

화학 산업 시설에서의 인적 오류 분석을 위한 HEP 프로그램 개발

임 차 순 · 박 교 식^{*} · † 고 재 욱

광운대학교 화학공학과

^{*}한국가스안전공사 가스안전시험연구원

(2002년 9월 30일 접수, 2002년 10월 4일 채택)

Development of Human Error Probability Program for Human Error Analysis of Chemical Plants

Cha Soon Im · Kyo-Shik Park^{*} and Jae Wook Ko

Dept. of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul

^{}Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation*

(Received 30 September 2002 ; Accepted 4 October 2002)

요 약

인적 오류(human error)는 공장설비의 설계, 제작, 건설, 운전, 유지·보수의 모든 단계에서 발생할 수 있으며 사고의 대부분이 인적 오류의 영향과 관계되어 있는 것으로 조사되고 있다. 본 연구에서는 현장의 작업자 행동 특성 및 오류 메커니즘을 확인하고, 평가분류 쉬트를 활용하여 공정에서 발생하는 인적 오류를 분석하였다. 또한 ASEP HRA 절차를 이용하여 인적 오류 확률(HEP) 산정 알고리즘을 구축하여 현장에서 쉽게 인적 오류를 분석할 수 있는 ASEP HEP 프로그램을 개발하였다. 이를 이용하여 화학공장에서의 가능한 인적 오류 사고를 예방하고 보다 체계적인 인적 오류 방지대책을 수립할 수 있다고 판단된다.

Abstract - Human errors can take place in all levels that include the design, production, construction, operation and maintenance of plant facilities. It was found that the causes were concerned with the effects of human error. This study verified characteristics of the on-site operators and error mechanism, and used the classifying sheet to analyze human error that occurred in process. Also, by applying the ASEP(Accident Sequence Evaluation Program) HRA(Human Reliability Analysis) procedure, the algorithm to estimate the HEP and the ASEP HEP program to analyze human error in the plant were developed. If it is built in on-site, possible human error incident will be prevented and the systematic human error prevention strategy will be devised.

Key-words : Human Error, Human Reliability Analysis, Human Error Probability

1. 서 론

급속한 산업의 발달에 따른 화학산업 시설의 공정 및 설비의 세분화는 대규모의 잠재 위험성을 증가시키며, 산업현장에서는 인간의

불안전한 행동 및 상태의 잠재위험으로 인한 중대재해 사고의 우려가 더 한층 증가하고 있다. 인적 오류(human error)는 국내·외의 사고사례의 원인을 분석하여 볼 때, 공장 설비의 설계, 제작, 건설, 운전 그리고 유지·보

수의 모든 단계에서 발생할 수 있으며, 사고의 대부분이 직·간접적으로 인적 오류의 영향과 관계되어 있는 것으로 조사되고 있다. 전문가의 의견에 의하면 사고를 유발하는 사람의 실수는 그 개인의 심신상태 또는 부주의에 의한 것이 전체의 10% 정도를 차지하고 있으며, 대부분의 경우 근본적인 인적 오류는 외부적인 요인, 즉, 절차서의 결함, 부적절한 교육·훈련, 규정의 불일치, 의사소통의 문제, 사람·기계 인터페이스의 이해부족, 인력 부족 등 부적절한 작업 조건에 있다고 할 수 있겠다. 따라서 본 연구에서는 산업 시설에서의 작업자의 실수, 오조작 등의 인적 오류 메커니즘에 관한 원인을 분석, 평가하여 인적 오류 분류 코드를 구축하고, 작업자 운전매뉴얼 분석 및 정성적·정량적 분석 방법론에 의한 HEP(Human Error Probability) 평가를 수행하여 작업자에 의한 사고를 체계적으로 예방할 수 있는 인적 오류 분석 프로그램을 개발하였다.

II. 인적 오류 분석

작업자의 인적 오류 분석은 지금까지 정량적인 위험성 평가에 널리 활용되어 왔다. 일반적으로 시스템의 위험성 평가는 이상상태 발생 시에 사고의 진전을 제압하도록 필요한 안전기능 및 시스템이 작동되어야 하기 때문에 사건수목의 구성요소로 시스템의 고장과 작업자의 인적 오류가 배열된다. 인적 오류는 고장수목(fault tree)의 한 요소로서 포함되어 평가되나, 몇 가지 특별한 경우에는 사건수목의 정상사상(top event)의 하나로 취급된다. 어떤 경우이든지 인적 오류는 시스템/부품과 같이 취급되며 관련 인적 오류 확률(Human Error Probability, HEP)이 구하여 질 수 있을 때까지 구분화(decomposition)된다. 일반적으로 작업자의 인적 오류 분석은 먼저 보수적인 값이 할당되어서 먼저 시설물의 사고로부터 예상되는 위험성에 기여한 인적 오류의 영향을 계산하고, 위험성에 대하여 중요한 기여도를 가지는 인적 오류들에 대하여는 상세한 분석이 수행된다.

현재 인적 오류 분석 방법들은 원자력 분야에서 가장 활발하게 개발되었으며, 여러 가지 방법이 사용되고 있다. 특히, THERP와 같은 방법은 상세한 인적 오류 분석을 가능

하게 한다는 장점이 있지만, 그 방법이 복잡하고 전문가의 많은 판단을 필요로 하여 인적 오류 분석을 상당기간 수행한 전문가가 되어야 어느 정도 분석을 제대로 수행할 수 있다는 어려운 문제가 있다. 그래서, 미국 원자력 규제 위원회는 인적 오류 분석을 위해서 THERP와 대응할 수 있는 좀 더 쉬운 분석 절차인 ASEP(Accident Sequence Evaluation Program) HRA(Human Reliability Analysis) 절차를 개발하였다.

ASEP HRA 절차는 비교적 방법이 단순하여 어느 정도 일정기간 교육을 받은 인적 오류 분석자라면 누구나 손쉽게 인적 오류 분석을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 또한 이 방법은 미국의 원자력 규제 위원회에서 원자력 발전소의 정량적 위험성 평가용으로 공식적으로 인정하는 방법으로서 널리 활용되고 있으며, 이 방법론의 단점은 인적 오류 factor들이 단순하여 세부적인 인적 오류 분석을 하기가 좀 어렵다는 점이다.

그러나 인적 오류 분석에 경험이 있는 전문가들도 인적 오류를 구하는 것은 쉽지 않은 방법으로 여러 가지 요인이 존재하며, 불확실성이 존재한다. 따라서 각 영향 요소에 따른 오류를 정량적으로 판단하는 것이 어렵기 때문에 인적 오류의 정확한 정량화된 값을 산출하는 것은 많은 문제가 존재하게 된다. 따라서, 인적 오류 분석을 통한 정량화된 인적 오류 값은 상대적으로 평가, 분석하여 활용하는 것이 중요하다고 할 수 있겠다.

III. ASEP HRA 절차에 의한 HEP 산정

ASEP HRA 절차에 의한 HEP 값은 사건이 발생하기 전의 오류와 사건이 발생한 후의 오류로 분리되어 pre-accident와 post-accident HEP의 합으로 산정된다.

산정 절차에서의 인적 오류 확률은 사건이 발생하기 전보다는 사건이 발생한 후에 일어나는 상황에 따라서 발생하는 오류확률에 더 많은 관심을 갖고, 최종적으로 pre-accident와 post-accident 인적 오류 확률을 더함으로써 total human error probability를 산출할 수 있다. 대부분의 인적 오류 분석이 전문가의 주관적 판단이 필요한 knowledge-based 절차를 통한 평가였지만, ASEP HRA 방법은

몇 가지 중요한 요소들을 선택하여 객관적으로 인적 오류 확률을 산정할 수 있는 rule-based 절차를 사용한다는 장점이 있다.

3.1 Pre-accident 인적 오류 확률 산정

Pre-accident 오류 평가는 아래의 다섯 가지 요소를 고려하여 산출하며, 전체오류확률(Total Failure Probability : Ft)은 각 요소의 곱으로 계산한다.

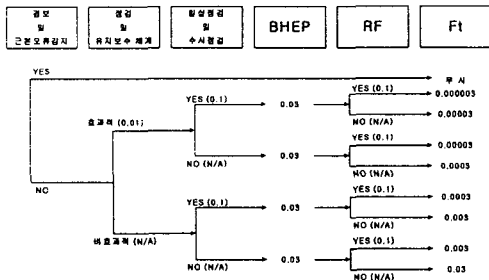


Fig. 1 Procedure of Ft assessment.

1) 경보 및 근본오류감지

시스템에서 경보의 유/무 및 근본오류를 인지하고 있는가를 확인한 후 적용하며, pre-accident에서는 경보 및 근본오류 인지를 하지 못하는 경우를 계산한다.

2) 점검 및 유지보수체제

점검 및 유지보수는 각 시스템별로 그 직무들이 적절히 수행되고 있는가에 따라 값을 반영한다.

- 효과적 : 0.01
- 비효과적 : 계산 값에 반영하지 않음

3) 일상점검 및 수시 점검

일상점검 또는 수시 점검이 이루어지고 있는가의 유/무

- 실시 : 0.1
- 미실시 : 계산 값에 반영하지 않음

4) 기본오류확률(BHEP)

- pre-accident 직무를 정확히 평가하기 어렵고, 공정상의 제어 및 관리가 적절하지 못하여 인적 오류 평가가 어려울 경우 : 0.05
- 공정상의 제어 및 관리가 기본적인 상태일 경우 (대부분의 공정에 적용) : 0.03
- 공정상의 제어 및 관리체계가 적절하게 이루어져 기본적인 상태보다 월등히 안정적인 상태일 경우 : 0.01

5) 복구가능성(RF)

아래와 같은 경우에 0.1의 값을 적용한다.

- checklist를 사용하여 작업을 진행하는 경우
- 주 작업자의 작업완료 후 보조 작업이 시행되는 경우
- 주 작업자가 같은 작업을 다른 시간, 다른 장소에서 수행할 경우

3.2 Post-accident 인적 오류 확률 산정

Post-accident에 대한 인적 오류 산정은 크게 진단 오류, 수행 오류 및 생략 오류 분석의 세 단계로 구분하여 수행한다. 한 직무를 세 단계로 구분하여 분석하는 것은 각 과정에서 발생하는 오류의 유형 및 특성이 다르기 때문이며, 이에 따라 분석방법 역시 달라지기 때문이다.

1) 진단 오류 산정

① 진단여유시간 결정 : 진단 오류 확률은 진단 및 의사결정에 허용된 여유시간의 합수로 표현되며, 아래와 같이 계산한다.

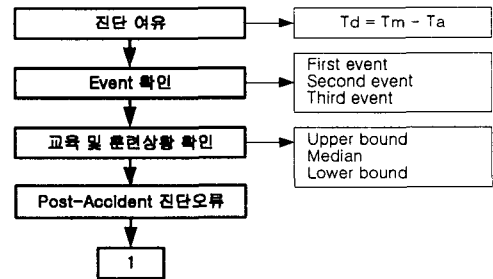


Fig. 2 Post-accident diagnosis error analysis.

- 작업허용시간(Tm) : 비정상적인 사건을 진단하기 위해 평가된 최대 허용시간
- 작업수행시간(Ta) : 진단 및 의사결정이 완료된 후, 물리적,육체적 작업을 수행하는데 필요한 시간
- 진단여유시간(Td) : 정확한 진단 및 의사결정을 위해 평가된 여유시간, 즉 $Td = Tm - Ta$

② Event 확인

- First event : 단순한 하나의 사건발생
- Second event : 복잡한 사건 또는 두 가지 사건이 동시에 일어난 경우와 어

는 정도 시간이 흐른 후 순차적으로 발생 시 (단, 순차적으로 발생 시 미리 알고 있었고 그에 따른 지침서가 있을 시 first event로 간주)

- Third event : 세 가지 이상의 사건이 동시에 발생 시

③ 교육/훈련 정도

- Upper bound (교육 및 훈련 수준 하)
 - 사건에 대한 훈련이 없는 경우
 - 비전문가에 의해 진행되는 경우
 - 인터뷰를 통해 operator들이 사건과 관계된 위험요소를 모두 알지 못하는 경우
- Low bound (교육 및 훈련 수준 상)
 - 이미 많이 알려진 사건이고, 시뮬레이션을 통해서 충분한 훈련이 이루어진 경우
 - 인터뷰를 통해 operator들이 사건과 관계된 위험요소를 파악하고있고, 만약 사건이 발생한다면, 어떻게 행동할지 알고 있으며, 절차서가 있는 경우
- Median (교육 및 훈련 수준 중)
 - 모든 operator들이 단순히 시뮬레이션을 통해서 사건의 성격을 알고 있는 경우
 - 상향 또는 하향조정 조건이 없을 경우

2) 수행 오류 산정

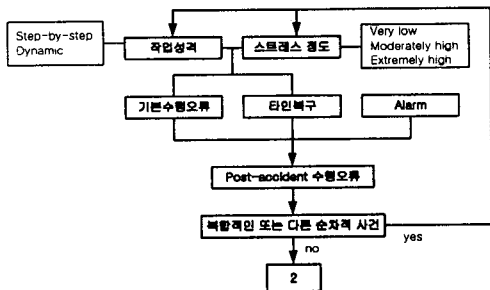


Fig. 3 Post-accident commission error analysis.

① 작업성격

단위작업의 행위조치가 step-by-step 행위인지 dynamic 행위인지를 다음 규칙에 따라 결정한다.

- Dynamic action : 연속적이고 복합적인 정보 관찰과 의사결정을 요구하는 조치 (복잡한 수행절차)
- Step-by-step action : 연속적인 정보관

찰이나 피드백 없이 일련의 절차를 순차적으로 수행하는 조치(단순한 수행절차)

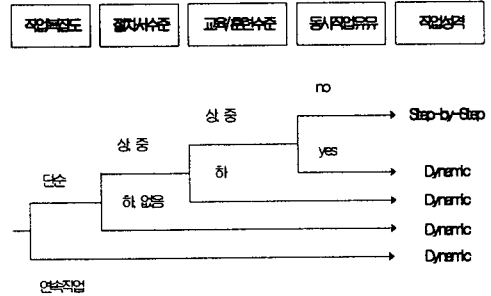


Fig. 4 Decision of characteristics for unit activity.

② 스트레스 수준 결정

작업자가 단위작업 수행상황에서 받는 심리적/육체적 부담감의 정도를 Extremely high, Moderately high, Very low 등으로 구분하여 결정한다. 스트레스 수준 결정에는 '시간 긴급성', '상황 심각성', '작업 위험성', '교육/훈련 수준', '작업경력' 등을 고려한다.

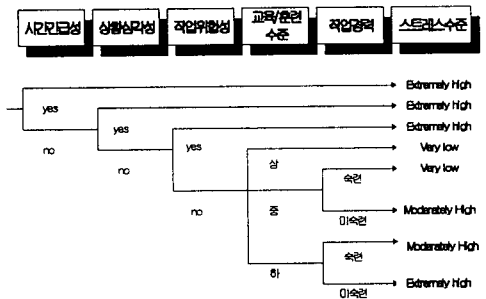


Fig. 5 Decision of stress level.

Table 1. Error value for stress from unit activity.

작업성격	스트레스 수준	기본수행 오류확률	복구 확률
Step-by-Step	Very Low	0.006	0.1
	Moderately High	0.02	0.2
	Extremely High	0.05	0.5
Dynamic	Very Low	0.02	0.1
	Moderately High	0.05	0.5
	Extremely High	0.25	0.5

③ 단위작업별 기본수행 오류확률 산출
작업성격과 스트레스 수준에 따라 Table 1과 같이 기본수행 오류확률을 산출한다.

④ Alarm

Alarm 장치의 수와 Alarm이 울렸을 때 작업자들이 범할 수 있는 수행 오류의 확률 값을 구한다.

⑤ 복합적인 또는 다른 순차적인 사건

하나의 사건에서 다른 사건을 발생시킬 수 있으므로 다음 행동에 관해 비상직무 수행 오류 값을 구해준다. 이러한 반복적인 값들은 실패 또는 성공으로 사건이 종결될 때까지 구하여 각각의 값들을 더함으로써 총 Post-accident 수행 오류 값을 얻을 수 있다.

3) 생략 오류 산정

Post-accident 생략 오류 확률은 다음의 3가지 항목(Table 2, 3, 4)을 선택하여 각각의 해당되는 항목을 선택하면 오류 확률 값을 찾을 수 있다.

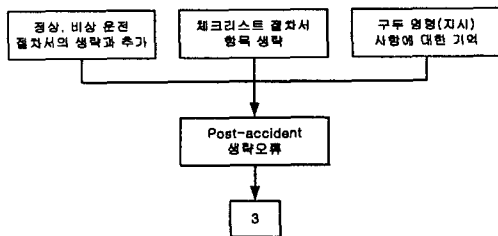


Fig. 6 Post-accident omission error analysis.

Table 2. Human error probability for omission and addition of uncertain item in normal/abnormal operation manual.

Item	Potential Error	HEP
(1)	정상 또는 비상 운전 절차서의 중요한 명령(지시) 사항 또는 단계를 생략하는 경우	0.003
(2)	정상 또는 비상 운전 절차서의 부정확한 항목을 추가하는 경우	0.001

Table 3. Estimated probabilities of errors of omission per item of instruction when use of written procedure is specified.

Item	Omission of Item	IIEP
	1. 체크리스트 절차서를 빠짐없이 정확하게 사용하였을 경우	0.001
	2. 체크리스트 절차서 항목이 생략되어 있거나, 체크리스트 절차서를 부정확하게 사용하였을 경우	
(1)	short list, 목록 5개 이하	0.003
(2)	long list, 목록 5개 이상	0.01
	3. 문서화된 체크리스트 절차서가 유용하게 사용되어야 하는데, 사용되지 않는 경우	0.5

Table 4. Estimated probabilities of error in recalling oral instruction items not written down.

기억해야할 항목 수의 함수로서 HEPs				
Item	구두 명령의 수	구두 명령의 중요성		
		중요하지 않음		중요함
		항목을 기억하지 못하는 경우	모든 항목을 기억하는 경우	모든 항목을 기억하는 경우
		(a)	(b)	(c)
(1)	1	0.001	0.001	0.001
(2)	2	0.003	0.004	0.006
(3)	3	0.01	0.02	0.03
(4)	4	0.03	0.04	0.1
(5)	5	0.1	0.2	0.4

IV. ASEP HEP 프로그램

ASEP HEP 프로그램은 Pre-Accident HEP와 Post-Accident HEP를 산출할 수 있도록 구성되어 있다. 사건 및 사고 전, 후의 경과에 따른 인적 오류 확률을 분석함으로써, 공정의 운전매뉴얼 항목별 상대적인 확률 값을 산출할 수 있다. (Fig. 7, 8, 9)

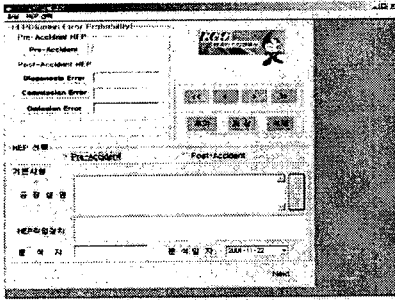


Fig. 7 Captured initial screen of ASEP HEP Program.

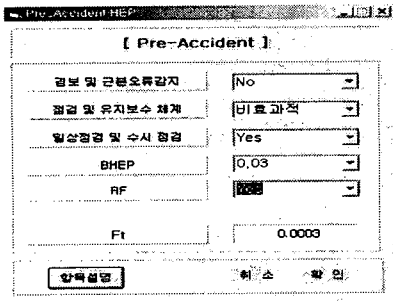


Fig. 8 Screen of pre-accident HEP.

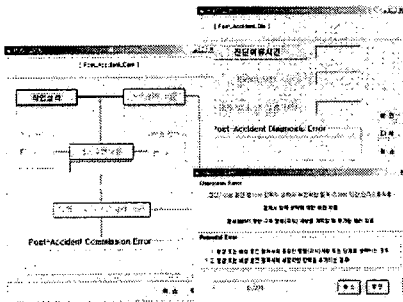


Fig. 9 Screens of post-accident diagnosis, commission and omission error.

또한 상대적인 인적 오류확률 값을 비교할 수 있으므로(Fig. 10, 11), 인적 오류확률 값이 높은 항목별로 인적 오류 예방 및 대책을 강구할 수 있을 것이다.

V. 사례 연구

본 사고 사례에서는 개발한 ASEP HEP

프로그램을 이용하여 LNG 생산 기지의 설비 중에 보수 및 정비의 빈도가 높은 설비에 대하여 인적 오류 확률(HEP) 값을 산출하여 그 상대적 수치의 분석을 통하여 체계적으로 인적 오류의 발생을 예방하고자 한다.

LNG 저장 탱크의 1차 펌프는 액체 상태의 LNG(liguified natural gas)를 용량이 100,000 Nm³인 저장 탱크에 저장한 후 압력을 약 15 kg/cm²로 올려 저압 기화기 및 2차 고압 펌프 등으로 공급하며, 보수와 점검을 위한 취의 및 취부 절차는 다음과 같다.

- 1) 펌프 취의
 - ① 해당 펌프의 ACB draw-out
 - ② LNG 토출 라인의 RV 01/02를 close
 - ③ Casing degassing line의 RVM 15/16 air locking
 - ④ PCVK 03의 상태 점검(setting 3kg/cm³)
 - ⑤ N₂ suction valve를 open하여 N₂ 주입(2시간 이상 충분히 가압)
 - ⑥ Top plate를 분리할 때 casing내를 감압하기 위해 RB 57/66 open
 - ⑦ Top plate를 분리할 때 casing내로 공기가 들어오는 것을 방지하기 위해 N₂를 약간씩 공급한다.
 - ⑧ 펌프 취의 후 casing 내로 빗물이나 공기가 유입되지 않도록 cover plate를 덮어둔다.

HEP결과

※공급처 : LNG 저장탱크 펌프 취부

번호	HEP 발생원인	Pre-Accident HEP	Diagnostic Error	Commission Error	Omission Error	Post-Accident HEP	Total HEP
1	LNG 토출라인 RV 01/02를 close	0.003	0.04	0.02	0.00	0.06	0.123
2	가. 이상물류 ACB OPEN-CU	0.0000	0.04	0.00	0.00	0.04	0.08
3	가. 이상물류 ACB OPEN-CU	0.0000	0.00	0.02	0.00	0.02	0.04
4	PCVK03의 상태 점검(setting 3kg/cm ³)	0.003	0.00	0.02	0.00	0.02	0.04
5	가. N ₂ 주입(2시간 이상 충분히 가압)	0.0000	0.011	0.00	0.00	0.01	0.022
6	가. Top plate를 분리할 때 casing내를 감압하기 위해 RB 57/66 open	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	가. Top plate를 분리할 때 casing내로 공기가 들어오는 것을 방지하기 위해 N ₂ 를 약간씩 공급한다.	0.0000	0.0025	0.00	0.00	0.0025	0.005
8	가. 펌프 취의 후 casing 내로 빗물이나 공기가 유입되지 않도록 cover plate를 덮어둔다.	0.0000	0.0024	0.00	0.00	0.0024	0.0048

Fig. 10 HEP result for separation of LNG storage tank pump.

- 2) 펌프 취부
 - ① 펌프설치 작업을 하는 동안 N₂ 공급
 - ② 펌프설치가 완료되면 N₂ 가압vent 반복
 - ③ N₂ purge가 끝나고 N₂ 밸브 모두 close
 - ④ RV 01/02 open
 - ⑤ RVM15/16 air locking 해제
 - ⑥ ACB draw-in

HEP 결과							
공정명 LNG 저장탱크 용접 작업							
번호	HEP 직립물지	Pre-Accident HEP	Diagnostic Error	Commission Error	Omission Error	Post-Accident HEP	Total HEP
1	작업 전 안전 확인	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
2	작업 중 안전 확인을 하는 동안 작업의 위험성	0.0000	0.0000	0.05	0.05	0.0000	0.0000
3	작업 중 안전 확인을 하는 동안 작업의 위험성	0.05	0.05	0.0000	0.05	0.0000	0.0000
4	작업 중 안전 확인을 하는 동안 작업의 위험성	0.05	0.05	0.0000	0.05	0.0000	0.0000
5	작업 중 안전 확인을 하는 동안 작업의 위험성	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	작업 중 안전 확인을 하는 동안 작업의 위험성	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Fig. 11 HEP result for joining of LNG storage pump.

HEP 프로그램을 이용하여 LNG 저장 탱크 펌프의 취외 절차의 각 단계의 pre-accident HEP 값과 post-accident HEP 값을 구하고, 각 작업 절차에 따라 산출된 total HEP 값의 크기 순서로 다시 배열하여 Fig. 10, 11에 나타내었으며, 결과적으로 각 작업 단계에 대한 상대적인 HEP 값의 높고 낮음을 알 수 있다.

예를 들면, 펌프 취부 작업 시에는 ACB (Air Circuit Breaker)를 draw-out할 때 다른 단계에 비해 HEP 값이 가장 높고 증발 가스를 배출하는 밸브인 RVM 15/16의 구동력을 해제하는 단계에서의 인적 오류 확률이 가장 낮음을 알 수 있다. 각 단계에서의 상대적인 HEP 값을 분석하여 수치가 높은 작업 단계에 대해서 failure safety device를 설치하거나 교육 및 훈련을 시행함으로써 인적 오류의 발생 가능성을 줄이고 안정성을 향상시킬 수 있다.

VI. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 화학 산업 시설에서의 작업자의 실수, 오조작 등의 인적 오류 메커니즘에 관한 원인을 분석, 평가하고 인적 오류 분류 코드를 구축하였다.

둘째, 미국 원자력 규제 위원회에서 제시한 ASEP HRA 절차를 이용하여 인적 오류 확률 산정 알고리즘을 개발하고 국내에서 적용하기 쉽고, 활용 가능한 인적 오류 분석 프로그램을 개발하였다.

셋째, 본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여 각 작업활동의 HEP를 산정해 줌으로써 상대적인 인적 오류 확률 값을 산출하여 인적 오류로 인한 사고의 예방 및 인적 오류 예방을 위한 대책을 강구할 수 있을 것으로 판단된다.

감 사

이 논문은 2001년도 광운대학교 교내학술 연구비 지원 및 한국가스안전공사의 연구비 지원에 의해 연구되었으며 지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] NURGE/CR-4772, "Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure", (1987)
- [2] NURGE/CR-1277, "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application I", (1983)
- [3] NURGE/CR-1278, "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application II", (1983)
- [4] AIChE/CCPS "Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety" CCPS, American Institute of Chemical Engineer New York, (1994)
- [5] AIChE/CCPS "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis" CCPS, American Institute of Chemical Engineer New York, (1989)
- [6] Gavriel Salvendy, "Handbook of Human Factors", John Wiley & Sons, (1987)
- [7] James K. Liming, "Human Error Analysis in the Chemical Process Industry", PLG, Inc.,(1997)
- [8] 한국산업안전공단 산업안전보건연구원, "화학공장의 휴먼에러 방지대책 지침", (1999)