

## 필라멘트와인딩 복합재의 기계적 특성과 와인딩시 공정변수와의 관계에 대한 실험적 고찰

윤성호\* · 김준영\* · 황태경\*\*

### Experimental Investigation on Relationship of Winding Process Variables and Mechanical Properties for Filament Wound Composites

Sung-Ho Yoon\* · Jun-Young Kim\* · Tae-Kyung Hwang\*\*

#### ABSTRACT

The relationship of the winding process variables and the mechanical properties of filament wound composites is investigated experimentally. The winding process variables considered are the fiber tensions and the fiber ends. The filament wound ring specimens are fabricated using 3-axis controlled filament winding machine. Two types of carbon fibers, TZ-507 and IZ-40, are used as reinforcements and epoxy for filament winding is used as resin. During the winding process, the fiber tensions are varied from 0.5kgf to 3.0kgf, and the number of the fiber ends are varied from 1 to 6. The fiber volume fractions and the void contents for the ring specimens are measured through the resin digestion. The mechanical properties of the ring specimens are also evaluated by the split disk test. The test results show that the winding process variables affect the fiber volume fractions and the void contents of the ring specimens, which result in the variation of the tensile properties of the ring specimens. Therefore, suitable winding process variables should be applied to maximize the structural performance and the productivity for filament wound structures.

#### 초 록

본 연구에서는 와인딩시 공정조건의 변화가 필라멘트와인딩 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 와인딩시의 공정변수로는 섬유장력과 섬유엔드수를 고려하였다. 고려한 시편은 필라멘트와인딩 공법으로 제작된 링 시편으로 강화섬유는 TZ-507 탄소섬유와 IZ-40 탄소섬유를 사용하고 수지는 필라멘트와인딩용 에폭시를 사용하였다. 와인딩시 섬유장력은 0.5kgf에서 3.0kgf의 범위에서 변화시켰으며 섬유엔드수는 1엔드에서 6엔드의 범위에서 변화시켰다. 와인딩시 섬유장력과 섬유엔드수를 변화시킨 링

\* 금오공과대학교 기계공학부(Kumoh National University of Technology, School of Mechanical Engineering)

\*\* 국방과학연구소(Agengy for Defense Development)

시편의 섬유체적비와 기공함유율은 황산용해법을 적용하여 측정하였으며 이들 렇 시편의 기계적 특성은 스프릿 디스크 시험을 통해 평가하였다. 본 연구의 수행을 통해 얻어진 결과들로 판단하면 와인딩시 섬유장력과 섬유엔드수는 필라멘트와인딩 복합재의 섬유체적비와 기공함유율을 변화시킬 뿐 아니라 필라멘트 와인딩 복합재의 기계적 특성에도 밀접한 영향을 미친다. 따라서 필라멘트와인딩 복합재의 구조성능을 극 대화하고 생산성을 향상시키기 위해서는 최적의 필라멘트 와인딩 공정조건이 적용되어야 한다.

## 1. 서 론

필라멘트와인딩 공법은 원하는 형상으로 가공되어 있는 축대칭 형상의 맨드렐 위에 열경화성 수지가 함침된 강화섬유들을 적절한 적층각도와 적층두께를 갖도록 연속적으로 감아 주는 제작공법 중의 하나로 주로 로케트부스터, 모타케이스, 고압용기, 발사관 등 구조적인 성능이 우수하고 경량화가 요구되는 대형 복합재 구조물의 제작에 사용되고 있다<sup>(1-4)</sup>. 필라멘트와인딩 공법에 의한 복합재 구조물을 제작하는 경우 설계자는 복합재 구조물의 구조성능을 극대화 시킬 수 있는 설계기법의 개발을 위해 많은 노력을 기울여 왔으며, 제작자는 생산성을 향상시킬 수 있는 최적의 공정조건 도출을 위해 많은 관심을 가져 왔다. 일반적으로 강화섬유와 수지로 구성되어 있는 복합재를 성형하기 위해서는 규정된 온도와 압력 등이 적절하게 적용되어야 한다<sup>(5,6)</sup>. 이때 압력은 복합재를 성형할 때 유출되는 과잉의 수지와 내부에 포함될 가능성이 있는 기공을 외부로 배출시켜 주는 역할을 한다. 특히 성형시 압력을 작용시키면 복합재 내에서의 과잉의 수지와 기공을 배출하여 복합재 내에서의 섬유체적비를 증가시키고 기공함유율은 감소시키는 효과를 얻을 수 있다.

필라멘트와인딩 공법에 의해 복합재를 제작하는 경우 복합재 내에서의 과잉의 수지와 기공을 배출하기 위해서는 주로 와인딩시 강화섬유에 적용되는 섬유장력을 높여 주는 방법과 와인딩이 완료된 후의 복합재 외면에 수축테이프를 감은 다음 오븐 속에서의 온도를 가하여 수축테이프를 강제적으로 수축시켜 주는 방법 등이 적용되고 있다. 와인딩시 섬유장력을 적용하는 방법은 수축테이프와 같은 이차적인 부재를 사용하지 않고 비교적 쉽게 과잉의 수지와 기공을 배출할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 와인딩시 섬유장력을 지나치게 높이는 경우에는 와인-

딩 도중에 강화섬유들이 끊어지는 현상이 발생하게 되므로 필라멘트와인딩 공법 자체가 갖는 강화섬유의 연속성을 갖지 못하는 결과를 초래하여 구조성능이 떨어지는 단점이 있다. 반면에 와인딩시 강화섬유에 작용하는 섬유장력을 지나치게 낮추면 과잉의 수지와 기공의 배출이 원활하지 않아 복합재 내에서의 섬유체적비는 상대적으로 낮아지고 기공함유율은 높아지게 되므로 와인딩시 섬유장력을 지나치게 높이는 경우에서와 마찬가지로 구조성능은 저하되는 결과를 초래한다.

최근에는 필라멘트와인딩 공법에 의해 대형 복합재 구조물을 제작하는 경우 생산성을 향상시키기 위한 하나의 방편으로 와인딩시 섬유엔드수를 증가시켜 줌으로써 와인딩에 소요되는 에 소요되는 공정시간을 뿐 아니라 필라멘트와인딩 복합재의 구조성능에도 영향을 미치게 된다. 통상적으로 와인딩시 섬유엔드수를 늘리면 와인딩에 소요되는 공정시간은 단축시킬 수 있지만 강화섬유의 이송장치인 아이를 통과한 강화섬유들이 맨드렐 위에 제대로 펼쳐지지 않은 상태로 와인딩되어 기공들이 강화섬유 사이에 함유되어 있을 가능성이 높아진다. 반면에 와인딩시 섬유엔드수를 적게 사용하면 와인딩시 강화섬유의 펼침성이 양호하여 강화섬유 사이에 함유될 기공을 최소화할 수 있으나 와인딩에 소요되는 공정시간이 길어져 생산성을 떨어진다.

본 연구에서는 필라멘트와인딩 공법을 통해 복합재를 제작하는 경우 와인딩시 적용되는 섬유장력과 섬유엔드수 등의 공정변수가 필라멘트와인딩 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. 사용한 시편은 필라멘트와인딩 공법을 적용하여 제작한 렇 시편으로 강화섬유는 탄소섬유를 사용하고 수지는 고압용기의 제작에 널리 적용되고 있는 필라멘트와인딩용 에폭시를 사용하였다. 이때 강화섬유로 사용한 탄소섬유는 (주)태광산업의 TZ-507

탄소섬유와 IZ-40 탄소섬유를 고려하였으며 에폭시는 Ciba-Geigy의 Epon826/Tonox6040/RD-2를 고려하였다. 와인딩시 공정변수 중의 하나인 섬유장력은 섬유엔드당 0.5kgf~3.0kgf의 범위에서 다섯 경우로 변화시켰으며 섬유엔드수는 1엔드~6엔드의 범위에서 여섯 경우로 변화시켰다. 특히 섬유장력의 영향을 고찰하기 위한 링 시편의 제작시는 섬유엔드수를 2엔드로 고정시키고 섬유장력만을 여섯 경우로 변화시켰으며 섬유엔드수의 영향을 고찰하기 위한 링 시편의 제작시는 섬유장력을 1.5kgf로 고정시키고 섬유엔드수만을 다섯 경우로 변화시켰다.

## 2. 시편제작 및 시험장치

필라멘트와인딩 공법을 통해 제작된 복합재의 구조성능은 강화섬유와 수지 등의 사용재료 그리고 와인딩시 적용된 섬유장력과 섬유엔드수 등의 공정변수에 의해 영향을 받는다. 그림 1에는 와인딩시 섬유장력과 섬유엔드수의 변화가 필라멘트와인딩 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 ASTM D2290에서 제시된 링 시편의 형상이 나타나 있다<sup>(7)</sup>. 여기에서 보면 링 시편의 내경은 146 mm, 두께는 1.52 mm, 폭은 6.35mm이며 수지가 합침된 강화섬유를 맨드렐의 원주방향을 따라 일방향으로 와인딩하였다. 특히 링 시편의 강화섬유로는 (주)태광산업의 TZ-507 탄소섬유와 IZ-40 탄소섬유를 사용하였으며 수지로는 필라멘트와인딩 복합재의 제작에 널리 적용되는 Ciba-Geigy의 Epon826 / Tonox6040/RD-2을 100/29/28의 무게비로 혼합하여 사용하였다. 와인딩시 섬유장력은 섬유엔드당 0.5kgf, 1.0kgf, 1.5kgf, 2.0kgf, 3.0kgf의 다섯 경우로 변화시켰으며 섬유엔드수는 1엔드, 2엔드, 3엔드, 4엔드, 5엔드, 6엔드의 여섯 경우로 변화시켰다. 이때 섬유엔드란 규정된 개수만큼의 필라멘트들을 모아 놓은 섬유다발로 정의되며 본 연구에서는 필라멘트와인딩 복합재의 제작에 널리 적용되는 12,000 개 (12K)의 필라멘트로 이루어진 섬유엔드를 사용하였다. 예를 들면, 섬유엔드수를 3엔드로 적용한 경우 강화섬유의 이송장치인 아이를 통과하여 맨드렐 위에 감기는 필라멘트의 전체 개수가 36,000개임을

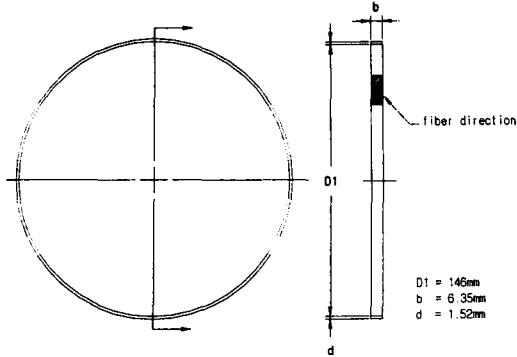


Fig. 1 Configuration of filament wound ring specimen

Table 1. Properties of epoxy used for this study

	unit	epoxy
Tensile strength	MPa	73.5
Tensile modulus	GPa	3.2
Poisson's ratio	-	0.42
Density	g/cm <sup>3</sup>	1.2

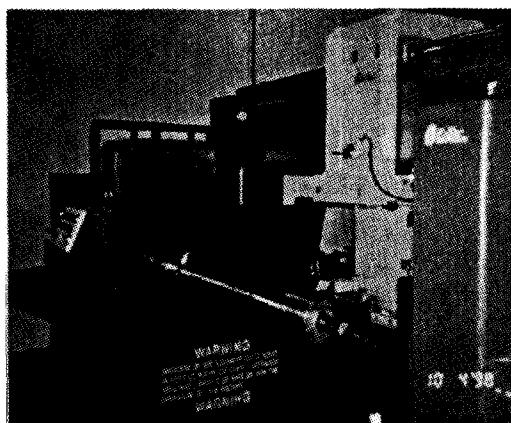
Table 2. Properties of the carbon fibers used for this study.

	unit	TZ-507	IZ-40
Tensile strength	MPa	3712	4680
Tensile modulus	GPa	253	281
Ultimate elongation	%	1.5	1.3
Density	g/cm <sup>3</sup>	1.8	1.8
Filament diameter	μm	6.8	5.4
Specific heat	cal/g °C	0.17	0.17
Coeff. of thermal expansion	1/°C	$-0.1 \times 10^{-6}$	$-0.1 \times 10^{-6}$
Thermal conductivity	Kcal/mh °C	15	15
Resistivity	Ωcm	$1.5 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$

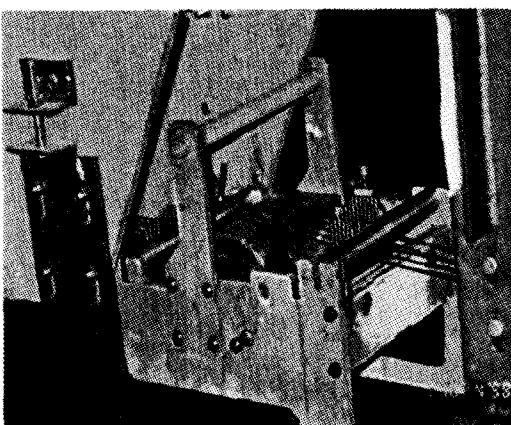
의미한다. 섬유장력의 영향을 조사하기 위한 링 시편의 경우에는 섬유엔드수를 2엔드로 고정한 다음 섬유장력을 변화시켰으며 섬유엔드수의 영향을 조사하기 위한 링 시편의 경우에는 섬유장력을 섬유엔드 당 1.5kgf로 고정한 다음 섬유엔드수를 변화시켰다.

표 1과 표 2에는 각각 강화섬유로 사용한 IZ-40 탄소섬유와 TZ-507탄소섬유의 특성과 수지로 사용한 Epon826/Tonox6040/RD-2의 특성이 나타나 있다<sup>(8)</sup>.

그림 2에는 링 시편의 제작에 사용된 맨드렐이 장착된 En-Tec사의 3축 필라멘트와인딩 장치가 나타나 있다. 필라멘트와인딩 공법을 적용하여 링 시



(a) Filament winding machine with mandrel



(b) Resin bath and fiber delivery system

Fig 2. Photographs of 3-axis controlled filament winding machine.

편을 제작하기 위한 절차는 다음과 같다. 먼저 외경이 146mm인 원통형 맨드렐을 필라멘트와인딩 장치에 장착한 다음 맨드렐의 표면에 이형체를 균일하게 도포한다. 규정된 섬유엔드수를 가진 강화섬유들이 일정한 섬유장력을 갖도록 장력조절기를 이용하여 섬유장력을 조절한 후 맨드렐 위에 길이가 800mm이고 두께가 1.52mm인 원통이 되도록 원주방향을 따라 수지가 함침된 강화섬유들을 일방향으로 와인딩한다. 와인딩이 완료되면 수지가 함침된 강화섬유들로 이루어진 미경화 상태의 복합재 원통이 감겨 있는 맨드렐을 회전축이 장착된 오븐 속에 장착한 다음 규정된 시간동안 일정 속도로 회전시키면서 경화시킨다. 이때 경화조건은 80°C에서 2시간, 120°C에서 2시간, 150°C에서 8시간을 유지하였으며 온도상승율과 온도하강율은 1°C/min를 적용하였다. 경화가 완료되면 탈형기를 이용하여 복합재 원통을 맨드렐에서 탈형시키고 이를 다시 가공용 맨드렐에 장착시킨다. 가공용 맨드렐에 장착된 원통형 복합재는 다이아몬드 훈을 이용하여 규정된 폭을 갖도록 절단한 다음 절단면을 다시 사포로 매끈하게 다듬질한다.

### 3. 섬유체적비와 기공함유율 평가

필라멘트와인딩 복합재에서의 섬유체적비와 기공함유율은 와인딩시 섬유장력과 섬유엔드수와 밀접한 관계가 있으며 이들은 필라멘트와인딩 복합재의 기계적 특성에 영향을 미치게 된다. 와인딩시 섬유장력과 섬유엔드수의 변화가 필라멘트와인딩 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 필라멘트와인딩 공법으로 제작된 링 시편에서의 섬유체적비와 기공함유율을 황산용해법을 적용하여 다음의 절차에 따라 측정하였다<sup>(9)</sup>. 필라멘트와인딩된 링 시편에서 0.5g 정도의 무게를 갖는 시료를 채취한 다음 이를 30°C의 오븐에 넣어 건조시킨다. 건조가 끝난 시료는 고정도의 전자저울을 이용하여 공기 중에서의 무게와 물 속에서의 무게를 측정한다. 무게측정이 완료된 시료는 황산 50ml가 담긴 용기에 넣고 120°C의 오븐에서 2시간 정도 가열시켜 수지를 녹임으로써 강화섬유와 수지를 분리시킨다. 수지가 녹

아 있는 황산 용액은 과산화수소수를 서서히 부어 황산을 중화시키고 용기 내에서의 강화섬유는 거름 종이를 이용하여 분리시킨 다음 중류수로 충분히 세척한다. 세척이 완료된 강화섬유는 30°C의 진공 오븐에서 6시간 정도 건조시킨 다음 공기 중에서의 무게를 측정한다. 이때 섬유체적비와 기공함유율은 각각 식(1)과 식(2)에 의해 구한다.

$$V_f = \frac{\left(\frac{w_f}{\rho_f}\right)}{\left(\frac{w_c}{w_{ca} - w_{cw}}\right)} \times 100 \quad (1)$$

$$V_r = 100 - (V_f + V_v) \quad (2)$$

여기에서  $w_f$ 는 공기 중에서의 강화섬유 무게,  $w_{ca}$ 는 공기 중에서의 복합재 무게,  $w_{cw}$ 는 물 속에서의 복합재 무게,  $\rho_f$ 는 강화섬유 밀도,  $\rho_r$ 는 수지 밀도, 그리고  $V_r$ 은 식(3)에 의해 표현되는 수지체적비이다.

$$V_r = \frac{(100 - w_f) \times \left(\frac{w_c}{\rho_c}\right)}{\rho_r} \quad (3)$$

여기에서  $w_c$ 는 공기 중에서의 복합재 무게이고  $\rho_c$ 는 공기 중에서의 복합재 밀도이다.

그림 3과 그림 4에는 각각 TZ-507 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편과 IZ-40 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편에 대한 와인딩시 섬유장력의 변화에 따른 섬유체적비와 기공함유율이 나타나 있다. 여기에서 보면 섬유장력의 변화는 필라멘트와 인딩 복합재에서의 섬유체적비와 기공함유율에 밀접한 관계가 있으며 1.5kgf~2.0kgf보다 낮은 범위의 섬유장력이 적용되는 경우 섬유장력에 따른 섬유체적비의 증가율과 기공함유율의 감소율은 비교적 크게 나타나고 1.5kgf~2.0kgf보다 높은 범위의 섬유장력이 적용되는 경우 섬유장력에 따른 섬유체적비의 증가율과 기공함유율의 감소율은 완만하게 나타난다. 특히 TZ-507 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편에 대해서는 섬유엔드당 섬유장력이 0.5kgf인 경우의 섬유체적비는 54.3%, 1.5kgf인 경우는 64.6%, 3.0kgf인 경우는 67.6%이며 섬유엔드당 섬

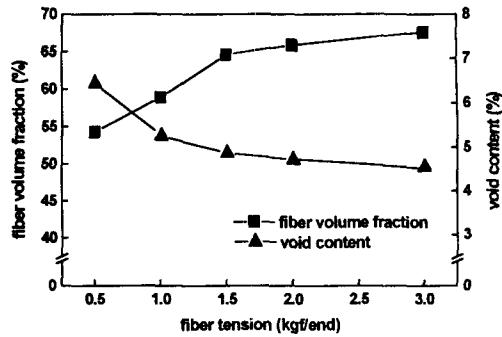


Fig. 3. Fiber volume fractions and void contents of filament wound ring specimens by varying fiber tensions(TZ-507 carbon fiber)

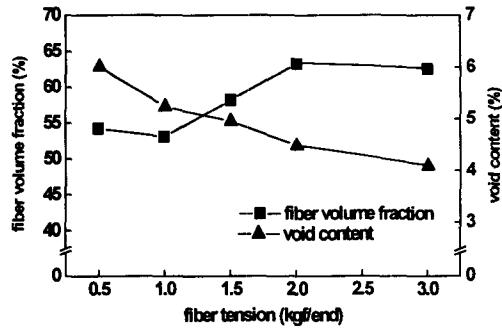


Fig. 4. Fiber volume fractions and void contents of filament wound ring specimens by varying fiber tensions(IZ-40 carbon fiber)

유장력이 0.5kgf인 경우의 기공함유율은 6.4%, 1.5kgf인 경우는 4.9%, 3.0kgf인 경우는 4.6%이다. 또한 IZ-40 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편에 대해서는 TZ-507 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 경우와 마찬가지로 섬유엔드당 섬유장력이 0.5kgf인 경우의 섬유체적비는 54.3%, 2.0kgf인 경우는 63.3%, 3.0kgf인 경우는 62.5%이며 섬유엔드당 섬유장력이 0.5kgf인 경우의 기공함유율은 6.0%, 2.0kgf인 경우는 4.5%, 3.0kgf인 경우는 4.1%이다. 이를 결과로 미루어 볼 때 비교적 낮은 섬유장력이 적용된 복합재에서는 와인딩 중에 과잉 수지와 기공이 제대로 배출되지 않아 섬유체적비는 낮아지고 기공함유율은 높아지며 반면에 비교적 높은 섬유장력이 적용된 복합재에서는 와인딩 중에 과

잉수지와 기공이 원활하게 배출되어 섬유체적비는 높아지고 기공함유율은 낮아지지만 일정 범위 이상의 섬유장력에 대해 섬유장력을 증가시키더라도 섬유체적비의 증가율과 기공함유율의 감소율을 지속적으로 높이기는 어려움을 알 수 있다.

그림 5와 그림 6에는 각각 TZ-507 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편과 IZ-40 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편에 대한 섬유엔드수의 변화에 따른 섬유체적비와 기공함유율이 나타나 있다. 여기에서 보면 와인딩시 적용된 섬유엔드수는 섬유장력의 경우와 마찬가지로 와인딩된 복합재의 섬유체적비와 기공함유율에 영향을 미침을 알 수 있다. 특히 TZ-507 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편에 대해서는 섬유엔드수가 1엔드인 경우의 섬유체

적비는 61.8%, 섬유엔드수가 4엔드인 경우 60.8%, 섬유엔드수가 6엔드인 경우 54.6%이며 섬유엔드수가 1엔드인 경우의 기공함유율은 6.1%, 4엔드인 경우는 7.0%, 6엔드인 경우는 7.6%이다. 또한 IZ-40 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편에 대해서는 TZ-507 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 경우와 마찬가지로 섬유엔드수가 1엔드인 경우의 섬유체적비는 66.9%, 4엔드인 경우는 60.4%, 5엔드인 경우는 56.2%이며 섬유엔드수가 1엔드인 경우의 기공함유율은 4.3%, 3엔드인 경우는 5.5%, 5엔드인 경우는 5.1%이다. 와인딩시 적용된 섬유엔드수는 맨드렐에 안착되는 강화섬유의 펼쳐짐 현상과 밀접한 관계가 있으며 통상적으로 와인딩시 섬유엔드수를 증가시키면 강화섬유의 이송장치인 아이를 통과한 강화섬유들이 제대로 펼쳐지지 않은 상태로 맨드렐 위에 감기게 되므로 강화섬유 사이에 기공이 함유되어 있을 가능성이 높아지며 반면에 와인딩시 섬유엔드수를 적게 하면 아이를 통과한 강화섬유의 펼침성이 양호하여 기공이 강화섬유 사이에 함유될 가능성은 감소하게 된다. 따라서 높은 섬유체적비와 낮은 기공함유율을 가진 복합재를 얻기 위해서는 와인딩시 적은 섬유엔드수를 적용하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

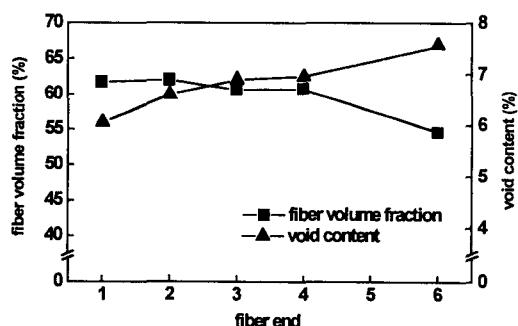


Fig. 5. Fiber volume fractions and void contents of filament wound ring specimens by varying fiber ends(TZ-507 carbon fiber)

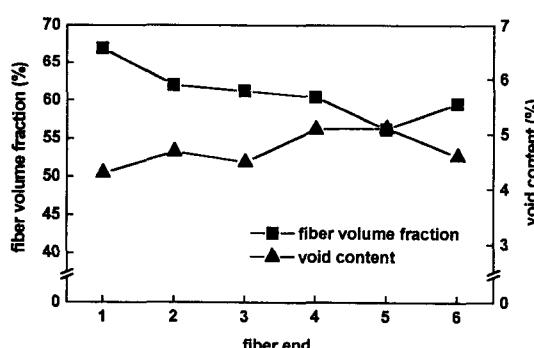
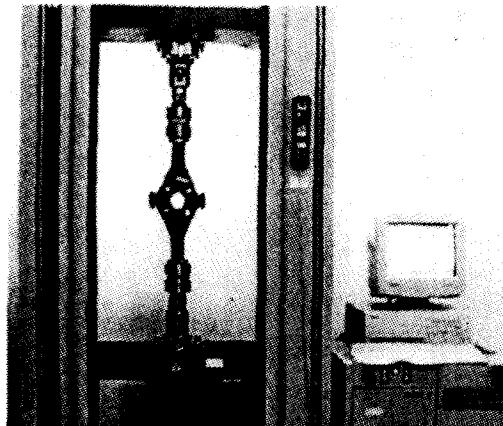


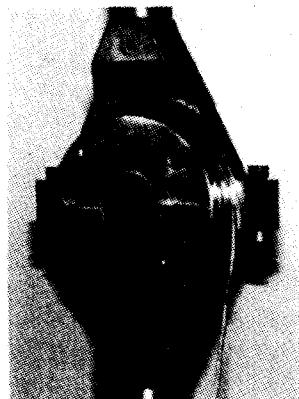
Fig. 6. Fiber volume fractions and void contents of filament wound ring specimens by varying fiber ends(IZ-40 carbon fiber)

#### 4. 인장특성의 평가

필라멘트와인딩된 링 시편의 인장특성을 평가하기 위한 시험치구의 일반적인 형상은 참고문헌<sup>(7)</sup>에 제시되어 있지만 이러한 시험치구에 하중을 작용시키면 시험치구 모서리 부위의 링 시편에 큰 응력집중이 발생하여 인장강도를 정량적으로 평가하기가 어려울 뿐 아니라 시험장치와 연결되는 시험치구 부위가 편 형태를 이용한 헌지로 되어 있기 때문에 작용하중이 증가할수록 시험치구는 시험장치와의 연결부를 기준으로 면의 방향으로 회전하여 시험치구 모서리 부위의 링 시편에는 꼭 방향을 따른 굽힘 변형이 생기는 문제점을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 시험치구가 갖는 이러한 문제점을 보완하기 위해 시험장치와 연결되는 시험치구 부위를 나사 형태로 고정시킨 수정된 시험치구를 적용하였다<sup>(10,11)</sup>.



(a) Overview of loading frame with test fixture



(b) Detailed view of test fixture

Fig. 7. Photographs of loading frame and test fixture with filament wound ring specimen

그림 7에는 링 시편이 장착된 수정된 시험치구 및 하중을 작용하기 위한 시험장치가 나타나 있다. 이와 같은 시험치구는 작용하중이 증가하더라도 링 시편이 장착된 시험치구는 면의 방향으로 회전이 억제되어 시험치구 모서리 부위의 링 시편에는 폭 방향을 따른 굽힘 변형이 거의 생기지 않는다.

링 시편이 장착된 시험치구에 하중을 작용하는 경우 링 시편과 시험치구와의 접촉면에는 마찰력이 발생하며 이러한 마찰력은 링 시편에 형성되는 변형을 영향을 미치는 요인이 된다. 그림 8에는 링 시편의 인장강성을 평가하는 경우 링 시편과 시험치구와의 접촉면에서 발생하는 마찰력의 영향을 제거하기 위한 작용하중의 선도가 나타나 있다. 이때 하중은

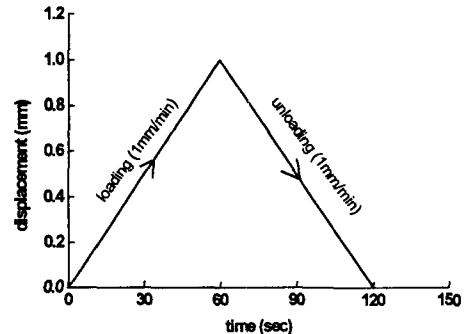


Fig. 8. Applied load history for measurement of tensile modulus

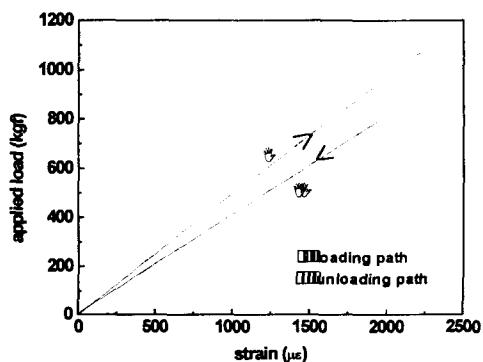


Fig. 9. Typical load-strain curve for loading path and unloading path

ZWICK Z100/SN5A(최대용량: 10톤)의 하중시험기를 이용하여 변위제어상태로 1.0mm까지 변위를 가하였으며 하중작용시와 하중제거시의 하중율이 각각 1.0mm/min인 삼각파형을 적용하였다.

그림 9에는 링 시편의 인장특성을 정량적으로 평가하기 위해 링 시편의 외면에 부착한 스트레인게이지에서 측정된 하중작용시의 하중-변형을 선도와 하중제거시의 하중-변형을 선도가 나타나 있다. 이때 링 시편에 형성된 변형율을 측정하기 위해 스트레인게이지 (KFG-1-120-C1, Kyowa)를 시험치구의 수평축을 기준으로 반시계 방향을 따라 30° 위치의 링 시편 외면에 부착하였다. 여기에서 보면 링 시편에서의 하중-변형을 선도는 링 시편과 시험치구와의 접촉면에서 발생하는 마찰력에 의해 히스테리시스 루우프를 나타낸다. 특히 링 시편과 시험치구와의 접촉면을 따라 형성되는 하중작용시의 마찰력은 작

용하중과 반대 방향으로 발생하여 링 시편에서의 변형을 증가를 억제시키는 역할을 하며 하중제거시의 마찰력은 하중감소와 반대 방향으로 발생하여 링 시편에서의 변형을 감소를 억제시키는 역할을 한다. 그러나 하중을 작용하는 경우 링 시편과 시험 치구와의 접촉면에 형성되는 마찰력이 변형을 증가를 억제하는 정도는 하중을 제거하는 경우 마찰력이 변형을 감소를 억제하는 정도와 크기가 같아지기 때문에 하중작용시의 하중-변형을 선도와 하중제거시의 하중-변형을 선도를 이용하면 링 시편과 시험치구의 접촉면에서 발생하는 마찰력의 영향을 제거할 수 있다.

링 시편에서의 인장강성과 인장강도는 하중작용시와 하중제거시의 변형을 충분에 응력 충분 그리고 파단시의 최대하중을 알면 각각 식(4)와 식(5)에 의해 나타낼 수 있다.

$$E_g = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \right)_t + \left( \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \right)_u \right] \quad (4)$$

$$\sigma_m = \frac{P_b}{2A} \quad (5)$$

여기에서 하첨자 *t*은 하중작용시, 하첨자 *u*는 하중제거시,  $\Delta \sigma$ 는 응력 충분,  $\Delta \epsilon$ 은 변형을 충분,  $P_b$ 는 파단시의 최대하중, 그리고 *A*는 링 시편의 한쪽 단면적을 나타낸다.

그림 10과 그림 11에는 각각 TZ-507 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 경우와 IZ-40 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 경우의 링 시편에 대한 섬유장력의 변화에 따른 인장강성과 인장강도가 나타나 있다. 여기에서 보면 TZ-507 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편의 경우에는 와인딩시 섬유장력이 섬유엔드당 0.5kgf이면 인장강성은 141GPa, 인장강도는 1831MPa로 되고 섬유장력이 점차 증가하여 섬유엔드당 3.0kgf가 되면 인장강성은 166GPa, 인장강도는 2294MPa로 된다. IZ-40 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편의 경우에도 TZ-507 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 경우와 마찬가지로 섬유장력이 섬유엔드당 0.5kgf일 경우 인장강성은 126GPa, 인장강도는 1198MPa로 되고 섬유장력이 점점 증가하여 섬유엔드당 3.0kgf가 되면 인장강성은 152GPa, 인장강도는 1771MPa로 된다. 이로 미루어 판단하면

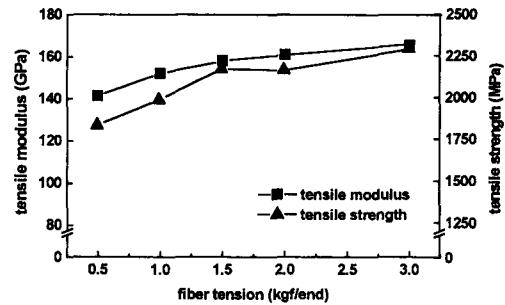


Fig 10. Tensile properties of filament wound ring specimens by varying fiber tensions (TZ-507 carbon fiber).

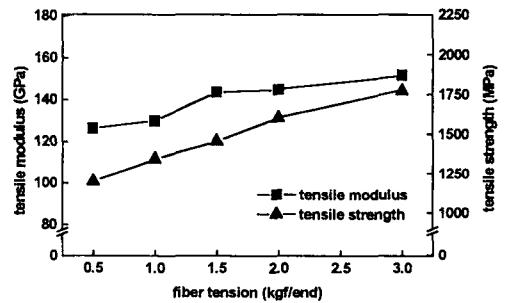


Fig 11. Tensile properties of filament wound ring specimens by varying fiber tensions (IZ-40 carbon fiber)

와인딩시 섬유장력을 낮추게 되면 링 시편에서의 섬유체적비는 감소하고 기공함유율은 증가하여 링 시편의 인장강성과 인장강도는 낮게 나타난다. 반면에 작용된 섬유장력을 점차 높게 하면 섬유체적비는 증가하고 기공함유율은 감소하여 링 시편에서의 인장강성과 인장강도는 높게 나타난다. 그러나 와인딩시 적용된 섬유장력이 지나치게 높아지면 사용된 강화섬유의 종류에 따라 와인딩 도중에 강화섬유의 끊어짐 현상이 발생하여 필라멘트와인딩 복합재의 인장특성이 저하되는 양상이 나타나는 경우도 있다<sup>(12)</sup>. 그러나 본 연구에서 적용한 TZ-507 탄소섬유와 IZ-40 탄소섬유로 제작된 링 시편의 경우에는 와인딩시 섬유장력을 3.0kgf까지 증가시키는 경우에도 링 시편에서의 인장특성은 감소되는 현상이 나타나지 않으며 이로 미루어 판단하면 와인딩 도중에 강화섬유의 끊어짐 현상은 거의 발생하지 않음을 간접

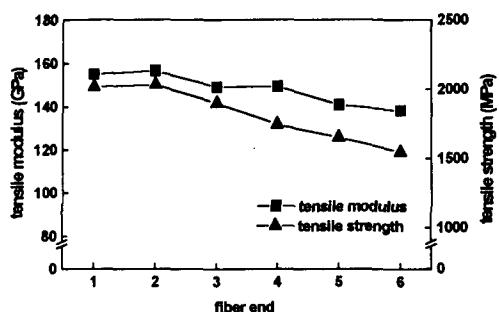


Fig 12. Tensile properties of filament wound ring specimens by varying fiber ends (TZ-507 carbon fiber).

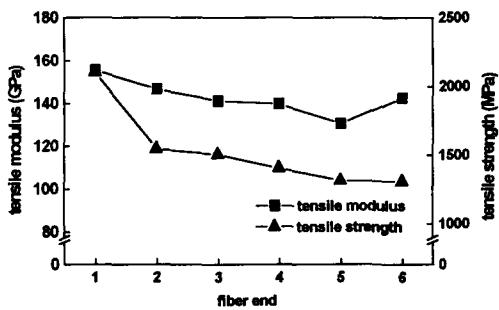


Fig 13. Tensile properties of filament wound ring specimens by varying fiber ends (IZ-40 carbon fiber)

적으로 추정할 수 있다.

그림 12와 그림 13에는 각각 TZ-507 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편과 IZ-40 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편에 대한 섬유엔드수의 변화에 따른 인장강성과 인장강도가 나타나 있다. TZ-507 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편의 경우에는 섬유엔드수가 1엔드이면 인장강성은 155GPa, 인장강도는 2016MPa로 되고 섬유엔드수가 점차 많아져 섬유엔드수가 6엔드이면 인장강성은 138GPa, 인장강도는 1546MPa로 된다. IZ-40 탄소섬유를 강화섬유로 적용한 링 시편의 경우 섬유엔드수가 1엔드이면 인장강성은 156GPa, 인장강도는 2105MPa로 되며 섬유엔드수가 점차 많아지면 인장강성과 인장강도는 감소하여 섬유엔드수가 5엔드인 경우 인장강성은 131GPa, 인장강도가 1314MPa로 된다. 그러나 섬유엔드수가 6엔드인 경우에는 인장

강성은 143GPa, 인장강도는 1309MPa로 되어 섬유엔드수가 5엔드인 경우보다 인장강성이 상대적으로 높게 나타나는 양상을 보인다. 이에 대한 원인은 현재로는 정확하게 규명하기는 어려우나 와인딩시 섬유장력을 조절할 때 발생한 오차 때문으로 판단된다. 특히 섬유엔드수를 6엔드로 적용한 경우의 섬유체적비를 조사해 보면 그림 6에서 나타난 바와 같이 섬유엔드수를 5엔드로 적용한 경우보다 조금 높은 섬유체적비를 나타내고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 와인딩시 공정변수가 필라멘트와인딩 복합재의 인장특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 섬유장력과 섬유엔드수를 달리하여 제작한 링 시편에 대해 인장강성과 인장강도를 평가하였다. 와인딩시 적용한 섬유장력의 영향을 살펴보면 와인딩시 섬유장력이 낮을수록 링 시편에서의 섬유체적비는 낮아지고 기공함유율은 높아지지만 섬유장력이 점차 증가하면 성형시 과잉수지와 기공이 원활하게 배출되어 링 시편에서의 섬유체적비는 높아지고 기공함유율은 낮아짐을 알 수 있다. 또한 와인딩시 적용된 섬유엔드수의 영향을 살펴보면 와인딩시 섬유엔드수가 적을수록 기공함유율은 낮아지고 섬유체적비는 높아지며 섬유엔드수가 점차 많아질수록 기공함유율은 높아지고 섬유체적비는 낮아짐을 알 수 있다. 특히 섬유엔드수의 경우는 강화섬유의 이송장치인 아이와도 밀접한 관계가 있으며 와인딩시 적절치 못한 아이가 적용된 경우 섬유엔드수를 증가시키면 강화섬유의 펼쳐짐이 불량하여 기공이 함유될 가능성은 높아진다. 와인딩시 적용된 섬유장력과 섬유엔드수는 링 시편에서의 섬유체적비와 기공함유율에 영향을 미칠 뿐 아니라 필라멘트와인딩 복합재의 인장특성과도 밀접한 관계를 갖는다. 와인딩시 섬유장력이 낮을수록 인장특성은 감소하고 섬유장력이 증가할수록 인장특성은 증가한다. 또한 섬유엔드수가 적으면 인장특성은 높으며 섬유엔드수가 점차 증가할수록 인장특성은 낮아진다. 그러나 와인딩시 섬유장력을 지나치게 높게 적용하면 와인딩 도중에 강화섬유의 끊어짐 현상이 생겨 필라멘트와인딩 복합재의 구조

성능이 저하되는 양상이 나타날 수 있다. 그러나 본 연구에서 적용한 TZ-507 탄소섬유와 IZ-40 탄소섬유를 적용하여 제작된 링 시편의 인장특성을 살펴보면 섬유장력이 증가하여도 인장특성의 저하는 나타나지 않음으로 판단하면 와인딩시 적용한 섬유장력은 와인딩 도중에 강화섬유의 끊어짐 현상을 거의 유발시키지 않음을 알 수 있다. 이와 같이 필라멘트 와인딩 공법에 의해 복합재를 제작하는 경우 구조성능을 극대화하고 생산성을 높이기 위한 와인딩 공정에 대한 연구가 수행되어야 한다.

### 참 고 문 헌

1. Peters, S.T., Humphrey, W.D., and Foral, R.F., Filament Winding Composite Structure Fabrication, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Covina, 1991.
2. Rosato, D.V. and Grove, C.S. Jr., Filament Winding: Its Development, Manufacture, Applications and Design, John Wiley & Sons Inc., New York, 1964.
3. Jung, B. et al., The Study on the Design and Fabrication of Composite Launch Tube, MSRD-416-91134, Agency for Defense Development, 1991.
4. Hwang, T.K., et al., The Study on the Design and Fabrication for CHUNMA Composite Rocket Motor Case (II), MSDC-421-940441, Agency for Defense Development, 1994.
5. Jun, E.J., et al., Development and Application of Fiber Reinforced Composites (I), BSG077-424.C, Korea Institute of Machinery and Materials, 1984.
6. Hong, C.S., et al., Fabrication and Design Technique for Thick Advanced Composite Laminates, N472-3587-2 MOST Report, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1989.
7. ASTM D2290-87, "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, American Society for Testing and Materials, 1992.
8. Yoon, S.H., et al., Evaluation of Mechanical Properties for Domestic Carbon Fiber and Its Reinforced Composites, KNUT-AML-97121, Kumoh National University of Technology, 1997.
9. ASTM D3171-76, "Standard Test Method for Fiber Content of Resin-matrix Composites by Matrix Digestion," Annual Book of ASTM Standards, Vol.08.01, American Society for Testing and Materials, 1992.
10. Yoon, Sung-Ho, Kim, Chun-Gon, and Cho, Won-Man, "Measurement of Modulus in Filament Wound Specimen Using Split Disk Test," Experimental Techniques, Vol.21, No.1, pp.25~28, 1997.
11. Yoon, Sung-Ho, Kim, Chun-Gon, and Cho, Won-Man, "Measurement of Tensile Properties Using Filament Wound Ring Specimens," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.16, No.9, 1997, pp.810~824.
12. Hwang, T.K., Gal, Y.S., Cho, W.M., and Jung, B., "A Study of Filament Winding Processing Variables Using NOL Ring Test," Journal of the Korean Society for Composite Materials, Vol.4, No.2, 1991, pp.62~70.