論文

필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 링 시편과 인장시편의 인장특성 비교

윤성호* · 김천곤** · 조원만*

Comparison of Tensile Properties Between Ring Specimen and Tensile Coupon Specimen Manufactured By Filament Winding Process

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

ABSTRACT

This research suggests an appropriate test mothod for the evaluation of tensile properties of filament wound structures by comparing the results of ring test and tensile coupon test. The research results showed that the tensile strength of each test method was influenced by the specimen shape, the continuity of fibers, and stress concentration in the specimen. The tensile strength of a ring specimen showed better agreement with the theoretical value obtained from the rule of mixtures than that of a coupon specimen because the stress concentration in a coupon specimen due to gripping action was more severe than that due to split disk edges in a ring specimen. The tensile modulus was influenced by the curvature in the coupon specimen and by the friction between the specimen and fixture surface in the ring specimen. With the aid of suitable data processing, the measured modulus agreed well with the theoretical value in the ring test. The ring test was better than the tensile coupon test for the quantitative characterization of tensile properties of filament wound structures.

초 록

본 연구에서는 필라멘트 와인딩된 링 시편과 인장시편들의 인장특성을 평가하고 이들 결과들을 혼합법칙에 의해 예측된 이론적인 인장특성과 비교함으로써 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려할 수 있는 적절한 인장특성 평가방법을 제시하였다. 연구결과에 따르면 인장강도는 강화섬유의 연속성, 시편형상 및 치구에 의해 시편에 형성된 응력집중 등에 영향을 받으므로 링 시편은 그립부위의 응력집중이 심한 인장시편들에 비해 혼합법칙에 의한 이론적인 인장강도에 가까운 값을 나타낸다. 또한 인장강성은 시편에 형성된 휨과 시험치구와의 마찰력 등에 영향을 받으며 링 시편과 인장시편들은 적절한 데이타 처리기법을 적용하면 혼합법칙에 의한 이론적인 인장강성과 유사한 값을 나타낸다. 따라서 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려한 정량적인 인장특성의 평가에는 링 시편을 이용한 평가방법이 인당시편을 이용한 평가방법 보다 적절하며 이를 통해 얻은 인장특성은 필라멘트 와인딩 구조물의 설계에 적용이 가능하다.

* 국방과학연구소
** 한국과학기술원 항공우주공학과

1. 서 론

필라멘트 와인딩 구조물의 설계를 위해 강화섬유가 작용하중을 지지한다는 망막 이론(netting theory)을 적용하면 비교적 간단한 절차에 의해 구조물의 형상을 결정할 수 있다. 그러나 구조물의 효율은 설계에 적용된 사용재료의 인장특성에 영향을 받기 때문에 효율을 극대화하기 위해서는 필라멘트 와인딩 공법의 특성이 고려된 정량적인 인장특성이 적용되어야 한다. 필라멘트 와인딩 구조물은 평판 형태의 구조물과는 다른 기하학적인 형상을 가질 뿐 아니라 강화섬유도 연속성을 나타내기 때문에 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려한 인장특성 평가방법과 이러한 평가방법을 적용한 정량적인 인장특성의 확보가 필라멘트 와인딩 구조물의 설계자에게 주요 관심 중의 하나로 되어 왔다.

필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려한 인장특성의 평가방법은 아직 표준화가 미흡한 실정으로 현재에는 필라멘트 와인딩된 링 시편에 내압을 작용시키는 방법[1], 평판 형태의 인장시편에 인장하중을 작용시키는 방법[2], 필라멘트 와인딩 링 시편에 인장하중을 작용시키는 방법[3] 등이 적용되고 있다. 필라멘트 와인딩 링 시편에 내압을 작용시키는 방법은 시편의 형상이 간단하여 시편의 제작이 용이하지만 인장특성을 평가하기 위해서는 내압을 작용시키기 위한 가압장치와 특별한 시험치구를 필요로 한다. 평판 형태의 인장시편에 인장하중을 작용시키는 방법은 섬유강화 복합재의 인장특성을 평가하기 위한 표준화 절차를 적용하여 시편의 형상을 결정하지만 강화섬유의 불연속성으로 인해 평가된 결과는 필라멘트 와인딩 공법의 특성이 고려된 전형적인 인장특성으로 간주하기는 어렵다. 필라멘트 와인딩된 링 시편에 인장하중을 작용시키는 방법은 시편의 제작이 간단하고 내압을 작용시키기 위한 가압장치와 시험장치를 필요로 하지 않으며 시편의 형상도 필라멘트 와인딩 구조물과 유사하여 필라멘트 와인딩 구조물의 설계에 적용할 수 있는 인장특성을 얻을 수 있다. 그러나 기존의 연구결과에 따르면 시험치구 모서리 부위의 링 시편에는 국부적인 굽힘현상으로 인한 응력집중이 발생하여 인장강도를 정량적으로 평가하기가 어려우며 시험치구와의 마찰력으로 인해 인장강성의 평가도 불가능한 것으로 알려져 있다[4]. 따라서 이러한 평가방법은 주로 강화섬유의 표면처리, 섬유장력, 와인딩 속도, 섬유엔드 등의 공정변수가 필라멘트 와인딩 구조물의 인장강도에 미치는 영향을 조사하기 위한 용도로 적용되어 왔다[5~6].

본 연구에서는 필라멘트 와인딩 링 시편의 인장시편들의 인장특성을 평가하고 이들 결과들을 혼합법칙에 의해 예측된 이론적인 인장특성과 비교함으로써 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려할 수 있는 적절한 인장특성 평가방법을 제시하였다. 이때 사용된 링 시편과 인장시편들은 T300 탄소섬유를 강화섬유로 사용하고 필라멘트 와인딩용 에폭시인 AD6005를 수지로 사용하여 제작하였으며 각 시편들의 상대적인 인장특성 비교를 위해 각 시편의 제작공정은 동일하게 유지하였다.

2. 시편의 종류 및 제작방법

Fig. 1에는 본 연구에서 사용한 링 시편, 기존 인장시편, 개선된 인장시편의 형상이 나타나 있다. 링 시편은 필라멘트 와인딩 공법에 의해 강화섬유를

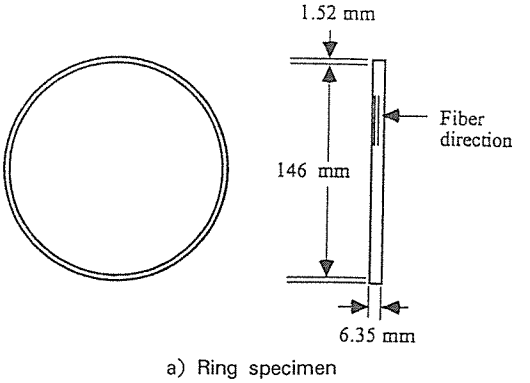


Fig. 1. The configuration of filament wound ring and tensile coupon specimens.

원주방향을 따라 일방향으로 감은 원통을 절단하여 얻으며 기존 인장시편과 개선된 인장시편은 링 시편과 마찬가지로 필라멘트 와인딩 공법에 의해 강화섬유를 길이방향을 따라 일방향으로 감은 평판을 절단하여 얻는다.

Fig.2에는 링 시편과 인장시편들을 제작하는 경우의 맨드렐 형상이 나타나 있다. 일반적으로 필라멘트 와인딩 구조물의 효율은 강화섬유, 수지, 섬유장력, 섬유엔드, 경화싸이클 등의 공정변수에 영향을 받는다. 본 연구에서는 각 시편들의 인장특성을 비교하기 위해 시편에 제작에 적용되는 공정변수를 가능한 동일하게 하였으며, 강화섬유는 T300 탄소섬유(Toho, Besfight carbon fiber HTA-12K), 수지는 소형 및 대형 압력용기의 제작에 적용되는 필라멘트 와인딩용 에폭시(Ciba-Geigy, AD6005/HY906/DY062)를 사용하고 섬유장력과 섬유엔드(fiber end)는 각각 2kg$_f$/end와 3개를 적용하였다. Table 1에는 시편의 제작에 사용된 강화섬유와 수지의 특성이 나타나 있다.

링 시편의 제작공정은 맨드렐 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) 원통형상의 맨드렐을 필라멘트 와인딩 장치에 장착하여 아세톤으로 세척한 다음 이형제(MS443)로 이형처리한다. (3) 주제인 AD6005, 경화제인 HY906, 경화촉진제인 DY062가 100/80/1의 무게혼합비로 배합된 에폭시를 준비한다. (4) 폭이 160mm, 두께가 1.52mm인 원통이 되도록 강화섬유를 원주방향을 따라 일방향으로 와인딩한다. (5) 와인딩이 완료되면 과잉의 수지를 제거하기 위해 미경화 상태의 원통 외면에 수축테이프를 감아 건조로에서 경화시킨다. 이때 경화온도/경화시간은 80℃/2시간, 120℃/2시간, 160℃/8시간이며 온도상승률과 냉각률은 각각 2℃/분과 -4℃/분이다. (6) 경화가 완료되면 탈형기를 이용하여 원통을 맨드렐에서 탈형하고 이를 다시 가공용 맨드렐에 조립한다. (7) 가공용 맨드렐에 조립된 원통을 다이아몬드 휠로 폭이 6.35mm가 되도록 절단하여 규정된 형상의 링 시편을 얻는다.

기존 인장시편은 필라멘트 와인딩 공법의 통상적인 절차에 의해 제작되는 인장시편으로 구체적인

Table 1. The characteristics of reinforcement and resin for this study.

Carbon fiber(Toho HTA-12K)
Filament diameter : 7.0μm
Density : 1.77g/cm^3
Tensile modulus : 215.7GPa
Tensile strength : 3658MPa
Ultimate strain : 1.7%
Resin(Ciba-Geigy AD6005/HY906/DY062)
Mixing ratio : 100/80/1 in parts by weight
Density : 1.21g/cm^3
Tensile modulus : 3.03GPa
Tensile strength : 64.8~84.5MPa
Flexural strength : 124.1MPa
Ultimate strain : 2.0%

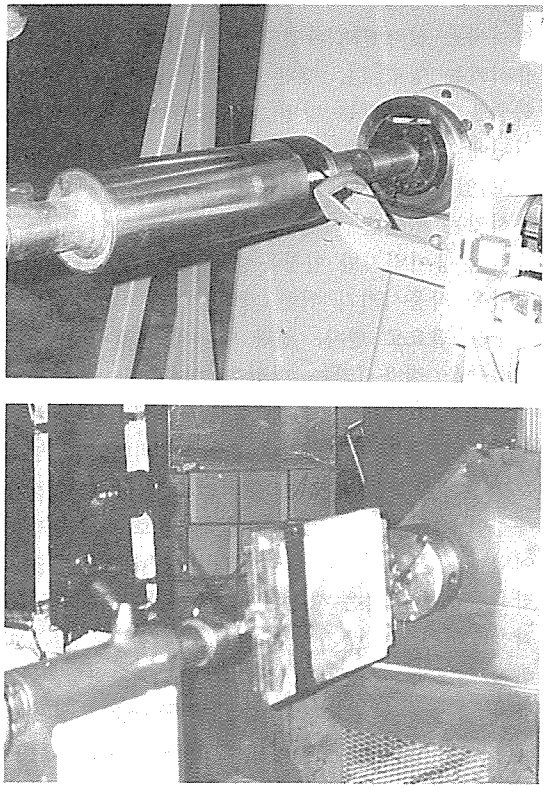


Fig.2. The mandrels used for manufacturing of ring specimen and tensile coupon specimen.

제작공정은 다음과 같다.

(1) 원주방향 섬유감기가 가능하도록 필라멘트 와인딩 장치의 패턴을 결정한다. (2) 평판 형상의 맨드렐을 필라멘트 와인딩 장치에 장착하여 아세톤으로 세척한 다음 이형제(MS443)로 이형처리한다. (3) 주제인 AD6005, 경화제인 HY906, 경화촉진제인 DY062가 100/80/1의 무게혼합비로 배합된 에폭시를 준비한다. (4) 폭이 220mm, 두께가 2.1mm인 평판이 되도록 강화섬유를 맨드렐의 길이방향을 따라 일방향으로 와인딩한다. (5) 와인딩이 완료되면 평판을 맨드렐의 양쪽에 조립하여 고정한 다음 건조로에서 경화시킨다. 이때 경화온도/경화시간, 온도상승률과 냉각률은 링 시편의 제작과 동일하게 적용하였다. (6) 경화가 완료되면 복합재 평판의 끝단을 절단하여 탈형하고 절단된 평판에는 보강탭을 부착한다. (7) 보강탭이 부착된 평판을 다이아몬드휠로 폭이 12.7mm가 되도록 절단하여 규정된 형상의 인장시편을 얻는다. 이와 같은 절차에 의한 기존 인장시편에는 잔류응력의 영향으로 인해 휨이 발생한다.

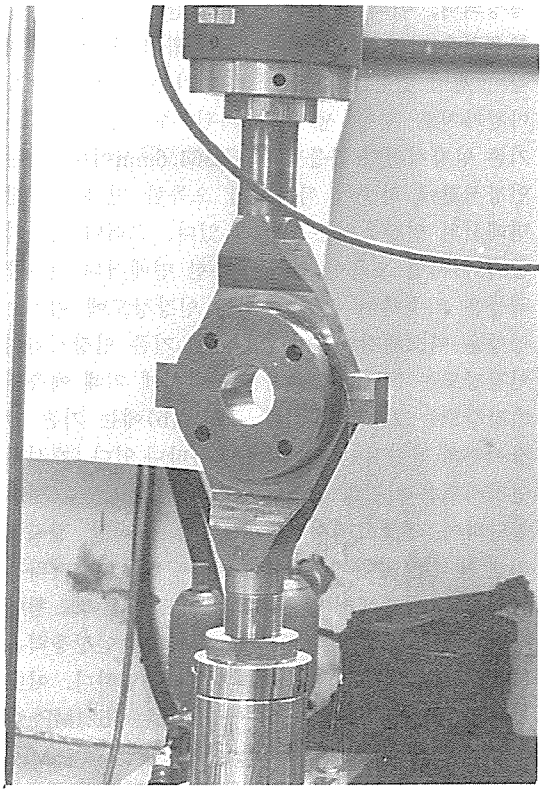


Fig. 3. The test set-up of ring specimen for tensile strength measurement.

개선된 인장시편은 기존 인장시편에서 발생하는 휨을 최소화하기 위해 제작공정을 개선한 형태로서 미경화 상태인 복합재 평판의 끝단을 날카로운 칼로 미리 절단한 다음 건조로에 넣어 경화시키며 이러한 과정을 제외하면 기존 인장시편의 제작공정과 동일하다. 이러한 제작공정에 의해 얻어진 인장시편에는 휨이 발생하지 않지만 미경화 상태인 복합재 평판의 끝단을 미리 절단한 다음 경화시키기 때문에 초기의 섬유장력은 상실되고 강화섬유는 수지의 유동에 의해 제자리를 유지하기가 어려울 가능성이 있다.

3. 링 시편과 인장시편의 인장강도 평가

3-1. 시험방법

Fig. 3에는 링 시편의 인장강도를 평가하기 위한 시험장치가 나타나 있다. 이때 사용한 하중장치는 Instron 1335(로드셀 용량 : 20톤) 유압하중시험기이며 시험치구 모서리부의 핀 구멍에 핀을 삽입함으로써 시험치구를 하중작용선에 정확하게 정렬시킬 수 있다. 링 시편에는 정적 하중을 작용시키기 위해 1.0mm/min의 변위제어상태로 인장하중을 가하였으며 시험 치구의 표면에는 흑연가루를 균일하게 발라 링 시편과 시험치구와의 마찰력을 최소화하였다. 링 시편의 인장강도는 식(1)에 의해 구할 수 있다.

$$(\sigma_m)_r = \frac{P_b}{2A_r} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

여기에서 P_b는 파단하중, A_r은 시험치구 모서리 부위의 링 시편 단면적이다.

Fig. 4에는 기존 및 개선된 인장시편의 인장강도를 평가하기 위한 시험장치가 나타나 있다. 이때 사용한 하중장치는 Instron 1335(로드셀 용량 : 20톤) 유압하중시험기이며 정적 하중을 작용시키기 위해 1.0mm/min의 변위제어상태로 인장하중을 가하였다. 인장시편의 인장강도는 식(2)에 의해 구할 수 있다.

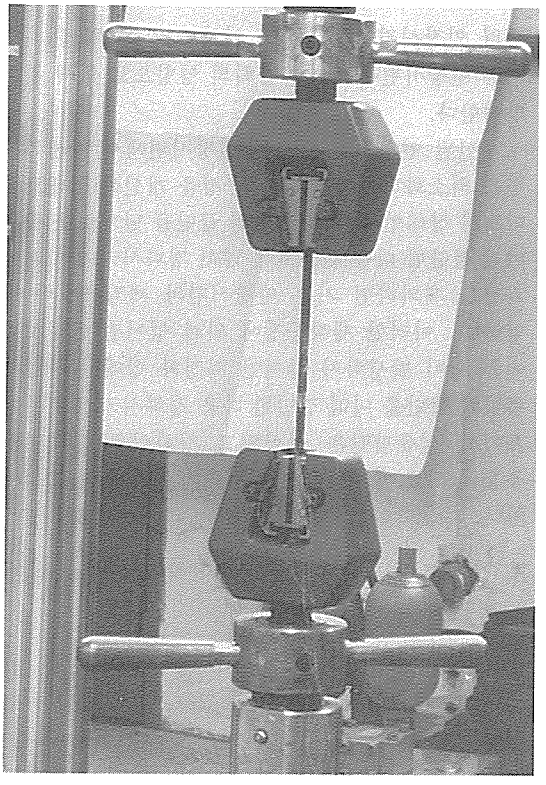


Fig. 4. The test set-up of original and modified tensile coupon specimens for tensile strength measurement.

$$(\sigma_m)_t = \frac{P_b}{A_t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

여기에서 P_b는 파단하중, A_t는 인장시편의 단면적이다.

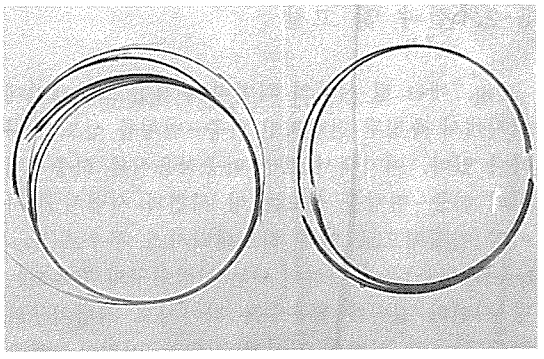
3-2. 결과 및 고찰

Table 2에는 링 시편, 기존 인장시편 그리고 개선된 인장시편의 인장강도가 나타나 있다. 링 시편은 인장시편과는 달리 강화섬유들의 연속성을 갖기 때문에 필라멘트 와인딩 공법시 적용되는 공정변수의 영향을 고려할 수 있다. 이때 평가된 링 시편의 인장강도는 1921MPa이며 강화섬유와 수지의 강도, 그리고 섬유부피함유율을 적용한 혼합법칙에 의해 예측된 인장강도는 2378MPa이다. Fig. 5(a)에는 링 시편의 전형적인 파단양상이 나타나 있다. 여기에서 보면 작용하중이 파단하중에 가까

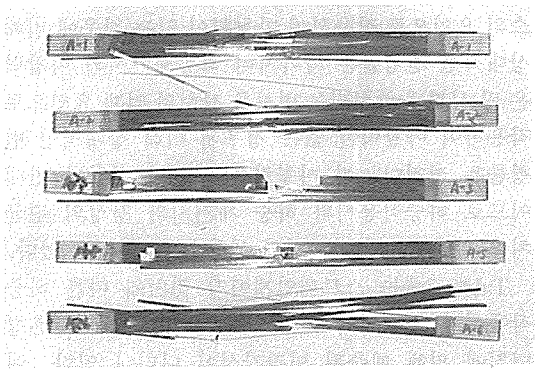
Table 2. The comparison of tensile strengths obtained from various specimen.

	Number of specimen	Fiber volume fraction (%)	Tensile strength (MPa)		Daviation(%) $\lvert[S_p-S_m]/S_p\rvert$
			Predicted S_p	Experintal S_m	
Ring specimen	7	65	2378	1921	19.2
Original tensile coupon specimen	6	57	2085	1480	29.0
Modified tensile coupon specimen	6	57	2085	1521	27.1

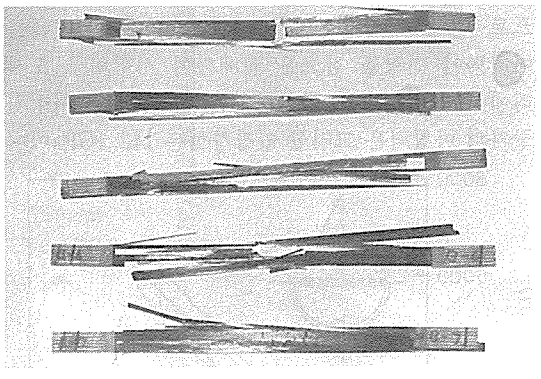
와지면 시험치구 모서리 부위의 링 시편에는 초기 파손이 발생하고 뒤이어 급작스런 균열진전과 함께 최종파단에 이른다. 기존 인장시편을 얻기 위해 평판을 제작하는 경우에는 미경화 상태인 필라멘트 와인딩된 평판을 건조로에서 경화시키면 섬유장력과 경화조건의 영향으로 인해 평판에는 잔류응력이 형성되며, 이때 평판의 양쪽 끝단을 절단하면 잔류응력은 변형에너지로 변환되어 휨이 생긴다. 이와 같이 휨이 있는 평판에서 얻은 기존 인장시편에도 마찬가지로 휨이 생기며 3차원 측정기로 측정한 기존 인장시편의 곡률반경은 3564.6mm이다. 기존 인장시편에 하중이 작용되면 오목한 면과 볼록한 면에서의 인장응력은 차이가 있다. 그러나 작용하중이 커지면 오목한 면과 볼록한 면에서의 인장응력들은 비슷하여 시편의 휨이 인장강도에 미치는 영향을 미소해진다. 이때 평가된 기존 인장시편의 인장강도는 1480MPa이며 혼합법칙에 의해 예측된 인장강도는 2085MPa이다. Fig.5(b)에는 기존 인장시편의 전형적인 파단양상이 나타나 있다. 개선된 인장시편은 미경화 상태인 평판의 양쪽 끝단을 미리 절단하여 건조로에서 경화시키며 이러한 절차에 의해 제작된 평판에는 휨이 생기지 않는다. 따라서 휨이 없는 평판에서 얻은 개선된 인장시편에도 휨이 생기지 않으며 하중작용시 각 면에서의 인장응력은 기존 인장시편에서와는 달리 거의 동일하다. 이때 평가된 개선된 인장시편의 인장강도는 1521MPa이며 혼합법칙에 의해 예측된 인장강도는 2085MPa이다. Fig.5(c)에는 개선된 인장시편의 전형적인 파단양상이 나타나 있다. 이상의 결과에서 보면 링



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. The photographs of fractured shapes for ring and tensile coupon specimens.

시편을 이용하는 경우가 강화섬유의 불연속성과 그림에 의한 보강탭 부위에서의 응력집중을 나타내는 인장시편을 이용하는 경우에 비해 혼합법칙에 의해 예측된 인장강도에 근접한 결과를 얻을 수 있기 때문에 링 시편이 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려한 인장강도 평가에 더욱 적절함을 알 수 있다.

4. 링 시편과 인장시편의 인장강성 평가

4-1. 시험방법

링 시편의 인장강성을 평가하기 위한 시험치구와 링 시편의 하중작용선 정렬은 인장강도를 평가하는 경우와 동일하게 적용하였다. 링 시편의 위치에 따른 변형률 차이를 조사하기 위해서는 수평축인 시험치구 모서리에서 반시계 방향으로 15°와 40°의 2곳에 Micro Measurement의 EA-13-062AP-120 스트레인게이지를 부착하였으며 시험치구와의 마찰력은 링 시편과 접촉되는 시험치구의 표면에 흑연가루를 균일하게 발라 주어 최소화하였다. 링 시편의 인장강성을 평가하기 위해서는 인장강도를 평가하는 경우와는 달리 하중작용시와 하중제거시의 하중-변형률 선도들이 필요하다. 유압하중시험기로 인장시험을 수행하는 경우와 같이 Fig. 6(a)의 램프파형에 의해 하중을 작용시킨 다음 reset 스윗치로 하중을 제거하면 초기보다 훨씬 높은 하중율로 하중이 감소된다. 이와 같은 하중율의 변화는 링 시편에 형성되는 변형률에 영향을 미칠 우려가 있다. 본 연구에서는 하중작용시와 하중제거시 동일한 하중율을 유지시켜 주기 위해 Fig. 6(b)의 삼각파형에 의해 하중을 작용시켰으며 하중율은 링 시편에 정적 하중을 작용시켜 주기 위해 1.0mm/min의 변위제어상태를 적용하였다. 링 시편의 인장강성은 스트레인게이지가 부착된 위치에서의 하중-변형률 선도를 통해 평가하며 이들은 컴퓨터를 이용한 자료수집장치로 기록하였다. 링 시편의 인장강성은 하중작용시의 인장강성과 하중제거시의 인장강성을 알면 식(3)에 의해 결정된다 [7].

$$(E_g)_r = \frac{(E_g)_l + (E_g)_u}{2} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

여기에서 $(E_g)_l$은 하중작용시의 인장강성, $(E_g)_u$는 하중제거시의 인장강성이며, 인장강성은 식(4)에 의해 구해진다.

$$E_g = \frac{\Delta\sigma_g}{\Delta\varepsilon_g} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

여기에서 $\Delta\sigma_g$와 $\Delta\varepsilon_g$는 각각 스트레인게이지가 부착된 위치에서의 응력 증분과 변형률 증분으로 이때 응력 증분은 식(5)에 의해 얻어진다.

$$\Delta\sigma_g = \frac{\Delta P}{2A_g} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

여기에서 ΔP는 하중 증분, A_g는 스트레인게이지가 부착된 위치에서의 링 시편 단면적이다. 기존 인장시편과 개선된 인장시편의 인장강성을 평가하기 위해 시편의 양쪽면에 Micro Measurement의 EA-05-062TT-120 스트레인게이지를 부착하였으며 시편의 게이지부에 정적 하중을 작용시키기 위해 1.0mm/min의 변위에저상태로 하중을 작용하였다. 기존 인장시편의 인장강성은 볼록한 면에서의 인장강성과 오목한 면에서의 인장강성을 알면 식(6)에 의해 결정된다.

$$(E_g)_t = \frac{(E_g)_a + (E_g)_b}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

여기에서 $(E_g)_a$는 볼록한 면에서의 인장강성, $(E_g)_b$는 오목한 면에서의 인장강성으로 이들은 스트레인게이지가 부착된 위치에서의 응력 증분과 변형률 증분을 알면 식(4)에 의해 구해진다. 또한 응력 증분은 식(7)에 의해 얻어진다.

$$\Delta\sigma_g = \frac{\Delta P}{A_g} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

여기에서 ΔP는 하중 증분, A_g는 스트레인게이지가 부착된 위치에서의 인장시편 단면적이다.

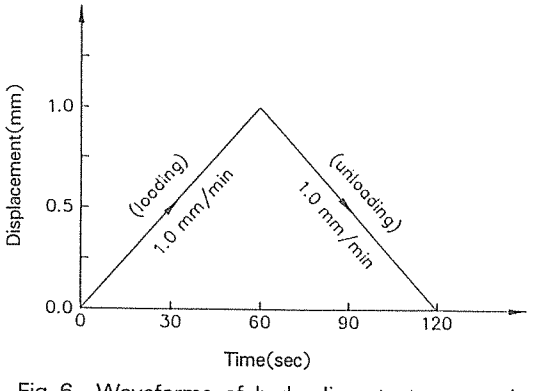


Fig. 6. Waveforms of hydraulic actuator control for loading and unloading conditions.

5-2. 결과 및 고찰

Fig. 7에는 링 시편의 외면에 부착된 스트레인게이지에서 측정된 전형적인 하중-변형률 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 하중작용시와 하중제거시의 하중-변형률 선도는 링 시편과 시험치구 사이의 마찰력으로 인해 히스테리시스 루우프(hysteresis loop)를 형성하며 이는 시험치구와 접촉되는 링 시편의 길이가 짧을수록 작아지고 시험치구와 접촉되는 링 시편의 길이가 길수록 커진다. 하중작용시의 마찰력은 링 시편에 형성되는 변형률 감소의 요인으로 작용하여 마찰력이 없는 경우에 비해 상대적인 변형률은 작아지며 하중제거시의 마찰력은 링 시편에 형성되는 변형률 감소의 억제 요인으로 작용하여 마찰력이 없는 경우에 비해 상대적인 변형률은 커진다. 이 마찰력은 하중의 방향과 반대이므로 하중작용시와 하중 제거시의 강성의 평균치를 취하므로써 마찰력의 영향을 제거할 수 있다.

Table 3에는 스트레인게이지 위치에 따른 하중작용시와 하중제거시 링 시편의 인장강성과 혼합법칙에 의해 예측된 인장강성이 나타나 있다. 여기에서 보면 하중작용시에는 시험치구와의 마찰력으로 인해 인장강성은 증가하며 하중제거시에는 마찰력이 변형률 감소를 억제하여 시험치구 모서리에서 멀어질수록 인장강성은 감소한다. 시험치구와의 마찰력은 고려한 인장강성은 142.1GPa이며

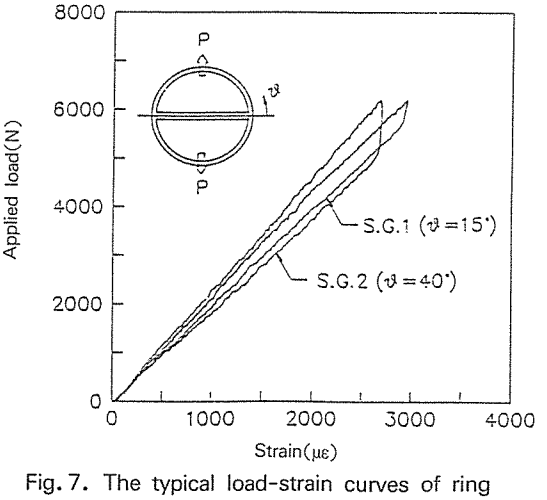


Fig. 7. The typical load-strain curves of ring specimen.

Table 3. The measured modulus of filament wound ring specimen.

Specimen	Gage location	Experimental modulus (GPa)			Deviation(%)
		Loading paths, $(E_g)_l$	Unloading paths, $(E_g)_u$	Average, $(E_g)_r$	$\lvert[(E_g)_p-(E_g)_r]/(E_g)_p\rvert$
RE-1	1	143.5	140.5	142.0	0.6
	2	153.9	134.1	144.0	2.0
RE-2	1	147.6	139.8	143.7	1.8
	2	157.1	130.6	143.9	1.9
RE-3	1	151.1	144.0	147.6	4.5
	2	151.4	129.6	140.5	0.5
RE-4	1	142.0	132.4	137.2	2.8
	2	146.3	128.8	137.6	2.5

* Fiber volume fraction : 65%
* Tensile modulus of carbon fiber and resin is 215.7GPa and 3.03 GPa, respectively.
* Predicted modulus$(E_g)_p$: 141.2GPa

강화섬유와 수지의 강성, 그리고 섬유부피함유율을 적용한 혼합법칙에 의해 예측된 인장강성은 141.2GPa이다.

Fig.8에는 기존 인장시편의 양쪽 중앙부에 부착된 스트레인게이지에서 측정된 전형적인 하중-변형률 선도가 나타나 있으며 Table 4에는 하중-변형률 선도에서 얻은 인장강성과 혼합법칙에 의해 예측된 인장강성이 나타나 있다. 여기에서 보면 기존 인장시편에 하중이 작용되면 시편의 휨으로 인하여 오목한 면에서의 변형률이 볼록한 면에서 보다 커

Table 4. The measured modulus of original tensile coupon specimen.

Specimen	Experimental modulus(GPa)			Deviation (%)
	Convex part $(E_g)_a$	Concave part $(E_g)_b$	Average $(E_g)_t$	$\lvert[(E_g)_p-(E_g)_t]/(E_g)_p\rvert$
AE-1	121.9	123.3	122.6	1.3
AE-2	120.0	127.1	123.6	0.5
AE-3	121.9	122.6	122.3	1.5
AE-4	123.0	128.9	126.0	1.4

* Fiber volume fraction : 57%
* Tensile modulus of carbon fiber and resin is 215.7GPa and 3.03 GPa, respectively.
* Predicted modulus$(E_g)_p$: 124.2GPa

지며 오목한 면에서의 인장강성은 볼록한 면에서보다 높다. 기존 인장시편의 인장강성은 123.6GPa이며 혼합법칙에 의해 예측된 인장강성은 124.2GPa이다.

Fig.9에는 개선된 인장시편의 양쪽면에 부착된 스트레인게이지에서 측정된 전형적인 하중-변형률 선도가 나타나 있으며 Table 5에는 하중-변형률 선도에서 얻은 인장강성과 혼합법칙에 의해 예측된 인장강성이 나타나 있다. 개선된 인장시편은 기존 인장시편의 경우와는 달리 휨이 생기지 않으며 작용하중에 의해 시편의 양쪽면에 형성된 변형률은 거의 비슷하다. 따라서 인장강성을 평가하기 위해서는 한쪽면에서의 하중-변형률 선도를 얻으면 충분하며 이때 평가된 개선된 인장시편의 인장강성은

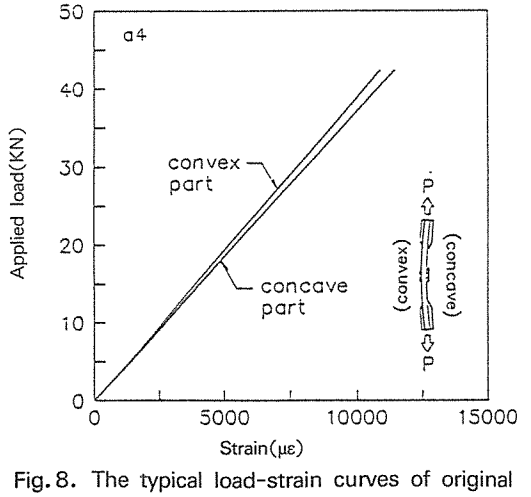


Fig.8. The typical load-strain curves of original tensile coupon specimen.

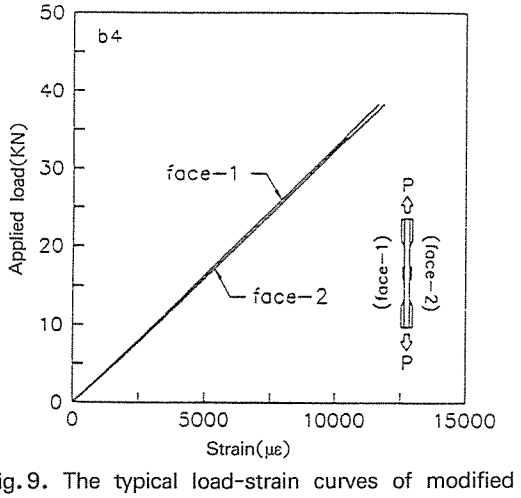


Fig.9. The typical load-strain curves of modified tensile coupon specimen.

Table 5. The measured modulus of modified tensile coupon specimen.

Specimen	Experimental modulus(GPa)			Deviation (%)
	Face−1 $(E_g)_a$	Face−2 $(E_g)_b$	Average $(E_g)_t$	$\lvert[(E_g)_p-(E_g)_t]/(E_g)_p\rvert$
AE−1	122.2	123.4	122.8	1.1
AE−2	121.0	123.5	122.3	1.5
AE−3	121.6	124.8	123.2	0.8
AE−4	124.3	−	124.3	0.0

* Fiber volume fraction : 57%
* Tensile modulus of carbon fiber and resin is 215.7GPa and 3.03 GPa, respectively.
* Predicted modulus$(E_g)_p$: 124.2GPa

123.2GPa이고 혼합법칙에 의해 예측된 인장강성은 124.2GPa이다.

이상의 결과에서 보면 인장강성은 시편의 종류에는 큰 영향을 받지 않으며 인장강도와는 달리 시편의 섬유부피함유율을 알면 강화섬유의 수지와 강도, 그리고 섬유부피함유율 등을 적용한 혼합법칙에 의한 예측된 결과와 동일한 인장강성을 얻을 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 필라멘트 와인딩된 링 시편과 인장시편들의 인장특성을 평가하고 이들 결과들을 혼합법칙에 의해 예측된 이론적인 인장특성과 비교함으로써 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려할 수 있는 적절한 인장특성 평가방법을 제시하였다. 연구결과에 따르면 인장강도는 강화섬유의 불연속성과 시편에 형성된 응력집중 등에 영향을 받으며 링 시편을 이용하는 경우가 인장시편을 이용하는 경우에 비해 혼합법칙에 의해 예측된 결과에 근접한 인장강도를 얻을 수 있다. 또한 인장강성은 시편에 형성된 휨과 시험치구와의 마찰력 등에 영향을 받으며 링 시편이나 인장시편을 이용하는 경우 모두 적절한 데이타 처리기법을 적용하면 혼합법칙에 의해 예측된 결과에 근접한 인장강성으 얻을 수 있다. 따라서 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려한 정량적인 인장특성의 평가에는 링 시편을 이용한 평가방법이 인장시편을 이용한 평가방법 보다 적절하며 이를 통해 얻은 인장특성은 필라멘트 와인딩 구조물의 설계에 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

1. P.W. Erickson, H.A. Perry, and F.R. Barret, "Status of the NOL Ring Test for Glass Roving Reinforced Plastics," Proceedings of Filament Winding Conference, Society of Aerospace Materials and Process Engineers, March 1961.

2. A.K. Munjal, S.B. Kalkarnl, and H.S. Starret, "Characterization of Filament Wound Kevlar and Glass Composites for Rocket Motor Applications," 29th National SAMPE Symposium, April 1984.

3. 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 Standrds, Vol. 15. 03, 1992.

4. C.E. Knight, Jr., "Failure Analysis of the Split−D Test Method," Composite Materials : Testing and Design(Fourth Conference), ASTM ST 617P, American Society for Testing and Materials, July 1977, pp.201−214.

5. 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(SPI), Section 7−C, 1969, pp.1−10.

6. T.K. Hwang, Y.S. Gal, W.M. Cho, and B. Jung, "A study of Filament Winding Processing Variables Using NOL Rings Test," Journal of the Korean Society for Composite Materials, Vol.4, No.2, 1991, pp.62−70.

7. S.H. Yoon, C.G. Kim, and W.M. Cho, "Measurement of Modulus in Filament Wound Ring Specimen Using Split Disk Test," To be published, Experimental Techniques, 1995.