

프로텍트 콜리타입 라비린스 시일의 성능개선에 관한 실험적 연구 An Experimental Study of Performance Improvement for Protective Collar Type Labyrinth Seal

나병철(자동차부품 연구원), 전경진(생산기술연구원), 한동철(서울대)

Byung Chul Na(KATECH), Keyoung Jin Chun(KITECH), Dong-Chul Han(Seoul National Univ.)

ABSTRACT

Sealing an oil-air mixture plays important roles to have an enhanced lubrication for high speed spindle. Current work was emphasized on the investigation of the air jet effect on the protective collar type labyrinth seal. To improve the sealing capability of conventional labyrinth seal, air jet was injected against through the leakage flow. It has a combined geometry of a protective collar type and an air jet type. In this study, both of a numerical analysis by CFD(Computational Fluid Dynamics) and experimental measurements are carried out to verify sealing improvement. Both of the turbulence and the compressible flow model were introduced in CFD analysis. The sealing effect of the leakage clearance and the air jet magnitude were studied for various parameter in the experiment. The results of pressure drop in the experiment match reasonably to those of the simulation by introducing a flow coefficient. Effects of sealing improvement are explained as decreasing of effective leakage clearance by air jetting. Thus, sealing effect is improved by amount of air jetting even though clearance become larger.

Keywords : labyrinth seal(라비린스 시일), oil mist lubrication(effective leakage clearance, air jet effect, oil mist lubrication)

1. 서론

고성능 공작기계에 사용되는 고속 주축에는 윤활 및 냉각 성능을 높이기 위하여 오일젯(oil jet) 또는 오일 미스트(oil mist) 방식의 특수한 윤활방식이 사용되며 이에 따라 이들 윤활시스템의 누설 및 오염을 방지할 수 있는 특수한 실링(sealing)시스템을 요구하게 된다.⁽¹⁾ 기본적인 라비린스 형태는 축 외부 또는 하우징에 케버티(cavity)를 설치하여 난류를 유발시키고 유동의 흐름을 저지하는 형태(cavity type)이다.^(2,3) 효율을 높이기 위하여 축 주위에 콜리(collar)를 설치하여 강제적으로 흐름의 방향을 전환시키는 프로텍트 콜리(protective collar) 타입 라비린스 시일도 각종 공작기계에 널리 사용되고 있다.^(4,5,6) 본 논문에서는 프로텍트 콜리 타입 라비린스 시일에 에어 젯 타입의 밀봉 메카니즘이 중첩될 수 있도록 형상을 조합하여 기존 프로텍트 콜리 타입 라비린스 시일의 밀봉성능을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하

였다. 실험을 통한 밀봉 성능을 비교와 함께 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 수행하여 실험결과를 검증하였다.

고속주축의 윤활에는 오일젯 또는 오일미스트 방식의 윤활기술이 적용되기 때문에 작동환경은 공기와 오일입적이 포함된 2 상(phase)의 압축성 작동유체를 사용하게 된다. 따라서 실험장치에는 공기분사 및 오일 분무 장치를 설치하여 2상유동의 환경이 조성될 수 있도록 고려하였다. CFD 해석에 있어서도 2상 난류유동(two phase turbulent flow)이 포함되며 시일 간극에서 발생하는 등축과정(isentropic processor)에 의한 압력강하(pressure drop)의 영향이 나타날 수 있도록 압축성 거동(compressible flow)이 고려되었다.^(7,8)

2. 실험장치 및 실험방법

밀봉성능 시험을 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치

를 제작하였다. 이 실험장치는 실제 고속추축의 윤활 환경과 같이 2상 작동분위기를 조성하였으며 누설압력 및 누설틈새의 정밀 조정이 가능하도록 제작하였다. 축회전이 누설에 미치는 초기 영향을 알아보기 위해 모터의 속도를 0, 1000, 2000, 3000 rpm 으로 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 조정하여 가며 실험하였다. 또한 초기 누설의 영향을 알아보기 위하여 일정 분사압력에 대하여 초기 누설 발생 압력을 10 Pa에서 200 Pa까지 변화시켜가며 압력강하를 측정하였다. 또한 누설압력과 누설유량의 상관관계를 분석하기 위하여 각 누설압력에서의 누설유량도 측정하였다.

평가방법은 누설량을 일정하게 가정하고 양단 압력강하의 크기를 밀봉성능의 평가기준으로 삼았다. 가정을 만족할 수 있는 실험조건을 형성하도록 하여 각 변수들의 영향을 고찰함으로써 각 변수들에 의해 측정된 누설특성이 다른 변수들에 의하여 영향받지 않도록 하였다. 이를 위하여 누설입구측에 압력발생을 위한 분사구를 설치하고 나머지 압력 유출공간을 모두 밀폐공간으로 만들어 고압으로 분사된 누설유량은 모두 외부로만 유출될 수 있도록 하여 가정을 만족시키도록 하였다.

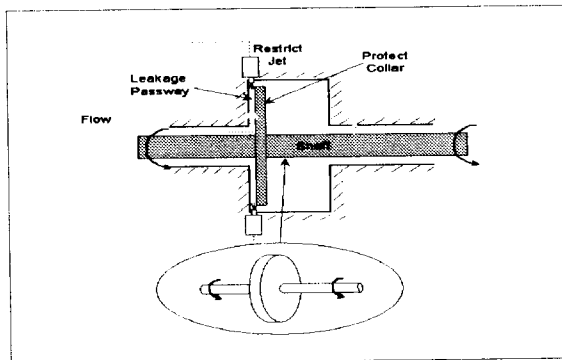


Fig. 1. Applied Seal Model

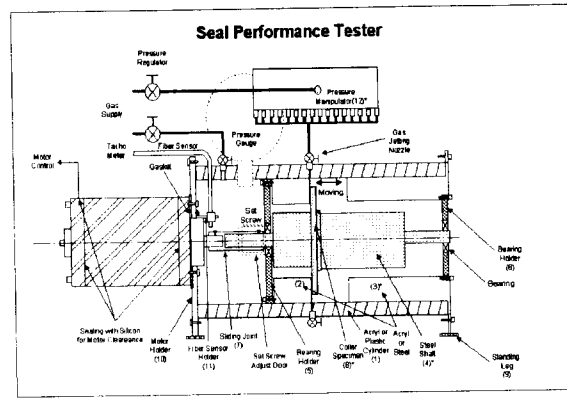


Fig. 2. Seal Performance Testing Equipment

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3에 추속도 변화에 따른 압력강하를 도시하였다. 누설틈새는 0.25 mm, 0.5 mm, 0.75mm, 1.0 mm, 1.25 mm, 1.5 mm 에 대하여 실험하였으며 0.25 mm 일 때의 측정결과를 도시하였다. 실험결과 회전 속도에 의한 영향이 그리 크지 않은 것으로 판명되었다. 그 이유는 밀도가 낮은 기체상의 작동유체에 축회전으로 인하여 실험 초기에서부터 충분한 난류가 생성되어 있기 때문에 원주방향의 속도성분을 갖는 축회전이 축방향의 누설에 큰 영향을 미치지 못하기 때문으로 사료된다.

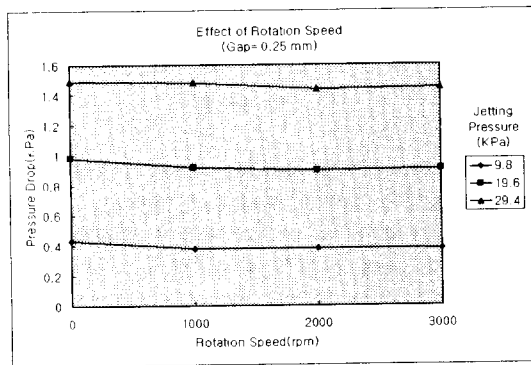


Fig. 3. Effect of Rotation Speed

Fig. 4에 분사압력이 전체 압력강하에 미치는 영향을 도시하였다. 이때의 누설틈새는 0.5mm 일 때의 결과이다. 여기서 누설압력(Leakage Pressure)은 누설량과 직접적으로 관계 있으며 누설압력이 일정하다

는 것은 동일형상에서 누설량이 일정하다는 것을 의미한다. 누설압력이 일정할 경우 분사압(Jetting Pressure)이 커질수록 전체 압력강하가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 저지분사로 인하여 밀봉 성능이 현저히 증대되었으며 밀봉 성능 향상에 매우 효과가 있음을 의미한다.

Fig. 5에 누설압력에 대한 압력강하의 영향을 도시하였다. 누설압력은 그리 크지 않기 때문에 큰 차이를 나타내지는 않지만 누설압력이 증가함에 따라 약간씩 압력강하가 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서 압력강하의 증대는 밀봉 성능의 향상을 뜻하는 것은 아니다. 오히려 이 결과는 시일 양단의 압력차가 일정할 때 분사에 의한 누설량의 차이를 직접적으로 나타내고 있다. 예를 들어, 누설압력이 0.08 KPa로 일정할 경우(Fig. 5의 점선표시) 39.2 KPa의 분사압력을 가하면 약 2.1 KPa의 압력강하가 생성되어 밀봉 성능이 상당히 향상된다는 것을 의미하고 있다.

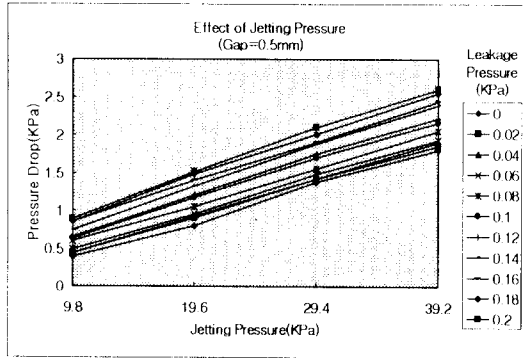


Fig. 4. Effect of Jetting Pressure

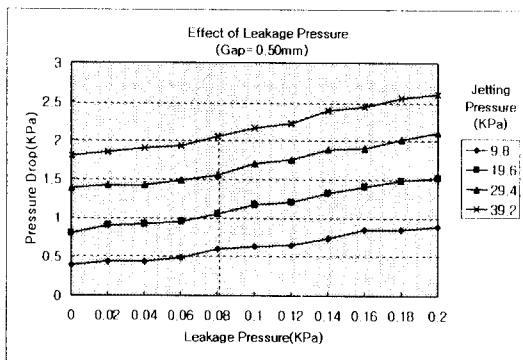


Fig. 5. Effect of Leakage Pressure

Fig. 6에 누설압력이 일정할 때 누설틈새에 대한

압력강하의 영향을 도시하였다. 누설압력의 차가 미소하여 전체 압력강하의 차이도 크지 않지만 전체적으로 누설틈새가 커질수록 압력강하가 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 누설틈새의 증가로 인하여 밀봉 성능이 낮아졌음을 의미한다.

Fig. 7에는 분사압력이 일정할 때 누설틈새에 대한 압력강하의 영향을 도시하였다. 마찬가지로 누설틈새가 커지면 전체 압력강하는 떨어지고 밀봉 성능이 나빠지게 된다. 여기서 특이한 것은 누설틈새가 커질수록 압력강하가 바로 낮아지는 것이 아니라 압력강하가 커지는 구간이 나타나게 되는 현상이다. Fig. 7에서 보면 누설틈새가 0.25 mm 일 때보다 0.5 mm일 때 오히려 압력강하가 크게 나타난다. 이것은 일반 비점촉 시일에서는 볼 수 없던 현상으로 저지분사에 의한 특성을 잘 표현해 주고 있다. 분사노즐의 크기가 1mm이므로 0.25 mm의 누설틈새에서는 분사유동이 효과적으로 침투하지 못하였다가 틈새가 넓어짐에 따라 저지분사의 효과를 나타내게 되어 압력강하가 커지게 되는 것이다. 따라서 이러한 저지분사는 누설틈새가 넓어서 밀봉효과를 기대할 수 없는 곳에서 상당한 효과를 기대할 수 있음을 의미한다. 누설틈새가 더욱 넓어지면 압력강하가 점차 줄어들지만 분사노즐의 개수를 더욱 많이 설치한다면 압력강하의 효과를 보다 높일 수 있을 것이다.

Fig. 8에는 누설압력에 대한 누설량을 측정된 결과를 도시하였다. 이 결과는 누설실험에 설정된 각 누설압력점에서의 누설량을 직접 측정된 것으로 실험 구간 내에서 누설압력의 변화가 누설량의 변화를 직접적으로 표현할 수 있다는 근거를 제시하여 주고 있다. 측정결과를 살펴보면 실험구간 내에서 누설량과 누설압력은 거의 비례적인 관계를 가지고 있으므로 누설압력으로 누설량을 표현할 수 있다는 것을 알 수 있다.

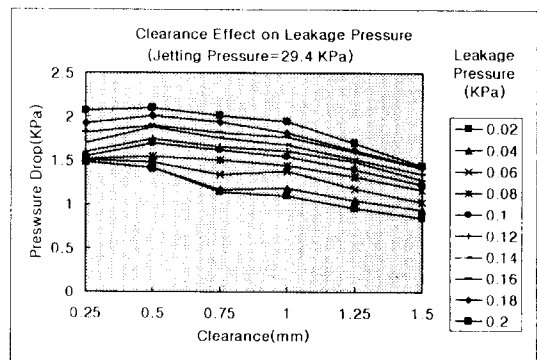


Fig. 6. Clearance Effect on Leakage Pressure

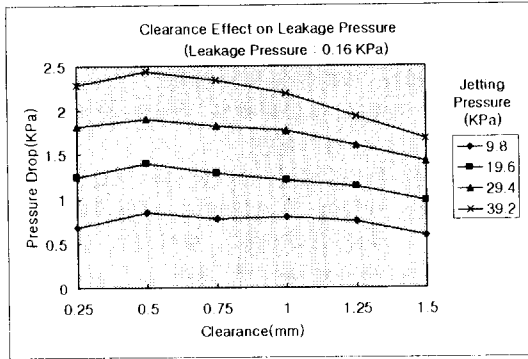


Fig. 7. Clearance Effect on Leakage Pressure

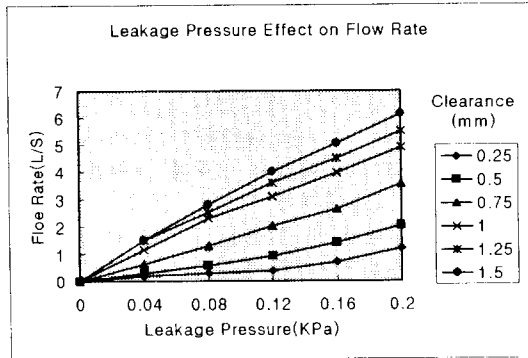


Fig. 8. Leakage Pressure VS. Flow Rate

6. CFD 해석결과 및 비교

Fig. 9에 CFD 해석을 위한 형상윤곽을 도시하였다. 경계조건은 실험장치와 동일하며 원주를 16 등분하여 1개의 포인트 소스(point source)를 갖는 세그먼트 모델로 가정하였다. 해석은 난류유동에 교축과정을 겪는 압축성 유동을 가정하였으며 20 °C 단열조건을 가정하였다. 실험과 비교할 조건은 누설틈새가 0.75 mm, 이고 누설압력이 0.08 KPa 인 경우이다. 이 경우에 측정된 누설유량은 1.3 l/s 이고 이때의 누설 입구측 속도를 계산하면 0.536 m/s 가 된다. 분사유량은 실험에서와 같이 9.8 KPa, 19.6 KPa, 29.4KPa, 39.6 KPa 를 적용하였으며 이 경우에 측정된 분사유량은 각 노즐 당 각각 0.16 l/s, 0.22 l/s, 0.27 l/s, 0.33 l/s 이다. 이 유량에 대한 노즐에서의 속도를 계산하여 CFD 해석시 각 경우의 포인트 소스에 대한 분사속도로 대입한다.

FVM CFD 코드를 이용한 속도분포 결과가 Fig. 10과 Fig. 11에 도시하였다. Fig. 10은 분사가 수반되

지 않은 프로젝트 컬러 타입 시일에서의 속도분포를 나타낸 것이고 Fig. 11은 분사가 가해진 모델에서의 속도분포를 나타낸 것이다. 저지분사 압력은 9.8 KPa 의 포인트 소스로 분사한 경우 이고 나머지 압력강하에 대한 결과는 Fig. 12의 비교도표를 통하여 고찰하기로 한다.

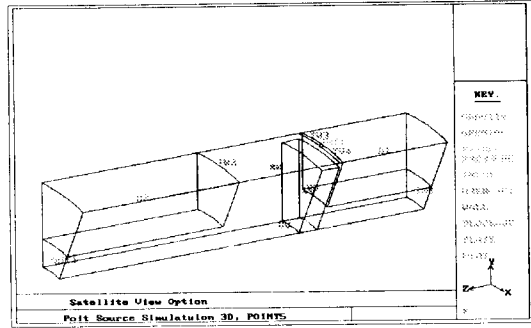


Fig. 9. Geometry of Segment for CFD Analysis

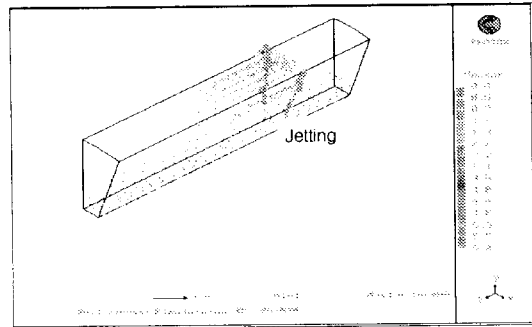


Fig. 10. CFD Velocity Profile in Case of No Jetting

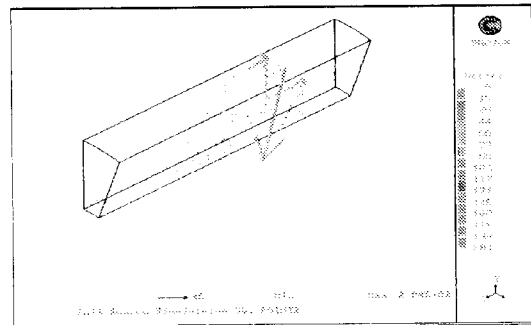


Fig. 11. CFD Velocity Profile in Case of Air Jetting

Fig. 10을 살펴보면 유동의 방향이 컬리에 의하여 바뀔 때 속도의 변화가 급격해지고 컬리의 끝단의 틈새를 빠져나갈 때에도 컬리 외곽쪽으로 속도벡터의 방향이 집중된 것을 알 수 있다. 속도벡터가 집중된 컬리의 끝단에 역방향으로 저지분사를 가하여 양방향 속도벡터를 상쇄시키는 것이 본 논문에서의 성능개선 방안이다. Fig. 11을 살펴보면 누설 속도벡터의 대부분이 저지분사와 만나는 곳에서 발생하며 상당히 빠른 속도로 유동이 빠져나오는 것을 볼 수 있다. 이것은 저지분사로 인하여 유효 누설통로가 좁아진 것을 의미하며 교축과정에 의하여 상당한 압력강하가 이루어 졌음을 암시한다. 저지분사가 가해지지 않을 때의 압력강하가 0.042 KPa 인데 비하여 저지분사를 가할 경우 1.8 KPa 의 압력강하를 나타내어 시뮬레이션 결과에 있어서도 분사를 가할 경우 동일 조건에서의 프로젝트 컬러 타입 보다 뛰어난 밀봉효과가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 12에 0.75 mm 누설틈새를 갖고 각각 9.8 KPa, 19.6 KPa, 29.4 KPa, 39.2 KPa 의 포인트 소스로 분사를 가할 때의 실험 측정값과 해석결과를 비교하여 도시하였다. 실험 측정값과 시뮬레이션 계산결과를 절대값으로 비교하는 것은 큰 의미가 없기 때문에 유량계수를 도입하여 실험값에 근접시키고 상대적인 특성을 비교하였다. 결과에서 알 수 있듯이 실험결과와 시뮬레이션 결과는 그 경향이 잘 일치하며 밀봉성능 향상의 측면에 있어서도 탁월한 효과를 나타내고 있음이 입증되었다.

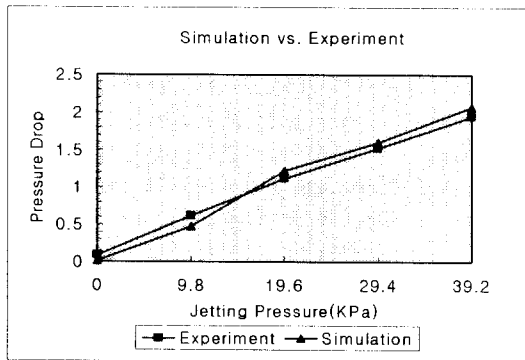


Fig. 12. Pressure Drop of Simulation & Experiment

5. 결 론

본 논문에서는 최근 첨단 주축에 응용되고 있는 프로젝트 컬러 타입 라비린스 시일에 대한 성능 개선

방안을 제시하였으며 CFD 해석과 실험을 통하여 밀봉성능이 향상됨을 검증하였다. 성능 개선 방안으로는 프로젝트 컬러 타입 라비린스 시일에 에어젯 시일의 원리를 도입하여 밀봉성능을 향상시키는 방안을 도입하였다. 밀봉성능을 평가하기 위하여 CFD를 이용한 압축성 난류유동장을 해석하였으며 저지분사로 인하여 밀봉성능이 상당히 증대되는 것을 알 수 있었다. 실험을 위하여 밀봉성능을 평가할 수 있는 성능시험기를 제작하여 실험과 해석을 병행하였다. 밀봉성능을 관찰한 결과 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. 실험 측정치와 계산결과가 밀봉 특성면에서 잘 일치하여 저지분사가 밀봉성능을 향상시킬 수 있음을 입증하였다.

참고문헌

1. 나병철, 전경진, 한동철, "고속 주축용 시일의 누설 특성 해석", 한국정밀공학회지, 제 12권, 제 13호, 12월호, 1995, 131-138
2. H.Stoff, "Incompressible Flow in a Labyrinth Seal", J. of Fluid Mech, 1980, Vol.100, pp.817-829
3. "Seals and Sealing HANDBOOK 2nd Edition", 1986, Trade & Technical Press Limited(1986)
4. 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.
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)