

응력완화와 립 시일의 성능의 관계에 대한 연구

A Study on the Relationship between Stress Relaxation and Performance of a Lip Seal

유명호¹, 이택성^{2,✉}
Myung-Ho Yoo¹ and Taek-Sung Lee^{2,✉}

¹ (주)에스제이테크 R&D Center (Research Center of SJ Tech Co., Ltd.)

² 한국산업기술대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic Univ.)

✉ Corresponding author: lts724@kpu.ac.kr, Tel: 031-8041-0423

Manuscript received: 2009.5.25 / Accepted: 2009.7.19

A lip seal is widely used not only to prevent leakage of fluids from an actuator or a rotating shaft but also to exclude outside substances. Recently, TPU(Thermoplastic Polyurethane), which is one of the sealing materials, has been frequently used due to its excellent mechanical properties and wear resistance. The material constants for finite element analysis through the experiment on stress relaxation are presented. The reaction forces of a shaft as well as the contact pressures of a lip seal under condition before and after stress relaxation using finite element analysis were obtained. The results show that stress relaxation has not a little effect on the performance of a lip seal.

Key Words: Stress Relaxation (응력완화), TPU (열가소성 우레탄), Lip Seal (립 시일), Finite Element Analysis (유한요소 해석), Contact Pressure (접촉압력)

1. 서론

회전축이나 왕복동 실린더 등과 같이 상대운동이 발생하는 곳에 작동유체의 누설이나 외부로부터 장치내부로 유입되는 이물질들을 차단하기 위해 립 시일이(lip seal) 사용된다. 립 시일은 자동차, 펌프 및 공작기계, 건설장비, 화학설비 등에 주로 사용되며 최근 다양한 소재의 개발에 따라 활용분야가 크게 넓어지고 있다.¹ 일반적인 립 시일은 유체의 작용압력에 의해 립과 회전축이 접촉하면서 누설을 방지하며, 작용압력이 높은 경우에는 압력에 의해 접촉면이 마멸되어 누설이나 외부 이물질 유입이 발생한다. 립 시일은 상대 축과 요동운동이나 병진운동을 하면서 미끄럼 마찰접촉을 하고 구조가 간단하며 설치공간도 작은 것이 특징이다.

화학적 소재기술의 발전으로 시일 재료인 탄성

중합체(elastomer)도 다양화되고 특성도 크게 발전하고 있으며, 립 시일의 재질로는 NBR(Nitrile Butadiene Rubber), Silicone, Polyacrylate, Fluoro-Elastomer, TPU(Thermoplastic Polyurethane) 등이 널리 사용되고 있다. 선진국에서는 탄성 중합체 시일의 소재 및 제조기술에 관한 연구가 일찍부터 이루어지고 있어 국내와의 기술격차가 크다고 할 수 있다. 국내에서는 정부출연 연구소나 대학을 중심으로 연구가 진행되고 있으며, 아직은 기초적인 시험데이터의 확보나 해석 방법의 체계 확립에 주력하고 있다. 근래에 Kim 등^{2,3}은 유한요소해석에 적용할 수 있는 고무재료의 기초적인 시험데이터 추출기술 등을 제시하였고, 또한 Lee⁴등은 유한요소해석을 통한 왕복동 실린더에 사용되는 너스트 시일의 립 접촉압력의 분배와 변형거동을 연구하였다.

국외의 연구동향을 살펴보면, Nikas 와 Sayles⁵가

극한 온도환경과 고압 상태의 사각 시일(rectangular seal)에 관하여 연구하였으며, Mokhtar 등⁶은 회전체의 축이 어긋난 상태에서 스프링이 없는 U 자형 립 시일의 비선형 거동에 관하여 연구하였다.

TPU 를 비롯한 탄성 중합체 재료의 립 시일은 사용시에 항상 일정한 변형 상태에 있게 되고 이때 응력완화(stress relaxation)가 일어나며, 이는 시일의 밀봉성에 영향을 미친다.

본 연구에서 응력완화가 립 시일의 성능에 미치는 영향을 보기 위해 시일 재료 중 내마모성과 기계적 성질이 우수하여 최근에 시일의 재료로 점차 사용 빈도가 증가하는 TPU 에 대하여 응력완화 시험을 하고 유한요소해석에 적용할 재료상수를 추출하였다. 그리고 외부 이물질 유입에 대한 밀봉성능을 확인하기 위해 유한요소해석을 통하여 응력완화 전과 응력완화 후의 시일 립의 접촉압력(contact pressure)과 축(shaft)의 반력을 계산하고 비교 분석하였다.

2. 재료시험

2.1 시험편

시일의 재료로 사용하는 TPU 는 일반적인 재료와 달리 하중과 변형의 관계에서 저 하중에서도 비선형성을 보이고 대 변형에서도 탄성거동을 나타내는 초탄성(hyperelasticity) 특성을 가지고 있으며, 분자 구조는 길고 유동적인 실이 마구 뒤엉킨 것과 같은 형태로 되어 있다. 이러한 상태의 분자들에 외부에서 하중가감을 반복하면 분자들의 범위만큼 형태가 변형되었다가 다시 회복된다.⁷

본 연구에서 사용한 재료는 Table 1 과 같은 물리적인 특성을 보이며 ㈜에스제이테크에서 현재 시일 양산에 적용하고 있다. 시험편은 양산의 성형 조건과 유사한 판상의 상태로 사출성형기로 제조하였으며 시험편의 두께는 1.8mm 이다. 성형된 판상 재료에서 절단 칼을 이용하여 Fig. 1 과 같이 ASTM D412 규격의 시험편을 절취하였다.

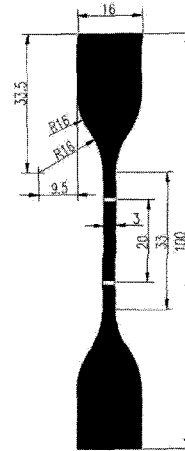


Fig. 1 Uniaxial tension specimen

2.2 응력완화시험 및 결과

응력완화시험 장치는 Fig. 2 와 같이 인장시험기, 레이저 변위 측정장치(laser extensometer), 데이터 저장장치로 구성하였다. 응력완화시험(stress relaxation test) 시험속도는 100mm/min 이며, 상온에서 7,200sec (22°C x 2Hr)동안 진행하였고 시험기의 로드셀(load cell)의 용량은 1,000N 이며 시험시편의 표선거리를 20mm 로 하였다. 표선의 변위를 측정하기 위하여 MTS 사의 비접촉 레이저 변위측정장치가 사용되었으며 시험방법은 ASTM D412 규격을 따랐다.

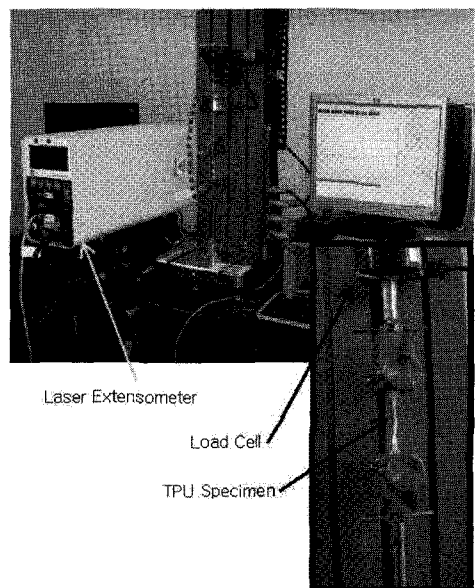


Fig. 2 Testing equipment for stress relaxation

Table 1 Physical properties of TPU

Items	Unit	Result
Tensile strength	MPa	36
Elongation at brake	%	500
100% Modulus(Stress at 100% strain)	MPa	8
Hardness(Micro-IRHD)	-	91.1

립 시일을 장비에 장착하여 사용할 때 축에 의한 립의 변형률(strain)은 최대 0.4 이내 이므로 응력완화 시험을 위해 동일한 시편에 대하여 연속적으로 0.1, 0.2, 0.3, 0.4의 변형률 수준(strain level)을 적용하여 Fig. 3 과 같은 결과를 얻었다.

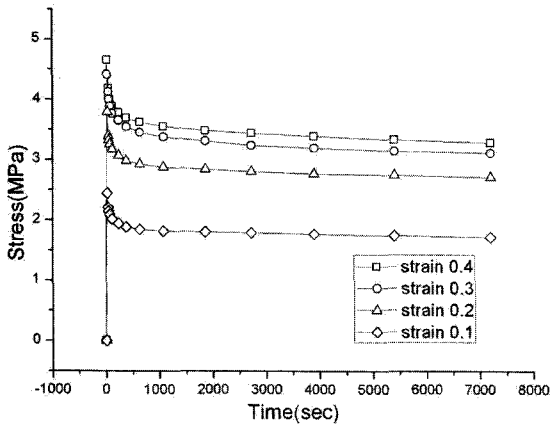


Fig. 3 Results of stress relaxation test (stress-time curves)

응력완화 시험결과인 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 4 가지 각각의 다른 변형률 상태에서 모두 유사한 완화 현상을 보였다. 응력이 급격하게 떨어지는 구간은 시험시작 초기부터 약 500sec 까지 이며 이후부터는 직선에 가깝고 기울기가 완만한 안정된 완화 경향을 보이고 있다. 각각의 변형률 수준에 대한 완화율을 비교하였는데 Table 2 에 보이는 것과 같이 28.23~29.51% 사이에서 유사한 값을 보이고 있다.

Table 2 Relaxation rate

Strain level	Before relaxation (MPa)	After relaxation (MPa)	Relaxation rate (%)
0.1	2.44	1.72	29.51
0.2	3.79	2.72	28.23
0.3	4.41	3.12	29.25
0.4	4.65	3.28	29.46

2.3 재료상수의 결정

Fig. 4 는 Fig. 3 의 응력완화시험 결과로부터 얻어진 응력-시간곡선(stress-time curve)을 각각의 변형률 수준(strain level)에 대하여 응력완화 전과 후를 응력-변형곡선(stress-strain curve)으로 전환한 그림으로 재료상수를 얻기 위한 기초 데이터이다.

일반적인 탄성 중합체에서 나타나는 하중-변형 관계에서 비선형 특성이 응력완화 전과 후에서 모두 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

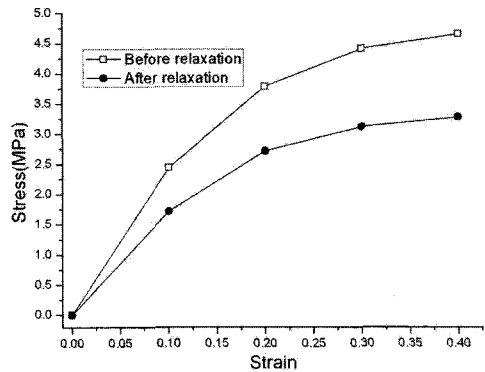


Fig. 4 Stress-strain curves before and after relaxation

재료상수는 Fig. 4 의 응력-변형 데이터를 이용하여 최소자승법(least square method)으로 구할 수 있으며, 본 연구에서는 MARC mentat⁸ 를 이용하여 응력완화 전과 후에 대하여 각각 Table 3 과 같이 결정하였다.

Table 3 Material constants of TPU

Mooney-Rivlin Constants (MPa)		
	After	Before
C ₁₀	-2.427	-4.749
C ₀₁	6.154	10.136
C ₁₁	-0.223	0.210

Fig. 5 는 Table 3 의 추출된 재료상수를 이용한 응력-변형 선도를 실험데이터와 비교한 것으로 Mooney-Rivlin 근사곡선이 높은 일치성을 보여주고 있다. 초탄성 거동을 보이는 탄성 중합체에서 사용하는 변형률 에너지 함수(W)는 대표적으로 식 (1)과 같이 탄성변형률 불변량 함수인 Mooney-Rivlin 3 항 모델로 표현된다.

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)+C_{11}(I_1-3) \quad (1)$$

여기서 I₁, I₂는 각각 탄성변형률 1 차, 2 차 불변량이고 C₁₀, C₀₁, C₁₁ 항은 실험으로부터 얻어지는 재료상수이다.⁹

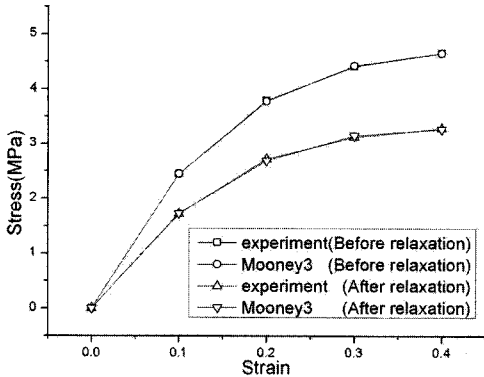


Fig. 5 Comparison of experimental curves with Mooney3 curves

3. 유한요소해석

3.1 모델링

립 시일 외측의 금속보강재(steel casing)는 상대 물인 장착 홈(groove)보다 약 0.2mm 가 크게 설계되어 조립 시 억지 끼움 상태로 장착된다. 시일 립의 두께는 주립인 경우 1.2mm, 보조 립은 0.5mm 이며 삽입되는 축의 지름은 80mm 이고 외측의 금속보강재의 지름은 95.2mm, 립 시일의 좌우 폭은 6mm 이다. Fig. 6 에서 보는 바와 같이 시일을 중심으로 내부인 우측에는 윤활제인 그리스(grease)가 충전되어 있고 좌측의 외부에서 유입되는 이물질을 차단하여 회전하는 축과 구름 베어링(bush)을 보호는 기능을 한다. 시일의 립은 축과 일정량이 중첩되는 간섭량이 주어지는데 이로 인하여 축의 삽입 시 립의 변형이 발생되고 축에 대하여 수직으로 작용하는 접촉력과 압력이 형성되어 밀봉성을 갖게 된다.

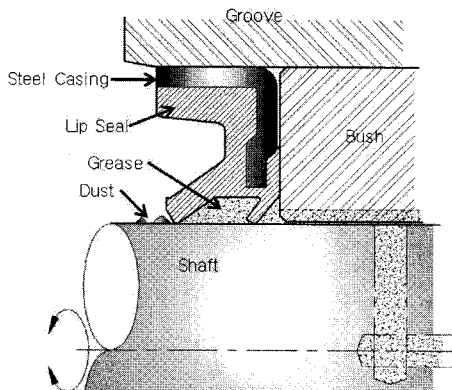


Fig. 6 Sealing system of lip seal

3.2 경계조건 및 재료물성

립 시일은 Fig. 6 과 같이 축대칭 형상을 하고 있으므로 수치적 계산의 효율을 위해 Fig. 7 과 같이 2 차원 축대칭 요소(2D axisymmetric element)를 사용하였다. 적용된 요소(element)는 MSC MARC 의 full- Hermann formulation quad 82 를 사용하였고, 자동요소 생성기능을 이용하여 요소망을 생성하였다. 립 시일에서 비교적 큰 변형이 발생하는 주립(main lip)과 보조립(sub lip)은 절점간격 0.036 mm, 축과 접촉하는 부분은 0.0092mm 로 세밀하게 요소망을 나누었다. 유한요소모델의 요소망의 요소 수는 4228 개, 절점 수는 8720 개 이다. 해석을 위한 재료 물성치는 Table 3 의 재료상수를 TPU 부분에 적용하였고 각각 응력완화가 발생하기 전과 응력완화가 발생한 후의 2 가지 경우로 해석하였다. TPU 와 축(shaft)간 마찰계수는 0.15 이며, TPU 와 접촉되는 냉간압연강판으로 만들어진 금속보강재(steel casing)의 물성치는 탄성계수(Young's Modulus) 164.5 GPa, Poisson 비는 0.3 이다.

실제 시일 조립상태를 유한요소해석의 경계조건으로 재현하기 위하여 강체(rigid body)로 설정된 밀판(pushing plate)을 축 길이 방향으로 6.5mm 이동시켜 립 시일을 강체인 홈 안으로 밀어 넣도록 설정하였다. 시일의 소재인 TPU 는 변형체(deformable body)로 하고, 하단의 강체인 축(shaft)은 축 길이에 수직인 방향으로 주립과 0.8mm, 보조립 0.3mm 의 간섭량을 갖도록 이동시켜 해석하였다.

립 시일의 전체적인 치수는 현재 산업현장에서 사용 중인 시일을 참고하여 설정하였다.

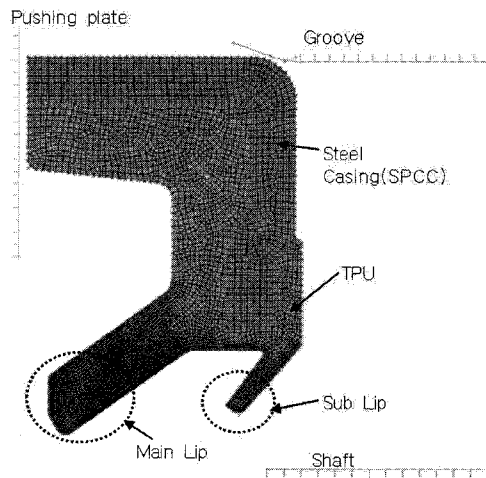


Fig. 7 Boundary conditions

3.3 해석결과

Fig. 8 의 결과는 립 시일의 변형률 상태를 나타낸 것으로 최대변형률은 0.163 으로 응력완화 전과 후의 결과가 동일하게 출력되었다. 변형률이 큰 곳은 주로 립이 꺾이는 라운드 부위에서 발생하고 있다.

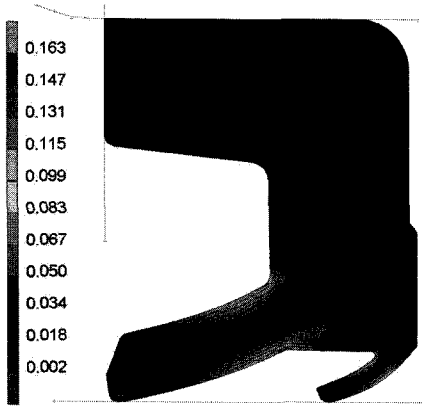


Fig. 8 Strain distribution

Fig. 9 와, Fig. 10 은 각각 응력완화 전과 후의 등가응력(Von Mises stress)분포를 나타낸 그림으로 거의 동일한 응력분포를 보이고 있다. 응력완화 전의 물성치를 적용한 Fig. 9 의 최대 등가응력은 5.893MPa 로 보조립 상부의 라운드 부분에서 나타나고 있으며 주립의 축 접촉부는 3.701MPa 이다. 응력완화 후 물성치를 적용한 Fig. 10 의 최대 등가응력은 3.986MPa 로 보조립 상부의 라운드 부분에서 나타나고 있으며 주립의 축 접촉부는 2.522MPa 이다. 즉 재료의 응력완화에 따라 최대 등가응력은 32.4% 감소하고 축 접촉부의 등가응력은 31.9% 감소한다.

Fig. 9, Fig. 10 에서 보듯이 금속보강재가 보이지 않는데, 이유는 장착 흡과 역지 끼움으로 발생하

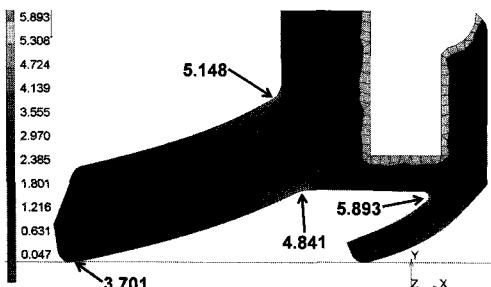


Fig. 9 Stress distribution (Before relaxation)

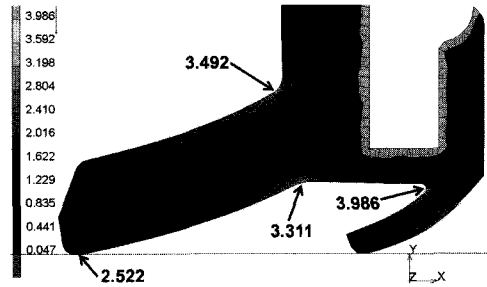
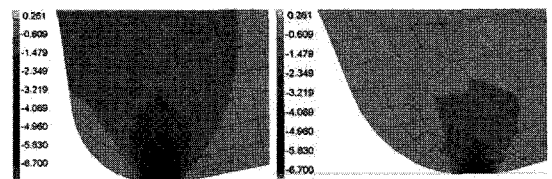


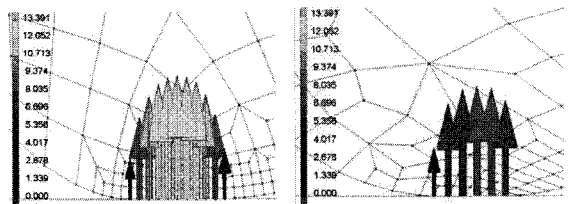
Fig. 10 Stress distribution (After relaxation)

는 높은 응력 값으로 인하여 상대적으로 값이 낮은 TPU 재료의 응력분포에 대한 변별력이 생기지 않아 금속보강재를 제거하고 출력하였다.

립 시일의 밀봉은 시일과 축과의 접촉압력에 의하여 발생하므로 이 부위의 최대접촉압력은 시일 성능의 지표로 볼 수 있다. Fig. 11, Fig. 12 는 응력완화 전 상태로 주 립과 보조 립의 축에 대한 최대 접촉압력과 수직 접촉력을 나타내고 있다. 보조립 보다는 주립에서 큰 압력과 접촉력을 보이는데 이것은 립의 두께와 길이 차이에 기인한 것으로 보인다. 주립에서 최대접촉압력은 5.686MPa, 보조 립에서는 4.27MPa 의 값을 보이고 있다. 수직 접촉력은 두 부분 모두 돔 형태의 접촉력 분포를 보이며 주립과 보조립이 누르는 힘의 합은 157.106N 이다.



(a) Main lip (5.686MPa) (b) Sub lip (4.270MPa)
Fig. 11 Max. contact pressure of lip (Before relaxation)



(a) Main lip(115.178 N) (b)Sub lip(41.928 N)
Fig. 12 Contact normal force of lip (Before relaxation)

Fig. 13, Fig. 14 는 응력완화 후 상태로 응력완화 전 상태와 전체적으로 최대 접촉압력과 접촉력의

분포는 유사하지만 각각 값의 차이를 보이는데 주립에서 최대접촉압력의 경우 3.9MPa, 보조립에서 2.897MPa 을 보인다. 그리고 축과 접촉력의 합은 108.41 N 이다.

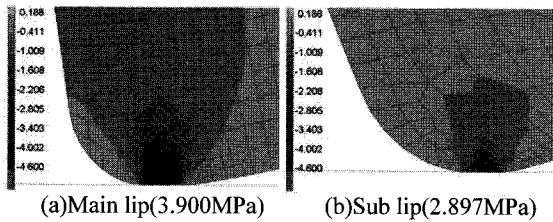


Fig. 13 Max. contact pressure of lip (After relaxation)

Table 4 에서 보듯이 최대 접촉압력과 수직 접촉력은 재료의 응력완화에 따라서 각각 31.4%(주립), 32.2%(보조립), 31 %의 감소율을 보인다.

Table 4 Comparison of maximum contact pressures and contact forces

Pressures and forces		Before relaxation	After relaxation	Relaxation rate (%)
Max. Contact pressures (MPa)	Main lip	5.686	3.900	31.4
	Sub lip	4.270	2.897	32.2
Contact normal forces(N)		157.106	108.410	31

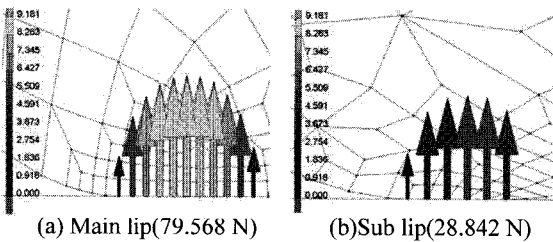


Fig. 14 Contact normal force of lip (After relaxation)

Fig. 15 는 축(shaft)에 작용한 주립과 보조 립의 반력(=수직 접촉력)을 축지름의 변화에 따라 나타낸 것으로 응력완화 전과 후의 접촉력을 비교한 것이다. x 축의 축경(shaft diameter) 79.2mm 부근에서 반력이 증가한 것은 강체(rigid body)로 설정된 축(shaft)이 Y 방향으로 이동하면서 간섭량이 0.8mm 인 주립이 1 차 접촉되어 힘이 증가하다가 간섭량이 0.3mm 인 보조립이 2 차 접촉되면서 이에 대한 영향이 반영된 것이다.

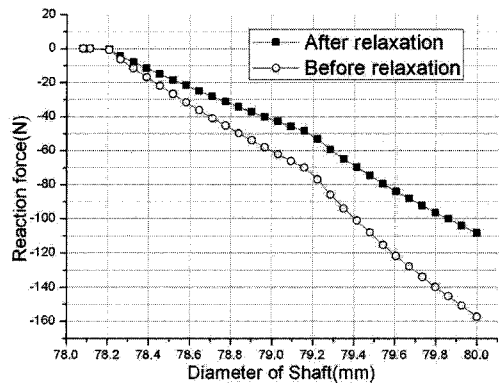


Fig. 15 Reaction forces of shaft

4. 결론

본 연구에서는 립 시일 재료인 TPU 에 대한 응력완화 시험을 하고 이를 바탕으로 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) TPU 재료는 변형 후 초기 500 초 이내에 급격한 응력완화를 보이며 이후 완만하고 직선적인 응력감소특성이 나타난다. 이런 특성은 변형률 수준에 관계없이 나타난다.
- 2) 재료의 응력완화는 시일의 밀봉 성능 지표인 시일과 축 사이의 최대 접촉압력을 감소시킨다.
- 3) 시일의 최대 접촉압력의 감소율은 재료의 응력 완화율 이상의 값이 된다.

따라서 재질의 응력완화 현상은 립 시일 설계 시 반드시 고려되어야 할 사항임을 확인하였다.

참고문헌

1. Muller, H. K. and Nau, B. S., "Fluid Sealing Technology, Principles and Application," Marcel Dekker, Inc., pp. 104-109, 1998.
2. Kim, W. D., Kim, W. S., Woo, C. S. and Lee, H. J., "Experimental Testing of Rubber Material for Finite Element Analysis," Proceedings of KSME Spring Conference, Vol. 1, No. 1, pp. 704-709, 2001.
3. Kim, W. D., Kim, W. S. and Kim, C. H., "Determination of Rubber Material Model and the Deformation Behaviors of Rubber Component Considering Mullins Effect," KIMM Research Report-UCN236-712.M, 1999.
4. Lee, K. O., Hur, Y. M., Kang, J. H. and Kang, S. S., "Performance estimation of dust wiper for hydraulic

- cylinders and optimization of geometric design variables,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187-188, pp. 215-219, 2007.
5. Nikas, G. K. and Sayles, R. S. “Nonlinear Elasticity of Rectangular Elastomeric Seals and Its Effect on Elastomer Hydrodynamic Numerical Analysis,” *Tribology International Journal*, Vol. 37, pp. 651-660, 2004.
 6. Mokhtar, M. O. A., Mohamed, M. A. A., El-Giddawy, M. E. and Yassaen, S. A. Y., “On the Effect of Misalignment on the Performance of U-type Lip Seal,” *Wear*, Vol. 223, No. 1-2, pp. 139-142, 1998.
 7. Gent, A. N., “Engineering with Rubber,” Oxford University Press, 1992.
 8. MSC. MARC, “Experiental Elastomer Analysis,” MSC. Software Corporation, 2005.
 9. Rivlin, R. S., “Large elastic deformations of isotropic materials IV: Further developments of the general theory,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 241, pp. 379-397, 1948.