

## 자동차 전장 커넥터 방수 시일의 유한요소해석

한정진<sup>1</sup> · 황원태<sup>1</sup> · 김호경<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 일반대학원 자동차공학과, <sup>2</sup>서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

### FEM Analysis of a Waterproof Seal of Automotive Electrical Connectors

JeongJin Han<sup>1</sup>, WonTae Hwang<sup>1</sup> and HoKyung Kim<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School, Dept. of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received December 18, 2018; Revised January 10, 2019; Accepted January 11, 2019)

**Abstract** – In the case of high-voltage connectors applied to automobiles, waterproofing has become an important issue for the safety of automobiles. In this study, structural analysis is performed on silicone rubber-type waterproof seals used in the voltage connector. For the structural analysis, the tensile properties of the actual rubber seal are evaluated using a miniaturized tensile testing machine. The Mooney-Rivlin material constants of the rubber seal are determined as follows;  $D_1=0$ ,  $C_{01}=0.241$ ,  $C_{10}=0.0142$ . The analysis shows that the contact pressure at the top of the seal where the seal and male connector are in contact is approximately three times higher than that at the bottom of the seal where the seal and female connector are in contact. It is confirmed that the waterproofing performance of the rubber seal depends on the contact pressure of the seal bottom where the seal and female connector are in contact. The contact pressure for waterproofing is found to be 4.7 bar. The strain concentration of the curved part is attributed to excessive initial tension. Therefore, a redesign is recommended for uniform stress or strain distribution in the curved section of the seal in response to the stress relaxation problem due to permanent deformation.

**Keywords** – connector seal (커넥터 시일), rubber properties (고무 물성치), waterproof seal (방수 시일), contact pressure (접촉 압력)

### 1. 서 론

최근 자동차에 적용되는 고전압용 커넥터의 경우 방수문제가 자동차의 안전성에 중요한 문제로 대두되고 있다. 방수를 위한 커넥터 방수 고무 시일에 대하여 이전의 약간의 습기와 먼지를 보호하는 수준에서 최근에는 침수상황에 대비하여 가혹한 살수조건에서도 완전한 방수조건을 요구하고 있다. 고무 시일 설계의 경우 기밀 유

지에 필요한 주요 형상 및 치수들에 대하여 산업현장에서는 설계-제작-실험 등의 과정을 반복하면서 문제를 해결하고 있다. 이 경우 금형비를 포함한 많은 비용과 시간이 소비되어 이를 줄이기 위하여 CAE 기법을 적용하는 것이 바람직하다.

고무 방수 시일의 경우 방수등급에 맞는 적절한 접촉압력을 유지하는 것이 장기간의 사용시 방수성능을 유지하는 중요한 설계 사항이다. 시일의 방수 성능의 경우 시일의 접촉압력이 증가할수록, 접촉면적이 클수록 시일의 방수 성능이 큰 것으로 알려져 있다. 그러나 접촉압력이 과도하게 크면, 장시간 사용시 응력이완으로 접촉압력이 급격히 저하되어 이로 인하여 방수성능이 급격히 저하된

\*Corresponding author: kimhk@seoultech.ac.kr

Tel: +82-2-970-6348, Fax: +82-2-979-7032

<http://orcid.org/0000-0003-4078-974X>

© 2019, Korean Tribology Society

다. 추가적으로, 이들 시일을 적용한 암/수 커넥터의 삽입 및 삽발력이 증가하는 문제가 발생한다. 거꾸로, 접촉 압력을 너무 낮게 설계할 경우 초기에 요구하는 방수등급을 만족하기 어렵다.

지금까지 다양한 용도의 고무 시일에 대하여 많은 연구[1-7]가 진행되었다. 예로, Kim은 NBR 고무재질의 물리적 특성값을 실험적으로 구한 후에 밀봉 간섭량에 따른 립 시일의 비선형 특성값을 고려한 립 시일의 접촉력, 접촉응력, 립시일 전체에 대한 온도분포를 수치적으로 해석하였다[1]. Yoo와 Lee는 응력완화가 립 시일의 성능에 미치는 영향을 보고하였다[2]. 이를 위하여 열가소성 폴리우레탄에 대하여 응력완화 시험을 하고 고무 재료상수를 추출하였다. 그리고 외부 이물질 유입에 대한 밀봉성능을 확인하기 위해 유한요소해석을 통하여 재질의 응력완화 현상이 립 시일 설계 시 반드시 고려해야 할 사항임을 발표하였다. Belforte 등은 공압 실린더에 사용되는 시일에 대하여 마찰력과 마모를 줄이기 위하여 얇은 막의 공기 흐름을 적용하여 시일을 설계하는 방안을 해석을 통하여 수행하여 이를 실험결과와 비교하였다[3].

본 연구에서는 자동차의 고전압용 커넥터에 사용하는 실리콘 고무 계열의 방수 시일에 대하여 구조해석을 수행하고자 한다. 구조해석을 위하여 시일의 고무에 대한 인장 물성치를 평가를 하였다. 구조해석을 통하여 시일의 초기장력으로 인한 접촉압력과 암/수 커넥터가 장착 후의 시일에 작용하는 접촉압력을 검토하고자 한다. 최종적으로 시일의 방수 성능과 개선방안을 제안하고자 한다.

## 2. 재료 인장 물성치 실험

고무시일은 생산되는 과정에서 동일한 성분의 재질로 일정두께로 제작된 표준형 시험편과는 다른 curing 조건에 노출됨으로서 재료 물성치에 변화가 발생할 것으로 사료된다. 따라서, 실제로 Fig. 1(a)와 같은 고전압용 커넥터 고무 시일과 동일한 재질의 고무 시트에서 채취한 Fig. 1(b)와 같은 표준 시험편에 대하여 인장 시험을 수행하였다. 표준시험편의 인장시험은 KS M 6782: '기황고무의 인장시험 방법'에서 제시하는 아령 3호형 시험편을 선정하였다. 실제 시일의 인장시험에는 Fig. 2와 같은 초소형 인장시험기를 사용하였다. 실제 시일의 경우 폐곡선 형상의 시험편이므로 이를 고정하는 지그를 제작하였다. 변형을 측정하기 위하여 시일 표점은 흰색 페

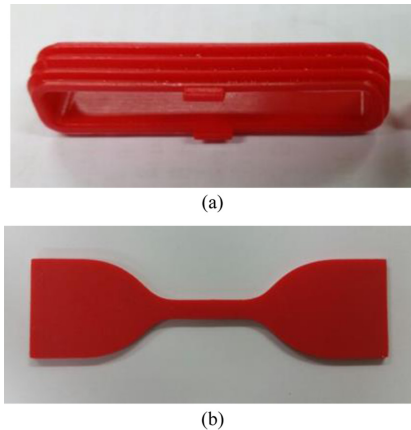


Fig. 1. (a) Rubber seal sample specimen and (b) standard tensile rubber specimen.

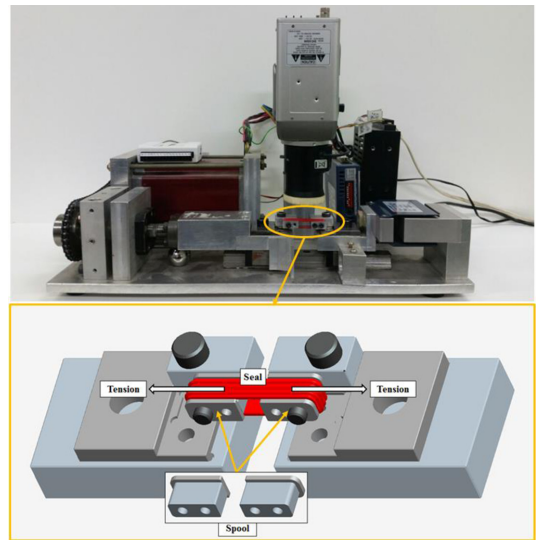


Fig. 2. Miniaturized tensile testing machine with vision extensometer system for testing the rubber seal sample.

인트로 표시를 하였으며, 표점거리의 변위는 CCD카메라를 이용하여 비 접촉식으로 측정하였다.

표준형 시험편과 실제 시일 시험편의 인장시험 결과를 비교한 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3을 통하여 두 시험편의 인장 응력-변형률 선도에서 차이를 확인하였다. 변형률 30%에서 시일 시험편의 응력이 표준형 시험편보다 30% 낮게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 시일이 생산되는 과정에서 curing 되면서 고무의 물성치에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 따라서, 제작환경에서 제작

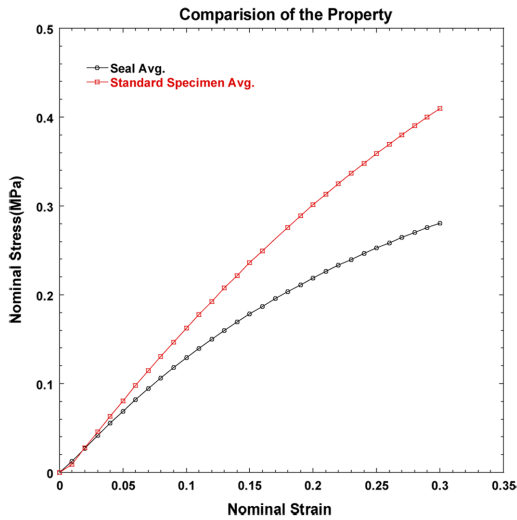


Fig. 3. Comparison of stress-strain curves of standard specimen and seal sample.

된 완성품인 시일 시험편의 인장시험결과를 활용하였다. 한편, 고무해석에 필요한 응력-변형률(Stress-Strain) 선도와 ABAQUS를 이용하여 Mooney Rivlin[8], Ogden[9]의 재료 상수를 도출하였다. Mooney-Rivlin 상수를 적용한 선도가 Ogden 상수를 적용한 선도보다 시일 시험편의 응력-변형률선도에 보다 근접한 것을 확인하여 Mooney-Rivlin 재료상수를 적용하여 해석을 수행하였다. Mooney-Rivlin 재료상수  $D_1=0$ ,  $C_{01}=0.241$ ,  $C_{10}=0.0142$ 로 결정하였다. 재료물성치의 유효성에 대한 검증은 시일 시험편에 대하여 Mooney-Rivlin 재료상수를 적용한 해석결과와 인장실험 데이터가 일치함을 확인하였다.

### 3. 시일 해석 방법

본 연구의 대상인 암/수 커넥터 및 방수 시일의 구조는 Fig. 4와 같다. 시일 해석을 수행 시 총 2단계의 해석이 필요하다. 1단계는 시일이 스트레칭(stretching)되어 암 커넥터에 안착되는 초기장력을 가하는 과정이다. 다음으로 두 번째 단계는 수 커넥터가 스퀴징(squeezing)되어 암 커넥터와 결합되는 삽입 과정이다. 특히 두 번째 단계에서는 시일이 암 커넥터에 안착된 상태에서 수 커넥터와 암 커넥터가 결합되고, 그 과정에서 시일이 압축되면서 이로 인하여 방수기밀이 형성되는 중요한 과정이다.

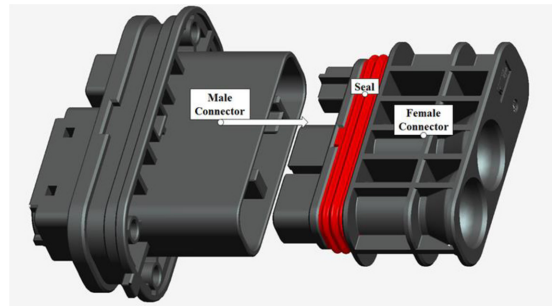


Fig. 4. Male/female connector assembly with the rubber seal.

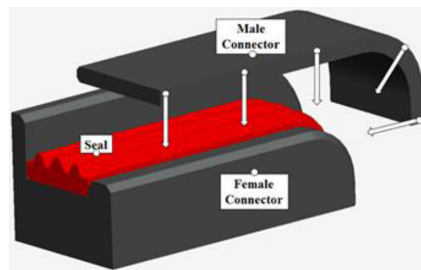


Fig. 5. Quarter model for structural analysis.

구조해석은 해석의 단순화를 위하여 시일의 접촉이 이루어지는 암/수 커넥터 부분의 형상에 대하여 수행하였다. 모델의 형상이 상하좌우가 대칭인 구조이기 때문에 Fig. 5와 같이 해석에 필요한 형상에서 1/4로 분할하여 모델링을 수행하였다.

해석모델의 전처리 과정은 HyperMesh를 이용하였고, Solver는 ABAQUS를 이용하여 Implicit 방식으로 수행하였다. 모델의 전체적인 요소크기는 0.5 mm로 생성하였으며 시일의 곡면부와 같이 해석에 중요한 부분은 0.1 mm로 생성하였다. 유한요소 모델은 시일과 암/수 커넥터를 Fig. 6(a) 및 6(b)로 모델링하였다. 시일은 3D Solid 요소인 C3D8H요소로 구성하였으며, 절점(Node)은 26,341개, 요소(Element)수는 22,540개이다. 암/수 커넥터는 2D Shell 강체 요소인 R3D4요소로 절점은 2,442개, 요소는 2,275개로 구성하였다.

시일의 물성데이터는 ABAQUS를 이용하여 Mooney-Rivlin 재료상수를 도출하여 물성 데이터로 사용하였다. 해석모델의 경계조건은 1단계와 2단계로 나누어 작성하였다. 1단계는 시일의 스트레칭을 표현하기 위하여 Fig. 6(b)의 암 커넥터 모델은 완전구속되어 있는 상태에서 Fig. 6(a)의 고무 시일모델의 Y축과 Z축의 끝 단면을

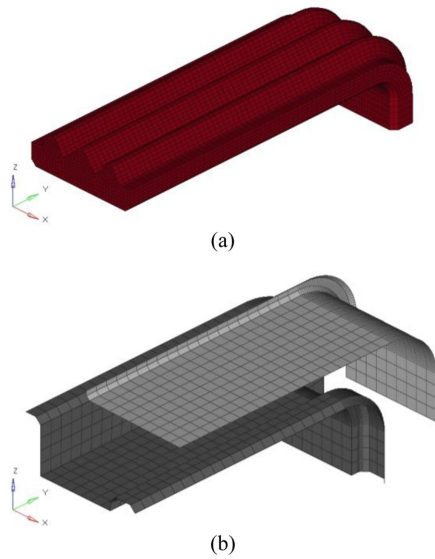


Fig. 6. (a) Rubber seal analysis model and (b) seal housing (male, female) analysis model.

구속하여 고무 시일이 암 커넥터에 안착되었을 때의 길이까지 Y축으로 3.6 mm, Z축으로 2.05 mm만큼 강제변위를 적용하였다. 2단계에서는 스퀴징을 표현하기 위하여 1단계의 구속 조건을 유지하면서 Fig. 6(b)의 수 커넥터를 압, 수 커넥터가 결합이 완료되었을 때의 위치로 강제변위를 적용하였다. 시일과 암/수 커넥터는 오일에 의해 윤활이 도포된 관계로, 마찰계수를 0으로 설정하여 contact으로 처리하여 모델링하였다.

#### 4. 해석 결과

##### 4-1. 초기장력 상태

1단계 해석인 시일이 수(male) 커넥터에 안착되는 스트레칭 과정의 해석 결과는 Fig. 7과 같이 시일과 수 커넥터와의 접촉압력 분포를 나타낸다. Fig. 7을 통하여 시일을 안착 후에 시일의 평행 직선부에서는 접촉 압력이 거의 없으나 곡선 부분 시작부분에서 0.3 MPa의 접촉압력이 발생하였다. 시일을 수 커넥터에 안착시 중요한 것은 과소한 스트레칭으로 인해, 즉 느슨하게 시일에 안착시 시일이 두 번째 단계로 암 커넥터에 삽입시 시일이 수 커넥터에서 미끄러지며 뒤틀리는 현상이 발생하지 않도록 적절한 장력으로 안착하는 것이 필요하다.

Fig. 8은 상/하 접촉부의 변형을 분포를 나타낸 결과이다. 그림을 통하여 곡선 부분에 최대 변형률 49.1%가

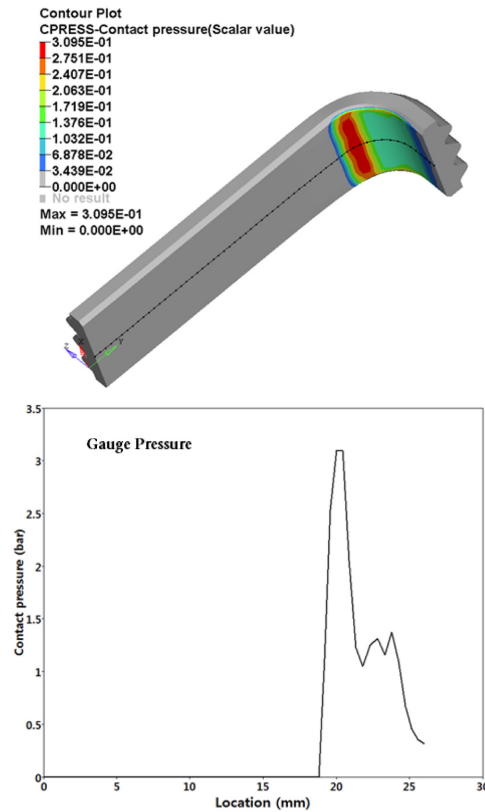


Fig. 7. Distribution of contact pressure of lower face of the seal during stretching.

집중적으로 분포되어 있는 것을 확인하였다. 본 결과를 통하여 과도하게 집중된 응력이나 변형률은 장시간 사용시 변형률이 집중된 부분에서의 영구적인 변형이 가속화되어 이로 인하여 시일의 초기 장력이 급격히 감소한다. 즉, 곡선 부분에 인장 영구변형, 응력이완이 발생하여 시일의 내구성 문제를 야기할 수 있다고 판단된다.

##### 4-2. 암/수 커넥터 결합 후 상태

두 번째 단계 해석인 암/수 커넥터가 결합되는 삽입(스퀴징) 과정은 커넥터에 기밀을 형성되는 과정이다. 이 삽입 과정에서 시일이 암/수 커넥터와 접촉을 하면서 발생하는 접촉압력이 시일의 기밀성능을 좌우하는 가장 중요한 변수 중의 하나이다. 시일과 커넥터 사이에서 발생하는 접촉압력은 크게 두 부분으로, 시일과 수 커넥터가 접촉되는 시일 상부와 시일과 암 커넥터가 접촉되는 시일 하부이다.

Fig. 9는 시일 하부의 A부터 C점까지의 접촉압력을

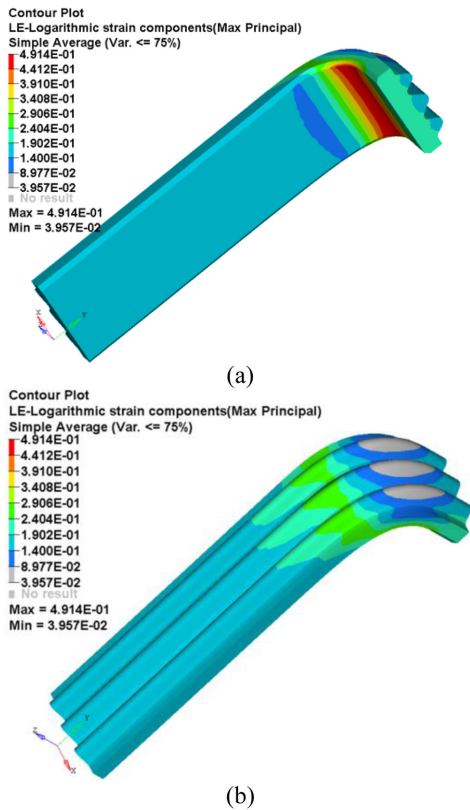


Fig. 8. (a) Distribution of strain of (a) lower and (b) upper faces of the seal during stretching.

나타낸 결과이다. 본 그래프를 통하여 시일의 A점부터 B점까지의 구간에서는 0.48 MPa의 접촉압력을 유지하다가 B점 부분에서 최소 접촉압력 약간 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 곡선부분에 해당하는 B점부터 C점까지의 접촉압력은 0.47 MPa(≈4.7 bar)~0.6 MPa(≈6 bar)로 높게 발생하는 것을 확인하였다. 따라서, 시일의 기밀 성능을 결정하는 것은 최소 접촉압력이므로 하부의 기밀 성능은 최소 접촉압력에 해당하는 4.7 bar이다.

Fig. 10은 시일 상부의 A부터 C점까지의 접촉압력을 나타낸 결과이다. 시일의 A점부터 B점까지의 구간에서는 1.31 MPa의 접촉압력을 유지하다가 B점 부분에서 최소 접촉압력 0.47 MPa로 감소하며, 라운드 중간 부분에서는 1.38 MPa 이상으로 증가하다가 C점에서는 1.27 MPa로 급감하는 것을 확인하였다. 시일 상부와 하부의 접촉압력 분포는 시일 하부에 비해 시일 상부의 접촉압력이 약 3배 정도 높게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 시일의 기밀 성능을 좌우하는 것은 최소값이다. 따라서,

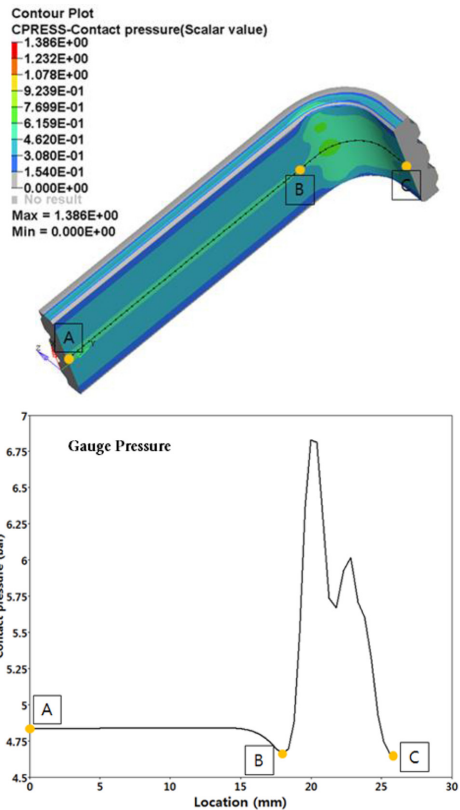


Fig. 9. Distribution of contact pressure of lower face of the seal during squeezing.

시일 상부의 접촉압력보다 시일 하부에서의 접촉 압력이 시일의 전체의 기밀성능을 좌우한다고 판단된다. 추가적으로 상부의 D점과 하부의 B점에서 접촉압력이 감소하는 것은 시일의 곡선부에 발생한 과도한 변형과 응력 불균형으로 인한 것으로 사료된다. 따라서 시일의 기밀 성능을 유지하는 접촉압력을 만족하면서 최소한의 응력 불균형과 변형을 최소화하는 설계방안이 필요하다고 판단된다.

해석결과에는 본 시일을 적용한 커넥터에 대한 방수 실험을 통하여 약 4.3 bar에서 누설이 발생하는 것을 통하여 확인하였다. 이는 해석상의 결과인 Fig. 9의 B지점에 해당하는 4.7 bar의 약 9% 정도의 오차를 갖는 값으로 이를 통하여 해석의 정확성을 확인하였다. 참고로, 유효 응력과 변형률은 초기장력 상태 해석과 동일하게 라운드 부분에서 각각 1.3 MPa, 50%로 가장 높은 것을 확인하였다. 이는 초기장력 스트레칭시의 응력과 변형률 값 1.2 MPa, 49.1%와 크게 다르지 않은 것으로 보아



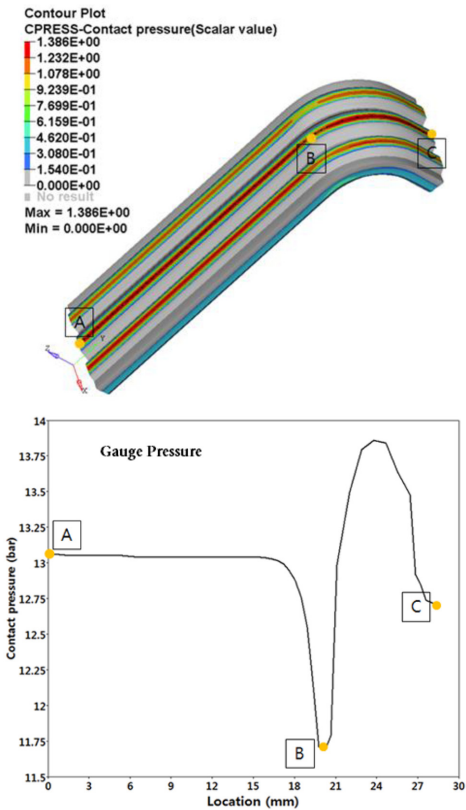


Fig. 10. Distribution of contact pressure of upper face of the seal during squeezing.

곡선부의 응력과 변형률이 집중되는 것은 과도한 초기 장력으로 인한 것으로 사료된다. 따라서, 과도한 초기장력이 곡선부가 시작되는 구간에 집중이 발생하지 않도록 하는 설계변경이 바람직하다.

한편, 본 시일과 동일한 제품에 대하여 120°C에서 500시간 동안 열화 후 변형된 본 시일은 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 곡선부 부분에서 연구 인장 변형이 발생한 것을 확인하였다. 이처럼 곡선부 부분에서 스트레칭시 과도한 변형으로 인하여 장기간 노출시 접촉압력이 감소하는 현상이 발생할 것으로 사료된다. 곡선부 부분에서의 발생하는 과도한 응력과 변형률을 감소시키기 위해서는 커넥터를 삽입 혹은 삽탈시 시일이 헐거워져서 암 커넥터로부터 미끄러져 말리는 문제(rolling)가 없으면서 현재 23% 정도의 과도한 초기장력을 가능하면 낮추면서 응력과 변형률을 균일하게 하는 초기장력의 선정이 필요하다.



Fig. 11. Seal samples before and after aging tests at 120°C for 500 hours.

## 5. 결 론

본 연구에서는 자동차의 고전압용 커넥터에 사용하는 실리콘 고무 계열의 방수 시일에 대하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석을 위하여 실제 시일의 고무에 대한 인장 물성치를 평가를 하였다.

구조해석을 통하여 시일의 초기장력으로 인한 접촉압력과 암/수 커넥터가 장착 후의 시일에 작용하는 접촉압력을 검토하였다. 해석을 통하여 시일과 수 커넥터가 접촉되는 시일 상부의 접촉압력이 시일과 암 커넥터가 접촉되는 시일 하부의 접촉압력보다 3배 이상 높게 나타났다. 이는 해석된 고무 시일의 방수 성능은 시일과 암 커넥터가 접촉되는 시일 하부의 접촉압력에 좌우됨을 확인하였다. 따라서, 해석 시일의 방수성능은 최종적으로 4.7 bar로 나타났다. 초기장력 스트레칭 상태와 암/수 커넥터 결합 후의 전반적인 응력의 크기가 곡선부를 제외하고 유사한 것으로 나타났다. 곡선부분의 응력과 변형률이 집중되는 것은 과도한 초기장력으로 인한 것으로 사료된다. 따라서, 장시간의 장력이 작용하는 상황에서 영구변형으로 인한 응력이완 문제를 고려하여 초기 장력상태에서의 응력이 집중되는 시일의 곡선 구간에서의 균일한 응력 혹은 변형률 분포를 위한 재설계가 바람직한 것으로 나타났다.

## Acknowledgements

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [1] Kim, C. K., "Finite element analysis of contact behaviors of rubber lip seals", *J. of the KSTLE*, Vol. 10, No. 4, pp.82-88, 1993.
- [2] Yoo, M. H., Lee. T. S., "A study on the relationship between stress and stress relaxation and performance of a lip seal", *J. Korean Sci. Precision Eng.*, Vol. 26, No. 11, pp. 85-91, 2009.
- [3] Belforte G., Mazza L., Visconte C., "Design methodology for an air-lubricated seal", *Tribology Int.*, Vol. 75, pp. 104-110, 2014.
- [4] Moon, H., Im, J., Kim, H., "Shape optimization of an automotive wheel bearing seal using the response surface method", *Trans. of KSME*, Vol.18, No.6, pp. 84-90. 2010.
- [5] Wen, C. Y., Yang, A. S., Huang, F. J., Chang, H. T., "New deflected-helix ribbed lip seal with enhanced sealing performance", *Tribology Int.*, Vol.44, pp. 2067-2073, 2011.
- [6] Pinedo, B., Aguirrebeitia, J., Conte, M., Igartua, A., "Tri-dimensional eccentricity model of a rod lip seal", *Tribology Int.*, Vol. 78 pp. 68-74, 2014.
- [7] Ping, C. S., Seth, A., "Optimization of contact pressure profile for performance improvement of a rotary elastomeric seal operating in abrasive drilling environment", *Wear*, Vol. 271, pp. 2466-2470, 2011.
- [8] Rivlin, R. S., Saunders, D. W., "Large elastic deformation of isotropic materials - VII. Experiments on the deformation of rubber", *Philos. Trans. R. Soc. (A)*, Vol. 243, pp. 251-288, 1951.
- [9] Ogden, R. W., "Large deformation isotropic elasticity: On the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids," *Philos. Trans. R. Soc. (A)*, Vol. 326, pp. 565-584, 1972.