論文

필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 섬유 방향 물성 평가 기법

황태경*+, 박재범*, 김형근*

Test Method to Evaluate the Fiber Material Properties of Filament Wound Composite Pressure Vessel

Tae-Kyung Hwang*+, Jae-Beom Park*, Hyoung-Geun Kim*

ABSTRACT

The fiber material properties, elastic constant and strength, are the most important factors among the various material properties for the design of composite pressure vessel, because of it's dominant influence on the performance of composite pressure vessel. That is, the deformation and burst pressure of pressure vessel highly affected by the fiber material properties. Therefore, the establishment of test method for exact fiber material properties is a priority item to design a composite pressure vessel. However, the fiber material properties in filament wound pressure vessel is very sensitive on various processing variables (equipment, operator and environmental condition etc..) and size effect, so that it isn't possible to measure exact fiber material properties from existing test methods. The hydro-burst test with full scale pressure vessel is a best method to obtain fiber material properties, but it requires a enormous cost. Thus, this paper suggests a newly developed test method, hoop ring test, that is capable of pressure testing with ring specimens extracted from real composite pressure vessel. The fiber material properties from hoop ring test method showed good agreement with the results of hydro-burst test with full scale composite pressure vessels.

초 록

섬유 방향 강성과 강도는 복합재 압력 용기의 성능과 밀접한 관계를 갖기 때문에, 압력 용기 구조 설계시에 다른 물성들보다 중요 설계 인자가 된다. 즉 복합재 압력 용기의 내압 변형 및 파열 압력은 섬유 물성에 의해 큰 영향을 받는다. 그러므로 정확한 섬유 방향 물성을 측정할 수 있는 기법을 확립하는 것이 복합재 압력 용기 설계 전에 우선되어야 한다. 그러나 복합재 압력용기의 섬유 방향 물성은 제작 공정 변수(와인딩 장비, 작업자, 작업환경 등)와 크기 효과에 의해 큰 영향을 받으므로 기존의 시편 시험 방법으로는 정확한 섬유 방향 물성 측정이 어렵다. 섬유 물성을 측정하는 가장 이상적인 시험 방법은 실물 압력용기 파괴시험이지만 많은 비용이 소요되어, 제품으로부터 다량의 링 시편을 채취, 내압 시험을 할 수 있는 Hoop ring 시험 방법이 제시되었다. Hoop ring 시험과 실물 압력용기의 수압 파괴 시험으로부터 구한 섬유 방향 물성들은 근접된 좋은 일치를 나타내었다.

Key Words : 복합재압력용기(composite pressure vessel),돔 형상(dome shape),성능(performance), 응력해석(stress analysis)

1. 서 론

섬유 방향 물성은 필라멘트 와인딩(Filament winding) 공법으로 제작되는 복합재 압력용기(Composite motor case)의

* 국방과학연구소 기술연구본부 추진기관부
*+ 국방과학연구소 기술연구본부 추진기관부 교신저자(E-mail:cais99@hanmail.net)

중요 설계 인자로서, 압력용기의 구조 변형 및 파열 압력에 가장 큰 영향을 미친다[1]. 그러므로 고 성능 복합재 압력용기 개발을 위해서는 정확한 섬유 방향 물성 측정이 전제되어야한다. 이러한 섬유 물성 측정을 위한 여러 가지 방법 중 대표적인 것이 Fig. 1과 같은 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 평판 맨드렐에 섬유를 와인딩하여 시편을 제작함으로써, 섬유 퍼짐성 불 균일로 인한 잔류 응력 존재로 성형 후 시편에 굴곡 현상이 발생하고, 시편 가공으로 인한 섬유의 끊어짐 으로 실제보다 낮은 섬유 강도가 측정되는 문제점이 존재한다. Split disk방법은 시편이 원통 맨드렐을 이용함으로써 균일 섬유 퍼짐으로 제작되지만, 시험 중 시편 내면에 내압 하중과 같은 균일 하중이 적용되지 못하는 문제점으로 섬유 방향 강도가 비교적 낮게 평가된다[2-3]. 직경 146.0(mm)인 시험용 압력 용기 시험은 비교적 정확한 섬유 방향 물성 측정이 가능하지만 실 구조물과 다른 치수 및 적층 두께로 인한 섬유 물성의 변화를 규명할 수 없는 문제점이 있다. 즉 섬유 방향 강도는 제작 공정 변수(와인딩 장비, 작업자, 작업환경 등)와 크기 효과(Size effect)에 의해 비교적 큰 영향을 받으므로 작은 크기의 압력용기 시험을 통해 구한 섬유 강도와 실제 제품의 섬유 강도 간에는 차이가 발생할 가능성이 있다[3]. 또한 물성의 분포화 처리를 위해서는 많은 수량의 시험이 수행되어야 하므로 압력 용기를 이용한 시험 방법은 큰 비용이 소모된다는 문제점도 존재한다.

(a) (b) (c)

Fig. 1 Test methods for fiber material properties; (a) ASTM D3039, (b) ASTM D2290, (c)ASTM D2585.

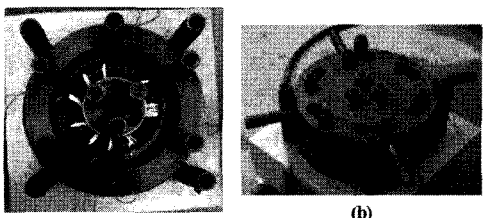
이러한 이유로 정확한 섬유 물성을 측정하는 가장 효과적인 방법은 실물 압력용기의 수압 파괴시험이지만, 원하는 분포함수를 만들기 위해서는 많은 비용이 소요되어 현실적으로 불가능한 방법이다. 그러므로 많은 시험이 가능한 시편 시험과 정확한 섬유 물성 측정이 가능한 제품 시험의 장점들을 고려한 Hoop ring 시험 방법이 제안되었다. 본 시험은 실물 압력 용기로부터 링 시편을 채취하여 제품과 동일하게 내압 하중으로 파괴를 유도함으로써, 적은 비용으로 다량의 시험이 가능하고 실물 압력 용기를 이용함으로써 정확한 섬유 물성 측정이 가능하다는 장점이 있다. 본 시험 방법으로부터 구한 섬유 강도의 정확성을 입증하기 위해, 실물 압력 용기 시험과 기존의 ASTM 시험 결과와의 통계적 비교/분석을 수행하였다.

2. Hoop ring test

2.1 시험장치

링 시편에 실물 압력용기와 동일한 내압 하중을 적용하기 위해 Fig. 2와 같은 Hoop ring 시험 치구가 설계/제작되었다. 실물 압력용기 직경에 맞추어 치구를 제작하고 링 시편을 제품으로부터 가공 채취하여 치구에 조립한 후, 내부의 고무 튜브에 수압을 적용하여 내압 파괴 시험을 수행하였다.

그림에서 보듯이 고무 튜브는 링 시편의 반경 방향으로만 변형이 허용되어 링 시편에는 순수 원주 방향 인장 하중이 적용된다. 치구와 링 시편 간에는 일정 간극(0.1mm)을 고려하여 내압 변형 시 링 시편이 반경 방향으로 자유롭게 변형되도록 하였다. Fig. 3은 Hoop ring 시험의 균일 내압 하중 적용과 그에 따른 시편의 균일 변형을 정량적으로 확인하기 위해 시험 중 계측한 압력별 변형률 분포를 나타내고 있다. 시편의 균일 변형률 확인은 원주 방향으로는 90도 간격으로, 시편의 높이(50.0mm) 방향으로는 각 3개씩 스트레인 게이지를 부착하여 총 12지점의 압력별 변형률을 계측/비교하였다. 그림에서 보듯이 약간의 변형 기울기 차이는 발생하지만 모든 지점의 변형률이 일정 범위 이내에 수렴된 비교적 균일한 변형률 분포를 나타내고 있다.



(a) (b)

Fig. 2 Hoop ring test fixture; (a) Top view, (b) Side view with top cover.

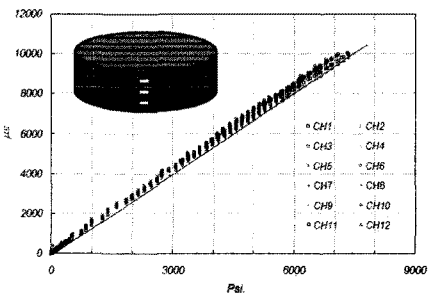


Fig. 3 Pressure versus hoop strain during hoop ring test.

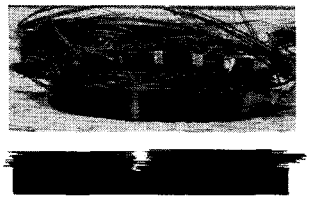


Fig. 4 Failure mode of existing hoop ring.

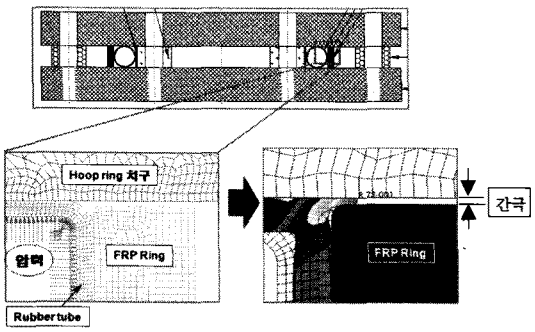


Fig. 5 Finite element analysis for hoop ring test.

2.2 시편 형상

본 논문에 적용된 Hoop ring 시편은 T700/Epoxy (Epon826/MPDA/KH100) 소재로 와인딩된 ϕ500.0(mm), L1500.0(mm) 튜브로부터 선반에서 50.0mm의 폭으로 기계 가공을 통해 제작되었다. 가공 면의 노치는 #1000의 사포 연마로 제거되었다. 이때의 적층은 [(±20)$_2$/90$_2$/ (±20)/90$_6$]으로 구성되며 총 적층 두께는 3.1mm이다. 이때 폭 50.0mm는 시편 가공 모서리 효과를 최소화할 수 있는 크기로 결정되었으나, 이 값은 시편 직경과 두께의 함수로 조정되어야 할 것으로 생각된다. 이와 같이 제작된 시편의 Hoop ring 시험 시 Fig. 4와 같이 낮은 압력에서 링 시편 일부만 파괴되는 현상이 발생되었다. 이때의 섬유 파손 변형률 값도 예상보다 낮으면서, 큰 변동성이 나타났다. 이러한 이상 파괴 현상을 규명하기위해 유한요소응력 해석을 수행한 결과, 링 시편의 가공 오차와 볼 균일 치구 조립으로 인해 발생한 링 시편과 치구 간의 불 균일 간극이 원인인 것으로 나타났다. 유한요소응력 해석은 시편과 치구간의 간극을 변수로 수행되었다. 시편과 치구간의 간극을 기준 값인 0.1mm에서 0.2mm로 증가시킨 경우, Fig. 5와같이 고무 튜브가 간극 사이로 밀려나와 링 시편의 끝단 지점이 응력 집중을 받게되어 최대 변형 지점이 된다. 이러한 응력 집중과 시편 가공으로 인한 섬유 끊어짐이 중첩되는 시편 모서리 지점은 낮은 압력에서 Fig. 4와 같이 파괴가 발생된 것으로 판단된다.

이러한 문제점 해결을 위한 방법으로 구조적으로 가장 취약한 시편 모서리 지점을 보강하는 방법이 제안되었고, 설계 변수 응력 해석을 통해 보강 층의 재질과 두께 및 폭이 결정되었다. 해석 변수는 모두 3가지로, 보강재 재질과 폭은 Glass와

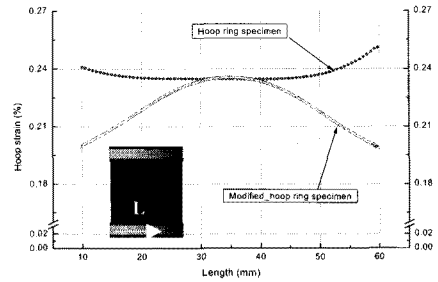
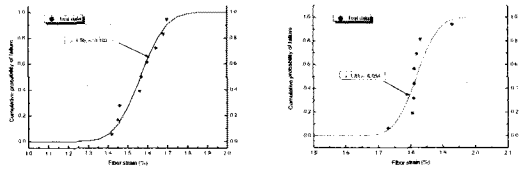


Fig. 6 Circumferential strain distribution along the width of hoop ring for existing and reinforced hoop ring.

Fig. 7 Failure mode of reinforced hoop ring.



(a) (b)

Fig. 8 Fiber failure strain versus cumulative probability of failure curve; (a) Existing hoop ring, (b) Reinforced hoop ring.

10.0(mm)로 고정한 후, 보강재 두께를 모재 두께의 1.0/0.5/0.2배로 적용하였다. 해석 결과 보강재 두께가 모재의 0.5배인 경우가, 보강 지점의 응력 집중도 크지 않고, 시편의 게이지 부에서 최대 변형 분포가 발생되어 Hoop ring 시편의 보강 방법으로 적용되었다. 보강된 링 시편은, 시편 끝단의 강성 증가로 고무 튜브의 밀림이 없고, 시편 모서리 가공부의 강도 저하도 보완되어 Fig. 6과 같이 시편 중앙에서 최대 변형이 발생하였다. Fig. 6은 링 시편의 보강 설계 전, 후의 원주 방향 변형률 분포를 비교한 해석 결과로서, Glass층을 보강한 경우에 시편 중앙의 원주 방향 변형률이 모서리 지점에 비해 약 15% 크게 나타나는데 비해, 보강하지 않은 경우는 반대로 시편 모서리 지점이 시편 중앙보다 약 10% 큰 변형을 나타내고 있다.

이와 같이 국부 보강된 링 시편의 Hoop ring시험을 수행한 결과, Fig. 7과 같이 시편 중앙에서 내압 파괴를 유도할 수 있었다. Fig. 8에 Hoop ring 시편 보강 전, 후로부터 구한 섬유 파손 변형률 결과를 누적 파괴 확률 분포로 비교하였다. 이들 시험 값들은 MIL-HDBK-17E의 분포적합도 검사를 통해 정규분포와 와이블 분포에 적합함이 확인되어, Table 1에 종합 정리하였다. Table 1에서 N은 시험된 시편 개수이고,

μ 는 평균 값, υ 는 변동율(coefficient of variation), α 는 와이블 함수의 형상(shape) 파라미터, β 는 척도(scale) 파라미터를 나타낸다. 보강된 시편은 기존 시편에 비해 평균값이 약 16% 증가하였고, 변동율은 절반으로 줄어드는 매우 안정된 결과를 나타내었다.

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

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

3. 결과 분석

Hoop ring 시험 결과의 타당성 입증을 위해 기존 시험 방법인 한 방향 복합재 인장 시험과 Split disk 그리고 Φ 500.0(mm) 압력용기의 수압시험 결과가 상호 비교 되었다. 모든 시료는 동일 소재, 동일 와인딩 장비로 제작되었고, 각 시험 방법으로부터 구한 섬유 파손 변형률 분포를 비교하였다. 이때 Hoop ring 시험은 보강 후 시험 값이고, Φ 500.0(mm) 압력용기는 실 제품으로 Fig. 9와 같이 원통부 파괴로 설계되어, 수압파괴 시험을 통해 섬유 파괴 변형률을 계측하였다. 각 시험 방법으로부터 구한 시험 값들은 Fig. 10과 같이 MIL-HDBK-17E에 따라 같은 뱃치 여부 검사와 분포함수 적합도 검사를 거치게 된다. 이때 모든 시험 결과는 정규 분포에 적합하였고, Fig. 11에 확률 밀도 함수와 누적 분포 함수로 비교하였다. 이와 같은 정규 분포를 Table 2에 종합 정리하였다. 참고로 기준이 되는 압력용기 시험은 비용문제로 4조만 시험이 수행되었고, 표에서 UD. Laminar는 ASTM D 3039인 한 방향 인장 시편을 의미한다. 표에서 보듯이 평균값 기준으로 실물 압력용기에 가장 근접한 것은 Hoop ring 시험인 것을 알 수 있다. 반면에 UD laminar 시험이나 Split disk 방법은 실물 압력용기 시험에 비해 낮은 섬유 파손 변형률 분포와 큰 변동성을 보였다. 이들 각 시험 값들 간의 통계적 연관성을 확인하기위해 실 제품인 Φ 500.0(mm) 압력용기 시험 결과를 기준 값으로 하여 각각의 시험 결과들과 ANOVA test를 수행하였다. ANOVA test는 각 시험 집단의 모 평균 값들이 서로 같다는 귀무가설로부터 출발하는데, 각 시험 값 집단은 정규 분포이고 모 분산은 동일하다는 가정이 적용된다. 일반적으로 복합재 구조물의 설계 물성 값은 B-base 기준 값을 이용하므로 95%신뢰도(유의수준 5%)로 F기준 값을 결정하였다. Table 3은 각 시험 방법으로 구한 섬유 파손 변형률의 ANOVA test결과로, 4가지 시험 결과간의 평균값이 같다는 가설은 5% 유의 수준에서 기각되고, UD. lamina와 Split disk 방법은 5% 유의 수준에서 압력용기 시험 결과와 모 평균이 같다는 가정이 기각되었다. 즉 UD. lamina와 Split disk 방법 시험법으로 계측한 섬유 방향 강도를 압력 용기 시험 설계 값으로 이용하려면, 5%이상의 오차를 감수해야 한다는 의미가 된다. 그러나 Hoop ring 시험 결과는 압력용기 시험 결과와 5% 유의 수준이내에서 모 평균값이 같다는 결과를 나타내었다. 즉 Hoop ring 시험 방법으로 실물 압력용기의 섬유 방향 강도를 예측할 수 있음을 의미한다.

Fig. 9 Typical cylinder Failure mode from hydro-burst test with Φ 500.0(mm) vessel.

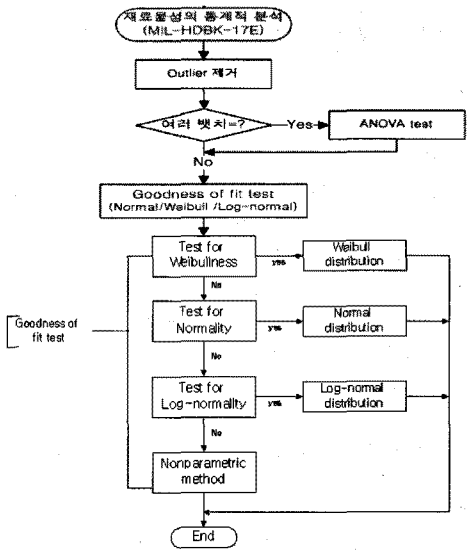
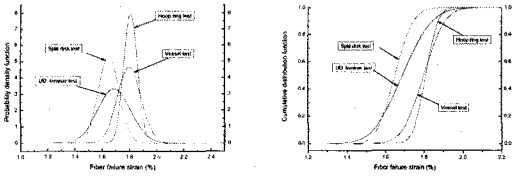


Fig. 10 Schematic flow chart for allowable material properties.



(a) (b)

Fig. 11 Fiber failure strain distribution for each test method; (a) Probability density function, (b) Cumulative distribution function.

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

Test	Method	μ (%)	σ	υ (%)	N
1	UD. Laminar	1.66	0.11	6.6	21
2	Split disk	1.65	0.075	4.5	5
3	Hoop ring	1.81	0.05	2.8	8
4	Φ500 용기	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	10.10	0.105	2.84	기각
Test 4-1	4.85	0.048	4.27	기각
Test 4-2	5.398	0.04	4.844	기각
Test 4-3	0.047	0.8327	4.965	채택

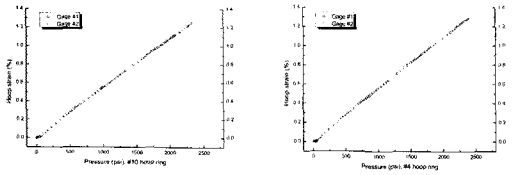


Fig. 12 Typical pressure versus hoop strain curve from hoop ring test.

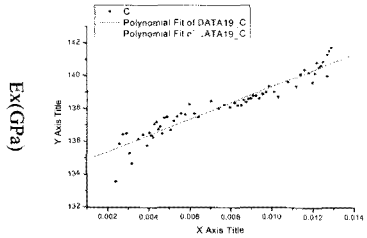


Fig. 13 Typical fiber strain versus fiber stiffness from hoop ring. test.

Table 4 Measured hoop stiffness from hoop ring test

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

Fig. 12는 Hoop ring 시험의 전형적인 압력별 원주 방향 변형률 분포로서, 압력 증가에 따라 약간의 강성증가 현상이 나타난다. 이러한 현상은 내압에 의한 링 시편의 팽창과 그에 따라 왜곡되었던 섬유가 재 정렬됨으로써 발생되는 현상으로 보고되고 있다[5]. 이러한 강성 증가 현상은 일반 시편 시험에서는 확인될 수 없는 것으로, 섬유 방향 강성의 비 선형성을 압력용기 구조 해석에 적용함으로써 보다 정확한 내압 변형 예측이 가능하다[5-6]. 이러한 비선형 변형을 2차 선도로 근사하여 변형률별 섬유 방향 강성을 계산하면 Fig. 13 및 Table 4와 같다. 8조 hoop ring시험 결과로부터 구한 시험 초기와 파괴 때의 섬유 방향의 강성은 각각 2%이내의 양호한 변동성을 보이며, 최대 5%정도의 크기 차이를 나타내었다. 이와 같이 예측한 섬유 방향 강성은 섬유부피 함유율 60%의 Rule of mixture로 예측한 섬유 방향 강성인 138.0(GPa)에 근사한 결과이다.

추가하여 본 시험에 적용한 소재 및 제작 공정으로 인한 섬유 강도의 크기 효과를 정량적으로 확인하기 위해 Φ 157.0(mm)의 Hoop ring 시험이 수행되었다. 이때 소재와 제작 공정 변수는 이전과 동일하고, 단지 시험 치구만 Φ 157.0(mm)에 맞추어 제작/적용되었다. Fig. 14와 같이 6조 시편 모두 게이지 부에서 균일한 파괴가 발생되었다. Table 5는 Φ157.0(mm) Hoop ring 시험 결과로부터 구한 섬유 방향 파손 변형률 값으로 변동율이 3.7%인 안정된 결과를 나타내었다. Table 6은 Φ500.0(mm) hoop ring 시험 기준으로 수행된 ANOVA test 결과로 5% 유의 수준 내에서 동일 모평균을 갖는 것으로 평가되었다. 그러므로 직경 157mm와 500mm사이에서는 5% 유의 수준에서 섬유 강도의 크기 효과는 없는 것으로 판단된다.

Fig. 14 Failure mode of Φ157.0(mm) hoop ring.

Table 5 Fiber failure strain distribution from Φ157.0mm hoop ring test

	μ (%)	σ	υ (%)	N
Φ157 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
Φ157- Φ500	0.221	0.64	4.74	채택

4. 결 론

필라멘트 와인딩으로 제작되는 복합재 압력용기의 정확한

섬유 방향 물성 측정을 위해 제품으로부터 링 시편을 채취하여 내압 시험하는 hoop ring 시험 방법이 제안되었다. 제품과 동일한 내압 파괴 유도를 위한 균일 내압 하중적용 설계와 시편 게이지부의 파괴를 위한 시편 형상 설계가 수행되었다. 또한 실물 압력 용기로부터 많은 수량의 시편 채취가 가능함으로써 저렴한 비용으로 섬유 방향 물성 분포 획득이 가능하였다. 실구조물의 파괴 시험 결과를 기준 값으로, 다른 ASTM 시험 결과와의 ANOVA test를 통해 Hoop ring 시험 방법의 타당성을 입증하였고, Hoop ring 시편 크기별로 시험을 수행하여 섬유 강도의 크기효과(Size effect)를 검증하였다.

참고문헌

1) Hwang, T.K., Hong, C.S. and Kim, C.G., "Probabilistic Deformation and Strength Prediction dor a Filament Wound Pressure Vessel," *Composite Part B*, Vol. 34, 2003, pp. 481-497.
2) 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, pp. 1080-1087.
3) Yoon, S.H., Kim, C.G., Cho, W.M., "Measurement of Tensile Properties Using Filament Wound Ring Specimens," *J. of Reinforced Plastic Composite,* Vol. 16, 1997, pp. 810-824.
4) Munjal, K., "Use of Fiber Reinforced Composites in Rocket Motor Industry," *SAMPE Quarterly*, January, 1986, pp. 1-11.
5) David, C., "Application of Material Non-linearity to a Composite Pressure Vessel Design," *AIAA90-1002-CP,* pp. 491-499.
6) Jenson, B., Trask, B. and Johnson, A., "Determining Laminate Strains from Nonlinear Laminar Moduli," *AIAA 90-1971,* pp. 1-6.