



다구찌 실험법을 이용한 LPG 충전노즐 O-링 그루브의 최적화 설계연구

†김 청 균

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과
(2006년 6월 9일 접수, 2006년 6월 20일 채택)

Optimized Design of O-ring Groove in LPG Filling Unit Using Taguchi Experimental Method

†Chung Kyun Kim

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University
(Received 9 June 2006, Accepted 20 June 2006)

요 약

본 논문은 다구찌 실험 설계법을 이용하여 O-링을 장착하는데 필요한 사각 그루브의 최적설계를 위해 FEM으로 최대코시응력과 최대변형률에 대하여 해석하였다. 다구찌 설계방법은 LPG 충전노즐의 내경측에 밀봉을 위해 설치하는 O-링 그루브의 설계변수를 최적화 하는데 대단히 유용하다. FEM과 함께 다구찌 설계기법을 적용하여 계산된 해석결과에 따르면, 최적화 설계치수를 단지 9번의 반복 실험법에 의해 설계변수의 치수를 최적의 조건으로 얻을 수 있다는 측면에서 간편한 최적설계 기술이다. 이것은 다구찌 설계 실험법이 사각형상의 O-링 그루브를 설계하는 간단한 방법으로 대단히 유용하다는 것이다. 다구찌 설계기법에 기초한 해석결과에 의하면, O-링 그루브의 기하학적 형상에 대한 최적치수는 $h=2.5\text{mm}$, $d=2.74\text{mm}$, $c=0.15\text{mm}$, $w=3.0\text{mm}$ 으로 각각 요약될 수 있다. 본 연구는 공급된 LPG 가스압력이 18kg/cm^2 인 상태에서 밀봉성과 안전성을 고려하면 초기압축률은 8.7%로 유지하는 것이 가장 효과적이라는 사실을 제공한다.

Abstract - In this paper, the optimized design of a rectangular O-ring groove has been analyzed for a maximum Cauchy stress and maximum strain using the Taguchi method. This method may efficiently optimize the design parameters for an O-ring groove of a LPG filling unit. The computed FEM results indicate that the optimized design parameters can only be drawn by nine experimental numbers of iterations when the Taguchi design technique has been employed with a finite element method. This means that the Taguchi design method is very useful for the optimization design of O-ring rectangular groove geometry. Based on the computed FEM results by the Taguchi design technique, the dimensions of a groove geometry are given as $h=2.5\text{ mm}$, $d=2.74\text{ mm}$, $c=0.15\text{ mm}$, and $w=3.0\text{ mm}$. In this study, the initial compression ratio of O-rings is recommended as 8.7% for a gas supply pressure of 18 kg/cm^2 .

Key words: O-ring, Taguchi method, Optimization design, LPG filling unit, Cauchy stress, Strain, Extrusion, Compression ratio, FEM

I. 서 론

자동차에서 배출되는 연소가스 오염물질을 줄이기 위해 액체연료 대신에 액화석유가스(LPG)를 사용하여 완전연소를 추구하고 있다. 나날이 악화되는 대기환경을 개선하기 위해 우리나라에서 보급하기 시작한 LPG

자동차는 2006년도 4월 기준 1,925,415대가 등록되어 세계에서 가장 많은 LPG 자동차를 보유하고 있다[1]. 이러한 LPG 보급률은 세계에서 가장 앞선 LPG 자동차 기술을 확보하는 계기를 제공하였으나, 기술된 자동차에 비해 LPG 자동차의 낮은 출력과 저온시동의 문제로 소비자 선호도는 많이 떨어지는 것으로 조사되었다. LPG 연료계통에 관련된 문제점은 새로운 기술개발로 극복할 수 있으나, 제한된 수요로 인해 자동차 메이

†주저자: chungkyunkim@empal.com

키는 항상 소극적이라 할 수 있다.

LPG는 국제 유류가격과 특히 정부의 연료정책, 즉 조세정책에 의해 수요가 결정되는 특징을 갖고 있다. 특히, LPG 자동차는 특수계층이나 특수차량에 대한 정부의 인허가권에 의해 수요가 크게 결정되므로 LPG 자동차의 신기술 개발에는 많은 제약을 받는다. 여기에 자동차 메이커의 소극적인 마케팅, 즉 LPG 자동차를 생산하여 외국에 판매하기에는 현재의 해외시장 규모가 너무 작기 때문에 차량의 월드카 개념의 판매 전략에 배치되므로 자동차 메이커 입장에서 보면 국내용 LPG 자동차를 생산하기 보다는 기존의 가솔린 자동차, 특히 디젤 자동차를 개발하는 것이 더 유리한 산업전략이라 할 수 있다.

청정연료라 할 수 있는 LPG 자동차를 확대 보급하려면 시장경제에 의존하기보다는 대기환경을 개선하려는 정부의 지속적인 환경정책에 의해 결정될 수밖에 없다. 정부의 정책에 자동차 메이커는 불가피하게 따르겠지만, 특히 LPG 연료 메이커는 LPG 자동차 보급 확대 정책 및 기술개발에 보다 적극적으로 나서야 한다. 즉, LPG 연료를 공급하는데 필요한 수요창출을 위해 LPG 차량 전문 메이커를 지원하고, LPG 충전소를 충분히 건설하여 LPG 차량 운전자의 불편함을 적극적으로 해소하는 고객만족 LPG 보급정책이 필요하다.

우리나라에서 사용하는 LPG 자동차의 연료 충전기(LPG filling unit)는 일본에서 개발한 볼타입 체결방식(ball clamping type)의 LPG 충전기를 도입하여 한국가스안전공사의 표준방식으로 규정하여 사용하고 있다. 이것은 유럽의 조클램핑 방식(jaw clamping type)과는 다른 것으로 충전노즐에 원주방향으로 설치된 다수의 볼이 충전니플의 외경부를 견고하게 잡는 방식으로 구조가 간단하다.

LPG 충전기에서 18 kg/cm²의 압력으로 공급하는 LPG가 외부로 누설하게 되면, LPG는 급격하게 기화되면서 대기중으로 확산되어 환경을 오염시키는 것은 물론 LPG 낭비에 따른 경제적 손실이 크다는데 문제가 있다. 따라서 LPG 충전기의 누설을 차단하기 위해 탄성체 O-링을 충전노즐의 내부에 설치하여 누설을 방지하는 O-링 그루브(O-ring groove)에 대한 최적설계 기술개발은 대단히 중요하다.

LPG 충전기의 단말기로 사용하는 LPG 충전노즐에 자동차의 연료탱크에 연결된 충전니플이 삽입되는 과정에서 발생하는 LPG 연료의 누설을 차단하기 위해 한 개의 O-링을 사용하여 축방향 누설을 차단한다. 따라서 본 연구에서는 LPG 충전노즐의 밀봉력을 안정되게 유지할 수 있도록 O-링을 설치하는 그루브에 대한 최적

설계는 다구찌 실험법을 적용하여 FEM으로 해석하였다. LPG 충전기에서 밀봉력이 확보되지 못하면 LPG를 충전하는 과정에서 많은 연료가 누출되어 손실되는 연료와 대기오염을 유발하는 등 문제점이 많다.

II. 해석방법

2.1. 해석조건 및 유한요소해석

LPG 충전니플의 외경측과 LPG 충전노즐 실린더의 내경측 사이의 간극에 O-링을 설치하도록 제작된 사각형상의 그루브는 O-링의 밀봉성과 내구성을 확보하는데 중요한 역할을 한다. O-링에 작용하는 LPG의 충전압력은 보통 18 kg/cm²이지만, 실제로는 8 kg/cm² 이하로 낮다. LPG 충전기의 안전성을 고려하여 본 연구에서는 충전장치를 36 kg/cm²까지 사용할 수 있도록 설계하였다. 또한 O-링이 설치되는 그루브의 마찰특성은 건조마찰이라는 가혹한 작동조건을 고려하여 마찰계수를 0.4로 가정하였다. Fig. 1은 LPG 충전노즐에 차량측의 LPG 충전니플 선단부가 삽입되면서 O-링이 미끄럼 마찰력에 의해 축방향으로 이동하는 위치이동과 충전니플과의 마찰력에 의해 이동하였던 O-링은 LPG가 공급되면서 가스압력에 의해 다시 밀려 되돌아가는 미끄럼 마찰 접촉운동 메커니즘을 보여준다. 가스압력에 의해 O-링이 압착되면서 충전니플의 외경측과 접촉하는 O-링의 ① 지역에서 밀봉작용을 하게 된다.

O-링과 접촉하는 그루브와 충전니플은 모두 황동(brass)으로 제작되어 있으므로 충전니플의 미끄럼마찰 표면을 변형체인 O-링의 NBR에 비하여 강체라 할 수 있다. O-링은 둥근 도우넛 형상을 하고 있으므로 Fig. 2에서처럼 2차원 축대칭 FEM 모델로 해석할 수 있고, 모든 요소들은 축대칭 4각요소를 사용한 MSC/MARC로 해석하였다[2].

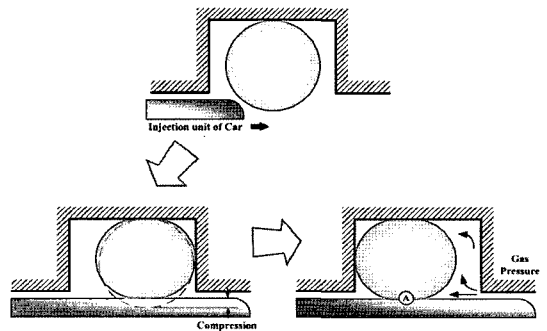


Fig. 1. Progressive sliding contact sealing mechanisms under the stroke motion of a LNG filling nozzle and the LPG supply pressure.

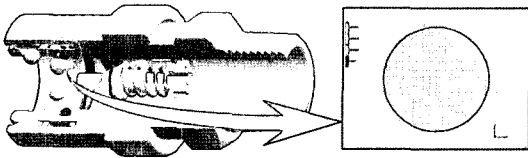


Fig. 2. LPG filling unit and FEM elements of O-ring and rectangular groove.

Table 1. Material properties of O-ring and filling unit.

Material property	NBR	Brass
Density, kg/m ³	1,450	8,500
Elastic modulus, GPa	3	97
Poisson's ratio	0.49	0.311

Table 1은 LNG 충전장치와 충전니플에 사용하는 황동소재와 O-링 소재로 선정된 NBR에 대한 기계적 특성값을 각각 제시하고 있다.

2.2. 다구찌법 적용 최적설계

O-링을 설치하기 위한 사각 그루브 형상을 최적의 설계조건으로 설계하기 위해 Table 2에서 제시하는 4가지의 설계변수에 대한 응력과 변형률 특성치의 산포도를 계산하여 가장 작은 특성치에 해당하는 설계치수를 선정한다. 즉, 그루브의 특성치에 관련된 SN 값을 분석하면 가장 적합한 산포도를 추정할 수 있다.

O-링에서 발생하는 코시응력(Cauchy stress)과 변형률(strain)의 특성치를 가능한 작도록 SN 값을 설정하면, O-링 그루브의 설계치수를 최적으로 나타내는 망소특성을 적용할 수 있다. 결국 SN 값이 클수록 그때의 설계변수들이 응력과 변형률 측면에서 안정되고 우수한 밀봉성능을 나타낸다는 해석결과를 제시할 수 있다. 또한 이들 설계변수들이 최적화 설계에 미치는 영향을 분석하기 위해 각각의 설계변수들이 특성치에 미치는 기여율을 분석하였다[3].

O-링 그루브의 최적설계를 위해 사용한 설계변수는 Fig. 3에서 보여준 것처럼 LPG 충전니플의 외경에서 O-링 그루브 외경측 사이의 거리 h , O-링의 직경 d , 충전니플의 외경과 충전노즐의 내경 사이에서 떨어진 반경간극 c , 그루브의 폭 w 의 4가지 변수로 구성된다.

Table 4. Compression ratio of nine Taguchi models.

Model No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Compression ratio [%]	17.9	20.7	23.3	14.1	16.9	19.7	2.3	5.6	8.7

Table 2. Factors and levels for Taguchi method.

		Factors			
		A:h [mm]	B:d [mm]	C:c [mm]	D:w [mm]
Level	1	2.1	2.56	0.05	3.0
	2	2.2	2.65	0.15	3.1
	3	2.5	2.74	0.25	3.2

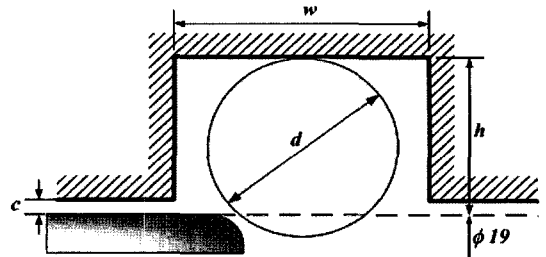


Fig. 3. Design parameters for O-ring groove optimization using Taguchi method.

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

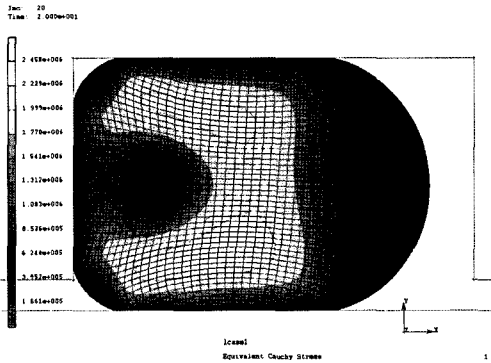
Factors	A	B	C	D
Analysis No.				
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

본 연구에서 사용한 O-링의 기준치수는 ISO 3601 G series에서 규정한 내경 18 mm, 두께 2.65 mm, 그리고 SAE AS565에서 규정한 내경 18.72 mm, 두께 2.62 mm 인 O-링의 오차범위 이내에서 지정하였다[4].

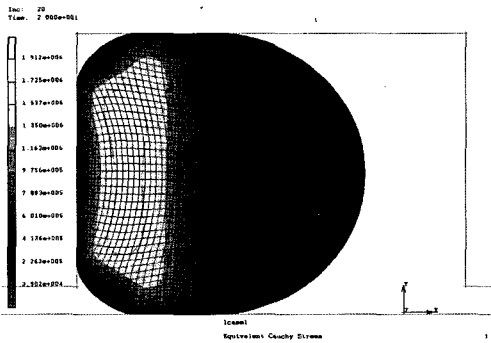
Fig. 3에서 제시한 4개의 설계변수 h, d, c, w 는 Table 2와 같이 3개의 수준(level)으로 각각 설계하였다. 4개의 설계변수를 3수준으로 각각 나누어 3수준계 직교 배

열표인 L₉(3⁴)형을 사용하였으며, 이들을 제시한 데이터가 Table 3이다.

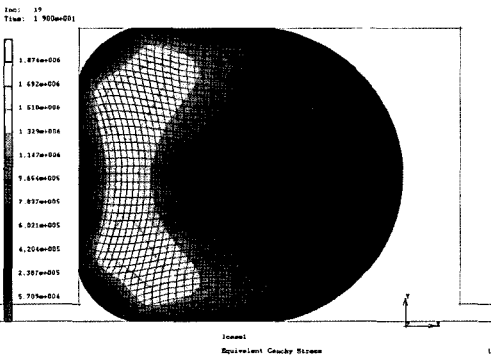
Table 4는 최적의 O-링 그루브 설계를 위해 제시된 모델 9가지의 경우에 대한 압축률(compression ratio) 데이터이다. 여기서 충전니플의 선단부와 O-링 그루브 사이의 거리를 나타내는 *h*는 작을수록, 그리고 O-링의 직경 *d*는 증가할수록 압축률은 증가한다는 것을 알 수 있다.



(a) 3rd model



(b) 7th model



(c) 9th model

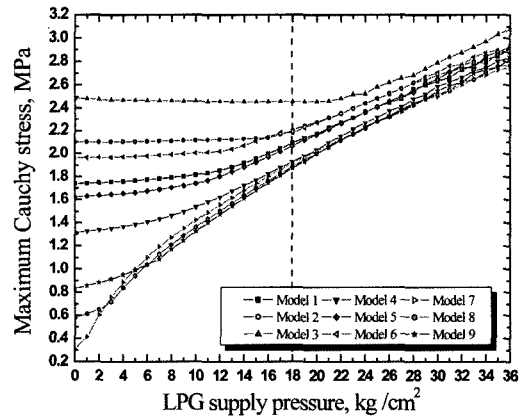
Fig. 4. Cauchy stress distributions of O-rings at a gas supply pressure of 18 kg/cm².

III. 해석결과 및 고찰

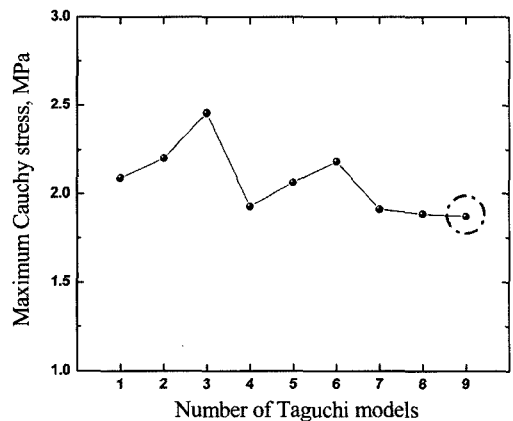
3.1. 최대코시응력

탄성중합체(elastomers)로 제조된 O-링은 비선형거동과 대변형성을 나타내는 대표적인 소재로 하중에 대한 저항성을 추정하는 응력을 계산하고자 하는 경우는 하중에 의해 변형된 면적을 고려하는 코시응력(Cauchy stress)이 초기면적을 고려하여 계산하는 von Mises 응력보다 탄성중합체의 거동특성을 더 우수하게 반영한다는 사실이다. 따라서 O-링의 소재로 사용하는 NBR은 비선형성과 대변형성을 고려하여 코시응력으로 표현하는 것이 합리적이다.

Fig. 4는 LPG 공급압력 18 kg/cm²가 O-링에 작동할 때 발생하는 코시응력을 해석한 결과이다. 즉, O-링의 해석모델 3에 대한 Fig. 4(a)는 가장 큰 압축률 23.3%



(a) For a gas supply pressure



(b) For Taguchi models with a gas supply pressure of 18kg/cm²

Fig. 5. Maximum Cauchy stress for nine Taguchi design models.

가 작용한 모델 3의 최대코시응력은 2.3 MPa, Fig. 4(b)는 가장 낮은 압축률 2.3%가 작용한 모델 7의 최대코시응력 1.8 MPa, Fig. 4(c)는 보통의 압축률 8.7%가 작용한 해석모델 9의 최대코시응력은 1.7 MPa로 각각 계산되었다.

Fig. 5는 9개의 O-링 그루브 해석모델에 대하여 낮은 압축력을 유지한 모델 7~9번의 여러 가지 O-링에 걸리는 최대코시응력은 모든 가스압력 구간에서 지속적으로 증가하지만, 높은 압축력을 유지한 모델 1~6번의 O-링에서는 설계압력 18 kg/cm² 전후까지 큰 변동이 없다가 그 이상으로 증가하면 O-링의 최대코시응력은 갑자기 선형적으로 증가하는 거동패턴을 보여준다. Fig. 5의 해석결과에 의하면, O-링에 걸리는 응력은 낮은 가스압력이 작동하는 경우에서 알 수 있듯이 초기압축률이 큰 모델 1~6에서는 큰 영향을 받지 않지만, 초기압축률이 작은 모델 7~9에서는 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 반면에 가스압력이 18 kg/cm² 이상으로 증가할수록 O-링의 초기압축률에 관계없이 O-링에는 큰 압축응력이 발생되고 있음을 알 수 있다.

또한 Fig. 5(b)에서 제시한 최대코시응력 해석결과에 의하면, 모델 4번, 7~9번은 초기압축률이 2.3%~14.1%인 경우에 발생하는 최대코시응력이 비교적 낮게 유지되고 있음을 알 수 있다. 여기서 모델 7의 경우는 초기압축률이 2.3%로 가장 작음에도 불구하고 O-링 그루브의 설계특성상 상대적으로 높은 최대코시응력이 형성되므로 우수한 밀봉성을 유지할 수 있고, 동시에 낮은 압축률로 인해 내구성이 우수한 설계조건이 될 것으로 예상된다.

3.2. 최대변형률

초기압축률과 가스압력에 의해 변형되는 O-링 소재의 변형률은 O-링 그루브의 사각공간에 적절하게 채워지면서 O-링의 변형정도에 따라 발생하는 응력과 특히 간극을 따라 발생하는 압출(extrusion)에 의한 표면의 손상이나 내구성을 떨어뜨리는 O-링의 기능성과 밀접한 관계를 맺고 있다.

Fig. 6은 LPG 공급압력이 18 kg/cm²일 경우에 O-링의 그루브 형상을 따라서 발생하는 변형률 분포에 대해 특징적 의미를 갖고 있는 모델 3번, 7번, 9번의 압출거동 현상을 각각 보여주고 있다. 모델 3의 Fig. 6(a)는 가스압력에 의해 37%의 변형률이 발생하여 압출현상이 발생한 경우를 보여주고, 모델 7의 Fig. 6(b)는 36%의 변형률에 의해 압출현상이 발생하려는 위험한 상태에 진입한 경우이고, 모델 9의 Fig. 6(c)는 35%의 변형률에 의해 아직 압출현상에 진입되지 않은 해석결

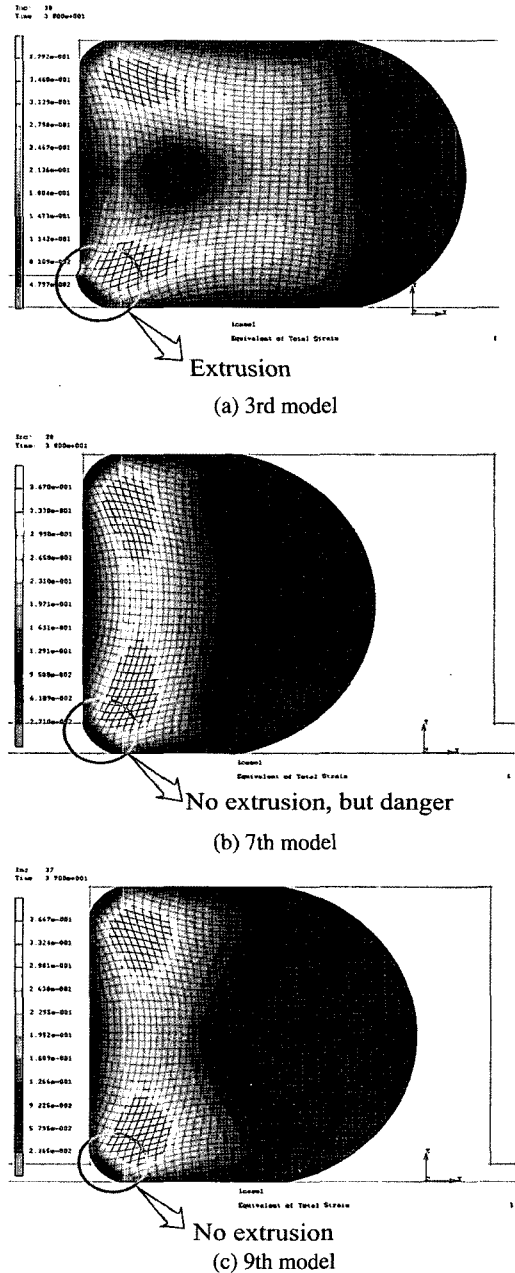


Fig. 6. Strain distributions of O-rings at a gas supply pressure of 18 kg/cm².

과를 제시한다. 여기서 O-링의 압출현상은 O-링의 마찰접촉 표면을 극부적으로 손상하여 내구성을 떨어뜨리는 것은 물론 누설을 일으키는 원인으로 작동하기 때문에 충전니플의 선단부와 O-링 사이의 간극은 가능한 작게 설계하는 것이 바람직하고, 동시에 압축률을 작게 설정하는 것이 O-링의 압출현상 방지 및 내구성 향상

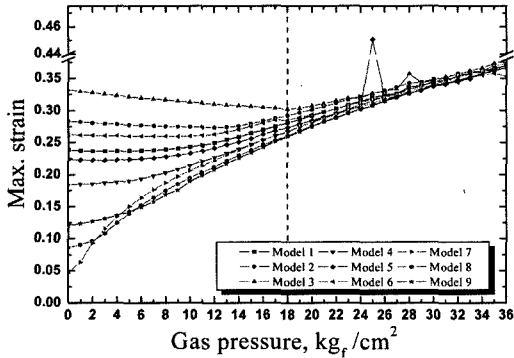
측면에서 유리함을 알 수 있다.

Fig. 7은 다구찌 해석모델 9가지에 공급된 LPG 가스 압력의 영향을 최대변형률에 대하여 고찰하였고, 변위량 측면에서 최적의 설계치수를 O-링 그루브에 대하여 각각 선정하였다. Fig. 7(a)는 가스공급 압력의 변동에 따라 달라지는 최대변형률을 제시한 결과로 초기압축률이 작은 모델 7~9는 가스압력이 증가함에 따라 지속적으로 증가하는 변위량을 보여준다. 초기압축률이 높은 모델 1~6의 경우는 가스압력이 12~18 kg/cm² 정도까지는 O-링의 변형률에서 별다른 변화가 없지만, LPG 가스압력을 그 이상으로 올려서 공급하면 초기압축률이 작은 모델 7~9처럼 거의 유사하게 완만한 변형률 상승곡선을 보여준다. 이러한 해석결과는 Fig. 5(a)의 최대코시응력의 경우처럼 초기압축률이 높은 경우는 가스압력이 12~18 kg/cm² 정도 작용하여도 O-링은 초기압축력에 의해 이미 충분히 변형되어 압착되어 있으므로 낮은 가스압력에서는 가스공급압력에 무관하게 과도한 초기 밀봉성을 확보하지만, 18 kg/cm² 이상에서는

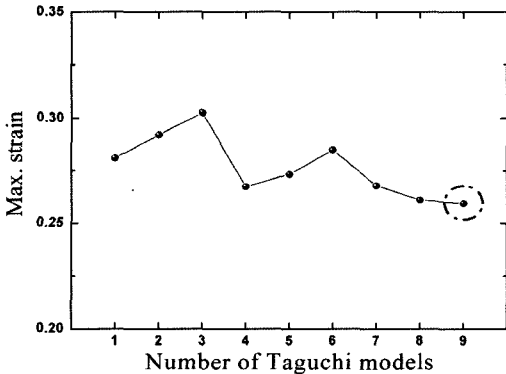
가스압력에 의해 변형이 점진적으로 진행되어 더 큰 압착력을 확보한다는 것이다. 즉, LPG 공급압력이 18 kg/cm²인 경우에 O-링에서 발생하는 최대변형률은 26~30%로 나타났고, 가스압력이 36 kg/cm²으로 대단히 큰 경우는 38~37%로 높은 변형률 거동상태를 보여준다. 이렇게 큰 변형률이 상시적으로 항상 발생하기보다는 가스압력이 가해지는 LPG 가스공급 작동상태에서 잠시 발생하기 때문에 O-링의 밀봉 안전성에는 큰 문제가 없으나, 동심원 작동을 유지하기가 어려운 기존의 LPG 충전노즐은 반복사용에 따른 O-링의 압출변형 등에 의해 소재의 내구성에는 문제가 있을 수 있다.

Fig. 7(b)는 9개의 다구찌 O-링 그루브 모델 1~9에 대하여 해석한 최대 변형률을 제시한 결과로, 초기압축률 2.3%로 가장 작은 모델 7번보다도 초기압축률 8.7%로 3.8배나 높은 모델 9번의 최대변형률이 더 낮게 제시된 결과를 보면 모델 9에 해당하는 그루브의 형상이 가장 안정된 변형률 해석 데이터를 제시한다고 볼 수 있다. 즉, 모델 9는 안정된 밀봉력과 압출현상이 발생되지 않는 변위량 거동상태를 유지한다는 우수 해석모델이다.

다구찌 실험법으로 가장 우수한 O-링 그루브를 설계하기 위해, Table 3의 직교배열표에서 제시한 9개의 그루브 모델에 장착한 O-링에 걸리는 최대코시응력과 최대변형률에 대한 SN값을 Table 4에서 요약하고 있다. 여기서 LPG 연료의 공급압력은 18 kg/cm²이고, 사용된 O-링의 소재는 NBR이다. Table 4에서 제시한 SN 결과처럼 최대코시응력 및 최대변형률은 모델 9의 경우가 -5.454와 11.718로 가장 높게 계산되었다. 결국 모델 9에서 제시한 초기압축률 8.7%에 대한 O-링 그루브의 설계치수가 가장 우수한 최적설계라는 사실로 기존의 권장 압축률 5~30%[4]의 범위로 안정된 설계조건이다.



(a) For a gas supply pressure



(b) For Taguchi models with a gas supply pressure of 18kgf/cm²

Fig. 7. Maximum strain for nine Taguchi design models.

Table 4. SN ratios for Cauchy stress and strain of O-rings.

Exp. No.	Cauchy stress [MPa]	Strain [%]
1	-6.401	11.024
2	-6.858	10.692
3	-7.811	10.386
4	-5.700	11.455
5	-6.296	11.266
6	-6.783	10.907
7	-5.630	11.440
8	-5.517	11.662
9	-5.454	11.718

Table 5. Factors affecting the Cauchy contact stress and strain of O-rings.

Affecting ratio [%]	A:h	B:d	C:c	D:w	Sum
Cauchy stress [MPa]	46.4	24.1	17.9	11.6	100
Strain [%]	50.6	16.9	14.4	18.1	100

Table 5는 O-링에서 발생하는 코시울력과 변형률에 가장 큰 영향을 미치는 설계인자를 알아보기 위해 간 이분석법을 사용하여 기여율(affecting ratio)을 고찰한 데이터이다. Table 5에서 코시울력에 큰 영향을 미치는 설계요소는 LPG 충전니플의 외경에서 O-링 그루브 외경측 사이의 거리 h 가 46.4%로 가장 큰 영향을 미치고, O-링의 직경 d 는 24.1%로 두 번째로 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면에 충전니플의 외경과 충전노즐의 내경 사이에 떨어진 반경간극 c 와 O-링 그루브의 폭 w 의 경우는 상대적으로 작은 영향을 미치는 설계요소로 파악되었다. 또한 변형률에 대해 영향을 크게 미치는 설계요소를 해석한 Table 5의 결과에 의하면 h 가 기여율 50.6%로 가장 큰 영향을 미치고, 그 다음이 d 로 기여율이 16.9%로 O-링 그루브를 설계할 경우에 우선적으로 고려해야 한다는 결과이다.

따라서 O-링의 그루브를 설계할 때에 가장 큰 영향을 미치는 압축률 인자인 h 와 O-링의 직경 d 를 결정하고, O-링이 가스압력에 의해 압출현상이 발생되지 못하도록 충전니플의 외경과 충전노즐의 내경 사이에 떨어진 반경간극 c 를 작게 하면 가장 우수한 O-링 그루브 설계가 된다.

IV. 결 론

LPG 충전기에서 밀봉을 위해 사용하는 O-링의 초기 압축률과 가스공급압력의 크기에 따라 최적의 O-링 그루브를 설계하고자 유한요소법과 다구찌 설계법을 동시에 사용하였다. O-링에 걸리는 최대코시울력과 최대 변형률 문제를 고찰하여 O-링 그루브의 최적설계를 수행하였고, O-링 그루브 설계에서 가장 큰 영향을 미치는 설계인자에 대해서도 고찰하였다.

LPG 가스압력을 18 kg/cm²으로 하고, NBR O-링을 사용하였을 경우, 초기압축률은 8.7%를 제시한 모델 9의 경우가 최적의 설계조건을 제시한다. 즉, LPG 충전니플의 외경에서 O-링 그루브 외경측 사이의 거리 $h=2.5$ mm, O-링의 직경 $d=2.74$ mm, 충전니플의 외경과 충전노즐의 내경 사이에 떨어진 반경간극 $c=0.15$ mm, O-링 그루브의 폭 $w=3.0$ mm로 설계하는 것이 가장 바람직하다는 해석결과이다. 또한 O-링 그루브에서 가장 큰 영향을 미치는 설계인자는 밀봉력과 직접 연계된 h 이고 그 다음은 d 이고, c 와 w 는 상대적으로 작은 영향을 미치는 설계요소로 파악되었다.

참고문헌

- [1] 한국엘피가스공업협회, "LPG 자동차 등록자료", (2006)
- [2] Marc Analysis Program, Ver. 7.3, MARC USA, (1999)
- [3] 박성현, "현대실험계획법", 민영사, (2003)
- [4] Dan Visscher, "The O-ring Handbook", North America.