

실리콘 중공 가스켓의 대변형에 관한 연구

이태원[#]

A Study on the Large Deformation of Silicon Rubber Gasket with Hollow Circular Section

Tae Won Lee[#]

ABSTRACT

In this paper, the large deformation of hollow silicon rubber gasket is treated. The frictional contact occurs between groove and the outer part of hollow gasket, and the frictional self-contact exists in the inner parts of hollow gasket. The silicon rubber has the nonlinear elastic behavior and its material property is approximately incompressible. Hence, the stress analysis requires an existence of a strain energy function, which is usually defined in terms of invariants or stretch ratio such as generalized Mooney-Rivlin and Ogden model. Considering large compressive deformation and friction, Mooney-Rivlin 3rd model and Coulomb's friction model are assumed. The numerical analysis is obtained by the commercial finite element program MARC. But, due to large deformation, the elements degenerate in the inner parts of hollow gasket. This means that the analysis of subsequent increments is carried out with a very poor mesh. In order to continue the analysis with a sufficient accuracy, it is necessary to use new finite element modeling by remesh. Experiments are also performed to show the validity of present method. As a conclusion, numerical results by this research have good agreements with experiments.

Key Words : Hollow Gasket(중공 가스켓), Mooney-Rivlin 3rd model(Mooney-Rivlin 3 차 모델), Coulomb's Friction(Coulomb 의 마찰), Self Contact(자체 접촉), Finite Element Remesh(유한요소 재생성)

기호설명

λ_i = principle stretch ratio
 μ = frictional coefficient
 a_i, b_i = material constants for Ogden model
 c_{rs} = material constant for Mooney-Rivlin Model
 I_i = strain invariants
 W = strain energy function

1. 서론

가스켓(gasket)은 분리된 구조물 사이에 위치하며 체결로 인한 압축력에 의하여 변형되고 이 때 발생하는 면압에 의하여 기밀이 유지되게 된다. 따라서 사용환경 및 목적에 따라 다양한 재료 및 형상으로 제작되고 있다. 이중에서도 실리콘 중공 가스켓은 작은 압축력에도 넓은 부위의 접촉을 얻을 수 있어 기밀 효과가 크므로 전자장비나 방산

[#] 접수일: 2003 년 2 월 26 일; 게재승인일: 2003 년 7 월 11 일
 교신저자: 금오공과대학교 기계공학부
 E-mail: twlee@kumoh.ac.kr, Tel: (054) 467-4225

장비 등의 방수용으로 널리 쓰이고 있다. 실리콘 중공 가스켓은 중실 실리콘 가스켓에 비해 큰 변형을 일으키는데 특히 가스켓 홈(groove)과의 접촉 현상뿐 아니라 중공의 내경부분에서 자체접촉(self contact)까지 발생한다. 이러한 복잡한 접촉현상 때문에 현재 국내 산업계에서는 단순한 형상을 제외하고 실리콘 중공 가스켓의 변형 형상의 파악을 위하여 단면 촬영을 통한 실험적 방법에 의존하고 있다.

현 연구 대상인 실리콘 중공 가스켓은 작은 하중 아래에서도 대변형을 일으키는 초탄성체(hyperelastic material)이며, 응력과 변형을 관계가 비선형성과 비압축성의 성질을 가지고 있고,¹ 가스켓 홈과의 외부접촉 및 대변형에 따른 자체접촉이 발생하여 해석학적으로 변형 형상을 파악하기에 어려움이 많다. 그러나, 최근 컴퓨터 연산능력의 비약적인 발달로 인해 유한요소법을 이용하여 대변형까지 고려한 접촉문제와^{2,4} 고무재료와 같은 비선형 탄성거동을 보이는 재료의 대변형 거동해석이 연구되었다.^{3,7} 뿐만 아니라, 고무재료의 접촉문제 역시 수치적으로 해를 구하는 것이 가능하게 되었고⁸⁻¹⁰ 이 중 Lee¹⁰는 자체접촉까지 고려한 실리콘 중공 가스켓의 변형해석을 시도하였다. 그는 Hermann¹¹ 유한 요소와 Total Lagrangian 정식화법을 적용하여 해를 구하였으나 연구 결과 자체 접촉이 일어나는 내경부분에서 접힘(folding)현상으로 유한요소가 4각형에서 3각형으로 왜곡되고 이 접힘 때문에 특정 형상으로 유한 요소 모델링을 하지 않으면 수치해석이 불가능한 문제점이 발생하였다.

문헌¹⁰의 문제점을 해결하여 보다 정확한 압축시 변형 형상과 압축력을 계산하기 위하여 본 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 유한 요소 재생성에 주안점을 두고 일반 4각형 유한 요소와 Update Lagrangian 정식화법을 사용하였다. 그리고, 연구 대상인 실리콘 중공 가스켓은 압축과 대변형이 일어나기 때문에 일반 고무문제와 달리 실리콘 고무 재료의 물성 실험을 통하여 대변형까지 잘 맞는 고차의 Mooney-Rivlin 모델을 적용하였다. 이러한 사항들 뿐만 아니라 가스켓 홈과 실리콘 고무 자체의 마찰 역시 고려하여 유한요소 상용 코드 MARC 로부터 가스켓의 변형 형상과 압축력을 구하고 실험을 통하여 비교 검증하였다.

2. 재료의 특성

변형 해석에 있어서 무엇보다도 중요한 것은 정확한 물성값의 결정이다. 고무는 비선형성인 초탄성체이므로 일반 탄성문제와 달리 변형에너지 함수 W 를 이용하여 물성치를 기술하여야 한다.

초탄성체의 변형에너지 함수를 정의하기 위하여 응력과 변형율에 대한 실험이 필요하다. 실험 결과 얻어진 응력-연신률과 가정된 접합곡선의 오차를 최소화함으로써 고무재료의 변형에너지 함수를 결정할 수 있으므로⁶ 변형에너지 함수의 표현 방식이 중요한데 일반적으로 크게 변형률 불변량 I_1, I_2, I_3 과 주연신률 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 로 표시한다. 이 때 변형률 불변량과 주연신율의 상관관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (1)$$

2.1 고무 탄성 모델

2.1.1 Mooney-Rivlin 모델

변형률 불변량으로 표시하는 방법으로 대표적인 것은 Mooney-Rivlin 모델로써 아래 식과 같이 제안되었다.

$$W = \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} c_{rs} (I_1 - 3)^r (I_2 - 3)^s \quad (2)$$

위 식에서 c_{rs} 는 재료 상수이고 실험을 통하여 결정될 미지수이다.

일반적으로 단순 Mooney-Rivlin 모델은 식 (2)에서의 선형항만을 취한 것을 사용할 수 있으나 이 모델은 인장 시험시 변형률이 100% 이하에 대해 잘 일치하지만, 변형이 압축모드인 경우나 변형율이 큰 경우는 오차가 크므로 본 연구에서는 더 좋은 결과를 얻기 위하여 3 차 급수전개 형태를 사용하였다. 그러나, 3 차 급수 전개에서 결정하여야 할 c_{rs} 의 수가 많기 때문에 식 (2)에서 표현한 완전한 모델보다 단순화된 아래의 형태를 선정하였다.

Mooney-Rivlin 3 차 모델:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{30}(I_2 - 3)^3 \quad (3)$$

2.1.2 Ogden 모델

주연신율을 이용한 대표적 모델은 Ogden 모델로써 다음과 같다.

$$W = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{b_i}{a_i} (\lambda_1^a + \lambda_2^a + \lambda_3^a - 3) \quad (4)$$

여기서 a_i, b_i 는 결정되어야 할 재료 상수들이다. 식 (4)의 가장 간단한 형태는 2 차 전개 모델로 Mooney-Rivlin 모델의 1 차 전개 모델과 같은 형태로 나타난다. 그러므로, 4 차 이상의 모델이 Mooney-Rivlin 모델의 3 차와 동일한 의미를 갖게 되나 이는 실험으로부터 결정하여야 할 재료 상수의 수가 너무 많아지므로 식 (3)의 Mooney-Rivlin 모델의 경우와 비슷한 수의 재료 상수를 결정하기 위하여 본 연구에서는 아래의 Ogden 3 차 모델을 채택하였다.

Ogden 3 차 모델:

$$W = \sum_{i=0}^2 \frac{b_i}{a_i} (\lambda_1^a + \lambda_2^a + \lambda_3^a - 3) \quad (5)$$

2.2 실리콘 고무 가스켓 재료의 특성

일반 고무는 실리콘 고무보다 우수한 물성을 갖고 있지만 인장강도 연신율, 내마모성의 성질은 고온, 저온 또는 약품에 의해서 쉽게 파괴되는 단점이 있다. 그러나, 실리콘 고무는 넓은 온도 범위에서도 원래의 물성이 큰 변화를 일으키지 않는다. 또한 열전도율이 일반 유기 고무보다 우수하고, 무독성이며 투명성 및 착색성이 우수하다. 따라서 실리콘 고무는 산업용 및 의학용, 방산용으로 널리 쓰이는 고무 재료이며 특히 내한, 내열성이 요구되는 장비의 가스켓 재료로 널리 사용된다. 실제로 실리콘 고무는 화학적으로는 일반 유기 고무와 다르지만 물성은 일반 고무와 매우 유사한 특성을 가지고 있다. 참고로 본 논문에서 사용된 실리콘 고무는 해룡 실리콘사의 HR-1150로 물성은 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties of silicon rubber

Properties	Value
Specific gravity	1.13e-6 kgf/mm ³
Hardness (Shore A)	50
Tensile Strength	1.03 kgf/mm ²
Elongation	374 %

실리콘 고무의 기계적 물성을 결정하기 위하여 단순 인장 시험을 하였다. 단순 인장 시험에 사용된 시편은 KS M 6518 에서 제시된 아령형 3 호를 사용하였다. 실험은 25 °C 에서 20 mm/min 의 속도로 만능시험기를 사용하였으며 시편의 자세한 형상은 Fig. 1 과 같다.

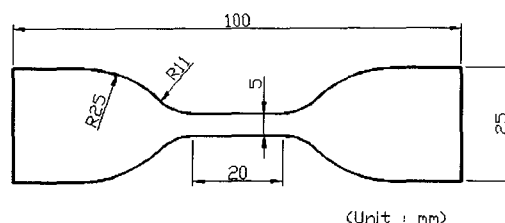


Fig. 1 Simple tension specimen (t=2mm)

Fig. 1 의 시편을 축방향으로 374 %까지 단순 인장 시험을 통하여 연신율과 응력을 측정하였다. 실험 결과로 얻어진 응력-연신율의 데이터로부터 변형에너지 함수의 재료 상수 계수들을 구할 수 있다. 계산 결과 선정된 식 (3)의 Mooney-Rivlin 3 차 모델과 식 (5)의 Ogden 모델의 재료 상수들은 Table 2 와 같다.

Table 2 Material constants for stain energy functions

Mooney-Rivlin 3rd Model	Ogden 3rd Model
$c_{10} = -8.14566 \times 10^{-3}$	$b_1 = 1.34477 \times 10^{-2}$
$c_{01} = 7.11768 \times 10^{-2}$	$b_2 = -4.48568 \times 10^{-2}$
$c_{11} = 1.57310 \times 10^{-2}$	$b_3 = -5.21585 \times 10^{-1}$
$c_{20} = -3.65149 \times 10^{-3}$	$a_1 = 3.47122$
$c_{30} = 4.98782 \times 10^{-5}$	$a_2 = -3.61345$
	$a_3 = -7.18419 \times 10^{-2}$

Table 2 의 재료 상수 계수를 갖는 Mooney-Rivlin 모델과 Ogden 모델 모두 3 배 이상의 연신율임에도 불구하고 실험결과와 잘 일치함을 Fig. 2 에서 볼 수 있다. 그러나, 좀 더 자세히 비교하여

보면 실험결과와 두 모델식으로부터의 응력-변형을 곡선과의 최대 오차가 Mooney-Rivlin 모델 경우는 0.247 %, Ogden 모델은 0.7954 %로 Mooney-Rivlin 3 차 모델이 실험 결과와 상대적으로 잘 맞는다. 이러한 이유로 본 연구 대상인 실리콘 고무의 재료 성질은 Mooney-Rivlin 3 차 모델을 적용하기로 한다(참고로 본 논문에서 기술되지 않았으나 식 (5)의 Ogden 3 차 모델에 대하여 해석을 수행한 결과 현 연구 대상인 실리콘 중공 가스켓의 경우 식 (3)의 Mooney-Rivlin 3 차 모델을 적용한 해석 결과가 실험 결과에 보다 잘 일치한다).

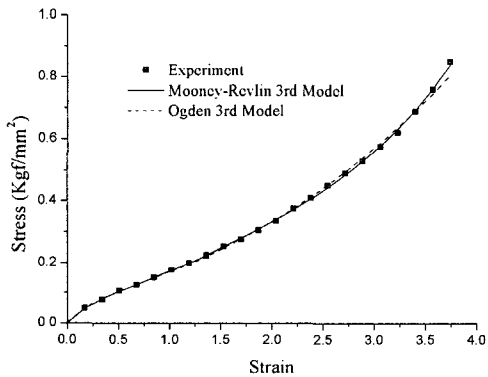


Fig. 2 Stress-strain curve for silicon rubber

3. 해석 및 실험

아래 그림은 본 연구에 사용된 실리콘 중공 가스켓이다.

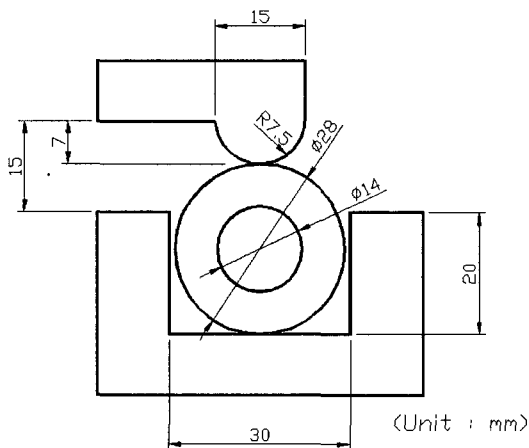


Fig. 3 The geometry of hollow gasket and groove

Fig. 3 과 같이 실리콘 중공 가스켓은 외경 28 mm, 내경 14 mm 인 중공의 단면을 갖는 세장형이며 길이 방향으로 하부 하우징의 가스켓 홈에 놓여 있다. 이 초기상태에서 상부 하우징이 아래로 이동하여 하부 하우징과 체결되면 가스켓은 상부 하우징의 돌출 형상에 의하여 홈 안에서 완전히 압축되어 밀봉 효과가 나타내게 된다. 이 때 Fig. 3 에서 보듯이 완전 체결을 위하여 이동거리는 1.5 mm 이다.

이 문제는 단순화하여 2 차원 평면 변형을 문제로 볼 수 있으며 변형이 크고 마찰을 고려한 고무 재질의 접촉 문제이다. 그러므로, 수학적 방법에 의존하여 직접 해를 구하기가 불가능하여 유한요소 상용코드 MARC 가 수치해를 위하여 선정되었다. 해석에 사용된 유한요소는 선형 4 절점 요소로 Fig. 4 와 같이 800 개의 요소와 900 개의 절점으로 가스켓을 모델링하였다. 이때, 중공 가스켓의 내경이 접히는 자체 접촉 현상이 예측되므로 내경측의 요소가 더 작도록 요소분할을 하였다.

고무문제의 해석은 Hermann 요소를 사용하는 Total Lagrangian 방법과 일반 유한요소를 사용하는 Update Lagrangian 방법이 있다. 일반적으로 변형이 큰 경우 Update Lagrangian 정식화법이 권장되며 이 방법만이 해석 도중 유한 요소 재생성이 가능하다. 그러므로, 유한 요소 재생성 기법을 사용하는 본 연구에서는 Update Lagrangian 방법을 적용하였다.

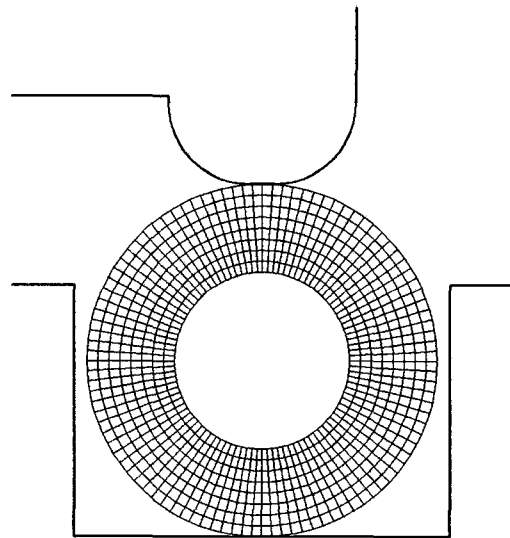


Fig. 4 Finite element model of hollow gasket

한편, 고무에 비하여 상부 하우징 및 하부 하우징은 변형이 거의 없기 때문에 문제의 단순화를 위하여 강체로 가정하였다. 이 외에도 실리콘 중공 가스켓 문제는 마찰을 고려하여야 한다. 그러나, 마찰은 상당히 복잡한 현상이고 상대재료의 형상, 조성, 온도, 압력과 마찰속도, 표면조도 등과 같은 수많은 요인에 영향을 받는다. 더구나 접촉부위에서 마찰이 고려하면 스틱슬립(stick-slip)현상이 나타나 이를 수식화하는 많은 가설이 존재한다. 이와 같이 마찰현상은 해석하기가 어려움이 많으므로 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 Coulomb 의 마찰 모델을 적용하기로 하고 이에 필요한 마찰계수를 항력과 마찰력을 측정하는 실험을 통하여 다음과 같이 설정하였다.

가스켓과 하우징 접촉시 : $\mu_{out} = 0.3$
 가스켓 자체접촉시 : $\mu_{in} = 0.7$

수치해석에 의한 변형과 실제 형상과의 비교를 위하여 먼저 실험 결과를 보기로 하자. Fig. 5 는 압축된 실리콘 중공 가스켓의 단면을 50 배 확대 촬영 사진이다.

사진에서 보듯이 중공의 내경부분이 완전히 압착되어 자체접촉이 일어나고 극히 일부분을 제외하고 중공의 외경부분은 하우징과 가스켓 홈에 완전히 접촉되어 밀봉 효과가 최대로 나타남을 알 수 있다. 그러나, 제작상의 어려움으로 인하여 상부 하우징의 돌출부에서 점 접촉이 일어났고 가스켓 홈이 수직을 유지하지 못한다는 것이다. 이로

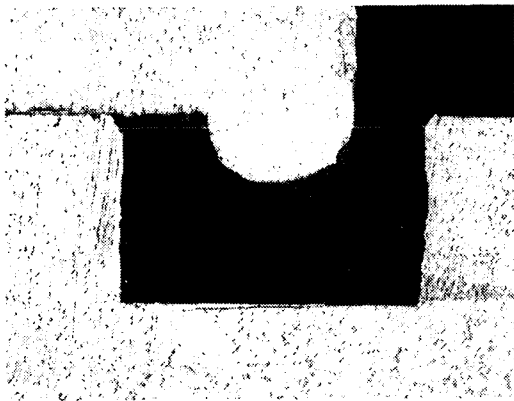


Fig. 5 Deformed shape of hollow gasket by the experiment (x 50)

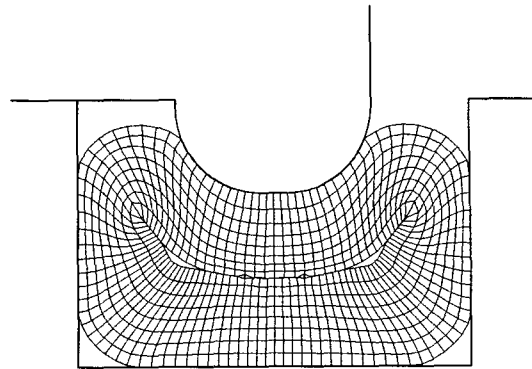


Fig. 6 Deformed shape of hollow gasket at the final position of upper housing without remesh technique

부터 수치해와 어느 정도 오차가 발생됨을 예측할 수 있다.

Fig. 6 은 유한 요소 재생성 기법을 사용하지 않고 Mooney-Rivlin 3 차 모델을 적용한 가스켓의 변형 해석 결과이다. 이 결과는 상부 하우징의 전체 이동거리 1.5 mm 를 0.0075 mm 의 증분으로 200 번에 걸쳐서 해석하여 얻은 것인데 자체 접촉이 일어난 내경부분에서 접합 현상이 일어나고 이 부분에서 유한요소의 형상이 3 각형으로 왜곡되어 있음을 볼 수 있다.

해석과정을 보다 자세히 검토하여 보면 상부 하우징의 이동거리가 약 1 mm 만 넘으면 내경의 형상이 원형에서 사각형으로 변형되기 시작한다. 사각형의 모서리에 해당하는 부분이 최종적으로 접합으로 발전하기 때문에 이 근처에서 유한요소 형상이 4 각형에서 3 각형으로 왜곡되기 시작한다. 수치해석 관점에서 보면 3 각형으로 왜곡되는 이 부분이 실제보다 유한요소의 강성이 크게 계산되어 수치해의 정확성에 문제를 일으킬 소지가 있다. 이 현상은 Fig. 6 에서와 같이 내경의 접합.양끝 국소 부분에서 자체접촉이 일어나지 않게 한다. 그러므로, 보다 향상된 해를 얻기 위하여 유한요소 재생성 과정이 필요하다. 그러나, 과도한 유한요소 재생성은 수치해의 정확도를 떨어뜨리므로 본 연구에서는 유한요소 재생성을 한번만 하였고 그 위치를 상부 하우징의 이동거리 1.0125 mm 로 선정하였다. 이 위치에서 유한요소 재생성 전의 변형 형상은 Fig. 7 에, 재생성후의 유한요소 모델링은 Fig. 8 에 도시하였다.

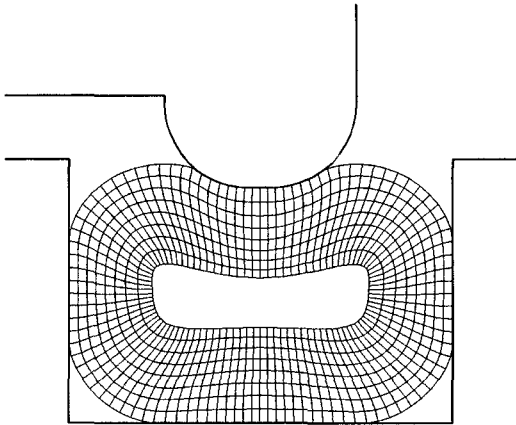


Fig. 7 Deformed shape of hollow gasket at 1.0125mm movement of upper housing before remesh

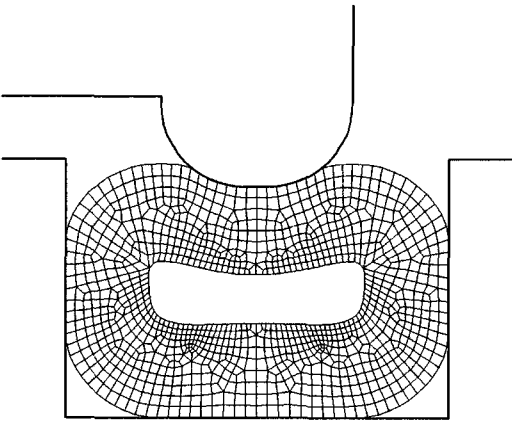


Fig. 8 Remeshed shape of hollow gasket at 1.0125mm movement of upper housing

유한요소 재생성 기법을 채택하여 Fig. 8 과 같이 모델링한 후 상부하우징의 이동이 1.5 mm 까지 도달하였을 때의 최종 변형 형상은 Fig. 9 에 나타나 있다. 물론 이 경우도 Fig. 6 의 경우와 마찬가지로 유한요소 재생성 후 0.0075 mm 의 증분을 적용하였다.

Fig. 9 의 결과를 보면 유한요소 재생성 없이 해석한 Fig. 6 의 결과와 달리 내경의 접힌 부분이 끝점에서 유한요소 형상이 4 각형으로 유지되었다. 또한 내경의 접힘이 발생하는 부분 근처에서 비접촉된 Fig. 6 과 달리 이 부분이 완전 밀착되어 있음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 유한요소

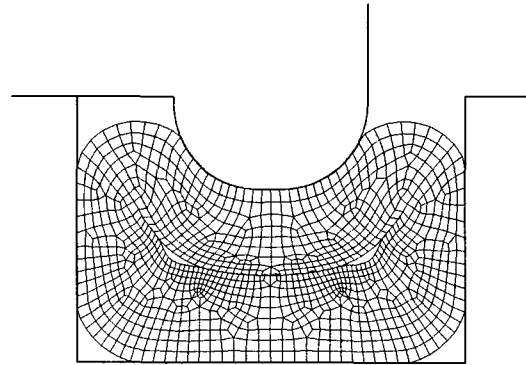


Fig. 9 Deformed shape of hollow gasket at the final position of upper housing after remesh

재생성으로 유한요소의 왜곡현상이 해결되어 수치해의 신뢰성이 향상되었음을 설명하고 있다.

실리콘 중공 가스켓의 변형에 대한 수치해의 결과와 실험의 결과를 비교하여 보기 위하여 Fig. 5 의 사진으로부터 가스켓의 변형형상을 추출한 후 Fig. 6 과 Fig. 9 의 해석 결과를 함께 Fig. 10 에 도시하였다. 그런데, 유한요소 재생성과 관계없이 수치해석한 두 경우의 변형 형상은 내경의 접힌 부분과 같은 국부적인 부분을 제외하고 전체 변형이 동일하여 Fig. 10 에서 실험과 유한요소 재생성한 해석결과만 도시하였다.

Fig. 10 을 보면 먼저 내경의 자체 접촉 부분은 실험에 의한 변형이 수치해석 결과보다 약간 더 크게 나타났고 외경의 경우도 실험에서 측정된 변형이 수치해석 결과보다 약간 더 크다. 이러한 오차는 Fig. 5 의 실험 사진에서 보듯이 제작상의 공차

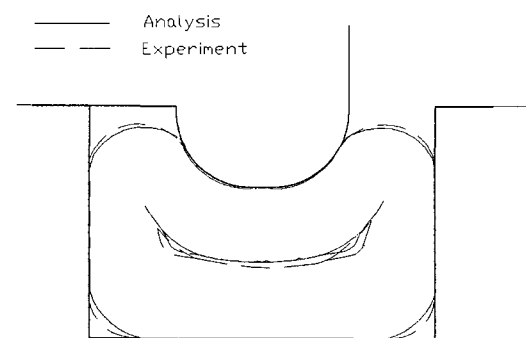


Fig. 10 Deformed shape of gasket by the experiment and the finite element analysis

등으로 인하여 하우징의 형상이 실제 해석한 형상과 약간의 오차를 보이고 있고 또 접촉 형상에 있어 실험은 해석 모델링과 달리 하우징 및 홈과 가스켓 사이에 완전 접촉이 아니라 부분 접촉이 일어나기 때문이다. 그러나, 전체적으로 볼 때 실험과 수치해의 변형 형상이 거의 유사하다.

가스켓의 설계에서 변형 형상 외에도 중요한 것은 Fig. 9 와 같은 최종 변형 형상을 일으키는 가스켓의 압축력이므로 실험으로부터 가스켓의 압축력을 측정하여 수치해의 결과와 비교하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 11 에 제시하였다. 압축력 실험에서 상부 하우징은 push-pull gauge 에 고정하고 0.1 mm 단위로 압축하여 이에 따른 깊이 및 압축력을 측정하였고 약 15 회 측정하여 평균값을 계산하였다. Fig. 12 는 실험과 수치해석에 의한 압축력을 비교한 것이다.

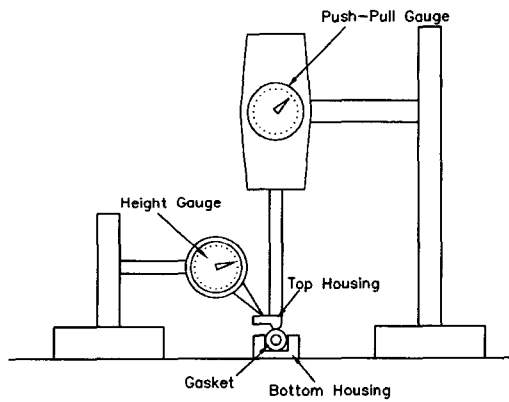


Fig. 11 Schematic diagram of the testing device

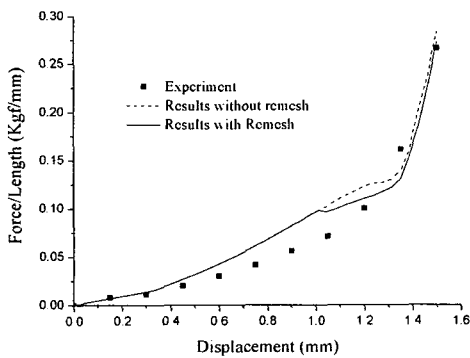


Fig. 12 Compressive load-displacement curve by the experiment and the finite element analysis

Fig. 12 를 보면 상부 하우징의 이동거리가 0.6 mm 에서 1.1 mm 부분을 제외하고는 잘 일치함을 알 수 있다. 이 부분에서 오차가 큰 이유는 크게 두가지이다. 첫째로 해석과정을 자세히 살펴보면 상부 하우징 이동거리 0.6 mm 부터 가스켓 홈의 측면과 가스켓 사이에 접촉이 발생하고 상부 하우징 이동거리 1.1 mm 까지는 측면 홈을 따라 가스켓이 미끄러지는 복잡한 마찰 접촉현상이 일어난다. 이 구간을 벗어나 상부 하우징의 이동거리가 1.1 mm 보다 크면 가스켓 홈의 측면과 실리콘 중공 가스켓 사이에 미끄러지는 현상이 없어지고 다시 실험값과 수치해가 잘 일치한다. 이는 현재 적용한 Coulomb 의 마찰 법칙이 접촉부위 전체가 동적으로 미끄러지는 마찰의 경우는 잘 맞지 않는다는 것을 의미한다. 둘째로 이 구간에서 급격한 변형이 일어나 유한요소 형상이 크게 변하고 이를 고려한 적절한 모델링이 행해지지 않았기 때문에 오차가 있는 것으로 판단된다. 이는 유한요소 재생성을 한 상부 하우징의 이동 거리 1.0125 mm 에서 유한요소 재생성이 없는 경우보다 실험값에 가깝게 압축력이 저하되는 것으로부터 알 수 있다.

본 연구에서 제안한 유한요소 재생성이 수치해의 결과를 전체적으로 향상 시켰음을 Fig. 12 에서 확인하였다. 실제로 최대 압축력은 실험시 단위 길이당 0.265 kgf/mm 이고 Mooney-Rivlin 3 차 모델을 적용하여 해석한 결과는 유한요소 재생성이 없으면 단위 길이당 압축력이 0.284 kgf/mm, 유한요소 재생성시 0.272 kgf/mm 로 얻어진다. 이는 변형 형상에서 관찰되지 못한 결과로 현 연구와 같이 실리콘 가스켓의 변형이 심한 경우 유한요소 재생성이 수치해의 정확성 관점에서 요구됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 초탄성체인 실리콘 중공 가스켓의 대변형에 따른 변형거동과 이에 따른 압축력을 상용 유한요소 코드인 MARC 를 사용하여 수치해를 구하였다. 실리콘 중공 가스켓의 경우 일반 고무 문제와 달리 대변형을 수반하기 때문에 일반적인 저차의 고무 물성치가 아니라 고무의 비선형 거동에 맞추어 선택된 식 (3)의 Mooney-Rivlin 3 차 모델을 사용하였다. 또한, 단순한 접촉문제가 아니라 수치 해석 도중 내경 부분에 접힘으로 유한요소가

4 각형에서 3 각형으로 왜곡되는 현상이 발생하는 복잡한 자체접촉 문제이므로 이를 해결하기 위하여 유한요소 재생성을 하였다.

실험과 비교한 결과 제안된 방법은 기존의 마찰 법칙으로 설명하기 힘든 가스켓과 가스켓 홈 측면사이에 미끄럼이 존재하는 경우를 제외하고 대변형과 자체 접촉까지 고려한 실리콘 중공 가스켓의 최종 변형형상 및 압축력을 수치적으로 정확히 예측할 수 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

참고문헌

1. Ogden, R. W., Non-linear Elastic Deformations, Halsted Press, New York, 1984.
2. Bathe, K. J. and Chaudhary, A., "A Solution Method for Planar and Axisymmetric Contact Problems," Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 21, pp. 65-88, 1985.
3. Bathe, K. J., Finite Element Procedures, Prentice-Hall, 1996.
4. Belytschko, T., Liu, W. K. and Moran, B., Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, Wiley, New York, 2000.
5. Scharnhorst, T. and Pian, T. H. H., "Finite Element Analysis of Rubberlike Materials by a Mixed Model," Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 12, pp. 665-676, 1978.
6. Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers, MARC Analysis Research Corporation, 1996.
7. Shin, S. J., Lee, T. S. and Oh, S. I., "Three-dimensional Finite Element Analysis of Rubber Pad Deformation," Trans. of the KSME A, Vol. 22, No. 1, pp. 111-131, 1998.
8. Lee, H. W., Kim, S. H., Lee, C. H., Huh, H., Lee, J. H. and Oh, S. T., "Finite Element Analysis for 3-D Self Contact Problem of C. V. Joint Rubber Boots," Trans. of the KSME A, Vol. 21, No. 12, pp. 2121-2133, 1997.
9. Kim, T. W., Moon, S. M., Koo, Y. P. and Cho, Y. J., "Finite Element Analysis for Performance Evaluation of the Seal in a Universal Joint Bearing," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 9, pp. 140-146, 2001.
10. Lee, S. H., A Study on the Structural Characteristics of Silicon Hollow Gasket, M. S. Thesis, KIT, 2001.
11. Hermann, L. R., "Elasticity Equations for Incompressible and Nearly Incompressible Materials by a Variation Theorem," AIAA J., Vol. 3, No. 10, pp. 1896-1900, 1965.
12. Czernik, D. E., Gaskets, Vol. 1, McGraw-Hill, 1996.