

오일 미스트 윤활환경의 밀봉성능향상을 위한 실험적 연구

나병철*, 전경진**, 한동철***

An Experimental Study on Sealing Performance Improvement for Oil Mist Lubrication Environment

Byung Chul Na*, Keyoung Jin Chun**, Dong-Chul Han***

ABSTRACT

Sealing an oil-air mixture plays important roles to have an enhanced lubrication for high speed spindle. Current work is 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 is 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 are introduced in CFD analysis. The sealing effect of the leakage clearance and the air jet magnitude are 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 becomes larger.

Key Words : high speed spindle(고속주축), labyrinth seal(라비린스 시일), oil mist(오일 미스트), effective leakage clearance(유효누설틈새), restrict jet(저지분사)

1. 서 론

고속 주축(일반적으로 12,000 rpm 이상)에는 윤활 및 냉각 성능을 높이기 위하여 오일젯(oil jet) 또는 오일 미스트(oil mist) 방식의 특수한 윤활방식이 사용되며 이에 따라 오일젯 또는 오일 미스트의 누설을 방지할 수 있는 밀봉기술⁽¹⁾이 성공적인 윤활시스템을 구축하는 기본요소로 대두되고 있다. 고속 주축에는 작동 특성상 비접촉식

시일이 사용되는데 기존 유형에 대한 연구를 통하여 고속 주축용 시일에는 프로텍트 컬러(protective collar) 타입의 라비린스(labyrinth) 시일과 에어 젯(air jet) 타입 시일이 우수한 효과를 나타내는 것으로 평가되었다⁽²⁾. 일반적으로 프로텍트 컬러 타입의 라비린스 시일은 컬러와 캐비티에 의하여 최소 누설틈새가 유지되도록 설계되어야 양호한 밀봉성능을 기대할 수 있다. 따라서 누설틈새의 크기는 기계의 열팽창, 진동 및 가공오차등을 고려하

* 자동차 부품연구원 부품개발연구부

**: 한국생산기술연구원 생산자동화기술개발센터

*** 서울대학교 기계설계학과

여 직접 접촉이 이루어지지 않는 최소거리가 되도록 설계 한다⁽³⁻⁶⁾. 그러므로 이러한 누설틈새는 물리적으로 더 이상 근접시킬 수 없는 거리이기도 하다.

본 논문에서는 성능이 우수한 것으로 판단되는 프로텍트 컬러 타입 라비린스 시일에 에어 젯 타입의 밀봉 메커니즘이 중첩될 수 있도록 형상을 조합하여 기존 프로텍트 컬러 타입 라비린스 시일의 밀봉성능을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하였다. 실험을 통한 밀봉 성능을 비교와 함께 CFD(Computational Fluid Dynamics)^(7,8) 해석을 수행하여 실험결과를 검증하였다. CFD 해석에는 상용 CFD code인 PHOENICS(version 2.1)가 사용되었다.

고속주축의 윤활에는 오일젯 또는 오일미스트 방식의 윤활기술이 적용되기 때문에 작동환경은 공기와 오일입적이 포함된 2상(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.

2. 기본구조 및 작동원리

Fig. 1에 연구모델의 형상을 도시하였다. 이 형상은 캐비티 선단에 최소간극이 생성되도록 컬러를 설치하고 누

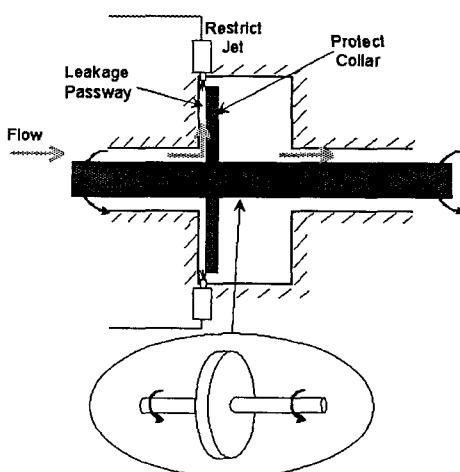


Fig. 1 Applied Seal Model

설유동의 방향에 반대되는 방향으로 공기를 분사하여 밀봉효율이 배가될 수 있도록 설계한 형상이다. 이 형상의 밀봉원리는 프로텍트 컬러 타입의 교축에 의한 압력강하 효과와 에어 젯 타입의 유효누설틈새 감소의 효과를 동시에 유발시켜 밀봉성을 향상시키는 것이다. 이 형상은 진동, 열팽창 등으로 인하여 프로텍트 컬러 타입의 누설간극을 더 이상 좁힐 수 없는 경우에도 실질적으로 누설틈새를 좁게 만드는 효과를 나타내게 되어 성능향상을 기대할 수 있다. Fig. 2에 저지분사에 의한 누설간극 감소의 효과를 도시하였다. 주축에 부착된 프로텍트 컬러로 캐비티의 유동입구측에 좁은 누설 통로를 형성하도록 하는데, 이 누설통로에 유동 방향과 반대 방향으로 직접 저지분사(restrict jet)를 가하면 분사된 저지분사의 양 만큼 누설통로를 점유하게 되어 실질적으로 누설통로를 좁게 한 것과 같은 효과를 나타내게 된다. 고속주축에서와 같이 필연적으로 누설틈새가 생성되는 비접촉 시일의 경

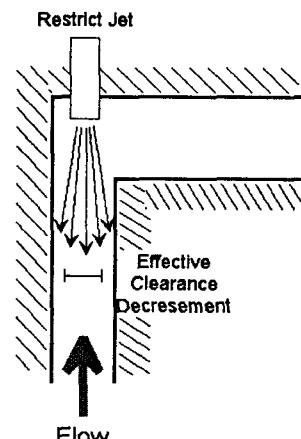
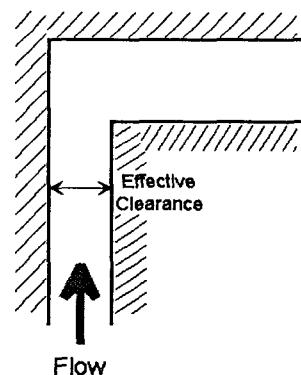


Fig. 2 Effective Clearance Decrease

우회전하는 축과 고정 지지부 사이에 어느 정도 넓은 틈새가 존재하더라도 분사에 의하여 우수한 밀봉성능을 얻을 수 있으며 누설량에 따라 적절하게 저지력을 조절할 수 있는 구조이다.

3. 성능실험장치 및 시편

밀봉성능 시험을 위하여 Fig. 3과 같은 실험장치를 제작하였다. 이 실험장치는 오일 미스트 윤활환경을 고려하여 오일 분무장치를 시일 입구측에 장착하여 2상의 작동 분위기를 조성하였다. 누설압력은 시일 입구측에 정밀 압력센서를 부착하여 1 Pa 까지 측정이 가능하도록 하였고 누설틈새의 조정은 나사 스크류 조절기를 이용하여 0.01 mm 까지 조절가능하도록 하였다. 저지 분사를 가하기 위하여 캐비티와 커리 선단사이 누설틈새에 원주 방향으로 16개소의 공기 분사노즐을 장착하여 저지분사를 가하도록 하였다. 누설압력은 본체의 정밀 압력센서를 통하여 누설압력을 측정하고 정밀 압력조절계를 이용하여 조절한다. 고압의 분사압력은 별도의 고압 압력 조절기를 이용하여 압력조절용기에 공급되며 16개의 분사노즐을 통하여 본체에 분사된다.

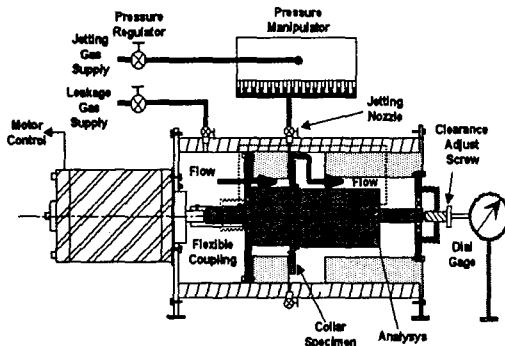


Fig. 3 Seal Performance Testing Equipment

4. 누설 실험조건 및 실험방법

축회전이 누설에 미치는 초기 영향을 알아보기 위해 모터의 속도를 0, 1000, 2000, 3000 rpm으로 조정하고 시일전후의 압력강하를 측정하였다. 본 연구에서는 저속 주축의 오일 또는 그레이스 윤활과는 다른 고속주축 윤활의 작동분위기(비접촉 밀봉방식 및 오일 미스트 작동유

체)를 고려하여 실험을 수행하였다.

커리는 직경이 98 mm로 이때 캐비티와 커리 끝단의 틈새는 2 mm이다. 캐비티와 커리 선단과의 틈새는 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm, 1.0 mm, 1.25 mm, 1.50 mm 까지 조정하여 누설틈새가 누설에 미치는 영향을 관찰하였다.

분사가 누설에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 초기 누설압력을 일정하게 고정하고 분사압력(압력조절용기의 압력)을 9.8 KPa, 19.6 KPa, 29.4 KPa, 39.2 KPa, 49.0 KPa로 조정하여가며 실험하였다. 초기 누설압력은 0~200 Pa까지 20 Pa 씩 증가시켜 가며 각 누설압력에서 분사압력의 영향을 관찰하였다.

본 실험에서는 축방향 누설에 대한 누설특성 및 공기분사의 영향등을 관찰하기 위하여 누설틈새, 분사압력, 누설압력을 변화시켜가며 시일 양단에서의 압력강하를 측정하였다. 일반적으로 시일의 해석에는 일정한 누설량을 가정하고 이때 양단에 발생하는 압력차를 계산하여 밀봉성능을 판단한다^[9,10]. 본 실험에 있어서도 누설량을 일정하게 고정하고 입출구 양단에서의 압력강하를 측정하여 밀봉성능을 평가하였으며 CFD 해석결과와의 비교, 검증하였다.

5. 실험결과 및 고찰

Fig. 4에 축속도 변화에 따른 압력강하를 도시하였다. 누설틈새는 0.25 mm, 0.5 mm, 0.75 mm, 1.0 mm, 1.25 mm, 1.5 mm에 대하여 실험하였으며 0.25 mm 일 때의 측정결과를 도시하였다. 실험결과는 회전속도에 의한 영향이 거의 없는 것으로 확인되었다. 작동유체의 밀도가 높을 경우 원심력의 영향으로 캐비티 내에 작동유

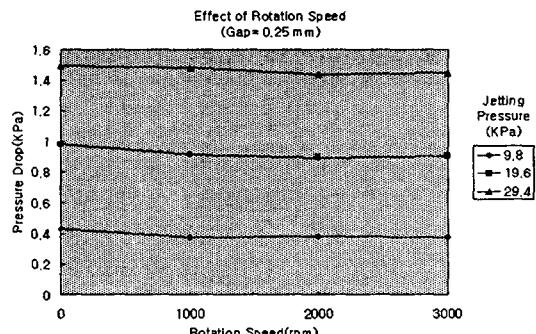


Fig. 4 Effect of Rotation Speed

체를 고립시켜 밀봉효과의 향상을 기대할 수 있으나 밀도가 낮은 기체상태의 작동유체는 이러한 효과를 기대할 수 없기 때문에 축 회전이 압력강하에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

Fig. 5에 분사압력과 누설압력이 전체 압력강하에 미친 영향을 도시하였다. 이때의 누설틈새는 0.5 mm 일 때의 결과이다. 여기서 누설압력(Leakage Pressure)은 누설량과 직접적으로 관계 있으며 누설압력이 일정하다는 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 밀봉성능이 현저히 증대되었으며 밀봉성능 향상에 매우 효과가 있음을 의미한다. 또한 Fig. 5는 정량적으로 증대되는 압력강하의 크기를 나타내어주고 있다. 예를 들어, 누설압력이 0.08 KPa로 일정할 경우(Fig. 5의 점선표시) 39.2 KPa의 분사압력을 가하면 약 2.1 KPa의 압력강하가 생성되어 분사가 없을 시의 압력강하(0.08 KPa) 보다 밀봉성능이 상당히 향상된다는 것을 나타내고 있다.

Fig. 6에는 분사압력이 일정할 때 누설틈새에 대한 압력강하의 영향을 도시하였다. 마찬가지로 누설틈새가 커지면 전체 압력강하는 떨어지고 밀봉성능이 나빠지게 된다. 여기서 특이한 것은 누설틈새가 커질수록 압력강하가 바로 낮아지는 것이 아니라 압력강하가 커지는 구간이 나타나게 되는 현상이다. Fig. 6에서 보면 누설틈새가 0.25 mm 일 때보다 0.5 mm일 때 오히려 압력강하가 크게 나타난다. 이것은 일반 비접촉 시일에서는 볼 수 없

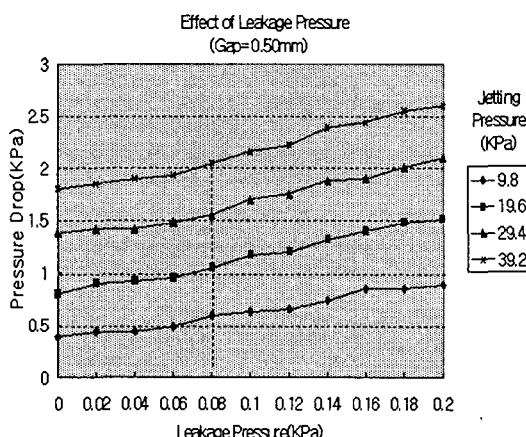


Fig. 5 Effect of Leakage Pressure

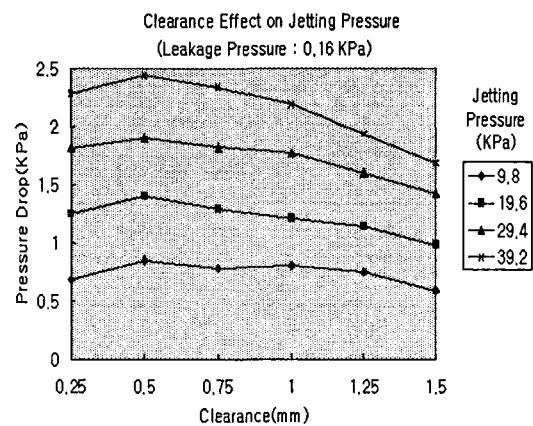


Fig. 6 Clearance Effect on Leakage Pressure

던 현상으로 저지분사에 의한 특성을 잘 표현해 주고 있다. 분사노즐의 크기가 1 mm이므로 0.25 mm 의 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. 7에는 분사노즐 개수에 대한 압력강하 특성을 도시하였다. 실제 설계측면에서는 저지분사가 포인트 소스(point source)로 가해지기 때문에 실제 제작의 측면에서 이용할 수 있도록 이 포인트 소스의 개수가 밀봉특성에 미치는 영향을 측정하였다. 실험 결과 압력강하에 대

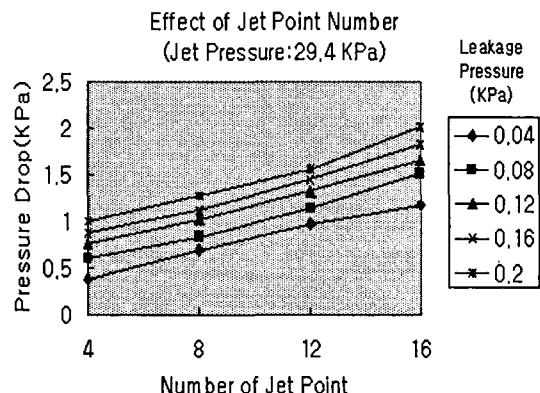


Fig. 7 Effect of Jet Point Number

한 분사노즐 개수의 경향은 거의 비례적인 관계를 나타내어 분사노즐의 개수가 많을수록 밀봉효과가 좋아짐을 알 수 있다. 분사노즐 개수의 증가는 분사압력이 시일내의 압력보다 월등히 클 경우 분사유량의 증가를 의미하기 때문에 분사유량이 클수록 유효 누설틈새를 더 많이 점유하게 되어 밀봉효과가 더 우수하여지게 됨을 알 수 있다.

6. CFD 해석결과 및 비교

해석에는 상용 CFD code인 PHOENICS(version 2.1)가 사용되었으며 Fig. 8에 CFD 해석을 위한 형상윤곽을 도시하였다. 경계조건은 실험장치와 동일하며 원주를 16 등분하여 1개의 포인트 소스(point source)를 갖는 세그먼트 모델로 가정하였다. 원주 좌표계를 도입하였으며 총 3840개의 불균일한 격자를 구성하여 계산하였다. 해석은 난류유동($\kappa-e$ 모델)에 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 이를 시일 입구측에서의 유입속도로 환

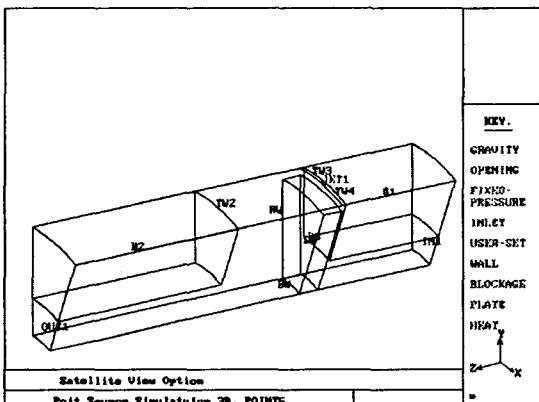
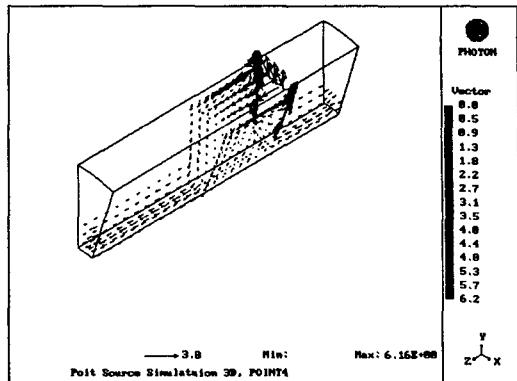


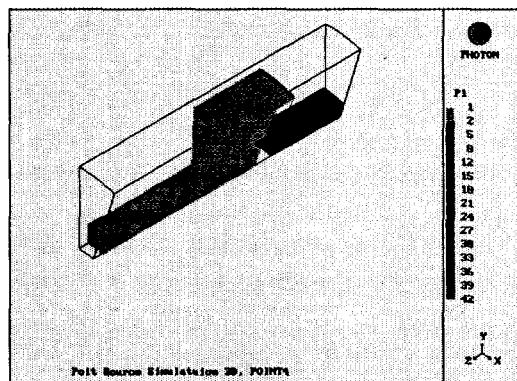
Fig. 8 Geometry of Segment for CFD Analysis

산한 0.536 m/s 를 CFD 해석시의 경계조건으로 대입하였다. 분사유량은 실험에서와 같이 9.8 KPa , 19.6 KPa , 29.4 KPa , 39.2 KPa 를 적용하였으며 이 경우에 측정된 분사유량은 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 대입하였다.

CFD 코드를 이용한 해석결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 도



(a) Velocity Profile

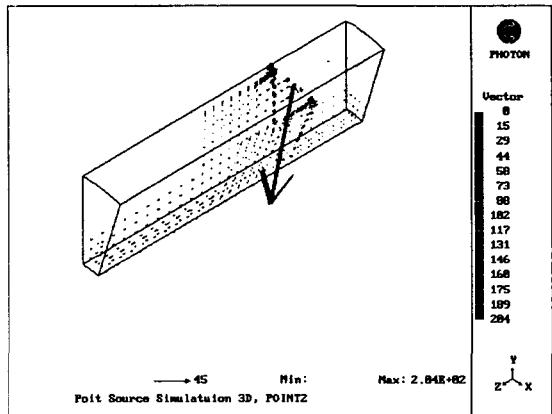


(b) Pressure Distribution

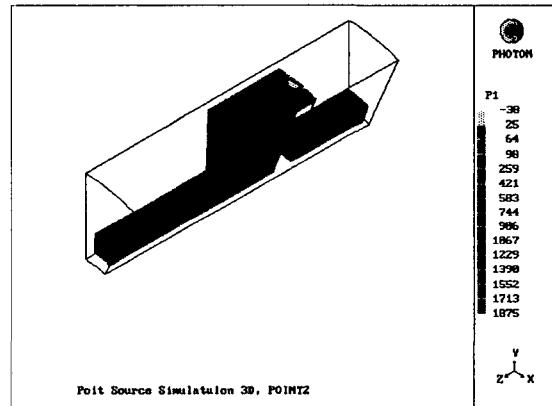
Fig. 9 CFD Results in Case of No Jetting

시하였다. Fig. 9의 (a)는 분사가 수반되지 않은 프로텍트 컬러 탑입 시일에서의 속도분포를 나타낸 것이고 (b)는 이 때의 압력분포를 도시한 것이다. Fig. 10의 (a)는 분사가 가해진 개선된 연구모델에서의 속도분포를 나타낸 것이고 (b)는 이때의 압력분포를 도시한 것이다. 저지분사 압력은 9.8 KPa 의 포인트 소스로 분사한 경우이다.

Fig. 9의 (a)를 살펴보면 유동의 방향이 컬러에 의하여 바뀔 때 속도의 변화가 급격해지고 컬러의 끝단의 틈새를 빠져나갈 때에도 컬러 외곽 쪽으로 속도벡터의 방향이 집중된 것을 알 수 있다. Fig. 9의 (b)를 살펴보면 기존의 프로텍트 컬러 탑입 라비린스 시일은 대부분의 압력강하가 컬러에 의하여 유동의 방향이 바뀔 때 발생한다는 것을 알 수 있다. 즉 컬러와 캐비티에 의해 생성된 최소 누설틈새를 통과할 때의 압력강하 효과로 밀봉이 이루어지게 된다. Fig. 10의 (a)를 살펴보면 누설 속도벡터의 대



(a) Velocity Profile



(b) Pressure Distribution

Fig.10 CFD Results in Case of Air Jetting

부분이 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 이루어졌음을 나타낸다. 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 프로텍트 컬러 타입 보다 뛰어난 밀봉효과가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 11에 0.75 mm 누설틈새를 갖고 각각 9.8 KPa, 19.6 KPa, 29.4 KPa, 39.2 KPa의 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 비교하였

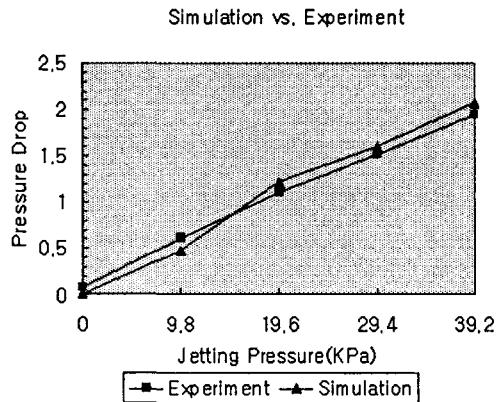


Fig.11 Pressure Drop of Simulations & Experiments

다. 결과에서 알 수 있듯이 실험결과와 시뮬레이션 결과는 잘 일치되는 경향을 나타내고 있으며 밀봉성능 향상의 측면에 있어서도 매우 효과적임을 알 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 최근 첨단 주축에 응용되고 있는 라비린스 시일의 성능 개선 방안을 제시하였으며 CFD 해석과 실험을 통하여 밀봉성능이 향상됨을 검증하였다. 성능 개선 방안으로는 프로텍트 컬러 타입 라비린스 시일에 에어젯 시일의 원리를 도입하여 밀봉성능을 향상시키는 방안을 도입하였다. 밀봉성능을 평가하기 위하여 CFD를 이용한 입축성 난류유동장을 해석하였으며 저지분사로 인하여 밀봉성이 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 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 밀봉성이 향상될 수 있음을 알 수 있었다. 분사노즐의 수는 실험구간 내에서 밀봉성능과 거의 비례적인 관계를 나타내었으며 수가 증가할수록 밀봉성능이 향상되는 것을 알 수 있었다. 실험 측정치와 계산결과가 밀봉 특성면에서 잘 일치하여 저지분사가 밀봉성능 향상에 효과적임을 입증하였다.

참 고 문 헌

1. 나병철, 전경진, 한동철, “고속 주축용 시일의 누설 특성 해석”, 한국정밀공학회지, 제12권, 제13호, 12월호, pp. 131-138, 1995.
2. “Seals and Sealing HANDBOOK 2nd Edition”, 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. Stoff, H., “Incompressible Flow in a Labyrinth Seal,” Journal of Fluid Mechanics, Vol. 100, pp. 817-829, 1980.
5. 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, pp. 19-25, March 1986.
6. H.Stoff, “Incompressible Flow in a Labyrinth Seal”, J. of Fluid Mech, Vol.100, pp. 817-829, 1980.
7. “PHOENICS Traning Course Notes CHAM TR/300”, CHAM Limited, 1990.
8. Partankar, “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Spalding, 1980.
9. 이관수, 김우승, 김기연, 김창호, “분사를 수반하는 평시일 내의 유동해석”, 기계공학회 논문집, 제6 권, 제4호, pp795-802, 1992.
10. Byung Chul Na, Keyoung Jin Chun, Dong-Chul Han, “Analysys of Seal Leakage Characteristics for High Speed Spindle”, The 6th International Symposium on Pheonomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. 1, pp. 542-551, Feb., 1996.