

비접촉 시일의 형상에 관한 누설특성 해석

나병철¹, 전경진², 한동철³

*자동차부품연구원 부품개발연구부

**생산기술연구원 생산시스템센터

**서울대학교 기계설계학과

Abstract

Evaluating an optimum seal design to minimize leakage is concerned in the aspect of flow control. Flow is characterized into five categories according to its leakage path. Effect of geometry and leakage path are evaluated according to variation of sealing geometry. To simulate an oil jet or oil mist type high speed spindle lubrication, the working fluid is regarded as two phases that are mixed flow of oil phase and air phase. Both of the turbulence and the compressible flow model were introduced in CFD(Computational Fluid Dynamics) analysis. This offers a methodological way of enhancement seal design for high speed spindle.

Keywords: Non-Contact Type Seal(비접촉식 시일), Two Phase Turbulent Flow(2상 난류 유동), Leakage Path(누설통로)

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.^(1,2) 고속 주축에는 작동 특성상 비접촉식 시일이 사용되는데 이러한 비접촉 시일의 설계 관점은 누설을 최소화 할 수 있는 최적 시일 형상을 구하는 데에 있다.^(3,4)

본 논문에서는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 통하여 설계관점에서의 고속주축용 비접촉 시일의 누설 특성을 분석하고 주요 형상설계 인자들에 관하여 논의하였다. 누설 특성에 대한 분석에는 시일 내부에서의 속도분포 및 압력강하를 계산하고 각 유형별 고찰을 통하여 밀봉성능을 향상된 형상 설계 변수를 찾아낼 수 있도록 방법론적인 설계방안을 제시하였다.⁽⁵⁾

밀봉성능에 대한 관별은 시일에 일정량의 누설이 존재한다고 가정하고 입출구 양단에서의 압력강하를 비교하여 판별하였다.⁽⁴⁾

연구 대상 시일에는 공기와 오일입적 이 포함된 2 상(phase)의 압축성 유동이 일어나게 된다. 따라서 CFD 해석에 있어서도 2상 난류유동(two phase turbulent flow)을 가정하여 해석하였으며 시일 간극에서 발생하는 등축과정(isentropic process)에 의한 압력강하(pressure drop)의 영향이 고려될 수 있도록 압축성 유동(compressible flow)을 가정하였다.^(6,7) 해석영역의 크기(domain) 및 초기조건은 모두 동일하고 시일구조(geometry)를 제외한 요소배열, 개수 및 경계조건은 모두 일정한 2차원 2상 난류유동을 가정하였다. 경계조건으로써, 베어링에서의 고온유입을 가정하여 유입온도를 100 °C를 가정하였고 외부온도는 20 °C로 가정하였다. 시일 내에서의 열전달은 단열조건을 가정하였으며 시일내 누설 유입 속도는 10 m/s 이다.

2. 형상설계변수 및 해석결과

2.1 Cavity Flow Type 설계변수

일정한 공간 내에서 cavity flow type의 설계 변수는 케비티의 깊이, 케비티의 폭 등이며 Fig. 1에 cavity flow type 에

대한 설계 변수를 도시하였다.

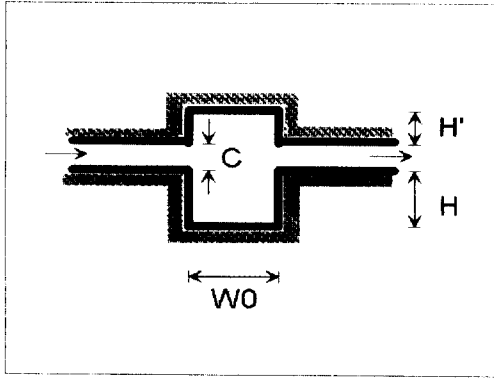


Fig. 1 Design Parameters of Cavity Flow Type

2.2 케비티 깊이의 영향

CFD 해석은 케비티의 폭, $W0/C$ 의 값이 2.5, 5.0, 10.0, 15.0 일 때에 대하여 깊이를 변화시켜 가며 수행하였으며 Fig. 2에 무차원화한 결과를 나타내었다. 케비티의 폭, $W0/C$ 가 2.5와 5.0일 경우 케비티의 깊이, H/C 가 2.7정도의 위치에서 가장 높은 압력강하를 나타내었으며 케비티의 폭 $W0/C$ 가 10과 15일 경우 케비티의 깊이, H/C 가 1.3 부근에서 최대 압력강하를 나타내었다. 케비티에서의 압력강하는 케비티가 깊을 수록 점차 증가하나 H/C 가 1.3에서 2.7 되는 부근에서 정점을 이루고 그 이상 깊어지면 오히려 압력강하가 낮아지는 구간이 생겨난다. 그러므로 케비티만으로 누설을 처리할 경우 케비티의 깊이는 그 폭과 상관하여 가장 압력강하가 크게 나타나는 깊이로 설계되어야 한다는 것을 알 수 있다.

2.3 케비티 폭의 영향

Fig. 2에서의 결과를 보면 케비티가 넓을수록 압력강하가 증대되어 밀봉효율이 높아지는 것을 알 수 있다. 케비티의 폭이 넓을수록 대부분의 압력강하가 넓은 공간에서 좁은 누설 출구를 통과할 때 발생한다. 이는 케비티의 폭이 넓어질수록 유동이 충분히 팽창하게 되어 누설

출구로의 유출이 어렵다는 것을 나타내고 있다. 따라서 케비티만으로 밀봉을 이룰 경우 그 폭을 가능한 한 넓게 하는 것이 누설방지에 유리함을 알 수 있다.

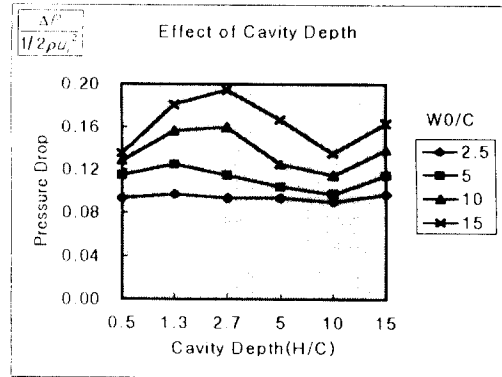


Fig. 2 Effect of Cavity Depth and Width

2.4 Protective Collar Type의 설계 변수

Fig. 3에 protective collar type의 설계 변수를 도시하여 놓았다. 이러한 protective collar type에서는 두 가지 효과를 기대할 수 있다. 하나는 프로젝트 칼리에 의한 유동 흐름 조절로 난류 발생을 증대시키는 효과이고 다른 하나는 최소 간극을 칼라와 케비티 사이에 위치 (C1, C2, C3) 시켜 교축과정에 의한 압력강하 효과를 기대하는 것이다.

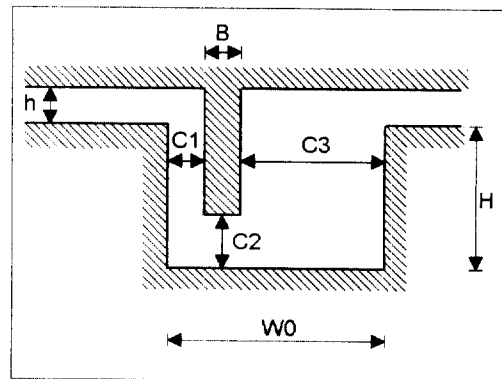


Fig. 3 Design Parameters of Protective Collar Type

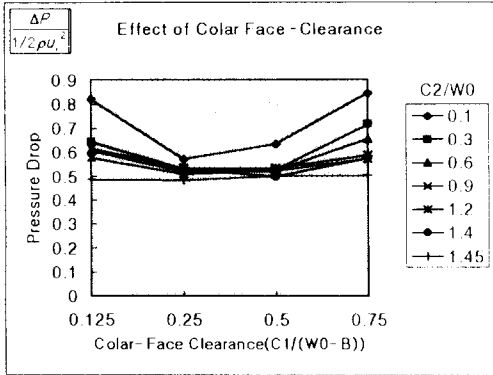


Fig. 4 Effect of Collar Face(C1) and End(C2) Clearance(h=0.1W0)

2.5 유입틈새가 좁은 형상에서 컬러 위치의 영향

누설 입구측이 최소간극을 유지할 경우(h=0.1W0)에 대하여 컬러의 위치(C1, C2)를 변화시켜가며 유동해석을 수행하였다. 계산된 결과는 C2/W0의 값이 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.4, 1.45 일 때 C1 변화에 따른 압력강하의 변화이다. Fig. 4에 비교 결과를 도시하였다.

Face-Clearance에서의 교축효과는 교축이 발생하는 형상(좁은 틈새가 생성되어 있는 형상)과 그렇지 않은 경우의 압력강하의 크기를 비교하여 보면 알 수 있다. 교축에 의한 압력강하의 효과가 나타나는 곳은 그렇지 않은 곳에 비하여 상대적으로 큰 압력강하를 나타내게 된다.

밀봉효과의 측면에서 컬러의 위치는 캐비티의 선단(입구측)에 위치하거나 캐비티의 중단(출구측)에 위치 할 경우에 보다 큰 압력 강하를 나타내고 중앙에 위치할 경우 압력강하가 낮아짐을 알 수 있다.

교축효과의 측면에서, C1/(W0-B)가 0.125 일 때와 0.25 일 때 압력강하의 차이가 그리 크지 않으므로 Face-Clearance에 의한 교축효과가 그리 크지 않음을 알 수 있다.

컬러 길이 변화(C2의 변화)에 대한 결과는 캐비티 밀면과의 틈새, C2를 작게

하여 최소간극이 되도록 설계하는 것이 밀봉성능면에서 가장 우수한 효과를 나타냄을 알 수 있다.

2.6 유입틈새가 넓은 형상에서 컬러 위치의 영향

누설 입구측의 유입통로가 넓을 때에(h=0.4W0) 컬러의 위치(C1, C2)에 따른 압력강하의 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 유입통로의 틈새가 넓을 때에는 캐비티에서 팽창의 영향이 무시되므로 대부분의 압력강하는 유입된 유동이 컬러에 의해 흐름이 저지될 때 발생한다. 틈새가 너무 넓어서 교축에 의한 효과를 기대할 수 없는 경우를 제외하고는 C1/(W0-B)가 0.125 일 때와 0.250 일 때의 압력강하의 차이가 다른 구간에 비하여 상대적으로 크게 나타나 교축과정에 의한 압력강하의 효과가 지배적임을 나타내고 있다. 그러므로 누설 유입통로가 넓을 때에는 컬러와 캐비티 벽면에 의해 시일의 최소 간극이 생성되어야 함을 알 수 있다.

유입통로가 넓을 경우, 컬러 길이의 변화에 대한 영향에서도 교축과정에 의한 압력강하의 영향이 지배적이 되기 때문에 컬러 끝단과 캐비티에 의해 생성되는 틈새 C2가 최소 간극이 될 경우 높은 압력 강하를 나타내는 것을 알 수 있다.

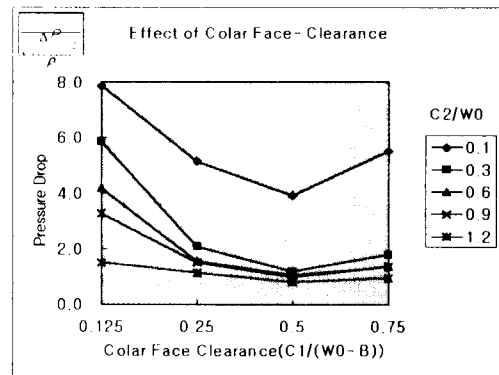


Fig. 5 Effect of Collar Face(C1) and End(C2) Clearance(h=0.4W0)

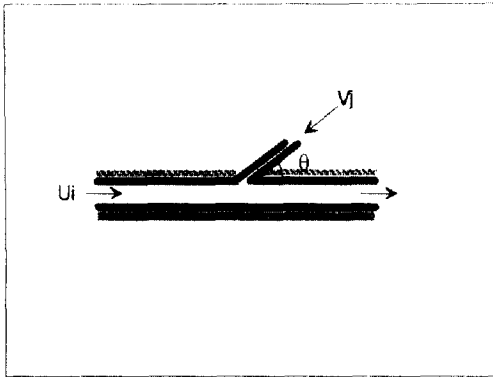


Fig. 6 Design Parameters of Air Jet Type

2.7 Air jet type 의 설계 변수

Fig. 6에 기본 유형에 대한 설계변수를 도시하였다. 이러한 유형에서의 설계 변수는 일반적으로 분사량의 크기(v_j)와 분사각(θ)이다.

2.8 분사각도의 영향 및 밀봉메카니즘

Fig. 7에 각도 변화에 따른 압력강하의 변화를 도시하였다. 분사각도는 수직으로 분사하였을 때에 가장 큰 압력강하를 나타내었다. 이러한 결과는 공기분사에 의한 유효 누설틈새 감소의 효과로 설명될 수 있다.

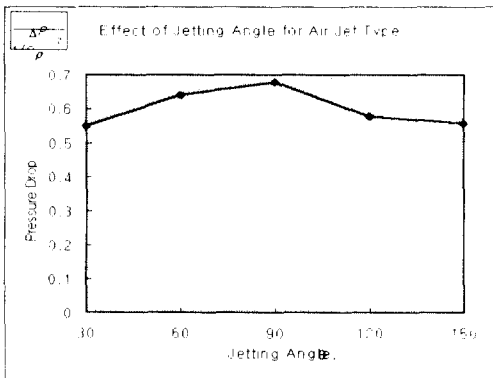


Fig. 7 Effect of Jetting Angle for Air Jet Type

Fig. 8에 공기분사에 의한 유효 누설틈새 감소의 효과를 나타낼 수 있도록

공기분사가 가해졌을 때의 유선분포를 도시하여 놓았다. Fig. 8에서 보는바와 같이 분사로 인하여 실제 누설이 이루어지는 유효 누설틈새의 영역이 줄어들었음을 알 수 있다. 공기분사의 각도를 90° 로 할 경우 유효누설틈새의 크기가 가장 좁아지게 되므로 우수한 밀봉효과를 나타내게 된다.

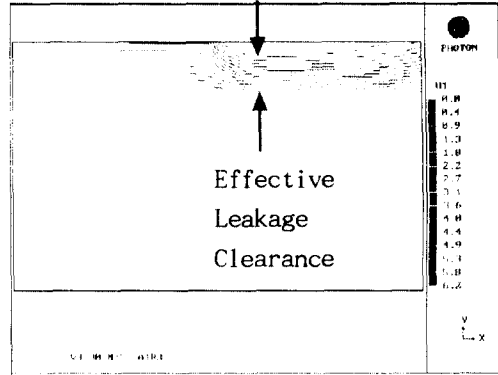


Fig. 8 Reduce of Effective Leakage Clearance

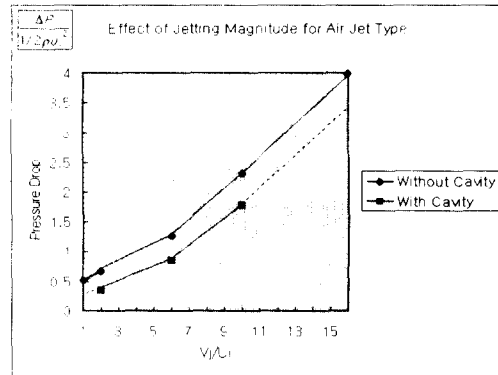


Fig. 9 Effect of Jetting Magnitude for Air Jet Type

2.9 공기 분사량의 영향

Fig. 9에 분사량 변화에 따른 압력강하의 변화를 도시하였다. 누설유량에 비해 분사량이 작을 경우에는 압력강하가 매우 적조하며 분사량이 증가할수록 압력강하가 커져 밀봉효과가 증대됨을 알 수 있다. 누설방지의 측면에서는 가능한 한 분사압력을 높게 하는 것이 좋다.

2.10 공기 분사에 대한 케비티의 영향

Fig. 9에 케비티가 있는 경우에 대하여 동시에 도시하였다. 동일한 분사량을 가했을 경우 케비티가 없는 형상에 비하여 오히려 압력강하의 크기가 낮아짐을 알 수 있다. 이것은 공기분사로 좁아진 유효 누설통로가 케비티의 공간에 의하여 보상되기 때문에 효과적으로 압력강하를 발생시키지 못하기 때문이다. Fig. 9에 케비티 공간에 의하여 유효누설통로 감소에 대한 보상효과를 나타내는 유선분포를 도시하였다. Fig. 8에서의 유선분포를 보면 분사 지점에서의 유효누설간극이 좁아진 것을 알 수 있는데 Fig. 9에서는 좁아진 유효누설틈새가 케비티에 의해 보상되어 넓은 공간으로 누설이 이루어지는 것을 알 수 있다.

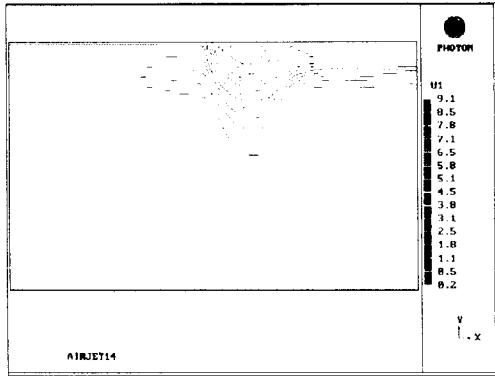


Fig. 9 Stream Line of Air Jet Type With Cavity

5. 결론

고속주축용 비접촉 시일에 있어서 CFD 해석을 통한 형상 설계 변수에 관한 특성은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. Cavity type에서 케비티의 깊이는 최대 압력강하를 나타내는 최적깊이로 설계하여야 하고 케비티의 폭은 넓을수록 밀봉효과가 뛰어나다.
2. Protective collar type의 유입통로가 좁은 경우 교축과정에 의한 압력강하 효과가 크지 않다.
3. Protective collar type에서 컬러의 크기

는 최대한 크게 하여 케비티의 하단에 최소간극을 생성시키는 것이 가장 유리하며 그렇지 않을 경우 컬러의 길이는 압력강하에 큰 영향을 미치지 않는다.

4. protective collar type에서 유입통로가 넓은 경우 케비티선단에 컬러를 위치시키는 것이 밀봉에 유리하다.
5. Air jet type의 경우 공기 분사량이 누설유량에 비하여 월등히 커야 양호한 밀봉효과를 기대할 수 있다.
6. Air jet type에서 분사각도는 90° 수직 분사시에 가장 우수한 밀봉성능을 얻을 수 있다.
7. Air jet type에서 케비티가 있는 경우에는 오히려 밀봉효과가 불량하게 된다.

6. 참고문헌

1. "Seals and Sealing HANDBOOK 2nd Edition", Trade & Technical Press Limited, 1986
2. Stoff, H., "Incompressible Flow in a Labyrinth Seal", J. of Fluid Mech, Vol.100, pp 817-829, 1980
3. 나병철, 전경진, 한동철, "고속 주축용 시일의 누설 특성 해석", 한국정밀공학회지, 제 12권, 제 13호, 12월호, pp 131-138, 1995
4. 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
5. Kawahara, Y. and Hirabayshi H., "An analysis of Sealing Characteristics of Oil Seals", ASLE Trans, Vol.23, pp 93-102, 1980
6. Suhas V. Partankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Spalding, 1980
7. "PHOENICS Traning Course Notes CHAM TR/300", 1990, CHAM Limited, 1990