

論文

NOL Rings 시험을 이용한 필라멘트 와인딩 공정 변수 연구

황태경*, 갈영순*, 조원만*, 정 발*

A Study of Filament Winding Processing Variables
using NOL Rings Test

Tae Kyeong Hwang*, Yeong Soon Gal*, Won Man Cho*, Bal Jung*

ABSTRACT

This paper deals with the effect of filament winding processing variables on the performance of composite rings which are made carbon fiber and epoxy resin. Split disk specimens were fabricated under different processing conditions (winding tension, number of ends, surface machining). The fiber volume fraction, tensile strength and young's modulus in tension increased as the winding tension increased from 0.5 to 4kg/end. However the increasing rate of mechanical properties was decreased above 2kg/end. And interlaminar shear strength was found to decrease with the increasing winding tension. The surface machining also had a significant effect on the tensile strength. As the number of ends increased from 1 to 5 ends, the tensile strength decreased to a minimum value at 5 ends. The measured Young's modulus in tension agreed well with the calculated modulus by the rule of mixture. Compared to the test results based on the ASTM D 3039, the split disk method provided about 92% of tensile strength.

초 록

본 논문은 탄소 섬유와 에폭시 수지로 제작된 링 시편을 사용하여, 필라멘트 와인딩시의 공정 변수들이 링 시편 성능에 미치는 영향을 연구하였다.

링 시편은 섬유 장력, 실패 갯수, 외면 가공등을 변수로하여 제작되었다.

이때 섬유 장력은 0.5kg부터 4.0kg까지 증가 시켰는데, 장력의 증가에따라 비례하여 시편의 섬유 부피 함유율과 인장 강도, 영 계수가 증가하였으나 증가율은 2kg을 기준으로 그 이상부터는 감소하

* 정회원, 국방과학연구소

였다. 또한 층간 전단 강도는 장력에 반비례하여 감소하는 현상을 보였다. 외면 가공 또한 인장 강도에 큰 영향을 미치는것으로 나타났다. 실패의 갯수를 1개부터 5개까지 증가 시킴에따라, 인장강도는 감소하여 실패 갯수가 5개일때 최소 강도 값을 보였다. 이때 측정된 영 계수는 Rule of Mixture로 계산된 값과 거의 유사한 결과를 얻었고, 인장 강도는 ASTM결과와의 약 92%를 나타냈다.

1. 서 론

필라멘트 와인딩(Filament Winding)공법이란 섬유 Strands혹은 Filaments를 회전하는 일정 형상의 맨드릴상에 감은후 경화시켜 복합재 구조물을 제작하는 한 방법으로서 주로 화학 물질 저장 탱크, 파이프, Golf club Shaft, 로켓 모터 케이스(Rocket Motor Case), 자동차용 Drive Shaft등의 대칭 및 비대칭 원통형 구조물제작에 이용되고 있다. 이 공법은 다른 공법에 비해 공정이 비교적 간단하고 단위 시간당 제작량이 많으며 또한 비 강도 비 강성이 뛰어나므로 인해 복합재 공법중 가장 많이 이용되고있다.

그러나 이러한 필라멘트 와인딩 공법은 공정중 여러 변수가 존재하여 이들의 영향을 최소화 시키는것이 큰 문제로 되어있다.

이러한 변수들은 공정중 발생하는 섬유의 끊어짐과 경화시의 경화 조건 영향등으로 크게 나누어 볼수있는데 특히 섬유의 끊어짐은 구조물 강도에 직접적인 영향을 미침으로인해 이에대한 체계적인 연구가 요구되고 있다.

섬유의 끊어짐의 원인은 와인딩시 섬유에 가해지는 장력, 와인딩 속도, 섬유를 이송시키는 Eye, Resin Bath 형상, 수지의 점도, 와인딩 각도, End수, 와인딩 이송 거리 등을 들수있다. 이러한 공정 변수들은 심한 경우 압력 용기 성능(Performance)의 30% 까지 영향을 미치고있다[1].

이 중에서 섬유에 가하는 장력은 섬유의 끊어짐에 가장 큰 영향을 미치는데 심한 경우, 불충분하고 불균일한 장력은 심각한 강도 저하를 초래 한다. 이러한 장력의 영향은 유리 섬유에 비해 표면형상이 거칠고, 취성이 심한 탄소 섬유에 더 크게 나타나서 와인딩 작업중 더 많은 섬유 손상을 받게된다. 현재 수행하고 있는 압력 용기의 수압 시험 결과 부-적절한 장력을 적용했을때 유리 섬유나 Kevlar섬유보다 탄소 섬유로

제작된 압력 용기의 파괴 압력이 기대치에 비해 현저히 낮은 강도를 보였다. 또한 실제 와인딩 작업중에도 탄소섬유의 많은 끊어짐을 발견할수있었으며 그리고 구조물이 두꺼워질수록 장력의 영향은 내부 층에 대한 압축력으로도 작용하므로 더욱 중요한 변수가 되고 있다[1,3]. 본 연구에서는 외국의 로켓 모터 케이스 등에 많이 사용되고 있는 고 강도 탄소 섬유를 사용했을 경우 와인딩 장력이 구조물의 구조 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 ASTM D2290 방법인 Split Disk시험을 통해 인장 강도와 층간 전단 강도, 섬유 함유율, 잔류 응력에 장력이 어떠한 영향을 미치는가를 평가하고자 한다.

이러한 장력에 대한 연구는 필라멘트 와인딩 공정의 가장 기본이되는 실험으로서 섬유의 특성연구일 수도있으나, 위에서 언급한 바와같이 여러 변수가 복합적으로 작용됨으로인하여 각 작업 현장에서 운영되고있는 와인딩 장비의 특성일수가있다. 또한 와인딩 공정시간과 직접 관계있는 End수 영향을 강도와 섬유 함유율및 기공 함유를 측면에서 연구하였다.

2. 실 험

2-1. 시편 제작

본 연구에 사용한 보강 섬유는 일본 Toray사의 고 강도 탄소 섬유인 T800이며, 매트릭스의 주재인 에폭시 수지는 Ciba-Geigy사의 기본형 수지인 Bisphenol A의 Diglycidyl ether인 AD6005를 사용하였고 경화제는 일본 Hitachi사의 저 점도의 산 무수물제 경화제인 3⁽⁴⁾-methyl-1, 2, 3-6-tetrahydrophthalic anhydride(METHPA)을 사용하였다. 경화 촉진제는 Ciba-Geigy사의 상품명 DY062인 Benzyldimethy amine(BDMA)를 사용하였다.

이들 재료에 대한 기본 물성은 Table 1.과 2.에 나타내었다.

여기서 섬유는 제조 회사에서 제공한 자료이고, 수지의 물성은 본 실험실에서 시험한 결과이며 수지 시편은 JIS K6911규격에 따라 금형 공구강인 SKD 61로 만든 금형을 사용하여 제작하였다. 필라멘트 와인딩시 장력의 변화에 따른 Split Disk 시편 제작을 위하여 ASTM D2290 기준에 적합한 Mandrel을 열 변형이 작은 탄소 구조강으로 제작하여 이곳에 Hoop 와인딩하였다.

여기서 이용한 필라멘트 와인딩 장비는 (주) 한국 화이바의 En-Tac사 제품인 2축 기계이다. 와인딩 완료 후 Oven내에서 Mandrel을 회전시키며 80℃ 2시간, 120℃ 2시간, 160℃ 8시간의 경화 Cycle로 경화시킨다음 탈형을 하였다. 이때 시편의 경계 효과를 줄이기 위하여 탈형후 시편 모서리를 #800의 Sapo로 가공하였다.

시편 제작후 시편의 폭과 두께치수 측정은 Micro-meter로 수행하는데 두께인 경우 내면 곡률로 기인

되는 오차를 줄이기 위하여 Ball-Type Micro-meter로 측정하였다. 여기서 제작된 시편의 종류와 수량은 Table 3.와 같다.

Table 3. Split Disk시편의 종류와 수량

kg/End ea	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
Machined	10	10	10	10	10
Nonmachined	10	10	10	10	10

End/kg ea	1	2	3	4
Nonmachined	10	10	10	10

시편들은 크게나누어 장력 영향을 보기위하여 각 End당 0.5Kg부터 4Kg까지 변화시켰으며, 또한 End수의 영향을 보기위하여 1 End 부터 5 End 까지를 변수로하여 각각 10개씩의 시편을 제작하였다.

그리고 복합재의 치수 마춤을 위하여 수행하는 선반 기계 가공 영향을 보기위하여 장력 변수 시편의 일부를 선반에서 Byte로 외경 가공하였다.

여기서 적용하고있는 최대 장력과 End수는 장비가 허용하는 최대 수치로 하였다.

Table 1. 탄소 섬유(T800)의 기본물성

Tensile Strength(Gpa)	5.59
Tensile Modulus(Gpa)	294
Elongation(%)	1.9
Density (g/cm ³)	1.80

Table 2. 매트릭스 AD6005/H-3326/DY062의 기본물성^a

Mixing Ratio(Parts by weight)	100/80/1
Viscosity(CPS) 25℃	700~850
40℃	200~300
Pot Life ^b (40℃, hr)	20~22
HDT (264psi, °C, ASTM 648)	120
Tensile Strength (Ksi)	11.4
Ultimate Strain(%)	3.8~4.5
Flexural Strength (ksi)	18.4
Poisson's Ratio	0.35

^aCure Schedule: 80℃(2hr)+120℃(2hr)+160℃(2hr)

^bTime to 1500 CPS Viscosity

2-2. 실험 장비 및 방법

시편 제작을 위하여 이용된 장비는 En-Tac사의 2축 필라멘트 와인딩 기계와 부속품인 CTC사의 Tension장치, 자체 개량한 Resin Bath 와 섬유 이송장치가 있는데 이들의 형상은 Fig.1-Fig.3과 같다. 여기서 Fig.1의 Tension 장치는 모두 5개로 구성되어 최대 5가닥의 실을 한꺼번에 와인딩 할수있다. Tension 장치는 CTC사의 Tension Compensator로서 800C012 Type이고 작동 방식은 판 스프링을 이용한 기계식이다. 하중 장치는 국과연의 Instron 1335를 이용하였고, 시험 치구는 ASTM D2290에 준하는 규격으로 제작하여 시험에 적용하였다.

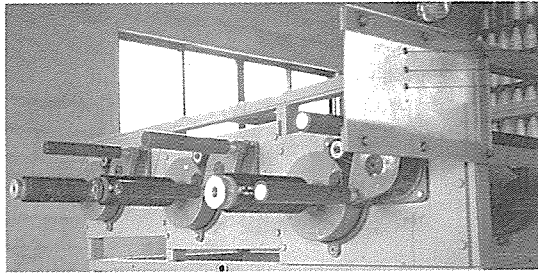


Fig. 1. Tension Brake and Creel

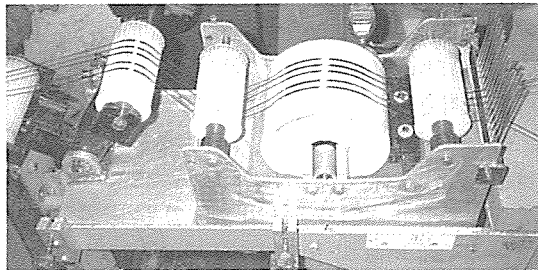


Fig. 2. Resin Bath

여기서 인장 시험은 시편에 Strain Gage를 부착한후 치구에 끼워서 Cross head speed를 1.3mm/min로 하여 파괴시까지 하중을 적용하였다.

이때 시험 상태와 시험 후의 시편 파괴 형상은 Fig. 4-Fig.5와같다. 이와같은 시험을 통해 시편 인장 강도와 파괴 변형도, Young's Modulus를 구하였다. 또한 장력에 따른 층간 전단 강도변화를 보기위한

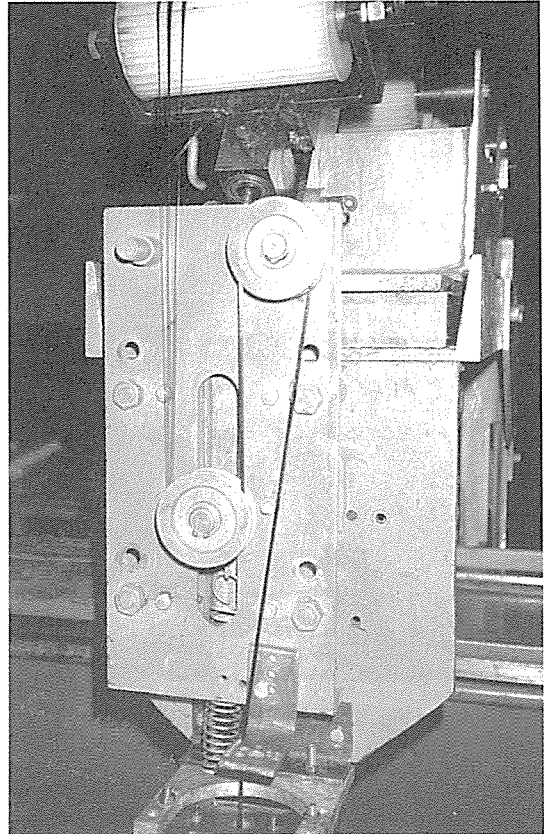


Fig. 3. Mandrel섬유를 최종적으로 전달하는 Eye

Short-Beam Test는 ASTM D2344 에따라 Split Disk시편에서 규격(Span/Thickness=4.0)에 만족하

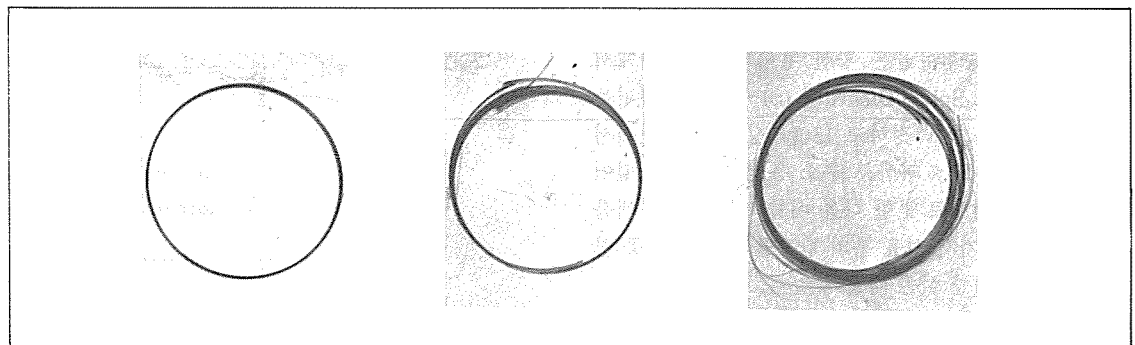


Fig. 4. Split Disk시편(시험 전, 후)

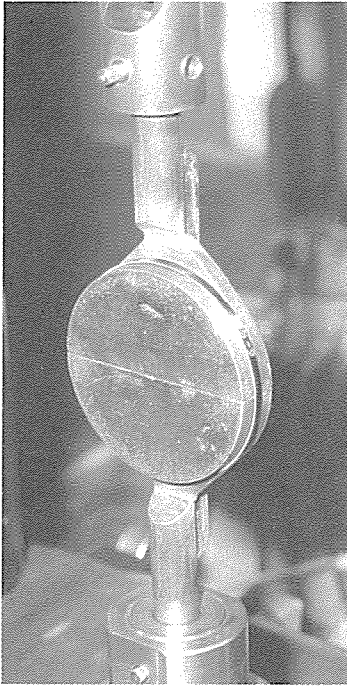


Fig. 5. Split Disk 시험모습

도록 길이가 약 6.6mm 되게 시편을 채취하였다.

인장 시편과 마찬가지로 같은 Cross Head Speed를 적용하여 하중이 떨어질때까지 시험을 수행하였다.

여기서는 층간 전단 강도를 다음과 같은 식을 통해 구하였다.

$$SH = 0.75P_B/bd \quad (1)$$

(P_B : 파괴 하중, b : 시편의 너비, d : 시편 두께)

섬유 및 기공함유율은 황산 용해법[7]에 의해서 측정 하였는데 Split Disk에서 0.4~0.5g의 시편을 채취한 후 밀도를 측정하고 1500C 정도의 황산에서 1시간 녹인 후 30% 과산화 수소 용액을 서서히 떨어트리며 섬유를 떠오르게 한 다음 이를 건조시켜 무게를 측정한다. 여기서 섬유 부피 함유율(V_f) 및 기공 함유율(V_v)의 계산 식은 다음과 같다.

$$V_f(\%) = \frac{\rho_m W_f 100}{\rho_f W_m + \rho_m W_f} \quad (2)$$

$$V_v(\%) = 100 - (V_f + V_m) \quad (3)$$

ρ_m : 수지 밀도, ρ_f : 섬유 밀도,

V_m : 수지 부피 함유율, W_f : 섬유 무게 함유율,

W_m : 수지 무게 함유율

3. 결과 및 분석

3-1. 섬유의 장력 변화 영향

섬유의 장력 영향을 보기 위하여 End수는 2로 하고 각 End당 Tension장치를 이용하여 Fig.6과 같이 End당 0.5Kg부터 4Kg까지 장력을 변화시키면서 시편을 제작한 후 시험을 수행하였다.

Fig.6에서와 같이 외면을 가공한 경우와 가공하지 않은 경우 2가지로 나누어 시험을 수행했는데, 일반적으로 동일한 장력하에서 가공한 경우가 가공하지 않은 경우에 비해 약 10% 정도의 인장 강도의 저하를 보였다. 이러한 강도 저하는 섬유가 와인딩될 때 장력으로 인하여 Mandrel의 길이와 원주 방향을 따라 균일한 형상으로 적층되지 못하고 굴곡이 발생됨으로 인하여 기계 가공시 이러한 적층의 일부가 제거됨으로서 발생된다. 이런 강도저하영향은 실제 제품

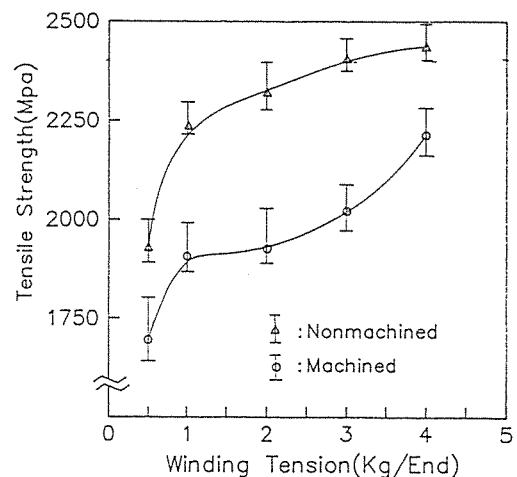


Fig. 6. Effect of Winding Tension on the Tensile Strength.

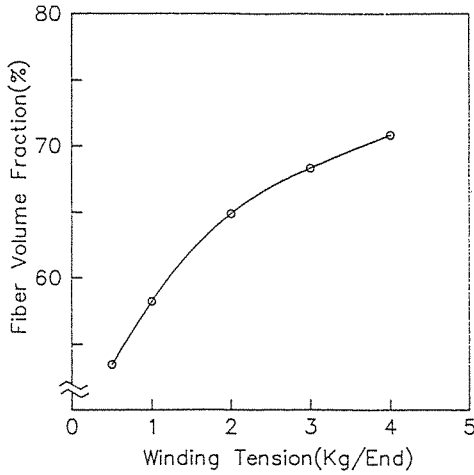


Fig. 7. Effect of Winding Tension on the Fiber Volume Fraction.

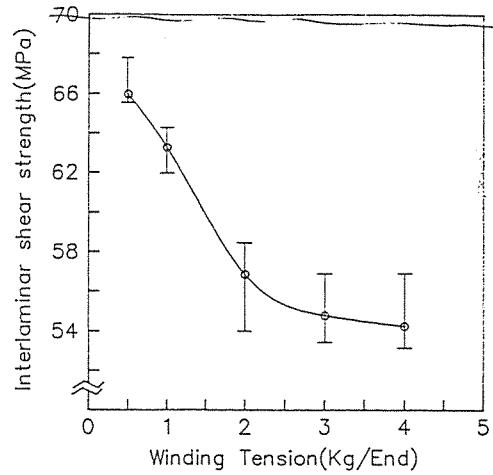


Fig. 8. Effect of Winding Tension on the Interlaminar Shear Strength.

제작시 치수 미충을위하여 외면 기계 가공을 할때도 유사한 현상이 발생되고 있다.

또한 외면 가공 영향은 각 장력당 6개 이상의 시편을 시험하였는데 이들 강도값의 편차가 가공 안한 시편에 비해 크게 나타났다.

일반적으로 가공을 안한 경우 Fig.6과 같이 장력의 증가에 따라 인장 강도의 증가를 보이고있는데 0.5 Kg에서 4.0Kg까지 장력을 변화시킴에따라 약 26 %의 인장 강도의 증가를 보였다.

이러한 강도 향상은 Fig.7에서 나타내듯이 장력 증가에 따라 섬유 파괴 함유율이 약 53%에서 72%까지 증가함에 기인됨을 알수있다.

그러나 이러한 강도 증가율이 섬유 함유율 증가에 비례하여 변화되지 않음을 Fig.6로부터 볼수있다.

즉 장력이 증가할수록 강도 증가율이 감소되는 현상을 보이는데, 장력이 0.5Kg에서 2Kg까지는 약 20 %의 인장 강도 증가를 보이는데 반해 2Kg에서 4Kg까지는 약 5%의 증가에 그치고 있다. 이러한 원인으로서는 장력이 증가함에 따라 섬유에 미치는 내부 응력이 증가되어 Mandrel에 감기전 이송 장치등에서 쉽게 끊어짐이 발생되고, 또한 미소하지만 내부 잔류 변형도의 증가를 가져오기 때문으로 추정된다.

그러므로 장력이 2Kg이상일 때는 장력의 증가에

따라 섬유 파괴 함유율은 증가하나 섬유의 끊어짐이 발생되어 강도의 증가율이 저하되는 현상이 나타났다. Fig.8은 장력의 변화에따른 층간 전단 강도의 영향을 표시한 것인데. 이 경우 장력의 변화에따라 최대 약 20%의 강도 감소를 보이고있는데 이러한 강도 변화는 장력 1Kg과 2Kg사이에서 최대로 발생되며 그 이상의 장력에서는 거의 일정한 강도를 보였다.

이러한 원인으로서는 장력의 증가로인한 섬유 파괴 함유율이 증가되어 수지의 함량 부족과 섬유의 손상 이 많이 발생되어 수지와 섬유의 점착 면적 감소, 그리고 미소한 영향이지만 잔류 변형도로서 장력이 약 4Kg일때 외면에서 최대 약 $700 \mu\epsilon$ 정도 존재함으로 이 영향도 생각해 볼수있다. 이러한 강도변화는 편차면에서도 2Kg이후부터는 장력에 관계없이 비슷한 양상을 보였다. Fig.9는 인장 시험시 시편의 외면에 Strain Gage를 부착한후, 하중에 따른 변형도를 측정하여 0°-Young's Modulus를 구한 다음 이 결과와 Rule of Mixture결과, 그리고 ASTM D3039 시편 결과를 비교한 그림이다. 이 시험 결과는 응력, 변형도그래프가 거의 직선에 가까운 선형적인 거동을 보임으로 인해 임의의 중간 지점의 물성을 채택하였다.

전반적으로 전 구간에 걸쳐 3가지 결과가 좋은 일치를 보이고있다.

그러므로 필라멘트 와인딩 공법인 경우 시편 제작
성과 시험 조건으로 보아 ASTM D3039보다 Split
Disk Method가 0°-물성 측정에 유리함을 알 수 있
었다.

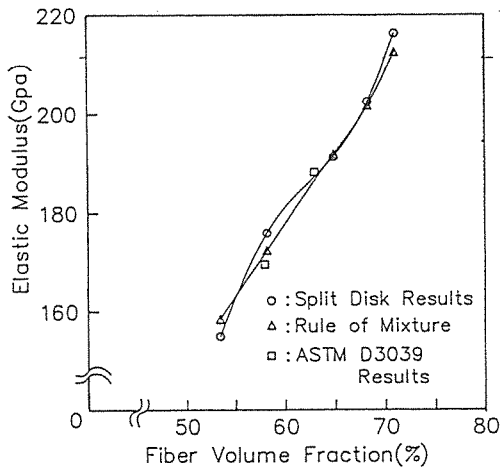


Fig. 9. Comparison of Elastic Modulus Obtained from Three Different Methods as a Function of Fiber Volume Fraction.

3-2. End 수 변화 영향

여기서 End수는 와인딩할 때 이용되는 실패의 갯수를 의미하며 이러한 End수의 증가는 와인딩되는 층의 폭이나 두께 증가로인하여 상당한 공정 시간의 단축을 가져오나, 이에 따른 강도 저하가 예상됨으로 인하여 End수 변화에 따른 시험을 수행하였다.

이때 장력은 앞절의 장력 영향시험을 통해 가장 적절하다고 예측되는 3Kg/End로 고정한 후 End수를 1 부터 5까지 변화시키며 인장 강도와 섬유 부피 함유율 및 기공 함유율을 조사하였다.

이때 Fig.10에서 보듯이 End수가 3일때 가장 높은 강도를 보이고, End수가 5일때 가장 낮은 강도를 보였다.

여기서 End수가 1부터 3까지는 약 2% 차이가 있는 거의 비슷한 강도를 보이고 있으나 5 End일 때는 약 20% 정도의 강도 감소를 나타냈다. 이때의 섬유

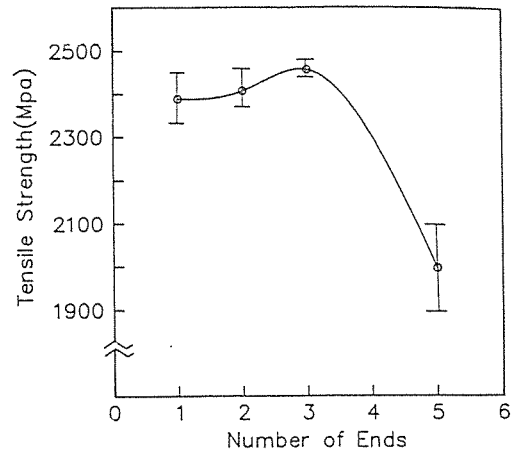


Fig. 10. Effect of Ends Number on the Tension Strength.

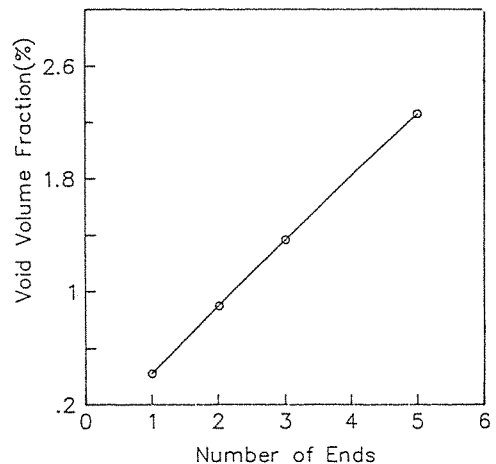


Fig. 11. Effect of Ends Number on the Void Volume Fraction.

부피 함유율은 Fig.12에서 보듯이 End수에 무관하게 약 65%~68% 정도로 비슷하므로 이로인한 강도 저하는 아님을 알수있다.

그러나 Fig.11과 같이 기공함유율은 End수가 증가함에 따라 증가하여 최소 0.42%에서 최대 2.26%까지 변화함을 볼수있다. 기공함유율은 한번에 와인딩되는 적층 수가 많아짐에 따라 Resin Bath의 Drum

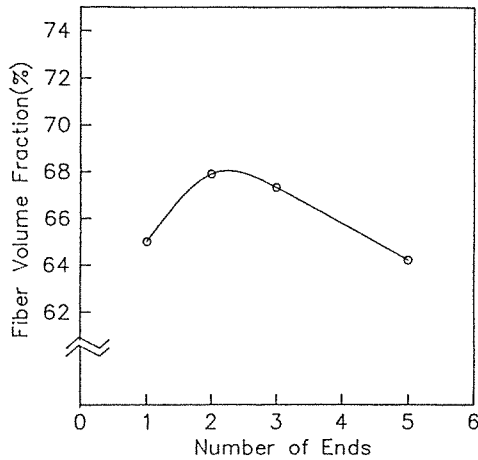


Fig. 12. Effect of Ends Number on the Fiber Volume Fraction.

에서 균일치 못한 수지 함침이 그 원인이 되는 것으로 생각된다.

그러므로 이런 기공 함유율의 증가는 시편의 인장 강도 저하의 원인이 될 수 있으나, 3 End까지 강도 저하가 거의 없는 것으로 보아 End수 자체 영향보다는 End수 변화로 인한 와인딩 작업성이나 작업 속도, 장력의 균일성등의 작업 조건이 강도에 영향을 더 미치는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 필라멘트 와인딩 공정중 Carbon/Epoxy(T800/AD6005)재질에 미치는 섬유 장력과 End수 변화 영향을 실험을 통해 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2 End로하여 장력을 증가 시키면서 와인딩을 할때 섬유 파괴 함유율 증가로 인하여 인장 강도가 증가되었다. 그러나 장력이 증가됨으로 인하여 섬유의 손상도 발생되어 약 2Kg/End이상의 장력에서는 강도의 증가율이 저하됨을 볼 수 있었다.

2. 시편의 표면 기계 가공을 한 경우 섬유 손상으로 약 10%의 인장 강도 손실을 보였다.

3. 장력 증가에 따라 층간 전단 강도의 감소를 보 이는데, 이러한 감소율은 약 2Kg/End 이후부터는 저하되어 장력의 영향에 무관하게 비슷한 값을 보였다.

4. End수 증가는 와인딩시 한번에 적층되는 섬유 가닥이 많아짐에따라 기공 증가의 원인이되어 5 End 일때 최소 인장 강도를 보이고 있으나 직접적인 End 수 변화요인 보다는 작업 조건으로 기인되는 섬유의 손상이나 수지의 함침 정도가 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5. Split Disk 방법으로 구한 Young's Modulus값은 Rule of Mixture나 ASTM D3039 결과와 매우 유사한 값을 나타내고, 인장 강도는 ASTM D3039 결과의 약 92% 정도 값을 보인다.

위와 같은 실험을 통해 현재 수행하고있는 압력 용 기 시험에 2Kg/End 장력과 3 End수를 선택하여 적용한 결과 강도와 강성이 증가하여 성능을 향상 시킬수 있었다.

참 고 문 헌

1. Ashok K.Munjai, "Use of Fiber-Reinforced Composites in Rocket Motor Industry," SAMPE Quarterly, January, 1986, pp.1-11.
2. Ashok K.Munjai, S.B.Kulkarni, "Characterization of Filament Wound Kevlar and Glass Composites for Rocket Motor Applications," 29th National SAMPE Symposium, April 3-5, 1984.
3. Ashok K.Munjai, "Product Acceptance Testing for Filament Wound Composite Rocket Motor Components," ASM/ESP Advanced Composites Conference, 1985.
4. R.R.Desai and I.L.Kalnin, "The Effect of Filament Winding Process Variables on the Performance of Carbon or Fiberglass Reinforced Nol Rings," 24th Technical Conference (S.P.I.), Section 7-C, 1969, pp.1-10.

5. C.E.Knight,Jr., "Orthotropic Photoelastic Analysis of Residual Stresses in Filament-Wound Rings," *Experimental Mechanics*, 12(2), Feb., 1972, pp.107-112.

6. C.Aleong and M.munro, "Evaluation of the Residual Cut Method for Determining Residual St-

rain in Fiber Composite Rings," *Experimental Techniques*, Jan./Feb., 1991, pp.55-58.

7. "탄소 섬유 복합 재료 연구 보고서(제1보)," 일본 프라스틱 표준 시험 방법 연구회. 탄소 섬유 복합 재료 연구 위원 회간, 1985.5.
