

<論 文>

# 필라멘트 와인딩된 링시편을 이용한 인장특성 평가

윤성호\* · 김천곤\*\* · 조원만\*\*\*

(1995년 1월 9일 접수)

## Evaluation of Tensile Properties Using Filament Wound Ring Specimens

Sung-Ho Yoon, Chun-Gon Kim and Won-Man Cho

**Key Words :** Split Disk Test (반원판형 시험치구), Filament Wound Structure (필라멘트 와인딩 구조), Ring Specimen (링시편), Tensile Properties (인장특성), Friction Effect (마찰 효과), Modulus Measurement (강성측정)

### Abstract

In this study, tensile strength and modulus were evaluated for a filament wound ring specimen by split disk test and compared with the theoretical values obtained by the rule of mixtures. The circumferentially wound ring specimens were prepared from 4 types of material systems. The results showed that the measured strengths of the composite systems were considerably lower than the theoretical values due to the local bending stresses around the split disk edges. For the measurement of elastic moduli of the filament wound ring specimens, the effect of friction on the strain of the ring must be taken into account. But the effect of friction between the split disk fixture and the ring specimen can be eliminated by averaging the moduli for loading and unloading state with maintaining the same crosshead rates. The measured elastic moduli of ring specimens showed very good agreement with the theoretical values.

### 1. 서 론

필라멘트 와인딩 구조물은 강화섬유를 수지에 함침시키면서 맨드릴에 감는 습식 필라멘트 와인딩 공법, 또는 B-stage 상태의 프리프레그를 맨드릴에 감는 건식 필라멘트 와인딩 공법에 의해 제작되며 이러한 제작공법은 로켓모터케이스, 고압 가스탱크, 항공기 동체, 레이돔, 연료탱크, 유도탄 저장용기인 발사관 등 다양한 분야에 적용되고 있다.

이와 같은 필라멘트 와인딩 구조물의 형상을 설계하기 위해서는 수지의 기여도는 고려하지 않고

강화섬유만이 작용된 전체 하중을 담당한다는 망막이론(netting theory)을 적용한다.<sup>(1)</sup> 이 때 구조물의 성능은 설계에 적용된 인장특성에 영향을 받기 때문에 효율적인 구조물의 형상을 결정하기 위해서는 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려한 정량적인 인장특성이 적용되어야 한다.

섬유강화 복합재 구조물의 인장특성을 평가하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며 현재에는 ASTM 등의 공인기관에 의해 표준화되어 있는 평판형태의 인장시편을 이용한 평가방법이 널리 적용되고 있다. 그러나 필라멘트 와인딩 구조물은 일반적인 섬유강화 복합재 구조물과는 기하학적 형상이 다르며 강화섬유도 연속성을 가지고 있어서 평판형태의 인장시편으로는 필라멘트 와인딩공법의 특성을 고려한 전형적인 인장특성을 얻기가 어렵다. 따

\*국방과학연구소 4-4-2

\*\*정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

\*\*\*정회원, 국방과학연구소 4-4-2

라서 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려할 수 있는 적절한 인장특성 평가방법의 확보와 이러한 평가방법을 적용한 인장특성의 평가가 필라멘트 와인딩 구조물의 설계자에게 주요 관심 중의 하나로 되어 왔다. 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려한 인장특성 평가방법은 필라멘트 와인딩된 원통에 내압을 작용시키는 방법,<sup>(2)</sup> 필라멘트 와인딩된 링시편에 내압을 작용시키는 방법,<sup>(3)</sup> 필라멘트 와인딩된 링시편에 인장하중을 작용시키는 방법,<sup>(4)</sup> 필라멘트 와인딩된 평판형태의 인장시편에 인장하중을 작용시키는 방법<sup>(5)</sup> 등이 제시되어 있다. 이들 평가방법 중 필라멘트 와인딩된 링시편에 인장하중을 작용시키는 방법은 시편의 형상이 간단하고 강화섬유의 연속성도 가지고 있기 때문에 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려한 인장특성을 얻을 수 있는 시편형상을 가지고 있다. 또한 내압을 작용시키기 위한 특별한 시험장치를 필요로 하지 않으므로 시험치구가 비교적 간편한 장점을 가진다. 기존의 연구결과에 따르면 하중이 작용될 경우 시험치구 모서리 부위의 링시편에는 국부적인 굽힘현상으로 인한 응력집중이 발생하여 정량적인 인장강도를 얻기가 어렵고, 시험치구와의 마찰력으로 인해 인장강도의 평가도 부적합하다고 알려져 있다.<sup>(6)</sup> 그러나 최근에 제시된 연구결과에 따르면 적절한 데이터 처리기법을 적용할 경우 시험치구와의 마찰력을 고려한 정량적인 인장강도의 평가가 가능하고, 평판형태의 인장시편(tensile coupon)을 이용한 경우보다 혼합법칙에 의해 예측된 인장강도에 근접한 결과를 얻을 수 있다.<sup>(7,8)</sup> 이는 링형태 시편이 평판형 시편에 비하여 응력집중이 비교적 적을 뿐 아니라 보강섬유의 유한성 및 시편의 grip부의 영향이 없으므로 이론강도에 접근할 수 있어 일방향 복합재의 인장특성을 시험하는 방법으로 적합함을 보이고 있다.

본 연구에서는 강화섬유를 달리하여 제작한 링시편들의 인장강성을 평가하고 강화섬유에 따른 하중 지지능력을 조사하기 위해 필라멘트 와인딩된 링시편에 인장하중을 작용시키는 방법을 적용하였으며 평가된 결과들은 혼합법칙에 의해 예측된 이론적인 인장특성과도 비교하였다. 링시편의 제작에 사용된 강화섬유는 T300 탄소섬유, T800 탄소섬유, T1000 탄소섬유, S2 유리섬유 등으로 이들의 상대적인 인장특성을 비교하기 위해 제작공정을 가능한 동일하게 적용하였다.

## 2. 링시편의 종류 및 시험치구의 형상

Fig. 1에는 필라멘트 와인딩된 링시편의 형상이 나타나 있다. 링시편은 내경이 146 mm, 두께가 1.52 mm, 폭이 6.35 mm인 비교적 얇은 형상이다. 인장강도를 평가하기 위한 링시편은 4종류로서 강화섬유는 T300 탄소섬유, T800 탄소섬유, T1000 탄소섬유, S2 유리섬유 등이며 수지는 필라멘트 와인딩용 에폭시인 AD6005를 주재료 사용하고 경화제와 경화촉진제는 각각 H3326과 DY062를 사용

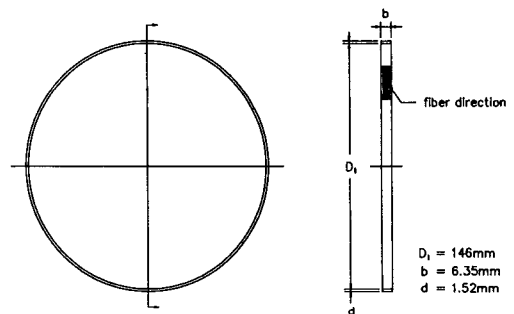
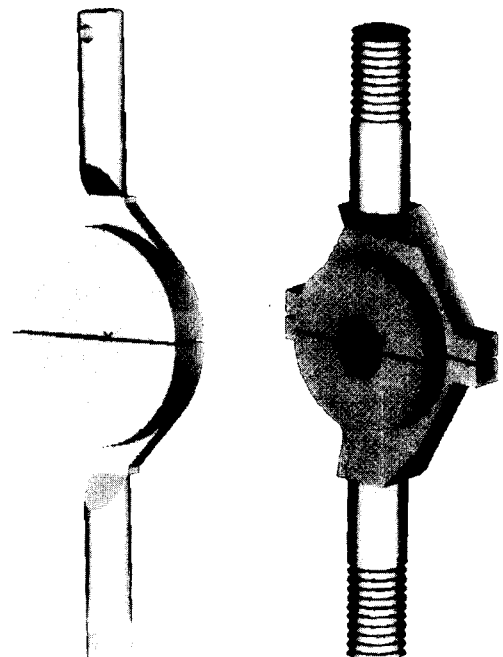


Fig. 1 The geometry of filament wound ring specimen



(a) Original test fixture (b) Modified test fixture

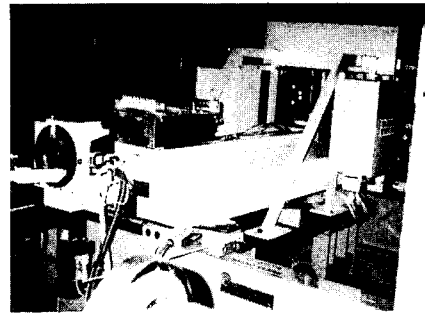
Fig. 2 The configuration of test fixtures

하였다. 인장강성을 평가하기 위한 링시편은 2종류로서 강화섬유는 T300 탄소섬유, S2 유리섬유 등이며 수지는 인장강도를 평가하기 위한 링시편의 경우와 동일하게 사용하였다.

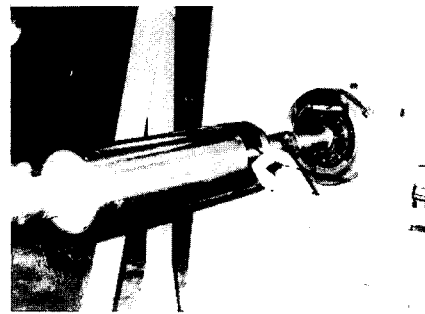
Fig. 2에는 필라멘트 와인딩된 링시편의 인장특성을 평가하기 위한 반원형 시험치구(split disk fixture)의 형상들이 나타나 있다. Fig. 2(a)는 기존 시험치구의 형상이며, (4) Fig. 2(b)는 기존 시험치구의 문제점을 개선한 수정된 시험치구의 형상이다. 여기에서 보면 기존 시험치구는 하중장치와 유니버설 조인트로 연결되어 있기 때문에 작용하중이 낮을 경우에는 링시편을 하중작용선에 정확하게 일치시킬 수 있다. 그러나 작용하중이 높을 경우에는 시험치구가 유니버설 조인트의 연결부를 기점으로 하중작용선에 수직인 면외(out-of-plane)방향의 회전이 생겨 링시편에는 폭방향을 따라 굽힘현상이 유발되어 파단하중이 과소평가되는 경우가 발생한다. 이와는 달리 수정된 시험치구는 하중장치와의 연결부가 나사로 고정되어 작용하중이 높아지는 경우에도 시험치구 자체가 면외방향으로 회전되지 않으며, 또한 시험치구 모서리에는 시험치구의 하중작용선 정렬을 위한 핀 구멍이 형성되어 있어 시험치구와 링시편을 하중작용선에 정확하게 일치시킬 수 있도록 개선하였다.

### 3. 링시편의 제작방법

Fig. 3에는 링시편을 제작하기 위한 필라멘트 와인딩 장치와 맨드렐(mandrel)이 나타나 있다. 링시편은 필라멘트 와인딩용 에폭시에 미리 함침시킨 강화섬유를 원통형상의 맨드렐에 감는 습식 필라멘트 와인딩 공법에 의해 제작하였다.<sup>(9)</sup>



(a) Filament winding machine



(b) The mandrel

Fig. 3 The overview of filament winding machine and mandrel

일반적으로 필라멘트 와인딩 구조물의 효율은 와인딩시 섬유장력과 섬유엔드 등에 영향을 받는다. 만약 섬유장력이 낮으면 과잉의 수지가 빠져 나오지 못하여 섬유부피함유율은 낮아지고 섬유장력이 지나치게 높으면 와인딩시 섬유의 끊어짐이 발생하여 구조물의 효율은 떨어진다. 또한 섬유엔드(fiber end)가 적으면 제작시간이 많이 소요되어 경제성이 떨어지며 섬유엔드가 많으면 와인딩시 결함이 포함

Table 1 The properties of various fibers used for this study

Fiber type	Manufacturer	Filament diameter (μm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile modulus (GPa)		Tensile strength (MPa)		Elongation (%)
				Supplied	Measured	Supplied	Measured	
T300	Toho	7.0	1.77	235	216	3920	3658	1.7
T800	Toray	5.0	1.81	294	271	5590	4843	1.9
T1000	Toray	5.0	1.82	294	262	7060	5584	2.4
S2 Glass	Owens-Corning fibreglas	9.1	2.46	87	93	4585	3744	5.4

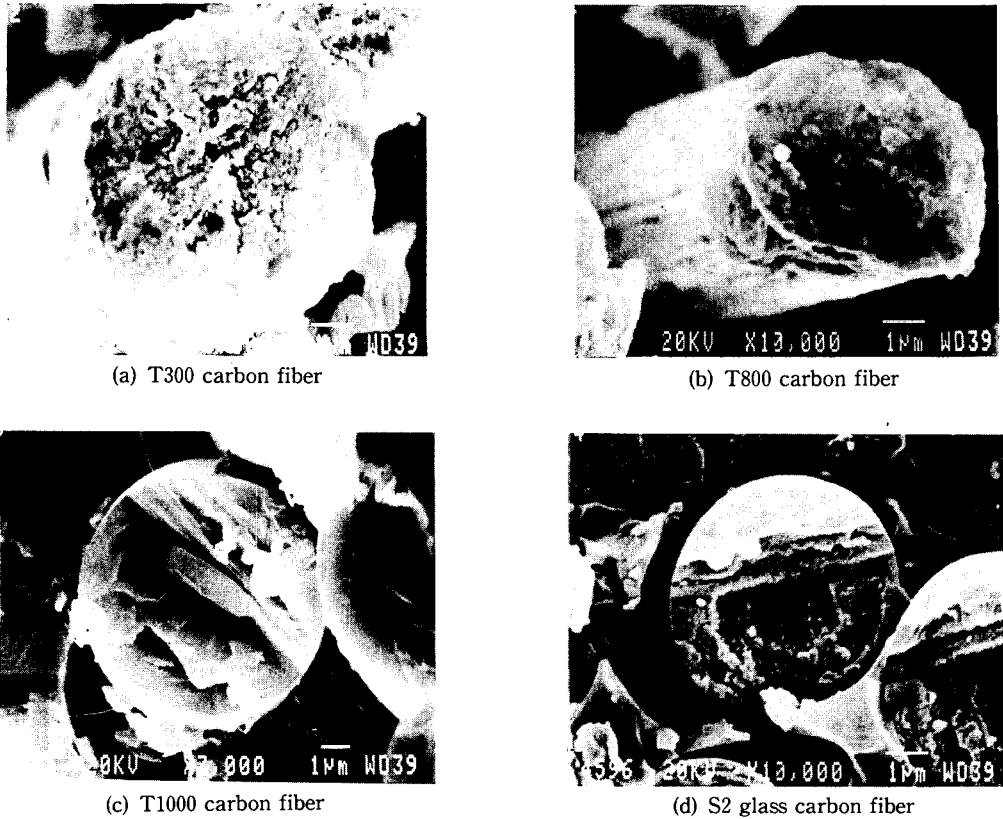


Fig. 4 The microstructures of various fibers

될 가능성이 많아진다. 본 연구에서는 강화섬유에 따른 링시편들의 인장특성을 비교하기 위해 섬유엔드는 3개를 사용하고 섬유장력은 섬유엔드당 2 kg를 적용하였다. 이 때 섬유장력은 필라멘트 와인딩 장치에 부착된 브레이크 디스크로 조절이 가능하지만 정확한 섬유장력의 적용 여부는 맨드릴에 감겨지기 직전의 섬유장력을 섬유장력계로 측정함으로써 확인하였다.

Table 1에는 링시편의 제작에 사용된 강화섬유들의 특성이 나타나 있다. 여기에서 강화섬유의 인장강성과 인장강도는 강화섬유의 스트랜드시험<sup>(10)</sup>을 통해 평가하였으며, 이때 평가된 강화섬유의 인장강도는 T300/AD6005의 경우 3658 MPa, T800/AD6005의 경우 4843 MPa, T1000/AD6005의 경우 5584 MPa, S2 Glass/AD6005의 경우 3744 MPa로서 섬유제작사에서 제공하는 인장강도에 비해 낮은 값을 나타내고 있다. Fig. 4에는 전자현미경을 통해 관찰한 강화섬유의 형상들이 나타나 있다. 이 때 사용한 전자현미경은 JEOL JXA-840A Electron

Prob Microscope로서 가속전압은 25 KV이며 최적 화상을 얻기 위해 관찰면에 200~300 Å의 금막처리를 하였다. 여기에서 보면 T300 탄소섬유는 직경 7 µm 정도의 둥근 원형, T800 탄소섬유는 직경 5 µm 정도의 찌그러진 원형, T1000 탄소섬유는 5 µm 정도의 둥근 원형, 그리고 S2 유리섬유는 9 µm 정도의 둥근 원형으로 되어 있다. Table 2에는 링시편의 제작에 사용된 수지의 특성이 나타나 있다. 수지는 필라멘트 와인딩용 에폭시로서 일반 용도의 수지에 비해 점도가 낮고, 강화섬유에 대한 수지함침성이 우수하며, 사용시간이 길뿐 아니라 수지의 파단변형률도 높아 다양한 종류의 압력용기 제작에 적용된다.

링시편의 제작공정은 맨드릴 장착 및 이형처리 → 필라멘트 와인딩 → 경화 → 탈형 → 가공 → 검사의 단계를 거치며 이에 대한 구체적인 절차는 다음과 같다.

(1) 원주방향 섬유감기가 가능하도록 필라멘트 와인딩 장치의 패턴을 결정한다. (2) 필라멘트 와

**Table 2** The characteristics of resin used for this study

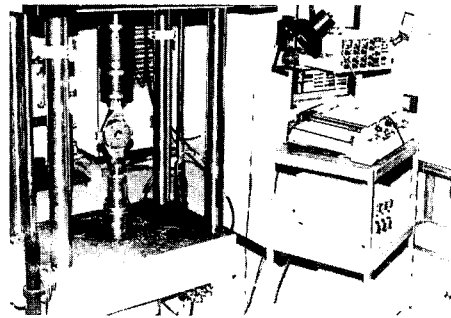
Mixed ratio(parts by weight)	100/80/1
Viscosity(cps)	700~850 at 25°C 200~300 at 40°C
Pot life(40°C, hr)	20~22 at 40°C
Density(g/cm <sup>3</sup> )	1.21
Tensile modulus(GPa)	3.3
Tensile strength(MPa)	83
Flexural strength(MPa)	127
Ultimate strain(%)	6.4
Poisson's ratio	0.35

인딩 장치에 맨드렐을 장착한 후 아세톤으로 표면을 세척하고 이형제(MS 443)로 이형처리한다. (3) 주재 AD6005, 경화제 H3326, 경화촉진제 DY062를 무게혼합비 100 : 80 : 1로 배합한 에폭시를 준비한다. (4) 강화섬유는 맨드렐의 원주방향을 따라 일방향으로 감으며 폭이 160 mm, 두께가 1.52 mm인 복합재 원통을 와인딩한다. (5) 와인딩이 완료된 미경화 상태의 복합재 원통은 맨드렐과 함께 건조로에서 경화시킨다. 이때 경화온도/경화시간은 80°C/2시간, 120°C/2시간, 160°C/8시간이며 온도상승률과 냉각률은 각각 2°C/분과 -4°C/분이다. (6) 경화가 완료되면 탈형기를 이용하여 복합재 원통을 맨드렐에서 탈형한 다음 이를 다시 가공용 맨드렐에 조립한다. (7) 링시편은 가공용 맨드렐에 조립된 복합재 원통에서 폭이 6.35 mm가 되도록 다이아몬드 휠로 절단하여 얻으며 절단된 링시편은 사포를 사용하여 다듬질한다.

#### 4. 링시편의 인장강도 평가

##### 4.1 실험방법

Fig. 5에는 링시편의 인장강도를 평가하기 위한 시험장치와 시험치구가 나타나 있다. 이때 하중장치는 Instron 1335(로드셀 용량 : 20톤) 유압하중시험기이고 시험치구는 Fig. 2(b)의 수정된 시험치구를 사용하였다. 또한 하중은 링시편에 정적 하중을 가하기 위해 변위제어 상태로 1.0 mm/min의 인장하중을 작용하였다. 링시편의 인장강도 평가시에는



(a) Test set-ups



(b) Test fixture with ring specimen

**Fig. 5** The overview of test set-up and test fixture with filament wound ring specimen

시험치구와 링시편의 하중작용선 정렬 그리고 링시편과 시험치구 사이의 마찰력이 평가된 결과에 영향을 미칠 우려가 있다. 본 연구에서는 시험치구 모서리부의 핀 구멍에 핀을 삽입한 다음 링시편을 시험장치에 밀착시켜 시험치구와 링시편을 하중작용선에 일치시켰다. 링 시편과 접촉되는 시험치구의 표면에는 흑연가루(graphite powder)를 균일하게 발라 주어 마찰력을 최소화하였다. 링시편의 인장강도는 파단하중에 의해 결정되며 식(1)과 같이 나타난다.

$$(S_m)_r = \frac{P_b}{2A} \tag{1}$$

여기에서  $P_b$ 는 링시편의 파단하중,  $A$ 는 시험치구 모서리 부위의 링시편 단면적이다.

##### 4.2 결과 및 고찰

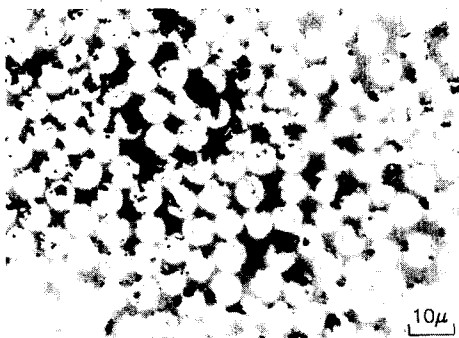
Table 3에는 강화섬유에 따른 링시편들의 인장강도가 나타나 있다. 여기에서 보면 링시편의 인장강도는 T300/AD6005의 경우 1845 MPa, T800/AD6005의 경우 2250 MPa, T1000/AD6005의 경우

**Table 3** The measured strength of various filament wound ring specimens

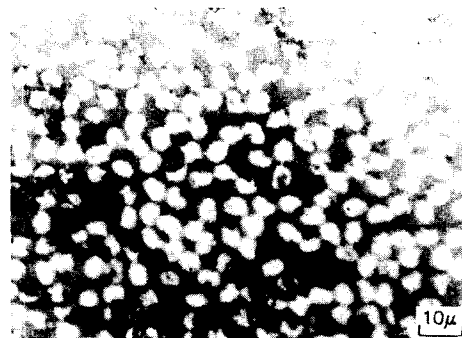
	Number of specimens	Fiber volume fraction (%)	Ring tensile strength(MPa)		Deviation(%) $ (S_p - S_m)/S_p $
			Predicted $S_p$	Measured $S_m$	
T300/AD6005	5	58	2157	1845	14.5
T800/AD6005	6	55	2701	2250	16.7
T1000/AD6005	7	56	3164	2746	13.2
S2 Glass/AD6005	5	53	2023	1585	21.7

2746 MPa, 그리고 S2 Glass/AD6005의 경우 1585 MPa이다. 일반적으로 인장강도는 링시편의 섬유부피함유율에 영향을 받으며 섬유부피함유율이 동일하지 않을 경우 평가된 인장강도만으로는 강화섬유들의 하중지지능력을 비교하기 어렵다. 본 연구에서는 링시편의 인장강도들을 정량적으로 비교하기 위해 황산용해법<sup>(11)</sup>으로 링시편의 섬유부피함유율을 측정하였으며 이때 측정된 섬유부피함유율은

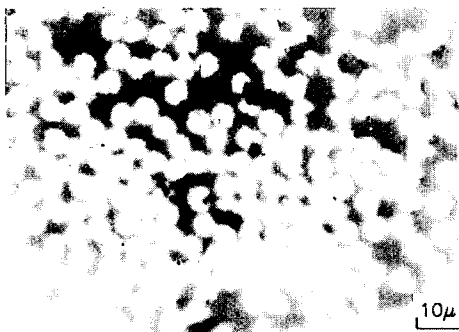
T300/AD6005의 경우 58%, T800/AD6005의 경우 55%, T1000/AD6005의 경우 56%, S2 Glass/AD6005의 경우 53%이다. Fig. 6에는 광학현미경을 이용하여 강화섬유의 분포상태를 관찰한 단면사진들이 나타나 있다. 여기에서 보면 강화섬유들은 비교적 균일하게 분포되어 있으며, 육안으로 관찰한 단위면적당 강화섬유의 면적비는 S2 Glass/AD6005, T800/AD6005, T1000/AD6005, T300/



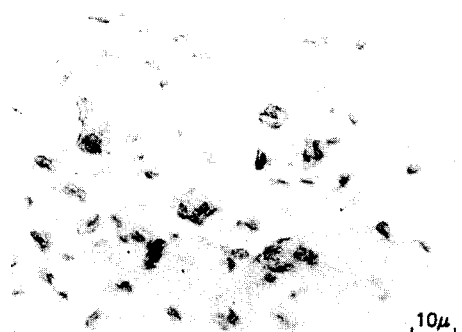
(a) T300/AD6005(×800)



(b) T800/AD6005(×800)



(c) T1000/AD6005(×800)



(d) S2/AD6005(×800)

**Fig. 6** The microphotographs of various filament wound ring specimens

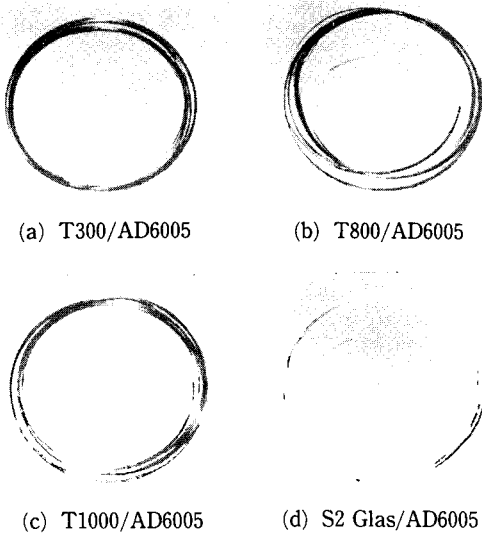


Fig. 7 The typical fracture specimens for tensile strength measurement

AD6005 순으로 커져 황산용해법을 이용한 섬유부피함유율의 결과와 비교적 잘 일치한다. 따라서 혼합법칙에 의해 예측된 인장강도는 T300/AD6005의 경우 2157 MPa, T800/AD6005의 경우 2701 MPa, T1000/AD6005의 경우 3164 MPa, S2 Glass/AD6005의 경우 2023 MPa로서, 링시편을 이용하여 평가된 인장강도들은 강화섬유에 따라 달라지지만 혼합법칙에 의한 이론적인 인장강도에 비해 반원형 치구 모서리 주위에서 링시편 두께방향의 응력집중에 의하여 13~21% 낮게 나타난다. Fig. 2(b)의 개선된 치구를 사용하여 측정된 T800/AD6005 시편의 경우 혼합법칙에 의한 이론강도에 비하여 16% 낮은 값을 보였다. (Table 3) 이에 비하여 참고문헌 (12)의 동일재료 링시험 결과는 ASTM2290의 치구(Fig. 2(a))를 사용하여 측정된 인장강도가 이론치에 비하여 24% 낮은 값을 보였다. 따라서 Fig. 2(b)의 치구형상 개선을 통하여 링시편 폭방향의 굽힘에 의한 응력집중 효과를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7에는 강화섬유에 따른 링시편들의 전형적인 파단양상이 나타나 있다. 링시편의 응력 및 변형률을 조사한 유한요소 구조해석의 결과에 따르면<sup>(6)</sup> 링시편에 작용된 하중에 의해 시험치구 모서리 부위의 링시편에는 국부적인 굽힘현상이 발생하며 이는 링시편의 파단을 유발시키는 요인이다. 본 연구

에서 관찰된 파단양상도 시험치구 모서리와 접하는 링시편에서 먼저 파손이 발생하고 뒤이어 원주방향을 따라 파손이 진전된 다음 최종파단에 이르게 되어 해석결과와도 비교적 잘 일치한다.

### 5. 링시편의 인장강성 평가

#### 5.1 실험방법

링시편의 인장강성을 평가하기 위해서는 하중작용시와 하중제거시의 하중-변형률 선도가 필요하며 이를 위해 링시편의 외면에 부착된 스트레인게이지를 통해 변형률을 측정하였다. Fig. 8에는 링시편의 외면에 부착된 스트레인게이지의 위치와 스트레인게이지들이 부착된 링시편의 형상이 나타나 있다. 사용한 스트레인게이지는 8개의 KYOWA KFG-2-120-C1-11로서 링 시편의 위치에 따른 변형률 분포를 조사하기 위해 원주방향을 따라 링시편의 수평면을 기준으로 7.5° 간격으로 3개를, 15° 간격으로 5개를 부착하였다.

링시편의 인장강성을 평가하기 위해서는 인장강도를 평가하는 경우와는 달리 연속적인 하중작용과 하중제거의 과정이 필요하다. 유압하중시험기를 이용하는 경우 통상적인 인장시험에 적용되는 램프파형에 의해 유압장치를 구동하면 하중작용시의 하중율은 하중제거시의 하중률과 달라지며 이는 시편에 형성되는 변형률에 영향을 미칠 우려가 있다. 본 연구에서는 하중작용시와 하중제거시 동일한 하중율을 유지시켜 주기 위해 Fig. 9와 같은 삼각파형에 의해 유압장치를 구동하였으며 작용하중에 대한 변형률은 컴퓨터를 이용한 자료수집장치를 이용하여 기록하였다. 링시편을 이용하여 인장강성을 평가하는 경우에는 링시편의 굽힘현상 및 시험치구와

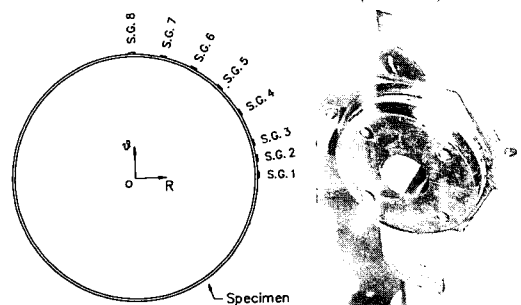


Fig. 8 The gage locations of filament wound ring specimen

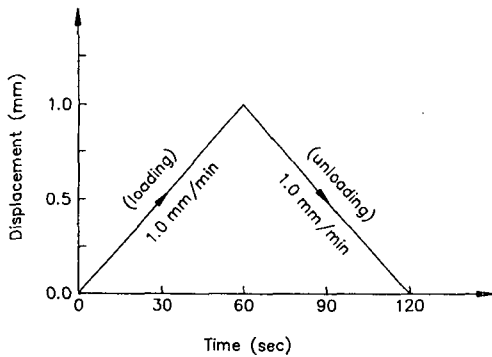


Fig. 9 Triangle waveform of hydraulic actuator control for loading and unloading conditions

의 마찰력 영향이 고려되어야 한다. 이때 굽힘현상은 작용하중에 의한 시험치구 모서리 부위의 링 시편에 나타나는 국부적인 현상으로 시험치구 모서리에서 어느 정도 멀어지면 이러한 굽힘현상은 급격히 감소되기 때문에 변형을 측정위치의 적절한 선정이 필요하다. 또한 시험치구와의 마찰력은 인장강성 평가에 영향을 미치는 주요인으로서 하중작용시에는 하중작용과 반대방향으로 마찰력이 형성되어 작용하중의 감소효과를 초래하며, 하중제거시에는 하중제거와 반대방향으로 마찰력이 형성되어 변형을 감소의 억제효과를 초래한다. 이러한 마찰력은 하중작용시와 하중제거시 각각 크기가 동일하고 방향이 반대이기 때문에 하중작용과 하중제거를

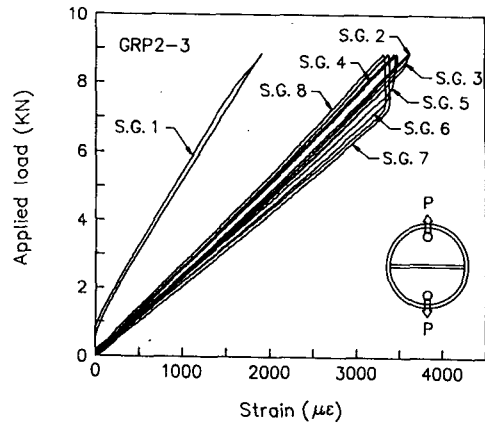


Fig. 10 Load-strain curves for T300/AD6005 at various gage locations from experiments

통해 얻은 하중-변형률 선도를 이용하면 정량적인 인장강성의 평가가 가능하다. 링시편의 인장강성은 하중작용시와 하중제거시의 인장강성들에 의해 결정되며 식(2)와 같이 나타난다.<sup>(7)</sup>

$$(E_g)_{true} = \frac{(E_g)_l + (E_g)_u}{2} \quad (2)$$

여기에서  $(E_g)_l$ 은 하중작용시의 인장강성,  $(E_g)_u$ 은 하중제거시의 인장강성이다.

5.2 결과 및 고찰

Fig. 10에는 T300/AD6005 링시편의 외면에 부

Table 4 The measured modulus of filament wound ring specimen of T300/AD6005 at several gage locations through experiments

Gage location	Tensile modulus(GPa)			Deviation(%)  [(E <sub>g</sub> ) <sub>p</sub> - (E <sub>g</sub> ) <sub>true</sub> ]/(E <sub>g</sub> ) <sub>p</sub>
	Loading path (E <sub>g</sub> ) <sub>l</sub>	Unloading path (E <sub>g</sub> ) <sub>u</sub>	Average (E <sub>g</sub> ) <sub>true</sub>	
1	229.0	239.2	234.1	-
2	126.5	123.5	125.0	1.3
3	130.3	126.2	128.2	1.2
4	132.7	122.3	127.5	0.6
5	137.5	121.0	129.3	2.1
6	143.5	122.0	132.8	4.8
7	149.9	122.0	136.0	7.3
8	147.1	114.7	130.9	3.3

\* Predicted modulus(E<sub>g</sub>)<sub>p</sub>: 126.7 GPa



착된 8개의 스트레인게이지를 통해 측정된 하중-변형률 선도들이 나타나 있다. 여기에서 보면 시험치구 모서리인 S. G. 1에서의 변형률은 링 시편의 굽힘현상으로 인해 S. G. 2~S. G. 8에서의 변형률보다 작아진다. 또한 S. G. 2~S. G. 8에서의 하중-변형률 선도는 링시편과 접촉되는 시험치구의 표면에 흑연가루를 균일하게 발라 마찰력을 최소화시켰음에도 불구하고 히스테리시스를 나타내고 있다. 이러한 히스테리시스는 링시편과 시험치구 사이의 마찰력에 기인하며 이는 시험치구와 접촉되는 링 시편의 시험치구 모서리로부터 게이지까지 길이가 짧을수록 작아지고, 시험치구와 접촉되는 링 시편의 길이가 길수록 커진다.

Table 4에는 T300/AD6005 링시편의 하중작용시와 하중제거시 인장강성들이 나타나 있다. 여기에서 보면 시험치구 모서리인 S. G. 1에서의 하중작용시와 하중제거시 인장강성은 링시편의 국부적인 굽힘현상으로 인해 시험치구 모서리에서 떨어진 S. G. 2~S. G. 8에서의 인장강성보다 훨씬 높게 나타난다. 반면에 S. G. 2~S. G. 8에서는 하중작용시 작용하중과 반대방향으로 형성된 마찰력이 링시편에 작용되는 하중감소의 효과를 초래하여 마찰력이 없는 경우에 비해 변형률은 감소되고 인장강성은 커진다. 하중제거시에는 링시편과 시험치구 사이의 마찰력이 변형률 감소를 억제하여 마찰력이 없는 경우에 비해 변형률은 증가되고 인장강성은 작아진

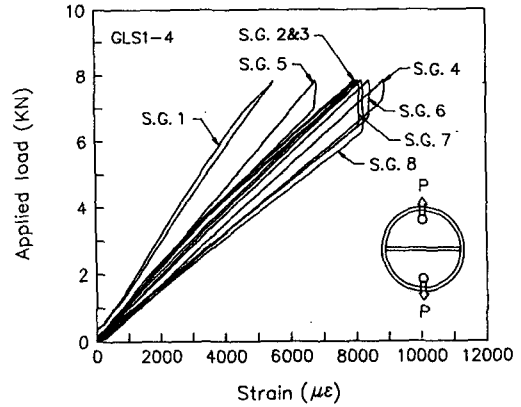


Fig. 11 Load-strain curves for S2 Glass/AD6005 at various gage locations from experiments

다. 이때 식(2)에 의해 평가된 링시편의 인장강성은 최소값이 125.0 GPa, 최대값이 136.0 GPa이며 강화섬유의 수지의 강성, 그리고 섬유부피함유율을 적용한 혼합법칙에 의해 예측된 이론값은 126.7 GPa이다. 따라서 이들 자료를 토대로 판단하면 스트레인게이지의 부착위치를 적절하게 선정함으로써 혼합법칙에 의해 예측된 이론값과 가까운 인장강성을 얻을 수 있다.

Fig. 11에는 S2 Glass/AD6005 링시편의 하중-변형률 선도들이 나타나 있다. 이때 시험치구 모서리인 S. G. 1에서의 변형률은 국부적인 굽힘현상으로

Table 5 The measured modulus of filament wound ring specimen of S2 Glass/AD6005 at several gage locations through experiments

Gage location	Tensile modulus(GPa)			Deviation(%) $ [(E_g)_p - (E_g)_{true}] / (E_g)_p $
	Loading path ( $E_g)_l$	Unloading path ( $E_g)_u$	Average ( $E_g)_{true}$	
1	92.6	97.6	95.1	-
2	47.9	46.1	47.0	7.5
3	50.8	47.6	49.2	3.1
4	45.6	42.0	43.8	13.8
5	59.8	49.2	54.5	7.2
6	54.7	45.4	50.1	1.4
7	53.7	42.5	48.1	5.3
8	52.5	40.6	46.6	8.3

\* Predicted modulus( $E_g)_p$ : 50.8 GPa

인해 T300/AD6005 링시편의 경우와 마찬가지로 시험치구 모서리에서 떨어진 S. G. 2~S. G. 8에서의 변형률보다 낮으며 S. G. 2~S. G. 8에서의 하중-변형률 선도도 시험치구와의 마찰력으로 인해 히스테리시스 루프를 형성한다. Table 5에는 S2 Glass/AD6005 링시편의 하중작용시와 하중제거시 인장강성들이 나타나 있다. 여기에서 보면 시험치구 모서리인 S. G. 1에서의 하중작용시와 하중제거시 인장강성은 시험치구 모서리에서 떨어진 S. G. 2~S. G. 8에서의 인장강성보다 훨씬 높게 나타난다. 또한 하중작용시에는 시험치구와의 마찰력 증가로 인하여 인장강성이 커지며 이는 시험치구 모서리에서 멀어질수록 증가한다. 하중제거시에는 시험치구와의 마찰력이 링시편의 변형률 감소를 억제시켜 시험치구 모서리에서 멀어질수록 인장강성은 작아지며 이는 시험치구 모서리에서 멀어질수록 감소한다. 이때 평가된 링시편의 인장강성은 최소값이 43.8 GPa, 최대값이 54.5 GPa이며 혼합법칙에 의해 예측된 이론값은 50.8 GPa으로 이 경우에도 스트레인게이지의 부착위치만 적절하게 선정하면 혼합법칙에 의해 예측된 이론값과 유사한 인장강성을 얻을 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 필라멘트 와인딩된 링시편에 인장하중을 작용하는 방법을 적용하여 강화섬유를 달리 하여 제작한 링시편들의 인장강도와 인장강성을 평가하였다. 필라멘트 와인딩 제품의 품질조절용으로만 주로 사용되어 온 반원형 치구에 의한 링시험법을 시험치구의 개량과 시험치구에 의한 국부적 굽힘이 없는 위치에 스트레인게이지를 접착하고 하중작용과 하중제거시의 평균치를 구하는 방법으로 필라멘트 와인딩 구조의 정량적 물성평가에 반원형 치구에 의한 링시험법이 사용될 수 있음을 보였다. 링시편의 인장강도는 강화섬유에 따라 달라지지만 혼합법칙에 의해 예측된 인장강도보다는 시험치구의 모서리에서의 국부적 굽힘에 의한 응력집중 때문에 조금 낮게 평가된다. 링시편의 인장강성을 구하기 위한 하중-변형률 선도는 시험치구와의 마찰력으로 인해 히스테리시스 루프를 나타낸다. 이와 같은 마찰력의 영향을 배제하기 위해서는 하중작용시와 하중제거시의 하중-변형률 선도를 고려하여야 하며 링시편의 인장강성은 스트레인게이지의 부착

위치만 적절하게 선정하면 혼합법칙에 의해 예측된 인장강성과 유사한 값을 얻을 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Rosato, D. V. and Grove, C. S. Jr., 1964, *Filament Winding : Its Development, Manufacture, Applications and Design*, John Wiley & Sons, Inc.
- (2) ASTM D2585-68, 1992, "Standard Test Method for Preparation and Tension Testing of Filament-Wound Pressure Vessels," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 15. 03.
- (3) Erickson, P. W., Perry, H. A. and Barnet, F. R., March 1961, "Status of the NOL Ring Test for Glass Roving Reinforced Plastics," *Proceedings of Filament Winding Conference, Society of Aerospace Materials and Process Engineers*.
- (4) ASTM D2290-87, 1992, "Standard Test Method for Apparent Tensile Strength of Ring or Tubular Plastics and Reinforced Plastics by Split Disk Method," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 15. 03.
- (5) Munjal, A. K., Kulkarni, S. B. and Starret, H. S., 1984, "Characterization of Filament Wound Kevlar and Glass Composites for Rocket Motor Applications," April, *29th National SAMPE Symposium*.
- (6) Knight, C. E. Jr., 1977, "Failure Analysis of the Split-D Test Method," *Composite Materials: Testing and Design(Fourth Conference)*, July, *ASTM STP 617, American Society for Testing and Materials*, pp. 201~214.
- (7) Yoon, S. H., Kim, C. G. and Cho, W. M., 1994, "Evaluation Technique for Tensile Modulus of Filament Wound Ring Specimen Considering the Frictional Effect," *Transactions of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, To be Published.
- (8) Yoon, S. H., Kim, C. G. and Cho, W. M., 1994, "Comparison of Tensile Properties Between Ring Specimen and Tensile Coupon

- Specimen Manufactured By Filament Winding Process," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Submitted.
- (9) ASTM D2291-83, 1992, "Standard Practice for Fabrication of Ring Test Specimens for Glass-Resin Composites," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 15. 03.
- (10) ASTM D4018-81, 1990, "Standard Test Method for Tensile Properties of Continuous Filament Carbon and Graphite Yarns, Strands, Rovings and Tows," *ASTM Standards and Literature References for Composite Materials*, 2nd ed., ASTM, Philadelphia, PA.
- (11) ASTM D3171-76, 1990, "Test Method for Fiber Content of Resin-Matrix Composites by Matrix Digestion," *ASTM Standards and Literature References for Composite Materials*, 2nd ed., ASTM, Philadelphia, PA.
- (12) 정 발, 조원만 외, 1992, "Split Disk 시험을 이용한 복합재 구조물의 공정변수 연구," 국방과학연구소 연구보고서.