

## THERP를 이용한 개스벨브시스템의 보수시 인적오류 평가

제 무 성

한성대학교

서울시 성북구 삼선동 2-389

### 요 약

THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) 방법론은 원전의 확률론적 위험성 평가(PSA)시 운전원과 작업자의 인간오류평가에 가장 널리 사용되고 있는 방법이다. HRA Handbook 이라고도 불리는 이 모델은 운전원 행위를 시스템 부품의 한 요소로 가정하고 인간오류를 평가한다. 본 논문은 이 방법론을 이용하여 원전 등과 같이 위험시설물 중의 하나인 개스벨브기지에서 작업자 보수시 인적오류를 평가하고 기계적 오류와 함께 인적오류의 기여도를 계산하였다. 본 방법론은 원전, 개스벨브 기지 뿐만아니라 석유화학 플랜트와 같은 위험시설물의 인적오류 평가에도 유연하게 사용될 수 있음을 보여주었다.

### 1. 서 론

THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) 방법론은 원전의 확률론적 위험성 평가(PSA)시 운전원과 작업자의 인간오류평가에 가장 널리 사용되고 있는 방법이다. HRA Handbook 이라고도 불리는 이 모델은 운전원 행위를 시스템 부품의 한 요소로 가정하고 인간오류를 평가한다. 먼저 분석대상 시설을 방문하여 주제어실 배치 및 운전원의 교육방법 및 운영/통제특성을 조사하고, 제어판넬의 인간공학적 설계특성, 판넬배치 및 계측/제어설비의 특성을 파악하며, 운전원 면담을 통하여 각종제어의 수행장소, 운전특성 및 운전원 반응시간 및 수행특성인자 평가에 필요한 각종정보를 수집하는 친숙화 작업이 수행된다. 또한 절차서 검토, 보수작업 행위분류, 직무과제특성, 인적오류형태, 관련보수절차서 검토, 운전원 수행특성인자 분석, 운전원 오류확률값의 할당 등의 직무분석(Task Analysis) 작업을 수행한 후, 직무분석 결과 도출된 각 단위행위의 인간오류를 시간순서별로 이분(Binary Branch)형태의 수목으로 구성하는 인간오류수목(HRA Event Tree)을 구성한다. 이 때 인간오류 수목의 각 가지에 THERP Handbook<sup>[1]</sup>으로부터 각 행위단위별 오류확률을 할당한다. 그 다음은 운전원 행위에 영향을 미치는 내부적인자, 외부적인자 및 스트레스 등의 수행특성인자(Performance Shaping Factors) 평가작업, 무의존성(ZD: Zero Dependence), 저의존성(LD: Low Dependence), 중간의존성(MD: Moderate Dependence), 고의존성(HD: High Dependence), 완전의존성(CD: Complete Dependence) 등 행위간 의존정도를 평가한다. 다음, 마지막으로 이미 발생한 오류를 성공상태로 정정해줄 수 있는 회복인자(Recovery Factor) 효과를 평가하고 고려하는 작업을 수행함으로써 참조시스템인 개스벨브기지 보수시 인적오류가

능성을 평가하였다.

본 논문은 이러한 분석단계를 통해서 개스밸브시스템의 여러 가지 설비의 보수시 인적오류를 평가하였으며 아울러 인적오류의 기계적 고장에 대한 상대적인 위험기여도를 계산하여 인적오류의 중요성을 정량적으로 평가하였다.

## 2. 참조시스템인 정압기에의 적용

### 2.1 정압기 (Governor)

정압기란 높은 압력의 가스를 도시가스로 공급하기 위한 압력제어 시스템이다<sup>[2]</sup>. 정압기는 높은 1차 압력을 받아서 설정된 2차 압력으로 감압하는 기기로서 정압조절기와 압력설정기로 조합되어 있으며 설정된 압력을 유지하도록 되어 있다. 정압조절기는 정압기 하류측에 설치한 압력 변환기의 신호를 받아서 압력을 설계된 압력으로 조절한다. 정압기는 가스의 수송효율을 높이기 위해 설정된 압력에 따라 고압으로 수송된 가스를 사용자에게 공급할 수 있는 적정압력으로 감압시키는 기능을 가지며, 압력을 감압조절하는 정압기와 급격한 감압시 가스의 팽창에 의한 온도 강하를 보상해 주기 위한 가열 장치, 외부 이물질의 유입으로 인한 기기장치의 보호를 위해 설치되는 가스여과기, 긴급사태 발생시 고압가스를 차단하는 긴급차단밸브 및 방산장치와 그 외 여러가지 계측장치로 구성된다<sup>[3]</sup>. 이 기계의 정기점검은 년 1회 이상이어야 하며 분해수리후에는 소음, 과압과 누설의 발생여부를 시운전을 통하여 확인하여야 한다<sup>[4]</sup>.

### 2.2 정압기 (Governor) 보수시 인적오류의 평가

참조시스템을 방문하여 제어실 및 정압기실의 고찰을 통하여 제어실의 일면과 인간행동에 영향을 주는 여러 가지 수행특성인자, 작업자의 업무수행 절차에 대한 요점을 질의, 조사하는 친숙화 작업(Familiarization)을 수행하였다. 여기서 얻어진 정보를 바탕으로 직무분석(Task Analysis)을 수행하였다. 직무란 일의 특성상 혹은 운전자가 일반적으로 계통의 목적의 일부분을 달성하기 위하여 필요한 하나의 단위(Unit)이다. 가장 중요한 직무분석의 하나는 각 업무를 개인의 행동단위로 분해하는 것이다. 이러한 분해는 분석대상의 인간행위에 대한 정보를 표를 만들어 기술한다. 직무분석을 통하여 정압기의 중요직무내용은 Main 및 Governor의 상태점검, Inlet Valve, Outlet Valve, Pilot Block Valve 등을 닫고 라인을 격리시키는 작업, Main Block Valve의 누출 확인, 배관 내 개스의 배기, Governor의 분해 점검, 소손품목이 존재하는 경우에 적절한 교체 및 조정하는 작업, Governor의 재조립 및 최종누출확인 등의 직무를 분석하였다<sup>[4]</sup>. 직무분석에서 제시한 중요직무 내용중에서 계통의 성공과 실패에 영향을 주는 직무만 선별하여 그림 1과 같이 그 오류가 일어나는 순서대로 HRA 수목(Event Tree)을 구성하였다. 이때 업무를 수행하는 방식 때문에 작업자의 수행간에 의존성(Dependence)이 존재하는데 그림 1에서와 같이 보수팀의 다른 작업자(QC)에 의한 상태의 부정확 확인의존성은 중간의존성(Medium Dependency)이 있는 것으로 가정하였다<sup>[5]</sup>. 그림 1의 점선은 회복효과 (Effect of Recovery Factors)를 나타낸다. 개발된 HRA 수목상의 인간오류행위의 확률 추정치는 HRA Handbook<sup>[1]</sup>으로부터 인용하여 해당 인적오류 확률값을

할당하였다. 할당된 확률값과 도출항목은 표 1과 같다.

### 3. 인적오류 확률의 계산

#### 3.1 인적오류 평가(HRA Analysis)

THERP Handbook의 표로부터 도출된 각 단위동작의 인적오류 확률 값은 모두 로그정규분포를 하고 있다. 따라서 보수시 인적오류를 계산하기 위해서는 HRA Event Tree 상의 확률값들에 대하여 불확정성 분석(Uncertainty Analysis)을 수행함으로써 최종적인 보수시 인적오류 확률 값을 계산해 낼 수 있다. 그 계산과정은 다음과 같다.

##### 3.1.1. 각 가지의 Lognormal 분포의 중간값(Median)과 정규분포 평균과 분산의 계산

그림 1과 같이 HRA Event Tree는 5개의 배타적인 인적오류 경우가 존재한다. 즉, 전체 인적오류 확률값은

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (1)$$

이다. 여기서 로그노말분포인  $F_1$ 의 분포의 모수값(평균과 분산)은 주어진 중간값( $X_{50}$ )과 EF 값을 이용하여 다음 식으로부터 구해진다. 즉,

$$F_1 \sim \Lambda(\mu_1, \sigma_1) \quad (2)$$

여기서,

$$X_{50} = e^\mu \quad (3)$$

$$EF = \sqrt{\frac{X_{95}}{X_{05}}} = e^{1.645\sigma} \quad (4)$$

의 관계식을 이용하여 모수값을 구하였다. 반면에  $F_2$ 는 3개의 로그노말 변수의 곱인데 로그노말 변수의 곱의 분포는 동일한 로그노말 분포를 갖는다. 즉,

$$F_2 = F_B F_C F_D \quad (5)$$

여기서  $F_B$ ,  $F_C$ ,  $F_D$ 는 각각 표1에서 제시한 B, C, D 직무의 인적오류 확률이다.  $F_C$ 는 B직무에 의존성이 있으므로 이 경우에 중간정도의 의존성 (MD)을 따르는 것으로 가정하여 확률값을 구하였다. 따라서  $F_2$  분포의 모수값(평균과 분산)은 다음 식으로부터 구해진다.

$$\mu_2 = \ln F_2 = \ln F_B + \ln F_C + \ln F_D \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{FB}^2 + \sigma_{FC}^2 + \sigma_{FD}^2 \quad (7)$$

$F_3$ ,  $F_4$ 에 대해서도 같은 방법이 적용되었으며 다음의 모수값을 갖는 로그노말분포가 결정되었다

F6도 식 (2)와 같이 다음 식으로 표현된다.

$$F_5 \sim \Lambda(\mu_5, \sigma_5) \quad (8)$$

위 식 Eq. (1)~(8)을 이용하여 계산된 각 가지  $F_i$  ( $i= 1, 2, \dots, 5$ )의 로그노말분포의 중간값과 각 가지의 정규분포 평균과 분산이 계산되었다.

### 3.1.2. 각 가지의 로그정규분포의 평균과 분산의 계산

각 분포의 모수가 결정되었으므로 전체 보수인적오류  $F_T$ 의 분포가 결정되어야 한다. 이  $F_T$ 의 평균( $\alpha$ )과 분산( $\beta^2$ )의 계산은 Taylor's Expansion을 이용한 2차 근사평가 (2nd Order Approximate Evaluation)에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$\alpha_{FT} = \overline{F_1} + \overline{F_2} + \overline{F_3} + \overline{F_4} + \overline{F_5} = \alpha_{F1} + \alpha_{F2} + \alpha_{F3} + \alpha_{F4} + \alpha_{F5} \quad (9)$$

$$\beta_{FT}^2 = \beta_{F1}^2 + \beta_{F2}^2 + \beta_{F3}^2 + \beta_{F4}^2 + \beta_{F5}^2 \quad (10)$$

이때 앞에서 구한 각 가지의 평균( $\alpha$ )과 분산( $\beta^2$ )을 이용하여 식 (9)과 식 (10)에 대입하면  $F_T$ 의 평균( $\alpha_{FT}$ )과 분산( $\beta_{FT}^2$ )이 얻어진다. 여기서 이 값을 다음의 상관 관계식에 대입하면  $F_T$ 의 정규 분포 모수(Parameter)인 최종 평균과 분산이 얻어진다.

$$\alpha_{FT} = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \quad (11)$$

$$\beta_{FT}^2 = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) \quad (12)$$

따라서 최종 보수시 인적오류의 확률은 로그정규 분포,  $F_T \sim \Lambda(\mu_T, \sigma_T)$ 로 표현되며 그 모수가 비로소 결정되어진다.

### 3.1.3. 최종 결과인 로그 정규분포의 각 모수(Parameter) 계산

전술한 계산과정으로부터 얻어진 값들을 이용하여 최종 인적오류 확률값의 각 모수(Parameter)는 다음 식으로부터 얻어진다.

$$\text{중간 값}(X_{50}) = e^{\mu}, \quad 5\% \text{ 하한치}(X_{05}) = e^{\mu - 1.645\sigma}, \quad 95\% \text{ 상한치}(X_{95}) = e^{\mu + 1.645\sigma}, \quad EF = \sqrt{\frac{X_{95}}{X_{05}}}$$

평균치( $\alpha$ ) =  $X_{50} e^{\left(\frac{\ln EF}{2 \times 1.645}\right)^2}$ . 이러한 계산은 정압기 보수시 인적오류 확률값 외에도 가스히타,

가스여과기, 계량설비, 밸브 등 다른 기기의 보수시 인적오류 평가에 동일한 절차로 계산이 수행되었으며 그 결과는 표 2와 같다.

### 3.2. 시스템 불이용도에서의 인적오류 기여도

시스템의 안전성을 확보하기 위하여 각 부품들은 주기적으로 점검되어야 하고, 필요시 교체되어야 한다. 시스템의 불이용도(Q, System Unavailability)는 보수시 인적오류확률, 부품 고장률, 점검주기, 점검시간 등의 함수이다. 일반적으로 일정 주기 [0, T] 사이의 평균 시스템 불가동 시간 비율이 시스템 불이용도로 정의되며 그 물리적 의미는 시간 t 때에 시스템이 고장(Down) 날 확률을 나타낸다. 따라서 주기적인 점검시간( $\tau_m$ )과 운전시간( $\tau$ )을 모두 포함하는 주기 T 시간 동안 시스템이 고장상태에 있을 시스템 불이용도는 다음 식으로 구해진다<sup>[6]</sup>.

$$Q_{av} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\tau} Q(t) dt + \int_{\tau}^{\tau+\tau_m} Q(t) dt + \dots + \int_{\tau+(n-1)\tau_m}^{\tau+n\tau_m} Q(t) dt \right] \quad (13)$$

$\tau$ : 보수 또는 점검 사이에 시간간격,

$\tau_m$ : 보수 또는 점검에 걸리는 시간.

정압기 시스템(Governor System)은 2개의 Train으로 구성되어 있다. 평상시 한 Train이 사용되다가 이상상태가 발생하면 제어실에서 시그널을 보내어 다른 쪽 Train을 이용하게 함으로써 이상상태를 조절하는 기능을 수행하게 된다. 이때 이 Train이 운전보수상의 인적오류가 있거나, 요구(Demand) 실패, 점검중이었거나 또는 작동중 고장으로 제 기능을 못할 때 정압기 시스템은 고장상태가 되며 즉각적인 비상대응이 없을 경우 사고(Accident)로 이어지게 된다. 이때 연속점검(Sequential Test) 방법으로 보수하는 참조 시스템의 점검주기 T는  $\tau + 2\tau_m$ 이다. 따라서 다음의 세인자,

$Q_d$ : 요구(Demand)시 Train의 기능이 제대로 작동하지 못할 확률,

F1: 첫 번째 Train에서 보수기간중 발생가능한 보수인적오류확률, 그리고

F2: 둘째 Train에서 보수기간중 발생가능한 보수인적오류확률,

를 사용하여 식 (13)를 해석적으로 풀어서 정압기 시스템 불이용도, Q를 다음식과 같이 유도하였다.

$$Q_{\text{정압기}} = F1F2 + 2F1 \left( \frac{\lambda\tau}{2} + Q_d \right) + \left\{ \frac{(\lambda\tau)^2}{3} + Q_d^2 + Q_d\lambda\tau_m \right\} + \left( \lambda\tau_m + 2Q_d \frac{\tau_m}{\tau} \right) + 2F1 \frac{\tau_m}{\tau} \quad (14)$$

이때 시스템 불이용도는 기계고장으로 인한 시스템 불이용기여도와 보수시 인적오류로 인한 시스템 불이용기여도로 다음과 같이 구분(Factorization)시킬 수 있다. 즉,

$$Q_{\text{기계고장}} = \left\{ \frac{(\lambda\tau)^2}{3} + Q_d^2 + Q_d\lambda\tau_m \right\} + \left( \lambda\tau_m + 2Q_d \frac{\tau_m}{\tau} \right) \quad (15)$$

$$Q_{\text{인적오류}} = F1F2 + 2F1 \frac{\tau_m}{\tau} + 2F1 \left( \frac{\lambda\tau}{2} + Q_d \right) \quad (16)$$

보수시 인적오류인 F1, F2는 3.1절에서 이미 평가하였고, 나머지 Data인 Train의 자연 고장률  $\lambda$

와 요구고장률  $Q_d$  등은 IAEA와 IEEE 자료인 참고문헌 [7]로부터 그 값(각각  $1E-7/\text{hour}$ ,  $0.001/\text{demand}$ )을 인용하여 사용하였다. 또한 점검주기  $\tau$ 에 대해서는 참조시스템의 실제 점검주기인 6개월을 사용하였고, 평균 검사 및 보수시간,  $\tau_m$ ,은 최근의 TBM 자료로부터 9시간의 값을 사용하였다<sup>[4]</sup>.

병렬 시스템인 정압기가 보수작업간에 무의존성(ZD)을 가질경우에 대한 인적오류의 기여도는 그림 2와 같다. 전체 시스템 불이용도는  $7.43 \times 10^{-5}$ 였고, 보수시 인적오류로 인한 정압기 불이용도는  $6.75 \times 10^{-5}$ 이었다. 따라서 인적오류 기여도가 기계고장으로 인한 시스템 불이용도의 약 9.8배나 되었다. 정압기의 경우 시스템의 고장은 인적오류로 인한 원인이 기계적 고장보다 상당히 크다는 것을 보여주고 있으며, 이 결과는 일반적으로 인적오류의 위험기여도 기계적오류로 인한 위험기여도 보다 크다는 주장을 뒷받침 하고있다<sup>[8]</sup>.

#### 4. 결 론

본 논문은 PSA (Probabilistic Safety Assessments)의 인간오류 평가도구인 THERP방법론을 이용하여 위험시설물 중의 하나인 개스밸브기지에서의 보수시 작업자의 인적오류를 평가하였다. 참조 시스템의 설비인 정압기, 가스허타, 가스여과기, 계량설비, 밸브 들에 대한 보수시 인적오류를 정량적으로 계산하였으며 아울러 정압기 시스템에 대해서는 기계적 오류에 대한 상대적인 인적오류의 기여도를 평가하여 인적오류의 중요성을 정량적으로 보여주었다. 본 방법론은 원전뿐만 아니라 개스밸브기와 같은 위험시설물의 인적오류 평가에도 유연하게 사용될 수 있었다. 본 논문은 이 방법론이 앞으로 수행될 석유화학 플랜트의 안전성 평가요건인 PSM (Process Safety Management)의 인간오류 평가에도 효과적으로 적용이 가능함을 보여주었다.

#### 참 고 문 헌

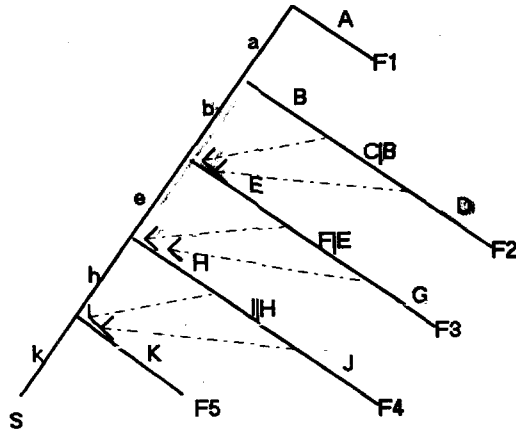
- [1]. A. D. Swain and H. E. Guttman, "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application, "NUREG/CR-1278, 1984.
- [2]. 한국가스공사, 운전 및 보수절차서, 1988. 3.
- [3]. 현대엔지니어링(주), 한국가스공사, 수도권 도시가스 공급간선망 세부설계, 1989. 2.
- [4]. "정비절차서-정압기(PCV)", 한국가스기술공업(주) 서울사업소 기계과, 1995. 9.
- [5]. G. E. Apostolakis, V.M.Bier, and A.Mosleh, "A Critique of Recent Models for Human Error Rate Assessment," Reliability Engineering and System Safety, Vol.22, 1988.
- [6]. G. E. Apostolakis and T. L. Chu, "The Unavailability of Systems under Periodic Test and Maintenance", *Nuclear Technology*, Vol. 50, 1980.
- [7]. IAEA, "Human Error Classification and Data Collection," IAEA-TECDOC-538, 1990.
- [8]. J. Rasmussen, "The Definition of Human Error and a Taxonomy for Technical System Design", New Technology and Human Error, John Wiley & Sons Inc., 1987.

표 1. 참조시스템 정압기 보수시 발생가능한 인간오류에대한 기본확률값

작업 (Task)	기본인적오 류확률값 (BHEP)	수행 특성 인자 (PSF)	인적오류확 률값 (HEP)	EF	자료의 도출근거 [THERP]
A	0.003		0.003	3	Table20-7, Item2
B	0.01		0.01	5	Table 20-6, Item1
C	0.1	MD	0.228	5	Table 20-22, Item 1 (Table 20-17, Eq. 10-16)
D	0.01		0.01	5	Table 20-6, Item 1
E	0.01		0.01	5	Table 20-6, Item1
F	0.1	MD	0.228	5	Table 20-22, Item 1 (Table 20-17, Eq. 10-16)
G	0.01		0.01	5	Table 20-6, Item 1
H	0.01		0.01	5	Table 20-6, Item1
I	0.1	MD	0.228	5	Table 20-22, Item 1 (Table 20-17, Eq. 10-16)
J	0.01		0.01	5	Table 20-6, Item 1
K	0.001		0.001	3	Table 20-11, Item2

표 2. THERP를 이용한 부분별 보수시 인적오류 평가결과

회비종류	HEP	EF
정압기(Governor)	$5.29 \times 10^{-3}$	2.41
가스히터(Heater)	$6.47 \times 10^{-2}$	2.60
가스여과기(Filter)	$1.94 \times 10^{-3}$	2.29
계량설비(Metering Section)	$1.31 \times 10^{-3}$	2.97
전동밸브(MOVs)	$6.36 \times 10^{-5}$	16.2



- A: 정압기 분해점검 (Overhaul)시 작업자의 소손부품 파악실패
- B: 작업자의 보수점검절차서예따른 Pilot Block Valve의 Reopen 실패
- C: 보수팀의 다른 작업자 (QC 작업자)의 Pilot Block Valve Open 상태의 부정확 확인
- D: 매 점검주기마다 작업자의 Valve 및 계기의 정확한 위치확인 실패
- E: 작업자의 보수점검절차서예따른 Outlet Valve 의 Reopen 실패
- F: 보수팀의 다른 작업자 (QC 작업자)의 Outlet Valve Open 상태의 부정확 확인
- G: 매 점검주기마다 작업자의 Valve 및 계기의 정확한 위치확인 실패
- H: 작업자의 보수점검절차서예따른 Inlet Valve의 Reopen 실패
- I: 보수팀의 다른 작업자 (QC 작업자)의 Inlet Valve Open 상태의 부정확 확인
- J: 매 점검주기마다 작업자의 Valve 및 계기의 정확한 위치확인 실패
- K: Leak 유무 점검실패

그림 1. 참조시스템의 정압기의 한 트레인 보수시 인적오류 평가를 위한 HRA Event Tree.

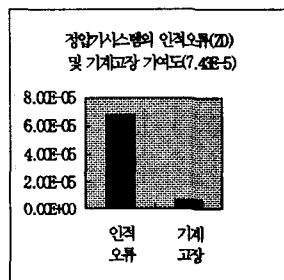


그림 2. 참조시스템의 정압기 보수시 인적오류의 기계고장에 대한 시스템불이용도 기여도.