

FTA를 이용한 LNG 하역설비의 정량적 위험성 평가

한정민·오신규·백재진*·이필호*·이광원*

한국가스공사 연구개발원 · *호서대학교 안전공학과

1. 서 론

FTA(Fault Tree Analysis)는 시스템 고장을 발생시키는 사상(event)과 그의 원인과의 인과관계를 논리기호(AND 와 OR)를 사용하여 나뭇가지 모양의 그림으로 나타낸 고장수목(Fault Tree)을 만들고, 이에 의거하여 시스템의 고장확률을 구함으로써 문제가 되는 부분을 찾아내어 시스템의 신뢰성을 개선하는 정량적 고장해석 및 신뢰성 평가 방법이다.

LNG 생산기지는 크게 프로세스설비와 유틸리티설비로 구성된다. 프로세스설비는 LNG의 하역, 저장, 기화와 천연가스의 송출을 담당하며 이러한 기능을 수행하기 위해서는 전기설비, 압축공기설비, 기화용 해수설비, 소화설비 등의 보조설비가 필요하다.

프로세스설비는 다시 하역설비, 저장설비, 증발가스 처리설비, 송출설비, 기화설비, 계량설비로 나뉘며 이 중 하역설비는 LNG 운반선을 접안시설에 정박해 하역설비를 통해 인수기지의 저장탱크로 LNG를 이송하는 기능을 수행한다.

본 연구에서는 FTA를 이용하여 LNG 생산기지 하역설비의 정량적 위험성평가를 수행하였다.

2. 설비 개요

하역지역의 설비는 접안설비와 하역설비로 나뉜다. 접안설비는 LNG 선의 접안에 관련된 기반시설로서 부두, trestle, gang way 등으로 구성된다.

LNG 선으로부터 11,000m³/hr로 하역하고 연료유 등을 선적할 수 있는 하역설비는 크게 하역암과 저장탱크까지의 파이프라인으로 구성되어 있다. 하역암은 LNG 선박과 지상의 파이프라인을 연결시키는 설비로서 3기의 16" LNG암, 1기의 16" NG 암 및 12"의 Bunker C 오일 공급용 암 1기로 구성되어 있다. 이 하역 시스템은 125,000m³의 LNG 선박으로부터 32" 2개 라인을 통하여 저장탱크에 하역된다.

2.1 하역 절차

LNG 선의 접안 후 육상의 하역암과 LNG선을 연결하는 Flanging 작업이 시작된다. 다음으로 선박과 연결된 하역암 내의 산소를 제거하기 위하여 질소가스를 주입하는 Purging 작업과 Trip Test라 불리는, 비상시를 대비한 선박내 펌프 및 밸브 자동조절

시험을 실시한다. 모든 테스트 결과 이상이 없다고 판단되면 하역 전에 하역암을 사전 냉각시키는 과정을 거치며 그 후 선박 내 10 대의 카고 펌프를 순차적으로 가동하여 하역 작업을 시작한다. 카고 펌프를 순차적으로 정지시켜 하역을 마치게 되면 선박 및 육상의 하역 배관 내 잔류 LNG를 배출시킨 후 질소 가스를 주입하여 잔류 천연가스를 제거하게 된다. 육상의 암과 LNG 선을 분리시킴으로써 하역작업은 완료된다.

2.2 안전장치

하역암은 하역조정실의 FMC 조작반과 연결된 휴대용 작동기로 조작하며 휴대용 작동기 고장시에는 FMC 조작반에서 직접 조작할 수 있다. 하역작업 중 암이 작업영역을 벗어났거나 화재발생 등 비상상태 발생시에는 긴급분리 장치인 PERC (Powered Emergency Release Coupler) 작동에 의해 LNG선과 하역암이 분리되도록 되어 있다.

LNG 누출시를 대비하여 부두지역 배관과 각 저장탱크 입구에는 차단밸브가 각각 설치되어 있다. 또한 부두에서 LNG 탱크까지의 하역배관에는 중간 차단 밸브가 있으며 이 밸브는 Trestle line 입구에 설치되어 있다.

3. 고장수목 분석

3.1 시스템의 정의 및 정상사상 결정

가연성 물질인 천연가스를 취급하는 생산설비에서 우려되는 가장 큰 위험은 LNG/NG의 누출이다. 그러므로 본 FT의 정상사상은 LNG/NG의 대규모 누출로 정의하였다. 하역설비에서의 누출은 하역작업 중 발생할 수 있는 누출과 운전 중 일어날 수 있는 누출로 구분된다. 본 분석에서의 하역지역은 선박과 연결되는 하역암으로부터 저장탱크 입구의 차단밸브까지로 정의하였다. 또한 대규모 누출은 직경 4" 이상으로 정의하였다.

3.2 하역라인의 FT 작성

본 연구에서는 하역라인에서의 LNG/NG 대규모 누출을 정상 사상으로 하여 분석하였다. 정상사상은 우선 하역작업의 유무에 의해 정상운전시의 누출과 하역작업시의 누출로 분류하였다.(그림 1 참조) 주요설비에서의 기계적 결함으로 인한 누출과 이들의 수량을 고려하였고, 외부요인으로 자연재해(지진, 홍수, 강풍)와 사보타지 그리고 자동차나 비행기의 추락 등에 의한 설비파손을 고려하였다.(그림 2 참조)

그림 4에는 하역작업이 일어나고 있는 경우의 대규모누출을 분석하여 보여준다. 우선 하역작업의 순서에 따라 flanging작업 시, 하역작업 시, unflanging과 purging 작업 시 그리고 외부요인 등으로 분류하여 대규모누출을 분석하였다. Flanging 작업시의 대규모누출은 flanging 실패 또는 하역암 릴리즈 실패에 의한 대규모누출로 분류하였다. flanging실패는 하역암에 설치된 안전장치인 PERC의 작동실패와 작업자의 플랜지 기계적 결함 확인실패, 그리고 플랜지의 기계적 결함 등 3가지의 사건이 동시에 일어나는

경우에 발생한다. 이때 작업자의 플랜지 기계적 결함 확인실패는 인간신뢰도 분석기법을 사용하여 발생빈도를 계산하였다. 그림 5에는 하역시의 대규모누출을 분석하였다. 이때는 배 안에 있는 10여대의 펌프가 서서히 작동하여 배에 있는 LNG를 지상의 저장탱크로 이송하게 되며, 운전원에 의한 실질적인 작업은 거의 일어나지 않는다. 이 때 고려된 사건들은 파이프와 밸브, 계측장비 및 K.O drum의 rupture 들이다.

드레인시의 대규모누출을 분석한 FT는 그림 6 이다. 드레인 작업은 주로 현장에서 운전원이 밸브를 조작하고 드레인이 끝났음은 중앙통제실의 K.O drum의 액위변화로 확인하게 된다. 이 때 주로 인간실수에 의하여 대규모누출이 일어나므로 인간신뢰도분석기법을 사용하여 발생빈도를 분석하였다.

마지막으로 외적요인은 인위적 재해와 자연재해로 나누었고 다시 인위적 재해는 sabotage, 비행기추락사고, 자동차사고 등을 고려하였다.(그림 6 참조) 또한 자연재해는 해일이나 로프의 절단 등의 비상사태 시 ESD (Emergency Shutdown System)의 미작동으로 인한 대규모누출을 고려하였다.

4. 기초사건들의 설명 및 데이터

FT 분석시 일반적으로 분석 대상 플랜트의 고유데이터를 수집하기 전의 초기 정량화 단계에서는 일반고장데이터를 사용하여 사건추이를 정량화한다. 고유데이터가 수집되고 개발되면 이를 사용하여 사건추이를 재 정량화하게 되며 이때 일반데이터의 영향은 감소하고 생산기지 고유 특성이 반영된다.

| No. | Basic Event Name | Text | Failure rate (/10 ⁶ hours) | Remarks |
|-----|------------------|--|---------------------------------------|---------|
| 1 | HRA_ARM | failure of arm release | 1.68E-3 | HRA |
| 2 | HRA_DRAIN | drain check through K.O. drem level gauge | 3.28E-2 | HRA |
| 3 | HRA_FLANGE | fail to indicate loss of mechanical integrity of arm | 3.2E-2 | HRA |
| 4 | HRA_GASCHECK | gas check by fire station personnel | 3.23E-2 | HRA |
| 5 | HRA_VALVE | valve control failure | 1.68E-2 | HRA |
| 6 | UAFLNGM | loss of mechanical integrity of flange | 3.0E-7 | GRI |
| 7 | UARBM0302AFC | RBM valve fail to open | 5.58E-3 | EIReDA |
| 8 | UARESDF | emergency shutdown failure | 2.88E-9 | CCPS |
| 9 | UARKODRUM | rupture at K.O. drum | 1.09E-8 | CCPS |
| 10 | UARPIPER | failure rate of pipes | 4.42E-7 | CCPS |
| 11 | UARVALVER | failure rate of valves | 1.36E-6 | CCPS |

표 1. List of Basic Events

그러나 위험성평가의 특성상 고유데이터를 수집, 분석하고 일반 데이터와의 베이지안

처리를 이용하여 정량화한 부분은 본 논문에서 제외하기로 하였다. 따라서 본 논문에서 분석한 누출빈도는 대상 플랜트의 고유값이 아닌 일반데이터를 사용한 값으로서 특정 플랜트의 누출빈도값이라고 볼 수 없다. 본 분석에서는 미국 화학학회 CCPS (Center for Chemical Process Safety) 데이터북과 미국 전기전자협회 (IEEE)의 std-500-1984, 유럽 신뢰도데이터뱅크 (European Industry Reliability Data Bank)의 EIReDA 1998 등을 이용하였다. 표 1은 본 분석에 사용된 중요 기초사상을 표로 정리한 것이다.

5. 결과분석 및 고찰

정상사상의 빈도 정량화는 FTA tool인 RiSA를 사용하였다. 누출빈도는 7.383×10^{-4} /year으로 계산되었다. 시스템의 실패에 영향을 미치는 주요 최소단절집합을 살펴보면 표2와 같다. 표에서 보는 바와 같이 정상운전시 밸브에서의 누출이 가장 큰 영향을 주는 것을 관찰할 수 있다. 운전원이 드레인 밸브를 여는 것을 인지하지 못하는 사건과 CR에서 KO drum의 액위관찰을 통한 Drain 농도확인 실패도 20% 정도의 기여도를 갖는다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 정상운전시 밸브 누출에 대한 점검 작업과 하역 작업시 절차에 대한 운전원 교육, 배관의 정기 점검 작업이 요구되는 바이다.

| No | Component | | | Unavailability | % |
|----|-----------|-------------|-------------|----------------|------|
| 1 | UARVALVER | FREQ_OPRT | UARVALVEN | 1.664E-4 | 22.5 |
| 2 | HRA_VALVE | HRA_DRAIN | FREQ_Unload | 1.501E-4 | 20.3 |
| 3 | UARPIPER | FREQ_OPRT | UARPIPEL | 1.287E-4 | 17.4 |
| 4 | UARVALVER | FREQ_Unload | UARVALVEN | 6.208E-5 | 8.4 |

표 2. 빈도분석 결과 - 주요최소단절집합의 기여도

6. 결론

FTA기법을 수행하기 위하여 우선은 LNG하역라인의 설비와 공정을 살펴보고 FT도를 작성한 후에 tool을 사용하여 최소단절집합들과 빈도분석, 중요도 분석 등을 시행하였으며 논문특성상 플랜트 고유데이터가 아닌 일반데이터를 이용하여 빈도값 자체에 대한 의미는 반감되지만 이로부터 몇 가지 개선점 및 주의점과 설비의 특성을 알 수 있었다.

참고문헌

1. CCPS, Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables, USA, 1989.
2. Procaccia, H. and Arsenis S. P. and Aufort, P., European Industry Reliability

Data Bank, EIReDA 1998, 1998.

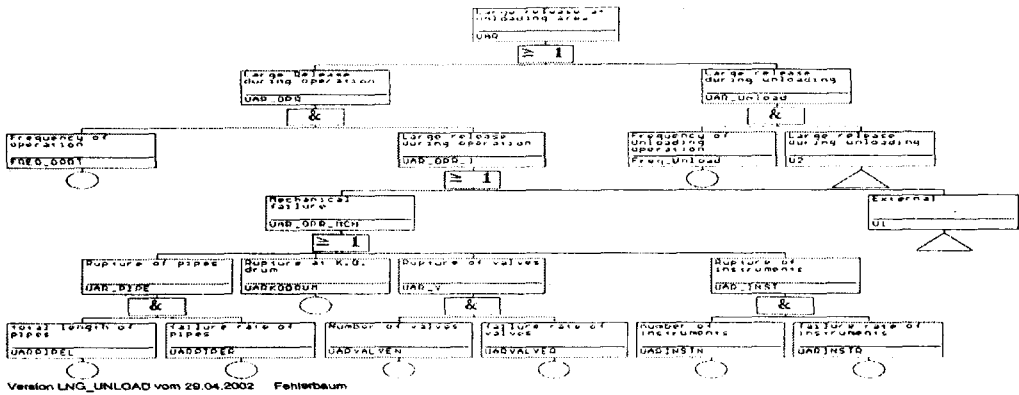


그림 1. 하역지역에서의 대규모 누출 (Top Event)

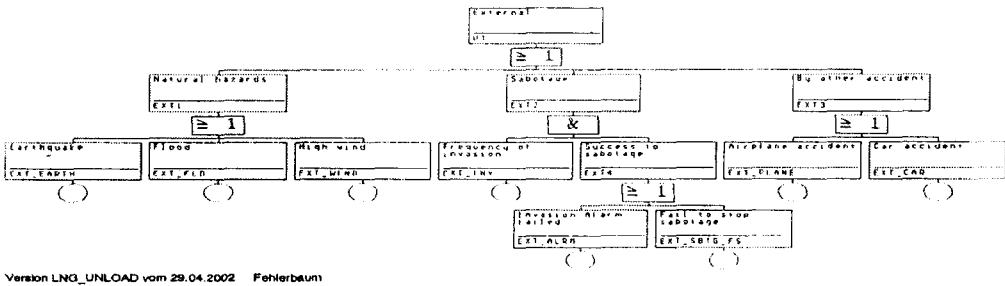
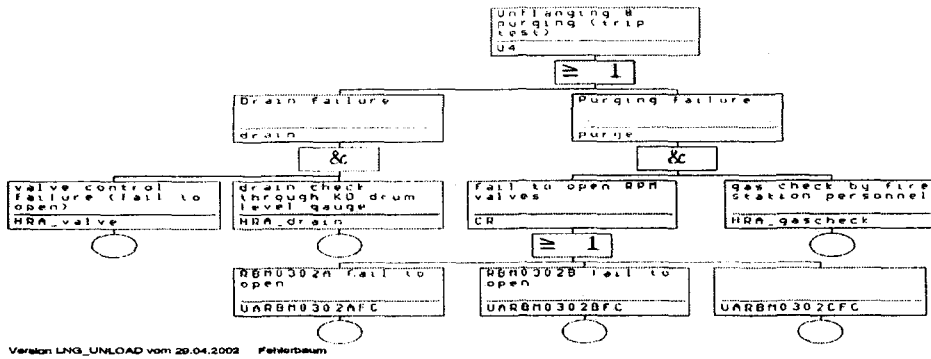
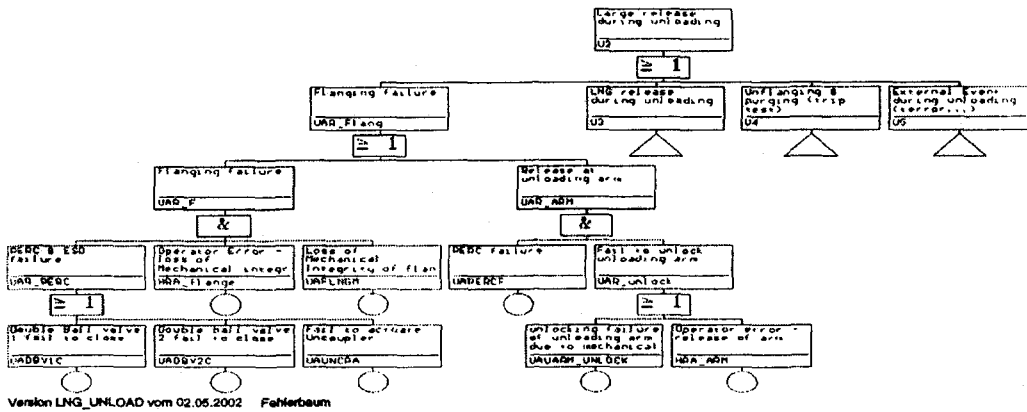


그림 2. 외부사건 (Transfer Gate)



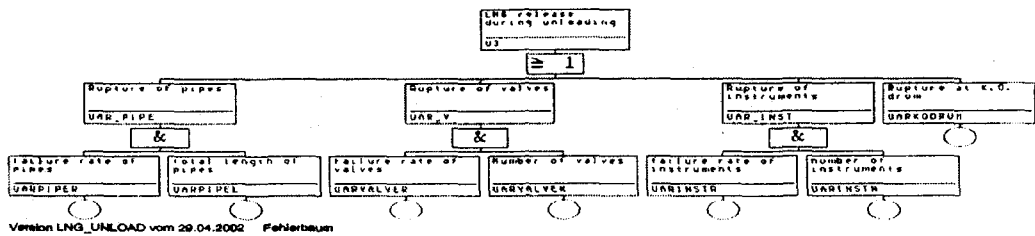
Version LNG_UNLOAD vom 29.04.2002 Fehlerbaum

그림 3. 하역 후 드레인시의 누출 (Transfer Gate)



Version LNG_UNLOAD vom 02.05.2002 Fehlerbaum

그림 4. 하역시의 대규모 누출 (Transfer Gate)



Version LNG_UNLOAD vom 29.04.2002 Fehlerbaum

그림 5. 하역시의 대규모 누출 (계속)

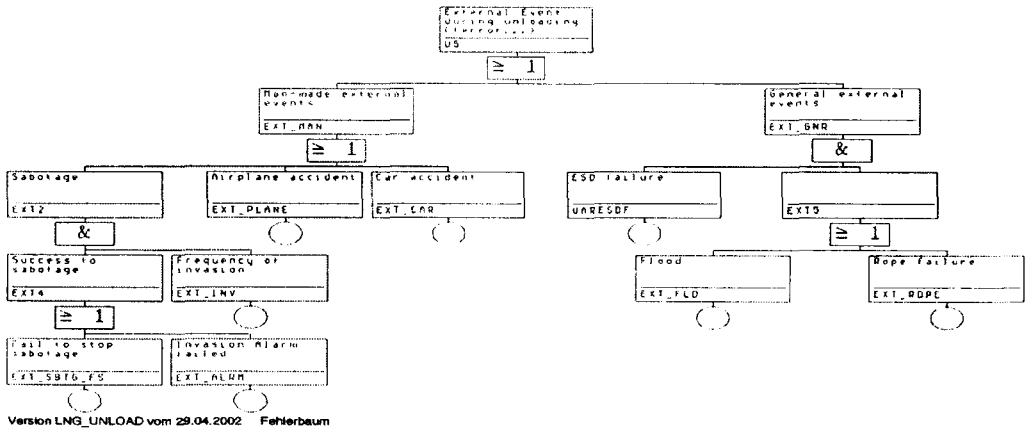


그림 6. 하역시의 외부사건 (Transfer Gate)