTS P6635이며, 모재는 폴리프로필렌(polypropylene : 이하 PP라 약칭한다.)이고, 강화제는 유리섬유이며, 섬유함유율은 35%이다.

상기 재료의 추천되는 성형 온도 조건은 금형온도 95℃, 제품 이형 온도 206℃ 이므로 Fig. 1.1 CTS P6635의 Heat equation 그래프의 5.767초에서의 플롯이 제품 이형 시 제품 두께에 대한 온도 분포를 나타낸다고 볼 수 있다.

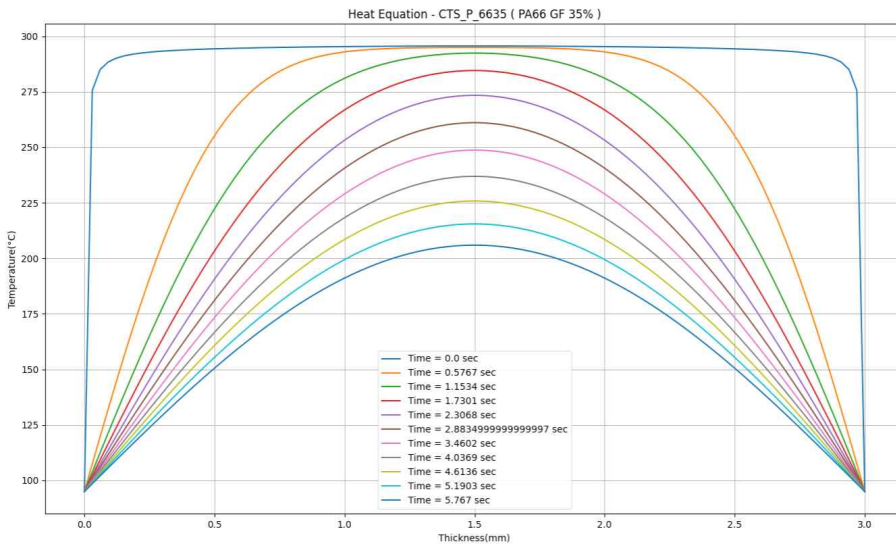


Fig. 1.1 Heat equation graph of CTS P6635

이 재료의 용융점은 220℃이고, 유리전이온도는 50℃이다. 재료의 기계적 물성은 Table.1.1에 나타내었다.

Table. 1.1 Mechanical properties

Elastic modulus, 1st principal direction	9120 MPa
Elastic modulus, 2nd principal direction	6870 MPa
Poisson' s ratio (v12)	0.4
Poisson' s ratio(v23)	0.71
Shear modulus (G12)	2750 MPa

1.3.2. 고온 크립

사출성형공정 완료 후에 시간이 경과함에 따라 변형이 크게 발생하는데, 이는 고분자 재료의 대표적 특성인 시간에 따른 점탄성 효과(creep compliance)가 나타난 것이다.

플라스틱은 일정한 하중(인장 또는 전단)을 가했을 때, 바로 탄성변형을 일으키고, 하중을 계속 유지하면 점탄성 변형이 시간에 따라 증가하게 된다. 이후 하중을 제거하면, 플라스틱은 바로 탄성 회복을 하고, 서서히 점탄성 회복을 하게 되는데 이러한 현상을 creep compliance 라 한다.[9,10]

Fig. 1.2은 일정한 stress를 받는 플라스틱 재료의 creep compliance 현상의 시간이 경과함에 따른 strain 변형률을 나타낸 것이다.

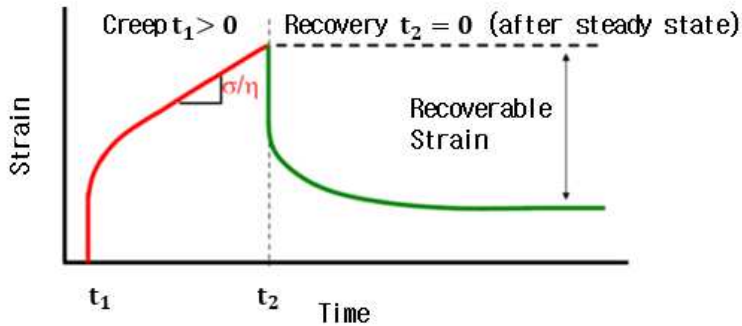
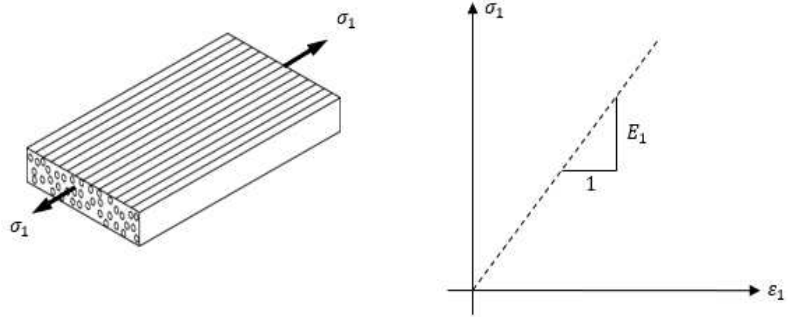
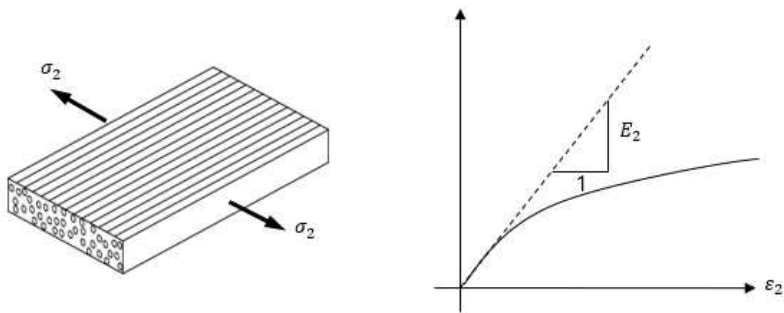


Fig. 1.2 Strain variation with time by creep compliance phenomenon

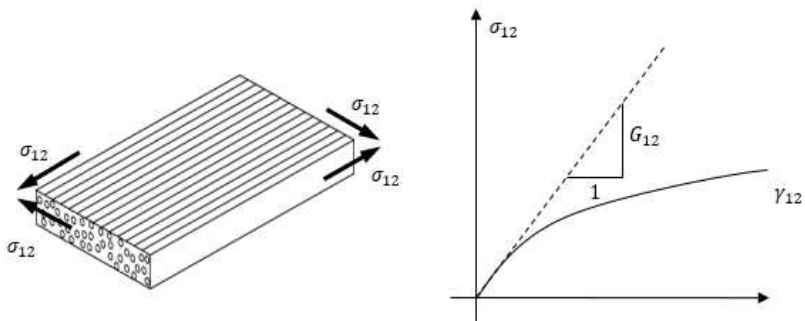
이러한 크립 현상에 영향을 주는 주요 인자는 재질, 온도, 하중이다. 일반적으로 고분자 복합재료의 기계적 성질은 transversely isotropic material로 나타낼 수 있다. Fig. 1.3(a)는 섬유 강화제의 배향 방향인 1차 기본방향에 대한 stress-strain curve이고, Fig. 1.3(b)는 섬유 강화제의 배향 방향에 수직인 2차 기본방향에 대한 stress-strain curve이며, Fig. 1.3(c)는 1,2차 기본방향에 대한 shear stress-strain curve를 나타낸다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1.3 (a) Stress-strain curves for the 1st principal direction (b) Stress-strain curves for the 2nd principal direction (c) Shear stress-strain curves for the 1st and 2nd principal directions

현상 분석 결과 결정형 수지의 경우 유리전이온도 이하에서는 Fig. 1.4(b)와 같이 강성이 커져 점탄성 효과가 거의 발생하지 않는다고 볼 수 있지만, 용융점과 유리전이온도 사이에서는 Fig. 1.4(a)의 점선 표시 부 비결정형 구간에서 과도한 전단 및 인장하중에 의한 점탄성 효과 발생이 가능하다고 판단된다.

또한 Fig. 1.6의 CTS P6635 재료의 2차 기본방향에 대한 온도 별 stress-strain curve에서 60℃ (유리전이온도:50℃) 이상에서는 강성이 급격히 저하되며, 항복강도 역시 급격히 작아지는 특성을 나타낸다.

이상에서 본 연구의 대상 제품에서는 항복을 동반한 고온 점탄성 변형이 발생한 것으로 판단된다.

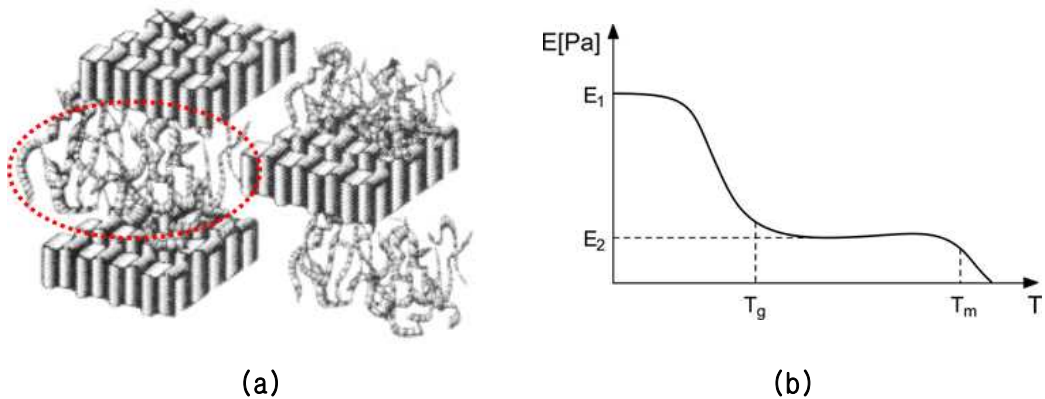


Fig. 1.4 Semi crystalline polymer and Stiffness - temperature curve for semi crystalline polymer

Fig. 1.5은 transversely isotropic 재료의 1차 기본방향이 직교 접합된 경우, thermal load에 의한 응력 해석 결과이다.

하중 구속 조건은 초기 온도 206℃, 최종 온도 25℃, 두께 2mm이다. 그리고 X축 및 Y축은 대칭 구속 조건을 적용하여 전체 해석 모델의 ¼에 대하여 수행하였으며, 이때 기계적 속성 data는 Moldflow CTS P6635 재료 data를 적용하였다.

해석 결과는 Von-Mises stress를 표시하며, 접합부에서 최대 35.5MPa를 나타냈다. 결과로부터 항복 및 점탄성 효과 발생이 가능하다고 판단된다.

Fig. 1.6은 CTS P6635의 1차 및 2차 방향에 대한 온도에 따른 stress-strain curve를 나타낸 것이다. 온도 별 stress-strain curve의 23°C 이상의 normal 방향 data에서 35.5MPa은 소성영역에 속한 것으로 판단된다.

이러한 경우 정확한 해석을 위해서는 소성 영역이 고려된 온도 별 stress-strain data는 물론 시간에 따른 점탄성 변형이 고려되어야 하나, 재료 data 확보 등 현실적 문제로 Moldflow에서는 이방성 재료의 선형 정적 해석을 통하여 변형해석을 수행하고 있다.[10]

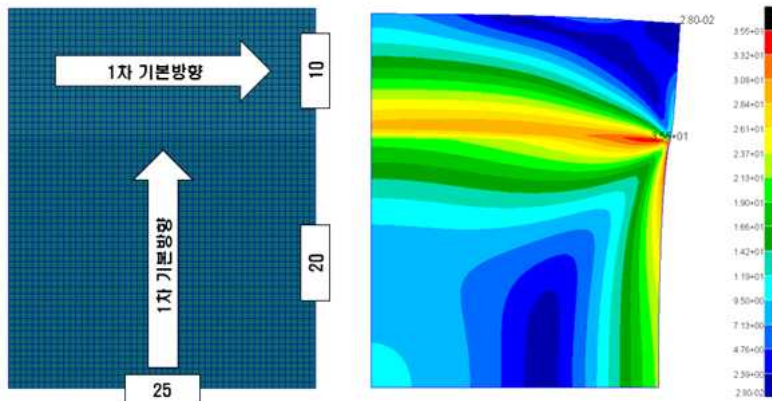


Fig. 1.5 Analysis of stress by thermal load for transversely isotropic material

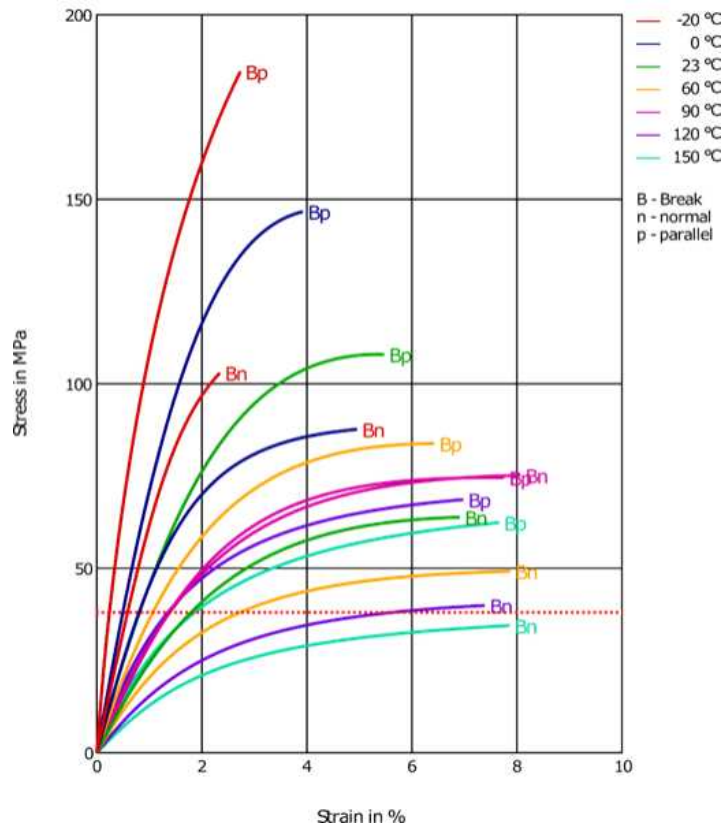


Fig. 1.6 Stress-strain curve with temperature for primary and secondary directions of the CTS P6635

1.3.3. 사출성형 공정

일반적으로 사출성형 공정은 순환 공정으로 한 주기를 압력과 온도의 변화에 따라 크게 충전 과정(filling Phase)·보압 과정(packing Phase)·냉각 과정(cooling Phase)의 세 단계로 나누어 볼 수 있다.

충전 과정에서는 임의의 기하학적인 형상을 갖는 금형의 내부로 수지가 흘러 들어가면서 복잡한 유동이 생기게 되고, 동시에 차가운 금형 벽면을 통하여 열전달이 발생하여 벽면 부근에서는 수지의 일부가 고체 상태로 전이되어 결정이나 배향이 생기게 된다.

보압 과정은 충전 과정을 지난 수지는 낮은 온도의 금형에 의해 냉각 후 수축되는 양을 보완하기 위해 충전 과정 시보다 더 높은 압력을 가하는 과정이다. 이때 수지의 압축성과 금형의 탄성으로 인하여 약간의 수지가 금형 안으로 더 들어가게 되는데 이로 인하여 금형 내부에서는 잔여유동이 존재하게 된다. 이 과정 중, 금형 벽면과의 열전달에 의해 고체화 과정이 계속 진행되고 잔여 유동의 효과와 함께 배향, 결정화, 수축, 뒤틀림 등이 발생한다.

냉각 과정은 금형 캐비티 내에 충전되고 압축된 플라스틱 수지를 취출 가능한 온도까지 냉각하는 시간이다. 위의 모든 과정을 거치면서 발생하는 잔류응력(residual stress)은 최종 사출품의 치수에 오차를 생기게 하며, 성질에도 영향을 준다. 또한 열적물성인 열팽창계수 및 배향의 영향으로 임의 온도 하에 장기간 방치 할 경우, 제품의 휨을 유발하기도 한다.[13]

고분자 재료는 용융상태에서 압력에 의해 압축성 점탄성 유동을 하며 동시에 심한 열전달 및 상변화를 하게 된다. 열가소성 수지의 사출성형은 플라스틱 수지를 유용한 제품으로 변환시키는 가장 보편적인 공정이다. 이러한 플라스틱 사출성형은 큰 생산성이 보장되지만, 성형 품질을 결정하기 어려우며 사출 과정을 제어하기 어려운 단점이 있다. 사출성형 제품에서 자주 발생하는 흐름 자국이나 흠자국과 같은 표면 결점과 제품 내 기공 등은 제품의 질을 저하시키는 요인이 되며, 수축과 뒤틀림은 최종 제품의 강도와 강성도를 저하시켜 결국 제품의 수명을 단축하는 요인이 되기 때문에 가장 심각한 문제점으로 지적되고 있다.[27, 28]

제 2 장 . 연구 방법

2.1 사출성형 해석 조건 및 방법

본 연구에서는 섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형시 금형 형상에 따른 고온 크립 특성을 고찰하기 위해 사출성형 해석 프로그램 Moldflow을 활용하여 변형해석을 수행하였다.

고온 크립의 현상을 반영하기 위해 2차 기본방향 영계수 및 1,2차 기본방향 전단계수를 기본값을 기준으로 50~100%로 수정하여 해석을 수행하였다. 기하학적 형상에 따른 고온 크립 특성을 고찰하고자 하여 기능의 제품 중 변형해석 오차가 각각 약 30%, 300%인 샘플 두 가지의 평균 섬유 배향 텐서와 잔류응력 특성을 비교하였다. 리브 배치에 따른 고온 크립 특성을 고찰하고자 하여 유동 방향에 평행인 리브 배치와 유동 방향에 수직인 리브 배치, 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치, 세 가지 경우의 리브 배치에 따른 평균 섬유 배향 텐서 및 배향효과에 의한 변형과 잔류응력 특성을 비교하였다.

2.2 고온 크립의 점탄성 효과 반영

Moldflow 변형해석은 제품 이형 후 발생하는 점탄성 변형은 계산하지 않지만, 제품 이형 전 금형 내에서 발생하는 constrained quenching에 의한 relaxation은 계산하는 것으로 알려져 있다.[10]

제품 이형 후 발생하는 점탄성 변형에 대해서는 섬유 강화제의 기계적 속성이 지배적인 섬유 배향 방향에 대해서는 극히 미소할 것으로 판단되며, 주로 섬유 배향 방향에 수직인 방향에 대해서 발생한다고 볼 수 있다. 이는 Moldflow transversely isotropic 재료 data 수정을 통하여 그 효과를 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

Moldflow transversely isotropic material data의 2차 기본방향은 섬유배향 방향에 수직인 방향으로 stress-strain curve에서 기울기 즉, 영계수 및 전단계수를 줄이는 방법으로 항복 및 점탄성 변형효과를 반영하고자 한다. Transversely isotropic material의 compliance matrix 와 stiffness matrix는 Fig. 2.1과 Fig. 2.2에 해당하며, 2차 기본방향에 대한 영계수 및 전단 계수는 E_p 와 G_{zp} 에 해당한다.

Moldflow 기계적 속성은 유동 이력에 따라 변화하는 섬유 배향 방향 및 정도를 고려하기 위하여, transversely isotropic 재료 data를 섬유 강화제의 기계적 속성을 이용하고 분해하여 polymer matrix에 대한 기계적 속성을 구한다. 이후 유동 해석 과정 중 섬유 배향 solver를 coupled analysis로 수행하여 섬유 배향 텐서를 계산한다. 각 4면체 요소 단위로 섬유 배향 텐서, polymer matrix 재료 data, 섬유 강화제 재료 data로부터 직교 이방성 재료에 대한 열팽창계수를 포함한 재료의 물성과 기계적 특성을 계산한다. 이는 Fig. 2.3에 나타내었다.

본 연구에서는 점탄성 효과를 고려하기 위해 2차 기본방향의 영계수 및 1,2차 기본방향의 전단계수를 기본값을 기준으로 50~100%로 적용시켜 고온 크립 해석을 수행하였다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_p} & -\frac{\nu_p}{E_p} & -\frac{\nu_{zp}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_p}{E_p} & \frac{1}{E_p} & -\frac{\nu_{zp}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{zp}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{zp}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu_p}{E_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}$$

Where $\frac{\nu_{pz}}{E_p} = \frac{\nu_{zp}}{E_z}$ (symmetric matrix), $\gamma_{xy} = \epsilon_{xy} + \epsilon_{yx} = 2\epsilon_{xy}$

Fig. 2.1 Compliance matrix of transversely isotropic material

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & \frac{\nu_p + \nu_{zp}\nu_{pz}}{E_p E_z \Delta} & \frac{\nu_{zp} + \nu_p\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_p + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_z E_p \Delta} & \frac{1-\nu_{zp}\nu_{pz}}{E_z E_p \Delta} & \frac{\nu_{zp} + \nu_{zp}\nu_p}{E_z E_p \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{pz} + \nu_p\nu_{zp}}{E_p^2 \Delta} & \frac{\nu_{pz}(1+\nu_p)}{E_p^2 \Delta} & \frac{1-\nu_p^2}{E_p^2 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G_{zp} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{zp} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E_p}{1+\nu_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix}$$

Where symmetric matrix and $\Delta = \frac{(1+\nu_p)(1-\nu_p-2\nu_{pz}\nu_{zp})}{E_p^2 E_z}$, $\gamma_{xy} = \epsilon_{xy} + \epsilon_{yx} = 2\epsilon_{xy}$

Fig. 2.2 Stiffness matrix of transversely isotropic material

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{V_{21}}{E_2} & -\frac{V_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{V_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{V_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{V_{13}}{E_1} & -\frac{V_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 - V_{23}V_{32}}{E_2E_3\Delta} & \frac{V_{21} + V_{23}V_{31}}{E_2E_3\Delta} & \frac{V_{31} + V_{21}V_{32}}{E_2E_3\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{V_{21} + V_{23}V_{31}}{E_2E_3\Delta} & \frac{1 - V_{13}V_{31}}{E_1E_3\Delta} & \frac{V_{32} + V_{12}V_{31}}{E_1E_3\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{V_{31} + V_{21}V_{32}}{E_2E_3\Delta} & \frac{V_{32} + V_{12}V_{31}}{E_1E_3\Delta} & \frac{1 - V_{12}V_{21}}{E_1E_2\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix}$$

Fig. 2.3 Reduced stiffness of orthotropic material

2.3 기하학적 형상에 따른 해석

섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형시 필연적으로 warpage가 발생하게 된다. 이는 제품 내부의 수축 편차에 의해 발생하며, 제품 내부 수축 편차는 금형 내부에서 제품이 고화되는 순간의 밀도차와 재료 이방성에 의한 수축 편차에 의해 발생한다.

이 중 밀도 차는 형상 및 두께 편차에 의해 냉각 시간이 달라짐에 따라 주로 발생하며, 금형 냉각 회로에 의한 편차는 일반적으로 크지 않지만, 부분적으로 가열하는 경우, steam mold 또는 heater 적용 금형의 경우는 크게 나타나기도 한다. 이러한 밀도 차는 고화 당시 보압이 불균일하게 작용하여 발생하게 되며 그 효과는 Fig. 2.4 CTS P6635 재료의 상태 방정식을 통해 확인할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형시 기하학적 형상에 따른 고온 크립 특성을 고찰하고자 하였다.

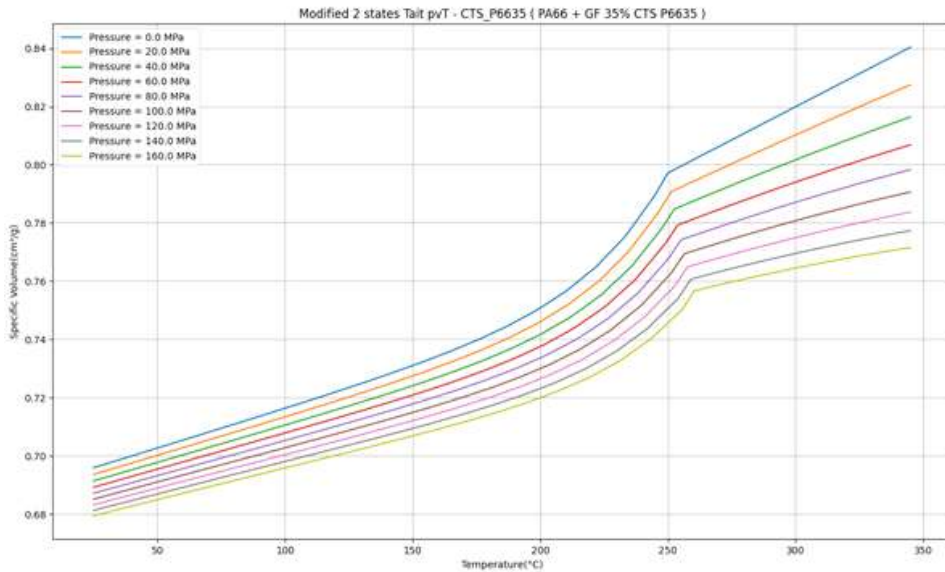


Fig. 2.4 Graph of the equation of state for CTS P6635

재료 이방성의 경우는 방향성 첨가제가 포함되지 않았을 때는 미소하지만, 섬유 강화제와 같은 방향성 첨가제가 포함된 경우는 수축 편차의 지배적 원인이 되어 변형의 주원인이 된다.

이러한 변형은 등방성 수축과 달리 제품 내부 잔류응력의 원인이 되며, Moldflow Mises-Hencky stress는 잔류응력으로부터 계산된 결과이므로 stress-strain curve와 비교 가능한 deviatoric stress로 사용 가능할 것으로 판단된다.

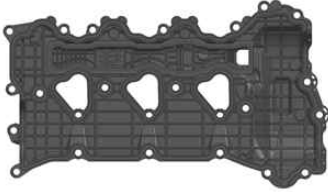
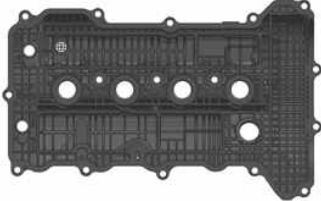
이상에서 Moldflow 섬유 배향 텐서로부터 2,3차 기본방향을 판단하고, Mises-Hencky stress 값을 고찰해보면 과도한 deviatoric stress를 유발하는 기하학적 형상을 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

이를 위하여 동일 기능의 제품 중 변형해석 오차가 약 30%인 sample “A” 와 약 300% 수준인 sample “B” 의 형상의 특성 비교를 Table. 2.1에 나타냈다.

Sample A, B를 비교해보면 사이즈는 각 476.0625 X 278.8902 X 103.8173, 489.6031 X 309.6494 X 85.6351이며, 기본 두께 2.5mm, 2.2mm, 체적 729.965mm³ , 1,100,433mm³ , 변형 해석 오차는 A는 약 30%, B에서는 약 300%의 해석 오차가 나타났다. A는 외곽 형상이 비대칭인 경향을 보였고, B는 매우 많은 rib 형상을 갖고 있다는 것이 특징이다.

따라서, 본 연구는 Sample “A” 와 “B” 에 대해 기하학적 형상에 따른 평균 섬유 배향 텐서와 잔류응력 비교를 통해 고온 크립 특성을 평가하고자 하였다.

Table. 2.1 Comparison of products A and B of the same function with different geometries

구분	A	B
Sample		
Size	476.0625 X 278.8902 X 103.8173mm	489.6031 X 309.6494 X 85.6351mm
기본 두께	2.5mm	2.2mm
체적	729,965mm ³	1,100,433mm ³
변형해석 오차	약 30%	약 300%

2.4 리브 배치에 따른 해석

과도한 deviatoric stress는 섬유 배향 방향의 급작스러운 변화에 의해 발생하는 것으로 판단되며, 이러한 배향 방향의 변화는 주로 리브 배치의 배열과 상관관계가 있는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 영향을 고찰하기 위해, 본 연구에서는 다음 세 가지 경우의 리브 배치에 따른 평균 섬유 배향 텐서와 잔류응력 해석 비교를 통해 고온 크립 특성을 고찰하고자 하였다.

Fig. 2.5는 유동 방향에 평행인 리브 배치를 나타낸 것이다. 사출 주입점의 효과를 최소화하기 위해 리브를 사출 주입점으로부터 100mm 이상에 위치시켰으며, 기본 두께 3mm, 리브 두께 2mm, 리브 높이는 10mm로 적용하였다.

Fig. 2.6는 유동 방향에 수직인 리브 배치를 나타낸 것이다. Fig. 2.5 유동 방향에 평행인 리브 배치의 해석 모델과 동일하게 사출 주입점의 효과를 최소화하기 위해 리브 배치를 사출 주입점으로부터 100mm 이상에 위치시켰으며, 기본 두께 3mm, 리브 두께 2mm, 리브 높이 10mm로 적용하였다.

Fig. 2.7는 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치를 나타낸 것이다. 유동 방향에 평행인 리브 배치의 flow leader 기능을 통해 점탄성 효과 검증을 위하여 Table. 2.1 Sample “B” 를 기준으로 해석 모델에 flow leader 기능을 하는 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치를 적용하여, 기본 두께 2.2mm, 유동 방향에 평행인 리브 두께 3mm, 수직인 리브 두께 2.5mm, 리브 높이 10mm로 적용하였다.

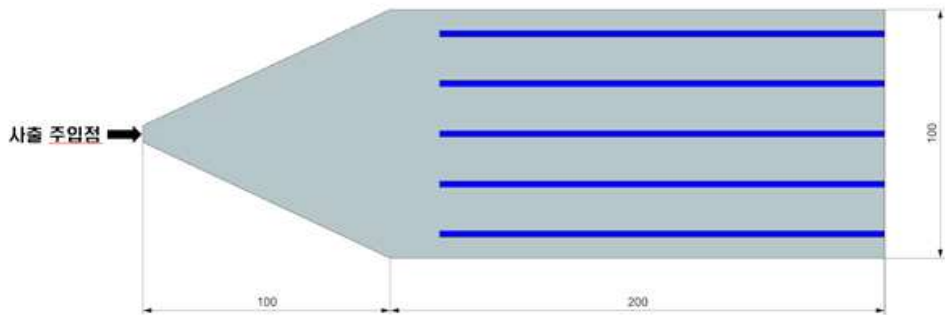


Fig. 2.5 Placement of the ribs parallel to flow direction

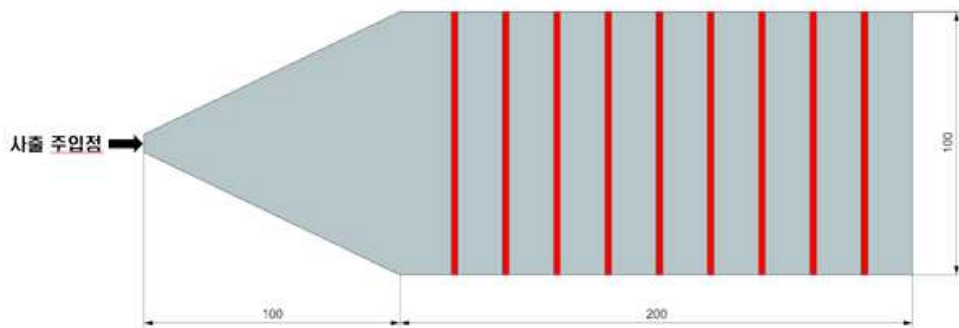


Fig. 2.6 Placement of the ribs perpendicular to flow direction

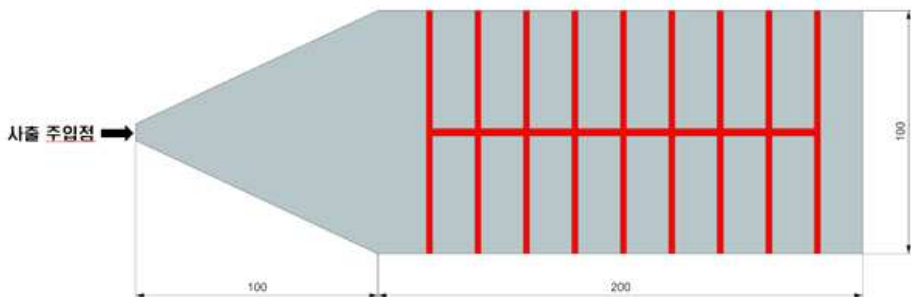


Fig. 2.7 Placement of the ribs parallel and perpendicular to flow direction

제 3 장. 연구 결과 및 고찰

3.1 고온 크립의 점탄성 효과 검증

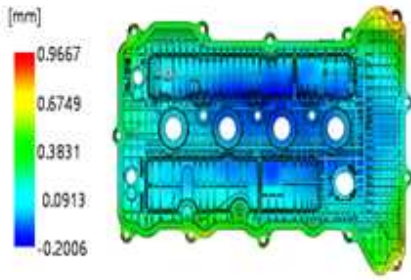
본 연구에서는 섬유강화 고분자 복합 재료의 사출성형시 발생하는 고온 크립 현상을 반영하기 위해 2차 기본방향의 영계수 및 1,2차 기본방향의 전단계수를 기본값을 기준으로 50~100%로 적용시켜 변형해석을 수행하여 해당 제품의 점탄성 변형 이후 나타난 변형과 재현되었는지 검토하였다.

Fig. 3.1는 transversely isotropic material data를 2차 기본방향에 대한 영계수와 1차, 2차 기본방향의 전단계수를 기본값을 기준으로 (a)100%, (b)80%, (c)70%, (d)60%, (e)50%로 적용하여 변형 해석을 한 결과를 나타낸 것이다.

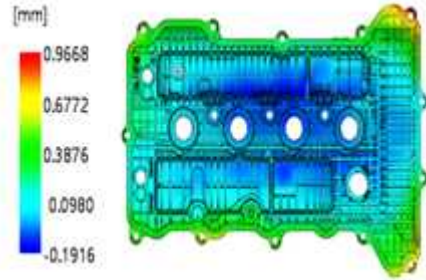
2차 기본방향에 대한 영계수 및 1,2차 기본방향의 전단계수를 Fig. 3.1(b)로 적용시켰을 경우에는 최댓값 변형량이 0.0001mm로 큰 영향이 없었고, (c), (d), (e)로 적용시켰을 경우에는 각각 3.589mm, 3.697mm, 3.870mm 으로 증가하였다. 이는 해당 제품의 점탄성 변형 이후 나타난 변형과 유사한 결과를 나타냈다.

이는 polymer matrix의 강성이 제품 강성에 기여하는 효과가 감소함으로써 나타나는 결과로 보이며, polymer matrix에서 점탄성 및 소성변형이 일어난 결과로 판단된다.

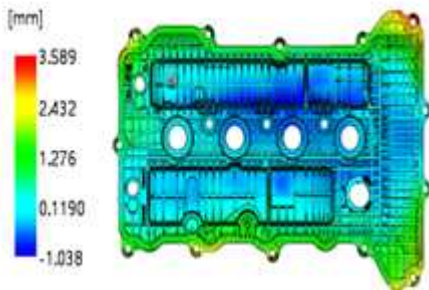
따라서, 섬유강화 고분자 복합 재료의 2차 기본방향 영계수 및 1,2차 기본방향 전단계수의 수정을 통한 변형 특성을 고찰한 결과, 해당 제품의 점탄성 변형 이후와 유사한 결과를 통해 점탄성 효과를 검증할 수 있었다.



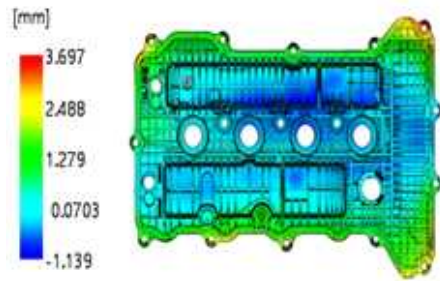
(a) 100%



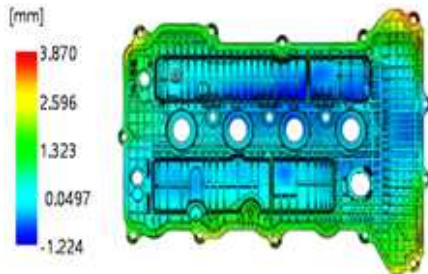
(b) 80%



(c) 70%



(d) 60%



(e) 50%

Fig. 3.1 Deformation distribution of the product with Elastic modulus and Shear modulus

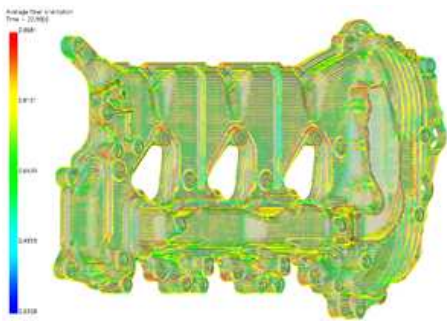
3.2 기하학적 형상에 따른 특성

3.2.1. 섬유 배향 텐서

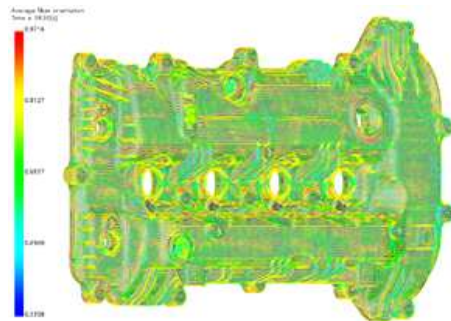
섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형시 기하학적 형상에 따른 고온 크립 특성을 고찰해보았다.

먼저, Fig. 3.2는 제품 외측의 평균 섬유 배향 텐서를 나타낸 것이다. Fig. 3.2(a)는 Sample A의 결과에 해당하며, Fig. 3.2(b)는 Sample B의 결과에 해당한다. Fig. 3.2(a),(b)모두 게이트 주변에서 배향 방향의 변화가 있으나, 전체적으로 직사각형 형상의 길이 방향으로 1차 기본방향이 배향되었다.

Fig. 3.3는 제품 내측의 평균 섬유 배향 텐서를 나타낸 것이다. Fig. 3.3(a)는 외측과 동일하게 게이트 주변에서 배향 방향의 변화가 있으나 전체적으로 길이 방향으로 1차 기본방향이 배향되는 결과가 나타났다. Fig. 3.3(b)는 다수의 길이 방향으로 배치된 두꺼운 리브 형상에서 racetrack effect에 의해 flow leader의 기능이 수행되는 것으로 보이며, 그에 따라 유동 방향에 수직인 리브 배치에서 직사각형 형상의 짧은 변 방향으로 배향성이 나타남을 확인할 수 있다.

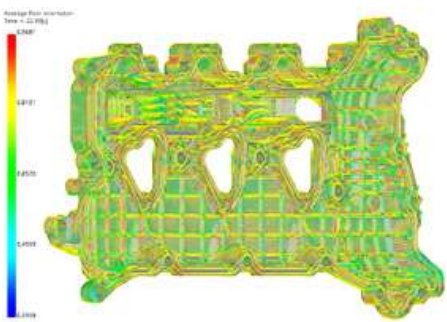


(a) Sample A

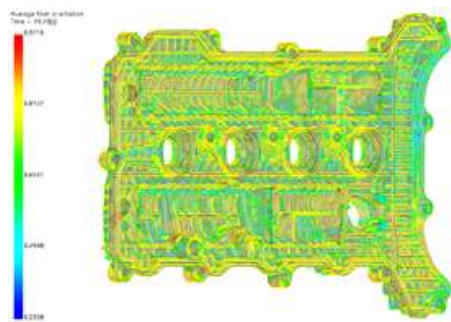


(b) Sample B

Fig. 3.2 Average fiber orientation tensor outside the products with different geometries



(a) Sample A



(b) Sample B

Fig. 3.3 Average fiber orientation tensor inside the products with different geometries

3.2.2. 잔류응력

Fig. 3.4는 섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형시 기하학적 형상에 따른 고온 크립 특성을 고찰하기 위한 제품 내측의 잔류응력에 따른 특성을 나타낸 것이다. Fig. 3.4(a)에서는 배향 방향의 급작스러운 변화가 발생하는 일부 구간에서 비교적 큰 값이 나타났으며, Fig. 3.4(b)에서는 대부분의 유동 방향과 수직으로 배치된 리브 형상에서 큰 값이 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 급격한 배향 방향의 변화로 인한 것으로 판단된다.

따라서, 섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형시 기하학적 형상에 따른 고온 크립 특성을 고찰하기 위해 잔류응력 결과를 비교하였다. 외곽형상이 비대칭인 Fig. 3.4(a)의 경우 부분적으로 배향 방향의 급격한 변화가 발생하는 구간에서 잔류응력 값이 비교적 크게 나타났다. 다수의 리브 형상을 가진 Fig. 3.4(b)의 경우 대부분의 유동 방향과 수직인 리브 구간에서 급격한 배향 방향 변화로 인해 잔류응력 값이 크게 나타남을 통해 Fig. 3.4(b)의 기하학적 형상이 다소 문제됨을 알 수 있었다.

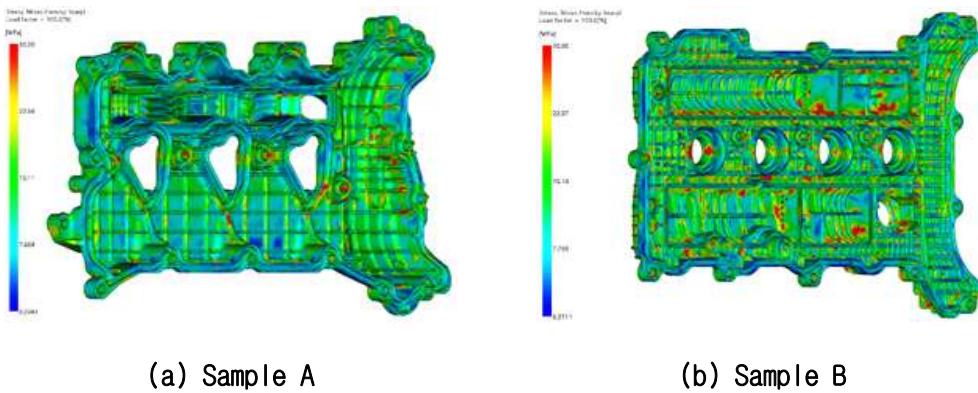


Fig. 3.4 Mises-hencky stress inside the products with different geometries

3.3 리브 배치에 따른 특성

3.3.1. 섬유 배향 텐서

섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형시 세 가지 경우의 리브 배치에 따른 고온 크립 특성을 고찰하고자 하였다.

Fig. 3.5는 유동 방향에 평행인 리브 배치의 평균 섬유 배향 텐서 결과를 나타낸 것이다. 섬유 배향 텐서를 고찰해본 결과, 해석 모델의 상하면 모두에서 1차 기본방향은 X축 방향으로 배향되었으며, 2차 기본방향은 바닥 면에서는 Y축 방향으로 균일하게 정렬되었다. 그러나 리브 구간에서는 제품의 두께 방향으로 정렬되는 3차 기본방향 특성에 의해, Y축 방향으로 2차 기본방향과 리브 구간에서 3차 기본방향이 교대로 나타났다.

이 경우 1차 → 2차 → 3차 기본방향 순으로 커지는 수축 특성으로 인해, 배향 효과에 의한 변형은 Fig. 3.6와 같이 바닥 면이 볼록한 원호 형태로 나타남을 확인할 수 있었다.

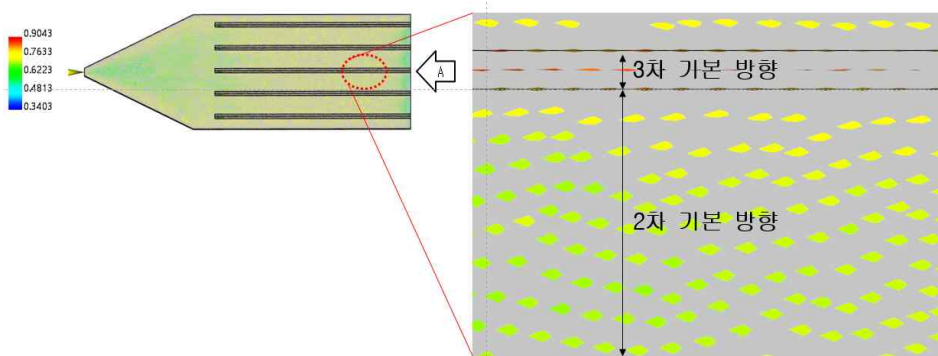


Fig. 3.5 Fiber orientation tensor for rib arrangement parallel to flow direction

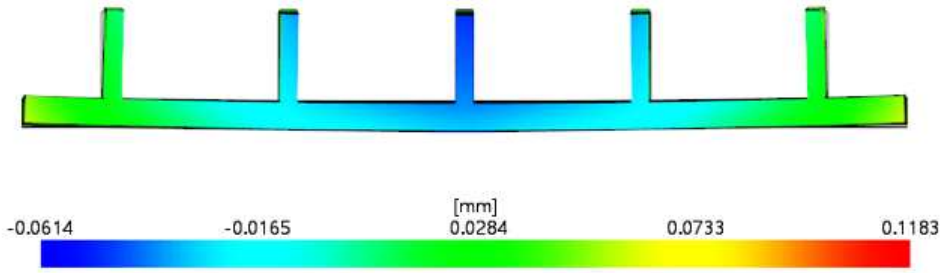


Fig. 3.6 Deformation caused by orientation effect for rib arrangement parallel to flow direction ; in view of A direction

Fig. 3.7는 유동 방향에 수직인 리브 배치의 평균 섬유 배향 텐서 결과를 나타낸 것이다. 해석 모델의 제품 표면에서 1차 기본방향은 X축 방향으로 배향되었으며, 리브 구간에서는 말단 면에서 말단 효과에 의한 배향 효과가 나타났으나 짧은 구간에서 나타나 영향이 크지 않은 것으로 보인다. 대부분의 리브 구간에서 3차 기본방향이 배향되어 1차와 3차 기본방향이 교대로 나타남을 확인할 수 있다.

이 경우 1차 기본방향과 3차 기본방향의 수축 차이로 인하여, 배향 효과에 의한 변형은 Fig. 3.8와 같이 바닥 면이 볼록한 원호 형태로 나타남을 확인할 수 있다.

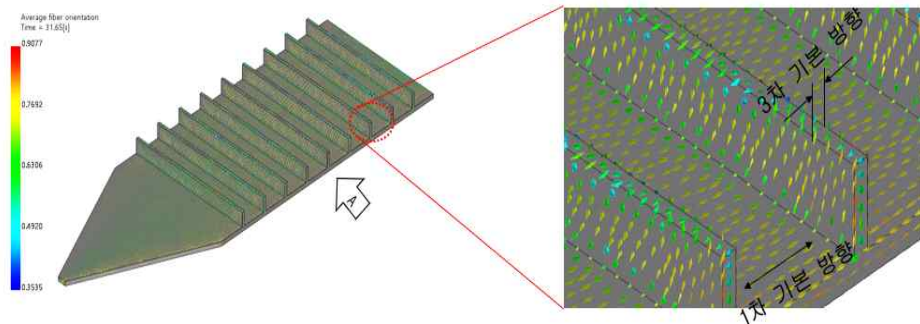


Fig. 3.7 Fiber orientation tensor for rib placement perpendicular to flow direction

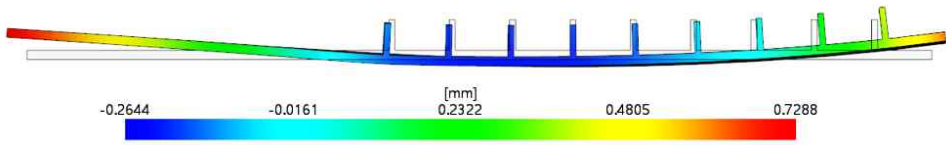


Fig. 3.8 Deformation caused by orientation effect for rib arrangement perpendicular to flow direction ; in view of A direction

Fig. 3.9는 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치의 평균 섬유 배향 텐서 결과를 나타낸 것이다. 해석 모델의 제품 표면에서 유동 방향에 평행인 리브에서 flow leader의 기능을 하여 racetrack effect로 인해 Fig. 3.10의 등고선으로 표시된 fill time 에서 보듯이 flow leader 기능을 하는 유동 방향에 평행인 리브에서 유속이 빨라짐을 알 수 있다. 또한 바닥 면에서는 느린 유속을 나타내어 바닥 면과 유동 방향에 수직인 리브에서 제품 표면에서 1차 기본방향에 교차하였다.

이 경우 배향 효과에 의한 변형은 Fig. 3.11과 같이 윗면이 볼록한 구 형상의 변형 양상이 나타남을 확인할 수 있다.

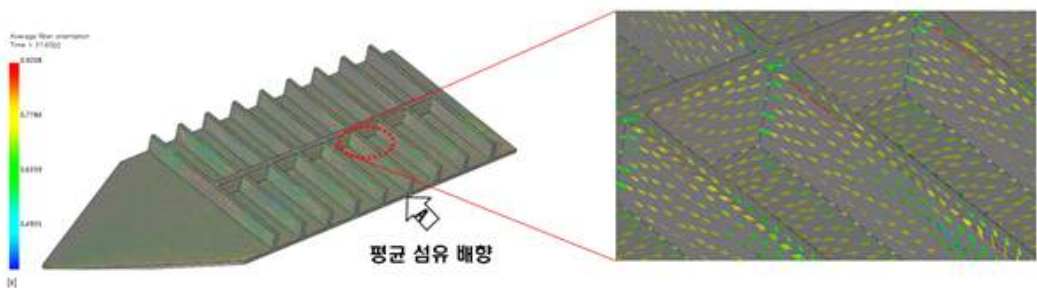


Fig. 3.9 Fiber orientation tensor for rib placement parallel and perpendicular to flow direction

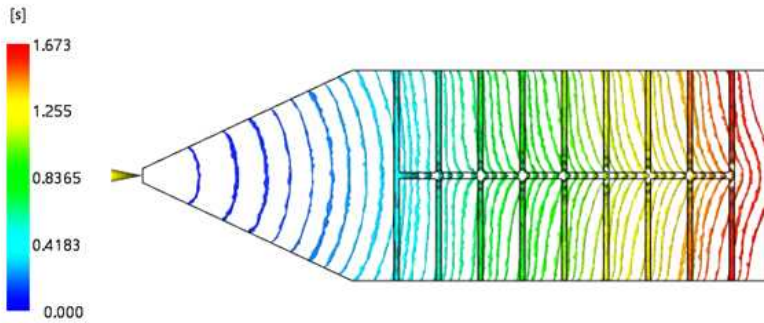


Fig. 3.10 Fill time contour line for rib arrangement parallel and perpendicular to flow direction

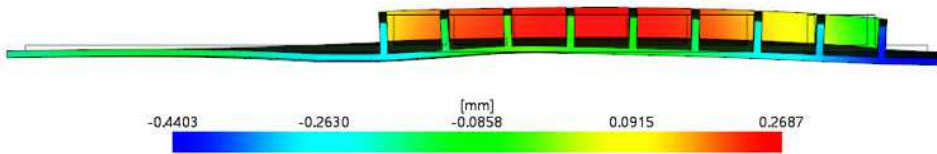


Fig. 3.11 Deformation caused by orientation effect for rib arrangement parallel and perpendicular to flow direction ; in view of A direction

본 연구에서 섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형시 리브 배치에 따른 고온 크립 특성을 고찰하기 위해 세 가지 경우의 리브 배치에 따른 섬유 배향 텐서 및 배향효과에 의한 변형을 비교한 결과, 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치의 제품 표면의 유동 방향에 평행인 리브에서 flow leader의 영향을 받아 1차 기본방향이 교차하였다. 이는 1차 기본방향에 직교 배향 양상을 보였다. 따라서, 유동 방향에 교차 되는 리브 배치는 지양해야 할 것으로 판단된다.

3.3.2. 잔류응력

Fig. 3.12는 유동 방향에 평행인 리브 배치의 잔류응력 해석 결과를 나타낸 것이다. 최댓값은 67.06MPa로 나타났으며, 일부 배향 방향이 급격히 변화하는 부분에서 값이 크게 나타났지만 전체적으로 균일한 1차 기본방향에 의해 낮은 값을 나타낸다.

Fig. 3.13는 유동 방향에 수직인 리브 배치의 잔류응력 해석 결과를 나타낸 것이다. 최댓값은 50.33MPa로 나타났으며, 제품 표면에서 배향 방향은 유지됐지만, 리브 진입 구간에서 수직으로 급격히 꺾여, 리브와 제품 접합 구간에서 비교적 큰 값을 나타낸다. 이 경우 제품 표면에서의 배향은 균일하게 유지되었으므로 제품 표면을 따라 항복이나 점탄성 변형을 일으킬 정도의 인장 또는 전단응력은 발생하지 않은 것으로 보인다.

Fig. 3.14는 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치의 잔류응력 해석 결과를 나타낸 것이다. 최댓값은 81.17MPa로 나타났으며, 제품 표면에서 1차 기본방향에 직교 배향 양상을 보였으며 큰 값이 나타나 이 경우 소성변형 및 점탄성 효과가 예상된다.

따라서, 섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형시 리브 배치에 따른 고온 크립 특성을 고찰하기 위해 세 가지 경우의 리브 배치에 따른 잔류응력 값을 비교한 결과, Fig. 3.14와 같이 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치에서 최댓값이 81.17MPa 으로 세 가지 리브 배치 중 가장 큰 값이 나타났다. 이 경우 소성변형 및 점탄성 효과가 예상되기 때문에 리브가 교차되는 배치를 지양해야 할 것으로 판단된다.

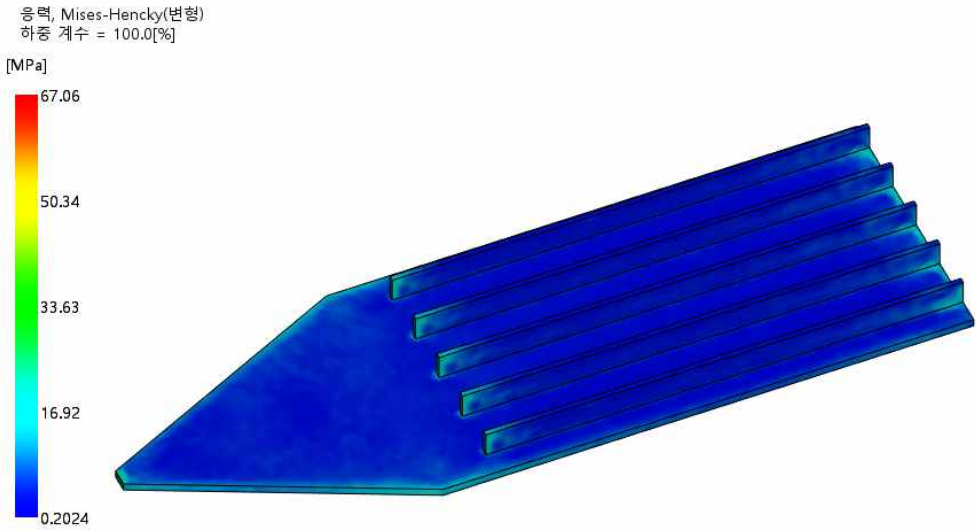


Fig. 3.12 Mises-Hencky stress for rib arrangement parallel to flow direction

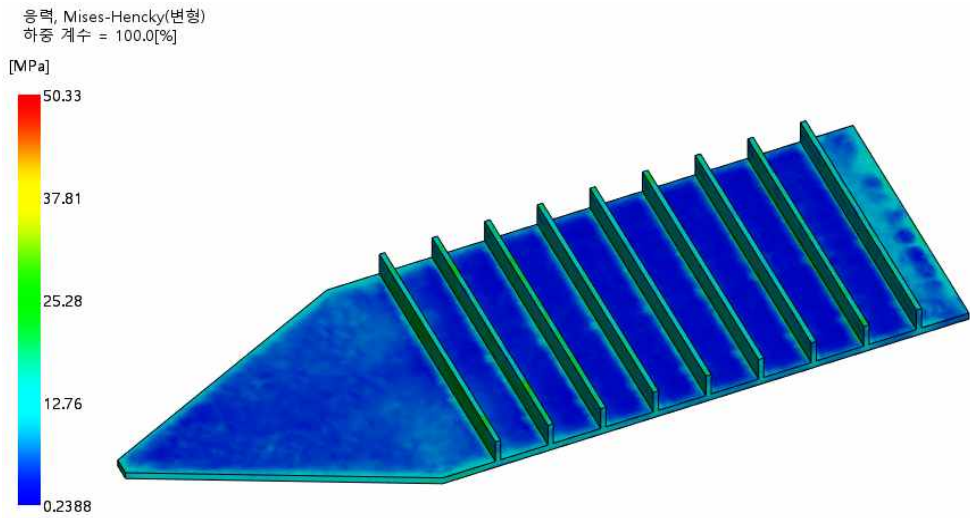


Fig. 3.13 Mises-Hencky stress for rib placement perpendicular to flow direction

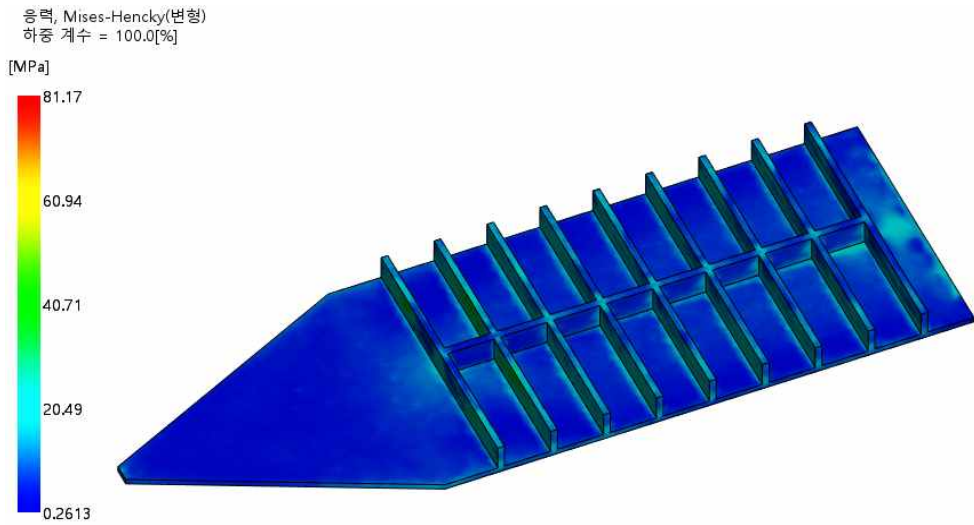


Fig. 3.14 Mises-Hencky stress for rib placement parallel and perpendicular to flow direction

제 4장. 결 론

본 연구에서는 사출성형공정 해석을 통하여, 섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형시 기하학적 형상 및 리브 배치에 따른 고온 크립 현상의 특성을 규명하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 고온 점탄성 효과는 결정형 수지 종류의 Engineering plastic 경우도 제품 이형 온도가 유리 전이온도보다 상당히 높을 시, 제품 이형 후 점탄성 변형은 amorphous regions에서 충분히 발생함을 확인할 수 있었다.

2) 기하학적 형상에 따른 특성으로는 외곽 형상이 비대칭인 Sample A 해석 모델의 경우 부분적으로 배향 방향의 급격한 변화가 발생하는 구간에서 잔류응력이 비교적 큰 값이 나타났다.

다수의 리브 형상을 가진 Sample B 해석 모델의 경우 대부분의 유동 방향과 수직인 리브 구간에서 급격한 배향 방향 변화로 인해 잔류응력이 큰 값이 나타남을 통해 Sample B의 기하학적 형상이 다소 문제됨을 알 수 있었다.

3) 세 가지 경우의 리브 배치에 따른 섬유 배향 텐서 및 효과 해석 결과, 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치에서 제품 표면의 유동 방향에 평행인 리브에서 flow leader의 영향을 받아 1차 기본방향이 교차하였다.

이는 1차 기본방향에 직교 배향 양상을 보였다. 또한, 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치에서 잔류응력 최댓값이 81.17MPa 으로 가장 큰 값이 나타나 이 경우 소성변형 및 점탄성 효과가 예상되기 때문에 리브가 교차되는 배치를 지양해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 조동환, 김현중, 자연순환형 바이오복합재료, *Elastomers and Composites*, Vol.44, No.1, 2009, pp13-21
- [2] A. B. Strong, *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications*, SME, Dearborn, 2008
- [3] M. M. Schwartz (Ed.), *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1992
- [4] B. Z. Jang, *Advanced Polymer Composites: Principles and Applications*, ASM International, Materials Park, 1994
- [5] 이정현, 사출성형 가소화 공정에서 발생하는 유리 섬유 강화 플라스틱의 잔류 섬유 길이에 관한 연구, 아주대학교 대학원, 2015
- [6] 박광진, 임태양, 박태현, 김기선, 김송화, 승용차 내장용 에어 밴드 부품 사출 금형 개발에 관한 연구, 한국산학기술학회, 춘계학술발표논문집, 2010, pp974-977
- [7] 우지에, 사출성형의 품질 향상을 위한 다양한 공정조건에 대한 해석적 고찰, 한남대학교 대학원, 2018
- [8] 김월룡, 이시호, 사출성형에서의 CAE 적용과 S/W, *Polymer Science and Technology*, Vol.9, No.4, 1998, pp283-292
- [9] 이정주, 김진우, 김혁, 한길영, 심재기, 이동기, 섬유강화 복합재료 사출성형품의 섬유배향상태, 한국공작기계학회, 춘계학술대회논문집, 2004, pp76-81
- [10] Mold Flow user manual
- [11] 문형일, 김현영, 최철우, 정갑식, 온도 및 잔류응력을 고려한 플라스틱 부품의 점탄성 해석, 한국소성가공학회지, 제 17권 제 7호, 2008, pp496-500
- [12] 김영주, 유택희, 이세춘, 김현영, 자동차 범퍼 사출성형해석과 금형설계, 한국자동차공학회, 춘계학술대회논문집, 1994, pp481-490
- [13] 박상현, 성형효과를 고려한 성형효과를 고려한 섬유강화 플라스틱 제품의 구조해석, 충남대학교 대학원, 2003
- [14] M. R. Kamal and S. Kenig, *The Injection Molding of Thermoplastic*, Part 1 :

- Theoretical Models, Polymer Engineering Science, Vol.12, 1972, pp294-301
- [15] K. K. Wang, Integration of CAD/CAM for Injection-Molded Plastic Part, Progress Report, No.12, 1996
- [16] H. Kikuchi and K. Koyama, Warpage, Anisotropy, and Part Thickness, Polymer Engineering Science, Vol.36, 1996, pp1326-1335
- [17] H. Kikuchi and K. Koyama, The Relation Between Thickness and Warpage in a Disk Injection Molded from Fiber Reinforced PA66, Polymer Engineering Science, Vol.36, 1996, pp1317-1325
- [18] F. Dupret and L. Vanderschuren, Calculation of the Temperature Field in Injection Molding, AIChE Journal, Vol.34, 1988, pp1959-1972
- [19] C. J. Yu, J. E. Sunderland and C. Poli, Thermal Contact Resistance in Injection Molding, Polymer Engineering Science, Vol.30, 1990, pp1599-1606
- [20] R. Y. Chang and B. D. Tsaur, Experimental and Theoretical Studies of Shrinkage, and Sink Marks of Crystalline Polymer Injection Molded Parts, Polymer Engineering Science, Vol.35, 1995, pp1222-1230
- [21] 정의철, 사출/압축 공정을 이용한 열가소성 탄소섬유강화 플라스틱(CFRTP) 성형품 제작에 관한 연구, 단국대학교 대학원, 2015
- [22] 임순호, 열가소성 수지 복합재, 고분자과학과 기술, Vol6, No.5, 1995, pp451-458
- [23] 신익재, 이동주, Fabric 형태에 따른 열가소성수지 적층복합재료의 성형성, 대한기계학회 논문집 A권, Vol.27, No.8, 2003, pp1338-2003
- [24] 김진우, 이동기, 섬유배향과 섬유함유량이 섬유강화 열가소성수지 복합재료의 인장강도에 미치는 영향, 한국복합재료학회지, Vol.20, No.5, 2007, pp13-19
- [25] 장동현, 핀 포인트 게이트 위치가 몰드 사출성형의 보압공정과 냉각공정에서 발생하는 휨 변형에 대한 영향 연구, 한양대학교 공학대학원, 2020
- [26] 노태정, 자동차 부품용 알루미늄 인서트 사출성형공정에 관한 연구, 동명대학교 대학원, 2009
- [27] 신성호, 사출성형시 웰드라인 최소화에 관한 연구, 부경대학교 산업대학원, 2009
- [28] 민남홍, 김성우, 박찬석, 이미혜, 이기준, 섬유 강화 사출성형품의 뒤틀림 현상 해석, HWAHAK KONGHAK, Vol.35, No.4, 1997, pp468-475