

Hoop ring 시험방법을 이용한 복합재연소관의 섬유방향 물성 평가

황태경** · 박재범** · 김형근** · 이상우*

Hoop Ring Test Method to Evaluate the Fiber Material Properties of Composite Motor Case

Taekyung Hwang** · Jaebyum Park* · Hyungkun Kim* · Sangwoo Lee**

ABSTRACT

The deformation and burst pressure of composite motor case highly depends on fiber material properties. Therefore, measuring exact fiber material properties is a priority item to develop a advanced composite motor case. However, the fiber material properties in composite motor case is very sensitive on the various processing variables (equipment, operator and environmental condition etc..)and size effect, so the fiber material properties can't be measured exactly from the existing specimen test method. This paper suggests a newly developed test method, hoop ring test, that is capable of pressure testing with ring specimens extracted from real composite motor case. The results of hoop ring test showed excellent agreement with measured fiber material properties from hydro-burst test with full scale composite motor cases.

초 록

섬유 방향 물성은 복합재 연소관의 내압 변형 및 파열 압력에 직접적인 영향을 미치므로, 우수한 성능의 복합재 연소관 개발을 위해서는 정확한 섬유 방향 물성 측정이 우선되어야 한다. 그러나 복합재 연소관의 섬유 방향 물성은 제작 공정 변수(와인딩 장비, 작업자, 작업환경 등)와 크기 효과에 의해 비교적 큰 영향을 받으므로 기존의 시편 시험 방법으로는 정확한 섬유 방향 물성 측정이 어렵다. 제품으로부터 다량의 링 시편을 채취, 시험할 수 있는 Hoop ring 시험 방법이 제시되었고, 실물 연소관의 수압 파괴 시험으로부터 구한 섬유 방향 물성과 근접된 좋은 일치율을 나타내었다.

Key Words: Filament Winding(필라멘트 와인딩), Composite Motor Case(복합재 연소관), Test Method(시험방법), Fiber Material Properties(섬유물성)

1. 서 론

섬유 방향 물성은 필라멘트 와인딩(Filament winding) 공법으로 제작되는 복합재 연소관(Composite motor case)의 중요 설계 인자로서, 연소관의 구조 변형 및 신뢰도에 가장 큰 영향을 미친다[1]. 그러므로 고 성능 복합재 연소관

* 한국화이버 특수사업본부

** 국방과학연구소 1기-6부

연락처, E-mail: cais99@hanmail.net

개발을 위해서는 정확한 섬유 방향 물성 측정이 전제되어야 한다. 이러한 섬유 물성 측정을 위한 여러 가지 방법이 있으나, 대표적인 것이 한 방향 복합재 인장 시험(ASTM D3039), Split disk 방법(ASTM D2290), 필라멘트 와인딩 압력용기의 수압시험(ASTM D2585) 등이 있다. 한 방향 복합재 인장 시험은 필라멘트 와인딩으로 평판 시편을 제작함으로써 발생하는 제작공정 변수 영향과 시편 가공으로 인한 섬유의 끊어짐으로 실제보다 낮은 섬유 강도가 측정된다. Split disk 방법은 복합재 링(Ring) 시편 전체에 내압 하중과 같은 균일 하중을 모사하지 못하는 문제점이 존재하고[2], 직경 146.0(mm)인 시험용 압력 용기 시험은 비교적 정확한 섬유 방향 물성 측정이 가능하지만, 실 구조물과의 크기 및 적층 두께차이로 인한 섬유 물성의 변화를 규명할 수 없는 문제점이 존재한다[3]. 이러한 이유로 정확한 섬유 물성을 측정하는 가장 효과적인 방법은 실물 연소관의 수압 파괴시험이지만 많은 비용이 소요되어, 제품으로부터 다량의 링 시편을 채취하여 적은 비용으로 다량의 시험이 가능한 Hoop ring 시험 방법이 제안되었다. 시험 방법의 타당성 입증을 위해 기존 시험 결과와 비교하였고, 최종적으로 실 구조물 시험으로부터 구한 섬유 물성과의 통계적 비교/분석을 수행하였다.

2. Hoop ring test

2.1 시험장치



Fig.1 Hoop ring test fixture

Figure 1에 Hoop ring 시험 장치로서, 제품으로부터 채취한 링 시편을 치구에 조립한 후 내부의 고무 튜브에 수압을 적용하여 내압 파괴 시험을 수행하게 된다. 고무 튜브는 링 시편의 반경 방향으로만 변형이 허용되며, 치구와 링 시편 간에는 일정 간격을 고려하여 내압 변형 시 링 시편이 반경 방향으로 자유롭게 변형되도록

하였다. Figure 2는 Hoop ring 시험 시 스트레인게이지로부터 측정한 링 시편의 압력별 변형을 결과로서 균일 변형을 분포를 나타내고 있다.

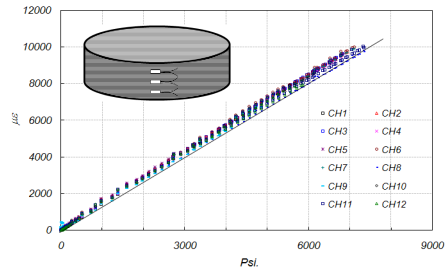


Fig. 2. Pressure versus hoop strain for hoop ring test

2.2 시편 형상

적용 소재는 T700/Epoxy(Epon826/MPDA/KH100)이고, 헬리컬 층과 후프 층으로 구성된 Φ 500.0(mm) 압력용기로부터 폭 50.0(mm)의 Hoop ring 시편을 가공하여 시험을 수행하였다. Hoop ring 시험 시 링 시편 일부만 파괴되는 현상이 발생하고, 섬유 파손 변형률의 변동성도 비교적 크게 나타났다.

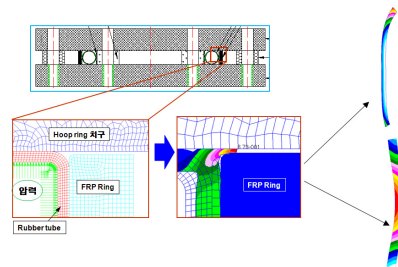


Fig. 3. Finite element analysis for hoop ring test

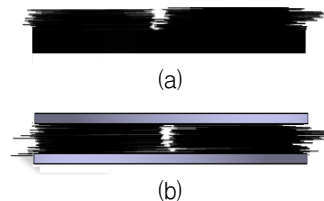


Fig. 4. Failure mode of hoop ring; (a)Existing hoop ring, (b)Reinforcing hoop ring

이러한 이상 파괴 현상을 규명하기 위해 Fig.3

과 같이 간극을 변수로 유한요소응력을 수행하였다. 시편과 치구간의 간극을 기준 값인 0.1mm에서 0.2mm로 증가시킨 경우, 고무 튜브가 간극 사이로 밀려나와 링 시편 끝단 지점이 응력 집중을 받게 된다. 이러한 응력 집중과 시편 가공으로 인한 섬유 끊어짐이 중첩되어 Fig.4(a)와 같은 파손 모드가 나타난 것으로 해석되었다.

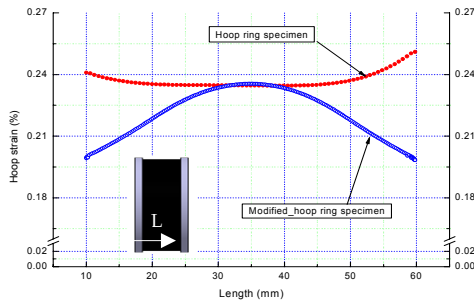


Fig. 5. Hoop strain distribution along the width of specimen for existing and reinforcing hoop ring

이러한 문제점 해결을 위해 링 시편의 끝단을 보강하는 방법이 제안되었고, 설계 변수 응력 해석을 통해 보강층의 재질과 두께 및 폭이 결정되었다. 보강된 ring 시편은 시편 끝단의 강성 증가로 고무 튜브의 밀림이 없고, 가공부의 강도 저하도 보완되어 Fig.3과 같이 시편 중앙에서 최대 변형이 발생하였다. Figure 5는 링 시편의 보강 설계 전, 후의 원주 방향 변형률 분포로, Glass층을 보강한 경우에 시편 중앙에서 최대 변형이 발생하여 Fig. 4(b)와 같이 시편 중앙에서 내압 파괴를 유도할 수 있었다.

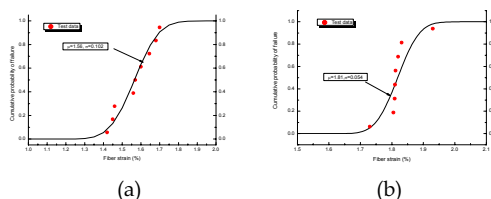


Fig. 6. Fiber failure strain versus cumulative probability of failure for hoop ring test; (a)Existing hoop ring, (b)Reinforcing hoop ring

Figure 6과 Table 1은 Hoop ring 시편 보강 전, 후로부터 구한 섬유 파손 변형률 결과로서

각각 MIL-HDBK-17E의 분포적합도 검사를 통해 정규분포와 와이블 분포로 비교되었다. 보강된 시편인 경우, 평균값이 약 16% 증가하였고, 변동율(COV)은 절반으로 줄어드는 안정된 결과를 나타내었다.

Table 1. Summary of fiber failure strain distribution as a function of ring shape design

	N	Normal function		Weibull function	
		μ (%)	v (%)	α	β (%)
Existing ring	9	1.56	6.5	19.0	1.60
Reinforced ring	8	1.81	3.0	32.3	1.84

(N: Number of specimen)

3. 결과 분석

Hoop ring 시험의 타당성 입증을 위해 Split disk와 $\Phi 500.0$ (mm) 압력용기의 수압시험으로부터 구한 섬유 파손 변형률 값과 비교분석하였다. 이때 Hoop ring 시험은 보강 전, 후 2가지 경우의 시험 값을 이용하였다. $\Phi 500.0$ (mm) 압력용기로부터 구한 섬유 파손 변형률 분포를 기준으로 ANOVA test를 수행하여 상호 연관성을 검사하였다. ANOVA test는 각 시험 집단의 모 평균 값들이 서로 같다는 귀무가설로부터 출발하는데, 각 시험 값 집단은 정규 분포이고 모 분산은 동일하다는 가정이 적용된다. 이때 복합재 연소판의 설계 물성 값은 B-base 기준값을 이용하므로 95%신뢰도(유의수준 5%)로 설정하여 F기준 값을 결정하였다.

Table 2. Summary of fiber failure strain distribution as a function of test method

Test	Method	μ (%)	σ	v (%)	N
1	Split disk	1.65	0.075	4.5	5
2	Hoop(1)	1.56	0.103	6.5	9
3	Hoop(2)	1.81	0.05	2.8	8
4	Vessel*	1.80	0.086	4.7	4

Table 3. Summary of analysis of variance of test method

	F-value	P-value	F _{기준값}	가설
Test 1,2,3,4	6.617	0.002357	3.049	기각
Test 4-1	10.214	0.015	5.591	기각
Test 4-2	0.047	0.8327	4.965	채택
Test 4-3	5.398	0.04	4.844	기각

Table 2는 각 시험방법에 따른 섬유 파손 변형률의 정규 분포와 변동율을 나타내고 있다. 표에서 Hoop(1), (2)는 각각 glass층 보강 전,후의 hoop ring 시험을 의미하고, Vessel은 Φ 500.0(mm) 압력용기의 수압 파괴시험을 나타낸다. 표에서 보듯이 평균값 기준으로 Hoop(2)시험이 실물 압력용기에 가장 근접한 반면에 Split disk 방법이나 Hoop(1) 시험은 낮은 결과를 나타내었다. Table 3은 각 시험 방법 간의 ANOVA test 결과로, 4가지 시험 결과의 평균값이 같다는 가설은 5% 유의 수준에서 기각되고, Hoop(2) 시험 결과만이 압력용기 시험 결과와 평균값이 같다는 결과를 나타내었다.

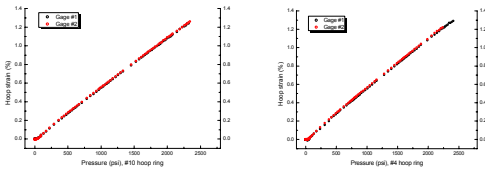


Fig. 7. Typical pressure versus hoop strain curve from hoop ring test

Figure 8은 Hoop ring 시험의 전형적인 압력별 원주 방향 변형률 분포로서, 압력 증가에 따라 약간의 강성증가 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 내압에 의한 링 시험의 팽창과 그에 따라 왜곡되었던 와인딩 섬유의 정렬이 원인인 것으로 보고되고 있다[4]. 이러한 비선형 변형을 2차 선도로 근사하여 변형률별 섬유 방향 강성을 계산하면 Table 4와 같다.

Table 4. Measured hoop stiffness from hoop ring test

Unit: GPa	μ	ν (%)
Initial modulus	134.2	1.4
Tangent modulus at failure	141.9	1.3

8조 시험 결과 2%이내의 양호한 변동성을 갖는 섬유 방향 강성 분포를 구하였는데, 섬유부피 함유율 60%의 Rule of mixture로 예측한 섬유 방향 강성인 138.0(GPa)에 근사한 결과이다. Table 5는 동일 소재와 제작 공정으로 제작된 Φ 157.0(mm) Hoop ring 시험 결과이고, Table 6은

Φ 500.0(mm) 시험 기준으로 수행된 ANOVA test 결과이다. 결론적으로 동일 모 평균을 갖는 것으로 평가되었다.

Table 5. Fiber failure strain distribution from Φ 157.0mm hoop ring test

	μ (%)	σ	ν (%)	N
Φ 157 ring	1.83	0.0679	3.7	6

Table 6. Analysis of variance of hoop ring test method as a function of diameter

	F-value	P-value	F _{기준값}	가설
Φ 157- Φ 500	0.221	0.64	4.74	채택

4. 결론

필라멘트 와인딩으로 제작되는 복합재 연소관의 정확한 섬유 방향 물성 측정을 위해 hoop ring 시험 방법이 제안되었다. 내압 하중 모사가 가능하고, 시험 경계에 적용된 Glass 층 보강은 정확한 섬유 방향 물성의 측정을 가능케하였다. 실구조물의 파괴 시험 결과와의 ANOVA test를 통해 Hoop ring 시험의 타당성을 입증하였고, 본 논문에 적용된 소재 및 제작 공정으로 제작된 압력용기는 섬유 강도에 대한 크기효과(Size effect)는 없는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- Hwang, T. K., Hong, C. S. and Kim, C. G., "Probabilistic Deformation and Strength Prediction for a Filament Wound Pressure Vessel," Composite Part B, Vol.34, 2003
- Kim, M. G., Kang, S. C., Kim, C. G. and Kong, C. W., "Thermally Induced Stress Analysis of Composite Aluminum Ring Specimens at Cryogenic Temperature," Composite Science and Tec., Vol.68, 2008
- Munjal, K., "Use of Fiber Reinforced Composites in Rocket Motor industry," SAMPE Quarterly, January, 1986
- David, C., "Application of Material Non-linearity to a Composite Pressure Vessel Design," AIAA90-1002-CP