

의료용 CSF 제어 밸브 설계를 위한 유동/구조 상호작용 해석

Flow/Solid Interaction Analysis for Design of Medical CSF-Flow Control Valve

○원찬식¹⁾, 허남건²⁾, 이종선³⁾

C. S. Won, N. Hur, C. S. Lee

Pressure-flow control characteristics of a commercially available cerebrospinal flow(CSF) control shunt valve was tested using fluid-solid interaction analysis. Pre-stress of the valve diaphragm(membrane) was computed for proper valve opening. The results were in good agreements with the valve specification listed in the commercially available CSF control valve. The results of the study can be effectively used to design variety of CSF control shunt valves.

1. 서론

뇌척수액(cerebrospinal fluid; CSF)은 소량의 당분과 단백질을 포함하는 무색의 액체로서, 뇌와 중추신경계를 감싸며 보호하는 역할을 한다. 성인의 경우 그 양은 약 200 ml 정도이며 하루에 500~600 ml 정도 분비되고 다시 뇌정맥으로 흡수된다. 뇌척수액이 분비와 흡수기전의 불균형 또는 뇌척수 순환통로의 폐쇄로 인하여 뇌실(ventricle)에 과잉 축적된 상태를 수두증(hydrocephalus)이라 한다. CSF 셉트밸브(shunt valve)는 수두증 환자의 머리표피 안에 수술되어 장착되는 소형의 의료기구로서, 뇌실 속에 과잉 축적되는 뇌척수액을 제거해 주기 위한 장치이다. 이때 셉트밸브는 뇌실 안의 압력에 따라서 효과적으로 유량을 배출시키는 기능을 하며 거꾸로 뇌실 쪽으로 유량이 흘러가지 못하도록 하는 일종의 체크밸브 역할도 한다. 현재 가장 일반적으로 쓰이고 있는 셉트시스템은 뇌실과 셉트밸브 입구를 짧은 카테터(catheter)로 연결하고 셉트밸브 출구와 복강사이에 긴 카테터를 연결하여 뇌실 안의 뇌척수액을 체내의 복강(peritoneal cavity) 쪽으로 배출시키는 기구이다. 시술된 셉트시스템(밸브와 카테터)은 여러 가지 이유로 인하여 5년후 50%가량의 재수술을 요하고 있는 상황이다. 현재 시장에는 여러 가지 디자인의 셉트밸브들이 판매되고 있으며 각 디자인마다 특징이 있으나 수두증의 치료효과에 관하여서는 거의 비슷한 것으로 알려져 있다[1].

셉트밸브의 가장 중요한 기능은 압력-유량 조절특성이다. 제작된 밸브 하나 하나에 대하여 간단한 압력-유량조절 실험을 수행하여 기준에 적합하지 않은 밸브는 출하되지 못하게 된다. 본 연구에서는 세계적으로 시장점유율이 가장 높은 밸브인 미국 PS Medical사의 CSF 셉트밸브(Fig. 1, 2)에 대하여 압력-유량 조절 특성을 수치해석을 통하여 수행하였다. 이 밸브는 뇌압이 일정 값 이상 걸리게 되면 유연한 다이아프램(실리콘 일레스토머 멤브레인이며 직경 6mm, 두께 0.45mm)의 변형을 통하여 뇌척수액을 한쪽 방향(Fig. 2의 오른쪽방향)으로 배출시키는 구조이며 다이아프램의 두께와 pre-stress(초기변형)를 이용하여 압력-유량 조절기능을 변경할 수 있다. Fig. 3은 PS Medical의 세가지 다른 두께의 다이아프램에 대한 압력-유량특성을 보여준다. 본 연구에서는 Fig. 3의 특성곡선 중에서 medium pressure valve에 대하여 유동해석과 구조 해석을 병행하여 다이아프램의 변형량(원주끝의 아래쪽 방향으로의 처짐)을 계산하고 이에 따른 압력-유량 특성곡선을 구하였다. 본 연구의 결과는 원하는 압력-유량 조절특성을 갖는 다양한 종류의 셉트밸브를 디자인하

1) 서강대학교 대학원 (121-742 서울시 마포구 신수동 1 전산유체연구실 Tel : 02-705-8637)

2) 서강대학교 기계공학과 (121-742 서울시 마포구 신수동 1 Tel : 02-705-8637)

3) 한동대학교 기계제어시스템공학부 (795-940 경북 포항시 흥해읍 남송리 3 Tel : 0562-260-1393)

는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

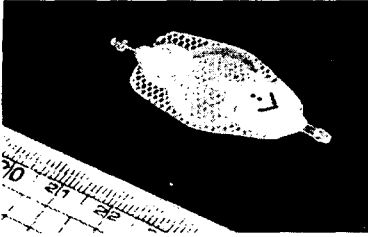


Fig. 1 CSF-flow control shunt valve

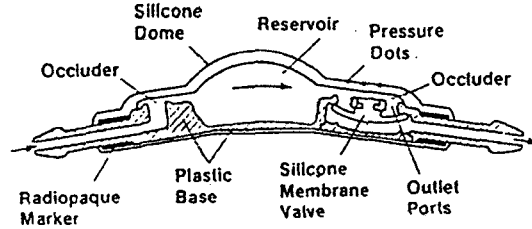


Fig. 2 Schematic diagram of CSF-flow control shunt valve

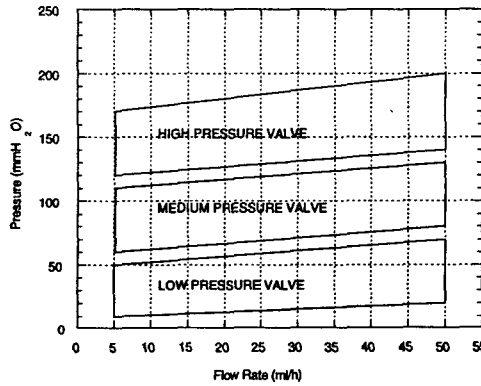


Fig. 3 Pressure-flow characteristics of PS Medical CSF-flow control shunt valve

2. 수치 해석 방법

2.1 유동 해석

유동 해석은 상용 코드인 STAR-CD를 사용하였으며[2], Fig. 4와 같은 계산 격자를 이용하였다. 지배 방정식은 비압축성, 정상 상태, 층류 유동 연속 방정식과 운동 방정식을 사용하였다. 유동해석에 사용된 계산 격자는 총 158,612개의 셀을 사용하였으며 이중 유체 셀은 112,060개, 고체 셀은 46,552개이다. 실제 CSF 유동 제어 셉트에서 유동 방향 축을 중심으로 셉트의 형상이 좌우 대칭이므로 계산 격자는 절반만 작성하고, 중심면에는 symmetry 경계조건을 사용하였다. 셉트 양 끝에는 경계 조건으로 입구조건과 출구조건을 사용하였다. 밸브 출하시의 실험은 상온에서 수행하여 검증하게 되므로 작동유체는 20℃ 물로 가정하였고 주어진 유량에 따른 압력과 밸브의 변형량을 계산함으로써 밸브의 압력-유량특성을 해석하였다.



Fig. 4 Computational mesh for flow analysis

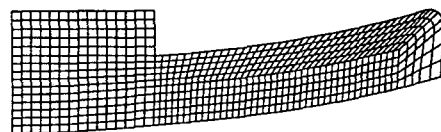


Fig. 5 Axi-symmetric finite element model for valve diaphragm

2.2 구조 해석

유동 해석을 통해 얻은 밸브의 위, 아랫면의 압력을 보면 원주 방향으로 균일하게 분포한다. 따라서 구조 해석을 하기 위한 유한 요소 모델은 밸브의 형상만을 고려하여 축대칭 8절점 요소를 사용하였다. 축대칭 요소를 사용함으로써 계산 격자를 간단하게 만들 수 있었고 아울러 계산 시간의 단축 효과도 얻을 수 있었다. 구조해석에 사용된 계산 격자는 Fig. 5에 나타났었고 총 650개의 요소이며 선트밸브에 사용되는 실리콘 일래스토머의 재료특성을 고려하여 밸브의 탄성계수는 2, 3 MPa, 포와송비는 비압축성을 고려하여 0.49의 값을 주었다. 유한 요소 해석은 ABAQUS를 이용하였다[3].

2.3 유동/구조 상호작용 해석

본 연구에서는 크게 두 가지로 나누어 수치해석을 수행하였다. 선트밸브내의 유동 환경은 초기에는 밸브가 닫혀져 있다가 일정한 압력(opening pressure)이 되면 그때부터 밸브가 열려서 유체가 흘러 배출된다. 즉 밸브는 pre-stress가 주어진 상태에서 작동함을 의미하며 Fig. 5의 다이어그램에서 압력을 전혀 받지 않은 상태에서는 오른쪽 끝부분의 높이가 중앙고정부위의 높이보다 높게 설계되어 있다. 따라서 다이어그램이 Fig. 2와 같이 플라스틱 베이스 내에 장착되면 초기변형이 생기며 pre-stress에 의해 일정한 opening pressure를 갖게 된다. 이러한 점을 고려하여 pre-stress가 없는 경우(Fig. 6)와 있는 경우(Fig. 7)를 각각 나누어 계산을 하였다. pre-stress를 유동 해석에 적용하기 위하여 우선 구조 해석을 통해 pre-stress가 주어진 경우 밸브의 변형 정도를 계산하고 이때 얻어진 밸브의 형상을 이용하여 Fig. 7과 같이 유동 계산 격자를 변형시켰다. 구조해석을 수행한 결과 밸브의 opening pressure가 80 mmH₂O인 경우 다이어그램 끝의 아래쪽 방향으로의 초기 변형량이 117.6 μm이며, 이 값이 적용된 변형된 계산 격자(Fig. 7)를 이용하여 유동 해석을 수행하였다. 유동해석을 위해 미리 계산한 opening pressure와 초기변형은 해석에 사용된 실제 밸브의 디자인 변수와 스펙과 거의 일치하였다.

유동/구조 상호작용 기법은 유동 해석 결과를 이용하여 유연성 있는 다이어그램의 변형 양상을 예측하며, 변형된 다이어그램의 형상은 유동장에 다시 영향을 미치는 상호관계를 반복계산을 통하여 수립시켜 가는 것이다. 실제적으로 이 기법은 허남건과 김욱에 의하여 oil fence의 변형 예측 연구에 사용된바있다.[4] 유동/구조 상호작용 기법을 CSF 제어 밸브에 적용하기 위해서 mean value 방법을 사용하였으며 그 방법은 다음과 같다. 우선 임의의 압력에 대하여 구조 해석을 수행하고 이때 얻은 밸브의 형상을 이용하여 유동 해석을 수행하였다. 유동 해석을 통해 얻은 압력을 구조 해석에 적용된 압력과 비교하여 밸브의 변형량과 압력이 일치하지 않을 경우 압력의 평균을 구하여 구조 해석에 재적용 하였다. 이러한 계산을 구조 해석과 유동 해석에서 얻은 압력과 변형량이 일치할 때까지 반복하였다. 그 예를 Fig. 8에 나타내었다. 전체 알고리즘은 Fig. 9에 제시하였으며, Table 1에는 구조 해석과 유동 해석에 장비의 사양과 계산 시간을 나타내었다.

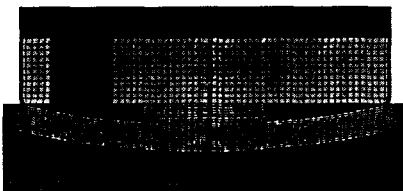


Fig. 6 Computational mesh without pre-stress

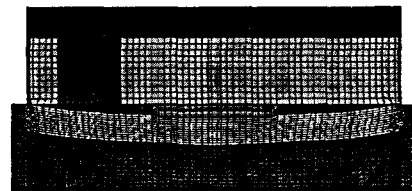


Fig. 7 Computational mesh with pre-stress

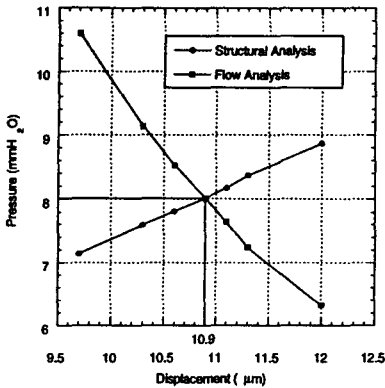


Fig. 8 Example of mean value method

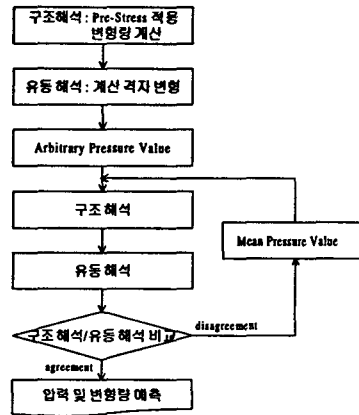


Fig 9 Analysis algorithm

Table 1 Computational conditions

	Flow Analysis	Structural Analysis
Computer	Silicon Graphics Origin 2000	Hewlett Packard SPP 2000 S-Class
CPU	4	4
Memory	2GB	2GB
Hard Disk	36GB	22GB
Analysis Program	STAR-CD	ABAQUS
Number of Cells	158,612	650
Calculation Time	5 Hours	1 Minute

3. 해석 결과

유동 해석은 유량이 5, 10, 20, 30, 50 ml/h인 경우에 대하여 계산을 하였다. Fig. 10, 11은 밸브 다이어프램 부위의 유동의 속도 벡터와 압력 분포를 각각 나타낸다. 속도 분포를 보면 다이어프램(flexible)과 윗벽(rigid) 사이 부분에서 급격히 속도가 증가함을 볼 수 있다. 이 부분에서 큰 압력강하가 생기며 이는 전체 밸브 시스템에서의 압력강하의 대부분을 차지한다. 압력 분포를 보면 다이어프램의 아랫면은 균일한 압력 분포를 갖지만, 다이어프램 윗면에서의 압력은 끝부분에서의 급격한 압력강하의 영향을 받는다. 따라서 다이어프램(이후 밸브라 칭함)의 위, 아랫면의 압력차를 얻기 위해서 밸브 윗면에서의 압력은 면적 평균된 값을 사용하였다. 그리고 밸브의 두께는 0.45 mm로 매우 작은 값을 가지므로 위 아랫면의 압력차를 구할때는 밸브 측면을 고려하지 않았다.

Fig. 12, 13은 pre-stress가 없을 때 밸브의 변형량과 작용하는 압력을 나타낸 그래프이며, 구조 해석시 밸브 재료의 탄성계수를 다르게 하여 계산하였다(E=2, 3 MPa). 위 값은 섀트밸브에 사용되는 실리콘 일래스토머 재료의 20% 스트레인 내에서의 탄성계수 범위에 해당된다. 계산된 결과를 보면 탄성계수가 클수록 밸브의 변형량(다이어프램 끝부분의 아랫쪽 방향으로의 처짐)은 작아지며, 밸브에 걸리는 압력은 커지게 된다. 탄성계수가 3 MPa인 경우, 변형량은 약 12%정도 감소하고 압력은 25%정도 증가한다. 그러므로 제품 제작시 이러한 특성을 고려하여 밸브의 재료를 선택하여야 할 것이다.

Fig. 14, 15는 pre-stress를 고려하여 탄성계수 2MPa을 갖는 밸브의 변형량과 작용하는 압력

을 나타내었다. 유량이 없을 때 밸브에 pre-stress를 $80 \text{ mmH}_2\text{O}$ 를 주었기 때문에 계산을 통해 얻은 결과에서도 유량이 없을때는 압력이 $80 \text{ mmH}_2\text{O}$ 가 되어야 하지만 그래프에서 보면 약 $81 \text{ mmH}_2\text{O}$ 정도가 된다. 이는 압력강하가 급격히 일어나는 밸브의 끝부분의 영향이 압력값을 구하는데 덜 적용되었기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 15에서 밸브 다이어프램에서의 압력차(ΔP_{valve})와 시스템 전체의 압력차(ΔP_{total})를 보면 유량이 증가할수록 그 차이가 점점 커짐을 볼 수 있다. 이는 유량이 증가할 때 밸브 시스템의 다른 부위에 의한 압력강하가 증가되어 더해지기 때문이다. Fig. 15에서 Shunt 전체 입, 출구 사이의 압력차(압력강하) 범위는 $85 \sim 92 \text{ mmH}_2\text{O}$ 로서 Fig. 3과 같이 medium pressure valve의 작동 압력 범위 안에 잘 들어 온다[5].

한편 수치해석에 사용된 것과 동일한 PS Medical의 medium pressure CSF 밸브의 실험결과에 의하면 유량이 $5 \sim 50 \text{ ml/hr}$ 사이에서 밸브전체의 압력강하는 $81.5 \pm 1.5 - 101.4 \pm 2.7 \text{ mmH}_2\text{O}$ 로 측정되었다[1]. 본 연구의 수치해석의 결과 얻어진 압력강하가 실험치에 비해 더 적게 나오는 이유는 밸브 다이어프램 및 맞닿는 부분의 표면 거칠기와 흔들림공차(다이어프램 끝의 원주를 따라서 측방향 흔들림)의 영향으로 사료된다. Fig. 14에서 밸브 다이어프램의 변형량이 $10 \mu\text{m}$ 이내이므로 다이어프램 표면의 조도(거칠기) 값 및 흔들림 제작공차 값과 비슷한 범위로 사료되며 이로 인하여 마찰손실에 의한 압력강하가 더 생기게 됨을 예측할 수 있다. 본 연구의 결과 얻어진 밸브의 작은 처짐량(다이어프램의 아랫방향 처짐)을 고려해 볼 때 밸브 제작시에 다이어프램의 표면조도 및 공차에 상당한 주의와 컨트롤이 필요함을 알 수 있다. 그러므로 제작된 밸브들은 일일이 실험을 통해 압력-유량 특성을 검증하여 품질관리를 할 필요성이 있을 것으로 사료된다.

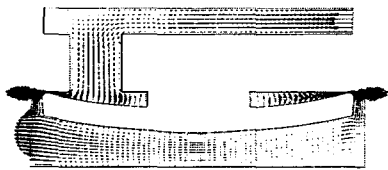


Fig. 10 Velocity vector around the valve

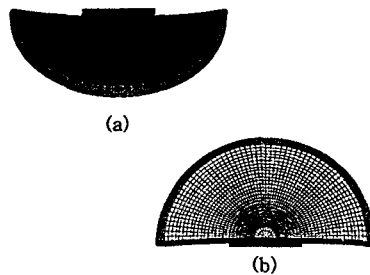


Fig. 11 Pressure distribution on the valve
(a) upside view (b) downside view

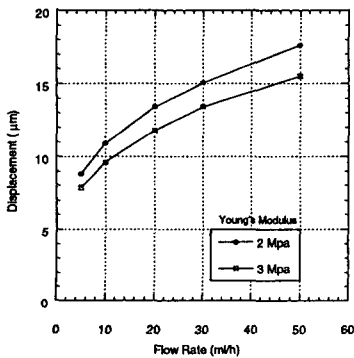


Fig. 12 Valve displacement without pre-stress

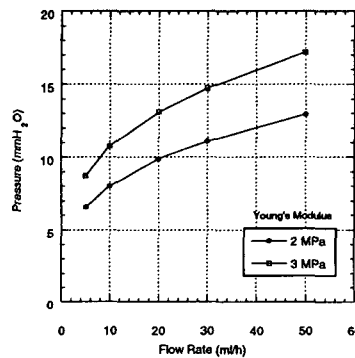


Fig. 13 Pressure distribution without pre-stress

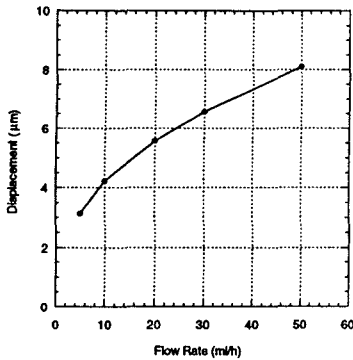


Fig. 14 Valve displacement with pre-stress

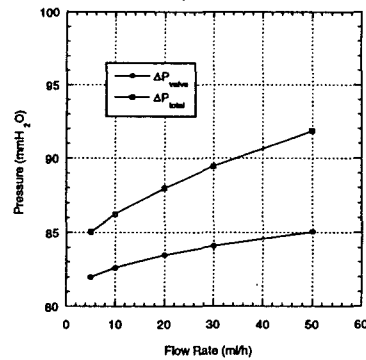


Fig. 15 Pressure distribution with pre-stress

4. 결 론

유동/구조 상호작용 해석을 통하여 CSF 제어 밸브에 작용하는 압력과 변형량을 계산하였다. 본 연구를 통해 밸브의 탄성계수가 2MPa이고 pre-stress가 적용된 경우, 밸브의 opening pressure와 초기 변형량이 실제 밸브의 값과 일치하였고 밸브 전체의 압력강하는 실제 사용되고 있는 CSF 제어 밸브의 압력 범위 내에 들어옴을 확인할 수 있었다. 그러나 실험에 비하여 수치해석 압력강하의 곡선이 완만한 기울기를 보였는데 이는 밸브 다이어프램의 변형이 워낙 작은 관계로 인하여 밸브의 제작공차와 표면조도가 유동에 의한 압력강하에 실제적 영향을 미치고 있기 때문으로 사료된다. 앞으로 다양한 종류의 셉트 제품 설계시 유동/구조 상호작용 해석이 효과적으로 적용하면 다이어프램의 초기압력과 초기변형량, 압력-유량특성곡선, 작동시 다이어프램의 처짐량을 미리 예측하여 밸브 설계변수를 결정하고 표면조도와 제작공차에 관한 조건을 명시할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 보건복지부 중점연구 “다종류 인체삽입용 shunt system의 개발” (HMP-99-E-12-0005)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 이종선, 장중윤, “수두증 환자의 치료를 위한 셉트밸브의 특성연구” 한동대학교 논문집 Vol.3 (2000), p.20~35
- [2] STAR-CD User's Manual Version 3.1
- [3] ABAQUS/Standard User's Manual, Version 5.8
- [4] Hur, N. and Kim, W., “A numerical simulation of an oil fence deformation by fluid-solid interaction method”, STAR-CD user's conference (1999), p.128~136
- [5] PS Medical CSF-Flow Control Shunts Manual