

## 풀투루전으로 제조한 유리섬유강화 복합소재 스트립의 구조적 특성

### Structural Characteristics of Pultruded Glass Fiber Reinforced Composite Strip

이 성 우\*      신 경 제\*\*  
Lee, Sung-Woo    Shin, Kyung-Jae

---

#### ABSTRACT

Recently advanced countries are now beginning to use ACM (Advanced Composites Material), which is mostly used in the industry of airplane, ship building and sports equipments, in the construction industry. Compared with existing construction materials, ACM possesses many advantages such as light-weight, high-strength, corrosion resistant property. Among other manufacturing process of ACM, pultrusion is one of the promising one of civil engineering application.

In this paper, the structural characteristics of pultruded GFRP strip were studied. Major parameters to influence structural behavior of pultruded GFRP are considered to be fiber volume fraction, die temperature, pulling speed and fiber orientations. The effect of these parameters are studied by experimentally and analytically. From this study, it is concluded that fiber volume fraction and fiber orientations influence more on the mechanical property of pultruded GFRP. In addition to above parametric study, off-axis tests were carried out and the results are compared with failure theories. It showed that they agree well each other.

Since this study is carried out in limited scope, further research on the reinforcement in the transverse direction, experiment on the compressive strength and research on the durability should be conducted for wide application of pultruded GFRP sections

---

#### 1. 서 론

최근 해외 선진국에서는 현재까지 주로 항공기, 선박, 자동차 및 스포츠용품에서 널리 사용되어 왔던 첨단 복합소재를 건설용 재료로 활용하는 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 신소재는 경량이며 고강도일 뿐만 아니라 내부식으로 인해 내구성이 뛰어나 기존의 건설재료에 비해 탁월한 장점을 가지고 있다. 복합소재의 제조방법에는 여러 가지가 있으나 인발성형(Pultrusion)이 토목용 구조재의 제조에는 가장 적합한 공정중의 하나이다. 인발성형은 높은 섬유함유율을 가지는 복합재료를 제조하기 위하여 사용되는 연속공정으로 다른 제조기술에 비해 상대적으로 비용이 적게 들며, 다양한 단면의 제작이 용이하므로 건설분야에 적용시 높은 잠재력을 가질 수 있을 것으로 사료된다.<sup>(1)</sup> 본 연구에서는 인발성형장비로 제작된 GFRP(Glass Fiber

---

\* 국민대학교 토목환경공학부 교수

\*\* 국민대학교 토목환경공학부 공학석사

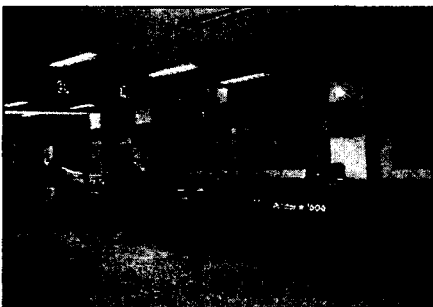
Reinforced Plastics) 스트립판에 대해 인발성형의 공정을 분석하고, 섬유 함유율과 성형온도, 인발속도와 같은 여러 가지 제조공정상의 변수와 섬유의 배향각도의 변화에 따라 인발성형된 GFRP의 구조적 특성을 재료시험을 통해 분석하였다.

## 2. 인발성형(Pultrusion)

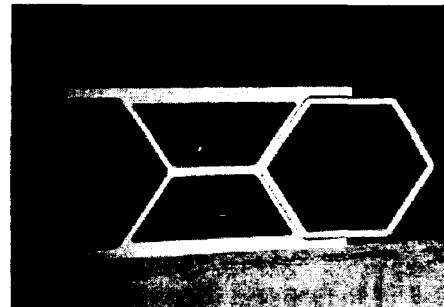
섬유강화 복합소재의 제조공정에는 그 사용 목적에 따라 여러 가지 방법이 사용되어 지고 있지만 최근 건설분야 구조부재 제작에 많이 사용되고 있는 방법중의 하나가 인발성형 방법이다. 인발성형은 강화섬유가 주로 축 방향으로 배열되기 때문에 인발성형으로 제조된 부재는 축방향으로 주된 응력을 받는 부재에 사용하게 되며 축에 수직한 방향으로로는 매트나 다축직포를 사용하므로서 횡방향 응력에 견딜 수 있게 제조한다. 인발성형된 섬유 강화 복합소재 구조부재는 재래의 강재나 콘크리트와는 다른 독특한 특징을 가지고 있다. 이러한 특징을 열거하면 다음과 같다.

- 1) 내부식성으로 인해 내구성이 커서 강재의 부식이 큰 문제가 되고 있는 해양환경하에 있는 구조물은 물론이고 교량등 강재 도로시설물의 대체용으로 적용하기 적합하다.
- 2) 내화학성 또한 우수하여 폐수처리시설등 열악한 환경속의 구조부재에 적용하기 적합하다.
- 3) 비중이 2.4로 강재무게의 1/3정도로 경량이어서 기존의 강재구조물이나 콘크리트 구조물의 자중을 크게 줄여줄 수 있어 재료가 적게 소요된다.
- 4) 무게가 가벼운 반면에 강성과 강도가 크므로 노후 또는 부적절한 설계에 대한 부재의 보강시 자중의 증가가 거의 없이 구조물의 내하력을 증진시킬 수 있다. 또한 기존 재료를 사용한 구조물의 부재를 복합소재 구조부재로 교체하여 사하중을 경감시켜 활하중에 대한 내하력을 증가시킬 수 있다.
- 5) 절연특성을 보유하고 있어 송전탑, 전철부대시설등 전기시설용 구조부재에 적합하다.
- 6) 전파투과성이므로 통신시설용 구조부재에 적합하다.
- 7) 인발성형은 완전히 자동화 되어 있기 때문에 전체 제조비에 대한 노무비의 비율이 20%정도로 아주 낮아 생산단가가 낮아 기존재료와 경쟁력이 있다.

[사진 1]에는 국민대학교 토목환경공학부의 복합재료 실험실에 설치된 인발성형 장비의 모습을 보여주고 있으며 [사진 2]에는 인발성형으로 제작한 복합소재 바닥판의 단면모습을 보여주고 있다.



[사진 1] 국민대 복합소재 실험실에 설치된 인발성형장비의 모습



[사진 2] 인발성형된 복합소재 바닥판의 단면모습

인발성형 제조공정은 강화섬유의 공급과 배열, 수지의 함침, 예비성형, 경화, 당김의 5가지 공정이 연속적으로 이루어지며 각 공정 단계별로 약술하면 다음과 같다.<sup>(3)</sup>

## 2.1 강화섬유의 공급과 배열

인발성형된 섬유강화 복합재료의 높은 강도는 일반적으로 섬유가 잘 배열되어 있을 때 최대의 강도를 나타낸다. 섬유가 꼬이거나 섬유의 배열이 불규칙적이면 인발시 섬유에 손상이 발생하거나 끊어져 기대하는 강도를 얻지 못하게 된다. 인발성형된 섬유복합재의 길이방향과 횡방향으로 섬유를 배열시키기 위해 가이드 평판을 사용한다. 가이드 평판의 모양은 제품의 모양과 강화재의 종류에 따라 다른 형상으로 설계되는데 이러한 가이드의 설계는 금형의 설계만큼 인발성형에서 아주 중요한 부분을 차지한다.

## 2.2 수지 함침

섬유를 수지로 잘 함침시키는 것은 섬유의 위치를 잘 배열하는 것만큼이나 중요하다. 섬유가 수지에 완전히 함침되지 못하면 원하는 기계적 특성을 나타내지 못한다. 섬유가 수지통을 통과하는 중에 섬유의 함침을 효율적으로 하기 위해 수지통속에 횡방향으로 여러 개의 막대기가 설치되어 있는데 섬유가 막대기 사이를 여러 방향으로 통과하면서 섬유의 미세한 부분까지 수지가 함침되게 된다.

## 2.3 예비성형

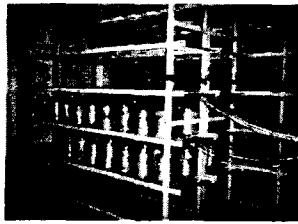
예비성형은 수지에 함침된 섬유를 원하는 단면형상에 가압도록 점진적으로 변형시키기 위한 가이드장치이다. 이러한 단계는 성형하고자하는 단면 형상의 크기와 모양에 따라 복잡해지고 길이도 늘어날 수 있다. 예비성형장치의 역할은 수지통을 통과한 강화섬유는 편평하므로 금형에 들어가기 전에 일차변형을 시켜주며 강화섬유에 섞여있는 과잉수지를 제거할 수 있다.

## 2.4 경화

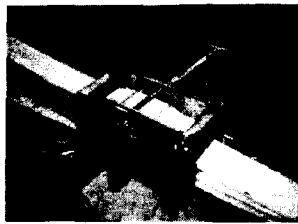
인발성형 공정에서 수지의 경화는 고온으로 가열된 금형 내부에서 연속적으로 일어난다. 금형의 길이는 구조재의 단면형상에 따라 30cm~150cm 정도가 되나, 제조하고자 하는 부재의 단면형상과 크기에 따라 금형의 길이는 더 크게 또는 더 작게 할 수 있다. 금형은 4개의 가열영역에 의해 가열된다. 금형의 온도조절은 수지성형, 섬유 함침율, 경화도, 당김속도, 첨가제 등의 제반요소와 연계하여 조절되어야 한다. 수지의 경화시 발열반응으로 인해 금형의 온도가 상한온도를 넘지 않도록 섬유와 수지의 함량을 일정하게 유지하는 것이 중요하다.

## 2.5 당김

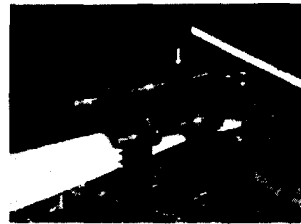
인발성형의 모든 공정은 연속적인 당김 장치의 왕복운동에 의해 이루어진다. 이 당김장치는 인발성형 공정중 가장 중요한 요소의 하나로 일정한 당김 속도를 유지해주는 것이 중요하다. 속도가 지나치게 빠르거나 느리면 제품의 경화조건이 바뀌어 유리섬유 복합구조재의 기계적 특성이 떨어지게 된다. 만들하고자하는 구조재의 규격 및 섬유의 양, 사용하는 수지의 종류에 따라 적절한 속도를 유지해주는 것이 매우 중요한 요소이다. 당김 장치의 종류는 왕복당김장치와 무한궤도식 당김장치로 구별된다. 본 연구에서 사용한 당김장치는 왕복당김장치를 사용하였다. [사진 3]에는 GFRP 스트립판에 대해 인발성형의 공정을 단계별로 보여주고 있다.



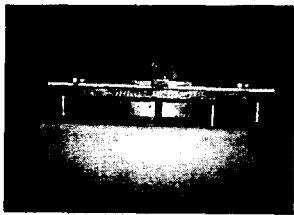
강화섬유의 공급과 배열



수지 함침



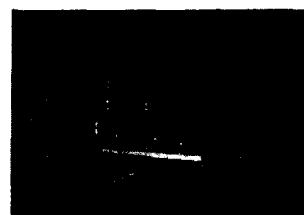
예비성형



경화



당김



절단

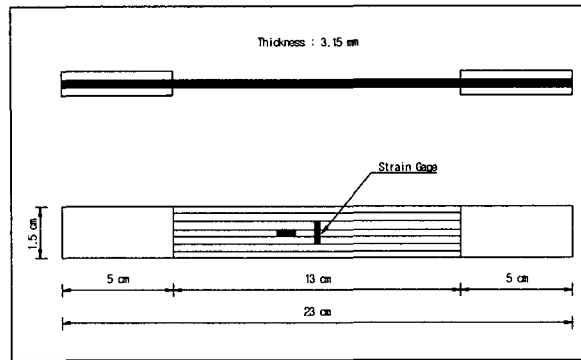
[사진 3] GFRP 스트립판의 인발성형 단계별 제작 공정

### 3. 인발성형 GFRP의 재료시험

인발성형 방법은 섬유의 함유율과 성형온도, 인발속도에 의해 GFRP의 구조적 특성이 변화할 수 있으므로 이러한 공정변수에 대해 각각 인장시험을 실시하여 특성을 분석하였다. 부피에 대한 섬유의 함유율을 30%, 40%, 50%로 변화시켜 제작한 스트립판에 대해 실험을 실시하여 섬유 함유율의 변화에 따른 탄성계수와 프아송의 비를 측정하였다. 또한 성형온도에 따른 물성치의 변화를 분석하기 위해 섬유함유율을 50%로 고정하고 성형온도를 140℃, 160℃, 180℃, 200℃로 변화시켰고, 각 성형온도에서 인발속도를 30cm/min, 60cm/min, 90cm/min, 120cm/min, 150cm/min로 변화시켜가며 스트립판을 제작하여 시편시험을 실시한 후 성형온도와 인발속도가 탄성계수와 극한인장강도에 미치는 영향을 분석하였다. 시편제작에 사용된 유리섬유와 비닐에스터 수지의 성질은 [표 1]과 같다. 인장시편은 ASTM<sup>(4)</sup>규정에 따라 [그림 1]과 같이 제작하였으며 스트레인 게이지의 부착위치도 [그림 1]에서 보여주고 있다.

[표 1] 사용재료의 화학성분 및 기계적 특성

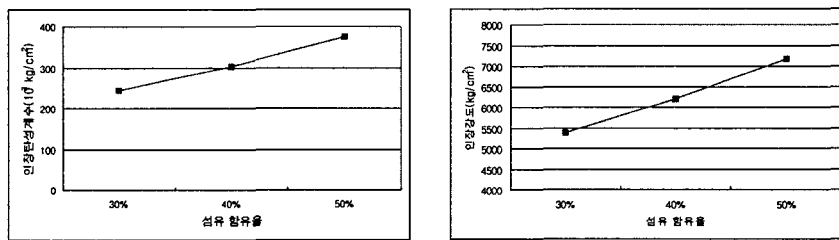
재료 의 종류	E-glass						비닐에스터								
	화학성분						기계적 성질			기계적 성질					
	SiO	AlO	CaO	MgO	BO	NaO+ KO	인장강 도	탄성계 수	신장률	Barcol 경도	신장률	수분흡수 량	인장강 도	탄성계 수	열변형온 도
%						kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	%		%	mg	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	℃	
물성 치	54	15	20	3	11	1	20000	738000	2~4	49	1.175	0.18	423.5	37790	113



[그림 1] GFRP 스트립 판의 인장시편의 치수 및 스트레인 게이지의 설치위치

### 3.1 섬유 함유율의 변화에 따른 물성치의 변화

[그림 2]에는 성형온도 160℃, 인발속도 60cm/min 일때의 섬유함유율에 따른 인장탄성계수와 극한인장강도의 변화를 보여주고 있다. 그림 3에서 알 수 있듯이 섬유 강화 복합재료는 대부분의 하중을 섬유가 받기 때문에 섬유의 함유량이 증가할수록 인장탄성계수와 극한인장강도가 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다.



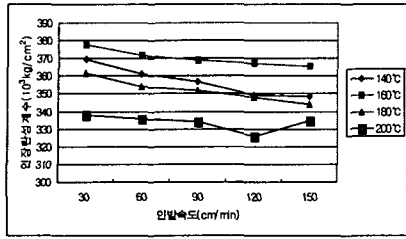
(a) 인장탄성계수

(b) 극한인장강도

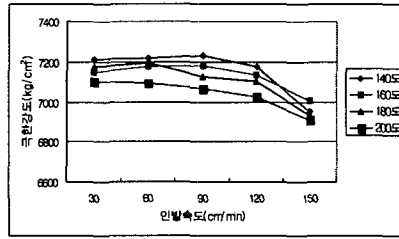
[그림 2] 섬유함유율에 따른 인장탄성계수와 극한인장강도의 변화

### 3.2 성형온도와 인발속도에 따른 물성치의 변화

[그림 3]에는 인발속도의 변화에 따른 인장탄성계수와 극한인장강도의 변화와 그림 5에는 성형온도의 변화에 따른 인장탄성계수와 극한인장강도의 변화를 보여주고 있다. [그림 3]에서 알 수 있는바와 같이 인발속도가 증가할수록 GFRP의 인장탄성계수와 극한인장강도는 감소함을 알 수 있다. 인발속도 30cm/min때의 물성치를 기준으로 했을 때 인발속도가 150cm/min일 경우 인장탄성계수는 5%, 극한인장강도는 3%정도 감소하였다. 실험 결과 GFRP의 물성치와 인발성형의 공정속도를 고려하여 90cm/min가 적절한 것으로 판단되었다. 또한 [그림 4]에서 보는바와 같이 성형온도가 증가할수록 GFRP의 물성치가 증가하다가 160℃에서 최고값을 나타낸 후 160℃부터는 성형온도의 증가에 따라 물성치가 오히려 감소한다. 160℃에서 200℃로 온도를 상승시켰을 경우 인장탄성계수는 약 10%, 극한인장강도는 약 1.5%정도 감소하여 인장탄성계수의 감소폭이 더 큼을 알 수 있었다.

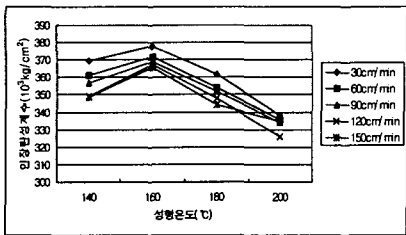


(a) 인장탄성계수

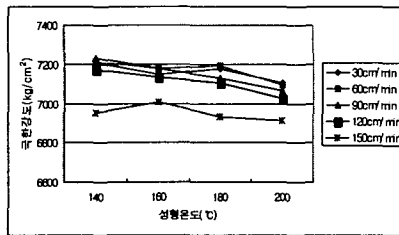


(b) 극한인장강도

[그림 3] 인발속도의 변화에 따른 인장탄성계수와 극한인장강도의 변화



(a) 인장탄성계수



(b) 극한인장강도

[그림 4] 성형온도의 변화에 따른 인장탄성계수와 극한인장강도의 변화

### 3.3 섬유 배향각도에 따른 물성치 변화

본 연구에서는 인발성형으로 제작된 GFRP 스트립판에 대해 섬유의 배향각도의 변화에 따른 극한인장강도의 변화를 분석하기 위해 비깎축 시편시험을 실시하였다. [표 2]에는 비깎축 시편 시험에 의한 극한인장강도와 섬유방향 응력, 섬유 직각방향 응력 및 전단강도를 보여주고 있다. 실험결과에서 알 수 있듯이 섬유 방향이 0°에서 5°만 증가하여도 극한인장강도 값이 35%가량 감소하는 것을 알 수 있으며, 섬유 방향이 10° 이상이 되면 0° 방향 극한인장강도 값의 50% 이하로 감소하는 것을 알 수 있다. 섬유의 각도가 0°일 때는 섬유 방향으로 인장 파괴를 일으키지만 섬유의 각도가 5°, 10°, 15°, 20°에서는 전단응력에 의해 전단 파괴를 일으킨다. 이것은 섬유의 각도가 증가할수록 전단응력과 섬유의 직각방향응력에 의해 섬유와 수지가 접착되어 있는 계면에서 파괴가 발생하여 섬유의 방향을 따라 찢겨졌기 때문이다. 실험을 통해 알 수 있는 바와 같이 일방향 복합재료의 경우 섬유가 끊김 없이 연속적으로 배열이 되어 있고 하중의 방향과 섬유의 방향이 같으면 섬유 전체가 외부의 하중에 저항하여 높은 강도를 나타낸다. 그러나 섬유의 일부가 손상이 되거나 섬유의 방향과 일정한 각도를 가지고 하중이 재하될 경우는 쉽게 파괴에 이를 수 있음을 보여주고 있다.

[표 2] 비깎축 시편시험 결과 (단위: kg/cm<sup>2</sup>)

섬유의 각도	극한인장강도( $\sigma_x$ )	섬유방향응력( $\sigma_1$ )	섬유의 직각방향 응력( $\sigma_2$ )	전단응력( $\tau_{12}$ )
0°	7177	7177	0	0
5°	4709	4673	35	409
10°	3130	3035	94	535
15°	2241	2090	150	560
20°	1717	1516	200	551

#### 4. 복합재료의 파괴이론

지금까지 섬유강화 복합재료에 사용할 수 있는 많은 파괴이론들이 제안되었는데, 그 중 Tsai-Hill 파괴이론과 Tsai-Wu 파괴이론이 가장 많이 알려져 있다.<sup>(5)(6)</sup> 식(1)은 Tsai-Hill 파괴이론식이며, 식(2)는 Tsai-Wu의 파괴이론식이다. 이식에서의 기호는 상용표기를 따랐다.

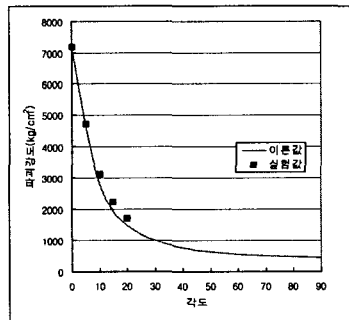
$$\frac{\sigma_1^2}{(X_t)^2} + \frac{\sigma_2^2}{(Y_t)^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{(X_t)^2} + \frac{\tau_{12}^2}{(S_{12})^2} = 1 \quad (1)$$

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (2)$$

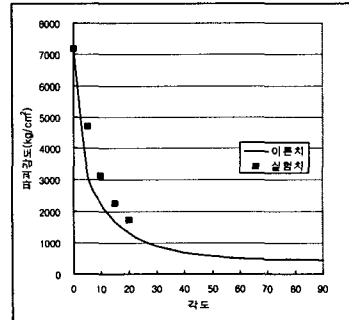
[표 3] 과 [그림 5]에는 Tsai-Hill 파괴이론과 Tsai-Wu 파괴이론에 의한 강도예측값과 비깁축 시편시험의 실험값을 비교 분석한 결과를 보여주고 있다. 표와 그림에서 알 수 있는바와 같이 Tsai-Hill 파괴이론의 경우, 각도가 5°일 때는 파괴이론에 의한 값과 실험값이 근접하지만 각도가 증가할수록 다소 오차가 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 오차가 15% 이내로 거의 근접한 결과를 얻을 수 있었다. Tsai-Wu 파괴이론의 경우, GFRP의 압축강도와 전단강도가 요구되나 스트립판의 폭에 제한이 있어 실험값을 구할 수 없어 이론식을 이용하여 근사적으로 구한 값을 사용하였다. 이로 인해 오차가 25%~30%로 나타나 Tsai-Hill 이론에 비해 보다 큰 차이가 발생한 것으로 판단된다. 그러나 Tsai-Wu 이론치도 실제 실험값을 이용한다면 오차의 폭을 더욱 줄여줄 수 있을 것으로 판단된다.

[표 3] 파괴이론에 의한 이론치와 실험치의 비교

섬유의 각도	극한인장강도( $\sigma_x$ , kg/cm <sup>2</sup> )				
	실험치 (A)	Tsai-Hill 이론(B)	Tsai-Wu 이론(C)	B/A	C/A
0°	7177	7177	7177	1.0	1.0
5°	4709	4610	3240	0.98	0.69
10°	3130	2775	2250	0.87	0.72
15°	2241	1933	1670	0.86	0.75
20°	1717	1475	1310	0.86	0.76



(a) Tsai-Hill이론 비교



(b) Tsai-Wu 이론 비교

[그림 5] GFRP 스트립판의 비깁축 시편의 강도에 대한 파괴이론치 비교

## 5. 결 론

본 연구에서는 인발성형된 GFRP 스트립판에 대해 다양한 공정변수에 따른 구조적 특성을 실험적으로 분석하였다. 비깎축 시편시험을 통해 섬유 배향각도에 따른 파괴강도의 변화를 분석하였고, 파괴이론에 의한 이론치를 비교 분석하였다. 본 연구를 통해 도출해낸 결론은 다음과 같다.

1. 인발속도가 증가할수록 GFRP의 물성치는 감소하였다. 실험 결과 GFRP의 물성치와 인발성형의 공정속도를 고려하여 90cm/min가 적절한 것으로 판단되었다.
2. 성형온도를 160℃로 할 때까지 GFRP의 물성치는 증가하지만 200℃이상 증가하면 오히려 물성치가 감소하여 적절한 성형온도는 160℃로 결정하여야 할 것으로 판단된다.
3. 섬유의 함유량이 증가할수록 인장강도와 탄성계수가 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.
4. 비깎축 시편시험 결과에서 섬유방향이 5°만 증가하여도 극한인장강도가 35%가량 감소하였으며 섬유방향이 10°이상이 되면 0°방향 극한인장강도의 50%이하로 감소함을 알 수 있어 섬유의 배향각도가 중요한 요소임을 알 수 있었다.
5. 파괴이론에 의한 강도예측값과 실험값을 비교해본 결과 섬유의 배향각도가 어느 정도 작은 경우는 잘 일치하지만 각도가 커지면 다소 오차가 발생함을 알 수 있었다.

## 6. 감사의 글

본 연구는 과학재단 산학협력과제 98-2-13-0101-2로 수행되었으며, 과학재단과 풀립파이버랩 건설(주)의 연구지원에 감사드립니다.

## 7. 참고문헌

1. D.S. Kukich, V.M. Karbharic, and D.A.Steenkamer, An Overview of the Pultrusion Process, CCM Report 94-01, University of Delaware Center for Composite Material, 1994
2. 신경재, 인발성형된 GFRP 스트립판의 구조적 특성 분석, 국민대학교 석사학위논문, 1999
3. 이대길, 정광섭, 최진호, "복합재료 역학 및 제조기술", 시그마프레스, 1998
4. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Material, ASTM D-3039, 1993
5. L. Holloway, Polymer Composites for Civil and Structural Engineering, Blackie Academic & Professional, 1993
6. M. W. Hyer, Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials, McGraw-Hill, 1998