

## 수소 충전소 충전기의 정량적 안전성 평가

이광원<sup>†</sup>, 김태훈\*, 이택홍\*\*

\*호서대학교 안전공학과, \*\*호서대학교 화학공학과

## Quantitative Safety Assessment for Hydrogen Station Dispenser

Rhie Kwang Won<sup>†</sup>, Kim Tae Hun\*, Lee Taeck Hong\*\*

*\*Dept. Safety Engineering, Hoseo University*

*\*\*Dept. Chemical Engineering, Hoseo University San 29-1 Sechul-li Baebang-myun, Chunan-city, Choongchungnamdo, 336-795, Korea*

### ABSTRACT

This study is quantitatively assessing of safety about dispenser of hydrogen station because it is hydrogen energy to efficient safety use. The large leakage of hydrogen gas is the most important accident among others occurrence possibility in hydrogen station. It had written FT by top event and calculated unavailability, m-cutsets, leakage frequency, etc with FTA after each base event collect reliability data by reliability data handbook, THERP-HRA and estimation of the engineering.

**KEY WORDS** : FTA(고장수목분석), dispenser(충전기), hydrogen safety(수소안전), quantitative assessment(정량적 평가), hydrogen station(수소 충전소)

### Nomenclature

$\lambda$  : failure rate  
 $\tau$  : Aggregated time in service, hour

m. cutsets : minimal cutsets  
MFM : mass flow meter  
CCU : central control unit

### Subscripts

ESV : Emergency shutdown valve

### 1. 서 론

수소에너지는 미래의 청정에너지원 가운데 하나로써 지구상에서 가장 풍부하고 공해물질이 배출되지 않는 가장 이상적인 연료이다. 반면 폭발범위가 크고 착화가 용이하며 빠른 화염속도 등의

<sup>†</sup>Corresponding author: kwrhie@office.hoseo.ac.kr

위험성으로 인해 제한적으로 사용되어 왔다. 이러한 수소가스를 안전하게 사용하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있는 가운데 미국, 독일, 캐나다, 일본 등에서 수소 충전소가 설치되고 자동차 연료로 사용되고 있다. 현재 우리나라도 시범적으로 4기 정도의 수소 충전소가 설치되었고 운영할 계획에 있지만 사고 발생 시 수소가스의 폭발 특성상 중대 사고로 이어질 가능성을 배제할 수 없다.

이와 같은 이유로 중대 사고를 미연에 방지하기 위하여 안전성평가가 시행되어야 한다. 본 연구에서는 이미 선행된 정성적 평가기법 중의 하나인 FMEA(Failure Mode & Effect Analysis)를 바탕으로 정량적 평가인 FTA(Fault Tree Analysis) 기법을 사용하여 수소 충전소의 충전기에 대한 안전성 평가를 수행하였다. 이를 위하여 신뢰성 기초 자료를 우선 수집하고 수소 station의 가장 큰 사고라 할 수 있는 대규모 누출사건을 Top event로 FTA기법을 사용하여 분석하였다<sup>1)</sup>.

## 2. 수소 dispenser의 개요

Fig. 1은 충전기의 계통도면, P&ID(Piping & Instrument Diagram)를<sup>2)</sup> 나타낸다. 공정흐름은 Filter를 통해 여과된 수소가스가 SV(Solenoid Valve)를 통하여 인입되며 중앙제어 장치의 제어

하에 SV는 수소가스의 흐름의 유·무를 통제한다. SV 측에서 인입된 수소가스는 MFM(Mass Flow Meter)에 의해 가스의 유량 및 농도를 계측하여 중앙제어부로 신호를 전송한다. 이어서 분리기 및 충전부(노즐)로 전달되고 350 bar의 압력으로 수소 충전이 시작된다. 충전 노즐 내에 3-way SV에 의해 충전 시 발생하는 잔압을 vent 시키게 된다. 중앙제어장치에서는 가스 및 온도 감지기과 MFM, PTX1(압력 트랜스듀서)로부터 신호를 받고 처리하게 된다. 또한 인입되는 유량과 압력 그리고 충전탱크의 잔압 및 충전압력 등을 제어하며, 디스플레이 기능도 담당하고 있다. 안전을 위한 RV(Relief Valve)는 설정된 압력(425.2 bar) 이상이 되면 자동으로 밸브가 열려 배관 및 장치의 파손을 보호한다.

수소 충전기의 주요 부품 및 기능은 아래와 같다.

(1) SV(Solenoid Valve)

수소의 공급측 밸브로서 dispensing system을 위해 이상적으로 수소를 공급 제어 하는 것이 목적이며, power fail 등 비상시 유체의 이동을 신속히 차단하는 기능을 갖고 있다.

(2) MFM(Mass Flow Meter)

배관에 압력 및 온도변화에 따라 얼마만큼의 유량으로 흘러 보내야 하는지를 측정하여 중앙제어부로 신호를 전송한다.

(3) Ball Valve

배관 내 흐름을 신속히 차단한다.

(4) 중앙제어장치

충전기의 핵심적인 부품으로서 시스템 내의 유량, 압력, 가스, 온도를 제어 및 감지한다. 또한 디스플레이 기능도 담당하고 있다.

(5) RV(Safety Relief Valve)

설정 압력 이상이 되면 자동으로 밸브가 열려 배관 및 장치의 파손을 보호하는 기능을 담당한다.

(6) PTX(압력 트랜스듀서)

물리량의 변화 상태를 검출하여 읽기 편한 신호로 변환해주는 기능을 담당한다.

(7) 가스감지기(Gas Detector)

가스 센서에 포함된 위험한 가스들의 감지 기능

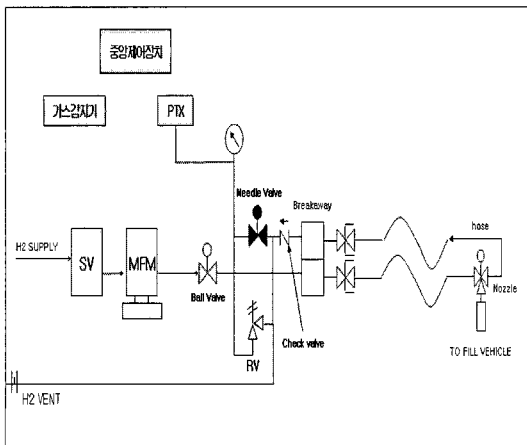


Fig. 1 P&ID of hydrogen dispenser

## 수소 충전소 충전기의 정량적 안전성 평가

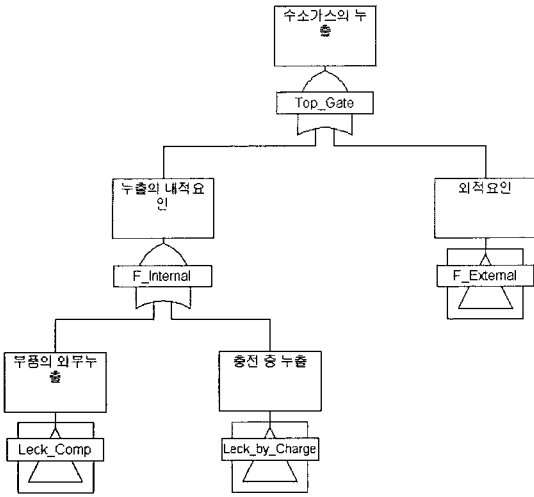


Fig. 2 Fault tree of hydrogen leakage

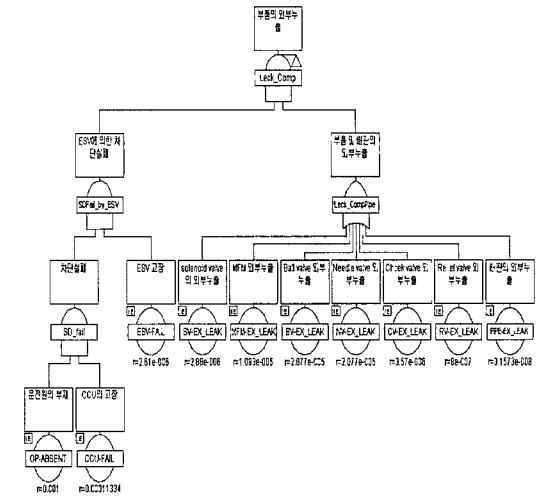


Fig. 4 Fault tree of hydrogen leakage - internal factor (components)

과 누출이 제한된 장소의 산소 수준이 어느 정도 인지를 확인할 수 있는 기능을 담당한다.

### 3. 안전성 평가

수소 충전소에서 발생할 수 있는 사고 중 가장 중대한 사고는 수소가스 누출 및 이로 인한 화재 및 폭발사고라 할 수 있다. 그리고 수소의 누출사고는 누출 시 확산속도 및 누출사고 발생 시의 파

급효과를 고려하여 대규모 누출과 단시간 누출의 두 가지로 구분할 수 있다. 누출 시 정상대응을 하지 못한 누출을 대규모 누출, 그 외의 누출을 단시간 누출로 정의하였다

대규모 수소 누출은 수소가스를 공급하는 노즐 또는 구성 부품의 파손으로 발생하거나, 수소가스 누출 후 수소감지기, ESD(Emergency Shut Down) 등의 작동 불능 및 오작동으로 인해 누출되는 경우

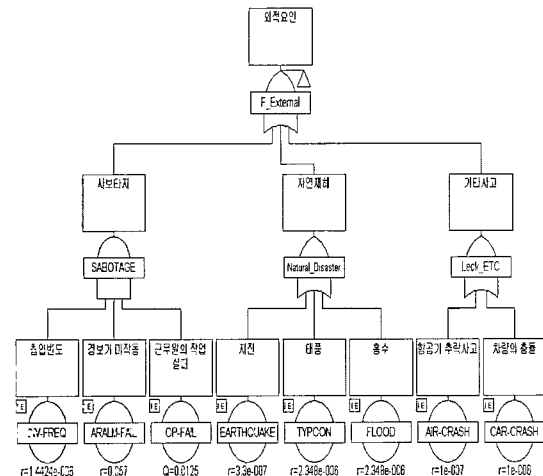


Fig. 3 Fault tree of hydrogen leakage - external factor

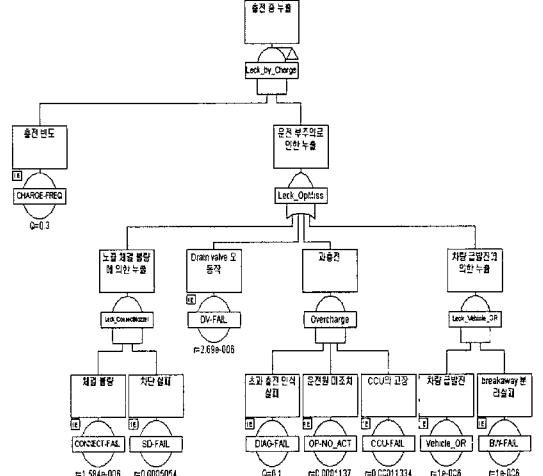


Fig. 5 Fault tree of hydrogen leakage - internal factor (charging)

Table 1 Reliability data of basic events (handbook)

Basic event		$\tau$	n	Failure rate	SD	Reference		
내적 요인	부품 외부 누출	CCU의 고장	0.0128	14	113.34E -06	19.72E -06	Offshore reliability data HB	
		ESV 고장	11.2277	32	2.61E -06	1.88E -06		
		Solenoid valve의 외부 누출	0.3784	1	2.88E -06	3.14E -06		
		MFM 외부 누출	2.2688	25	10.93E -06	9.08E -06		
		Ball valve의 외부 누출	0.0481	1	20.77E -06	20.77E -06		
		Needle valve의 외부 누출	0.0963	2	20.77E -06	20.77E -06		
		Check valve의 외부 누출	0.2083	1	3.57E -06	3.57E -06		
		Relief valve의 외부 누출	1.2482	1	0.80E -06	0.95E -06		
		배관의 외부 누출			3.1573E -09	EF:10		데이터 합성
		외적 요인	충전 중 누출	CCU의 고장	0.0128	14		113.34E -06
Drain valve의 오동작	1.1146			2	4.69E -06	5.37E -06		

등을 의미한다. 단시간 수소 누출은 충전기 내 누출이 발생하였을 때 수소감지기가 누출을 감지하고 ESD 또는 운전원이 비상정지를 한 경우를 뜻한다. 본 연구에서는 설비에 치명적인 영향을 주는 대규모 누출에 대하여 고찰하였다.

### 3.1 FT (Fault tree) 작성

수소 충전기의 대규모 누출사고를 Top event로 하여 FT를 작성하였다. 대규모 누출사고를 Top Gate로 하고 이는 다시 외적 요인과 내적 요인으로 크게 나누었다. 외적 요인은 다시 기타사고, 자연재해, 사보타지(Sabotage)로 나누었다.

기타사고는 항공기의 추락으로 인한 파손이나 차량의 충돌 등을 고려하였으며, 자연재해는 지진이나 홍수, 태풍을 의미하게 된다. 사보타지는 고

Table 2 Reliability data of basic events (engineering decision)

Basic event		Failure rate	Error factor
내적 요인	운전원의 부재	0.01	15
	충전빈도	0.3	SD : 1
	차량급발진	10 <sup>-6</sup>	10
	Breakaway	10 <sup>-6</sup>	5
외적 요인	침입빈도	1.4424 × 10 <sup>-6</sup>	5
	경보기 미작동	5.7 × 10 <sup>-2</sup>	5
	근무원의 작업실패	1.25 × 10 <sup>-2</sup>	10
	지진	3.3 × 10 <sup>-7</sup>	5
	태풍	2.348 × 10 <sup>-6</sup>	5
	홍수	2.348 × 10 <sup>-6</sup>	5
	항공기 추락	10 <sup>-7</sup>	5
	자동차 충돌	10 <sup>-6</sup>	5

의에 의한 누출사고로써 침입빈도와 경보기 미작동, 근무원의 진압실패 등을 고려해야 한다.

내적 요인은 부품의 외부 누출, 충전 중 누출로 나누었다. 부품의 외부 누출은 ESV에 의한 차단 실패와 부품 및 배관의 외부 누출이 동시에 일어나는 경우를 고려하였으며 다시 ESV에 의한 차단 실패는 ESV자체 고장과 운전원의 부재, CCU의 고장을 고려하였다. 부품 및 배관에서의 파손에 의한 외부 누출은 Solenoid valve, MFM, Ball valve, Needle valve, Check valve, Relief valve, 배관의 larger rupture를 고려하였다. 충전 중 누출에서는 충전 빈도와 운전 부주의로 인한 누출이 동시에 일어나는 경우로써 노즐 체결 불량, Drain valve 오동작, 과충전, 차량 급발진에 의한 누출을 고려하였다.

### 3.2 기초사건의 정의

국내에는 아직 수소설비에 대한 신뢰도 데이터가 없어서 “Process equipment reliability data”<sup>3)</sup>, “European industry reliability data bank”<sup>4)</sup>, “Offshore reliability data handbook”<sup>5)</sup> 등의 일반 신뢰도 데이터를 수집 사용하고 데이터가 없는 경우 전문가의 의견으로 대체 하였고 고장률 계산식은<sup>5)</sup> 아래와 같다.

$$\hat{\lambda} = \frac{\text{Number of failures}}{\text{Aggregated time in service}} = \frac{n}{\tau}$$

Table 1은 기초사건 중 handbook에서 얻은 신뢰도 데이터이다.

Table 2는 handbook에서 얻을 수 없는 사건에 대하여 공학적 판단으로 구한 신뢰도 데이터이다.

Table 3은 인간 오류에 해당되는 기초 사건으로 HRA기법을 이용하여 계산된 신뢰도 데이터이다.

### 3.3 FTA 분석 결과

현재 충전기는 상세설계 중에 있으며 본 분석에서는 운전원의 수, 부품의 요구 신뢰도, 외부사건에 대한 가정 등 여러 가지 요인을 가정하여 기초사건의 신뢰도 데이터를 입력하여 분석하였다. 그 결과 Table 4에서 보는 바와 같이 정상사상의 누출빈도는 약 10년의 1번 정도로 나타났다. 충전기 시스템의 비가동도는 0.0931로 나타났고 1년간 기대 고장수는 0.093이다.

기대고장수 값이 높게 나온 이유는 분석에서 사용된 모든 신뢰도 데이터 값은 보수적으로 계산되

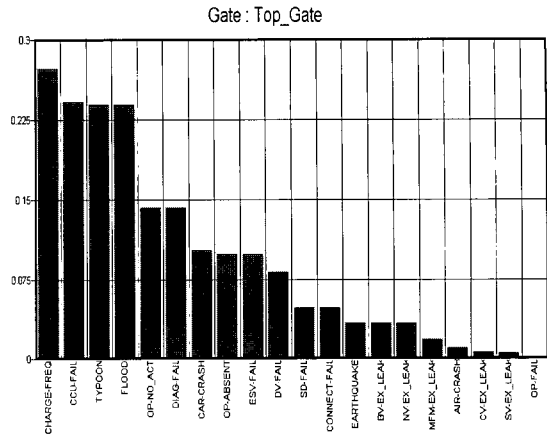


Fig. 6 Fussell - vesely importance analysis

었기 때문이며 모든 누출이 화재나 폭발로 연결되는 것은 아니다. 또한 운전원의 수나 교육, 경험정도 그리고 지역의 특성에 따른 자연재해 가능성의 감소 등은 누출확률을 상당 부분 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

충전빈도가 높을수록 당연히 누출의 위험은 증

Table 3 Reliability data of basic events (HRA)<sup>b)</sup>

Basic event	Failure rate	Error factor
운전원의 미조치	0.0001137	7.57
차단실패	0.0005054	5.67
체결불량	1.584 × 10 <sup>-6</sup>	6.12
초과충전 인식실패	0.1	10

Table 4 Summary - result

Parameter	Point value
Unavailability(Q)	0.0931
Failure Frequency	1.02E-5 per hr
Expected Failures	0.093

Table 5 Gate analysis

Name	Unavailab ility	Failure Frequency	Number Of Expected Failures	Unreliability	Total Down Time	NO. Cut Sets
F_External	5.96E-02	5.78E-06	5.96E-02	5.96E-02	3.01E+02	6
F_Internal	3.56E-02	4.96E-06	3.56E-02	3.56E-02	1.48E+02	11
Leak_by_Ch arge	2.58E-02	2.71E-06	2.62E-02	2.62E-02	1.20E+02	4
Leak_Comp	7.86E-03	2.33E-06	9.60E-03	9.59E-03	2.32E+01	7
Leak_Comp Pipe	4.50E-01	3.29E-05	4.50E-01	4.50E-01	2.47E+03	7
Leak_Conne ctNozzel	1.56E-02	1.60E-06	1.56E-02	1.56E-02	7.29E+01	1
Leak_ETC	1.09E-02	1.09E-06	1.09E-02	1.09E-02	5.48E+01	2
Leak_OpMi ss	8.60E-02	8.71E-06	8.57E-02	8.57E-02	3.99E+02	4
Leak_Vehicl e OR	9.90E-05	1.97E-08	9.90E-05	9.90E-05	3.32E-01	1
Natural_Dis aster	4.90E-02	4.78E-06	4.90E-02	4.90E-02	2.47E+02	3
Overcharge	4.61E-02	4.95E-06	4.59E-02	4.59E-02	2.00E+02	1
Sabotage	1.79E-04	1.78E-08	1.78E-04	1.78E-04	8.97E-01	1
SD_fail	6.78E-01	3.65E-05	6.75E-01	6.77E-01	3.91E+03	1
SDFail_by ESV	1.75E-02	2.66E-06	1.74E-02	1.74E-02	6.59E+01	1
Top_Gate	9.31E-02	1.02E-05	9.30E-02	9.30E-02	4.42E+02	17

Table 6 M-cutsets analysis

No	Cut Set	Unavailability	Frequency
1	TYPOON	2.32E-02	2.29E-06
2	FLOOD	2.32E-02	2.29E-06
3	DIAG-FAIL. OP-NO_ACT. CCU-FAIL. CHARGE-FREQ	1.38E-02	1.49E-06
4	CAR-CRASH	9.95E-03	9.90E-07
5	DV-FAIL. CHARGE-FREQ	7.96E-03	7.86E-07
6	CHARGE-FREQ. ONNECT-FAIL SD-FAIL	4.68E-03	4.80E-07
7	EARTHQUAKE	3.29E-03	3.29E-07
8	OP-ABSENT. CCU-FAIL. ESV-FAIL. NV-EX_LEAK	3.28E-03	7.95E-07
9	OP-ABSENT. CCU-FAIL. ESV-FAIL. BV-EX_LEAK	3.28E-03	7.95E-07
10	OP-ABSENT. CCU-FAIL. ESV-FAIL. MFM-EX_LEAK	1.81E-03	4.47E-07
11	AIR-CRASH	1.00E-03	9.99E-08
12	OP-ABSENT. CCU-FAIL. ESV-FAIL. CV-EX_LEAK	6.13E-04	1.54E-07
13	OP-ABSENT. CCU-FAIL. ESV-FAIL. SV-EX_LEAK	4.96E-04	1.25E-07
14	INV-FREQ. ARALM-FAIL. OP-FAIL	1.79E-04	1.78E-08
15	OP-ABSENT. CCU-FAIL. ESV-FAIL. RV-EX_LEAK	1.39E-04	3.51E-08
16	CHARGE-FREQ. Vehicle_OR BW-FAIL	2.97E-05	5.91E-09
17	OP-ABSENT. CCU-FAIL. ESV-FAIL. PIPE-EX_LEAK	5.51E-06	1.39E-09

대하게 되며, 그 뒤로 CCU가 중요하며 자연재해의 Importance 수치가 높게 나타났다.

게이트 분석에서는 외부적 요인에 의한 누출빈도가 5.78E-06로 내부적 요인에 의한 누출빈도 3.56E-06보다 높게 나타났으며 각 gate별 비가동도와 발생빈도, 기대 고장수, 10000시간당 고장확률, 총예상고장시간, 그리고 게이트별 m-cutset의 수는 아래의 Table 5와 같다.

본 FTA에서는 총 17개의 m. cutsets이 산출되었으며 각각의 비가동도와 고장빈도 값은 Table 6과 같다. 즉 수소가스의 누출 경로를 보면 태풍과 홍수에 의한 경우가 제일 높으며 다음으로는 충전 중 중앙제어장치의 고장과 과충전에 의한 운전원의 미인식과 미조치에 의한 누출 사고 순이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고압 수소 충전기를 이해하고, 이 시스템에서의 수소 누출가능성을 Fault Tree Analysis를 통하여 정량적으로 분석하여 보았다. 이를 위하여 1) Dispenser system의 구조를 이해하고, 수소가스 누출을 Top gate로 하여 FT를 도식하고, 2) 각 기초사건들의 신뢰도 데이터를 문헌에서 찾아 입력하고, 3) THERP 인간실수 분석기법을 통하여 기초사건 중 인간실수 부분에 대하여 정량적 평가를 하여 사용하였으며, 4) m. cutsets 17개를 산출하고 분석하였으며, 5) 각 gate와 기초사건별로 Importance 값을 산출하여 보았으며, 6) 마지막으로 누출의 빈도와 비가동도 등을 계산하여 보았다.

본 연구를 진행하며 고압수소 충전에 대한 운전경험이 거의 없어 기초사상에 대한 신뢰도 데이터 산정에 어려움이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 차후 고압수소 충전과 유사한 CNG 충전 system의 운전 데이터와 기존 문헌 데이터를 2-stage bayesian 기법을 이용하여 합성해야 할 것이다. 또한 ETA(Event Tree Analysis) 기법을 이용한 누출 후 화재/폭발 가능성에 대한 분석 및 민감도 분석을 통하여 각 부품과 운전원 등의 요구 신뢰도 목표설정과 전체 시스템의 risk 관리, Common Course Failure의 고려 등이 향후 연구되어야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 수소·연료전지사업단 지원을 받아 수행되었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 김유탉, 이광원, 백재진, 오신규, 한정민, 김원국, “가스설비의 정량적 안전성 평가”, 산업안전학회, 2000.
- 2) 이광원, 김태훈, 김정근, 한승용, “Steam Reforming 방법을 이용한 수소제조설비의 안전성 평가”, KIGAS, Vol. 9, No. 4, Dec. 2005, pp. 44-49.

수소 충전소 충전기의 정량적 안전성 평가

- 3) Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for process equipment reliability data with data tables", 1989.
- 4) Henri Procaccia, Spyros P. Arsenis, Patrick Aufort, Preface by G.Volta, "European Industry Reliability Data Bank", 1998.
- 5) OREDA, "Offshore Reliability Data Handbook. 3rd edition", DNV Technica, 1997.
- 6) A.D. Swain, NUREG/CR-1278, "Handbook of Human-Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications", 1983.