

형상설계에 관한 고속주축용 비접촉 시일의 밀봉특성 연구

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

나병철(생산기술연구원), 전경진(생산기술연구원), 한동철(서울대 공대)

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

ABSTRACT

Sealing of lubricat-air mixture in the high performance machining cente 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 arranges a geometry of mostly used non-contact type seal and analyzes leakage characteristics to minimize a leakage on the same sealing area.

Keywords: Non-Contact Type Seal(비접촉식 시일), Two Phase Flow(2상 난류유동), Turbulent Flow(난류 유동), Compressible Flow(압축성 유동), Leakage Characteristics(누설특성)

1. 서 론

메카니컬 시일의 밀봉 유형은 크게 접촉식 시일과 비접촉식 시일로 나눌 수 있다⁽¹⁾. 고속 주축에는 작동 특성상 비접촉식 시일이 사용되는데 이러한 비접촉 시일은 직접 접촉에 의한 손실이 없는 반면 일정 간격의 틈새를 유지하고 있으므로 어느 정도의 누설을 감수하여야 한다⁽²⁾. 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⁽³⁾. 비접촉 시일은 밀봉 방식에 따라 라비린스 시일(labyrinth seal)형과 공기 분사(air seal)형으로 나눌 수 있다⁽⁴⁾. 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⁽⁵⁾.

본 연구에서는 비접촉 시일의 유동 해석을 통하여 누설 특성을 분석하고 누설에 영향을 미치는 설계 변수들을 도출하여 동일 공간 내에서 누설을 최소화 할 수 있는 방안을 모색하였다. 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 구간에 난류를 유발시킬 수 있는 블록을 설치하거나 공기를 분사 시키면 우수한 밀봉 성능을 기대할 수 있다. 그리고 이러한 고찰을 바탕으로 밀봉 효과가 뛰어난 시일의 설계 데이터를 제시하고 추후에 실험을 통하여 밀봉성능을 검증할 예정이다.

2. 비접촉 시일 모델링

본 연구에서는 공작기계 주축의 밀봉에 사용되는 비접촉 시일의 유형을 누설통로의 형상과

작동 방식에 따라 구분 하였다⁽⁴⁾. 각 유형은 보다 세밀한 여러 설계 변수들을 갖는다. 이번 연구에서는 이들 중 가장 기본이 되는 cavity type 과 protective collar type, air jet type 만을 고려하였다.

해석 영역의 크기(domain) 및 초기조건은 모두 동일하고 시일 구조(geometry)를 제외한 요소 배열, 개수 및 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. 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⁽⁶⁾. 각 상 간의 질량 전달(mass transfer)은 0 이고 운동량 전달(momentum transfer) 거동 및 각 상간의 간섭특성은(drag force, surface force 등) 공기-수증기에서의 전달 특성을 도입하였다.

유동해석은 2차원 유동으로 계산하였으며 축 원주길이에 비하여 틈새가 매우 작기 때문에 2차원에서의 해석이 가능하다.

유동 해석을 통한 시일의 밀봉 성능은 기본적으로 일정량의 누설을 가정하고 유동장 입구와 출구에서의 압력강하로 평가한다. 양단에서의 압력강하가 1 클수록 밀봉 성능이 더 우수한 것으로 평가한다.

3. Cavity Type의 설계 변수에 대한 고찰

3.1 Cavity Type 의 설계 변수

Cavity type 비접촉 시일은 누설 유동의 흐름을 캐비티 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 캐비티의 깊이, 캐비티의 폭 등이 있으며 양쪽으로 캐비티를 두는 것도 유동에 다른 영향을 줄 수 있다.

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

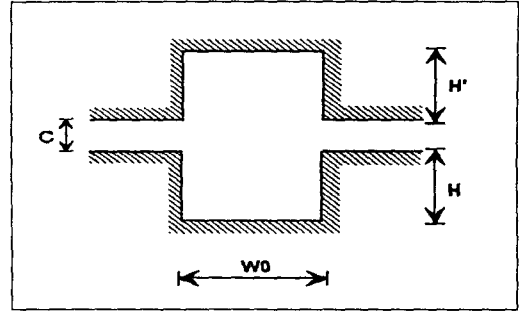


Fig.1. Design parameters of cavity type

3.2 캐비티 깊이의 영향

Fig.2.에 캐비티 폭이 일정할 경우($W_0/C=5.0$) 캐비티 깊이에 따른 압력강하를 도표로 표시하였다. 캐비티에서의 압력강하는 캐비티가 깊어질수록 점차 증가하나 캐비티 폭의 1/3 되는 점($H/C=1.5$)을 기준으로 최대를 나타내고 그 이상 깊어지면 오히려 압력강하가 낮아지는 구간이 생겨난다. 그 이유는 Cavity type의 유선 분포를 살펴보면 알 수 있는데 캐비티로 유입되는 유량은 캐비티가 깊어질수록 증가하다가 폭의 1/3 부근을 중심으로 캐비티 내의 순환 유동이 생성되어 유동 유입이 억제되는 현상을 나타낸다. 따라서 캐비티 폭의 1/3 부근은 캐비티 내의 사 순환(dead circulation)에 의해 유입이 억제되지 않는 최대 깊이가 되는 셈이다.

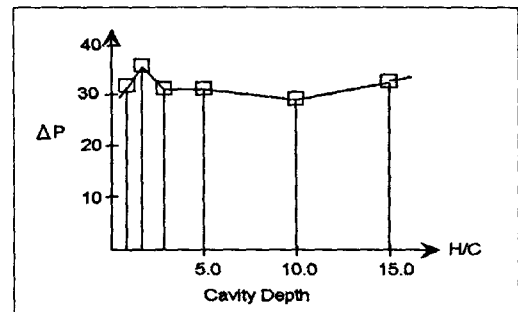


Fig.2. Effect of Cavity Depth

3.3 캐비티 폭의 영향

Fig.3.에 캐비티 깊이가 일정할 경우($H/C=1.4$) 압력강하에 미치는 캐비티 폭의 영향을 도시하였다. 캐비티의 폭이 넓어질수록 압력강하가 커져 밀봉 효과가 증대됨을 알 수 있다. 캐비티의 폭이 좁을 경우 캐비티 내로의 유동이 저조하게 되고 캐비티 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.

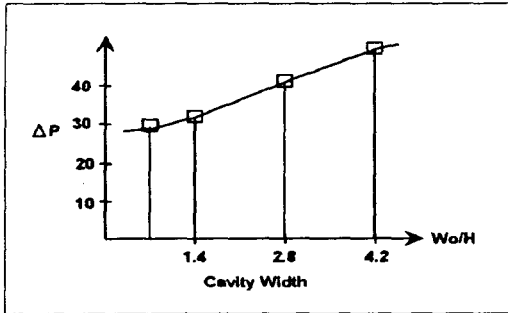


Fig.3. Effect of cavity width

4. Protective Collar Type의 설계 변수에 대한 고찰

4.1 Protective Collar Type의 설계 변수

Protective collar type은 유동의 중간에 흐름을 제거하는 켈러를 설치하여 난류를 유발시키고 누설을 방지하는 유형으로 두 가지 효과를 기대할 수 있다. 하나는 프로텍트 켈러에 의한 유동 흐름 조절로 난류 발생을 증대시키는 효과이고 다른 하나는 최소 간극을 켈러와 케비티 사이에 위치시킬 수 있어(C1 위치) 교축 과정에 의한 부가적인 압력강하 효과를 기대하는 것이다. Fig.4에 Protective collar type의 설계 변수들을 도시하여 놓았다. Protective collar type에서의 설계 변수는 케비티내에 켈러의 위치이다.(C1, C2의 크기) Protective collar type은 두 가지 유형으로 나누어 유동 특성을 고찰하기로 한다. 한가지는 유동 입구 측에서의 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 켈러의 위치

유동 입구에서 최소 간극을 유지 할 경우(최소 간극을 $h=0.1W_0$ 로 가정) 켈러의 위치를 변화시켜 가며 유동 해석을 수행한 결과가 Fig.5에 도시 되

어있다(간극 C1의 변화, 이 때 켈러 밑면에서의 틈새는 충분히 크다고 가정한다. $C2=0.3W_0$) 계산 결과는 켈러는 유동이 유입되는 케비티의 선단에서 멀어질 수록 큰 압력 강하를 나타내고 케비티의 중앙에 위치해 있을 때 가장 큰 압력강하를 나타내고 있다. 켈러가 유동 입구측에서 유동이 좁은 통로를 지날 경우 큰 압력강하를 일으키려면 팽창을 위한 넓은 케비티로의 유입이 필요하다. 그러나 Fig.6에서 C1이 작을 경우 켈러에 의하여 최소 간격이 다시 형성되어 케비티 선단에서의 팽창에 의한 난류 생성을 기대할 수 없다. 오히려 케비티에 의해 최소 간극이 형성되지 않을 때 밀봉 성능이 우수해 질 수 있음을 나타낸다. 즉, 유동 입구의 통로에 최소 틈새를 유지하도록 설계하였다면 케비티 내에서는 또다시 유동을 저지할 목적으로 케비티와의 간극을 좁힐 필요가 없음을 나타낸다.

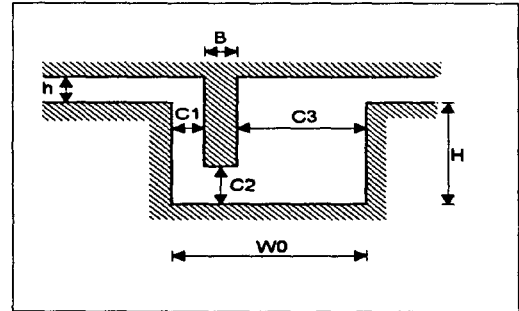


Fig.4. Design parameters of protective collar type

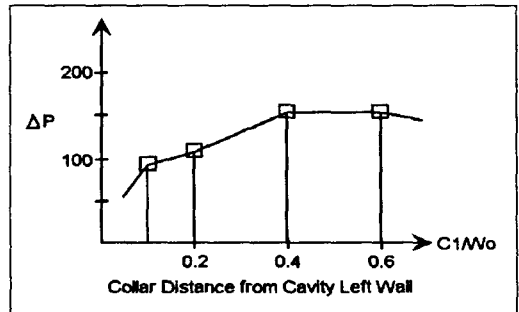


Fig.5. Effect of collar position at the narrow clearance of protective collar type

4.3 좁은 통로에서의 켈러의 길이

좁은 유입 통로를 갖는 protective collar type에서 켈러길이 변화에 대한 해석 결과를 Fig.6에 나

타내었다(간극 C2의 변화). 케비티 밀면과의 틈새, C2에 최소 간극이 생성되도록 설계 할 경우(이때 케비티 위치는 중앙으로 가정) 가장 큰 압력 강하를 나타낸다. 컬러의 길이가 줄어들수록 따라 (틈새 C2가 점점 커질수록) 급격히 압력강하가 줄어드는데 이 때에는 최소 간극에 의한 밀봉 효과가 급격히 줄어든 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.

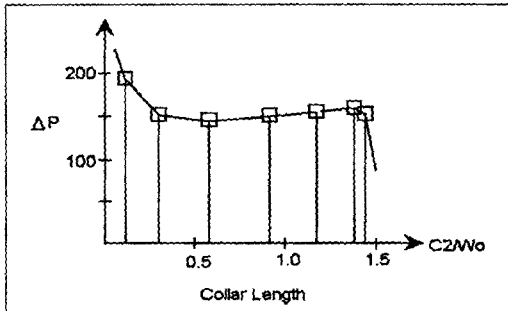


Fig.6. Effect of collar length at the narrow clearance of protective collar type

4.4 넓은 통로에서의 컬러 위치

유입 통로가 넓을 때 컬러의 위치에 따른 유동의 변화를 Fig.7에 도시하였다. 컬러의 위치가 케비티의 벽면에 가까워져 유동 통로가 좁아질수록 큰 압력강하를 나타내고 컬러가 중앙에 위치하여 틈새가 클수록 가장 낮은 압력강하를 나타낸다. 유입통로가 넓을 경우 상대적으로 압력강하의 특성을 결정하는 부분은 컬러와 케비티에 의해 생성되는 간극의 크기가 되기 때문이다. 그러므로 유입 통로가 넓을 때에는 컬러와 케비티 벽면에 의해 시일의 최소 간극이 생성되어야 한다.

4.5 넓은 통로에서의 컬러길이

Protective collar type에서 유입 통로가 넓을 때 컬러길이 변화에 대한 시일의 압력강하를 Fig.8에 도시하였다. 유동 통로가 넓을 경우에는 컬러와 케비티에 의해 생성되는 틈새 C2가 최소 간극이 될 경우 높은 압력 강하를 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.

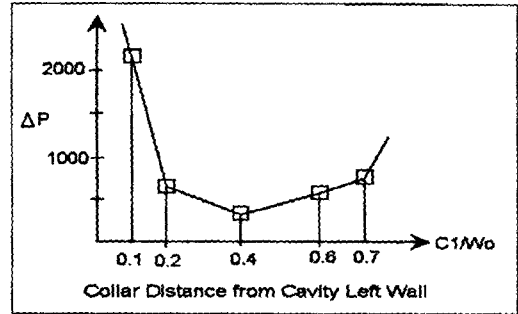


Fig.7. Effect of collar position at the wide clearance of protective collar type

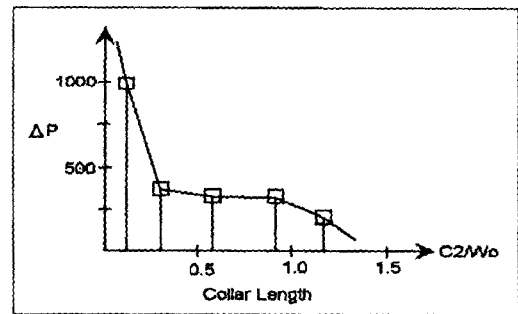


Fig.8. Effect of collar length at the wide clearance of protective collar type

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(vj)와 분사각(θ)이다. 케비티가 있는 경우에는 케비티내에 공기분사의 분사위치도 중요한 의미를 지니는데 케비티로 유입되는 유동의 순환 방향에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. Fig.9에 air jet type의 설계 변수를 도시하였다.

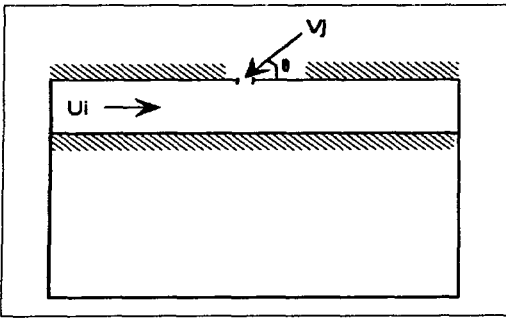


Fig.9. Design parameters of air jet type

5.2. Air jet seal에서의 분사량

Fig.10에 공기분사의 분사량에 따른 압력강하를 도시하였다. 누설 유량에 비해 분사량이 작을 경우에는 압력강하가 매우 저조함을 알 수 있다. 분사량이 증가할수록 압력강하가 커져 밀봉효과가 증대한다. 따라서 이러한 유형은 밀봉 부위의 압력차가 크거나 누설 유량이 많은 곳에는 그 효과를 기대하기 어렵다. 고속 주축의 윤활 부위에는 누설 유량이 적고 압력차가 크지 않으므로 효과적으로 사용될 수 있다.

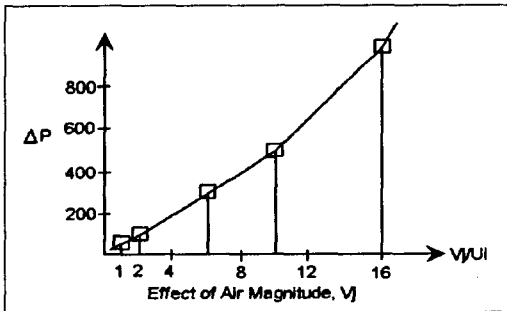


Fig.10. Effect of jet magnitude

5.3 Straight air seal에서의 분사각도

분사각도는 수직으로 분사하였을 때에 가장 큰 압력강하를 나타내었다. 그 이유는 유효 누설 틈새 감소 효과로 설명될 수 있다. 분사유량에 의하여 점유된 영역만큼 누설유량이 통과하는 영역이 좁아진 것과 같은 효과를 나타내어 90°로 분사될 때 가장 좁은 유효누설통로를 형성하기 때문이다.

6. 결론

1. Cavity type에서 케비티는 그 깊이가 케비티

폭의 1/3 정도 깊이에서 우수한 밀봉 효과를 나타낸다.

2. Cavity type에서 케비티의 폭은 넓을수록 밀봉효과가 뛰어나며 우수한 밀봉 효과를 얻으려면 압축된 작동 유체가 충분히 팽창할 수 있는 공간이 필요하다.

3. Protective collar type에서 유입 통로가 좁을 경우 케비티의 중앙에 컬리를 설치하는 것이 가장 우수한 밀봉효과를 나타낸다.

4. Protective collar type에서 유입 통로가 좁을 경우 컬리의 길이는 최대한 크게 하여 케비티의 하단에 최소 간극을 생성시키는 것이 가장 밀봉효과가 높다.

5. Protective collar type에서 유입 통로가 넓을 경우 유동입구의 선단에 컬리를 위치시키는 것이 밀봉에 유리하다.

6. Protective collar type에서 유입 통로가 넓을 경우 컬리의 길이는 길게 하여 케비티 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 케비티가 없는 경우 분사 각도는 90° 수직 분사시에 가장 우수한 밀봉성을 얻을 수 있다.

7. 참고 문헌

1. Kawahara, Y. and Hirabayshi H., An analysis of Sealing Characteristics of Oil Seals, ASLE Trans, Vol.23 (1980) 93-102
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 (1980) 817-829
4. 나병철, 전경진, 한동철, 고속 주축용 시일의 누설 특성 해석, 한국정밀공학회지, 제 12권, 제 13호, 12월호, 1995, 131-138
5. Byung Chul Na, Keyoung Jin Chun, Dong-Chul Han, Analysis 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
6. Suhas V. Partankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Spalding (1980).