

공기분사가 라비린스 시일의 성능개선에 미치는 영향

나병철* · 전경진* · 한동철**

*생산기술연구원 생산시스템센터

**서울대학교 기계설계학과

The Air Jet Effect of Sealing Performance Improvement on Labyrinth Seal

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

**Automation & Machining System Research Center, KITECH*

***Dept. of Mechanical Design & Production Engineering, Seoul National Univ.*

Abstract—The labyrinth seal is one of the widely used non-contact type mechanical seal. Current work was emphasized on the investigation of the air jet effect on the labyrinth seal. To improve the sealing capability of conventional labyrinth seal, air jet was injected against through the leakage flow. In this study, both of the numerical analysis by CFD (Computational Fluid Dynamics) and the experimental measurement were carried out. 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 in the experiment. The reason of the enhanced sealing was explained as a reduction of effective clearance by jetting air. As a result, the air jet could reduce the effective clearance with a wide range of leakage clearance.

Key word—labyrinth seal, air jet, effective clearance.

1. 서 론

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 컬러(collar)를 설치하여 강제적으로 흐름의 방향을 전환시키는 유형(protective collar type)도 각종 공작기계에 널리 사용되고 있다[3]. 라비린스 시일의 효율은 틈새에 반비례하므로 틈이 작을수록 효율이 좋지만 작동 중에 하우징과 회전축간의 직접 접촉은 피할 수 있을 정도는 되어야 한다. 시일의 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 에어시일을 많이 사용하는 추세이다[7-8].

일반적으로 프로젝트 컬러 타입의 라비린스 시일은 컬러와 케비티에 의하여 최소 누설틈새가 유지되도록 설계되어야 양호한 밀봉성능을 기대할 수 있다[9]. 이 누설틈새는 기계의 열팽창, 진동 및 가공오차를 고려하여 접촉이 이루어지지 않을 최소거리를 유지한다. 따라서 이러한 누설틈새는 물리적으로 더 이상 근접시킬 수 없는 거리가기도 하다. 이러한 누설틈새를 통한 기체의 누설을 효과적으로 방지하기 위하여 본 연구에서는 기존에 사용되던 라비린스 시일에 에어시일의 원리를 도입하여 밀봉성능을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하였다. 에어시일은 단순 평 시일에 수직

으로 공기분사를 가하여 내부 유체의 누설을 방지하고 동시에 외부의 이물질 침입을 막기 위한 방법으로 공기분사에 의한 누설저지 효과를 라비린스 시일에 적용하여 보다 밀봉성능이 뛰어난 저지형 라비린스 시일의 연구모형을 제시하고 그 누설특성 및 밀봉성능 향상을 규명하고자 한다. 누설특성 및 밀봉성능을 규명하는 데는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 해석을 통하여 성능향상 정도를 정량화 하였으며 밀봉성능 시험기를 제작하여 그 효과를 검증하였다. 이러한 프로젝트 컬러 타입 시일의 성능향상은 공작기계, 압축기, 가스 터빈 및 전기전자 부품에 사용되어 제품의 성능향상에 기여할 것으로 생각된다.

2. 연구모형 및 성능해석

2-1. 연구모형에 대한 해석

라비린스 시일과 에어젯 타입의 구조를 기본으로 새로운 연구모형을 제시하였다. Fig. 1에는 프로젝트 컬러타입 라비린스 시일에 공기분사가 가해진 연구모형의 형상을 도시하였다. 이 형상은 캐비티 선단에 유동을 저지할 수 있는 컬러를 설치하고 캐비티의 끝단에는 컬러에 의해 방향이 전환된 누설유동의 방향에 반대되는 방향으로 공기를 분사하여 밀봉효율을 배가시킬 수 있도록 설계한 형상이다. Fig. 2에 저지분사에 의한 누설간극 감소의 효과를 도시하였다. 주축에 부착된 프로젝트 칼라로 캐비티의 유동입구측에 좁은 누설 통로를 형성하여 작동유체의 유동을 저지하도록 하는데, 이때 프로젝트 칼라와 하우징에 의해 형성되는 누설통로에 누설유체가 흐를 때 Fig. 2에서와 같이

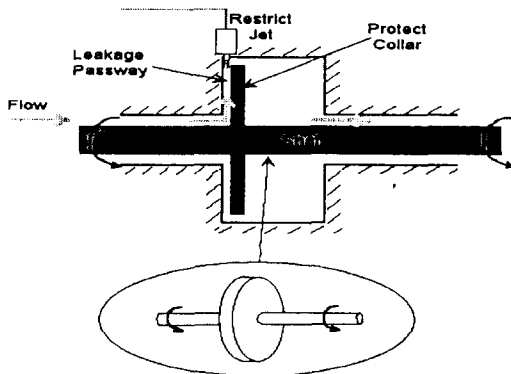


Fig. 1. Applied seal model.

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 나타낸다. 최소 간극은 캐비티 선단과 컬러 사이에서만 생성되도록 하고 회전하는 축과 고정 지지부 사이에 어느 정도 넓은 틈새가 존재하더라도 분사에 의하여 우수한 밀봉성능을 기대할 수 있으며 필요에 따라 적절하게 저지력을 조절할 수 있어서 누설량 조절이 가능한 구조가 된다.

2-2. 해석결과 및 성능비교

연구모형에 대한 유동해석을 위하여 사용된 형상윤곽(ouline)과 격자점(grid)이 Fig. 3에 도시되어 있다. 짙은 실선은 해석용 경계조건이고 흐린 점선은 적분이 수행될 격자점을 나타내었다[10]. 모델링에는 4800개

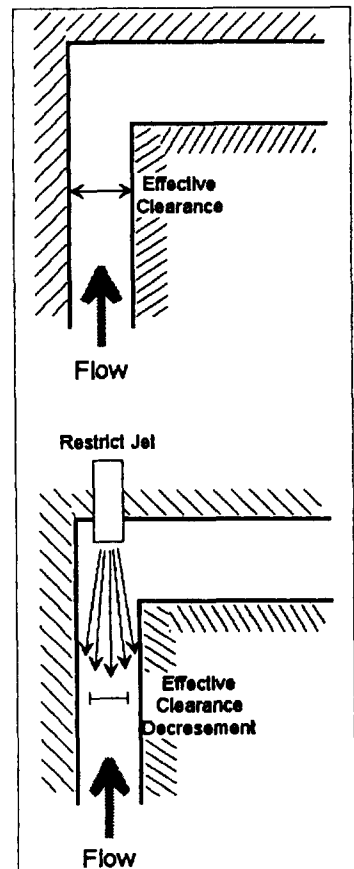


Fig. 2. Effective clearance decrease.

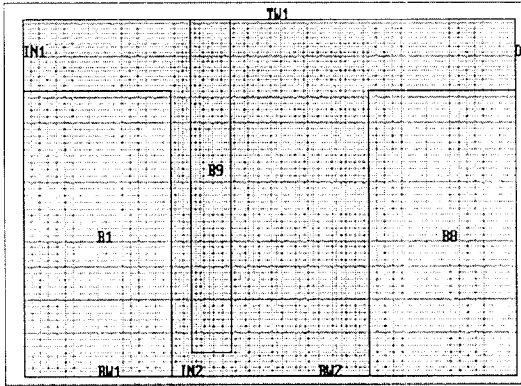


Fig. 3. CFD grid of applied model.

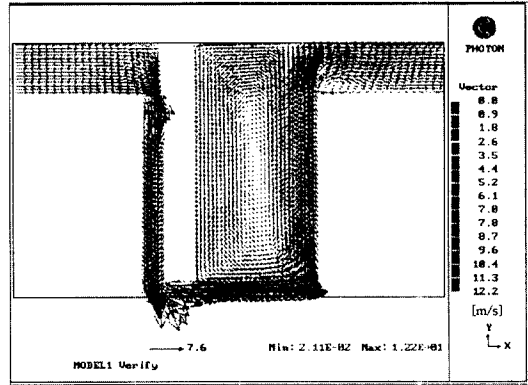


Fig. 4. Velocity profile of protective collar type.

의 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. 유동해석은 2차원 유동으로 계산하였으며 축원주길이에 비하여 틈새가 매우 작기 때문에 2차원으로의 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. 4-Fig. 7에 도시되어 있다[11]. Fig. 4, Fig. 5는 분사가 수반되지 않는 프로젝트 컬러 타입에서의 속도와 압력 분포 결과이고 Fig. 6, Fig.7은 저지분사가 가해진 연구모델에서의 속도와 압력분포 결과를 도시한 것이다. Fig. 4를 살펴보면 유동의 방향이 컬러에 의하여 바뀔 때 속도의 변화가 급격해지고 컬러의 끝단의 틈새를 빠져나갈 때에도 컬러 외곽쪽(아래 방향)으로 속도벡터의 방향이 집중된 것을 알 수 있다. 속도벡터가 집중된 컬러의 끝단에 역방향으로 저지분사를 가하여 양방향 속도벡터의 상쇄효과를 발생시키도록 한 것이 개선된 연구모델이다. Fig. 6을 살펴보면 기존의 프로-

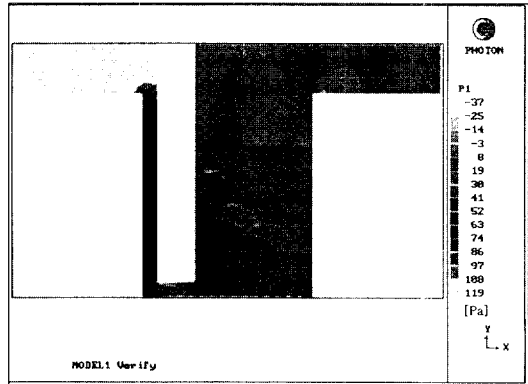


Fig. 5. Pressure distribution of protective collar type.

젝트 컬러 타입은 대부분의 압력강하가 컬러에 의하여 유동의 방향이 바뀔 때 발생하는 것을 알 수 있다. 즉 컬러와 케비티에 의해 생성된 최소 누설틈새를 통과할 때의 압력강하 효과로 밀봉이 이루어지는 것을 뜻한다. Fig. 6을 살펴보면 누설유량 속도벡터 성분의 거의 대부분이 저지분사와 만나는 곳에서 발생하며 상당히 빠른 속도로 유동이 빠져나오는 것을 알 수 있다. 이것은 저지분사로 인하여 유효 누설통로가 좁아진 것을 의미하며 교축과정에 의하여 상당한 압력강하가 이루어 졌을 것임을 나타낸다. Fig. 7을 보면 이러한 효과를 확인할 수 있다. 저지분사가 작용하는 곳에서 큰 압력강하가 발생하였으며 Fig. 5에서와는 달리 유동 입구측에서 유동의 방향이 바뀌고 최소 틈새가 형성되어도 거의 압력변화가 없는 것을 볼 수 있다. 이것은 저지분사로 인한 압력강하 효과가 매우 큼을 의미하며 효과적으로 누설을 저지할 수 있음의

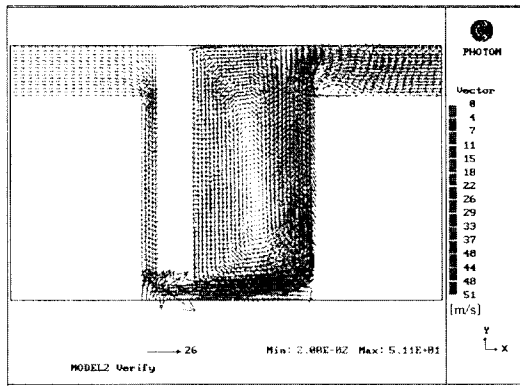


Fig. 6. Velocity profile of applied model with air jetting.

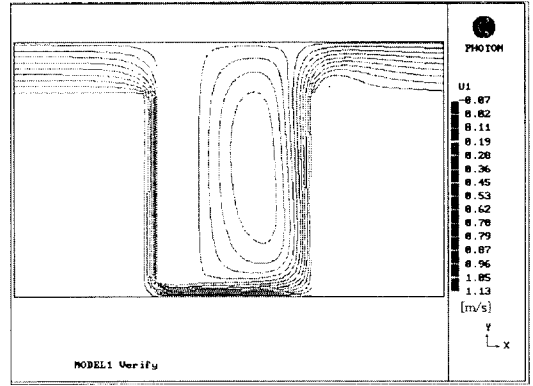


Fig. 8. Streamline of protective collar type.

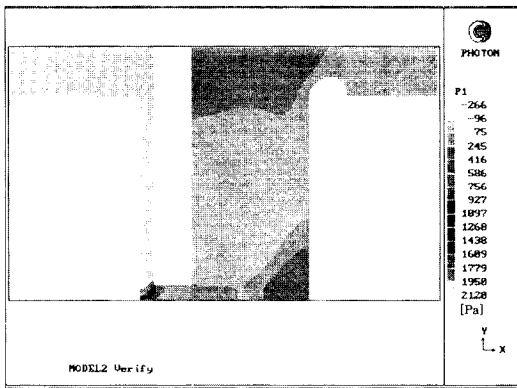


Fig. 7. Pressure distribution of advanced model with air jetting.

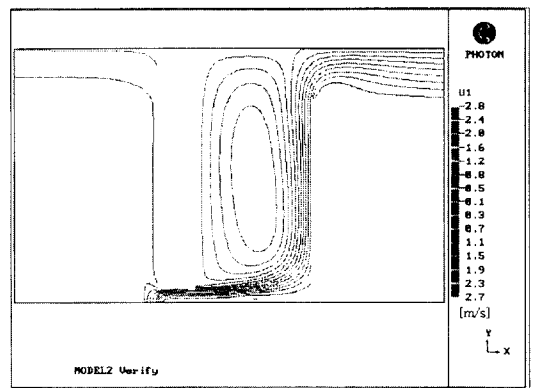


Fig. 9. Streamline of applied jetting model.

미한다. 저지분사가 가해지지 않을 때의 압력강하 (Fig. 5)가 119 Pa 인데 비하여 저지분사를 가할 경우 2120 Pa 의 압력강하를 나타내어 분사를 가할 경우 동일 조건에서의 프로텍트 컬러타입 보다 뛰어난 밀봉효과가 있는 것으로 판명되었다.

Fig. 8, Fig. 9에는 각각 분사가 가해지지 않을 때와 분사가 가해질 때의 유선(streamline)을 도시하여 놓았다. 분사가 가해지지 않은 Fig. 8을 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. 9의 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. 또한 이 유효누설 틈새는 외부에서 가하는 저지 분사량에 따라 조절이 가능하므로 요구되는 밀봉성능을 조절할 수 있다는 이점도 있다.

3. 성능실험

3-1. 성능실험장치

이제까지 논의된 해석결과를 검증하고 개선된 연구 모델의 밀봉성능 평가를 위하여 Fig. 10과 같은 밀봉성

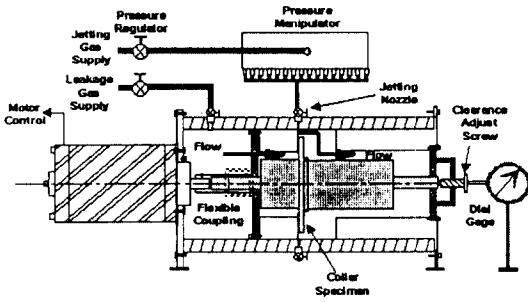


Fig. 10. Control diagram of testing equipment.

능 시험기를 제작하였다. 이 실험장치에 사용된 모터는 DC 모터로 회전수 조절이 가능하며 본 실험에서는 축회전으로 인한 난류를 조성하기 위하여 실험 운전속도를 0-3000 rpm 사이로 선정하였다. 축회전은 누설통로에 난류를 유발시키기 위하여 조성되는 실험조건이며 이 난류의 강약에 따라 누설유동에 영향을 미칠 수도 있으므로 축 회전조건을 고려하였다. 실험장치의 하우징은 아크릴로 제작하여 케비티와 컬러의 누설간극을 확인할 수 있도록 하였으며 저지분사 및 회전으로 인한 컬러 미끄럼 등의 오작동을 관찰할 수 있도록 하였다. 모터 축에는 비접촉 광센서를 부착하여 속도를 측정하도록 하였으며 누설유량은 분사가 없을 시 출구에서의 유속을 측정하여 환산하였다. 시일 입구에는 정밀 압력센서(분해능 1 Pa)를 장착하여 누설을 유발시키는 미소압력을 측정하도록 하였다. 공기분사를 가하기 위하여 케비티와 컬러 선단의 최소간극이 발생하는 위치에 분사노즐을 장착하였다. 분사는 분사직경 1 mm의 밸브가 달린 노즐을 원주방향으로 16개 장착하였으며 분사되는 압력을 균일하게 하기 위해 대용량 압력조정용기(pressure manipulator)를 설치하고 이곳에서 분사노즐로 균일하게 분사압력이 전달될 수 있도록 조정하였다. 분사압력의 조절은 분사측 압력조절기(pressure regulator)를 이용하여 압력조정용기의 압력을 조정함으로써 동시에 16곳의 분사압력을 조절할 수 있도록 하였으며 압력조정용기에 부착된 압력 지지계를 이용하여 분사압력을 확인하였다.

컬러와 케비티 선단에서의 최소간극 조절은 회전축의 끝에 베어링 볼을 장착한 조정 스크류와 다이얼게이지를 부착하여 회전중에 0.01 mm 까지 누설간극이 조정되도록 하였다. 축 회전시 본 장치의 최대 접근 간극은 누설유량이 공급될 경우 0.02 mm 까지 근접

이 가능한데 너무 틈새가 좁을 경우 외력에 의한 직접 접촉의 우려와 불안정 진동특성을 유발시킬 수 있으므로 본 실험에서는 0.25 mm에서 1.5 mm 까지 누설 틈새를 조정하였다.

실험장치에는 2개소에서의 압력공급이 필요하다. 하나는 누설압력을 발생시키기 위한 누설 압력 공급(leakage gas supply)이 필요하며 미소압력에 대한 정밀조절이 요구된다. 누설압력의 조절은 정밀 압력조절기를 이용하여 누설분사를 통하여 이루어지며 본체의 정밀 압력센서를 통하여 누설압력을 확인한다. 일단 본체에 공급된 누설유량은 전부 베어링 지지부를 지나 누설입구측 통로를 통과하게 되고 컬러에 의해 생성되는 최소간극을 통과하여 외부로 방출된다. 또 하나는 고압의 분사압력이 필요한데 별도의 고압 압력 조절기를 이용하여 압력조절용기에 공급된다. 공급된 압력은 16개의 분사노즐을 통하여 본체에 분사되고 누설유량과 함께 외부로 방출된다.

3-2. 누설 실험조건 및 실험방법

축회전이 누설에 미치는 초기 영향을 알아보기 위해 모터의 속도를 0, 1000, 2000, 3000 rpm으로 조정하고 시일전후의 압력강하를 측정하였다. 이때는 초기에 생성되는 난류의 영향을 알아보기 위한 것으로 누설유량이 없는 상태에서 공기분사에 의한 압력강하와 모터회전수 변화에 대한 영향을 알아보았다.

케비티와 컬러 끝단의 틈새는 2 mm이고 케비티와 컬러 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 (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.

CFD 계산에서의 가정과 마찬가지로 누설량을 일정하게 가정하고 양단 압력강하의 크기를 밀봉성능의 평가기준으로 삼았다. 누설이 누설입구측의 압력이 높아져서 발생된다는 원리를 고려할 때에 밀봉성능을 평가하기 위하여는 누설량을 일정하게 가정하고 압력

을 측정하는 방법이 가장 일반적이고 신뢰성 있는 측정방법이 된다. 본 실험에서와 같이 분사가 가해질 경우 압력을 일정하게 유지하고 누설량을 측정하는 것은 실험조건을 형성하기도 매우 어려울 뿐 아니라 측정에도 오차가 많이 발생하게 된다. 따라서 본 실험은 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 압력유출공간을 모두 밀폐공간으로 만들어 고압으로 분사된 누설유량은 모두 외부로만 유출될 수 있도록 하여 가정을 만족시키도록 하였다.

3-3. 실험결과 및 고찰

Fig. 11에 분사압력이 전체 압력강하에 미치는 영향을 도시하였다. 여기서 누설압력(Leakage Pressure)은 누설량과 직접적인 관계가 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 증대되었음을 의미한다.

Fig. 12에 누설압력에 대한 압력강하의 영향을 도시하였다. 누설압력은 그리 크지 않기 때문에 큰 차이를 나타내지는 않지만 누설압력이 증가함에 따라 약간이나마 압력강하가 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서 압력강하의 증대는 밀봉성능의 향상을 뜻하는 것은 아니다. 오히려 이 결과는 시일 양단의 압력차가 일정

할 때 분사에 의한 누설량의 차이를 직접적으로 나타내고 있다. 즉, 압력강하가 일정할 경우 분사압력이 커질수록 낮은 누설압력을 나타내게 되고 궁극적으로 누설유량이 감소함을 나타낸다.

Fig. 13에 축 회전에 대한 영향을 도시하였다. 실험 결과 축 회전은 전체 압력강하에 그리 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 작동유체가 기체일 경우 누설 초기에서부터 충분한 난류가 생성되기 때문에 축 회전 증가로 인한 난류증가의 영향을 기대할 수 없기 때문으로 생각된다.

Fig. 14에 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 밀봉성능이 낮아졌음을 의미한다.

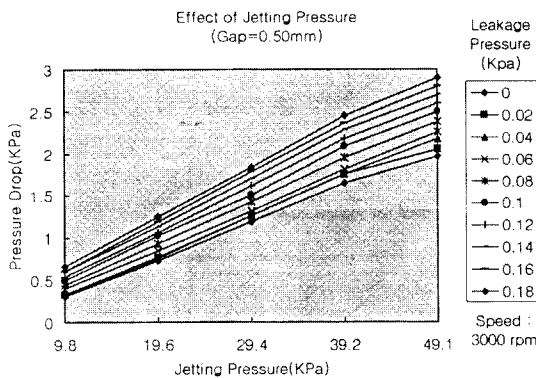


Fig. 11. Effect of jetting pressure.

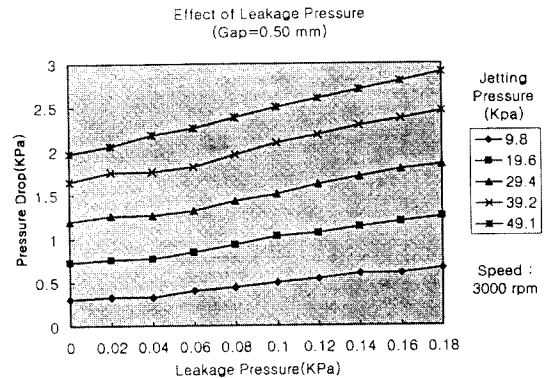


Fig. 12. Effect of leakage pressure.

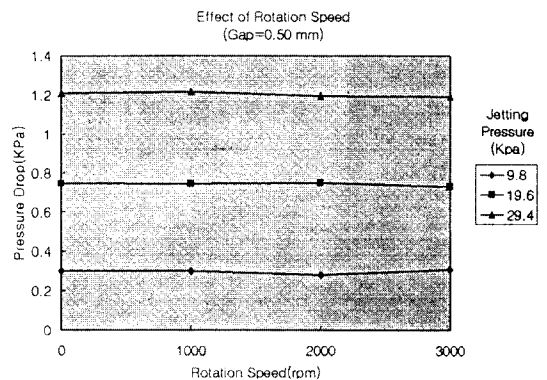


Fig. 13. Effect of rotation speed.

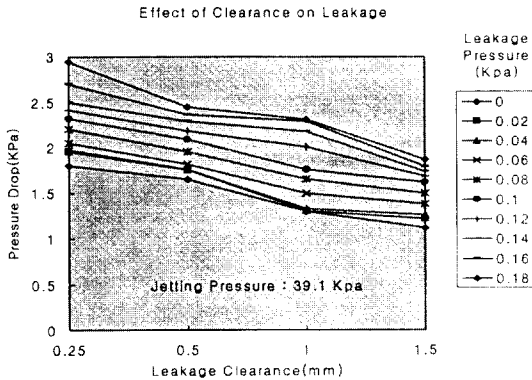


Fig. 14. Effect of leakage clearance on leakage pressure.

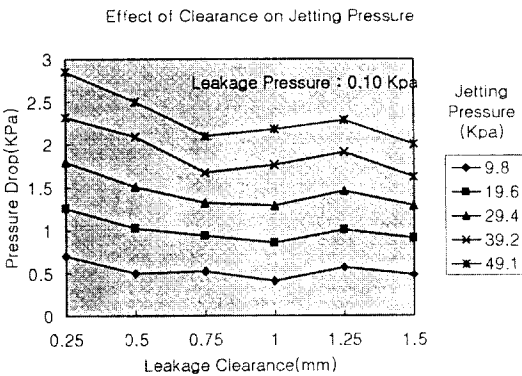


Fig. 15. Effect of leakage clearance on jetting pressure.

Fig. 15에는 분사압력이 일정할 때 누설틈새에 대한 압력강하의 영향을 도시하였다. 마찬가지로 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 1 mm이므로 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.

4. 결 론

프로젝트 컬러 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 실험결과 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.

참 고 문 헌

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. 나병철, 전경진, 한동철, "고속 주축용 시일의 누설 특성 해석," 한국정밀공학회지, 제12권, 제13호, 12월호, 1995, 131-138.
8. Byung Chul Na, Keyoung Jin Chun, Dong-Chul Han, "Analysys of Seal Leakage Characteristics for High Speed Spindle," The 6th International Symposium on Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. 1, Feb., 1996, 542-551.

9. 나병철, 전경진, 한동철, "형상설계에 관한 고속주축용 비접촉 시일의 누설특성 연구," 제4차 G7 Workshop, Vol. 2, , 1996, pp. 1990, CHAM Limited.
10. "PHOENICS Training Course Notes CHAM TR/300," 11. Partankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Spalding (1980).