

국내 원자력발전소 및 화학공장의 기기 신뢰도 데이터베이스 구축

Development of Component Reliability Database for Korean Nuclear Power Plants and Chemical Plants

최선영, 한상훈

종합안전평가팀
한국원자력연구소
대전 유성구 덕진동 150번지

Abstract

The component reliability database is required in PSA (Probabilistic Safety Analysis) for NPP (Nuclear Power Plant). We have applied a generic database to the PSA for the Korean NPPs, since there is no specific component reliability database. Therefore we are developing the plant-specific component reliability database for domestic NPPs. We also extend the experience and knowledge of PSA and component reliability database for NPP to chemical industry. We collect the raw data like component operation history and maintenance history and then input the required data for the component reliability database through failure analysis. With the database, we can not only perform PSA with real data but also perform maintenance optimization. .

1. 서론

산업 재해를 방지하고 사고시의 적절한 대책을 마련하기 위한 한 방법으로 주요 설비로부터 발생할 수 있는 사고의 유형을 찾아내고 이의 발생 가능성 및 피해를 객관적인 단위로 평가할 수 있는 정량적 위험성 평가 (Quantitative Risk Assessment, QRA)에 대한 관심이 증가하고 있다. 원자력 분야에서는 확률론적 안전성 평가 (Probabilistic Safety Assessment, PSA)방법을 QRA에 적용하여 원자력발전소를 대상으로 최근 20여년간 활발하게 적용되어 왔으며 최근에는 화학공장의 안전성 평가에서 활용하려는 노력이 증대되고 있다.

원자력발전소는 원전의 설계, 운영 등을 포함하여 원전의 안전성을 종합적으로 평가하는 방법인 PSA를 활용하여 원전의 규제, 설계 및 운영 등 여러 분야에서 PSA 결과를 적용하고 있다. 국내에서는 표준형 원전의 PSA 수행시 기기 고장률 (failure rate) 값으로 외국 문헌의 데이터를 정리해놓은 일반 기기 신뢰도 자료 (generic data)를 사용하여 분석을 수행하였다. 그러나 일반 기기 신뢰도 자료는 외국 원전의 데이터를 인용한 값이라서 국내 발전소의 고유 특성을 반영하기에는 부족함이 있어 국내 발전소의 고유 특성을 반영한 기기 신뢰도 데이터베이스의 필요성이 대두되었다. 따라서 한국원자력연구소에서는 차기 국내 원전의 PSA 수행시 국내 발전소의 특성을 반영한 데이터를 제공하기 위하여 1998년부터 기기 신뢰도 데이터베이스 구축 과제를 수행하고 있다[1][2].

화학공장의 경우에도 원자력발전소보다 시기적으로는 늦게 시작하였지만 최근 주요 위험설비에 대한 위험성과 안전성을 정량적으로 평가하려는 노력이 증대되고 있다. 국내에서는 1996년부터 석유화학공장 및 위험물질 취급설비에 대하여 공정안전관리제도 (Process Safety Management)를 시행하고 있으며 최근에는 정량적 위험성 평가 기법을 도입하여 산업설비의 위험도를 정량적으로 평가하려는 시도를 하고 있다. 한국원자력연구소는 원전에 적용한 PSA 기법과 기기 신뢰도 데이터베이스 구축 경험을 바탕으로 산업안전관리공단과 공동으로 정량적 위험성 평가의 기초를 확립하기 위한 연구를 수행하고 있으며 이중 확률론적 평가와 관련된 S/W 개발과 데이터 제공 업무를 담당하고 있다[3][4].

이와 같이 원자력발전소 및 화학공장의 기기 신뢰도 데이터베이스를 구축하고 고장분석을 수행하여 기기 신뢰도 결과값으로 기기별 고장률과 이용불능도 (unavailability) 데이터를 제공함으로써 일반 데이터 대신에 실제 산업체의 고유 특성을 반영한 데이터를 활용한 정량적 위험도 평가는 물론 보수최적화 등의 수행이 가능하게 되었다.

본 논문의 목적은 현재 한국원자력연구소에서 과제수행중인 국내 원자력발전소와 화학공장의 기기 신뢰도 데이터베이스 구축 사례에 대해서 다루고 있다. 2장은 원자력발전소에서 적용하고 있는 위험도 정량평가 기법인 PSA에 대해서 간략히 설명하였으며 기기 신뢰도 데이터베이스의 목적 및 활용분야와 데이터베이스 구축체계는 3장과 4장에서 다루었다. 5, 6장에서는 기기 신뢰도 데이터베이스 S/W 소개와 신뢰도 분석 결과를 제시하였으며 7장에서는 결론을 기술하였다.

2. PSA 개요

PSA 기법은 원자력 설비에서 발생 가능한 모든 사고 경위 및 사고 현상을 분석하여 원자력발전소 위험도의 중요한 척도중 하나인 노심 손상 빈도 (Core Damage Frequency, CDF)를 계산하고 넓은 의미에서는 노심손상빈도 뿐 아니라 방사능 외부누출로 인한 소외의 인적-물적 위험도까지 분석하는 원전의 안전성을 종합적으로 평가하는 방법이다.

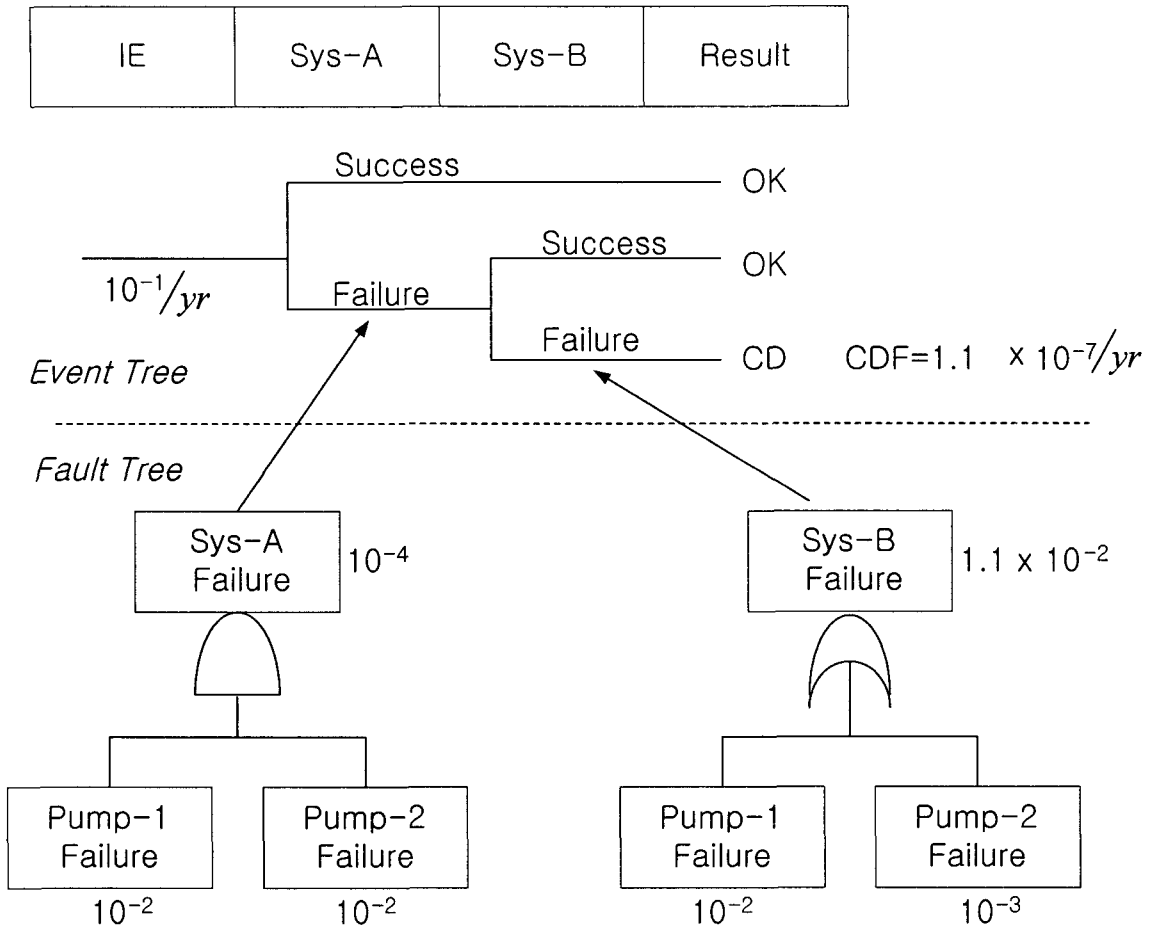


그림 1. PSA 수행 방법

그림1과 같이 PSA에서는 사건수목 (Event Tree) 방법과 고장수목 (Fault Tree) 기법을 활용하여 노심손상빈도를 계산한다. 사건수목 방법은 사고가 발생한 후 사고의 전체적인 전개과정, 즉 사고 시나리오를 모델하는 기법이다. 초기사건 (initiating event) 발생 후 각 계통의 기능 (function)의 성공여부에 따라 노심손상을 유발할 수 있는 모든 경로 (branch)를 파악하고 branch의 실패확률은 고장수목 기법을 사용하여 구한다.

정량적 위험성 평가의 대표적인 방법인 고장수목 분석방법에서는 주어진 계통에 대하여 원치 않는 사건 (계통의 기능상실)이 발생할 가능성을 기기의 기능상실 고장 단계까지 모델한다. 고장수목에 모델되는 기기에 대해서 고장률을 대입하면 이 고장수목에 대한 확률값을 수치적으로 나타낼 수 있다. 즉, 계통의 신뢰도를 정량적으로 표현할 수 있다.

3. 기기 신뢰도 DB의 목적 및 활용분야

앞에서 설명한 바와 같이 신뢰도 자료는 위험도 정량 평가에 직접적으로 이용되는 데이터이다. 따라서 본 보고서에서 구축한 기기 신뢰도데이터베이스의 일차적 목표는 기기 신뢰도 데이터베이스로부터 기기 고장률 값과 이용불능도를 구하여 국내 원전 (또는 화학공장) PSA/QRA 수행에 필요한 신뢰도 자료를 제공하는 것이다.

현재는 원자력발전소의 PSA 수행시 기기 고장률 값으로 외국 원전의 데이터를 정리한 일반 기기 신뢰도 데이터를 사용하여 노심손상빈도를 구하였다. 국내 원전 기기 신뢰도 데이터베이스를 구축하게 되면 일반 데이터 값을 사용해온 기기 고장률을 국내 원전의 고유 특성을 반영한 값으로의 대체가 가능해진다. 화학공장은 정량적 위험성 평가 기법을 도입하고 구축된 기기 신뢰도 데이터베이스를 활용하여 주요 위험 설비로부터 발생할 수 있는 사고의 유형을 찾아내고 이의 발생 가능성 및 피해를 정량적으로 평가하는데 활용할 수 있을 것이다.

이외에도 기기의 평균보수시간 및 보수빈도를 산출하여 보수최적화 (Maintenance Optimization)에 기초자료를 제공할 수 있다. 즉 기기에 대해 신뢰도 자료를 이용하여 정비 우선순위를 결정할 수 있으며, 또한 보수 및 시험 정책을 세운 후 각 기기의 시험주기, 정비주기, 교체주기를 결정하는데 참고할 수 있다. 또한 데이터 수집기간이 길어지면 많은 양의 데이터 활용이 가능하여 다음과 같은 분석을 수행함으로써 기기의 신뢰성을 향상할 수 있다.

- 반복되는 고장의 유형 및 고장발생주기 발견
- 각 계통별 주요 고장 모드 분석
- 각 고장의 근본원인 분석을 통한 예방보수업무 선정
- 노화 분석 (Aging Analysis)

4. 기기 신뢰도 데이터베이스 구축 체계

다음 그림 2는 기기 신뢰도 데이터베이스 구축 체계의 주요 항목을 설명하고 있다. 즉, 현장의 기초자료를 수집하여 데이터 분석을 통해 필수 입력 항목에 데이터를 입력한 후 신뢰도 결과물인 기기별 고장률과 이용불능도를 산출하여 PSA/QRA, 보수최적화 및 앞에서 설명한 여러 활용분야에 적용하게 된다.

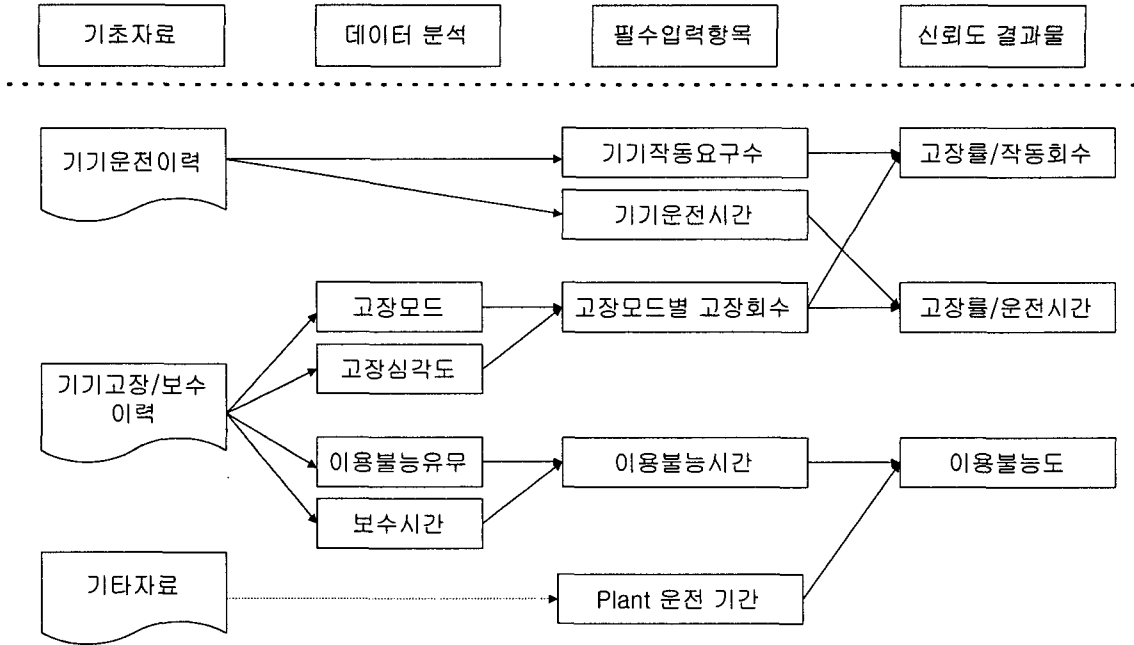


그림2. 기기 신뢰도 데이터베이스 구축 체계

1) 데이터 분석

앞 절에서 설명한 기기 신뢰도 데이터베이스의 활용분야를 수행하기 위해서 요구되는 현장자료는 주로 기기의 운전이력 및 고장/보수 이력이다. 현장으로부터 기초자료 수집이 완료되면 이로부터 필수 입력 항목에 적당한 데이터를 선별하여 입력하여야 한다. 그림 2에 기술되어 있는 필수 입력 항목 중 일부는 바로 기초자료로부터 얻을 수 있으나 고장모드별 고장회수나 이용불능시간과 같이 데이터 분석을 통해서 입력해야 하는 항목이 있다.

고장분석 단계에서는 먼저 기기의 고장을 기기의 기능에 따라 분류한다. 예로서 밸브의 외부누출 및 밸브의 열림실패는 기능면에서 다른 것이다. 밸브의 열림실패는 단혀 있는 밸브의 경우 공장(혹은 발전소)계통에서 필요에 의해 열릴 필요가 있을 경우 나타날 수 있는 것이다. 작동실패 확률이 높을지라도 특정 밸브에 대해 정상운전 및 비상운전시 계속 단혀 있는 것이 주어진 기능인 경우 이 밸브의 기능과는 관계가 없는 것이다. 이와 같이 기기 종류별로 고장유형을 분류한 것을 고장모드 (Failure Mode) 라고 하며, 신뢰도 데이터에서는 고장모드에 따라 고장률을 계산하여야 한다.

기기의 고장분석시 기기의 기능에 따라 다른 것과 같이 고장 정도(고장 심각도) 또한 다르다. 예를 들면 펌프가 출력을 완전하게 제대로 내지 못할 경우에 설계치 미만인지, 문제는 있으나 설계치는 내고 있는지, 또는 가동이 중지되어 완전히 기능을 상실하였는지 차이가 있다. 기기의 기능상실 정도는 기능상실 (Catastrophic), 기능저하 (Degraded), 고장징후발생 (Incipient) 세가지로 분류한다. 기기의 신뢰도 계산시 기능상실 고장위주로 고려되기 때문에 고장심각도를 분석하는 작업은 필수적이다.

- 기능상실 (Catastrophic) : 기기가 주어진 기능을 전혀 수행하지 못하는 경우
- 기능저하 (Degraded) : 기기가 주어진 기능을 어느 정도 수행하나 완전한 기능을 수행하지 못하는 경우
- 고장징후발생 (Incipient) : 기기가 주어진 기능을 설계치 이상으로 수행하나 진동이나 소음이 발생하여 영향을 주고 있으며 시간이 지나면 기능저하 단계로 발전하는 경우

고장모드 및 고장심각도 외에 이용불능도 계산을 위해 해당 보수이력으로부터 보수시간을 산출하고 또한 기기의 고장이나 보수기간 동안 해당 기기의 작동이 불가능한 지에 대한 이용불능 여부를 판별하여 이용불능시간을 계산하여야 한다. 보수시간은 실제 보수를 시작하여 완료하는데 소요된 시간이며 이용불능시간은 기기의 고장 및 보수로 인하여 기기를 이용할 수 없었던 총 시간이다.

2) 신뢰도 결과

이상의 필수 입력 데이터로부터 기기의 신뢰도 특성을 알아보기 위하여 도출해내는 결과물은 기기별 고장률과 이용불능도이다. 신뢰도 평가에서 각 기기는 두가지 측면에서 평가된다. 하나는 기기가 얼마나 자주 고장 나서 주어진 기능을 못하는 가이며, 다른 하나는 기기의 작동이 요구되는 시점에서 기기가 작동을 하지 못하는 가이다. 첫번째 사항은 기기의 고장률과 밀접한 관계를 가지며, 두 번째 사항은 기기의 고장률은 물론 이용불능도와 밀접한 관계를 가진다.

- 고장률 : 고장률은 기기가 시간당 또는 작동 회수 당 고장이 발생하는 발생률을 뜻한다.
 - 시간당 고장률: 같은 유형의 기기 종류에 대해 고장회수의 합을 운전시간의 합으로 나눔으로써 계산할 수 있으며 펌프의 가동중정지 빈도, 밸브의 외부누출 빈도와 같이 단위시간당 고장률을 계산할 때 사용된다.
 - 작동회수당 고장률: 밸브를 몇 번 열고 닫힘을 수행할 경우 몇 번 작동이 안 되는가, 펌프를 몇 번 기동하였을 경우 몇 번 기동이 안 되는가 등의 자료를 평가할 때 사용되는 특성치로 고장회수의 합을 작동회수의 합으로 나눔으로써 계산한다.
- 이용불능도 : 이용불능도는 주어진 시간에 기기가 보수 등의 이유로 인하여 이용할 수 없는 가능성을 뜻한다. 이용불능도는 같은 유형의 기기종류에 대해 각 기기가 계통으로부터 이용불능된 시간의 합을 전체 시간으로 나눔으로써 계산할 수 있다.

5. 데이터 입력/분석 S/W

신뢰도 데이터베이스 관리 전산 소프트웨어는 월드 와이드 웹(WWW) 방식으로 개발하여 인터넷 익스플로러와 넷스케이프와 같은 월드 와이드 웹 브라우저만 설치되어 있으면 개인 컴퓨터에서 웹 브라우저만 가지고도 데이터베이스에 저장된 각종의 자료들을 자유로이 검색하고 수정할 수 있도록

하였다. 또한 저장된 자료는 그 자체가 발전소의 안전과 직접적으로 관련된 자료이므로 비관계자 및 기타 외부인으로부터의 원치 않은 접속 및 자료검색을 원천적으로 차단하기 위하여 관련 담당자만이 검색이 가능하도록 사용자 접속 제한 기능을 구현하였다[5].

다음 그림3은 원전의 기기 신뢰도 데이터베이스 S/W를 사용한 보수이력분석의 화면 예이다.

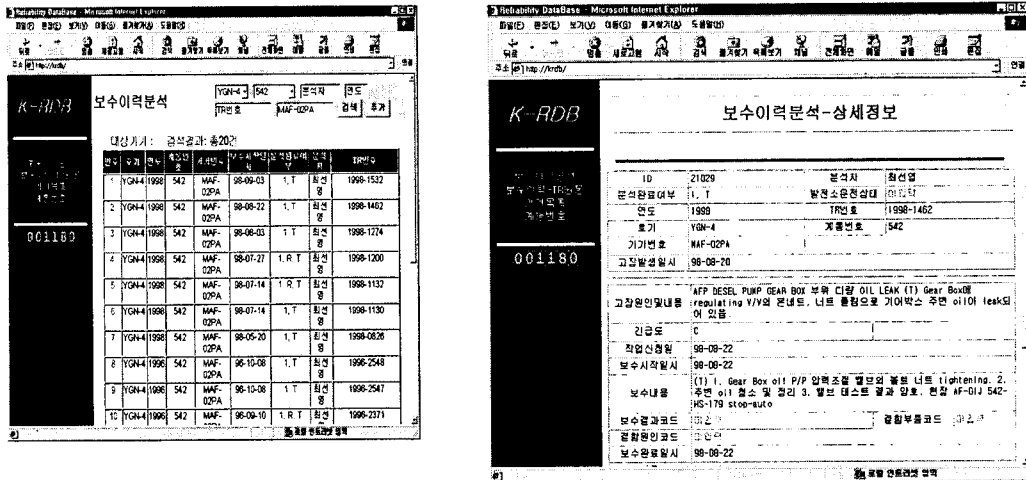


그림 3. 원전 기기의 보수이력분석 예

6. 기기 신뢰도 데이터베이스 구축 및 고장분석 사례

지금까지 설명한 기기 신뢰도 데이터베이스의 구축 체계를 기초로 한국원자력연구소는 현재 표준원전을 대상으로 30여개의 주요 안전 계통의 펌프 및 밸브 등 주요 기기의 고장/보수/운전 이력을 수집, 분석하여 기기 신뢰도 데이터베이스 S/W에 입력 중에 있으며, 화학공장에 대해서는 국내 6개 사업장의 10개 단위공장에 대해서 4400여개의 설비에 대해 11000건의 보수이력을 수집, 분석하여 기기 신뢰도 데이터베이스를 구축하였다.

다음에 제시하는 표 1과 표 2는 한 사업장의 기기 신뢰도 분석결과로 382개 설비와 786건의 정비이력에 대한 13개월 동안의 자료를 수집, 분석하였으며 그 중 주요설비에 속하는 팬, 펌프, 혼합기에 대한 데이터 분석 결과와 고장모드별로 계산한 고장을 결과이다.

표1. 기기 신뢰도 분석 결과

구분	분석대상 설비수	보수횟수 총계	기능상실 횟수총계	기능저하 횟수총계	조사시간 총계	운전시간 총계	평균보수 시간	평균OOS 시간
팬-모터구동	24	4	0	2	9936	7920	1.75	1
펌프-모터구동	135	402	4	174	55890	44550	2.28	2.8
혼합기-모터구동	31	102	9	25	12834	10230	3.07	4.54

표2. 설비종류별 고장모드에 따른 고장률

구분	고장모드	기능상실 총계	기능저하 총계	고장률(/년)
팬-모터구동	기타		1	7.35e-3
팬-모터구동	진동		1	7.35e-3
펌프-모터구동	과열		5	6.53e-3
펌프-모터구동	과전류		1	1.31e-3
펌프-모터구동	기타		8	1.04e-2
펌프-모터구동	외부누출		105	1.37e-1
펌프-모터구동	진동		28	3.66e-2
펌프-모터구동	출력불량		27	3.53e-2
펌프-모터구동	파손	1		6.53e-3
펌프-모터구동	가동중정지	3		1.96e-2
혼합기-모터구동	파손	5		1.42e-1
혼합기-모터구동	출력불량		3	1.71e-2
혼합기-모터구동	진동	1	3	4.55e-2
혼합기-모터구동	유량감소		1	5.69e-3
혼합기-모터구동	외부누출		15	8.53e-2
혼합기-모터구동	기타		2	1.14e-2
혼합기-모터구동	가동중정지	2		5.69e-2

7. 결론

국내 원전의 PSA 수행시 기기 고장률 값으로 일반 신뢰도 자료를 사용하였다. 그러나 일반 신뢰도 자료는 주로 외국 원전의 운전 이력을 인용한 값이라서 국내 원전의 고유 특성을 반영하기에는 부족함이 발생하였다. 화학공장의 경우도 주요 위험설비에 대한 위험성 평가 및 안전대책 수립에 대한 필요성이 증대되고 있으며 최근에는 정량적 위험성 평가 기법을 도입하여 산업설비의 위해도를 정량적으로 평가하려는 시도를 하고 있다.

본 논문은 현재 한국원자력연구소에서 수행중인 국내 원전의 기기 신뢰도 데이터베이스와 이미 개발이 완료된 화학공장의 기기 신뢰도 데이터베이스 현황에 대해서 다루었다. 기기 신뢰도 데이터베이스의 목적 및 활용분야, 필수 입력 데이터 항목 및 데이터베이스로부터 얻는 신뢰도 결과 등을 기술하였다.

기기 신뢰도 데이터베이스의 목적은 일차적으로 PSA/QRA와 같은 발전소 (혹은 공장)의 위험도 정량 평가 기법에 사용되는 기기 고장률 값으로 국내 고유의 특성을 반영한 데이터를 제공하여 보다 정확한 결과를 도출하기 위함이며 보수 업무의 효율성을 향상시키기 위한 보수최적화 등에 활용하는 것이다.

이와 같은 신뢰도 데이터베이스의 목적에 부합하기 위하여 고장모드별 고장회수, 보수시간, 이용불능시간 등의 입력 데이터 항목을 선정하였다. 기기 고장 자료는 다시 발생한 고장 유형을 기기의 기능 측면에서 분석하고 고장의 심각성 정도를 분석하여 기능상실, 기능저하, 고장징후발생의

3그룹으로 분류하였으며 보수자료는 기기의 이용불능 여부를 판별하고 보수시간 및 이용불능시간을 추정하였다.

기기 신뢰도 데이터베이스로부터 얻는 대표적인 신뢰도 결과물은 기기별 고장률과 이용불능도이다. 신뢰도 평가에서 각 기기는 두가지 측면에서 평가된다. 하나는 기기가 얼마나 자주 고장 나서 주어진 기능을 못하는 가이며, 다른 하나는 기기의 작동이 요구되는 시점에서 기기가 작동을 하지 못하는 가이다. 첫번째 사항은 기기의 고장률과 밀접한 관계를 가지며, 두 번째 사항은 기기의 고장률은 물론 이용불능도와 밀접한 관계를 가진다.

이와 같은 기기 신뢰도 데이터베이스를 이용하여 PSA/QRA나 보수최적화 뿐 아니라 향후에는 보다 많은 양의 데이터를 바탕으로 노화분석 등 여러 분석 기법을 적용하여 기기의 신뢰성을 향상하기 위한 노력이 활발히 진행될 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] S.Y Choi, S.H et al (1999). "Development of Component Reliability Database for Korean NPPs". The 5th Korea-Japan PSA Workshop.
- [2] 최선영 등 (1999). "국내 원자력발전소의 기기 신뢰도 데이터베이스 개발 현황 및 기기 고장 분석 사례". 한국원자력학회 '99 추계학술대회.
- [3] 한상훈 등 (1998). "국내 화학공장 설비 및 기기에 대한 신뢰도 데이터베이스 구축". 한국산업안전공단 산업안전연구원.
- [4] 한상훈 등 (2000). "국내 화학공장 설비 및 기기 신뢰도 데이터베이스 구축 (II)". 안전분야 - 보고서 연구원2000-35-181. 한국산업안전공단 산업안전연구원.
- [5] 김승환 등 (1999). "원자력발전소 기기 신뢰도 데이터베이스 관리 시스템의 설계 및 구현". 한국원자력학회 '99 추계학술대회.