

## 技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.39.1.90

## 키크모터 플렉시블 씰 개발을 위한 고무의 성능 평가

김병훈\*, 권태훈\*\*, 조인현\*

## The Rubber Performance Evaluation for Kick Motor Flexible Seal

Byung Hun Kim\*, Tae-Hoon Kwon\*\* and In-Hyun Cho\*

## ABSTRACT

A Kick Motor, KSLV-I second stage propulsion system, utilizes a flexible seal for pitch and yaw axis controls during combustion. A flexible seal consists of the alternate laminate of rubber and composite reinforcement between forward and aft rings. A Kick Motor nozzle is rotated by the shear deformation of rubber layers. Consequently, the development of rubber, which is appropriate to the usage condition of flexible seal, is very important. A tensile test, QLS test (shear modulus and failure shear stress), and aging test have been carried out to confirm the performance of rubber developed. Test results show that the shear modulus of rubber are 0.4310 ~ 0.4997MPa and the failure shear stress is more than 2.5MPa.

## 초 록

KSLV-I 상단부 키크모터는 연소 중 피치 및 요 축 자세제어를 위해 플렉시블 씰이 적용된 구동 노즐을 사용하였다. 플렉시블 씰은 고무와 보강재를 번갈아 가며 적층하며, 고무의 변형을 통해 노즐이 회전할 수 있도록 한다. 따라서 플렉시블 씰 개발에서 노즐의 운용 조건에 맞는 고무를 개발하는 것은 매우 중요하다. 키크모터 플렉시블 씰 제작에 사용된 고무의 성능 평가를 위해 단축 인장시험, QLS 시험(전단 계수, 파단 전단응력), 노화 시험을 수행하였다. 시험 결과 고무의 전단 계수는 0.4310 ~ 0.4997MPa 범위를 가지며, 고무의 파단 전단응력은 2.5MPa 이상을 보이고 있다.

**Key Words** : Movable Nozzle(구동 노즐), Flexible Seal(플렉시블 씰), Rubber(고무), Shear Modulus(전단계수)

## 1. 서 론

고체모터에 적용되는 노즐은 크게 고정형 노즐(Fixed Nozzle)과 구동형 노즐이(Movable Nozzle) 있다. 이중 현재 사용되고 있는 많은 고체모터는 구동형 노즐을 사용하여 비행 중 모터의 자세제어를 수행한다.

구동형 노즐의 경우 노즐은 고정부와 운동부로 나누어지며, 고정부와 운동부 사이에는 베어링에 준하는 구동 부품이 설치되어 노즐의 운동부가 회전될 수 있도록 한다. 이러한 장치에는 테크롤 조인트(Techroll Joint), 볼 앤 소켓(Ball and Socket), 플렉시블 씰(Flexible Seal) 등이 있다.

테크롤 조인트는 1970년대 CSD(Chemical Systems Division)에 의해 개발되었으며, 미국의 IUS(Inertial Upper Stage)에 성공적으로 적용되었다. 테크롤 조인트를 사용한 구동 노즐 시스템은 노즐 구동에 필요한 구동력이 다른 시스템보

† 2010년 10월 11일 접수 ~ 2010년 12월 17일 심사완료

\* 정희원, 항공우주연구원 추진제어팀

교신저자, E-mail : bhk@kari.re.kr

대전광역시 유성구 어은동 45번지

\*\* 정희원, (주)한화 대전 공장

다 비교적 작은 것으로 알려져 있다[1,5].

불 엔 소켓은 1960년대 개발되었으며, 미국의 THAAD 및 Tomahawk 부스터 노즐에 적용되었다. 불 엔 소켓이 적용된 구동 시스템은 노즐의 외형이 플렉시블 썰이 적용된 노즐보다 작은 장점이 있다. 그러나 구동 파트의 공차 요구 조건이 매우 엄격하며, 제작비용이 상대적으로 높은 것으로 알려져 있다[1].

플렉시블 썰은 1963년 Lockheed Propulsion Company에 있는 John T. Herbert에 의해 개발되었으며, 스페이스 셔틀 부스터, 아리안 5 부스터와 같은 상업용 발사체 및 피스키피, 트라이던트 I, 트라이던트 II 와 같은 군사용에 이르기까지 수많은 고체모터에서 성공적으로 적용되었으며, 매우 높은 신뢰성을 보여주고 있다[1].

플렉시블 썰의 형상, 제원 그리고 구동 특성에 관한 자료는 비교적 많이 제시되어 있다[2-4]. 그러나 플렉시블 썰 성능에서 중요한 고무의 특성에 관한 자료는 거의 찾아보기 어려우며, 제시된 자료 또한 단편적인 고무 물성만 제시된 정도이다.

특히 노즐의 구동 토크는 고무의 전단계수에 비례하여 증가하는 특성을 가지기 때문에, 노즐의 구동 토크를 줄이기 위해서는 전단계수가 작은 고무를 사용하여야 한다. 그러나 고무의 전단계수가 너무 작을 경우 제작된 고무마다 물성 변화가 크게 나타나 플렉시블 썰의 성능이 불안정한 특성을 보이는 것으로 알려져 있다[2,3].

따라서 본 연구는 고무의 전단계수가 플렉시블 썰의 성능 요구 조건을 만족하며, 제작된 고무의 물성 변화가 작은 고무를 개발하데 있다.

그림 1은 항공우주연구원에서 개발한 플렉시블 썰의 모습을 보여준다. 그림에서 볼록한 부분은 보강재를 나타내며, 오목한 곳은 고무가 적층된 부분이다.

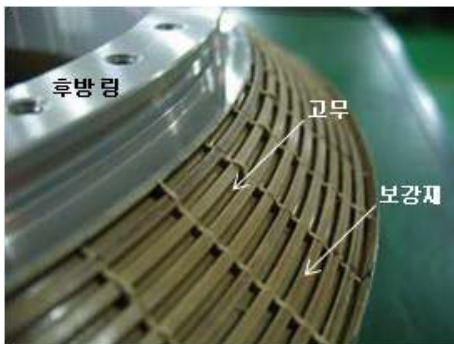


그림 1. 플렉시블 썰

## II. 본 론

### 2.1 고무의 개발 요구 조건

플렉시블 썰에 사용되는 고무의 개발에 있어서 가장 중요한 것은 전단계수가 작으며 제작된 고무마다 물성 변화가 적은 고무를 개발하는 것이다[2]. 또한 플렉시블 썰 성능에서 고무의 특성이 매우 중요하기 때문에 장기 보관에 따른 고무의 노화 특성을 알아야 한다.

표 1은 KSLV-I 키크모터에 적용된 플렉시블 썰의 제원 및 고무의 개발 조건을 보여준다.

일반적으로 플렉시블 썰의 피봇 반경은 노즐 목 직경에 의해 결정된다[3]. 따라서 제한된 설계 조건에서 노즐의 구동 토크를 감소시키기 위해서는 전단계수가 작은 고무를 개발하여야 한다. 또한 고무 층에 작용하는 전단응력을 감소시키기 위해서는 각각의 고무 층의 두께가 얇으며, 고무 층의 층수가 증가하도록 설계하여야 한다[2].

이를 위해 제한된 형상 조건에서 고무 층의 총 두께가 16mm ~ 19.6mm, 고무 층의 수가 7 ~ 10개인 여러 조건에 대하여 설계를 수행하였다. 이러한 설계를 통해 고무 층의 총 두께가 18mm이며, 고무 층의 수가 10개인 플렉시블 썰을 선정하였다. 현재 고무 층의 설계 및 키크모터의 운용 조건에서 고무 층에 작용하는 전단응력은 최대 약 1.25MPa 이다. 또한 노즐 구동에 필요한 구동 토크를 만족하기 위한 고무의 전단계수는 약 0.6MPa 이하여야 한다.

표 1. 플렉시블 썰 제원 및 고무 개발 조건

항목	요구조건
구동 점 위치	Aft-Pivot
구동 토크	≤ 60kgf-m/deg
구동 각 (피치, 요)	Max. ±3°
고무 두께	1.8mm
고무 층 개수	10
고무소재	천연고무
전단계수	≤ 0.6MPa
전단응력	≥ 1.25MPa

## 2.2 시험 평가

플렉시블 썰에 사용된 고무의 성능 평가를 수행하였다. 고무의 성능 평가는 크게 단축 인장시험, 고무의 전단계수 및 전단응력을 확인하기 위한 QLS(Quadruple Lap Shear)시험 그리고 시간 경과에 따른 고무의 물성 변화를 확인하기 위해 노화 시험(Aging)을 수행하였다. 또한 고무의 재현성을 확인하기 위해 모든 시험은 플렉시블 썰의 제작 시 마다 시편을 제작하여 고무의 물성 변화 정도를 확인하였다.

### 2.2.1 단축 인장시험

단축 인장시험은 고무의 가장 기본이 되는 물성 시험이다. 즉 플렉시블 썰의 제작에 앞서 고무의 인장 강도를 확인함으로써 고무의 품질을 확인하여 플렉시블 썰의 불량 요소를 줄이는 목적으로 수행되었다.

단축 인장시험을 위한 시편은 한국산업 규격 KS M 6518 "가황고무 물리시험 방법" 기준으로 수행하였다[6]. 인장 시편은 각각의 플렉시블 썰 제작 시 마다 3개를 제작하였으며, 시험기의 인장 속도는 500.0mm/min로 설정하였다. 그림 2는 플렉시블 썰 제작에 사용된 고무의 인장 시험 결과를 보여준다. 키크모터 플렉시블 썰 제작에 사용된 고무의 인장 강도는 평균 15.89MPa 정도이며, 연신율은 약 640% 이상을 보이고 있다.

### 2.2.2 QLS 시험

플렉시블 썰에 사용되는 고무의 시험에서 가장 중요한 것은 고무의 전단계수와 파단 전단응력을 확인하는 것이다.

고무의 전단계수와 파단 전단응력을 확인하기 위해 QLS 시험을 수행하였다.

시험을 위한 시편은 플렉시블 썰 제작 시 마다 총 10개를 제작하였다. 이중 5개의 시편을 이용하여 고무의 전단계수 및 전단응력을 확인하였으며, 나머지 5개의 시편은 고무 노화에 따른 전단계수 변화를 확인하기 위해 보관하였다.

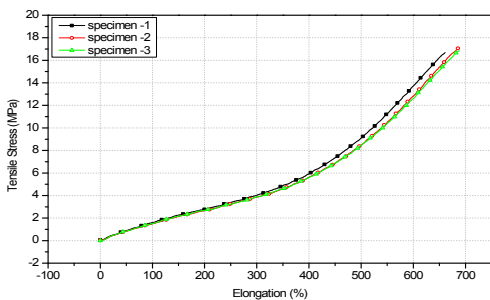


그림 2. 인장시험 결과

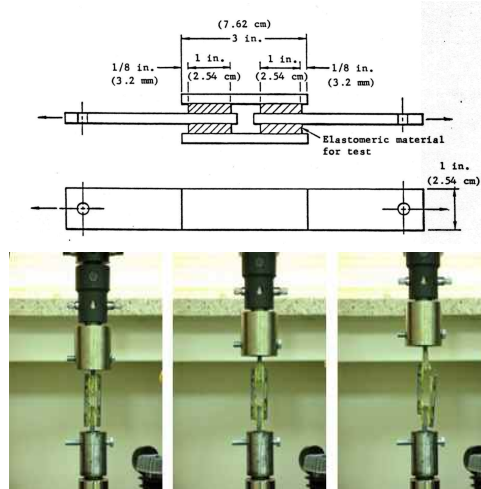


그림 3. QLS 시편 및 시험 모습

그림 3은 고무의 전단계수를 측정하기 위해 사용된 QLS 시편 규격 및 시험 모습을 보여준다. 시편 제작은 NASA SP 8114에서 제시된 규격을 참고하였다[2].

고무 재료는 점탄성 재료이기 때문에 일반적으로 시험 속도에 따라 고무의 물성 값이 다르게 측정되는 것으로 알려져 있다. 즉 고무의 인장 속도가 느릴수록 강성은 떨어지며, 인장 속도가 빠를수록 강성은 올라간다. 따라서 고무 재료의 물성 시험을 하기 위해서는 적절한 시험 속도를 먼저 선택해야 한다[7].

미국 스페이스 셔틀 부스터 노즐 플렉시블 썰에 사용된 고무의 경우 고무의 시험 속도가 12.7mm/min에서 3048mm/min으로 약 240배 증가할 때 고무의 전단계수가 약 16.9% 정도 증가한다고 보고하였다[8].

시험 속도에 따른 고무의 전단계수 변화를 확인하기 위해 서로 다른 시험 속도에서 전단계수를 측정하였다. 시험 속도는 시험 장치의 성능 및 플렉시블 썰의 회전 각 속도 요구 조건을 고려하여 선정하였다. 그림 4는 시험 속도가 각각 25.4mm/min, 508mm/min일 때 개발된 고무의 전단계수 시험 결과를 보여준다. 시험 범위에서 고무의 인장 속도가 증가할 때 전단계수가 약간 3.7% 정도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 이러한 수준의 전단계수 증가는 고무 재료 시험 평가에서는 미미한 수준으로 판단된다. 이에 이후 시험에서는 고무의 시험 속도를 25.4mm/min으로 설정하였다.

고무는 변형을 받으면 초기 상태의 분자 구조가 수정 및 재배치로 인하여 강성이 낮아지며 댐

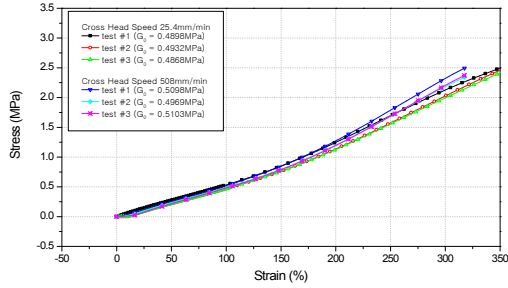


그림 4. 시험 속도에 따른 전단계수 변화

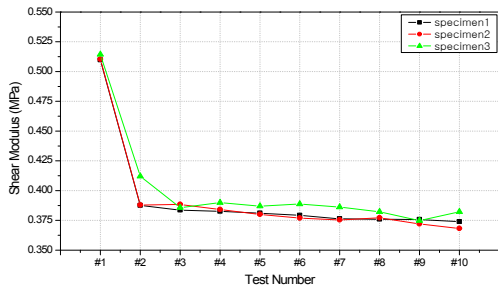


그림 5. 물린스 효과에 의한 전단계수 변화

핑(damping) 특성이 변하는 것으로 알려져 있다. 고무의 이러한 현상을 물린스(Mullins) 효과라고 한다[7]. 특히 경도가 높은 재료일수록 물린스 효과가 크게 나타나는 것으로 알려져 있다. 이러한 특성으로 인해 고무는 부하(Loading)와 제하(Unloading)과정을 대략 3 ~ 10회 정도 반복하여야 고무의 시험 특성이 안정화 된다[7,8].

그림 5는 고무를 350%까지 변형시켜 부하 제하 과정을 10회 반복할 때 고무의 전단계수 변화를 보여준다. 물린스 효과에 의해 개발된 고무의 전단계수는 초기에 급격히 감소하다가 2회 시험이 후 안정화 되는 것을 볼 수 있다. 시험에서 초기 값에 대한 전단계수 감소율은 2회 시험 후 약 22.61%정도 급격히 감소하다 이후의 반복 과정에서 감소율은 매우 작은 값을 보이고 있다.

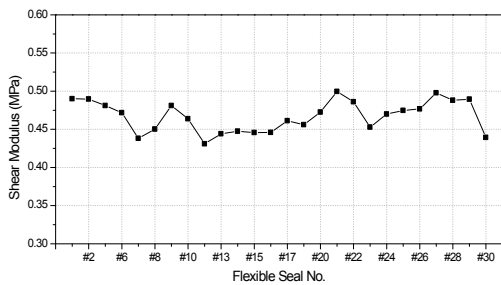


그림 6. 고무의 전단계수 측정 결과

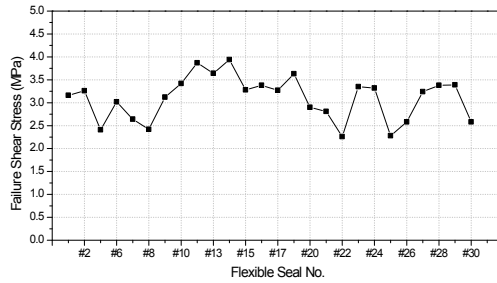


그림 7. 고무의 파단 전단응력 측정 결과

그림 6 및 그림 7은 각각 플렉시블 셸 제작에 사용된 고무의 전단계수 및 파단 전단응력 측정 결과를 보여준다. 플렉시블 셸 제작에 사용된 고무의 전단계수는 0.4310MPa에서 0.4997MPa 정도를 보이고 있으며, 파단 전단응력은 최하 2.26MPa 이상을 보인다. 모든 경우에서 고무의 개발 요구 조건인 전단계수 0.6MPa 이하, 파단 전단응력 1.25MPa 이상을 보이고 있다.

### 2.2.4 고무 노화 시험

플렉시블 셸과 같이 고무가 사용된 제품의 경우, 고무 노화에 의해 제품의 성능이 변한다.

NASA SP 8114에 의하면 온도 및 습도가 각각 300K, 50%인 조건에서 보관된 플렉시블 셸의 구동 토크가 고무 노화에 의해 3년 반 동안 매년 약 6%정도 증가하고 이후 구동 토크의 증가는 미미한 수준이라고 보고하였다[3]. 또한 미국의 대륙간 탄도 미사일인 피스키퍼 MX 노즐의 경우 고무 노화에 의해 노즐 구동 토크가 초기에 비해 약 22.8% 정도 증가한다고 보고하였다[10]. 이러한 구동 토크의 증가는 거의 대부분 고무 노화에 따른 전단계수 증가에 의한 영향이다.

고무 노화에 따른 고무의 물성 변화를 확인하기 위해 전단계수 측정해 사용한 QLS 시편을 사용하였다. 고무 노화에 있어서 온도 및 습도 조건이 중요하기 때문에 시편은 온도가 20±2℃로 유지되는 항온실에 밀봉하여 보관하였다. 시험은 제작된 시편 수량이 제한되어 있기 때문에 1년 단위로 총 2년 수행하였으며, 측정된 전단계수를 초기에 측정된 결과와 비교하였다.

그림 8은 노화에 따른 고무의 전단계수 변화를 보여준다. 모든 경우에서 시간이 경과 하면서 고무의 전단계수가 증가하는 것을 볼 수 있다.

초기 1년 동안 전단계수 증가는 평균 12.36% 정도 이며, 2년 후 전단계수의 증가율은 평균 4.01%정도 이다[11]. 현재 고무 노화에 대한 시험 결과가 많지는 않지만 고무 노화에 의한 전단계

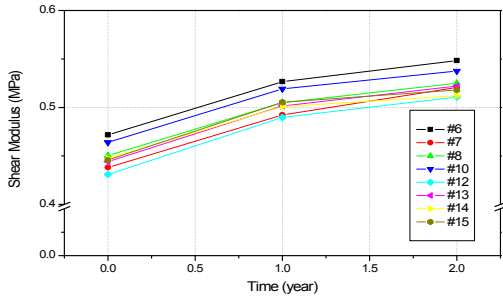


그림 8. 노화에 따른 전단계수 변화

수 증가는 시간이 지나면서 안정화 될 것이라는 것을 예측할 수 있다. 또한 이것은 NASA SP 8114에서도 언급한 바와 같이, 고무 노화에 따른 플렉시블 썰의 구동 토크 증가는 시간이 지나면서 일정 수준으로 수렴되는 경향을 보일 것으로 예측된다.

2.2.5 고무 재현성

고무는 금속 부품과 달리 제작된 고무의 물성 변화가 비교적 큰 것으로 알려져 있다. 이러한 물성 변화 차이는 제품의 신뢰성을 저하시키는 중요한 요인이 되기도 한다. 따라서 플렉시블 썰 제작 과정에서 지속적으로 고무의 전단계수를 측정하여 고무의 물성 변화를 확인하였다.

그림 9는 플렉시블 썰 제작을 위해 생산된 고무의 전단계수 변화를 평균값에 대한 편차로 분석한 결과이다. 또한 상대 비교를 위해 스페이스 셔틀 부스터의 플렉시블 썰 제작에 사용된 고무를 물성 변화 정도를 표시하였다[12].

키크모터에 사용된 고무의 전단계수는 평균 값 대비 -7.7% ~ 7.0% 정도인 반면, 스페이스 셔틀 부스터에 사용된 고무의 전단계수는 평균 값 대비 -20% ~ 17% 정도의 편차를 보이고 있다.

이것은 앞서서도 언급한 바와 같이 플렉시블 썰 제작에 사용되는 고무의 전단계수 차이에 의한 결과로 보인다. 실제 스페이스 셔틀 부스터에

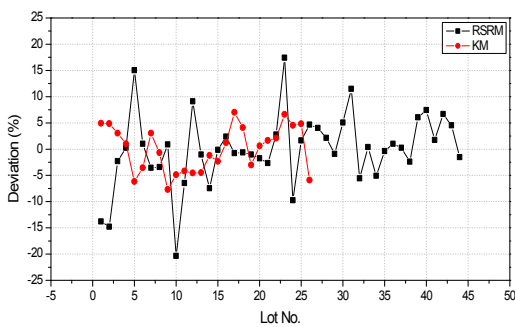


그림 9. 고무 로트 별 전단계수의 변화

사용되는 플렉시블 썰용 고무의 전단계수는 0.13MPa 정도로 키크모터 플렉시블 썰에 사용된 고무의 전단계수에 비해 작은 값을 보이고 있다[12].

III. 결 론

키크모터 플렉시블 썰에 사용된 고무의 성능 평가를 수행하였다. 개발된 고무는 천연고무를 사용하였으며, 개발된 고무의 특성을 확인하기 위해 단축 인장시험, QLS 시험(전단계수, 파단 전단응력), 노화 시험을 수행하였다. 또한 플렉시블 썰 제작 시 마다 고무의 물성을 측정하여 고무의 물성 변화 정도를 확인하였다. 시험 결과 개발된 고무의 특성은 플렉시블 썰의 성능 요구 조건을 만족하는 것을 확인하였다.

1. 플렉시블 썰 제작에 사용된 고무의 평균 파단 인장 강도는 15.89MPa, 평균 연신율은 640.39% 정도를 보이고 있다.

2. 플렉시블 썰 제작에 사용된 고무의 전단계수 및 파단 전단응력을 확인하기 위해 QLS 시험을 수행하였다. 시험 결과 고무의 전단계수는 0.4310 ~ 0.4997MPa정도이며, 고무의 파단 전단응력은 2.26MPa이상으로 모두 설계 요구 조건을 만족하고 있다.

3. 장기 보관에 따른 고무의 물성 변화를 확인하였으며, 시험 범위에서 고무의 전단계수는 초기 1년 동안 약 12.36% 정도 증가하지만, 그 이후 증가율은 약 4%정도로 감소하는 것을 확인하였다.

4. 고무의 재현성을 확인하기 위해 제작된 QLS 시험 결과를 분석하였다. 분석 결과 고무의 전단계수의 변화는 평균 값 대비 -7.7 ~ 7.0%정도이며, 이것은 스페이스 셔틀 부스터에 사용된 고무의 물성 변화 정도에 비해 양호한 결과를 보이고 있다.

후 기

본 연구는 “소형위성 발사체 (KSLV-I) 개발 사업”의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1) Leonard H. Caveny, Robert L. Geisler, Russell A. Ellis, "Solid Rocket Enabling

Technologies and Milestones in the United States", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 6, November-December 2003, pp. 1038~1066.

2) NASA, "Solid Rocket Thrust Vector Control", SP-8114.

3) R. Akiba, M. Kohno, H. Inohara, T. Fujiwara, T. Murakami, "Development of Movable for Solid Rocket Motor" AIAA Paper 83-2285.

4) William S. Prins, Scott A. Meyer, Paul D. Cox, "Advanced Solid Rocket Motor Nozzle Thrust Vector Control Flexseal Development Status", AIAA-92-3553.

5) Charles A. Chase, "IUS Propulsion Status", AIAA No. 84-1192, June 1984.

6) "Physical Testing Method for Vulcanized

Rubber", KS M 6518, 1996.

7) 우창수, "고무부품의 피로수명 예측 및 평가에 관한 연구", 영남대학교 기계공학과 박사학위 논문, 2004.

8) "Block II SRM Conceptual Design Studies Final Report", Morton Thiokol, Inc.

9) 권태훈, 노태호, 서혁, "QLS시편의 반복인장시험을 통한 고무 전단 갯성 연구", 군사과학기술학회, 2007.

10) A. R. Canfield, G. C. Lamere, M. B. Kuwana, A. L. Chambers, "MX first stage nozzle development", AIAA-1981-1576.

11) 김병훈, 권태훈, 조인현, "고체모터 플렉시블 셸을 위한 고무 특성 시험", 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 2008.

12) Thiokol, "Flex bearing UUEC final report", NASA-CR-193900, 1993.