

## 論文

# Filament Winding에 의해 제조된 복합재료 NOL Ring시험편의 최적 인장강도 평가법에 관한 연구

김윤해\*, 권순철\*\*, 임철문\*\*

## A Study on the Optimum Evaluation Method for Tensile NOL Ring Specimen Manufactured by Filament Winding Process

Y. H. Kim\*, S. C. Kwon\*\*, and C. M. Yim\*\*

### ABSTRACT

Filament Winding Process is a comparatively simple operation in which continuous reinforcements in the form of roving are wound over a rotating mandrel. It is well established and versatile method for storage tanks and pipes for the chemical and other industries. In this study, tensile strength of a filament wound ring specimens were evaluated by a split disk test fixture and a dress disk test fixture. The results obtained from experiments were compared with the theoretical values from the rule of mixtures. The purpose of this paper is the suggestion of an appropriate test method for the evaluation of tensile properties of filament wound structures.

The tensile strength of a ring specimen tested by the dress disk test showed better agreement with the theoretical values than those tested by the split disk test because of higher stress concentration in edges of a split disk test fixture. The results showed that the tensile strength of a ring specimen was influenced by the geometry of test fixture, the continuity of fibers, fiber-tension, fiber-end and stress concentration in specimen.

### 초 록

필라멘트 와인딩 공법(filament winding process)은 회전하는 맨드렐에 로빙(roving)형태의 연속섬유를 감는 비교적 간단한 공정이다. 이것은 저장탱크, 화학용 파이프, 그리고 다른 산업에 사용되는 안정적이고 다양한 공법이다. 본 연구에서는 split disk test 치구와 dress disk test 치구에 의한 필라멘트 와인딩 링 시험편의 인장강도 값을 실험에서 얻어진 결과와 혼합 법칙에 의해 얻어진 이론적인 값을 비교하였다. 이 논문의 목적은 필라멘트 와인딩 구조물의 인장 특성 평가에 대한 적합한 시험법을 제안하고 있는 것이다.

dress disk test 치구로 시험한 링 시험편의 인장강도는 split disk test 치구의 모서리 부분에서 발생하는 응력집중 때문에 split disk test의 시험 결과보다 이론적인 인장강도 값에 잘 근접함을 보여준다. 이 실험 결과 시험 치구의 기하학적 형상과 섬유의 연속성, 섬유 장력 그리고 시험편의 응력 집중에 영향을 받을 수 있었다.

### 1. 서 론

필라멘트 와인딩 성형 기법 (filament winding method)은 수지가 함침된 연속섬유를 회전하는 심축(mandrel) 위에 감

\* 한국해양대학교 교수, 교신저자(E-mail:yunhaek@hanara.kmaritime.ac.kr)

\*\* 한국대학교 대학원

아서 주로 파이프나 압력용기 등과 같은 축대칭 복합재료 구조물을 제작하는 방법이다. 성형은 심축의 회전속도와 섬유의 공급위치를 이동시키는 캐리지(carriage)의 속도를 조절하여 일정한 와인딩 각도와 패턴으로 수지가 함침된 연속섬유를 심축에 감을 수 있는 성형기를 이용한다[1-3]. 필라멘트 와인딩방법으로는 수지를 섬유에 함침시키는 방법에 따라 습식 와인딩(wet winding)과 건식 와인딩(dry winding)으로 나뉘어진다. 습식 와인딩은 와인딩하는 과정에서 섬유가 수지 함침용기를 통과할 때 수지가 함침되어 바로 심축에 감는 방법이며, 건식 와인딩은 이미 수지가 섬유에 함침되어 경화가 일부 진행된 B단계로 된 프리프 레그 로빙 (prepreg roving)을 심축에 감는 방법이다[4]. 필라멘트 와인딩 공법으로 제작되는 구조물은 일반적인 평판 형태의 구조물과는 다른 축대칭 형태의 형상을 가질 뿐만 아니라, 사용되는 강화섬유도 연속성을 가지기 때문에 이러한 특성을 고려한 인장특성 평가방법과 이를 적용한 정량적인 인장특성의 확보가 무엇보다 중요하다[5,6]. 따라서 ASTM (American Society for testing and Materials)등과 같은 공인기관에서는 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려할 수 있는 적절한 인장특성 평가방법으로 다양한 실험방법[7]이 표준화 되어 있으며, 그 중에서 ASTM D 2290의 NOL (Naval Ordnance Laboratory) 링 시험은 유리섬유의 화학적 표면처리 효과를 간단히 알아보기 위한 시험으로 시작되었다가 후에 필라멘트 와인딩 구조물의 기본 물성시험으로 정착되었다[8]. 이는 필라멘트 와인딩된 링 시험에 인장하중을 작용시켜 인장특성을 평가하는 방법으로, 시험편의 제작이 용이하고 내압을 작용시키기 위한 가압장치와 시험장치를 필요로 하지 않으며, 강화섬유의 연속성을 고려한 시험치구 등으로 필라멘트 와인딩 구조물의 설계에 적용할 수 있는 인장특성을 얻을 수 있다[9,10]. 그러나 기존의 연구결과에 따르면, 시험치구 모서리 부위의 링 시험에 응력이 집중되어 인장강도를 정량적으로 평가하기 어려우며, 시험치구와의 마찰력으로 인해 인장강도의 평가도 불가능하여 주로 강화섬유의 표면처리, 와인딩 속도, 섬유장력, 섬유엔드 등이 인장강도에 미치는 영향을 평가하기 위한 방법으로 사용되어 왔다[11,12].

본 연구에서는 필라멘트 와인딩된 링 시험편을 ASTM D 2290에서 표준화한 split disk test와 시험치구의 형상을 개선시킨 dress disk test로 인장특성을 평가하여 상호비교함으로써 이상적인 강도를 얻고자 하였다. 그리고 각 시험에 사용되는 시험치구를 구조 해석하여 시험치구 형상에 따른 이론적 인장강도의 변화를 규명한 후, 이들 결과들을 혼합법칙으로 예측한 인장강도와 비교하여 적절한 필라멘트 와인딩 특성을 고려한 평가방법을 제시하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험재료

본 연구에 사용된 강화섬유는 Owens - Corning Fiber glass의 S2 Glass를 사용하였으며, 수지는 Ciba-Geigy의 필라멘트 와인딩용 에폭시인 AD 6005를 사용하였으며, 경화제와 경화촉진제로는 HY 906과 DY 062를 각각 사용하였다.

### 2.2 시험편 제작

링 시험편의 제작에는 습식 필라멘트 와인딩 공법을 적용하였으며, 그 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

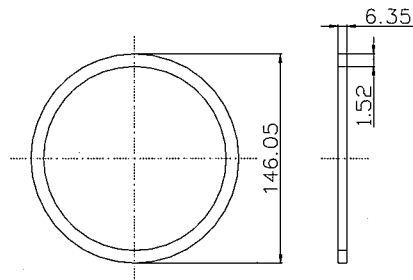


Fig. 1 The geometry of filament wound NOL ring specimen.

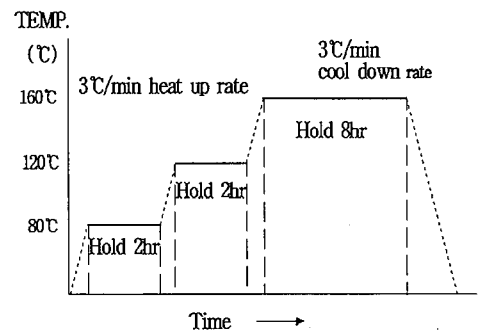


Fig. 2 The cure cycle for filament wound ring specimen.

제작공정은 원주방향으로 섬유를 감을 수 있도록 패턴을 결정한 후, ASTM에서 규정한 링 시험 제작용 맨드릴 (mandrel)을 장착하여 아세톤으로 세척한 다음 이형제 (FREKOTE 44-NC, DEXTER)로 이형처리하였다. 필라멘트 와인딩용 에폭시 수지를 AD 6005/HY 906/DY 062가

100/80/1의 무게혼합비가 되도록 배합한 후, 수지 함침용기에서 65℃까지 예열시켜, 폭 6.35mm, 두께 1.52mm의 시편 규격에 맞도록 섬유장력 1.5kg으로 일방향 와인딩한 다음, 파잉수지를 제거하기 위해 미경화상태에서 수축테이프를 감아 경화로에 넣고 경화시킨 후 탈형하였다. 이 때의 경화사이클을 Fig. 2에 나타내었다.

### 2.3 실험방법

필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 링 시편의 인장강도 평가에는 INSTRON STATIC 4469 Model인 유압하중시험기 (5 ton)를 사용하였으며, 각각의 인장 시험치구에 링 시편을 부착시키고 인장시험기에 장착한 다음, 인장시험을 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 시험치구 형상에 따른 인장강도 변화

Table 1에는 ASTM의 표준 시험법인 split disk test에 의한 인장강도값을 나타내었고, Table 2에는 dress disk test에 의해 얻어진 인장강도를 나타내었다. 여기서, 링 시편의 이

론적 최대 인장강도는 섬유강화의 기본적인 메카니즘인 혼합법칙(rule of mixture)[13]에 의해 구하였으며, 인장강도에 큰 영향을 미치는 섬유부피함유율(ASTM D317-76)은 매트릭스(matrix)수지를 분해·제거한 후, 잔사로써 보강섬유의 함유율을 측정하는 매트릭스 분해법[14]을 이용하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이 split disk test에 의한 인장강도는 dress disk test에 의해 얻어진 인장강도에 비하여 대략 9% 정도 낮게 나타남을 알 수 있었다. 이는 시험치구의 형상을 구조해석하여 보면, split disk test의 시험치구에 부착된 링 시편에 작용하는 응력과 dress disk test의 시험치구에 부착된 링 시편에 작용하는 응력의 차이 때문이라고 사료된다. Fig. 3(a)와 (b)는 각각의 링 시편에 인장력을 가했을 때 변화하는 시험편의 형상을 도식적으로 나타내었다. 링 시편은 치구의 형상에 따라서 split disk의 경우는 원형의 형태를 가지고 dress disk의 경우는 직선의 형태를 가지게 된다.

이에 따라서 각각의 시편에 작용하는 응력분포를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 응력분포는 다음과 같은 차이가 난다. Fig. 4(a) split disk test의 경우 응력분포는 사다리꼴 형태의 응력 분포를 갖고, (b) dress disk test의 경우는 균일한 응력분포를 갖는다. 따라서 파단 되는 때의 응력( $\sigma_f$ )은 차이를 가지게 되고, split disk test

Table 1 The measured strength of filament wound NOL ring specimen used by split D-test

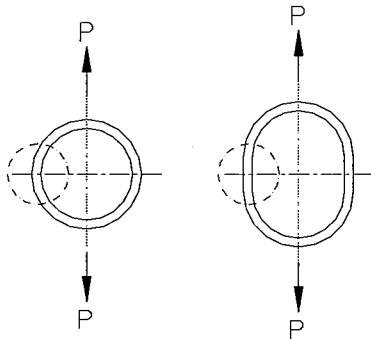
	Specimen No.	Fiber Volume Fraction(%)	Ring Tensile Strength(MPa)		Deviation(%) [( $S_p - S_m$ )/ $S_p$ ]
			Predicted $S_p$	Measured $S_m$	
S2 Glass / AD 6005	1	53	2023	1658.975	17.9
	2	53	2023	1683.136	16.8
	3	53	2023	1624.469	19.7
	4	53	2023	1608.285	20.5
	5	53	2023	1614.354	20.2
	6	53	2023	1707.412	15.6
	7	53	2023	1664.729	17.7

Table 2 The measured strength of filament wound NOL ring specimen used by dress D-test

	Specimen No.	Fiber Volume Fraction(%)	Ring Tensile Strength(MPa)		Deviation(%) [( $S_p - S_m$ )/ $S_p$ ]
			Predicted $S_p$	Measured $S_m$	
S2 Glass / AD 6005	1	53	2023	1824.746	9.8
	2	53	2023	1780.241	11.9
	3	53	2023	1846.799	8.7
	4	53	2023	1814.631	10.3
	5	53	2023	1792.378	11.4
	6	53	2023	1853.183	7.9
	7	53	2023	1855.091	8.3

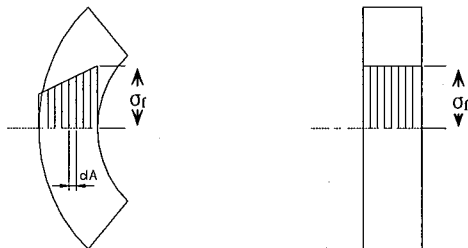
에서의 응력은  $P = \int \sigma dA$ 이고, dress disk의 경우는  $P = \sigma A = \sigma_f A$ 이다.

따라서, dress disk test의 경우가 더 많은 하중을 받을



(a) split disk test (b) dress disk test

Fig. 3 Illustration of specimen geometry.



split disk test (b) dress disk test

Fig. 4 Illustration of stress distributions in the test fixture.

수 있고, 더 큰 인장강도를 갖는다고 생각된다.

### 3.2 파단 양상에 따른 인장강도의 변화

인장시험 후에 파단된 부위를 관찰하기 위하여 링 시편을 제작한 후, 각 시험치구의 모서리 부위에 위치한 링 시편의 외면을 표시하여 장착하였다. split disk test의 파단 양상은 링 시편의 대부분이 시험치구의 모서리와 접하는 부위에서 파손이 발생하고 원주방향으로 파손이 진전된 다음 최종 파단이 발생됨을 알 수 있었다. 이는 링 시편에 작용된 하중에 의해 시험치구 모서리 부위에 응력집중 현상이 발생하고, 이것이 파단을 유발시키는 직접적인 원인이라 규명한 Knight, C.E. Jr.[15]의 링 시편 응력 및 변형률을 조사한 유한요소 구조해석의 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. dress disk test의 경우, 대체적으로 링 시편의 여

러 부위에서 파단이 발생함을 알 수 있었다. 이는 링 시편이 제작시 와인딩의 시작지점과 끝 지점에서 강화섬유가 끊어져 있는 상태이므로 이 취약지점에서 파단이 발생된다고 생각된다[16]. 또한 인장하중이 가해지면서 시험치구의 모서리와 접하는 부위가 split disk test의 점 접촉과는 달리 링 시편이 dress disk test의 시험치구의 직선부위와 면 접촉을 하게 됨으로 응력집중 효과가 줄어들었기 때문이라 판단된다.

### 3.3 이론적 인장강도와와의 비교

Fig. 5과 6는 split disk test와 dress disk test의 인장강도와 혼합법칙에 의해 예측된 인장강도와와의 비교를 나타낸 것으로, split disk test에 의한 인장강도는 혼합법칙에 의한 이론적인 인장강도에 비하여 대략 15~20% 정도 낮게 나타나지만, dress disk test에 의한 인장강도는 이론적 인장강도에 근사한 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 앞에서 규명한 내용들과 잘 일치함을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 링 시편을 split disk test와 dress disk test로 나누어 실시하였으며, 링 시편의 인장특성에 각 시험치구의 형상이 어떠한 영향을 미치는지 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) split disk test의 경우, 실험을 통해 얻은 인장강도는 혼합법칙에 의한 이론적 인장강도에 비하여 대략 15~20% 정도 낮게 나타났으며, dress disk test의 인장강도에 비해 약 9% 정도 낮게 나타났다. 이는 시험치구 형상을 구조해석한 결과와 일치하며, 시험치구의 반원형 모서리 부위에서의 인장 시 발생된 응력집중 효과에 의해 파단강도가 저하한 것이다.

(2) dress disk test의 경우, 실험을 통해 얻은 인장강도는 혼합법칙에 의한 이론적 인장강도에 근사한 값(7~11%)을 나타냄을 알 수 있다. 이는 split disk test의 반원형 모서리에 직선부위를 부여하여 형상을 개선시킴으로써 링 시편과의 면 접촉에 의해 응력집중 효과가 최소화되었기 때문이다.

(3) 링 시편의 파단양상은 split disk test의 경우, 반원형 시험치구의 모서리 부위에서 집중적으로 발생되었으며, 이는 링 시편과의 점 접촉에 의한 응력집중 효과에 따른 것이라 생각된다. dress disk test의 경우, 파단은 다른 부위에서도 고르게 발생되었는데, 이는 시험치구의 응력집중 효

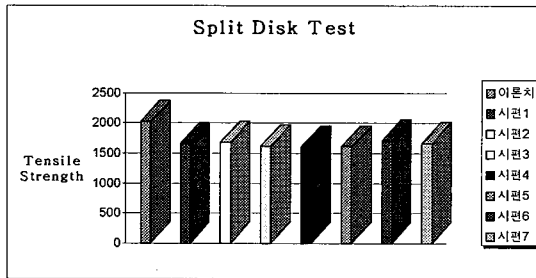


Fig. 5 The comparison of tensile strength between rule of mixture and split disk test.

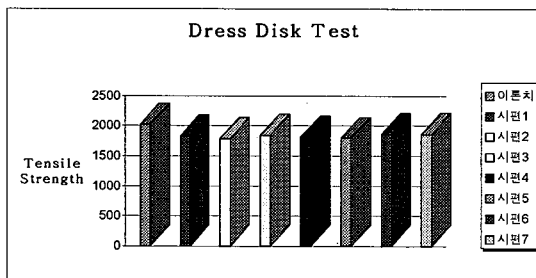


Fig. 6 The comparison of tensile strength between rule of mixture and dress disk test.

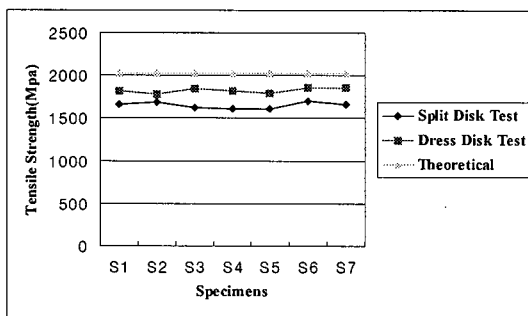


Fig. 7 The comparison of tensile strength between split disk test and dress disk test.

과보다는 링 시편의 강화섬유가 끊어진 부위가 인장시험 시 취약한 부위로써 작용되었기 때문이다.

(4) 이상의 실험결과에서 ASTM D 2290에서 표준화한 split disk test에 비해 시험치구의 형상을 개선시킨 dress disk test가 필라멘트 와인딩 구조물의 정량적인 인장특성을 보다 정확하게 평가할 수 있음을 알 수 있다.

## 참고문헌

- 1) *Handbook of Composites*, Chapman & Hall, London, pp. 456-458.
- 2) Peters, S.T., Foral, R.F and Humphrey W.D., Filament Winding, In *International Encyclopedia of Composites*, 1987, pp. 503-518.
- 3) Peters, S.T., Filament Winding, In *Engineered Materials Handbook*, Vol.1, Composites, 1987, pp. 504-509.
- 4) *Handbook of Composites*, Edited by George Lubin, Filament Winding, A.M.Shibley, Plastic Technical Evaluation Center, pp. 449-450.
- 5) S. H. Yoon, C. G. Kim and W. M. Cho., "Composites of Tensile Properties between Ring Specimen and Tensile Coupon Specimen Manufactured by Filament Winding Process," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, 1995.
- 6) G.Di Vita, M.Marchetti and M. Nappi, *Composites Application and Design, Proceedings of ICCM-12*, A Code to Analyse the Structure Technological Design of Filament Wound Pressure Vessels, Paris, 1999.
- 7) M. Lee, *International Encyclopedia of Composites*, Vol.2, pp. 180-181.
- 8) D.V. Rosato, C.S.Grove, "Filament Winding; Its Development Manufacture, Applications and Design," John Wiley & Sons Inc., pp. 218-223.