

돔 분리형 연소관의 접착 길이에 따른 체결부의 구조해석

전광우* · 신광복**† · 황태경***

Structural analysis of joint part by adhesive length of a composite pressure vessel with separated dome

KwangWoo Jeon* · KwangBok Shin**† · TeaKyung Hwang***

ABSTRACT

In order to determine optimal design length of adhesive joint of a composite pressure vessel with separated dome, stress analysis of joint part according to changes of adhesive length was done. Adhesive length has a range of 50mm to 300mm as design variables. The ratio of adhesive length with any stress gradient to initial non-stressed adhesive length was called "stress gradient length ratio" and selected as objective function. The stress gradient length ratio of joint part with adhesive length of more than 200mm was increased very slowly with increase of adhesive length. It means that adhesive length of about 200mm could be the optimal value to ensure the structural safety of joint part against internal pressure of 2,500 psi.

초 록

돔 분리형 복합재 연소관의 접합 체결부 최적의 설계 길이를 결정하기 위해 접합부 길이변화에 따른 구조해석을 수행하였다. 이때, 접착 체결부의 길이는 50mm에서 300mm의 범위를 갖는다. 무응력 상태의 초기 접합부 길이대비 응력구배가 발생하는 구간의 길이를 "응력구배 길이 비"로 정의하고 이를 목적함수로 선정하였다. 구조해석 결과 접착 체결부의 길이가 200mm 이상으로 증가할 경우 응력구배 길이 비의 증가가 서서히 나타남을 확인하였다. 이는, 접착 체결부에 적용되는 2,500psi 내압에서 구조적 안전성을 확보하는 최적화된 접착 체결부의 길이가 200mm임을 의미한다.

Key Words: Separated Dome(분리형 돔), Composite Pressure Vessel(복합재 연소관), Adhesive joint part(접착 체결부)

1. 서 론

섬유강화복합재(fiber reinforced composites)는 기존 금속재에 비해 비강도 및 비강성이 우수할 뿐만 아니라, 요구 조건에 따른 설계 변경이 용이하여 경량화를 요구하는 분야에 널리 적용되고 있다[1]. 특히, 항공우주 및 방산 분야의 추진

* 한밭대학교, 기계설계공학과 대학원

** 한밭대학교, 기계공학부

*** 국방과학연구소 1기술연구본부 6부

† 교신저자, E-mail: shin955@hanbat.ac.kr

기관에 적용되는 연소관의 경우 유효하중(payload)이 설계의 주요한 인자로 인식되어 경량화가 필수조건으로 요구되고 있다. 이에, 1980년대 이후 탄소섬유 복합재를 적용한 복합재 연소관 개발을 통하여 기존 금속재에 비해 강도와 중량 측면에서 많은 이점을 얻고 있다[2]. 로켓이나 미사일등에 사용되는 연소관은 축대칭(axisymmetry) 구조물로서 필라멘트 와인딩기법을 통해 제작되며, 하중 전달방향으로 섬유를 집중적으로 보강함으로써 복합재료가 갖는 장점을 극대화 할 수 있으며 일체성형이 가능한 이점을 지닌다. 이러한, 연소관의 경우 내부 추진제 탑재량에 따라 성능이 결정됨으로 보다 많은 추진제 탑재공간 확보가 필요하며, 외부적 요인에 의한 화약 둔감화(Insensitive munition) 특성이 요구된다. 이에, 연소관 원통부에 와인딩된 섬유를 최소화하여 보다 넓은 추진제 탑재공간을 확보하고, 돔과 원통부의 접착 체결을 통한 화약 둔감화 특성을 향상시킨 돔 분리형 연소관의 연구가 진행되고 있다. Anthony A Yurko[3]는 돔 분리형 연소관의 설계를 수행하고 접착 체결부의 구조적 안전성을 평가하였으며, Francis Mard[4]는 돔 분리형 연소관의 시험과 해석을 통한 구조 안전성 평가를 수행하였다.

그러나, 돔 분리형 연소관의 접착 체결부는 일체성형된 복합재에 비하여 비교적 취약한 구조를 가지므로 개발 단계에 있어 해석적 방법을 통한 설계 검증이 필요하며, 체결부 길이변화에 따른 접착부 응력변화 추이(stress deviation)를 확인하고 구조적 안전성을 확보하여야 한다. 이에, 본 연구에서는 현재 국방과학연구소에서 개발 중인 돔 분리형 복합재 연소관의 최적화된 체결부 길이 선정에 대해 구조 해석을 수행하고 이를 바탕으로 접착 체결부 구조 안전성 평가 기준을 제시하였다.

2. 돔 분리형 연소관의 구성

2.1 돔 분리형 연소관의 구성

Figure 1은 돔 분리형 연소관의 형상을 보여준

다. 돔 분리형 연소관은 기존 일체형으로 제작되는 복합재 연소관과 달리 돔과 원통부를 각각 제작한 후 결합하게 된다. 이때, 각 돔과 원통부는 T800/Epoxy 탄소섬유 복합재가 적용되며 접착 체결은 FM73(FM73 adhesive)을 사용하였다.

돔 분리형 복합재 연소관의 섬유 와인딩 각은 일반적인 필라멘트 와인딩 연소관 설계에 적용되는 장력 돔 설계 기준식에 따라 결정되었으며, 측지선(geodesic) 관계식을 통해 연소관 끝단부 보스 오프닝에서 섬유의 적층각이 90°가 되는 것을 고려하였다[5].

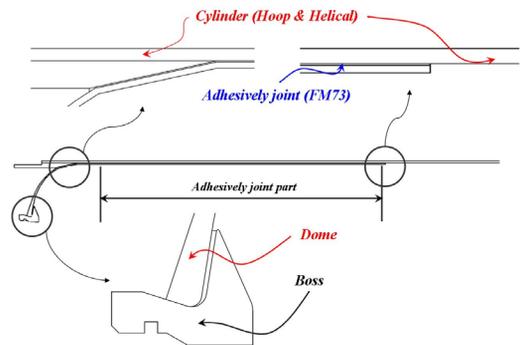


Fig. 1 Drawing of a composite pressure vessel with separated dome

현재 개발중인 돔 분리형 연소관의 경우 기존 연구사례를 바탕으로 돔과 원통부의 접착 체결부 길이를 50mm에서 300mm 구간으로 선정하였으며, 돔의 전방에 스키투를 적층함으로써 내압에 의한 돔과 원통부의 분리현상을 방지하였다.

2.2 돔 분리형 연소관의 유한요소 모델

설계된 돔 분리형 연소관의 접착부의 응력 분포를 확인하고 구조적 안전성을 평가하기 위해 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS v11을 사용하여 구조해석을 수행하였다. Fig. 2는 해석에 적용된 유한요소모델을 보여주며, 해석의 단순화를 위해 연소관의 구조적 취약부위로 판단되는 전방부 2°를 모델링하고 순환대칭(cyclic symmetry) 조건을 부여하였다. 또한, 금속보스와

복합재 돔 간의 상대변형을 허용하기 위해 고무층(EPDM)을 고려하였으며, 복합재의 층 별 파손 판단이 가능한 3차원 적층 솔리드 요소(C3D20R)를 적용하였다. 유한요소모델의 요소와 질점은 각각 22,016개와 30,783개로 구성하였으며, 적용 물성을 Table 1과 같다.

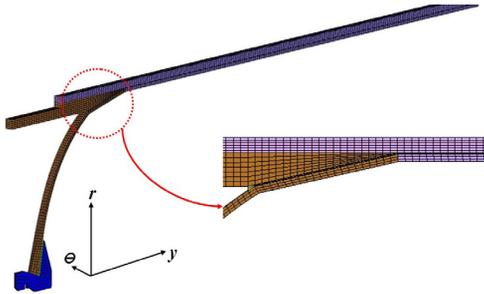


Fig. 2 Finite element model for composite pressure vessel

Table 1. Material properties applied to a composite pressure vessel

*Unit : GPa

| Materials | Modulus (GPa) | Poisson's ratio | | |
|---------------|----------------------------------|-----------------|--------|------|
| T800/Epoxy | E ₁ | 172 | 12, 13 | 0.3 |
| | E ₂ ,E ₃ | 9 | | |
| | G ₁₂ ,G ₁₃ | 5 | 23 | 0.4 |
| | G ₂₃ | 2.5 | | |
| Metal Boss | E | 210 | | 4.2 |
| FM73 Adhesive | E | 4.2 | | 0.45 |

일반적으로 필라멘트 와인딩된 복합재 연소관의 경우 섬유층의 적층 두께와 각도가 자오선을 따라 변화하여 해석모델링에 어려움이 있다. 와인딩되는 섬유의 단면적이 일정하고, 와인딩된 섬유가 동일 장력이라는 가정을 통하여 돔의 임의의 위치에서 와인딩 각도를 결정하였으며, 이를 해석모델에 적용하기 위해 각 요소별 국부 좌표계(local coordinate system)를 생성하고 섬유의 와인딩 각도를 적용하였다.

돔 분리형 연소관의 구성은 원통부 끝단의 길이방향(y-axis)에 대한 대칭 경계조건($U_y=0$)을 부여하였으며, 금속보스 끝단은 반경 방향 변위

($U_r=0$)를 고정하고 축 방향 하중을 분포 하중으로 변환하여 보스 끝단에 적용하였다. 해석에 적용된 내압은 2,500psi이다.

3. 돔 분리형 연소관의 해석결과

3.1 접착 체결부 길이 선정을 위한 평가 기준 제시

돔 분리형 연소관의 경우 국내 선행연구 사례가 전무하고 초기설계 단계에 있어 접착 체결부 길이의 결정을 위한 판정 기준을 제시할 필요가 있다. Fig. 3은 일반적인 돔 분리형 복합재 연소관의 접착 체결부에 발생하는 응력선도를 나타낸다. 응력선도를 바탕으로 접착부의 시작과 끝단에서 응력의 기울기가 가파르게 변화됨을 확인할 수 있으며, 그 외 구간의 경우 응력의 변화가 없음을 확인할 수 있다. 내압에 의해 발생하는 접착 체결부의 응력구배 변화는 접착부의 파손을 유발할 수 있는 구간으로 판단되며, 접착 체결부의 전체 길이와 응력구배가 발생하는 길이의 비를 통해 최적의 접착 체결부 길이를 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

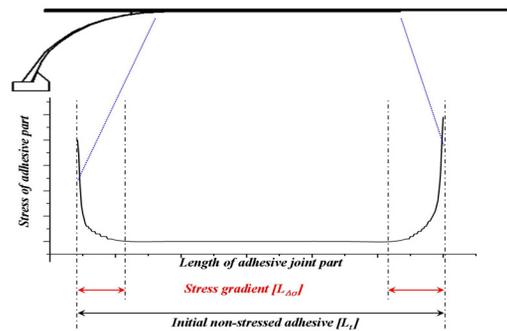


Fig. 3 Stress gradient of a composite pressure vessel with separated dome

따라서, 본 연구에서는 돔 분리형 연소관의 접착 체결부의 최적화된 길이를 얻기 위해 식 (1)과 같이 체결부 평가 기준식을 제시하였다.

$$80\% \leq L_{SR}^* = \frac{L_T - L_{\Delta\sigma_{nn}}}{L_T} (\%) \leq 100\% \quad (1)$$

여기서, L_T 는 접착 체결부의 전체 길이, L 는 응력구배가 발생하는 구간의 길이, L_{SR}^* 은 전체 접착부 길이대비 응력구배가 발생한 구간의 길이 비(stress gradient length ratio)이다. 응력구배 길이 비가 100%인 경우 응력구배가 발생하지 않는 구조적으로 안전함을 나타내며, 80%로 나타날 경우 구조적 안전성을 만족하지 못하는 것으로 판단한다. 이때, 판정 기준을 만족하는 구간(100%~80%)은 접착 체결부 길이변화에 따른 응력해석을 통해 결정되었으며, 응력구배의 길이 비가 80% 이하로 감소될 경우 구조적 파손 위험이 급격히 높아지기 때문에 이를 판정 기준의 최소치로 선정하였다.

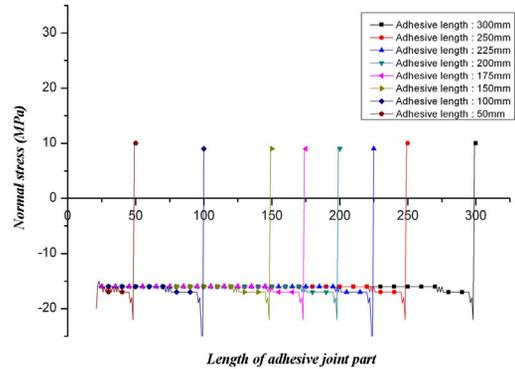
3.2 접착 체결부 길이변화에 따른 응력해석

돔 분리형 복합재 연소관의 구조해석 결과 내압에 의한 응력이 원통부에서 1,380MPa로 가장 높게 나타남을 확인하였으며, 접착 체결부 길이 변화에 따른 섬유방향 최대응력과 응력분포가 각 모델에서 동일하게 발생함을 확인하였다. 이는, 접착 체결부 길이변화가 돔과 원통부 섬유방향 응력에 큰 영향을 미치지 않음을 의미한다.

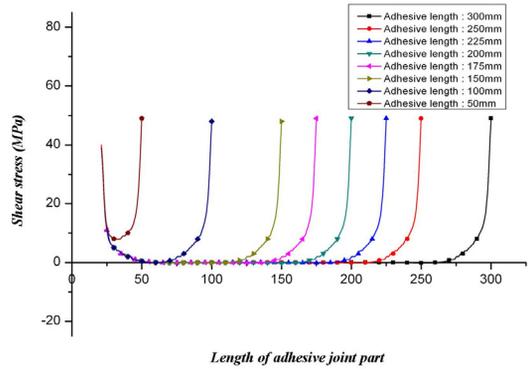
체결부 길이 변화에 따른 접착부의 응력해석을 수행하기 위해 50mm에서 300mm구간을 체결부 길이 변수로 선정하고 응력해석을 수행하였다. 이때, 내압에 의한 접착 체결부의 발생 응력은 연소관의 길이방향(U_y) 범선응력과 전단응력을 바탕으로 평가하였다.

Figure 4는 돔 분리형 연소관의 체결부 길이변화에 따른 접착부의 해석결과를 보여주며, 각 모델의 경우 돔의 끝단에 접착 체결부의 응력 집중이 발생함을 확인하였다. 이는, 돔과 원통부가 겹쳐진 체결부에 비해 원통부의 변형이 상대적으로 크기 때문이라 사료된다. 접착부에 발생하는 최대응력의 경우 체결부 길이에 따른 변화가 미비하였으나, 체결부의 길이가 감소함에 따라 접착부에 발생하는 전단응력의 구배가 증가함을

확인하였다. 이는, 접착 체결부 길이가 감소함에 따라 돔과 원통부의 축 방향 분리현상이 증가하기 때문이라 사료된다.



(a) Normal stress of adhesive joint parts



(b) Shear stress of adhesive joint parts

Fig. 4 Stress results with variable adhesive length for a composite pressure vessel

Table 2. The results of stress gradient length ratio

| Adhesive Joint part | L_{SR}^* (Stress gradient length ratio) |
|---------------------|---|
| Length : 50mm | 3% |
| Length : 100mm | 5% |
| Length : 150mm | 35% |
| Length : 175mm | 55% |
| Length : 200mm | 80% |
| Length : 225mm | 82% |
| Length : 250mm | 83% |
| Length : 300mm | 85% |

Table 2는 판정 기준식을 적용한 접착 체결부 길이 변화에 따른 평가결과를 보여준다. 접착 체결부

결부의 안전성 평가 결과 200mm의 접착 체결부 길이를 갖는 모델에서 판정 기준인 80%를 만족함을 확인하였다. 이때, 200mm의 접착 체결부를 기준으로 체결부의 길이가 감소할 경우 응력구배 길이 비가 급격히 감소하였으며, 체결부 길이 증가에 따른 응력구배 비 증가가 낮아짐을 확인하였다. 이에, 돔 분리형 접착 체결부의 경우 판정 기준을 만족하며 효율적인 200mm를 최적화된 접착 체결부 길이로 선정하였다.

4. 결 론

본 연구는 돔 분리형 연소관의 접착 체결부의 응력해석을 통하여 최적화된 접착 체결부 길이를 제시하였다.

- (1) 최적화된 돔 분리형 연소관의 접착 체결부의 길이를 도출하기 위해 접착 체결부의 길이와 응력구배가 발생하는 길이의 비율을 통한 평가 기준을 제시하였다.
- (2) 돔 분리형 연소관의 접착 체결부 길이 선정을 위해 제시된 판정 기준을 바탕으로 50mm~300mm의 체결부 길이 변화에 따른 평가를 수행하였다. 이때, 200mm를 기준으로 체결부의 길이가 줄어들 경우 응력구배 길이 비가 급격히 감소하였으며, 체결부 길이가 늘어날 경우 응력구배 길이 비의 증가가 낮게 나타남을 확인하였다. 이에, 구조적 안전성을 만족하며 효율적인 접착 체결부 길이를 200mm로 선정하였다.
- (3) 본 연구를 통하여 제시된 평가 기준을 통하여 돔 분리형 연소관의 접착 체결부 최적화 길이 선정에 적용이 가능 할 것으로 사료되

며, 추후 접착부의 점진적 파손을 고려하여 판정 기준을 검증하고 보완 할 예정이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 위탁과제 “돔 분리형 필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 체결부 설계 및 파손 매카니즘 연구”의 지원으로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 황태경, 박재범, 김형근, 도영대, “자연 노화에 따른 카본 에폭시 압력용기의 섬유 인장강도 변화,” 한국복합재료학회지, 2007, 제 20권 2호, pp.1-9
2. 박재범, 김동륜, 김형근, 황태경, “저속충격하중을 받은 탄소섬유강화 복합재 압력용기의 잔류강도 저하 평가,” 한국복합재료학회, 2008, 제 21권 3호, pp.9-17
3. Anthony A Yurko, J. R. Esslinger, “Affordable High Performance Composite Case Raket Motor Manufacturing,” 2005 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion conference
4. Francis Mard, “Design, manufacture and test of the composite case for erint-1 solid rocket motor,” AIAA 93-2462, 29th Joint Propulsion conference, 1993
5. 황태경, 박재범, 김형근, 도영대, 문순일, “복합재 압력용기의 돔 형상 설계 및 성능평가,” 한국복합재료학회, 2007, 제20권 4호, pp.31-41