

주기적안전성평가의 조직요소 정량화 연구

A Study on the Quantification of Organizational Factors in Periodic Safety Review

계무성
한성대학교
서울시 성북구 삼선동 2-389

안남성
한국전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

요약

최근 IAEA가 국제적인 규범으로 가동중인 원전의 안전성을 평가하기 위하여 주기적안전성평가(PSR)제도를 제시하였고 국내에서도 PSR 수행방안 절차서를 개발한 바 있다. 본 연구는 PSR의 한 요소인 조직인자의 정량적인 평가방안을 제시함으로써 이미 착수한 고리 1호기의 PSR요소 가운데 하나인 조직인자의 평가에 기여하고자 하였다.

Abstract

Recently IAEA has issued a safety guidance entitled "Periodic Safety Review (PSR)" to assess the safety of operating nuclear power plants. Based on this guideline, the PSR execution procedures have been developed in Korea. In this paper, the quantification methodology of organizational factors in PSR is suggested. It might contribute to assessing the organizational factor, which is an item of PSR, quantitatively at Kori unit 1.

1. 서론

지금까지 가장 널리 사용되는 원전 안전성의 평가는 설비고장이나 인간오류평가에 제한되어 있었다. 최근에 와서 동일한 유형의 원전에 서로 다른 안전성 평가결과를 통해서 조직(Organization)의 질(Quality)이 설비의 신뢰도와 인적오류정도에 영향을 주고 있으며, 원전의 안전성에 전반적인 영향을 끼친다는 것을 고려하지 않고 있다는 사실이 지적되기 시작하고 있다[1]. TMI 사고는 경미한 설비고장은 있었으나 중요한 사고 원인은 운전원의 오류였다. 훈련량의 부족, 절차서의 불명확성, 주제어실의 설계상의 결함 등이 함께 어우러진 안전문화와 관련한 조직오류(Organizational Failure)였다. Chernobyl사고도 전반적인 관리조절(Management Control)의 부족과 운전원의 부적절한 실험 절차서의 검토, 안전 절차서의 위배 등이 함께 연루되어 발생하였다.

설비의 안전성은 구조적 요인을 고려함으로써 개선되어야 하며 따라서, 조직적 인자가 원전안전성에 중요한 만큼 기존의 원전 안전성 평가방법은 조직적 인자 및 관리 인자를 정량적으로 포함시키기 위해서 모델링, 정보 수집 및 분석, 그리고 정량화 도구를 개발하여야 한다. 이와 관련하여 인적성능(Human Performance)이 사고를 예방하는 중요한 역할을 한다. 지난 수년간 조직인자가 원전의 인적 성능과 나아가서 원전의 안전성에 어떻게 영향을 끼치는가에 대한 이슈가 세계적으로 주목을 받고있는 연구의 대상이 되고 있다[1].

2. 조직인자의 주기적안전성평가

PSR의 조직인자평가는 조직이 원전의 안전에 적절한지를 확인하기 위한 것이다[2]. 이러한 조직의 평가범위는 원전의 조직과 행정이 적절한 사례를 따르고 있는지, 위험요소가 존재하는지 여부를 확인하기 위하여 원전의 조직을 평가하고 관리하여야 한다. 여기에는 안전관리, 조직의 통제, 기술지원, 훈련, 품질보증, 규제나 법령 요건의 준수 등이 포함되어야 하며 첫째, 운전 및 안전목표 설정방법 과 생산성에 우선하는 안전정책 및 이행과 관련한 안전문화, 둘째, 개인 및 그룹의 역할 및 책임, 원전운영의 유기적 구성방법, 외부기술 및 인력(전문가)의 공식적인 고용체제 등과 관련한 조직관리, 그리고 셋째로는 조직 및 관리 실패의 경험반영절차, 직원 훈련 시설 및 계획, QA 계획 및 정규QA 감사, 규제 요건준수, 기준정보 및 운전·보수 이력의 검색 및 감사 기록과 관련한 안전관리로 나누어 지며 이러한 요소들을 모두 포함하여 평가하여야 한다. 조직요소의 단계별 평가절차는 그림 1과 같다.

3. 조직적 인자

주기적 안전성평가를 위한 조직인자에 관한 연구는 위험성평가에 조직인자(Organizational Factors) 및 관리인자를 정량적으로 포함시키는 것에서 시작한다[3,4]. 이를 위해서 먼저 정보수집 및 정량화 도구를 개발하는 것, 각종 제도나 조직이 발전소 운영에 미치는 영향을 재는 정량적인 척도의 개발, 그리고 조직 및 관리 분야의 검사를 할 때 그 합목적성, 일관성, 타당성 등을 파악하고 처방을 할 수 있는 방법론 개발로 요약 될 수 있다. 원전의 안전한 운전을 위한 안전문화(Safety Culture)조성에 중요한 구조적 인자는 크게 조직과 운전원이 가지고 있는 안전지식(Safety Knowledge)의 정도, 직무에 대한 운전원의 자세(Attitude), 경제성과 안전성의 트레이드 오프와 관련한 최고경영자의 발전소 수행목표(Choice of plant performance goals), 책임라인과 의사소통라인(Establishment of lines of responsibility and communication)으로 구분될 수 있다.

3.1 안전지식

운전원은 원전계통, 중대사고현상과 사고결과 등에 대하여 주지하여야 하는 바 원전의 각종 계통설비의 기능을 이해하여야 하고 중요한 Tech. Spec., 즉 Safety Limit초과시의 예상결과 등에 대하여 훈련을 통해서 숙지하고 있어야 하며 정해진 훈련프로그램을 통해 반복교육이 필요하다. Chernobyl 사고는 안전 절차서의 위반누적이 어떤 결과를 초래하는지에 관하여 운전원 인식부족으로 발생한 인적오류가 기인한 사고였다[4]. 따라서 운전원의 안전지식(Safety Knowledge)이 매우 중요하다.

3.2 작업자세

1987년 미국의 Peach Bottom-3 원전에서는 USNRC로부터 Cold Shutdown 명령을 받았다. 몇 번에 걸쳐 운전원이 운전 중에 취침을 하는 위반사항이 적발되었고, 심지어 감독자(Supervisor)의 묵인 하에 자리를 지키지 않은 때가 있었기 때문이었다. 이처럼 원전운전 시에 일상적이고 지루한 환경이 조성됨으로써 느슨해지는 작업자세(Attitude Toward Plant Operation)를 가질 수 있고 이러한 태만하고 부주의한 자세를 가지는 운전원 그룹은 사고 시 원전을 정상 상태로 환원하기 힘든 상황을 초래할 가능성이 매우 크다.

3.3 운용목표의 선정

1985년 미국 Davis Besse 원전에서는 증기발생기로 주입되는 모든 보충수가 공급 중단되어서 증기발생기가 노출(Dryout)되는 사고가 발생되었다. 비상운전 절차서 상으로는 운전원이 Feed-and-Bleed를 수행하여 잠열을 제거시켜야 하는데 감독자는 장기적인 제염(Clean-up)과 이에 따르는 경제적 손실을 고려하여 운전원이 아무런 조치를 취하지 않는 가운데 보조급수계통만 회복되기를 기다렸고 급기야 노심 손상을 가져왔다. 감독자는 언제라도 Feed-and-Bleed가 성공적으로 수행가능 하다고 판단하는 오류를 범함으로써 적기(Timing)를 놓치게 되었다. 이처럼 상위의 조직(Higher organizational level), 즉 최고 경영자가 원전의 운용목표(Choice of Plant performance goals)를 경제성에 우선을 두느냐 아니면 안전성확보에 더 치중하느냐에 따라 운전원의 판단과 처치에 직접 영향을 준다.

3.4 책임과 의사소통라인

명확한 책임과 의사소통라인(Lines of Responsibility and Communication)의 구성은 원전 안전 운전에 매우 중

요하다. NUREG-1150 참조원전인 미국의 Peach Bottom Plant에서 운전원이 운전 중에 잠잘 때에 원전의 매니저는 그 사실을 파악했어야 하고, 혹은 알고있었지만 묵인하여 어떤 조치도 취하지 않았다. 의사소통은 직접 face-to-face로 하는 것이 가장 효과적이지만 작업자는 구두지시에 불편한 경향이 있다. USNRC보고에 의하면 Turkey Point Plant는 구두보다 문서로써 주로 의사소통을 하며 감독자는 직접 관찰하고 감독할 충분한 시간을 가지지 못하므로 결국 의사소통에 취약한 원전으로 평가되고있다. 이러한 안전문화의 환경은 조직의 품질에 의하여 그 특성이 결정된다. NOMAC(Nuclear Organization and Management Analysis Concept)개념에 의하면 일반적으로 원전조직은 최고경영자(Strategic Apex), 경영자(Middle Line), 운전그룹(Operating Core), 기술그룹(Technostructure), 그리고 행정보조원(Support Staff)의 5가지 Hierachy 구조를 가지고 있다.

4. 조직적 요소가 인적오류에 미치는 영향

조직적 요소는 운전원의 의도형성(Intention Formation)과 의도수행(Intention Execution)의 두 측면으로 인적 오류에 영향을 미친다. 의도형성은 주어진 상황에서 어떤 행위가 적절한지를 진단하고 결정하는 인지행위(Cognitive Activities)를 말하고, 의도수행은 결정된 조치를 수행하는 행위(Activities)를 의미한다. 의도형성의 인지행위는 지각장소(Conscious Workspace)와 Knowledge Base로 세분된다[Reason, 1988]. 지각장소는 인지 시스템이 센서를 통하여 외부와 KB로부터 입력을 받고 KB는 특별한 상황에 대처했던 이전의 경험들을 저장함으로서, 인지와 행위의 자동조절을 위한 것으로 이용된다. 저장된 정보를 선별하기 위하여 위에서 기술한 조직의 네가지 요소는 유사사건의 유추집작(Similarity Matching)과 다중발생사건에 대한 유추집작(Frequency Gambling) Mechanism이 바로 조직요소에 의하여 영향을 받는다[5-9].

심리학자인 Reason은 SM이 저장된 정보구조의 속성과 현실의 상태사이에서 유사성을 결부시키는 메카니즘이고 FG는 과거에 자주 이용되었던 것을 선호해서 부분적으로 결부되는 조직요소들 사이에서 모순을 해결하는 메카니즘이라고 정의한다[10-16]. 즉, 조직적 요인은 Similarity Matching과 Frequency Gambling에 근거한 속성과 저장된 정보(Knowledge Base)에 크게 영향을 미칠 수 있으며 가령 안전정보(Safety Knowledge)에 역점을 두는 조직은 비상시에 충분한 정보(Solid Knowledge)를 가지는 운전원을 양성하기 원한다. 지식이 충분치 못한 운전원은 Similarity Matching을 위한 적은 표준패턴(Standard Pattern)을 가지므로 사고 시에 주어진 상황에 대해서 유사모듈을 발견하기가 어려우므로 연결이 가능할 때 까지 Similarity Matching을 연기하다가 보면 Frequency Gambling을 이행하게 된다. 만약 운전원이 Frequency Gambling을 하게 되면 자기에게 가장 친숙한 추론을 하게 되는데 불확실하고 불안정한 추론을 할 수도 있는 것이다. 즉, 최고경영자가 운용목표를 안전성 보다 경제성에 역점을 둘 때 Frequency Gambling의 결과는 Davis Besse Plant에서의 경우처럼 원전의 안전성을 선호하지 않으려고 하는 쪽으로 기울 것이다. 또한 운전원이 사고경위에 대하여 더 많은 정보가 모여지고 사고 경위가 파악될 때까지 기다리다가 Similarity Matching을 연기할 수 있으며 이 경우에 적절한 시간(Timing)과 수단(Resource)을 놓치고 회복할 수 없는 중대한 사고를 초래할 수 있다. 의도수행(Intention Execution)시에도 절차서가 명확하고 쉽게 썩여 졌는가, 운전원이 잘 훈련되어 있는가 하는 등의 조직적 요인에 당연히 영향을 받는다.

5. 조직적 요소가 시스템의 신뢰성에 미치는 영향

비상시 사용되는 공학적 안전 설비는 주로 대기상태(Stand-By)에 있다. 필요시 제대로 작동하기 위해서는 주기적인 검사(Periodic Test)를 받아야 하고 필요하면 보수(Repair)도 해야한다. 시스템의 비신뢰성에 유지, 보수를 고려하면 시스템불이용도가 도출된다. 시스템 이용 불능도 q_{dav} 는 다음 식과 같이 정의된다.

$$q_{dav} = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt \text{ -----(1)}$$

단일시스템의 평균이용불능도는 점검주기(STI)와 테스트시간, 인적오류, 요구고장의 신뢰도 값을 대입하면 식(1)은 다음과 같이 유도된다.

$$Q_{av} = \frac{\tau_r}{\tau} + \gamma_0 + Q_0 + \frac{1}{2} \lambda_n \tau \text{ -----(2)}$$

즉, 식(2)의 각 항은 실험기여도 부분과 ,인적오류기여도 부분, 그리고 요구고장 기여도, 임의사고 기여도로 구분된다. 여기서 각 파라메타의 간략한 설명은 다음과 같다.

- τ: 점검주기(Surveillance Test Intervals)
- τ_r: 실험지속시간
- γ₀: 실험중 배열실패나 원상회복실패 등 인적오류률
- Q₀: 요구시 실패확률
- λ_n: 임의고장률

따라서 경영 또는 조직 요소는 평균이용불능도에 영향을 준다. 왜냐하면 Q_{av} 가 공통적으로 절차서의 질(Quality of Procedures), 운전의 질(Quality of Plant Operation)과 보수의 질(Quality of Maintenance)에 영향을 주며, 전체적으로 조직/관리에 의하여 신뢰성이 평가된다. 즉, 보수의 질은 파라메터 τ, τ_r, γ₀, Q₀, λ_n에 동시에 영향을 끼치고, Q₀와 γ₀는 운전팀의 질(Quality of Operation Team)에 영향을 받는다. 마찬가지로 조직요소의 품질이 n-out-of-m의 리턴던트 시스템에도 동일하게 적용된다.

6. 조직 요소가 초기사건발생빈도에 미치는 영향

초기사건과약과, 사고경위의 표본공간(Complete Set)관련한 Issue는 지금도 중요한 문제 중의 하나이다. 현재의 PSA방법론은 Chernobyl과 같은 초기사건 발달을 고려하지 못하고 있다[4]. 이러한 초기사건으로 야기되는 사고는 기타 초기사건(Other Initiating Events)에 포함하여 분류한다고 할때, 건전한 조직(High Quality of Organization)은 기타 초기사건의 발생 빈도는 낮추어 반영하고, 취약한 조직의 원전에서는 조직적 오류와 관련한 초기사건에 대해서는 자세한 분석을 수행함으로써 구조적 인자가 초기사건 규정에 미치는 영향을 정량적으로 반영하여야 할 것이다.

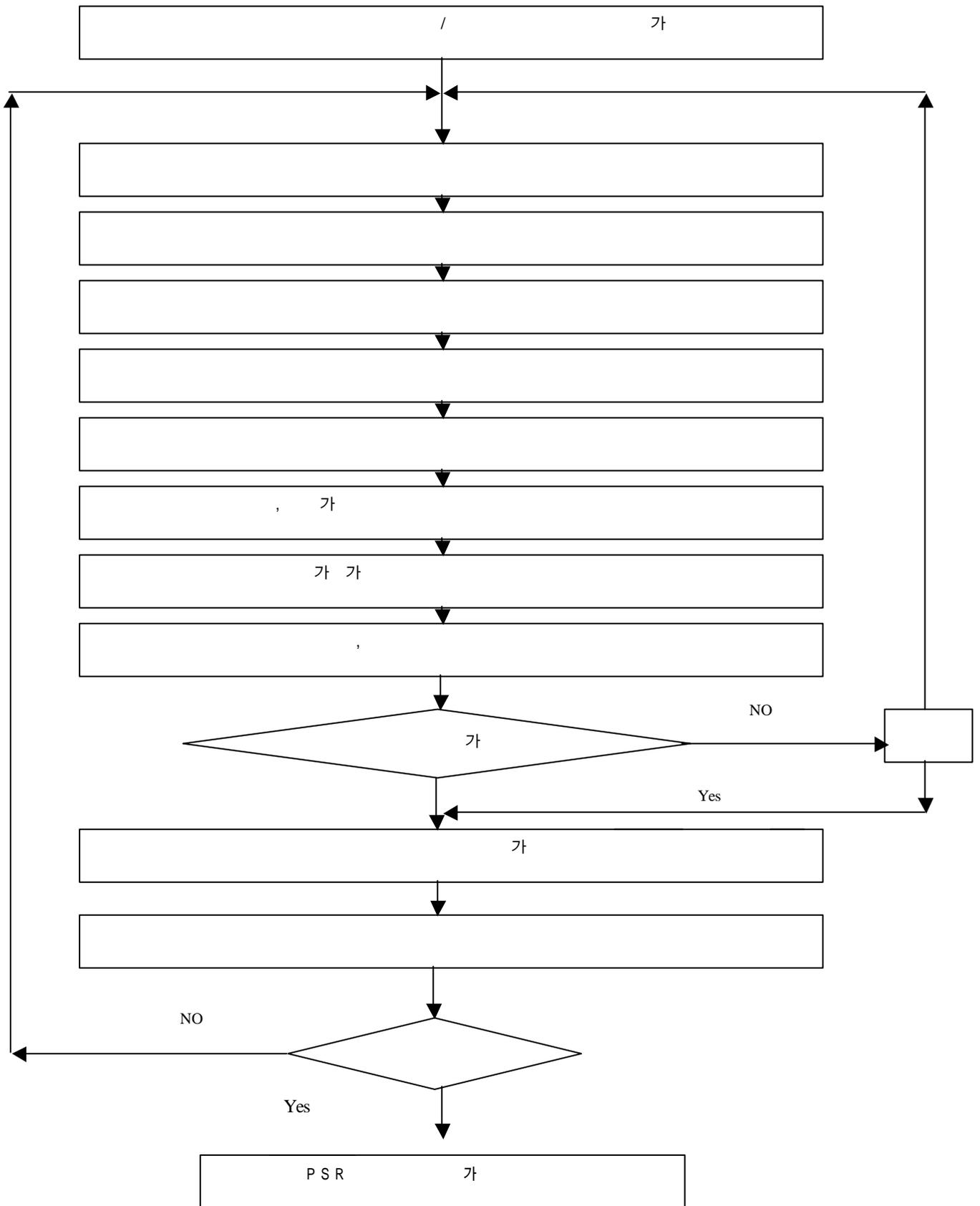
7. 결론

조직이 발전소의 안전한 운영에 영향을 미친다는 것과 Probabilistic Risk Assessment에 조직적 인자 및 관리 인자를 정량적으로 포함시켜야 하는 필요성을 정리하였다. 모든 원전에 대하여 주기적안전성평가(PSR)의 필요성이 대두되었고 이미 고리1호기는 PSR을 수행 중에 있다. PSR의 두 요소인 안전성평가와 조직인자평가는 원전의 안전성확인에 매우 중요하다. 따라서 위험성평가에 조직적인자 및 관리 인자를 정량적으로 포함시키기 위해서는 최신정보수집, 방법론 개발, 관련 요소별 세부모델개발 등 이 매우 필요한 상황이다. 또한 각종 제도나 조직이 발전소 운영에 미치는 영향을 재는 정량적인 척도의 개발과 조직 및 관리 분야를 검토할 때 그 합목적성, 일관성, 타당성 등을 파악하고 처방을 할 수 있는 방법론 개발이 수행되어야한다. 그러므로 PSR의 차질없는 수행을 위하여 사업자, 규제기관, 연구기관이 상호 협력하며 긴밀한 연구수행체제를 갖추고 국제적 연구동향을 분석함으로써 체계적으로 조직인자의 연구가 활발히 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. S. Haber, etc., "Influence of Organizational Factors on Performance Reliability," BNL, NUREG/CR5538, 1991.
2. 황일순, 제무성 외 18인, "가동중 원전 주기적안전성평가(PSR) 수행방안연구," 한국전력공사, 2000.
3. G. Apostolakis, etc., "Inclusion of Organizational Factors into Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants," 5th Conference on Human Factors and Power Plants, Montrey, CA, 1992.
4. G. Apostolakis, etc., "On the inclusion of Organizational and Managerial inferences in Pribabukustuc safety Assessnepts of Nuclear Power Plants," Unpublished Paper, 1998.
5. J. Reason, "Human Errors," Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990.

6. J. Reason, "Types, Tokens and Indicators," Proceedings of the Human Factors Society 34th Annual Meeting, 1990.
7. J. Wreathall, tec., "An Observation on the Human Performance and Safety: The Onion Model of Human Performance Influence Factors," Proceedings of PSAM '91, Beverly Hills, CA, 1991.
8. J. Rasmussen, "Then Definition of Human Error and a Taxonomy for Technical System Design", New Tecgbikigt abd Human Error, John Wiley & Sons Inc., 1987.
9. J. Reasan "Modelling the Basic Error tendencies of Human Operators", Reliability Engineering and System Safety, Vol 22, 1988.
10. D. Wood and E. Roth, "Modelling Human Intention Formation for Human Reliability Assessment" , Reliability Engineering and System Safety, Vol.22, 1988.
10. A. D. Swain and H. E. Guttman, "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application, "NUREG/(R-K)8, 1984.
12. D. E. Embery, "SLIM-MUD; An Approach to Assessing Human Error Probabilities Using Structured Expert Judgement, "NUREG/CR-3518, 1984.
13. E. M. Dougherty, Jr, Human Reliability Analysis-where should you trun?", Reliability Engineering and System Safety 29, 1990.
14. 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.
15. G. W. Hannaman, "Human Cognitive Reliability Model for PRA Analysis, "NUS-4531, Nuclear Utility Service Crop., 1984.
16. P. C. Cacciabue, "Cognitive Modelling; A Fundamental Issue for Human Reliability Assessment Medodology", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 38, 1992.



1. 가