

다구찌 기법을 통한 LPG 저장탱크 시공최적화

임사환*, 허용정**, 백승철**

*한국기술교육대학교 기계공학과

**한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

e-mail : leemsahwan@kut.ac.kr

A Study on the Optimal Installation for LPG Storage Tank through Taguchi Method

Sa-Hwan Leem*, Yong-Jeong Huh**, Seung-Cheol Paek**

*Department of Mechanical Engineering, KUT

**School of Mechatronics Engineering, KUT

요 약

자동차 연료로서 LPG(Liquefied Petroleum Gas)의 사용은 대기오염을 줄이는데 효과적으로 사용이 빠르게 확산되고 있다. 가스사용이 늘어나면서 폭발과 화재에 의한 인명피해가 해마다 발생하고 있으며, 특히 대규모 저장시설에서의 가스사고는 사회적으로 심각한 문제를 야기하고 있다. 이를 최소화하기 위한 방안으로 지하격납형 저장탱크를 대안으로 제시하고 있다.

본 연구는 LPG를 대량으로 취급·저장하는 시설에서 운용하는 저장탱크의 설치방법을 개선하기 위한 것으로, 지상형과 지하매몰형, 지하격납형에 대하여 누출가능성, 경제성, 토지이용률, 안전성, 점검 편리성, 시공용이성을 인자로 다구찌(Taguchi) 실험계획법으로 분석하면 토지이용률, 경제성, 안전성 순으로 효과적인 것으로 나타났으며, 최적의 시공법은 지하격납형 저장탱크인 것으로 나타났다.

1. 서론

녹색성장을 위한 에너지원으로서 LPG는 대도시의 대기환경 개선을 위해 자동차 연료로 사용하고 있으며 대기 오염물질을 저감시키는데 효과적인 것으로 입증되고 있다.

미국, EU(유럽연합), 일본, 중국 등은 2000년도 이후부터 자동차의 이산화탄소 배출 허용기준과 연비 기준을 크게 강화하고 있다.[1] 이는 자동차 부문이 국가 에너지소비의 19.3%를 차지하고 있으며, 타 부문보다 감축 여력이 큰 편이기 때문이다.[2]

독일의 경우 2004년 보급된 LPG 차량 수가 3만 여대, LPG 충전소 600여개에 불과했던 것이 2006년에는 각각 7만여대의 LPG 차량 및 1000여개의 충전소로 확장되었다.[3]

표 1에서 보듯이 운송용으로 사용되는 LPG량이 점진적으로 년 평균 3.9%씩 증가하고 있다.[4,5]

하지만 가스는 물리적 특성상 무색, 무취로 형태가 없어 검지하기가 어려워 안전관리자가 상주하고 있는 대단위 시설에서도 누출로 인한 화재 및 폭발의 사고가 발생하고 있다.

액화석유가스 자동차는 충전소가 대도시 근교에서 운용되고 있으며, 1998년에 발생한 익산충전소(UVCE)와 부천충전소(BLEVE)는 LPG 충전소에서 발생한 대표적인 안전사고로서 인명피해와 막대한 재산손실을 초래하였다.

박명섭(1999) 등의 연구에 따르면 지상저장탱크의 경우 VCE와 외부 열원에 의한 BLEVE 그리고 Pool fire에 의한 열 영향이 가장 큰 피해 발생요인으로 밝혀졌다.[6] 또한, 이진한(2006) 등의 연구에서 LPG

[표 1] 액화석유가스 소비현황

단위 : 1000톤

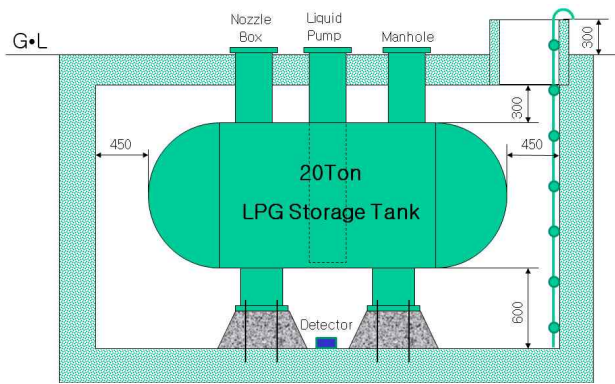
사용처별	2004	2005	2006	2007	2008	증가율(%)
사업용	2,065	2,184	2,081	1,911	1,679	△5.4
도시가스	75	96	69	62	178	2.8
운송용	3,860	3,968	4,069	4,366	4,379	3.9
공업용	481	509	504	637	650	4.2
연료용	1,226	1,236	1,445	1,516	2,045	13.6

충전소가 법적 최소기준을 만족하였더라도 국내 1,000개의 충전소가 있다고 가정할 때 25년에 1회 꼴로 탱크로리 BLEVE 사고가 발생할 수 있다고 하였다.[7]

현행법에 의하면 저장탱크의 설치는 지상형 및 지하형으로 규정하고 있다.[8]

LPG 충전시설에 설치되어 있는 저장탱크의 65% 정도가 자동차 충전소에 설치되어 있으며, 대부분이 지하매몰형으로 설치되어 있어 저장탱크의 구조적 결함을 수시로 점검하기 어려운 실정이다.[4] 따라서 지상형 저장탱크는 가스누출로 인한 VCE와 BLEVE를 유발할 수 있으며, 매몰형은 부식 등에 의한 위험성과 경제성이 취약하다.[6,9,10]

이를 해결하기 위한 방안으로 최근 지상형과 지하매몰형의 위험성과 경제성에 대한 모순문제를 해결하기 위하여 그림 1과 같은 지하격납형 저장탱크를 TRIZ 기법을 활용하여 제안하였다.[11]



[그림 1] 지하격납형 저장탱크 제안형태.

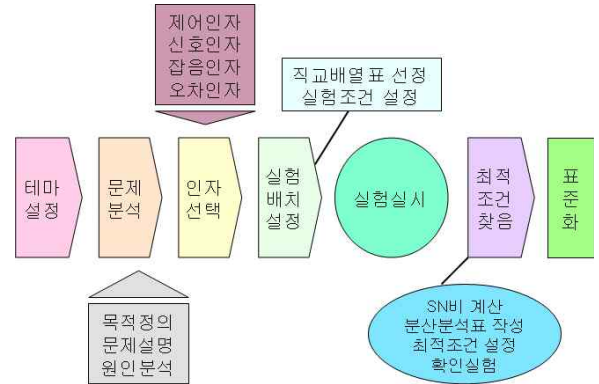
따라서 본 연구에서는 지상형, 지하매몰형, 지하격납형에서 안전성과 경제성을 고려한 최적의 저장탱크를 시공하기 위하여 다구찌 기법을 활용하여 파악하였다.[12]

2. 이론

다구찌 기법은 일본의 다구찌 겐이찌가 구현한 제품의 품질개선 기법이다. 알려진 다구찌 기법은 제어 가능한 인자로 제어할 수 없는 잡음(환경) 인자에 강건한 설계, 영어로 로부스트 설계(Robust Design)를 하는 것으로 알려져 졌다.

다구찌는 품질정의를 제품이 출하된 후 사회에 주는 손실이라고 정의하였다. 손실은 기능편차에 의한 손실, 사용 비용에 의한 손실, 폐해 항목에 의한 손

실로 크게 3가지로 나눌 수 있다. 물건의 출하된 후 사회에 주는 세 종류의 손실을 줄이기 위한 대책이 다구찌 기법이다.



[그림 2] 다구찌 기법(파라미터 설계) 적용 순서.

그림 2와 같은 다구찌 기법 적용 순서에 의해서 테마를 설정하고 문제분석을 위한 목적정의에 의한 인자를 저장탱크의 설치위치에 따른 누출가능성, 경제성, 토지이용률, 안전성, 점검편리성, 시공용이성에 대하여 설정하였다.

2.1. 다구찌 해석방법

다구찌 기법은 실험과 설계의 최적조건을 결정하는 기준으로 특성치의 산포도가 가장 작은 조건을 선정하고 있다. 특성치의 산포도는 SN(signal to noise ratio)값에 의해 표현되며, SN값은 특성치의 성질에 따라 표 2와 같이 정의되는 것이 일반적이다.

[표 2] 특성치 분류.

특성 분류	계량 계수	특성	정의	예
동특성	계량치	능동적	신호를 임의로 조정할 수 있는 경우	잔가스 회수시간
		수동적	신호를 조정하지 않는 경우	저장탱크 충전한계
정특성	계량치	망소	작을수록 좋은 것	안전밸브 작동횟수
		망대	클수록 좋은 것	강도, 안전성
		망목	목표치가 있는 것	규격제품
	계수치	망소	작을수록 좋은 것	불량률
		망대	클수록 좋은 것	양품률

다구찌 기법에서 계량치의 망대특성 SN비는 다음의 식으로 결정된다.

$$SN = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}$$

위 식에서 SN 기준값이 크게 나타난 경우는 그때의 요인인자의 순서에 의해 가장 효과가 있다는 것을 의미한다.

따라서 본 연구에서 지정된 6개의 요인에 대한 SN 기준값으로부터 저장탱크의 시공방법에 따른 효과를 간이 분석법을 통하여 고찰하였고, 각각의 요인들이 SN 특성값에 미치는 기여도를 계산하였다.

2.2. 요인과 직교배열표

다구찌 해석에 사용된 6개의 요인과 각 요인의 수준(level)은 설치장소를 지상형, 지하매몰형, 지하격납형으로 하였고, 인자는 누출가능성, 경제성, 토지이용률, 안전성, 점검편리성, 시공용이성으로 각각 설정하였다. 이와 같이 다구찌 최적화 설계에서 6개의 요인인자를 2수준인자 1개와 3수준인자 5개로 직교배열표인 $L_{18}(2^1 \cdot 3^5)$ 을 사용하였다. 이것들을 표 3에서 제시하고 있다.

[표 3] 직교배열표. $L_{18}(2^1 \cdot 3^5)$

순번 \ 인자	누출가능성	경제성	토지이용률	안전성	점검편리성	시공용이성
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2
5	1	2	2	2	3	3
6	1	2	3	3	1	1
7	1	3	1	2	1	3
8	1	3	2	3	2	1
9	1	3	3	1	3	2
10	2	1	1	3	3	2
11	2	1	2	1	1	3
12	2	1	3	2	2	1
13	2	2	1	2	3	1
14	2	2	2	3	1	2
15	2	2	3	1	2	3
16	2	3	1	3	2	3
17	2	3	2	1	3	1
18	2	3	3	2	1	2

완전요인법에 의하면 486회를 실시하여야 하는데 Taguchi 기법을 사용하여 실험회수를 18회로 줄였다.

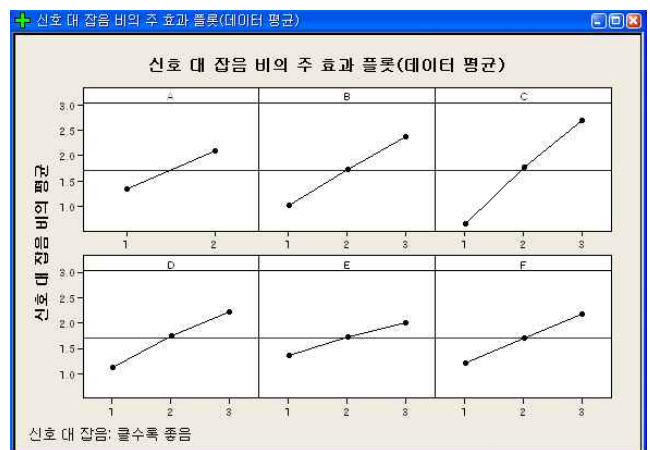
3. 해석결과 및 고찰

LPG 충전소에 설치되는 저장탱크의 최적 시공을 위하여 지상형, 지하매몰형, 지하격납형에 대하여 다구찌 기법에 의하여 미니탭 10.0을 이용하여 분석하였다.

[표 4] SN비($L_{18}(2^1 \cdot 3^5)$).

순번	R1	R2	SN비
1	0.8	0.78	-2.04955
2	1.1	1.09	0.78801
3	1.4	1.4	2.92256
4	0.975	0.98	-0.19775
5	1.275	1.29	2.1607
6	1.35	1.225	2.16423
7	1.175	1.14	1.26744
8	1.325	1.225	2.09016
9	1.4	1.355	2.77836
10	1.125	1.1875	1.25152
11	1.125	1.1675	1.18111
12	1.275	1.2525	2.03219
13	1.1	1.1275	0.93377
14	1.325	1.2875	2.31784
15	1.4	1.4175	2.97618
16	1.35	1.3625	2.64652
17	1.275	1.2675	2.08451
18	1.5	1.4275	3.30135

표 4는 표 3의 직교배열표에서 제시한 16개의 실험적 해석모델을 통하여 각각의 요인의 SN비를 나타내고 있다.



[그림 3] 신호 대 잡음 비의 주 효과 플롯.

[표 5] 신호 대 잡음비.

설치장소별	누출가능성	경제성	토지이용률	안전성	점검편리성	시공용이성
지상형	1.32	1.02	0.64	1.13	1.36	1.21
지하매몰형	2.08	1.73	1.77	1.75	1.72	1.71
지하격납형		2.36	2.69	2.23	2.02	2.19
수준차이	0.76	1.34	2.05	1.10	0.66	0.98
순위	5	2	1	3	6	4

그림 3의 신호 대 잡음비 주 효과를 살펴보면, C(토지이용률)이 가장 큰 영향을 나타내고 있으며, 그 다음으로 B(경제성)과 D(안전성)이 효과적인 것으로 분석되었다.

표 4에서 제시한 SN비를 기준값으로 하여 저장탱크의 시공방법에 따른 요인인자의 영향과 순위를 간 이 분석법을 이용하여 계산한 결과를 표 5에서 제시하고 있다.

수준차이는 각 요인의 가장 큰 영향인자와 가장 작은 수의 차이를 나타낸 것이고, 순위는 영향력의 크기를 나타낸다.

표 5의 다구찌 해석결과로부터 저장탱크의 시공방법에 따라 지상형, 지하매몰형, 지하격납형의 영향력은 토지이용률, 경제성, 안전성의 순으로 나타났다.

따라서 LPG 저장탱크를 최적시공방법은 지하격납형을 선택하는 것이 바람직하다는 것을 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구는 LPG충전소에 설치하는 지상형 저장탱크에서 발생하는 VCE와 BLEVE에 의한 피해를 최소화하고, 지하매몰형의 시공의 어려움, 경제적 부담과 점검 애로를 해소하기 위한 안전성과 경제성을 최적으로 증가시킬 수 있는 시공방법을 해석하였다.

최적화를 위해 고려한 5개의 요인인자와 3수준을 해석하기 위해서 모두 486번의 반복적 해석을 수행해야 하지만, 다구찌 실험적 설계해석법에서는 표 4에서 제시한 것처럼 단지 18번의 해석을 통하여 저장탱크의 설치방법의 실효성을 위한 최적의 조합조건을 찾아낼 수 있었다.

저장탱크를 시공함에 있어서 지상형, 지하매몰형, 지하격납형에서 가장 큰 영향은 토지이용률에 따른

것으로 나타났다. 또한 경제성과 안전성에 대한 최적시공은 지하격납형으로 나타났다.

참고문헌

[1] <http://www.keei.re.kr>

[2] OECD, Integrating Environment and Economy, Progress in the 1990s, 1996.

[3] So-Young Park, "German gas market trends - LPG gas increasing popularity of alternative fuels", The Gas Safety Journal, Vol.35, March, pp.77-80, 2009.

[4] Korea Gas Safety Corporation, Technical Inspection & Advisory Service Division, "High-pressure Gas Statistics", 2009.

[5] Korea Statistical Information System Consumption data of Energy source. <http://kosis.nso.go.kr>

[6] Myung-Seop Park, Jae-Min Seo, Jung-Woo Lee, Ky-Soo Kim, Sung-Bin Kim, Jae-Wook Ko and Dong-Il Shin, "A Study for Risk Assessment of LPG Storage Facilities", KIGAS, Vol.3, No.3, December, pp.9-16, 1999.

[7] Jin Han Lee, Kwang Soo Yu, Kyo Shik Park, "Availability Analysis of Safety Devices installed for Preventing Accidental Events in the LPG Refueling Station", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol.10, No.1, March, pp.26-31, 2006.

[8] Korea Gas Safety Corporation, "Liquefied Petroleum Gas Safety Control and Business Law", 2007.

[9] Sa-Hwan Leem, Yong-Jeong Huh and Jong-Rark Lee, "A Study on the Possibility of BLEVE and UVCE for LPG Storage Tank of Underground Containment Type", 2008 Proceedings of The KASI Spring Conference, Vol.9, No.1, pp.313-315, 2008.

[10] Sa-Hwan Leem and Yong-Jeong Huh, "A Study on the Quantitative Analysis and Estimation for Surround Building caused by Vapor Cloud Explosion(VCE) in LPG Filling Station", KOSOS, Vol.25, No.1, pp.44-49, 2010.

[11] Sa-Hwan Leem and Yong-Jeong Huh, "Improvement for installation technology of LPG storage tank using TRIZ", Proceedings of Global TRIZ Conference 2010, 2010.

[12] Sang-Bok Ree, Taguchi Method using Minitab, Eretec Inc., 2006.