

Foil사이의 미끄러짐을 고려한 Foil Bearing 변형 및 내부유동특성해석

이상훈* · 원찬식* · 허남건** · 전승배***

Internal Flow Characteristic Analysis and Deformation of Foil Bearing Considering Slip between Foils

S.H. Lee*, C.S. Won*, N. Hur**, S.B. Jeon***

Key Words: Leaf Type Foil Bearing(박막형 포일 베어링), Flow/Structure Interaction Analysis(유동/구조 연성해석), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Finite Element Method(유한 요소법)

ABSTRACT

Leaf type foil bearings have been used successfully in many aerospace applications such as air cycle machines, turbocompressors and turboexpander. These applications are characterized by light loads, constant speeds and low to moderate temperatures. But, as system on start-up or shutdown, sliding contact between the shaft and foil surfaces cause wear. So, in present study, to understand pressure-flow characteristics and deformation of foil bearing, flow/structure interaction analysis was used. and using this method, 2D and 3D calculation was performed for shape of foil bearing to know circumferential direction flow and leakage flow characteristics of axial direction

1. 서론

고속으로 회전하는 회전체에서 베어링의 역할은 상당히 중요하다. 일정속도 이상으로 회전할 경우 회전축과 베어링간의 마찰에 의한 열과 일의 손실로 회전체의 역할을 제대로 다하지 못할 수 있다. 고속 회전인 경우 마찰에 의한 손실을 막기 위해 기존의 볼베어링이나 롤러베어링이 사용되던 보단 Foil Bearing이 적합한 기계요소로 인식되어지고 있다. Foil Bearing의 작동원리는 회전축이 고속 회전하게 되면 공기의 유동에 의한 압력상승으로 Foil Bearing이 축으로부터 떨어

어지게 되고 공기자체가 베어링의 역할을 하게 하는 것이다.

Foil Bearing의 장점으로는 윤활을 위한 별도의 장치가 필요 없기 때문에 무게의 경량화를 가져 올 수 있다. 그리고 Foil Bearing의 축과 닿는 면적이 넓기 때문에 회전축을 보다 더 안정하게 고정시킬 수 있게 된다. 그러나 단점으로는 작동 시 Foil과 회전축과의 마찰이 발생함으로 이때 Foil의 마모가 발생이 된다.

지금 Foil Bearing에 대해 활발히 연구중이다. Swanson⁽¹⁾ 등은 작은 가스터빈엔진(31 KN to 53 KN thrust class)을 이용하여 회전자의 동적인 움직임을 통해 Foil Bearing의 성능을 테스트했으며, 30,000 rpm 정도의 속도에서 Foil Bearing의 사용이 효과적으로 사용됨을 확인하였다. Peng과 Carpino⁽²⁾는 유한 요소법을 이용하여 Foil Bearing의 강성과 감쇠 계수를 예

* 서강대학교 기계공학과 대학원

** 서강대학교 기계공학과

*** 삼성테크윈

E_mail : manaves@hotmail.com

측하여 Foil 박막의 강성이 베어링의 동특성계수에 영향을 미침을 보여주었고 DellaCorte⁽³⁾는 Foil의 재질 상태에 따른 Foil Bearing의 성능 향상에 관한 연구를 수행하였다.

Foil Bearing에 대한 연구는 실험과 수치 해석 등을 통하여 상당수 이루어지고 있으나 대개 Foil의 동적 특성에 중점을 두어 진행되어오고 있으며, 아직까지 열/유동 특성과 함께 동적 특성에 대한 수치해석 연구는 부족한 편이다. 특히, Foil Bearing은 축이 회전하지 않고 정지해 있는 경우는 Foil이 축에 닿아 있다가, 회전하게 되면 공기의 유동에 의한 압력상승으로 Foil이 축으로부터 떨어지게 되므로, 유동해석과 함께 구조해석을 병행하여야 만이 정확한 해석이 가능하다. 그러나 지금까지 연구들은 실험에 바탕을 두고 있거나 단순화된 유체 모델을 이용한 해석결과들을 보여 주고 있으며 전술한 유동/구조 연성해석에 의한 해석은 거의 진행되지 않았다.

이것에 대한 선행 연구로 이상훈과 허남건⁽⁴⁾ 등은 계산을 간단히 하기 위해서 서로 떨어진 형태의 Foil들의 형상을 붙여있는 것으로 가정하여 계산을 수행하였다. 그래서 본 연구의 주목적은 보다 실제현상에 가깝게 Foil들간에 떨어진 상태에서 미끄러짐이 발생하는 Foil Bearing의 유동 현상과 Foil의 구조적 변형 양상을 함께 고려하는 연성 해석 방법론을 개발하고, 이를 적용하여 설계된 Foil Bearing의 유동/구조 특성을 해석하는데 있다.

2. 수치해석

2.1 유동해석

Leaf type Foil Bearing은 대개 Fig. 1과 같은 형상을 가지고 있다. 이와 같은 베어링의 유동 해석을 위하여 현재 계획중인 설계 도면에 주어진 형상을 이용하여 계산 격자를 형성하였다. 2차원 형상에 대한 해석격자는 40,000개, 3차원 형상에 대해서는 900,000개의 Cell을 사용하였다. Fig. 2에 2차원 유동 해석 격자를 나타내었다. 이때 해석 격자는 회전축과 베어링 사이의 유동만을 고려하여 작성하였으며 원주 방향 양 끝단에 회전 주기 경계 조건을 주어서 계산을 수행하였다. 베어링의 폭이 축 방향으로 유동이 완전히 발달할 정도로 충분히 길기 때문에 축 방향 면에

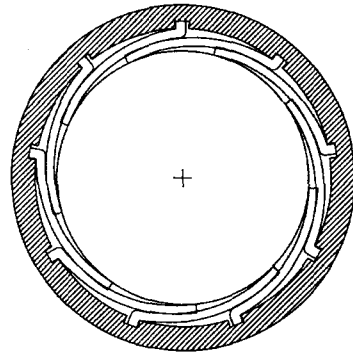


Fig. 1 Shape of leaf type Foil Bearing

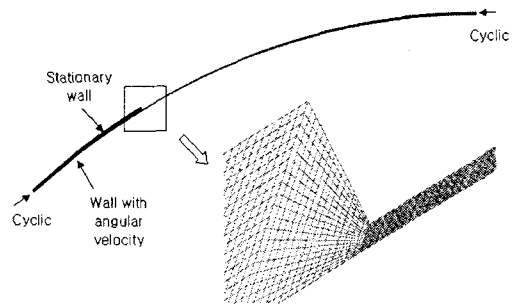


Fig. 2 Computational mesh for 2D Flow analysis

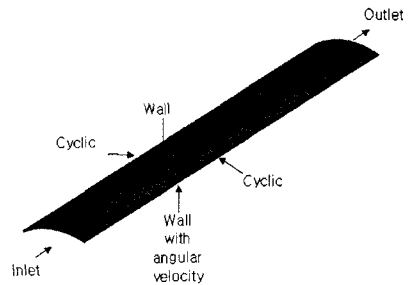


Fig. 3 Computational mesh and Boundary conditions for 3D Flow analysis

대칭 경계 조건을 주어서 2차원 계산 격자를 생성하였다. 2차원 계산은 구조해석과 연성해서 이루어진다. 3차원 계산 격자는 축 방향의 유동특성을 알아보기 위해 축 방향으로 충분히 길게 하여 계산 영역으로 잡았다. 격자의 형상은 Foil Bearing이 차지하는 영역과 축 방향으로 Foil Bearing으로 들어가는 부분과 나가는 부분으로 나누었고 경계조건과 격자형상은 Fig. 3에 나타나있다.

2.3 유동/구조 연성해석

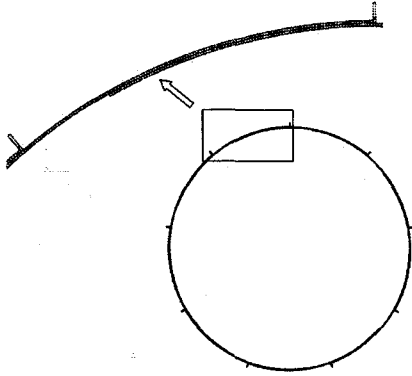


Fig. 4 Computational mesh for structural analysis

Foil과 회전축과 접하는 면에는 2차원 계산에서는 4가지의 Rotor 회전속도별로 30,000 rpm, 50,000 rpm, 70,000 rpm, 90,000 rpm의 회전 속도를 갖는 벽 조건을 주어 각 경우별로 계산을 수행하였고 각 rpm에서 구해진 Foil의 변위를 채택하여 계산 격자를 바꿔가며 계산을 수행했다. 3차원 계산에서는 최종 수렴된 형태의 형상을 가지고 70,000 rpm에 대한 계산을 수행하였다. 본 연구의 지배 방정식은 연속 방정식, 압축성 $k-\epsilon$ 난류 모델, 에너지 보존 방정식이며 열, 유동 해석을 위해 상용 해석 프로그램인 STAR-CD⁽⁵⁾를 이용했다.

2.2 구조해석

전체의 Foil Bearing 형상을 가지고 구조변형의 해석을 수행했다. 구조 해석을 하기 위한 유한 요소 모델은 Foil Bearing의 형상만을 고려하여 4절점 요소를 사용하였다. 구조해석에 사용된 계산 격자는 두께 0.143 mm의 베어링의 형상으로 계산 격자 형상은 Fig. 4에 나타내었고 총 3069개의 요소로 이루어지며 베어링에 사용되는 Inconel Alloy X750의 재질 특성을 고려하여 탄성계수는 210 GPa, 압축성을 고려하여 포와송비는 0.30의 값을 주었다. 그리고 Foil 두 장이 겹치는 부분에 대해서는 실제적으로는 미끄러짐이 발생하게 됨으로 Foil사이의 재료특성에 의한 마찰계수는 참고논문⁽³⁾에 의해 0.4의 값을 가진다. 그리고 베어링 곡면 아랫부분에는 2차원 유동해석에서 구한 압력 값을 주어 계산하였다. 유한 요소 해석은 ABAQUS⁽⁶⁾를 이용하였다.

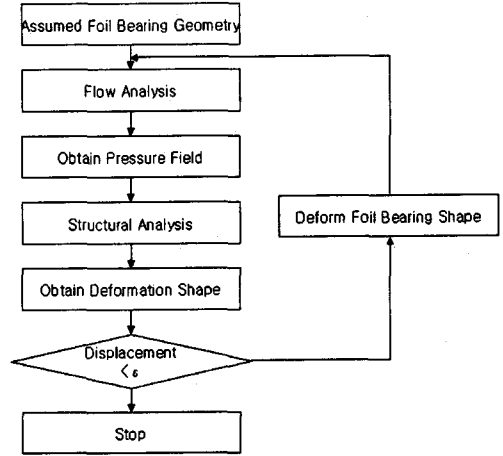


Fig. 5 Flow/Structure Interaction Algorithm

유동/구조 연성 해석은 유동 현상에 의해 형상이 결정되고, 그 형상에 따라 유동의 양상이 달라지는 물리적 현상을 해석하는 기법이다. 전체 알고리즘은 Fig. 5에 제시하였다. 처음 계산은 가정된 형상으로 Foil Bearing에 작용하는 압력분포를 구한다. 또 이것은 0.02 mm간극으로 Rotor의 회전면과 Foil의 끝단을 띄운 형태이다. 이 형상에 대한 유동해석을 통한 압력분포를 구한 다음 가정된 형상이 아닌 원래의 Foil의 형상으로 구조해석을 한다. 이렇게 하는 이유는 Rotor가 정지된 상태에서 Foil의 끝단은 Rotor와 맞붙은 상태에 있기 때문이다. 그래서 Foil의 변형양상을 알아보기 위해서 실제의 형상으로 구조해석을 하게 된다. 변형된 형상이 수렴된 상태가 아니라면 다시 다음 단계의 계산으로 넘어간다. 전 단계에서의 구조해석 후 변형된 형상을 이용하여 유동해석을 다시 수행한다.

이때 전 단계에서의 유동장에 대한 계산 데이터를 이어받아 수행하게 한다. 유동해석을 다시 수행하면 새로운 압력분포가 나오게 된다. 이 값을 구조해석에 다시 적용하게 된다. 적용 후 변형된 형상이 수렴된 상태가 아니면 수렴이 될 때까지 즉, 더 이상의 변형이 되지 않을 때까지 이전의 과정들을 반복계산을 한다. 실제적으로 이 기법은 김옥과 허남건⁽⁷⁾에 의하여 Oil fence의 변형 예측 연구와 원찬식과 허남건⁽⁸⁾의 CSF(Cerebrospinal Fluid) Control Shunt 밸브의 변형 예측에 사용된 바 있다.

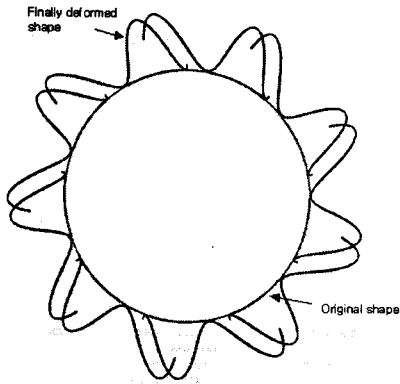


Fig. 6 Structure analysis result for original shape finally deformed shape (245 times magnification)

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 Foil Bearing에 대한 2차원 및 3차원 계산을 수행하였는데 그 이유는 회전축의 회전에 의한 원주방향의 유동과 압력차이에 기인한 누설유동인 축 방향의 유동이 혼재하는 3차원 유동이다. 2차원 계산은 원주방향의 유동을 살펴보기 위한 유동계산과 반지름 방향의 변형을 알아보기 위한 구조계산을 함께 수행하였고 2차원에서 계산된 최종 형상을 3차원에 적용하여 축 방향의 유동을 관찰하기 위해서 3차원 유동계산을 수행하였다.

유동계산을 처음 수행할 때에 처음에는 Foil의 끝단이 회전축으로부터 0.02 mm 떨어져 있다고 가정하여 해석하였다. 이는 Bearing이 작동하지 않는 상태에서는 회전축과 닿아 있으나, 작동상태에서는 Foil의 끝단이 회전축과 어느 정도 떨어져 있기 때문이다. 이렇게 구한 압력분포로부터 구조해석을 수행하였으며, 구조해석에서 초기형상은 Foil의 끝단이 회전축과 맞닿아 있는 것으로 하였다. Fig. 5는 Foil Bearing의 변형 형상을 확대해서 나타낸 것이고 Table 1을 보면 각 rpm 별로 구조해석 시 Foil의 끝단이 수렴되는 과정을 나타낸 것이다. 구조해석의 결과로 Foil의 변형형상을 구하게 되고, 이를 이용하여 유동해석 격자를 다시 생성하여 유동해석을 수행하게 되어, 유동해석과 구조해석을 수렴된 결과를 얻을 때까지 반복 수행하였다. 설계속도인 70,000 rpm에서 최종 Foil의 형상은 끝단이 회전축으로부터 약 0.0224 mm 떨어진 곳에 위치하게 되는 것을 알 수 있었다. 반지름 방향의 변형거리는 계

Table 1 Convergence history for position of foil end point

Iter.	Displacement from center of rotor to foil end (mm)			
	30,000 rpm	50,000 rpm	70,000 rpm	90,000 rpm
0	0.02	0.02	0.02	0.02
1	0.0208	0.0227	0.0317	0.0517
2	0.0207	0.0210	0.024	0.0218
3	-	0.0212	0.0214	0.0246
4	-	-	0.0229	0.0224
5	-	-	0.0224	0.0240
6	-	-	-	0.0227
7	-	-	-	0.0234

* Shaded cell is converged displacement

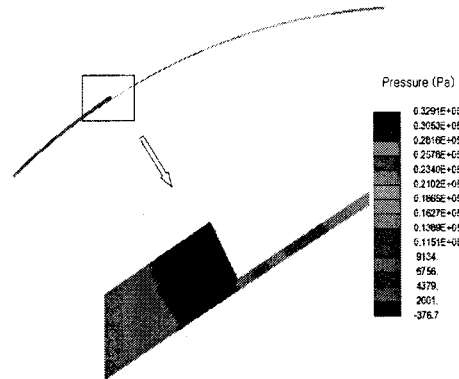


Fig. 7 Relative pressure for final shape (70,000 rpm) for 2D

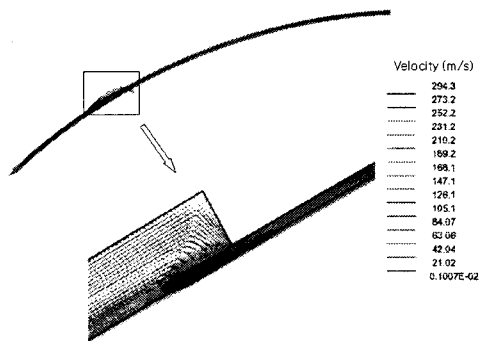


Fig. 8 Velocity magnitude for final shape (70,000 rpm) for 2D

산횟수가 증가함에 따라 증가 및 감소를 반복해 가며 수렴해간다. 회전수의 증가에 따른 내부유동이 안정화

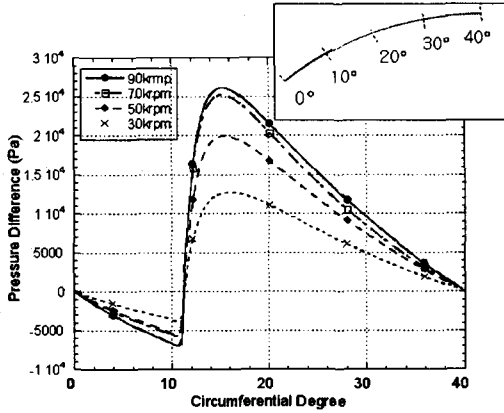


Fig. 9 Pressure difference for each case

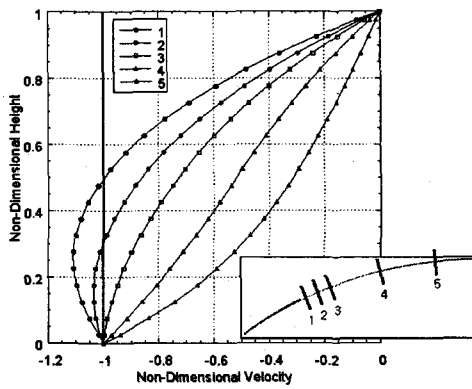


Fig. 10 Velocity profile at various position

되어 가는 과정을 나타내는 것이다.

이는 처음에 Foil Bearing의 끝단을 조금만 띄워 놓고 계산을 수행했기 때문에 처음 가정된 위치가 수렴되어 나올 최종 위치보다 작은 값을 가지고 있었기 때문에 그 부분에서 보다 많은 압력을 받게 되어서 보다 큰 변형이 일어났다. 그 변형만큼 이동된 형상에 다시 압력을 구했을 때가 두 번째 해석에 접어드는데 그때의 형상은 첫 번째 해석에서 보다 좀 줄어든 값을 보인다. 이는 처음에 가정된 간격이 너무 좁아 상당히 많은 압력이 걸려서 많은 변형을 했으므로 2단계에서는 상대적으로 적은 압력을 받게되어 이동 거리가 줄어들게 된 것이다.

Fig. 7은 70,000 rpm에서 Foil아래면의 압력 분포를 나타낸 것이고 압력이 가장 낮은 위치는 유로가 확장되는 부분에서 현저하게 압력이 낮아짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 70,000 rpm에서의 최종적으로 수렴한 속도

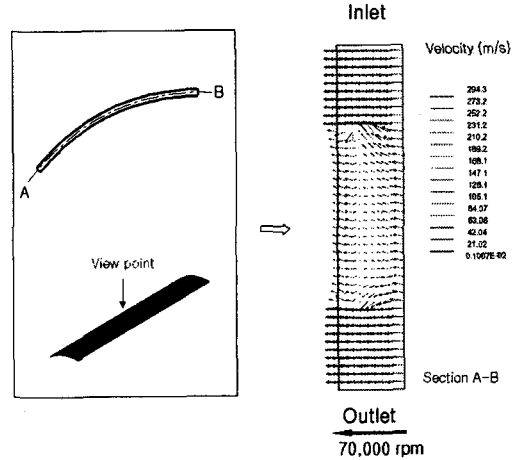


Fig. 11 Velocity profile of axial direction in 3D calculation

를 나타낸 것이다. 속도분포를 보면 좁은 유로에서 기존의 회전수에 해당한 속도보다 훨씬 빠른 속도가 나타남을 알 수 있다. Rotor의 회전에 의한 축 표면의 속도는 약 218 m/s 인데, 압축성 유동으로 해석했기 때문에 최고속도는 이 보다 높은 약 294 m/s를 가짐을 알 수 있다. 이것은 Fig. 10을 보면 Jet 유동처럼 압력이 높은 곳에서 낮은 곳으로 유동이 팽창하면서 높은 속도를 갖게되기 때문이다. 그리고 급격히 확대되는 공간에서 심한 역류 현상도 관찰 할 수가 있었다.

Fig. 9는 각 rpm에서 Foil곡면 하단에 작용하는 압력분포를 나타낸 것이다. 이때의 압력분포는 Foil의 윗면에서 작용하는 압력과 아래면에서 작용하는 압력의 차이를 나타낸다. 윗면에서의 압력은 3차원해석 결과 아래면에서의 Foil양쪽 끝에서의 압력과 같았기 때문에 2차원계산에 이를 적용하였다. rpm이 증가할수록 최대압도 마찬가지로 증가 하지만 계속 비례해서 증가하는 것이 아니라 마치 한곳으로 수렴하는 형상으로 압력분포가 발달되고 있다. 이는 Foil곡면 아래부분의 압력이 커지면 윗면의 압력도 커지기 때문이다.

3차원 계산은 70,000 rpm에서 축방향 누설유동의 특징을 알아보기 위한 것인데 이때 유동의 입구부분에 축방향으로 1 m/s의 속도를 임의로 주었을 때 Foil Bearing에서 입구와 출구의 압력차는 약 14 kPa정도가 되었다. 그리고 Fig. 11을 보면 입구부분에서는 Foil 아래 부분의 유로가 넓은 부분에 대해 공기의 유입이 출구보다 두드러진다. 이것은 입구에서의 임의의 속도

를 주었기 때문에 입구쪽의 압력이 출구쪽보다 높은 것을 나타낸다. 그리고 Jet유동이 나타나는 부분에서는 축방향의 흐름이 다른 곳보다 크게 된다.

4. 결론

2차원 해석에서 회전 방향으로 Foil Bearing의 아래 부분에서의 내부유동특성과 변형 양상을 각 rpm별로 알아보았다. 70,000 rpm인 경우에 좁은 곳에서 확장된 곳으로 가는 유로에서의 Jet유동과 유동의 역류현상을 관찰할 수 있었고, 가장 낮은 압력지점은 Foil의 끝단 부분에서 확장된 유로에 있으며 가장 압력이 높게 걸리는 곳은 Foil끝단에서의 좁은 유로부분이다. Foil Bearing에 걸리는 최고치 압력과 최저치 압력 차는 약 33 kPa이다. 그리고 회전수가 증가함에 따라 Foil 아래면에 작용하는 압력의 증가율이 감소함을 알 수 있다.

Foil Bearing의 변형에 대해서는 회전수가 높을수록 보다 많은 수렴과정이 필요하였다. 그리고 3차원 계산에서는 주어진 입구 속도에 따른 축방향의 Foil양끝의 압력차를 알아보았고 축방향의 유동흐름을 관찰해 보았다. 이처럼 Foil Bearing해석에 있어서 수치적인 방법을 통하여 유동/구조 연석해석 기법을 이용한 Foil Bearing에 대한 유동특성 및 구조변형을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 중점 국가 연구 개발사업인 “차세대 초소형 압축기 개발의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Swanson, E.E., Heshmat, H. and Walton II, J., 2000, "Performance of a Foil-Magnetic Hybrid Bearing.", Proceedings of TURBOEXPO2000, ASME 2000-GT-0387.
- (2) Peng, J.P. and Carpino, M., 1997, "Finite Element Approach to the Prediction of Foil Bearing Rotor Dynamic Coefficients," journal of Tribology, vol. 119, pp 85-90.
- (3) DellaCorte, C. and Laskowski, J.A., 1996, "Friction and Wear Characteristics of Candidate Foil Bearing Materials From 25°C to 800°C," NASA TM-107082.
- (4) 이상훈, 허남건, 2001, "유동/구조 연석해석에 기법에 의한 Foil Bearing 유동특성해석," 대한기계학회 유체공학부문 추계학술대회 논문집, pp 265-270.
- (5) STAR-CD User's Manual Version 3.1, 1999, Computational Dynamics Limited.
- (6) ABAQUS Standard User's Manual, 1999, Version 5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.
- (7) Kim, W. and Hur, N., 1999, "A Numerical Simulation of an Oil Fence Deformation by Fluid-Solid Interaction Method," STAR-CD User's Conference, pp.128-136.
- (8) Won, C.S., Hur, N. and Lee, C.S., 2001, "A Flow/Structure Interaction Analysis for the Design of Medical CSF-Flow Control Valve," Journal of Computational Fluids Engineering, pp. 40-46.