

고압 RTM 공정에서 고속 수지 유동에 의한 섬유 보강재의 변형 거동에 관한 연구

안종무* · 성동기*[†] · 이원오* · 엄문광* · 최진호**

A Study on Slip Behavior of Fiber Preform by High Speed Resin Flow in High Pressure Resin Transfer Molding

Jong-Moo Ahn*, Dong-Gi Seong*[†], Won-Oh Lee*, Moon-Kwang Um*, Jin-Ho Choi**

ABSTRACT: This paper presents the slip behavior of composite fabrics by high speed resin flow in high pressure resin transfer molding. In order to observe the fiber deformation behavior, we constructed the measuring equipment for friction coefficient between fiber and mold, and the monitoring system for deformation of fiber preform in high-pressure RTM process. Coulomb friction coefficient and hydrodynamic friction coefficient between fiber preform and mold were measured and the external force induced by fluid flow causing the deformation of fiber preform was measured. Friction force calculated by friction coefficient and the external force upon fiber deformation were compared, which showed that preform deformation occurred when the external force was bigger than the friction force. The slip behavior of the fiber preform was mainly influenced by the volume fraction of fiber preform and the friction coefficient.

초 록: 본 연구에서는 고압 RTM 공정에서 고속 수지 유동에 의한 섬유 보강재의 변형 거동에 관한 연구를 진행하였다. 이를 위해 섬유와 금형의 마찰계수 측정 장치와 고압 RTM 공정을 모사하여 preform 변형을 평가하는 장치를 구축하였다. 마찰계수 측정 장치를 통해 금형-섬유 간 Coulomb 마찰계수와 수력학적 마찰 계수를 측정하였고, preform 변형 평가 장치를 통해 preform의 변형이 발생할 때의 유체에 의해 작용하는 외력의 힘을 측정하였다. 마찰계수를 이용하여 마찰력을 구하고 외력과 비교하여 직물의 슬립(slip) 여부를 판별할 수 있었다. 유체에 의해 섬유에 작용하는 외력이 섬유와 금형 사이의 마찰력보다 커지게 되면 직물이 움직이는 것으로 관찰 되었으며, 이는 섬유의 체적률과 마찰계수에 주로 영향을 받는 것으로 나타났다.

Key Words: HP-RTM (High-pressure resin transfer molding), 복합재료(composite), 섬유 변형(fiber deformation), 마찰력(friction)

1. 서 론

현재 전 세계적으로 고유가 기조 현상이 지속되고 있고, 탄소연료는 점점 고갈되어 가고 있는 상황에서 사람들의 친

환경에 대한 관심은 점점 증대되어 가고 있다. 지구 온난화 문제에 따른 이산화탄소 배출 문제와 배기가스에 대한 규제 강화로 자동차 산업 역시 고효율 친환경 자동차 개발에 관심을 기울이고 있다. 자동차를 고효율로 만들기 위해서

Received 4 December 2013, received in revised form 29 January 2014, accepted 6 February 2014

*한국기계연구원 부설 재료연구소 복합재료연구센터

*[†]한국기계연구원 부설 재료연구소 복합재료연구센터, Corresponding author (E-mail: dgseong@kims.re.kr)

**국립 경상대학교 기계공학부

는 무게 절감을 통한 연비 향상이 가장 좋은 방법이다. 승용차의 무게를 10%만 감소시키게 되면 연비, 가속, 제동정지거리, 조향, 내구성, 배기가스 등 많은 부분에서 이득을 볼 수 있다. 경량화의 중요성이 대두되고 있는 가운데 탄소섬유복합재는 무게대비 강성과 강도가 좋아서 무게 절감에 탁월한 효과가 있어 대체 재료로 많은 기대를 받고 있다[1,2].

현재 복합재는 주로 람보르기니나 페라리 등 고성능 스포츠카에서 무게절감을 위해 주로 사용하고 있으며 독일, 일본 등 자동차 선진국에서 복합재를 상용자동차에 적용하기 위해 많은 연구를 진행하고 있다. BMW 등 일부 업체에서 양산을 시작하였으며 نيسان 등 일본의 자동차 회사에서 양산을 위해 연구하고 있다[3]. 우리나라 역시 현대자동차에서 복합재료를 이용한 자동차를 개발하고 있다. 하지만 복합재료 제조는 재료 단가가 비싸고 생산 시간이 오래 걸리기 때문에 대량생산에 적용하기 위해서는 기술적으로 극복해야 할 문제가 많은 실정이다[1].

복합재료 제품을 생산할 경우, 제품의 단가와 생산성, 물성을 고려해 볼 때 RTM(Resin transfer molding) 공정이 가장 적합하다. 오토클레이브 성형(Autoclave molding)의 경우는 물성이 가장 좋지만 단가가 비싸고 제작 공정이 오래 걸리기 때문에 주로 항공기 제조 시에 많이 쓰이고 있다. RTM 공정이 제일 적합하지만 RTM 공정 역시 수지 주입 및 경화에 따른 성형공정이 오래 걸리는 점은 오토클레이브 성형을 완벽히 보완하기에는 부족한 실정이다. RTM 공정은 섬유 프리폼을 금형에 넣고 수지를 주입하고 경화 시켜 복합재를 제조하는 공정인데 수지 주입 및 경화 부분에서 시간이 많이 소요가 된다[4]. 이를 해결하기 위해 외국에서는 이미 많은 연구가 진행되었고, 독일의 한 회사에서는 High pressure RTM이라는 고속 고압 대량생산에 적합한 공정을 개발하였다[5]. 이는 보통 RTM 공정과 유사한 방법으로 진행되지만, 주로 한 점으로 주입하는 일반적 공정과는 다르게 금형을 일부만 닫은 상태에서 고압으로 주입하고 2차적으로 금형에 압력을 가하여 속경화 시킴으로써 공정시간을 많이 단축할 수 있다. 일본 역시 다점주입식 고속 RTM 방식 등을 개발하는 많은 연구를 진행하고 있다.

국내에서도 복합재를 이용한 자동차 생산을 목표로 연구가 진행 중에 있다[6]. 복합재료 자동차를 양산하기 위해서는 고속 고압 공정이 필요한데, 고압 RTM 공정에서 수지가 주입 되면 그 때 직물에 주름 혹은 슬립 현상이 발생할 수 있는데 주름 혹은 슬립현상은 제품 물성 저하 및 결함을 야기시킬 수 있다[7]. 이에 본 논문에서 고속으로 수지가 주입되는 상황에서 직물의 주름 및 슬립 발생을 예측해보고자 한다. 두 가지의 실험을 진행하였고 첫 번째 실험은 직물의 변형의 발생을 예측하기 위한 사전 연구로서 수지가 채워지는 상황에서의 마찰을 고려할 수 있는 수력학적 마찰계수 측정을 위해 장치를 구축하고 이를 이용해 마찰계수를 측정하였다. 두 번째 실험은 실제 공정을 간략하

게 모사하여 고압 RTM 공정에서 수지가 흐를 때 preform의 변형을 관찰 할 수 있는 장치를 구축하여 특정 공정 조건에서의 변형 유무를 판별하였다. 이를 통해 최종적으로 프리폼의 형상과 공정 조건에 따른 섬유보강재의 변형 거동에 관한 연구를 수행하였으며 이를 고압 RTM 공정 최적화에 활용하고자 한다.

2. 이 론

2.1 마찰계수 측정

마찰계수를 측정하기 위한 simple slip criteria[8]를 살펴 보게 되면 Fig. 1과 같이 금형과 적층된 섬유 사이에 유체가 흐를 때 유동압이 발생을 하는데 이 유동압이 직물에 작용하는 마찰력보다 큰 경우 슬립이 발생한다고 가정하고, 이 현상을 RTM 공정 해석 시 슬립 판별 조건으로 이용했다[9].

직물 슬립 판별 모델을 적용하기 위하여 가장 중요한 인자인 직물간의 마찰계수(μ_f)와 직물과 금형 사이의 마찰계수(μ_r)를 측정하여야 한다. 이는 일반적인 Coulomb 마찰 거동과 달리, 수지가 주입된 상황에서는 수력학적 마찰 모델을 고려하여 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며, 수력학적 마찰 계수는 아래의 식 (1)과 같이, Hersey number로 표현될 수 있다.

$$\mu = \mu(H) \quad (1)$$

$$H = \eta_R U / N$$

H : Hersey number

η_R : 유동막 점도

U : 이동 속도

N : 금형에 작용하는 수직항력

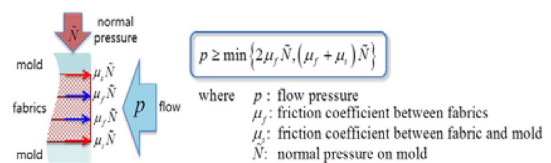


Fig. 1. Criteria for determining slip of fiber preform

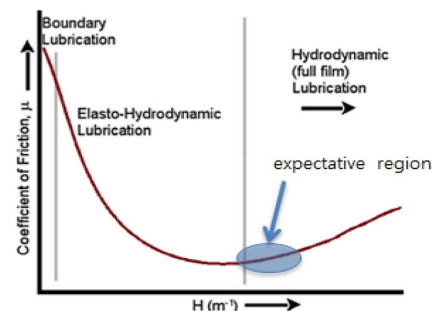


Fig. 2. Relationship between friction coefficient and Hersey number

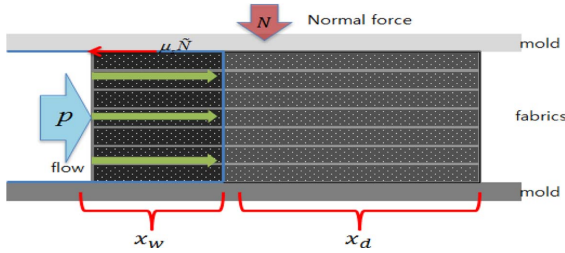


Fig. 3. Schematic diagram for determining wet and dry area during resin impregnation

수력학적 마찰조건에서는 유동특성인 점도와 공정조건인 유속 및 수직항력이 고려되어야 하며 이를 Hersey number로 대변하여 나타낼 수 있다[10].

2.2 마찰력과 섬유변형외력 비교

유체가 흐를 때 발생하는 섬유 프리폼의 변형은 Fig. 3에 서처럼 유체가 섬유를 다 빠져 나오기 전에 유체의 유동 때문에 섬유에 작용하는 외력이 섬유와 금형사이의 마찰력보다 커지기 때문에 발생한다. 아무런 변화 없이 유체가 다 빠져 나오는 경우는 섬유에 작용하는 외력이 섬유와 금형간의 마찰력보다 작기 때문이다.

슬립이 발생할 때의 섬유는 두 가지 파트로 나뉘서 생각해야 한다. 수지가 함침되어 유체의 조건을 고려해야 하는 수력학적 마찰조건을 적용하여 x_w 부분과 수지가 함침되기 전 유체의 영향이 없는 일반적인 Coulomb 마찰조건을 적용하는 x_d 부분으로 나뉘서 고려하여야 한다. 마찰력은 수직항력에 마찰계수를 곱해준 값으로 면적 비[11]를 고려해 각각의 마찰력을 계산하여 더해준 값이 전체 섬유 프리폼의 마찰력 값이며 이 값을 유체의 유동에 의해 작용하는 외력 값과 비교하여 슬립유무를 판별 할 수 있으며 아래의 식 (2)와 같은 조건에서 슬립이 일어남을 알 수 있다.

$$P \times A \geq 2 \left(\mu_w \times N \times \frac{x_w}{x_w + x_d} + \mu_d \times N \times \frac{x_d}{x_w + x_d} \right) \quad (2)$$

P : 유체에 의한 섬유 외부 압력

A : 압력이 작용하는 부분의 섬유 면적

μ_w : 수력학적 마찰계수

μ_d : Coulomb 마찰계수

x_w : 섬유에 수지가 채워진 거리

x_d : 섬유에 수지가 채워지지 않은 거리

N : 섬유에 작용하는 수직항력

3. 실험

3.1 수력학적 마찰계수 측정

수력학적 마찰계수 측정 장치는 마찰력을 측정하는 섬유 부착 부위인 마찰력 측정 프레임과 수직방향 하중을 가

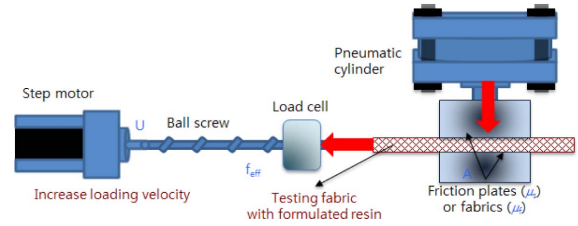


Fig. 4. Schematic diagram for measuring friction coefficient

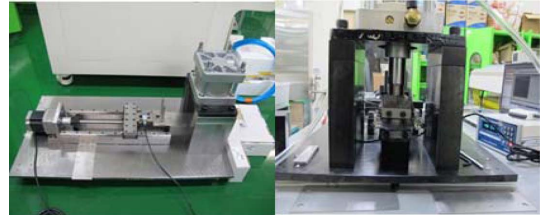


Fig. 5. Measuring apparatus of friction coefficient

Table 1. Test condition for measurement of friction coefficient

Factor	Test condition
Normal force (N)	100 / 300 / 500
Velocity (m/s)	0.01 / 0.02 / 0.03
Viscosity (Pa·s)	0.34 / 1.27 / 9.75

하는 공압 실린더, 섬유의 수평방향 거동을 부여하는 스텝 모터와, 리니어 가이드, 볼 스크류로 구성되어 있다. 식 (1)에서 언급한 바와 같이 수력학적 마찰계수를 측정하기 위해서는 점도, 속도, 수직항력 세 가지 공정인자가 고려되어야 한다. 유동막 점도(η_R)는 실제로 사용되는 수지 점도를 온도에 따라 측정을 하고, 마찰 시험 시 해당 점도를 가지는 실리콘 오일을 사용하여 측정할 수 있다. 속도(U)는 스텝모터를 이용하여 일정한 속도가 유지될 수 있도록 제작하였으며 섬유의 수평방향 움직임에 구속을 주기 위해 리니어 가이드와 볼 스크류를 설치하였다. 섬유에 작용하는 수직방향 하중(N)을 조절하기 위해 공압 실린더를 선택하였으며 섬유에 작용하는 수평방향 힘(f)을 측정하기 위해 마찰력 측정 프레임에 로드셀을 장착하여 실시간으로 힘을 측정 할 수 있도록 설계하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 마찰계수를 측정하는 장치의 개략도와 실제 사진을 보여주고 있다.

구축된 장비를 통해 다양한 Hersey number에 따른 마찰계수를 측정하였다. 사용된 직물은 탄소섬유(0° Carbon * Panex 35 50K UD150, Zoltek, 미국)이고, 실리콘 오일(KF-96H-10000CS, ShinEtsu, 일본)을 사용하였고, 속도와 수직항력을 변화하며 Table 1과 같은 조건으로 실험을 진행하였다.

3.2 고압 RTM 공정 모사에서의 Preform 변형 평가

실제 공정을 간략하게 모사한 프리폼 변형 평가장치는 Fig. 6과 Fig. 7에서 보여주는 것과 같이 금형 사이에 섬유를

적층해 놓고 실제 수지와 유사한 점도를 가지는 실리콘 오일을 고압으로 흘려줄 때 발생하는 실리콘오일의 유동압에 의한 섬유 변형을 평가할 수 있게 설계하였다. 장치는 동일한 유속으로 실리콘 오일을 공급하기 위해 UTM 장치(Instron 5882, Instron, 미국)와 공압실린더(WCL FA100-80, KCC정공, 한국)를 이용했고, UTM의 속도조절 기능을 이용함으로써 원하는 유속을 조절할 수 있었다. 정확한 압력을 측정하기 위해서 금형 내부에 압력센서(PA21Y-30bar, Keller AG, 스위스)를 설치했고 DAQ 장치(USB-6009 14-bit, National Instruments, 미국)를 이용해 내부 압력을 실시간으로 기록했으며, 두 대의 디지털 카메라를 이용해 측면과

상부의 프리폼 변형을 동시에 관찰하고 기록할 수 있게 제작하였다. 제작한 금형의 측면과 윗면에 아크릴 블록을 사용하여 육안으로 관측이 가능하게 하였고, 내부에 고압이 걸리기 때문에 금속 가이드를 설치하여 고압에 버틸 수 있게 하였다. 실험 장치의 실제 사진을 Fig. 8에서 보여주고 있다.

구축된 장비를 통해 앞서 마찰계수를 측정할 때 사용했던 재료와 동일한 섬유와 실리콘오일을 사용하였고 섬유의 배열방향과 점도는 일정하게 고정시키고, 유동속도와 섬유 체적률(V_f)을 각각 변화시켜 가며 Table 2와 같은 조건으로 실험을 진행하였다.

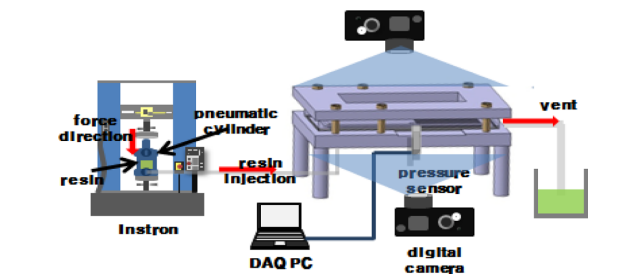


Fig. 6. Schematic diagram for measuring preform deformation in HP-RTM process

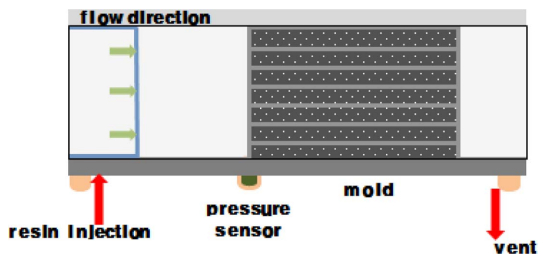


Fig. 7. Schematic diagram of mold for measuring preform deformation



Fig. 8. Measuring apparatus of preform deformation

Table 2. Test condition for measurement of preform deformation

Classification	Test condition	
Fiber	Fiber alignment direction (degree)	0
	Fiber volume fraction (%)	40 / 50 / 55
Resin	Viscosity (Pa·s)	0.34
	Flow rate (cm ³ /s)	0.84 / 1.68 / 2.51 / 3.35

4. 결과 및 고찰

4.1 마찰계수 측정

마찰계수는 Coulomb 마찰계수와 수력학적 마찰계수 두 가지의 값을 측정했다. Coulomb 마찰계수는 금형-섬유 간의 마찰계수를 측정하였으며 그 물체가 가지고 있는 고유의 상수 값이기 때문에 물리적인 조건이 변한다고 해서 변하는 값이 아니다. 섬유-금형 간 마찰계수는 0.148의 일정한 값으로 측정이 되었다. 수력학적 마찰계수는 Hersey number에 대해 Fig. 9와 같이 두 가지 형태의 결과를 나타냈다.

섬유와 금형 간의 마찰계수(μ_s)는 선형의 분포를 나타내었으며 식 (3)과 같이 정리할 수 있고 섬유와 섬유간의 마찰계수(μ_f)는 식 (4)의 관계식으로 정리할 수 있다.

$$\mu_s = 220.77H + 0.0565 \quad (3)$$

$$\mu_f = 561053H^2 - 903.7H + 0.5899 \quad (4)$$

섬유-섬유 간 마찰계수 거동은 Hersey number 그래프의 수력학적 거동을 따르지 않으며 높은 마찰계수로 인해 rigid body 거동을 나타낸다. 섬유-금형간 마찰계수 거동은 Hersey number의 수력학적 거동을 따르며 마찰계수가 섬유-섬유 간 마찰계수 보다 작음을 알 수 있다.

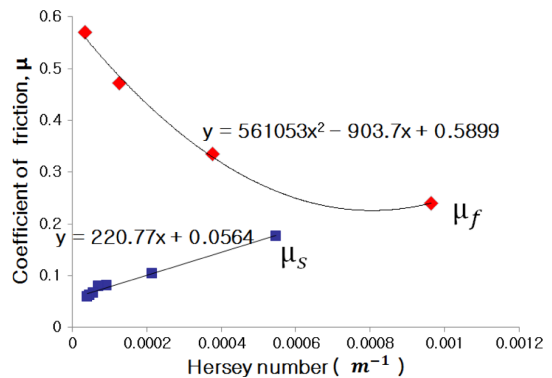


Fig. 9. Relationship between Hersey number and coefficient of friction

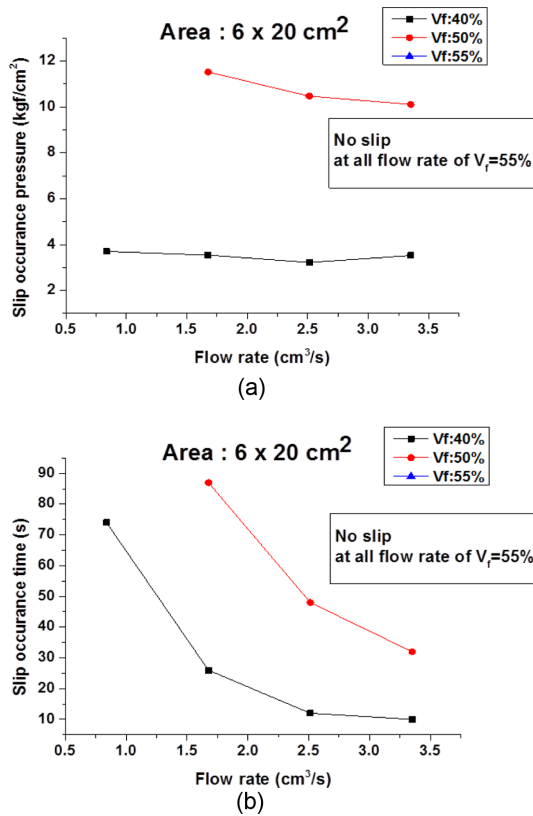


Fig. 10. Pressure and time at slip occurrence of fiber preform in HP-RTM process. (a) Relationship between resin flow rate and fiber slip occurrence pressure and (b) Relationship between resin flow rate and fiber slip occurrence time

4.2 고압 RTM 공정 모사 Preform 변형 압력 측정

Preform 변형 압력 측정 실험은 Fig. 10에서처럼 유량에 따른 슬립 발생 시간 그래프와 유량에 따른 슬립 발생 압력 그래프로 표현할 수 있다.

Fig. 10(a)는 유량에 따른 프리폼 변형 발생 압력을 나타낸 그래프이다. 마찰계수는 금형-섬유 간에 고유한 상수 값이기 때문에 동일한 조건에서 유량에는 상관없이 일정한 값이 나와야 하는데 실험 결과를 보게 되면 유량에 상관없이 섬유체적률이 일정하면 거의 유사한 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 섬유체적률 값이 증가할수록 같은

두께에서 작용하는 수직항력이 증가하기 때문에 섬유-금형 사이에 마찰력이 증가한다. 이 때문에 프리폼 변형압력은 증가하는데 결과 그래프를 확인하면 섬유체적률이 증가함에 따라 프리폼 변형 압력이 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10(b)는 유량에 따른 프리폼 변형 발생 시간을 나타낸 그래프이다. 프리폼 변형 발생 시간은 섬유체적률 과 유량에 모두 영향을 받는 인자이다. 같은 유량에서 섬유체적률이 증가 하면 섬유 변형에 발생하는 시간이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 섬유체적률이 증가하면 섬유 변형 압력이 증가하기 때문이다. 섬유의 외력의 증가량은 동일 유량에서는 일정하기 때문에 더 큰 압력까지 도달하는데 시간이 더 많이 걸리게 된다. 또한 동일한 섬유체적률에서 유량이 증가 할 경우는 시간이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 섬유 변형 외력 까지 도달하는데 걸리는 시간이 유량이 증가함에 따라 줄어들었기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 마찰력과 preform 변형 외력 비교

Table 3은 섬유 변형에 필요한 마찰력과 preform이 변형됐을 때의 외력 값을 비교한 표이다.

마찰력은 식 (2)를 사용하여 각각의 값을 구했고 섬유 변형에 필요한 외력은 압력센서를 이용해 측정된 섬유 변형이 시작되는 순간의 압력에 섬유 단면적을 곱해준 값을 사용하였다. 마찰력이 섬유 변형 외력보다 큰 경우 프리폼에 아무런 변형이 발생하지 않고, 마찰력이 섬유 변형 외력보다 작은 경우 프리폼이 변형 되는 것이 관찰되었다. 섬유체적률 40%의 경우 모든 유량 조건에서 유동외력이 마찰력보다 크기 때문에 모든 조건에서 변형이 발생하였고, 50%의 경우는 0.838 cm³/s의 조건에서 아무런 변형이 발생하지 않았고, 나머지 세 조건의 유량에서 변형이 발생하였으며 55%의 유량 조건에서는 섬유에 작용한 최대 외력이 마찰력보다 작기 때문에 변형이 발생하지 않았다.

5. 결 론

본 논문에서는 고압 RTM 공정에서 고속 수지 유동에 의한 복합재료 직물의 슬립 거동에 관한 연구를 하였으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

Table 3. Comparison between friction force and fiber deformation force

Fiber volume fraction	40%		50%		55%	
	Friction force (N)	Fiber deformation force (N)	Friction force (N)	Fiber deformation force (N)	Friction force (N)	Fiber deformation force (N)
Flow rate (Pa·s)						
0.838	93.99	130.71	-	-	750.67	438.27
1.676	109.18	125.02	472.94	420.97	752.22	450.28
2.513	111.06	113.72	474.19	369.76	748.56	467.94
3.351	87.15	124.31	564.34	357.05	734.49	517.38

마찰계수 값은 재료의 고유한 상수 값이기 때문에 동일한 조건에서는 항상 일정한 값을 가진다. 실험 조건에 따라 마찰계수에 의한 한계마찰력에 유체의 유동에 의한 힘이 도달하는지의 여부에 따라 프리폼의 변형 여부가 결정이 되고, 프리폼의 변형이 없는 조건에서는 고압 RTM 공정이 가능할 것으로 판단된다.

프리폼이 변형하는 경우, 동일 유량에서 섬유체적률이 증가함에 따라 프리폼을 변형시키는 외력이 증가를 하고, 동일 섬유체적률에서는 유량이 증가할수록 프리폼 변형이 발생하는 시간이 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다.

프리폼의 변형 외력과 마찰력의 경우 식 (2)에 따라 판별이 가능하며 관계식을 통해 직물의 고유 물성 값만 알게 되면 고압 RTM의 가능 여부를 예측 할 수 있다.

향후 추가적인 연구를 통하여 프리폼의 변형 형태(미끄러짐, 주름 등)에 따라 구분하여 실험을 진행하고, 이 결과를 이용하여 고압 RTM 공정의 성형 시간 및 성형품 성능 확보를 위한 최적화가 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 탄소밸리 구축사업과 한국기계연구원 부설 재료연구소의 주요사업의 지원을 받아 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- Kim, K.S., Bae, K.M., Oh, S.Y., Seo, M.K., Kang, C.G., and Park, S.J., "Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Light-weight Vehicles," *Elastomers and Composites*, Vol. 47, No. 1, 2012, pp. 65-74.
- Jung, J.W., Kim, S.H., Kim, S.H., Park, J.K., and Lee, W.I., "Research on the Development of the Properties of PLA Composites for Automotive Interior Parts," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 3, 2011, pp. 1-5.
- Gong, J.D., "A Report of Comprehensive Technological Development of Innovative, Next-Generation, Low-Pollution Vehicles Part I," *Auto Journal*, Vol. 31, No. 3, 2009, pp. 76-80.
- Lee, D.G., *Composite Materials*, Hongrung Pub. Co., Korea, 2007.
- Erich Fries, "Light Weight and HP-RTM," *Proceeding of the Korean Society for Composite Materials*, Seoul, Korea, May, 2013, pp. 17-18.
- Choi, C.H., "Current Development Status of Polymer Composites for Automobiles," *Proceeding of the Korean Society for Composite Materials*, Seoul, Korea, May 2013, pp. 15-16.
- Daniels, W.W., "Relationship Between Fiber Properties and Fabric Wrinkle Recovery," *Textile Research Journal*, Vol. 30, No. 9, 1961, pp. 656-661.
- Joakim Schön, "Coefficient of Friction of Composite Delamination Surfaces," *Wear*, Vol. 237, No. 1, 2000, pp. 77-89.
- Joakim Schön, "Coefficient of Friction and Wear of a Carbon Fiber Epoxy Matrix Composite," *Wear*, Vol. 257, No. 3-4, 2004, pp. 395-407.
- Gorczyca Jennifer, *A Study of Frictional Behavior of a Plain-weave Fabric during the Thermostamping Process*, Ph.D. Thesis, University of Massachusetts Lowell, USA, 2004.
- Rauch, J.Y., Roisselot, C., and Martin, N., "Structure and Composition of TiAlN Thin Films Sputter Deposited Using a Composite Metallic Target," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 157, No. 2-3, 2002, pp. 138-143.