

# 연료전지 차량용 TYPE3 복합재 압력용기 개발

박지상\*\*\*, 정상수, 정재한, 조성민, 김태욱

## Development of Type3 Composite Cylinder for Fuel Cell Vehicle

Jisang Park\*\*\*, Sangsu Cheung, Jaehan Chung, Sungmin Cho and Tae-Wook Kim

### Abstract

The objective of this study is to develop and validate a compressed hydrogen storage system for fuel cell vehicles. The type3 composite cylinder consists of full wrapped composites on a seamless aluminum liner. The key technologies, including design, analysis, and optimized fabrication process for 350bar composite cylinder, were established and verified, and the facilities for fabrication and validation testing have been constructed. Prototype cylinders were fabricated and validated through burst test and ambient cycling test in accordance with international standard.

### Key words

Composite cylinder(복합재 실린더), Type3(타입3), Filament Winding(필라멘트와인딩), Fuel cell vehicle(연료전지차량)

(접수일 2008. 8. 27, 수정일 2008. 9. 8, 게재확정일 2008. 9. 11)

\*\*\* 한국기계연구원 부설 재료연구소

E-mail : jspark@kims.re.kr

Tel : (055)280-3316

Fax : (055)280-3498

## 1. 서론

카본, 케블라, 유리섬유 등의 보강섬유와 에폭시 등의 수지를 사용하여 만들어지는 복합재료는 우수한 비강도, 비강성도, 그리고 내피로 특성 등으로 경량화와 고강성, 고강도가 요구되는 고급 구조물에 광범위하게 사용되고 있다.<sup>(1)</sup>

수소연료전지차량의 탑재용 고압기체 저장 수단으로 복합재 압력용기는 경량성, 안전성 등에서 매우 이상적인 특성을 가진다. 복합재 압력용기는 축대칭(axisymmetry)구조물로서 복합재료 제조 공법으로는 필라멘트 와인딩 성형법이 적용된다. 필라멘트 와인딩 성형법으로 제작되는 복합재료 압력용기는 재래식 금속재 압력용기에 비해 40~60% 정도의 중

량으로 설계/제작이 가능하고, 뛰어난 내식성과 내피로 특성을 가진다. 또한 파손 시 금속재 압력용기가 폭발형태의 급격한 파열이 발생하는 반면, 복합재료 압력용기는 급격한 파열 이전에 내부 유체가 먼저 누출 되어 내부 압력을 경감시키는 폭발전압력누출(leakage before burst) 특성을 가지므로 구조적으로 안전성이 우수한 특성을 갖는다.<sup>(2)</sup>

복합재 압력용기는 그 구조적 특성상 이음매 없는 라이너(seamless liner)의 제조상의 어려움과 설계, 해석 그리고 최적의 필라멘트 와인딩을 구현해야하는 어려움이 있다. 특히 돔 부위의 곡률과 와인딩 각도가 연속적으로 변화하기 때문에 유한요소해석을 위한 모델링에 많은 시간과 노력이 소요된다. 또한 최적의 필라멘트 와인딩 형태를 찾기 위한 부단한

노력이 필요한 현실이다.

본 연구에서는 350 bar, 74L급 수소저장용 복합재 압력용기의 국산화 개발을 위해, 이음매 없는 라이너 개발, 필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 설계, 해석 및 필라멘트 와인딩 성형기술, 시험평가 기술을 개발, 검증하여 수소연료전지 차량용 복합재 압력용기의 실용화 기반을 구축한다.

## 2. 수소 저장용기의 설계 및 해석

연료전지 차량용 350 bar, 74L급 수소저장용 복합재 압력용기는 Al6061-T6 소재의 알루미늄 라이너에 탄소섬유/에폭시 복합재를 헬리컬 및 홉 와인딩으로 번갈아 감은 구조를 가지고 있다. 여기서 라이너는 와인딩을 위한 형상 제공 및 기밀유지라는 중요한 기능을 담당하며 구조적 안전성을 위해 이음매 없는 구조를 가진다. Fig. 1은 용기의 단면 형상과 치수를 나타낸 것으로, 용기의 외경은 369mm, 길이는 894mm이다.

본 연구에서는 국산 라이너 시제품이 개발될 때까지 수입 라이너를 이용한 복합재 설계 타당성 평가를 수행하고 있다.

탄소섬유는 고성능 타입을 직접 사용한 모델과 이와 동일한 성능을 구현하기 위해 범용 탄소섬유를 보강하여 제작된 모델로 나누어 설계 및 제작을 수행하였다.

알루미늄 라이너를 비롯한 수지와 섬유의 기계적 특성을 확보하기 위해 만능시험기와 extensometer를 이용하여 기계적 특성시험을 하였다. 알루미늄은 AL6061, 수지는 에폭시, 보강섬유는 탄소섬유이다. 각 원재료 물성들의 기계적 특성은 요구되어지는 ANSI/NGV2-2000의 규격에 따라 아래의 Table 1에 나타내었다.<sup>(3,4)</sup>

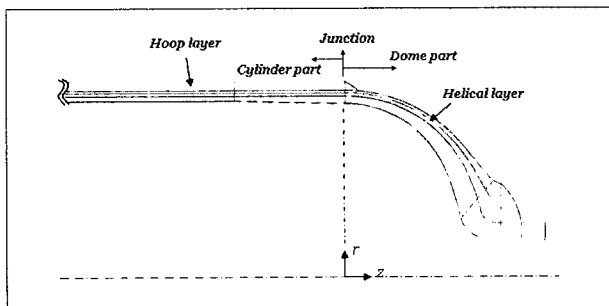


Fig. 1 용기의 단면 형상

## 2.1 라이너 형상 설계 및 필라멘트 와인딩 패턴 설계

필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 설계에 있어서 성능에 큰 영향을 미치는 것은 라이너의 형상과 탄소 섬유 와인딩 패턴이다.

Fig. 2는 라이너 형상 및 와인딩 패턴 생성 전용코드의 user interface화면과 라이너 형상에 따른 와인딩 경로를 나타낸 것이다. 라이너의 형상은 내압구조로서 최적의 형상을 유지해야하면서 필라멘트 와인딩에 적합해야 한다. 와인딩 시 최적의 성능을 발휘하기 위해 등장력 돔 이론을 이용하여 돔 좌표를 생성하였으며, 확관공정(Ironing), 최종제품 치수, 피로특성 및 자진처리압을 고려하여 벽두께를 산출하였다.<sup>(5)</sup>

등장력 돔 이론에서 용기 돔 부분의 헬리컬 층의 각도  $\alpha$  는 돔 자오선과 이루는 각으로 정의되며, 돔 표면상의 최단 경로를 지난다는 가정으로부터 다음 식으로 표현된다.

$$\gamma \sin \alpha = \text{const} \quad (1)$$

$\gamma$ 은 압력용기 중심 축 z에서 돔 표면까지의 거리이다.

돔 부분에서 헬리컬 층의 두께는 z 축에 수직인 임의의 단면을 지나는 섬유의 양이 동일하다는 조건으로부터 다음 식 2와 같이 유도된다.

$$t = \frac{r_c \cos \alpha_c}{r \cos \alpha} \times t_c \quad (2)$$

Table 1. 원소재의 기계적 특성

원재료	물성값	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	전단강도 (MPa)	비고
라이너		311	358	14.5	-	Pass
카본섬유		-	4136	-	-	Pass
수지		-	-	-	41,26	Pass

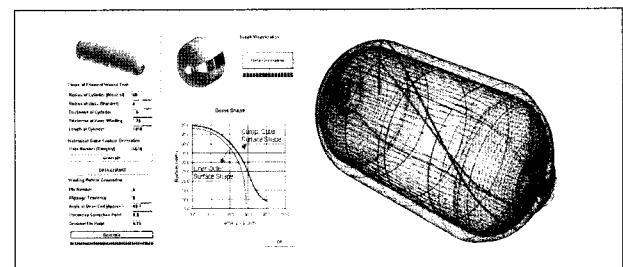


Fig. 2 필라멘트 와인딩을 고려한 돔 contour 생성

여기서  $r_c$ ,  $\alpha_c$ ,  $t_c$ 는 각각 실린더 부분의 반경, 와인딩 각도와 헬리컬 층의 두께이다.

시제품의 필라멘트 와인딩 패턴은 10도~25도 사이의 각도에서 변화하는 헬리컬 와인딩과 90도의 홑 와인딩 패턴을 번갈아 감는 형태이다. 여기서 와인딩 각도 및 두께는 실린더 부에서 돔으로 진입하는 지점의 헬리컬 층의 각도를 의미한다.

## 2.2 복합재 압력용기 유한요소 해석

필라멘트 와인딩 복합재 압력용기는 등방성 특성을 가지는 메탈 라이너에 이방성 특성을 가지는 탄소섬유/에폭시 복합재가 일정한 패턴으로 와인딩 된 구조를 가지므로 단순한 설계 및 해석으로는 정확한 응력 및 변형 거동을 예측하기가 어렵다.

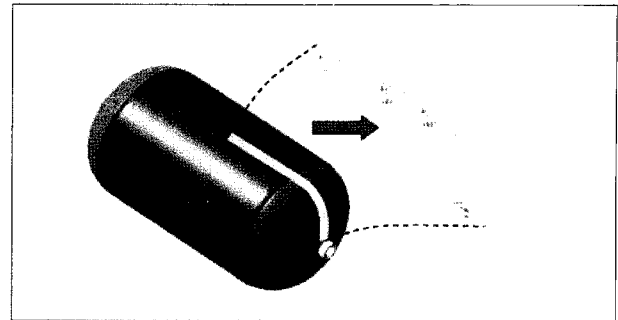
본 연구에서는 두꺼운 복합재 및 알루미늄 라이너의 응력 거동을 예측하기 위하여 재료 및 기학적 비선형성을 고려한 설계기법을 구축하였다. 특히 돔 부위는 헬리컬의 각도가 연속적으로 변하며 감기므로 기존의 고정된 각도로만 설계하는 기법으로는 모델링의 정확성이 저하된다.

따라서 돔 부위의 정확한 거동 예측 및 응력 분포 확인을 위해 연속적으로 변하는 헬리컬 각도까지 고려하여 해석할 수 있는 기법을 개발했다. 또한 이를 와인딩 패턴설계에 적용하여 반복 충전 시 발생하는 돔 부위 경계점(knuckle부)에서의 굽힘 변형 등의 과도한 변형 발생을 최소한으로 억제하여 피로특성을 증대시켰다.

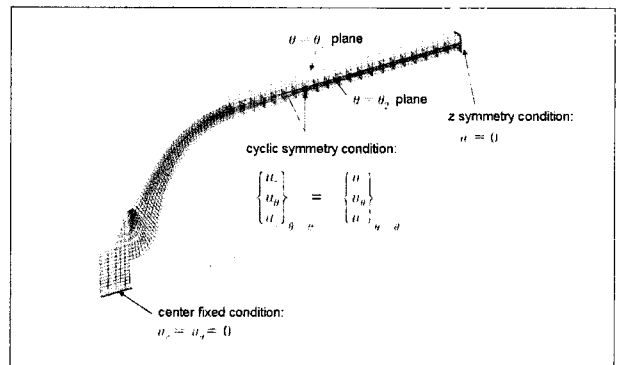
필라멘트 와인딩 복합재 압력용기는 헬리컬 층의 존재로 인해 주기적 축대칭 특성을 가진다. 따라서 이러한 특성을 고려해서 유한요소 모델링에서는 Fig. 3과 같이 전체 모델의 일부 중심각만을 모델링하고 원주방향으로 주기적인 대칭 조건(cyclic symmetry)을 부가하였다.

유한요소 해석에서는 전처리와 후처리로 상용프로그램인 PATRAN을, solver로 ABAQUS가 사용되었으며, 모델링에 사용된 요소는 직교이방성 강성을 가지는 20절점의 3차원 고체요소를 사용하였고, 재료 및 기하학적 비선형 해석을 통하여 가압 경로별 용기의 응력거동을 파악하기 위해 Fig. 4와 같이 각 하중 부과 단계별로 해석을 수행하였다.

위의 여러 해석, 설계요소를 적용하여 탄소섬유 소재, 라이너 형상 등의 설계변수가 용기의 구조 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해 다양한 상세 구조해석을 수행하였으며, 설



(a) 주기적 대칭조건을 이용한 full-modeling 기법



(b) 변위 경계 조건

Fig. 3 복합재 압력용기의 유한요소모델링

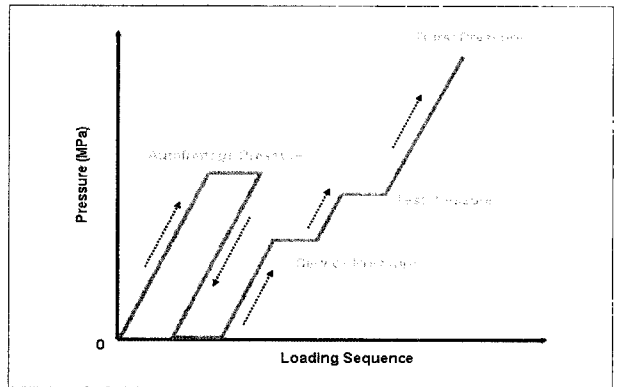


Fig. 4 유한요소해석 단계

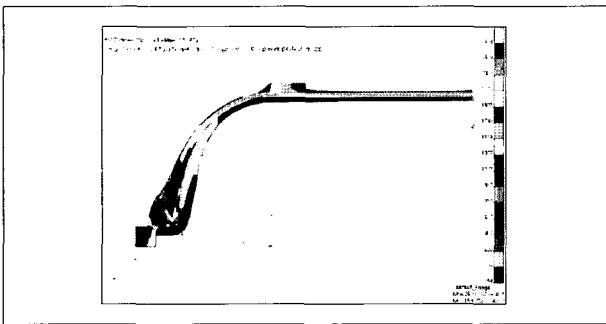
계변수의 변화에 따른 용기의 구조적 거동 고찰을 통해 다음과 같은 결과를 산출하였다.<sup>(5)</sup>

해석결과를 살펴보면, 먼저 각 하중단계별로 복합재 층과 라이너에 유도되는 응력분포와 용기의 위치별 변형변위를 수준을 파악할 수 있었다(Fig. 5).

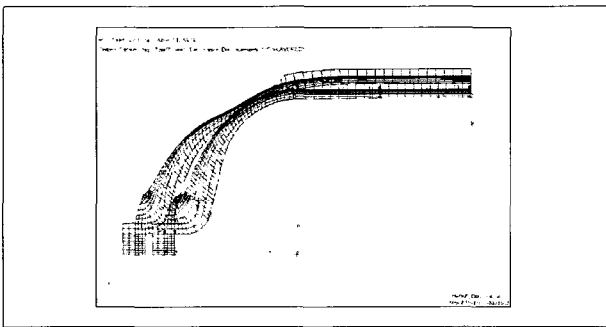
Fig. 6은 복합재 후프 층과 헬리컬 층의 응력분포를 나타낸 것이다. 복합재 후프 층과 헬리컬 층에 발생하는 응력비가

최적화 되어 있으며, 이는 구조 및 중량의 최적화임을 의미한다. 또한 상대적으로 실린더 몸통부의 후프 층의 발생응력이 최대로 파손 부위 및 파손 모드를 바람직한 방향으로 유도하고 있음을 알 수 있다.

Table 2는 응력분포 및 변형변위 해석결과를 나타낸 것이다. 최고 충전압에서 용기의 최대응력은 819MPa로, 이는 섬유파열강도 대비 30%이하의 수준으로 요구 규격 ANSI/NGV2-2000



(a) 응력 분포



(b) 변형 변위

Fig. 5 용기 응력분포 및 변형 형상

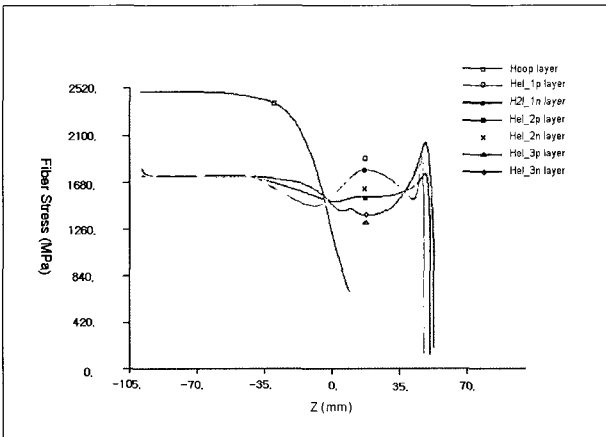


Fig. 6 파열압에서의 복합재 응력 분포

의 규정, 사용압의 2.25배 이상을 만족시킨다. 이외 사용압에서 용기의 원주방향의 팽창량도 최소요구변위를 만족함을 알 수 있다.

### 3. 이음매 없는(Seamless) 알루미늄 라이너 제조 및 건전성 평가

알루미늄 라이너 성능을 결정하는 벽두께 구현을 위한 주요 공정으로서 아래 Fig. 7과 같이 확관 Tool 설계기법 구축하였다.

또한, 전용 Spinning 기계 구축으로 양쪽 Boss 및 Dome 을 성형하였고 T6 열처리에 의한 라이너를 제조하였다.

위와 같이 제조되어진 라이너의 건전성 평가요소로서 치

Table 2. 응력분포 및 변형변위 해석결과

응력(Stress)				
최고 충전압		설계 파열압		
Max. 819 MPa; 섬유파열강도 대비 27% 수준		Max. 2466 MPa; 1000bar 파열 예상		
변형 변위(Displacement)				
방향	요구기준	사용압	최고 충전압	설계파열압
길이 방향	-	1,25mm	2,17mm	5,45mm
원주 방향	1mm 이하	0,62mm	0,94mm	2,84mm

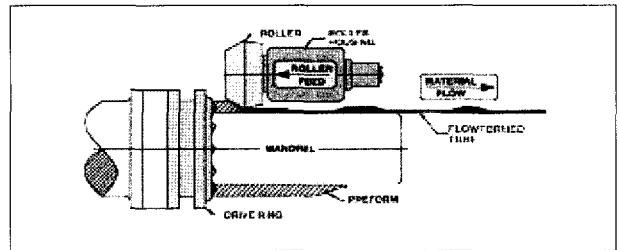
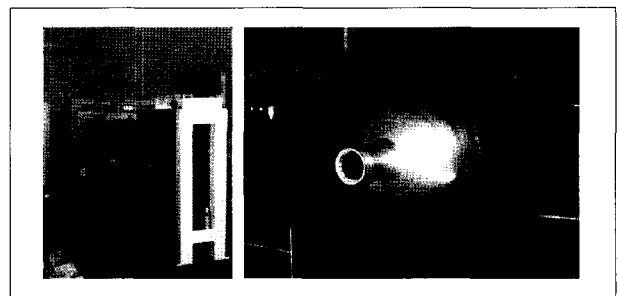
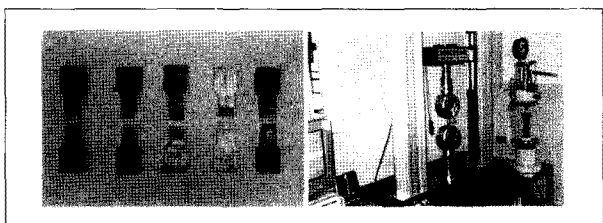


Fig. 7 확관 공정 개략도



Picture 1 전용 Spinning 기계



Picture 2 Seamless Tube의 기계적 물성평가

수, 벽두께 및 Dome contour의 정확한 구현과 기계적 물성값을 평가하여 설계, 해석 시 적용하였다.<sup>(7)</sup>

#### 4. 복합재 압력용기의 시제작 및 성능 평가

유한요소해석법을 통한 구조설계 결과를 이용하여 시제품에 대한 무게 및 전체 크기를 CATIA 3D 모델로 예측하였으며, 공정해석으로 획득한 최적 와인딩 패턴을 예측하고 구현하였다. Fig. 8은 CATIA 모델링에 의한 시제품의 무게 및 부피를 예측한 화면이며 결과값은 아래 Table 3과 같다.

##### 4.1 복합재 압력용기 시제품 제작

공정해석을 통해 획득한 최적 와인딩 패턴 및 필라멘트 와인딩 장비를 사용하여 시제품을 제작하였다. 제작 완료된 알루미늄 라이너와 와인딩되는 탄소섬유간의 Galvanic 부식을

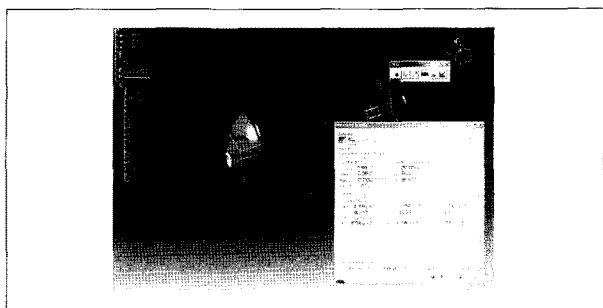


Fig. 8 3D CATIA 모델링에 의한 시제품 무게 및 부피 예측

Table 3. 복합재 압력용기 제작 사양

Water Capacity	74L
Outside Diameter	397mm
Total Weight	39,88kg
Overall Length	900mm

방지하기 위해 에폭시로 라이너 표면을 코팅하였다.

라이너의 돔 형상 및 헬리컬 층의 각도 제어를 위해 4축 필라멘트 와인딩 장비 축에 거치시키고, 와인딩 공정설계에 따라 필라멘트 와인딩을 실시하였다. Picture 3이 필라멘트 와인딩 제작 중인 용기 형상을 나타낸 것이며, Table 4는 제작 완료 된 시제품의 사양을 나타낸 것이다.

##### 4.2 복합재 압력용기 성능평가시험

개발 완료된 350bar급 74L 수소저장용 복합재 압력용기에 대해서 개정된 국제규격(Modified) NGV2-2000의 규정에 따라 성능평가 시험 완료하였다.<sup>(8,9)</sup> 성능평가 시험으로 파열시험과 반복시험을 수행하였으며, 시험장비는 Picture 4와 같다.

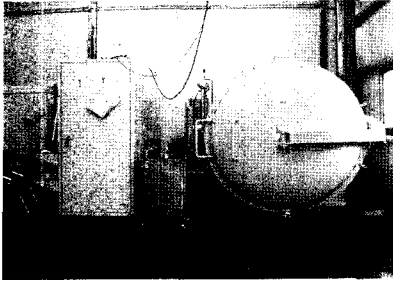
시험 방법 및 절차는 국제규격에 따르며 그 내용을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 파열시험은 규정된 최소 파열압까지 가압 후 60초간 유지한 후 동일한 가압속도로 파열될 때까지 승압하였다. 시험결과 약 1080bar에서 용기가 파열되었으며, 규격에서 요구되는 최소파열압(사용압의 2.25배)를 만족시킴을 확인하였다. 반복가압시험은 규정된 반복시험압 43.5MPa의 압력을 분당 10회 이하의 속도로 누수가 발생될 때까지 반복가압하여 시험을 수행하였다. 시험결과 21,000회 이상의 반



Picture 3 필라멘트 와인딩 공정

Table 4. 복합재 압력용기 제작 사양

Water Capacity	73,7L
Outside Diameter	396mm
Total Weight	38,84kg
Overall Length	899mm
External Volume	85,9L
H2 Capacity	1,7kg
Weight Efficiency	4,5wt%
Volumetric Efficiency	20kg/m <sup>3</sup>



Picture 4 파열, 반복 시험장비



(a) 파열 시험 후 시제품



(b) 반복 시험 후 시제품

Picture 5 시제작 반복, 파열 테스트

복합수를 보였으며, 규격에서 요구되는 최소반복횟수 11,250회를 만족시켰다.

종합적으로 파열 및 반복시험 모두 규격에서 요구되는 최소파열압력과 최소반복횟수를 만족하였으며, 파열모드 파약을 통해 설계/해석의 신뢰성을 검증 할 수 있었다. Picture 5는 파열시험과 반복가압시험 후의 용기 형상을 나타낸 것이다.

## 5. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 등장력 돔이론을 이용해 설계하였으며 3차원 비선형 FEM을 통해 각 부위의 응력분포 및 거동을 예측하였다. 따라서 복합재 압력용기가 수소 자동차에 적용될 수 있는 최적의 구조설계를 하였다.

둘째, 이음매 없는(Seamless) 알루미늄 라이너를 제조하기 위해 확관, 스피닝(Spinning) 기술을 개발하여 이론 설계값과 최대한 부합되도록 하였다.

셋째, 필라멘트 와인딩 공법으로 복합재 압력용기를 성형하였으며 특히, 설계해석으로 획득된 와인딩 패턴의 공정해석을 통해 실제 필라멘트 와인딩에 적용되도록 최적화 시켰다.

넷째, 제작된 시제품의 성능 타당성 검사(Design Qualification Test)를 위해 전용 파열, 반복 시험기법을 개발하였고 이러한 개발 장비를 이용하여 시제품에 대한 성능 평가를 하였다. 이를 통해 국제 규격에 만족함을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 신재생에너지기술개발사업의 일환(과제번호 2006-N-HY12-P-03)으로 수행되었습니다.

## References

- [1] 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱 공저, 1995, "최신 복합재료", p. 1, (주)교학사.
- [2] 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱 공저, 1995, "최신 복합재료", p. 6.
- [3] ASTM E8-01, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, p. 14.
- [4] Modified NGV-2000, 2006, Batch Test, p. 20, ANSI.
- [5] 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱 공저, 1995, "최신 복합재료", p. 134.
- [6] Modified NGV-2000, 2006, Service Condition, p. 6, ANSI.
- [7] ISO/DIS 15869-1, 2004, Batch tests, p. 9, ISO.
- [8] Modified NGV-2000, 2006, Design Qualification Tests, p. 25, ANSI.
- [9] Modified NGV-2000, 2006, Material Qualification Tests and Requirements, p. 10, ANSI.
- [10] D. V. Rosata and C. S. Grove, 1984, "Filament Winding : Its Development, Manufacture, Application, and Design",

INTERSCIENCE PUBLISHERS.

- [11] X. K. Sun, S. Y. Du and G. D. Wang, 1999, "Bursting Problem of Filament Wound Composite Pressure Vessels", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 76, pp. 55-59.
- [12] T. K. Kwang, S. K. Jung, Y. D. Doh, W. M. Cho and B. Jung, 2000, "The Performance Improvement of Filament Wound Composite Pressure Vessels", SAMPE 2000, May 21-25, pp. 1427-1438.
- [13] Engineering Materials Handbook - Composites, 1987,

- ASME International, Ohio, pp. 503-518.
- [14] S. Krolewski, 1989, "Economic Comparison of Advanced Composite Fabrication Technology", 34th International SAMPE Symposium, May 1989.
- [15] D. V. Rosata and C. S. Grove, 1984, "Filament Winding : Its Development, Manufacture, Application, Design", INTERSCIENCE PUBLISHERS.
- [16] M. Loisse, "Production Orieinted Design of Filament Wound Composites, 1990", K. U. Leuven, PhD Thesis, April, 1990.

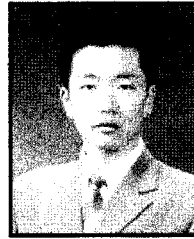
**박 지 상**



1989년 인하대학교 항공우주공학 공학사  
 1991년 KAIST 항공우주공학 구조해석/복합재료 공학석사  
 1995년 KAIST 항공우주공학 구조해석/복합재료 공학박사

현재 한국기계연구원 부설 재료연구소 책임연구원  
 (E-mail : jspark@kims.re.kr)

**정 상 수**



1997년 경상대학교 금속재료 공학사  
 2008년 경상대학교 기계항공공학 구조해석/복합재료 공학석사

현재 한국기계연구원 부설 재료연구소 연구원  
 (E-mail : css4592@kims.re.kr)

**김 태 욱**



1983년 서울대학교 공과대학 항공공학과 공학사  
 1985년 서울대학교 대학원 항공공학과 공학석사  
 1990년 한국기계연구원 복합재료실 선임연구원  
 2000년 한국과학기술원 항공우주공학과 공학박사  
 2002년 한국기계연구원 복합재료연구그룹 책임연구원  
 2003년 경상대학교 BK 사업 겸임교수

현재 (주)이노컴 부사장  
 (E-mail : twkim@inocom21.com)

**정 재 한**



1999년 건국대학교 항공우주공학 공학사  
 2001년 건국대학교 항공우주공학 공학석사

현재 (주)이노컴 연구개발팀 팀장  
 (E-mail : jhchung@inocom21.com)

**조 성 민**



2004년 경상대학교 항공기계공학부 공학사  
 2007년 경상대학교 기계설계 공학석사

현재 (주)이노컴 연구개발팀 연구원  
 (E-mail : cho225@inocom21.com)