

고압하 추력중단장치의 변형거동 연구

박성환* · 장홍빈** · 이환규** · 강문중** · 김재훈***

A Study on Deformation Behavior of Thrust Cut Off System under High Pressure

Sunghan Park* · Hongbeen Chang** · Hwangyu Lee** · Moonjung Kang** · Jaehoon Kim***

ABSTRACT

Thrust cut off(TCO) system is installed at the port of a rocket motor case forward dome. The snap ring and the closure are escaped sequentially by pulling out a wedge under internal pressure. The hydraulic structural tests of TCO and numerical simulations were performed, and both results were compared to understand the deformation behavior of TCO. By increasing splines symmetrically, the sealing capacity of TCO can be improved significantly. The escape pressure of TCO increases according to the increase of friction coefficient and there is a critical friction coefficient beyond which the snap ring can not be nearly escaped even after forced escape of wedge. Under low friction coefficient the snap ring is contracted to radial direction and easily escaped. But, under high friction coefficient, the snap ring can not be escaped from the port even after severe plastic deformation.

초 록

추력중단장치는 연소관 전방 도움부의 구멍에 설치되며 연소관에 내압 작용 시 썰기가 강제로 이탈 되면 스냅링과 마개가 순차적으로 이탈된다. 이 장치의 변형거동을 이해하기 위하여 수압 구조시험 및 구조해석을 수행하여 그 결과를 비교분석하였다. 추력중단 구멍에 설치되는 분할선의 개수를 대칭적으로 증가시키면 추력중단장치의 기밀성능은 크게 향상된다. 부품간의 마찰계수가 증가하면 추력중단 장치의 이탈압력이 증가하며 썰기가 강제 이탈된 상태에서도 스냅링 및 마개의 이탈이 불가능한 임계 마찰계수가 존재한다. 스냅링은 마찰계수가 작으면 반경 방향으로 수축하여 이탈하며 마찰계수가 크면 상당한 소성 변형을 받은 후에도 이탈되지 않는 거동을 보인다.

Key Words: Thrust Cut off System(추력중단장치), Port(구멍), Spline(분할선), Snap Ring(스냅링) Wedge(썰기), Closure(마개), Sealing(기밀), Critical Friction Factor(임계마찰계수), Squeeze(압축률), Escape Pressure(이탈압력)

† 2005년 9월 28일 접수 ~ 2005년 12월 9일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 기4-4

** 정회원, 국방과학연구소 기4-1

*** 정회원, 충남대학교 기계설계공학과
연락처, E-mail: psh4534@empal.com

1. 서 론

추력중단(Thrust Cut Off) 장치는 추력중단 명령이 내려지는 순간 연소관 도움(Dome)부의 구

멍을 개방해서 연소관의 압력을 급격히 떨어뜨려 추진기관의 연소를 중단시키는 역할을 한다. 추력중단장치는 연소관의 전방 도움부에 가공된 구멍(Port)에 스냅링(Snap ring), 마개(Closure), 썸(Wedge) 등을 장착하여 구성된다.

스냅링은 썸이 장착된 상태에서 마개에 전달되는 연소가스의 고압을 견디어야 하고 썸이 강제 이탈된 후에는 저압에서 쉽게 이탈되도록 설계되어야 한다.

이 장치의 기능 실패는 작동 명령이 없는 상태에서 스냅링의 조기 이탈, 마개 홈에 설치된 오링(O-ring)의 기밀(Sealing) 실패 및 썸이 강제 이탈되고 난 후 스냅링의 이탈 실패 등으로 분류된다. 특히 오링의 기밀실패는 유도탄이 폭발되는 엄청난 재앙을 초래할 수 있다.[1]

썸을 기계적으로 이탈시키는 추력중단 장치는 썸이 장착용으로 썸이 위치하는 부분에 한 개의 분할선만을 적용해왔다. 그러나 이 모델에서 마개에 고압이 작용하면 분할선이 설치된 구멍부는 축 방향(마개이탈 방향) 하중지지 능력이 분할선이 없는 부위에 비해 상대적으로 저하되어 마개가 추력중단 구멍의 중심축과 비스듬하게 기울어지게 된다. 따라서 오링의 압축을(Squeeze)이 원주 방향으로 불균일해지며 오링의 기밀성능이 저하되고 유도탄의 기밀과피를 유발할 수 있다.

스냅링의 구조안전성에 대한 연구는 시도된 적이 있으나[2, 3] 기밀성능 및 변형거동을 분석하기 위한 이렇다 할 연구결과가 제시되지 않는 상황이다. 추력중단장치의 상세한 변형 거동을 분석하기 위하여 각 부품간의 접촉 및 미끌림, 압축에 의한 변형과 같은 복잡한 재료 및 기하, 접촉 비선형을 고려하여 구조해석이 수행되어야 한다.

본 연구에서는 구조해석 및 수압구조시험을 통하여 구멍에 가공된 분할선의 개수를 변경하여 스냅링과 마개의 변형거동 및 구조안전성에 주는 영향을 분석하였고 추가로 추력중단장치의 이탈 거동에 주는 마찰계수의 영향을 수치적으로 평가하였다.

2. 추력중단장치 구조해석

2.1 해석모델

Figure 1은 추력중단장치의 형상을 개략적으로 나타내는 개념도이다. 추력중단장치는 연소관의 전방 도움부에 가공된 구멍에 장착된 마개가 압력에 빠져나가지 못하도록 스냅링을 구멍의 홈(Groove)에 장착하고, 스냅링의 수축을 방지하기 위하여 스냅링의 양단을 썸이 지탱하도록 설계되었다. 또한 추력중단 명령 시 썸이 빠져나가도록 구멍에 분할선(Spline)이 가공되어 있다.

Figure 2는 추력중단장치의 3차원 선형요소로 구성된 구조해석모델이며 정적 구조해석용 소프트웨어로 MARC[4]를 사용하였다. 구멍에 두 개의 분할선이 180° 대칭으로 설계되어 있으며 스냅링과 구멍의 조립부에서 기밀을 유지하기 위하여 마개의 홈(Groove)에 두 개의 오링이 설치된다. 해석 모델은 분할선의 영향을 평가하기 위하여 분할선 1개 모델, 2개 모델, 4개 모델의 3가지로 구성되며 복수 분할선의 경우 대칭으로 설치하였다. 추력중단장치의 대칭성을 고려하여 180° 만 모델링하였다.

2.2 하중 및 경계조건

하중 조건은 첫째, 썸이 장착된 상태에서 스냅링이 이탈하는 압력을 평가하기 위하여 연소관의 오링 장착부 및 마개에 압력을 적용하였다. 둘째, 720 psi의 일정한 압력에서 썸을 강제 이탈시키고 난 후 스냅링이 이탈하도록 압력을 증가시켰다. 또한 추력중단 마개의 이탈압력에 미치는 마찰계수의 영향을 분석하기 위하여 썸이 장착 및 강제 이탈 해석에서 부품간의 마찰계수를 0.10, 0.15, 0.17, 0.2, 0.23, 0.25, 0.30으로 변화시켜 구조해석을 수행하였다. 대칭면에 대칭 변위경계조건을 적용하였으며 연소관 외면의 변위를 고정하여 추력중단장치의 강제운동을 방지하였다. 해석의 수렴성 때문에 해석 초기에 스냅링이 구멍의 홈 측면과 접촉하며, 썸과 스냅링이 원주 방향으로 접촉하고, 마개가 스냅링 및 썸과 구멍의 중심축 방향으로 접촉한다고 가

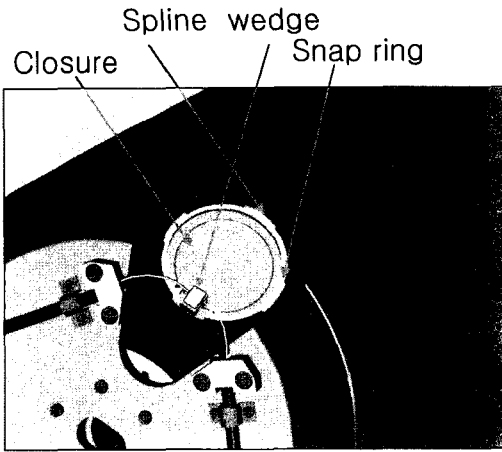


Fig. 1 The Schematic of TCO System

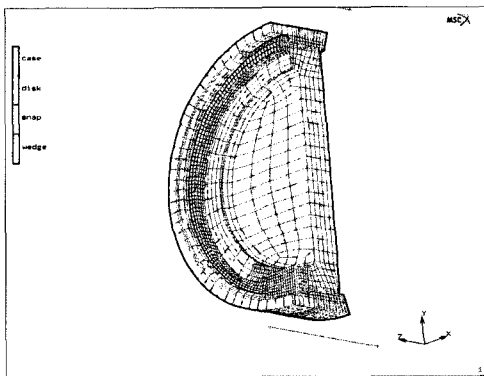


Fig. 2 The Finite Element Model for Thrust Cut Off System

정하였다. 해석모델에서 오링은 고려하지 않았다.

23 기계적 물성값

Table 1은 추력중단장치의 구조해석에 사용된 재료 및 기계적 물성값을 나타낸다.

3. 추력중단장치 구조시험

분할선이 구조안전성 및 변형거동에 주는 영향을 평가하기 위하여 분할선 1개, 2개, 4개를

Table 1. Mechanical Properties Used in Structural Analysis of Thrust Cut Off System

	port	closure	snap ring/ wedge
Material	4130	SCM435	maraging
E(kg/mm ²)	21000		18900
v(Poisson's ratio)	0.3		0.3
1st yield stress /plastic strain	110.76 / 0.0		168 / 0.0
2nd yield stress /plastic strain	123.73 / 0.0163		180 / 0.0045

갖는 압력용기를 제작하여 마개가 토출될 때까지 수압을 연속적으로 증가시켰다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 변위 게이지 4개를 추력중단 구멍의 마개 측면에 부착하여 마개가 구멍의 중심축에 대하여 기울어지는 정도 즉 구멍의 중심축 방향으로 변위를 측정하였다. 마개 변위의 측정점은 분할선을 기준으로 90° 간격으로 선정되었으며 이 상대 변위가 오링의 기밀성능을 나타낸다.

Figure 3에 나타난 바와 같이 마개의 측면 가장자리에 센서고정용 링 치구를 설치하고 마개의 어느 위치나 모두 계측이 가능하도록 슬롯 지지부를 갖는 센서를 제작하여 장착하였다. 변위 계측용 센서는 얇은 판의 감지 요소를 갖는 외팔보 형으로서 표면에 부착된 스트레인 게이지로부터 굽힘 변형률을 계측할 수 있다. 신뢰할 수 있는 변위 계측을 위해 추력중단장치가 장착된 상태에서 0.0mm, 0.2mm, 0.4mm, 0.6mm, 0.0mm 순서로 게이지 블록을 끼워 넣는 방식으로 교정을 반복 수행하여 선형계수를 얻은 후, 시험을 수행하였다. 이때 계측된 값의 선형화에 의한 오차는 1% 이하였다. 변위 계측용 센서의 감도는 0.6mm의 변위에 대해 약 900μe의 변형률을 나타내었다. 또한 스냅링의 내면 중앙부에 원주 방향으로 스트레인 게이지를 부착하였다. 구조시험용 데이터 획득 장비인 시스템 4000을 사용하여 압력을 포함한 6 채널의 데이터를 연속적으로 계측하였다.

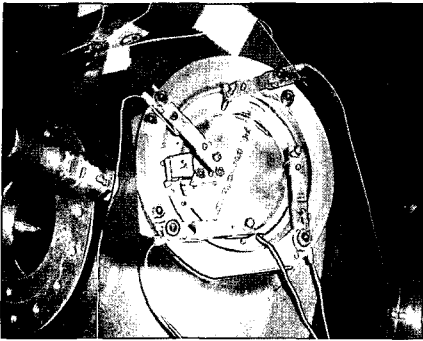


Fig. 3 The Hydrostatic Setup of a Motor Case Installed with Thrust Cut Off System

4. 결과 및 고찰

4.1 췌기 장착

4.1.1 기밀성

분할선이 1개, 2개 및 4개인 각 압력용기를 대상으로 스냅링의 변형률과 마개 변위에 대한 측정 및 구조해석 결과를 비교하였으며 구멍과 스냅링의 접촉 마찰계수를 0.1로 나머지 부품간 접촉 마찰계수를 0.05로 가정할 경우 구조해석 결과와 측정결과가 가장 비슷하였다.

Figure 4, Fig. 5 및 Fig. 6은 구멍과 스냅링의 접촉 마찰계수를 0.1로 나머지 부품간 접촉 마찰계수를 0.05로 가정할 경우 분할선이 1개, 2개 및 4개인 각 압력용기에 대하여 압력 증가 시 추력중단 구멍 중심축 방향의 변위에 대한 구조 시험 및 구조해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 췌기와 마주보는 180° 대칭위치에서 변위 측정 및 해석 결과를 비교하여 구조해석 모델 및 경계 조건 적용의 타당성을 확인하였다. 췌기 설치 위치에서 마개의 축 방향 변위 측정값은 해석결과와의 비교대상에서 제외되었다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 췌기가 설치된 위치에서는 췌기 이탈 방지핀이 부착되어 압력 작용시 췌기가 움직이므로 그 위치에서 측정값은 신뢰할 수 없을 것으로 판단되었다. Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6으로 부터 마개의 기울어짐 즉 췌기 설치부와 180° 대칭위치에서 축 방향 변위의 차이는 분할선의 개수가 증가할수록 작아지며 압력이 증가

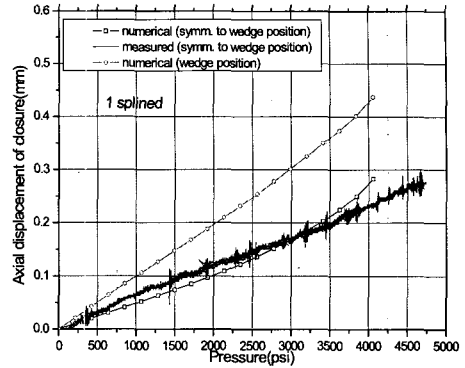


Fig. 4 Comparison of Measured and Analytical Axial Displacement of Closure for One Splined Model to Center Axis Direction(Z Direction of Figure 2) of Port

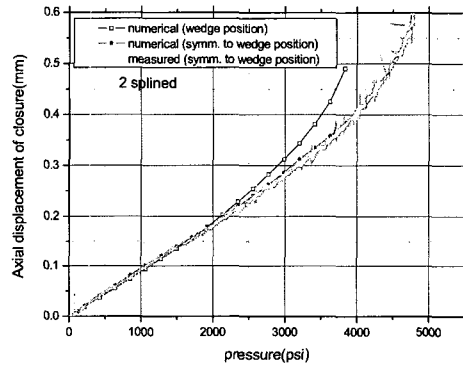


Fig. 5 Comparison of Measured and Analytical Axial Displacement of Closure for Two Splined Model to Center Axis Direction(Z Direction of Figure 2) of Port

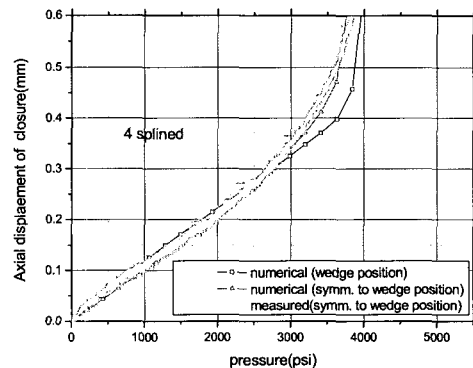


Fig. 6 Comparison of Measured and Analytical Axial Displacement of Closure for Four Splined Model to Center Axis Direction(Z Direction of Figure 2) of Port

할수록 커지는 타당한 결과를 나타내었다.

구조시험 및 구조해석 결과로부터 분할선의 개수가 증가되면 추력중단 장치의 기밀성능이 크게 향상됨을 알 수 있다.

이와 같은 구조해석결과의 타당성은 각 압력 용기에 대한 수압파열시험 후 오링의 손상여부를 육안 검사한 결과로부터 확인되었다.

4.1.2 구조 안전성

추력중단 장치 부품 중에서 스냅링이 가장 큰 구조하중을 받는다. Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9는 구멍과 스냅링의 접촉 마찰계수를 0.1로 나머지 부품간 접촉 마찰계수를 0.05로 가정할 경우 분할선이 1개, 2개 및 4개인 각 압력용기를 대상으로 스냅링의 원주 방향 변형률에 대한 구조시험 및 구조해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 각 압력용기에 대하여 스냅링의 원주 방향 변형률 측정값은 구조해석결과와 근접함을 알 수 있다. 스냅링의 변형률은 분할선의 개수가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 분할선의 개수와 상관없이 일정한 내압에서 스냅링에 작용하는 반경 방향 마찰하중의 총합은 일정하다. 그러나 분할선의 개수가 증가할수록 스냅링과 구멍의 접촉 면적이 작아져 반경 방향 마찰하중이 재분포하며 이에 따라 스냅링을 반경 방향으로 수축시키려는 면내(in plane) 굽힘 모멘트가 증가되기 때문에 판단된다.

Figure 10은 각 분할선 모델에 대하여 마찰계수 0.15-0.25를 적용한 구조해석결과이며 압력에 따른 스트레인 게이지가 부착된 요소에서 스냅링의 원주 방향 변형률을 나타낸 것이다. 마찰계수가 증가할수록 원주 방향 변형률의 절대치가 감소하는 경향 즉 이탈압력이 증가하는 경향을 보인다.

스냅링의 원주 방향 변형률은 압력 하에서 압축 거동을 나타내며 압력이 증가할수록 압축 변형률이 증가한다. 그러나 압축 변형률은 마찰계수가 클수록 분할선 수가 작을수록 감소하는 경향을 나타낸다. 이 결과는 스냅링이 압력 작용시 반경 방향의 마찰하중을 받으며 마찰 계수가

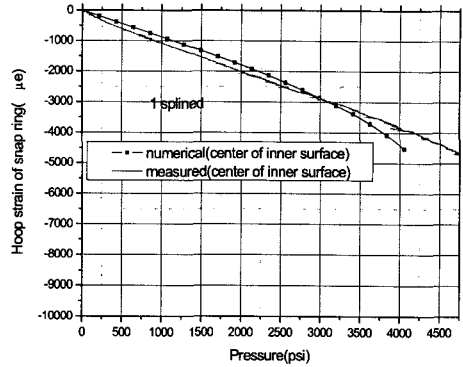


Fig. 7 Comparison of Measured and Analytical Hoop Strain of Snap Ring for One Splined Model

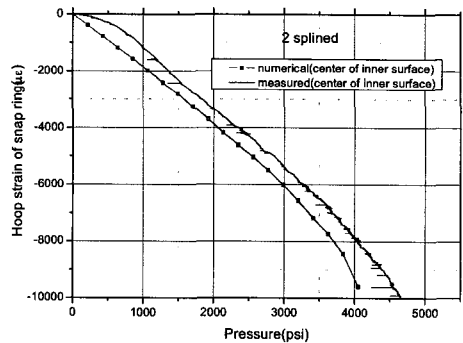


Fig. 8 Comparison of Measured and Analytical Hoop Strain of Snap Ring for Two Splined Model

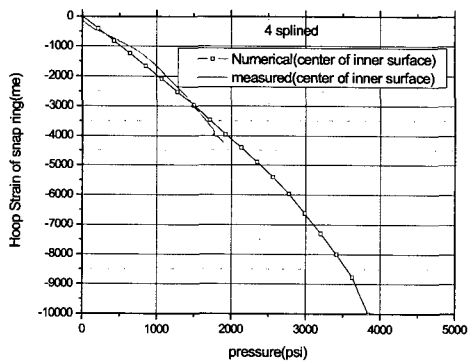


Fig. 9 Comparison of Measured and Analytical Hoop Strain of Snap Ring for Four Splined Model

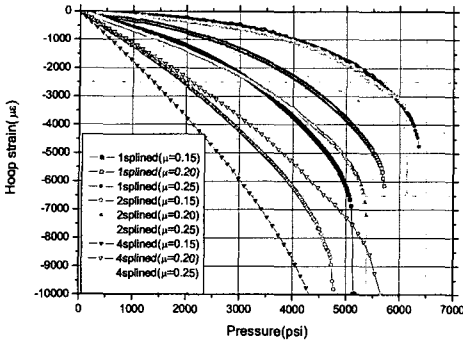


Fig. 10 Comparison of Analytical Hoop Strain of Snap Ring according to Friction Coefficients for Two Splined Model

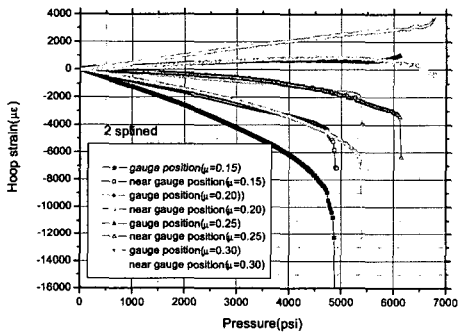


Fig. 11 Comparison of Analytical Hoop Strain of Snap Ring at Gage and near to Gage Position according to Friction Coefficients for Two Splined Model

작을 경우 스냅링이 수축하나 마찰계수가 증가하면 팽창하는 경향[5]과 일치한다.

Figure 11은 Fig. 10과 동일한 조건에서 2개의 분할선 모델에 대한 구조해석결과이며 Fig. 12에 나타낸 바와 같이 스트레인 게이지가 부착된 중앙부 요소(gage position)와 인접 요소(near gage position)에서 변형을 해석값을 비교하여 나타낸 것이다. 마찰계수가 0.25 이상에서는 중앙부 요소에서 인장 변형률이 나타난다.

Figure 11에서 인접 요소와 중앙부 요소의 원주 방향 변형률을 비교해보면 인접 요소의 경우 중앙부보다 압축 변형이 줄어드는 경향을 나타내는데 이는 압력에 의한 면외(out of plane) 굽힘

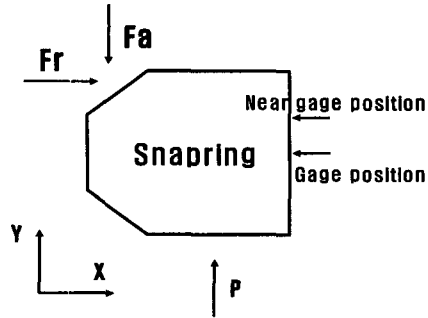


Fig. 12 Forces of Snap Ring

모멘트가 작용하여 인장 변형률이 추가되었기 때문이다. 즉 Fig. 12에 나타낸 바와 같이 압력 작용 시 반력 Fr 는 스냅링의 면내 굽힘 모멘트를 유발하고 압력 P 는 스냅링의 면의 굽힘 모멘트를 발생시킨다. 이와 같이 스냅링의 변형은 면내 굽힘 모멘트와 면의 굽힘 모멘트의 조합으로 발생한다.

썩기를 장착한 상태에서 추력중단 장치의 이탈거동은 압력이 증가되면 압력을 받는 면이 넓은 스냅링의 단부에 과도한 모멘트가 발생하여 단부가 굽힘 변형하며 단부와 면접촉하고 있는 썩기도 단부와 비슷한 회전 거동을 보이다가 먼저 썩기가 이탈되고 스냅링이 수축하여 이탈되고 마지막으로 마개가 이탈되어 구멍이 개방되는 순서이다.

4.2 썩기 강제 이탈

4.2.1 스냅링 이탈압력

Figure 13은 720psi의 압력에서 썩기를 강제 이탈 시킬 때 마찰계수 및 분할선 개수의 변경에 따른 압력과 스냅링의 원주 방향 변형률에 대한 구조해석결과이다. 스냅링의 원주 방향 변형률의 절대치는 동일한 마찰 계수 하에서 분할선의 개수가 증가할수록 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 앞에서 언급한 이유와 동일하게 면내 굽힘 모멘트의 증가 때문으로 판단된다.

또한 스냅링은 720psi의 압력에서 썩기를 강제로 이탈시키면 마찰계수가 0.2 이하로 작을 경우 미소압력 증가시 변형율의 급격한 증가로부터 반경방향으로 수축하여 이탈할 것으로 판단된다.

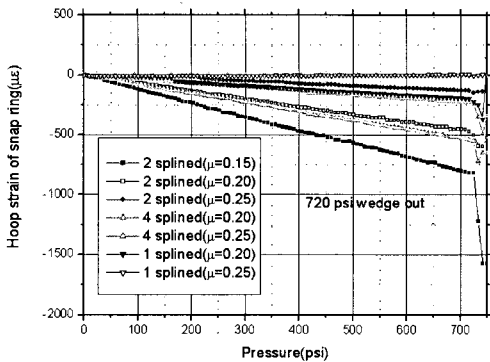


Fig. 13 Comparison of Hoop Strain of Snap Ring at Gage Position according to Numbers of Splines after Forced Escape of Wedge (at 720 psi) for Two Splined Model

그러나 분할선이 1개인 모델에서 스냅링은 마찰계수가 0.25 이상일 경우 반경 방향으로 오히려 팽창하며 아주 높은 압력에서 면내 굽힘 모멘트와 면외 굽힘 모멘트의 조합에 의해 상당한 소성변형이 발생해도 이탈이 불가능해진다. 따라서 0.2~0.25 범위의 마찰계수가 추력중단장치의 이탈을 방해하는 임계 마찰계수 (critical friction coefficient) 라고 판단된다.

5. 결 론

추력중단 장치의 변형 거동을 이해하기 위하여 구조시험 및 구조해석을 수행하였으며 다음의 결과를 얻었다.

1. 마개의 기밀성능은 분할선의 개수가 증가할수록 향상되며 압력이 증가할수록 저하되는 경향을 나타내었다.

2. 스냅링의 구조안전계수는 분할선의 개수가 증가할수록 면내 굽힘 모멘트의 증가로 인해 감소하였다.

3. 썸기 강제이탈 상태에서 스냅링의 이탈압력은 마찰계수 및 분할선의 개수에 영향을 받으며 마찰계수에 지배된다. 마찰계수가 어느 크기 이상으로 증가하면 이탈압력이 크게 증가되거나 이탈이 불가능한 임계 마찰계수가 존재하게 된다.

4. 추력중단 장치는 압력이 증가되면 스냅링의 단부가 굽힘 변형하며 단부와 면접촉하고 있는 썸기도 단부와 비슷한 회전 거동을 보이다가 먼저 썸기가 이탈되고 스냅링이 수축하여 이탈되는 거동을 보인다.

참 고 문 헌

1. Lach, C. L., "O-Ring Sealing Verification for the Space Shuttle Redesign Solid Rocket Motor", N89-26268, 1989
2. Murali, M. R. Krishna, " Non-Linear Finite Element Analysis of a Clutch End Plate and Snap ring of a Clutch Pack", Society of Automotive Engineers, INC, 1999
3. 김경희, "Thrust Cut Off 시스템에서의 스냅링 구조 해석", 한국 추진공학회, 학술대회지, 한국 추진공학회 제15회 학술대회 논문초록집, 2000, pp.21
4. MARC General Purpose Finite Element Program Volume A-D, 2004
5. Blake, A. , "Design of Curved Members for Machines", Industrial Press Inc., 1966