

스프링클러 소방 배관용 시일의 최적설계에 관한 연구

김경섭 · 김청균

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터

A study on optimization design of sealing for sprinkler fire pipe system

Kyung Seob Kim · Chung Kyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology Hongik Univ.

요 약

본 연구는 최적설계 기법의 하나인 다구찌 방법을 이용하여 소방용 스프링클러 배관용 밀봉부에 대한 유한요소해석을 수행하고, 이를 통하여 소방용 배관의 밀봉안전성을 확보하고자 한다.

1. 서론

O링의 소재로는 NBR소재[1]와 같은 고무를 널리 사용하는데, 이는 반발탄성을 유지해야 원하는 밀봉성능을 얻을 수 있기 때문이다. 빠른 속도로 물체를 운반하거나 구동을 하기 위해서는 전달되는 에너지에 대한 지속적인 저항과 그 저항으로 인한 변형이 일어나지 않아야 시일로서 역할을 다할 것이다. 이렇듯 밀봉은 시스템의 안정화와 작업자의 안전에 밀접한 연관이 있기 때문에 트라이볼로지 연구에 있어서 간과할 수 없는 분야인 것이다.

또한, 산업공학에서 품질관리의 통계를 위해 사용했던 다구찌 방법(Taguchi method)은 최적설계 기법으로 공학 전반에 걸쳐 널리 활용되었고, 트라이볼로지의 설계에도 적용되고 있는 실정에 있다. 특히, 배관시스템에 사용되는 밀봉[2,3]은 자중, 진동, 풍하중, 내관 내부에서 흐르는 온도에 의한 팽창 및 수축, 관 내부에 흐르는 유체 및 기체의 압력, 수격 및 공동현상에 의한 일시적 압력상승, 밸브류와 같은 기타 부속물의 하중에 의한 내·외적으로 발생하는 요인으로부터 안전한 기밀을 유지해야 하는 막중한 역할을 부여 받고 있다. 따라서, 본 연구는 최적설계 기법의 하나인 다구찌 방법을 이용하여 소방용 스프링클러 배관용 밀봉부에 대한 유한요소해석을 수행하고, 이를 통하여 스프링클러를 사용하는 소방용 배관의 밀봉안전성[4]을 확보하고자 한다.

2. 해석 모델 및 해석조건

2.1 해석모델

Fig.1은 배관이음을 위한 밀봉부분을 나타낸 것이다. Fig.2는 다구찌방법을 사용하여 밀봉부분의 최적화 설계를 하기 위한 3가지 인자를 나타낸 것이다. Table 1과 같이 3인자 3수준의 다구찌방법에 의한 모델은 직교배열표에 의하여 유한요소해석을 수행하며, Table 2는 다구찌방법에 의한 최적화를 위하여 O-링의 지름(d), O-링간 거리(t), 그리고 O-링의 깊이(ℓ)인 3 요소의 파라메타를 설정하였다. 이러한 설계 파라메타는 3개의 수준(level)으로 설계되는데, e 는 다구찌 설계에 있어서 오차항을 나타낸다.

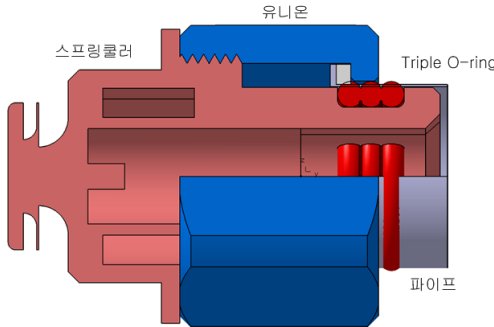


Fig.1 Shape of pipe joint.

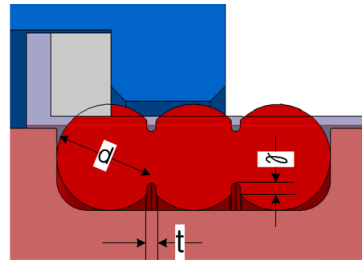


Fig.2 Factors for Taguchi method.

Table 1. Factors and levels for Taguchi method

	Factors				
	A(d), mm	B(t), mm	e	C(ℓ), mm	
Levels	1	3.0	0.2	-	0.3
	2	3.1	0.3	-	0.4
	3	3.2	0.4	-	0.5

Table 2. Analysis layout of orthogonal array table of $L_9(3^4)$

Analysis No.	Factors			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1
Indication	a	b	a	a
Arrangement	A	B	e	C

2.2 해석 조건

O링의 해석에 중요한 요인으로는 압축율이 있다. 움직인 거리/O링의 두께(직경)의 비율을 말하는데, 밀봉성능을 좌우하기 때문에 소재특성과 설계조건에 맞는 압축율을 선정하

는 것은 해석에 있어서 매우 중요하다. 또한, 압축율은 마찰, 마모의 내구성 및 밀봉성능과 밀접한 관련이 있기 때문에 가능한 한 낮은 압축율을 사용하도록 하고 있다.[1] 일반적으로 정적거동을 하는 O링의 압축율은 5~10%의 범위이며, 20%가 권장 압축율이다.

1, 2, 3번 모델의 압축률은 10% $\left[\beta = \frac{0.3}{3.0} = 10\%\right]$ 였고, 4, 5, 6번 모델은 9.7% $\left[\beta = \frac{0.3}{3.1} = 9.7\%\right]$ 였으며, 7, 8, 9번 모델은 12.5% $\left[\beta = \frac{0.4}{3.2} = 12.5\%\right]$ 의 압축율이 각각 적용되었다. 배관에 가해진 압력은 2.1MPa였고, 2차원 축대칭 4절점 모델링을 하였다.

2.3 O링 소재

NBR은 비선형 탄성거동을 하기 때문에, 탄성변형을 온도에 따른 응력-변형율 곡선으로 유도하기 위해 사용한 함수 모델이 오차가 가장 작게 계산된 Ogden 3차 모델이다. 다음은 Ogden 3차 모델의 변형에너지 함수를 나타낸다.

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} \left[J^{\frac{-\alpha_n}{3}} \left(\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3 \right) + 4.5K \left(J^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^2 \right]$$

여기서, μ_n 과 α_n 은 물질상수이고, J 는 체적비(Volumetric ratio)로서 $J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$ 으로 정의되며, K 는 초기 체적탄성계수(Bulk modulus)이다. 또한 N 은 Ogden 모델에서 고려해야 하는 항의 개수를 나타내며, 일반적으로 2차항, 3차항으로 정의할 수 있다. Fig.3은 각 소재의 상온에서 얻은 응력-변형율 곡선을 3차항의 Ogden 모델로 근사화한 것이다.

3. 해석 결과 및 토의

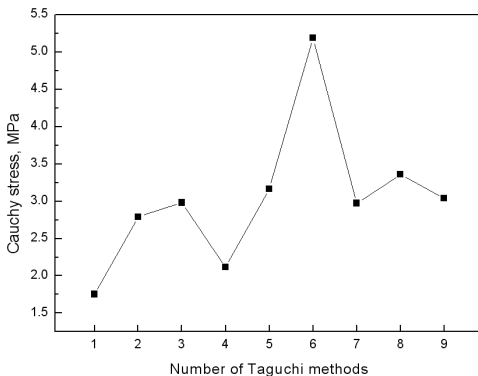


Fig.3 Cauchy stress distributions of various Taguchi models.

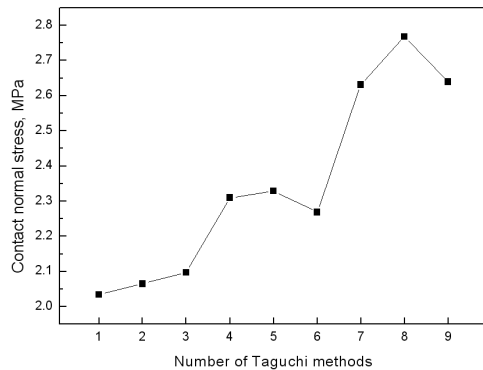


Fig.4 Contact normal stress distributions of various Taguchi models.

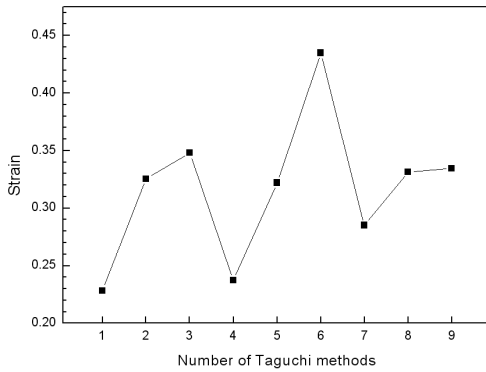


Fig.5 Strain distributions of various Taguchi models.

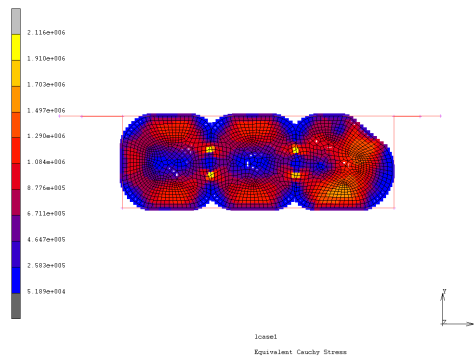


Fig.6 Cauchy stress distribution of No.4 Taguchi model.

비선형 거동과 대변형 특성을 나타내는 탄성중합체의 경우는 응력을 계산할 때 변형된 면적을 고려하는 Cauchy응력이 초기면적에 의해 응력을 계산하는 von Mises응력에 비해 중합체의 특성을 정확하게 반영할 수 있다. 따라서 대변형을 감안하여 계산되는 Cauchy 응력을 관찰하였다.

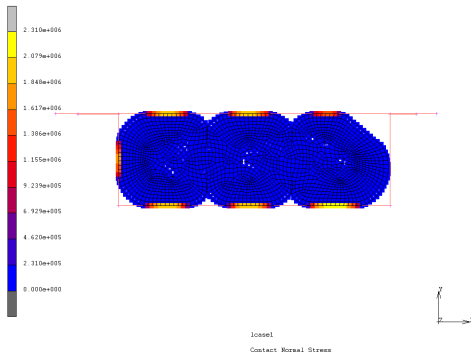


Fig.7 Contact normal stress distribution of No.4 Taguchi model

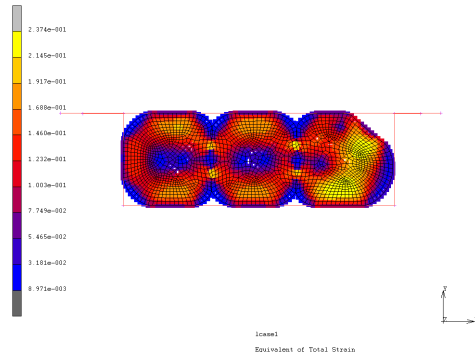


Fig.8 Total strain of No.4 Taguchi model

우선, 1, 4번 모델은 Cauchy 응력과 접촉수직응력과 변형률에서 상대적으로 다른 모델에 비하여 매우 작은 값을 보이고 있다. 또한, 7번 모델은 응력은 상대적으로 조금 높게 나타났지만 접촉수직응력은 우수하게 나타나고 있다. O-링의 밀봉능력을 판단할 때에는 Cauchy응력이 작게 나온다고 좋은 밀봉 안전성을 갖는다고 할 수 없다. Cauchy응력뿐만 아니라 접촉수직응력과 변형량을 같이 고려해서 밀봉시스템의 밀봉안전성을 판단하기 때문이다. 접촉수직응력은 응력값이 가해진 압력보다 높아야만 압력에 대한 우수한 밀봉성을 확보하고 있다고 말할 수 있다. 이런 이유로 접촉수직응력은 클수록 좋다. 따라서, 모든 다구찌 모델에서 접촉수직응력은 양호하게 나타났다. 특히, 1,4번 모델은 비슷한 낮은 응력과 변형량이 발생했지만, 접촉수직응력은 4번 모델이 13%의 성능이 우수하게 나

타났기 때문에 밀봉안전성이 우수하게 나타났다. 종합하면, Cauchy 응력과 변형율이 가장 우수하게 나타났고, Contact normal stress도 역시 비교적 잘 나타난 4번 다구찌 모델이 가장 우수한 모델이라고 판단된다. 또한, 밀봉부에 발생하는 최대 Cauchy 응력과 변형율에 영향을 미치는 설계 파라메타들의 기여도를 계산하기 위해 다구찌방법의 망소특성을 이용하여 SN비를 계산하여 Table 4에 나타냈다. 본 논문에서는 특성치의 값이 작을수록 좋은 경우 망소특성을 적용하였는데, 망소특성의 정의는 다음과 같다.

Table. 4 SN ratios for Cauchy stress, strain and displacement of models

Analysis No.	Cauchy stress	C.N.S	Strain
1	-4.88	-6.17	12.82
2	-8.909	-6.3	9.75
3	-9.48	-6.43	9.17
4	-6.51	-7.27	12.49
5	-10.00	-7.34	9.84
6	-14.3	-7.11	7.23
7	-9.46	-8.4	10.9
8	-10.53	-8.84	9.59
9	-9.66	-8.43	9.51

Table.5 Factors affecting Cauchy stress

	A(d)	B(t)	e	C(ℓ)	Sum
1	-23.27	-20.86	-	-29.71	-73.84
Level 2	-30.82	-29.44	-	-25.1	-85.34
3	-29.66	-33.45	-	-28.95	-92.05
Difference of level	6.39	12.59	-	0.76	19.73
Affecting ratio,%	32.36	63.8	-	3.84	100

Table. 6 Factors affecting Contact normal stress

	A(d)	B(t)	e	C(ℓ)	Sum
1	-18.9	-21.84	-	-22.13	-62.86
Level 2	-21.73	-22.49	-	-22	-66.22
3	-21.68	-21.98	-	-22.18	-69.83
Difference of level	6.78	0.136	-	0.051	6.96
Affecting ratio,%	97.32	1.95	-	0.73	100

Table. 7 Factors affecting Strain

	A(d)	B(t)	e	C(ℓ)	Sum
1	31.74	36.21	-	29.65	97.6
Level 2	29.56	29.18	-	31.75	90.5
3	30	25.91	-	29.9	85.81
Difference of level	1.74	10.3	-	0.254	12.3
Affecting ratio,%	14.16	83.77	-	2.07	100

$$SN = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 SN값이 큰 경우가 그때의 설계 파라메타들이 von Mises 응력과 변형율을 줄이는데 효과적이라는 것을 의미한다. 다구찌 최적설계에서 망소특성을 채택한 이유는 해석을 수행한 결과 SN값이 크면 클수록 von Mises 응력, 변형율 그리고 변위가 모두 작게 나오기 때문에 밀봉시스템의 안정성에 월등히 유리하기 때문이다. 1번과 4번 다구찌 모델의 Cauchy stress의 SN비가 가장 크게 발생하였으며, 특히, 4번 모델의 SN비가 가장 컸

다. 이와 같은 결과로부터 4번 다구찌 모델이 가장 바람직한 사용조건이라는 것을 의미한다. Table 5 ~7은 Cauchy 응력과 변형율에 영향을 미치는 설계 파라메타들의 기여도를 나타냈는데, 이 데이터에 의하면 O-링의 파인 폭(t)이 von Mises 응력과 변형율에 63.8%, 83.77%의 영향을 미쳤고, O-링의 직경(d)는 32.36%, 14.16%의 영향을 미쳤으나, O-링의 파인길이(l)는 3.84%, 2.07%의 미세한 영향이 미친 것을 확인하였다. 또한, Contact normal stress에는 O-링의 직경(d)이 지배적인 인자로서 97.32%의 압도적인 영향을 미친 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 최적설계 기법의 하나인 다구찌 방법을 이용하여 소방용 스프링클러의 밀봉부에 대한 최적설계를 함으로써 배관시스템의 안정성을 확보하고자 유한요소법을 사용하였다.

배관에 2MPa의 압력을 가하여 밀봉부 해석을 수행하여 SN값이 크면 클수록 von Mises 응력, 변형율 그리고 변위가 모두 작게 나오기 때문에 배관시스템의 안정성에 월등히 유리한 망소특성을 적용하였으며, O-링의 파인 폭(t), O-링의 직경(d), 그리고 O-링의 파인길이(l)인 3 요소의 파라메타를 설정하여 9개의 다구찌 해석모델을 계산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1,4번 다구찌 모델은 비슷한 낮은 응력과 변형량이 발생했지만, 접촉수직응력은 4번 모델이 13%의 성능이 우수하게 나타났기 때문에 밀봉안전성이 우수한 모델은 4번 다구찌 모델이라고 판단된다.

다구찌 설계 파라메타들의 기여도를 확인한 결과 O-링의 파인 폭(t)이 von Mises 응력과 변형율에 가장 큰 영향을 미쳤고, O-링의 직경(d)는 약간의 영향을 미쳤으나, O-링의 파인길이(l)는 미세한 영향이 미친 것을 확인하였다. 또한, Contact normal stress에는 O-링의 직경(d)이 지배적인 영향을 미치는 요소임을 확인하였다.

참고문헌

1. Dan Visscher 외, "The dichtometik O-ring handbook", pp.8-9, 12-17, 132-137, 188-193, Dichtometik North America.
2. 김경섭, 김청균, "고속 회전하는 기어 전동장치 O-링의 거동특성에 관한 수치적 연구" 한국운활학회 제49회 추계학술대회 논문집, pp.237-241, 2009.
3. 김도현, 김청균, "배관용 O-링의 밀봉특성에 관한 수치적 연구" 한국운활학회 제49회 추계학술대회 논문집, pp.221-226, 2009.
4. 김경섭, 김청균, "유한요소해석을 이용한 가스수송 배관용 파형오링의 밀봉특성에 관한 연구" 한국가스학회 춘계학술대회 논문집, pp.82-88, 2010.