ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 8, pp. 1152~1158, 2014
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.8.1152

지하철 유입 변압기의 FN 선도를 이용한 위험도 평가 연구

A Study on the Risk Assessment for Oil Immersed Transformer of Subway with FN curve

최 승 혁* · 이 종 우†
(Seung Hyeok Choi · Jong Woo Lee)

Abstract - In Modern society, various important systems is operated such as nuclear plant, chemistry industry, railway system and so on. But these systems can cause high risky accidents. Hence, these systems are required to ensure the individual and societal risk criteria. In this paper, we reviewed EU risk criteria which is already operated in UK and Netherlands, then we proposed acceptable risk criteria and estimated risk of oil immersed transformer for subway with FN curve.

Key Words : Individual risk, Societal risk, Risk criteria, FN curve, Oil immersed transformer

1. 서 론

인간의 활동은 대부분 사고를 동반하게 되어 있다. 일반적으로 이러한 활동에는 자발적 활동과 비자발적 활동이 있다. 자발적으로 하는 활동은 본인의 의사로 활동을 하는 것으로, 암벽 등반 혹은 오토바이를 타는 경우 등과 같이 사고의 위험이 매우 높은 활동이다. 비자발적 활동의 예로는 화학공장 주변에 사는 주민이 될 수 있다. 화학공장에서 폭발 혹은 유독가스가 누출될 경우, 본인 의사와 상관없이 주변 주민들이 사고위험에 노출될 수 있다 [1].

이러한 비자발적 활동에서 나타나는 사고의 위험을 감소시키고자 원자력 발전소, 화학 공장, 철도시스템 등과 같은 시스템을 운용에 안전기준이 반드시 필요하다. 하지만 안전기준을 엄격하게 적용하면 사고의 위험이 크게 감소하나, 요구되는 높은 기술과 경제적 비용으로 시스템의 운용이 어려울 수 있다. 반대로 안전기준이 느슨하면 사고가 확대될 수 있는 가능성이 있다. 따라서 사회적으로 받아들일 수 있는 적정한 안전기준이 필요하다.

안전기준 설정 중 하나의 방법은 위험도를 정하는 것이다. 활동에 대한 위험도는 개인적 위험도와 사회적 위험도의 두 가지 형태로 나타낼 수 있다. 개인적 위험도는 활동의 결과로 발생되는 사고에 의해 개인이 생명을 잃을 수 있는 확률이며, 사회적 위험도는 개인이 아닌 단체에 대한 확률이다. 이는 직간접적으로 활동에 관여되는 것과 그 활동과 상관없이 위험에 노출된다는 차이를 갖고 있다.

이러한 위험도 평가는 사업의 일부이며, 사고의 영향이 일반인들에게 위험이 될 경우, 이는 사회적 우려 사항이 된다 [2]. 철도는 고속의 이동체를 운용하는 복합적인 시스템의 수송수단으로서 철도 시스템 자체의 위험성도 존재하지만 석유, 화학 물질 등의 위험물 수송으로 승객, 철도원 그리고 일반인들에게 위해요인이 될 수 있다 [3-4].

본 논문에서는 대부분의 도시 및 지하철도에서 사용하고 있는 유입 변압기의 위험도를 FN 선도를 도입하여 평가하였다. 2장에서는 유럽 각국의 위험 허용 한도에 대해서 조사를 하였으며, 3장에서는 지하철도용 유입 변압기에 적용하기 위한 개인적 위험도와 사회적 위험도에 대해서 논하였고, 4장에서는 지하철에서 화재가 발생하였을 경우와 지하철도용 유입 변압기에서 화재가 발생하였을 경우의 위험도에 대해서 평가하였다.

2. 사회적 리스크

2.1 위험 허용 한도

위험 허용 범위는 사회적 이해관계에 해당되므로 정부는 관련활동에 대한 계획과 발생할 수 있는 위험도의 가이드라인을 제시해야 하여, 제 3자에 대한 위험도를 법적으로 수용 가능하게 해야 한다. 위험 사건이 발생하였을 때, 한쪽은 위험 발생원이 되고, 다른 한쪽은 위험 피해원이 된다. 위험도는 위험 발생원과 위험 피해원 사이의 거리함수로 나타내어야 한다. 다른 방법으로는 위험 발생원 주변에 주어진 위험 피해원의 밀도를 고려하는 것으로, 잠재적인 위험 피해원의 수를 결정할 수 있다. 1차적 목표는 사람 즉, 개인적 위험도를 따지며, 사회적 위험도는 2차적 형태로 나타낸다. 개인적 위험도는 지속적으로 위험에 노출될 때 일정장소에서 보통 1년의 정해진 시간 동안에 발생한 사망 확률로, 사회적 위험도는 위험 사건이 발생하였을 때 사망 확률의 빈도로 나타내거나, 연간 혹은 그 이상의 누적빈도가 초과하는 것으로 나타낸다. 이러한 과정은 개인 및 사회에 대해 허용 가능한 위험도를 정하는 것이다 [5].

† Corresponding Author : Dept. of Railway Electrical and Signalling, Seoul National University of Science and Technology, Korea
E-mail : saganlee@seoultech.ac.kr
* Dept. of Railway Electrical and Signalling, Seoul National University of Science and Technology, Korea
Received : June 9, 2014; Accepted : June 29, 2014

2.1.1 해외의 개인적 위험 허용 한도

위험도 영역에 대해서 EU의 몇몇 국가들은 표 1과 같이 제시하였다. 영국의 안전법령에 대한 근거는 작업법령의 Health and Safety에 포함되어 있으며, 고용인 및 일반인에게 위험도를 알리도록 책임자에게 의무를 부과하고 있다. HSE(The Health and Safety Executive)는 다양한 환경 조건에서 허용 가능 혹은 불가능한 위험도를 공표하였으며, 그 위험도는 영국의 모든 산업 활동에 적용된다. 이러한 위험도에 대한 제어의 첫 번째 수단은 ALARP(As Low As Reasonably Practicable) 활동이다.

표 1 유럽의 개인적 위험도
Table 1 Individual Risk of Europe

개인적 위험도	영국	네덜란드	헝가리	체코
$10^{-3}/yr$	작업자(최대)	해당 없음		
$10^{-4}/yr$	일반인(최대)			
$10^{-5}/yr$	ALARP 낮춰야 하는 한도	신규 시설 (ALARP 적용 전)	상한 한도	기존 시설
$3\times10^{-6}/yr$	국토이용	해당 없음	하한 한도	신규 시설
$10^{-6}/yr$	작업자 및 일반인(보편)	신규 시설 (ALARP 적용 후)		

EU가 제시한 최대 위험도는 $10^{-5}/yr$이고, 영국의 허용 불가능한 상한 한도가 $10^{-4}/yr$이지만, ALARP을 엄격히 적용하기 때문에 실제로 위험도는 그 이하이다. 네덜란드와 체코는 2010년 이후 건설한 신규 시설들에 대한 위험도를 $10^{-6}/yr$로 관리하고 있다. 영국의 HSE는 2004년 국토이용 계획에서 위험도 가이드라인을 $3\times10^{-7}/yr$로 제시하였으며, 이는 개인적 위험도로 환산하면 $3\times10^{-6}/yr$이다. 네덜란드는 특정 위험 위치에 일반인이 지속적으로 있게 될 경우, 이에 대한 위험도를 $10^{-5}\sim10^{-6}/yr$으로 제시하였다. 이는 단일 설비에 대한 사항이며, 다수의 설비로부터 발생하는 누적 위험도는 고려하지 않는다. 무시할 수 있는 위험도는 영국은 $10^{-7}/yr$, 네덜란드는 $10^{-8}/yr$이며, 유럽 전역에서는 $10^{-8}/yr$이 타당한 것으로 간주된다.

2.1.2 해외의 사회적 위험 허용 한도

사회적 위험도는 일반적으로 특정 위험원에서 발생된 일정 수준의 악영향이 어떤 집단에 피해를 주는 인원수와 그 빈도 사이의 관계로 정의된다.

영국에서는 사회적 위험도 영역에 대한 근거를 ACMH (Advisory Committee on Major Hazards)에서 특정 공장에서 발생한 심각한 사고는 10,000년당 1건 이하로 발생해야 한다고 제안하였으며, 1976년에 ACMH가 이것을 한계 값으로 간주할 수 있다고 한 것에서 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 10명 혹은 그 이상의 심각한 사망사고는 10,000년당 1건을 초과해서는 안 된다는 점을 FN 선도의 고정점으로 사용해왔다.

HSE의 1981년 보고서는 1,500명의 사망자가 발생한 사건은 빈도가 2×10^{-4} 즉, 10,000년당 2건으로 이에 대해서는 허용 불가라 명시되어 있다. 과거 기록에 따르면 화학공업의 FN 선도의 기울기는 -1 이다. 1981년 ACMH는 최대 허용한도를 기울기가 -1이고 N은 500, F는 $2\times10^{-4}/yr$를 통과하는 FN 선도로 정했다. 2001년 HSE는 50인 이상 사망사고를 일으키는 단독사고에 대한 빈도가 $2\times10^{-4}/yr$인 사고는 허용 불가로 정하였다. 일반적으로 받아들일 수 있는 위험도는 지난 60년 동안 최대 허용 가능한 FN 선도보다 낮은 값이다. HSE는 사회적 위험도를 평가하기 위해서 ACMH의 위험도 누적 값을 사용하고 있다. 이러한 접근 방법은 최대 사망자 수와 빈도에 근거하고 있으며, FN 선도의 기울기가 1.4인 위험도를 사용하여 잠재적 사망자 혹은 치명적 사고율의 대략적인 수준을 평가하는데 사용한다.

네덜란드 법령은 사회적 위험도 기준을 정하지 않았으며, 외부 위험도를 평가할 때, 사회적 통념을 기준으로 사용하여 결정한다. FN 선도에서의 최대 허용 값은 $10^{-3}/N^2$이며, 무시 가능한 값은 $10^{-5}/N^2$으로, 기울기가 -2인 위험도를 적용하고 있다 [7]. 체코는 기존 시설에 대해서 네덜란드와 같이 사회적인 통념 값을 사용하고, 신규 시설에 대해서는 $10^{-4}/N^2$과 같이 엄격한 값을 사용한다. 헝가리에서는 사회적 위험도 값을 사용하고 있지 않다.

표 2 한국의 안전사고 사망자 수
Table 2 The number of death of negligent in Korea

구분 \ 년도	2003	2004	2005	2006	2007
총 사망자 수	244,056	244,217	243,883	242,266	244,874
안전사고 사망자 수	31,456	30,476	30,846	29,504	30,137
안전사고 사망률(%)	12.9	12.5	12.6	12.2	12.3

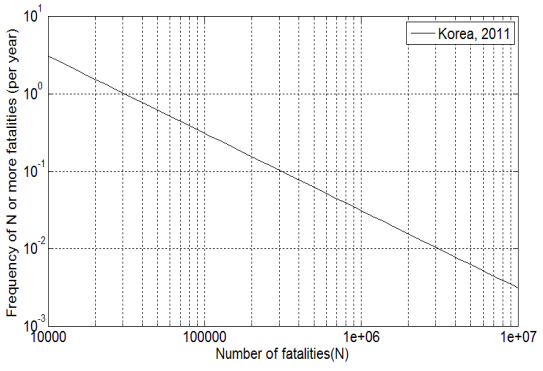

그림 1 한국의 FN 선도
Fig. 1 FN curve of Korea

2.1.3 한국의 위험 허용 한도

한국의 위험 허용 한도는 정확하게 정되어 있지 않다. 한국의 위험도를 평가하기 위해서 산업재해를 이용한 FN 선도를 추론하였다 [4]. 한국의 안전사고 사망자 수는 약간의 변동은 있지만 대체적으로 일정한 비율을 유지하고 있다. 따라서 FN 선도로 나타내어 위험 허용한도를 충분히 추론할 수 있다. 1년에 발생하고 있는 안전관련 사망자 수는 30,000명 내외로 사회적 위험도는 $6\times10^{-4}/yr$라 할 수 있다.

3. 위험도 평가방법

3.1 위험도 및 영향 범위

위험도는 항상 빈도와 사고의 크기와 연관되어 있으며, 대부분 곱의 형태로 나타낸다. 위험도는 특별히 정해진 사고 시나리오(s_i)와 관련된 확률(p_i)과 결과(x_i)로 정의 된다. 위험도는 위험원과 안전대책 사이의 균형인자로서 표시되며, 위 3개의 변수를 통해 어떤 활동에 대한 위험도가 다음과 같이 나타난다.

$$R=\{\langle s_i, p_i, x_i\rangle\}\ \ i=1,2,\cdots,N \tag{1}$$

사회적으로 허용 가능한 위험도는 연간 예상 사망자 수의 상한 값으로 나타낼 수 있다. 사망자의 수와 발생 빈도는 역 비례하게 되며, 사망자 수는 1명부터 시작하기 때문에 사망 빈도의 분포를 예측하기 위해 Pareto 분포를 적용할 수 있다.

3.2 개인적 위험도 척도

개인적 위험도 척도는 어떤 정해진 장소에서 무방비 상태의 일반인이 지속적으로 존재할 때, 위해한 활동으로 인한 사고에 의해서 사망할 확률이다 [9].

$$IR=P_f P_{d|f} \tag{2}$$

여기서 P_f는 사고가 날 확률(yr^{-1})이며, $P_{d|f}$는 무방비 상태로 일반인이 지속적으로 존재한다고 가정한 경우에 사고로 개인이 사망할 확률이다.

개인적 위험도는 장소 특성이며, 공간 계획에 유용하게 사용된다. 동등한 개인적 위험도의 수준은 위험도 등고선 지도로 나타낼 수 있다. 개인적 위험도 척도는 위해한 설비와 그 통로 부근에서 위험도를 제한하는 것으로 네덜란드에서 사용되었던 것으로, 네덜란드 국토청(VROM)은 거주 지역에 대해 다음과 같은 기준을 정하였다.

$$IR<10^{-6}/yr \tag{3}$$

따라서 $10^{-6}/yr$ 보다 낮은 위험도 즉, ALARA(As Low As Reasonably Achievable)를 가능한 낮출 수 있도록 하여야 한다. 이 기준은 위해한 활동에 관련되어 비자발적으로 부가된 위험도를 경감 혹은 가중할 수 있도록 하였다. TAW(Dutch Technical Advisory Committee on Water Defences) 방법은 암벽 등반과 같은 자발적 활동에서 위해 설비 등과 같은 비자발적인 활동의 범위까지 위험도를 넓힐 수 있도록 하였다. TAW에 의해서 정해진 기준은 다음과 같다.

$$IR<\beta\circ10^{-4/}/yr \tag{4}$$

여기서 β는 활동의 자발성에 따라 변하게 되며, 자세한 수치를 표 3에 나타냈다.

표 3 활동의 자발성에 따른 β의 변화
Table 3 Variation of β caused by spontaneity of activity

β	자발성	혜택	비고
100	완전	직접	암벽등반
10	보통	직접	오토바이 탑승
1	중립	직접	자동차 운전
0.1	비자발	약간	공장
0.01	비자발	없음	LPG 충전소

3.3 사회적 위험도 척도

사회적 위험도 척도는 특정 위험원으로부터 생성된 일정 수준의 악영향에 의해 어떤 집단에서 피해 받는 사람 수와 빈도 사이의 관계로 Ichem에 의해서 정의되었다. 개인적 위험도는 일정 장소에서 사망할 확률이지만, 사회적 위험도는 위해 사건이 발생했을 때 그 장소 전체 영역의 피해 수로 나타낸다 [9].

사회적 위험도 평가는 어떤 사건에 의해서 동시에 한 사람 이상이 피해를 당할 수 있는 기회 평가에 관련된 것이다. 사건의 발생 가능성이 하나의 변수이며, 그리고 결과는 피해의 정도 및 피해를 받는 인원수에 대해 평가하는 것이고, 사상자 수에서 사고의 척도에 대한 아이디어를 제공한다.

사회적 위험도는 주요 위험 시설에서 사용되는 물질과 그 물질이 처리되는 절차에서 생성되는 위험도에 비례한다. 사회적 위험도 평가에서 가장 중요한 변수는 위험 시설의 위치와 위험 시설 주변의 인구 밀집도이다. 예를 들어, 특정 지역의 빌딩에 많은 인구가 있다면, 그 지역을 오염시키는 독성가스에 의해서 많은 사상자가 발생할 수 있다. 특정한 방향으로 위치한 인구 밀집 지역에 대해서는 독성가스 누출로 인한 중독 사고의 가능성은 그 방향으로 그 독성가스가 퍼져나가는 확률과 동일하다.

일반적으로 위험도 평가에 사용되는 시나리오는 발생 빈도와 사망자 수로 나타낸다. 사회적 위험도를 표시하는 방법은 도식적으로 나타낸 FN 선도의 형태와 그 적분형태인 수식으로 나타낸다.

3.3.1 FN 선도

FN 선도는 사건 모델과 연관하여 각각의 사고 시나리오의 누적 빈도와 사망자 수로 나타낸다. 가끔 사건의 원인이

사망자 수에 대한 위험도 평가로 정의되며, 사건에 의해서 발생하는 사망자 수 N과 같거나 초과할 수 있는 사망자 수에 대해 각각의 누적 빈도는 다음과 같다.

$$F_{N_i}(x)=\int_0^{N_i} f(x)\,dx \tag{5}$$

Pareto 누적분포함수와 확률밀도함수는 다음과 같으며, x_m은 최소값을 나타낸다.

$$F_X(x)=\begin{cases}1-\left(\frac{x_m}{x}\right)^{\alpha} & x\geq x_m\\ 0 & x<x_m\end{cases} \tag{6}$$

$$f_X(x)=\begin{cases}\frac{\alpha x_m^{\alpha}}{x^{\alpha+1}} & x\geq x_m\\ 0 & x<x_m\end{cases} \tag{7}$$

3.3.2 위험도 산출

사회적 위험도 산출의 기본은 연간 피해자의 확률밀도함수로 나타낸다. 사회적 위험도에 대한 단순 척도는 연간 사망자 수의 기대 값으로 다음과 같이 나타낸다.

$$E(N)=\int_0^{\infty} x\cdot f_N(x)\,dx \tag{8}$$

$$E(N)=\sum x_i\cdot f_N(x_i) \tag{9}$$

여기서 x는 사망자 수이며, $f_N(x)$는 연간 사망자 숫자의 확률밀도함수, 기대 값은 단순히 사망자 수와 빈도의 곱에 대한 합과 동일하다.

이 확률밀도함수에서 FN 선도를 유추할 수 있으며, 이는 사망자 숫자의 함수로서 초과확률은 다음과 같다.

$$1-F_N(x)=P(N>x)=\int_x^{\infty} f_N(x)\,dx \tag{10}$$

여기서 $F_N(x)$는 연간 사망자 수의 누적분포함수로 연간 사망자 수 x보다 낮은 확률을 나타낸다.

영국의 HSE는 위험도 적분 RI(Risk Integration)를 다음과 같이 정의했다 [11].

$$RI=\int_0^{\infty} x\cdot(1-F_N(x))\,dx \tag{11}$$

이 식에서 $x\cdot(1-F(x))$가 의미하는 것은 x 이상의 사망확률$(1-F(x))$에 사망자 수 x를 곱한 것이다. 위험도 적분은 사회적 위험도의 전체적 수준의 합산이며, $x\cdot f$ 선도의 전체를 고려한 것이다. RI에 대한 기여도 계산은 x가 증가함에 따라 가중치를 부여할 수 있다. x를 증가시키면, RI 기여도가 급속하게 증가한다. 수학적으로는 $RI=\sum x^{\alpha}\cdot f$와 같이 나타내며, α는 반감도 승수이다. 일반적으로 제안된 α는 1-2이며, 주어진 $x\cdot f$ 에서 RI의 기여도는 기대 값에 비해서 x에 따라 증가한다.

$$RI=\int_0^{\infty} x^2\cdot f(x)\,dx \tag{12}$$

이는 결정영역과 관련하여 사망자 수가 증가함에 따라 영향을 더욱 미치기 되어, 가능성보다 더 중요하게 취급하게 된다. 이러한 방법은 의사결정에서 결과에 가중치를 더욱 증가시켜 불확실한 사실에 대한 HSE의 신중한 접근방법이다. RI는 합산 통계치로 어느 지역에서 다양한 특정사고 시나리오 혹은 가능성에 대한 것은 아니다.

영국 국토이용계획의 RI 는 다음과 같이 더 높은 위험도를 사용한다.

$$RI_{LUP}=\sum x\cdot F(x)=\sum x^{\alpha}\cdot f(x),\ \alpha=2 \tag{13}$$

유럽에서는 다양한 위해 활동에 대한 위험도를 FN 선도에 의해서 제한하고 있다. 이 기준은 다음과 같이 기술되고 있다.

$$1-F_N(x)<\frac{C}{x^n}\quad \text{for } all\quad x\geq 10 \tag{14}$$

사망자 수 x가 증가할수록 발생될 확률은 n의 제곱에 반비례하게 된다. 네덜란드의 VROM 기준은 위해 시설에서 C는 10^{-3}, n은 1로 정하였으며, 다음과 같이 된다.

$$x^2\left(1-F_N(x)\right)<10^{-3} \tag{15}$$

n이 1인 경우는 위험도 중립이라 하며, n이 2인 경우는 위험도 반감으로 불린다. 이 경우에서 사건 발생할 확률이 클수록 가중치가 높아지고, 비교적 낮은 확률을 가진 것으로 받아들인다.

3.3.3 국가적 허용 위험도

식 (15)에서 좌변은 사망자 수를 나타내고, 우변은 제한 값을 나타낸다. 식 (15)을 변형하면 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (16)의 N_f는 사고 발생 시에 영향을 받는 지역 내에 있는 사람 수, N_A는 사고 발생 장소 수를 나타낸다. 식 (16)은 또한 $0.01\leq\beta_i\leq 10$의 범위에서 연간 사망수가 $\beta_i\times 100$ 보다 작아야 한다는 것을 나타내며, 일반적으로 해당 국가의 사망자는 $\beta_i\times 7\times 10^{-7}\times$국가인구수로 정의된다.

$$N_A\cdot N_{fi}\cdot P_{fl}\cdot P_{d|fi}<\beta_i\cdot 100 \tag{16}$$

여기서 P_{fi}는 어떤 고장이 발생할 확률, $P_{d/fi}$는 그 고장에 의해서 사망사고를 발생시킬 확률이며, N_{fi}는 영향을 받는 사람 수를 나타낸다.

한국의 안전사고 사망자 수를 적용한 경우, 다음과 같다.

$$\sum_i N_{fi}\cdot P_{fl}\cdot P_{d|fi}\approx 3\times 10^3 \tag{17}$$

예로 들어, 케이블카가 고장이 발생할 확률을 P_{fi}, 그 고장

에 의해서 사망할 확률을 $P_{d/fi}$, 케이블카에 타고 있는 승객 수를 N_{fi}이라면, 모든 사고를 더한 것이 총 사망률이 된다.

4. 사례연구

4.1 지하철 화재사고 분석

과거 국제적으로 발생했던 지하철 화재 사고를 표 4에 나타내었다. 지하철 화재는 초기에 진압할 경우, 경미한 피해가 발생하나 화재가 확대될 경우 대규모 사고로 이어진다. 특히 사람이 붐비는 출퇴근 시간에 화재가 발생하면 밀폐된 지하철에서는 대규모 인명사고가 발생하게 된다. 대표적인 사고로는 런던 지하철의 화재사고로 31명, 바쿠 지하철 화재사고 337명, 대구 지하철 화재사고 198명 등의 사상자가 발생한 사례가 있다.

표 4 세계의 지하철 화재 사고
Table 4 Subway fire accidents in the world

	날짜	도시	비고
1	1964.3	New York	차량화재 부상 3명
2	1968.1	Tokyo	제동장치화재 부상 11명
3	1970.9	Tokyo	식당화재
4	1976.2	London	플랫폼 장치화재 부상 25명
5	1979.9	New York	변압기 화재 부상 178명
6	1979.1	San Francisco	차량화재 사망 1명, 부상 44명
7	1983.8	Nagoya	변압기화재 사망 1명
8	1984.11	London	지하장치화재 부상 18명
9	1985.7	London	에스컬레이터 화재 사망 1명, 부상 47명
10	1985.12	London	에스컬레이터 화재
11	1987.11	London	에스컬레이터 화재 사망 31명, 부상 87명
12	1994.5	Taipei	변압기 화재 부상 10명
13	1995.10	Baku	차량화재 사망 337명. 부상 227명
14	2000.4	Washington DC	전기도선 화재
15	2000.4	Daegu	차량화재 사망 198명, 부상 147명

지하철 화재사고에 의해서 큰 인명사고가 발생하는 것은 밀폐된 공간, 제한된 출구 및 유독가스 방출에 의한 질식에 의해서 발생한다. 이러한 지하철 화재사고에 의한 사망자에 대한 예측은 화재의 크기, 발생 시간의 유동 및 지하철 탑승 인원 등이 시간, 장소에 따라 변하기 때문에 불가능하다. 이러한 사고를 예측하는 방법 중 하나가 QRA(Quantitative Risk Analysis) 분석 방법으로 그림 2에서 나타낸 것과 같다. 그림 3의 P_{ij}는 i사건의 발생과 관련된 확률이며, j는 사건 상태를 나타내고 $\sum_j p_{ij}$는 1이다.

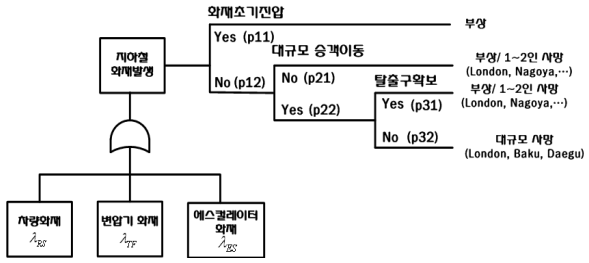

그림 2 지하철 화재로 인한 사고결과 모델링
Fig. 2 Risk modeling for subway fire accidents

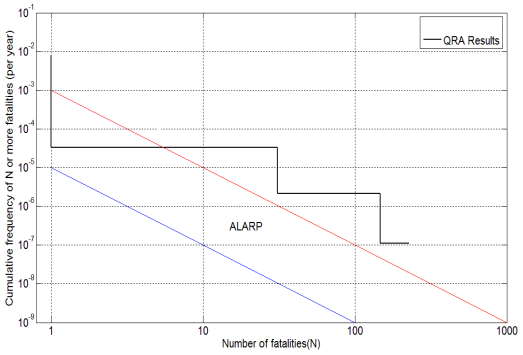

그림 3 지하철 화재에 의해 발생된 FN 선도
Fig. 3 FN curve for subway fire accidents

4.2 유입변압기의 화재확률

유입변압기의 화재의 경우 그 발생 빈도는 빈번하지 않다. 이러한 유입변압기의 화재는 한 유입변압기의 열화된 서브시스템으로 인해 발생하게 된다. 그림 3의 QRA 결과로 나타난 검은 실선은 표 4에서 사상자가 발생된 사고들에 대한 누적 빈도수에 관한 것이다. 그림 3에서 특화된 내용으로부터, 그림 4에서는 유입변압기의 화재·폭발에 관련된 사건을 모델링 하였다. 유입변압기의 폭발·화재 가능성을 모델링하기 위해서 각 서브시스템의 고장률을 예측해야 한다.

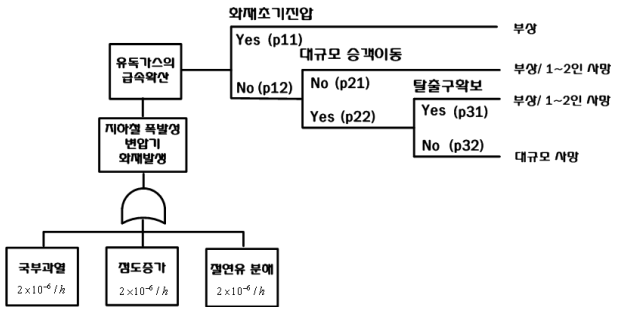

그림 4 지하철 유입변압기의 화재로 인한 사고결과 모델링
Fig. 4 Risk modeling for fire accidents of subway oil immersed transformer

본 논문에서 예측된 결과는 일생 동안에 화재발생 확률이 반드시 있다고 가정하여 도출하였다.

4.3 유입변압기의 위험도 평가

이러한 사고는 변압기 100대 중 1대가 50년마다 1번씩 발생하며, 사용연수를 30년으로 가정하였다. 이 가정은 표 4에서 나타난 사고 발생 빈도는 운용 중에 발생할 수 dLT는 확률과 주상 유입 변압기의 고장률을 근거로 하였으며, 사용년수는 절연강도가 정상적으로 유지되는 것으로 하였지만, 변압기 사용재료, 제작기술 및 사용 환경에 따라 달라질 수 있다. 본 논문에서는 10,000년에 6번의 유입변압기 폭발사고 즉, SIL 4에 해당 하여 일어날 확률이 없는 것으로 가정을 하였다. 따라서 지하철 유입변압기가 폭발성 화재를 발생할 확률 P_{fi}는 다음과 같다.

$$\lambda_{fi} = {}_{100}C_1 \times 2 \times 10^{-6}/h = 2 \times 10^{-8}/h \quad (18)$$

$$P_{fi} = 1 - e^{-\lambda_{fi} t} = 1 - e^{-6 \times 10^{-4}} = 0.0006/yr \quad (19)$$

4.3.1 유입변압기의 개인적 위험도 평가

개인적 위험도를 평가를 하기에 앞서, 지하철 유입변압기에서 발생하는 유독가스에 노출되어 사망자가 발생할 확률 $P_{d|fi}$를 정해야 한다. $P_{d|fi}$를 정하기 위해서는 2가지 가정이 필요하다. 첫 번째는 사고가 발생했을 때 영향을 받는 지역 내에 사람이 몇 명이 있을 것인가 이며, 두 번째는 그러한 인원들이 사고 발생 후 몇 분 만에 탈출할 것인가 이다.

첫 번째로 요구되는 사항은 최대 인원으로 1개 편성의 열차에 4000명이 탑승한다고 가정하였다. 이 가정은 출근시간의 혼잡률 200%, 1량 정원이 200명, 10량이 1개 편성을 바탕으로 하였다. 이 가정은 서울 지하철 2호선 출퇴근 시간의 혼잡률을 이용하였다. 두 번째로 요구되는 사항은 4000명 중 99%가 10분 내로 탈출에 성공하여 결과적으로 40명이 탈출에 실패하여 사망하였다고 가정하였다. 이 가정은 화재가 발생하였을 경우 적어도 99% 이상은 10분 내에 탈출을 해야 개인적 위험도를 만족하는 수준에서 역으로 추산을 하였다. 시간은 크게 상관 없으나 사고가 발생했을 때 치명적인 사고를 당할 수 있는 것으로 추론 하였다.

이 두 가지 가정에 의해서 산출된 $P_{d|fi}$는 다음과 같다.

$$P_{d|fi} = 40/4000 = 0.01 \quad (20)$$

$$IR = P_f P_{d|f} = 6 \times 10^{-4}/yr \cdot 10^{-2} = 6 \times 10^{-6}/yr \quad (21)$$

따라서 개인적 위험도 $\beta_i \cdot 10^{-4}/yr$를 만족하기 위해서는 승객의 경우 β_i를 0.1로 하여, 개인적 위험도를 $10^{-5}/yr$로 나타낸다.

4.3.2 유입변압기의 사회적 위험도 평가

사회적 위험도는 지하철 유입변압기를 사용하는 개소의 수에 비례하게 된다. 유입변압기 사용 개소 N_A를 10개로 가정하고 개인적 위험도 평가 결과를 바탕으로 산출한 사회적 위험도는 다음과 같다.

$$E(N_{di}) = N_A \cdot P_f \cdot P_{d/f} \cdot N_p = 10 \times 6 \times 10^{-6}/yr = 6 \times 10^{-5}/yr \quad (22)$$

이를 통해서 위의 가정들이 사회적 위험도 또한 만족함을 나타낼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 지하철에서 사용하는 유입변압기의 안전성을 측정하는 방법을 제시하였다. 국내에서는 아직까지 정확한 개인적, 사회적 위험도를 정해 놓지 않아, 유럽의 기준을 적용하여 보았다. 유럽의 기준은 개인적 위험도와 사회적 위험도를 구분하여 적용한다. 국내에서도 안전성을 활동을 하기 위해서는 개인적인 위험도와 사회적 위험도를 설정할 필요가 있으며, 설정한 결과는 본론에서 제시한 FN 선도로 나타낼 수 있다. 국내에서 사회적 위험도를 설정하기 위해서는 특별히 제정하는 것보다, 유럽의 기준을 준용하면 국내에서 발생하는 기존의 안전사고 비율($6 \times 10^{-4}/yr$)과 비교할 때 커다란 무리가 없을 것으로 사료되며, 공중 혹은 작업장에서 일하는 근로자의 위험도도 유럽의 기준을 적용하면 보편타당하다. 이는 본론의 그림 3에서 제시된 FN 선도의 ALARP 범위와 동일하게 된다.

유럽에서 설정된 개인 위험도와 사회적 위험도를 적용하기 위해 유입변압기의 사고 상황을 가정하였다. 유입변압기의 사고는 최악의 상황을 상정하여 계산하였다. 보다 정확한 유입변압기의 고장 시나리오를 정하기 위해서는 많은 데이터가 요구되나, 축적된 데이터가 거의 없어, 여러 가정을 통해서 위험도 평가를 수행하였다.

향후 보다 정확한 예측을 위해서는 Pareto 분포 등을 이용하여, 사고 발생경향을 예측하고, 또한 개인 및 사회적 위험도를 설정하고, 그것을 근거로하여, 시스템을 운용할 때 발생할 수 있는 고장과 시나리오를 예측하여, 시스템의 안전 확보에 활용할 수 있도록 추가적인 연구를 진행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 서울과학기술대학교 산학협력단의 지원에 의하여 이루어진 “지하철 유입 변압기의 FN 선도를 이용한 위험도 평가 연구”에 대한 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

[1] Edward Broughton "The Bhopal disaster and its aftermath: a review", Environ Health. 2005; 4: 6. Published online 2005 May 10. doi: 10.1186/1476-069X-4-6

[2] H.J. Pasman et al., "Social Risk Assessment of Large Technical Systems", Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, Vol. 13 (4) 305-316

(2003)
[3] Health and Safety Executive, "HSE's annual report on railway safety"
[4] Health and Safety Executive, "Transport fatal accidents and FN curves", 1967~2001
[5] V. M. Trbojevic, "Risk criteria in EU", Risk Support Limited, London, UK
[6] J. K. Vrijling et al., "Societal Risk and The Concept of Risk Aversion"
[7] J. K. Vrijling et al., "A Framework for Risk Criteria for Critical Infrastructures : Fundamentals and Case Studies in the Netherlands"
[8] S.N. Jonkman et al., "Flood Risk Calculated With Different Risk Measures"
[9] S.N. Jonkman et al., "An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage"
[10] Health and Safety Executive, "Societal Risk : Initial Briefing to Societal Risk Technical Advisory Group"

저 자 소 개

최 승 혁

2011년 서울과학기술대학교 석사졸업, 2004년~현재 한국철도시설공단 부장, 2013년~현재 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과 박사과정

이 종 우 (李 鍾 宇)

1983년 한양대학교 기계설계공학과 학사졸업, 1986년 Ecole Centrale de Nantes 석사졸업, 1993년 University of Paris VI 박사졸업, 2005년~현재 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과 교수