비독립적 사상연쇄를 고려한 LPG 이송작업의 FTA

김 호 영* · 임 현 교**
*충북대학교 대학원 · **충북대학교 안전공학과

I. 서론

통상적으로 FTA 를 활용한 정량적 해석에 있어서 기본사상은 통계적으로 상호독립이라고 가정되고 있다[1]. 그러나 실제 현장에서 대부분의 작업이나 요소가 서로 의존하여 이루어지기 때문에, 기본사상이 독립이라는 가정에 기초한 분석 결과는 현실적으로 받아들이기 어려운 값을 제시해 온 경우가 많았다[2].

따라서 이러한 문제를 극복하고자 하는 방법들이 계속 연구되고 있는데, 그 중에 기본사상간 의존성을 표현하는 통계적 모델로서 Association 의 개념이 있다.

본 연구에서는 LPG 이송작업과 같이 인적과오 요소가 많은 작업의 사고예방을 위한 안전관리 및 교육에 있어서 보다 현실적인 대안을 제시하기 위하여, LPG 충전소의 이송작업시 인적과오에 의한 가스누출사고 모델에 어소시에션 개념에 의한 FTA 를 도입하여 정량적으로 해석해 봄으로써, 보다 현실성 있는 결과를 도출하고자 하였다.

II. Association 개념에 의한 FTA 평가법

Association 개념에 의한 FTA 에서 정사사상의 발생확률 g 는 각 minimal path p_i 에서 적어도 하나의 기본사상이 발생하는 확률의 최소치를 상한으로 하고, 각 minimal cut k_i 의 모든 기본사상의 발생확률을 곱한 최대치를 하한으로 하는 방법이다. 이 평가식은 다음의 식 (1) 과 같다[3].

$$\max_{1\le s\le k_i \in k_s} \prod q_i \le g \le \min_{1\le j\le p_i \in p_j} \coprod q_i \qquad (1)$$

이 평가에서 다음과 같은 연산을 수행하면, 각 중간사상의 발생확률의 상한 및 하한을 구할 수 있다.

표 1 독립인 경우와 비독립인 경우의 발생확률 계산

Dependency \ Gate		AND	OR
independent		$q_a \times q_b$	$q_a + q_b - (q_a \times q_b)$
dependent	maximum	$q_{min}\{q_a, q_b\}$	$q_a + q_b - (q_a \times q_b)$
	minimum	$q_a \times q_b$	$q_{max}\{q_a, q_b\}$

III. LPG 충전소의 이송작업

LPG 충전소에서의 이송작업은 탱크로리 유도정지, 충전준비, 충적작업 개시, 충전작업 종료, 탱크로리 출발의 순서로 이루어진다[4]. 이 과정에서 작업자는 그림 1 에서 볼 수 있는 것과 같은 많은 밸브를 조작해야 하고 압력계 등을 관측해야 하며, 또한 운전시 이상유무를 감시해야 한다. 따라서 작업자가 이송작업을 수행할 때, 조작미스, 절차생략, 검사·확인 불량 등의 인적과오를 저지를 수 있다.

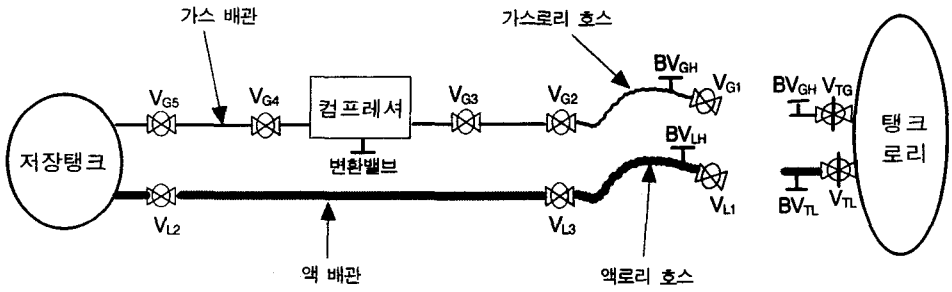

그림 1 이송작업의 설비 배치도

이러한 인적과오는 가스누출사고로 직결될 수 있는데, 그동안의 사고사례로부터 분류할 수 있는 유형은 크게 탱크로리 운전자의 작업종결전 출발에 기인한 로리호스 파열, 밸브오조작·과충전에 기인한 과압, 로리호스 체결불량 등이 가스누출로 이어지는 3 가지 경우이다[5]. 이 중 첫 번째와 두 번째의 경우는 장비의 현대화로 사고가 많이 감소하였으나, 로리호스 체결불량에 의한 누출의 가능성은 여전히 크다.

IV. FTA 분석 및 결과

이송작업시 인적과오에 의한 누출사고의 유형별 FT 작성에 있어서, 정상사상 (가스누출) 의 원인이 된 기본사상은 작업분석과 사고사례 분석을 통해 적출하였고, 각 사상간의 관계는 작업특성과 작업절차에 의해 규명하였다[5]. 이것을 통하여 그림 2 와 같은 FT 가 작성되었다.

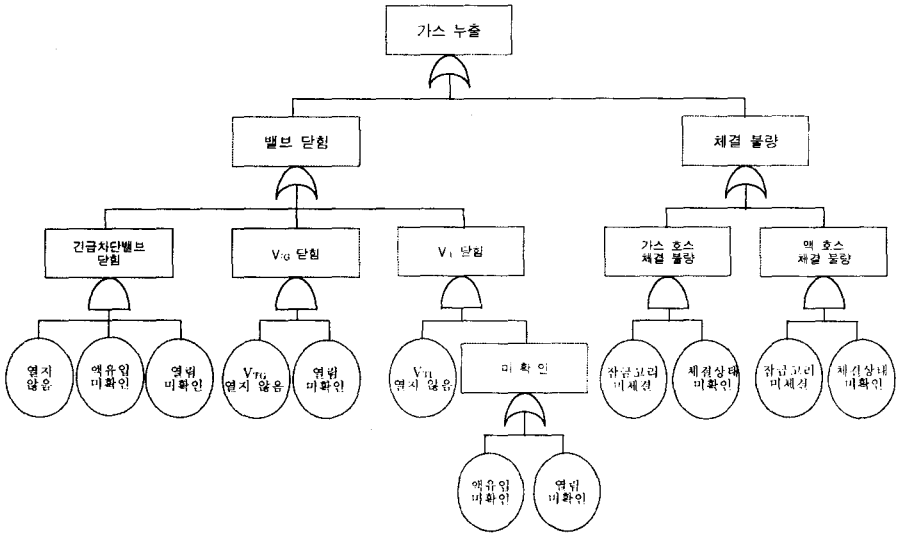

그림 2 로리호스 체결불량에 의한 가스누출의 FT

FT 의 정량적 계산에 있어서 기본사상에 해당하는 작업요소의 인간 신뢰도값은 많은 경험적 또는 실험적 데이터에 기초할 필요가 있는데, 본 연구에서는 Hammer 가 제시한 수치를 적용하였다[6]. 직접적인 수치적용에 의한 계산은 가지수가 많기 때문에 프로그램에 의해 수행하였고 그 결과는 표 2 와 같다.

표 2 계산 결과의 비교

Dependecy / Type	independent case	dependent case
운전자 착오에 의한 누출	$2.111E$-8	$2.106E$-8 $\leq g \leq 1.2E$-3
로리호스 체결불량에 의한 누출	$8.999E$-6	$1.8E$-6 $\leq g \leq 6.284E$-3
과압에 의한 누출	$1.694E$-16	$1.283E$-17$\leq g \leq 0.9E$-3

이 분석 결과에서 보는 바와 같이, 사상 간의 관계를 어떻게 가정하느냐에 따라 정량적 결과에서 많은 차이가 발생함을 알 수 있다. 즉, 사

상연쇄의 발생이 독립적인 경우의 결과는 현실을 반영한 Association 모델의 결과에 비교하여 볼 때, Association 모델의 하한치에 치우쳐 있어 독립이라는 가정에 의한 결과값이 현실을 왜곡한 결과를 제시할 수 있음을 나타낸다.

또한 상황에 따라 변동이 큰 인적과오의 특성상 정상사상의 발생확률을 엄밀하게 평가하는 것은 거의 불가능하기 때문에, Association 개념의 결과값과 같이 하한과 상한의 분포로서 제시되는 결과는 매우 유용하다고 할 수 있다. 뿐만 아니라, 안전측면에서 보면 하한값보다 상한값에 더 관심을 가져야 하는데, 이 값은 독립적 모델에서보다 더 현실적인 결과를 제시해주고 있다.

V. 결론

이상의 연구 결과로부터 내릴 수 있는 결론은 FTA 에 의한 인적과오의 정량적 평가에 있어서 Association 개념의 FTA 를 활용하는 것은 인적과오를 보다 현실적으로 평가하는데 유용하고, 사상 간의 관계를 독립이라는 기존의 가정은 현실성을 반영하지 못하는 엉뚱한 평가를 내리기 쉽다는 것이다.

따라서 FTA 를 수행함에 있어서 사상연쇄의 발생이 독립이라는 가정은 신중히 다루어야 하며, 이를 극복하기 위하여 어소시에시션 개념과 같은 종속적 모델이 적극 활용되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] J. Stephenson, System Safety 2000, VNR, 1991.

[2] 임현교, "반도체 공장의 위험물 교체작업시 인적과오에 대한 정량적 분석", 한국산업안전학회지, Vol.12, No.4, pp.161-168, 1997.

[3] 井上紘一, 幸田武久, "FTAの基礎理論", 安全工学, Vol. 17, No. 3, pp.150-157, 1978.

[4] 韓國가스安全公社, 가스사고편람, 1997.

[5] 김호영, 김성영, "LPG 충전소의 이송작업에 대한 인적과오의 정량적 분석과 효과적 안전작업지도 방안", 삼성화재 사고예방 논문집, pp.533-576, 1998.

[6] 日本總合安全研究所, FTA 安全工學, 日刊工業新聞社, 1985.