



다구찌 실험법을 이용한 액화석유가스 용기용 밸브의 최적설계에 관한 연구

†김청균 · 오경석

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과
(2006년 11월 26일 접수, 2006년 12월 12일 채택)

Optimization Design of a Gas Valve for a LPG Cylinder Using a Taguchi's Experimental Method

†Chung Kyun Kim · Kyoung Seok Oh

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Received 26 November 2006, Accepted 12 December 2006)

요 약

본 연구에서는 LPG 용기용 가스밸브의 강도 안전성과 몸체의 경량화 해석을 9개의 밸브모델에 대하여 유한요소해석 프로그램 MARC 및 다구찌의 실험적 설계법을 사용하였다. 가스밸브의 몸체에 작용하는 Von Mises 최대응력은 밸브에 작용하는 최대가스압력 91 kg/cm²을 적용하여 황동밸브 구조물의 안전성을 고찰하였다. 여기서 최대압력 91 kg/cm²은 LPG 가스용기의 안전계수를 고려한 것으로 안전성 해석이나 최적설계를 수행하는데 충분한 작동압력이다. 밸브몸체의 자중량을 줄이기 위해 수행된 해석은 LPG 가스의 유동손실을 줄이고, 최적설계에 따라 소재가격을 낮출 수 있기 때문에 설계단계에서 고려해야 할 하나의 주요변수이다. 계산결과에 따르면, 최적설계 밸브모델은 9번이고, 이때의 최적설계 변수는 가스가 통과하는 밸브의 아래쪽 A의 반경 $r=10$ mm, 위쪽 B의 반경 $r=6$ mm, A와 B의 연결부 파이프 길이 $l=2$ mm로 결정되었다.

Abstract – This paper presents the strength safety and the weight reduction analysis of nine gas valve models for a LPG cylinder using a finite element analysis program, MARC and Taguchi's experimental method. The maximum Von Mises stress of a gas valve body represents a safety of a brass valve structure for the given gas pressure of 91 kg/cm², which considered a safety factor of a LPG gas cylinder. The weight reduction analysis is very important for reducing a gas flow friction loss and a manufacturing cost as a design parameter. The calculated results present an design model 9 as an optimized design data with 10 mm radius of a lower part gas flow pipe A, 6 mm radius of an upper part gas flow pipe B and a connecting length 2 mm of tapered pipe D between lower and upper pipes.

Key words : Valve, LPG cylinder, Optimization design, FEM, Taguchi's design method, Von Mises stress, SN ratio

I. 서 론

청정연료로 잘 알려진 액화석유가스(LPG)는 휘발성 탄화수소인 프로판 가스와 부탄 가스를 총칭한 것으로 취사용, 연료용으로 널리 사용되고 있다. LPG는 석유를 정제할 때, 또는 석유·화학 공장에서 나프타를 분해할 때 나오는 가스 등에 있는 프로판, 프로필

렌, 부탄, 부틸렌 등을 냉각 또는 7~10기압으로 액화한 것이다.

높은 압력으로 액화한 LPG를 안전하게 저장할 수 있는 LPG 용기가 필요하고, 저장된 LPG를 필요에 따라 용기로부터 방출하거나 또는 가두어 두는 저장용기의 기능성을 확보하기 위해 LPG 용기에 밸브를 설치한다. LPG 용기는 강재, 알루미늄, FRP와 같은 소재로 제작하고, 밸브는 황동을 사용하는 것이 일반적이다.

용기에 LPG를 안전하게 저장하고, LPG를 신속하게

†주저자:chungkyunkim@empal.com

방출하기 위해 LPG 용기의 상단부 중앙에 가스차단 및 안전변 기능을 갖춘 밸브가 설치되어 있다. 밸브의 상단부에 설치된 나사의 작동으로 LPG의 방출량을 조절하거나, LPG 연료의 외부누출을 안전하게 차단하는 역할을 한다. LPG 용기의 차단용 가스밸브는 LPG의 저장압력, 설계압력 등을 모두 고려하여 LPG 용기 구조물에 대한 안전성을 확보해야 한다. 즉, LPG의 충전압력 또는 설계압력에 적합한 가스압력을 충분히 견딜 수 있도록 안전성을 고려하여 설계되어야 한다.

최근 LPG 용기용 밸브로 사용하는 황동소재의 가격 급등은 LPG 용기용 밸브에 대한 최적설계 및 가격대비 경량화 연구의 중요성을 제기하였다. 따라서 본 연구에서는 LPG 용기에 공급된 압력을 기준으로 용기용 밸브 구조물의 기계적 강도를 안정적으로 검증할 수 있는 유한요소법 프로그램 MARC를 이용하여 해석하고, 밸브의 사용조건에 적합한 최적의 용기용 밸브를 다구적 실험법으로 최적화 설계를 추구하여 LPG 용기용 가스밸브의 강도 안전성과 경량화에 대한 연구를 함께 추진하였다.

II. 유한요소 해석모델

2.1. LPG 용기용 밸브의 구조 및 기능

LPG 용기용 밸브는 LPG 용기의 상단부 중앙에 설치되어 LPG를 안전하게 저장하고, 필요에 따라 LPG를 방출하고자 하는 경우에 효율적으로 밸브를 개방하고 차단하는 접촉식 시일기구(sealing mechanism)와 용기 내부의 가스압력을 안전하게 보장하기 위한 안전밸브(safety relief valve)의 두 가지 기능성을 갖고 있다.

용기에 나사로 체결된 Fig. 1의 밸브는 LPG 소비처의 가스 요구량을 충족시키는데 필요한 가스를 공급하기 위해 가스의 유로를 개폐하는 1차적 기능과 LPG 용

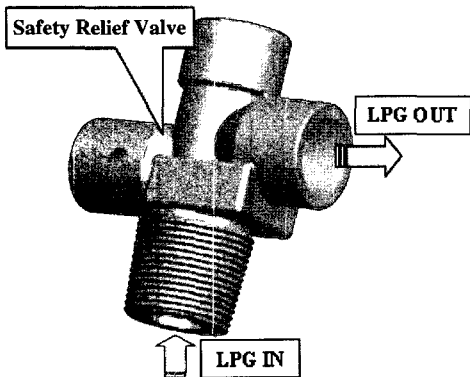


Fig. 1. General view of a gas valve for a LPG cylinder.

기의 안전성을 확보하기 위해 설정압력보다 높게 압력이 상승하면 즉시 안전변을 개방하는 안전밸브가 설치되어 있다.

밸브는 가스압력에 대한 안전성과 가공성, 코스트 측면에서 황동소재를 단조하여 제작한다. 밸브는 강도 안전성을 보장하기 위한 몸체, 밸브를 용기에 체결하기 위한 볼트, 밀봉기구의 개도를 조절하기 위한 핸들, 스피들, 스템, O-링, 시일 및 밸브시트, 그리고 가스의 이상압력 상승으로 인해 발생하는 용기의 안전성을 보장하는 안전밸브 등으로 구성된다.

2.2. 해석조건

LPG 용기용 밸브의 기본소재로 사용하는 황동과 같은 연성재료의 안전계수는 보통의 기계 구조물에서는 이론적으로 안전하면 충분하다고 평가하지만, 가스용기는 가스폭발이라는 위험성과 사고시 그 피해정도가 크기 때문에 안전계수를 3배 높여 제작할 것을 권장한다. 따라서 본 연구에서는 용기용 밸브 구조물의 안전계수를 3배나 높여 가스압력 91 kg/cm^2 (9.1 MPa)에 대한 밸브 구조물의 응력을 해석하고 설계하였다[1].

LPG 용기용 밸브의 강도 안전성은 1차적으로 밸브의 나사 체결부를 따라서 유입되는 가스설계압력 18 kg/cm^2 에 의해 결정되지만, 해석에 사용된 가스압력은 91 kg/cm^2 으로 압력용기의 안전성을 충분히 고려하였다. 본 연구에서는 밸브몸체의 내압시험에서 가장 높은 31 kg/cm^2 에 대해서도 FEM으로 해석하여 안전성을 고찰하였다.

가스압력은 Fig. 2에서 보여주는 것처럼 가스의 유출을 차단하는 시일기구와 가스의 이상압력 상승을 최대한 안전하게 허용하는 안전밸브의 시일, 가스의 유출구에는 동일한 가스압력이 작용하지만 완벽하게 밀봉되었다고 가정한다. 여기서 밸브의 구조적 안전성을 확보

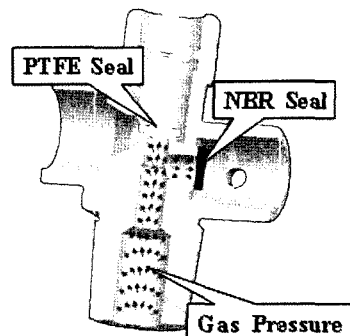


Fig. 2. Boundary conditions of a gas pressure for a LPG cylinder.

하기 위해 사용된 압력은 안전계수를 고려한 91 kg/cm²이다.

2.3. 해석모델 및 소재특성

밸브 구조물의 강도 안전성을 해석하기 위한 유한요소 해석모델에서 밸브모델의 요소(element)는 4개의 노드(node)를 갖는 Tetra 요소로 복잡한 밸브의 내부 구조물 형상을 해석하는데 특히 유용한 요소이다. 또한 밸브의 유한요소 해석모델에 사용된 요소와 절점의 개수는 모델 2와 9의 경우는 24806과 22963이다.

밸브 구조물의 강도 안전을 검증하기 위해 사용한 프로그램은 형상의 복잡성을 고려하여 PRO/ENG, HyperMesh를 사용하여 메시 작업을 수행하였고, 유한요소해석은 MSC/MENTAT와 MSC/MARC를 각각 사용하였다[2].

황동으로 제작된 밸브 구조물의 응력을 해석하는데 필요한 소재특성을 Table 1에서 제시하고 있다. 밸브는 LPG 가스의 누설안전성을 높이기 위해 높은 밀도를 갖는 황동소재를 사용한다.

Table 1. Material properties of a brass.

Properties	Brass
Modulus of elasticity, GPa	97
Density, kg/m ³	8490
Poisson's ratio	0.31
Yield strength, MPa	124

III. 다구찌 설계법

3.1. 개요

다구찌 방법은 응력, 변형률, 온도, 하중 등과 같은 특성치의 산포를 통해 설계와 실험의 최적치 조건을 찾아내는 일종의 기준값 설정법에 해당한다. 이 때 물리적 의미를 갖는 특성치의 산포가 가장 적은 해석조건을 밸브설계의 최적조건으로 결정하게 되며, 특성치의 산포는 SN비를 통해 알 수 있다.

본 연구에서는 가스밸브 구조물에서 발생하는 Von Mises 응력, 변형률과 같이 특성치가 작으면 밸브의 강도 안전성 측면에서 우수하다는 SN비를 사용하는 망소특성과 접촉수직응력과 같이 특성치가 클수록 우수한 밀봉성능을 나타내는 경우의 망대특성을 선정하는 두 가지가 있다. SN비가 클 경우 그 때의 설계 파라미터들이 응력과 변형률 측면에서 안정되고, 우수한 밀봉성능에 효과적이라고 생각한다. 또한, 밸브의 SN비를 사

용하여 설계 파라미터들이 최적설계에 미치는 영향을 간이분석법을 통해 관찰하였고, 각 파라미터들이 특성치에 미치는 기여율을 계산하여 최적조건을 찾아내었다[3].

3.2. 설계 파라미터와 직교 배열표

Fig. 3과 Table 2에서는 밸브에서 LPG의 유동 및 가스압력에 의해 형성되는 핵심 설계인자의 위치와 수준을 각각 나타내고 있다. 그림에서 A는 가스가 통과하는 관(pipe)의 반경, B는 위쪽 관의 반경을 각각 나타낸다. 결국 가스가 통과하는 관의 직경이 커지면 가스의 유동 마찰손실이 줄어들어 좋고, 밸브의 벽면두께는 상대적으로 줄어들므로 밸브의 자중량을 감소시키는 효과를 기대할 수 있지만, 강도저하에 따른 안전성은 점검해야 한다. 따라서 밸브의 강도 안전성을 고려하여 최소두께는 3 mm를 유지할 수 있도록 설계인자를 결정하였다. D는 A와 B의 관을 연결하는 축방향의 연결테이퍼 부분으로, 이 길이가 짧을수록 경사도가 급해져 가스유동을 방해하여 손실을 증가시키는 문제점을 제기하기 때문에 완만한 구배를 주는 것이 필요하다. 그리고 C는 다구찌 설계과정에서 발생하는 오차를 나타낸 것이다.

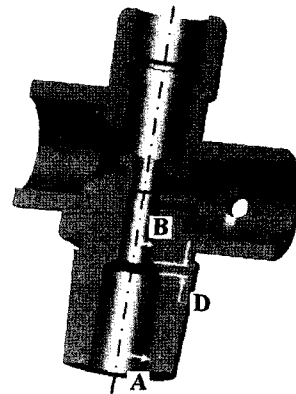


Fig. 3. Design parameters of a gas valve.

Table 2. Factors and levels for a Taguchi's experimental method.

Factors and Levels		Variation Factors			
		A: r (mm)	B: r (mm)	C: Error	D: l (mm)
Level	1	7	4	-	2
	2	9	5	-	3
	3	10	6	-	4

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

Model 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

Table 3은 3개의 수준계에 따라 달라지는 직교 배열 표이고, 해석인자 81개를 총 9개 모델로 축소하여 간편하게 해석하였다[3].

IV. 해석결과 및 고찰

4.1. 응력해석

LPG 용기용 밸브에 작용하는 가스압력에 의해 9개의 서로 다른 밸브모델 구조물에 걸리는 응력과 각 모델에 대한 자중량을 하나의 설계 파라미터로 고려하여 고찰하였다. Fig. 4는 9개의 밸브모델에서 대표적인 밸브모델 3개에 대한 FEM 응력분포를 보여준 결과이다. 이때에 밸브에 가한 가스압력은 용기의 안전계수를 고려한 91 kg/cm²으로 밸브의 강도 안전성을 충분히 점검할 수 있다. 이때에 PTFE 밸브시트나 NBR 안전편에 가한 가스압력은 완벽하게 차단되었다고 가정한다. Fig. 4에서 응력이 가장 크게 걸리는 부위는 나사 체결부의 안쪽으로 두께를 약간 증가시킬 필요가 있고, 밸브의 유출구 부분은 오히려 유동구의 직경을 늘리는 것이 바람직하다.

Fig. 5는 9개의 밸브모델에서 발생하는 최대응력을

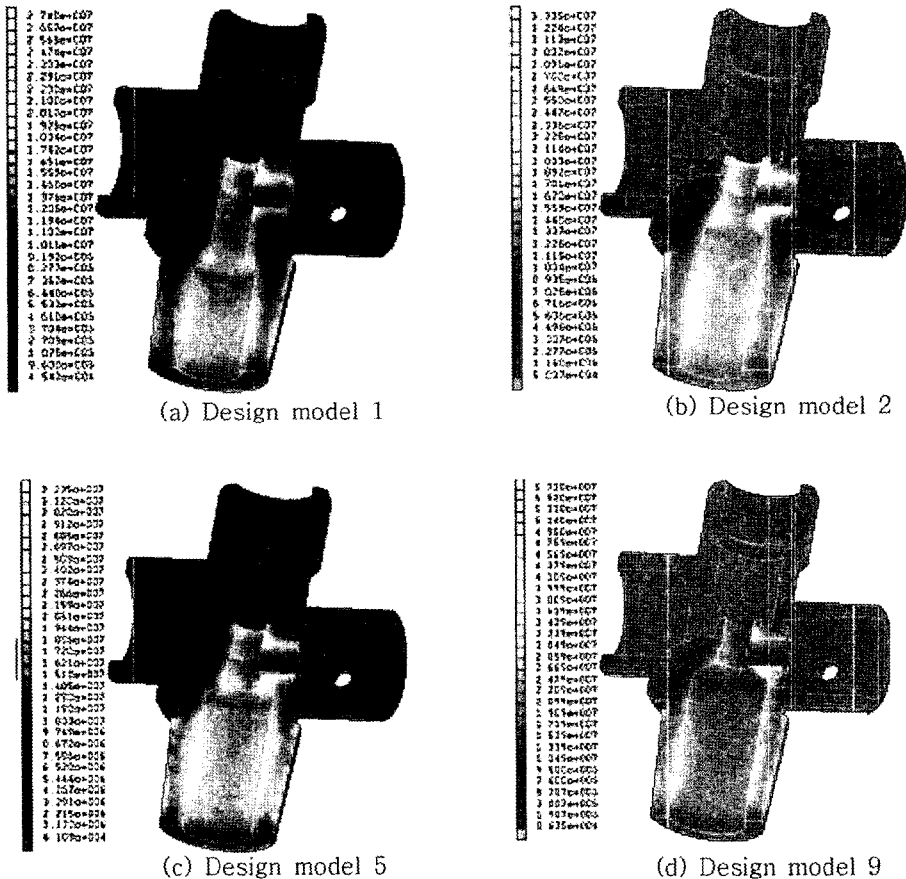


Fig. 4. Von Mises stress distribution of a LPG valve at P=91 kg/cm².

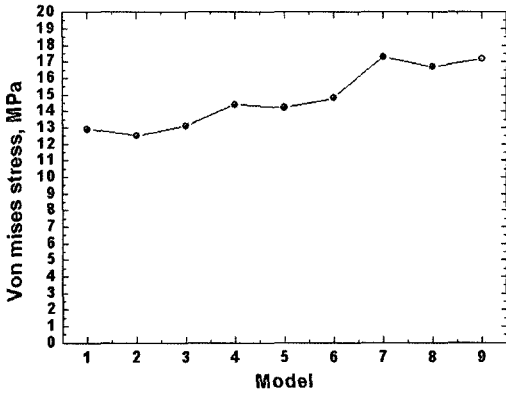


Fig. 5. Maximum Von Mises stress of nine LPG valve models at P=91 kgf/cm².

상대적으로 비교한 FEM 해석결과이다. 밸브에 걸리는 최대응력은 가스가 통과하는 아래쪽 A의 직경과 위쪽 B의 직경이 연결되는 테이퍼 지역, 즉 직경의 단면적이 급격하게 변하는 지역에서 상대적으로 높은 응력이 걸리고 있다. 따라서 가스유동과 밀접한 관련이 있는 연결구의 단면 수축률은 가능한 작으면서 긴 테이퍼 형상을 유지하도록 설계하는 것이 유리함을 알 수 있다. 해석결과에서 제시한 최대응력 17MPa는 황동소재의 항복응력 124MPa에 비하여 10~14% 이하로 안전계수를 충분하게 유지하고 있음을 알 수 있다. 밸브 몸체의 응력을 해석하기 위해 고려한 압력이 91 kg/cm²라는 점을 고려하면 밸브의 안전은 지나치게 강화되어 있으므로 가스통과 직경을 증가시켜 가스의 유동손실을 줄이고 무게를 줄이는 경량화가 필요하다.

4.2. 밸브의 경량화

Fig. 6은 9개의 밸브모델에서 가스가 통과되는 구멍

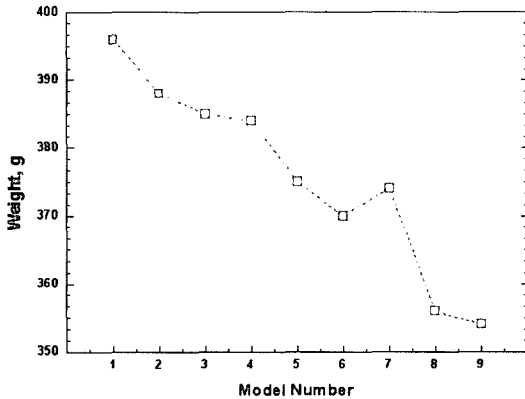


Fig. 6. Valve weight reduction for nine proposed valve models for a LPG cylinder.

의 직경이 증가되면서 감소하는 밸브의 자중량을 계량한 해석결과이다. 안전밸브의 기본모델을 제시한 모델 1의 자중량은 396g인 것에 비하여 가장 가볍게 제작된 모델 9의 무게는 354g으로 42g이나 줄어든 약 11%의 자중량 감소효과를 가져왔다. Figs. 5와 6의 응력해석 및 자중량 해석결과에 의하면, LPG 용기에 걸리는 최대응력은 가해진 가스압력에 대하여 충분히 안전성을 유지하면서도 용기용 밸브의 경량화와 원가절감에 큰 기여를 한 것으로 나타났다.

4.3. 다구찌 설계법에 근거한 최적설계

4.3.1. SN비에 의한 최적밸브모델 선정

Table 4는 9개의 밸브모델에 대한 Von Mises 최대응력과 자중량을 SN비로 제시한 결과이다. 여기서 밸브에 걸리는 Von Mises 최대응력의 SN비가 크다는 것은 밸브의 강도설계가 우수하게 설정되었다는 것으로, 2번 모델을 강도 안전성 측면에서 추천할 수 있다. 또한, 밸브의 경량화 측면에서 가벼운 가스밸브 모델로 가장 바람직한 모델은 9번이다. 제시된 9개의 밸브모델을 다구찌 설계법의 SN비로 평가하면 강도 안전성의 2번 모델과 경량화의 9번 모델에서 보다 더 우수한 최적설계 모델을 선정하면 된다. 결국 안전성과 경량화를 모두 만족하는 9번 밸브모델이 가장 우수한 최적설계 밸브 모델로 평가될 수 있다.

4.3.2. 기여율에 따른 최적치수 선정

Table 5는 가스밸브의 강도 안전성을 나타낸 Von Mises 최대응력과 경량화의 향으로 표현한 밸브의 무게를 각각의 설계인자로 선정하여 기여율을 해석한 결과이다. LPG 용기용 밸브에 작용하는 가스압력에 의해 가스밸브 몸체에 걸리는 최대응력은 여러 가지 설계요

Table 4. S/N ratios of Von Mises stress and weight of nine LPG valves.

Model No.	Von Mises Stress	Weight
1	-22.2118	-51.9539
2	-21.9382	-51.8657
3	-22.3454	-51.7317
4	-23.1672	-51.4574
5	-23.0458	-51.4109
6	-23.4052	-51.2696
7	-24.7609	-51.1742
8	-24.4543	-51.0777
9	-24.7106	-50.9801

Table 5. Affecting ratio of a LPG valve.

Affecting Ratio %	A: r (mm)	B: r (mm)	C: Error	D: l (mm)	Sum
Von Mises Stress	93.23	4.03	1.013	1.723	100
Weight	77.78	20.25	0.523	1.431	100

소에 의해 영향을 받는데, 그 중에서 가장 큰 영향을 미치는 설계인자는 가스가 통과되는 아래쪽 직경 A로 약 93%의 비중을 차지하고, 경량화의 핵심 설계인자인 자중량에 미치는 것도 직경 A로 약 78%의 중요도를 갖는다. 그 다음의 핵심 설계인자는 위쪽의 직경 B이지만 최대응력과 자중량에 미치는 영향은 4%와 20%로 크게 높지는 않으나 가스의 유동손실을 줄이면서 특히 경량화에 긍정적인 영향을 미친다는 측면에서 밸브의 설계에서 중요하게 다루어야 한다.

V. 결 론

본 연구에서는 LPG 용기용 가스밸브의 강도 안전성을 해석하기 위해 유한요소법을 사용하였고, 동시에 밸브의 경량화 및 유동마찰 손실을 고려한 응력해석을 통

해 밸브몸체에 대한 최적설계를 수행하였다. 밸브의 최적설계 조건은 가스의 충격하중을 고려하여 밸브몸체에 작용하는 최대응력을 일정이하로 유지하고, 가능한 밸브의 경량화 및 원가절감에 기여토록 설계해야 한다.

유한요소법으로 해석한 강도 안전성은 제시된 9개의 밸브모델 모두에 대하여 항복강도 대비 10~14% 이하로 충분히 안전하고, 최적모델로 선정된 밸브모델 9는 기존의 밸브모델 대비 11%의 경량화를 추구할 수 있었다. 상기의 해석결과를 바탕으로 제시된 밸브모델 9의 설계인자는 가스가 통과하는 밸브 아래쪽 A의 반경 $r=10$ mm, 위쪽 B의 반경 $r=6$ mm, A와 B의 연결부 파이프 길이 $l=2$ mm로 각각 선정되었다.

참고문헌

- [1] Norton, R.L., 정태형 외 4인 공역, 기계설계, Prentice Hall, pp.3-22, (2002)
- [2] MARC Analysis Ver. K7.3, (1999)
- [3] 박성현, 현대실험계획법, 민영사, pp.459-462, pp.631-638, (2003)