

공기분사를 이용한 라비린스 시일의 성능개선방안 연구

나병철*, 전경진*, 한동철**

*생산기술연구원 생산시스템센터

**서울대학교 기계설계학과

Abstract

A restrict jetting air is applied against leakage flow to improve a sealing performance of conventional labyrinth seal. A CFD analysis and sealing experiment are introduced to evaluate a sealing performance of applied model. The base of enhanced sealing is explained as a reducing clearance effect by jetting air. As a result, the applied model can improve the sealing performance of labyrinth seal in spite of the wide leakage clearance.

Keyword : labyrinth seal(라비린스 시일), air jet(공기분사), effective clearance(유효 틈새)

1. 서론

라비린스 시일은 일정한 틈을 가지고 작동하며 유체가 길고 복잡한 통로를 통과하게 하여 밀봉을 이루는 구조로 되어있으며 거의 모든 공작기계의 주축에 사용된다.[1] 기본적인 라비린스 형태는 축 외부 또는 하우징에 케비티(cavity)를 설치하여 난류를 유발시키고 유동의 흐름을 저지하는 형태(cavity type)이다.[2] 보다 효율을 높이기 위하여 축 주위에 컬리(collar)를 설치하여 강제적으로 흐름의 방향을 전환시키는 유형(protective collar type)도 각종 공작기계에 널리 사용되고 있다.[3] 라비린스 시일은 구조상 일정한 누설틈새가 존재하기 때문에 경우에 따라 밀봉효과가 낮아지고 누설이 발생하게 된다.[4] 따라서 라비린스 시일은 그 성능을 높이기 위하여 여러 가지 방법으로 많은 연구가 진행되고 있다.[5-6] 시일방법도 라비린스에만 의존하던 종래의 방식을 탈피하여 적극적인 에어 시일을 많이 사용하는 추세이다.

본 연구에서는 기존에 사용되던 라비린스 시일에 에어시일의 원리를 도입하여 밀봉성능을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하였다.

2. 연구모델 및 성능해석

2.1. 연구모델에 대한 해석

라비린스 시일 과 에어젯 타입의 구조를 기본으로 새로운 연구모델을 제시하였다. Fig. 1에는 프로텍트 컬러타입 라비린스 시일에 공기분사가 가해진 연구모델의 형상을 도시하였다. 이 형상은 케비티 선단에 유동을 저지할 수 있는 컬러를 설치하고 컬러에 의해 방향이 전환된 누설의 방향에 반대되는 방향으로 공기를 분사하여 밀봉효율을 배가시킬 수 있도록 설계한 형상이다. 컬러에 의해 형성된 누설통로에 누설유체가 흐를 때 유동 방향과 반대 방향으로 직접 저지분사(restrict jet)를 가하면 저지분사의 관성에 의한 누설 방지 효과와 함께 분사된 저지분사의 크기만큼 누설통로를 점유하게 되어 실질적으로 누설통로를 좁게 한 것과 같은 효과를 나타내게 된다.

2.2 해석결과 및 성능비교

CFD 모델링에는 4800개의 그리드가 사용되었으며 해석 영역의 크기(domain) 및 초기조건은 모두 동일하고 저지분사 경계조건을 제외한 요소 배열, 개수 및 다른 경계 조건은 모두 일정하다. 경계 조건으로써, 베어링에서의 고온 유입을 가정하여 유입 온도를 100°C를 가정하였고 외부 온도는 20°C로 가정하였다. 시일 내에서의

열 전달은 단열 조건을 가정하였다. 초기에 누설되는 공기의 속도는 10 m/s 이고 분사의 속도는 50 m/s를 가정하였다. 유동해석은 교축과정을 겪는 압축성 유동을 가정하였다.

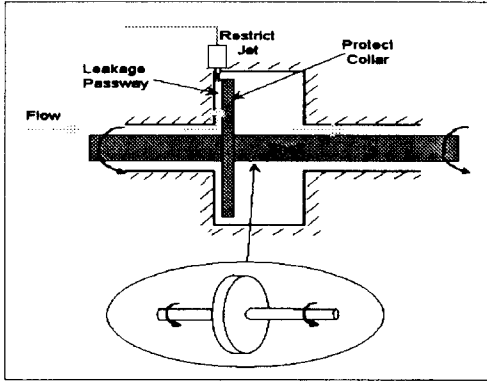


Fig. 1 Applied Seal Model

유동해석은 2차원 유동으로 계산하였으며 축원주길이에 비하여 틈새가 매우 작기 때문에 2차원에서의 해석이 가능하다. 유동 해석을 통한 시일의 밀봉 성능의 평가는 일정량의 누설을 가정하고 유동장 입구와 출구에서의 압력강하로 평가한다. 양단에서의 압력강하가 클수록 밀봉 성능이 더 우수한 것으로 평가한다.

FVM(Finite Volume Method) CFD(Computational Fluid Dynamics) 코드를 이용한 해석결과가 Fig. 2 - Fig. 5에 도시되어 있다.[7-8] Fig. 2, Fig. 3은 분사가 수반되지 않는 프로젝트 쉐일 타입에서의 속도와 압력분포 결과이고 Fig. 4, Fig. 5는 저지분사가 가해진 연구모델에서의 속도와 압력분포 결과를 도시한 것이다. Fig. 2를 살펴보면 유동의 방향이 쉐일에 의하여 바뀔 때 속도의 변화가 급격해지고 쉐일의 끝단의 틈새를 빠져나갈 때에도 쉐일 외곽쪽(아래 방향)으로 속도벡터의 방향이 집중된 것을 알 수 있다. 속도벡터가 집중된 쉐일의 끝단에 역방향으로 저지분사를 가하여 양방향 속도벡터의 상쇄효과를 발생시키도록 한 것이 개선된 연구모델이다. Fig. 3을 살펴보면 기존의 프로젝트 쉐일 타입은 대부분의 압력강하가 쉐일에 의하여 유동의 방향이 바뀔 때 발생하는 것을 알 수

있다. 즉 쉐일과 케비티에 의해 생성된 최소 누설틈새를 통과할 때의 압력강하 효과로 밀봉이 이루어지는 것을 뜻한다.

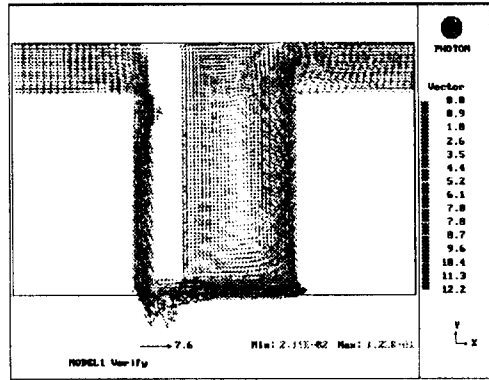


Fig. 2 Velocity Profile of Protective Collar Type

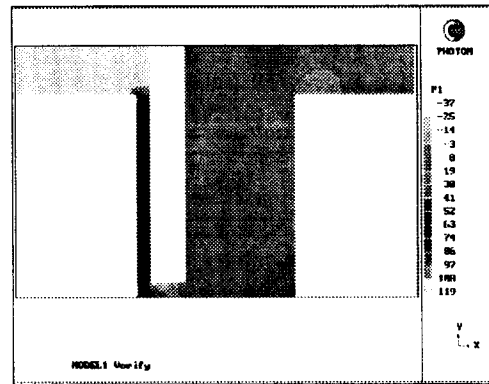


Fig. 3 Pressure Distribution of Protective Collar Type

Fig. 4를 살펴보면 누설유량 속도벡터 성분의 거의 대부분이 저지분사와 만나는 곳에서 발생하며 상당히 빠른 속도로 유동이 빠져 나오는 것을 알 수 있다. 이것은 저지분사로 인하여 유효 누설통로가 좁아진 것을 의미하며 교축과정에 의하여 상당한 압력강하가 이루어 졌을 것임을 나타낸다. Fig. 5를 보면 이러한 효과를 확인할 수 있다. 저지분사가 작용하는 곳에서 큰 압력강하가 발생하였으며 Fig. 3에서와는 달리 유동 입구측에서 유동의 방향이 바뀌고 최소 틈새

가 형성되어도 거의 압력변화가 없는 것을 볼 수 있다. 이것은 저지분사로 인한 압력강하 효과가 매우 큼을 의미하며 효과적으로 누설을 저지할 수 있음을 의미한다. 저지분사가 가해지지 않을 때의 압력강하(Fig. 3)가 119 Pa 인데 비하여 저지분사를 가할 경우 2120 Pa 의 압력강하를 나타내어 분사를 가할 경우 동일 조건에서의 프로젝트 컬러타입 보다 뛰어난 밀봉효과가 있는 것으로 판명되었다.

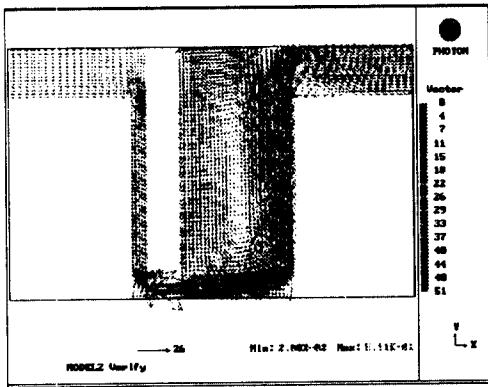


Fig. 4 Velocity Profile of Applied Model with Air Jetting

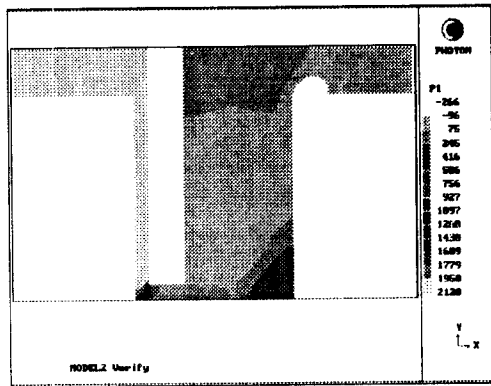


Fig. 5 Pressure Distribution of Advanced Model with Air Jetting

Fig. 6, Fig. 7에는 각각 분사가 가해지지 않을 때와 분사가 가해질 때의 유선(streamline)을 도시하여 놓았다. 분사가 가해지지 않은 Fig. 6을 보면 누설유동의 유효간극이 컬러와 케비티

사이에서 최소를 유지하게 되고 이 틈새를 통하여 누설이 이루어지게 되고 유선의 폭이 좁아진 결과로 미루어 보아 약간의 누설방지 효과가 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 분사가 가해진 Fig. 7의 경우는 누설유동이 최소간극을 지나 케비티 끝단에서 중단된 것 같은 유선의 모양을 관찰할 수 있다. 실제로 누설유동이 중단된 것은 아니고 저지분사에 의해 누설유동의 유선의 폭이 매우 감소된 것을 나타낸다. 즉 저지분사로 인하여 분사된 양만큼의 누설통로를 점유하게 되어 실제적으로 누설이 일어나는 틈새(유효 누설간극)는 매우 좁아지게 된다. 이러한 효과는 기계의 가공, 재료의 열팽창 또는 진동 등으로 인하여 더 이상 좁히기 어려운 비접촉 시일의 누설틈새를 간접적으로 좁히는 것과 같은 역할을 하게 되어 매우 우수한 밀봉효과를 기대할 수 있다.

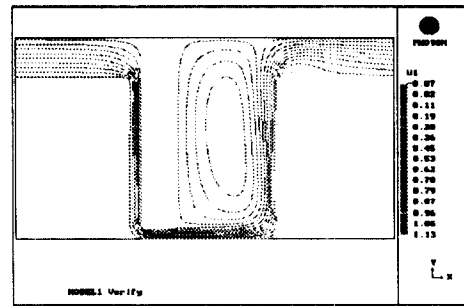


Fig. 6 Streamline of Protective Collar Type

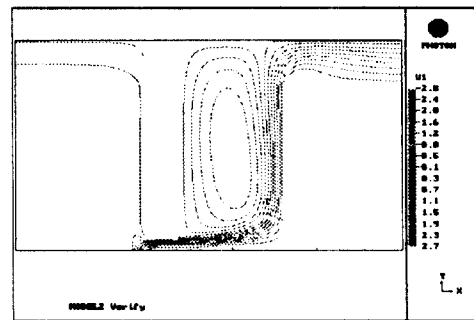


Fig. 7 Streamline of Applied Jetting Model

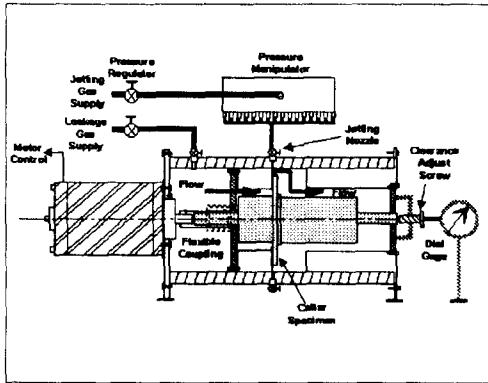


Fig. 8 Control Diagram of Testing Equipment

3.2 누설 실험조건 및 실험방법

축회전이 누설이 미치는 초기 영향을 알아보기 위해 모터의 속도를 0, 1000, 2000, 3000 rpm으로 조정하고 시일전후의 압력강하를 측정하였다.

케비티와 컬러 선단과의 틈새는 0.25mm, 0.50mm, 0.75mm, 1.0mm, 1.25mm, 1.50mm 까지 조정하여 누설틈새가 누설에 미치는 영향을 관찰하였다.

분사가 누설에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 초기 누설압력을 일정하게 고정하고 분사압력(압력조절용기의 압력)을 9.8 KPa(0.1 kg/cm²), 19.6 KPa(0.2 kg/cm²), 29.4 KPa(0.3 kg/cm²), 39.2 KPa(0.4 kg/cm²), 49.0 KPa(0.5 kg/cm²)로 조정하여가며 실험하였다. 또한 초기 누설의 영향을 알아보기 위하여 일정 분사압력에 대하여 초기 누설 발생 압력을 10 Pa에서 180 Pa까지 변화시켜가며 압력강하를 측정하였다. 각 측정값은 동일 실험을 4회 이상 반복하여 측정된 값들중 재현성이 있는 값들을 취하였다.

CFD 계산에서의 가정과 마찬가지로 누설량을 일정하게 가정하고 양단 압력강하의 크기를 밀봉성능의 평가기준으로 삼았다. 그러나 실제 공작기계의 밀봉부위는 누설입구측에서의 공간이 오일 드레인 등이 설치되어 있어서 외부 압력변화에 대하여 누설량이 변화하게 되어 누설량이 일정하다는 조건을 만족시키지 못한다. 따

라서 본 실험은 누설입구측에 압력발생을 위한 분사구를 설치하고 모두 밀폐공간으로 만들어 가정을 만족시키고 분사된 유량은 모두 외부로만 유출될 수 있도록 하였다.

3.3 실험결과 및 고찰

Fig. 9에 분사압력이 전체 압력강하에 미치는 영향을 도시하였다. 여기서 누설압력(Leakage Pressure)은 누설량과 직접적으로 관계 있다. 누설압력이 일정할 경우 분사압(Jetting Pressure)이 커질수록 전체 압력강하가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 저지분사로 인하여 밀봉 성능이 현저히 증대되었음을 의미한다.

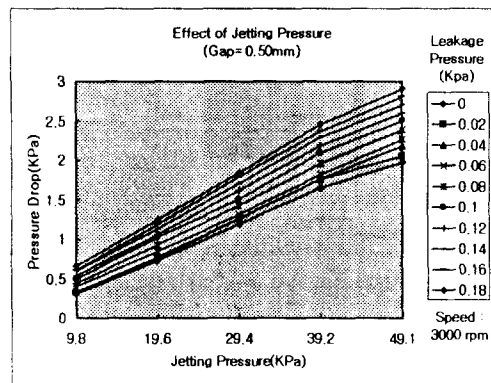


Fig. 9 Effect of Jetting Pressure

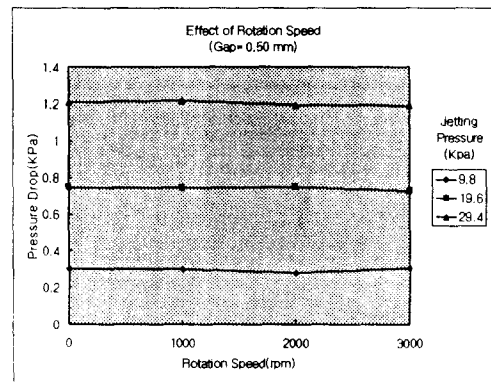


Fig. 10 Effect of Rotation Speed

Fig. 10에 축 회전에 대한 영향을 도시하였다. 실험결과 축 회전은 전체 압력강하에 그리 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 작동

유체가 기체를 다량으로 포함할 경우 누설 초기에서부터 충분한 난류가 생성되기 때문에 축회전 증가로 인한 난류증가의 영향을 기대할 수 없기 때문으로 생각된다.

Fig. 11에는 누설틈새에 대한 압력강하의 영향을 도시하였다. 누설틈새가 커지면 전체 압력강하는 떨어지고 밀봉성능이 나빠지게 된다. 여기서 특이한 것은 누설틈새가 어느 정도 커지게 되면 오히려 압력강하가 커지게 되는 현상이다. 이것은 저지분사에 의한 특성으로 분사노즐의 크기가 1mm이므로 그 이하의 누설틈새에는 분사유동이 효과적으로 침투하지 못하였다가 틈새가 넓어짐에 따라 효과를 나타내게 되어 나타나는 현상이다. 따라서 이러한 저지분사는 누설틈새가 넓어서 밀봉효과를 기대할 수 없는 곳에서도 상당한 효과를 기대할 수 있음을 의미한다.

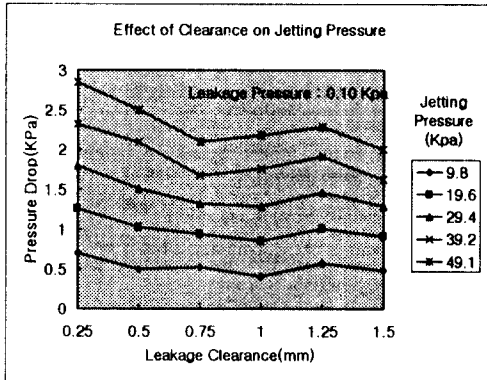


Fig. 11 Effect of Leakage Clearance

4. 결론

프로젝트 쿨러 타입 라비린스 시일에 에어젯 시일의 원리를 도입하고 저지분사를 가하여 밀봉성능을 향상시키는 방안을 모색하였다. 밀봉성능을 평가하기 위하여 CFD를 이용한 압축성 난류유동을 해석하였으며 저지분사로 인하여 밀봉성능이 상당히 증대되는 것을 알 수 있었다. 밀봉성능 향상의 근거는 유효 누설통로 감소의 효과로 설명될 수 있으며 실험을 통하여 그 특성을 검증하였다. 실험을 위하여 밀봉성능을 평가할 수 있는 성능시험기를 제작하였으며 실험결

과 저지분사의 크기가 밀봉성능에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 축회전 속도는 본 실험에서 밀봉성능에 크게 영향을 미치지 못하였다. 누설간극은 좁을수록 밀봉효과가 우수해지며 불가피하게 틈새가 넓어질 경우에도 저지분사로 인하여 밀봉성능이 향상될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. H.Stoff, "Incompressible Flow in a Labyrinth Seal", J. of Fluid Mech, 1980, Vol.100, pp.817-829
2. "Seals and Sealing HANDBOOK 2nd Edition", 1986, Trade & Technical Press Limited(1986)
3. Rhode, D. L., Ko, S. H., and Morrison, G. L., "Numerical and Experimental Evaluation of a New Low-Leakage Labyrinth Seal," AIAA Paper 88-2884, July 1988.
4. Rhode, D. L., Ko, S. H., and Morrison, G. L., "Design Optimization and Testing of a Pump Wear Ring Labyrinth Seal," AIAA Paper 88-3694, July 1988.
5. Stoff, H., "Incompressible Flow in a Labyrinth Seal," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 100, 1980, pp. 817-829
6. Rhode, D. L., Demko, J. A., Traegner, U. K., Morrison, G. L., and Sobolik, S. R., "The Prediction of Incompressible Flow in Labyrinth Seals," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 108, March 1986, pp. 19-25.
7. "PHOENICS Training Course Notes CHAM TR/300", 1990, CHAM Limited
8. Partankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Spalding(1980)