고성능 터보기계의 환상 비접촉 실

하 태 웅*
(경원대학교 건축설비 · 기계공학부)

1. 머리말

고속, 고압축 터보기계의 실링 시스템은 회전기계의 구조적 특성상 회전체와 회전기계의 하우징 사이에 형성된 틈새부분을 이루고 있는 기계요소로써 회전기계의 로터를 따라서 환상 비접촉 실(annular type 실)들이 산재해 있다. 환상 비접촉 실 시스템의 첫 번째 기능은 밀봉(leakage)특성으로 회전기계의 효율향상에 있으며, 두 번째 기능은 실링 시스템을 통한 불안정화 유체력에 의한 시스템의 진동특성 향상으로 적절한 실링 시스템의 설계를 통한 고속회전 기계의 안정성(stability) 향상에 있다. 특히 고속, 고압축 터보 기계의 경우, 회전체 시스템의 진동문제가 매우 중요한 설계요건이 되며 환상 비접촉 실을 통해서 진동감쇠(damping)를 부가함으로써 시스템의 진동특성을 향상시킬 수 있으며, 누설량 제어와 더불어 터보 기계의 고성능화 및 고신뢰도화를 이룰 수 있다. 고성능(고속, 고압축) 터보기계의 환상 비접촉 실 시스템의 design target은 실 틈새를 통한 누설량의 최소화, 실 틈새를 흐르는 작동유체에 의한 불안정화 유체력인 연성강성계수(k)의 최소화 및 안정화 유체력인 감쇠계수(C)의 최대화에 있다. 이에 따라 현재 외국의 유수한 펌프 및 압축기의 마모 실(wear-ring seal 또는 shaft seal), 중간단 실(interstage seal 또는 eye packing seal), 밸런스 피스톤(balance piston 또는 balance drum)등에는 작동 조건 및 로터-하우징의 형상에 따라서 다양한 환상 비접촉 실이 개발되어 적용되고 있다. 가장 단순한 형태인 평 실(plain seal)로부터 홈 실(grooved seal), 래버린스 실(labyrinth seal), 댐퍼 실(damper seal), 허니콤 실(honeycomb seal)등이 많이 사용되고 있으며, 그 밖에도 후로팅 링 실(floating-ring seal), 브러시 실(brush seal)등이 터보 기계의 특성에 따라 누설량을 줄이기 위하여 또는 불안정 진동 문제를 해소하기 위하여 사용되고 있다.

본 글에서는 다양한 환상 비접촉 실에 대한 개요와 국내외 기술 동향 및 연구를 소개함으로써, 고성능 터보기계의 독자적 개발에 필요한 핵심기술중 하나인 실링 기술에 대한 관심과 자료를 제공하고자 한다.

* 편 학회 편집위원
E-mail : twha@mail.kyungwon.ac.kr

2. 환상 비접촉 실의 개요

2.1 비압축성(펌프) 터보기계의 환상 비접촉 실

고성능 펌프의 비접촉 환상 실은 임펠러의 출구에서 임펠러의 입구 부로 임펠러의 전면을 따라 역류하는 유량을 제어하는 마모 실, 다단 펌프의 경우 임펠러 각 단 사이에서 축을 따라 역류하는 유량을 제어하는 중간단 실, 및 마지막 단 출구로부터 임펠러 후면을 따라 펌프 입구로 역류하는 유량을 제어하는 밸런스 피스톤이 있으며, 펌프의 축을 따라 여러 위치에 산재해있다. 이 실들은 펌프의 효율을 향상시키기 위하여 역유량을 최소화할 필요가 있어 틈새 간극을 최소화(후로팅 링 실)하거나, 인위적으로 실 표면에 여러 모양의 요철을 형성시켜(댐퍼 실) 실 틈새의 흐름에 저항을 증가시키거나 , 또는 실 틈새의 유로를 미로(홈 실)로 만드는 등 다양한 설계가 적용되고 있다.

(1) 홈 실

펌프에서 보편적으로 많이 사용되는 실로 홈(groove)이 로터 축에 평행하게 나있는 parallel type(그림 1)과 축에 어긋난 각도로 나있는 spiral type(그림 2)이 있다. 로터 부나 또는 스테이터 부에 홈을 새기며 홈의 깊이, 너비, 모양에 따라서 다양한 특성을 나타낸다. 매끈한 표면을 갖는 평 실에 비하여 밀봉특성이 우수한 장점이 있으나, 홈을 따른 원주방향 유속의 발달에 기인된 불안정화 유체력이 커질 수 있으며, 실 입구에 원주방향성분의 유속을 줄이기 위한 swirl breaker를 사용함으로써 안정성을 향상시킬 수 있다. 특히, spiral type grooved seal은 로터의 회전에 따라서 유체를 압력 차에 의한 누설 흐름의 반대방향으로 밀어 올려 누설량을 최소화 할 수 있는 이점이 있어 많이 사용되고 있다.

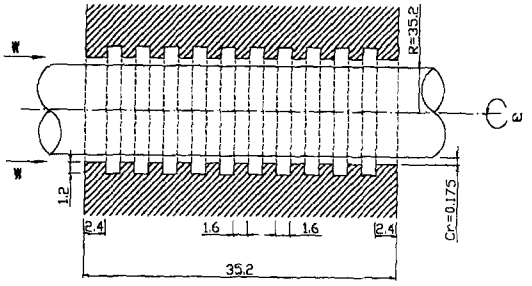

그림 1 Parallel grooved seal

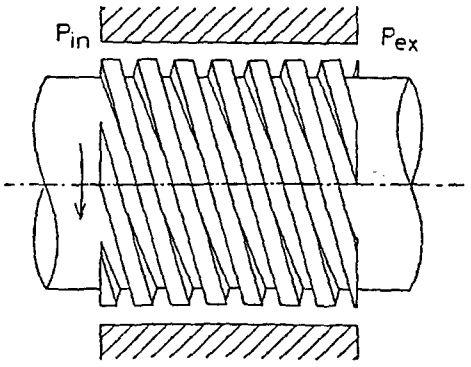

그림 2 Spiral type grooved seal

(2) 댐퍼 실

댐퍼 실은 실 표면에 구멍이나 여러 가지 모양을 새겨 넣어 인위적으로 표면 거칠기를 증가시킨 것으로, 누설량을 감소시킬 수 있으며 또한 감쇠력(damping force)이 크게 증가하여 펌프 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있다. 그림 3은 삼각형 모양의 문양이 실 표면에 새겨진 댐퍼 실을 보여주고 있으며, 실 표면에 새겨진 형상 및 크기에 따라서

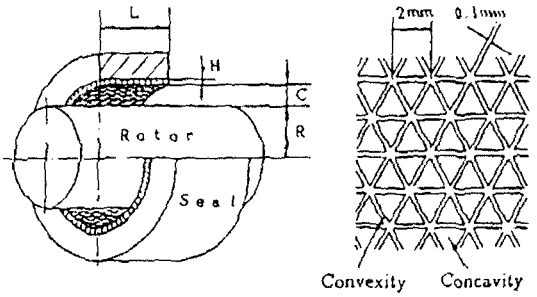

그림 3 댐퍼 실

다양한 특성을 나타낸다.

(3) 후로팅 링 실

후로팅 링 실(그림 4)은 rubbing 현상이 발생하지 않으며 실의 간극을 최소화 할 수 있어 누설량을 제어하는데 큰 장점이 있다. 또한 우수한 안정성을 갖음으로 터보펌프에

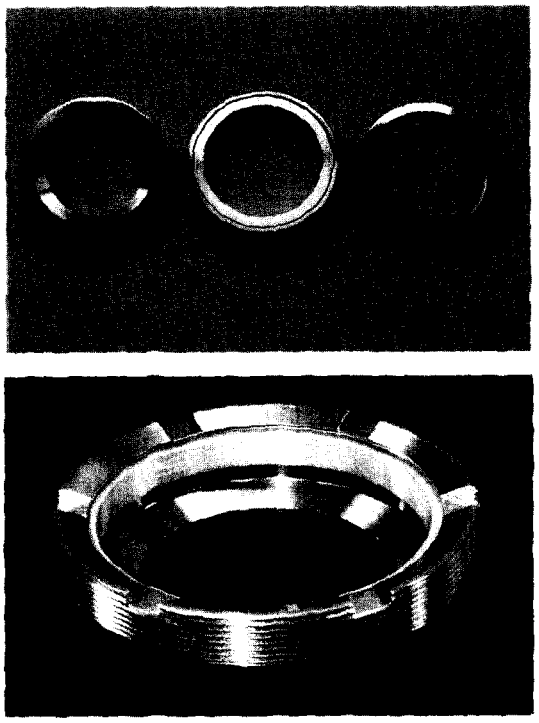

그림 4 후로팅 링 실

널리 적용되고 있다.

2.2 압축성(압축기) 터보기계의 환상 비접촉 실

고성능 압축기의 비접촉 환상 실은 임펠러의 출구에서 임펠러의 입구 부로 임펠러의 전면을 따라 역류하는 유량을 제어하는 중간단 실(eye packing seal), 다단 압축기의 경우 임펠러 각 단 사이에서 축을 따라 역류하는 유량을 제어하는 마모 실(shaft seal), 및 마지막 단 출구로부터 임펠러 후면을 따라 압축기 입구로 역류하는 유량을 제어하는 밸런스 드럼(balance drum)이 있으며, 압축기의 축을 따라 여러 위치에 산재해있다. 이 실들은 압축기의 효율을 향상시키기 위하여 역유량을 최소화할 필요가 있어 다양한 설계가 적용되고 있다.

(1) 래버린스 실

압축기나 터빈의 실링 시스템에는 보편적으로 여러 가지 형태의 래버린스 실이 사용되고 있는데, 그 형태로는 관통형(see-through)(그림 5), 계단형(stepped)(그림 6), 엇갈린형(staggered)(그림 7) 등이 있으며 래버린스 이(teeth)의 모양, 이의 피치(pitch), 이의 깊이(depth)등에 따라서 다양한 특성을 나타낸다. 매끈한 표면을 갖는 평실에 비하여 밀봉특성이 우수한 장점이 있으나, 래버린스 실을 통한 불안정화 유체력이 커질 수 있어 실 입구에 원주방향성분의 유속을 줄이기 위한 swirl breaker를 사용함으로써 안정성을 향상시킬 수 있다. 래버린스 이(labyrinth teeth)는 로터 또는 스테이터에 설치되는데, 일반적으로 터빈에서는 래버린스 이가 로터(회전부)에 있는 teeth-on-rotor 래버린스 실이 사용되며, 압축기

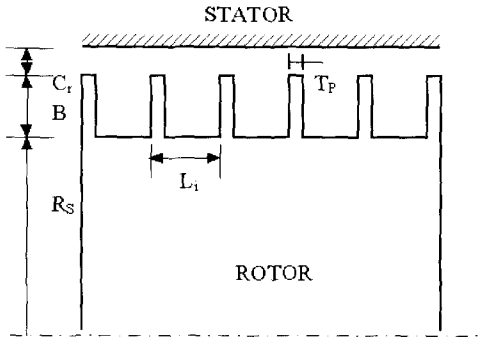

그림 5 관통형 래버린스 실

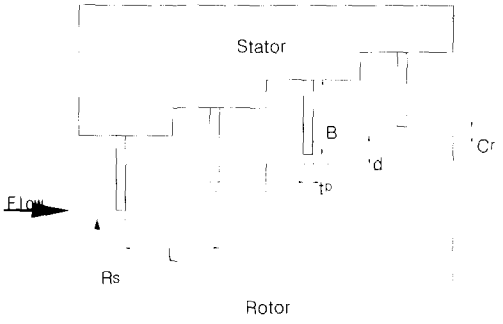

그림 6 계단형 래버린스 실

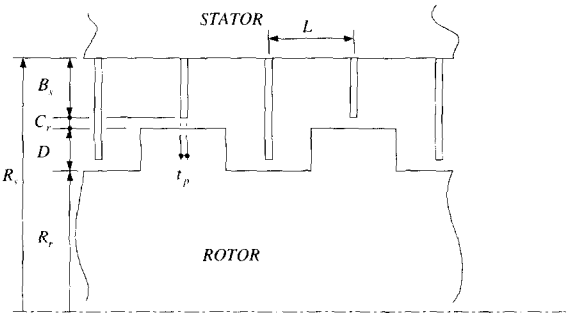

그림 7 엇갈린 형 래버린스 실

에서는 래버린스 이가 스테이터(비회전부)에 있는 teeth-on-stator 래버린스 실이 사용된다.

(2) 허니콤 실

벌집모양의 육각형 셀이 연속된 허니콤 구조물을 실의 표면에 부착한 허니콤 실(그림 8)은 SSME(space shuttle main engine)의 고압 연료 터보 펌프(HTOTP : high pressure oxygen turbo pump)의 중간단 실(interstage seal)에 사용되어 우수한 밀봉특성과 안정성 향상이 입증된 바 있어, 압축기 및 터빈에 많이 활용되고 있다. 육각형 셀의 너비 및 깊이에 따라 다양한 특성을 나타낸다.

(3) 브러시 실

래버린스 실이나 허니콤 실보다 더 밀봉특성이 뛰어난 브러시 실(그림 9)은 미세한

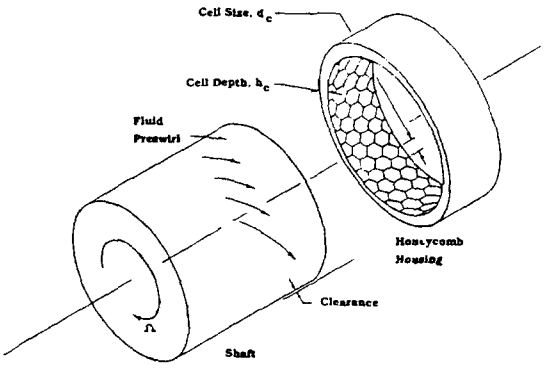

그림 8 허니콤 실

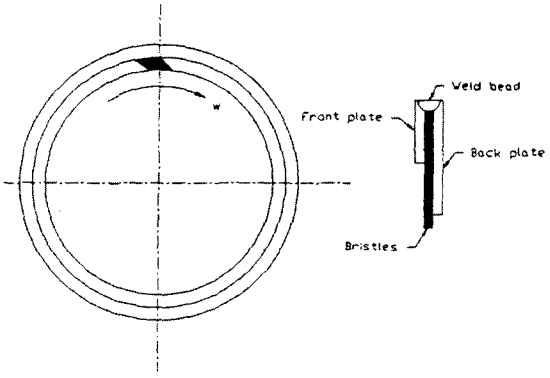

그림 9 브러시 실

wire bristle을 가진 static ring으로 구성되어 있고 회전축과 계속적으로 접촉을 가지므로 마찰 부위(로터 표면)는 세라믹으로 코팅되어 있다.

2.3 환상 비접촉 실의 이론적 해석기술

실링 시스템의 틈새유량 예측 및 유체력 해석기술은 윤활이론에 근거한 bulk flow model을 사용한 해석방법과 수치해석기법(CFD)을 사용한 실 틈새의 난류유동 해석방법이 있다. Bulk flow model을 사용한 방법은 비교적 해석이 단순하나 복잡한 형상의 경우 수치해석이나 실험결과의 정보가 필요하다. 최근 이산화(discretization), 수치알고리즘(numerical algorithm), 물리학적 모델(physical modeling)과 컴퓨터의 발전을 통해 큰 진보가 이루어진 전산유체역학(CFD)은 그 적용 범위가 넓어져 터빈의 실 내부에서의 유동을 포함하는 이차 유동(secondary flow)의 보다 정확한 해석에 적용될 수 있으며 bulk flow model을 사용한 해석방법에 정보를 제공함으로써 실링 시스템의 이론적 해석에 중요한 방법이다. Seal test rig는 다양한 설계변수에 대한 실의 정특성(leakage) 및 동특성계수(rotordynamic coefficients)의 측정을 통하여 앞에서 설명한 이론적 해석 방법의 개선과 최적한 실의 형상 및 표면형상의 연구에 매우 필요하다.

3. 환상 비접촉 실의 국외 및 국내 연구 개발 동향

터보 기계에 비교적 많이 적용되고 있는 환상 비접촉 실에 대한 국외 및 국내의 연구개발 실적을 표 1에 요약했다. 고성능 터보 기계에 많이 사용되고 있는 홈 실, 래버린스 실, 댐퍼 실, 허니콤 실 등에 대하여 국외에서는 활발한 연구가 진행되고 있으나 국내에서는 극히 일부에서만 진행되고 있는 실정이다.

일반적으로 고성능의 터보기계에 사용되는 환상 비접촉 실은 상품화되어 제작업체에 의해 판매되는 것이 아니므로 국제적으로 유명한 펌프제작사(KSB, Sulzer, Mitsubishi, 등)및 압축기(compressor) 제작사(Elliot, Atlas copco, IHI, Ingorsol Rand, 등)들이 자사 제품에 채용된 실링 시스템에 대한 연구를 활발히 진행해 왔으며 석유화학관련 대형 플랜트와 열동력 플랜트의 사용자그룹의 유지보수(maintenance)와 관련된 연구, 미국 유럽 일본의 대학들(Texas A&M, Virginia Tech., Kaiserslautern, Kobe 등)에서 비교적 활발히 진행되어져 왔다. 특히, 기술선진국들은 매년 International Pump Users Symposium과 Turbomachinery Symposium을 통하여 고성능 유체기계의 hydraulic design(impeller design, efficiency 등), mechanical design (casing, bearing, seal, lubrication, balancing, vibration), maintenance등 고성능 유체기계 전반에 걸쳐서 문제점을 해결하고자 활발히 연구를 진행하고 있으며 그 중에서도 핵심요소 기술로써 실링 시스템에 관련된 연구를 지속하고 있다.

환상 비접촉 실 시스템에 관한 국내의 연구는 활발히 이루어지지는 않았지만 몇 명의 국내 연구자에 의하여 지속적인 이론적 연구가 이루어졌다. 표 1에 나타낸 것처럼 고성능 펌프에 적용되고 있는 parallel type grooved seal(그림 1 참조)의 경우 국제적

표 1 환상 비접촉 seal의 연구 개발 실적

Seal type		주요적용대상	연구 개발 실적	
			국 외	국 내
Grooved	Parallel type	Pump	Childs et al.[1] Florjancic [2] Iwatsubo and sheng[3] 외 다수	Yang[19] Kim[1] Ha et al.[14]
	Spiral type		Kanki and Kawakami[4] Iwatsubo et al[5] Kim and Childs[6] 외 다수	Kim[6] Yang[19]
Labyrinth	See-through	Compressor/Turbine	Iwatsubo et al.[7] Childs and Scharrer[8] 외 다수	Ha et al.[15]
	Stepped	Compressor/Steam turbine	Scharrer[19]	Ha[16][17]
	Staggered	Compressor/Steam turbine		
Damper		Pump	Childs et al.[10] Iwatsubo and Sheng[11] 외 다수	Kim[10]
Honeycomb		Turbo-pump/ Compressor/ Steam turbine	Childs et al[12] Ha and Childs[13] 외 다수	Ha et al.[18]
Floating-ring		Turbo pump		Ha et al.[20]

으로 가장 개선된 해석법인 three-control-volume 해석을 기초로 한 해석 코드가 개발되었고,[14] 압축기 및 터빈에 적용되는 래버린스 실의 경우 유로의 형상 및 특성에 따라서 see-through type labyrinth seal(그림 5 참조), stepped type labyrinth seal(그림 6참조), 및 staggered type labyrinth seal(그림 7 참조)이 사용되는데, see-through type labyrinth seal의 경우 국제적으로 최근 발표된 two-control volume 해석을 기초로 한 해석 코드가 이미 개발되었으며,[15] stepped type labyrinth seal의 경우도 국제적으로 최근 발표된 one-control volume 해석을 기초로 한 해석 코드가 이미 개발되었다.[16] 래버린스 실 중 제작 및 설치는 어렵지만 가장 누설을 줄일 수 있는 staggered type labyrinth seal의 경우는 국외나 국내에서 이렇다할 연구 결과가 발표되지 못한 실정이나 현재 one-control volume 해석을 기초로 한 해석 코드가 국내에서 개발 중에 있다. 허니콤 실의 경우도 현재 국제적 수준의 이론적 해석 코드[17]를 보유하고 있으며, 최근 후로팅 링 실의 해석 코드[20]도 개발된 바 있다.

4. 맺음말

고성능 펌프, 압축기, 가스 및 증기 터빈 등은 국가 기간산업의 기본설비로써 현재 저급의 이들 터보기계를 생산할 수 있는 우

리의 실정을 감안할 때 환상 비접촉 실 기술은 고성능 터보기계 개발에 필요한 다른 핵심기술의 발전과 더불어 국내업계가 고성능 터보기계를 독자적으로 설계, 제작할 수 있는 기술을 확보하고 운전 중 발생되는 진동과 관련된 안정성 문제를 해결하는데 크게 기여할 것으로 사료된다. 터보기계의 유지보수나 국내 독자적 개발시 위에서 열거한 다양한 환상 비접촉 실에 대한 해석 기술을 모두 갖추고 있어야 대상 기계의 특성에 맞는 최적 환상 비접촉 실을 선정하고 설계할 수 있다. 다행히 환상 비접촉 실 시스템에 관한 국내의 연구는 앞에서 설명한 것처럼 활발히 이루어지지는 않았지만 몇 명의 국내 연구자에 의하여 비교적 많은 이론적 연구가 이루어졌다. 차후 실험적 연구 기반이 확보되고, 실험적 접근에 의하여 보완된다면 이 분야의 기술은 국제적인 수준에 접근할 수 있다고 사료된다. 본 글에서는 다양한 환상 비접촉 실에 대한 개요와 국내외 기술 동향 및 연구를 소개함으로써, 고성능 터보기계의 독자적 개발에 필요한 핵심기술중 하나인 실링 기술에 대한 관심과 자료를 제공하고자 하였다.

참고문헌

(1) Childs, D. W., and Kim, C. H., 1986, "Testing for Rotordynamic Coefficients and Leakage : Circumferentially-Grooved Turbulent Annular Seals," in Proceedings of the Second IFToMM International Conference on Rotordynamics, Tokyo, Japan, pp. 609 ~ 618.

(2) Florjancic, S., 1990, "Annular Seals of High Energy Centrifugal Pumps : A New Theory and Full Scale Measurement of Rotordynamic Coefficients and Hydraulic Friction Factors," Ph. D. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.

(3) Iwatsubo, T., and Sheng, B., 1990, "Evaluation of Dynamic Characteristics of Parallel Grooved Seals by Theory and Experiment," in Proceedings of the Third IFToMM International Conference on Rotordynamics, Lyon, France, pp. 313 ~ 318.

(4) Kanki, H., and Kawakami, T., 1987, "Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Screw Grooved Seals," Rotating Machinery Volume 1, ASME DE-Vol. 2, pp. 273 ~ 278.

(5) Iwatsubo, T., Sheng, B., and Ono, M., 1990, "Experiment of Static and Dynamic Characteristics of Spiral Grooved Seals," Rotordynamic Instability Problems in High-Performance Turbomachinery, NASA CP No. 3122, Proceedings of a workshop held at Texas A&M University, pp. 223 ~ 234.

(6) Kim, C. H., and Childs, D. W., 1987, "Analysis for Rotordynamic Coefficients of Helically-Grooved Turbulent Annular Seals", ASME Journal of Tribology, Vol. 109(1), pp. 136 ~ 143.

(7) Iwatsubo, T., 1980, "Evaluation of Instability Forces of Labyrinth Seals in Turbines or Compressors," NASA CP 2133 Proceedings of a workshop at

Texas A&M University, pp. 139~167.

(8) Childs, D.W., and Scharrer, J.K., 1986, "An Iwatsubo Based Solution for Labyrinth Seals : A Comparison to Experimental Results," ASME Trans. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, April Vol. 108, pp. 325~331.

(9) Scharrer, J.K., 1988, "Rotordynamic Coefficients for Stepped Labyrinth Gas Seals," ASME/ASLE Tribology Conference, Paper No. 88-Trib-42.

(10) Childs, D., and Kim, C. H., 1986, "Test Results for Round-Hole-Pattern Damper Seals : Optimum Configurations and Dimensions for Maximum Net Damping," Journal of Tribology, 108, pp. 605~611.

(11) Iwatsubo, T., and Sheng, B., 1990, "An Experimental Study on the Static and Dynamic Characteristics of Damper Seals," in Proceedings of the Third IFToMM International Conference on Rotordynamics, Lyon, France, pp. 307~312.

(12) Childs, D., Elrod, D., and Hale, K. 1989, "Annular Honeycomb Seals : Test Results for Leakage and Rotordynamic Coefficients;Comparisons to Labyrinth and Smooth Configurations," Journal of Tribology, 111, pp. 293~301.

(13) Ha, T. W. and Childs, D. W., 1994, "Annular Honeycomb Stator Turbulent Gas Seal Analysis Using A New Friction-Factor Model Based On Flat Plate Tests", ASME Journal of Tribology, Vol. 116, pp. 352~360.

(14) Ha, T. W. and Lee, A. S., 2000, "A Rotordynamic Analysis of Circumferentially-Grooved Pump Seals Based on a Three-Control-Volume Theory", KSME International Journal, Vol. 14, No. 3, pp. 261~271.

(15) 하태웅, 이안성, 1998, "압축기용 라비린스 시일의 동특성 해석", 한국소음진동공학회지 제8권 제5호, pp. 849~855.

(16) Ha, T. W., "Rotordynamic Analysis for Stepped-Labyrinth Gas Seals Using Moody's Friction-Factor Model," KSME International Journal 게재심사중.

(17) 하태웅, 이안성, 2000, "압축기용 계단식 래버린스 실의 누설 및 동특성해석", 한국소음진동공학회 10주년 학술대회 논문집, pp. 1084~1089.

(18) Ha, T. W. and Childs, D. W., 1996, "Rotordynamic Analysis of An Annular Honeycomb Seal Using A Two-Control Volume Model," KSME Journal, Vol. 10, No. 3, pp. 332~340.

(19) 양보석, 1993, "작동유체에 의한 불안정화 유체력 해석", 연구보고서, 한국기계연구원.

(20) Ha, T. W., Lee, Y. B., and Kim. C. H., 2001, "Leakage and Rotordynamic Analysis of High Pressure Floating Ring Seal in Turbo Pump Unit of Liquid Rocket Engine," submitted on Tribology International Journal.