



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](#)

공학석사 학위논문

PTFE 코팅에 따른 현무암 섬유강화
복합재료의 Tribology 특성에 관한 연구

Tribological Properties of the Basalt Fiber Reinforced
Composites by PTFE-Coating



지도교수 김 윤 해

2014년 1월 10일

한국해양대학교 대학원

재료공학과

박 준 무

본 논문을 박준무의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 김 준 영
위 원 이 병 우
위 원 김 윤 해



한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	i
List of Figures	ii
Abstract	iii
1. 서 론	9
2. 현무암 섬유 및 PTFE 코팅제의 소개	12
2.1 현무암 섬유의 정의	12
2.2 현무암 섬유의 특징	13
2.3 현무암 섬유의 적용 분야	14
2.4 PTFE 코팅제의 특징 및 적용 분야	20
3. 재료 및 실험 방법	22
3.1 실험 재료	22
3.2 시험편 제작	25
3.2.1 Prepreg	26
3.2.2 VaRTM	28
3.2.3 Hand lay-up	31
3.2.4 Autoclave	33
3.3 실험 장치 및 방법	35
3.3.1 실험 장치 구성	35
3.3.2 실험 방법	37
4. 연구 결과 및 고찰	40
4.1 공정법에 따른 마찰 및 마모 시험 결과	40

4.1.1 Prepreg/VaRTM 공정에 따른 마찰 및 마모 특성 분석 ..	40
4.1.2 마찰 단면 관찰	43
4.2 섬유 배향각에 따른 마찰 및 마모 시험 결과	45
4.2.1 배향각에 따른 마찰 및 마모 특성 분석	45
4.2.2 마찰 단면 관찰	48
4.3 PTFE 코팅에 의한 마찰 및 마모 시험 결과	50
4.3.1 PTFE 코팅에 의한 마찰 및 마모 특성 분석	50
4.3.2 마찰 단면 관찰	53
5. 결 론	55
참고 문헌	57



List of Tables

Table 1	Physical properties of the basalt fiber and glass fiber used for experiments	11
Table 2	Chemical composition of basalt fiber	15
Table 3	Mechanical and physical properties of PTFE	21
Table 4	Property of epoxy resin for tests	22
Table 5	Main specifications of ball-on-disk tribometer	35
Table 6	The experimental conditions of friction and wear	35
Table 7	Average friction coefficients of various materials	38



List of Figures

Fig. 1 Images of the basalt fibers	16
Fig. 2 A simplified diagram of a basalt fiberization processing line	17
Fig. 3 Manufacturing process of the basalt staple fibers	18
Fig. 4 Application of basalt fibers	19
Fig. 5 Images of basalt fibers	23
Fig. 6 Images of coating agent	24
Fig. 7 Selection of effective process	25
Fig. 8 Prepreg process	27
Fig. 9 VaRTM process	29
Fig. 10 VaRTM procedures	30
Fig. 11 Hand lay-up process	32
Fig. 12 Images of autoclave	34
Fig. 13 Images of ball-on-disk tribometer	36
Fig. 14 Prepreg lay-up method	39
Fig. 15 Images of specimens	39
Fig. 16 Friction coefficient by Prepreg/VaRTM process	42
Fig. 17 SEM micrographs of wear test by Prepreg/VaRTM process	44
Fig. 18 Friction coefficient by fiber orientation	47
Fig. 19 SEM micrographs of wear test by fiber orientation	49
Fig. 20 Friction coefficient by PTFE coating	52
Fig. 21 SEM micrographs of wear test by PTFE coating	54

Tribological Properties of the Basalt Fiber Reinforced Composites by PTFE-Coating

Park, Jun Mu

Department of Materials Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

The purpose of this study makes the basalt fiber reinforced composite and progresses the friction and wear property test. Because basalt fiber reinforced composite can be supplemented the defect like the harmfulness to human body and environmental damage of the glass fiber and overcome the defect that the application area is limited due to the high cost of carbon fiber. First, the test specimen was made with the optimized method according to the composites molding process. And the friction and wear property test result by the fiber orientation angle was analyzed. In addition, the friction section was analyzed. Finally, the friction and wear property test according to PTFE coating treatment of the material surface was compared and analyzed. This study verified the possibility of life extension caused by excellent wear resistance and enlargement of application area according to the low cost. And also, this study considered that the fiber orientation and the existence and nonexistence of the PTFE have a effect on tribological property.

The experiment was classified as three condition and progressed through the process method, fiber orientation, and PTFE coating treatment. VaRTM and Prepreg process method were compared. The tribological characteristics test according to the fiber orientation was progressed with prepreg fiber in Case1(0°), Case2(0°/90°), Case3 (0°/±45°/90°) of order. In addition, the tribological characteristics according to existence and nonexistence of PTFE coating treatment were analyzed through the experiment. Finally, the friction section worn away was observed through SEM.

Consequently, the test specimen which was made by using the prepreg process is shown the excellent tribological characteristic rather than the VaRTM process. And as to the tribological characteristic according to the fiber orientation, Case1 was the most excellent. Finally, in case of processing PTFE coating treatment, the coefficient of friction which about 0.18μ is low was measured.

This study result about friction and wear of the basalt fiber reinforced composite by PTFE coating can be served as base line data for the tribology application of the fiber reinforced composite.

KEY WORDS: Tribology 트라이볼로지; Basalt fiber 현무암섬유; Composites 복합재료; Friction 마찰; Wear 마모; Epoxy 에폭시; PTFE 폴리테트라 플루오로에틸렌.

1. 서론

복합재료(Composite material)란 두 종류 이상의 소재를 복합화 하여 각각의 소재가 원래의 상을 유지하면서 원래의 소재보다 물리적, 화학적으로 우수한 성질을 갖게 한 재료를 말한다. 이러한 복합재료 중에서도 섬유강화플라스틱은 비강도와 비강성이 크고, 내마모성 및 내마멸성이 우수하며 성형성이 좋아 지금까지 우주항공, 조선 및 자동차, 스포츠 관련 레저용품 등 금속재료를 대체하는 소재로서 각종 산업에 지속적으로 사용되고 있다. 현재 복합소재들은 모든 공업 분야에 널리 파급되어 있으며, 서서히 고갈되어가는 화석연료를 절약하고 심각한 상태에 놓인 지구 대기환경을 보호하기 위한 친환경적 산업의 추구는 선진국을 중심으로 강력하게 추진되고 있으며 이를 해결하는 데는 재료의 경량화를 최대 장점으로 하고 있는 복합재료의 사용이 필수적이다. [1]

고분자 및 섬유보강 고분자 복합재료의 산업에의 응용은 최근 수십 년간 괄목할만한 성장을 이루었지만 탄소섬유는 매우 고가이기 때문에 적용할 수 있는 분야가 제한되고, 전도체로써 고압전류가 흐르는 곳에서는 사용이 적합하지 않는 등의 문제가 있는 것으로 나타났다. 그와는 반대로 유리섬유는 탄소섬유보다 상대적으로 낮은 기계적 물성을 지니지만 탄소섬유에 비해 비교적 저렴한 가격을 가지고, 저탄성재료로서의 이점이 있어 다양한 분야에 사용되고 있다. 그러나 최근에는 섬유의 제작, 재단 및 시공 시 유리 분진에 의하여 여러 가지 문제가 발생하는 것으로 나타났으며, 내화학성이 떨어질 뿐만 아니라 폐기 시에는 환경에 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 또한 인체의 해로움과 유리섬유의 환경유해성, 산업분야에서의 유리섬유 사용제한에 대한 국제적인 회의 등 끊임없는 많은 논란이 발생하고 있으므로 결과적으로 새롭게 발전하고 있는 무기섬유의 수요가 증가하고 있다.

현무암섬유는 무기 섬유로 천연 현무암의 특성에 기반 하여 높은 온도에서

녹여서 생산된다. 게다가 현무암 섬유는 다른 첨가물 없이 단일 생산과정을 통해 생산된다. 그러므로 생산 과정이 단순하고, 생산 비용도 낮으며 친환경적인 생산이 가능하다. 또한 섬유보강재의 사용 온도가 $-265\sim 700^{\circ}\text{C}$ 로 기존의 섬유보강재에 비해 열에 대한 특성이 우수하고, 유리섬유와 비교하여 탄성계수, 화학적 특성, 그리고 내마모성이 우수한 것으로 연구되었다. 따라서 현무암섬유는 특수 산업에서 요구하는 다양한 온도범위에서 사용되어 질 수 있으며 고성능의 산업 섬유 재료로 적합하다. [2,3] Table 1에서는 현무암섬유와 기존 섬유들과의 물성 차이를 보여주고 있다.

한편 공업용 재료는 크게 금속재료, 세라믹 재료, 플라스틱 재료로 대표된다. 특히 플라스틱과 섬유보강 고분자 복합재료들은 산업에의 이용에 있어 지난 수십 년간 엄청난 성장을 보였다. 섬유강화 복합재료를 기어, 캠, 베어링과 같이 미끄럼 접촉을 하는 기계요소에 사용할 경우 성형의 용이성, 경제성과 함께 진동 흡수, 무게 감소, 내충격성 및 내 부식성 향상과 같은 장점이 있으므로 많은 분야에서 금속 재료를 대체하고 있다. [4,5] 섬유강화복합재료의 기계적 특성 중 내마모특성은 열악한 환경조건에서 사용되는 복합재료의 특성상 그 중요성이 부각되어 이에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

섬유강화 복합재료의 마찰과 마모 특성에 영향을 주는 인자들은 상대 마찰면의 경도, 마찰면의 표면 처리, 재료, 그리고 섬유배열방향 등이 있고 특히 섬유의 구조 및 배열방향과 배열상태가 마모 특성에 큰 영향을 준다.

그러나 복합재료의 섬유 배향이 마찰과 마멸에 미치는 영향에 대한 메커니즘은 현재까지 명확하게 밝혀지지 않고 있는 실정이다. 메커니즘 뿐 만 아니라 단순히 마모 자체에 대해서만 이야기 하는 것이 실제 사용조건에서는 큰 의미가 없는 경우가 많으므로 마모, 윤활, 마찰 등을 종합적으로 연구하는 것이 요구된다. 때문에 에너지 부족과 함께 중요성이 커진 분야가 바로 트라이볼로지(Tribology)다. [6]

오늘날 산업 현장에서 마모만이 독자적으로 작용하는 경우는 흔치 않으며 대부분 마찰과 윤활이 마모와 같이 작용하여 나타나므로 매우 복잡한 양상을 보인다. 마모 만에 대하여 검토하는 것은 연구의 목적 외에는 실제적인 응용이라는 측면에서 본다면 큰 의미가 없다. 따라서 마찰, 마모, 윤활의 3요소를 종합적으로 연구하는 것이 필요하며 이들의 복합적 작용은 기계장치의

구동 및 운전 효율에 큰 영향을 미친다. 실제로 산업계에서는 생산되는 총 에너지의 약 30%가 마찰 과정에서 소실되어 없어질 정도로 생산성과 밀접한 관계가 있어 에너지 절약에 직접적인 기여가 가능하다.

따라서 본 연구에서는 유리섬유의 인체 및 환경 유해성 등의 단점을 보완하고 비교적 고가로 형성되어있는 탄소섬유로 인해 그 적용분야가 제한된다는 단점을 극복할 수 있는 현무암섬유강화 복합재료를 제작하고 마찰 및 마모 특성 시험을 진행하였다. 먼저 복합재료 성형공정에 따라 최적화된 공법으로 시험편을 제작한 뒤 섬유 배향각에 따른 마찰 및 마모 특성 시험결과와 마찰 단면을 분석하고 재료 표면의 PTFE코팅 처리에 따른 마찰 및 마모 특성 시험을 비교 분석하면서 우수한 내마모성으로 인한 기계 부품의 수명연장, 낮은 재료비용을 통한 적용분야의 확대가 가능한지를 검증해보고 섬유 배향과 코팅의 유무가 마찰특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. PTFE코팅에 의한 현무암섬유강화 복합재료의 마찰 및 마모에 관한 본 연구결과는 섬유강화 복합재료의 트라이볼로지 응용을 위한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

Table 1 Physical properties of the basalt fiber and glass fiber used for experiments

	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Density (g/cm ₃)	Elongation at Break (%)
Carbon fiber	2500~5600	230~240	1.7	1.4~1.8
Basalt fiber	3100~4840	85~95	2.8	3.15
Glass fiber	2000~3500	70	2.5	2.5

2. 현무암 섬유 및 PTFE 코팅제의 소개

2.1 현무암 섬유의 정의

현무암 섬유는 전 세계에 분포되어 있는 불활성 암석인 현무암을 원료로 하는 차세대 광물섬유로써 무기섬유의 일종으로 현무암석을 원료로 하여 만드는 섬유이다. 현무암은 화산에서 분출된 용암이 굳어져 만들어진 것으로 매장량이 풍부하여 천연광물질로서 안전한데다 열적성질, 강도 및 내구성이 좋기로 오래전부터 잘 알려져 온 암석으로 1400~1500℃ 사이에 온도로 용융시켜 일정한 점도의 현무암 용융액체에서 노즐을 통해 초미세극사로 인발하여 만든 섬유를 말한다. [7]

이러한 현무암은 일반적으로 다른 암석재에 비하여 우수한 물성을 나타낸다. 경도와 연성 등이 우수하고, 물리적 성능이 좋을 뿐만 아니라 암석에 함유된 화학성분에 의하여 휨, 눌림, 충격 등에 대한 저항성이 우수하며, 고온과 저온, 습기, 알칼리 등에도 잘 견디는 성질이 있다. 그러나 무엇보다도 가장 중요한 특징 중의 하나는 인체에 해로운 각종 방사선 함량이 각 국가별 및 국제기준보다 현저하게 낮아서 친환경재료로 각광 받고 있다. Fig. 1에 현무암 섬유의 모습을 나타내었다. [8,9] 이러한 현무암 섬유는 장섬유(연속섬유)와 단섬유(스테인플 섬유)로 대별되며, 대개 연속섬유는 제한이 없는 긴 길이와 수평 배열이 특징이며, 단섬유는 길이가 길지 않고 굴곡이 있으며 불규칙적인 배열상태가 특징이다. Table 2에는 현무암 섬유의 화학적 조성을 나타내고 있다. 현무암 연속섬유는 현무암을 20mm 이하의 굵기로 된 현무암 쇄석으로 분쇄하여 공급하는 단계와 현무암 쇄석을 1,440~1,480℃에서 용융하는 단계, 용융된 현무암을 1,380~1,480℃로 유지시키면서 인발하는 단계, 연속섬유를 960~1,150℃로 서서히 냉각하는 단계, 연속섬유의 표면에 표면처리제를 도포하는 단계 및 도포된 표면처리제를 건조하고 권취하는 단계에 의하여

제조된다. Fig. 2에 현무암 연속섬유의 간략한 생산단계에 대하여 표시하였다. 반면, 단섬유 제조장치의 경우 현무암을 20mm 이하의 굵기로 된 현무암 쇄석으로 분쇄하여 공급하는 단계; 상기 현무암 쇄석을 1,440℃~1,480℃에서 용융하는 단계; 상기 단계에서 용융된 현무암을 1,380℃~1,480℃로 유지시키면서 인발하여 현무암 초기섬유를 형성하는 단계; 상기 현무암 초기섬유를 1,500℃~1,600℃의 고온가스가 290m/s~310m/s로 송풍 되는 가열 송풍 부위로 공급하여 단섬유로 형성하는 단계; 및 상기 단섬유를 권취하는 단계로 이루어진다. Fig. 3에 현무암 단섬유의 간략한 생산단계에 대하여 표시하였다. [9,10]

2.2 현무암 섬유의 특징

현무암 섬유는 현무암을 고온에서 용융하고 대기에서 인발하여 형성된 무기 섬유로서 용암이 지표로 분출하여 굳은 후 시간이 흘러 풍화가 완성되어 안정화가 이루어진 암석만을 사용하여 섬유를 만들기 때문에 환경 친화적인 최첨단 섬유소재이다. 이러한 현무암 섬유는 산업섬유 중 10% 정도를 차지하고 있으며, 국내 수요도 점차 급등하고 있다.

내산성, 내알칼리성, 내수성, 흡음성, 내열성 등이 뛰어난 반합성 무기섬유로서 현무암의 고유한 용융특성으로 인하여 초극사로부터 조대섬유에 이르기까지 수 종류의 현무암 섬유 생산이 가능하며, 자체섬유로도 사용이 가능하지만 다른 섬유와도 혼합되어 다양한 제품에 사용이 가능하다. 또한 원적외선 방사에 의한 모세혈관 확장, 음이온 방출, 다량의 미네랄 함유, 향균 및 탈취력이 탁월하다. [11]

2.3 현무암 섬유의 응용분야

현무암 섬유는 최근 산업구조의 고도화와 더불어 우주항공, 자동차, 에너지, 환경, 스포츠 등의 다양한 분야에서 사용되는 산업용 섬유로 사용될 뿐만 아니라 건강 쾌적성 소재, 기능성 의류로서도 중요한 역할을 할 수 있다. 앞서 언급했듯이 현무암섬유는 안정화 과정을 거친 현무암만으로 제조된 환경 친화적 섬유로서 내마모성, 내열성, 내알칼리성 등 기계적 물성이 뛰어나 각종 산업은 물론 공업용 재료로도 널리 사용되고 있다. 그 외에도 다음과 같은 다양한 분야에 적용되고 있다. Fig. 4는 현무암 섬유의 적용 분야를 보여준다.

- 환경필터, 고온 분진필터, 내화학필터
- 생활건강 및 의료용 (원적외선, 단열성 이용)
- 콘크리트 강화 섬유, 고강도 복합재, 방화재, geogrid, geomat
- 자동차용 머플러 흡음재
- 해양수산용 복합재료 보강재
- 전기 배선용 케이블 내화 구조재
- 건축용 내화방화재, 방화커튼, 단열, 흡음재
- 자동차 headliner용 경량 매트
- 고온작업복 및 장갑, 용접복

Table 2 Chemical composition of basalt fiber

Composition	Contents (%)
SiO ₂	47 ~ 56
Al ₂ O ₃	14 ~ 19
FeO + Fe ₂ O ₃	7 ~ 15
CaO	8 ~ 11
MgO	3.5 ~ 10.0
K ₂ O+Na ₂ O	2.5 ~ 6.0
TiO ₂	0.2 ~ 2.0
P ₂ O ₅	0.3 ~ 0.8
Cr ₂ O ₃	0.04
MnO	0.2
SO ₃	0.2



Fig. 1 Images of the basalt fibers

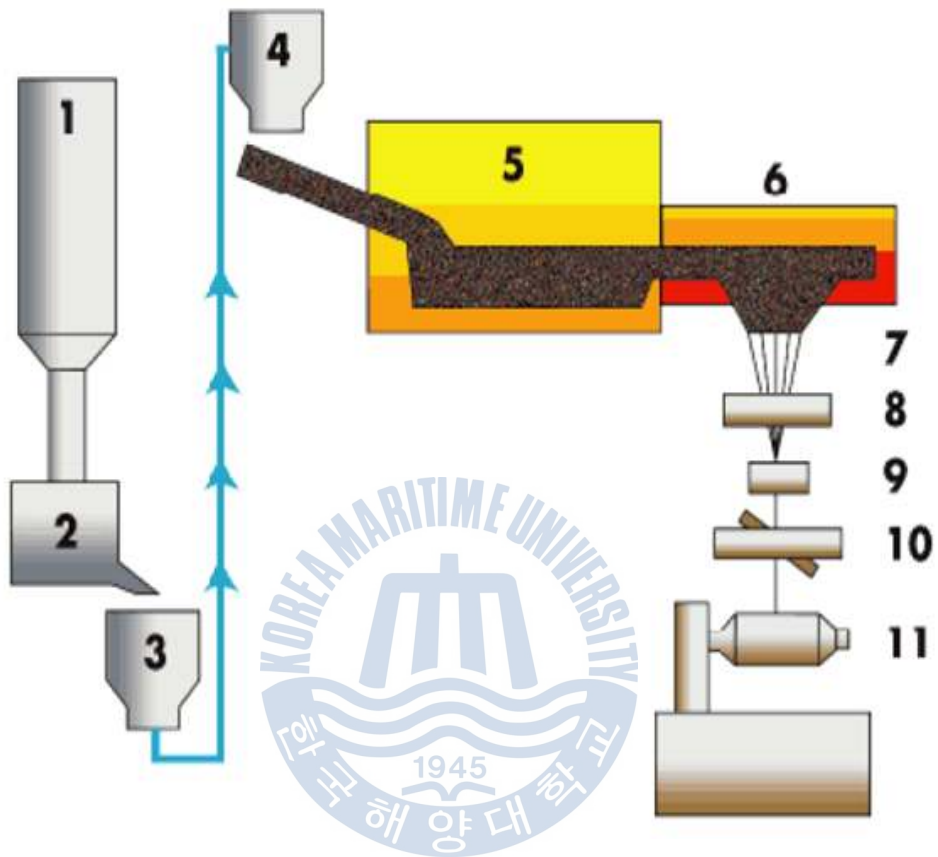


Fig. 2 A simplified diagram of a basalt fiberization processing line : 1) crushed stone silo; 2) loading station; 3) transport system, 4) batch charging station, 5) initial melt zone, 6) secondary heat zone with precise temperature control, 7) filament forming bushings, 8) sizing applicator, 9) strand formation station, 10) fiber tensioning station, 11) automated winding station.

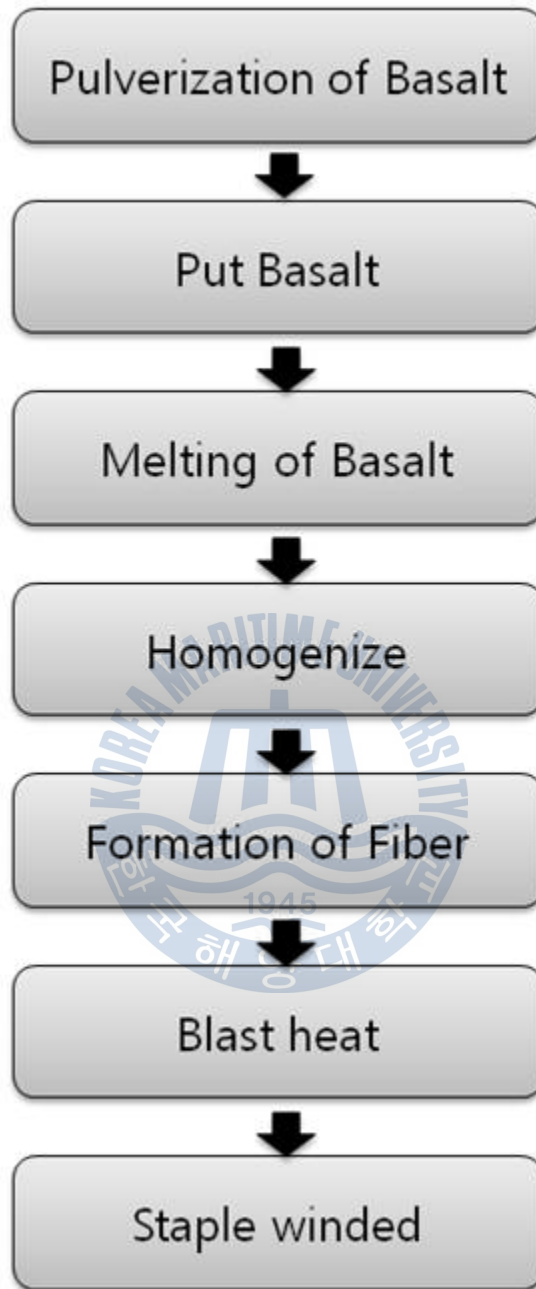


Fig. 3 Manufacturing process of the basalt staple fibers



Fig. 4 Application of basalt fibers

2.4 PTFE 코팅제의 특징 및 적용 분야

PTFE(Polytetrafluoroethylene)의 특징은 0.05~0.2 정도로 모든 고체 물질 중 가장 낮은 마찰계수를 나타내고, 융점 327°C의 결정성 고분자로, -260°C~+260°C의 온도에서 연속적으로 사용할 수 있는 유용한 기계적 성질을 유지한다는 것이다. 또한 PTFE는 화학적으로 불활성적이며 흡습성이 없어서 뛰어난 형상적 안정성을 갖고 준결정 고분자들 중에서 가장 높은 마모율을 보인다. [12-14] 또한 유기 재료 중 내약품성은 최고 수준으로 3불화염소, 불소가스, 용융알칼리금속을 제외한 모든 화학 용제에 용해되지 않는다. 뛰어난 전기 절연성과 난연성을 가지고 있으며 표면 저항을 또한 우수한 것이 특징이다. 이러한 특징들로 인하여 트라이볼로지 재료로 널리 사용되고 있다. Table 3 은 PTFE의 기계적 화학적 특성표를 나타낸다.

PTFE 코팅제는 불소 수지를 베이스로 한 도료로써 상온(자연건조)에서 무색투명의 불소계 도료의 특성을 갖춘 효과 높은 박막을 형성하고, 방식과 방청효과로 기재를 보호한다. 다음은 PTFE 코팅제의 특징을 나타낸다.

- 투명도막으로 원래의 색을 훼손하지 않는다.
- 자연건조로도 기재와의 밀착성(접착력)이 상당히 강력하다.
- 도막표면은 상온건조로도 건조가 가능하다.
- 불소수지 함유량이 많아 기밀성이 높고, 내약품성과 내마모성이 우수하다.

PTFE 코팅제는 스테인리스, 철, 동, 알루미늄 등의 금속부 뿐 만 아니라 도자기, 플라스틱, 염화비닐, FRP를 비롯해 목재나 고무부분까지 폭넓게 사용된다. 다음은 PTFE 코팅제의 적용분야를 나타낸다.

- 공업 재료소재, 산업용 전자기기
- 건축,토목,엔지니어링, 그 외 통신기기 소프트웨어
- 반도체액정, 자동차, 금속가공어셈블리, 민생용 전자기기
- 철강,비철금속, 물류수송기기, 정밀기기, 분석기기, 컴퓨터기기, 전송기기

Table 3 Mechanical and physical properties of PTFE

Characteristic		Unit	PTFE
Physical	Melting point	°C	220
	Specific gravity	-	2.03-2.2
Mechanical	Tensile strength	kgf/cm ²	315-420
	Compressive strength	%	320-520
	Impact strength	kgf/cm ²	13.6-14.7
	Rockwell hardness	kgfcm/cm	R75-80
	Shore hardness	-	D75-80
	Tensile	-	12.7-18.3
	elastic modulus	10 ³ kgf/cm ²	10.5-21
	Coefficient	10 ³ kgf/cm ²	0.37
	of kinetic friction	-	

3. 재료 및 실험 방법

3.1 실험 재료

현무암섬유강화 복합재료의 마찰 및 마모 특성 시험을 위해 본 연구에 사용된 보강재는 세코텍(SECOTECH)사에서 제조한 일방향 현무암섬유이다. Fig. 5에 실험에 사용된 섬유의 사진을 나타내었다.

기지재료는 Prepreg 와 VaRTM 공정에 사용하기 위해 국도화학 사에서 제조한 열경화성 수지인 Epoxy KFR121를 사용하였고 경화제는 KFH141 를 사용하였다. Prepreg는 Wet Prepreg 방식으로 제작하였으며 실험에 사용된 Epoxy 수지의 물성을 Table 4에 나타내었다.

마찰 및 마모 특성을 높이기 위해 사용한 코팅제로는 ACE 사에서 제조된 PTFE 코팅제인 JET PROTECTOR SPRAY (발수타입) 을 사용하였다. Fig. 6은 실험에 사용한 PTFE 코팅제품의 실제사진을 나타내었다.

Table 4 Property of epoxy resin for tests

ITEM (Measured at 25°C)	Equivalent Weight DIN EN ISO 3001	Density		Color	Viscosity	
		DIN	EN ISO		DIN	EN ISO
KFR-121	170~180	1675	1675	5 Max	2555	2555
ITEM (Measured at 25°C)	Total Amine Value KD-AS-201-01	Density		Color	Viscosity	
		DIN	EN ISO		DIN	EN ISO
KFH-141	500~700	1675	1675	5 Max	2555	2555

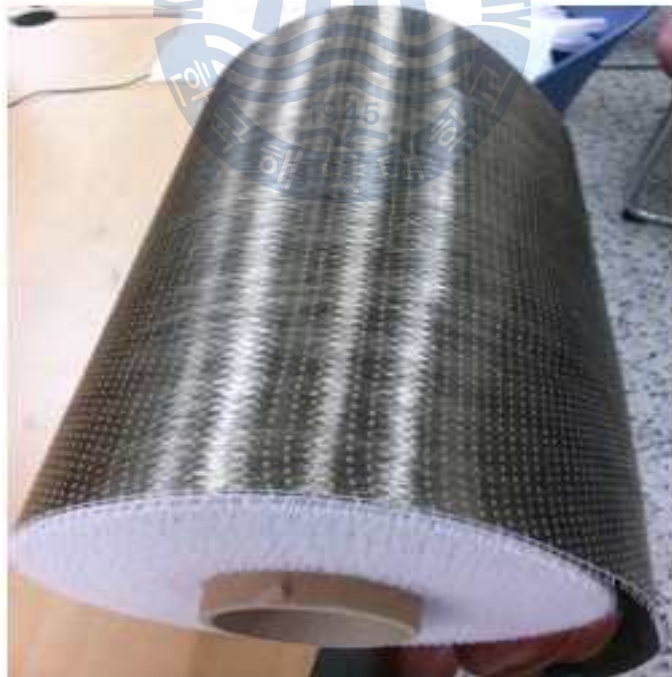
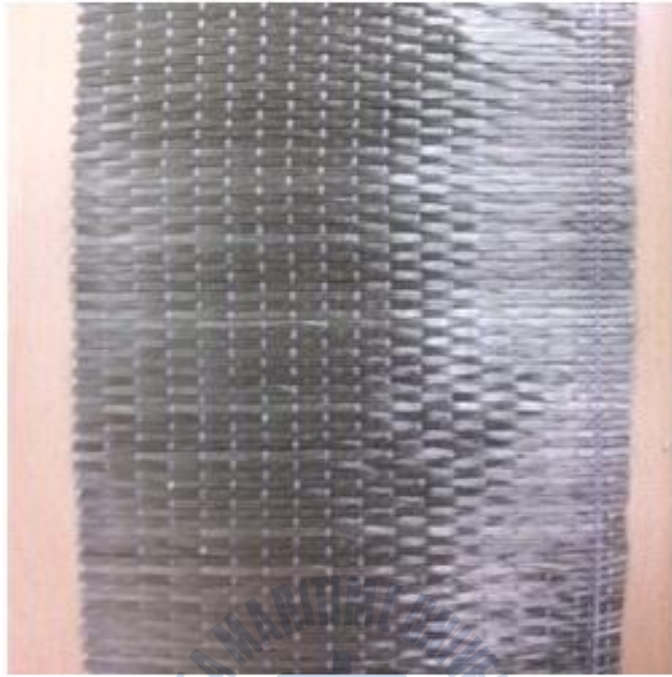


Fig. 5 Images of basalt fibers



Fig. 6 Images of coating agent

3.2 시험편 제작

복합재료의 성형에는 사용하는 재료의 종류 및 형태에 따라 성형 공법 및 성형 조건이 달라지며 성형품의 물성에도 큰 차이가 있다. 각 성형법에 대한 보다 효율적인 공정선택의 기준은 제품의 생산량, 크기와 형상의 대칭성, 보강섬유의 비강도와 비강성 및 표면처리 여부, 수지와와의 결합성 등을 들 수 있다. 생산성과 효율성을 고려한 공정선택 기준을 Fig. 7에 나타내었다.

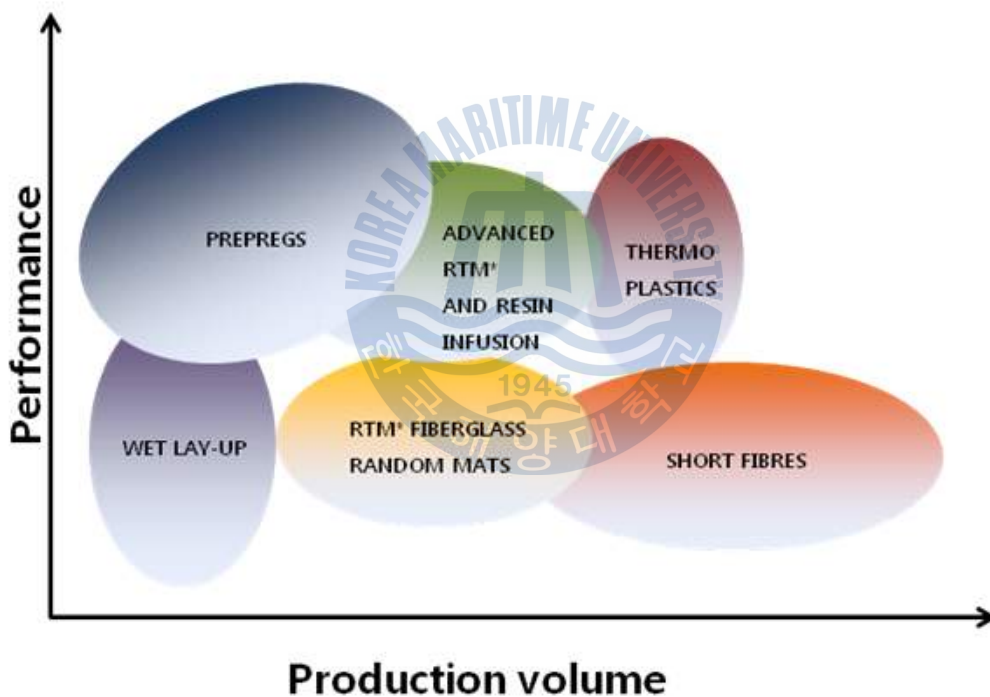


Fig. 7 Selection of effective process

3.2.1 Prepreg

Prepreg는 Pre-Impregnated material (미리 함침 된 재료)의 약어로서 강화섬유에 미리 수지를 함침 시킨 것이다. Prepreg는 약 42% 정도의 수지함유량을 가진다. 일반적으로 Prepreg에 사용되는 열경화성 수지의 경화는 다음의 A, B, C Stage 3단계로 진행이 된다. Fig. 8에 Prepreg 공정의 모식도를 나타내었다.

- (1) A-Stage: 수지와 경화제가 배합비에 따라 단순히 혼합만 된 상태로 경화반응이 전혀 일어나지 않는 상태
- (2) B-Stage: 수지와 경화제가 어느 정도 반응이 진행되어 점도가 급상승하여 용제에 의해 용해되지 않고 열에 의해 용융되어 Flow를 형성하는 단계
- (3) C-Stage: 수지와 경화제의 반응이 거의 끝나거나 완료된 단계로서 솔벤트나 열에 영향을 받지 않으며 소재의 경화가 이루어진 단계

Prepreg는 수지경화 단계 중 B-Stage로 경화시키고 저온에서 보관하여 더 이상의 반응을 지연시키는 것이다. 이것은 -18°C 정도의 온도에서도 느리게나마 경화반응이 계속되므로 저장시간 내에 사용해야 하며 저장 시한은 경화제의 종류와 온도에 영향을 받으며 수시간~6개월 정도가 일반적이다. [15,16]

Wet Prepreg 제작에 사용된 보강섬유는 현무암섬유를 사용했으며, Epoxy와 경화제는 KFR121/KFH141을 사용하였다. Epoxy 수지와 경화제의 비율은 제조회사에서 제공된 혼합 비율표에 따라 100:30의 비율로 혼합하였다. 수지와 경화제를 혼합한 후 수지 함침은 수지의 무게를 측정하여 42%의 수지 함침률로 비커와 롤러를 사용하여 함침 시켰다. 수지를 함침 시킨 섬유는 건조과정을 거쳐 냉장 보관하여 사용하였다.

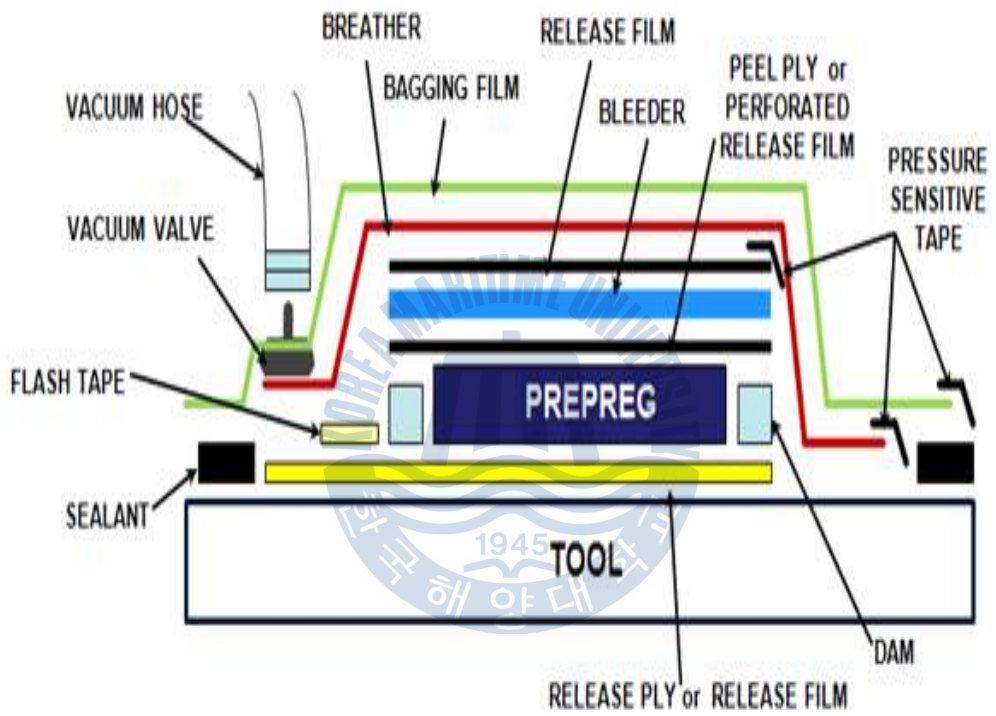


Fig. 8 Prepreg process

3.2.2 VaRTM (Vacuum-assisted Resin Transfer Molding)

RTM은 성형품 구조 중에서 섬유로 구성되는 부분인 preform을 미리 제작해두고 제작해 둔 preform을 금형에 장착해서 수지를 주입하는 방법으로 복합재료를 성형하는 방법이다. 그에 비해 VaRTM은 더욱 대형이며 생산 대수가 적은 성형품에 적합한 공법이다. 그리고 고품질과 높은 섬유함유율을 가지며, 형상이 복잡한 복합재료 구조물의 제작이 가능한 closed mold 기술이다.

VaRTM은 양쪽 면이 모두 금형으로 되어 있지 않고 한쪽면의 금형과 진공백으로 금형을 이루고 압력차를 이용하여 금형 내부에 적층된 preform에 수지를 신속하게 함침 시켜 복합재료 구조물을 성형하는 방법이다. Fig. 9에 VaRTM 공정의 모식도를 Fig. 10에 제작 과정을 나타내었다.

VaRTM 공정은 진공의 힘을 이용하여 수지가 주입되면서 금형 내부의 기포를 배출시키고, 대기압만큼의 힘으로 진공백 면을 통하여 수지의 압력이 가해져 제품 내부의 기공을 줄여주고 섬유 체적율을 높여준다. VaRTM 공법은 RTM 및 Autoclave 공법과 비교하여 성형비용이 적게 들고, Hand lay-up 공정보다 고품질의 제품 생산이 가능하다. [17,18]

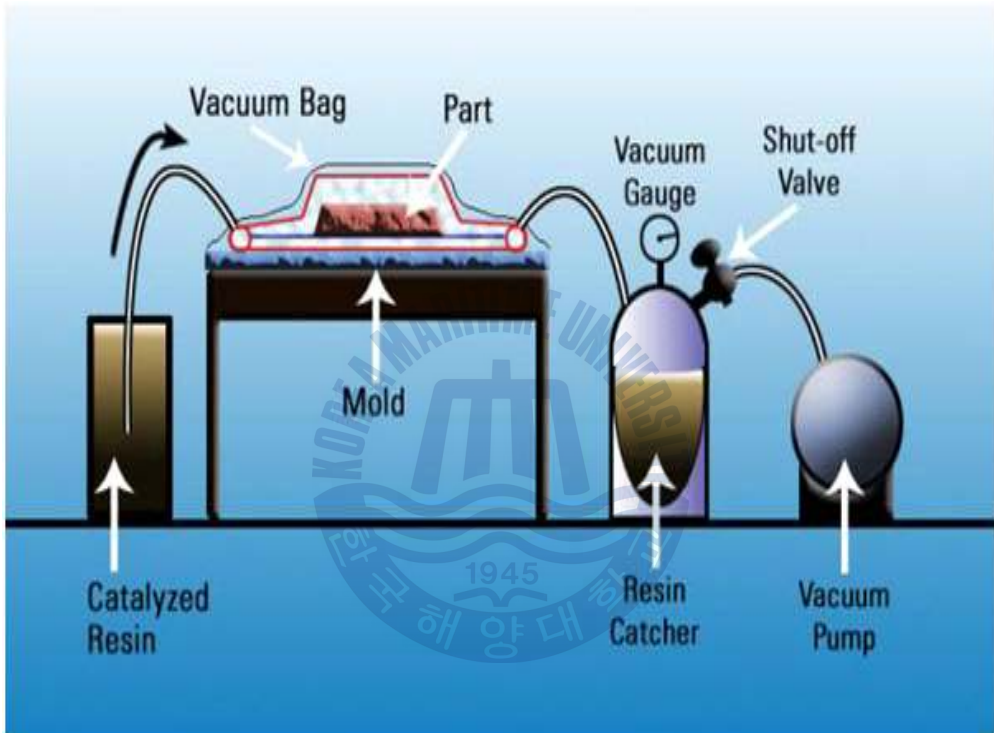


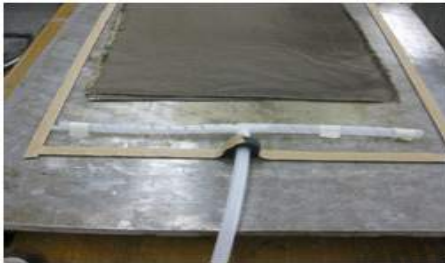
Fig. 9 VaRTM process



(a) Release Coating



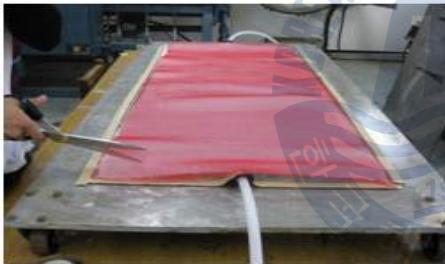
(b) Fiber lay-up



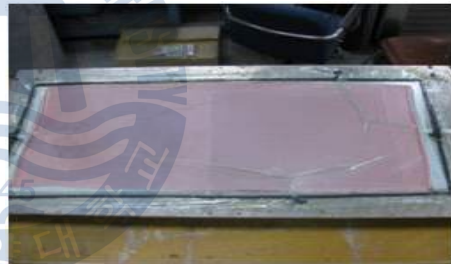
(c) Injection Line Setup



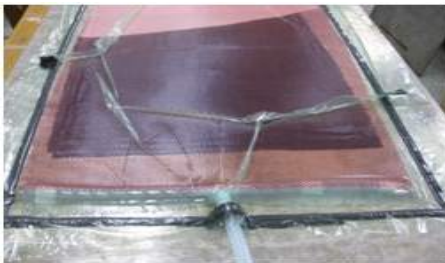
(d) Peel Ply



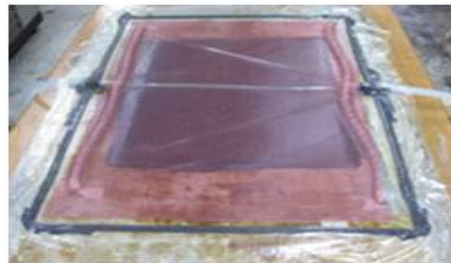
(e) Distribution Media



(f) Vacuum Bagging



(g) Resin Infusion



(h) Cure

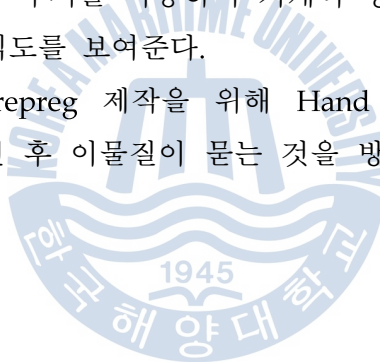
Fig. 10 VaRTM procedures

3.2.3 Hand lay-up

Hand lay-up 공정은 가장 오래된 성형법 중의 하나이다. Hand lay-up 공정은 강화재인 섬유를 적층하고 붓이나 롤러 등을 이용하여 수지를 함침 시키는 방법을 사용한다. 강화재를 한 층(layer)씩 금형 위에 적층하고 기지재료인 수지를 롤러 등의 도구를 사용하여 작업자가 직접 손으로 함침 시키면서 성형하는 방법으로 상온에서 방치하여 경화시키는 방법이나 생산 속도를 향상시키기 위해 금형에 가열 장치를 설치하여 경화 시간을 줄이는 방법도 병용하고 있다. 제조비용이 가장 저렴하고 공정이 쉽기 때문에 다양한 분야에 적용이 가능하다는 장점이 있다.

반면 비강도, 비강성이 낮아 고품질을 요구하는 제품 성형에는 부적합하다는 단점이 있다. 또한 인체에 유해한 작업환경 때문에 숙련공이 많지 않고 작업의 용이를 위해 점도가 낮은 수지를 사용하여 기계적 강도가 저하된다. Fig .11은 Hand lay-up 공정의 모식도를 보여준다.

본 연구에서는 Wet Prepreg 제작을 위해 Hand lay-up 공정을 이용하여 섬유에 수지를 함침 시킨 후 이물질이 묻는 것을 방지하기 위해 이형 필름을 붙여 보관하였다. [18]



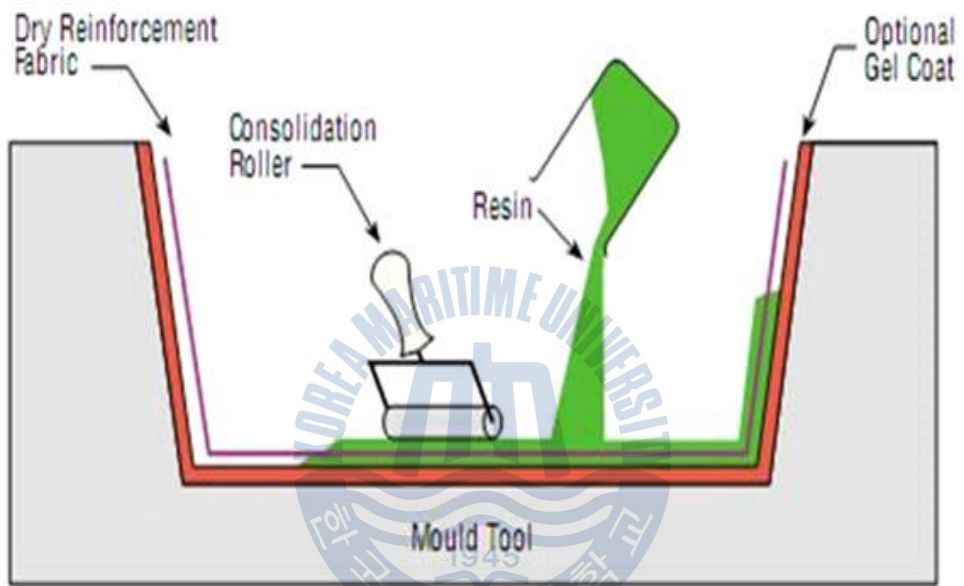


Fig. 11 Hand lay-up process

3.2.4 Autoclave

Autoclave 시스템은 여러 가지 제품을 성형하기 위해 특정한 계획에 따라 압력 용기 내에서 발생하는 복잡한 화학반응을 말한다. Autoclave란 Fig. 11에서와 같이 열과 압력을 동시에 가할 수 있는 가압로이다. 섬유강화 복합재료를 제작 할 경우 가장 일반적으로 사용되고 Prepreg를 이용하거나 항공기 최신 복합재료 부품의 판재 및 샌드위치 구조물은 대부분 Autoclave 공법을 이용하여 제작한다. 이 성형법은 크기가 아주 크거나 복잡하기 때문에 제품 생산 수량이 많지 않아 금형 제작이 어려운 경우에 사용된다. Autoclave를 이용한 성형법은 대형 부품의 제작이 가능하고 형태가 서로 다른 부품도 동시에 성형이 가능하다. 또한 하니콤 샌드위치 형태의 복합재료 성형에도 적합한 이점이 있다. 그러나 Autoclave에 의해 제작된 구조물의 내부결함을 최소화하고 층과 층 사이의 분리가 없고 적층 방향을 정확하고 균일하게 하기 위해서는 온도 및 압력 속도, 가열, 가압시기 및 유지시간을 고려한 최적의 공정을 설정하여야 한다. Fig. 12는 Autoclave의 형상을 보여준다.

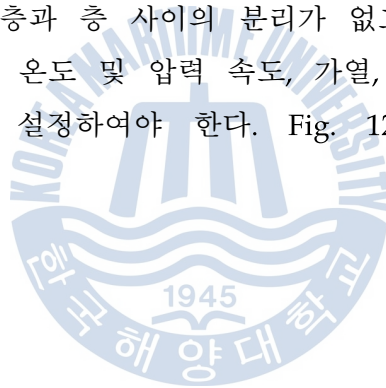




Fig. 12 Images of autoclave

3.3 실험 장치 및 방법

3.3.1 실험 장치 구성

본 연구에서는 볼-온-디스크 형 마찰 및 마모 시험기를 사용하였다. 시험편을 고정하고 볼(Cr)을 접촉 시킨 상태에서 하중을 가하여 시험편과 볼 사이에 작용하는 마찰력을 로드셀에서 측정하였다. 시험기의 원리는 모터에 의해서 실험 장치에 설치된 회전축이 회전하게 되며, 회전축에 고정시킨 디스크 시험편이 토크 암 끝부분의 시험편 홀더에 고정된 시험편과 미끄럼 접촉하며 회전하게 된다. 볼 시험편은 토크 암의 끝 부분에 만들어진 시험편 홀더에 고정되며, 토크 암의 반대쪽 끝에는 연직 방향과 회전 방향의 운동이 자유로운 운동 베어링이 부착되어 직선 운동 베어링 안내축에 끼워져 있다. 따라서 두 마찰면 사이에서 발생하는 마찰력은 직선 운동 베어링 안내축을 중심으로 하여 토크암을 회전시키는 토크로 작용하게 된다. 마찰력은 토크에 의한 운동을 로드셀로 구속함으로써 측정할 수 있다. [19-21] Fig. 13은 마찰 및 마모 실험용으로 제작된 볼-온-디스크 형 실험 장치의 모습이다. 이 장치의 주요 사항은 Table 5 에 나타내었다.

Table 5 Main specifications of ball-on-disk tribometer

Load resolution [mN]	Maximum friction force [N]	Friction resolution [mN]	Speed [rpm]	Maximum test radius [mm]
30 mN	10 N	5 mN	0.3~500 rpm	30 mm

Table 6 The experimental conditions of friction and wear

Normal load [N]	Lin. Speed [cm/s]	Stop condit. [m]	Time [s]	Radius [mm]
10 N	15 cm/s	200 m	2000 s	3 mm



Fig. 13 Images of ball-on-disk tribometer

3.3.2 실험 방법

본 연구에서는 PTFE 코팅에 따른 현무암 섬유강화 복합재료의 트라이볼로지 특성을 확인하기 위해서 3가지 방법으로 실험을 진행하였다. 먼저 현무암 섬유강화 복합재료의 공정법에 따른 시험편을 제작하였고 기초적인 트라이볼로지 특성 파악을 위하여 방향성은 주지 않았다. 실험은 Prepreg 공정과 VaRTM 공정을 이용하여 시험편을 제작하고 물성을 비교하였다. Wet Prepreg 제작에는 보강섬유로 현무암섬유를 사용했으며, Epoxy와 경화제는 KFR121/KFH141을 사용하였다. Epoxy 수지와 경화제의 비율은 100:30의 비율로 혼합하였다. 수지와 경화제를 혼합한 후 수지 함침은 수지의 무게를 측정하여 42%의 수지 함침률로 비이커와 롤러를 사용하여 함침 시켰다. 수지를 함침 시킨 섬유는 건조과정을 거쳐 냉장 보관하여 사용하였다. 다음으로 섬유 방향성이 트라이볼로지 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 기초 물성 연구로 얻어진 결과를 바탕으로 섬유 방향성을 달리하여 물성이 더 우수한 Prepreg 공정을 이용하여 시험편을 제작하였다. Fig. 14 는 Prepreg 적층 방법을 나타내고 있고, Fig. 15는 공정에 따른 제작된 시험편의 형상을 보여준다.

섬유 방향성은 3가지 조건(0° , $0^\circ/90^\circ$, $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$)을 주어 각각의 조건에 맞게 섬유를 적층하고 시험편을 제작하였다. Case 1은 0° 방향으로만 적층하였을 경우, Case 2는 $0^\circ, 90^\circ$ 로 적층한 경우 그리고 Case 3는 $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ 로 적층한 경우이다. 마지막으로 PTFE 코팅이 트라이볼로지 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 섬유 방향성에 따라 제작된 각각의 시험편에 PTFE 코팅 처리를 하여 코팅이 되지 않은 시험편과 비교 분석 하였다. PTFE 코팅은 표면 세정과 표면처리, 코팅 후 건조과정을 3번 반복하여 시험편 표면에 코팅 처리를 하였다. 모든 과정을 거쳐 제작된 시험편은 트라이볼로지 특성 연구를 위해 Ball-on-Disk Tribometer를 통해 실험을 진행하였다. 공정에 따라 제작된 현무암 섬유강화 복합재료와 코팅 처리된 시험편을 시료로 사용하였으며, 상대 마모재료로는 크롬(Cr) 볼을 사용하여 Ball-on-Disk 방식으로 마찰 및 마모실험을 수행하였다. 마찰 및 마모시험은 10N의 수직 하중을 부과하고 회전속도는 15cm/s, 477rpm을 적용하였다. 데이터는 매초당 샘플링 되어

저장되었으며 각 시험별로 7개씩의 시험편으로 측정된 결과값의 최고와 최저치를 제외한 나머지 5개 시험편에 대한 결과값의 평균치를 취하였다. 시험에 사용된 주요 조건을 Table 6에 나타내었고, 마찰계수의 비교를 위해 다양한 재료의 평균 마찰계수를 Table 7에 나타내었다. 트라이볼로지 특성 시험을 실시한 후 섬유와 마모 정도를 확인하기 위하여 마모면 주위를 SEM(Scanning Electron Microscopy)을 이용하여 관찰 하였다. 이때 배율은 1000배와 8000배로 하였다. [21-25]

Table 7 Average friction coefficients of various materials

Cu-10% Fe-10% Sn	Carbon/PEEK	SM45C	Glass15%/Nylon
[μ]	[μ]	[μ]	[μ]
0.51	0.25	0.53	0.42



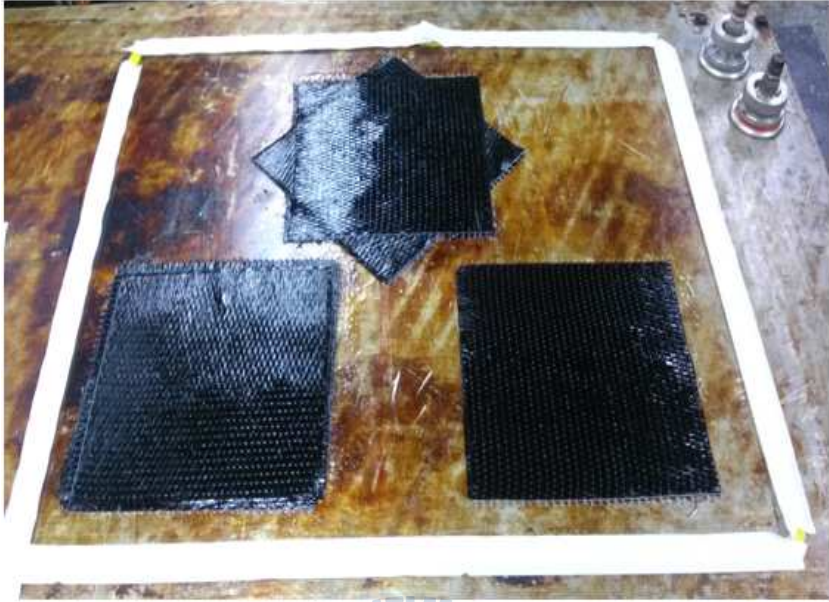


Fig. 14 Prepreg lay-up method

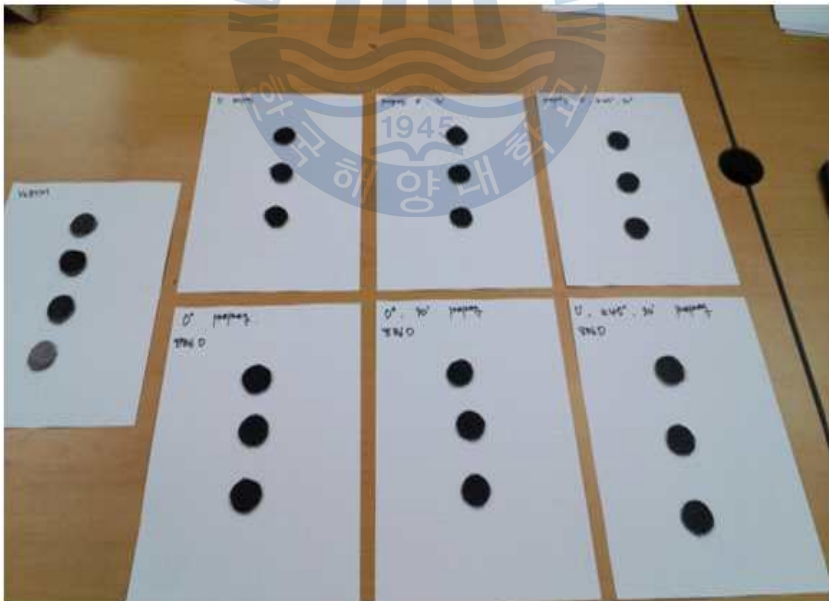


Fig. 15 Images of specimens

4. 연구 결과 및 고찰

4.1 공정법에 따른 마찰 및 마모 시험 결과

성형 공정에 따른 트라이볼로지 시험 결과를 확인해보면 Prepreg 공정을 사용하여 제작된 현무암 섬유강화 복합재료 시험편의 마찰계수가 0.4104μ 로 측정되었고 VaRTM 공정을 사용하여 제작된 시험편의 마찰계수는 0.5472μ 로 측정되었다. 마찰계수를 비교해보면 Prepreg 공정을 이용하여 제작된 시험편이 VaRTM 공정을 이용하여 제작된 시험편보다 낮게 측정됨을 확인할 수 있었고, 마찰계수 그래프를 보면 시험 초기에는 마찰계수가 급격히 증가했다가 일정 시간이 경과하면 어느 정도 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

4.1.1 Prepreg / VaRTM 공정에 따른 마찰 및 마모 특성 분석

공정법에 따른 트라이볼로지 시험 결과를 분석해보면 섬유강화 복합재료를 제작하는데 있어서 공정법에 의해 기계적 물성이 크게 달라짐을 확인할 수 있었다. 본 연구에서도 Prepreg 공정을 이용하여 제작된 시험편이 VaRTM 공정을 이용하여 제작된 시험편보다 우수한 트라이볼로지 특성을 나타내었다. 이는 VaRTM 공정으로 제작된 시험편보다 Prepreg 공정을 이용해 제작된 시험편이 공정상의 장점으로 내부결함을 최소화시킬 수 있었고 층과 층 사이의 분리가 없었기 때문으로 판단된다. 또한 Prepreg 로 제작된 시험편이 섬유 함유율이 더 높고 적층 방향을 정확하고 균일하게 하여 더 좋은 시험편 제작이 가능했기 때문으로 사료된다. Fig. 16에 공정법에 따른 마찰계수의 그래프를 나타내었다. 그래프를 분석해보면 시험 초기에는 마찰계수가 급격히 증가했다가 일정 시간이 지나면 마찰계수가 어느 정도 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 트라이볼로지 시험이 진행되면서 시험 초기에는 섬유와 수지의 표면이 마모되면서 인장응력을 받아 마찰계수의 급격한 증가를 보이고 일정

시간이 경과하면 마모된 표면에 더 이상 인장응력이 작용하지 않아서 마찰계수가 다소 낮아지는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 또한 상대 마찰면인 크롬볼이 회전함으로 인하여 마찰재료인 현무암 섬유 복합재료의 접촉 표면에서 delamination이 일어나 상대 마찰면에 물질이착막(Wear transfer film)이 생성되어 결과적으로 다소 낮아진 마찰계수가 큰 변화 없이 어느 정도 수렴하는 것으로 사료된다.



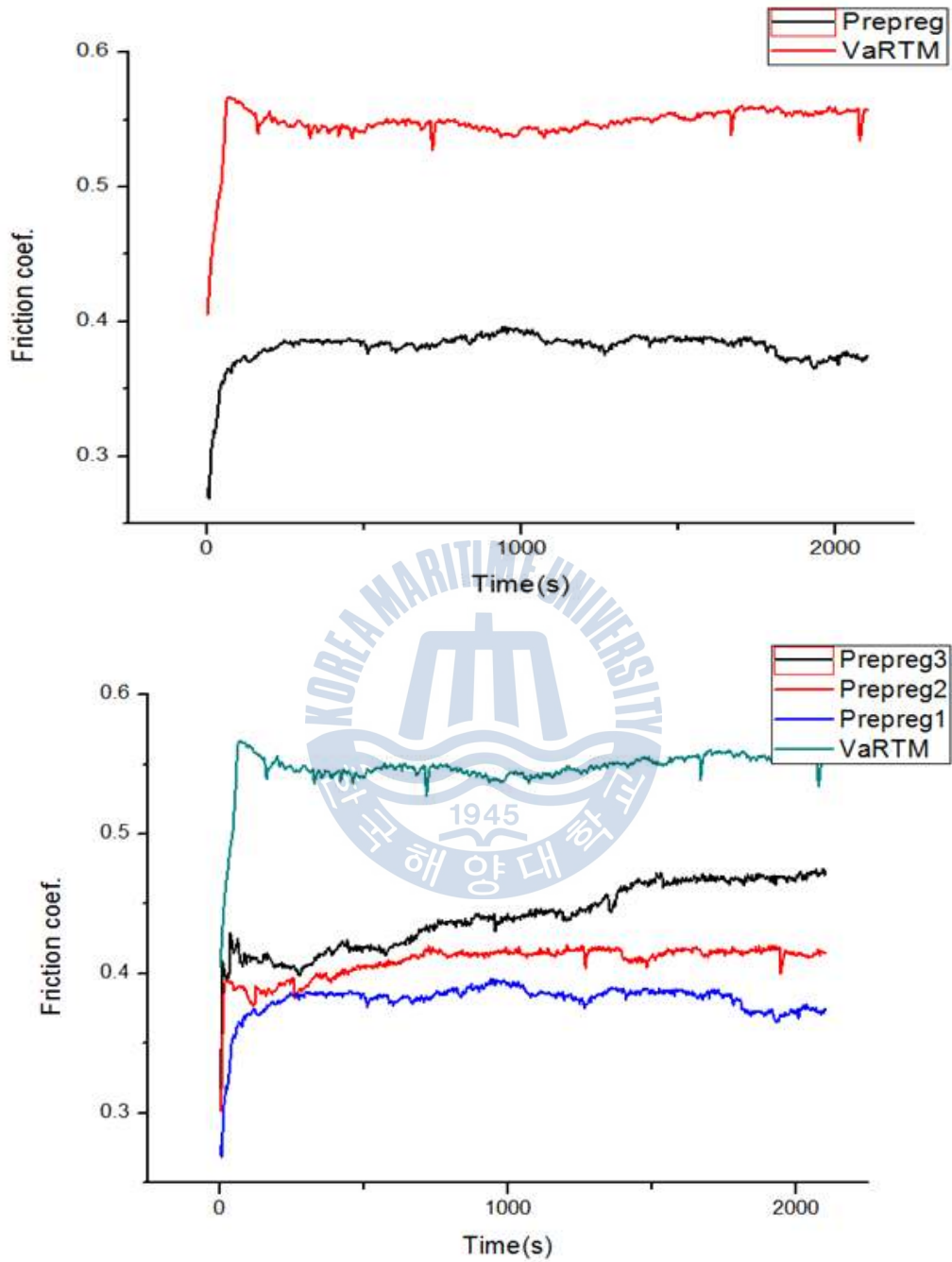
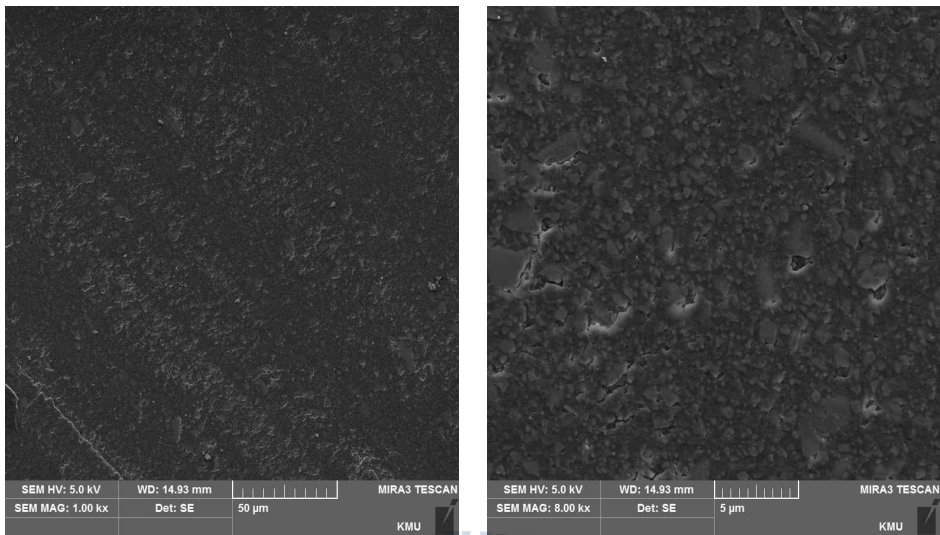


Fig. 16 Friction coefficient by prepreg/VaRTM process

4.1.2 마찰 단면 관찰

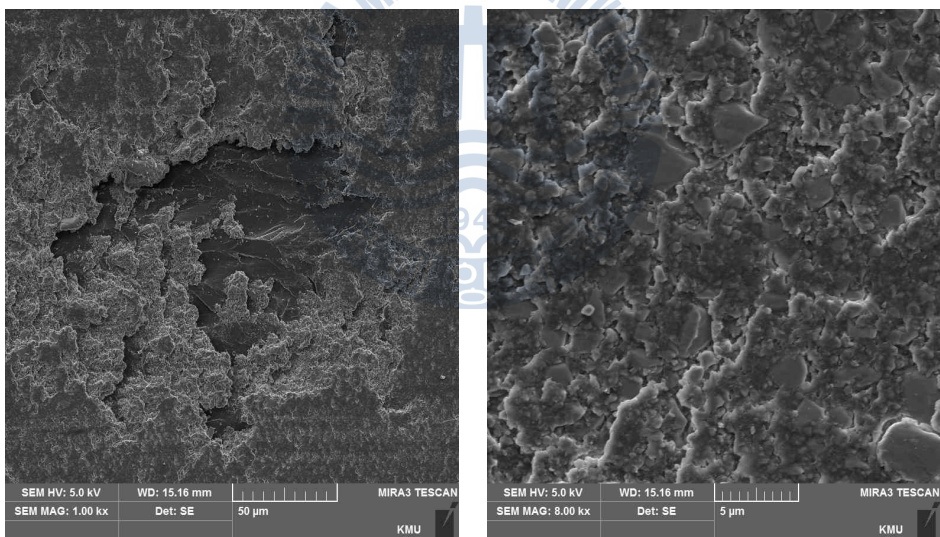
공정법에 따른 마찰단면을 SEM 사진을 통해 분석해 본 결과 모든 시험편에서 수지 부분에 작은 균열들이 발생하고 섬유와 수지의 결합이 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다. 이 상태에서 시험편이 반복 하중을 받게 되면 마찰면 부분에서 많은 마찰열까지 추가로 발생하기 때문에 재료의 열화에 의해서 섬유는 깨어지고 탈락하는 현상이 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 17 은 각 공정법에 따른 마찰 단면을 SEM을 사용하여 1000배와 8000배로 관찰한 사진을 나타낸다.

VaRTM 공정을 통해 제작된 시험편은 입자가 고르고 단면이 매끄러운 것을 확인할 수 있고 반면에 Prepreg 공정으로 제작된 시험편은 표면이 거칠고 입자가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 Prepreg 공정으로 제작된 시험편이 마찰계수가 낮아 수지와 섬유 부분이 VaRTM을 통해 제작된 시험편보다 마모되는 정도가 작기 때문이며 결과적으로 같은 하중과 시간동안 마모되는 정도가 달라져 수지와 섬유들이 큰 입자를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 또한 VaRTM 공정으로 제작된 시험편에서는 탈락된 섬유가 마찰면 사이에서 부서지게 되어 이것이 연삭 마찰 성분으로 작용해 마찰계수가 증가한 것으로 판단된다.



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig. 17 SEM micrographs of wear test by prepreg/VaRTM process

(a) VaRTM-1kx (b) VaRTM-8kx

(c) Prepreg Case1-1kx (d) Prepreg Case1-8kx

4.2 섬유 배향각에 따른 마찰 및 마모 시험 결과

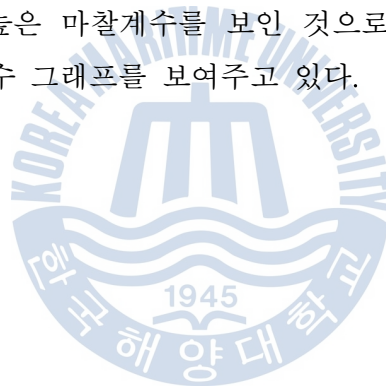
섬유 배향에 따른 마찰계수의 변화는 수치상의 많은 차이를 나타내지는 않았지만 전반적으로 Case1 (0°), Case2 ($0^\circ/90^\circ$), Case3 ($0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$) 순으로 낮은 마찰계수가 나타남을 확인할 수 있었다. Case1은 평균 마찰계수가 0.3812μ 로 가장 낮게 측정되었고, Case2는 0.4088μ 그리고 Case3에서는 0.4411μ 로 가장 높게 측정 되었다. 마찰계수 그래프를 살펴보면 모든 시험에서 비슷한 결과를 보였는데 섬유 배향각에 따른 시험도 시험 초기에는 급격한 증가를 보이다가 일정 시간이 경과한 후 부터는 어느 정도 값이 수렴하는 것을 확인 할 수 있었다.

4.2.1 배향각에 따른 마찰 및 마모 특성 분석

섬유 배향에 따른 트라이볼로지 특성을 분석해보면 섬유배향각에 따라서 트라이볼로지 특성이 수치상의 많은 차이는 보이지 않지만 분명한 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 복합재료의 일반적인 마찰 현상을 분석해보면 시험편에 지속적인 하중이 전달되면 마찰 물질에 플라스틱 전단변화가 야기되고 표면 밑에 crack 이 발생하여 이미 존재하고 있었던 빈틈이나 주변에 이미 발생하였던 crack과 결합하는 현상이 일어나게 된다. 결국 결합된 crack 의 성장이 일어나 최종적으로는 층간박리(delamination) 현상이 나타나게 된다. 그러나 본 연구에서는 현무암 섬유와 매트릭스인 에폭시가 불연속면이므로 섬유와 에폭시 수지가 접촉하고 있는 면에서 crack 이 먼저 일어나기 때문에 계면분리(debonding) 현상이 발생하게 된다. 또한 현무암 섬유의 방향이 마찰면에 수직(normal)이 아닌 수평(parallel)인 경우의 debonding 은 마찰면과 섬유의 접촉면적이 상대적으로 크다고 볼 수 있기 때문에 현무암 섬유와 에폭시의 접촉면에서 많이 발생하게 된다.

결과적으로 적층방향과 접촉면이 수평(parallel)인 경우 상대 마찰면과 현무암 섬유의 접촉면적은 동일하지만 적층되어 있는 현무암 섬유의 이방성에 따라 인장강도가 굽힘강도에 비해 높은 값을 가지게 되고, 이러한 기계적 물성의 차이에 의해서 현무암 섬유의 배향방향에 따라 트라이볼로지 거동이 상이하게 나타내는 것으로 사료된다.

그래프를 분석해보면 모든 Case에서 첫 layer는 0°의 동일한 방향을 가지고 적층되어 있기 때문에 마찰계수는 표면의 첫 layer가 모두 마모되기 전에는 비슷한 값을 나타내지만 0°방향의 layer가 완전히 마모되어 버린 후에는 다른 layer가 0°,45°또는 90°로 각각 다른 방향이기 때문에 두 번째 layer부터는 상이한 기계적 물성에 의해 각기 다른 트라이볼로지 특성을 갖게 된다. Case1에서는 첫 번째와 두 번째 layer가 동일한 방향을 갖기 때문에 인장응력을 받는다. 또한 상대 마찰면과 현무암 섬유와의 접촉 면적이 작아져 debonding이 일어날 확률이 극히 낮아지기 때문에 가장 낮은 마찰계수를 보이는 것으로 판단된다. Case2에서는 인장응력을 받기는 하지만 90°라는 방향성이 그다지 큰 영향을 미치지 못하고 Case1과 Case3의 중간 값 정도로 나타났다. Case3에서는 현무암 섬유에 인장응력과 굽힘응력이 동시에 작용하고 상대 마찰면과 현무암 섬유와의 접촉 면적이 커지기 때문에 debonding 이 일어날 확률이 높아져 높은 마찰계수를 보인 것으로 사료된다. Fig. 18에서는 배향각도에 따른 마찰계수 그래프를 보여주고 있다.



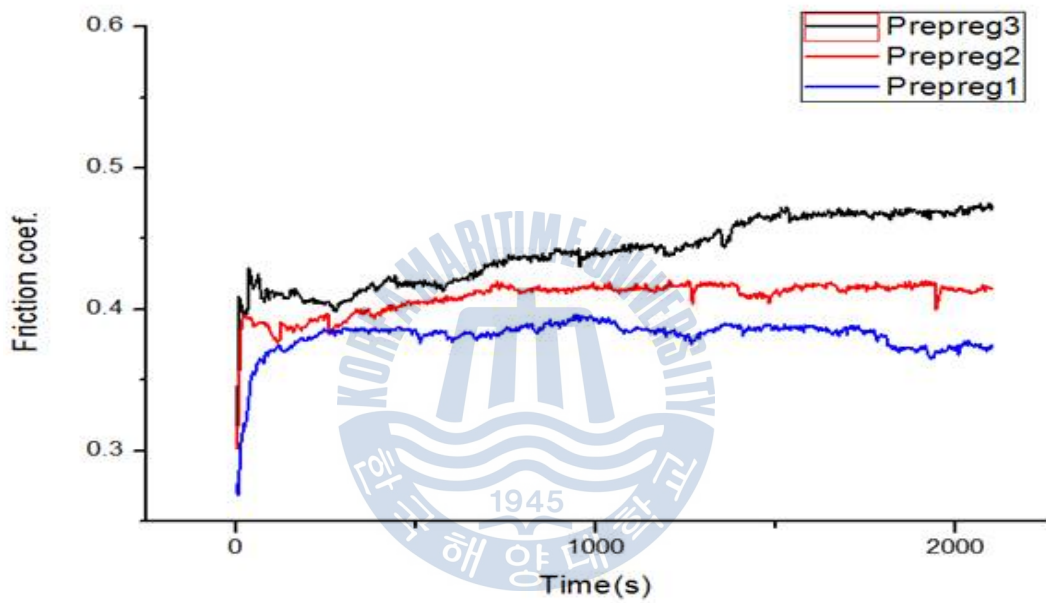


Fig. 18 Friction coefficient by fiber orientation

4.2.2 마찰 단면 관찰

섬유배향에 따른 마찰단면을 SEM 사진을 통해 분석해 본 결과 crack에 성장으로 인한 delamination 현상과 섬유와 수지가 접촉하고 있는 면에서의 debonding 현상이 일어나는 것을 확인 할 수 있었다. Case1에서는 상대 마찰면과 현무암 섬유와의 접촉 면적이 작아져 debonding 현상이 적게 발생하여 때문에 마찰계수가 작고 수지와 섬유 입자가 큰 것을 확인할 수 있으며 Case2는 Case1과 Case3의 중간정도의 마찰 단면을 보여준다. Case3에서는 상대 마찰면과 현무암 섬유와의 접촉 면적이 커지기 때문에 확실히 debonding 현상이 많이 발생하여 수지와 섬유의 입자가 작고 고른 것을 확인 할 수 있다. Fig. 19는 섬유 배향각에 따른 마찰 단면을 SEM을 사용하여 1000배와 8000배로 관찰한 사진을 보여준다.



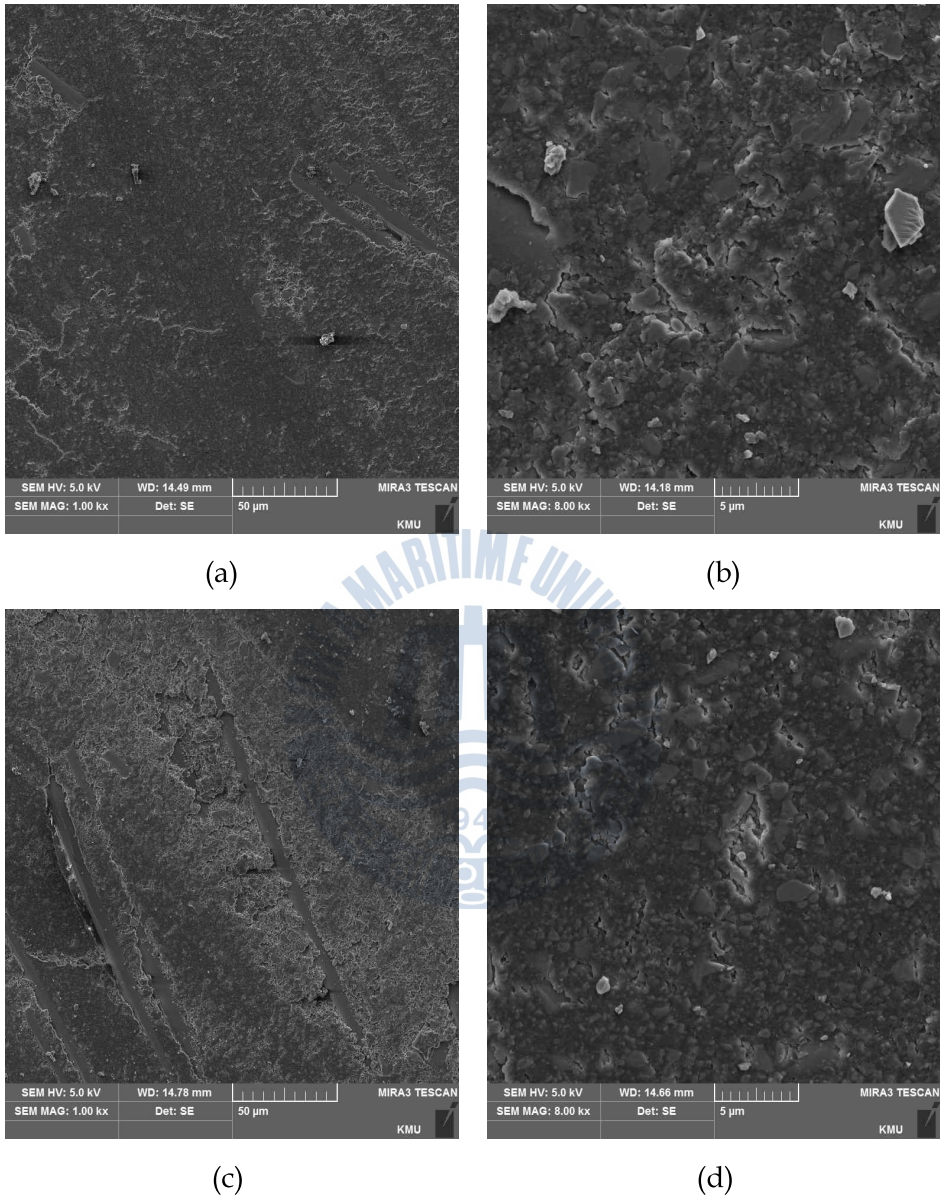


Fig. 19 SEM micrographs of wear test by fiber orientation

(a) Prepreg Case2-1kx (b) Prepreg Case2-8kx

(c) Prepreg Case3-1kx (d) Prepreg Case3-8kx

4.3 PTFE 코팅에 의한 마찰 및 마모 시험 결과

공정법에 따른 트라이볼로지 특성 결과 Prepreg 공정을 사용하여 제작한 시험편의 트라이볼로지 특성이 우수하다는 것을 앞선 실험을 통해 확인할 수 있었다. 그러나 트라이볼로지 특성을 향상시켜 더 낮은 마찰계수를 얻기 위해 본 연구에서는 시험편에 PTFE 코팅 처리를 하였다. Prepreg 공정을 사용하여 제작한 시험편에 PTFE 코팅 처리를 한 결과 일반적인 Prepreg 공정법에 의해 제작된 시험편보다 0.18μ 정도 낮은 마찰계수를 갖는 것을 확인할 수 있었다. PTFE 코팅 처리를 한 시험편의 평균 마찰계수는 평균 0.2307μ 로 전체 시험편 중에서 가장 낮은 측정값을 보였다.

4.3.1 PTFE 코팅에 의한 마찰 및 마모 특성 분석

PTFE Coating 에 의한 트라이볼로지 특성을 분석해보면 PTFE 코팅 처리로 인해서 트라이볼로지 특성이 매우 우수해 지는 것을 알 수 있다. 마찰계수는 앞선 실험과 마찬가지로 Case1 (0°), Case2 ($0^\circ/90^\circ$), Case3 ($0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$) 순으로 낮게 측정되었다. Case1은 마찰면과 현무암 섬유와의 접촉 면적이 작아 debonding 현상이 일어날 확률이 적고 마모에 의해 잘게 부서진 PTFE 코팅 입자들은 불의 표면이나 수지와 섬유 부분에 박히게 되어 코팅막을 형성하기 때문에 마찰계수가 낮아지는 것으로 판단된다. Case2는 다른 실험들과 마찬가지로 Case1과 Case3의 중간 정도의 트라이볼로지 특성을 나타냈다. 마지막으로 Case3에서는 마찰면과 현무암 섬유와의 접촉 면적이 커지기 때문에 섬유의 파괴와 탈락 연삭마모 흔적이 더 심해지게 되고 결국 불 표면에 일부 코팅막이 형성되더라도 마모 입자에 의한 연삭작용에 의해서 코팅막이 약간 제거된 것으로 사료된다. 그래프를 분석해보면 시험 초기에는 시험편 표면에 처리되어 있는 코팅막에 의해서 이 코팅막이 제거되는 과정으로 인해 마찰계수가 약간 증가하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 마찰계수가 점차 낮아지고 어느 정도 시간이 경과하면 마찰계수가 일정 값에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이는 잘게 부서진 PTFE 코팅 입자들은 불의 표면이나 틈이 발생한 수지와 섬유 부분에 박히게 되거나 또는 연삭된 부분 사이에 끼여 점차 두터운 코팅막을 형성하게 되었기 때문으로 추측된다. 또한

코팅막 형성으로 인해 윤활 특성이 좋은 코팅막을 사이에 두고 서로 상대 운동을 하게 되므로 결과적으로 마찰계수가 낮아지게 된 것으로 사료된다. Fig. 20은 PTFE 코팅에 의한 마찰계수 그래프를 보여준다.



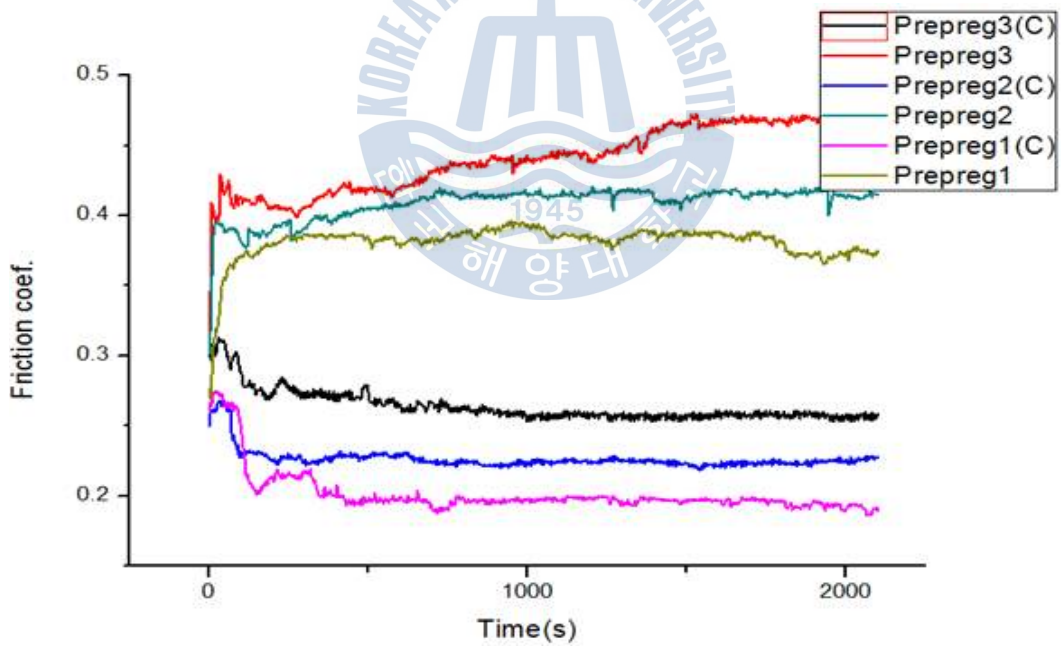
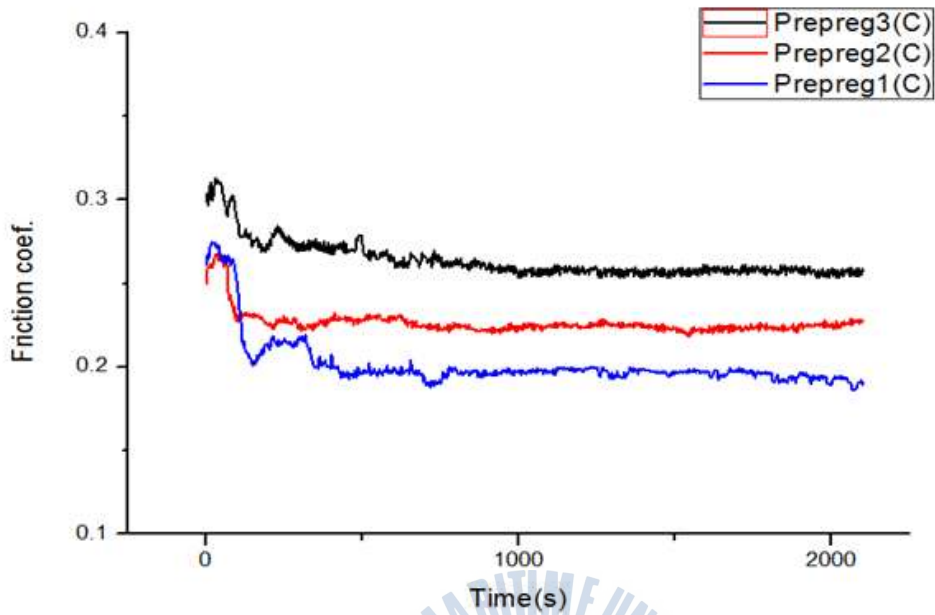


Fig. 20 Friction coefficient by PTFE coating

4.3.2 마찰 단면 관찰

Prepreg 공정법으로 제작된 시험편의 SEM 사진을 분석해본 결과 매트릭스 부분에 작은 균열들이 발생하고 섬유와 매트릭스의 결합이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 마찰면의 마찰열까지 추가로 발생하고 열화에 의해서 섬유는 깨어지고 탈락하는 현상이 발생하게 되는 것도 이미 확인하였다. 그러나 PTFE 코팅 처리를 한 시험편의 경우에는 잘게 부서진 PTFE 코팅 입자들은 불의 표면이나 틈이 발생한 수지와 섬유 부분에 박히게 되어 마찰 단면이 코팅입자들로 인해 많은 부분 메워져 있는 것이 보인다. 이는 마찰계수를 낮추는 중요한 요인으로 작용하는 것으로 판단되며 또한 연삭된 부분 사이에 끼여 두터운 코팅막을 형성하고 있는 모습도 사진을 통해 확인할 수 있다. Fig. 21은 PTFE 코팅에 따른 마찰 단면을 SEM을 사용하여 1000배와 8000배로 관찰한 사진이다.



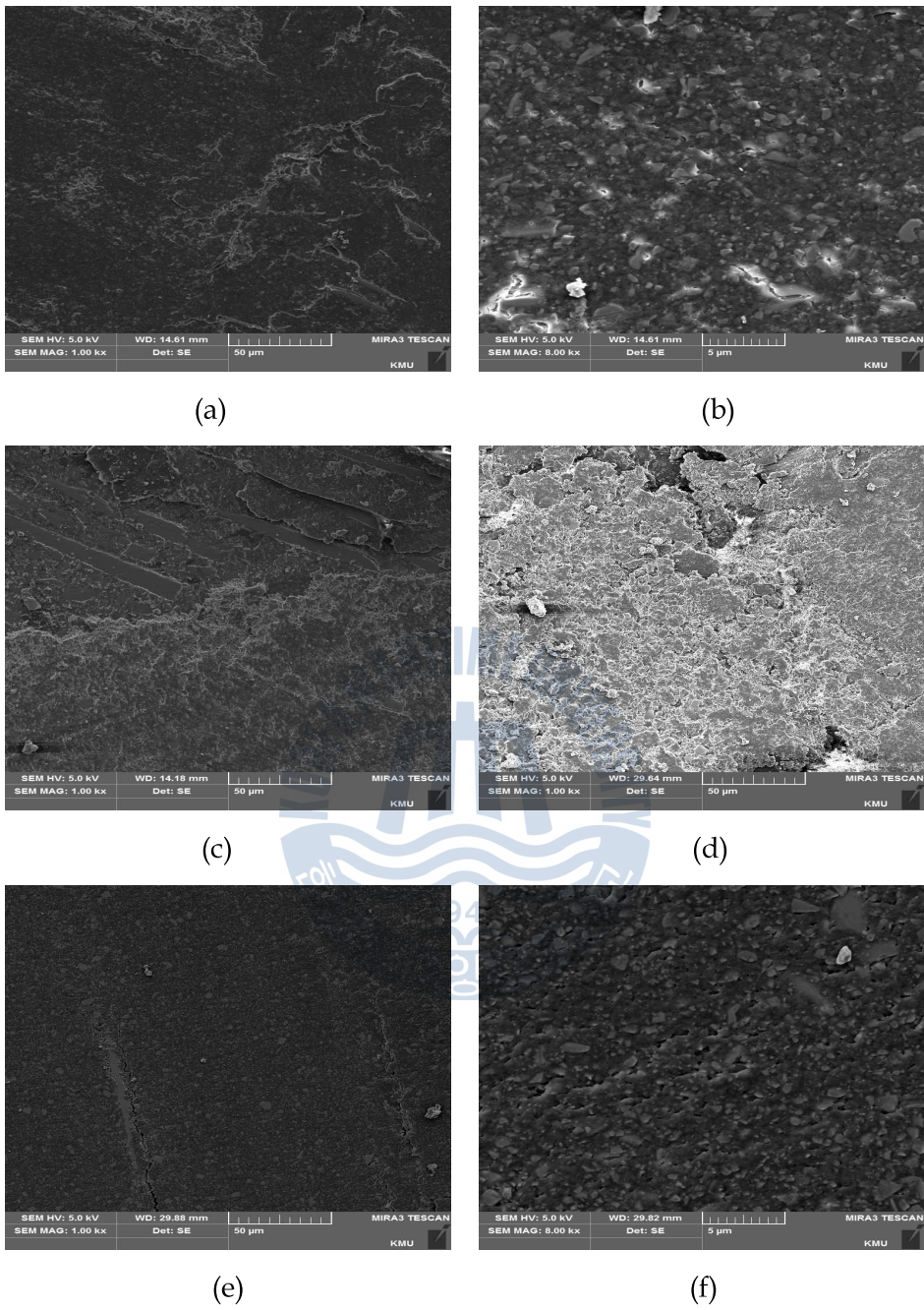


Fig. 21 SEM micrographs of wear test by PTFE coating
 (a) Prepreg Coating Case1-1kx (b) Prepreg Coating Case1-8kx
 (c) Prepreg Coating Case2-1kx (d) Prepreg Coating Case2-8kx
 (e) Prepreg Coating Case3-1kx (f) Prepreg Coating Case3-8kx

5. 결론

본 연구에서는 복합재료 성형 공정에 따라 최적화된 시험편을 제작한 뒤 섬유배향각에 따른 트라이볼로지 특성 시험을 진행하고 마모된 마찰 단면을 분석하였다. 또한 재료 표면의 PTFE Coating 처리를 하여 우수한 내마모성으로 인한 기계 부품의 수명연장, 낮은 재료비용을 통한 적용분야의 확대가 가능한지를 검증해보고 섬유 배향과 코팅의 유무가 마찰특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 그 결과 각각의 조건들이 현무암 섬유강화 복합재료의 트라이볼로지 특성에 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었으며, 본 연구를 수행하면서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) VaRTM 공정보다 Prepreg 공정을 이용하여 제작된 시험편이 우수한 트라이볼로지 특성을 나타내었다. 이는 Prepreg 공정상의 장점으로 인해 내부결함을 최소화시킬 수 있었고 층과 층 사이의 분리가 없었기 때문으로 판단된다. 또한 더 높은 섬유 함유율과 적층 방향을 정확하고 균일하게 하여 우수한 시험편 제작이 가능했기 때문으로 사료된다.

(2) 시험 초기에는 마찰계수의 급격한 증가를 보이고 일정 시간이 경과하면 다소 낮아지다 큰 변화 없이 어느 정도 수렴하는 경향을 보이는 것은 상대 마찰면인 크롬볼이 회전함으로 인하여 마찰재료인 현무암 섬유 복합재료의 접촉 표면에서 delamination이 일어나 상대 마찰면에 물질이착막(Wear transfer film)이 생성되었기 때문으로 사료된다.

(3) 0°의 동일한 방향을 가지고 적층되어 있는 layer가 모두 마모되어 버린 후에는 다른 layer가 0°,45°또는 90°로 각각 다른 방향으로 적층되어 있기 때문에 상이한 기계적 물성에 의해 현무암 섬유의 배향방향에 따라 각기 다른

트라이블로지 특성을 갖게 된다.

(4) Case1에서는 첫 번째와 두 번째 layer가 동일한 방향을 갖기 때문에 인장응력을 받는다. 또한 상대 마찰면과 현무암 섬유와의 접촉 면적이 작아져 debonding이 일어날 확률이 극히 낮아지기 때문에 가장 낮은 마찰계수를 보이는 것으로 판단된다. Case2에서는 인장응력을 받기는 하지만 모든 시험에서 90°라는 방향성이 그다지 큰 영향을 미치지 못하고 Case1과 Case3의 중간 값 정도로 나타났다. Case3에서는 현무암 섬유에 인장응력과 굽힘응력이 동시에 작용하고 상대 마찰면과 현무암 섬유와의 접촉 면적이 커지기 때문에 debonding 이 일어날 확률이 높아져 높은 마찰계수를 보인 것으로 사료된다.

(5) SEM을 통해 마찰단면을 분석해 본 결과 모든 시험편에서 수지 부분에 작은 균열들이 발생하고 섬유와 수지의 결합이 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다. 이 상태에서 반복 하중을 받게 되면 마찰면 부분에서 많은 마찰열까지 추가로 발생하기 때문에 재료의 열화에 의해서 섬유는 깨어지고 탈락하는 현상이 관찰되는 것으로 판단된다.

(6) 마모되어 잘게 부서진 PTFE 코팅 입자들은 볼의 표면이나 틈이 발생한 수지와 섬유 부분에 박히게 되거나 또는 연삭된 부분 사이에 끼여 점차 두터운 코팅막을 형성하게 된다. 또한 코팅막 형성으로 인해 윤활 특성이 좋은 코팅막을 사이에 두고 서로 상대 운동을 하게 되므로 결과적으로 마찰계수가 낮아지게 된 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] 김윤해, 한중원 공저, 복합재료학, 효성출판사, pp.2-4, 2001.
- [2] 박철우, 심종성, “Basalt 섬유쉬트의 철도시설 콘크리트구조물 보강재로서의 부착거동 연구”, 한국철도학회논문집, 제12권, 제5호, pp.641-642, 2009.
- [3] Sim, J., Park., C. and Moon, D. Y., “Characteristics of Basalt Fiber as a Strengthening Material for Concrete Structures,” Composite Part B: Engineering, Elsevier, Vol. 36, pp.504-512, 2005.
- [4] 류성국, 김경웅, “탄소섬유 보강 폴리에테르에테르케톤의 마찰 및 마모 거동에 관한 연구”, 대한기계학회논문집, A권, 제25권, 제6호, pp.930-931, 2001.
- [5] H. Domininghaus, “Plastics for engineers: Materials, Properties, Applications,” Hanser, 1988.
- [6] www.randb.co.kr
- [7] 엄숙자, “新素材 製品의 마케팅 戰略에 관한 研究”, 석사학위 논문, pp.38-41, 2006.
- [8] www.yj-ceramics.co.kr
- [9] 이준우, 한국과학기술정보연구원, “현무암섬유 기술시장정보”, pp.1-11, 2007.
- [10] “Basalt fibers: alternative to glass?”, 2006, www.compositesworld.com
- [11] 윤성원, “밸러스트 파이프에 적용하기 위한 현무암섬유 복합재료의 기계적특성에 관한 연구”, 석사학위논문, pp.18-22, 2011.
- [12] 심현해, “PTFE계 복합재료의 마찰과 마모에 대한 다양한 충전재들의 영향”, Journal of the KSTLE, Vol.10, No.4, pp.1, 1994.
- [13] Sung N. and Suh N.P., “Effect of Fiber Orientation on Friction and Wear of Fiber Reinforced Polymer Composites”, Wear Vol.53, pp.129-141, 1979.

- [14] Suh N.P. and Sin H.C., "The Genesis of Friction", Vol.69, pp.91-114, 1981.
- [15] 손진호, VaRTM 成形工法에 의해 製造된 尖端 複合材料의 物理的·機械的 特性評價 및 그 應用, 박사학위 논문, pp.2, 2006.
- [16] 김윤해, 한중원 공저, 복합재료학, 효성출판사, pp.81-82, 2001.
- [17] Tugrul Seyhan, et. al. "Artificial Neural Network (ANN) Prediction of Compressive Strength of VaRTM Processed Ploymer Composites," Computational Materials Science, Vol. 34, pp.99-105, 2005.
- [18] 손진호, VaRTM 成形工法에 의해 製造된 尖端 複合材料의 物理的·機械的 特性評價 및 그 應用, 박사학위 논문, pp.6-10, 2006.
- [19] 오석주, 김성기, 김경웅, "무윤활 상태에서 미세공이 가공된 표면의 마찰거동에 관한 연구", Journal of the KSTLE, Vol.25, pp.218, 2009.
- [20] N.P. Suh, M. Mosleh and P.S. Howard, "Control of Friction", Wear Vol. 175, pp.195-202, 1994.
- [21] www.randb.co.kr
- [22] DIN 50320 : "Wear-Terms, systematic analysis of wear processes, classification of wear phenomena"
- [23] DIN 50332 : "Testing of materials-Abrasive jet wear testing"
- [24] ASTM G77-83 : Standard practice for "Ranking resistance of materials to sliding wear using block-on-ring wear test"
- [25] ASTM D2714-68 : Standard method for "calibration and Operation of the alpha model LFW-1 friction and wear testing machine"