

## 고속주축용 비접촉 시일의 형상설계 연구

나 병철\*, 전 경진\*, 한 동철\*\*

### Design Characteristics of Non-Contact Type Seal for High Speed Spindle

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

#### ABSTRACT

Sealing of lubricant-air mixture in the high performance machining center is one of most the important characteristics to carry out enhanced lubrication. High speed spindle requires non-contact type of sealing mechanism. Evaluating an optimum seal design to minimize leakage is concerned in the aspect of flow control. Effect of geometry and leakage path are evaluated according to variation of sealing geometry. Velocity, pressure, turbulence intensity of profile is calculated to find more efficient geometry and variables. This offers a methodological way of enhancement seal design for high speed spindle. The working fluid is regarded as two phases that are mixed flow of oil phase and air phase. It is more reasonable to simulate an oil jet or oil mist type high speed spindle lubrication. Turbulence and compressible flow model are used to evaluate a flow characteristic. This paper considers a design effect of sealing capability of non-contact type seals for high speed spindle and analyzes leakage characteristics to minimize a leakage on the same sealing area.

**Key Words:** Non-Contact Type Seal(비접촉식 시일), Two Phase Turbulent Flow(2상 난류유동), Effective Leakage Clearance(유효 누설 간극)

#### 1. 서론

메카니컬 시일의 밀봉 유형은 크게 접촉식 시일과 비접촉식 시일로 나눌 수 있다<sup>(1)</sup>. 고속 주축에는 작동 특성상 비접촉식 시일이 사용되는데 이러한 비접촉 시일은 직접 접촉에 의한 손실이 없는 반면 일정 간격의 틈새를 유지

하고 있으므로 어느 정도의 누설을 감수하여야 한다<sup>(2)</sup>. 따라서 비접촉 시일에서의 설계관점은 형상 설계를 최적화 하여 가능한 한 최소의 누설을 이루도록 하는 것이 된다. 동일한 공간 내에서 허용 틈새가 같을 경우 누설 통로의 형상을 바꾸거나 유동의 흐름을 저지할 수 있는 구조로 설계하여 최대의 밀봉 성능을 얻도록 하여야 한다<sup>(3)</sup>.

\* 생산기술연구원 생산시스템 센터  
 \*\* 서울대학교 공대 기계설계학과

비접촉 시일은 밀봉 방식에 따라 라비린스 시일(labyrinth seal)형과 공기 분사(air seal)형으로 나눌 수 있다<sup>(4)</sup>. 라비린스 시일형은 유체 유동을 방해하는 난류를 유발시켜 누설을 방지하는 구조로 현재까지 공작기계의 주축 선단에 응용되고 있다.

공기 분사형은 시일의 내부에서 공기를 불어내어 누설 방지와 함께 이물질 침입을 보다 적극적으로 차단하기 위한 것이다<sup>(5)</sup>.

본 연구에서는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 통하여 설계관점에서의 고속 주축용 비접촉 시일의 누설 특성을 분석하고 오일 미스트 누설에 대한 상황별 주요인자들에 관하여 논의하였다. 또한 현재 사용되어지고 있는 여러 유형의 비접촉 시일의 유동해석을 통하여 그 밀봉 특성을 비교하였다. 이러한 계산 결과를 바탕으로 유동 흐름을 관찰하여 보면 보다 밀봉성능이 향상된 시일 설계 형상을 유추할 수 있다. 유동 방향이 균일한 구간에서 난류를 유발시킬 수 있는 블록을 설치하거나 공기를 분사시키면 우수한 밀봉 성능을 기대할 수 있다. 따라서 궁극적으로는, 본 연구를 통하여 관련 산업체에 폭넓은 지식을 제공하고 제품개발에 직접 적용될 수 있도록 비접촉 시일 설계에 관한 방법론적 접근법을 제시하고자 한다.

## 2. 비접촉 시일 모델링

공작기계 주축의 밀봉에 사용되어지는 비접촉 시일은 누설통로의 형상과 작동 방식에 따라 유형을 구분할 수 있다<sup>(4)</sup>. 가장 기본이 되는 유형으로 cavity type 과 protective collar type, air jet type 이 있으며 각 유형은 보다 세밀한 여러 설계 변수들을 갖는다.

기존에 비접촉 시일이 사용되던 기계요소와는 달리 고속주축의 윤회에는 공기와 오일입적이 포함된 2 상(phase)의 압축성 작동유체를 사용하게 된다. 따라서 본 연구에서는 기본적으로 2상 난류유동(two phase turbulent flow)을 가정하여 그 유동특성을 판단하였으며 시일 간극에서 발생하는 등축과정(isentropic processor)에 의한 압력강하(pressure drop)의 영향이 고려될 수 있도록 압축성 유동을 가정하였다. 각 상 간의 간섭 특성(drag force, surface force 등)은 steam에서의 특성을 도입하였다. 고속 회전을 가정하여 입구측 유입 온도는 100°C, 출구 온도는 20°C로 가정하였고 유동 통로에서는 단열 조건을 가정하였다.

해석 영역의 크기(domain) 및 초기조건은 모두 동일하고 시일 구조(geometry)를 제외한 요소 배열, 개수 및 경계 조건은 모두 일정하다. 출력 변수로 압력 분포(pressure distribution), 속도 벡터(velocity vector), 온도 분포(temperature distribution), 난류 강도(turbulence intensity), 유선 분포(stream line) 등을 구하였다.

유동해석은 기본적으로 2상 유동을 가정하여 IPSA(Inter-Phase-Slip-Algorithm) 알고리즘을 도입하였다<sup>(6)(7)</sup>. 각 상 간의 질량 전달(mass transfer)은 0 이고 운동량 전달(momentum transfer) 거동 및 각 상 간의 간섭특성은(drag force, surface force 등) 공기-수 증기에서의 전달 특성을 도입하였다.

유동해석은 2차원 유동으로 계산하였으며 축 원주길이에 비하여 틈새가 매우 작기 때문에 2차원에서의 해석이 가능하다. 축 회전으로 인하여 시일 내의 유동이 발생하여 실제 축회전시에는 정지시 보다 난류의 강도가 커지게 된다. 본 연구에서는 동일 조건하에서의 상대 비교를 통한 특성 분석을 목적으로 하기 때문에 축 회전 수 및 이에 따른 초기 난류강도가 일정하다고 가정하여 축 회전에 따른 난류변화를 고려하지 않았다.

유동 해석을 통한 시일의 밀봉 성능은 기본적으로 일정량의 누설을 가정하고 유동장 입구와 출구에서의 압력강하로 평가한다. 양단에서의 압력강하가 클수록 밀봉 성능이 더 우수한 것으로 평가한다. 각 CFD 해석 결과는 파라메트릭 스테디로 수행되어 정리되었으며 Cavity Type에서의 케비티 깊이의 영향을 고찰할 때에만 그 결과를 제시하고 나머지 변수들에 대하여는 동일한 방식으로 정리한 파라메트릭 연구결과만을 나타내기로 한다.

## 3. Cavity Type의 설계 변수에 대한 고찰

### 3.1 Cavity Type의 설계 변수

Cavity type 비접촉 시일은 누설 유동의 흐름을 케비티 내로 유입하여 난류를 유발시키는 원리로 누설을 방지한다. 가장 간단하고 제작도 용이하여 오래 전부터 각종 터보 기계에 사용되어 왔으며 이 형태는 protective collar type과 air jet type의 기본이 되는 형태이며 복잡한 형태로 개선되기 위한 기본 지식을 제공한다. 일정한 공간 내에서 cavity type의 설계 변수는 케비티의 깊이, 케비티의 폭 등이 있으며 양쪽으로 케비티를 두는 것도 유동에 다른 영향을 줄 수 있다.

Fig. 1에 cavity type의 기본형상 및 설계 변수를 도시하였다.

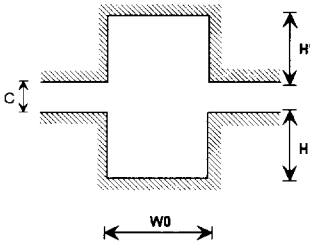


Fig. 1 Design Parameters of Cavity Type

### 3.2 케비티 깊이의 영향

Fig. 2에 케비티 폭이 일정할 경우( $W0/C=5.0$ ) 케비티 깊이를 파라메트릭 변수로 한 CFD 해석결과를 제시하였으며 Fig. 3에 케비티 깊이에 따른 압력강하의 결과를 도표로 표시하였다. 케비티에서의 압력강하는 케비티

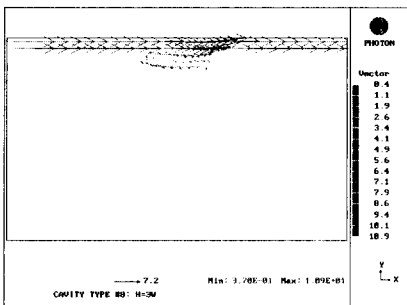


Fig. 2-(a) Pressure Distribution( $H=0.3W0$ )

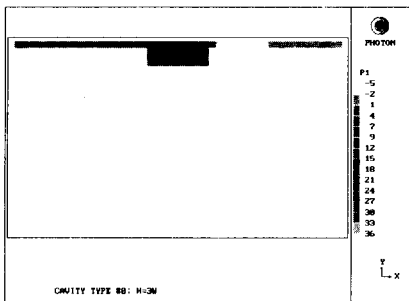


Fig. 2-(b) Velocity Profile( $H=0.3W0$ )

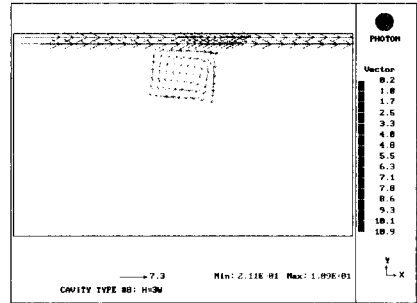


Fig. 2-(c) Velocity Profile( $H=1.0W0$ )

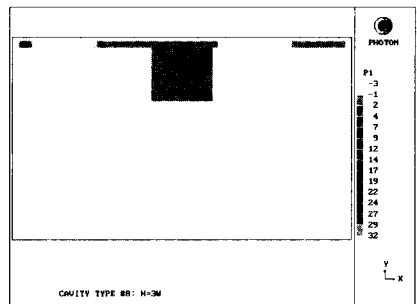


Fig. 2-(d) Pressure Distribution( $H=1.0W0$ )

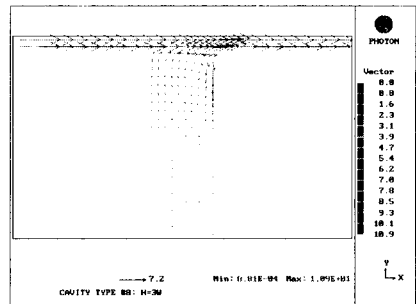


Fig. 2-(e) Velocity Profile( $H=3.0W0$ )

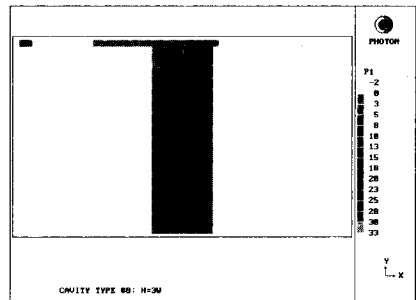


Fig. 2-(f) Pressure Distribution( $H=3.0W0$ )

Fig. 2 Parametric Analysis of Cavity Depth on Cavity Type

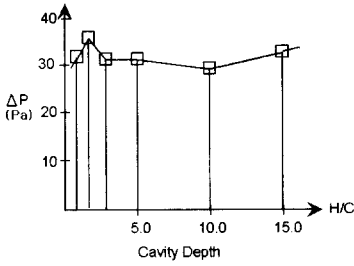


Fig. 3 Effect of Cavity Depth

가 깊을수록 점차 증가하나 케비티 폭의 1/3 되는 점 ( $H/C=1.5$ )을 기준으로 최대를 나타내고 그 이상 깊어지면 오히려 압력강하가 낮아지는 구간이 생겨난다. 그 이유는 유선 분포에 대한 CFD 결과를 살펴보면 알 수 있는데 케비티로 유입되는 유량은 케비티가 깊어질수록 증가하다가 폭의 1/3 부근을 중심으로 케비티 내의 순환 유동이 생성되어 유동 유입이 억제되는 현상을 나타낸다. 따라서 케비티 폭의 1/3 부근은 케비티 내의 사 순환 (dead circulation)에 의해 유입이 억제되지 않는 최대 깊이로 간주할 수 있으며 더 이상 케비티가 깊어질 경우 유동은 효과적으로 케비티에 유입되지 않아 유동 저지효과가 상대적으로 약해지게 된다. 그러나 주축의 강도의 저하를 고려하지 않는다면, 케비티의 깊이가 매우 깊어질 경우 압력강하는 점점 커지게 된다. 순환유동과 누설유동은 서로 접촉하고 있기 때문에 순환유동의 순환강도가 낮을수록 누설유동의 흐름을 저지하는 효과는 나타내게 된다. 즉 케비티의 깊이가 매우 깊어지면 순환의 강도가 미약하게 되어 누설유동의 흐름을 어느 정도 저지하는 효과를 나타내게 된다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 케비티 폭의 영향

Fig. 4에 케비티 깊이가 일정할 경우( $H/C=1.4$ ) 압력강하에 미치는 케비티 폭의 영향을 도시하였다. 케비티의 폭이 넓을수록 압력강하가 커져 밀봉효과가 증대됨을 알 수 있다. 케비티의 폭이 좁을 경우 케비티 내로의 유동이 저조하게 되고 케비티 내로의 유동이 없으면 밀봉 장치의 역할을 할 수 없다. 또한 일반적으로 cavity type의 최소 간극은 유동 입구 및 출구에 위치하게 되므로 좁은 통로를 통과한 누설 유동이 충분히 팽창할 수 있는 공간이 필요하다. 이 팽창 공간이 좁을 경우 충분한 팽창이 이루어지기 전에 다시 좁은 틈 속으로 유동이 유입되므로 효과적으로 밀봉을 이룰 수 없다.

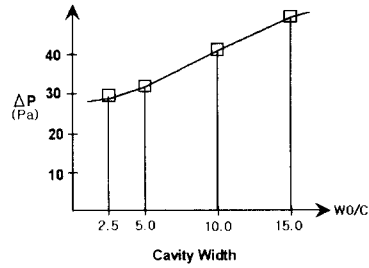


Fig. 4 Effect of Cavity Width

## 4. Protective Collar Type의 설계 변수에 대한 고찰

### 4.1 Protective Collar Type의 설계 변수

Protective collar type은 유동의 중간에 흐름을 제거하는 컬러를 설치하여 난류를 유발시키고 누설을 방지하는 유형으로 두 가지 효과를 기대할 수 있다. 하나는 프로텍트 컬러에 의한 유동 흐름 조절로 난류 발생을 증대시키는 효과이고 다른 하나는 최소 간극을 컬러와 케비티 사이에 위치시킬 수 있어(C1 위치) 교축과정에 의한 부가적인 압력강하 효과를 기대하는 것이다. Fig. 5에

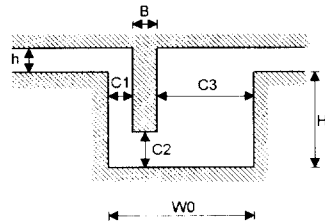


Fig. 5 Design Parameters of Protective Collar Type

Protective collar type의 설계 변수들을 도시하여 놓았다. Protective collar type에서의 설계 변수는 케비티내에 컬러의 위치이다.(C1, C2의 크기) Protective collar type은 두 가지 유형으로 나누어 유동 특성을 고찰하기로 한다. 한가지는 유동 입구측에서의 간극이 최소 간극이 되도록 설계하여 좁은 통로를 통과하여 유동이 유입되는 경우와 다른 하나는 유입되는 통로가 충분히 넓은 경우로 구분하여 각 설계 변수의 영향을 평가하여 보기로 한다.

### 4.2 좁은 통로에서 컬러의 위치

유동 입구에서 최소 간극을 유지 할 경우(최소 간극을

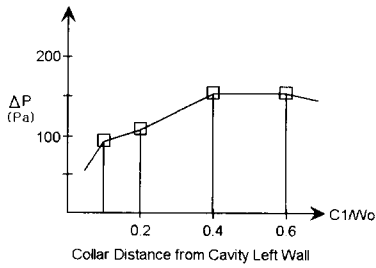


Fig. 6 Effect of Collar Position at the Narrow Clearance of Protective Collar Type

$h=0.1W_0$ 로 가정) 컬러의 위치를 변화시켜가며 유동 해석을 수행한 결과가 Fig. 6에 도시 되어있다(간극 C1의 변화, 이 때 컬러 밀면에서의 틈새는 충분히 크다고 가정한다.  $C2=0.3W_0$ ) 계산 결과는 컬러는 유동이 유입되는 캐비티의 선단에서 멀어질 수록 큰 압력 강하를 나타내고 캐비티의 중앙에 위치해 있을 때 가장 큰 압력강하를 나타내고 있다. 컬러가 유동 입구측에서 유동이 좁은 통로를 지날 경우 큰 압력강하를 일으키려면 팽창을 위한 넓은 캐비티로의 유입이 필요하다. 그러나 Fig. 5에서 C1이 작을 경우 컬러에 의하여 최소 간격이 다시 형성되어 캐비티 선단에서의 충분한 팽창효과를 기대할 수 없다. 오히려 캐비티에 의해 최소 간극이 형성되지 않을 때 밀봉 성능이 우수해 질 수 있음을 나타낸다. 즉, 유동 입구의 통로에 최소 틈새를 유지하도록 설계하였다면 캐비티 내에서는 또다시 유동을 저지할 목적으로 캐비티와의 간극을 좁힐 필요가 없으며 충분한 팽창공간을 확보해 주는 것이 오히려 누설억제에 효과가 있다는 것을 알 수 있다.

### 4.3 좁은 통로에서의 컬러의 길이

좁은 유입 통로를 갖는 protective collar type에서 컬러 길이 변화에 대한 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다

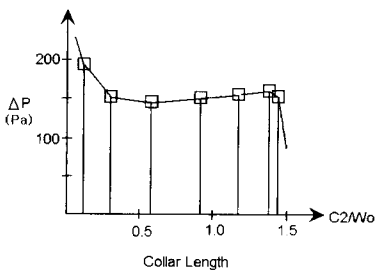


Fig. 7 Effect of Collar Length at the Narrow Clearance of Protective Collar Type

(간극 C2의 변화). 캐비티 밀면과의 틈새, C2에 최소 간극이 생성되도록 설계 할 경우(이때 캐비티 위치는 중앙으로 가정) 가장 큰 압력 강하를 나타낸다. 컬러의 길이가 줄어들에 따라 (틈새 C2가 점점 커질수록) 급격히 압력강하가 줄어들는데 이 때에는 최소 간극에 의한 밀봉 효과가 급격히 줄어들 것으로 생각된다. 그 이후 중간 정도의 크기에서는 컬러의 크기에 무관하게 거의 일정한 압력강하를 나타내는데 이때는 컬러의 역할이 단지 유동 흐름을 조절할 뿐이므로 컬러의 크기에 큰 영향을 받지 않기 때문으로 생각된다.

### 4.4 넓은 통로에서의 컬러 위치

유입 통로가 넓은 때에 컬러의 위치에 따른 유동의 변화를 Fig. 8에 도시하였다.

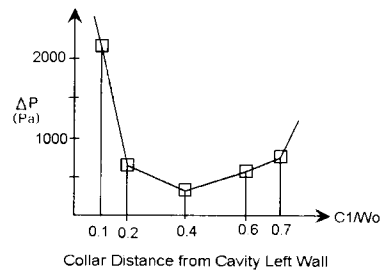


Fig. 8 Effect of Collar Position at the Wide Clearance of Protective Collar Type

컬러의 위치가 캐비티의 벽면에 가까워져 유동 통로가 좁아질 수록 큰 압력강하를 나타내고 컬러가 중앙에 위치하여 틈새가 클 수록 가장 낮은 압력강하를 나타낸다. 유입통로가 넓은 경우 상대적으로 압력강하의 특성을 결정하는 부분은 컬러와 캐비티에 의해 생성되는 간극에 의한 등축과정에 의한 것이다. 그러므로 유입 통로가 넓은 때에는 컬러와 캐비티 벽면에 의해 시일의 최소 간극이 생성되어야 한다. 또한 컬러에 의해 생성되는 최소간극의 위치가 캐비티의 누설 입구측에 있을 때 캐비티 끝단의 유동출구 측에 최소간극이 있을 때 보다 압력강하가 크다. 그 이유는 캐비티로 유입되기 전에 높은 내부 에너지를 포함하고 있을 때 발생하는 압력강하가 누설 입구에서 1차적으로 캐비티에 의한 압력강하를 겪은 유동의 압력강하보다 크기 때문으로 생각된다. 따라서 효율적인 누설억제의 측면에서 유입통로가 넓은 경우에는 캐비티의 누설 입구측에 최소 간극이 생성되도록 컬러를 설치하는 것이 좋은 효과를 기대할 수 있다.

#### 4.5 넓은 통로에서의 컬러길이

Protective collar type에서 유입 통로가 넓을 때 컬러 길이가 변화에 대한 시일의 압력강하를 Fig. 9에 도시하였다. 유동 통로가 넓을 경우에는 컬러와 캐비티에 의해 생성되는 틈새 C2가 최소 간극이 될 경우 높은 압력 강하를

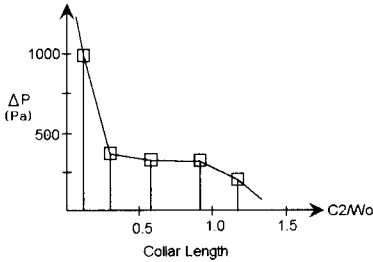


Fig. 9 Effect of Collar Length at the Narrow Clearance of Protective Collar Type

나타내는 것을 알 수 있다. 틈새 C2가 커질수록 압력강하는 급격히 떨어져 좁은 틈새에 의한 효과는 없어지게 되고 컬러의 유동 조절에 의한 압력강하가 나타나게 된다. 이 경우 컬러의 길이는 큰 영향을 미치지 못하게 된다. 틈새 C2가 커질수록 전체적으로 압력강하가 낮아지는 경향을 나타내고 있으나 컬러의 길이가 중간 정도일 경우에는 그 변화가 미소하다. 컬러의 길이가 매우 짧아서 유동의 흐름을 효과적으로 조절하지 못할 경우에는 급격히 압력강하가 저조해져 밀봉효과가 떨어지게 된다.

### 5. Air jet type의 설계 변수에 대한 고찰

#### 5.1 Air Jet Type의 설계 변수

Air jet type은 최근의 고속 주축에 많이 사용되는 형태로 외부에서 압력 공기를 불어내어 난류를 유발시키고 누설을 방지하는 형태이다. 이러한 유형에서의 설계 변수는 일반적으로 분사량의 크기( $v_j$ )와 분사각( $\theta$ )이다. 캐비티가 있는 경우에는 캐비티내에 공기분사의 분사위치가 중요한 의미를 지니는데 캐비티로 유입되는 유동의 순환 방향에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. Fig. 10에 air jet type의 설계 변수를 도시하였다.

#### 5.2 에어젯 시일에서의 분사량

Fig. 11에 공기분사의 분사량에 따른 압력강하를 도시하였다. 누설유량에 비해 분사량이 작을 경우에는 압력강

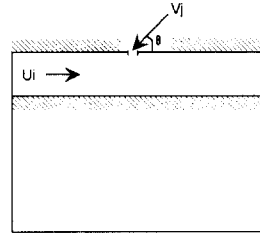


Fig. 10 Design Parameters of Air Jet Type

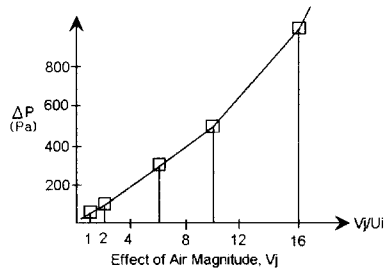


Fig. 11 Effect of Jet Magnitude

하가 매우 저조하여 시일로써의 기능이 미약하여지며 분사량이 증가할수록 압력강하가 커져 밀봉효과가 증대됨을 알 수 있다. 앞에서 논의된바 있는 protective collar type에서의 유동 저지 능력 정도를 기대하려면(약 500 Pa) 누설유량의 8배 이상의 공기분사가 필요하다. 따라서 이러한 유형은 밀봉부위의 압력차가 크거나 누설유량이 많은 곳에는 그 효과를 기대할 수 없다. 고속주축의 윤활부위와 같은 곳에는 누설유량이 적기 때문에 매우 효과적으로 사용될 수 있음을 나타내며 누설방지의 측면에서는 가능한 한 분사압력을 높게 하는 것이 좋다.

#### 5.3 Air jet seal에서의 분사각도

Fig. 12에 분사각도 변화에 대한 압력강하의 영향도를

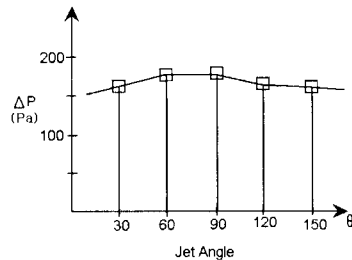


Fig. 12 Effect of Jet Angle

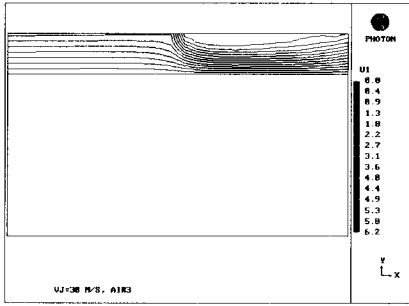


Fig. 13 Reduction of Effective Clearance by Air Jet

시하였다. 누설방향과 역방향으로 분사할 경우 분사공기의 모멘텀에 의한 저지효과가 있을 것으로 기대되지만 0°에서 90°에 이르기까지 유동방향과 반대 방향으로 분사시켜도 압력강하에는 별 차이를 나타내지 않았다. 이것은 기체의 밀도가 매우 낮기 때문에 모멘텀에 의한 저지효과가 크지 않은 것으로 생각된다. 오히려 수직으로 분사하였을 때에 가장 큰 압력강하를 나타내었다. 분사각도가 90°를 넘어서 누설유동과 동일한 방향으로 분사하게 되면 압력강하가 낮아지고 밀봉효과가 나빠지게 된다. 분사의 방향을 수직으로 하는 것이 가장 양호한 효과를 나타내는 이유는 유효 누설 틈새 감소 효과로 설명될 수 있다. Fig. 13 분사가 가해진 ( $V_j = -30$  m/s) 에어젯 시일에서의 유선분포를 도시하였다. 분사에 의하여 유효 누설 틈새가 감소하였음을 나타내고 있다. 따라서 분사유량에 의하여 점유된 영역만큼 누설유량이 통과하는 영역이 좁아진 것과 같은 효과를 나타내어 90°로 분사될 때 가장 좁은 유효누설틈새를 형성하게 되고 상대적으로 높은 압력강하를 나타내게 된다.

## 6. 결론

본 논문에서는 고속 주축에 응용되고 있는 비접촉 시일을 형상별로 구분하고 CFD 해석에 의하여 각 설계변수들이 누설에 미치는 영향을 조사하였다. 해석 결과를 바탕으로 속도분포, 압력장에 대한 파라메트릭 연구를 통하여 누설에 영향을 미치는 설계변수 및 누설 메커니즘에 대하여 고찰하였다. 고속 주축 시일의 경우 충분한 압력강하를 나타내기 위하여는 유동통로 내의 공간의 변화가 필요하며 좁은 틈새로만 구성된 형상은 그리 효과적이지 못한 것으로 나타났다. 이러한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Cavity type에서 캐비티는 본 연구모델의 경우 그 깊이가 캐비티 폭의 1/3 정도 깊이에서 우수한 밀봉효과를 나타낸다.
2. Cavity type에서 캐비티의 폭은 넓을수록 밀봉효과가 뛰어나며 우수한 밀봉 효과를 얻으려면 압축된 작동유체가 충분히 팽창할 수 있는 공간이 필요하다.
3. Protective collar type에서 유입 통로가 좁을 경우 캐비티의 중앙에 컬러를 설치하는 것이 가장 우수한 밀봉효과를 나타낸다.
4. Protective collar type에서 유입 통로가 좁을 경우 컬러의 길이는 최대로 크게 하여 캐비티의 하단에 최소 간극을 생성시키는 것이 가장 밀봉효과가 높다.
5. Protective collar type에서 유입 통로가 넓을 경우 유동입구의 선단에 컬러를 위치시키는 것이 밀봉에 유리하다.
6. Protective collar type에서 유입 통로가 넓을 경우 컬러의 길이는 길게 하여 캐비티 하단에 최소 간극이 생성되도록 하는 것이 밀봉에 유리하다.
7. Air jet type의 경우 누설유량이 미소하거나 공기 분사량이 누설유량보다 월등히 커야 양호한 밀봉효과를 기대할 수 있다.
8. Air jet type에서 캐비티가 없는 경우 분사 각도는 90°수직 분사시에 가장 우수한 밀봉성능을 얻을 수 있다.

본 연구는 아직까지 고속 주축용 시일에 대한 설계데이터를 확보하지 못하고 있는 국내 상황에 있어서 실질적으로 제조업체에서 제품개발에 활용할 수 있도록 방법론적 설계방안을 제시하였으며 제품 성능향상을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 7. 참고 문헌

1. Kawahara, Y. and Hirabayshi H., "An analysis of Sealing Characteristics of Oil Seals", ASLE Trans, Vol.23, pp 93-102, 1980.
2. "Seals and Sealing HANDBOOK 2nd Edition", Trade & Technical Press Limited, 1986.
3. Stoff, H., "Incompressible Flow in a Labyrinth Seal", J. of Fluid Mech, Vol.100, pp 817-829, 1980.

4. 나병철, 전경진, 한동철, "고속 주축용 시일의 누설 특성 해석", 한국정밀공학회지, 제 12권, 제 13호, 12월호, pp 131-138, 1995.
5. 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, Feb., pp 542-551, 1996.
6. Suhas V. Partankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Spalding, 1980.
7. "PHOENICS Traning Course Notes CHAM TR/300", 1990, CHAM Limited, 1990.