Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 15, No. 4 pp. 1859-1864, 2014

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.4.1859
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

자동차용 방수커넥터의 밀봉특성에 관한 연구

고영배[1*], 박형필[1], 이정원[1], 차백순[1]
[1]한국생산기술연구원 금형기술연구실용화그룹

A Study on the sealing Characteristic of Automobile Waterproof Connector

Young-Bae Ko[1*], Hyung-Pil Park[1], Jeong-Won Lee[1] and Baeg-Soon Cha[1]
[1]**Molds & Dies Technology R&BD Group, Korea Institute of Industrial Technology**

요 약 본 액화 실리콘 고무는 내열성 및 내화학적 우수성으로 전자 제품 및 다양한 제품에서 활용되고 있다. 하지만 초탄성 재료는 일반 금속재료와 다른 특성을 보인다. 초탄성 재료는 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 대변형 범위에서도 탄성거동을 나타내는 특성을 지니며, 비선형, 비압축성 및 대형의 특성을 지니고 있다. 이러한 특성 때문에 제품을 설계 및 생산하기위해는 기능적 측면을 고려한 소재의 특성에 대한 물성 확보가 반드시 필요하기 때문에 현장에서 많은 어려움이 있다. 본 논문에서는 자동차용 방수커넥터 설계를 위해 소재의 인장, 압축 시험으로부터 구한 하중-변형관계를 이용하여 이를 유한요소 해석에 적용한 결과를 비교하였으며, 해석결과와 제품의 성능 테스트 결과를 비교하여 방수커넥터용 씰의 경우 어떠한 소재특성을 적용할 경우 유용한 결과를 도출할 수 있는지를 확인하였으며, 이를 통해 제품 개발에 유용성을 확인하였다.

Abstract Liquid silicone rubber(LSR) has been applied to various products such as electronic devices owing to its excellent thermal and chemical resistance. Hyperelastic materials, however, have properties distinguished from general metal materials. Hyperelastic materials show elastic behaviors in the range of large deformation in which load has the nonlinear relation with deformation. In addition, they have characteristics of nonlinearity, incompressibility, in large scale. On account of such characteristics, there are many difficulties in design and production using these materials. In this study, the load-deformation relation obtained from tension and compression tests was applied to finite element analysis in order to design waterproof connectors for automobiles. Furthermore, the effectiveness of the finite element analysis was confirmed by comparing the results of analysis with those of performance tests.

Key Words : Hyperelastic material, Liquid silicone rubber, Sealing, Waterproof connector

1. 서론

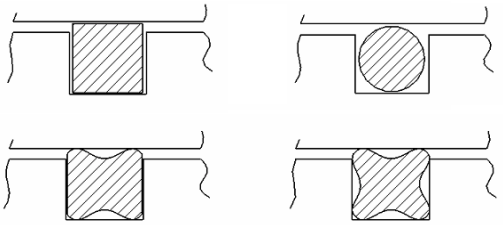
외부의 기체나 유체가 부품의 내부로 침입하는 것을 방지하기위해 사용되는 요소부품인 씰(seal)은 사용 환경 및 목적에 따라 여러 가지 재료 및 형상으로 제작되고 있다. Fig. 1에 다양한 용도로 사용되어지는 몇 가지의 씰의 단면형상을 보여주고 있다. 씰의 단면형상은 사용목적에 따라 성능결정에 매우 중요한 요소이며 예를 들어 오링(O-ring) 형상은 가장 효율적으로 밀봉하고 낮은 마찰력으로 인한 설치가 용이하며, 사각 단면형상의 경우는 오링 형상에 비해 큰 압력을 견딜 수 있으나 높은 마찰력으로 인해 상대적으로 설치에 어려움이 있다[1]. 이러한 단점을 극복하고자 H나 X형상을 적용하는 경우도 있다.

자동차 전장 부품에 사용되는 커넥터의 경우 외부 유체의 유입을 방지하기위해 씰을 사용하고 있으며, 다양한 재료 및 형상으로 제조되었으나 자동차 제조업체에서의 내열성, 내화학성 및 내구성에 대한 요구가 높아짐에 따라 액화 실리콘 고무(LSR: liquid silicone rubber)의 사

본 논문은 산업통상자원부의 "방수제품용 열가소성/열경화성 정밀사출 금형 기술개발" 사업으로 수행되었음.
*Corresponding Author : Young-Bae Ko(Korea Institute of Industrial Technology)
Tel: +82-32-850-0321 email: kaiser74@kitech.re.kr
Received March 12, 2014 Revised April 3, 2014 Accepted April 10, 2014

용이 높아지고 있으며, 대량생산도 용이하다는 장점이 있다.

LSR 씰은 작은 하중 아래에서도 대변형을 일으키는 초탄성체(hyperelastic material)이며, 이러한 초탄성 재료는 일반 금속재료와는 다른 특성을 보인다. 초탄성 재료는 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 대변형 범위에서도 탄성 거동을 나타내며, 비압축성 대변형의 특성을 지니고 있다. 하지만 이러한 특성이 소재의 성분에 따라 큰 차이를 나타내기 때문에 초탄성 재료를 이용한 제품을 설계 및 생산하기위해서는 많은 어려움이 있다[2]. 이를 위해서는 초탄성 재료에 대한 물성 확보 및 유한요소 해석을 이용한 설계의 검증이 필수적이라 할 수 있다. 따라서 인장 및 압축 시험으로부터 구한 하중-변형 관계를 가장 적절히 표현하는 변형에너지 함수(Stain Energy Function)를 찾는 일이 매우 중요하다. 본 연구에서는 자동차 전장 부품에 하나인 방수커넥터의 밀봉성능을 유한요소 해석을 통해 설계하기 위해 실제 산업에서 적용하고 있는 재료를 이용하여 인장 및 압축 시험을 진행하고 이에 따른 변형 에너지 함수를 구하고 이를 유한요소 해석에 적용하였다. 이를 통해 생산된 밀봉성능 실험 장치를 이용하여 측정된 밀봉성능과 해석결과를 비교하여 정확도에 대하여 비교 검증하였다.



[Fig. 1] Types of seal profiles used in different applications

2. 재료의 특성

유한요소 해석에 있어 무엇보다도 중요한 것은 정확한 물성값의 결정이다. LSR로 성형된 씰은 비선형성의 초탄성체이므로 일반 탄성문제와 달리 변형에너지 함수 W를 이용하여 물성치를 기술하여야 한다. 초탄성체의 변형에너지 함수를 정의하기 위하여 응력과 변형율에 대한 실험이 필요하다. 실험결과 얻어진 응력-연신률과 가정된 접합곡선의 오차를 최소화 함으로써 LSR 재료의 변형에너지 함수를 결정할 수 있으므로 변형에너지 함수의 표현 방식이 중요한데 일반적으로 크게 변형률 불변량 I1, I2, I3 와 주연신률 λ1, λ2, λ3로 표현한다. 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 LSR 탄성 모델

2.1.1 Mooney-Rivlin 모델

변형률 불변량으로 표시하는 방법으로 대표적인 것은 Mooney-Rivlin 모델로써 아래 식과 같이 제안되었다[3].

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

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 인장시험시 변형률 100% 이하에 대해 잘 일치하지만, 변형이 압축모드인 경우나 변형율이 큰 경우는 오차가 크므로 본 연구에서는 다음과 같은 모델을 적용하였다.

2.1.2 Ogden 모델

주연신률을 이용한 대표적 모델은 Ogden 모델로써 본 연구에서는 LSR 소재를 Ogden 3차 모델로 가정하여 비선형 거동특성을 해석하였다. 식(3)은 Ogden 모델의 변형에너지 함수를 나타낸다[4-6].

$$W = \sum_{n=1}^{N} \frac{\mu_n}{\alpha_n}[J^{\frac{-\alpha_n}{3}}(\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + 4.5K(J^{\frac{1}{3}} - 1)^2 \quad (3)$$

여기서, μ_n와 α_n은 물질상수이고, K는 초기 체적탄성계수(Bulk modulus)이며 J 는 체적비(Volumetric ratio)로서 $J = \lambda_1\lambda_2\lambda_3$으로 정의된다. 또한 N은 Ogden 모델에서 고려해야 하는 항의 개수를 나타내며 일반적으로 2차항이나 3차항으로 정의할 수 있다.

한편, Mooney-Rivlin, Ogden, Foam 모델과 같은 대변형 모델을 사용하는 중합체의 해석은 Total

Lagrangian method를 사용하여 Cauchy stress를 계산한다. Total Lagrangian method는 선형과 비선형 거동특성을 갖는 소재에 모두 적용이 가능하지만, 특히 Mooney-Rivlin, Ogden모델과 같이 비선형 탄성 문제에 적합하다[7-9].

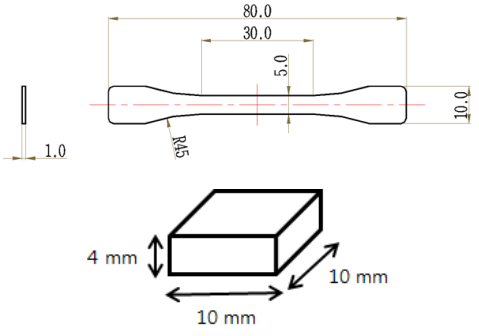
2.2 LSR 씰 재료의 특성

본 연구에서 적용된 방수형 커넥터용 씰은 2액형 LSR로 모멘티브사의 Silopren© LSR 3386 40으로 물성은 Table 1과 같다

[Table 1] Material properties of silicone rubber

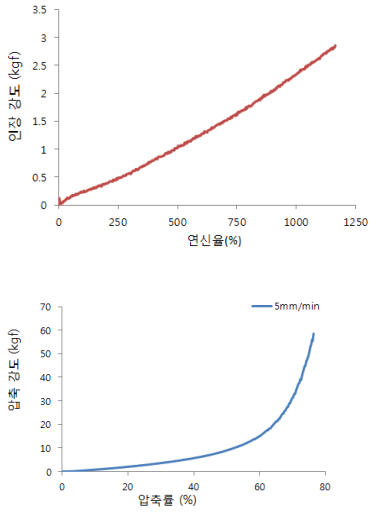
Properties	Value
Density	1.12 g/cm3
Hardness(Shore A)	40
Tensile strength	8.0N/mm2
Elongation at break	600 %
Tear strength	30N/mm
Compression Set, 22h at 175℃	25 %

LSR 씰의 기계적 물성을 결정하기 위하여 단순 인장시험 및 압축시험을 하였다. 각각의 시험에 사용된 시편은 KS 표준을 참조하였고 시편의 자세한 형상은 Fig. 2과 같다. 각각의 실험은 25℃ 20mm/min, 5mm/min 의 속도로 만능시험기를 사용하였다.



[Fig. 2] Simple tension and compression specimen

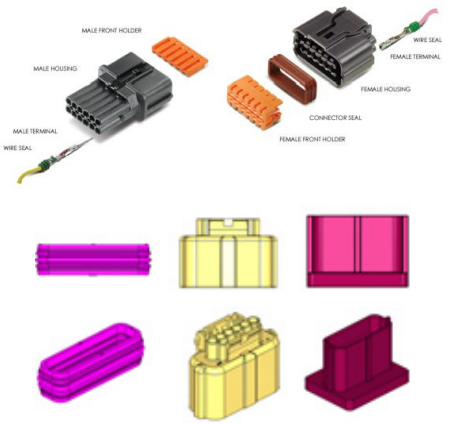
위와 같은 조건으로 이용하여 시험을 진행하였고 각각의 경우 총 5회 반복 측정을 하였고 Fig. 3에 인장 및 압축에 시험에 따른 강도-연신율의 곡선을 보여주고 있다. 이를 이용하여 시편의 단면적을 이용하여 응력-변형율 곡선을 계산하였고 이 결과를 이용하여 유한요소 해석을 진행하였다.



[Fig. 3] Tensile and compressive strength curve for LSR specimen

3. 해석 및 실험

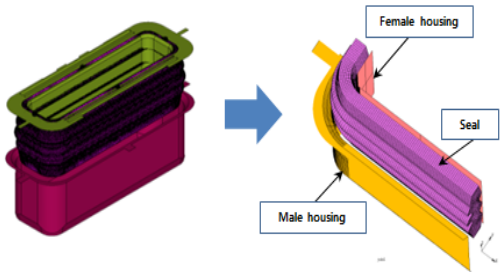
아래 그림은 본 연구에 사용되는 방수형 커넥터의 구성 부품 및 3D 형상이다. 방수형 커넥터의 구성은 하우징, 홀더 및 씰로 이루어져 있으며, 상대물에 물리적으로 결합을 통해 연결되는 구조로 해석 모델에서는 씰을 제외한 하우징의 경우 상대적으로 변형이 없는 강체로 가정하여 단순화 하였다.



[Fig. 4] Configuration of automotive waterproof connector and 3D modeling

씰의 조립은 Female 하우징에 1차적으로 조립되며 상대 하우징(Male)이 체결되면서 씰의 외측에 형성되어 있는 립(lib)을 압축하여 밀봉 효과가 나타나게 된다. 우선 유한요소 해석을 위해 모델을 단순화하여 1/4, 3D 모델로 볼 수 있으며 Fig. 5에서 유한요소모델을 보여주고 있다.

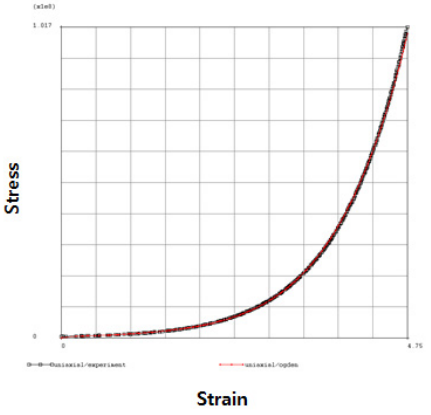
유한요소 해석은 상용프로그램인 MSC. Marc 를 사용하였고 해석에 사용된 유한요소는 3D solid 요소로 62,400 개의 요소와 70,902 개의 절점으로 씰을 모델링하였다. 또한 각각의 하우징은 강체로 모델링하였고, 1차적으로 씰이 Female 하우징에 장착된 후 Male 하우징이 이동하면서 체결과 동시에 압축을 하는 조건으로 해석을 수행하였다. LSR과 같은 고무문제의 해석은 Hermann 요소를 사용하는 Total Lagrangian 방법과 일반 유한요소를 사용하는 Update Lagrangian 방법이 있다. 일반적으로 변형이 큰 경우 Update Lagrangian 정식화법이 권장되며, 본 해석에서는 Update Lagrangian 방법을 적용하였다[10]. 또한 실험에 의해 획득한 응력-변형률 곡선을 그ㄴ사하기 위해 앞서 언급한 탄성모델 중에 오차가 가장 작게 계산된 Ogden 3차 모델로 근사화 하였고 Fig. 6에서 보여주고 있으며, 그림에서 보듯이 특성곡선과 근사화된 곡선이 거의 일치함을 알 수 있고, 근사하는 과정에서의 오차는 통상적으로 받아들일 수 있는 크기이다.



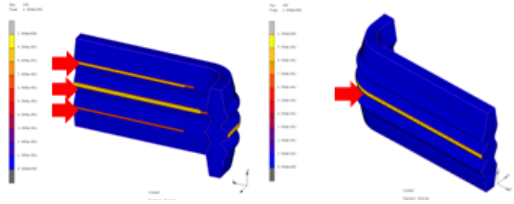
[Fig. 5] The geometry and finite element model of connector system

Fig. 7(a)는 1차적으로 씰을 female 하우징에 장착 후 접촉면의 분포를 보여주고 있으며, Fig. 7(b)는 추가적으로 상대 하우징을 체결한 후 씰의 접촉면 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 초기 씰이 하우징에 장착되는 경우 내측의 3개의 lib 모두가 접촉하여 밀봉 성능을 나타내는 것으로 보이나, 이후 커넥터가 체결된 후에는 씰의 외측 립은 가운데만 전체적으로 고르게 접촉하는 것으로 예측되었다.

Fig. 8은 인장 및 압축 시험 결과를 이용한 경우 각각의 밀봉성능을 예측할 수 있는 Cauchy stress의 분포를 보여주고 있다. Fig. 8(a)는 인장 시험결과를 반영하였고 Fig. (b)는 압축 시험 결과를 반영하였다. 이 경우 인장 시험 결과를 적용한 경우가 약 3배정도 높은 밀봉성능이 예측되었다.

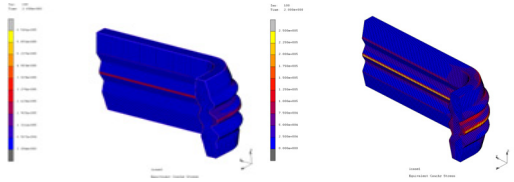


[Fig. 6] Stress-strain propertiy of LSR



(a) Female housing (b) Male housing

[Fig. 7] Contact distribution of seal after housing install

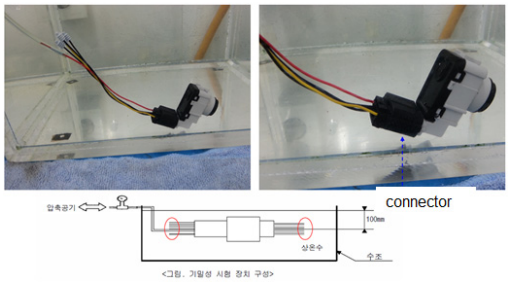


(a) Max. 655KPa (b) Max. 215KPa

[Fig. 8] Cauchy stress distributions of seal

이를 분석하고자 실제 사용되는 동일 모델에 대한 밀봉성능 테스트를 Fig. 9와 같은 실험 장치를 이용하여 확인하였다. 실제 제조현장에서는 자동차용 방수커넥터의 방수성 테스트의 기준은 50 KPa이지만 본 연구를 위해 누설이 생기는 시점까지 압축공기를 주입하였고 누설 시점은 약 200 KPa로 나타났으며, 이를 해석결과와 비교하

면 압축 시험결과를 재료특성으로 적용한 해석모델의 결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.



[Fig. 9] Testing images and Schematic diagram of test system

4. 결론

본 연구에서는 초탄성체인 LSR 소재의 씰의 압축 변형에 따른 변형거동과 이에 따른 방수형 커넥터의 밀봉력을 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 수치해를 구하였으며, 이때 적용되는 재료 특성을 인자 및 압축 시험결과를 각각 적용하여 실제 기밀성 테스트 결과와 비교하였다. 유한요소해석을 이용한 설계시 본 연구에서는 인장시험 결과를 적용한 경우 실제 제품과의 밀봉력 성능이 약 3배 이상 높은 값을 나타내는 결과를 보였으며, 압축시험 결과를 적용한 경우 실제 제품과의 밀봉력 성능 값이 200KPa과 215KPa로 거의 일치하는 결과를 보였다. 이는 방수형 커넥터에 적용된 LSR 씰의 경우 모든 변형이 압축력에 의해 발생하게 되며 본 연구결과를 통해 유한요소 해석 시 재료특성을 압축 시험결과를 이용하는 경우 정확히 예측할 수 있는 것으로 판단되었다.

References

[1] I. Green, C. English, “Stress and Deformation of Compressed Elastomeric O-ring Seals”, *Proc. of 14th International Conference on Fluid Sealing*, pp. 83-95, April, 1994.

[2] G. H. Kang, C. S. Kim, “Nonlinear Analysis of Rubber Bellows for the High Speed Railway vehicle”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society,* Vol. 14, No. 8, pp. 3631-3637, 2013
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.8.3631

[3] J. U. Cho, “A Dynamic Behavior of Rubber Component with Large Deformation”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society,* Vol. 6, No. 6, pp. 536-541, 2005

[4] Ogden, R. W., Non-linear Elastic Deformations, *Halsted Press*, New York, 1984.

[5] D. J. Charlton, J. Yang, K. K. TEH, “A Review of Methods to Characterize Rubber Elastic Behavior for use in Finite Element Analysis”, *Rubber Chemistry and Technology,* Vol. 67, pp. 481-503, 1993
DOI: http://dx.doi.org/10.5254/1.3538686

[6] W.D. Kim, “Fatigue life estimation of an engine rubber mount,” *Int. journal of fatigue*, pp. 553-560, 2004.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.08.025

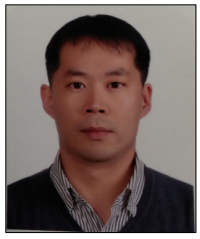
[7] C. K. Kim, D. H. Kim, “Finite Element Analysis on the Deformation Behavior Stability of Contact Sealing Rings”, *Journal of the Korean Institute of Gas,* Vol. 16, No. 5, pp 47-51, 2012.
DOI: http://dx.doi.org/10.7842/kigas.2012.16.5.47

[8] Nutthanun Suphadon, “The viscoelastic properties of rubber under a complex loading”, PhD Thesis, *University of London*, pp.125-143 2010.

[9] T. W. Lee, “A Stury on the Large Defomation of Silicon Rubber Gasket with Hollow Circular Section”, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering,* Vol. 20, No. 11, pp. 150-157, 2003.

[10] “MARC User’s Manual,” Version V2003, MARC

고 영 배(Young-Bae Ko) **[정회원]**



- 2001년 8월 : 홍익대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 선임연구원

<관심분야>
사출성형, 열/구조 해석, 실리콘 성형, LED system

박 형 필(Hyung-Pil Park) **[정회원]**

- 2006년 2월 : 아주대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 아주대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2004년 2월 ~ 현재 : 한국생산기술연구소 선임연구원

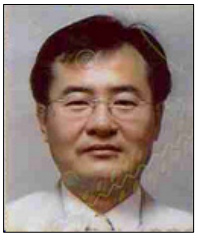
<관심분야>
정밀사출성형, 유체사출성형, 분말사출성형

이 정 원(Jeong-Won Lee) **[정회원]**

- 2011년 2월 : 인천대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 인천대학교 기계공학과 (공학박사수료)
- 2002년 12월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 연구원

<관심분야>
백색 조명용 LED, 의료기기용 디바이스/광 부품 정밀사출금형 및 성형, 사출 유동해석/구조해석

차 백 순(Baeg-Soon Cha) **[정회원]**



- 1991년 12월 : 독일 브라운슈바익 공대 기계공학과 (공학석사)
- 1996년 11월 : 독일 브라운슈바익 공대 기계공학과 (공학박사)
- 1999년 10월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 금형기술연구실용화그룹 수석연구원

<관심분야>
생산기술, 금형/성형