

복합재 연소관의 접착 길이에 따른 체결부의 구조해석

전광우* · 신광복**† · 황태경***

A Study on the Structural Analysis of Joint Part in Accordance with Adhesive Length of a Composite Rocket Motor Case

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

ABSTRACT

In order to determine optimal design length of adhesive joint of a composite rocket motor case, stress analysis of joint part according to changes of adhesive length was done. Adhesive length has a range of 50 mm to 300 mm as design variables. The ratio of adhesive length without any stress gradient to initial non-stressed adhesive length was determined as evaluation criteria for selection of adhesive length, which called "stress gradient length ratio". The numerical result showed that stress gradient length ratio of joint part with adhesive length of more than 200 mm was increased very slowly with increase of adhesive length. It means that adhesive length of about 200 mm could be the optimal dimension to ensure the structural safety of joint part against internal pressure of 2,500 psi.

초 록

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

Key Words: Composite Rocket Motor Case(복합재 연소관), Adhesive Joint Part(접착 체결부), Stress Gradient Length Ratio(응력 구배 길이 비)

접수일 2011. 11. 30, 수정완료일 2012. 5. 15, 게재확정일 2012. 5. 21

* 학생회원, 한밭대학교 대학원 기계설계공학과

** 정회원, 한밭대학교 기계공학부

*** 정회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 6부

† 교신저자, E-mail: shin955@hanbat.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 24-25, 부산 노보텔 엠베서더) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

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 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 강성, 강도와 중량 측면에서 많은 이점을 얻고 있다 [2]. 로켓이나 미사일 등에 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. 근래 연소관 개발에 있어 가장 중요하게 요구되는 설계 조건은 보다 많은 추진제 탑재 공간 확보와 외부적인 요건에 의한 화약 둔감화(Insensitive munitions) 특성이다. 이때, 기존 일체성형을 통해 제작되는 복합재 연소관은 이러한 요구조건을 만족하는데 한계를 가지고 있어 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 선정을 위해 구조 해석을 수행하고 이를 바탕으로 평가기준을 제시하였다.

2. 복합재 연소관의 구성

2.1 복합재 연소관의 구성

Figure 1은 돔 분리형 연소관의 형상을 보여준다. 돔 분리형 연소관은 기존 일체형으로 제작되는 복합재 연소관과 달리 돔과 원통부를 각각 제작한 후 결합하게 되며, 각 돔과 원통부는 T800/Epoxy 탄소섬유 복합재가 적용되었다. 각각 제작된 연소관의 원통부와 돔부는 FM73 (FM73 adhesive) 접착제를 사용하여 체결하였다. 돔 분리형 연소관은 165 mm의 원통부 지름을 갖는다.

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].

현재 개발중인 돔 분리형 연소관의 경우 기존 연구사례[3, 4]를 바탕으로 돔과 원통부의 접착 체결부 길이를 50 mm에서 300 mm 구간으로 선정하였으며, 돔의 전방에 스키투를 적층함으로써 내압에 의한 돔과 원통부의 분리현상을 방지하였다.

2.2 복합재 연소관의 유한요소 모델

설계된 돔 분리형 연소관의 접착부의 응력 분포를 확인하고 구조적 안전성을 평가하기 위해 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS v11을

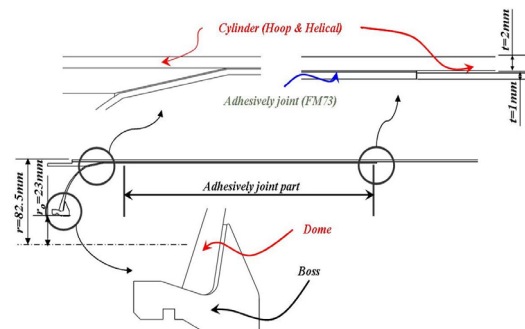


Fig. 1 Drawing of a composite rocket motor case with separated dome

사용하여 구조해석을 수행하였다. Fig. 2는 해석에 적용된 유한요소모델을 보여주며, 해석의 단순화를 위해 연소관의 구조적 취약부위로 판단되는 전방부 2°만을 모델링하고 순환대칭(cyclic symmetry) 조건을 부여하였다. 이때, 해석에 적용된 순환대칭은 연소관의 길이방향(y-axis)을 기준으로 360° 회전하도록 적용하였다. 또한, 금속 보스와 복합재 돔의 접촉부에 질점을 공유하지 않음으로 상대적 변형을 허용하였다. 연소관에 적용된 복합재는 3차원 고체 요소(C3D8R)로 모델링하였다. 일반적으로 필라멘트 와인딩된 복합재 연소관의 경우 섬유층의 적층 두께와 각도가 자오선을 따라 변화하여 해석모델링에 어려움이 있다. 이때, 와인딩되는 섬유의 단면적이 일정하고, 와인딩된 섬유가 동일 장력이라는 가정을 통해 돔의 임의의 지점에 섬유 와인딩 각도(α_i)를 Eq. 1을 통해 도출할 수 있다[6].

$$\alpha_i = \pm \sin^{-1} \frac{R_o}{R_i} \quad (1)$$

여기서, α_i 는 임의의 위치에 연소관 섬유 와인딩 각도, R_o 는 보스 오프닝 반경, R_i 는 연소관의 중심축과 돔의 반경을 나타낸다.

해석에 적용된 연소관의 섬유 와인딩 각도를 모사하기 위해 돔과 원통부의 국부 좌표계(local coordinate system)를 생성하고 Eq. 1에서 도출된 섬유의 와인딩 각도를 적용하였다. 복합재의 섬유 와인딩 각도는 ABAQUS에서 제공하는 복합재 적층 프로그램(composite lay-up manager)을 통해 모사하였다. 이때, 연소관 돔부의 섬유 와인딩 각도는 돔의 길이방향(y-axis)에 따라 연속적으로 변화하기 때문에 각 요소별 국부좌표계를 개별적으로 생성하고 섬유 와인딩 각도를 적용하였다. 해석모델의 요소와 질점은 각각 22,016개와 30,783개로 구성하였으며, 적용 물성은 Table 1과 같다[7-9].

돔 분리형 연소관의 구조는 원통부 끝단의 길이방향(y-axis)에 대한 대칭 경계조건($U_y=0$)을 부여하였으며, 금속보스 끝단은 반경 방향 변위($U_{r,\theta}=0$)를 고정하였다. 해석에 적용된 내압은

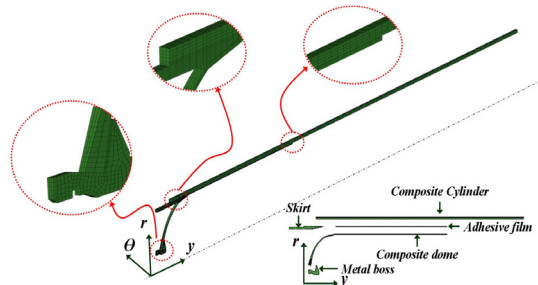


Fig. 2 Finite element models for a composite rocket motor case with separated dome

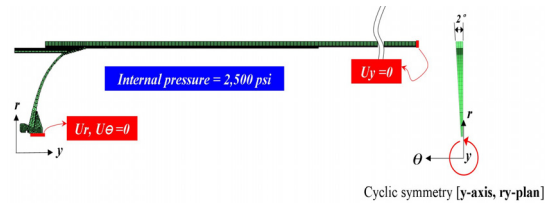


Fig. 3 Load and boundary conditions

Table 1. Material properties applied to a composite rocket motor case

Unit : GPa				
Materials	Modulus (GPa)		Poisson's ratio	
T800/Epoxy	E_1	172	ν_{12}, ν_{13}	0.3
	E_2, E_3	9		
	G_{12}, G_{13}	5	ν_{23}	0.4
	G_{23}	2.5		
Metal Boss	E	210	ν	0.32
FM73 Adhesive	E	2.4	ν	0.45

2,500 psi이다. Fig. 3은 돔 분리형 연소관의 구속조건을 보여준다.

3. 복합재 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. 돔 분리형 연소관은 돔과 원통부의 체결을 위해 FM73 접착제를 사용하게 되며 제작공정, 운용환경등의 변수에 따라 접착되지 않은 구간이 발생 할 수 있다. 이는 돔 분리형 연소관의 안전성 저하시키는 요인으로 작용 할 수 있다. 이에, 돔 분리형 연소관의 안전성을 확보하기 위한 극한조건으로 접착이 발생하지 않은 상태에서 돔과 연소관의 분리되지 않는 경우를 내압에 의한 마찰력의 관계인 Eq. 2와 같이 정의하고 이를 돔 분리형 연소관의 접착 체결부 최소길이 선정에 적용하였다.

$$L_{min} = \left(\frac{\pi r^2 P_i}{\mu_f 2\pi r P_i} \right) S_f \quad (2)$$

이때, L_{min} 는 체결부 최소길이, μ_f 는 복합재의 마찰계수[10], r 은 연소관의 반경, P_i 는 연소관에 작용하는 내압, S_f 는 안전계수를 나타낸다. 이때, 극한조건인 돔 분리형 연소관에 적용된 안전율은 2.5이다. Eq. 2를 통해 돔 분리형 연소관의 극한조건하의 안전성을 확보하기 위한 체결부 최소 길이를 선정하였으며, 본 연구에 적용된 연소관의 경우 196 mm이상의 체결부 길이가 요구됨을 확인하였다.

Figure 4는 일반적인 돔 분리형 복합재 연소관의 접착 체결부에 발생하는 응력선도를 나타낸다[3, 4]. 응력선도를 바탕으로 접착부의 시작과 끝단에서 응력의 기울기가 가파르게 변화됨을

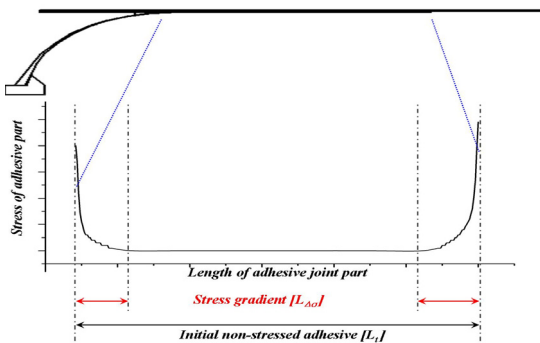


Fig. 4 Stress gradient of a composite rocket motor case with separated dome

확인 할 수 있으며, 그 외 구간의 경우 응력의 변화가 없음을 확인 할 수 있다. 내압에 의해 발생하는 접착 체결부의 응력구배 변화는 접착부의 파손을 유발 할 수 있는 구간으로 판단되며, 접착 체결부의 전체 길이와 응력구배가 발생하는 길이의 비를 통해 최적의 접착 체결부 길이를 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 돔 분리형 연소관의 접착 체결부의 최적화된 길이를 얻기 위해 Eq. 3과 같이 체결부 평가 기준식을 제시하였다.

$$80\% \leq L_{SR}^* = \frac{L_T - L_{\Delta\sigma_{min}}}{L_T} (\%) \leq 100\% \quad (3)$$

여기서, L_T 는 접착 체결부의 전체 길이, $L_{\Delta\sigma_{min}}$ 는 접착 체결부에 발생하는 응력 변화 구간의 길이, L_{SR}^* 은 전체 접착부 길이대비 응력구배가 발생하지 않은 구간의 길이 비(stress gradient length ratio)이다. 응력구배 길이 비가 100%인 경우 응력구배가 발생하지 않는 구조적으로 안전함을 나타낸다. 판정 기준을 만족하는 구간(100%~80%)은 접착 체결부 길이변화에 따른 응력해석을 통해 결정되었다. 접착 체결부 길이변화에 따른 응력해석 결과 체결부 길이가 감소함에 전체 접착부 길이대비 응력구배가 발생하지 않은 구간의 길이 비가 증가함을 확인하였다. 이때, 전체 접착부 길이대비 응력구배가 발생한 구간의 길이 비가 80%이하일 경우 길이감소에 따른 응력구배 발생구간이 급격히 증가함을 확인하였다. 이는, 전체 접착부 길이대비 응력구배가 발생하지 않은 구간의 길이 비가 80% 이하로 감소될 경우 응력구배가 발생하는 구간이 증가하여 구조적인 위험요소로 작용 할 것으로 판단된다. 이에, 본 연구에서는 $L_{SR}^*=80\%$ 를 돔 분리형 연소관의 접착 체결부 길이를 결정하는 판정기준 최소치로 선정하였다.

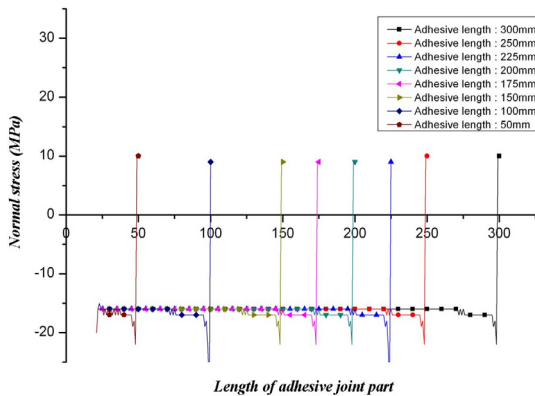
3.2 접착 체결부 길이변화에 따른 응력해석

돔 분리형 복합재 연소관의 구조해석 결과 내압에 의한 응력은 연소관의 원통부에서 섬유가 와인딩된 방향으로 최대 1,380 MPa이 발생함을

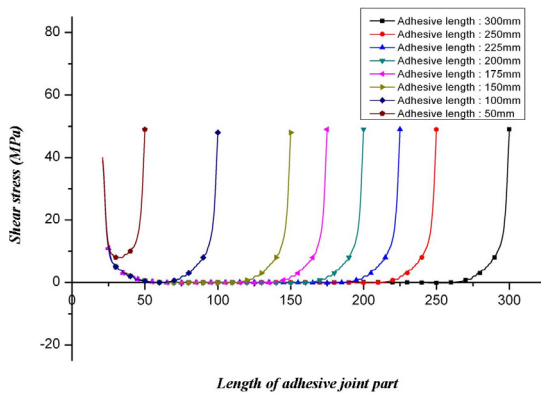
확인하였으며, 접착 체결부 길이변화에 따른 섬유방향 최대응력과 응력분포가 각 모델에서 동일하게 발생함을 확인하였다. 이는, 접착 체결부 길이변화가 돔과 원통부 섬유방향 응력에 큰 영향을 미치지 않음을 의미한다.

체결부 길이 변화에 따른 접착부의 응력해석을 수행하기 위해 50 mm에서 300 mm구간을 체결부 길이 변수로 선정하고 응력해석을 수행하였다. 이때, 내압에 의한 접착 체결부의 발생 응력은 연소관의 길이방향(y-axis) 범선응력(normal stress)과 전단응력(shear stress)을 바탕으로 응력 추이를 확인하였다.

Figure 5는 돔 분리형 연소관의 체결부 길이변



(a) Normal stress of adhesive joint parts



(b) Shear stress of adhesive joint parts

Fig. 5 Stress results with the changes of adhesive length for a composite rocket motor case

화에 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.

Table 2는 판정 기준식(Eq. 3)을 적용한 접착 체결부 길이 변화에 따른 평가결과를 보여준다. 이때, L_{SR}^* 의 결과는 길이변화에 따른 응력해석을 통해 체결부에 발생하는 범선응력(σ_{rr})과 전단응력(σ_{ry})을 바탕으로 응력추이의 변화가 발생하는 구간의 길이($L_{\Delta\sigma}$) 측정하였다. 접착 체결부 길이 선정을 위한 평가 결과 200 mm의 접착 체결부 길이를 갖는 모델에서 판정 기준인 80%를 만족함을 확인하였다. 또한, 돔 분리형 연소관의 극한조건을 만족하기 위한 접착 체결부 최소 길이인 196 mm를 만족함을 확인하였다. 이때, 200 mm의 접착 체결부를 기준으로 체결부의 길이가 감소에 따라 전체 접착 체결부 길이대비 응력구배 발생하지 않은 구간의 비가 급격히 감소하였으며, 체결부 길이 증가에 따른 전체 접착 체결부 길이대비 응력구배 미 발생구간의 비율 증가가 낮아짐을 확인하였다. 이에, 돔 분리형 접착 체결부의 경우 극한조건을 최소길이와 전체 접

Table 2. The analysis results of stress gradient length ratio

Adhesive Joint part	L_{SR}^* (Stress gradient length ratio)
Length : 50 mm	3.3%
Length : 100 mm	5.2%
Length : 150 mm	35.4%
Length : 175 mm	55.3%
Length : 200 mm	80.2%
Length : 225 mm	82.2%
Length : 250 mm	83.5%
Length : 300 mm	85.6%

착부 길이대비 응력구배가 발생하지 않은 구간
의 길이 비를 바탕으로 하는 판정 기준을 모두
만족하며, 추진재 탑재량 극대화 및 무게절감에
효율적인 200 mm를 최적화된 접착 체결부 길이
로 선정하였다.

4. 결 론

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

- (1) 최적화된 돔 분리형 연소관의 접착 체결부의
최소길이를 도출하기 위해 접착이 발생하지
않은 극한조건을 바탕으로 체결부 최소길이를
제시하였다. 또한, 접착 체결부의 응력해
석을 통하여 체결부의 길이와 응력구배가 발
생하지 않은 길이의 비율을 통해 체결부의
길이 선정에 평가 기준을 제시하였다.
- (2) 돔 분리형 연소관의 접착 체결부 길이 선정
을 위해 제시된 판정 기준을 바탕으로 50
mm부터 300 mm까지 체결부 길이 변화에 따
른 평가를 수행하였다. 이때, 200 mm를 기
준으로 체결부의 길이가 줄어들 경우 전체 접
착 체결부 길이대비 응력구배 미 발생구간의
길이 비가 급격히 감소하였으며, 체결부 길이
가 늘어날 경우 전체 접착 체결부 길이대비
응력구배 미 발생구간의 길이 비율 증가가
낮게 나타남을 확인하였다. 이에, 극한조건
의 체결부 최소길이와 접착 체결부 길이 선정
을 위한 판정기준을 모두 만족하는 200 mm
를 접착 체결부 최적의 길이로 선정하였다.
- (3) 본 연구를 통하여 제시된 평가 기준을 통
하여 돔 분리형 연소관의 접착 체결부 최적
화 길이 선정에 적용이 가능 할 것으로 사료
되며, 추후 접착부의 점진적 파손을 고려한
판정 기준의 검증에 활용할 수 있을 것이다.

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

참 고 문 헌

1. 황태경, 박재범, 김형근, 도영대, “자연 노화
에 따른 카본 에폭시 압력용기의 섬유 인장
강도 변화,” 한국복합재료학회지, 제20권, 제
2호, 2007, pp.1-9
2. 박재범, 김동륜, 김형근, 황태경, “저속충격하
중을 받은 탄소섬유강화 복합재 압력용기의
잔류강도 저하 평가,” 한국복합재료학회, 제
21권, 제3호, 2008, pp.9-17
3. Anthony A Yurko, J. R. Esslinger,
"Affordable High Performance Composite
Case Rocket Motor Manufacturing," 41st
AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion
conference, 2005, AIAA-2005-3610
4. Francis Mard, "Design, manufacture and
test of the composite case for erint-1 solid
rocket motor," 29th Joint Propulsion
conference, 1993, AIAA 93-2462
5. 황태경, 박재범, 김형근, 도영대, 문순일, “복
합재 압력용기의 돔 형상 설계 및 성능평
가,” 한국복합재료학회, 제20권, 제4호, 2007,
pp.31-41
6. 황태경, 도대영, 문순일, “복합재 압력 용기
의 확률적 유한 요소 응력 해석,” MSC
software conference, 2003
7. 손대성, 배지훈, 장승환, “동시 경화법으로
제조된 T800/에폭시 복합재료-알루미늄 단면
접치기조인트의 성형압력 및 부가압력에 따
른 접착강도에 관한연구,” 한국복합재료학회,
제24권, 제5호, 2011, pp.23-28
8. 박재성, 강현규, 김철웅, 황태경, 홍창선, 김
천근, “필라멘트 와인딩된 복합재 탱크의 거
동해석과 변형을 측정 I. 필라멘트 와인딩
탱크의 유한 요소 해석,” 항공우주학회지,

- 제29권, 제7호, 2001, pp.49-55
9. A.D. Crocombe, "Modeling and predicting the effects of test speed on the strength of joint made with FM73 adhesive," International journal of adhesion and adhesives, Vol. 15, 1995, pp.21-27
10. Joakim Schon, "Coefficient of friction and wear of a carbon fiber epoxy matrix composite," WEAR, Vol. 257, Issues 3-4, 2004, pp.395-407