

# 수소 충전소에 대한 정량적 안전성 평가

성대현 · 이광원\* · 김태훈\* · 오동석\* · 오영달\* · 서두현\* · 김영규\*\* · 김은정\*\*

바텍안전 · \*호서대학교 안전공학과 · \*\*한국가스안전공사

(2009. 6. 26. 접수 / 2012. 6. 14. 채택)

## Quantitative Safety Assessment for Hydrogen Station

D.H. Seong · K.W. Rhie\* · T.H. Kim\* · D.S. Oh\* · Y.D. Oh\* · D.H. Seo\* · Y.G. Kim\*\* · E.J. Kim\*\*

Bartec E&C · \*Department of Safety Engineering, Hoseo University

\*\*Korea Gas Safety Corporation

(Received June 26, 2009 / Accepted June 14, 2012)

**Abstract :** This study is about the quantitative safety assessment of hydrogen station in Korea operating with on-site type. This was written by background information that before qualitative safety assessment to write. For the qualitative safety assessment method, the study used FMEA(failure mode & effect analysis) and HAZOP(hazard & operability), and adopted the FTA(fault tree analysis) as the quantitative safety assessment method. To write the FTA, we wrote FT by Top event that hydrogen leakage can be called most serious accident of hydrogen station. Each base event collect reliability data by reliability data handbook, THERP-HRA and estimation of the engineering. Assessment looked at the high frequency and the possible risk through Gate, Importance, m.cutsets analysis.

**Key Words :** hydrogen, station, quantitative, analysis, fault tree analysis, FTA

### 1. 서론

수소 에너지는 지구 환경 오염문제와 에너지 자원의 고갈을 동시에 해결할 수 있는 신·재생에너지로 적은 양으로 고효율을 낼 수 있는 이상적인 에너지이며, 다가올 미래시대에 널리 사용될 에너지로 전망되고 있다. 이러한 이유로 수소경제시대의 도래가 예고되고 있으며 필수 요소 중 원활한 공급과 운송을 담당하는 수소 인프라 구축이 중요시 되며 그 중심에는 수소 충전소가 있다. 국내에는 수소 제조설비를 포함하여 압축·저장, 충전이 가능한 on-site 방식 4개소와 생산된 수소를 운송하여 저장, 충전만 가능한 off-site 방식 2개소로 총 6개소의 수소 충전소가 건립되어 시험 운행 중에 있다. 건립된 충전소는 수소 폭발 특성상 중대 사고로 이어질 가능성이 있어 안전 확보가 우선시 되어야 하지만 안전성 평가가 수행되어 있지 않고, 또한, 충전소에 관한 법규 및 규격이 아직 미비한 실정이다. 이와 같은 이유로 수소 충전소에 대한 안전 확보를 위해 안전성 평가가 시행 되어 법규 및 규격을 제정할 수

있는 근간을 마련해야 한다.

본 연구에서는 국내 on-site 방식의 수소 충전소를 대상으로 FTA(Fault Tree Analysis)기법을 사용하여 정량적 안전성 평가를 하였다. 본 평가를 위해 국내 수소 충전소에 대한 정성적 안전성평가인 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)와 HAZOP(Hazard and Operability)이 선행되었으며<sup>1)</sup> 이를 바탕으로 수소 충전소의 가장 큰 사고라 할 수 있는 수소 누출사건을 Top event로 선정하여 FTA분석을 하였다.

### 2. 수소 충전소 개요

Fig. 1은 수소 충전소의 PFD(Process Flow Diagram)로 이 설비는 크게 수소 제조, 압축, 저장, 충전부로 나눌 수 있다. 공정흐름은 원료공급 시스템으로부터 공급된 원료를 탈황기에서 원료에 섞인 황이 제거되고 개질기에서 고온의 수증기와 반응하여 수증기개질을 통한 수소 가스가 생성된다. 생성된 수소 가스는 Shift-reactor를 거쳐 Separator로 공급되고 기체와 액체로 분리되어 액체는 피드백 되고 기체는 PSA(Pressure Swing Adsorption)로 흐른다.

\* To whom correspondence should be addressed.  
kwrhie@hoseo.edu

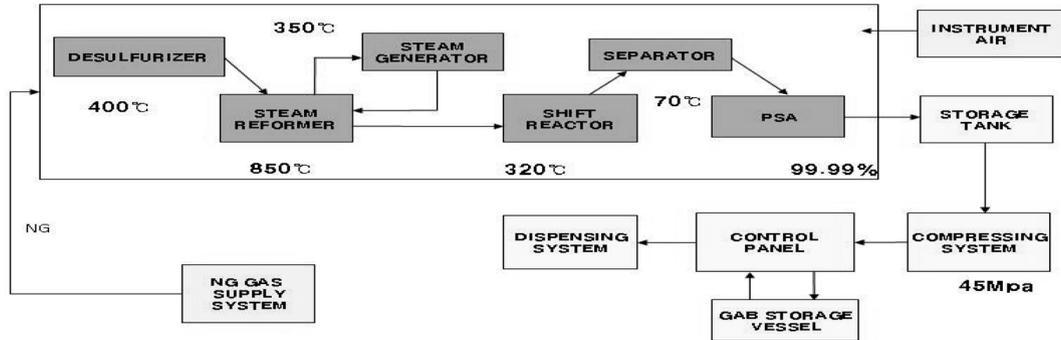


Fig. 1. PFD of a hydrogen station.

PSA에서는 가스에 포함된 불순물을 제거하여 99.99%의 고순도 수소가스를 생성한다.

제조를 마친 가스는 압축 공정을 통해 고·중·저 압으로 압축되어 control panel의 제어에 저장되거나 필요에 따라 차량 및 연료전지에 충전공급 된다.

### 3. 안전성 평가

선행연구로 수소 충전소에 대한 FMEA와 HAZOP을 실시하여 발생 가능성 있는 모든 위험 요소를 도출한 바 있다<sup>1)</sup>.

도출된 위험 요소 가운데 수소 충전소에서 발생할 수 있는 사고 중 가장 중대한 사고는 수소 가스의 누출과 그로 인한 화재 및 폭발사고라 할 수 있다. 이에 따라 선행된 FMEA결과를 살펴보면 수소 누출이 발생하는 고장모드로는 수소 취성, 부품 결함, 체결 불량, 크랙 등이 있으며 Table 1과 같다<sup>1)</sup>.

이에 본 연구에서는 FTA분석을 위해 Top event를 가장 중대한 사고인 수소 가스의 누출로 선정하여

외적요인과 내적요인으로 나누고 각 공정 중의 누출과 부품의 누출로 나누어 FT를 작성하였다.

#### 3.1. FT(Fault Tree) 작성

본 연구에서는 수소 충전소의 대규모 누출사고를 Top event로 하여 FT를 작성하였고 누출사고를 크게 외적요인과 내적요인으로 나누었다.

내적 요인은 공정에 따라 크게 제조부 누출, 압축·저장부 누출, 충전부 누출로 나누었고 각각 부품에 대해 자체의 결함으로 인한 누출과 운전 중에 발생하는 누출로 나눌 수 있다.

또한, 나누어진 각각의 사상을 세분화하여 AND GATE와 OR GATE로 구분하여 논리적으로 연결하였으며 공정상에 일어날 수 있는 사건을 나열하여 FT를 작성하였다. Fig. 2와 3은 작성된 FT의 일부 분이다.

외적 요인은 기타사고, 자연재해, 사보타지(Sabotage)로 나눌 수 있으며, 사보타지는 고의에 의한

Table 1. Failure mode of hydrogen external leakage

Components	Failure mode
2 stage compressor, Storage Tank, Exchanger	breakdown of connection part, unfasten to nut by vibration, external impact
Reformer, Shift Reactor, separator	breakdown by corrosion, external impact, over reaction, furnace breakdown by fail to temperature control
PSA, Product gas Buffer Vessel	external leakage of components, fail to pressure control, corrosion by hydrogen embrittlement, external impact
Drain Valve	open to valve, external impact, crack
Needle Valve, Check Valve, Solenoid Valve, Manual Valve, PI, Filter	breakdown, fracture by embrittlement, unfasten to nut by vibration, external impact, critical pressure exceed
Pressure safety Valve, Relief Valve	aging, corrosion by hydrogen embrittlement, wrong operation, fail to open & close
Breakaway	fail to operation, aging, corrosion by hydrogen embrittlement
Nozzle	breakdown, defect of valve, external impact, fail to connect
Automatic Valve	fail to close, setting error, breakdown, fracture by embrittlement, critical pressure exceed

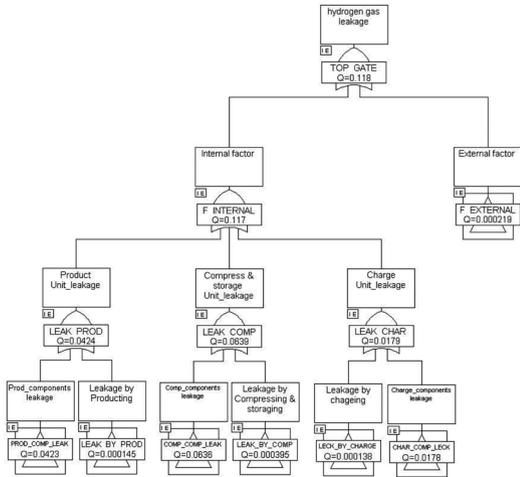


Fig. 2. Fault tree of hydrogen leakage.

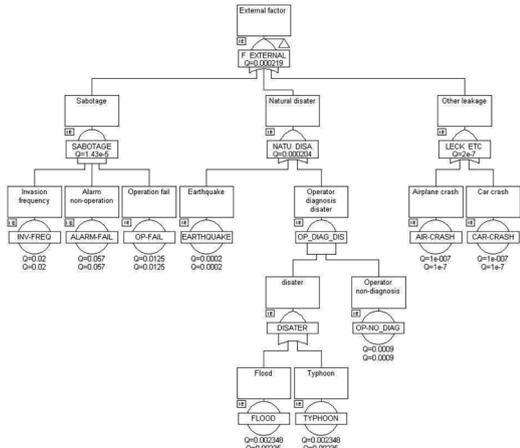


Fig. 3. Fault tree of hydrogen leakage - external factor.

누출사고로서 침입자의 침입빈도와 경보기 미작동, 근무원의 초기 진압실패 등을 고려하였다. 기타 사고는 항공기의 추락으로 인한 파손이나 차량 충돌 등을 가정하였으며, 자연재해는 지진이나 홍수, 태풍을 의미하며, 홍수나 태풍의 경우에는 운전자가 예보를 통해 인지하고 조치할 수 있다고 판단되어 운전원 미인지와 함께 동시에 일어나는 경우로 작성하였다.

다음 Fig. 4는 충전중에 발생하는 누출에 대한 FT이다.

3.2. 기초사건의 정의

FT를 토대로 기초사건의 정의를 위해서 “Process-equipment reliability data”<sup>33)</sup>, “European industry reliability data bank”<sup>34)</sup>, “Offshore reliability data hands

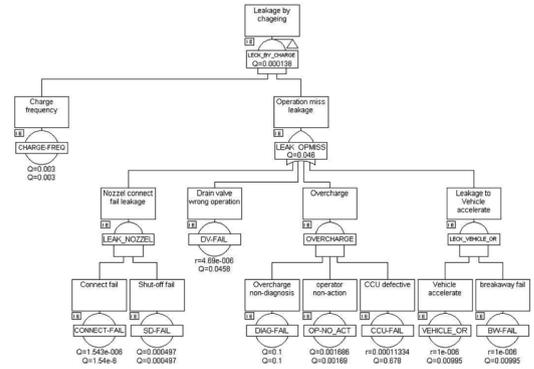


Fig. 4. Fault tree of hydrogen leak-internal factor (dispensing).

book”<sup>35)</sup>의 일반 신뢰도 데이터를 수집하여 사용하였으며 데이터가 없는 경우 전문가의 의견을 토대로 공학적인 판단하에 신뢰도 데이터를 구하였다. 신뢰도에 사용된 고장률 계산식은 아래와 같다.

$$\lambda = \frac{\text{Number of failures}}{\text{Aggregated time in service}} = \frac{n}{\tau}$$

인간오류에 해당되는 기초 사건으로 HRA기법 중 THERP기법을 사용하여 신뢰도 데이터를 구하였다. Fig. 5는 운전원에 의한 체결 불량에 대하여 평가한 도식의 샘플이다.

이와 같이 기초사건의 신뢰도 데이터를 구하였으며 Table 2는 본 평가에 사용된 기초사건을 정리한 표이다.

3.3. FTA 분석 결과

수소 충전소에서 위험이 가장 큰 사건인 수소 누출을 Top event로 선정하고 FT를 작성, 기초 사건의 신뢰도 데이터를 입력하여 분석하였다. 그 결과 Table 3에서 보는 바와 같이 정상사상의 누출빈도는 약 10년에 1.46회 정도로 6.8년에 1회 발생한다고 볼 수 있으며, 수소 충전소 시스템의 비가동도는 0.118로

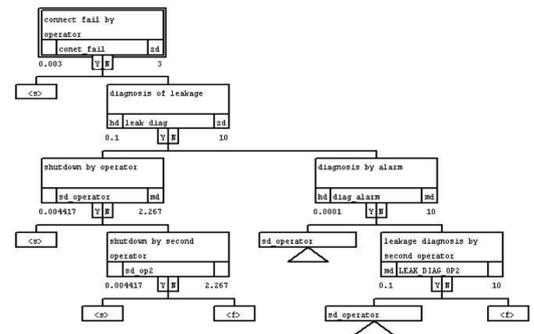


Fig. 5. THERP-Fail to connect by operator.

Table 2. Basic event of hydrogen leakage

Reference	Basic event	
book Hand	leakage components	separator leakage PI leakage XV leakage PSV leakage Gas buffer vessel leakage CV leakage SV leakage PRV leakage HV leakage pipe leakage heat exchanger leakage filter leakage storage Tank leakage
	leakage operating	gas detector leakage TE defective BE defective DV wrong operation PSA vessel leakage CRV defective vent valve wrong operation PI defective PSV non-operation CCU defective drain Valve wrong operation
Decision Engineering	factor Internal	operator absent product time compressing time charge frequency vehicle accelerate breakaway
	factor External	invasion frequency alarm non-operation operation fail earthquake typhoon flood airplane crash car crash
HRA		operator no action shut-off fail connect fail overcharge non-diagnosis operator non-diagnosis setting error

Table 3. Summary-result of FTA

Parameter	Point Value
Unavailability (Q)	0.118
Failure Frequency (w)	1.46 E-5 per hr
Unreliability	0.117

나타났고, 1년간 기대 고장 수는 0.117이다.

Fig. 6은 Top event의 Top gate의 논리적 연결에 대하여 Importance 계산에 의한 결과 값이다. Importance 계산결과, 가장 값이 높은 것은 알람의 고장과 ESV의 고장, 운전원의 부재 순으로 나타났다. 이는 수소 가스 누출 발생 시, 충전소의 운전 중단과 관련된 요인들이 가장 중요하다는 것을 의미한다

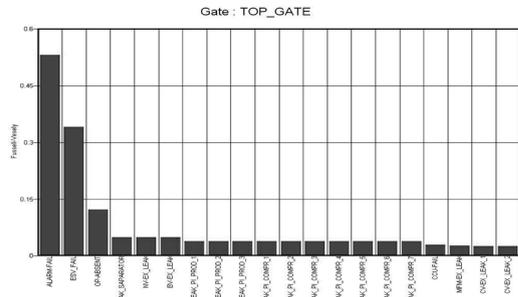


Fig. 6. The result of fussler – vesely importance analysis.

고 할 수 있다.

Top event의 비가동도는 1.175E-01로 나타났으

Table 4. Results of gate analysis of each event

Name	Unavailability	Failure Frequency (per hr)	Number Of Expected Failures	Total Down Time(hrs)	NO. of Cut Sets
TOP_EVENT	1.1750E-01	1.4598E-05	1.1725E-01	5.3439E+02	243
F_INTERNAL	1.1731E-01	1.4601E-05	1.1727E-01	5.3232E+02	237
F_EXTERNAL	2.1867E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	2.1867E+00	6
CHAR_COMP_LECK	1.7772E-02	3.1989E-06	1.7756E-02	6.2730E+01	14
LECK_BY_CHARGE	1.3806E-04	1.3503E-08	1.3809E-04	6.9551E-01	4
SDFAIL_BY_ESV	3.2368E-02	2.8810E-06	3.2375E-02	1.6882E+02	2
LECK_CHAR_CO-PI	4.4967E-01	3.2868E-05	4.4978E-01	2.4689E+03	7
SABOTAGE	1.4250E-05	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4250E-01	1
NATU_DISA	2.0423E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	2.0423E+00	3
LECK_ETC	2.0000E-07	0.0000E+00	0.0000E+00	2.0000E-03	2
LEAK_OPMISS	4.6021E-02	4.4988E-06	4.6021E-02	2.3184E+02	4
LEAK_CHAR	1.7907E-02	3.2117E-06	1.7892E-02	6.3419E+01	18
LEAK_PROD	4.2409E-02	5.2161E-06	4.2406E-02	1.9527E+02	122
LEAK_COMP	6.3922E-02	7.7606E-06	6.3914E-02	2.9555E+02	111
PROD_COMP_LEAK	4.2260E-02	5.2021E-06	4.2256E-02	1.9451E+02	104

며, 내적 요인에 의한 비가동도는 1.1731E-1, 외적 요인에 의한 비가동도는 2.1867E-04로 내적 요인에 의한 영향이 외적 요인보다 큰 것으로 나타났다. 각 사상별 비가동도와 발생빈도, 기대 고장수, 총 예상 고장시간, 그리고 사상별 cut sets의 수는

Table 4와 같다.

본 FT의 cutsets은 243개이며 이 중 m. cutsets은 181개가 산출되었다. 다음 Table 5는 비가동도가 높은 순 20개의 m. cutsets에 대한 비가동도와 고장빈도 값이다.

Table 5. Results of m. cutsets analysis

no	cut set	Unavailability	Frequency
1	ESV_FAIL. BV-EX_LEAK	4.8317E-03	9.1162E-07
2	ESV_FAIL. NV-EX_LEAK	4.8317E-03	9.1162E-07
3	ALARM-FAIL. LEAK_SAPARATOR	3.8110E-03	3.6807E-07
4	ALARM-FAIL. LEAK_PI_PROD_1	2.9423E-03	2.8651E-07
5	ALARM-FAIL. LEAK_PI_COMPR_1	2.9423E-03	2.8651E-07
6	ESV_FAIL. MFM-EX_LEAK	2.6674E-03	5.1570E-07
7	ALARM-FAIL. CV-EX_LEAK_1	1.9990E-03	1.9635E-07
8	ESV_FAIL. LEAK_SAPARATOR	1.7225E-03	3.3636E-07
9	ALARM-FAIL. SV-EX_LEAK_1	1.6182E-03	1.5950E-07
10	ESV_FAIL. LEAK_PI_PROD_1	1.3299E-03	2.6075E-07
11	ESV_FAIL. LEAK_PI_COMPR_1	1.3299E-03	2.6075E-07
12	OP-ABSENT. CCU-FAIL. NV-EX_LEAK	1.2717E-03	1.8285E-07
13	OP-ABSENT. CCU-FAIL. BV-EX_LEAK	1.2717E-03	1.8285E-07
14	ESV_FAIL. CV-EX_LEAK_1	9.0349E-04	1.7792E-07
15	ALARM-FAIL. LEAK_XV_1	7.8120E-04	7.7582E-08
16	ESV_FAIL. SV-EX_LEAK_1	7.3137E-04	1.4428E-07
17	OP-ABSENT. CCU-FAIL. MFM-EX_LEAK	7.0206E-04	1.0422E-07
18	ALARM-FAIL. LEAK_EXCHANGER	6.7991E-04	6.7584E-08
19	OP-ABSENT. LEAK_SAPARATOR	6.6860E-04	6.4573E-08
20	ALARM-FAIL. LEAK_PSV_1	6.5175E-04	6.4800E-08

Table 5에서 수소 가스의 누출 경로를 보면 ESV의 고장과 Ball valve의 누출, ESV의 고장과 Needle valve의 누출이 가장 높게 나타났고 다음으로 알람 고장과 함께 separator 또는 PI의 고장으로 나타난다. 이로 하여 주경로에 ESV의 고장 또는 알람의 고장이 포함되어 있는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수소의 상용화를 이루기 위하여 가장 핵심이 되는 수소 충전소의 안전성 확보를 위해 국내 수소 충전소를 대상으로 선행된 FMEA와 HAZOP를 바탕으로 정량적 안전성 평가인 FTA를 실시하였다.

수소 충전소에서 가장 위험한 사건인 수소 누출을 Top Event로 선정하여 FT를 작성하였으며 수소 가스 누출에 대하여 외적 요인과 내적 요인으로 구분하였다.

도출된 각 기초사건들의 신뢰도 데이터는 문헌에서 수집하였고 인간 실수 부분에 대하여는 THERP 인간실수 분석기법으로 도출하였다.

Gate, Importance, m.cutsets analysis 등으로 분석하였으며 각 gate와 기초사건별 Importance값 산출, 누출의 빈도와 비가동도 등을 계산하였다. 수소 누출에 대하여 가장 높은 결과 값으로 나타난 것은 알람의 고장과 ESV의 고장으로 나타났으며 이는 충전소의 비상시 운전을 중단하기 위한 요소들이 가장 중요하다는 것을 시사한다. 또한, ESV의 고장과 Ball valve의 누출, ESV의 고장과 Needle valve의 누출의 경로로 인한 수소 누출 사건이 가장 높은 발생 확률을 가지는 것으로 나타났다.

본 연구를 진행함에 있어 기초 사상에 대한 신뢰도 데이터 산정에 어려움이 있었으며 이러한 문제점을 해결하기 위해 수소 충전소에 대한 운전 데이터 확보가 필요할 것이다.

또한, ETA(Event Tree Analysis)기법을 이용한 분석 및 민감도 분석을 통한 각 부품의 운전원 등의 요구 신뢰도 목표설정 등이 향후 연구 되어야할 것이다.

**감사의 글:** 본 연구는 지식경제부의 수소·연료전지사업단 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 1) 이광원 등 “국내 수소 충전소의 안전성 평가”, 한국가스학회, 08 추계학술발표회, pp. 9~14, 2008.
- 2) 이광원 등 “수소 충전소 충전기의 정량적 안전성 평가”, 한국수소 및 신에너지학회논문집, Vol. 17, No. 3, September, 2006.
- 3) Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. “Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables”, 1989
- 4) Henri Procaccia, Spyros P. Arsenis, Patrick Aufort, Prefaceby G.Volta. EIREDA, “European Industry Reliability Data Bank”, 1998
- 5) OREDA, “Offshore Reliability Data Handbook. 4th edition”, DNV Technica, 2002
- 6) A.D. Swain, NUREG/CR-1278, “Handbook of Human-Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications”, 1983