

LPG 충전노즐의 디스크 패키징에 관한 연구

김한구, 김도현, 김청균, 김영규*
홍익대학교 기계시스템디자인공학과
한국가스안전공사 가스안전연구개발원*

A study on a disk packing of LPG filling unit

Kim Han Goo, Kim Do Hyun, Chung Kyun Kim, Kim Young Gyu*
Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University
Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation*

1. 서론

세계적으로 자동차에 의한 환경오염이 방지하기 위해 자동차 배출가스 규제를 강화하고 있다. 국내의 경우도 1990년 초부터 무연가솔린의 사용 등 연료의 품질에 대한 관심이 확대되고 있으며 환경에 미치는 유해성 문제가 점차 대두되면서 LPG 및 CNG 등 청정연료의 사용이 점차 확대되고 있는 추세이다.

LPG(liquefied petroleum gas : 액화석유가스)연료는 휘발유와 비교하여 분자구조상 탄소가 적기 때문에 탄화수소 및 이산화탄소의 배출량과 경유에서 배출되는 입자상 물질, 질소산화물의 배출량이 적어 청정연료로 평가받고 있다. 하지만 LPG는 누출시 화재와 폭발 위험 등의 단점이 있다. 또한 LPG 주입시 가스누출에 따른 두통, 피로, 신경 마취로 인한 졸음, 구토증상 등의 많은 문제점을 있기 때문에 LPG 주입시 가스누출을 최소화하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

현재 LPG 충전노즐(커플러)은 차량에 연료주입시 대기중으로 가스가 누출되는 것을 방지하기 위한 목적으로 가스누출을 차단하는 O-링이 설치되어 있다. 그러나 O-링이 경화되거나 파손되면 가스의 누설을 방지할 수가 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 밀봉 안정성을 한층 강화하기 위하여 내열성, 내화학성이 우수하며 제작이 용이한 NBR 소재를 사용하고 다구찌법을 통해 최적화된 디스크 패키징을 설계하였다.

2. 디스크 패키징의 설계

2.1 디스크 패키징

Fig. 1은 디스크 패키징의 위치와 형상을 나타낸 그림이다. 디스크 패키징은 차량 쪽 스틱커플러의 끝부분과 접촉하도록 설계하였다. PTFE 소재로 설계되었던 디스크 패키징은 탄성 변형성의 부족으로 인해 암·수 커플러의 체결과정에서 문제를 일으켰다. 이런 이유로 탄성 변형성이 우수한 NBR 소재를 사용하여 디스크 패키징에 대한 최적화 설계를 수행하였다.[4, 5, 6]

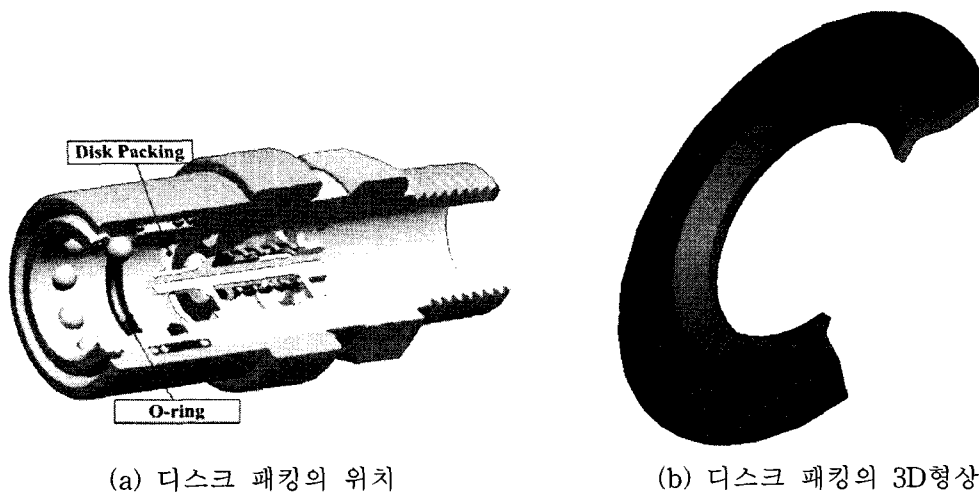


Fig. 1 디스크 패킹의 위치 및 형상

2.2 설계 조건

LPG 충전노즐에서 스틱플러가 체결될 때 암커플러와의 사이에서 발생하는 공간은 체결단계에 따라 0.67mm~1.2mm 까지 변화한다. 따라서 이 변화에 견딜 수 있도록 탄성변형성이 우수하면서 저렴한 소재를 사용해야 하기 때문에 NBR이 가장 적절하다.

또한 디스크실을 압축하는 과정에서 필요한 힘을 최소화하기 위해 체결할 때 스프링을 압축하기 위한 $2.2 \pm 0.44\text{kgf}$ (17.26N~25.9N) 크기의 힘보다 작은 범주 내에서 작동해야 하며, 최종 조립 단계에서 LPG 가스는 평균 18kgf/cm^2 (1.764MPa) 로 주입되기 때문에 밀봉압력은 주입압력보다 크게 설계해야 한다.[3]

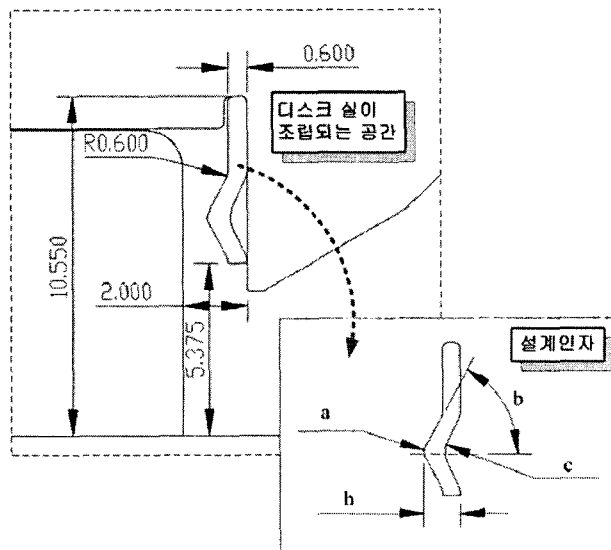


Fig. 2 디스크 패킹의 설계 인자

Table 1 디스크 패키징의 설계 인자 및 수준

Level	No.	Variation Factor			
		선단부 직경(a),	선단부 각도(b)	모깍기 직경(c)	높이(h)
1	1	0 mm	50°	0.5 mm	1.3 mm
	2	0.25 mm	55°	1.5 mm	1.4 mm
	3	0.5 mm	60°	2.5 mm	1.5 mm

Table 2 L₉(3⁴)형 직교배열표

	No.	선단부 직경(a)	선단부 각도(b)	모깍기 직경(c)	높이(h)
해석 모델 형상	1	0	50	0.5	1.3
	2	0	55	1.5	1.4
	3	0	60	2.5	1.5
	4	0.25	50	1.5	1.5
	5	0.25	55	2.5	1.3
	6	0.25	60	0.5	1.4
	7	0.5	50	2.5	1.4
	8	0.5	55	0.5	1.5
	9	0.5	60	1.5	1.3

2.2 설계 인자 및 수준

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 디스크 패키징에서 발생하는 접촉수직력과 같이 특성치 값이 작으면 좋은 경우의 SN비를 사용하는 망소특성과 접촉수직압력과 같이 클수록 좋은 밀봉성능을 나타내는 경우의 망대특성을 적용하였다. SN비는 큰 경우가 그 때의 인자들이 안정되고, 우수한 밀봉성능에 효과적임을 의미한다. 또한 SN비를 사용하여 설계 인자들이 최적설계에 미치는 영향을 간이분석법을 통해 관찰하였고, 각 인자들이 특성치값에 미치는 기여율을 계산하였다.[1, 2]

Fig. 2는 최적설계에 사용된 각 인자의 위치를 나타낸 그림이고, Table 1은 각 인자에 대한 수준을 보여주는 표이다. 인자를 살펴보면, a는 선단부 직경이고, b는 선단부 각도이다. c는 모깍기 직경이고, d는 높이이다. 모든 인자는 접촉수직압력과 접촉수직력에 영향을 미치는 인자이다.

Table 2와 같은 3수준계 직교배열표를 사용하여 총 27개의 모델을 9개의 모델로 줄여 유한요소해석을 진행하였다.

2.3 유한요소해석 모델

해석에 적용한 모델은 디스크패키징과 슛커플러, 암커플러로만 간략화하였다. 또한 디스크 패키징을 제외한 다른 부분은 황동으로 이루어져 있기 때문에 NBR과 비교하여 변형이 거의 없으므로, 강체로 정의하고, 디스크 패키징은 변형체로 정의하였다.[6]

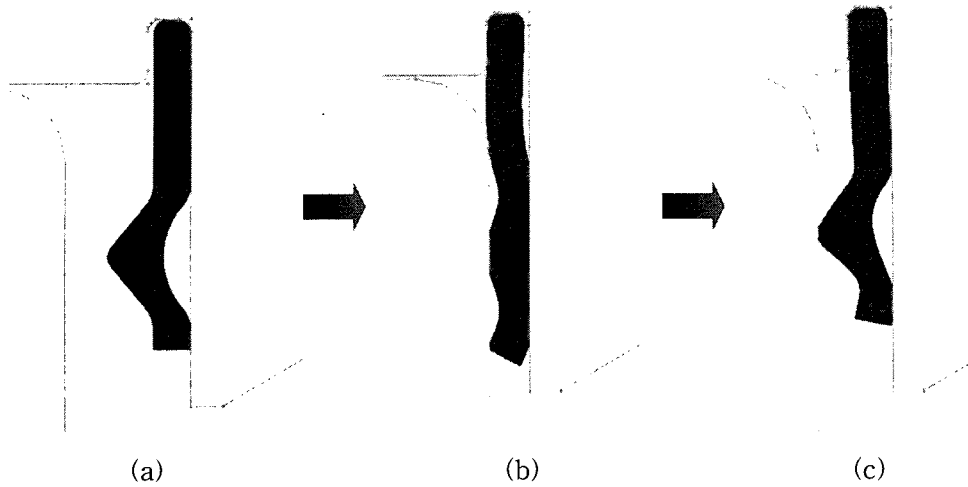


Fig. 3 슷커플러 체결에 따른 디스크 패킹의 해석 과정

해석의 신속성과 편의성을 위해 2차원 축대칭모델로 정의하였으며, 모든 요소들은 축대칭 4각요소를 사용하였다.

LPG 충전니플의 디스크 패킹의 접촉거동특성을 관찰하기 위해 Fig. 3와 같은 단계를 수행하였다. 먼저 슷커플러가 체결되면서 Fig. 3(b)와 같이 0.67mm의 공간이 형성되었다가 이후 슷프링에 의해 뒤로 밀리면서 최종적으로 Fig. 3(c)처럼 1.2mm의 공간이 형성된다. LPG의 가스압은 Fig. 3(b)의 전후부터 작용하기 시작한다. 가스압은 표면에 법선방향으로 작용하며, O-링의 투과율은 무시하였다. 각 소재 사이의 마찰계수는 0.4로 일정하다고 가정하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

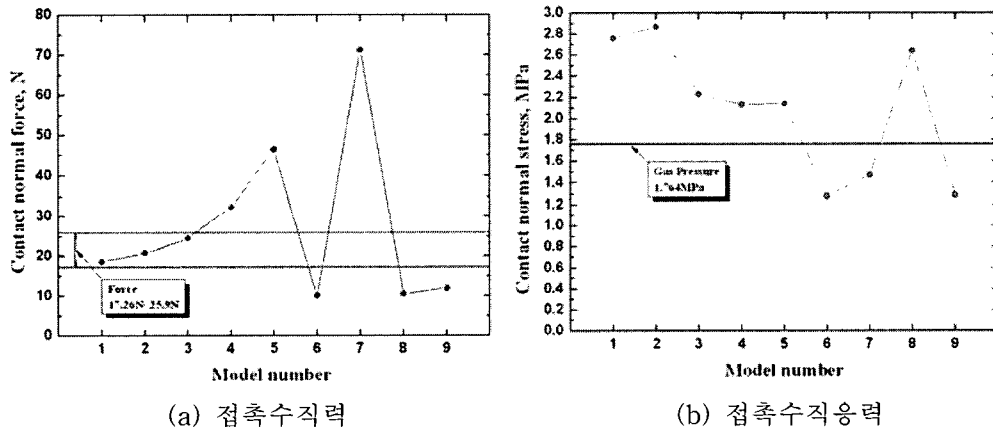


Fig. 4 모델에 따른 접촉수직력 및 접촉수직응력 분포

Fig. 4는 모델에 따라 최대 접촉수직력과 최대 접촉수직응력을 나타낸 그래프이다. Fig. 4(a)를 보면 접촉수직력은 모갓기 직경이 큰 모델에서 크게 발생하는 것을

Table 3 각 모델의 파손 여부

Model	1	2	3	4	5	6	7	8	9
파손여부	o	o	x	o	x	o	o	o	o

알 수 있다. 전체적인 분포를 살펴보면 초기 체결 시의 편의성을 위해 접촉수직력은 $2.2 \pm 0.44 \text{kgf}$ ($17.26 \text{N} \sim 25.9 \text{N}$)의 범주보다 작게 발생해야 하기 때문에 모깍기 직경이 작을 수록 적은 힘이 발생한다. 따라서 4, 5, 7번 모델을 제외한 모델은 적절하다고 할 수 있다. Fig. 4(b)는 접촉수직응력의 분포를 나타낸 그래프이다. 접촉수직응력은 선단부의 직경이 작을 수록 보다 큰 압력이 발생하기 때문에 6, 7, 9번 모델을 제외한 나머지 모델에서 가스압 이상의 접촉수직응력이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 충분한 밀봉작용을 할 수 있다. Table 3은 각 모델이 가스압을 받았을 때의 파손 여부이다. 가스압이 가해지면 디스크 패키징의 Y축에 대한 변형이 커지면서 파손이 발생한다. 그러므로 압축하는 높이가 작은 동시에 모델의 돌출한 부분의 폭이 커야 가스압에 의해 변형에 저항력이 강해져 파손이 발생하지 않는다. 따라서 모깍기 직경이 큰 3, 5번 모델이 파손이 되지 않았기 때문에 우수한 모델임을 알 수 있다.

결과적으로 모든 모델 중 가장 우수한 모델은 일단 파손이 안 되는 모델인 동시에 접촉수직력이 위의 범주에 속해 있어야 하며 발생하는 접촉수직응력이 가장 커야 한다. 그러므로 파손이 안 된 상태에서 각 특성치 관찰 결과에서 제외되지 않은 3번 모델이 가장 우수하다고 할 수 있다.

Table 4은 직교배열표에 의한 9개 모델에 대해 SN비를 나타낸 표로 SN비가 클 수록 우수함을 의미한다. 또한 각 인자가 특성치에 미치는 기여율을 나타낸 표다.

접촉수직력은 SN비가 가장 큰 6, 8, 9번이 가장 우수하지만, 1, 2, 3번 모델도 접촉수직력의 범주에 속해있기 때문에 사용할 수 있다. 다음으로 접촉수직응력은 SN비가 큰 1, 2, 8번 모델이 우수하지만 3, 4, 5번 모델도 가스압 이상의 접촉수직응력이 발생하였다. 그러나 파손의 여부를 검토하면 파손이 안 된 모델은 3, 5번 모델이기 때문에 결과적으로 3번 모델이 가장 우수하다고 다시 한 번 확인할 수 있다.

Table 4 각 특성치에 대한 SN비와 기여율

Model No.	Contact normal force	Contact normal stress	기여율					
			Affecting ratio, %	선단부 직경	선단부 각도	모깍기 직경	높이	sum
1	-25.3855	8.8181						
2	-26.3570	9.1576						
3	-27.7833	6.9661						
4	-30.2028	6.5676						
5	-33.3397	6.6083						
6	-20.0260	2.1442	0.788	38.126	52.896	8.190	100	
7	-37.0556	3.3463						
8	-20.4485	8.4321	45.966	31.101	10.383	12.550	100	
9	-21.5401	2.2118						

각 인자의 기여율을 살펴보면 접촉수직력에는 모깍기 직경이 가장 큰 영향을 미친다. 이는 모깍기 직경이 클 수록 디스크 패킹의 돌출한 부분의 폭이 증가하기 때문에 변형을 일으키기 위해서는 큰 힘이 필요하기 때문이다. 또한 선단부 각도 또한 폭에 영향을 미치는 인자이기 때문에 기여율이 큰 것을 알 수 있다. 하지만 접촉수직응력의 경우 접촉부분의 면적을 결정하는 선단부 직경이 가장 큰 영향을 미치고, 선단부 각도도 약 30%의 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 하지만 일반적으로 밀봉압력에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 압축률, 즉 높이는 디스크 패킹을 압축하는 힘과 압축하는 과정에서의 변형을 고려하여 크게 할 수 없기 때문에 기여율이 매우 작게 나타났다. 따라서 디스크 패킹의 설계에는 압축률을 결정하는 높이보다는 형상에 관련된 인자를 보다 중요하게 다뤄야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 LPG 충전노즐의 밀봉안전성과 내구성 향상을 위해 기존의 O-링을 보완하기 위한 디스크 패킹의 설계를 수행하였다. 큰 변형에 대비하기 위해 탄성변형성이 우수한 NBR 소재의 디스크 패킹을 대상으로 다구찌법을 이용한 최적설계를 수행하였고, 유한요소해석을 사용하여 거동을 관찰하였다.

그 결과 주어진 가스압에 대해 충분히 밀봉성능을 유지할 수 있으며 동시에 내구성과 안정성을 고려한 최적의 디스크 패킹의 형상을 선정할 수 있었다. $2.2 \pm 0.44 \text{kgf}$ ($17.26 \text{N} \sim 25.9 \text{N}$)보다 작은 크기의 접촉수직력과 충분한 밀봉작용을 위한 가스압 이상의 접촉수직응력, 그리고 변형에 의한 파손여부를 관찰한 결과 최종적으로 3번 모델을 가장 우수한 모델로 선정하였다.

또한 각 인자들이 미치는 기여율을 살펴본 결과 접촉수직력에는 모깍기 직경이 가장 큰 영향을 미치고 선단부 각도 다음으로 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그리고, 접촉수직응력의 경우 접촉부분의 면적을 결정하는 선단부 직경이 가장 큰 영향을 미치고, 선단부 각도가 그 다음으로 영향을 미친다. 압축률, 즉 높이의 기여율은 매우 낮았다. 이는 디스크 패킹이 설치되는 공간과 디스크 패킹의 변형, 그리고 압축하기 위한 힘에 의한 제약으로 인한 것이며, 따라서 디스크 패킹의 설계에는 형상에 관련된 인자들이 매우 중요하다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 박성현, 현대실험계획법, 민영사 (2003)
2. 이상복, 알기쉬운 다구찌기법, 창조사 (2000)
3. 김청균, 트라이블로지, 형설출판사 (2006)
4. Anil K. Bhowmick and howard L. Stephens, "Handbook of elastomers", second edition, revised and expanded, M. Dekker, (2001)
5. 유기탄성체학회역, RUBBER 고무과학과 기술, 도서출판 MRC 미래컴, (2000)
6. A. Ciesielski, 강신영 외 공역, 엘라스토머 입문, 청문각, (2005)