

자동차 전장 커넥터 방수시일 단면의 최적설계

강규태¹ · 이채은¹ · 김호경^{2*}

¹서울과학기술대학교 일반대학원 자동차공학과 석사과정생
²서울과학기술대학교 기계자동차공학과 교수

Optimization Design of a Waterproof Seal Cross-Section of Automotive Electrical Connectors

KyuTae Kang¹, ChaeEun Lee¹ and HoKyung Kim^{2*}

¹Master Student, Graduate School, Dept. of Automotive Eng., Seoul National University of Science and Technology
²Professor, Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received October 14, 2021; Revised November 22, 2021; Accepted November 24, 2021)

Abstract – Recently, the waterproofing performance of high-voltage connectors in automotive vehicles has attracted increased interest. In this study, an optimal cross-sectional shape was derived to obtain uniform contact pressure and strain by considering stress relaxation problems caused by initial tension when mounting a seal. A high strain of 52.1 was distributed in the round region, owing to excessive initial tension. The finite element method (FEM) analysis indicated that the strain corresponding to the optimal initial tensile was 11. We adopted six design factors to optimize the seal cross-section and three factors as the main design factors. An orthogonal arrangement table was prepared using Minitab. FEM analyses of 16 study models were conducted to determine the optimized model. The contact pressure of the optimization model is the most evenly distributed while satisfying the waterproof performance of 0.47 MPa. Compared to the initial model, the difference in strain decreases from 35.5% to 19.6%. Finally, the derived cross-sectional shape can reduce the strain of the round region by 33.8% and the differences in the contact pressure at the upper and lower surfaces by 42% and 76%, respectively.



© Korean Tribology Society 2021. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords – connector seal(커넥터 시일), contact pressure(접촉압력), finite element analysis(유한요소해석), optimal design(최적설계), waterproof performance(방수성능)

1. 서 론

자동차가 침수시에도 정상적으로 작동해야 하므로, 최근에는 자동차의 고전압용 커넥터의 경우 방수문제가 자

동차의 안전성에 중요한 문제로 간주된다. 이전의 커넥터 고무 시일의 경우 외부로부터 단순히 습기와 먼지를 보호하는 수준이었으나, 이들 커넥터에 대하여 가혹한 살수 조건에서도 완전한 방수조건을 자동차 메이커에서 요구하고 있다. 따라서, 요구하는 수준의 방수성능을 위한 커넥터 고무 시일의 설계는 중요한 설계 문제이다.

일반적으로 고무 시일의 경우, 기밀성능은 시일의 접촉압력이 높고 접촉면적이 클수록 증가하는 것으로 알려져

*Corresponding author: HoKyung Kim
Tel: +82-2-970-6348, Fax: +82-2-979-7032
E-mail: kimhk@seoultech.ac.kr
<https://orcid.org/0000-0003-4078-974X>

있다[1,2]. 그러나 접촉압력이 과도하게 크거나, 전체 구간에서 접촉압력의 편차가 클 경우, 시일을 장시간 사용 시 시일의 응력집중 부분에서 응력이완 가속화로 인한 급격한 접촉압력 저하와 더불어 기밀성능이 저하된다[3-5]. 또한, 방수시일의 과도한 기밀성능은 이들을 구성하고 있는 커넥터의 삽입력 및 삽발력의 증가를 초래한다. 거꾸로, 시일의 접촉압력을 너무 낮게 설계될 경우 초기에 요구하는 방수등급을 만족하기 어렵다. 그러므로, 방수시일의 경우 방수등급에 맞는 적절한 접촉압력과 균일한 변형률을 유지하는 것이 장기간의 방수성능을 유지하는 중요한 설계방안이다. 즉, 시일의 방수성능과 내구성을 동시에 만족하는 적절한 접촉압력과 균일한 변형률을 갖는 시일의 단면을 설계하는 것이 산업체 설계현장에서 요구되고 있다[6-8].

통상적으로 산업현장에서는 시일 단면의 형상과 치수를 CAE 해석을 통하여 최적화 설계를 하기보다는 정해진 암/수 커넥터에 고무시일의 초기장력과 형상 및 치수를 경험적으로 결정한다. 이때 설계 → 제작 → 실험 등의 과정을 반복하면서 결정한다. 고무 시일을 암 커넥터에 장착하는 초기장력은 단순히 암/수 커넥터를 삽입 혹은 삽발시에 시일이 커넥터로부터 열리는 문제 (rolling)가 발생하지 않을 정도로 결정한다. 또한 단면의 여러 주요 치수를 경험으로 설계하고 제작하여 평가하여 결정한다.

본 연구에서는 시일의 방수등급 IP69[9]에서 요구하는 방수수준에 해당하는 접촉압력인 0.1 MPa 이상을 목표 압력으로 초기장력이 과도하게 설계된 자동차용 고전압 커넥터 방수 시일[1]에 대하여 초기장력과 단면을 최적화하고자 한다. 참고로 IP69 방수 실험은 시험 대상물에 대하여 각기 다른 지정된 각(0°, 30°, 60°, 90°)으로 제트 노즐을 통해서 수온은 -5°C ~ 80°C, 수압은 100 kg/cm², 노즐과 대상물과의 거리는 100~150 mm로 30초간 분사하여 대상물의 방수여부를 평가한다. 관련 연구 결과[1]에 따르면, 본 해석 대상인 방수시일의 경우 곡선 부분에 최대 변형률 49.1%가 집중적으로 분포되어 장시간 사용시 변형률이 집중된 부분에서의 영구적인 변형이 가속화가 예상되어 적절한 초기장력을 통한 시일의 내구성 개선이 필요하다. 또한, 삽입 후의 상태에서 시일의 하부의 최소 압력은 0.47 MPa이며 시일의 상부의 접촉압력이 약 3배 정도 하부보다 높게 분포하는 것을 확인하였다. 최소접촉압력 0.47 MPa에 해당하는 방수능력은 IP69[9]에서 요구하는 접촉압력인 0.1 MPa의 목표값을 충분히 만족하는 것으로 확인하였다[1].

따라서, 본 연구에서는 시일을 장착시 장시간의 장력

이 작용하는 상황에서 영구변형으로 인한 응력이완 문제를 고려하여 목표 방수등급을 만족하는 최적의 단면 형상을 도출하고자 한다. 이를 위하여 시일의 균일한 변형률 분포를 위한 최적의 초기장력을 결정하고자 한다. 또한, 최적의 초기장력 상태에서 시일의 방수성능을 유지하는 기존의 방수성능 수준(= 0.47 MPa)을 유지하면서 균일한 변형률 분포를 위한 시일의 주요 단면의 치수에 대하여 최적화 설계안을 제시하고자 한다.

2. 해석방법

본 연구의 대상인 자동차 고전압용 암/수 커넥터 및 방수 시일의 구조는 Fig. 1과 같다. 구조해석의 단순화를 위하여, 시일의 접촉이 이루어지는 암/수 커넥터 부분의 형상에 대하여 Fig. 2와 같이 1/4로 분할하여 모델링을 수행하였다. 해석모델의 전처리 과정은 HyperMesh[10]를 이용하였고, Solver는 ABAQUS[11]를 이용하여 수행하였다. 모델의 전체적인 요소 크기는 0.5 mm로 모델링하였으며, 시일의 곡면부는 상세한 해석값을 도출하기 위해 전체 요소 크기보다 작은 0.1 mm로 모델링하였다. 유한요소 모델은 시일과 암/수 커넥터를 Fig. 3(a) 및 3(b)

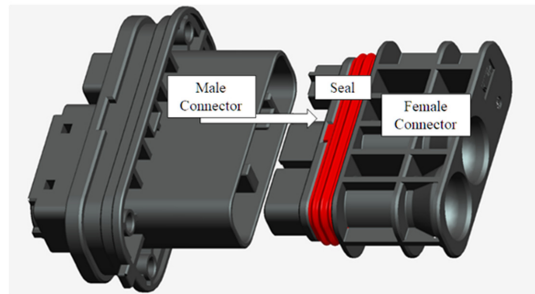


Fig. 1. Male-female connector assembly with a rubber seal.

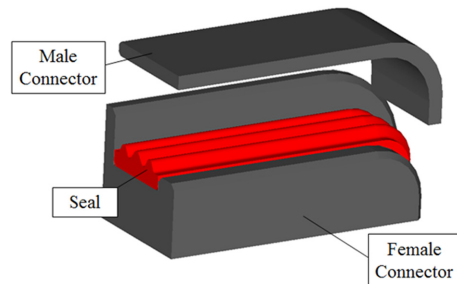


Fig. 2. Quarter model for structural analysis.

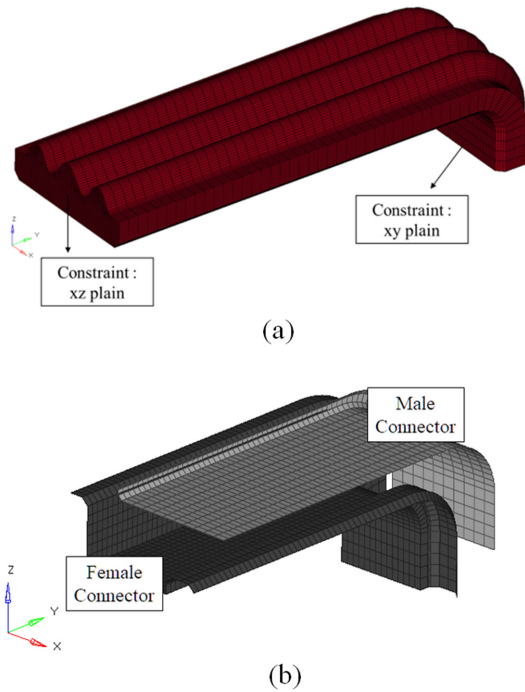


Fig. 3. (a) Rubber seal analysis model and (b) male and female connector analysis models.

와 같이 모델링하였다. 고무시일은 3D Solid 요소인 C3D8H 요소를 적용하여 26,341개 절점(node)과 22,540개 요소(element)로 구성하였다. 암/수 커넥터는 2D Shell 강체 요소인 R3D4 요소로 2,442개 절점과 2,275개 요소로 구성하였다.

고무해석에 필요한 시일의 물성데이터는 시일 재료에 대한 인장 응력-변형을 선도를 이용하여 Mooney-Rivlin 재료상수[12,13]를 도출하였다. Mooney-Rivlin 재료상수는 $D_1 = 0$, $C_{01} = 0.241$, $C_{10} = 0.0142$ 로 결정하였다[1]. 시일 해석은 고무시일을 암 커넥터에 장착하는 단계와 시일이 암 커넥터에 장착된 상태에서 암 커넥터를 수 커넥터에 삽입하는 두 단계로 해석하였다. 고무시일을 암 커넥터에 장착하는 단계는 고무시일이 초기장력으로 긴장(stretching)되어 암 커넥터에 장착되는 단계이다. 암 커넥터 모델은 완전구속상태에서 그림과 같이 Fig. 3(a)의 시일모델의 Y축 끝 단면의 XZ평면과 Z축 끝 단면의 XY평면을 구속하여 시일이 암 커넥터에 장착되었을 때의 길이까지 Y축으로 3.6 mm, Z축으로 2.05 mm만큼 강제변위를 적용하였다. 두 번째 단계는 고무시일이 암 커넥터에 장착된 상태에서 암 커넥터를 수 커넥터에 삽입 되고, 이때 시일이 압축(squeezing)되면서 접촉압력으로

인하여 방수기밀이 형성되는 과정이다. 이때 첫 번째 단계의 구속 조건을 유지하면서, Fig. 3(b)의 수 커넥터를 암/수 커넥터가 결합이 완료되었을 때의 위치로 강제변위를 적용하였다. 자세한 해석 및 실험절차는 관련 연구 [1]와 같다.

3. 해석결과 및 고찰

3-1. 초기모델 해석결과

초기모델의 첫 번째 단계 해석인 고무시일이 암 커넥터에 장착되는 스트레칭 후의 시일의 접촉압력 및 변형을 분포에 대한 해석 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)를 통하여 시일을 암 커넥터에 장착 후에 시일의 평행 직선부에서는 접촉 압력이 거의 없으나 곡선 부분의 시작부

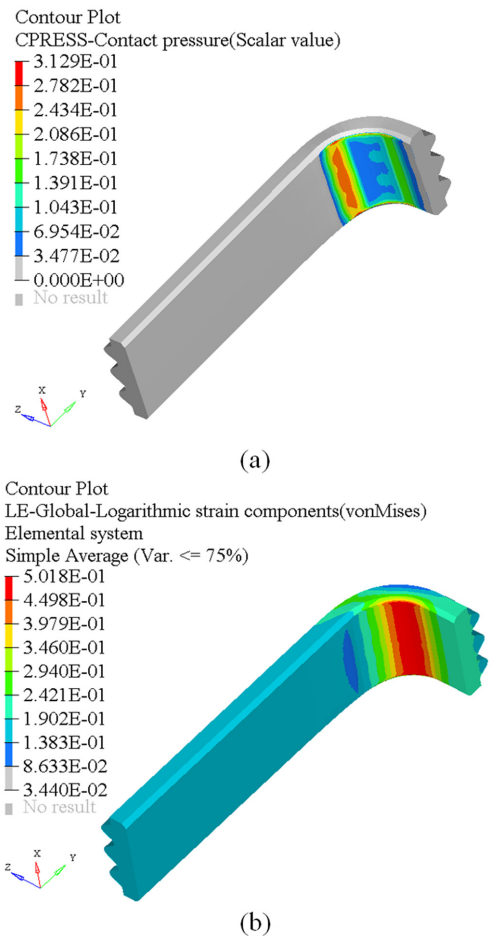


Fig. 4. Distribution of (a) contact pressure and (b) strain of the lower surface of the seal during stretching.

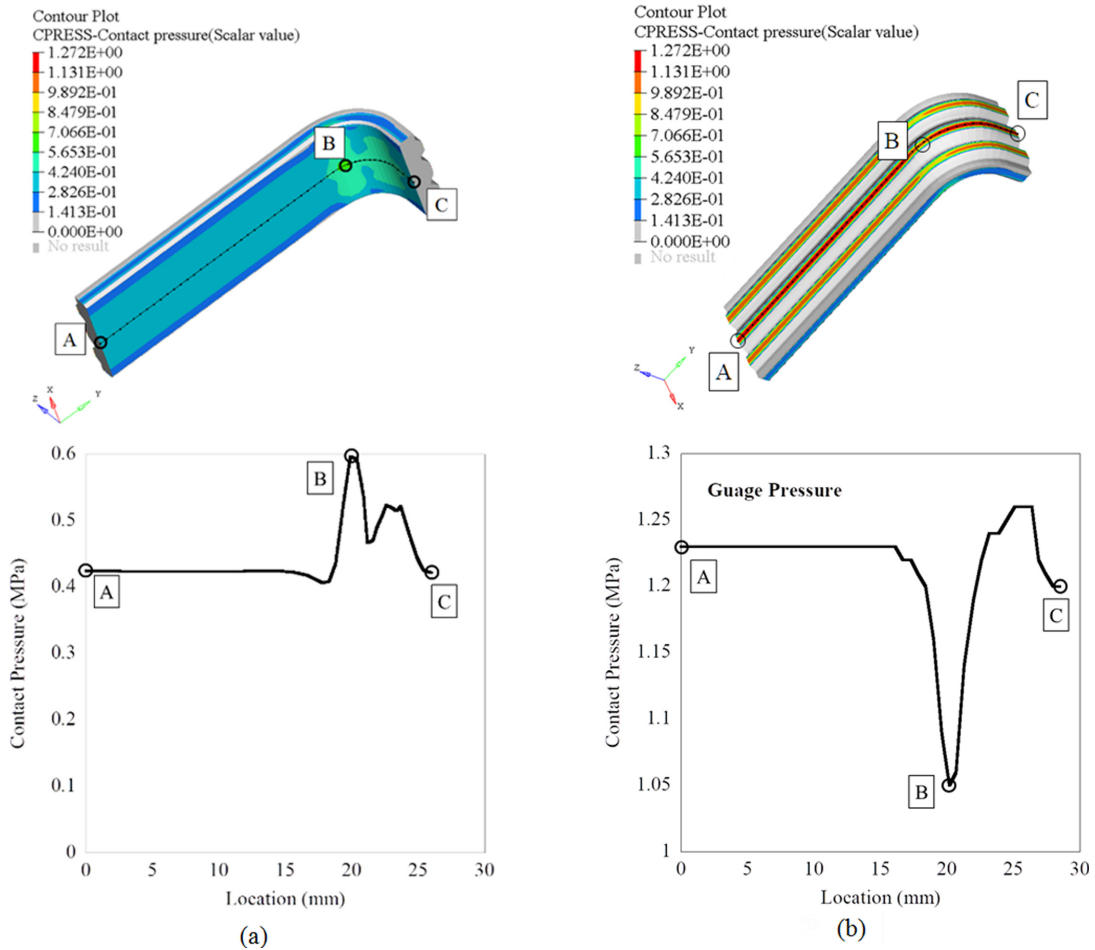


Fig. 5. Distribution of contact pressure of (a) lower surfaces and (b) upper surfaces of the seal during squeezing.

분에서 0.31 MPa의 접촉압력이 분포하였다. Fig. 4(b)는 시일의 바다면의 유효변형률 분포를 나타낸 결과로, 곡선 부분에 최대 유효변형률 50.1%가 집중적으로 분포되어 있는 것을 확인하였다. 장시간 사용시 과도하고 불균일하게 변형률이 분포된 곡선부 구간에서 영구적인 변형의 가속화의 발생이 예상된다. 이로 인하여 시일의 초기장력이 급격히 감소하며 헐거워진다. 즉, 곡선 부분에서의 응력이완으로 시일의 내구성 문제를 야기할 수 있어 적절한 초기장력 설정이 필요하다.

한편, 초기모델의 두 번째 단계 해석인 암/수 커넥터가 결합되는 단계에서 시일과 암/수 커넥터에의 접촉압력이 시일의 방수성능을 좌우한다. 최종적으로는 시일의 상부 및 하부에서의 최소접촉압력이 그 시일의 방수성능에 해당한다. Fig. 5(a)와 (b)는 암/수 커넥터가 결합된 상태에서 각각 암 커넥터가 접촉되는 시일 하부와 수 커

넥터가 접촉되는 시일 상부의 접촉압력 분포도이다. 그림에서 “A”점은 시일 단면의 장축의 중심이며, “B”점은 장축이 끝나는 지점으로 곡선부가 시작되는 부분이며, “C”지점은 단축의 중심위치에 해당한다. A점은 장축의 중심부이기 때문에 균일한 접촉압력 분포가 나타나며, 곡선부가 시작하는 B점 근처에서 접촉압력의 변화가 발생하며, 변화가 가장 심하게 나타난다. 따라서 시일의 다른 부위에 비하여 B점 근처에서의 접촉압력이 시일의 방수성능 및 내구성에 큰 영향을 미친다고 판단된다. Fig. 5(a)와 5(b)를 통하여 시일 하부 및 상부의 방수성능은 각각 최소 접촉압력에 해당하는 0.42 MPa, 1.05 MPa임을 확인하였다. 시일 하부에 비해 시일 상부의 접촉압력이 약 2.5배 정도 높게 발생하며, 최종적으로 본 시일의 방수능력은 상, 하 접촉압력의 최소값인 0.42 MPa임을 확인하였다. 0.42 MPa의 방수능력은 IP69[9]에서 요구하는

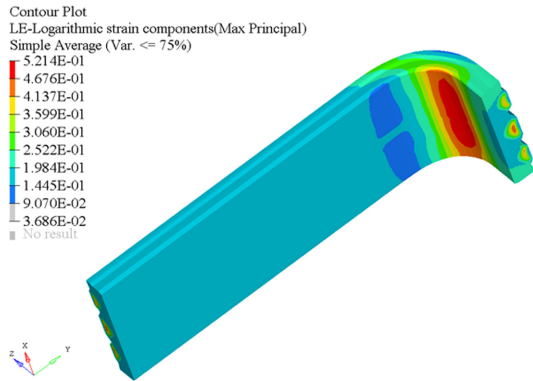


Fig. 6. Distribution of strain of lower surfaces of the seal during squeezing.

접촉압력인 1 bar의 목표값을 충분히 만족하는 수준이다. 해석결과에 대하여 본 시일을 적용한 커넥터에 대한 방수 실험을 통하여 약 0.43 MPa에서 누설이 발생하는 것으로 확인하였다[1]. Fig. 5를 통하여 접촉압력이 목표 방수성능에 비하여 과도하게 크므로 장시간 사용시 응력이완의 가속화가 예상된다. 따라서 시일의 방수성능에 필요한 접촉압력을 유지하면서 균일한 접촉압력과 변형을 분포를 위한 시일의 최적화 설계방안이 필요하다.

Fig. 6은 압수 커넥터가 결합된 상태에서 시일 하부의 유효변형을 분포도이다. Fig. 6을 통하여 초기장력 상태 해석과 동일하게 곡선 부분에서 변형률이 52.1%로 가장 높은 것을 확인하였다. 이는 초기장력으로 시일을 장착 시의 변형률 값(= 50.1%)과 유사한 크기로, 곡선부의 변형률이 집중되는 것은 과도한 초기장력으로 인한 것으로 사료된다. 따라서, 과도한 초기장력이 곡선부가 시작되는 구간에 균일하게 분포하도록 하는 최적화 설계가 필요하다.

3-2. 최적 초기장력 설정

최적의 초기장력을 설정하기 위하여 시일의 초기장력에 해당하는 변형률을 23%에서 10%까지 1%씩 순차적으로 감소시켜 해석을 진행하며 최적의 초기장력을 결정하였다. Table 1은 시일 하부의 최소 접촉압력과 최대 접촉압력의 차이를 나타내며, 초기장력이 10%일 때 하부 접촉압력 차이가 가장 작게 나타난다. Table 2는 시일 상부의 최소 및 최대 접촉압력 차이를 나타내며, 12%의 초기장력에서 상부 접촉압력의 차이가 가장 작으므로 나타났다. Table 1과 2를 통하여 시일의 접촉압력이 상부보다 하부가 낮으며, 하부의 최소 접촉압력도 본 시일의 방수성능인 1bar를 충분히 만족하고 있다. 초기

Table 1. The lower surface contact pressures of the seal with various stretch rates

Stretch rate (%)	Min. (MPa)	Max. (MPa)	Difference (MPa)
10	0.548	0.651	0.103
11	0.541	0.652	0.111
12	0.536	0.650	0.114
13	0.529	0.650	0.121
14	0.523	0.646	0.123
15	0.517	0.642	0.125
16	0.511	0.641	0.130
17	0.506	0.643	0.137
18	0.501	0.646	0.145
19	0.496	0.646	0.150
20	0.492	0.648	0.156
21	0.488	0.650	0.162
22	0.483	0.652	0.169
23	0.479	0.654	0.175
initial	0.483	0.683	0.200

Table 2. The upper surface contact pressures of the seal with various stretch rates

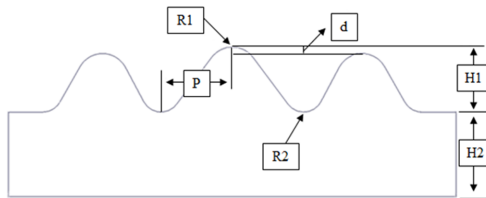
Stretch rate (%)	Min. (MPa)	Max. (MPa)	Difference (MPa)
10	1.49	1.58	0.08
11	1.48	1.53	0.07
12	1.46	1.53	0.07
13	1.44	1.53	0.09
14	1.43	1.51	0.08
15	1.41	1.48	0.07
16	1.39	1.47	0.07
17	1.38	1.45	0.07
18	1.36	1.44	0.08
19	1.35	1.42	0.08
20	1.34	1.41	0.08
21	1.32	1.40	0.08
22	1.31	1.39	0.08
23	1.30	1.38	0.08
initial	1.17	1.39	0.22

장력에 의한 시일의 과도한 접촉압력은 장시간 사용시 응력이완을 초래하여 시일의 내구성을 저하시킨다. 따라서, 필요 방수성능을 만족하는 조건에서는 가능한 균일한 접촉압력을 유지하기 위하여 최대 및 최소압력의 차

이가 작은 조건이 바람직하다. 시일을 장착한 상태에서 압/수 커넥터를 결합시 시일이 밀리는 현상(rolling)과 상부 및 하부 접촉압력 분포를 모두 고려하였을 때 11%의 변형률에 해당하는 초기장력이 최적인 것으로 결정하였다.

3-3. 단면 설계변수 최적화

시일 단면의 최적화를 위하여 현재 사용된 시일 단면의 형상은 Fig. 7과 같다. 시일의 단면을 결정하는 설계인자(design parameter)는 Fig. 7과 같이 R1, R2, H1, H2, P, d로 정하였다. 설계인자의 범위(level)를 변화시키면서 각각의 설계인자가 종속변수인 접촉압력과 유효변형률에 영향을 미치는 민감도를 분석하여 주요 설계인자를 선정하였다. 설계인자인 R1, R2, H1, H2, P의 범위는 각각 -0.1 mm, 0 mm, 0.1 mm로 범위를 변경하면서 해석을 수행하였고, d는 -0.05 mm, 0 mm, 0.05 mm로 범위를 변경하면서 해석을 수행하였다. Fig. 8은 시일의 하부 접촉압력 민감도 분석 결과이다. 그래프에서 x축은 형상 변화량, y축은 접촉압력으로 기울기가 큰 변수일수록 형상 변화에 민감하다는 것을 의미한다. 민감도 분석 결과 시일의 접촉압력에 큰 영향을 미치는 주요 설계인자는 R1과 d임을 확인하였다. 추가로 R2는 R1과



Design parameter	Note
R1	Curvature radius of the crest in seal cross-section
R2	Curvature radius of the root in seal cross-section
H1	Height between the bottom and crest in seal cross-section
H2	Height between the bottom and root in seal cross-section
P	Length between the crest and root in seal cross-section
d	Height difference between the middle and outer crests (H-H1-H2)

Fig. 7. Design parameters affecting the seal shape optimization.

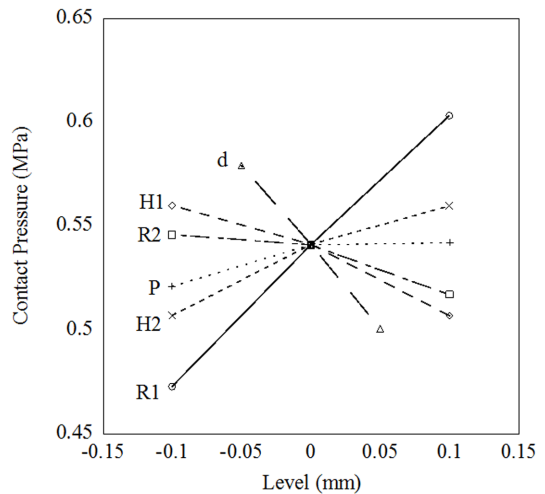


Fig. 8. Design parameter sensitivity to the lower surface pressure.

접선으로 연결되어 있는 형상이므로 이를 고려하여 R1, R2, d를 최적화 변수로 선정하였다.

따라서, 민감도 분석을 통해 선정된 주요 설계인자 R1, R2, d에 대하여 설계 수준을 5 수준으로 세분화하여 해석을 수행하였다. R1 및 R2의 수준은 0.1 mm씩 변경하였으며, d의 수준은 0.05 mm씩 변경하며 세분화하였다. 상용 통계 프로그램인 Minitab을 이용하여 직교배열표를 작성하였으며, 총 16회의 해석을 수행하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 초기 해석 모델(initial model)을 포함하여 실험계획법을 통해 해석한 16회의 결과에서 각각 하부

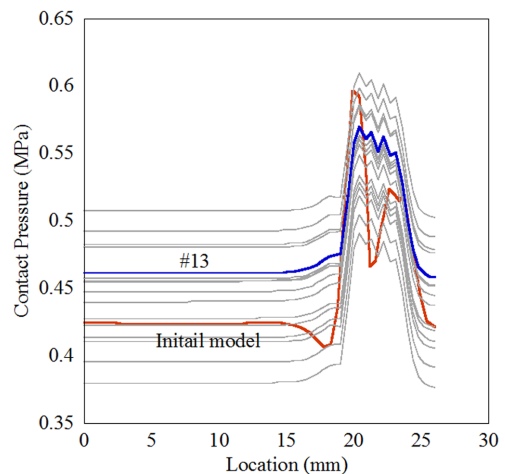


Fig. 9. The lower surface contact pressure distribution of the initial and various models.

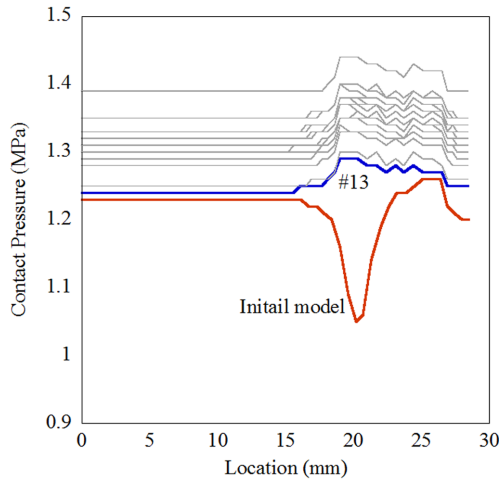


Fig. 10. The upper surface contact pressure distribution of the initial and various models.

및 상부 접촉압력을 나타낸 그래프이다. 해석 결과 모델 #13이 시일의 각 위치별 하부 접촉압력 분포가 압력 수준인 0.47 MPa를 만족하면서 접촉압력이 가장 균일하게 분포한 것으로 나타났다. 따라서 최종적으로 모델 #13을 최적화 모델로 선정하였다.

3-4. 시일 초기 모델과 최적화 모델 비교

Table 3은 최종적으로 결정된 시일의 독립변수인 R1, R2, d에 대하여 초기모델과 최적모델을 비교한 값을 나타낸다. 결과적으로 최적모델의 경우 R2 및 d 값은 초기모델과 동일하였으나, R1이 0.05 mm 크게 나타났다.

Fig. 11은 시일의 초기모델과 최적모델의 하부 접촉압력을 위치별로 비교한 그래프로, 최적모델의 경우 최소 접촉압력은 초기모델과 비슷한 수준을 유지하면서 접촉압력의 차이를 완화하였다. Fig. 11을 통하여 초기모델에 비하여 최적모델이 최소 접촉압력지점과 최대 접촉압력 지점에서의 접촉압력의 차이가 0.19 MPa에서 0.11 MPa로 장축과 단축 부분의 접촉압력이 감소하였음을 확인할 수 있다. Fig. 12는 초기 시일모델과 최적모델의 상부 접촉압력을 위치별로 비교한 그래프이다. Fig. 12를 통하여, 초기모델에 비하여 최적모델이 최소 접촉압력지점

Table 3. Comparison of the seal shapes between the initial model and the optimized model

	R1 (mm)	R2 (mm)	d (mm)
Initial model	0.4	0.3	0.1
Optimized model	0.45	0.3	0.1

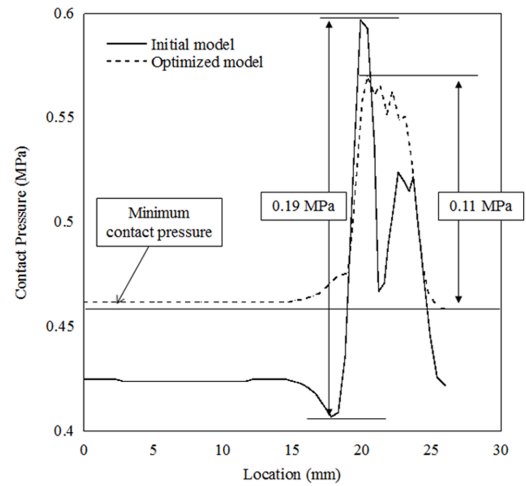


Fig. 11. Comparison of the lower surface contact pressure distribution of the initial model and the optimized model.

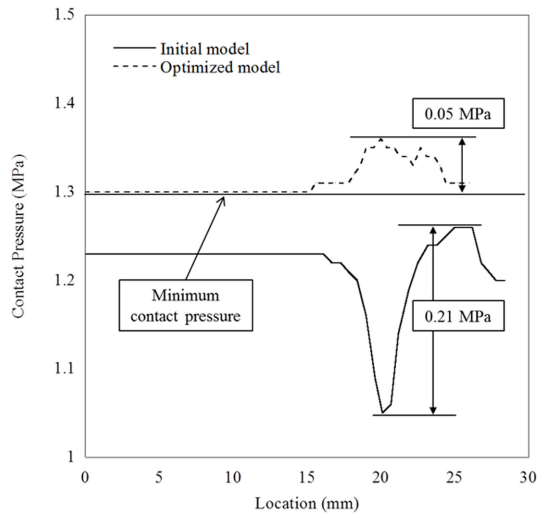


Fig. 12. Comparison of the upper surface contact pressure distribution of the initial model and the optimized model.

과 최대 접촉압력 지점의 접촉압력의 차이가 0.21 MPa에서 0.05 MPa로 장축과 단축 부분의 접촉압력이 감소하였음을 확인할 수 있다. 시일의 초기모델에서 상부 접촉압력이 위치 20 mm 지점에서 접촉압력이 급격히 변화하는 현상을 최적화 모델에서는 개선이 된 것을 확인할 수 있다.

최적화 설계 모델과 초기모델에 대한 각 부분에서의 변형률 분포를 비교한 결과 최적화 모델의 경우, 초기모

델에 비하여 시일 상부의 중앙산 지점의 유효변형률이 약 6% 감소하였다. 또한, 시일 하부 곡선부에 집중되었던 변형률이 33.8% 감소하였다. 따라서, 최적설계 결과 시일의 초기모델에 비하여 약간 상회하는 기밀성을 유지하면서 시일의 내구성에 영향을 미치는 응력 및 변형률을 감소시켰음을 확인하였다. 최종적으로, 상부 및 하부의 접촉압력이 좀 더 균일하게 분포하였다. 초기모델에 비하여 최소 및 최대 접촉압력의 차가 상부 및 하부에서 각각 42%, 76% 감소하였으며, 곡선부의 최대 변형률은 33.8% 감소하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차의 고전압용 커넥터에 사용하는 고무 방수시일에 대하여 목표 방수성능인 0.1 MPa를 만족하면서 내구성 향상을 위하여 최적화 설계방법을 기술하였다. 구조해석을 통하여 시일의 초기장력으로 인한 접촉압력과 압/수 커넥터가 장착 후의 시일에 작용하는 접촉압력을 검토하였다. 초기모델의 경우 과도한 초기장력으로 인하여 곡선부분의 변형률이 집중되는 문제에 대하여 장시간의 장력이 작용하는 상황에서 영구변형으로 인한 응력이완 문제를 고려하여 최적의 초기장력에 해당하는 변형률은 11%로 결정하였다. 최적의 초기장력 상태에서 기존 시일 단면에 대하여 3개의 설계인자에 대하여 실험계획법을 이용하여 기존의 방수성능(= 0.42 MPa) 이상인 0.46 MPa를 유지하면서 상부 및 하부의 접촉압력을 균일한 최적화된 단면을 제시하였다. 최적화 모델의 경우 기존 모델에 비하여 동일한 방수성능을 유지하면서, 곡선부의 변형률은 33.8% 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 시일의 최소 및 최대 접촉압력의 차가 상부 및 하부에서 각각 42%, 76% 감소시킬 수 있는 단면 형상의 치수를 제시하였다.

References

- [1] Han, J., Hwang, W., Kim, H., "FEM Analysis of a Waterproof Seal of Automotive Electrical Connectors", *Tribol.Lubr.*, Vol.35, No.1, pp.52-58, 2019,
- [2] Sui, P., Anderle, S., "Optimization of Contact Pressure Profile for Performance Improvement of a Rotary Elastomeric Seal Operating in Abrasive Drilling Environment", *Wear*, Vol.271, Iss.9-10, pp.2466-2470, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.02.021>
- [3] Sun, F., Yu, T., Cui, W., Zong, X., "The Seal Reliability Analysis of Oring Seals", IEEE Xplore, 8th Int. Conf. Reliability, Maint. Safety, 2009.
- [4] Liao, B., Sun, B., Yan, M., Ren, Y., Zhang, W., Zhou, K., "Time-variant Reliability Analysis for Rubber O-ring Seal Considering both Material Degradation and Random Load", *Mater.*, Vol.10, No.10, pp.1211, 2017.
- [5] Yoo, M.-H., Lee, T.-S., "A Study on the Relationship between Stress Relaxation and Performance of a Lip Seal", *JKSPE*, Vol.26, No.11, pp.85-91, 2009.
- [6] Zhang, X., Wang, G., Xia, P., Li H.P., He, M., "Finite Element Analysis and Experimental Study on Contact Pressure of Hydraulic Support Bud-shaped Composite Sealing Ring", *Adv. Mech. Eng.*, Vol.10, No.8, pp.1-9, 2016, <https://doi.org/10.1177/1687814016674846>
- [7] Achenbach, M., "Service Life of Seals - Numerical Simulation in Sealing Technology Enhances Prognoses", *Comp. Mater. Sci.*, Vol.19, pp.213-222, 2000.
- [8] Sinha, N.K., Ghosh, P., Saha, A., Mukhopadhyay, R., Raj, B., Chetal, S.C., "Design Optimization of Backup Seal for Sodium Cooled Fast Breeder Reactor", *Mater. & Design*, Vol.36, pp.396-407, 2012.
- [9] Road Vehicles - Degrees of Protection (IP code) - Protection of Electrical Equipment against Foreign Objects, Water and Access, *ISO 20653*, 2013.
- [10] Altair® HyperMesh Basic Training, Altair Eng., Vol.1, 2011.
- [11] ABAQUS User Manual Version 6.10.
- [12] Rivlin, R.S., Saunder, 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.
- [13] 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.