

볼밸브에서 시트링에 관한 최적화 연구

김도현, 이병관, 김청균, 이일권*
홍익대학교 기계시스템디자인공학과

Design optimization of a seat ring in a ball valve

Kim Do Hyun, Lee Byung Kwan, Chung Kyun Kim, Il Kwon Lee*
Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University
Department of Automotive Engineering, Daelim College*

1. 서론

볼밸브는 직선형의 유로에 볼타입의 디스크가 직각 또는 분할되는 각도로 돌면서 밸브를 개폐하거나 방향을 전환 시켜주는 밸브이다. 사용이 간편하고 기밀성도 비교적 우수할 뿐 아니라 개방했을때 밸브의 유로가 100% 직선으로 개방되는 형식이다. 따라서 압력강하가 작고 볼이 회전할때 시트링에 밀착하여 구동하므로 슬러지 등의 이물질이나 점성이 높은 유체에 적용하는 경우에도 비교적 개폐의 신뢰성이 높은 등의 장점을 가지고 있다. 하지만, 밸브의 개폐 동작 중에 볼 주위에 유체가 유입되어 밸브를 개폐하는 동안에도 볼과 몸통 사이에 위치하는 유체는 정체되므로 물의 경우엔 동파가 있을 수 있고 온도에 따라 민감하게 체적 팽창이 일어나는 유체의 경우 밸브 파손의 원인이 될 수도 있으며 밸브를 100% 개방하지 않을 경우에는 심한 소음과 캐비테이션이 발생하며 개폐 속도가 빨라 워터해머의 원인이 되기도 한다. 또한 시트링은 PTFE 등의 소재를 사용하는데 반복적인 동작에 비교적 쉽게 마모되어 누설이 발생하는 등의 단점도 있다.

따라서 본 연구에서는 볼밸브 구성품 중 시트링에 대해 형상을 변화시켜 사용조건에 대한 충분한 접촉면압을 유지하면서 시트링에 가해지는 응력을 완화할 수 있는 최적화 설계를 수행하였다. 다구찌법과 직교배열표를 통해 시트링의 기능과 수명을 결정하는 인자를 지정하고, 이에 대한 수준을 고려하여 최적화 설계를 진행하고, 유한요소법을 통해 시트링에 발생하는 거동을 관찰하였다.[3]

2. 시트링의 설계

2.1 시트링의 설계 인자

Fig. 1은 시트링의 위치 및 설계인자를 나타낸 그림이다. 시트링은 PTFE로 만들어 졌으며 볼밸브에서 볼과 접촉하여 누설을 방지하고 기밀을 유지하는 역할을 담당하고 있다. 따라서 볼의 반복되는 움직임에 대해 마모가 발생하고, 이는 누설로 연결된다.[6]

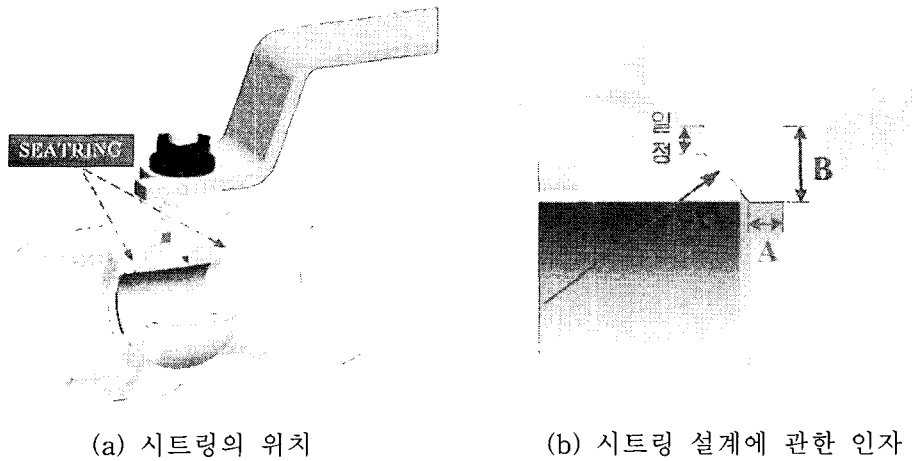


Fig. 1 시트링의 위치 및 설계 인자

따라서 지나친 압축 및 큰 접촉면압은 시트링의 내구성에 영향을 미치게 된다. 그러므로 설계인자로 내부에 발생하는 응력을 줄일 수 있도록 시트링의 폭에 관한 인자 A와 보다 넓은 면적에서 접촉하도록 유도하여 접촉면압을 변화시켜 시트링에 가해지는 영향을 관찰하는 인자 B, 그리고 압축률을 인자로 선정하였다. 압축률은 볼밸브 커버가 볼밸브 바디와 체결되면서 시트링을 압축하는 길이로 나타내었다. Table 1은 각 인자에 대한 수준을 나타낸 표이다. 여기서 e는 다구찌 설계과정에서 나타나는 오차항이다. 그리고 회색으로 된 셀의 값은 시트링의 기본값이다.

Table 1. 설계 인자에 대한 수준

		A(mm)	B(mm)	C(mm)	e(error)
level	1	1.4	3.25	0.05	1.4
	2	1.7	3.5	0.1	1.7
	3	2	3.75	0.15	2

2.2 다구찌법과 직교배열표

다구찌법은 특성치의 산포를 통해 설계와 실험의 최적조건을 결정하는 기준을 정한다. 이 때 특성치의 산포가 가장 적은 조건을 최적조건으로 결정하게 되며, 특성치의 산포는 SN비를 통해 알 수 있다. 본 연구에서는 특성치 값이 작으면 좋은 경우에 사용하는 망소특성과 특성치 값이 클수록 좋은 성능을 나타내는 경우의 망대특성을 적용하였다. SN비는 큰 경우가 그 때의 인자들이 특성치에 대해 우수함을 의미한다. SN비를 사용하여 각 인자들이 설계에 미치는 영향을 간이분석법을 통해 관찰하였고, 각 인자들이 특성치값에 미치는 기여율을 계산하였다.[1,2]

그리고 연구의 효율성을 위해 3수준계의 직교배열표를 사용하여 최종적으로 9개 모델로 축소하여 연구를 진행하였다. Table 2는 직교배열표를 나타낸 표이다.

Table 2. $L_9(3^4)$ 형 직교배열표

Model No. \ Factors	A	B	C	e
1	1.4	3.25	0.05	-
2	1.4	3.5	0.1	-
3	1.4	3.75	0.15	-
4	1.7	3.25	0.1	-
5	1.7	3.5	0.15	-
6	1.7	3.75	0.05	-
7	2	3.25	0.15	-
8	2	3.5	0.05	-
9	2	3.75	0.1	-

2.3 설계 조건 및 유한요소해석

해석에 사용한 시트링은 KS B 2308 규격의 나사식 볼밸브 호칭번호 #20 모델에 사용되는 모델이며, 시트링이 감싸고 있는 볼의 지름은 25mm이다. 또한 작동조건은 LPG 가스의 충전노즐에 사용되는 볼밸브를 대상으로 하고 있기 때문에 LPG 가스의 평균주입압력인 $18\text{kgf/cm}^2(1.765\text{MPa})$ 보다 큰 접촉수직응력이 발생해야 한다. 유한요소해석모델은 시트링과 시트링을 감싸고 있는 볼밸브 바디 및 볼밸브 커버, 그리고 볼로만 간략화하였다. 또한 황동으로 만들어진 볼밸브 바디와 볼밸브 커버는 강체로 정의하고, PTFE 소재의 시트링과 황동소재의 볼은 변형체로 정의하였다. 해석의 신속성과 편의성을 위해 2차원 축대칭모델로 정의하였으며, 모든 요소들은 축대칭 4각요소를 사용하였다. LPG의 가스압은 유체가 흐르는 유로의 외벽에 수직으로 작용하도록 적용하였으며, 시트링에 대한 투과율은 무시하였다.[5]

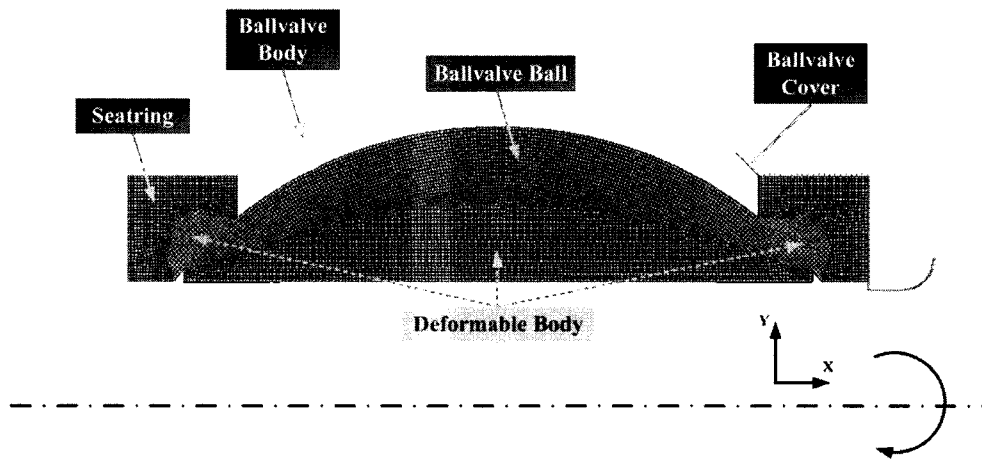
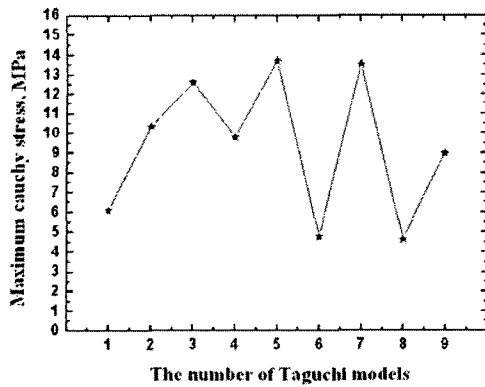
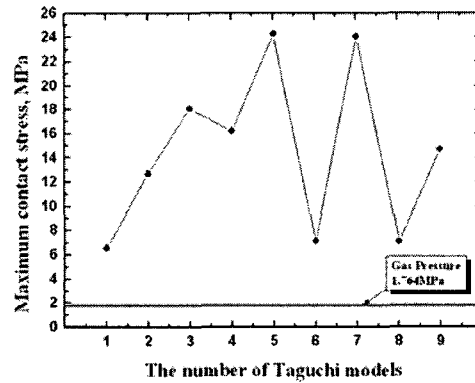


Fig. 2 유한요소해석 모델

3. 해석결과 및 고찰



(a) 최대 cauchy 응력



(b) 최대 접촉수직응력

Fig. 3 모델에 따른 최대 cauchy 응력 및 최대접촉수직응력

Fig. 3(a)는 시트링에서 발생하는 최대 cauchy 응력의 최대값을 나타낸 그래프이다. 볼밸브 바디와 볼밸브 커버가 체결되는 과정에서는 시트링의 압축에 의해 영향을 받게 된다. 각 모델에 발생한 cauchy 응력을 살펴보면 압축률의 변화에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 3, 5, 7번 모델에서 큰 값의 cauchy 응력이 발생했는데 이 모델들의 인자를 보면 압축한 길이가 가장 큰 모델이다. 즉 압축에 의한 영향을 매우 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 하지만 PTFE 소재의 극한강도는 20.7MPa 이고, 모든 모델에서 극한강도 이내의 값을 발생하였으므로 cauchy 응력에서의 시트링은 모든 모델에서 손상이 발생하지 않는다.

Fig. 3(b)는 모델에 따라 최대 접촉수직응력을 나타낸 그래프이다. 접촉수직응력은 접촉된 상태에서 작용하는 영향만을 고려하기 때문에 압축정도에 따라 반발탄성에 의한 반력의 크기가 달라지며, 또한 가스압에 비례하여 시트링이 주입구나 그루브의 표면에 접촉하려는 힘은 증가하게 되므로 압축률이 높은 모델일수록 높은 접촉수직응력이 발생한다. 모든 모델에서 LPG 가스의 주입압력인 1.764MPa 이상의 접촉수직응력이 발생하여 충분한 밀봉작용을 할 수 있다. 하지만 5, 7번 모델에서 극한강도 이상의 응력이 발생하기 때문에 시트링의 손상을 예상할 수 있다.

Table 3. 각 특성치에 대한 SN비

Model No.	maximum cauchy stress	maximum contact normal stress
1	-15.7065	16.3645
2	-20.2820	22.0623
3	-22.0074	25.1535
4	-19.8272	24.1903
5	-22.7344	27.7121
6	-13.5704	17.0861
7	-22.6259	27.6367
8	-13.3116	17.0129
9	-19.0655	23.3345

Table 4. 각 인자가 미치는 기여율

Affecting ratio, %	A(mm)	B(mm)	C(mm)	e(error)	sum
maximum cauchy stress	9.175	10.780	75.961	4.084	100
maximum contact normal stress	11.685	6.945	79.709	1.661	100

Table 3은 직교배열표에 의한 9개 모델에 대해 SN비를 나타낸 표로 SN비가 클수록 우수함을 의미한다. 그리고 Table 4는 각 인자가 특성치에 미치는 기여율을 나타낸 표다.

먼저 최대 cauchy 응력을 살펴보면 압축한 길이가 작은 1, 6, 8번이 나머지 모델과 비교하여 상대적으로 작은 cauchy 응력이 관찰되었고, SN비도 크게 나타났다. 모든 모델이 극한강도 이내의 cauchy 응력이 발생했기 때문에 SN비가 가장 큰 모델이 우수하다고 할 수 있고, 결과적으로 SN비가 가장 큰 8번 모델이 가장 우수하다.

그리고 최대 접촉수직응력을 살펴보면 일단 극한강도를 넘어선 5, 7번 모델은 제외하고, 가장 큰 SN비를 가지는 모델을 살펴보면 3, 4번 모델이라 할 수 있다. 그렇지만 모든 모델이 가스압 이상의 접촉수직응력이 발생했기 때문에 충분한 밀봉작용을 할 수 있다.

따라서 cauchy 응력이 작은 모델일수록 우수한 모델이라 할 수 있고, 결과적으로 8번 모델이 가장 우수한 모델로 선정할 수 있다. 8번모델에서 발생한 cauchy 응력은 약 4.63MPa이고, 이 때의 접촉수직응력은 7.09MPa 이다.

Table 4는 각 인자가 미치는 기여율을 나타낸 것이다. PTFE 소재는 NBR 또는 불소고무 등과 비교하여 경한 소재이기 때문에 탄성변형성이 다소 작은 편이다. 따라서 힘이 가해지면 변형이 상대적으로 작게 일어나면서 남은 에너지가 응력발생에 영향을 미치게 된다. 그러므로 압축하는 길이(c)가 모든 특성치에 대해 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 볼밸브의 조립 과정에서 볼밸브 바디와 볼밸브 커버를 지나치게 조이면 시트링의 내구성이 떨어지는 것을 알 수 있다. 따라서 적절한 수준으로 조립을 해야만 한다. 그리고 나머지 인자들이 미치는 영향은 거의 비슷한 크기고, cauchy 응력의 경우 높이 B가 조금 더 큰 영향을 미치고, 접촉수직응력의 경우 폭 A가 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만 압축률에 비해 매우 미비한 수준이다.

6. 결론

본 논문에서는 볼밸브의 시트링에 대해 밀봉성과 내구성 향상을 위해 다구찌법과 유한요소해석을 이용하여 최적설계를 수행하고, 각 인자들이 미치는 영향을 관찰하였다. 해석 대상이 된 볼밸브는 LPG 가스 주입시 사용되는 볼밸브로 KS B 2308 규격의 나사식 볼밸브 호칭번호 #20 모델을 대상으로 하였다.

그 결과 주어진 가스압(1.764MPa)에 대해 충분히 밀봉성능을 유지하면서 동시에

보다 내구성이 확보된 시트링의 형상을 선정할 수 있었다. 최종적으로 선정한 모델은 8번 모델로 기존 모델과 비교하여 폭과 높이가 각 0.3mm, 0.5mm 만큼 증가한 모델이다. 또한 시트링에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 압축률, 즉 조립시에 발생하는 압축한 길이로 조립 과정에서 볼밸브 바디와 볼밸브 커버를 지나치게 조이게 되면 시트링의 내구성에 큰 영향을 줄 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 시트링의 수명을 증가시키는 동시에 안정된 밀봉성을 확보하기 위해서는 현재의 시트링보다 폭은 0.3mm, 높이는 0.5mm를 증가시켜서 획득할 수도 있지만 정밀한 가공과 공차관리를 통한 적정 수준의 압축이 먼저 우선시 되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 박성현, 현대실험계획법, 민영사 (2003)
2. 이상복, 알기쉬운 다구찌기법, 상조사 (2000)
3. 박한영, 밸브 핸드북, 홍릉과학출판사 (2005)
4. MARC Analysis, Ver. 7.0, (1999)
5. 김문일, 기계재료공학, 청문각 (1990)
6. 김청균, 트라이볼로지, 형설출판사 (2006)