

필라멘트 와인딩 공법으로 제조된 링 시험편의 인장강도 평가법에 관한 연구

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

○ 배창원*, 권순철*, 임철문*, 엄수현**, 김윤해***

C.W. Bae, S.C. Kwon, C.M. Im, S.H. Um, Y.H. Kim

Key Words : Filament Winding, Tensile Strength, Split Disk Test
Dress Disk Test, Stress Concentration

ABSTRACT

Filament winding process is a comparatively simple operation in which continuous reinforcements in the form of roving are wound over a rotating mandrel. And it is now well established as a versatile method for storage tanks and pipe for the chemical and other industries. In this study, tensile strength of a filament wound ring specimens were evaluated by split disk test fixture and dress disk test fixture. The results obtained from experiments were compared with the theoretical values obtained by the rule of mixtures in composites. And 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 that of a ring specimen tested by the split disk test because the stress concentration in edges of a split disk test fixture is more severe than that of dress 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.

1. 서 론

필라멘트 와인딩 성형 기법 (Filament Winding Method)은 수지가 함침된 연속섬유를 회전하는 심축 위에 감아서 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 심축(Mandrel)에 감을 수 있는 성형

기를 이용한다.^{1,2,3)} 필라멘트 와인딩 방법으로는 수지를 섬유에 함침시키는 시기에 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 프리프레그 로빙 (Prepreg Roving)을 심축에 감는 방법이다.⁴⁾ 필라멘트 와인딩 공법으로 제작되는 구조물은 일반적인 평판형태의 구조물과는 다른 축대칭 형태의 형상을 가질 뿐만 아니라, 사용되는 강화섬유도 연속성을 가지기 때문에 이러한 특성을

* 한국해양대학교 대학원

** 한국해양대학교 기계소재공학부 학부생

*** 한국해양대학교 기계소재공학부 교수

고려한 인장특성 평가방법과 이를 적용한 정량적인 인장특성의 확보가 무엇보다 중요하다.^{15,16} 따라서 ASTM 등과 같은 공인기관에서는 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려할 수 있는 적절한 인장특성 평가방법으로 다양한 실험방법¹⁷이 표준화 되어 있으며, 그 중에서 D 2290의 NOL (Naval Ordnance Laboratory) 링 시험은 유리섬유의 화학적 표면처리 효과를 간단히 알아보기 위한 시험으로 시작되었다가 후에 필라멘트 와인딩 구조물의 기본 물성시험으로 정착되었다.¹⁸ 이는 필라멘트 와인딩된 링 시편에 인장하중을 작용시켜 인장특성을 평가하는 방법으로, 시편의 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.^{19,10} 그러나 기존의 연구결과에 따르면, 시험치구 모서리 부위의 링 시편에 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 시편을 ASTM D2290에서 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 - Corn

ing Fiber glass의 S2 Glass를 사용하였으며, 수지는 Ciba-Geigy의 필라멘트 와인딩용 에폭시인 AD 6005를 사용하였으며, 경화제와 경화촉진제로는 HY 906과 DY 062를 각각 사용하였다. Table 1에 사용된 강화섬유와 수지의 기계적 성질을 나타내었다.

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

<u>S2 GLASS (Owens-Corning Fiberglass)</u>	
Filament Diameter :	9.1 μm
Density :	2.46 g/cm ³
Tensile modulus :	87 GPa
Tensile strength :	4585 MPa
<u>RESIN (Ciba-Geigy AD6005/HY906/DY062)</u>	
Mixing ratio :	100/80/1 in parts by weight
Density :	1.21 g/cm ³
Tensile modulus :	3.03 GPa
Tensile strength :	83 MPa
Flexural strength :	124.1 MPa
Ultimate strain :	2.0 %

2.2 시편 제작

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

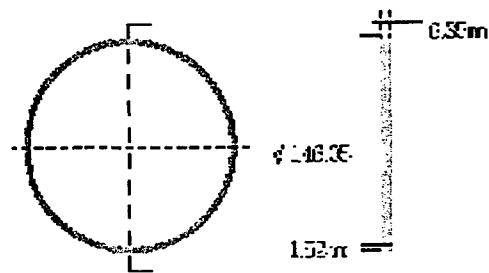


Fig.1 The geometry of filament wound ring specimen

제작공정은 원주방향으로 섬유를 감을 수 있도록 패턴을 결정한 후, ASTM에서 규정한 링 시편 제작용 맨드렐(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, 과잉수지를 제거하기 위해 미경화상태에서 수축테이프를 감아 경화로에 넣고 경화시킨 후 탈형하였다. 이 때의 경화사이클을 Fig.2에 나타내었다.

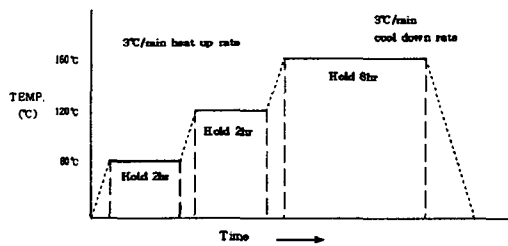
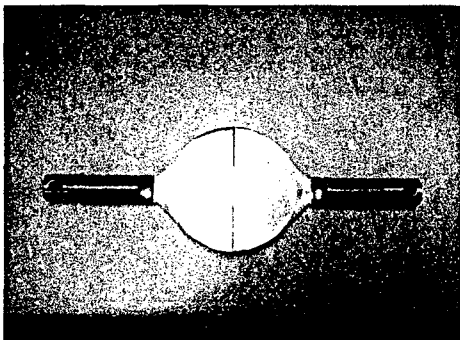


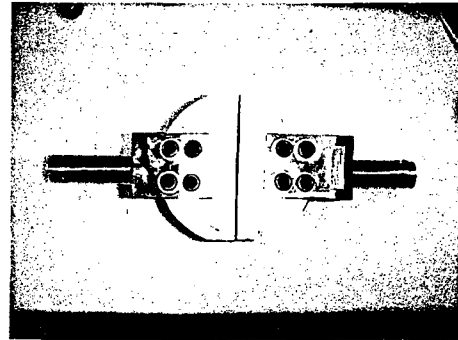
Fig.2 The cure cycle for filament wound ring specimen

2.3 시험치구의 형상

Fig. 3에는 필라멘트 와인딩된 링 시편의 인장특성을 평가하기 위한 시험치구들을 나타내었다. Fig.3(a)에 ASTM에서 규정한 시편을 장착하여 시험치구를 상하로 분리시켜 그 양단에 인장응력을 받도록 한 Split Disk Test용 시험치구를 나타내었으며, Fig.3(b)는 보다 정확한 인장특성을 얻을 수 있도록 구조해석을 통해 개선된 Dress Disk Test용 시험치구의 형상을 나타낸 것이다.



(a) Split Disk Test Fixture



(b) Dress Disk Test Fixture

Fig. 3 The configuration of tensile test fixture

2.4 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, 0.2mm/min의 크로스 헤드 속도(Cross Head Speed)로 인장시험을 하였다.

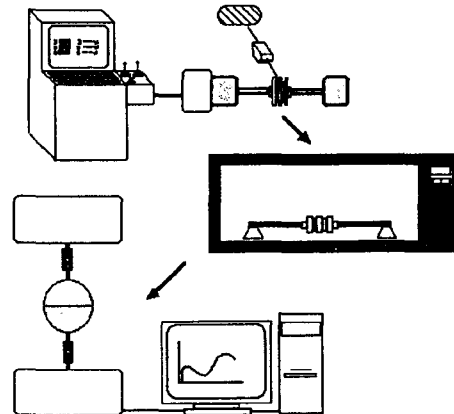


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 시험치구 형상에 따른 인장강도의 변화

Table 2에는 ASTM의 표준 시험법인 Split Disk Test에 의한 인장강도값을 나타내었고, Table 3에는 Dress Disk Test에 의해 얻어진 인장강도를 나타내었다. 여기서, 링 시편의

이론적 최대 인장강도는 섬유강화의 기본적인 메카니즘인 혼합법칙(Law of Mixture)^[13]에 의해 구하였으며, 인장강도에 큰 영향을 미치는 섬유부피함유율(ASTM D317-76)은 매트릭스(Matrix)수지를 분해·제거한 후, 잔사로서 보강섬유의 함유율을 측정하는 매트릭스 분해법^[14]을 이용하였다.

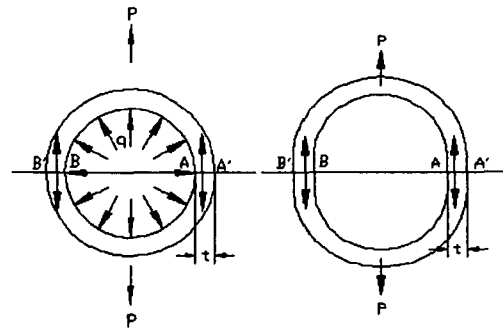
Table.2 The measured strength of filament wound ring specimen used by Split Disk Test

	Specimen No.	Fiber Volume Fraction (%)	Ring Tensile Strength (MPa)		Deviation (%) [(S _p -S _m) / S _p]
			Predicted S _m	Measured S _m	
S3 Glass / AD 6005	1	53	2023	1658.975	17.9
	2	53	2023	1683.136	16.8
	3	53	2023	1624.409	19.7
	4	53	2023	1608.285	20.5
AD 6005	5	53	2023	1614.354	20.2
	6	53	2023	1707.412	15.6
	7	53	2023	1664.729	17.7

Table.3 The measured strength of filament wound ring specimen used by Dress Disk Test

	Specimen No.	Fiber Volume Fraction (%)	Ring Tensile Strength (MPa)		Deviation (%) [(S _p -S _m) / S _p]
			Predicted S _m	Measured S _m	
S3 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
AD 6005	5	53	2023	1792.378	11.4
	6	53	2023	1853.183	7.9
	7	53	2023	1855.091	8.3

Table 2에서 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 구조해석한 결과와 일치함을 알 수 있는데, Split Disk Test의 시험치구에 부착된 링 시편에 작용하는 응력의 경우, Fig.5(a)와 같이 링 시편에는 응력이 균일하게 작용하게 된다. 이 때, 시험치구의 내경을 d, 링 시편의 두께를 t, 링 시편에 분포하는 힘을 q, 링 시편의 원호 길이를 l이라 하면, 인장강도(σ_s)는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.



(a) Split Disk Test (b) Dress Disk Test

Fig. 3 Illustration of how a applied stress system produces stresses in the test fixture

$$2\sigma_s tl = qdl = P \quad (1.1)$$

이 때, 링 시편의 AA'와 BB'의 양 면은 전단된다고 가정한다. 반면에 Dress Disk Test의 시험치구에 부착된 링 시편은 Fig.5(b)와 같이 Split Disk Test와는 달리 힘(P)이 시험치구의 직선부위(Dress Line)와 평행하게 작용하게 된다. 따라서 이 때에 작용하는 인장강도를 σ_d , 링 시편의 폭을 b라 하면,

$$2\sigma_d bt = P \quad (1.2)$$

이다. 여기서, Split Disk Test와 Dress Disk Test의 링 시편에 걸리는 힘은 동일하므로,

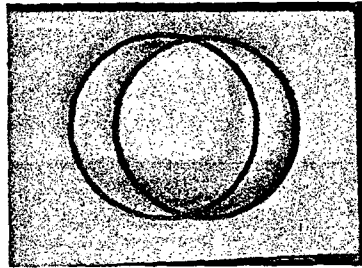
$$2\sigma_s tl = 2\sigma_d bt \quad (1.3)$$

과 같은 성립관계가 형성된다. 하지만, $b \ll l$ 이므로 Dress Disk Test에 의한 인장강도 σ_d 은 Split Disk Test의 σ_s 에 비해 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

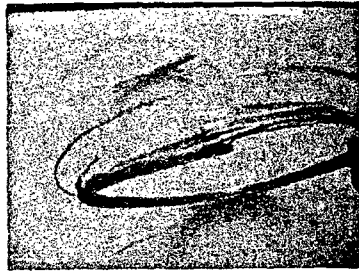
3.2 파단 양상에 따른 인장강도의 변화

Fig.7에 링 시편의 파단 양상을 나타내었다. 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



(a) Original Shape



(b) Fractured Shape

Fig.6 The photograph of fractured shape and original shape for filament wound ring specimen

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 여러 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 사료된다.

3.3 이론적 인장강도와 비교

Fig. 8과 9는 Split Disk Test와 Dress Disk Test의 인장강도와 혼합법칙에 의해 예측된 인장강도와 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.

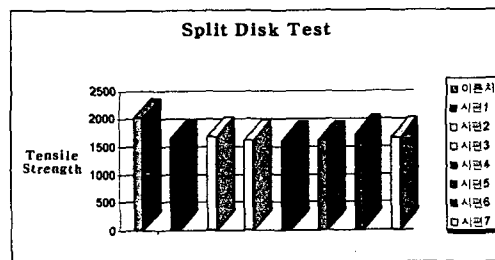


Fig. 7 The comparison of tensile strength between law of mixture and Split Disk Test

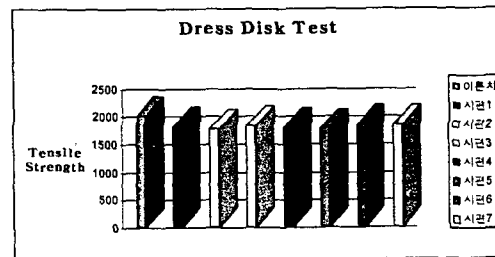


Fig. 8 The comparison of tensile strength between law of mixture and Dress Disk Test

4. 결론

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 복합법칙에 의한 이론적 인장강도에 비하여 대략 15~20% 정도 낮게 나타났으며, Dress Disk Test의 인장강도에 비

해 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 이론적인 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 효과보다는 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, Edited by S.T. Peters, Published in 1988 by Chapman & Hall, London, pp 456~458
2. Peters, S.T., Foral, R.F and Humphrey W.D., 1987, Filament Winding, In International Encyclopedia of Composites, pp 503~518
3. Peters, S.T., 1987, Filament Winding, In Engineered Materials Handbook, Vol.1, Composites, 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. A Code to Analyse the Structure-Technological Design of Filament Wound Pressure Vessels, G.Di Vita, M.Marchettii and M. Nappi, Composites Application and Design, ICCM, Paris, 12th
7. International Encyclopedia of Composites, Vol.2, Edited by Stuart M. Lee, 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
9. 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, 1992
10. 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, 1961
11. T.K.Hwang, Y.S.Gal, W.M.Cho and B.Jung, "A Study of Filament Winding Processing Variables using NOL Ring Test", Journal of the Korean Society for Composites Materials, Vol.4, 1991, pp 62~70
12. 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
13. 複合材料工學, 林 敷編, 日科技連出版社, 1988
14. 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.
15. C.E. Knight, Jr., "Failure Analysis of the split-D Test Method", 4th Composites Materials; Testing and Design, ASTM ST 617P, American Society for Testing and Materials, 1977, pp 201~214
16. Development of Composite Transmission Shaft for Aircraft (I)(II), Ministry of Science and Technology