

## 초기하중을 받는 로켓모타 케이스 나사체결부의 구조해석

Structural Analysis for Thread Joint Part of Rocket Motor Case Applied Pre-load

**구 송 회\***  
Song-Hoe, Koo

**조 원 만\***  
Won-Man, Cho

**이 방 업\***  
Bang-Eop, Lee

### ABSTRACT

Behaviour of a thread joint of a rocket motor case show complex structural characteristics. Pre-torque must be applied to the threads to prevent the loosening of the interface from the additional pressure load. During the pressurization of the rocket motor case, the jointing face may be opened if the pre-torque were not set properly or the structure may be failed if the local concentrated stress exceeds the strength of the material. In this paper, the structural behaviour of a thread joint of a rocket motor case were analyzed by the finite element method and the results were compared to the experimental ones. A method to set a pre-torque for a thread joint were proposed to ensure the structural safety.

주요기술용어(주제어) : Thread Connection(나사체결), Pre-load(초기하중), Torque(토크), Rocket Motor(로켓 모타), Overclosure Tying

### 1. 서 론

본 연구의 나사체결 방법은 산업 기계 구조 부품끼리의 연결뿐만 아니라 로켓 모타의 구성요소인 앞마개, 실린더, 노즐 등에도 적용되는 체결방법으로서 일반적으로 사용되고 있는 볼트, 커플링 체결방법보다 조립부의 구조가 간단하여 제작이 간편하고, 연소관의 무게를 줄일 수 있기 때문에 널리 사용하는 체결방법이다.

나사 체결부는 적절한 토크에 의한 체결력 유지가 매우 중요하며, 너무 작거나 잘못된 조립 토크는 비행하중 및 진동 등의 요인으로 체결력을 이완시

킬수가 있으며, 너무 높은 토크는 나사부에 과중한 변형 및 응력 부식, 응력 균열을 발생시킬 수 있다. 불충분한 조립 토크는 체결부의 미끄럼에 의한 어긋남(Misalignment) 및 체결부의 분리를 발생하고, 누설의 원인이 되며, 심하면 체결부의 파열 및 피로 파괴를 야기 시키므로, 나사 체결부에는 작동하중에 의한 최대응력을 넘지 않는 큰 체결력을 가하는 것이 바람직하다<sup>[1]</sup>.

로켓 모타 구조물에 적용된 나사체결 부위는 경량화를 위하여 조립부의 두께를 매우 얇게 설계하므로 두께가 얇은 나사의 끝부위에 응력 집중으로 항복 강도를 넘는 응력이 발생할 수 있으므로 상세 응력 해석을 통하여 적절한 조립 토크를 선정할 필요가 있다.

접촉 해석을 할 수 없었던 예전부터 지금까지 많은 사람들이 나사 체결부 역학 및 하중 분포 등을 연구

† 2006년 11월 13일 접수~2007년 1월 26일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : ksh4537@yahoo.co.kr

하여 왔다. 1980년 야마모토<sup>[2]</sup>는 나사체결부의 굽힘 모멘트, 전단하중, 체결부의 반경축소 팽창 등에 관한 변형 계산을 제안하였으며, 1990년 Grosse<sup>[3]</sup>와 1996년 Lehnhoff<sup>[4]</sup>는 나사체결부의 응력분포 및 변형 분포를 축대칭 2차원모델로 해석하였다. 1999년 Jien-Jong Chen<sup>[5]</sup>는 나선각의 헬리컬 효과를 고려한 3차원 모델 해석방법과 축대칭 2차원 모델 방법에 의한 해석 결과를 비교 검토하여 헬리컬 효과가 하중 분포에 큰 영향이 없으며, 2차원 방법과 3차원 방법의 결과에 큰 차이가 없음을 밝혔다.

본 연구에서는 나사부를 해석하기 위해서 나사 형상을 모델링하여 접촉부에 접촉요소를 적용하였으며, 나사부에 발생하는 응력이 항복강도를 초과할 수 있으므로 탄소성해석을 수행하였다.

해석 모델링과 결과분석은 MSC PATRAN 2005r2를 이용하였으며, 응력해석은 구조해석 전용 프로그램인 MSC MARC 2005를 이용하였다.

나사 조립부 구조 해석시 고려해야 할 중요사항은 조립 토크 의한 초기 하중을 적용 방법, 나사 조립면의 마찰계수, 탄소성 해석 시 소성역에서 정확한 재료거동의 적용 등이다.

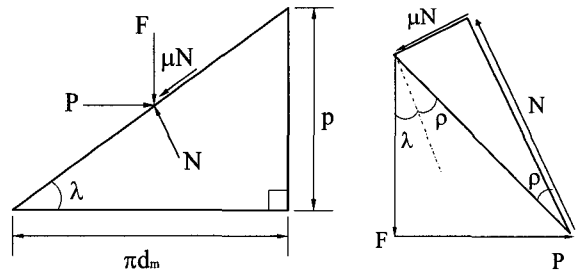
본 연구에서는 조립 토크에 의한 초기 하중을 적용하기 위하여 나사 체결부에 MSC MARC 프로그램의 pre-load 기능을 이용하였다. 토크에 의한 pre-load 크기와 마찰계수를 변화시켜 가며 해석을 수행하였으며, 실험치와 비교하여 적절한 조립 토크 값을 선정하였다. 탄소성 해석시 소성역에서의 재료 거동은 bi-linear한 true-stress true-strain 관계를 적용하였다.

초기하중과 내부압력을 고려한 해석결과 조립 토크에 의한 초기하중 값은 압력이 증가하면서 이완되었으며, 마찰계수가 작아지면 토크의 영향이 더 높은 내부압력 작동까지 유지되었다. 마찰계수가 0.05이고, 조립 토크가 200ft-lbs일 경우 최대 작동압력까지 조립 토크의 영향이 남아 있음을 알 수 있었다. 본 연구 대상의 로켓 모터에서는 작동중 구조적인 안전성 및 기밀성능을 유지하기 위하여 나사부에 마찰계수를 가능한 작게 하여야 하며, 이를 위하여 물리코트 윤활제의 도포를 추천하고, 200ft-lbs의 조립 토크로 나사부를 조립할 것을 제안하였다.

## 2. 조립 토크에 의한 축하중

삼각 체결나사의 조립 토크  $T$ 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$T = T_t + T_c = F \cdot \frac{d_m}{2} \tan(\lambda + \rho_\Delta) + \frac{F \cdot \mu' \cdot d_c}{2} \quad (1)$$



- $P$  : 나사를 들어올리는 힘,  $F$  : 축방향힘,
- $N$  : 수직력,  $p$  : 나사피치,  $d_m$  : 피치직경,
- $\mu$  : 나사면 마찰계수(=tan $\rho$ ),  $\rho$  : 마찰각,
- $\mu'$  : 이음부 마찰계수,  $\tan\lambda = p/\pi d_m$
- $\rho_\Delta$  : 삼각나사의 마찰각,  $d_c$  : 이음부 접촉 평균직경
- $T_t$  : 삼각 나사면의 조립 토크
- $T_c$  : 나사끝 이음부의 조립 토크

## 3. 해석 방법

MARC 코드에서 제공하는 축대칭 선형요소 (Axisymmetric Quadrilateral Linear Element)를 적용하였으며, 내부 압력은 Edge pressure로 1차 O-링 부까지 1.69kg/mm<sup>2</sup>를 작용시켰다. 나사 접촉부위와 부품간의 접촉부에는 MARC 코드에서 제공하는 접촉 요소의 direct constraint 방법을 적용하였다. 접촉면 간의 마찰 모델은 Columb 마찰 모델 중에서 수정된 step 함수를 적용한 stick-slip 방법을 사용하였다<sup>[6]</sup>. 조립 토크에 의한 초기하중은 overclosure tying 경계 조건으로 적용하였다. 이 방법은 임의 나사면을 취하여 상하면을 분리시키고 외부에서 이 상하면을 제어할 수 있는 제어 절점(Control Node)를 생성

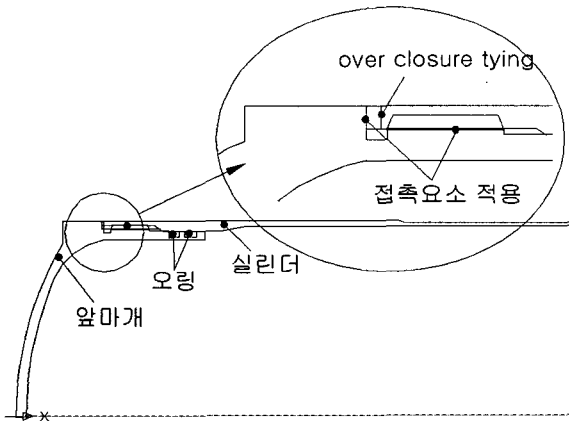
시켜서 이 절점과 분리된 상하면에 constraint를 주어서 축하중에 의한 조립 토오크를 모사시키는 방법이다<sup>[7,8]</sup>.

#### 4. 해석 모델

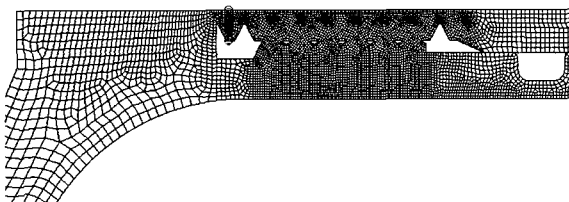
로켓 모터 연소관 및 나사 체결부의 형상과 유한요소 모델을 그림 1, 2에 나타내었다. 해석 모델은 실린더 부위에 균일한 응력분포를 갖게 하기 위해 실린더

[표 1] 부품의 기계적 물성치

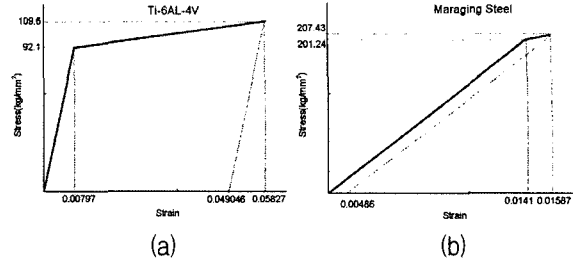
부 품	재 료	탄성 계수 kg/mm <sup>2</sup>	포아 송비	항복 강도 kg/mm <sup>2</sup>	인장 강도 kg/mm <sup>2</sup>
앞마개	Ti-6Al-4V	11882	0.31	91.3	103.4
연소관	Maraging 250 Grade	18631.3	0.31	199.0	204.0



[그림 1] 로켓 모터 케이스의 나사 체결부 형상



[그림 2] 유한 요소 해석 모델링 형상



[그림 3] 재료의 탄-소성 진응력-변형률 선도

를 충분히 길게 모델링하여 끝단부의 영향을 최소화 하였다.

사용된 재료의 기계적 성질은 표 1과 그림 3에 나타 내었다.

#### 5. 실험

조립 토오크에 의하여 발생하는 축방향 하중에 대한 해석의 정확성을 확인하기 위하여 그림 4와 같이 연소관 표면에 2축 변형률 게이지를 부착하여 토오크 값의 변화에 따른 연소관 외면의 변형을 변화를 측정 하였다. 조립나사부에는 접촉부의 마찰계수에 따른 변형률을 측정하기 위하여 MEK 세척제로 나사부를 세척하여 토오크를 준 경우와 물리코트를 도포한 후 토오크를 준 경우에 대하여 시험을 수행하였다.



[그림 4] 토오크 측정실험 및 변형률 게이지 부착 상태

#### 6. 결과 및 고찰

가. 초기하중에 의한 구조해석 결과  
유한요소해석에서 사용할 축방향 하중을 구하기 위

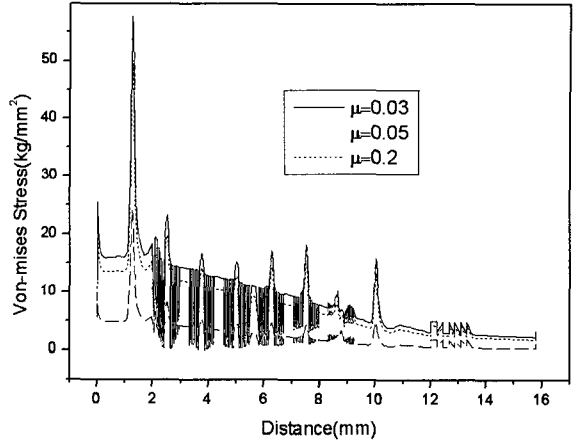
하여 식 (1)의 이론식을 적용하였다. 토오크에 대한 축방향하중은 선형 관계를 갖으며, 마찰계수가 증가하면 같은 토오크에서 축방향 하중이 증가함을 알 수 있다.

그림 5는 나사 조립부에 폴리코트를 도포한 조건에서 90ft-lbs의 토오크에서 연소관 나사부 외부의 변형률 실험치를 나사부 마찰계수가 0.03에서 0.075로 변화시킨 해석치와 비교 분석하였으며, 나사끝 이음부에는 폴리코트를 도포하지 않았기 때문에 0.13의 마찰계수를 적용하였다<sup>[9]</sup>.

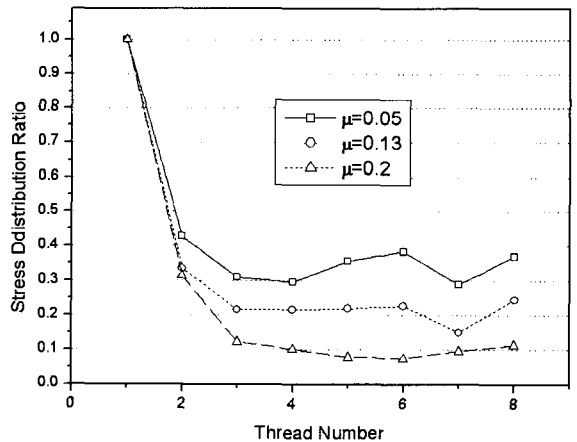
실험결과 연소관 끝단부의 변형률은 측정값에 변화가 크지만 문헌[9]에서 제시한 폴리코트 마찰계수인 0.03~0.075의 범위 내에 존재하며, 평균적인 값의 경향은 마찰계수 0.05 해석결과와 유사함을 알 수 있다.

그림 6은 마찰계수의 변화에 따른 나사부의 응력상태를 보여주는데, 마찰계수가 증가하면 나사부의 등가응력은 감소하는 경향을 보이고 있다. 해석에서 사용한 마찰계수 0.2는 MEK 세척제로 나사면을 완전히 닦아낸 상태이며, 마찰계수 0.05는 나사부의 윤활을 위하여 폴리코트를 도포한 경우이다<sup>[9]</sup>.

나사부에 토오크를 작용시키면 첫 번째 나사부에서 응력이 급격히 증가한다. 그림 7에서 보면 나사부에서의 하중분담률(=  $\frac{N\text{-st 나사부위등가응력}}{\text{최대응력발생나사부위등가응력}}$ )이 마찰계수가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있는데, 마찰계수



[그림 6] 조립 토오크 90ft-lbs에서 마찰계수 변화에 따른 나사부 등가응력분포

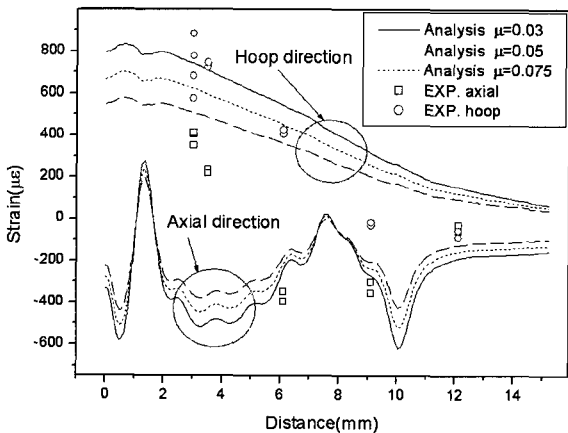


[그림 7] 조립 토오크 90ft-lbs에서 나사부 하중 분담률

가 작을수록 나사에 작용하는 응력이 고르게 분포됨을 알 수 있다.

나. 초기하중과 압력하중이 동시에 작용할 경우

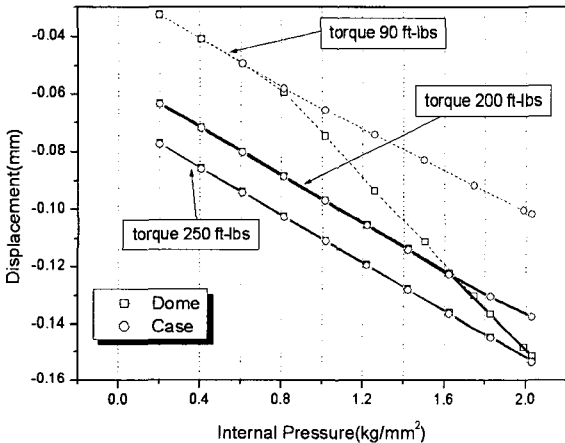
하중 작동 시 나사부의 풀림현상을 방지하기 위해서는 작동하중 동안에 나사 끝 이음부의 접촉이 분리되지 않아야 한다. 그림 8을 보면 조립 토오크가 90 ft-lbs인 경우에는 내부압력 0.6kg/mm<sup>2</sup> 이상에서 나사 끝 이음부 분리가 발생함을 알 수 있다. 토오크를 증가시켜 200ft-lbs가 되면, 약 1.63kg/mm<sup>2</sup> 까지 나사 끝 이음부가 접촉하고 있는데, 최대예상작동압력(MEOP)



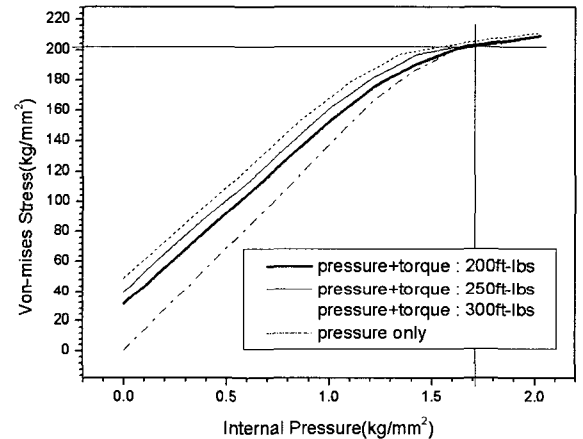
[그림 5] 조립 토오크 90ft-lbs에서 실험치와 해석치 비교

1.69kg/mm<sup>2</sup>와 거의 같은 값을 보이고 있다. 따라서 현재 연구대상의 로켓모타에 적용할 수 있는 최대 토오크값은 200ft-lbs로 판단된다. 그림 9는 조립 시 나사부의 표면을 어떻게 처리해야 하는가를 확인하기 위하여 마찰계수 변화에 따른 조립 토오크의 영향을 분석하였다. 마찰계수가 감소하면, 조립 토오크의 영향이 좀 더 늦게까지 나타난다. 즉 나사부 잠김 성능과 기밀 성능이 증가함을 나타내는 것이며, 마찰계수를 감소시키기 위하여 나사부에 폴리코트와 같은 윤활제를 도포하여 조립할 것을 제안한다. 그림 9에서 알 수 있듯이 마찰계수가 감소하면 같은 토오크에서 나

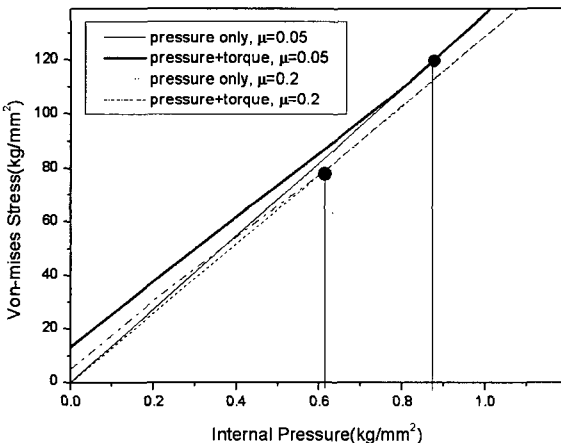
사부에 작용하는 응력이 증가한다. 그러나 그림 10에 보여주는 바와 같이 조립 토오크와 내압이 작용하는 경우에 최대등가응력의 변화를 보면, 마찰계수의 감소로 조립 토오크에 의한 나사부의 응력은 증가하지만 내부압력이 작용하면 최대압력에서 조립 토오크의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 그림 10에서 조립 토오크 250ft-lbs의 결과를 보여주고 있는데, 250 ft-lbs의 조립 토오크를 가하여도, 사용 최대압력에서 토오크를 주지 않은 경우와 거의 같은 응력상태를 보여주고 있다. 이러한 현상은 그림 11에서 알 수 있듯이 최대사용 압력에서 최대응력 발생부위에 소성역이 국부적으로 발생하였기 때문이다.



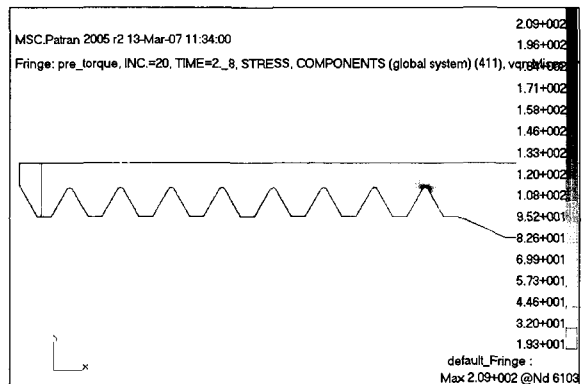
[그림 8] 토오크에 의한 나사끝 이음부 변위 (마찰계수 0.05)



[그림 10] 조립 토오크의 변화에 따른 최대응력변화



[그림 9] 마찰계수 변화에 따른 조립 토오크의 영향



[그림 11] 마찰계수 0.05, 조립 토오크 200ft-lbs, 내압 1.69kg/mm<sup>2</sup>에서 연소관 나사부 등가응력 분포

## 7. 결론

로켓 모터 연소관의 나사 체결부에 대하여 유한요소 구조해석과 구조시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 나사조립부에 몰리코트를 도포한 후 구조시험을 수행하여 해석과 비교한 결과 문헌에서 제시한 마찰계수 0.03~0.075가 타당함을 알 수 있었다.
- 2) 나사부에 마찰계수가 작아지면 나사부의 등가응력은 증가하지만, 같은 토오크에서 나사 체결부 잠김 성능과 기밀 성능이 증가된다.
- 3) Overclosure tying 기법을 이용한 나사부 정밀해석을 통하여 최대 작동압력까지 나사 잠금 효과를 유지하면서 토오크에 의한 응력 증가현상을 제거할 수 있는 조립 토오크값을 선정할 수 있다.
- 4) 본 연구의 대상이 되는 로켓 모터에서는 조립시 나사부에 몰리코트 윤활제 도포를 추천하며, 조립 토오크를 200ft-lbs로 적용할 경우 최대 작동압력까지 나사의 풀림현상을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. H. Bickford, "An introduction to the design and behavior of bolted joints", Marcel Dekker, Inc, 1995.
- [2] A. Yamamoto, "The theory and computation of thread connection", Youkendo, Yokyo, pp.39~54, 1980.
- [3] I. R. Grosse, L. D. Nitchell, "Non-linear axial stiffness characteristic of axisymmetric bolted joint", Trans. ASME J. Mechanical Design 112, pp.442~449, 1990.
- [4] T. F. Lehnohoff, W. E. Wistehuff, "Non-linear effects on the stress and deformations of bolted joints", Trans. ASME J. Mechanical Design, 118, pp.54~58, 1996.
- [5] J. J. Chen, Y. S. Shih, "A study of the helical effect on the thread connection by three dimensional finite element analysis", Nuclear Engineering and Design 191, pp.109~116, 1999.
- [6] 2005 MSC. MARC Topic Seminar, "Contact analysis with MSC. Marc", April 2005.
- [7] 2005 MSC. MARC User's Guide Ch.2.2 "Thermo-Mechanical analysis of cylinder head joint with quadratic contact", pp.2.2.13~2.2.18
- [8] 2005 MSC. Marc User's Manual Vol. A, "Theory and user information: chap. 9 boundary conditions, overclosure tying", pp.628~631.
- [9] R. L. Roehrich, "Torquing Stresses in Lubricated Bolts", Machine Design, pp.171~175, 1967. 6.