

逆方向스윙自己注入 시일의 漏洩 성능에 관한 실험 연구

김창호 · 이용복

한국과학기술연구원 Tribology 연구실

Test Results of Leakage Performance for Anti-Swirl Self-Injection Seals

Chang-Ho Kim and Yong-Bok Lee

Tribology Lab. Korea Institute of Science and Technology

Abstract—An experimental investigation for leakage performance of five anti-swirl self-injection seals was carried out to select an optimum configuration for minimum leakage. Test results show that the self-injection mechanism with a plain seal generally degrades the leakage performance of noncontacting seals; however, through a series of the test program, an optimum anti-swirl self injection seal was selected to obtain a comparable leakage performance with a damper seal. A 12 holes anti-swirl and anti-leakage self-injected configuration with a labyrinth surface gives minimum leakage among the tested anti-swirl self-injection seals.

1. 서 론

비접촉시일에 대한 누설성능 및 동특성에 대한 연구는 70년대 이후 활발히 전세계적으로 추진되어 온 이후 현재로는 여러 방향에서 이들의 문제에 관하여 연구가 계속되어지고 있으며 기본적인 현상의 이해와 아울러 이를 최적화 하려는 경향이 뚜렷하다. 특히 터보 기계류의 경쟁력 향상의 기본적 요건이 되고 있는 고성능화에 있어 필수 불가결하게 따르는 고속, 고압화 시도에 있어서 당면하는 여러 문제점 중에서 비접촉시일에 의한 동특성 현상에 대한 이해와 아울러 누설성능의 향상에 대한 연구가 활발하다. 초기에는 평면시일, 댐퍼시일, 래비린스시일[1-3] 등 시일 표면의 형상에 따른 특성의 파악을 통하여 광목함만한 성과를 이루어 이를 실용화 하여 사용하고 있으며 이를 위한 유동해석 또한 발전을 거듭하여 수치해석을 통하여 비교적 상세하게 비접촉시일내의 유동을 해석함으로써 설계의 기본으로 삼고 있다[4, 5].

한편, 선형회전축 모델에서 불안정성의 판단기준이 되는 연성강성(cross-coupled stiffness)와 감쇄계수의 비인 불안정성계수(instability parameter)의 개선을 위하여 시일표면의 형상에 따른 원주방향 유동의 억제와

축방향의 누설억제에 대한 기존방법의 차원[1-3]을 넘어 시일 입구에 스윙 브레이크(swirl brake)를 장착하여 축회전에 의한 유입 유동의 회전을 억제하는 연구가 최근에 추진되고 있다[6]. 본 논문에서는 앞서 언급한 방법과는 획기적으로 새로운 개념인 축회전의 역방향으로 시일 유입구의 고압을 자연적으로 이용하여 원주방향의 유동 및 축방향 누설을 제어하는 역방향스윙 자기주입형 시일을 새로이 고안하고 이를 기존시일과 비교하기 위한 실험장치를 설계 제작하였으며 역방향 스윙 자기주입형 시일의 누설성능을 비교 분석하여 최적의 형상을 추출하고자 한다.

2. 실험장치 및 시일

2-1 시일 실험 시스템의 총체적 구성

본 논문의 목적인 시일의 누설성능의 비교 측정을 위하여 Fig.1과 같은 실험 시스템을 구성하였다. 그림에서와 같이 작동유체인 물을 실험장치에 유입 시키기 위하여 원심펌프를 구동시키는 것을 시작으로 하여 실험장치에 유입되는 작동유체를 수동밸브로 조절하였고 작동유체가 실험장치로 보내어지는 과정에서 임의로 설정해 놓은 압력값 이상의 과압이 작용할 때는 경고음과

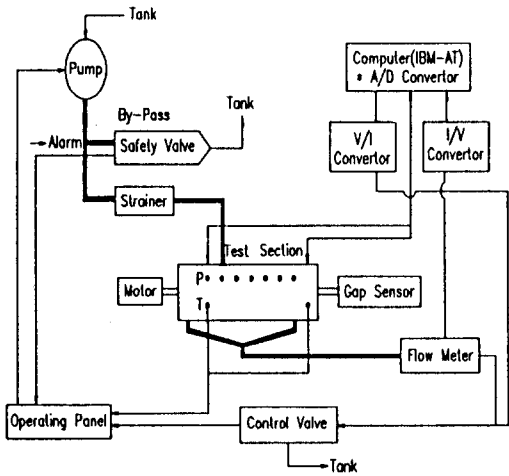


Fig. 1. Schematics of the sealing test system

동시에 안전밸브가 작동되고 작동 유체를 물탱크로 귀환시켜 안전을 도모하였다. 작동유체의 온도는 점성과 관련된 중요한 요소로 작용되는 관계로 실험장치 내의 온도는 주입되는 유체의 온도와 유출되는 온도를 검출하여 냉각기를 컴퓨터에 의하여 자동제어토록 하였으며 그 변동상황을 컴퓨터에 입력시켰다. 유량은 마그네틱 유량계에서 측정되며 출력신호 역시 아날로그/디지털(AD) 변환기로 변화를 모니터링함과 동시에 유량 제어 밸브를 이용하여 유량을 컴퓨터 프로그램을 통하여 원하는 유량을 자동조절하였다.

압력의 측정은 시일의 특성을 파악하는 중요한 자료로서 압력의 측정부위에 따라 유입부위, 시일내 5부위, 유출부위 등 총 7부위를 측정하기 위하여 스캐니 밸브(scanni-valve)를 이용하였으며 컴퓨터를 이용하여 제어하였다. 선택된 부위의 압력은 압력변환기에서 감지되어 전류전압 및 아날로그/디지털 변환기를 거쳐 컴퓨터에 kPa 단위로 환산 표시되도록 하였다. 이와 같이 작동계기판과 컴퓨터 제어를 연계하여 on-line 모니터링과 제어를 할 수 있는 소프트웨어를 개발하여 시스템 운영의 효율을 높였다.

2-2 실험장치

하우징 본체②의 중앙부에 2개의 유입구⑪를 가공하여 유체가 유입되도록 하였으며 두 개의 실험 시일⑨를 통하여 축방향으로 유출되어 유출구⑫를 통하여 물 탱크로 연결되어 있다. 실험될 시일은 하우징 본체에 삽입되어 압력측정용 구멍을 가공한 후 스캐니 밸브(scanni-valve)에 연결되며 2개의 열전대가 유출부위와 유입부위에 각각 삽입되어져 있다. 시일의 동특성을 파

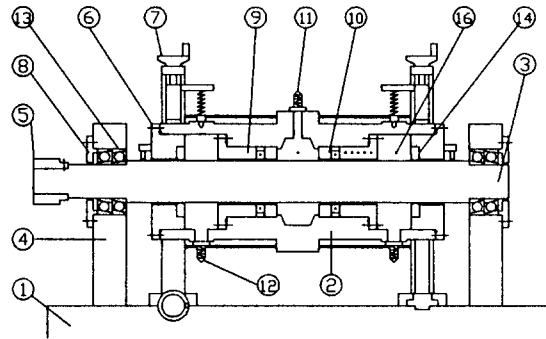


Fig. 2. Test apparatus

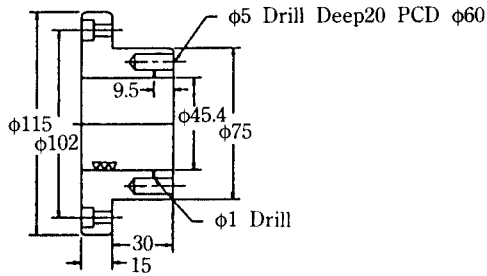
Table 1. Configuration of Test Seals

Test seals	Type	Configuration
seal 1	plain	
seal 2	damper	hole pattern (circle)
seal 3	ASIS	6 holes one-line injection
seal 4	ASIS	6 holes double-line injection
seal 5	ASIS	12 holes one-line injection
seal 6	ASIS	12 holes one-line with anti-axial flow injection
seal 7	labyrinth ASIS	12 holes one-line with anti-axial flow injection and labyrinth effect

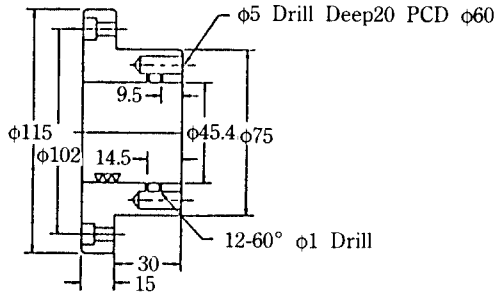
악하기 위하여 4개의 스프링⑮과 4개의 지지봉⑰으로 유연하게 지지 구조물에 연결되어 지도록 설계하였으며 전체 하우징의 위치를 미세조정⑦하도록 설계되어 있다. 양단 2개의 리프시일(lip seal)⑭은 축선을 타고 유출되는 유체를 막는데 사용하였다. 하우징과 회전축과 상대변위를 측정하기 위하여 와전류 형의 proximity probe⑱를 좌우측 양단에 90도 간격으로 설치하여 연직과 좌우 방향의 변위를 측정할 수 있도록 하였다. 공급압력은 2~9기압의 범위에서 조절하여 유출 유량을 조절하였으며, 회전수는 1500-4500 rpm의 범위에서 조절하여 여러 가지의 경우에 대하여 누설량을 측정하였다.

새로히 고안된 역방향 자기주입 시일(ASIS : Anti-swirl injection seal)에 대한 누설성능을 비교함에 있어 실험대상인 일련의 ASIS 시일에 대하여 Table 1에 수록하였으며 ASIS와 기존의 평면시일(시일 1)과 댐퍼시일(Damper seal)(시일 2)[1-3]과 비교하였다. ASIS의 특징적 형태는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 회전 역방향으로 유체를 자연발생적으로 주입하기 위한 메카니즘으

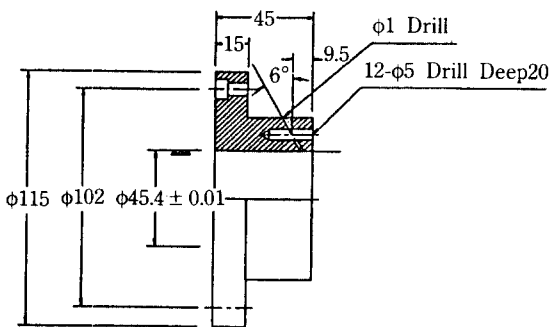
<Self-injection pattern>



a) one-line injection (seal 3, 5)

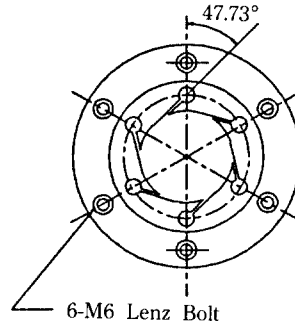


b) double-line injection (seal 4)

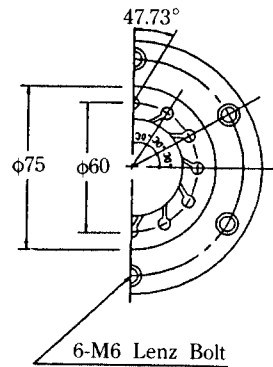


c) 6° anti-leakage with smooth surface (seal 6)

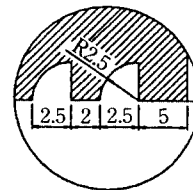
<Anti-swirl pattern>



a) 6 holes anti-swirl (seal 3, 4)



b) 12 holes anti-swirl (seal 5, 6, 7)



c) 6° anti-leakage with labyrinth effect (seal 7)

Fig. 3. Geometry of anti-swirl self-injection seals

로 우선 60도 간격으로 6개의 구멍을 가공(시일 3) 하였으며, 역회전 효과를 상승시키기 위하여 2열의 주입을 (시일 4), 1열 30도 간격 12개 구멍(시일 5) 1열 30도

간격 12개 구멍 6도 역 유출방향 주입 (시일 6), 시일 6에 래비린스(labyrinth)효과를 추가한 시일 7로 구분할 수 있다. 모든 시일의 틈새는 0.2 mm로 하였다.

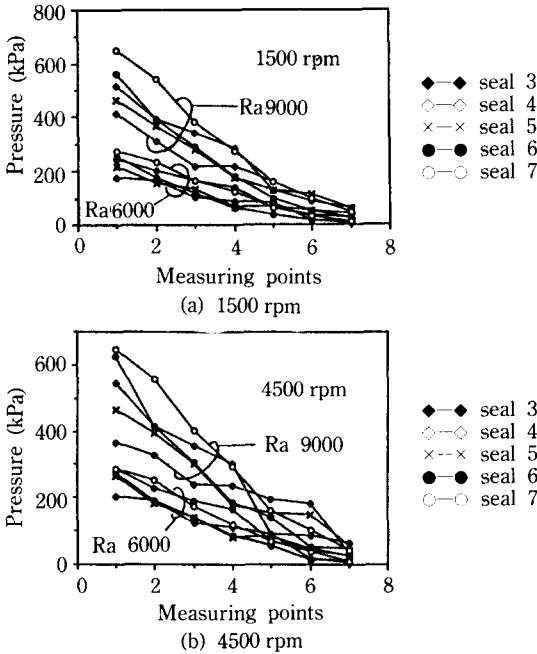


Fig. 4.1. Pressure measurements of anti-swirl self-injection seals

3. ASIS 시일의 누설성능 상대 비교

시일의 누설성능을 비교하기 위하여 시일의 체적 누설량을 다음과 같이 정의하였다.

$$(1) \dot{Q} = C_L / 2\pi R^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

여기서 C_L 은 동일한 반경을 갖는 시일들의 누설량을 상대적으로 비교할 수 있는 무차원 수로 정의된다[1-3].

앞서 언급한 바와 같이 ASIS 시일의 누설성능을 비교 분석하면서 최적의 시일 형태를 선택하기 위하여 Table 1의 일련의 ASIS 시일에 대하여 실험을 하였다. 이를 위하여 시일내의 압력강하와 누설량을 비교할 수 있는 누설계수를 비교하였다. Fig. 4.1에서는 일련의 ASIS 시일에 대하여 측정된 압력을 1500 rpm과 4500 rpm, Ra=6000과 Ra=9000의 경우에 대하여 각각 비교하였다. 여기서 축방향 레이놀즈수는 $Ra = 2\rho VC/\mu$ 로 정의되며, ρ 는 밀도, V 는 유출속도, C 는 시일의 틈새, μ 는 점도로 정의된다. Fig. 4.1에서 보듯이 일반적으로 시일에서 나타나는 현상 즉, Ra가 증가함에 따라 압력강하가 증가하는 점, rpm이 증가함에 따라 압력강하가 약간 증가하는 점등이 대체적으로 모든 ASIS시일에서도 나타났다. 또한 Ra가 클수록 역회전 자기주입 효과가 더욱 커져

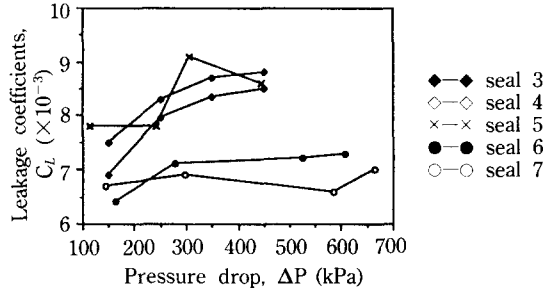


Fig. 4.2. C_L versus ΔP for anti-swirl self-injection seals at 4500 rpm

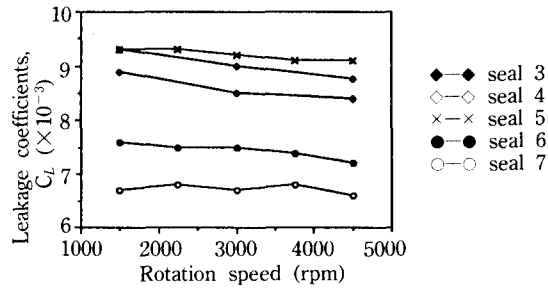


Fig. 4.3. C_L versus rpm for anti-swirl self-injection seals at $Ra=8000$

압력강하의 분포가 커짐을 보여 역회전 자기주입 효과가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.2와 4.3에서는 누설계수를 압력강하와 축회전속도에 대하여 비교하였다. 전체적으로 압력강하가 증가할 수록 누설계수가 점근적으로 증가하는 일반적 현상을 볼 수 있으며[1-3] 축회전속도가 증가할 수록 누설계수가 약간씩 감소하는 일반경향을 잘 나타내고 있다. 시일 3과 4를 비교하여 볼 때 2열 주입은 역회전 효과를 상승시킬 수는 있으나 누설에는 역효과가 남을 알 수 있었고 시일 6에서 보듯이 역 유출방향 주입이 큰 누설억제 효과가 있으며 시일 표면의 래비린스 형태 가공(시일 7)누설 감소효과가 있음을 알았다. 또한 평면시일에 역회전 효과만을 고려한 구멍만을 추가한 1열 6개 구멍시일(시일 3), 복열 12개 구멍 시일(시일 4), 1열 12개 구멍시일(시일 5)들은 평면시일에 비하여(Fig. 5.2 참조) 오히려 누설성능이 저하되었으나 역유출방향 주입시일(시일 6), 시일 6에 래비린스 효과를 추가한 시일 7은 현저히 누설을 저감시키는 결과를 주었다. 결론적으로 ASIS 시일의 실험을 통하여 래비린스 효과와 역유입방향 주입 형태가 누설 성능에 우수한 효과가 있음을 알았으며 이는 시일 7에 의하여 구현되었고 다음에서는 평면시일과 댐퍼시일에 대하여 이를 비교하였다.

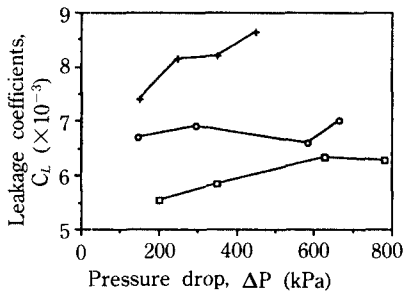


Fig. 5.1. C_L versus ΔP for a smooth seal (1), a damper seal (2), and an optimum ASIS (7) at 4500 rpm

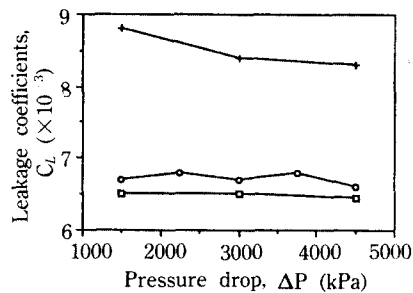


Fig. 5.2. D_L versus rpm for a smooth seal (1), a damper seal (2) and an optimum ASIS (7) at $Re=8000$

Fig. 5.1과 5.2에서 평면시일, 댐퍼시일, ASIS(시일 7)에 대하여 압력강하와 축 회전속도에 따른 누설계수를 비교하였다. 압력강하가 증가할 수록 댐퍼시일과 ASIS의 성능이 비슷하며 축 회전에 무관하게 두 시일의 성능이 비슷하여 본 논문에서 제시한 ASIS의 타당성을 입증하는 결과로 나타났다. 즉, ASIS 시일은 동적 안정성의 현격한 향상[7]과 아울러 래비린스 효과와 역 유출방향 주입의 적절한 사용에 힘입어 평면시일을 훨씬 능가하며 댐퍼시일과 비슷한 누설성능을 얻을 수 있었다. 이러한 현상은 래비린스 효과에 의한 유출에너지의 소산 및 역방향 주입에 의한 유출 역방향 모우멘텀이 유출을 억제하여 누설이 감소된 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서 새로히 고안된 일련의 ASIS 시일의 누설성능을 실험적으로 검토한 결과, 평면시일에 역회전 스윙만을 고려하면 오히려 누설성능이 저하되나 래비린스 효과가 역 유입방향 주입을 병행하면 댐퍼시일과 유사한 누설성능을 밝혔다. 결국 역방향 자기유입형 시일은 현격한 동적 안정성의 향상과 아울러 실제적인 시일의 누설성능 대체에 적절히 대응할 수 있음을 알았고 ASIS 시일에 대한 좀더 심도 있는 추가 연구가 예정되어 있다.

후 기

본 연구는 과학기술처의 첨단요소사업의 연구지원에 의해 수행되었으며 관계자 제위께 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. D.W. Childs and Chang-Ho Kim, "Analysis and Testing for Rotordynamic Eoefficients of Turbulent Annular Seals with Differnt Directionally-Homogeneous SSurface Roughness Treatments for Rotor and Stator Elements", ASME Trans. J. of Tribology, Vol. 107, pp.296-306, July, 1985.
2. D.W. Childs and Chang-Ho Kim, "Test Results for Round-Hole Pattern Damper Seals: Optimum Configurations and Dimensions for Maximum Net Damping", ASME Trans. J. of Tribology, Vol.108, pp.605-611, Oct. 1986.
3. Takuzo Iwatsubo, Bo-suk Yang, and Ryuji Ibaraki, "Static and Dynamic Characteristics of Parallel-Grooved Seals", NASA Conference Publication 2443, June 2-4, 1986.
4. F.J. Dietzen and Normann, "Calculating Rotordynamic Coefficients of Seals," NASA Conference Publication 2443, Juen 204, 1986.
5. P. Weiser and R. Nordamann, "Determination of Rotordynamic Coefficients for Labyrinth Seals and Aplication to Rotordynamic Design Calculations," The Sixth Workshop on Rotordynamic Instability Problems in High-Performance Turbomachinery, May 21-23, 1990.
6. D. W. Childs, E. Baskharone, and C. Ramsey, "Test Results for Rotordynamic Coefficients of the SSME HPOTP Turbine Interstage Seal with Two Swirl Brakes", The 6th Workshop on Rotordynamic Instability Problems in High-Performance Turbomachinery, May 21-23, 1990.
7. 김창호, "고압 펌프용 로타다이내믹스 및 최적 Sealing 기술 개발" Most 보고서 UCN709-4162-2, July, 1991.