

고무의 Bulging을 이용한 O-링의 접촉압력 측정

김 원 호

부산대학교 공과대학 화학공학과

(1995년 5월 2일 접수)

Measurements of Contact Pressure of a Squeezed O-ring (Rubber Disc) by Using Rubber Bulging through a Hole

Wonho Kim

Dept. of Chem. Eng., Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received May 2, 1995)

요 약 : 두 평판 결함체 사이에 설치된 고무 디스크를 반경방향으로 압축하면서 접촉면에 만든 작은 구멍을 통한 고무의 bulge 되는 높이를 측정하여 접촉압력을 구하였다. 자유변형일 경우, bulge 높이 측정법으로 측정한 최대 접촉응력은 반경방향 변형이 증가됨에 따라 비선형적으로 증가하였으며 Curro의 식과 잘 일치하였다. 그러므로 bulge 높이 측정법은 Muller 방법과 상호 보완적으로 접촉압력을 측정하는데 이용될 수 있음을 확인하였다. 제한변형일 경우, 최대 접촉응력은 무차원 반경방향 변형(x/D) 값이 0.01 부터 0.18 사이에서 변할 경우에 선형적이었고 자유변형의 경우보다 높은 값을 나타내었으며 이 경향은 x/D 값이 증가할수록 현저하였다. 접촉응력 분포는 semi-ellipse 처럼 보였으며, 포아송 비가 증가할수록 반경방향 변형에 따른 최대 접촉응력 값은 증가하였다.

Abstract : A rubber disc confined between two plates was radially compressed to measure the contact pressure of an O-ring. Contact pressure was determined by the bulge height of a rubber disc which was measured by a wood probe through a hole. In the case of laterally unrestrained compression, the maximum contact stress increases non-linearly as a function of radial deformation and was in good agreement with the Curro's analytical equation. As a result, bulge height measurement method compensates the Muller's method in measuring contact pressure. In the case of restrained compression, the maximum contact stress was linearly proportional to radial deformation in the range of $0.01 < x/D < 0.18$. This trend was more significant as the value of x/D was increased. The shape of the contact stress distribution looks like a semi-ellipse and the maximum contact stress increased as the value of the Poisson's ratio was increased.

Keywords : rubber bulging, O-ring, contact pressure, bulge height.

서 론

Seal은 기밀을 유지하거나 고압유체를 내장하고 있는 부분의 누출을 방지하는 도구이다. 가장 일반적으로 사용되는 seal인 O-링은 탄성재료로 만들

어진 도너츠 형태로 그 단면적은 원형이다. O-링이 빈번히 사용되는 이유는, 다양한 재료를 이용할 수 있으며, 제품의 크기가 다양하고, 가격이 싸며, 결합이 용이하고, sealing 효과가 뛰어나기 때문이다. Sealing 재료로서 고무의 장점은 성형성, 내인

열성, 큰변형율, 낮은 탄성율 등에 있다.

O-링은, seal 결합체에 결합되면, 단면적의 반경 방향으로 압착됨과 동시에 접촉면에 접촉압력을 형성하게 된다. 탄성체로 만들어진 O-링과 접촉면 사이의 접촉압력을 구하기 위하여 광탄성 기술(photoelastic technology),¹⁻³ 유한 요소법(finite element technology)⁴⁻⁶ 등이 사용되어 왔다. 그러나 광탄성 기술은 투명한 재료를 사용하여야 하며, isochromatic field로 부터 주응력을 분리하는데 어려움이 있으며, 유한요소법은 고무의 특징인 비압축성, 큰 변형율, 응력-변형율의 비선형성 등으로 인하여 많은 제약 요건이 따르고 있다. 실험적인 방법으로는 Muller의 방법⁷이 보편적으로 사용되고 있는데 이 방법은 접촉면의 작은 구멍을 통해 외부에서 유압을 증가시키는 동안 더 이상의 유압증가가 없을 때의 유압값을 접촉압력으로 결정하는 방법이다. 이 방법은 공급된 오일이 접촉면에서의 흐름에 방해받는 경우 높은 접촉압력을 나타내게 되는 단점이 있다. Gent와 Kim⁸은 접촉면의 작은 구멍을 통한 탄성재료의 bulge 높이를 측정하여 접촉면에서의 local 접촉압력을 직접 측정할 수 있는 방법을 제안하였다.

본 실험에서는 Gent와 Kim이 제시한 bulge 높이 측정법을 O-링의 접촉압력 측정에 이용하였으며, O-링의 자유변형과 제한 변형에서의 접촉면의 접촉압력을 측정하여 side restrainer의 영향을 평가하였다. Bulge 높이 측정법은 고무의 힘-변형율 상관관계의 선형성을 이용하였으며, Muller의 방법과는 정반대의 개념으로, 접촉압력을 직접적인 방법으로 측정하는 간편한 기술을 제공하고 있다.

기본이론

좌우방향 변형에 제한을 받지않는 O-링의 자유 변형은 많은 연구자들^{1, 4, 9-15}에 의하여 연구되어 왔다. 저압유체 적용시 O-링은 실린더와 피스톤 사이의 갭(gap)에서 압축되는데, seal로서의 효과

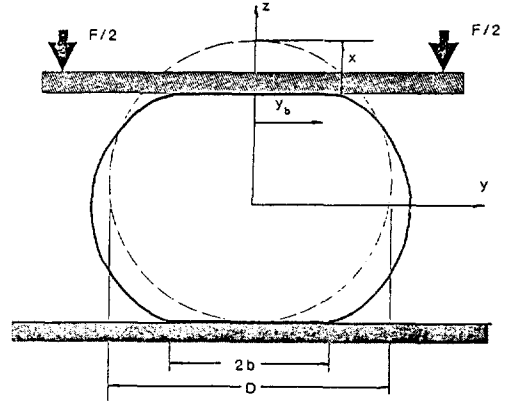


Fig. 1. Deformed cross-section of the laterally unrestrained O-ring seal.

를 발휘하기 위해서는 압축시 형성된 접촉압력이 유체의 압력을 능가하여야 한다. 홈에 설치된 후 변형된 O-링의 단면적 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

Gorelik, Buhina, 그리고 Ratner⁹는 고무 실린더와 O-링의 접촉면적의 변화를 5-80%의 반경 방향 압축범위에서 실험하여, 양 끝단의 변형이 제한된 고무 실린더와 O-링의 실험 데이터가 일치함을 보여주었다.

Hertz¹⁶는 마찰이 없는 접촉면과 미소변형을 가정하고 두 탄성체의 접촉응력과 변형을 해석하였다. 선 접촉의 경우, 접촉면에 수직으로 작용하는 접촉응력 σ_c 는 (1)식과 같이 표현되었다.

$$\sigma_c = \left(\frac{2F}{\pi L b} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{y_b}{b} \right)^2} \quad (1)$$

$$= \sqrt{\frac{F E^*}{\pi L R}} \sqrt{1 - \left(\frac{y_b}{b} \right)^2}$$

$$b = \sqrt{\left(\frac{4FR}{\pi L E^*} \right)}$$

$$E^* = \frac{1}{\left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right]}$$

$$R = \frac{1}{\left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right]}$$

여기서, F 는 적용된 힘, L 은 실린더의 길이, b 는 $0.5x$ (접촉폭), y_b 는 접촉폭 중앙으로부터 수평방향의 거리, E 는 탄성체의 탄성율, ν 는 탄성체의 포아송 (Poisson) 비, R 은 실린더의 반경, 1은 금속탄성체, 2는 고무탄성체를 의미한다.

반경방향으로 압축된, 고무로 만들어진, O-링의 금속 접촉면에서의 무차원 최대 접촉응력 $(\sigma_c)_{max}/E$ 는 (1)식에 $E_1 \gg E_2$, $R_1 = \infty$, $\nu_2 = 0.5$ 를 대입함으로써 (2)식으로 표현될 수 있다.

$$\left(\frac{(\sigma_c)_{max}}{E} \right)^2 = \left(\frac{8}{3\pi} \right) \left(\frac{F}{LED} \right) \quad (2)$$

여기서 D 는 실린더의 직경을 의미한다.

무차원 가해진 힘 F/LED 와 무차원 반경방향 변형 x/D 와의 상관관계를 알면 (2)식으로 부터, 어떤 특정값 x/D 에서의 최대 접촉응력 $(\sigma_c)_{max}$ 을 계산할 수 있다.

1967년에, Lindley¹¹는 좌우방향 변형이 제한받지 않는 O-링의 압축변형을 분석하여, 마찰이 있는 계면에서, 40% 반경방향 압축까지 적용할 수 있는 다음과 같은 준실험식을 제안하였다.

$$\frac{F}{\pi D_0 DE} = 1.25 \left(\frac{x}{D} \right)^{1.5} + 50 \left(\frac{x}{D} \right)^6 \quad (3)$$

여기서, x 는 반경방향의 변형, D_0 는 O-링의 직경을 의미한다.

F/LED 와 x/D 의 상관관계를 나타내는 (3)식을 (2)식과 결합함으로써 최대 접촉응력 $(\sigma_c)_{max}$ 은 (4)식과 같이 $(\sigma_c)_{max}/E$ 와 x/D 의 상관관계로 표현될 수 있다.

$$\frac{(\sigma_c)_{max}}{E} = \sqrt{\left(\frac{8}{3\pi} \right) \left[1.25 \left(\frac{x}{D} \right)^{1.5} + 50 \left(\frac{x}{D} \right)^6 \right]} \quad (4)$$

1973년에, Curro와 Salazar¹²는 O-링의 변형을 해석적으로 분석하였는데 마찰이 없는 접촉면과 O-링의 미소변형을 가정하였다. O-링 재료의 포아송 비와 전단 탄성율을 0.5 와 $E/3$ 으로 가정하였을 때, 접촉응력 σ_c , 반 접촉폭 b , 무차원 반경방향 변형 x/D 는 다음과 같이 표현되었다.

$$\sigma_c = \left(\frac{2F}{\pi L b} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{y_b}{b} \right)^2} \quad (5)$$

$$b^2 = \frac{3FR}{\pi LE} \quad (6)$$

$$\frac{x}{D} = \left(\frac{3}{\pi} \right) \left(\frac{F}{LED} \right) \left[\ln \left(\frac{R}{b} \right) + 0.874 \right] \quad (7)$$

탄성체 seal의 응력-변형을 관계의 상세한 해석은 seal의 성능을 평가하기 위해서는 필수적이다. 이러한 목적을 위하여 Gorelik과 Feld'man¹ 또한 Molari²는 투명한 고무 디스크로, 광탄성 기술을 이용하여, O-링 seal의 응력분포를 해석하였다. 광탄성 기술은 잘 정립된 실험적인 기법이지만 isochromatic field로 부터 주응력을 분리하는데 상당한 노력이 필요하다.³ 유한요소법을 이용한 응력해석 역시 잘 수립된 기술이지만 고무의 비압축성, 대변형, 힘-변형을 상관관계의 비선형성 등으로 인한 여러 문제점이 있다.⁴⁻⁶

Muller가 제안한 방법이 접촉압력 분포를 측정하기 위하여 빈번히 사용되어 왔다. 이 방법은 접촉면에 매우 작은 구멍을 내고 그 구멍을 통하여 유압을 증가시켜 더 이상의 유압증가가 없을 때의 유체압력을 접촉압력으로 규정하는 간접적인 접촉압력 측정방법이다. 이 방법을 이용하여 Muller⁷와 Johannesson¹⁷은 pressurized O-링의 접촉압력 분포를 측정하였다.

Gent와 Kim⁸은 접촉면의 구멍을 통한 고무의 bulge 높이를 측정함으로써, local 접촉압력을 구할 수 있다고 하였으며 bulge 높이 h , 내압 p , 구멍의 반경 a , 고무의 탄성율 E 와의 상관관계를

(8)식으로 나타내었다

$$h = \left[\left(\frac{3}{\pi} \right) \left(\frac{p}{E} \right) a \right] K \quad (8)$$

여기서 K 는 고무 block과 원형구멍의 크기에 따른 보정상수이다.

좌우방향으로의 변형을 제한받는 O-링의 압축에 대한 연구는 미미한 실정이다. Ebisu등¹³은 overpacked O-링 seal의 변형을 연구하였는데, O-링이 두 restrainers 사이에서 압축될 때, O-링의 변형을 양방향(biaxial) 압축으로 생각하여 최대 접촉응력 (σ_c)_{max}과 무차원 반경방향 변형 x/D 의 상관관계를 (9)식과 같이 제안하였다.

$$(\sigma_c)_{max} = \left(\frac{E}{3} \right) \left[\left(1 - \frac{x}{D} \right)^{-2} - \left(1 - \frac{x}{D} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Dragon와 Strozzi¹⁸는 O-링의 제한변형을 연구하였는데, 제한변형일 경우의 최대 접촉응력이 자유변형의 경우보다 상당히 높음을 지적하였고, 포아송 비가 최대 접촉응력에 큰 영향을 미침을 유한 요소법을 이용하여 지적하였다.

실 험

고무 디스크의 반경방향 압축시험은 Fig. 2에 잘 나타나 있다. 좌우방향 변형이 제한받지 않는(자유 변형) 경우는 2개의 restrainer를 제거하고 실험하였다.

고무 디스크를 제조하기 위한 원료고무로는 천연 고무를 사용하였으며 카본 블랙은 첨가하지 않았다. 고무 디스크는 지름이 144 mm, 두께가 24.6 mm 이고, 앞판과 뒷판 결합체에 의하여 두께방향으로의 변형이 제한되며, 반경방향으로 압축된다. 고무 디스크는 2개의 판, 4개의 spacer, 4개의 큰 볼트를 이용하여 결합하였다. 앞판은 plexiglass로, 뒷판은 알루미늄으로 제조되었으며, 원형접촉면에는 실리콘그리스를 적용하여 마찰을 제거하였다. 앞판

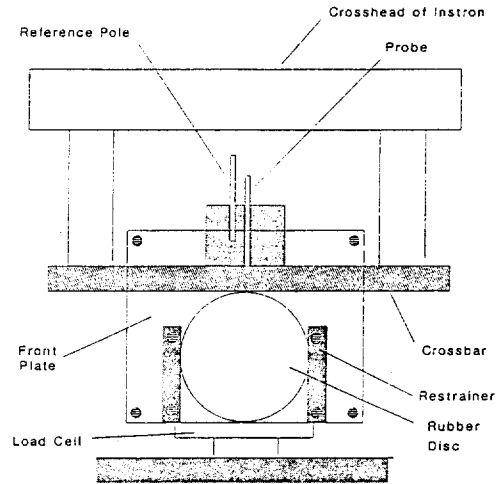


Fig. 2. A schematic diagram for the compression test of a laterally restrained rubber disc.

과 뒷판 결합체에는, 평면 변형을 조건을 만족시키기 위하여, 고무 디스크의 두께와 동일한 길이를 갖는 spacer 4개를 두 판 사이의 4 모서리에 설치하였다. 크로스바(crossbar)는 폭이 23.7 mm, 두께가 25.4 mm, 길이가 457 mm인데 직경이 4 mm인 구멍이 10개 뚫려 있으며, 두 판 사이에 설치되었다. 구멍의 직경은 bulge 높이를 측정하는 기구의 감도 (sensitivity)에 따르며, 구멍들은 접촉면의 특정 지점에서 bulge 높이를 측정하는데 사용되었다. 크로스바의 전면에는 접촉폭을 측정하기 위하여 모눈종이를 부착하였으며 압축시 고무 디스크의 미끄러짐을 방지하기 위하여 load cell의 상부 판과 고무 디스크 사이에 사포를 끼웠다.

Bulge 높이를 측정하기 위하여 기준점을 표시한 나무봉 (reference pole)을 back board에 부착한 후 크로스바 상부에 back board 결합체를 부착하였다. Universal testing machine (Instron사 모델-4201)의 crosshead를 움직여 크로스바의 바닥이 고무 디스크 원주 상부에 접촉하도록 하였다. 직경 2 mm, 길이 146 mm인 나무봉으로 만든 탐침 (probe)을 크로스바의 구멍에 수직으로 삽입하였다. 탐침을 수직으로 유지하기 위한 guide를 고무 디스크 결합체의 상부에 부착하였다. 기준점과 탐

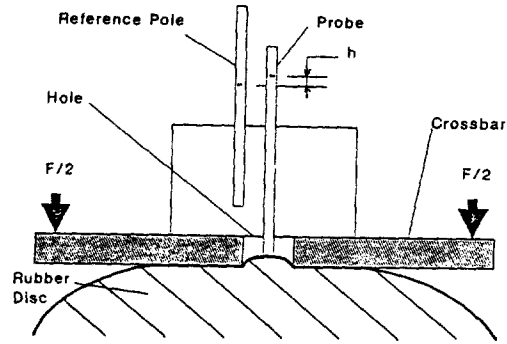


Fig. 3. A schematic diagram showing the bulge height measurement.

침에 있는 표시점을 일치시키고 이때의 bulge 높이를 zero로 하였으며 (Fig. 3 참조) Universal testing machine의 gauge length를 기록하여 반경 방향 변형의 기준값으로 하였다. Crosshead를 아래로 움직여 힘 F 를 증가시키면서 bulge 높이 h 와 반경방향 변형 x 를 기록하였다.

좌우방향 변형이 제한받는 (제한변형)경우는 2개의 restrainer가 설치된 것을 제외하고는 실험 내용 및 방법이 자유변형과 동일하였다. 알루미늄 restrainer의 두께는 24.6 mm, 폭은 25.4 mm, 길이는 115 mm이며, 두 restrainer 사이의 거리는 144 mm 이었다. 고무 디스크와 restrainer 사이의 마찰을 제거하기 위하여 윤활제를 restrainer에 적용하였다. 고무 디스크의 반경방향 변형 x 에 따른 bulge 높이 h 를 측정하여 O-링의 자유변형과 비교하였다.

결과 및 고찰

고무 디스크의 탄성을 측정. 부드러운 재질의 탄성을 측정하는 여러방법중 하나는, 원형단면의 단단한 봉을 이용하여 부드러운 재질의 평면을 수직으로 누르면 평면의 일부분이 압축을 받아 우묵하게 변형을 일으키게 된다. 이때, 우묵하게 변형된 깊이 (indentation depth), 봉에 가해진 힘, 봉의 반경, 부드러운 재질의 두께와의 상관관계에 의하여 탄성율을 구할 수 있는데 이를 indentation에

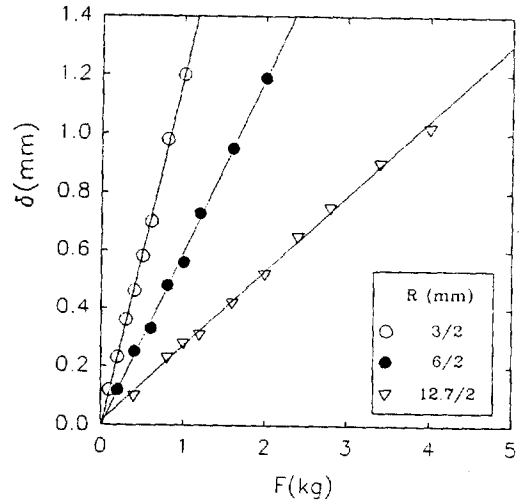


Fig. 4. Indentation depth as a function of applied loads F .

의한 탄성을 측정 방법이라 한다. 고무 디스크의 탄성율 E 도 indentation 방법에 의해 구할 수 있는데 Gehman¹⁹이 제안한 (10)식을 이용하였다.

$$\delta = \left[\frac{3}{8ER} \right] F\phi \quad (10)$$

여기서 $\delta(\text{mm})$ 는 indentation 깊이, $F(\text{N})$ 는 힘, $E(\text{MPa})$ 는 탄성율, $R(\text{mm})$ 은 indenter의 반경, $t(\text{mm})$ 는 고무 디스크의 두께, ϕ 는 형상계수; $\phi = \{(t/R) - 0.75\} / (t/R)$ 를 나타낸다. 고무 디스크 2장을 겹쳐 놓고 직경이 3, 6, 12.7 mm인 3개의 indenter를 이용하여 힘을 가하면서 indentation 깊이를 측정한 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. Indentation 깊이와 힘의 상관관계는 선형적이며 (10)식에 의한 실험적인 탄성율 값은 2.02, 1.98, 1.99 MPa이었다. 그러므로 이 고무 디스크의 탄성율은 2.0 MPa로 정하였다.

O-링의 자유변형. 힘 F 와 bulge 높이 h 의 상관관계를 나타내기 위하여 (8)식의 p 와 (2)식의 $(\sigma_c)_{max}$ 를 같게 두고 정리하면 아래의 (11)식과 같다.

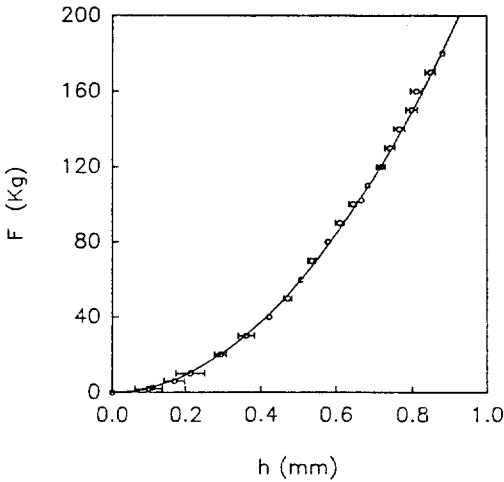


Fig. 5. The comparison of the bulge height h estimated from measurement with Equation 11. The measured values for bulge height were divided by 0.9 for h .

$$h = a \sqrt{\left(\frac{24}{\pi^3}\right) \left(\frac{F}{LED}\right)} K \quad (11)$$

(11)식에, $a=2$ mm, $L=24.6$ mm, $D=144$ mm, $E=2$ MPa, $K=1$ 을 대입하고, F 와 h 의 상관관계를 실선으로 Fig. 5에 나타내었다. 접촉폭의 중앙에서 힘 F 를 증가시키면서 bulge 높이 h 를 측정하였는데 측정값은 (11)식으로 계산된 값보다 작았다. 이는 접촉면적의 크기가 원형구멍의 크기에 비해 충분하지 못하기 때문이다, 즉 $K < 1$. 실험 데이터 값을 0.9로 나누어 준 결과를 Fig. 5에 표시하였는데 실선과 잘 일치하였다. 이는 보정상수 K 값이 0.9임을 의미한다. 그러므로 (8)식은 다음과 같이 (12)식으로 수정 표현될 수 있다.

$$h = \left[\left(\frac{3}{\pi} \right) \left(\frac{p}{E} \right) a \right] (0.9) \quad (12)$$

(12)식에서 내부압력 p 는 접촉면에서의 접촉응력 σ_c 와 동등하다. 최대 접촉응력 $(\sigma_c)_{max}$ 를 구하기 위하여 반경방향 변형 x 를 증가시키면서 접촉폭 중앙에서의 bulge 높이 h 를 측정하였다. 최대

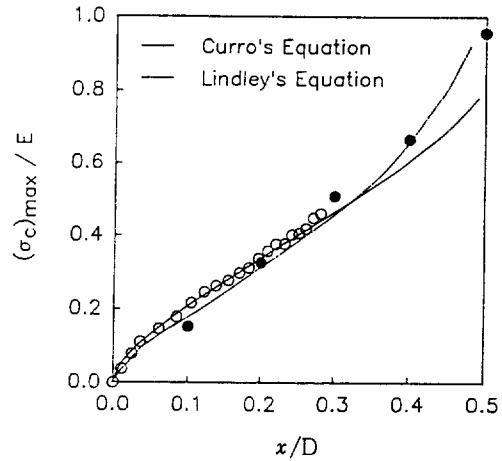


Fig. 6. Values of $(\sigma_c)_{max}/E$ as a function of dimensionless radial deflection x/D . Experimental data (○) and Molari's data (●).

접촉응력 $(\sigma_c)_{max}$ 와 bulge 높이 h 와의 상관관계는 (12)식으로 부터 다음의 (13)식과 같이 표현될 수 있다.

$$(\sigma_c)_{max} = \left(\frac{1}{0.9} \right) \left(\frac{\pi}{3} \right) \left(\frac{E}{a} \right) h \quad (13)$$

무차원 최대 접촉응력 $(\sigma_c)_{max}/E$ 와 무차원 반경방향 변형 x/D 의 상관관계를 Fig. 6에 나타내었다. Curro의 식은 (5)식-(7)식을 이용하여 실선으로, Lindley의 식은 (4)식을 이용하여 이점 채선으로 표시하였다.

x/D 값이 0.28까지 측정된 실험 데이터는, 최대 접촉응력이 반경방향 변형의 증가에 따라 비선형적으로 증가하고 있음을 보여주고 있으며, Lindley의 식보다 Curro의 식에 잘 일치하였다. Molari²는, x/D 값을 0.1씩 증가시키면서, Muller의 방법을 이용하여 최대 접촉압력을 측정하였는데 그의 실험 데이터는 x/D 값이 0.1일 때는 실제보다 낮은 접촉압력을 나타내고 있다. 이는 bulge 높이에 의한 접촉압력 측정이 Muller 방법보다 정교하게 접촉압력을 측정할 수 있음을 나타낸다. x/D 의 값이 0.5일 때는, 즉 대변형일 경우, Molari의 실험

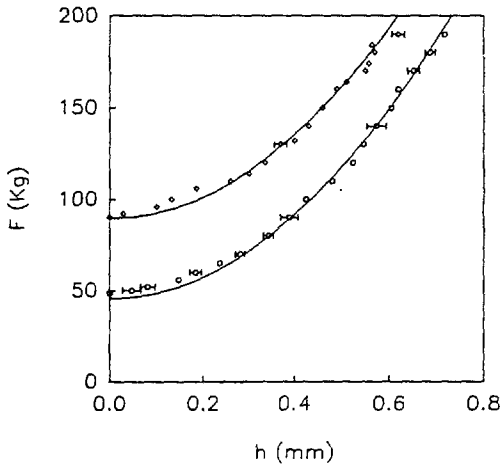


Fig. 7. The comparison of the measured bulge heights h with the Hertz equation (solid lines) at $y_b=25$ mm ($\circ$) and 35 mm ($\diamond$).

값은 Lindley의 식과 잘 일치하였다. 이는 Lindley의 식이 대변형일 경우에 장점이 있음을 나타내고 있다.

접촉폭의 중앙에서 25 mm 떨어진 지점 ($y_b=25$ mm)과 35 mm 떨어진 지점 ($y_b=35$ mm)에서 48.5 kg과 90 kg의 힘이 적용되었을 때 bulge 높이는 각각 zero였다. 힘 F 를 증가시키면서 bulge 높이 h 를 측정할 결과를 Fig. 7에서 Hertz 식과 비교하였다.

(1)식은 (12)식에 의해 수정되었으며 Fig. 7에서 실선으로 표시되었다. Local 위치에서 bulge 높이를 측정할 때 구멍의 직경이 크고 접촉면 바깥쪽이 곡면을 이루고 있기 때문에 접촉면 edge에서의 bulge 높이는 0.3 mm 이상에서 주어진 힘에 대해 충분히 발달됨을 알 수 있다. Bulge 높이 0.3 mm 이상에서의 실험데이터는 Hertz식과 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 접촉압력 분포측정에 bulge 높이 측정법이 적용될 수 있음을 의미한다.

$y_b=0, 25, 35$ mm 에서, $50, 100, 140, 180$ kg의 힘을 적용했을 때 측정된 bulge 높이 값을 Table 1에 나타내었으며 x 값은 (7)식으로 부터 구하였다.

Fig. 8에 무차원 y 방향거리 y_b/D 에 따른 무차

Table 1. Values of the Measured Bulge Height h (mm) at Three Different Local Positions. Values for x were Determined from Equation 7

F (kg)	x (mm)	$y_b=0$ (mm)	$y_b=25$ (mm)	$y_b=35$ (mm)
50	17.8	0.426	0.06	
100	29.2	0.576	0.424	1.132
140	36.4	0.694	0.569	0.43
180	42.6	0.796	0.687	0.57

원 접촉응력 분포 σ_c/E 를 4개의 x/D 값에 대해 나타내었다. 4개의 반경방향 변형 값 (즉, $x=17.8, 29.2, 36.4, 42.6$ mm)에서의 Hertz type의 접촉응력 분포는 4종류의 선으로 나타내었다.

검은 점으로 표시된 접촉응력 측정값은 bulge 높이가 0.3 mm 이하인 2개의 데이터를 제외하면 Hertz type의 접촉응력 분포와 잘 일치한다. 이는 bulge 높이 측정법이 local 접촉압력을 측정하는데 유용하게 사용될 수 있음을 보여준다.

O-링의 제한변형. Side restrainer를 부착한 후, $y_b=0, 15, 25, 35$ mm에서, 힘 F 를 증가시키면서 bulge 높이 h 를 측정할 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

좌우방향의 변형이 제한되었기 때문에 자유변형과는 달리 작은 힘에 대해서도 bulge 높이가 잘 발달됨을 알 수 있다.

실험 데이터는 실선으로 나타난 이차 polynomial regression에 잘 일치한다. 이는 접촉응력은 적용된 힘의 제곱근에 비례함을 의미한다.

접촉폭 중앙에서 bulge 높이를 측정하여 무차원 최대 접촉 응력 $(\sigma_c)_{max}/E$ 와 무차원 반경방향 변형 x/D 와의 상관관계를 Fig. 10에 나타내었다. Bulge 높이 h 는 (13)식에 의하여 접촉 응력으로 변환되었다. $(\sigma_c)_{max}/E$ 와 x/D 의 상관관계는 x/D 의 값이 0.01 보다 작을 경우를 제외하고는 선형 관계를 나타내었으며, (14)식으로 표현할 수 있었다. 이는 자유변형 대비 x/D 초기 값에서의 비선형 구간이 현저하게 줄어 들었음을 의미한다. (14)식은 x/D 값으로 부터 최대 접촉응력을 구할

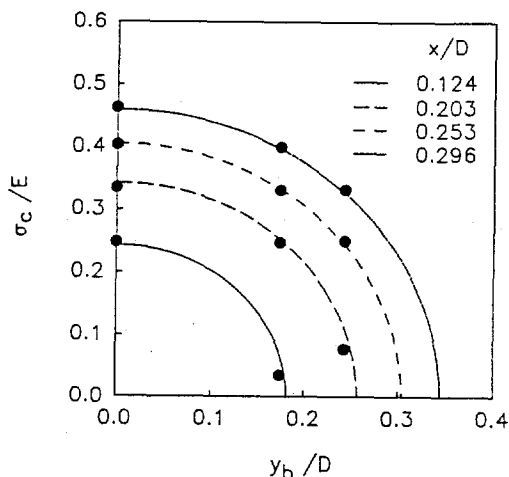


Fig. 8. The variation of dimensionless contact stresses as a function of dimensionless contact width y_b/D at four different radial deflections. Experimental data(●) and Curro's equation(four lines).

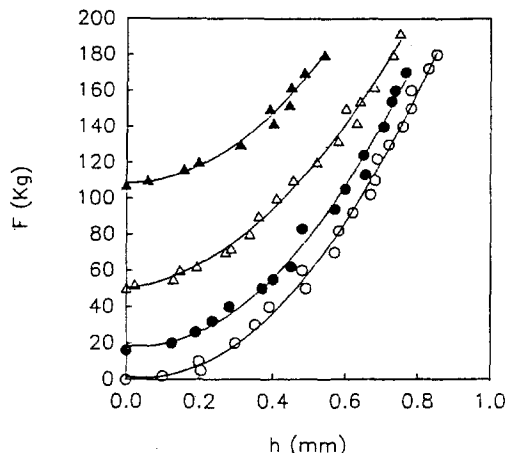


Fig. 9. The relationship between F and h for restrained deformation. Bulge heights were measured at $y_b=0$ mm (○), 15 mm (●), 25 mm (△), and 35 mm (▲).

수 있는 간편한 실험식이다.

$$\frac{(\sigma_c)_{max}}{E} = 2.46 \left(\frac{x}{D} \right) + 0.04 \text{ for } 0.01 < \frac{x}{D} < 0.184 \quad (14)$$

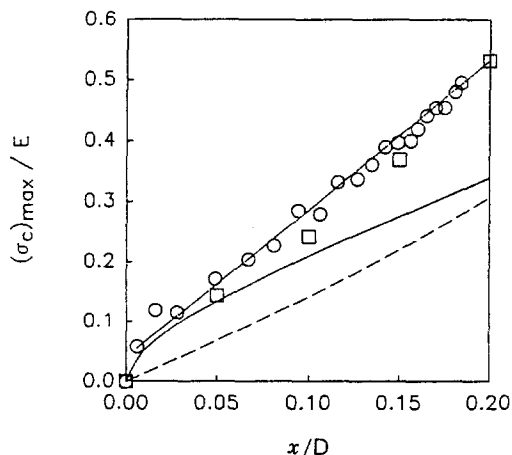


Fig. 10. Values of $(\sigma_c)_{max}/E$ vs. x/D . Experimental data(○) and Dragoni and Strozzi's data (□). Solid line; Curro's equation in unrestrained condition, long-dashed line; Ebisu's representation in restrained condition, dashed-dot-dot line; Equation 14.

점선으로 나타낸 Ebisu의 (9)식은 실제 실험값의 50% 정도를 나타내 $(\sigma_c)_{max}/E$ vs. x/D 의 상관관계를 표현하는데 부적합하였다. x/D 값이 0.1, 0.15, 0.18 일때, restrained 고무 디스크의 $(\sigma_c)_{max}/E$ 값은 unrestrained 고무 디스크의 경우 보다 1.36, 1.47, 1.52배나 높았다. 이는 좌우방향의 변형이 제한된 고무 디스크의 증가된 shape factor 값 S 에 기인한다; 즉, S = 힘이 가해진 면적/힘이 가해지지 않은 면적. 가해진 힘 F 가 증가함에 따라 restrained 고무 디스크의 힘이 가해진 면적은 증가하고 힘이 가해지지 않은 면적은 급격히 감소한다. 그 결과 S 값은 급격히 증가하여 고무 디스크의 압축 stiffness를 급격히 증가시키게 되어 동일한 x/D 값에서 높은 접촉응력을 나타내게 된다. 본 실험 결과는 Dragoni와 Strozzi의 실험 결과보다 $(\sigma_c)_{max}/E$ 값이 조금 높는데 이는 본 실험에서 사용된 고무 디스크의 포아송 비 (0.4988)가 그들 재료의 포아송 비 (0.49)보다 높기 때문이라 추측된다.

접촉압력 분포를 Fig. 11에 나타내었다. x/D 값

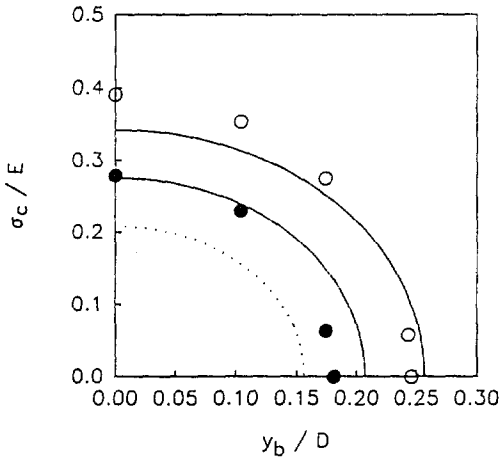


Fig. 11. The distribution of contact stresses at the top contact width. Experimental data with $x/D=0.1$ (●) and 0.15 (○). Calculated Hertz contact stress distributions with $x/D=0.1$ (dotted line), 0.15 (dashed-dot-dot line), and 0.2 (solid line).

이 0.1과 0.15 일때 bulge 높이 값은 Fig. 9의 실험 데이터로 부터 구했다. 이때 적용된 힘 F 의 값은 55 kg과 110 kg이었다. x/D 값이 0.1, 0.15, 0.2 에서 좌우방향 변형이 제한 받지 않는 O-링의 Hertz type 접촉응력 분포는 3종류의 선으로 표시하였다.

동일한 x/D 값에서, 자유변형 대비 접촉폭이 증가하였으며, 접촉폭 중앙에서의 접촉압력 증가가 현저하였고, 접촉응력 분포는 semi-ellipse 처럼 보였다. x/D 값이 0.1일 때, 제한변형일 경우의 접촉압력은 자유변형의 경우 보다 높았다. 이는 restrained 고무 디스크의 증가된 shape factor 값에 기인한다. 그러므로 O-링이 내부 유체압력이 낮은 sealing 기구에 설치될 때, 직각 홈의 폭은 O-링 단면적의 직경보다 클 필요가 없다. 왜냐하면, restrained O-링의 최대 접촉응력이 unrestrained O-링의 최대 접촉응력보다 크기 때문이다. 측벽에서의 마찰을 제거하여야만 상부 접촉면과 바닥 접촉면에서 동일한 접촉응력을 얻을 수 있어 seal의 효율이 손상되지 않는다. 이는 O-링을 홈에 설치할 때 윤활제를 적용함으로써 달성할

수 있다.

결론

O-링의 자유변형에서, 최대 접촉응력 $(\sigma_c)_{max}$ 은 반경방향 변형 x 가 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 뚜렷하게 보여주었다. Sealing 기구에 설치된 O-링의 x/D 값은 일반적으로 0.3 이하이므로 최대 접촉응력 계산시 Curro의 식이 Lindley의 식 보다 정확한 값을 제공하였다.

Bulge 높이 h 와 접촉응력 (σ_c) 의 상관관계는 O-링 접촉면에서의 local 접촉압력을 직접적인 방법으로 측정하는데 성공적으로 적용되었다. 그러므로 bulge 높이 측정법은 Muller의 방법과 상호 보완적으로 접촉압력을 측정할 수 있다. 역으로, 대형 고무제품에 대해 알고있는 압력을 적용하여 bulge 높이를 측정하면 이 고무제품의 탄성을 측정이 가능하다.

O-링의 제한변형에서, 접촉압력으로 변환될 수 있는 bulge 높이는 적용된 힘의 제곱근에 비례하였으며 최대 접촉응력과 반경방향 변형과의 상관관계는 x/D 의 값이 0.01보다 작을 경우를 제외하고는 선형적인 관계를 나타내었다. O-링의 좌우방향 변형제한은 고무 디스크의 압축 stiffness를 증가시키게 되는데 이 현상은 반경방향 변형이 클수록 현저하였다; 즉, x/D 값이 0.1, 0.15, 0.18 일 때, restrained 고무 디스크의 $(\sigma_c)_{max}/E$ 값은 unrestrained 고무 디스크의 경우를 나타낸 Curro의 식에 의한 값 보다 1.36, 1.47, 1.52 배 높았다.

O-링이 내부 유체압력이 낮은 sealing 기구에 설치될 때 홈의 폭은 O-링 단면적의 직경보다 클 필요가 없으며 윤활제를 적용함으로써 상하부 접촉면에서 균일한 접촉응력을 얻을 수 있음을 알았다.

NOMENCLATURE

a : radius of a hole.

b : half width of contact surface.

D_o : diameter of a toroidal O-ring.

D : cross-sectional diameter of the undeformed O-ring.

E ; material Young's modulus.

F : applied loads.

h : bulge height.

K : correction factor.

L : thickness of a rubber disc, or length of a rubber cylinder.

p : internal pressure

R : radius of a round substance.

S : shape factor.

t : thickness of a rubber block

x : radial deflections.

y_b : horizontal distance from the center of contact width.

ϕ : geometric factor.

δ : indentation depth.

ν : material Poisson's ratio.

σ_c : contact pressure.

$(\sigma_c)_{max}$: maximum contact pressure.

1 : for metals

2 : for rubbery materials

참 고 문 헌

1. B. M. Gorelik and G. I. Feld'man, *Soviet Rubber Technology*, **22**(4), 27 (1963).
2. P. G. Molari, 6th International Conference on Fluid Sealing, BHRA, Munich, GFR, B2/15-31, Feb. 27-Mar. 2 (1973).
3. G. Medri and A. Strozzi, *Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev.*, **23**, 596 (1984).
4. A. Strozzi, "Experimental Stress Analysis", ed. H. Wieringa, p. 613-622, Martinus Nijhoff Publ., 1986.
5. E. Patri and A. Strozzi, *J. of Tribology*, **106**, 505 (1984).
6. E. Dragoni, G. Medri, and A. Strozzi, 11th International Conference on Fluid Sealing, BHRA, Cannes, France, B3/160-174 (1987).
7. H. K. Muller, 2nd International Conference on Fluid Sealing, BHRA, Cranfield, UK, B2/13-28 (1964).
8. A. N. Gent and W. Kim, *Rubber Chemistry and Technology*, **64**, 813 (1991).
9. B. M. Gorelik, M. F. Buhina, and A. V. Ratner, *Soviet Rubber Technology*, **20**(1), 10 (1961).
10. B. M. Gorelik and G. I. Feld'man, *Soviet Rubber Technology*, **23** (4), 21 (1964).
11. P. B. Lindley, *J. of IRI*, **4**, 209 (1967).
12. J. G. Curro and E. A. Salazar, *Rubber Chemistry and Technology*, **46**, 530 (1973).
13. T. Ebisu, M. Yamamoto, H. Maekawa, and A. Onodera, *PATRAM*, **83**, 672 (1983).
14. A. F. George, A. Strozzi, and J. I. Rich, *Tribology International*, **20**, 237 (1987).
15. N. W. B. Clarke, *Inst. Public Health Engrs. Journal*, **63** (2), 108 (1964).
16. H. Hertz, "Miscellaneous Papers", translated by D. E. Jones and G. A. Schott, p. 146, Macmillan and Co., London, 1896.
17. H. Johannesson, "Calculation of the Pressure Distribution in an O-ring Seal Contact", Mechanical Engineering Publications, London, 1978.
18. E. Dragoni and A. Strozzi, *J. of Tribology*, **110**, 173 (1988).
19. S. D. Gehman, *Rubber Chemistry and Technology*, **41**, 1122 (1968).