

LPG 가열로 및 건조로의 안전장치 설치에 따른 사고빈도에 관한 연구

송동우 · 김기성 · 김충희 · 이성경 · †이수경

서울과학기술대학교 안전공학과

(2015년 7월 15일 접수, 2015년 8월 25일 수정, 2015년 8월 26일 채택)

A Study on Accident Frequency by Installing Safety Devices in the LPG Heating and Drying Furnace

Dong-Woo Song · Ki-Sung Kim · Choong-Hee Kim

Seong-Gueong Lee · †Su-Kyung Lee

*Dept. of Safety Engineering, Seoul National Univ. of Science & Technology, Seoul
139-743, Korea*

(Received July 15, 2015; Revised August 25, 2015; Accepted August 26, 2015)

요 약

본 연구에서는 국내 가열로 · 건조로의 안전장치 유무에 따른 위험변화를 평가하기 위하여 FTA(Fault Tree Analysis)를 통하여 안전장치들의 사고발생 빈도수 도출 및 분석을 실시하였다. 국내 LPG 가열로 및 건조로의 안전장치의 국내 설치기준이 미비하고 가스 누출하여 체류할 수 있는 구조로 폭발의 위험을 가지고 있다. 안전장치는 다른 설비의 연소기 국내 기준과 NFPA를 바탕으로 4가지를 선정하였다. 안전장치 설치 전후의 사고발생 빈도 감소효과를 각각 분석하였다. 이를 통해 국내 LPG 가열로 · 건조로의 가스누출 피해 방지를 위한 최소한의 안전장치를 제시하였다.

Abstract - The purpose of this study is to assess the risk of depending on the presence or absence of safety device of domestic heating and drying furnaces, by derivation and analysis of accident frequency of safety devices through FTA (Fault Tree Analysis). Installation standards are lacking in Korean for the safety device of LPG heating and drying furnace, which have a risk of explosion due to structure to trap the leaked gas. Four different safety devices were selected on the basis of NFPA and national standards for combustors of other equipment. Effects of frequency reduction in accidents were analyzed before and after installing the safety devices respectively. As a result, a minimal leakage safety device was presented for preventing damages from gas leak of domestic LPG heating and drying furnace.

Key words : FTA, Fault Tree Analysis, Accident Frequency, Drying Furnace, Heating Furnace

†Corresponding author: lsk@seoultech.ac.kr

Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

1.1. 연구의 배경 및 필요성

국내 가열로 및 건조로는 LPG를 이용하는 가스식을 주로 사용하며, 대규모 LPG 사용시설에 포함된다. LPG 가열로 및 건조로는 가스가 누출하여 체류할 수 있는 구조로 폭발의 위험성이 높음에도 불구하고 안전장치의 의무설치 등 국내 기준이 미비한 실정이다. 그에 대한 안전방안으로 저장능력 250kg 이상의 시설에는 안전관리자를 선임하고 있지만 산업용 LPG 사용시설의 경우에는 가스시설 점검 및 종업원에 대한 관리감독이 소홀하게 될 개연성이 있다. 가스안전 의식이 부족한 외국인 근로자의 가스 시설 취급으로 인해 사고 위험이 상존하고 있는 실정에도 불구하고, 소화안전장치나 불꽃 감시 장치, 자동 퍼지 제어기능 등 적절한 안전기준이 마련되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 가열로 및 건조로의 안전장치를 선정하고 안전장치 설치유무에 따른 위험도를 정량적으로 분석하고 위험확률을 줄일 수 있는 개선방안을 제시하였다.

1.2. 국내외 기준조사

국내기준에 따르면, 가열로·건조로 등 대규모 LPG 사용시설에 사용되는 연소기는 액화석유가스의 안전관리 및 사업법 시행규칙 별표 4와 별표 7에 따라 「허가대상 가스용품 범위」에서 제외되어있다. 이에 따라 가열로·건조로는 제작 후 안전기준 검사없이 공장에 바로 설치되어 사용함에 따라 대부분의 가열로·건조로 안전장치의 설치가 미흡한 실정이다.

국외의 안전기준의 조사에 살펴보면, 미국의 NFPA 86(Standard for ovens and furnaces : 2011) 코드에는 불꽃감시장치를 의무설치하고, 연소안전장치, 제어장치를 부착하도록 되어있다[7]. 그 외에도 필요 시에는 연소 보호 장치 및 연소 안전 회로 등의 설치를 권장하고 있다. UL 795(Commercial-Industrial Gas Heating Equipment : 2014)에서는 안전제어장치와 화염감시장치를 모든 가스식 가열로의 버너에 설치하도록 규정되어있다[8].

II. 연구방법

본 논문에서는 LPG 가열로·건조로의 안전장치 설치 유무를 비교하고 그에 따른 사고 빈도분석 방법 및 결과를 제시하고자 한다. 본 연구에서는 아래 Figure 1에 따라 위험도 분석을 진행하였다.

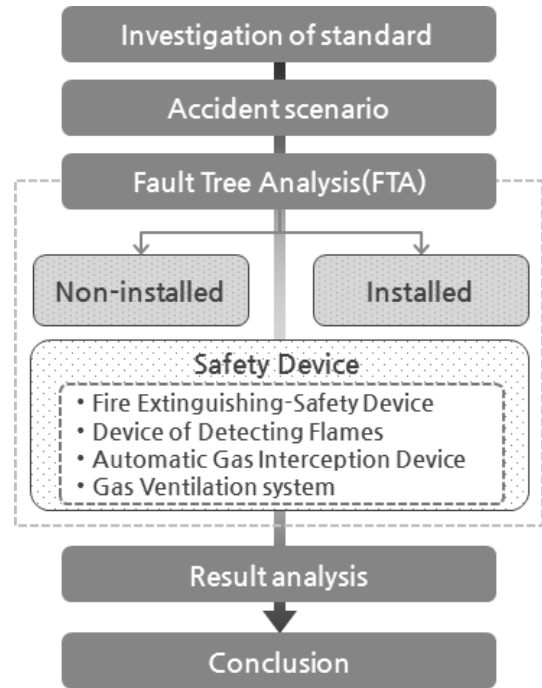


Fig. 1. Study procedure.

2.1. 접근방법

각 장치 및 사상들의 정량적인 위험도 분석인 FTA(Fault Tree Analysis) 기법을 적용해 보고자 한다[1,2]. FTA는 공정의 위험 및 신뢰도를 분석할 수 있는 방법 중 연역적 분석의 대표적인 방법으로 대상 설비의 예기치 못한 사건(정상사상, Top-event)을 결정하고 시스템의 환경과 작업의 상황하에서 설비를 분석하여 예기치 못한 사건이 일어날 수 있는 모든 가능한 방법들을 Gate-by-Gate 방식의 방법으로 발견하는 분석기법이다[3]. 본 연구에서는 가열로·건조로 설비에 대해 FTA를 수행하여 안전장치 부착에 따른 사고빈도 감소효과를 정량적으로 분석하였다.

2.2. 시나리오 선정 및 FTA 구성

가열로·건조로관련 사고에서 가장 큰 부분을 차지하는 것은 가스누출로 인한 사고발생이다. 따라서, 본 연구에서는 가스누출이 지속적으로 진행된다면 가스의 폭발 하한까지 체류하는 시나리오로 선정하였으며, 그것을 정상사상(Top-event)으로 하였다. 그리고 아래의 Figure 3과 같이 정상사상에 따른 장치고장 및 기타 원인들을 기본사상(Basic-event)으로

LPG 가열로 및 건조로의 안전장치 설치에 따른 사고빈도에 관한 연구

구성하였다. 또한, Figure 2에는 Minimal Cut-set과 4개의 안전장치를 부착하였을 경우의 정상사상 발

생빈도수 3.23×10^{-12} 을 나타내었다.

안전장치의 선정은 연소기부분의 국내관련 기준의 안전장치와 국외의 안전장치를 분석하여 국내 가열로·건조로 형태에 맞는 4가지의 안전장치를 선정하였다.

# Of MCS	사상	값
MCS1	AFLMKJN	2.9568E-14
MCS2	AHILMKJN	1.77408E-...
MCS3	AGLMKJN	1.77408E-...
MCS4	BFLMKJN	2.9568E-12
MCS5	BHILMKJN	1.77408E-...
MCS6	BGLMKJN	1.77408E-...
MCS7	CFLMKJN	2.9568E-14
MCS8	CHILMKJN	1.77408E-...
MCS9	CGLMKJN	1.77408E-...
MCS10	DFLMKJN	2.9568E-15
MCS11	DHILMKJN	1.77408E-...
MCS12	DGLMKJN	1.77408E-...
MCS13	EFLMKJN	2.9568E-14
MCS14	EHILMKJN	1.77408E-...
MCS15	EGLMKJN	1.77408E-...

MCS결과수식: A*F*L*M*K*J*N
 정상사상: 3.231551355648E-12

Fig. 2. Minimal Cut-Set and accident frequency.

2.3. 기본사건 데이터

국내 기준 설치된 가열로·건조로내에 일반적인 시설형태를 고려하여 가스누출 시나리오를 유발할 수 있는 14개의 기본사건으로 구성하였다. 그리고 FTA의 기본사건의 장치고장율과 인적오류를 데이터를 수집하였다. 장치의 고장율 자료는 OREDA (Offshore Reliability Data)를 사용하였으며, 이진한 등 “LPG충전소 안전장치의 사고방지 효과에 대한 정략적 분석”에 관한 연구에서 나타난 자료들을 참조하였다[4],[5].

OREDA 2009의 경우 Topside Equipment와 Sub-sea Equipment로 분류하고 있으며, 각 시스템에는 대표적인 장비들로 분류하고 있다. 본 연구의 대상인

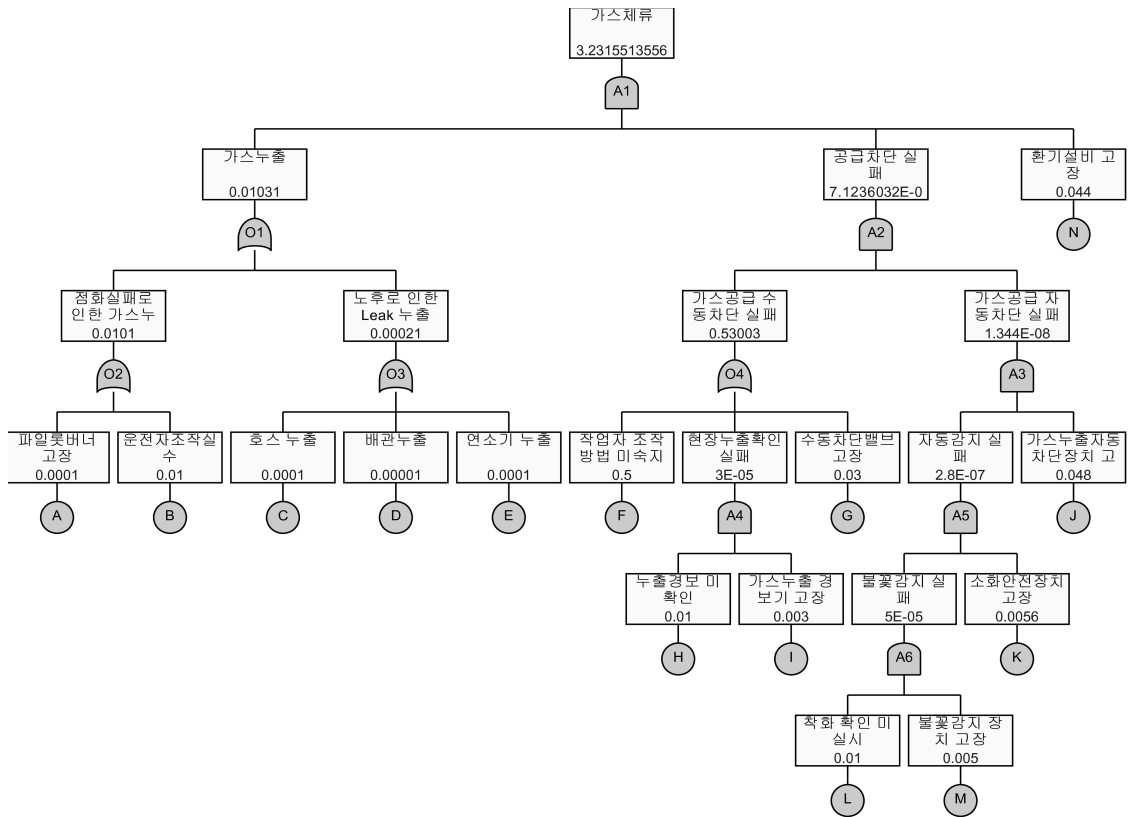


Fig. 3. Fault Tree diagram about gas residence of heating & drying furnace.

가열로 · 건조로의 안전장치들은 Topside Equipment에서 분류하고 있다. 또한, OREDA는 장비가 정상 가동중인 경우에 일정 고장율을 제시하고 있다. 본 연구에서도 가열로 · 건조로의 안전장치의 고장율

이 일정하다는 가정을 적용하여 해석하였다.

Table 1에는 FTA에 사용된 기본사건의 확률을 요약하여 나타내었다. 그리고 빈도 값은 1년의 발생 빈도로 환산하여 동일한 기준값으로 표기하였다.

Table 1. Summary of basic event

Event	Basic event description	Frequency / Probability		Reference
A	Failure to pilot-burner	F	0.0001	Generic Data
B	Operation mistake	P	0.01	Human error
C	Leak of hose	F	0.0001	NUREG
D	Leak of pipe	F	0.00001	Generic Data
E	Leak of burner	F	0.0001	Generic Data
F	Inadequate operational knowledge of users	P	0.5	NUREG
G	Failure to manual valve	F	0.03	OREDA
H	Inadequate checking leak alarm	F	0.01	NUREG
I	Failure to gas leak alarm system	F	0.003	OREDA
J	Failure automatic gas interception device	F	0.048	OREDA
K	Failure to fire extinguishing-safety device	F	0.0056	OREDA
L	Failure to check ignition	P	0.01	Human error
M	Failure to device of detecting flames	F	0.005	OREDA
N	Failure to gas ventilation system	F	0.044	OREDA

Table 2. Frequency of attachment or not safety device of heating and drying furnace

Senario	Attachment or not safety device of heating and drying furnace				Frequency
	Device of detecting flames	Fire extinguishing-safety device	Automatic gas interception device	Gas ventilation system	
1	○	○	○	○	3.23×10^{-12}
2	○	×	×	×	2.73×10^{-07}
3	×	○	×	×	3.06×10^{-07}
4	×	×	○	×	2.62×10^{-06}
5	×	×	×	○	2.40×10^{-06}
6	×	○	○	○	6.46×10^{-10}
7	○	×	○	○	5.77×10^{-10}
8	○	○	×	○	6.73×10^{-11}
9	○	○	○	×	7.34×10^{-11}
10	×	×	×	×	5.46×10^{-05}

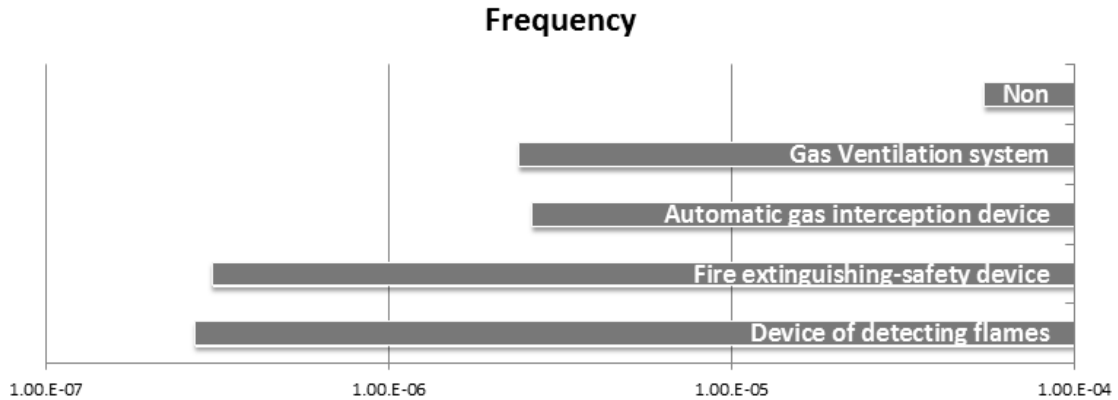


Fig. 4. Graph of frequency by safety device.

III. 분석결과

FTA 분석 후 각 안전장치의 설치여부에 따른 발생빈도를 계산하였다. 본 분석 단계에서 도출된 사고시나리오를 바탕으로 LPG가스 사고 빈도를 분석한 결과, 가열로·건조로 설비에서 4개의 안전장치를 설치하였을 경우 사고빈도는 $3.23 \times 10^{-12}/\text{yr}$ 로 나타났다. 반면에 안전장치 설치를 하지 않았을 경우에는 사고빈도가 $5.46 \times 10^{05}/\text{yr}$ 로 약 100만 배 정도 감소하는 효과가 있었다. 각각의 단일 안전장치 설치에 따른 빈도분석을 볼 때, 불꽃 감지장치만 설치하였을 경우 2.73×10^{-07} 로 사고빈도가 가장 낮았으며, 다음으로 소화안전장치가 3.06×10^{-07} 로 나타났다. 환기설비, 가스누출자동차단기는 각각 2.40×10^{-06} , 2.62×10^{-06} 로 나타났다.

3.1. 불꽃감지장치

불꽃감지장치는 연소기(파일롯 버너)의 작동시 착화여부를 알려주는 장치로서, 연소기의 불꽃이 감지되면 정상 작동하는 것으로 판단한다. 만약 착화가 되지 않았는데 오작동하게 되고 작업자는 착화되지 않은 상태에서 가스가 지속적으로 누출하게 된다. 가열로·건조로 설비에 안전장치를 설치하지 않을 경우의 사고빈도는 5.46×10^{05} 으로 불꽃감지장치만 설치된 설비의 경우(2.73×10^{-07})보다 약 200배 감소하는 효과가 발생하였다.

3.2. 소화안전장치

소화안전장치는 점화시와 재점화시의 비점화, 소화, 불어서 꺼짐 등에 의하여 생기는 생가스의 유출을 방지하는 안전장치이다. 검지부에는 열전대(써머커플), 플레임로드 등이 이용되고 있다. 가열로·건

조로 설비에 안전장치를 설치하지 않을 경우의 사고빈도는 5.46×10^{05} 으로 소화안전장치만 설치된 설비의 경우(3.06×10^{-07})보다 약 179배 감소하는 효과가 발생하였다.

3.3. 가스누출 자동차단기

가스누출 자동차단기는 가스가 누출되면 자동으로 감지하고 가스를 차단하는 장치로 감지부, 제어부, 차단부로 구성되어 있다. 가열로·건조로 설비에 안전장치를 설치하지 않을 경우의 사고빈도는 5.46×10^{05} 으로 가스누출 자동차단기만 설치된 설비의 경우(2.62×10^{-06})보다 약 21배 감소하는 효과가 발생하였다.

3.4. 환기설비

환기설비는 가스 누출시 가스가 체류하지 못하고 폭발 하한값 이하로 조성되도록 하는 환기 설비이다. 가열로·건조로 설비에 안전장치를 설치하지 않을 경우의 사고빈도는 5.46×10^{05} 으로 환기설비만 설치된 경우(2.40×10^{-06})보다 약 23배 감소하는 효과가 발생하였다.

영국을 포함한 유럽의 경우 위험관리는 사회적 위험분석(Social Risk Analysis)방법을 통해 허용 가능한 위험수준인 $1.0 \times 10^{-06}/\text{yr}$ 이하에 이르지 못하면 설치를 허락하지 않고 있다. 이에 요구조건을 만족하는 장치는 불꽃감지장치와 소화안전장치로 가열로·건조로에 안전장치로 단독으로 설치가 가능하다[6].

IV. 결론

본 연구에서는 국내 가열로·건조로의 안전장치

유무에 따른 위험변화를 평가하기 위하여 FTA (Fault Tree Analysis)를 통하여 가열로 · 건조로의 사고발생 빈도분석을 실시하였다. 국내 LPG 가열로 · 건조로에 안전장치가 없는 경우에는 가스누출 및 체류에 대한 사고빈도가 5.46×10^{05} 으로 분석되었다. 이에 따라 가열로 · 건조로의 사고빈도 감소를 위한 안전장치로 불꽃감지장치, 소화안전장치, 가스누출 자동차단기, 환기설비를 안전장치로 선정하였다. 그 중 불꽃감지장치와 소화안전장치가 허용 가능한 위험수준인 $1.0 \times 10^{06}/\text{yr}$ 이하의 조건에 만족함에 따라 가열로 · 건조로 설비에 안전장치로서 불꽃감지장치와 소화안전장치의 설치가 적합하다고 판단된다.

국내 가열로 · 건조로의 가스누출 사고를 예방하기 위하여 최소한의 안전장치에 관한 국내 기준이 마련되어야 하고, 본 연구는 이에 필요한 기초자료로 활용이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발사업의 LPG 사용시설 안전기준 현장 실증 연구(2013202050 0050)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

REFERENCES

[1] M. Bosman, "Availability Analysis of a Natural

Gas Compressor Plant", Reliability Engineering, Vol. 11, P. 13~26 (1985)

- [2] Yijing Ren, Laibin Zhang, Yingchun Ye, Wei Liang, Hedeng Yang, "Reliability assessment of anti-surge control system in centrifugal compressor," Fourth International Conference on Computational and Information Sciences (2012)
- [3] Yong-shik Han, Tae-hoon Kim, Myung-bae Kim, Byung-il Choi, "The study on the lifetime estimation using Fault Tree Analysis in design process of LNG compressor", The Korean Society of Mechanical Engineers, P. 2330~2335 (2013)
- [4] OREDA, "Offshore Reliability Data Handbook. 5th edition", DNV Technica (2009)
- [5] Jin-han Lee, Kwang-soo Yu, Kyo-shik Park, "Availability Analysis of Safety Devices installed for Preventing Accidental Events in the LPG Refuelling Station", KIGAS, Vol. 10, No. 1, P. 26-31 (2006)
- [6] Jin-han Lee, Kwang-soo Yu, Kyo-shik Park, "Risk Variations on the Capabilities of Safety Devices in the LPG Refuelling Stations", The Korea Society for Energy Engineering, P. 117~123 (2005)
- [7] NFPA 86 : Standard for ovens and furnaces (2011)
- [8] UL 795 : Commercial-Industrial Gas Heating Equipment (2014)