# 전산화 단층촬영에 의한 오링 변형 거동 분석

김동륜* · 박성한* · 이환규* · 구형회*

# Analysis of the O-ring Deformation Behavior by the Computed Tomography

Dongryun Kim* · Sunghan Park* · Hwangyu Lee* · Hyunghoi Koo*


## ABSTRACT

The object of this study is to develop new examination techniques for measuring the O-ring deformation behavior under the pressure condition. The extrusion lengths measured from the computed tomography were in good agreement with the results that measured from non-contact laser displacement sensor. The deformed shapes of O-ring measured by the computed tomography and evaluated by the FEM agreed well with the extrusion length and the expanded diameter. But the contact widths of the O-ring and steel measured by the computed tomography were a little larger than the results of the FEM.

## 초 록

본 연구는 가압상태에서 오링 변형 거동을 측정하기 위한 새로운 시험 기법을 개발하기 위함이다. 전산화 단층촬영으로 압출 틈에서 측정한 압출 길이와 비접촉 레이저 변위 센서로 측정한 압출 길이는 결과가 일치하였다. 전산화 단층촬영에서 측정한 변형된 오링 형상과 유한요소법으로 해석하여 얻은 오링 형상은 압출 길이와 확장 지름은 일치하였으나, 오링과 스틸의 접촉 길이는 전산화 단층촬영의 결과가 유한요소해석의 결과보다 약간 크게 측정되었다.


Key Words: Non-destructive Testing(비파괴시험), Computed Tomography(전산화 단층촬영), O-ring (오링), Linear Attenuation Coefficient(선형흡수계수), Deformation(변형)

## 1. 서 론

기밀 부품은 기계적 시스템에 내압 작용시 유체나 가스의 누수를 방지하는 중요한 역할을 한다. 기밀 부품 중에서 고무 오링은 대단히 광범위하게 사용하고 있으며 고압 기밀을 요구하는 고체 추진기관의 체결부에도 적용하고 있다.

오링이 기밀면과 접촉을 유지하게 하는 중요한 성질은 부과된 변형(squeeze)에 대한 고무의 탄성 변형 즉 반발력이다. 따라서 오링의 응력장을 예측할 수 있으면 기밀 성능 및 파괴 모드를 이해하는데 유용하다. 예를 들면 오링의 내부 및 어깨부(shoulder)에서 인장 응력이 오링의 파괴

* 국방과학연구소 기술연구본부
연락저자, E-mail: ndtpro@hanmail.net

를 유발할 수 있다[1]. 중심부 균열은 인장 응력 때문에 수직 방향을 따라서 나타나고 어깨부의 표면 균열은 원주 응력 때문에 원주 방향에서 나타난다. 이 응력들은 유한요소법(Finite Element Method, FEM) 및 실험을 통하여 분석될 수 있다.

고무에 대한 유한요소법은 다른 재료에 비하여 개발이 늦어지고 있다. 이는 고무 적용 분야가 대변위, 대변형 및 비선형 거동을 보일 뿐만 아니라 프와송 비가 0.5에 접근하기 때문이다. 그래서 유한요소 해석 결과는 실험에 의한 타당한 검증 없이 신뢰하기 어렵다. 특히 범용 구조 해석 프로그램에서는 내압에 의해 고무가 압출 틈(Extrusion gap)으로 빠져 나올 경우 해의 수렴을 위하여 맵핑(Mapping)에 의한 자동 메쉬 재생성(Automatic remeshing)을 수행하므로 해석 결과의 검증은 필수적이다.

대변형 문제의 변형장을 측정하기 위하여 광탄성법(Photoelasticity method), 그리드법(Grid method), 모아레법(Moire method) 등의 실험적 방법이 주로 적용되어 왔다[2]. 그러나 오링 문제의 경우 횡 단면적이 작기 때문에 접촉 응력 분포 및 내부 응력 분포를 측정하기 위하여 광탄성법을 주로 적용하고 있다[3, 4]. 그러나 광탄성의 기본 원리가 탄성 이론에 근거하므로 광탄성 방법을 적용하면 압출 틈에 끼인 고무의 응력 분포를 측정할 수 없다. 따라서 압출 틈의 고무 변형 거동을 검증하기 위한 새로운 방법이 절실히 요구된다.

전산화 단층촬영(Computed Tomography, CT)은 물체에 여러 각도로 투과한 방사선을 검출하고 물체의 단면에 대한 선형흡수계수를 사용하여 영상을 재구성하는 시험기법이다. 전산화 단층촬영은 제품에 손상없이 오링의 형상을 측정할 수 있는 비파괴시험법으로 광탄성법, 그리드법 및 모아레법의 단점을 보완할 수 있으며, 특히 압출 틈의 오링 변형 거동을 검증할 수 있는 시험기법으로 생각된다. 전산화 단층촬영으로 가압에 따른 오링의 형상을 측정한 예는 아직까지 없었으며 전산화 단층촬영으로 가압상태에서 오링 변형 거동을 측정하게 되면 획기적인 시험 방법이 될 것으로 판단한다.

## 2. 실험 장치 및 시험편

### 2.1 실험 장치

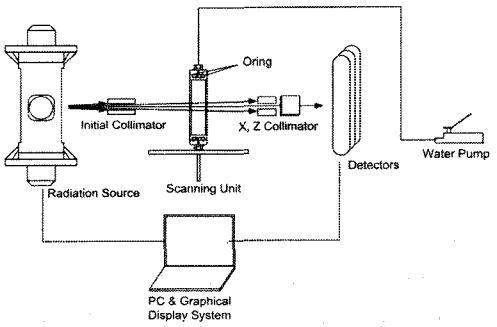



Fig. 1 Schematic of experimental setup for O-ring deformed shape measurement

본 연구에 사용한 전산화 단층촬영 장치의 구조도는 Fig. 1과 같으며 본체의 구성은 X-ray 발생장치(X-ray generator)와 검출기(Detector), 이송장치(Scanning Unit), 영상장치(Graphical display system) 및 컴퓨터로 구성되어있다.

### 2.2 오링변형측정치구 설계 및 제작

고체 추진기관 체결부 내 오링에 대한 전산화 단층촬영은 스틸의 두께가 두꺼워 X-ray가 투과되지 않으므로 고체 추진기관 체결부의 형상을 모사한 오링변형측정치구를 제작하였다. 오링변형측정치구는 두 군데에 홈(groove)을 파고 각각의 홈 안에 오링을 넣도록 설계되었으며 두 개의 오링이 원활하게 결합되도록 격벽을 설치하였다.

오링변형측정치구의 모서리에서 발생할 수 있는 줄무늬 알티팩트(Streak artifact)를 제거하기 위하여 모따기를 실시하였으며, 압력에 의하여 압출 틈으로 오링의 압출 길이(Extrusion length)를 계산하기 위하여 1 mm와 0.1 mm의 압출 틈을 제작하였다.

## 3. 실험 및 실험 방법

### 3.1 히스토그램 분석

본 연구를 위하여 사용한 전산화 단층촬영 장비는 2세대 전산화 단층촬영 장비로써 회색도(Gray level)는 32,768단계이다. 전산화 단층촬영 영상을 Fig. 2의 히스토그램으로 분석하면 오링 변형측정치구의 재질인 스틸과 고무 성분인 오링 및 물로 구별되는 것을 알 수 있으며, 스틸의 CT 계수 평균값이 21,503, 오링의 CT 계수 평균값이 6,339 및 물의 CT 계수 평균값이 5,199임을 알 수 있다. 오링과 물의 밀도 차이는 0.1 $g/cm^3$로 아주 작은 밀도 차이를 나타내므로 히스토그램에서 오링과 물을 구별할 수 있지만 대부분의 영역이 겹치므로 분해능은 그다지 높지 않았다.

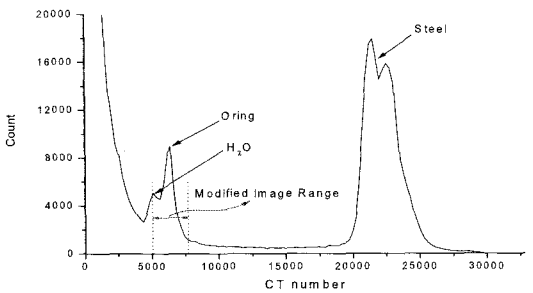
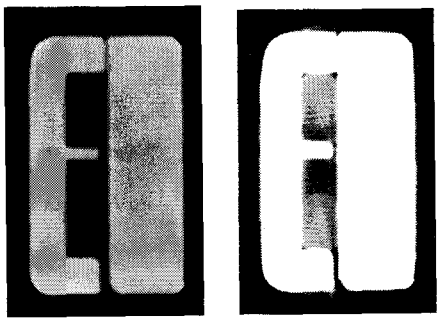



Fig. 2 Histogram about the image of the computed tomography

전산화 단층촬영 영상은 스틸이 CT 계수의 대부분을 차지하고 있으며 상대적으로 오링의 밀도가 낮으므로 Fig. 3(a)와 같이 스틸 영역만 전산화 단층촬영 영상에 나타났다. 전산화 단층촬영 영상에서 오링의 변형을 측정하기 위하여 전시화소값(Display pixel values)을 0~32,767단계에서 오링의 CT 계수 범위인 5,043~7,635단계로 조정하였다. Fig. 3(b)는 전시화소값을 조정한 전산화 단층촬영 영상으로 오링변형측정치구와 오링이 구별됨을 알 수 있다.



(a) original image (b) modified image

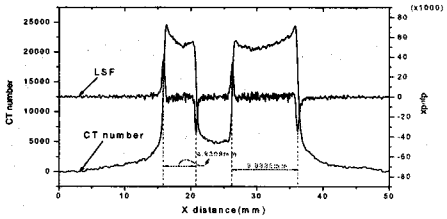
Fig. 3 The image of the computed tomography

### 3.2 오링 변형 측정 방법

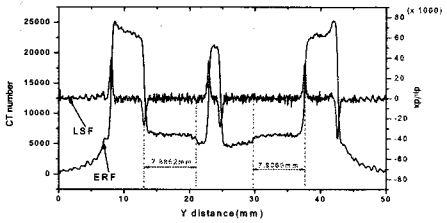
오링변형측정치구에 장착된 오링은 압축력에 의해 22.3%의 압착상태(Squeezed condition)가 되며, 전산화 단층촬영은 압착상태에서 0, 200, 711, 1422, 2276 psi의 압력을 가하여 내부의 오링이 변형된 형상을 측정할 목적으로 실시하였다. 실험에 사용한 오링의 재질은 클로로프렌 고무(Chloroprene Rubber, CR)이고, 오링 단면의 지름(Cord diameter)은 6.98 mm이다.

Figure 4(a)는 x축의 계면반응함수(Edge Response Function, ERF)와 선확산함수(Line Spread Function, LSF)를 나타낸 그래프이다[5]. 계면반응함수와 선확산함수를 이용하여 오링변형측정치구의 x축에 대한 스틸 두께를 측정하였을 때 각각 4.931 mm 및 9.934 mm로 측정되었다. 스틸의 두께는 5 mm와 10 mm였으며 전산화 단층촬영에서 측정한 결과와 스틸의 두께는 일치하였다.

Figure 4(b)는 y축의 계면반응함수와 선확산함수를 나타낸 그래프로써 오링이 22.3% 압착된 상태에서 압축력에 의한 오링의 확장 지름(Expanded diameter)을 측정한 결과이다. 1 mm 압출 틈 부근에 장착한 오링의 확장 지름은 7.886 mm, 0.1 mm 압출 틈 부근에 장착한 오링의 확장 지름은 7.907 mm로 측정되었다.




(a) ERF and LSF at the x axis




(b) ERF and LSF at the y axis

Fig. 4 The method of measuring the length with ERF and LSF

## 4. 실험 결과 분석

전산화 단층촬영의 영상을 분석한 결과 1 mm 압출 틈 부근에 장착한 오링은 압력에 따라 오링과 스틸의 접촉 길이(Contact width), 오링의 확장 지름 및 1 mm 압출 틈에서의 압출 길이를 측정할 수 있었지만, 0.1 mm 압출 틈 부근에 장착한 오링은 오링과 스틸의 접촉 길이와 오링의 확장 지름만 측정되었고 0.1 mm 압출 틈에서 압출 길이는 측정되지 않았다. 이런 원인은 0.1 mm 압출 틈의 CT 계수가 오링의 CT 계수보다 컸기 때문이다.

1 mm 압출 틈 부근의 오링에 대한 오링과 스틸의 접촉 길이, 1 mm 압출 틈의 압출 길이 및 오링의 확장 지름을 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 압력이 높아질수록 1 mm 압출 틈으로 압출 길이는 늘어났으며, 상대적으로 오링과 스틸의 접촉 길이와 확장 지름은 줄어들었다. 오링과 스틸의 접촉 길이는 측정 결과 상단면이 하단면보다 약간 길었는데 이는 압출 틈에 의한 구속 조건과 마찰 조건으로 발생한 현상이라 판단한다.

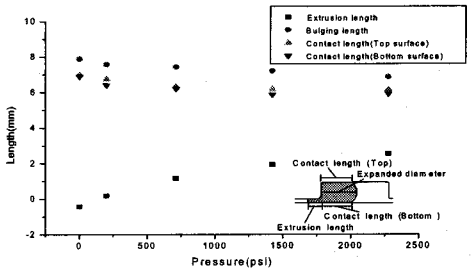



Fig. 5 The displacement of O-ring measured from the computed tomography under the water pressure

전산화 단층촬영의 결과를 검증하기 위하여 비접촉 레이저 변위 센서를 이용하여 1 mm 압출 틈의 압출 길이를 측정하였으며, 유한요소법으로 오링의 변형 형상을 해석하였다. Fig. 6은 오링의 전산화 단층촬영으로 1 mm 압출 틈에서 측정한 압출 길이와 비접촉 레이저 변위 센서(Non-contact laser displacement sensor)로 측정한 압출 길이를 비교한 그래프이다. 전산화 단층촬영으로 측정한 결과와 비접촉 레이저 변위 센서로 측정한 결과가 일치하는 것을 알 수 있다.

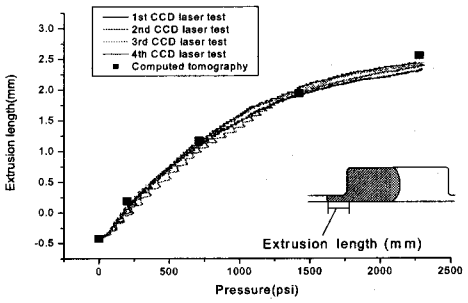
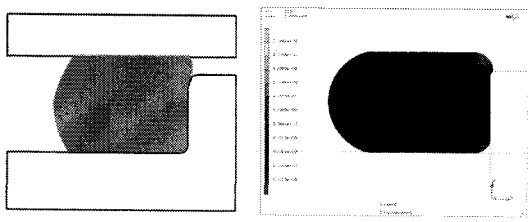



Fig. 6 Comparison of the extrusion length measured from the computed tomography and the laser displacement sensor

전산화 단층촬영으로 각각의 압력에 대하여 오링의 변형된 형상을 측정하였고, 유한요소법의 해석 결과를 Fig. 7과 같이 비교하였다. 전산화 단층촬영의 측정 결과와 유한요소법의 해석 결과는 오링의 압출 길이와 오링의 확장 지름은

비교적 일치하였으나, 오링과 스틸의 접촉 길이는 전산화 단층촬영의 결과가 유한요소해석의 결과보다 크게 측정되었다. 이런 이유는 오링의 밀도와 물의 밀도가 0.1 g/cm$^3$이므로 밀도 차이가 아주 작아서 스틸, 오링 및 물의 계면에서 전산화 단층촬영의 콘트라스트가 낮았기 때문이다. 가압방식을 수압에서 유압으로 변경하면 각각의 물질에 대한 콘트라스트가 커지므로 스틸과 오링의 접촉 길이를 보다 정확하게 측정할 수 있을 것으로 판단한다.



(a) CT (b) FEM

Fig. 7 Comparison of the deformed shape measured from the computed tomography and evaluated from the FEM at the pressure of 200psi

## 5. 결 론

오링 변형 거동을 측정하기 위하여 새로운 시험 기법인 전산화 단층촬영을 적용하였고, 비접촉 레이저 변위 센서의 측정 결과와 유한요소법에 의한 해석 결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전산화 단층촬영은 오링이 22.3%로 압착상태에서 0, 200, 711, 1422, 2276 psi의 압력을 가하여 내부의 오링이 변형된 형상을 측정할 목적으로 실시하였다.
2) 전시화소값을 0~32,767단계에서 오링의 CT 계수 범위인 5,043~7,635단계로 조정하여 전산화 단층촬영 영상에서 오링변형측정치구와 오링을 구별하였다.
3) 계면반응함수와 선확산함수를 이용하여 오링의 변형된 형상 및 길이를 측정하였다.
4) 전산화 단층촬영의 영상을 분석한 결과 1 mm 압출 틈의 압출 길이는 측정할 수 있었지만, 0.1 mm 압출 틈의 압출 길이는 측정되지 않았다.
5) 전산화 단층촬영으로 측정한 1 mm 압출 틈의 압출 길이와 비접촉 레이저 변위 센서로 측정한 압출 길이가 일치하였다.
6) 전산화 단층촬영으로 측정한 결과와 유한요소법의 해석 결과는 압출 길이와 확장 지름이 일치하였으나, 오링과 스틸의 접촉 길이는 전산화 단층촬영의 결과가 유한요소해석의 결과보다 크게 측정되었다.
7) 스틸과 오링의 접촉 길이 및 0.1 mm 압출 틈의 압출 길이를 정확하게 측정하기 위한 전산화 단층촬영 기법을 개발하고 있는 중이다.

## 참 고 문 헌


1. Ebisu, T., Yamamoto, M., Mackawa, H. and Ondera, A., "Fundamental Studies on the Performance of O-ring for Cask", PATRAM 83, New Orleans, 1983
2. Durelli, A. J., Parks, V. J., and Feng, H., "Experimental Methods of Large Strain Analysis", Int. Jnl. Non-Linear Mech. (Pergamon Press), 2, 1967, pp.387-404
3. Strozzi, A., "Static Stresses in an Unpressurized, Rounded, Rectangular, Elastomeric Seals", ASLE Transaction Vol. 29, 1986, pp.558-563
4. Dragoni, E., and Strozzi, A. " Analysis of Unpressurized, Laterally Restrained, Elastomeric O-ring Seal", J. Tribology Vol. 110, 1988, pp.193-200
5. Judy, P. F., "Line Spread Function and Modulation Transfer Function of a Computed Tomographic Scanner", Medical Physics, Vol 3, No. 4, 1976, pp.233-236