

전산화 단층촬영에 의한 오링 변형 거동 분석

Analysis of the O-Ring Deformation Behavior by the Computed Tomography

김동륜*[†], 김재훈**, 박성한*, 이환규*

Dongryun Kim*[†], Jaehoon Kim**, Sunghan Park* and Hwangyu Lee*

초 록 본 연구는 내압과 압축이 동시에 작용하는 오링의 변형 거동을 측정하기 위한 시험 기법을 개발하기 위함이다. 오링변형측정치구는 고압에서도 변형되지 않으며 오링변형측정치구 내의 두 곳에 홈을 파서 각각의 홈 안에 오링을 장착하도록 설계하였고 내압에 의한 오링의 압출 길이를 측정하기 위해 1 mm 및 0.1 mm의 압출 틈을 제작하였다. 오링의 변형 형상을 정확히 측정하기 위하여 선속경화현상 보정, 히스토그램 분석 및 불감대 영역 보정을 실시하였으며, 계면반응함수와 선확산함수를 이용하여 오링의 변형 길이를 측정하였다. 전산화 단층촬영은 22.3%의 압착상태에서 0, 1.378, 4.902, 9.804, 15.692 MPa의 압력을 가하여 실시하였으며, 각각의 압력에서 오링의 확장 지름, 접촉 길이 및 압출 길이를 측정하였다. 전산화 단층촬영의 측정 결과를 검증하기 위하여 유한요소법으로 오링의 변형 형상을 해석하였고, 수치해석법으로 실제 오링의 면적과 전산화 단층촬영에서 얻은 오링의 면적을 상호 비교하였다.

주요용어: 비파괴시험, 전산화 단층촬영, 오링, 변형

Abstract The object of this study is to develop the examination technique for measuring the O-ring deformation behavior under the pressure and the squeezed condition simultaneously. The O-ring deformation measuring device in which two grooves were dug to insert the two O-rings was manufactured to be not deformed under the high pressure and the 1 mm and 0.1 mm gap were designed to measure the extrusion lengths under the internal pressure. The beam hardening correction, the histogram analysis and the dead zone correction were executed to exactly measure the shape of O-ring deformation and the lengths of the O-ring deformation were measured by the LSF and the ERF. The computed tomography applied the pressure of 0, 1.378, 4.902, 9.804, 15.692 MPa at 22.3% squeezed condition and the expanded diameter, contact length and extrusion depth were measured in each pressure. The shape of O-ring deformation was evaluated by the FEM to verify the results of measuring by the computed tomography and the area of O-ring was mutually compared to the area measured by the computed tomography.

Keywords: Non-Destructive Testing, Computed Tomography, O-Ring, Deformation

1. 서 론

기밀 부품은 기계적 시스템에 내압 작용시 유체나 가스의 누설을 방지하는 중요한 역할을 한다.

기밀 부품 중에서 고무 오링은 대단히 광범위하게 사용하고 있으며 고압 기밀을 요구하는 교체 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 파괴를 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 프로그램 MARC에서는 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), 그리드 법(Grid method), 모아레 법(Moire method) 등의 실험적 방법이 주로 적용되어 왔다[2]. 하지만 오링 문제의 경우 횡 단면적이 작기 때문에 접촉 응력 분포 및 내부 응력 분포를 측정하기 위하여 광탄성법을 주로 적용하고 있다[3,4]. 그러나 측벽 구속, 압축 및 내압을 받는 오링 문제의 경우 광탄성법으로는 0.1 mm의 작은 조립 틈에 끼인 고무의 응력장을 정확하게 측정하기 어렵다. 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 비파괴 시험법으로 광탄성법, 그리드법 및 모아레법의 단점을 보완할 수 있으며, 특히 압출 틈의 오링 변형 거동을 검증할 수 있는 시험기법으로 생각된다. 하지만 오링의 변형을 측정하기 위해서는 두껍고 밀도가 높은 구조강재 내부의 상대적으로 얇고 밀도가 낮은 오링의 형상을 측정해야 하므로 최적화된

시험 조건 및 적절한 치구가 반드시 필요하다.

전산화 단층촬영으로 가압에 따른 오링의 형상을 측정할 때는 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

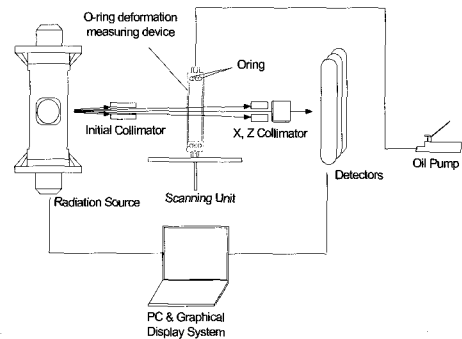


Fig. 1 Schematic of experimental setup for O-ring deformed shape measurement

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 체결부에 장착되는 오링에 대한 전산화 단층촬영은 체결부 구조강재의 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. 가압은 유압방식을 채택하였으며 가압매체는 오일(DTE25)을 사용하였다.

오링변형측정치구의 모서리에서 발생할 수 있는 줄무늬 얼티팩트(streak artifact)를 제거하기 위하여 모따기를 실시하였으며, 압력에 의하여 압출 틈으로 빠져 나온 오링의 압출 길이(extrusion depth)를 계산하기 위하여 1 mm와 0.1 mm의 압출 틈을 제작하였다.

3. 실험 및 실험 방법

3.1. 선속경화현상(Beam Hardening) 보정

전산화 단층촬영 영상에 영향을 미치는 인자는 선속경화현상, 산란 X-ray 및 전기적 잡음 등이 있고 그 중 가장 큰 영향을 주는 인자는 선속경화현상이다. 선속경화현상은 연속 X-ray가 매질을 통과할 때 매질의 두께가 증가할수록 저에너지의 X-ray가 매질에 많이 흡수되어 X-ray의 평균 에너지가 높아짐으로 선형흡수계수가 낮게 측정되는 현상이다. 선속경화현상의 영향으로 선형흡수계수가 같은 매질에서도 X-ray의 투과 길이가 긴 영역에서는 선형흡수계수가 낮은 것처럼 전산화 단층촬영 영상에 나타나므로 오링 변형 측정과 같이 정밀한 실험을 요할 때는 반드시 보정해야 한다.

Fig. 2는 오링 변형 측정치구에 대한 선속경화현상이 전산화 단층촬영 영상에 미치는 영향을 나타낸 그래프로써, 선속경화현상을 보정한 CT 계수가 선속경화현상을 보정하기 전과 비교하여 일정해 짐을 알 수 있다. 본 실험에서 선속경화현상은 전산화 단층촬영 장치의 polychromatic correction의 수치를 이용하여 실험적 방법으로 보정하였다.

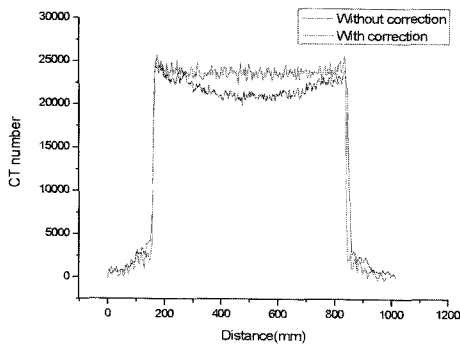


Fig. 2 Correction of beam hardening

3.2. 히스토그램 분석

본 연구를 위하여 사용한 전산화 단층촬영 장비는 2세대 전산화 단층촬영 장비로써 회색도(gray level)는 32,768단계이다. 전산화 단층촬영 영상을 Fig. 3의 히스토그램으로 분석하면 오링 변형 측정치구인 구조재와 고무 성분인 오링 및 오일로 구별되는 것을 알 수 있으며, 구조재의 CT 계수 평균값이 12,929, 오링의 CT 계수 평균값이 2,804 및 오일의

CT 계수 평균값이 2,054임을 알 수 있다. 오링과 오일의 밀도 차이는 0.224 g/cm^3 로 아주 작은 밀도 차이를 나타내므로 히스토그램에서 오링과 오일을 구별할 수 있지만 대부분의 영역이 겹치므로 분해능은 그다지 높지 않았다.

전산화 단층촬영 영상은 구조재가 CT 계수의 대부분을 차지하고 있으며 상대적으로 오링의 밀도가 낮으므로 Fig. 4(a)와 같이 구조재 영역만 전산화 단층촬영 영상에 나타났다. 전산화 단층촬영 영상에서 오링의 변형을 측정하기 위하여 전산화소값(display pixel values)을 0~32,767단계에서 오링의 CT 계수 범위인 1,791~3,839단계로 조정하였다. Fig. 4(b)는 전산화소값을 조정한 전산화 단층촬영 영상으로 오링 변형 측정치구와 오링이 구별됨을 알 수 있다.

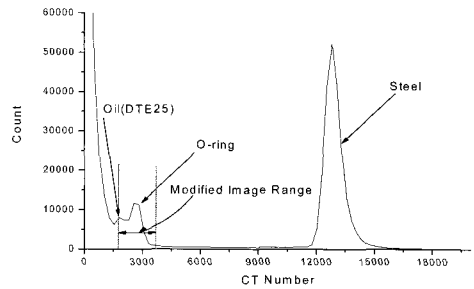


Fig. 3 Histogram about the image of the computed tomography



(a) Original image (b) Modified image

Fig. 4 The image of the computed tomography

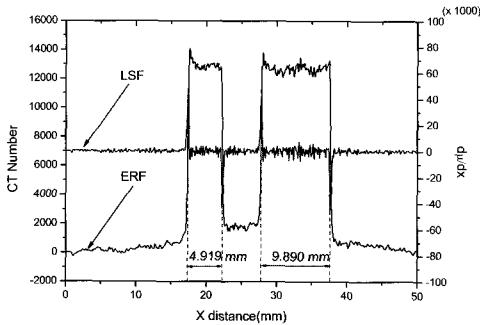
3.3. 오링 변형 측정

오링 변형 측정치구에 장착된 오링은 압축력에 의해 22.3%의 압착 상태(squeezed condition)가 되며, 전산화 단층촬영은 압착 상태에서 0, 1.378, 4.902, 9.804, 15.692 MPa의 압력을 가하여 내부의 오링이

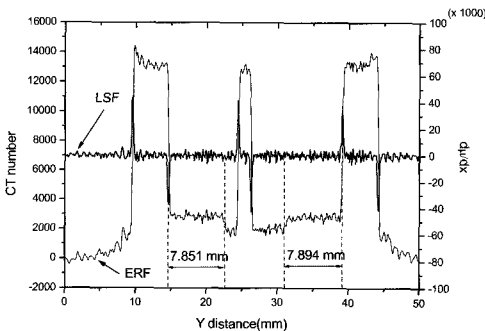
변형된 형상을 측정할 목적으로 실시하였다. 실험에 사용한 오링의 재질은 클로로프렌 고무(chloroprene rubber, CR)이고, 오링 단면의 지름(cord diameter)은 6.98 mm이다.

Fig. 5(a)는 x축의 계면반응함수(edge response function, ERF)와 선확산함수(line spread function, LSF)를 나타낸 그래프이다[5]. 계면반응함수와 선확산함수를 이용하여 오링변형측정치구의 x축에 대한 구조재 두께를 측정하였을 때 각각 4.919 mm 및 9.890 mm로 측정되었다. 구조재의 두께는 5 mm와 10 mm였으며 전산화 단층촬영에서 측정한 결과와 구조재의 두께는 거의 일치하였다.

Fig. 5(b)는 y축의 계면반응함수와 선확산함수를 나타낸 그래프로써 오링이 22.3% 압축된 상태에서 압축력에 의한 오링의 확장 지름(expanded diameter)을 측정한 결과이다. 1 mm 압출 틈 부근에 장착한 오링의 확장 지름은 7.851 mm, 0.1 mm 압출 틈 부근에 장착한 오링의 확장 지름은 7.894 mm로 측정되었다.



(a) ERF and LSF at the x axis



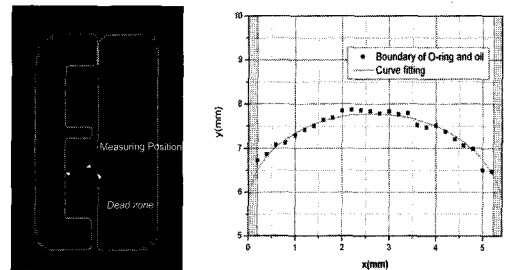
(b) ERF and LSF at the y axis

Fig. 5 The method of measuring the length with ERF and LSF

3.4. 불감대 영역(Dead Zone) 보정

오링변형측정치구의 경계면에는 불선명효과(blurring effect)로 인하여 Fig. 6(a)와 같이 약 200 μ m의 불감대 영역이 발생하였으므로 구조재와 오링의 접촉 길이를 측정할 때 필연적으로 측정 오차가 발생할 수 밖에 없다. 오링은 압축력에 의해 오링과 오일의 경계면에서 타원 형상을 나타내므로, 불감대 영역에서 측정할 수 없는 오링 형상은 회전된 타원의 방정식을 이용하여 커브 피팅으로 오링과 오링변형측정치구의 접촉 길이(contact width)를 측정하였다[6].

Fig. 6(b)는 오링과 오일의 경계면을 200 μ m 간격으로 측정한 길이를 이용하여 커브 피팅으로 불감대 영역에서의 오링변형측정치구와 오링의 접촉 길이를 측정한 결과이다.



(a) dead zone

(b) curve fitting

Fig. 6 The method of measuring the contact length using the curve fitting

3.5. 유한 요소 해석

범용 구조해석 프로그램 MARC를 이용하고 초탄성(hyperelastic) 재료 모델을 적용하여 오링의 축대칭 유한 요소 해석을 수행하였다. Fig. 7는 오링의 축대칭 해석 모델이다. 복합 하중을 받는 오링의 구조해석은 두 단계의 해석으로 이루어진다. 첫 번째 해석 단계에서는 압축 변형만 적용하고 두 번째 해석 단계에서는 압축이 작용된 상태에서 압력이 중첩된다. 두 번째 해석 단계에서 요소의 변형이 과대하여 메시 재생성을 수행하였다.

접촉 계면에서의 마찰은 stick-slip 모델을 사용하였으며 마찰 계수(μ , 0.17)를 적용하였다[7]. 초탄성 재료모델로 Ogden 모델을 사용하였으며 압축만 작용할 경우 인장 및 등이축시험 결과를 조합하여 Ogden 변형 에너지 함수의 계수를 결정하였고 압

축 및 압력이 중첩될 경우 인장, 등 이축 및 순수 전단 모드를 조합하여 계수를 결정하였으며 Table 1은 Ogden 3차 항의 상수를 나타낸다.

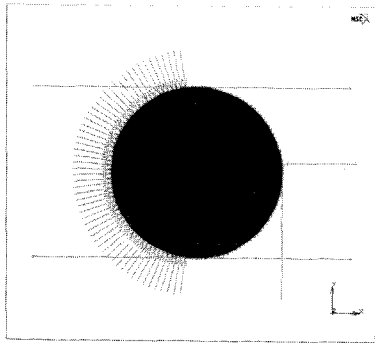


Fig. 7 Axisymmetric FE analysis model of O-ring

Table 1 Ogden model strain energy constants

μ_1	0.87664	α_1	1.4307	K	40137.9
μ_2	65.8816	α_2	-0.120786		
μ_3	-16.7206	α_3	-0.409349		

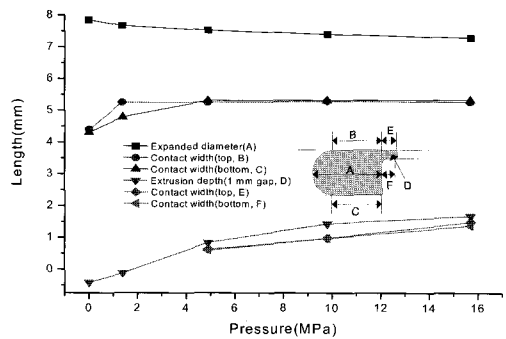
4. 실험 결과 분석

전산화 단층촬영의 영상을 분석한 결과 1 mm 압출 틈 부근에 장착한 오링과 0.1 mm 압출 틈 부근에 장착한 오링에 대하여 압력에 따른 오링과 구조재의 접촉 길이, 오링의 확장 지름 및 1 mm 압출 틈에서의 압출 길이를 측정할 수 있었다. 하지만, 1 mm 압출 틈 부근에 장착한 오링은 1 mm 압출 틈에서 타원형의 오링의 형상을 보여주고 있지만, 0.1 mm 압출 틈 부근에 장착한 오링은 0.1 mm 압출 틈에서 압출 길이만 측정되고 오링의 형상은 측정되지 않았다. 이런 원인은 전산화 단층촬영 장비의 픽셀 크기가 50 μm 이므로 0.1 mm 압출 틈과 같이 좁은 공간에서 단지 두 픽셀만 나타나기 때문이다.

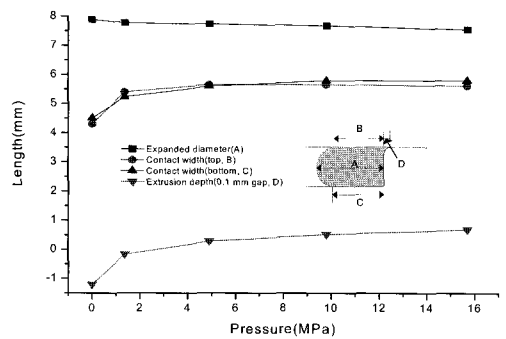
1 mm 압출 틈 부근의 오링에 대한 오링의 확장 지름, 오링과 구조재의 상, 하단면 접촉 길이, 1 mm 압출 틈의 압출 길이 및 1 mm 압출 틈의 상, 하단면 접촉 길이를 측정하여 Fig. 8(a)에 나타내었다. 고무가 비압축성이기 때문에 압력이 증가할수록 압출 틈새로 고무가 빠져나가므로 확장 지름은 줄어들고 있으며, 상대적으로 1 mm 압출 틈에서 오링의 압출 길이는 늘어나고 있다.

0.1 mm 압출 틈 부근의 오링에 대한 오링의 확장 지름, 오링과 구조재의 상, 하단면 접촉 길이, 0.1 mm 압출 틈의 압출 길이를 측정하여 Fig. 8(b)에 나타내었다. 압력이 높아질수록 오링의 확장 지름은 줄어들고 있으며, 상대적으로 0.1 mm 압출 틈에서 오링의 압출 길이는 늘어나고 있다. 하지만 0.1 mm 압출 틈의 상, 하단면 접촉 길이는 측정할 수 없었다.

1 mm 압출 틈 부근 및 0.1 mm 압출 틈 부근의 오링과 구조재의 접촉 길이는 측정 결과가 하단면이 상단면보다 약간 길었는데 이는 압출 틈에 의한 구속 조건과 마찰 조건으로 발생한 현상이다.



(a) 1 mm gap



(b) 0.1 mm gap

Fig. 8 The displacement of O-ring measured from the computed tomography under the oil pressure

압력을 받고 있는 오링에서 오링과 오일의 접촉 계면 형상은 타원이고 압력이 증가함에 따라 Fig. 9과 같이 장축 대 단축 비가 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉, 오링의 형상은 압력이 증가함에 따라 점점 납작해짐을 의미한다.

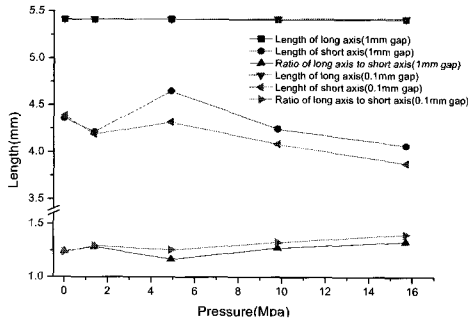


Fig. 9 The length of long axis verse the length of short axis by the pressure

오링이 압출 틈으로 빠져나가기 전인 1.378 MPa의 압력에서는 장축 대 단축 비가 감소하여 오링의 형상이 납작해졌다가 4.902 MPa의 압력에서 일시적으로 증가하고 있다. 이는 압출 틈에 의한 형상인자(shape factor)로 인해 일시적으로 오링의 장축 대 단축 비가 증가하였기 때문이다.

전산화 단층촬영으로 각각의 압력에 대하여 오링의 변형된 형상을 측정하였고, 유한요소법의 해석 결과를 Fig. 10과 같이 비교하였다. 전산화 단층촬영의 측정 결과와 유한요소법의 해석 결과는 오링의 확장 지름 및 접촉 길이가 비교적 일치하였으나, 전산화 단층촬영의 결과가 유한요소법의 해석 결과보다 약 100 μm 내외로 크게 측정되었다. 이 차이의 주된 원인은 유한 요소 법에서 사용된 변형 에너지 함수를 계산할 때 발생된 오차 및 근사화 오차, 수치 오차로 판단된다.

압축력만 작용하고 내압이 없는 0 MPa의 경우 전산화 단층촬영에서 확장 지름은 7.85 mm로 측정되었고 유한요소법에서는 7.80 mm로 해석되었다. 또한 전산화 단층촬영에서는 상단면의 접촉 길이는 4.40 mm 및 하단면의 접촉 길이는 4.31 mm로 측정되었고, 유한요소법에서는 상단면의 접촉 길이는 4.29 mm 및 하단면의 접촉 길이는 4.28 mm로 해석되었다.

압축력과 1.378 MPa의 내압이 작용하였을 때 전산화 단층촬영에서는 확장 지름은 7.67 mm로 측정되었고 유한요소법에서는 7.69 mm 해석되었다. 또한, 전산화 단층촬영에서는 상단면의 접촉 길이는 5.25 mm 및 하단면의 접촉 길이는 4.79 mm로 측정되었고, 유한요소법에서는 상단면의 접촉 길이는 4.90 mm 및 하단면의 접촉 길이는 4.72 mm로 해석되었다.

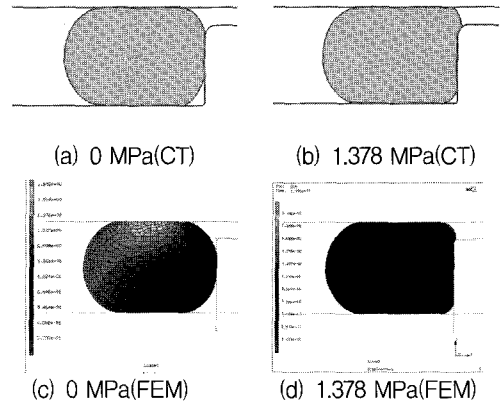


Fig. 10 Comparison of the deformed shape measured from the computed tomography and evaluated from the FEM at the pressure of 0 MPa and 1.378 MPa

Fig. 11은 압축력에 의해 오링의 압착상태가 0~22.5%일 때 오링의 변형된 형상을 유한요소법으로 해석한 결과이다. 구조재와 오링의 마찰계수는 0.13과 1.0으로 각각에 대하여 해석하였는데 Fig. 11(a)

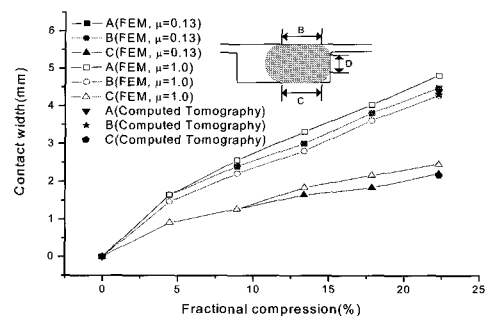
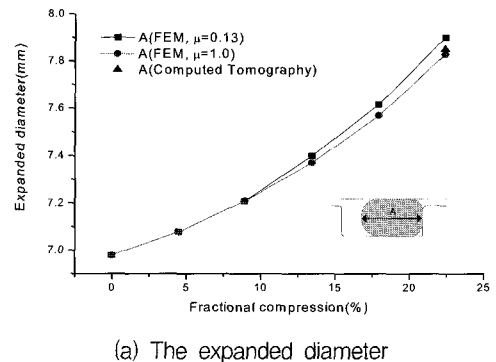


Fig. 11 Comparison of the expanded diameter and the contact width measured from the computed tomography and evaluated from the FEM at the pressure of 0 MPa

와 같이 압축력이 22.3%인 경우 해석한 오링의 확장 지름과 전산화 단층촬영의 결과가 일치하고 있다. 또한, Fig. 11(b)와 같이 유한요소법으로 오링의 접촉 길이를 해석한 결과와 전산화 단층촬영의 측정 결과가 일치하고 있음을 알 수 있다.

전산화 단층촬영의 실험 결과를 검증하기 위하여 비접촉 레이저 변위 센서(non-contact laser displacement sensor)를 이용하여 1 mm 압출 틈의 압출 길이를 측정하여 전산화 단층촬영으로 측정된 결과와 비접촉 레이저 변위 센서로 측정된 결과가 일치함을 확인하였다. 하지만, 비접촉 레이저 변위 센서는 압출 틈 사이로 압출된 오링의 길이만을 측정되는 단점이 있으므로 전산화 단층촬영에서 측정된 오링의 단면적과 오링의 실제 단면적을 비교하여 전산화 단층촬영의 실험 결과를 비교하였다. 오링은 비압축성 재질로 압력에 의해 단면적이 변하지 않는다.

전산화 단층촬영에서 측정된 오링의 변형 형상은 수치해석법(Newton-Cotes법)으로 면적을 측정하였으며 Fig. 12와 같다. 오링의 단면 지름은 6.98 mm 이고 단면적은 38.26 mm²이며, 전산화 단층촬영에서 측정된 오링의 단면적은 1 mm 압출 틈에서는 38.15~38.99 mm²으로 측정되었고 0.1 mm 압출 틈에서는 38.79~39.50 mm²으로 측정되었다. 측정된 면적을 이용하여 오링의 단면 지름을 환산하면 1 mm 압출 틈의 오링의 단면 지름은 6.970~7.046 mm로 환산되며, 0.1 mm 압출 틈의 단면 지름은 7.028~7.092 mm로 환산된다.

전산화 단층촬영의 측정 결과가 실제 오링의 단면 지름보다 1 mm 압출 틈에서는 약 -10~66 μ m의 오차로 측정되었으며, 0.1 mm 압출 틈에서는 약

48~112 μ m의 오차로 측정되었다. 전산화 단층촬영의 결과가 오링의 면적보다 크게 측정된 이유는 전산화 단층촬영의 슬라이스 두께와 오링의 등근 기하학적 현상에 의해 크게 측정되며, 오링에 가압으로 인해 오링의 팽윤 효과(swelling effect)의 영향으로 오링이 약간 부풀었기 때문으로 판단한다.

5. 결론

오링 변형 거동을 측정하기 위하여 비파괴시험기법인 전산화 단층촬영을 적용하였고, 유한요소법에 의한 해석 결과와 수치해석법으로 구한 면적 비교를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전산화 단층촬영의 영상을 분석한 결과 1 mm 압출 틈 부근 및 0.1 mm 압출 틈 부근의 확장 지름, 접촉 길이 및 압출 길이를 측정할 수 있었다. 하지만, 압출 틈의 압출 형상은 측정할 수 있었으나, 0.1 mm 압출 틈의 압출 형상은 측정할 수 없었다.
- 2) 전산화 단층촬영으로 측정된 결과와 유한요소법의 해석 결과는 확장 지름, 접촉 길이 및 압출 길이는 전산화 단층촬영에서 약 100 μ m 이내로 크게 측정되었다.
- 3) 전산화 단층촬영의 측정 결과가 실제 오링의 단면 지름보다 1 mm 압출 틈에서는 약 -10~66 μ m의 오차로 측정되었으며, 0.1 mm 압출 틈에서는 약 48~112 μ m의 오차로 측정되었다.
- 4) 전산화 단층촬영은 슬라이스 두께, 오링의 기하학적 구조 및 가압으로 인한 팽윤 효과의 영향으로 오링이 실제보다 약간 크게 측정되었을 것을 판단한다.

참고문헌

[1] T. Ebisu, M. Yamamoto, H. Mackawa and A. Ondera, "Fundamental studies on the performance of O-ring for cask," PATRAM 83, New Orleans, (1983)

[2] A. J. Durelli, V. J. Parks and H. Feng, "Experimental methods of large strain analysis," Int. Jnl. Non-Linear Mech. (Pergamon Press), pp. 387-404, (1967)

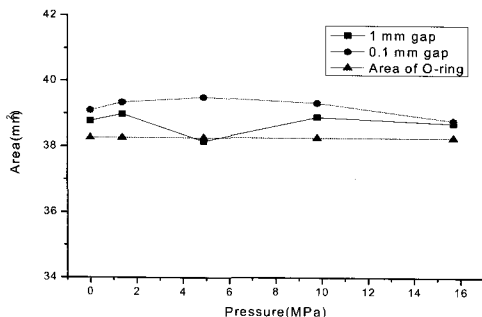


Fig. 12 The area of O-ring which mutually compared to the area measured by the computed tomography

- [3] A. Strozzi, "Static stresses in an unpressurized, rounded, rectangular, elastomeric seals," ASLE Transaction, Vol. 29, pp. 558-563, (1986)
- [4] E. Dragoni and A. Strozzi, "Analysis of unpressurized, laterally restrained, elastomeric O-ring seal," J. Tribology, Vol. 110, pp. 193-200, (1988)
- [5] P. F. Judy, "Line spread function and modulation transfer function of a computed tomographic scanner," Medical Physics, Vol. 3, No. 4, pp. 233-236, (1976)
- [6] Karaszkievicz, "Geometry and contact pressure of an O-ring mounted in a seal groove," Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 29, pp. 2134-2137, (1990)
- [7] M. Salita, "A simple finite element model of O-ring deformation and activation during squeeze and activation," AIAA-87-1730, AIAA/SAE/ASME/ASEE 23rd Joint Propulsion Conference, pp. 1-16, (1987)