

사고관리 방안의 정량적 평가 방법론 및 공동범람 방안 평가

김재환, 유동한, 서균렬
한국원자력연구소

요 약

이 논문은 원자력발전소의 중대사고를 중지 또는 완화시키기 위하여 제시된 사고관리 방안의 실현가능성을 평가하기 위한 새로운 방법론을 소개하고 있다. 이 방법론은 사고관리 방안의 수행실패 요인으로 운전원 진단 및 의사결정 오류, 운전원 수행오류, 관련 기기 실패로 인한 오류, 수행지연으로 인한 오류 등으로 나누고, 각각에 대하여 평가 방법을 제시하였다. 운전원 진단 및 의사결정 오류 평가시 고려하여야 할 주요 인자들을 제시하였으며, 수행지연으로 인한 오류 평가시에는 시스템 가용시간과 방안 수행 소요시간을 정의하고 각각에 대한 분포 획득 방법과 이를 이용한 평가 방법을 제시하였다. 제시된 방법론을 영광 3.4호기 공동범람 방안의 평가에 적용하였다.

1. 서 론

사고관리 방안은 현상학적 및 실현가능성 측면에서 평가되어야 한다. 현상학적 평가는 방안의 효과 및 부작용의 발생 여부 등을 실험 및 해석을 통하여 현상학적으로 평가하는 것이며, 실현가능성의 평가는 방안의 실현과 관련된 인적 자원 및 관련 기기, 정보의 가용성을 평가하는 것이다. 이 논문은 원자력발전소 사고관리 방안의 실현가능성을 평가하는 방법론을 다루고 있다. 방안의 실현가능성 평가는 방안수행을 위해 허용된 시간내에 운전원들이 주어진 기기 및 장비를 이용하여 방안을 성공적으로 완료시킬 수 있는지의 가능성을 확인하는 것이다. 방안의 성공 여부는 크게 운전원 오류와 관련 기기 오류로 분류될 수 있다. 기존의 확률론적 안전성평가(PSA) 방법론에서는 운전원의 행위 분석을 위한 시간체계와 기기 작동과 관련한 시간체계를 시스템 분석을 통하여 서로 분리하여 다루었다. 즉, 운전원 행위 분석을 위한 시간체계는 열수력 분석을 통하여 얻은 전체 시간체계중 기기의 성공기준을 만족시키는 시간을 할당한 후 결정하게 된다. 또한 운전원에게 주어진 총가용시간을 진단을 위한 시간과 수행을 위한 시간으로 일정한 값(Point Value)으로 분리하여 다루고 있다[1]. 현재 PSA에서 사용되고 있는 주요 인간신뢰도분석(HRA) 방법론인 THERP[2], ASEP[3], HCR[4], HCR/ORE[5] 등에서는 주어진 시간관계곡선(Time Correlation Curve)과 최종적으로 얻은 운전원 진단 가용시간을 이용하여 인간오류확률을 추정한다. 그러나, 노심손상사건 발생 이후의 중대사고에서는 현상에 대한 불확실성으로 인하여 사고관리 방안 수행을 위한 가용시간이 일정값으로 주어지기보다는 불확실성을 고려한 분포로 나타내어야 한다. 또한 주어진 방안의 성공 가능성 평가는 운전원 대처능력과 관련 기기의 수행능력을 서로 분리하여 다루는 것이 아니라 전체적인 시간체계내에서 연속적으로 다루어져야 한다. 참고문헌 [4]는 사고관리 방안 수행을 위한 전체 가용시간을 현상학적인 불확실성을 고려하여 분포로 구해냈으며, 전체 가용시간중 기기 작동시간을 제외한 운전원 가용시간과 실제 방안을 수행하는 데 소요되는 운전원 반응시간을 비교하여 평가하였다. 본 논문에서 제시하는 방법론은 사고관리 방안의 수행실패 요인으로 운전원 진단 및 의사결정 오류, 운전원 수행오류, 관련 기기 실패로 인한 오류, 수행지연으로 인한 오류 등으로 나누고, 각각에 대하여 평가 방법을 제시한다. 제2장에서 이와 관련한

방법론을 구체적으로 설명하였으며, 제3장에서는 제시된 방법론을 공동범람 방안에 평가에 적용하였다. 제4장에서 방법론의 적용결과에 대한 평가 및 결론, 그리고 추후 연구내용을 제시하였다.

2. 방법론

원자력발전소의 사고관리 방안 수행은 그림 1에서 제시된 것처럼 발전소에서 이상징후가 나타날 때 운전원은 그 원인과 사고진행 상태를 진단하고 사고관리 방안에 대한 의사결정을 하게 된다. 방안 수행에 대한 의사결정이 이루어지면 적절한 시점에서 운전원의 조치행위가 수행되고, 관련 기기가 작동을 시작하여 발전소 중대손상사건(예, 노심 손상, 노심 낙하, 원자로 용기 파손, 격납건물 파손 등)이 발생하기 전에 모든 방안이 완료되도록 한다. 이와 같은 사고관리 방안 수행은 그 수행 특성과 관련하여 일반적으로 두가지 형태로 구분할 수 있다(그림 1). 형태 A와 같은 사고관리 방안 수행 형태는 이상 징후가 발생했을 때 방안 수행시기와 관련된 한계 시점(Plant Limit)이 주어지지 않은 상태에서 중대손상사건을 방지 및 완화하는 방안을 완료시키는 것을 나타내고, 형태 B는 이상 징후 발생 후 한계 시점에 이르기까지 운전원의 진단행위가 이루어지고, 한계 시점에 이르렀을 때에 관련 조치행위가 수행되는 것을 나타낸다.

사고관리 방안 수행 실패 확률(Non-success Probability)과 관련된 요소는 그림 2에서 도시된 것처럼 몇가지 경우로 구분할 수 있다. 첫째, 운전원이 감지(Detection), 진단(Diagnosis), 의사결정(Decision-making)을 올바르게 형성하지 못할 경우(P_{Fd}), 둘째, 운전원이 사고진단 및 의사결정은 제대로 했지만 수행 실패할 경우(P_{Fa}), 셋째, 관련 기기가 요구시(On Demand) 혹은 가동중(During Operation) 실패할 경우(P_{Fs}), 넷째, 운전원 진단 및 의사결정, 수행, 그리고 관련 기기가 수행되지만, 주어진 가용시간내에 방안을 완료하지 못할 경우(P_{Fr})로 각각 나눌 수 있다. 4가지 경우에 대한 발생확률을 각각 P_{Fd} , P_{Fa} , P_{Fs} , P_{Fr} 이라 정의하면 전체 사고관리 방안 수행 실패 확률, P_{NS} 은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_{NS} = P_{Fd} + P_{Fa} + P_{Fs} + P_{Fr} \quad (1)$$

각 경우의 발생확률은 다음과 같은 방법으로 추정할 수 있다.

- P_{Fd} : 운전원이 사고관리 방안을 수행하기에 앞서 발전소의 상태 진단 및 방안 수행에 대한 의사결정 단계에서의 운전원 오류확률을 의미한다. 이 확률을 추정하기 위해서는 먼저 운전원의 올바른 진단 형성 및 의사결정에 영향을 미칠 수 있는 주요 영향인자들 (Influence Factors)을 파악하고, 이들 영향인자들이 운전원의 진단 및 의사결정에 미치는 영향을 모델링하여야 한다. 대표적인 영향인자들에는 계측기의 가용도, 운전원들의 중대사고 현상에 대한 지식 정도, 관련 절차서 유무, 운전원 스트레스 정도, 훈련정도, 구성 조직, 진단 및 의사결정 지원 시스템 유무, 가용 시간 등이 있다. 현재 인간신뢰도분석 방법론중에 이러한 모든 영향인자들을 고려하여 평가할 수 있는 모델은 없으며, 추후 연구가 수행되어야 할 것으로 본다.
- P_{Fa} : 운전원이 진단 및 의사결정을 올바르게 형성한 후 방안 실행 단계에서의 오류확률을 의미한다. 실행오류에 기인하는 요소에는 스트레스, 훈련, 제어실 설계, 절차서 등이 있으며, THERP/ASEP으로 평가 가능하다.
- P_{Fs} : 운전원이 방안과 관련된 기기를 작동시켰을 때 관련 기기의 고장 확률을 나타낸다. 고장모드는 요구시 고장(Failure on Demand)과 운전중 고장(Failure during Operation)으로 나눌 수 있다.
- P_{Fr} : 주어진 전체 가용시간(Plant Time Window)내에 사고관리 방안을 완료시키지 못할 확률이다. 이 확률은 방안 수행에 소요되는 총 방안수행시간이 전체 가용시간보다 클 비율 계산함으로써 얻어진다. 여기서 전체 가용시간은 열수력 분석을 통해 어떤 방안도 수행되지 않았을 때 기준사건인 중대손상사건이 발생하는 시점까지의 시간을 나타낸다. 중대사고에서는 현상에 대한 불확실성이 존재하므로 전체 가용시간에 대한 분포를 얻는 것이 바람직하다. 총 방안수행시간은 운전원의 반응시간(진단시간+수행시간)과 관련 기기의 작동모드에 따른 소요시간의 합으로 얻을 수 있다. 즉,

총 방안수행시간에 대한 분포(f_{Tr})는 운전원의 진단시간 분포(f_{Td}), 수행시간 분포(f_{Ta})와 시스템 작동시간 분포(f_{Ts})로부터 얻을 수 있다.

위의 설명을 간단히 정리하면 다음과 같은 순서로 P_{Fr} 을 계산할 수 있다.

1. MAAP과 같은 중대사고 분석코드를 이용해 전체 가용시간에 대한 분포(f_{Tw})를 얻는다. (분포 형태는 Weibull 혹은 Lognormal 분포로 적절히 취한다.)
2. 운전원의 진단시간 분포(f_{Td}), 수행시간 분포(f_{Ta}), 시스템 작동시간 분포(f_{Ts})를 구하여 총 방안수행시간 분포(f_{Tr})를 얻는다.
3. 다음식을 이용해 P_{Fr} 을 계산한다[5,7].

$$\begin{aligned}
 P_{Fr} &= \Pr(T_r > T_u) \\
 &= \int_0^{\infty} f_{Tu}(t)[1 - F_{Tr}(t)]dt \\
 &= \int_0^{\infty} f_{Tr}(t)F_{Tu}(t)dt
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, $Tr = Td + Ta + Ts$, f_{Tw} : 전체 가용시간의 확률밀도함수, f_{Tr} : 총 방안수행시간의

확률밀도함수, F_{Tw} : 전체 가용시간의 누적분포함수, F_{Tr} : 총 방안수행시간의 누적분포함수이다.

한편, 형태 B와 같은 방안수행의 평가에서는 운전원에게 주어진 진단 및 의사결정 가용시간을 한계시점(Plant Limit)까지로 가정하고, HRA Handbook[2]에 주어진 진단오류곡선을 이용해 간단히 평가할 수도 있다. 이 경우, $Tr = Ta + Ts$ 이고 Tw 는 한계시점부터 중대손상사건 발생시점까지로 재정의하여 P_{Fr} 을 구할 수 있다.

3. Application

제시된 평가 방법론을 영광 3.4호기 전원상실사고시 격납건물 살수계통(CSS)을 기동시켜 원자로 공동을 범람시키는 사고관리 방안의 실현성 평가에 적용하였다. 이 방안은 원자로 용기 파손 방지를 위한 목적으로 수행되어진다. 운전원이 노내 온도계측기인 노심출구 온도계측기(Core Exit Thermocouple)를 이용하여 노심 노출(Core Uncovery)을 감지하고 CSS를 기동시켜 공동을 충수시킨다. 이 방안의 수행을 위하여 전원이 노심 노출 발생 이전에 회복된다고 가정하였다. 현재 참조 발전소에는 이 방안과 관련한 절차서가 마련되어 있지 않지만 본 논문에서는 실현성 평가를 위하여 운전원이 참조할 관련 절차서가 마련되어 있다고 가정한다.

방안의 성공적인 수행은 용융노심이 낙하(Core Slumping)하기 전에 원자로 공동을 범람시키는 것이다. 공동을 채우는 물이 압력용기 하반구까지 미쳐 다 채우기도 전에, 많은 양의 용융 노심이 녹아 압력용기 바닥으로 떨어지는 재배치 현상이 발생하면 압력용기 외부에 막비등(Film boiling)이 발생하여 압력용기의 손상을 막을 만큼 충분한 열전달 현상이 일어나지 않는다[8]. 따라서 용융 노심이 낙하하기 전까지 공동이 충수되어야 이 사고관리 방안이 효과가 있으므로 용융노심낙하시간(Core Slumping Time)을 사고관리 방안 수행을 위한 전체 가용시간으로 정의하였다. 본 사고관리 방안 수행 형태는 형태 B와 유사하므로 운전원에게 허용된 진단 및 의사결정 시간을 노심노출 시점까지로 정할 수 있다. 그럴 경우, 전체 가용시간(Tw)은 노심노출 시점부터 노심낙하 시점까지로 정의되며, 방안수행시간(Tr)은 운전원의 수행시간(Ta)과 관련 기기의 방안 완료시간(Ts)의 합으로 구해진다. 참조 발전소에는 두대의 CSP가 가용하며 CSP 하나당 최대 펌프 유량(Pumping Flowrate)은 4,000 gpm이며, 공동 체적은 164,830 gallon이고, 총 썸프 체적이 187,420 gallon 이다. 참조발전소의 경우 공동과 썸프의 높이가 비슷하므로 CSS의 물이 쏟아질 때, 공동과 썸프를 동시에 채우는 것으로 가정하였다. 물공급원으로서 RWT(최대 600,000 gallon)의 물이 방안수행을 위해서 가용한 것으로 생각한다.

3.1 용융노심의 낙하 시간(Core Slumping Time)의 분포(f_{Tw})의 결정

전체 가용시간, Tw 의 분포 f_{Tw} 는 노심노출 시점부터 노심낙하 시점까지의 시간분포를 의미한다. 이 분포를 얻기 위하여 중대사고 분석코드인 MAAP3.0B를 이용하였으며, 노심낙하에 영향을 미치는 8개의

주요 매개입력변수들을 취하여 LHS(Latin Hypercube Sampling) 방법을 이용해 100개의 MAAP3.0B 입력표본을 추출하였다[8]. 추출된 100개의 입력에 대하여 각각 MAAP3.0B 코드를 이용해 용융노심 낙하시간을 계산하였고, 얻은 결과는 그림 3과 같다. 용융노심 낙하시간 T_w 에 대한 분포 f_{T_w} 를 구하기 위하여 Two-parameter Weibull Distribution을 이용하였다. 일반적으로 Two-parameter Weibull Distribution은 다음과 같은 확률밀도함수를 갖는다.

$$f(t) = (\alpha/\beta)(t/\beta)^{\alpha-1} \exp\{-(t/\beta)^\alpha\} \quad (3)$$

여기서, α 와 β 는 Method of moments 를 이용하여 다음 식으로 구한다.

$$\begin{aligned} \mu &= \beta \Gamma\left(\frac{1+\alpha}{\alpha}\right) \\ \sigma^2 &= \beta^2 \left\{ \Gamma\left(\frac{2+\alpha}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(\frac{1+\alpha}{\alpha}\right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

노심낙하시간에 대한 평균 μ 는 96.4 이고 표준편차 σ 는 20.2 이다. 식 (4)를 이용해 α 및 β 를 구하면, $\alpha=5.5$, $\beta=104.4$ 이다. 이 값을 식 (3)에 대입하면 전체 가용시간에 대한 분포 f_{T_w} 는 다음과 같다.

$$f_{T_w}(t) = (0.053)(t/104.4)^{4.5} \exp\{-(t/104.4)^{5.5}\} \quad (5)$$

3.2 운전원 진단오류(PFd), 수행오류(PFa) 및 수행시간 분포(fTa)의 결정

정전사고시 원자로 용기의 파손 방지를 위한 공동범람 방안을 수행하기 위하여 운전원은 노심 상태 및 노심 수위에 관한 정보를 지속적으로 관찰하고, 전원이 회복되는 것을 확인하고 적절한 시점에서 CSS를 강제 기동시킨다. 현재 참조 발전소에는 정전사고시 노심노출 시점까지 노심상태 진단과 수위를 측정할 수 있는 계측기로서, RVLMS (Reactor Vessel Level Monitoring System)와 노심출구 온도계측기(Core Exit Thermocouple)를 이용할 수 있다. 이들 계측기가 노심노출 시점까지 기능이 정상적으로 유지되어 충분한 정보를 제공해 줄 수 있다면 운전원의 노심 상태 진단은 적절히 수행될 것으로 생각된다. 본 논문에서는 형태 B의 사고관리 방안수행 평가에 적절한 방법을 이용한다. 정전사고시의 사고진행 상황을 분석하면 노심노출 시점까지 운전원에게 주어진 진단 및 의사결정 가용시간은 30 분 이상이 될 것으로 판단되며, 이 경우 HRA Handbook에 주어진 진단오류 곡선을 이용하면, 진단 가용시간이 30 분 일때 진단오류 확률, PFd는 1E-3 이다.

운전원이 올바른 의사결정을 형성한 후, CSS를 강제 기동시키기 위해서는 운전원이 주 제어실내에서 수동으로 CSAS(Containment Spray Actuation Signal)를 발생시켜야 한다. 이때 관련된 운전원의 수행오류를 평가하기 위해서 ASEP 방법론을 이용한다. 운전원의 수행 작업은 Step-by-step으로 가정하고, 운전원의 스트레스 정도는 Extremely High Stress로 가정했을 때, 수행오류는 5E-2 이다.

운전원 수행시간 분포 f_{T_a} 를 얻기 위한 방법은 Simulator 실험이나 운전원과의 면담, 또는 전문가의 의견을 이용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 현재 상황에서 실제 운전원의 수행시간에 대한 분포를 얻는 것이 용이하지 않기 때문에 실제 상황을 가정한 분포를 추정하였다. 기본적인 수행절차는 관련 절차서의 참조. 해당 기기 제어 판넬로의 이동, 제어 판넬 조작 등이다. 한편, 중대사고시에는 운전원이 심리적 두려움 및 정신적, 육체적 스트레스를 상당히 받으므로 운전원의 수행능력이 현저히 감소할 수 있다. 이러한 영향인자를 고려하여 운전원의 평균 수행시간을 10분, 표준편차를 4분으로 가정하였다. 전체 가용시간에 대한 분포 f_{T_w} 와 마찬가지로 수행시간분포 f_{T_a} 도 Two-parameter Weibull Distribution을 가정하고 식 (3)과 같은 분포를 취하여 식 (4)를 이용하면 두 변수 $\alpha=2.70$, $\beta=11.25$ 으로 얻을 수 있다. 이 값을 식 (3)에 대입하면 수행시간분포 f_{T_a} 는 다음과 같다.

$$f_{T_a}(t) = (0.24)(t/11.25)^{1.70} \exp\{-(t/11.25)^{2.70}\} \quad (6)$$

3.3 기기 작동모드에 따른 실패확률(PFs) 및 방안 완료 실패확률(PFr)의 결정

운전원이 CSS를 강제 기동시켰을 때 두 트레인의 CSS는 요구시 고장과 작동중 고장이 발생할 수 있으나 작동중 고장 발생확률은 거의 무시할 정도로 낮으므로(10^{-5} ~ 10^{-6}), 이 논문에서는 요구시 고장 모드만 고려하였다. 참조발전소의 CSS 주입모드시 두 트레인 모두 기동실패할 확률은 1.142E-3 이며, 어느 한

트레인만 실패할 확률은 $1.71E-2$ 이다. 그러므로, CSS 기동 실패에 의한 방안 실패확률 P_{Fs} 는 $1.142E-3$ 이다.

두 트레인의 CSS중 어느 한 트레인만 동작할 때의 공동범람 소요시간은 공동 및 썸프의 총 체적인 352.250 gallon을 CSP 하나의 유량률인 4.000 gpm으로 채울 때의 시간이다. 발전소의 기하학적인 구조로 인한 지연 시간을 무시하고, CSP의 유량이 공동 및 썸프에 모두 주입된다고 가정했을 때, CSP 하나로 공동을 채우는 데 소요되는 시간은 약 88 분이 소요된다. 이 경우에 총 방안수행시간(T_r)은 운전원 방안수행시간(T_a)과 88 분을 더한 값이다. Section 3.2에서 얻은 운전원 방안수행시간분포(f_{Tr})를 이용하면 총 방안수행시간(T_r)에 대한 분포(f_{Tr})는 다음과 같다.

$$f_{Tr}(t) = (0.24)\left(\frac{t-88}{11.25}\right)^{1.70} \exp\left\{-\left(\frac{t-88}{11.25}\right)^{2.70}\right\} \quad t \geq 88 \quad (7)$$

전체 가용시간 T_w 에 대한 분포인 식 (5)와 식 (7)을 식 (2)에 대입하면 CSP 하나로 공동을 채울 때 수행지연에 의한 방안 완료 실패확률(P_{Fr}^{1csp})은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{Fr}^{1csp} = (1.71E-2) * \Pr(T_r > T_w) = (1.71E-2) * (0.51) = 8.721E-3 \quad (8)$$

두 트레인의 CSS로 공동을 채울 때 소요되는 시간은 약 44 분이다. 앞과 마찬가지로 하면 이 경우의 총 방안수행시간은 다음과 같다.

$$f_{Tr}(t) = (0.24)\left(\frac{t-44}{11.25}\right)^{1.70} \exp\left\{-\left(\frac{t-44}{11.25}\right)^{2.70}\right\} \quad t \geq 44 \quad (9)$$

CSP 두개로 공동을 채울 때 수행지연에 의한 방안 완료 실패확률(P_{Fr}^{2csp})은 다음과 같다.

$$P_{Fr}^{2csp} = (9.82E-1) * \Pr(T_r > T_w) = (9.82E-1) * (0.028) = 2.750E-2 \quad (10)$$

그러므로, 수행지연에 의한 방안 완료 실패확률(P_{Fr})은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_{Fr} = P_{Fr}^{1csp} + P_{Fr}^{2csp} = 8.721E-3 + 2.750E-2 = 3.62E-2. \quad (11)$$

3.4 최종 사고관리 방안 수행 실패 확률(PNS) 및 민감도 분석 결과

원자로 용기 파손방지를 위한 사고관리의 방안으로서 제시된 CSS를 이용한 공동범람 방안의 최종 수행 실패 확률(PNS)은 앞의 Section 3.2, 3.3 에서 얻은 네개의 확률값 P_{Fd} , P_{Fa} , P_{Fs} , P_{Fr} 을 합하여 얻을 수 있다. 즉,

$$PNS = P_{Fd} + P_{Fa} + P_{Fs} + P_{Fr} = 8.834E-2.$$

그러므로, 방안이 성공적으로 완료될 가능성(PS)은 다음과 같다.

$$(PS) = 1 - PNS = 0.917.$$

한편, 운전원 수행시간 분포(f_{Ta})에 따른 방안 성공확률(PS)의 민감도 분석을 수행하였다. 최적의 경우(Optimal case)를 고려한 운전원 평균 수행시간 6분, 표준편차 2분일 때와, 최악의 경우(Worst case)를 고려한 평균 수행시간 20분, 표준편차 10분으로 했을 때의 성공확률을 계산하여 기본 경우(Base case)와 비교하였다(표 1). CSP 용량이 어느 정도 큰 편이므로 운전원 수행시간 분포의 변화가 방안 성공확률에 미치는 정도는 크게 민감하지 않은 것으로 나타났다.

4. 결론

지금까지 사고관리 방안의 실현가능성을 평가하는 새로운 방법론을 제시하였다. 이 방법론은 사고관리 방안의 수행실패 요인으로 운전원 진단 및 의사결정 오류, 운전원 수행오류, 관련 기기 실패, 수행지연으로 인한 오류 등으로 나누고, 각각에 대하여 평가하는 방법을 제시하였다. 한편 수행지연으로 인한 오류에서는 시스템 가용시간과 운전원 반응시간, 기기 작동모드에 따른 방안 완료시간의 처리에 있어서 기존의 PSA 수행방법과는 다른 접근 방식을 제시하였다. 먼저, 시스템 가용시간에 대해서는 기존의 PSA에서 일정값으로 처리하던 것을 본 방법론에서는 현상에 대한 불확실성을 고려하여 분포로

얻었다. 두번째. 기존 PSA에서 운전원 반응시간과 기기 수행시간을 분리하여 다루던 것을 본 방법론에서는 전체 사고관리 방안 수행 소요시간을 운전원 반응시간과 기기 작동모드에 따른 방안 완료시간을 각각 고려하여 연속적으로 처리하였다.

앞으로 연구되어야 할 주요 연구과제는 중대사고관리시 운전원 진단 및 의사결정 오류에 관한 평가 모델의 개발이다. 먼저 영향을 주는 주요 영향인자들을 밝혀내고, 이들 인자들이 운전원 진단 및 의사결정 오류에 영향을 미치는 메카니즘을 분석하고, 이들의 영향 정도를 정량적으로 평가하는 모델을 개발하여야 한다. 또한, 운전원 진단 및 수행에 소요되는 운전원 반응시간의 분포 획득에 있어서 좀 더 논리적인 취득방법이 요구된다.

ACKNOWLEDGMENT

논문에 대해 귀중한 조언을 주신 한성대학교 제무성 교수님과 한국원자력연구소 강대일, 정원대, 김시달, 김태운 박사님께 감사사를 표합니다.

참고문헌

1. G.E. Apostolakis, V.M. Bier & A. Mosleh, A critique of recent models for human error rate assessment, Reliability Engng and System Safety, 20, 1988, 63-85.
2. A.D. Swain & H.E. Guttman, Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications, NUREG/CR-1278, US NRC, USA, 1983.
3. A.D. Swain, Accident sequence evaluation program human reliability analysis procedure, NUREG/CR-4772, US NRC, USA, 1987.
4. A.J. Hannaman, et. al., Human cognitive reliability model for PRA analysis, NUS-4531 (EPRI), 1984.
5. P. Moieni, A.J. Spurgin & A. Singh, Advances in human reliability analysis methodology, part I: frameworks, models, and data, Reliability Engng and System Safety, 44, 1994, 27-55.
6. M. Jae & C.K. Park, Quantification of human error probabilities in implementing accident management strategies, Proceedings of international conference on New Trends in Nuclear System Thermohydraulics, Pisa, Italy, May 30 - June 2, 1994.
7. Y.C. Yeh & J.T. Teng, Quantification of dynamic human error rate probabilities in terms of sampled timing data, Nuclear Technology, 84, March 1989.
8. H. Park & V. Dhir, Steady-state thermal analysis of external cooling of a PWR vessel lower head, AIChE symposium series, No. 283, Vol. 97, P.1, 1991.
9. C.K. Park, et al., Development of accident management technology and computer codes, KAERI/RR-1330/93, 1994.

표 1. 운전원 수행시간 분포에 따른 방안 성공 확률(PS)의 민감도 분석

	(μ, σ) [min]	P _{Fr}	P _{NS}	P _S
Optimal case	(6, 2)	2.51E-02	7.724E-02	0.923
Base case	(10, 4)	3.62E-02	8.834E-02	0.912
Worst case	(20, 10)	9.42E-02	1.462E-01	0.854

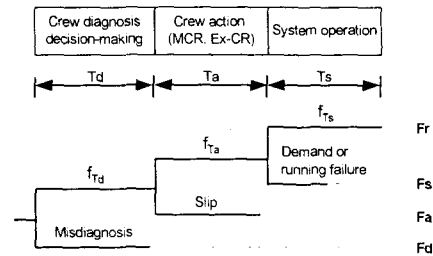


그림 2. 사고관리 방안 수행과 관련한 사건수목

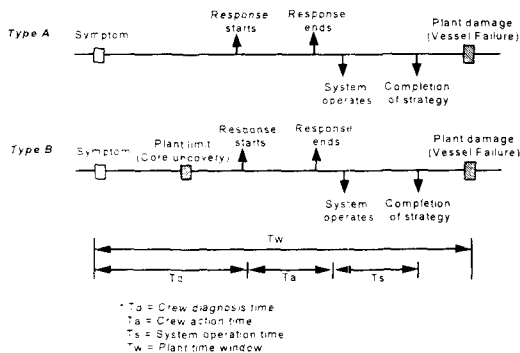


그림 1. 사고관리 방안 수행을 표현하는 시간 프레임

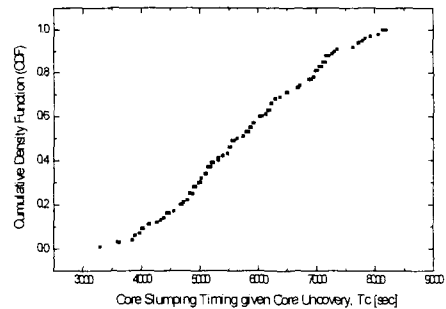


그림 3. LHS를 이용하여 얻은 100개의 입력으로부터 구한 용융노심 낙하시간의 MAAP3.0B 계산출력 분포