

실험계획법에 의한 립 시일의 설계

Design of Lip seal using Design of Experiment

*이택성¹, #유명호², 김지연³

*T. S. Lee¹, #M. H. Yoo (skillman@sjseal.com)², J. Y. Kim³

¹ 한국산업기술대학교 기계설계공학과, ²주)에스제이테크, ³한국산업기술대학교 기계시스템설계공학과

Key words : DOE, Lip seal, Response surface design

1. 서론

립 시일은 주로 건설 중장비 유압장치 중 유압실린더에 의해 움직임을 갖는 관절 부분에 사용된다. 이 부분은 장비 구동 시 큰 하중이 발생하면서 회전운동을 한다. 장비의 사용 용도상 분진이나 이물질 등이 많이 발생하는 건설, 토목, 광산, 채굴작업 등 열악한 환경 하에 사용되고 있다. 따라서 그림의 화살표로 표시된 부분 즉 큰 하중과 회전운동을 하는 부분이 빠른 마모손상이 발생한다.

이런 마모로 인한 문제를 해결하고자 원만한 회전운동을 유지하기 위하여 축과 구름운동을 하는 부분에 효과적인 부시(bush)를 사용한 구조를 가지고 있다. 또한 이 구름운동 부분에 그리스(grease)를 공급하여 사용하고 있다.

립 시일은 이처럼 회전운동이 발생하는 부분에서 외부로부터 이물질의 진입을 막고 내부의 윤활제를 보호하여 건설 장비를 정상적인 작동 상태로 유지하는데 중요한 역할을 하고 있다.

여기서는 실험계획법 중 반응표면분석법(response surface methodology)을 이용하여 회전축에 작용하는 주립(main lip)의 적정접촉압력으로 제시된 1MPa 을 형성하는 최적형상을 찾고자 한다.

2. 인자의 선별

립 시일은 건설 중장비에 장착되어 저속 회전 부분에 적용되는데 립 시일의 역할은 외부에서 발생하는 이물질을 회전운동부로 침투하지 못하도록 하는 것이 주요 기능이다. 이 기능은 시일의 밀봉성에 의해 결정된다. 밀봉은 시일 립과 축의 접촉압력에 의하여 발생하므로 이 부위의 최대접촉압력이 시일성능의 지표로 볼 수 있다[1].

최대접촉압력에 영향을 줄 수 있다고 예상되는 형상 인자를 Fig. 1 과 같이 4 가지로 추정하였다. 내측 립의 곡면반지름(R), 축과 립의 중첩량(δ), 립의 두께(t), 립의 높이(h)이다.

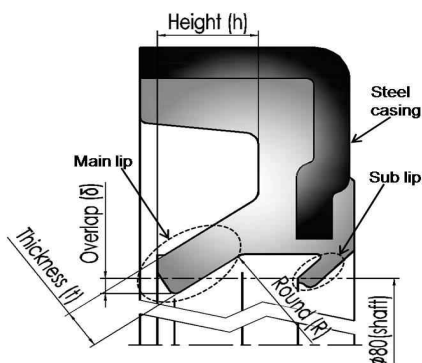


Fig. 1 Section of lip seal

Fig. 1 과 같이 예상되는 요인 중 접촉압력 또는 접촉력에 영향을 미치는 인자를 선별하기 위해 실험수가 비교적 적은 부분배치법에 의한 부분요인 실험을 Table 1 과 같이 2 수준, 4 인자, 1/2 부분요인 실험을 계획하고 반응치 Y는 축과 립에서 발생하는 수직접촉압력(contact normal force)으로 정하고 유한요소법을 이용하여 실험하였다.

Table 1 2 level 4 factor perfection element experiment

| Run | R(mm) | δ (mm) | t(mm) | h(mm) | Y(contact normal force(N)) |
|-----|-------|---------------|-------|-------|----------------------------|
| 1 | 0.4 | 0.5 | 1.25 | 2.9 | 20.1 |
| 2 | 1.2 | 1 | 1.85 | 3.2 | 37.44 |
| 3 | 1.2 | 1 | 1.25 | 2.9 | 21.36 |
| 4 | 0.4 | 0.5 | 1.85 | 3.2 | 34.08 |
| 5 | 0.4 | 1 | 1.25 | 3.2 | 20.76 |
| 6 | 1.2 | 0.5 | 1.25 | 3.2 | 19.86 |
| 7 | 0.4 | 1 | 1.85 | 2.9 | 38.64 |
| 8 | 1.2 | 0.5 | 1.85 | 2.9 | 35.14 |

Table 1 의 완전요인 실험에 대한 분석결과는 Table 2 와 같은 결과를 보였다. 실험설계 및 결과 분석은 상용 통계프로그램인 미니탭을 사용하였다.

Table 2 estimated effect & coefficient of Y

| 항 | 효과 | 계수 | SE계수 | T | P |
|----------|---------|---------|--------|-------|-------|
| R | 0.0550 | 0.0275 | 0.3562 | 0.08 | 0.943 |
| δ | 2.2550 | 1.1275 | 0.3562 | 3.17 | 0.051 |
| t | 15.8050 | 7.9025 | 0.3562 | 22.19 | 0.000 |
| h | -0.7750 | -0.3875 | 0.3562 | -1.09 | 0.356 |

각 요인의 영향력을 판단하는 기준으로 P 값의 크기로 결정하는데 일반적으로 유의수준(α) 0.05(5%)를 기준으로 P 값이 0.05 보다 크면 유의하지 않고 0.05 보다 작으면 해당 요인은 "유의하다." 라고 결정하는데 어떤 실험 결과 자료를 두고 "통계적으로 유의하다."라고 하는 것은 확률적으로 봐서 단순한 우연이라고 생각되지 않을 정도로 의미가 있다는 뜻이다. 반대로 "통계적으로 유의하지 않다."라고 하는 것은 실험 결과가 단순한 우연일 수도 있다는 뜻이다. 실험의 P 값은 실험의 표본 공간에서 정의되는 난수로서, 0~1사이의 값을 가진다.

Table 2 에서 보이는 바와 같이 축에 대한 최대접촉압력의 영향은 t 가 가장 크며 요인 R 은 영향력이 거의 없는 것으로 나타났다.

3. 반응표면설계

반응표면분석은 반응치에 영향을 미치는 2~3 개 핵심인자가 선정 되었을 때 각 인자의 최적 조건을 도출하기 위해 사용되며 반응치와 요인들 간에 2 차식의 수학적 모형이 필요한 경우에 사용한다. 반응치의 목표값 주위에서 주어진 핵심인자의 변화에 대해 반응치 Y 가 어떻게 변하는 지를 확인하기 위하여 사용하기도 한다. 또한 2~3 개의 핵심 인자가 동시에 변화 되었을 때 반응치 Y 가 어떻게 되는지 확인하려는 목적도 있다.

Table 1 의 2 수준 부분요인 실험에서 얻은 결과는 접촉력에 대한 반응에서 4 가지 요인 중 R 이 큰 영향력이 없는 것으로 분석되어 반응표면설계에서는 이 요인을 제외하고 3 요인을 반영 하였다.

반응표면설계에서 요인3(δ, t, h), 2 수준으로 하고 반응치는 축과 접촉면에서 발생하는 최대접촉압력(maximum contact pressure)으로 결정하였다.

립 시일에서 최대 접촉력의 목표치는 Heinz K. Muller [2]가 언급한 일반적인 립 시일에서의 적정 접촉압력인 1MPa 로 정하였고 선정된 인자와 수준은 Table 3과 같다.

Table 3 element & level of response surface design

| 요 인 | 수 준 | | 단 위 |
|----------|-----|-----|-----|
| | (-) | (+) | |
| δ | 1.0 | 1.5 | mm |
| t | 0.6 | 0.8 | |
| h | 2.2 | 3.3 | |

Table 3 요인의 결정은 Table 2의 2수준 부분요인실험에서 얻은 결과를 반영한 것이며 수준은 현재까지의 경험을 바탕으로 립 시일의 성형공정에서 수용할 수 있는 범위를 수준으로 정하였다. 반응표면분석법에서 중심합성법의 내접설계를 선택하여 Table 3 과 같은 반응표면 실험표를 얻었다.

Table 4 3element response surface experiment

| Run | δ (mm) | t(mm) | h(mm) | Y(Max. contact pressure(MPa)) |
|-----|---------------|-------|-------|-------------------------------|
| 1 | 1 | 0.6 | 2.2 | 0.228 |
| 2 | 1.5 | 0.6 | 2.2 | 1.063 |
| 3 | 1 | 0.8 | 2.2 | 0.871 |
| 4 | 1.5 | 0.8 | 2.2 | 0.755 |
| 5 | 1 | 0.6 | 3.3 | 1.109 |
| 6 | 1.5 | 0.6 | 3.3 | 0.082 |
| 7 | 1 | 0.8 | 3.3 | 1.405 |
| 8 | 1.5 | 0.8 | 3.3 | 0.433 |
| 9 | 1 | 0.7 | 2.75 | 1.3425 |
| 10 | 1.5 | 0.7 | 2.75 | 0.207 |
| 11 | 1.25 | 0.6 | 2.75 | 0.127 |
| 12 | 1.25 | 0.8 | 2.75 | 0.665 |
| 13 | 1.25 | 0.7 | 2.2 | 0.308 |
| 14 | 1.25 | 0.7 | 3.3 | 0.898 |
| 15 | 1.25 | 0.7 | 2.75 | 0.309 |

Table 4 에 의한 실험으로 반응치 Y 를 구하여 다시 반응치 Y 에 대하여 추정된 회귀 계수에 대한 분석은 Table 5 와 같다.

Table 5 3element Y(Max. contact pressure(MPa)) assumed regression coefficient (code unit)

| 항 | 계수 | SE계수 | T | P |
|-----------------|----------|---------|--------|-------|
| 상수 | 0.3852 | 0.07546 | 5.105 | 0.000 |
| δ | -0.24155 | 0.07546 | -3.201 | 0.006 |
| t | 0.152 | 0.07546 | 2.014 | 0.064 |
| h | 0.0702 | 0.07546 | 0.930 | 0.368 |
| $\delta*\delta$ | 0.36435 | 0.10671 | 3.414 | 0.004 |
| $\delta*h$ | -0.33975 | 0.08436 | -4.027 | 0.001 |

Fig. 2 는 h 를 2.75mm 로 고정하고 요인 t 와 δ 의 수준변화에 따른 반응치 Y(Max. contact pressure(MPa))에 대한 반응표면도 및 등고선도를 나타낸 것이다. 반응치 1MPa 인 목표치가 형성되는 구간이 표면도와 등고선도의 좌측 상단 부근에 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3 은 t 0.7mm 로 고정된 상태에서 요인 h와 δ 의 수준변화에 따른 Y(Max. contact pressure(MPa))에 대한 반응표면도 및 등고선도를 나타낸 것이다. Fig. 2 와 유사하게 1 MPa형성구간이 좌측상단에 나타나고 있다.

Fig. 4 는 δ 를 1.25mm 로 고정 후 h 와 t 의 수준변화에 따른 Y(Max. contact pressure(MPa))에 대한 반응표면도 및 등고선도를 나타낸 것으로 이때는 반응치 1MPa 구간이 나타나지 않았다.

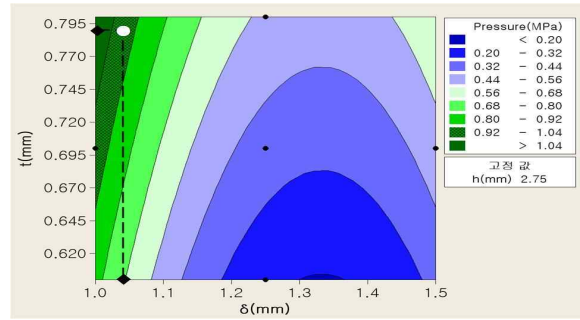


Fig. 2 Max. contact pressure contour map , h = 2.75mm

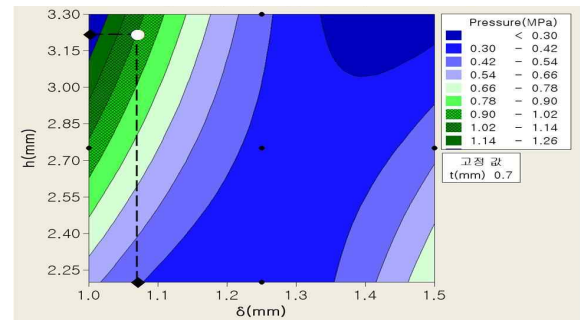


Fig. 3 Max. contact pressure contour map , t = 0.7mm

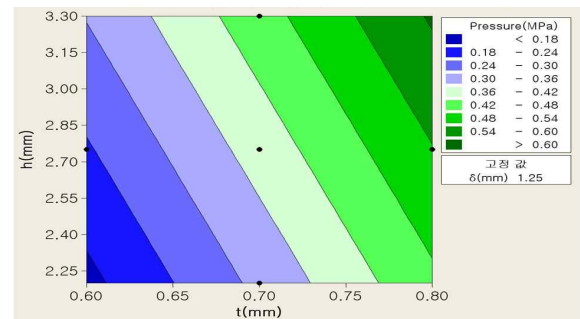


Fig. 4 Max. contact pressure contour map , δ = 1.25mm

4. 결론

회전축과 시일의 주립에서 발생하는 최대접촉압력은 중첩량 (δ) 이 가장 큰 영향을 주고 있음을 확인하였고, 유의한 인자이다. 주립에서 수직접촉압력 1MPa 이 나타나는 형상은

h 가 2.75mm 로 고정되었을 때 δ =1.04mm, t =0.79mm
t 가 0.79mm 로 고정되었을 때 δ =1.08mm, h =3.19mm 이다.

참고문헌

1. B. Guido, M. Andrea and M. Luigi, "Optimization of the Cross Section of an Elastomeric Seal for Pneumatic Cylinders," Journal of Tribology, Vol. 128, pp.406-413, 2006.
2. K. Heinz Muller and S. Nau Bernard, "Fluid Sealing Technology Principles and Application," Marcel Dekker, Inc., pp.104-109, 1998.