

論文

필라멘트와인딩된 복합재 내열튜브의 구조 성능 평가

윤성호*, 황태경**, 윤남균**, 문순일**

Evaluation of Structural Performance for Filament Wound Composite Ablative Tubes

Sungho Yoon*, Taekyung Hwang**, Namgyun Yun**, Soonil Moon**

ABSTRACT

Composite ablative tubes required capabilities of ablative and structural characteristics were fabricated through filament winding technique and several experiments were conducted to evaluate the structural performance of composite ablative tubes. For this purpose, manufacturing procedures were briefly described and then resin digestion method was applied to measure the fiber volume fraction and the void content of composite ablative tubes. The configuration of tensile specimen for composite ablative tubes with not losing the continuity of reinforced fibers was suggested by evaluating mechanical properties of several types of the specimen with different widths. Also, suitable processing variables for composite ablative tubes were determined by evaluating mechanical properties of several types of the specimen with different processing variables. In addition, acoustic emission signals were obtained during the proof test and could be applicable to study the crack initiation and the damage mode of composite ablative tubes. Finally, the structural reliability of composite ablative tubes could be verified to satisfy design requirements through the proof and burst tests.

초 록

본 연구에서는 내열 특성과 구조적인 특성을 갖는 탄소섬유/페놀릭 복합재 내열튜브를 필라멘트와인딩 공법에 의해 제작하고 이들의 구조적인 성능을 평가하였다. 이를 위해 내열튜브의 제작방법을 소개하고 황산용해법을 적용하여 내열튜브에서의 섬유체적비와 기공함유율을 측정하였다. 시편폭을 달리한 인장시편의 기계적 특성을 평가함으로써 강화섬유의 연속성을 나타낼 수 있는 시편형상을 제시하였으며 공정변수를 달리한 내열튜브에서 채취된 인장시편의 기계적 특성을 평가함으로써 내열튜브의 제작을 위한 적절한 공정조건을 결정하였다. 그리고 보증시험을 통해 수집한 음향신호의 분석을 통해 내열튜브에서의 균열진전과 파손양상을 조사하였다. 마지막으로 내열튜브 자체에 대해 보증시험과 파열시험을 수행함으로써 내열튜브 자체의 구조적인 신뢰성을 확인하였다.

1. 서 론

기존의 로켓 모터 케이스용으로 적용되고 있는 내열튜브는 내열 특성이 비교적 우수한 실리카/페놀릭으로 되어 있다. 이와 같은 소재는 숯화가 되기 위해 높은 에너지를 필요하므로 추진제의 연소로 인한 고열을 자체적으로 흡수하여 모터 케이스로 전달되지 않도록 해 준다. 내열튜브는

롤링 공법으로 프리프레그를 적층하여 성형시킨 다음 외면을 가공하는 방법으로 주로 제작하고 있지만 이러한 경우 내열튜브의 강도와 파단변형율은 현저하게 감소되는 단점이 발생한다. 최근에는 성형이 완료된 후 외면을 가공하지 않는 무가공 롤링 공법, 섬유방향을 일정 각도로 경사지게 적층하여 성형시킨 후 외면을 가공하지 않는 무가공 바이어스 롤링 공법, 좁은 폭의 테이프를 적층하여 성형시키는

* 금오공과대학교 기계공학부, 교신저자 (E-mail:shyoon@knut.kumoh.ac.kr)

** 국방과학연구소 추진기관부

소폭 테이프 적층 공법 등을 적용하여 내열튜브가 갖는 단점을 해결하려는 노력이 행해졌다[1,2].

고성능 로켓 모터 케이스의 개발이 진행됨에 따라 점차 내열튜브 자체도 내열 특성 뿐 아니라 구조재로서의 기능을 갖도록 요구되고 있다. 이를 위해 복합재 모터 케이스, 복합재 발사관, 고성능 압력용기 등의 제작에 널리 성공적으로 적용되어 온 필라멘트와인딩 공법을 적용하여 내열튜브를 제작하려는 시도가 행해져 왔다. 이는 페놀릭 수지에 함침시킨 고강도의 탄소섬유를 원하는 형상으로 가공되어 있는 맨드릴 외면에 와인딩하고, 이를 경화시킨 다음 맨드릴에서 탈형시킴으로써 내열튜브를 얻는 방법이다[3]. 이 경우 고강도의 탄소섬유는 내열튜브에 작용된 높은 압력을 지탱하며, 내열 특성을 갖는 페놀릭 수지는 추진제의 연소시 발생하는 고온의 가스를 견디게 된다. 그러나 페놀릭 수지는 기존의 압력용기를 제작하기 위해 적용되는 에폭시와는 달리 휘발 성분이 많고 점도의 하강이 급격하여 성형 중 쉽게 이탈되기 때문에 균일하게 분포되는 페놀릭층을 얻기 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서는 필라멘트와인딩 공법으로 탄소섬유/페놀릭 복합재로 된 내열튜브를 제작하고 인장시험 및 공압시험을 통해 이들의 기계적 성능을 평가하였다. 이를 위해 내열튜브를 제작하는 방법을 간단히 기술하였으며 내열튜브에서의 섬유체적비와 기공함유율을 확산용해법으로 측정하였다. 또한 시편의 폭을 달리한 인장시편의 기계적 특성을 평가함으로써 강화섬유의 연속성을 나타낼 수 있는 시편형상을 제시하였다. 아울러 공정변수를 달리한 내열튜브에서 채취된 인장시편을 이용하여 기계적 특성을 평가함으로써 내열튜브를 제작하기 위한 적절한 공정조건을 결정하였으며, 제작된 내열튜브의 내압 성능은 공압시험을 통해 평가하였다. 마지막으로 음향신호검출장치를 이용하여 작용압력에 의한 내열튜브에서의 음향신호를 수집하고 이를 분석하였다.

2. 내열튜브의 제작

내열튜브는 원하는 형상으로 미리 가공되어 있는 맨드릴 위에 T700 탄소섬유 또는 T300 탄소섬유를 SC-1008 페놀릭 수지(Borden Packing and Industrial Products)에 함침시키면서 와인딩하는 습식 필라멘트와인딩 공법에 의해 제작하였다. 내열튜브를 제작하기 위한 공정절차는 다음과 같다.

첫째, 원하는 형상으로 가공되어 있는 맨드릴을 필라멘트와인딩 장치에 장착한다. 둘째, 맨드릴의 표면에 이형제(Frekote 770NC, Dexter)를 골고루 칠한 다음 페놀릭 수지를



(a) 3-axis controlled F/W machine



(b) composite ablative tube

Fig. 1 3-axis controlled F/W machine and composite ablative tube.

Table 1 Processing variables for ablative tubes

	Fiber	Pattern	Tension (kgf/end)	Bandwidth (mm)
Type 700-1	T700	1	2.5	6.0
Type 700-11	T700	11	2.5	6.0
Type 300-11	T300	11	1.5	6.0

다시 도포한다. 셋째, 탄소섬유의 밴드폭은 6.0mm, 와인딩 각도는 45°로 설정하고 섬유장력 측정장치를 이용하여 탄소섬유에 규정된 섬유장력이 작용되도록 한다. 넷째, 탄소섬유를 페놀릭 수지에 함침시키며 원하는 두께로 와인딩한 다음 회전축을 가진 오븐에서 회전시키며 규정된 성형조건으로 경화시킨다. 이때 성형조건은 80℃에서 2시간, 120℃에서 2시간, 150℃에서 3시간을 적용한다. 특히 경화시 맨드릴을 오븐 속에서 회전시키는 이유는 수지가 한 쪽으로 물리는 현상을 방지하기 위함이다. 다섯째, 성형이 완료되면 맨드릴에서 내열튜브를 탈형시킨 다음 다이아몬드 휠을 이용하여 규정된 치수로 가공한다.

Fig. 1에는 내열튜브의 제작에 적용한 3축 제어용 필라멘트와인딩 장치(EnTec Inc.)와 맨드릴에서 탈형한 다음 규정된 치수로 가공된 내열튜브가 나타나 있다.

Table 1에는 공정변수가 내열튜브의 기계적인 특성에 미



(a) 1 pattern



(b) 11 pattern

Fig. 2 Configuration of winding patterns.

치는 영향을 조사하기 위한 공정조건들이 나타나 있으며 Fig. 2에는 와인딩 패턴에 따른 탄소섬유의 배열 형태가 나타나 있다. T700 탄소섬유의 경우 2.5kgf/end의 섬유장력을 적용하여 패턴 1과 패턴 11의 내열튜브를 제작하였으며 T300 탄소섬유의 경우 1.5kgf/end의 섬유장력을 적용하여 패턴 11의 내열튜브를 제작하였다. 이때 와인딩 패턴은 맨드렐의 표면을 덮기 위한 층 서킷의 수와 인접한 강화섬유 엔드 사이의 서킷 수의 차이에 의해 결정된다[4]. 특히 패턴 1은 맨드렐에 와인딩된 강화섬유 엔드와 인접한 강화섬유 엔드와의 서킷 수의 차이가 1로서 국부적으로는 일방향 프리프레그를 적용한 경우와 유사한 형태를 갖는다. 패턴 11은 맨드렐에 와인딩된 강화섬유 엔드와 인접한 강화섬유 엔드와의 서킷 수의 차이가 11로서 직조된 복합재와 유사한 형태를 갖는다.

3. 섬유체적비 및 기공함유율 평가

내열튜브에서의 섬유체적비와 기공함유율은 그림 3과 같이 내열튜브의 특성을 대표할 수 있도록 내열튜브의 끝단에서 200mm, 435mm, 670mm, 710mm 떨어진 위치와 180° 대칭되는 위치에서 채취된 시편에 대해 ASTM D3171과 ASTM D2734에 근거하여 평가하였다[5,6]. 내열튜브에서의 섬유체적비와 기공함유율을 평가하기 위한 절차는 다음과 같다.

첫째, 내열튜브에서의 특성을 대표하는 각 부분에서 0.5g 정도의 시편을 3~4개 채취한 다음 고정밀 전자저울을 이용하여 공기 중에서의 무게와 물 속에서의 무게를 측정한다.

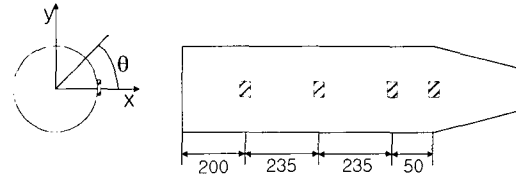


Fig. 3 Specimen selections for fiber volume fraction and void content.

다. 이때 비중(C)은 식(1)에 의해 구한다.

$$c = \frac{(w \times \rho_w)}{(w - w_w)} \tag{1}$$

여기에서 w 는 공기 중에서의 시편 무게, w_w 는 물 속에서의 시편 무게, ρ_w 는 물의 비중 (0.9982)이다. 둘째, 50ml의 황산 용액이 담긴 삼각 플라스크에 시편을 넣고 열판을 이용하여 290℃에서 5시간 정도 가열시킨다. 셋째, 삼각 플라스크에 담긴 황산 용액을 충분히 식힌 다음 50% 과산화수소가 100ml될 때까지 서서히 첨가하여 탄소섬유를 페놀릭 수지와 분리시킨다. 이때 탄소섬유가 페놀릭 수지에서 완전히 분리되면 거품종이를 이용하여 탄소섬유를 걸러내고 30℃의 진공 오븐에서 6시간 정도 건조시킨다. 넷째, 건조가 완료되면 탄소섬유의 무게를 고정밀 전자저울을 이용하여 측정한다. 내열튜브에서의 섬유체적비와 기공함유율은 각각 식(2)와 식(3)에 의해 표현된다.

$$Fiber, vol \% = \frac{\left(\frac{W}{F}\right)}{\left(\frac{w}{T}\right)} \times 100 \tag{2}$$

$$Void, vol \% = \frac{T_d - M_d}{T_d} \times 100 \tag{3}$$

여기에서 W 는 시편에서 추출된 탄소섬유의 무게, w 는 시편의 초기 무게, F 는 탄소섬유의 비중, T 는 시편의 비중, T_d 는 이론적인 시편의 비중, M_d 는 측정된 시편의 비중을 나타낸다.

4. 인장특성 평가

4.1 인장강성과 인장강도 평가

Fig. 4에는 내열튜브에서의 인장특성을 평가하기 위한 곡

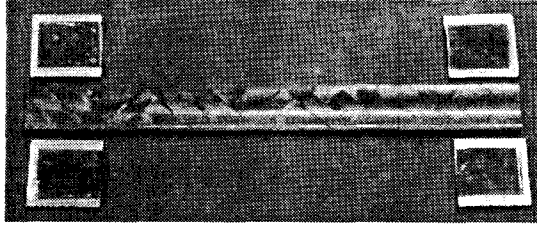


Fig. 4 Photograph of tensile curved specimen with test fixture.

물을 가진 인장시편과 시험치구의 형상이 나타나 있다. 인장시편은 내열튜브에서 규정된 형상으로 절단하여 얻었으며 이러한 경우 내열튜브 자체가 갖는 강화섬유의 연속성을 나타내지 못하는 경우가 있다. 이를 위해 내열튜브에서 길이가 230mm이고 원호가 각각 25mm, 35mm, 50mm인 인장시편을 채취하여 이들의 기계적 특성을 평가함으로써 내열튜브 자체의 특성을 고려할 수 있는 적절한 인장시편의 형상을 결정하였다. 이때 시험치구는 곡률을 가진 인장시편이 장착될 수 있도록 시편과 동일한 곡률을 갖도록 하였다.

특히 내열튜브의 인장강성(E)은 곡률을 가진 인장시편의 내면에 부착된 양축 스트레인게이지 (FCA-5-11, Tokyo Sokki Kenkyujo Co.)에서 얻은 하중-변형률 선도의 초기 선형 기울기를 이용하여 식(4)에 의해 평가하였으며, 인장강도(S)는 파단시의 최대하중을 이용하여 식(5)에 의해 평가하였다[7].

$$E = \frac{\Delta P}{A \Delta \epsilon} \quad (4)$$

$$S = \frac{P_{cr}}{A} \quad (5)$$

여기에서 ΔP 는 작용하중의 증분, $\Delta \epsilon$ 은 작용하중에 대한 변형률의 증분, A 는 시편의 단면적, 그리고 P_{cr} 은 파단시의 최대하중을 나타낸다.

Fig. 5에는 내열튜브에서 채취된 인장시편의 기계적인 특성을 평가하기 위한 시험장치가 나타나 있다. 시험장치는 Zwick/Z100(최대하중: 10톤)의 하중장치와 2100 Strain Gage Amplifier System(Measurements Group)의 신호증폭기 등으로 구성되어 있다. 이때 하중, 변형률, 변위 등은 PCI-MIO-16E-1(National Instruments)의 A/D 변환기와 Labview(National Instruments)로 구성된 자료수집장치를 통해 개인용 컴퓨터에 저장하였다.

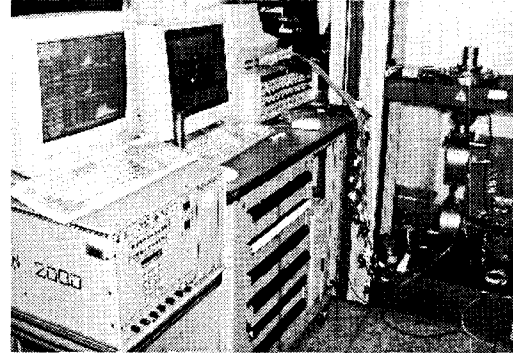


Fig. 5 Experimental test set-ups.

4.2 음향방출신호의 수집

내열튜브가 과도한 외부하중을 받게 되면 내열튜브의 내부에는 손상이 발생하고 이는 탄성과 형태로 나타난다[8]. 외부하중을 받는 내열튜브에서의 미세한 역학적 거동을 조사하기 위해 시편중앙부에 150KHz 공진형 센서 (R15, Physical Acoustics Corp.)를 부착하고 음향신호검출장치 (SPARTAN 2000, Physical Acoustic Corp.)를 통해 음향신호를 수집하였다. 이때 음향신호를 수집하기 위한 절차는 다음과 같다.

첫째, 음향신호를 검출하기 위한 센서는 시편의 중앙부에 절연 테이프를 감아 떨어지지 않게 고정한다. 이때 센서와 시편의 접촉부에는 그리스를 발라 음향신호의 손실을 방지한다. 둘째, 하중시험기를 구동하여 시편에 하중을 가하고 파손이 발생할 때까지의 음향신호를 수집한다. 이때 음향신호를 검출하기 위해 threshold는 35dB, PDT는 150 μ s, HDT는 300 μ s, HLT는 300 μ s를 적용하였다.

5. 공압성능시험

필라멘트와인딩된 내열튜브의 구조적인 성능을 평가하기 위해 공압을 이용한 파열시험과 보증시험으로 수행하였다. 파열시험은 내열튜브 자체의 성능을 검증하기 위한 용도이며 보증시험은 다른 용도의 시험에 적용될 내열튜브의 품질을 미리 검증하기 위한 용도이다.

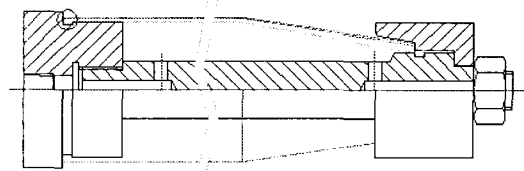
Fig. 6에는 내열튜브가 장착된 공압시험치구의 개략적인 형상과 내열튜브의 외면에 부착된 스트레인게이지의 위치가 나타나 있다. 공압시험을 수행하기 위해 내열튜브의 양 끝을 실란트로 밀봉하였으며 내열튜브의 내면에는 특별하게 제작된 고무백을 삽입하여 공압시험시 기밀을 유지할

수 있도록 하였다. 일반적으로 내압이 작용되는 원통 형태의 압력용기에는 원주 방향의 변형율이 길이 방향의 변형율보다 높게 나타나며 파괴 양상은 원주 방향의 변형율에 의해 지배됨을 고려하여 내열튜브의 외면에 원주 방향을 따라 12개의 단축 스트레인게이지를 부착하였다. 보증시험을 위해서는 보증압력을 1.390MPa로 설정한 다음 0MPa→0.691MPa (30초유지)→0.904MPa (30초유지)→1.112MPa (30초유지)→1.390MPa (1분유지)의 가압조건을 적용하였다. 보증시험을 수행하는 동안 내열튜브에서의 음향신호는 150KHz 공진형 센서(R15, Physical Acoustic Corp.)를 그림 7에서와 같이 세 곳의 위치에 부착하여 검출하였으며 음향신호검출장치는 SPARTAN 2000 (Physical Acoustic Corp.)을 적용하였다.

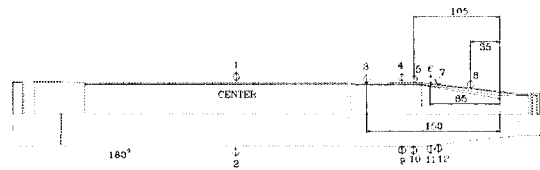
6. 결과 및 고찰

Fig. 8와 9에는 T700 탄소섬유에 2.5kgf/end의 섬유장력을 적용하여 패턴 1과 패턴 11로 각각 와인딩한 내열튜브에서의 위치에 따른 섬유체적비와 기공함유율이 나타나 있다. 패턴 1인 경우 기준축을 중심으로 0°위치에서의 섬유체적비는 46.7~47.5%, 기공함유율은 1.2~3.7%이며 180°회전된 위치에서의 섬유체적비는 45.1~46.2%, 기공함유율은 2.3~3.2%이다. 또한 패턴 11인 경우 기준축을 중심으로 0°위치에서의 섬유체적비는 46.7~51.1%, 기공함유율은 4.8~11.5%이며 180°회전된 위치에서의 섬유체적비는 48.4~51.1%, 기공함유율은 3.7~8.3%이다. 이로 미루어 판단하면 패턴 1의 경우 섬유체적비는 패턴 11의 경우에 비해 조금 낮게 나타지만 기공함유율은 패턴 1에 비해 상대적으로 낮은 값을 나타낸다. 이와 같이 내열튜브에서의 섬유체적비와 기공함유율은 와인딩 패턴에 따라 달라지게 되는데 패턴 1의 경우가 패턴 11에 비해 섬유체적비가 균일하고 기공함유율이 비교적 낮으며 위치에 따른 변화도 크지 않아 내열튜브의 상태는 양호함을 알 수 있다.

Fig. 10에는 T300 탄소섬유에 1.5kgf/end의 섬유장력을 적용하여 패턴 11로 와인딩한 내열튜브에서의 위치에 따른 섬유체적비와 기공함유율이 나타나 있다. 여기에서 보면 기준축을 중심으로 0°위치에서의 섬유체적비는 41.5~45.6%, 기공함유율은 3.7~11.4%이며 180°회전된 위치에서의 섬유체적비는 42.7~45.9%, 기공함유율은 5.1~8.5%로 나타낸다. 이로 미루어 판단하면 T300 탄소섬유를 적용한 경우는 와인딩시 낮은 섬유장력의 작용으로 인해 700 탄소섬유의 경우보다 낮은 섬유체적비를 가진다. 특히 패턴 11은 직물 형태의 복합재와 유사한 형태로 되어 성형시 과잉



(a) pneumatic test fixture with composite ablative tube



(b) strain gage placements on composite ablative tube

Fig. 6 Pneumatic test fixture and strain gage placements.



Fig. 7 Sensor placements for acoustic emission signals.

수지의 배율이 원활하여 패턴 1에 비해 상대적으로 높은 섬유체적비를 얻을 수 있지만 강화섬유 간의 교차점에서 기공이 함유될 가능성이 증가할 수 있기 때문에 패턴 1의 경우에 비해 기공함유율은 비교적 높고 위치에 따른 분산 정도도 커짐을 알 수 있다.

Fig. 11에는 T700 탄소섬유를 적용하여 패턴 1로 와인딩한 내열튜브에서 채취된 시편의 폭에 따른 인장강성과 인장강도의 변화가 나타나 있다. 이때 인장강성은 하중-변형율 선도의 초기 선형기울기에서 구하였으며 시편의 폭이 25mm인 경우 16.0GPa, 35mm인 경우 16.7GPa, 50mm인 경우 16.0GPa로서 시편의 폭에 그리 민감하지 않음을 알 수 있다. 인장강도는 시편의 폭이 25mm인 경우 67.2MPa, 35mm인 경우 68.5MPa, 50mm인 경우 73.5MPa로서 시편의 폭이 커지는 경우 강화섬유의 불연속성의 정도가 상대적으로 감소하여 인장강도는 다소 증가하는 양상을 나타낸다.

일반적으로 직조된 복합재의 경우 인장시편의 폭은 통상적으로 25mm의 폭을 주로 사용하지만 본 연구에서와 같은 내열튜브의 인장특성을 평가하기 위해서는 50mm의 폭을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Fig. 12에는 T700 탄소섬유를 적용하여 패턴 1과 패턴 11로 와인딩한 내열튜브에 대한 기계적 특성의 변화가 나

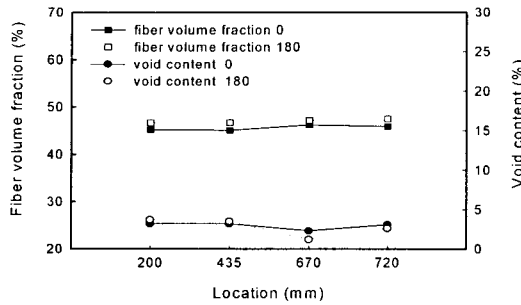


Fig. 8 Variations of fiber volume fraction and void content for T700 composite ablative tube with 1 pattern.

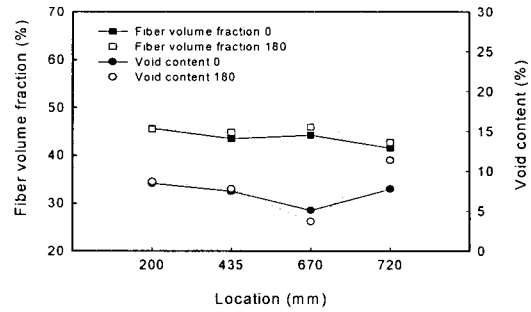


Fig. 10 Variations of fiber volume fraction and void content for T300 composite ablative tube with 11 pattern.

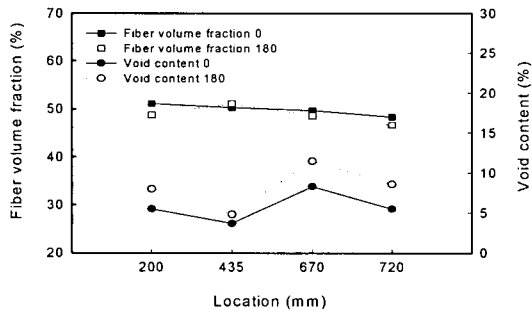


Fig. 9 Variations of fiber volume fraction and void content for T700 composite ablative tube with 11 pattern.

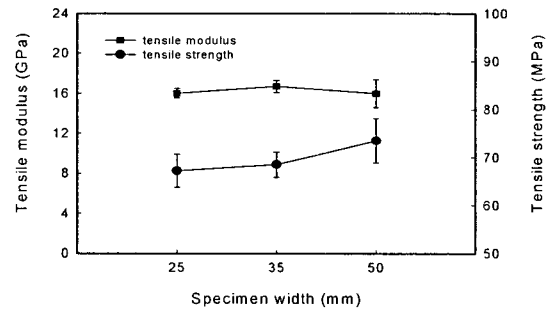


Fig. 11 Variation of tensile properties by varying with specimen width for T700 composite ablative tube with 1 pattern.

타나 있다. 여기에서 보면 패턴 1의 경우 인장강성은 16.0GPa, 인장강도는 73.5MPa, 파단변형율은 0.50%이며 패턴 11의 경우 인장강성은 14.6GPa, 인장강도는 60.2MPa, 파단변형율은 0.45%로서 패턴 1의 경우가 패턴 11의 경우보다 섬유체적율이 상대적으로 높기 때문에 인장강성이 높게 나타나고 기공함유율은 상대적으로 낮기 때문에 인장강도가 높게 나타난다. 이로 미루어 판단하면 와인딩 패턴은 내열튜브의 기계적 특성에 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 12에는 T700 탄소섬유를 적용하여 패턴 1과 패턴 11로 와인딩한 내열튜브에 대한 기계적 특성의 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 패턴 1의 경우 인장강성은 16.0GPa, 인장강도는 73.5MPa, 파단변형율은 0.50%이며 패턴 11의 경우 인장강성은 14.6GPa, 인장강도는 60.2MPa, 파단변형율은 0.45%로서 패턴 1의 경우가 패턴 11의 경우보다 섬유체적율이 상대적으로 높기 때문에 인장강성이 높게 나타나고 기공함유율은 상대적으로 낮기 때문에 인장강도가 높게 나타난다. 이로 미루어 판단하면 와인딩 패턴은 내열튜브의 기계적 특성에 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 13에는 T700 탄소섬유에 2.5kgf/end의 섬유장력을 적용하여 패턴 1로 와인딩한 내열튜브에서 채취된 인장시편의 시간에 따른 변형율과 hit rate가 나타나 있다. 여기에서 보면 시간에 따라 하중이 증가함으로 인해 시편이 형성된 변형율은 점차 증가하며 시편에서 방출되는 음향신호도 점차 커지기 시작하여 시편에 파손을 유발시키는 변형율 근처에서 hit rate는 최대가 된다. 또한 시편에 형성된 파손이 점차 진전하기 시작하면 이에 대응하는 음향신호는 다시 증가하기 시작하며 시편에 파단이 발생하여 변형율이 급격히 감소하면 hit rate도 급격히 감소한다. 특히 작용하중이 점차 증가하면 hit rate도 증가하지만 작용하중의 초기부터 미세한 음향신호가 방출되는 양상을 관찰할 수 있다. 이는 치구와 시편 사이의 마찰 그리고 시편 표면에서의 수지 균열 등에 기인하는 것으로 시편의 손상으로 인한 음향신호에서 치구와 시편 사이의 마찰에 의한 음향신호를 분리해 내기는 쉽지는 않다. 그러나 작용하중이 점차 증가하면 시편의 파손으로 인한 음향신호는 치구와 시편 사이의 마찰에 의한 음향신호에 비해 상대적으로 커져 작용하중이 큰

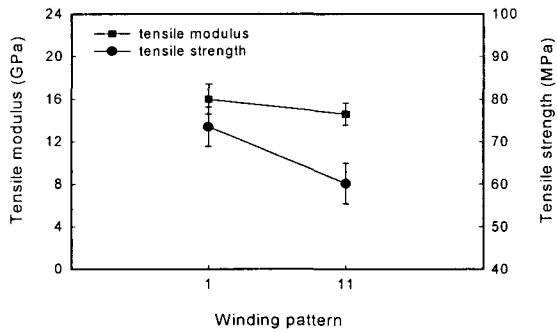


Fig. 12 Comparison of tensile properties for T700 composite ablative tubes by varying with winding pattern.

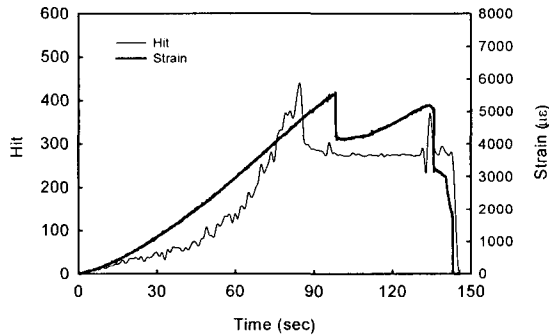


Fig. 13 Strain and acoustic emission signals by varying with time for T700 composite ablative tube.

영역에서의 음향신호는 시편 자체의 파손이 지배적인 영향을 미치는 것으로 간주할 수 있다.

내열튜브의 품질을 미리 검증하기 위해 비교적 낮은 보증압력으로 6개의 내열튜브에 대해 보증시험을 수행하고, 내열튜브의 구조적인 성능을 조사하기 위해 2개의 내열튜브에 대해 파열시험을 수행하였다. 내열튜브는 T700 탄소 섬유를 적용하여 패턴 1로 와인딩한 경우를 고려하였다. 규정된 보증압력이 작용된 경우 0.28%의 변형율을 나타내는 한 가지 경우를 제외하면 모두 0.2% 이하의 변형율을 나타내었다. Fig. 14에는 내열튜브의 길이를 따라 부착된 스트레인게이지에서 측정된 작용압력에 따른 전형적인 변형율 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 작용압력이 증가함에 따라 변형율은 점차 증가하고 원통부와 축소부의 경계부 부위에서 최대가 된다. 그리고 공압시험을 통해 측정된 파열압력은 각각 2.016MPa과 2.224MPa이며 최대 변형율은 각각 0.43%와 0.63%이다. 또한 파괴양상은 원주방향

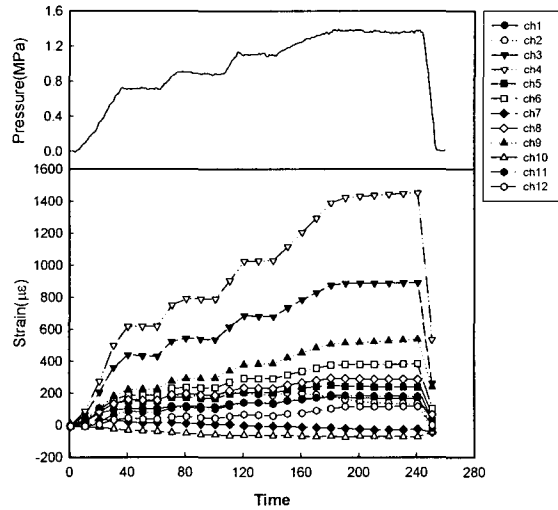


Fig. 14 Applied pressure and strain signals at various locations along T700 composite ablative tube by varying with time.

을 따라 내열튜브의 축소부와 원통부의 경계부 부위에서 강화섬유의 파손이 발생하며 특히 파열압력이 더 높은 내열튜브의 경우 축소부와 원통부의 경계부가 분리되는 양상도 관찰되었다. 이와 같이 파열시험과 보증시험을 통해 측정된 최대 변형율을 서로 비교해 볼 때 제작된 내열튜브는 충분한 안전여유를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 15에는 내열튜브에 대해 보증시험을 수행하는 동안 내열튜브의 길이를 따라 방출된 음향신호가 나타나 있다. 이때 압력을 작용하는 동안 내열튜브에서의 기밀을 유지하기 위해 내면에 고무백을 삽입하였으며 압력은 0.691MPa, 0.904MPa, 1.112MPa에서 각각 30초 유지시킨 후 보증압력까지 상승시켰다. 여기에서 보면 초기의 가압 단계에서는 비교적 높은 hit rate가 발생하며 이는 내열튜브의 내부에 삽입된 고무백이 작용압력에 의해 적절한 위치로 안정화되는 과정에서 발생하는 현상으로 판단된다. 그러나 내열튜브에 점차 압력을 증가시키면 작용압력에 비례하는 음향신호가 방출되지만 압력을 유지하는 동안의 음향신호는 지속적으로 감소됨을 알 수 있다. 특히 각 위치에 따라 측정된 음향신호를 살펴 보면 원통부와 축소부의 경계부 부위에 부착된 음향센서는 다른 부위에 장착된 음향센서에 비해 매우 많은 음향신호를 검출하였으며 이로 미루어 판단하면 내열튜브의 원통부와 축소부의 경계부 부위가 내열튜브의 파손이 시작되는 위치임을 알 수 있다.

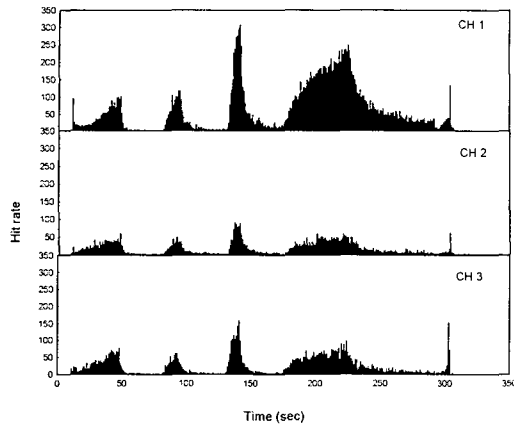


Fig. 15 Acoustic emission signals at various locations of T700 composite ablative tube with I pattern.

7. 결 론

필라멘트와인딩 공법을 통해 내열 특성 및 구조적인 특성을 갖는 탄소섬유/페놀릭 복합재 내열튜브를 제작하고 인장시험과 공압시험 그리고 음향신호의 분석을 통해 내열튜브의 구조적인 성능을 평가하였으며 본 연구를 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 패턴 I로 제작된 내열튜브는 패턴 II의 경우에 비해 섬유체적비는 균일하고 기공함유율은 낮으며 위치에 따른 변화도 크지 않아 양호한 내열튜브를 얻을 수 있었다.
- (2) 인장강성은 시편 폭의 변화에 민감하지 않지만 인장강도는 시편 폭이 커지는 경우 강화섬유의 불연속성 정도가 상대적으로 감소하여 증가하는 양상을 가진다. 이로 미루어 판단하면 내열튜브의 기계적 특성을 평가하기 위해서는 시편 폭을 50mm로 설정하는 것이 바람직하다.
- (3) 패턴 I로 제작된 내열튜브는 패턴 II의 경우보다 인장강성과 인장강도가 높게 나타난다. 이로 미루어 판단하면 패턴 I의 경우가 내열튜브의 제작에 더 유리함을 알 수 있다.
- (4) 보증시험을 통해 수집된 음향신호는 내열튜브의 축소부와 원통부의 경계부 부위에서 최대가 된다. 이로 미루어 판단하면 내열튜브의 축소부와 원통부의 경계부가 가장 취약한 부위로서 파손이 발생하는 위치임을 알 수 있다.
- (5) 보증시험을 통해 측정된 최대변형율은 0.2% 보다 낮으며 파열시험에서의 최대변형율과 비교해 보면 제작된 내열튜브는 충분한 구조적인 안전성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) 정상기, 윤남균, KPSAM용 연소관 조립체 제작공정 연구, MSDC-416-97043, 국방과학연구소, 1997.
- 2) Yun, N. G., Chung, S. K., and Lee, S. H., "A Study on the Fracture Process of KP-SAM Flight Motor Ablative Tube by Pressure," *KTCR-421,000001*, Agency for Defense Development, 2000.
- 3) Rosato, D. V. and Grove, C. S. Jr., *Filament Winding: Its Development, Manufacture, Applications and Design*. John Wiley & Sons Inc., New York, 1964.
- 4) Rousseau, J., Perreux, D., and Verdiere, N., "The Influence of Winding Patterns on the Damage Behaviour of Filament-Wound Pipes," *Composite Science and Technology*, Vol. 59, 1999, pp. 1439-1449.
- 5) ASTM D3171, Annual Book of ASTM Standards, 08.01, American Society for Testing and Materials, 1990.
- 6) ASTM D2734, Annual Book of ASTM Standards, 08.01, American Society for Testing and Materials, 1990.
- 7) ASTM D3039, Annual Book of ASTM Standards, 08.01, American Society for Testing and Materials, 1990.
- 8) Hill, E. V. K. and Lewis, T. J., "Acoustic Emission Monitoring of a Filament Wound Composite Rocket Motor Case During Hydroproof," *Materials Evaluation*, Vol. 43, 1985, pp. 859-863.