

LPG 충전노즐에서 디스크 시일의 최적설계에 관한 연구

김한구, 한주현, 김청균

홍익대학교 기계.시스템디자인공학과

Design optimization of a disk seal in LPG filling unit

Han Goo Kim, Joo Hyun Han, Chung Kyun Kim

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

1. 서론

세계 각 국에서는 자동차에 의한 환경오염이 점점 심각해지는데 대처하기 위해서 자동차 배출가스 규제를 강화하고 있다. 국내의 경우도 1990년 초부터 무연가솔린의 사용 등 연료의 품질에 대한 관심이 확대되고 있으며 환경에 미치는 유해성 문제가 점차 대두되면서 가솔린 및 경유의 대체연료로서 LPG 및 CNG 등 청정연료의 사용이 점차 확대되고 있는 추세이다[1].

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. 따라서 정부에서는 대기오염 방지 대책으로 경유자동차를 LPG연료 자동차로 전환하도록 권장하고 있다. 하지만 LPG는 출력저하, 냉시동성 문제를 비롯하여 LPG 충전소가 도시 근교에 집중되어 장거리 운행이 곤란하고, LPG 누출 시 화재와 폭발 위험 등의 단점이 있다. 또한 LPG 주입시 가스흡입에 따른 두통, 피로, 신경 마취로 인한 졸음, 구토증상 등의 많은 문제점을 안고 있기 때문에 LPG 주입시 가스누출을 최소화하기 위한 연구가 절실히 요구되어지고 있다[3,4,5].

시일(seal)은 밀봉된 유체의 누설을 방지하고, 외부의 이물질 침입을 차단하기 위한 장치로 유압, 공압, 수압기기 등의 운동부에 사용되는 기계요소부품이다. 보통 시일은 압축력이 가해진 상태에서 소재의 대변형 성질에 의해 밀봉성능을 확보하게 된다.

LPG 충전노즐은 차량에 연료주입 시 대기 중으로 가스가 누출되는 것을 방지해야 하므로 밀봉성이 항상 강조된다. 현재의 충전노즐은 연료를 주입할 때 가스누출을 차단하는 O-링만이 설치되어 있다. 그러나 O-링이 경화되거나 파손되면 가스의 누설을 방지할 수가 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 가스 주입시 LPG 충전노즐에서의 밀봉 안정성을 한층 강화하기 위하여 내열성, 내화학성, 내마모성이 우수하며 제작이 용이한 PTFE 소재를 사용하여 최적화된 디스크 시일을 설계하였다[6].

2. 해석방법

2-1. 해석조건

LPG 충전노즐에서의 디스크 시일의 접촉특성을 고찰하기 위해 차량 주입구가 충전노즐 본체에 체결되면서 시일이 압축을 받도록 하였으며, 이 후 가스압을 가하여 압력에 따른 시일의 영향을 관찰하였다. 체결 시 차량 주입구와 LPG 충전노즐의 체크밸브 사이에는 1mm의 간극이 존재하게 된다. 따라서 디스크 시일의 두께를 1mm보다 크게 설정하여 압축이 이루어지도록 하여 밀봉력을 확보하도록 하였다.

LPG는 보통 18kgf/cm^2 의 압력으로 차량에 주입되며, 27kgf/cm^2 까지 압력이 상승하면 안전장치의 작동으로 가스주입이 차단된다. 따라서 27kgf/cm^2 가 최대 작동압력이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 최대 작동압력 이상에서도 거동을 관찰하기 위해 $35\text{kgf/cm}^2(3.531\text{MPa})$ 까지 압력을 상승시켜 해석하였다.

탄성체의 거동특성을 유한요소법을 이용하여 계산하기 위해서는 실험에 의해 획득한 응력

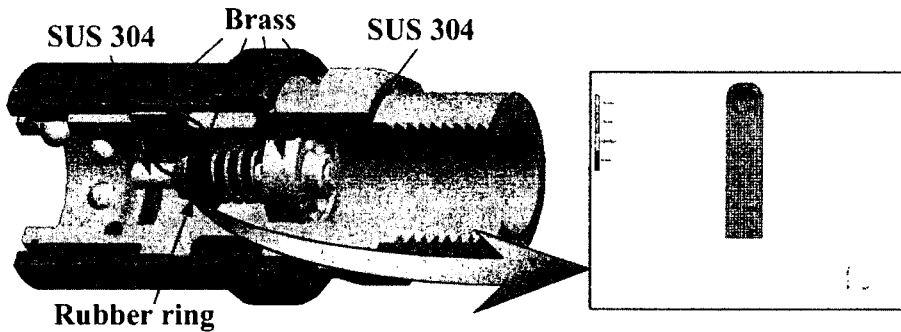


Fig. 1 3D mode of LPG filling unit and the finite element model of disk seal

Table 1 Material properties

Properties	PTFE
Modulus of elasticity, GPa	0.46
Density, kg/m ³	2190
Poisson's ratio	0.46

-변형률 곡선을 적절한 모델로 가정하여 해석을 수행하게 된다. 본 논문에서는 PTFE의 단축실험을 통하여 획득한 응력-변형률 특성곡선을 Ogden 2차 모델로 가정하여 비선형 거동 특성을 해석하여 해석의 정확성을 높였다. 또한 디스크 시일과 차량 주입구, 충전노즐 사이의 마찰계수는 메탈과 나일론의 마찰계수인 0.3을 적용하였다[7].

2-2. 유한요소 해석 모델

Fig. 1은 충전노즐의 3차원 모델과 디스크 시일의 유한요소 모델을 표현한 그림이다. 모델링은 시일과 충전노즐본체의 시일홈 그리고 차량의 주입구로 단순화하여 해석을 수행하였다. 탄성체인 PTFE에 비해 황동소재로 된 본체와 차량 주입구는 변형이 매우 작다. 따라서 디스크 시일만을 변형체로 모델링하였으며, 충전노즐과 차량 주입구는 강체로 가정하였다.

해석은 2차원 축대칭 4각요소 모델로 정의하였으며, 모델링과 해석은 각각 상용프로그램 MSC/MENTAT과 MSC/MARC를 사용하였다.

2-3. Taguchi method

다구찌법은 특성치의 산포를 통해 설계와 실험의 최적조건을 결정하는 기준을 정한다. 이때 특성치의 산포가 가장 적은 조건을 최적조건으로 결정하게 되며, 특성치의 산포는 SN비를 통해 알 수 있다. 본 연구에서는 디스크 시일에서 발생하는 cauchy응력, 변형률과 같이 특성치 값이 작으면 좋은 경우의 SN비를 사용하는 망소특성을 적용하였으며, 접촉수직응력과 같이 클수록 좋은 밀봉성능을 나타내는 특성치는 망대특성을 적용하였다. SN비가 큰 경우가 설계인자들이 디스크 시일에서 발생하는 응력과 변형면에서 높은 안정성을 지니며 우수한 밀봉성능을 확보하는데 효과적임을 의미한다. 또한 본 논문에서는 SN비를 사용하여 설계 파라미터들이 최적설계에 미치는 영향을 간이분석법을 통하여 분석하였고, 각 파라미터들이 특성값에 미치는 기여율을 계산하였다[8].

2-4. 설계 파라미터와 직교배열표

Fig. 2는 디스크 시일의 최적설계를 위한 인자를 나타낸 그림이다. 최적설계를 위한 인자들은 시일의 내경 D_1 , 시일 그루브의 지름 D_2 , 시일의 두께 t 와 시일 그루브의 폭 w 의 4가

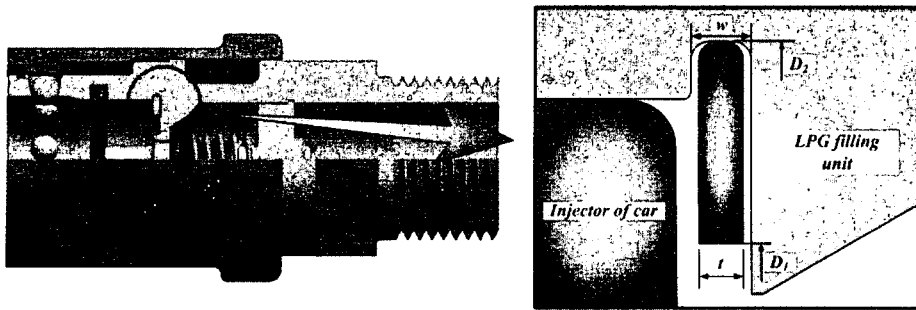


Fig. 2 Design parameters for optimized LPG filling unit using Taguchi method

Table 2 Factors and levels for Taguchi method

3 Levels	4 Factors			
	A(D ₁) : mm	B(D ₂) : mm	C(t) : mm	D(w) : mm
1	14.00	21.1	1.2	1.4
2	12.75	22.1	1.3	1.5
3	11.50	23.1	1.4	1.6

지로 지정하였다. 여기서 시일의 흔들림이 없게 하기 위해 그루브 지름(D₂)과 시일의 외경을 동일하게 설정하였다. 또한 LPG 충전노즐에 디스크 시일을 장착하기 위해 만든 그루브는 충전노즐에 가해지는 압력으로 인한 응력집중을 방지하기 위해 내부에 라운드를 좌우 각각 0.5mm로 설정해 주었다.

Table 2과 같이 모두 4개의 파라미터들은 각각 3개의 수준으로 설계하였다. 이와 같이 총 4개의 파라미터를 3수준으로 나누어 3수준계 직교배열표인 L₉(3⁴)형을 사용하였으며 Table 3에서 나타내었다.

3. 해석결과 및 고찰

해석은 차량 주입구가 충전노즐에 삽입되어 체결되면서 시일을 압축한 다음 가스압이 작용하였을 때 최대 cauchy응력, 최대변형률, 최대 접촉수직응력을 관찰하였다.

Table 3 Analysis layout of orthogonal array table of L₉(3⁴)

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

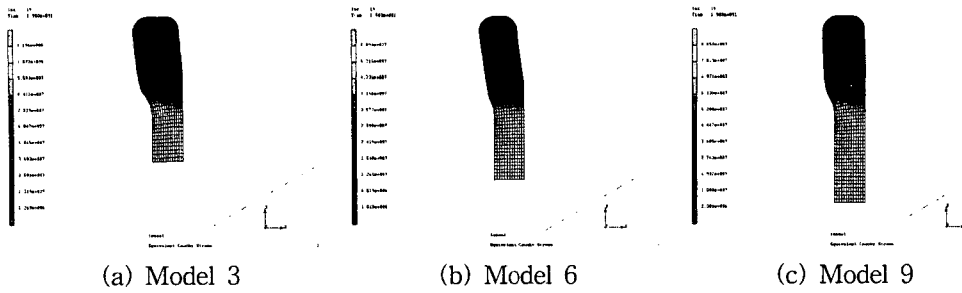
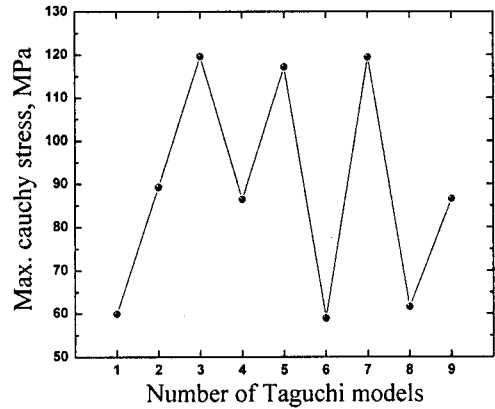
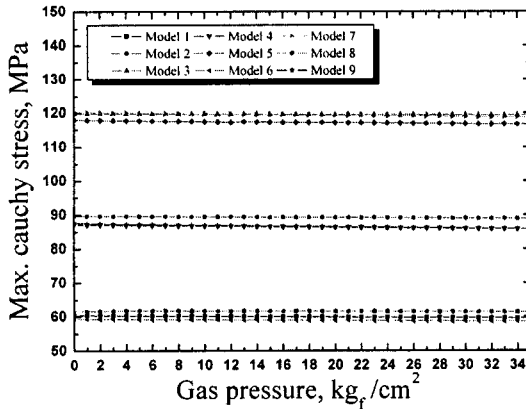


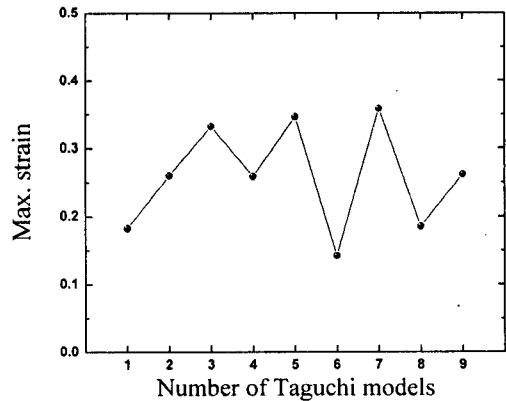
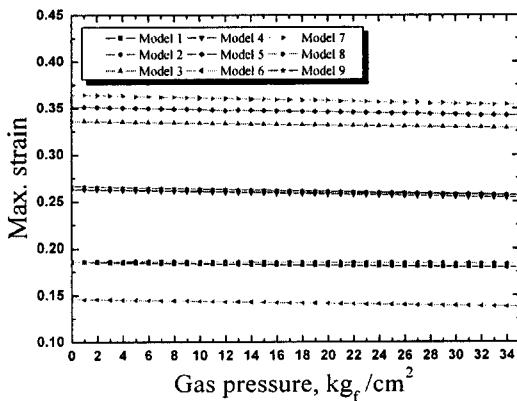
Fig. 4 Cauchy stress distribution of disk seal at $P=18\text{kgf/cm}^2$



(a) according to gas pressure (b) according to model number (18kgf/cm^2)
 Fig. 5 Max. cauchy stress according to gas pressure and various Taguchi models

Fig. 4는 18kgf/cm^2 의 압력이 작용하는 상황에서 가장 큰 cauchy응력을 나타내는 모델3, 가장 작은 응력을 나타내는 모델6 그리고 이 두 모델의 중간 값 정도의 응력을 나타내는 모델9의 cauchy응력 분포를 나타낸 그림이다. 최대 cauchy응력은 체크밸브부와 차량 주입구에 의해 시일이 압축된 후 가스압을 받는 시일의 내경부에서 발생하는 것으로 관찰된다.

Fig. 5(a)는 압력의 증가에 따른 디스크 시일에서 발생하는 최대 cauchy응력을 나타내고 있으며, Fig. 5(b)는 가스압이 18kgf/cm^2 일 때 디스크 시일이 받는 응력을 다루지 모델에 따라 표현한 그래프이다. 해석결과를 통하여 알 수 있듯이 모든 압력범위에서 모델 3, 5 7은



(a) according to gas pressure (b) according to model number (18kgf/cm^2)
 Fig. 6 Max. strain according to gas pressure and various Taguchi models

약 118~120MPa의 매우 높은 응력이 발생하며, 모델 2, 4, 9는 약 87~90MPa의 응력이, 모델 1, 6, 8은 약 59~61MPa의 비교적 낮은 응력이 발생한다. 이는 최대 cauchy응력이 차량 주입구에 의한 압축의 영향을 매우 크게 받기 때문에 나타나는 현상이다. 압력에 의한 영향이 초기 압축에 의한 영향에 비해 매우 작으므로 가압력이 증가하여도 응력이 증가하지 않으며, 오히려 가압으로 인하여 디스크 시일의 외경부가 뒤로 밀리는 현상이 발생하여 응력이 약간씩 감소하는 경향이 나타난다.

Fig. 6(a)는 압력의 증가에 따른 디스크 시일에서 발생하는 최대 변형률을 나타내고 있으며, Fig. 6(b)는 18kg/cm² 일 때 디스크 시일이 받는 변형률을 각 모델에 따라 표현한 그래프이다. 폴리머소재와 같은 중합체는 비선형성을 지니고 있으므로 상황에 따라서는 응력과 변형률이 다른 경향을 갖는 경우도 발생할 수 있다. 그러므로 변형률 또한 탄성체의 성능을 판단하는 중요한 기준이 된다. 본 연구의 디스크 시일은 압축량에 의해 큰 영향을 받고 비교적 안정적인 거동변형을 나타내고 있기 때문에 cauchy응력과 변형률이 약간의 차이는 보이지만 큰 경향 차이는 없는 것으로 보인다.

18kg/cm²에서 관찰하면 모델 3, 5, 7은 약 0.33~0.37의 높은 변형률이 발생하며, 모델 2, 4, 9는 약 0.26~0.27의 변형률이, 모델 1, 6, 8은 약 0.14의 비교적 낮은 변형률이 발생한다. cauchy응력과 마찬가지로 압력에 의한 영향보다 초반 압축의 영향이 크므로 압력증가에 따른 영향을 미비한 것으로 판단된다.

Fig. 7는 18kg/cm²의 가스압이 작용할 때 모델 6에서 발생하는 접촉수직응력 분포를 나

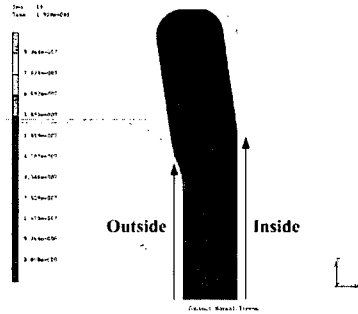


Fig. 7 Contact normal stress contour distribution of 6th model at $P=18\text{kg}/\text{cm}^2$ and the measuring position

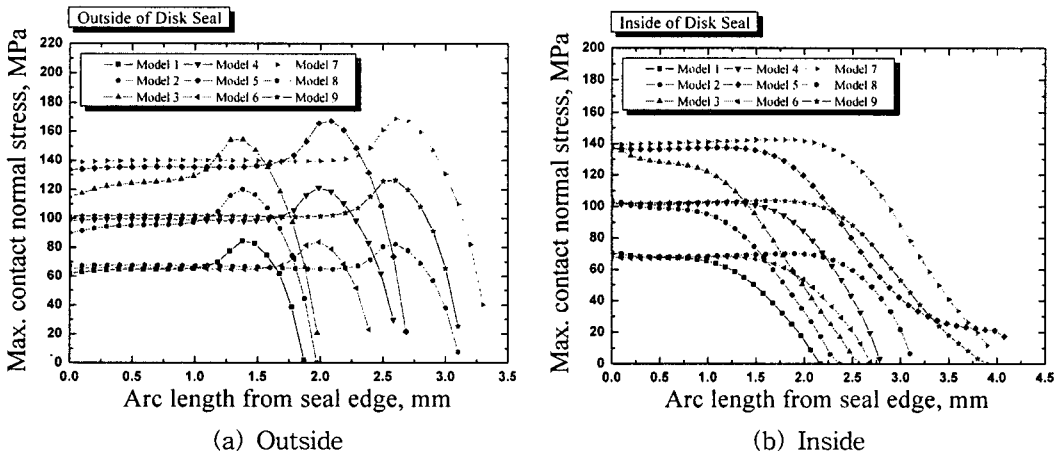


Fig. 8 Contact normal stress from seal edge according to the arc length at $P=18\text{kg}/\text{cm}^2$

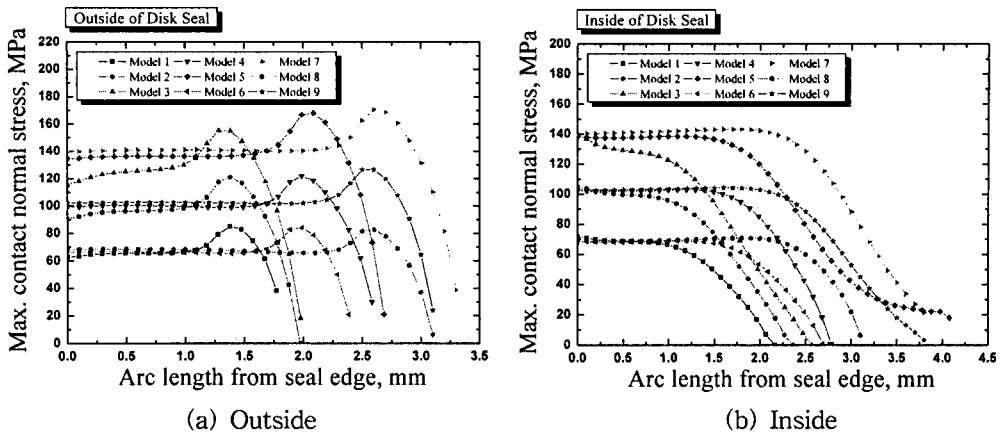


Fig. 9 Contact normal stress from seal edge according to the arc length at $P=35\text{kg}/\text{cm}^2$

타내며, 디스크 시일의 안쪽면과 바깥면의 응력측정 방향을 나타낸 그림이다. 최대 접촉수직 응력은 시일의 형상변형이 크게 발생하는 차랑 주입구의 라운드와 시일과의 접촉부에서 발생하며, 시일의 밀봉능력을 측정하기 위해 차랑 주입구, 충전노즐의 체크밸브부와 접촉하는 부분에서도 관찰하였다.

Fig. 8(a)는 가스압이 $18\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때 디스크 시일의 바깥 면에서 Fig. 7의 측정위치를 따라서 관찰한 그래프이며, Fig. 8(b)는 디스크 시일의 안쪽 면에서 측정위치를 따라서 관찰한 그래프이다. 또한 Fig. 9는 $35\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 가스압이 작용할 때 시일의 안쪽면과 바깥면에서 관찰한 그래프이다. 바깥 면 측정결과를 살펴보면, 디스크 시일의 내경부에서는 모델 3, 5, 7가 약 $135\sim 140\text{MPa}$ 의 높은 응력이, 모델 2, 4, 9가 약 $90\sim 102\text{MPa}$ 의 응력이, 모델 1, 6, 8이 약 $60\sim 68\text{MPa}$ 의 비교적 낮은 응력이 발생한다. 시일의 외경부로 이동할수록 응력이 유지되다가 차랑 주입구 라운드부와와의 접촉하는 부분에서 응력이 증가하는 현상으로 관찰된다. 이는 주입구 라운드 접촉부에서 디스크시일의 단면형상변화가 심하게 일어나기 때문에 압축의 영향이 증대되는 것으로 판단된다. 안쪽 면을 관찰한 결과를 살펴보면 시일의 내경부에서는 바깥 면과 비슷한 응력이 발생하며, 시일의 외경부에는 압축이 일어나지 않으므로 외경부로 갈수록 응력이 점차 감소하는 경향을 보인다.

각 모델에 따른 응력차이는 압축정도에 따라 달라지는데 압축량이 증가할수록 접촉력에 의한 영향이 크므로 응력이 증가한다. 따라서 압축량이 클수록 밀봉성이 우수하다고 할 수 있다. 그러나 모든 모델에서 접촉수직응력이 가스압인 $18\sim 36\text{kg}/\text{cm}^2(1.765\sim 3.531\text{MPa})$ 에 비해 월등한 응력값을 유지하기 때문에 안정적인 밀봉성을 유지하고 있다고 판단된다.

Table 4 S/N ratios for cauchy stress, strain, contact normal stress of disk seal

Analysis No.	Cauchy stress	Strain	Contact normal stress
1	-35.550	14.771	38.527
2	-39.012	11.720	41.592
3	-41.552	9.576	43.775
4	-38.729	11.765	41.681
5	-41.377	9.207	44.470
6	-35.408	16.965	38.552
7	-41.542	8.905	44.565
8	-35.794	14.655	38.302
9	-38.745	11.659	42.026

Table 5 Affecting ratio in disk seal

Affecting ratio, %	A : D ₁	B : D ₂	C : t	D : w	Sum
Cauchy stress	3.131	2.491	92.277	2.101	100.000
Strain	10.398	10.559	71.574	7.469	100.000
Contact normal stress	4.967	2.085	86.659	6.288	100.000

Table 4는 Table3에서 나타낸 직교배열표에 의한 9개 모델을 해석하여 18kgf/cm²의 압력이 작용할 때 디스크 시일에서 발생한 최대 cauchy응력, 변형률, 접촉수직응력을 SN비로 나타낸 표이다. Cauchy응력, 변형률은 망소특성으로, 접촉수직응력은 망대특성으로 SN비를 계산하였으며, SN비는 값이 클수록 안정성, 밀봉성 측면에서 우수한 것이다.

Cauchy응력과 변형률면에서는 모델6이 SN비가 각각 -35.4, 17.0로 가장 우수하다고 판단되며, 접촉수직응력은 모델7이 44.6의 SN비로 가장 성능이 뛰어나다. 특히 접촉수직응력은 밀봉성을 판단하는 기준이 되는데 모든 모델에서 가스압 18~36kgf/cm²(1.765~3.531MPa)에 비해 큰 응력을 나타내므로 밀봉성에는 문제가 없다고 할 수 있다.

따라서 최적의 안정성을 나타내는 모델을 선정한다면 6번 모델이 cauchy응력과 변형률면에서 가장 큰 SN비를 나타내므로 우수한 성능을 확보하고 있다고 판단된다.

Table 4에서 구한 SN비의 값을 가지고 디스크 시일에서 발생하는 cauchy응력, 변형률, 접촉수직응력에 영향을 미치는 인자들의 기여율을 간이분석법을 이용하여 계산하여 Table 5와 같이 나타내었다.

Table 5에서 나타낸 것과 같이 cauchy응력, 변형률, 접촉수직응력에서 디스크 시일의 두께 t가 각각 약 92.3%, 71.6%, 86.7%로 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

차량주입구는 본체의 체크밸브부에서 1mm 떨어진 지점까지 일정하게 삽입되므로 디스크 시일의 두께 t에 따라 압축률이 변한다. 즉, 디스크 시일의 밀봉성과 거동안정성을 확보에 가장 큰 영향을 미치는 압축률을 결정하는 주요 인자가 두께 t라고 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 LPG 충전노즐에서 연료 충전 시 가스의 누설을 방지하는 밀봉장치로서 O-링에 이은 2차적인 밀봉을 담당하는 디스크 시일을 고안하였으며, 우수한 접촉거동과 밀봉성을 확보할 수 있는 형상을 다구찌 실험법과 유한요소법을 이용해 해석하였다. 시일 형상의 최적화를 위해 4개의 인자를 3개의 수준으로 나누어 9개의 다구찌 해석모델을 계산하였으며, 안정성과 밀봉성을 평가하기 위해서 cauchy응력과 변형률은 망소특성을, 접촉수직응력은 망대특성을 각각 적용하여 관찰하였다.

해석결과에 의하면 디스크 시일의 4가지 인자 중 두께 t가 cauchy응력, 변형률, 접촉수직응력에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 우수한 접촉거동과 밀봉성을 확보하기 위해서는 시일의 두께에 대한 적절한 설계가 필요한 것으로 판단된다. 또한 내경 D₁, 외경 D₂, 그루브의 폭 w는 디스크 시일의 성능에 미치는 영향이 미비한 것으로 관찰되었으므로 문제가 되지 않는다면 설계의 용이성을 위해 수정하여도 디스크 시일의 거동에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

본 논문에서는 형상이 D₁ : 12.75mm, D₂ : 23.1mm, t : 1.2mm, w : 1.5mm인 모델6이 안정적인 cauchy응력과 변형률 그리고 밀봉성을 유지하므로 가장 우수한 모델이라 할 수 있다.

5. 참고문헌

1. 한영출, 나완용, 박만재, 오상기, 김재진, "LPG자동차에서 ECM제어에 의한 배기가스 배출특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp. 279~284, (2001)
2. 김종춘, 엄명도, 박용희, 이종태, "LPG자동차의 연료성분에 따른 오염물질 배출특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 179~183, (2002)
3. 윤재건, "LPG자동차의 안정성에 대한 고찰", 한국자동차공학회지 Vol.19, No.4 , pp. 10~15, (1997)
4. 선우명호, 백안선, 송정훈, "LPG 자동차에서의 LPG 누출 검사 방법에 관한 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp. 423~429, (1995)
5. Eric Johnson, "LPG: a secure, cleaner transport fuel? A policy recommendation for Europe", Energy policy, pp. 1573~1577, (2003)
6. Anil K. Bhowmick and Howard I. Stephens, "Handbook of elastomers", 2nd edition, revised and expanded, M. Dekker, pp. 785~790, pp. 809~811, (2001)
7. Ernest Rabinowicz, "Friction and Wear of Materials", 2nd edition, John Wiley and Sons, p. 100, (1995)
8. 박성현, "현대실험계획법", 민영사, (2003)
9. "MARC Analysis", Version K7.3, (1999)