

## 로터리 유니온용 립 시일의 거동 해석

유재찬 · 박태조\*

경상대학교 기계항공공학부, 공학연구원

### Analysis of a Lip Seal Behavior for Rotary Union

Jae-Chan Yoo and Tae-Jo Park†

Graduate School, Dept. of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University  
School of Mechanical & Aerospace Engineering, ERI, Gyeongsang National University

**Abstract** – Various type of rotary unions are widely used to provide fluids between rotating parts. To prevent fluid leakage, most of the rotary unions adopt mechanical seals which is highly reliable but too expensive and complicate. In this paper, a simple lip seal system made of PTFE is adopted in designing of a compact rotary union. Using MARC, the behavior characteristics of lip seal are investigated for seal mounting process, and obtained variations of contact pressure distribution and contact width with interferences and fluid pressures. The results showed that contact width are increased with interference and pressure. The maximum contact pressure are also increased up to a certain interference and pressure, however, then decreased. The numerical methods and results can be applied in designing and performance improvement of lip seal adopted rotary union, and further extensive studies are required.

**Key words** – rotary union, lip seal, PTFE, interference, finite element analysis.

#### 1. 서 론

제조회사나 사용형태에 따라서 로터리 커플링(Rotary coupling), 로터리 조인트(Rotary joint), 멀티포트 조인트(Multiport joint) 등으로도 호칭되는 로터리 유니온(Rotary union)은 고정배관으로부터 각종 기계장치의 회전부에 유체를 누설되지 않게 공급하거나 배출시키는 경우에 사용되는 회전관 이음장치이다. 특히, 반도체 제조장비나 화학플랜트 등에서는 회전부에 여러 종류의 공정용 가스나 화학물질이 서로 혼합되지 않게 공급하는 것이 아주 중요한 요구사항이다. 만일, 로터리 유니온에서 시일(Seal)의 결함으로 인하여 대상유체가 누설될 경우에는 이를 사용하는 장비에 치명적인 문제가 발생한다. 따라서, 유체의 누설방지에 적합한 시일의 설계와 이의 적용이 로터리 유니온의 성능을 결정하는 핵심적인 기술로 널리 인식되고 있다.

메카니컬 시일(Mechanical seal)[1]은 고압, 고온 및 고속의 넓은 적용조건에서도 높은 신뢰성과 함께 낮은 누설특성을 나타내는 등의 많은 장점을 가지고 있기 때문에 현재 거의 대부분의 로터리 유니온에서 채용되고 있다[2-4]. 하지만 실링(Sealing)면에 형성된 윤활막으로써 유체의 누설을 방지하기 때문에 별도의 윤활유 공급시스템을 설치해야 한다. 이 결과, 로터리 유니온은 구조가 복잡하고, 크기가 크게 될 뿐만 아니라 유지비용이 많이 소요되며, 윤활유가 대상유체에 침투되는 등의 많은 문제점이 발생하고 있다. 메카니컬 시일의 이러한 단점을 보완하기 위하여 대상유체가 물이나 오일에 비하여 상대적으로 저압이 요구되는 가스인 경우에는 O-링, U-컵 시일 등이 채용되기도 한다[5]. 하지만 이는 저압과 저속회전 조건인 경우에 한정되며, O-링의 경우에는 시일이 돌출(Extrusion)되는 등의 문제가 발생할 가능성이 높다.

한편, 윤활유 공급장치가 불필요하고, 선접촉 상태로 운전되어 손실동력이 아주 작고 염가일 뿐만 아니라

\*주저자 · 책임저자 : tjpark@gnu.ac.kr

PTFE(polytetrafluoroethylene)와 같은 새로운 시일 재료의 적용으로 1 MPa 이상의 높은 압력조건에서도 사용이 가능한 립 시일(Lip seal)에 대한 연구가 지난 10여년 동안에 집중적으로 수행되었다[6-12]. 특히, Salant & Flaherty[7]는 립 시일의 실링기구(Sealing mechanism)를 완전하게 규명하였으며, Kletschkowski 등[11]은 립 시일 재료인 PTFE의 상세한 비선형특성을 사용하여 축에 립 시일이 조립되는 과정에서의 비선형거동을 ANSYS를 사용하여 해석하였다. 이와 같이 립 시일에 대한 아주 많은 연구에도 불구하고 이를 적용한 로터리 유니온은 최근에 개발되어 현재 반도체 제조장비 등에 부분적으로 적용되고 있다[13]. 하지만 사용한 립 시일의 거동특성과 수명 등에 대한 이론 및 실험적인 연구결과는 아직까지 제시되지 않고 있는 실정이다. 따라서, 메카니컬 시일의 사용으로 발생하는 단점들을 해소할 수 있는 새로운 로터리 유니온을 개발하기 위해서는 립 시일의 조립과정에서 발생하는 간섭량(Interference)과 대상유체의 사용압력 등의 설계변수의 변화에 따른 시일의 변형거동에 대한 상세한 해석이 우선적으로 요구된다.

이에 본 논문에서는 고성능 로터리 유니온의 개발에 필요한 상세한 설계자료를 확립하기 위한 연구의 일환으로 립 시일의 조립과정과 운전조건에 따른 시일의 거동특성을 상세하게 조사하고자 한다. 이를 위하여 비선형문제 전용해석 프로그램인 MARC[14]를 사용하여 간섭량과 대상유체의 압력조건에 따른 시일의 변형형상, 접촉압력 및 접촉폭의 변화를 해석하였다.

## 2. 해석 방법

Fig. 1은 본 논문에서 조립과정과 운전시의 립 시일의 거동특성을 해석하고자 하는 로터리 유니온의 외부형상에 대한 모델링이고, Fig. 2는 이의 내부구조를 나타낸 그림이다. Fig. 2에 나타낸 4개의 립 시일 조합은 3개의 포트(Port)를 통하는 3종류의 유체가 서로 혼합되지 않게 한다. 이때, 사용한 시일은 설치공간이 가장 작게 요구되는 형태이므로 로터리 유니온을 콤팩트하게 설계할 수 있다[13].

Fig. 3에는 본 논문에서 거동해석에 사용한 립 시일에 대한 메쉬 형상과 적용한 경계조건을 나타내었다. 메쉬는 해석을 쉽게 하기 위하여 축대칭요소인 Quad 4 Full Integration 10을 이용하였으며, 경계조건으로는 시일이 조립되는 것을 표현할 축 부분을 강체(Rigid)로

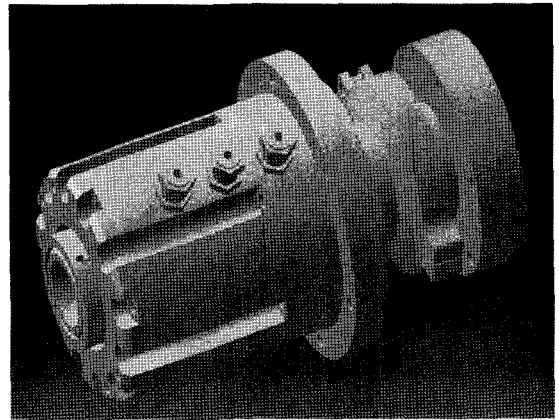


Fig. 1. A rotary union model used in analysis.

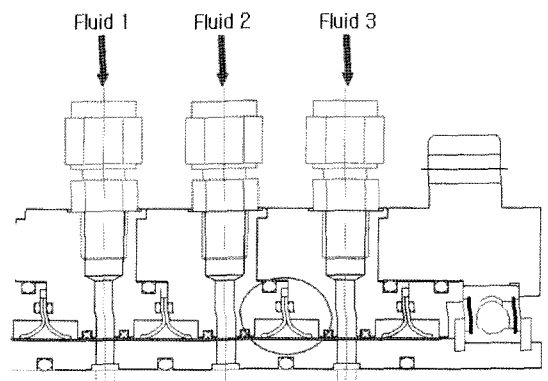


Fig. 2. Cross sectional view of 3-port rotary union.

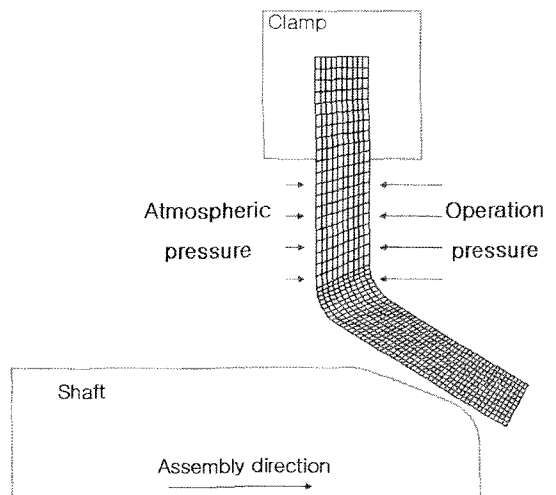


Fig. 3. Mesh and boundary conditions used.

가정하여 변위를 주었고, 시일의 상부에서는 x, y방향으로의 변위를 고정시켰다. 이때, 실제로 조립된 시일

**Table 1. Material properties of PTFE seal.**

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| Elastic modulus, MPa       | 460   |
| Poisson ratio              | 0.46  |
| Density, kg/m <sup>3</sup> | 2,160 |

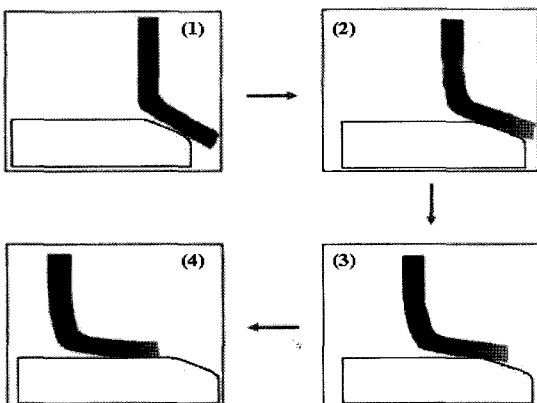
의 경우에 대한 해석결과를 구하기 위하여 시일과 축은 접촉상태로 정의하고 마찰계수는 0.1로 하였다. MARC를 사용한 해석의 정확성과 수렴성을 향상시키기 위하여 립 영역에는 메쉬를 조밀하게 배치하고, Time Table을 사용하여 변위와 압력을 정의하였다[14].

본 논문에서는 다음과 같은 순서로 립 시일의 변형 거동을 해석하였다. 먼저 간섭량을 0~1.5 mm까지 0.1 mm씩 순차적으로 변화시킨 다음 각각의 변형된 형상에 대하여 유체압력을 1.5 MPa까지 0.5 MPa씩 증가시키면서 해석하였다. 이때, 축의 직경은 40 mm이다. 이러한 크기의 간섭량과 유체압력의 범위는 실제 반도체 제조장비용으로 사용되고 있는 로터리 유니온에서의 조립 및 운전 조건과 거의 유사하다.

Table 1에는 본 논문에서 사용한 립 시일 재료인 PTFE에 대한 주요물성치를 나타내었으며, 이를 사용하여 간섭량과 유체압력의 변화에 따른 탄성해석을 수행하였다. 참고로 보다 정확한 시일의 거동을 예측하기 위해서는 PTFE에 대한 Mooney-Rivlin 모델[9] 등을 사용한 비선형해석이 요구된다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 립 시일을 축에 조립하는 과정을 순서대로 나타낸 그림으로 축의 외경이 시일의 내경보다 크기 때문에 억지끼워맞춤 형태로 조립된다. 이때, 축의 외경

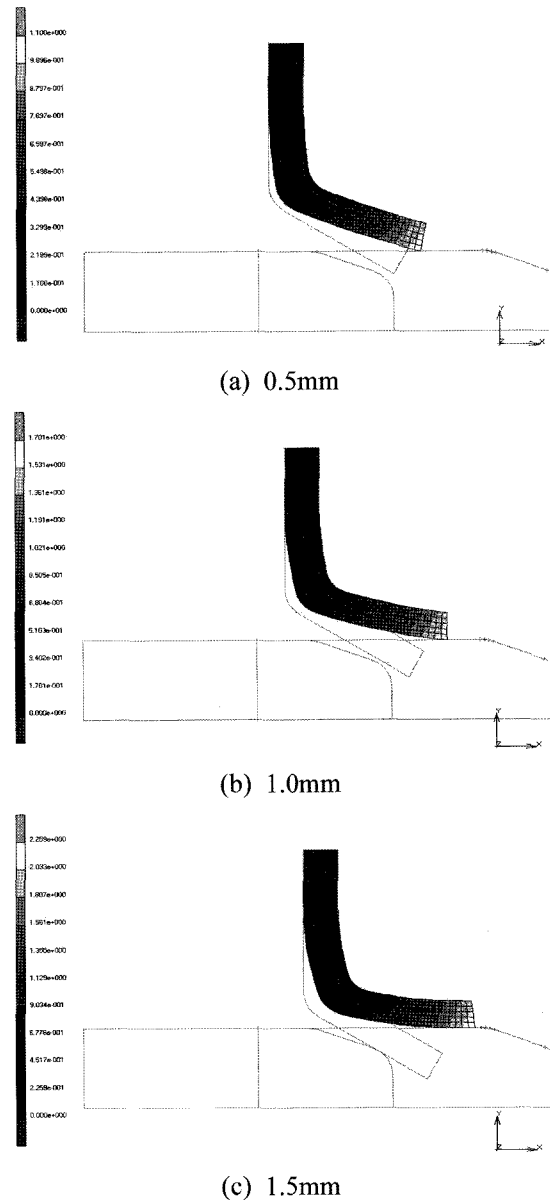


**Fig. 4. Mounting process of a PTFE shaft seal.**

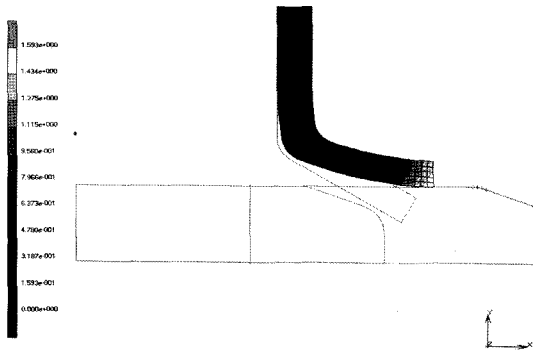
과 조립전 시일 내경과의 차이가 간섭량으로 정의된다.

Fig. 5는 축에 립 시일이 완전하게 조립된 경우, 간섭량에 따른 시일의 변형된 형상을 조립직전의 형상과 겹쳐서 나타낸 그림이다. 이 결과, 간섭량이 작을 경우에는 립의 끝부분만 축과 접촉하지만 간섭량이 커지면 시일은 크게 변형되어 시일의 옆면과 접촉하게 되어 접촉면적은 급격하게 증가한다.

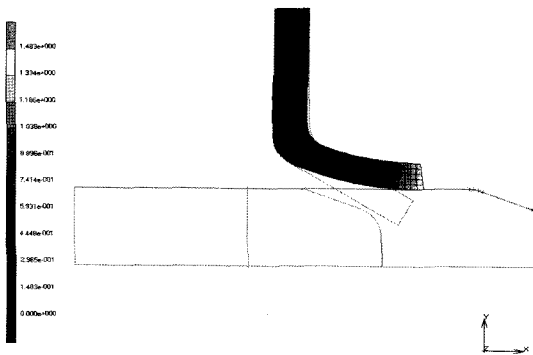
한편, 실제의 유체공급에 사용되는 로터리 유니온에



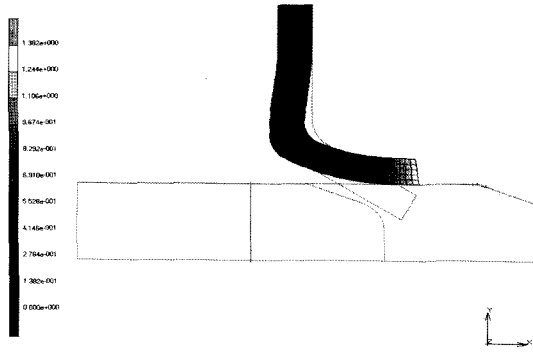
**Fig. 5. Lip seal displacement with interference.**



(a) 0.5MPa



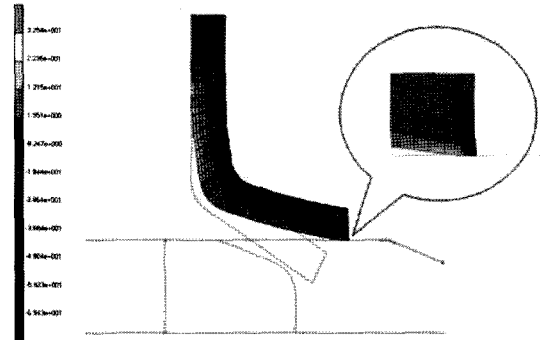
(b) 1.0MPa



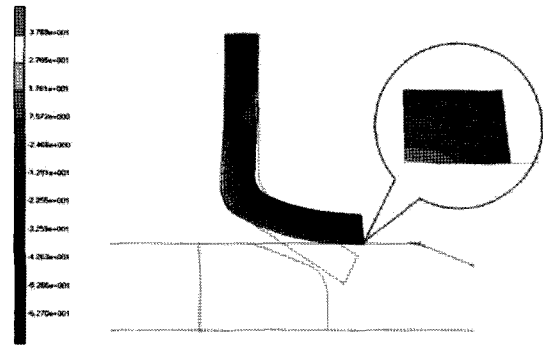
(c) 1.5MPa

Fig. 6. Lip seal displacement with fluid pressure.

서는 이와 같이 조립과정에서 변형된 시일 형상에 유체압력이 추가적으로 작용하게 된다. Fig. 6은 간섭량이 1.0 mm인 시일(Fig. 5(b))에 유체압력이 작용하는 경우에 대한 시일의 변형된 형상을 나타낸 결과이다. 고압일수록 시일은 압력이 작용하는 반대방향으로 밀리면서 접촉면적도 증가하고 있다. Fig. 7(a)는 1.0 mm의 간섭량으로 조립된 경우, (b)는 (a)의 결과에 1.5 MPa의 유체압력이 추가적으로 작용하는 경우에 대



(a) Interference only(1.0 mm)



(b) Interference(1.0 mm)+Pressure(1.5 MPa)

Fig. 7. Stress distribution.

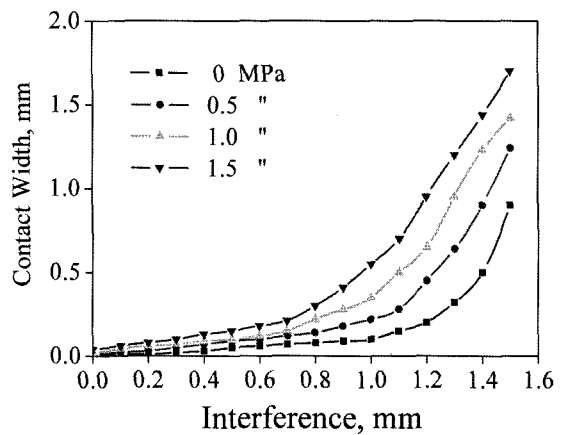


Fig. 8. Variation of contact width with interference.

한 응력분포를 국부적으로 확대한 그림과 함께 나타낸 결과이다. 최대압축응력은 단순조립상태인 시일에서는 립의 끝부분에서 발생하지만 여기에 압력이 추가로 작용할 경우에는 시일의 굽혀진 부분에서 발생하고 있다. 이는 압력의 작용으로 립 시일이 변형되면 축과의 접촉면적이 증가하고 이로 인하여 접촉압력은 감소하는

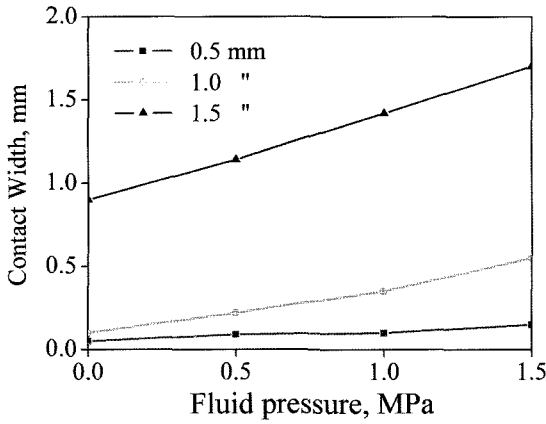


Fig. 9. Variation of contact width with fluid pressure.

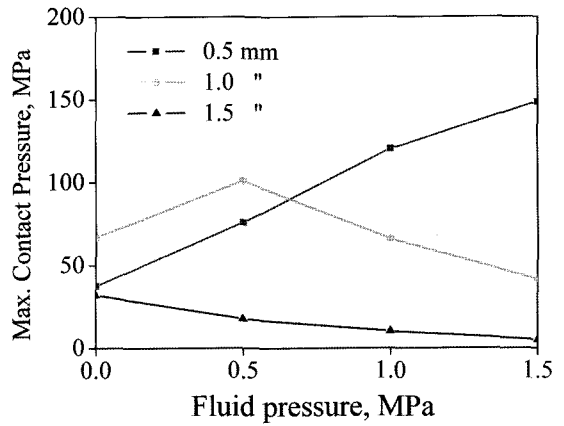


Fig. 11. Variation of maximum contact pressure with fluid pressure.

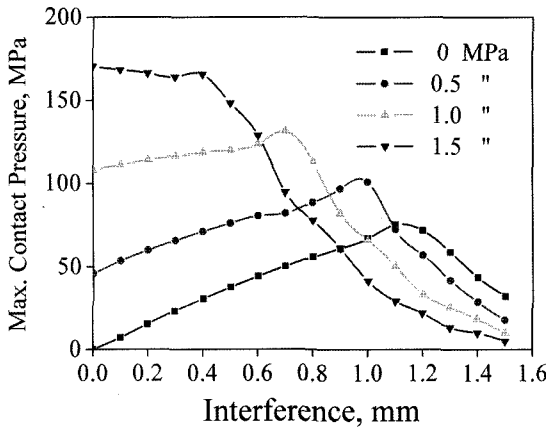


Fig. 10. Variation of maximum contact pressure with interference.

반면에 굽혀진 부분에서는 굽힘응력이 증가하기 때문인 것으로 추정된다. 참고로 최대압축응력이 발생하는 위치는 서로 확연하게 다르지만 이의 크기는 대략적으로 비슷하였다.

Fig. 8과 Fig. 9에는 간섭량과 유체압력에 따른 시일 접촉폭의 변화를 각각 나타내었다. 앞의 Fig. 5와 Fig. 6에서 고찰한 결과와 같이 간섭량이 커질수록 시일의 옆면이 축과 접촉하게 되므로 접촉폭(접촉면적)은 증가하며, 유체압력은 이의 크기를 더욱 크게 하였다. 본 논문에서 사용한 시일에서는 간섭량이 1.2 mm 이상인 경우에는 작용압력의 크기에 관계없이 접촉면적이 급격하게 증가하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 간섭량과 유체압력의 변화에 따른 시일 접촉면에서 발생하는 최대접촉압력의 변화를 각각 나타낸 그림이다. 이 결과, 간섭량이 작을 경

우에는 Fig. 5(a)에 나타낸 것과 같이 립 시일의 끝부분만 접촉되고 여기에 유체압력이 추가로 작용하면 접촉압력은 급격하게 증가한다. 하지만 간섭량의 증가에 따라서 접촉압력이 최대치에 도달한 이후에 감소하는 것은 립 시일의 접촉상태가 선접촉에서 면접촉으로 바뀌는 것을 의미한다. 또한, 간섭량과 유체압력에 따라서 최대접촉압력의 크기는 크게 달라지고 있다. 한편, 간섭량이 1.2 mm 이상일 경우에는 유체압력의 증가에도 불구하고 최대접촉압력이 감소할 것으로 예상되며 이는 유체압력으로 인하여 시일에 작용하는 하중증가보다는 접촉면적의 증가가 더욱 크기 때문인 것으로 생각된다.

이상의 결과에서 제시한 것과 같이 조립과정에서의 변형거동과 간섭량, 작용압력의 변화에 따른 접촉폭과 최대접촉압력에 대한 결과는 립 시일을 적용한 로터리 유니온의 설계와 성능향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대되며, 본 논문에서는 이에 필요한 설계자료를 제시하였다. 보다 정확한 시일의 거동을 구하기 위해서는 PTFE에 대한 Mooney-Rivlin 모델 등을 사용한 비선형해석이 요구된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 메카니컬 시일을 사용하는 기존의 로터리 유니온에서 발생하는 제반문제를 개선하기 위한 연구의 일환으로 PTFE 소재의 가장 단순한 형상의 립 시일을 새롭게 적용하였으며, 비선형문제 해석전용 프로그램인 MARC를 사용하여 조립과정과 함께 간섭량

과 대상유체의 압력조건에 따른 립 시일의 거동을 상세하게 조사하였다. 이 결과, 간섭량이 작고 유체압력이 낮을 경우에는 립의 끝부분만 접촉하지만 간섭량이 크거나 고압이 될수록 시일 옆면이 축과 접촉하게 되어 접촉면적은 증가하였다. 특히, 간섭량과 유체압력에 따라서 최대접촉압력이 어느 한도까지는 증가하다가 감소하는 것은 시일의 접촉상태가 선접촉에서 면접촉으로 바뀌기 때문이었다. 따라서, 본 논문에서 제시한 해석 방법과 결과는 립 시일을 사용하는 로터리 유니온의 설계와 성능향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대되며, 다양한 형상의 립 시일과 시일 재료인 PTFE의 비선형특성을 고려한 추가적인 연구가 요구된다.

## 후 기

이 논문은 2단계 BK21사업과 2006년도 경상대학교 연구년제연구과제에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- Müller, H. K. and Nau, B. S., Fluid Sealing Technology : Principles and Applications, Marcel Dekker, 1998.
- Yokota, H., Ishiyama, M., Ishikawa, Y., Aoyama, T. and Miwa, Y., "Development of High Speed Side-through Rotary Union for the Transfer of Coolant," *Trans. JSME(C)*, Vol. 60, pp. 2938-2945, 1994.
- GAT, "Rotary Joint for Alternating Media," U. S. Patent No. 6,406,065, 2002.
- Nippon Pillar Packing Co., "Rotary Joint," U. S. Patent No. 6,412,822, 2002.
- Focal Technologies Corporation, "Fluid Rotary Union," U. S. Patent No. 7,083,200, 2006.
- Institution of Mechanical Engineers, "Dynamic Sealing of Fluids. I : Guide to Selection of Rotary Seals," ESDU 80012, 2002.
- Salant, R. F. and Flaherty, A. L., "Elastohydrodynamic Analysis of Reverse Pumping in Rotary Lip Seals with Microasperities," *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 117, pp. 53-59, 1995.
- Kim, C. K. and Shim, W. J., "Analysis of Contact Force and Thermal Behaviour of Lip Seals," *Tribology International*, Vol. 30, No. 2, pp. 113-119, 1996.
- Valenta, L. and Molnar, L., "Vergleich des Neo-Hooke'schen und des Mooney-Rivlin'schen Materialmodells in der FEM-Berechnung," *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, Vol. 45, No. 1, pp. 95-101, 2001.
- Rocke, A. H. and R. F. Salant, "Elastohydrodynamic Analysis of a Rotary Lip Seal Using Flow Factors," *Tribology Trans.*, Vol. 48, pp. 308-316, 2005.
- Kletschkowski, T., Schomburg, U. and Bertram, A., "Computational Analysis of PTFE Shaft Seals," *Computational Material Science*, Vol. 32, pp. 392-399, 2005.
- Lee, C. Y., Lin, C. S., Jian, R. Q. and Wen, C. Y., "Simulation and Experimentation on the Contact Width and Pressure Distribution of Lip Seals," *Tribology International*, Vol. 39, pp. 915-920, 2006.
- 신원기계부품(주), "로터리 유니온," 대한민국특허 10-0418278, 2004.
- MSC. MARC/MENTAT, "2005r2 User's Guide," Vol. A-E, 2005.