

RBI(Risk based inspection)에 의한 설비관리 연구

Development Equipment management for RBI

박주식*

Joo-sic, park

박영기*

Yong-gi, park

오성환*

Sung-hwoansic, oh

박상민**

Sang-min, park

강경식***

Gyung-sic, kang

1. 서론

효과적인 검사 및 유지보수 프로그램은 설비의 파손을 최소화하는 데 중요한 역할을 하며 그 범위, 방법, 시기, 수용기준 등과 같은 검사 및 유지보수의 모든 부분이 요소의 파손 가능성에 영향을 미친다. 사용중에 파손사고가 발생하였을 경우, 또는 파손사고가 없더라도 발전설비를 일정기간 사용한 후에는 정기적으로 정밀 안전진단을 실시하여 설비 안전도 향상이나 유지보수 효율화를 위해 필요한 사항을 찾아내고 설비의 노후정도, 향후 잔여수명 등을 평가하여 필요한 경우 보수, 교체 등의 적절한 조치를 취해야 한다. 현재 이러한 가동중검사(in-service inspection, ISI)는 대부분 과거의 경험이나 공학적인 판단에 기초하여 수행되고 있다.

가동중검사에 정량적, 정성적인 접근방법을 도입하면 위험도의 개념으로 문제에 접근할 수 있다. 설비를 장시간 사용하다 보면 각 설비 요소별로 사고 위험성 등급이 다양해 지며, 각 설비요소의 사고에 따른 파급손실의 심각성 정도도 다양해 진다. 따라서 설비 요소별로 위험도를 평가하여 위험도가 큰 설비부터 우선적으로 진단하는 위험도에 근거한 검사(risk based inspection, RBI) 기법의 필요성이 커지고 있다. 위험도는 파손빈도와 같은 파손 가능성과 인명, 환경, 경제적 손실과 같은 파손손실의 심각성을 모두 반영하는 손실 잠재성으로 측정될 수 있다.

* 명지대학교 산업공학과 박사과정

** 인천대학교 산업공학과 교수

*** 명지대학교 산업공학과 교수

미국과 유럽, 일본 등에서는 십여년 전부터 RBI 프로그램을 개발하는 연구를 진행중에 있다. ASME는 1988년부터 특별 조사단을 구성하여 위험도를 결정하고 이를 검사에 반영하기 위한 지침서를 발간하였으며, Pacific Northwest Laboratory(PNL) 역시 1987년부터 RBI 기법에 대한 연구를 진행해 오고 있다. Atomic Energy of Canada, Limited, Japan Power Engineering and Inspection Corporation, Swedish Nuclear Power Derictorate, U.K. Nuclear Submarine Program 등의 기관도 RBI 절차에 대한 연구를 진행중에 있다.

실제로 1980년대 중반에 Niagara Mohawk Power Corporation에서는 35년동안 사용한 화력발전 설비의 파손 데이터베이스를 구축하여 수명연장 프로그램을 구축하였으며, 설비의 효율성은 4년만에 70%에서 85%로 향상되었다. Carolina Power & Light에서는 화력발전 설비의 취약한 튜브 교체 계획에 위험도에 근거한 방법을 사용하여 500만 달러의 예산절감 효과를 얻은 바 있다.

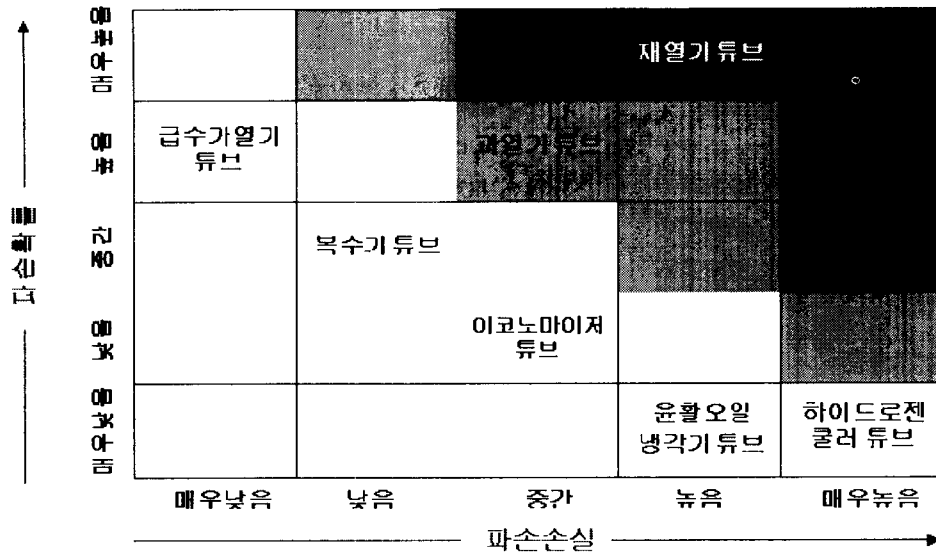
2. 본론

2-1. RBI 개요

RBI는 확률론적인 방법에 기초를 두고 있다. 결정론적인 방법으로 설비의 잔여수명을 평가하는 경우 너무 보수적인 결과가 나오는 경향이 있다. 최근 들어 점차 환경과 자원의 한정과 같은 문제 때문에 더 이상 이와 같은 보수적인 결과는 바람직하지 않다. 또한 기반시설이 노후화함에 따라 보수적인 전통적 결정론적 방법으로는 노후화된 설비의 지속적인 운전을 보장할 수 없다. 확률론적인 방법에서는 보수성은 단지 "보수적인 면의 오류"로 취급된다. 결정론적 방법에서 고려하는 "최악의 경우"는 아주 드문 경우일 뿐이며, 확률론적인 평가 결과는 가장 가능성이 높은 경우에 근거하여 결정된다.

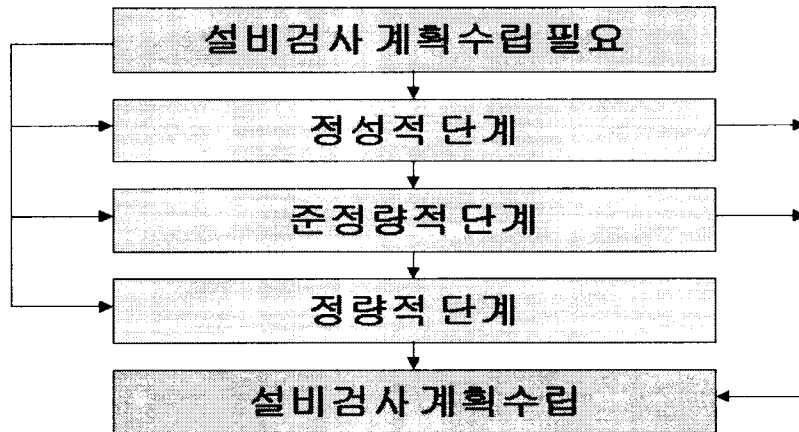
RBI에서 위험도는 파손확률(probability of failure)과 파손손실(consequence of failure)로 구성되는 노출위험도(risk exposure, RE)로 표시하며, 정량적으로 노출위험도(RE)=파손확률(ρ)×파손손실(C) 과 같이 표시된다. <그림 1>에 다섯 단계로 파손확률 및 파손손실이 구분되어 있는 위험도 선도를 나타내었다. 그림에서 위쪽으로, 오른쪽으로 갈수록 위험도는 증가하며, 같은 단계의 색으로 표시된 영역이 대략 같은 위험도를 갖는 영역이다.

RBI는 설비 및 요소의 수, 교체 비용의 수준, 계획자의 기술적인 수준, 파손손실이 안전 및 재정에 미치는 영향 등을 고려하여 정성적, 준정량적, 정량적 방법중 하나를 사용하거나 하위 수준의 방법을 시행한 후 설비 전체의 대략적인 위험도를 파악한 후 위험도가 높은 요소를 선정하여 점차 준정량적, 정량적인 방법을 적용해 나가면서 평가한다. <그림 2>에 세 단계의 검사계획수립 절차를 나타내었다. 정성적인 방법의 경우 파손확률 및 파손손실 수준은 수치적이지 않으며, 보통 직관에 의존한다. 이



<그림 1> 정성적인 위험성 선도

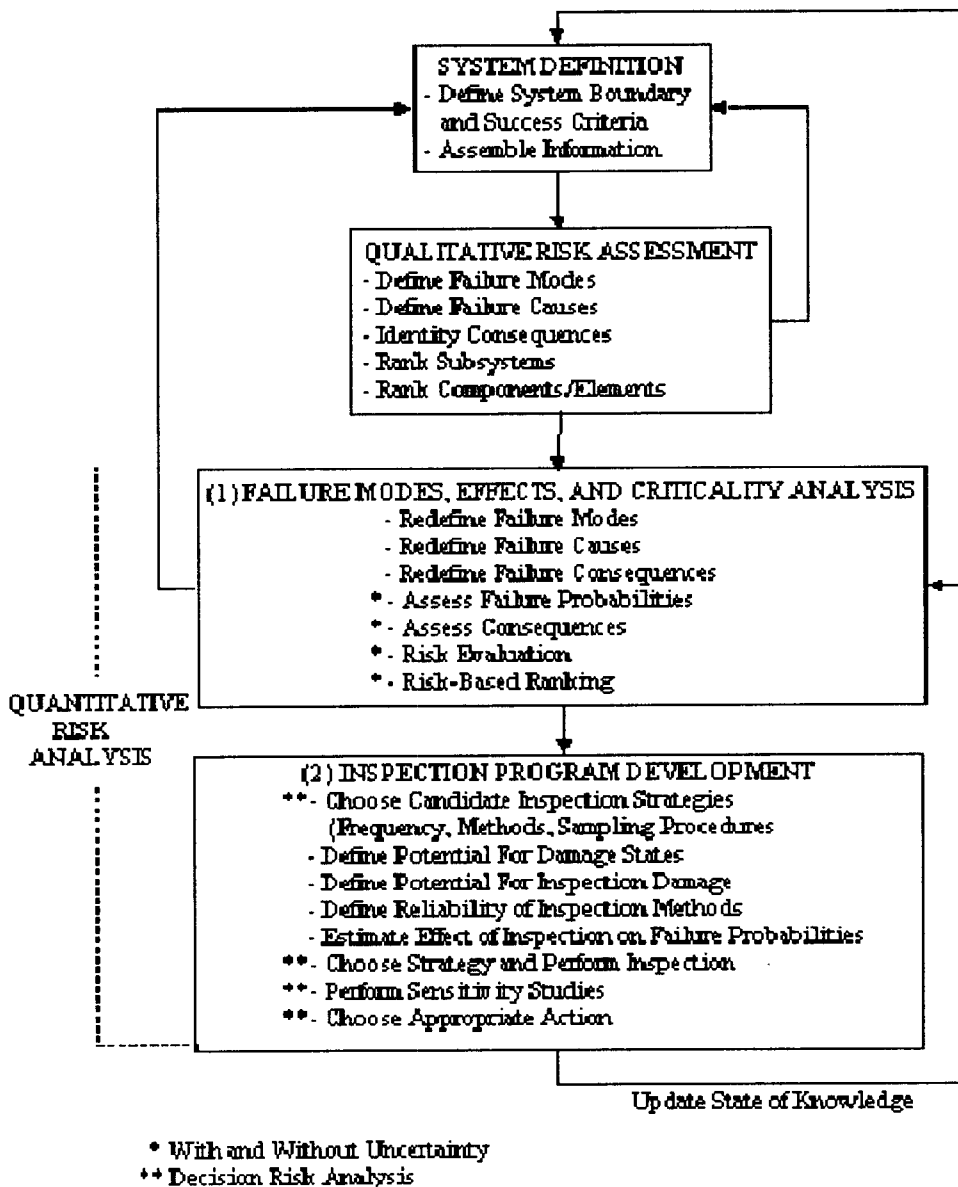
방법은 자체만으로도 파손발생 빈도와 그 파손손실을 도식적으로 표현하는 유용한 방법이나, RBI의 첫 번째 단계로서 사용중 검사 혹은 더 복잡한 수준의 위험도 평가가 필요한 요소를 선별하는 데 사용된다. 준정량적인 방법에서는 파손확률 및 파손손실 수준은 수치적이며, 얻어진 정보는 직관이나 해석의 결과로 나온 결정론적인 결과값이다. 정량적인 방법에서 파손확률 및 파손손실 수준은 수치적이며 얻어진 정보는 확률론적인 해석의 결과이다.



<그림 2> 검사계획 수립의 단계별 절차

2-2. RBI의 절차

RBI 안전성 진단 절차는 <그림 3>과 같이 시스템의 정의, 정성적인 위험성 평가, 정량적인 위험성 평가, 검사 프로그램 개발의 4단계로 나눌 수 있다. 각 단계에서의 절차를 살펴보면 다음과 같다.

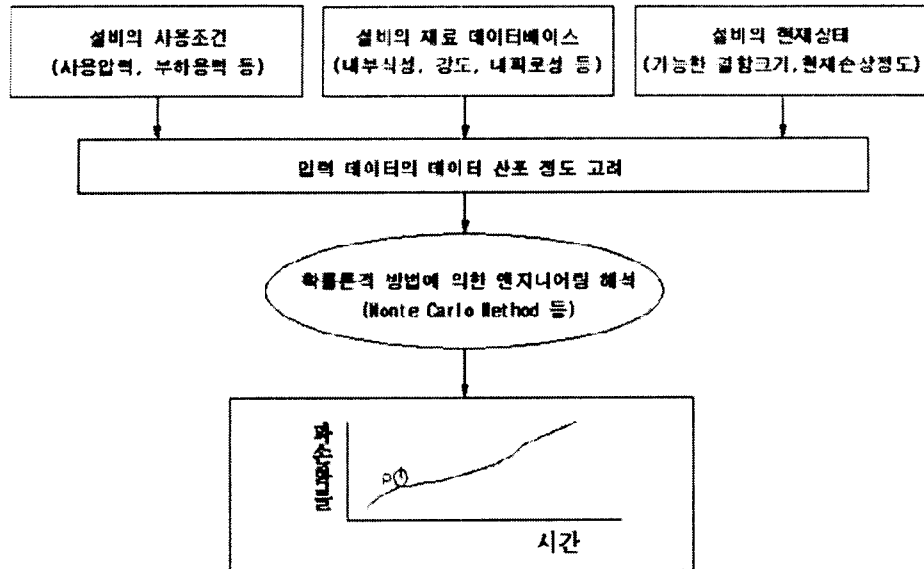


<그림 3>. RBI 절차도

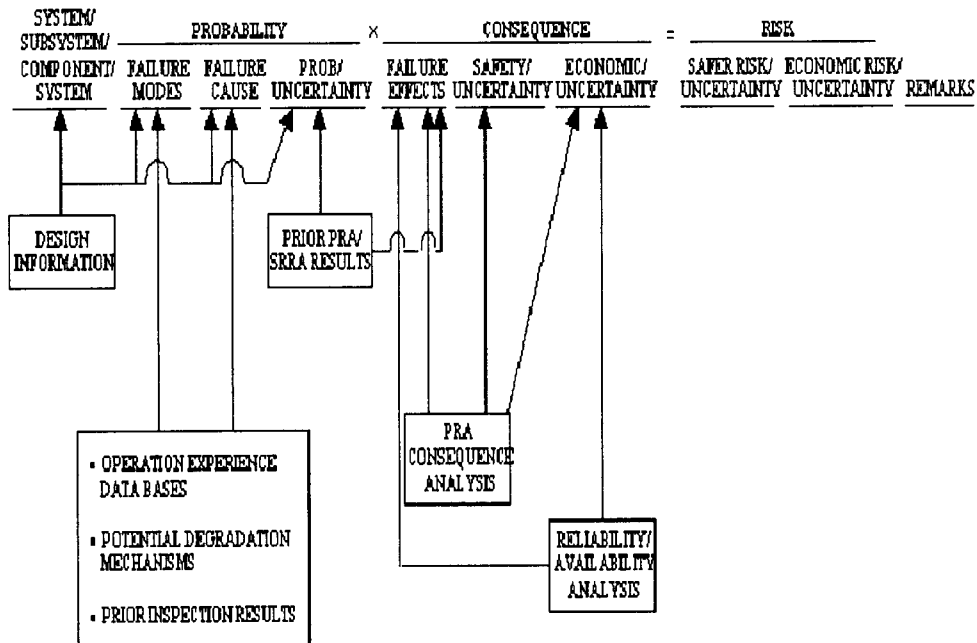
첫 번째 단계는 검사의 대상이 되는 시스템을 정의하는 단계로서 이때 가장 중요한 것은 필요한 자료를 충분히 수집하는 것이다. 특히 열화 메카니즘이나 문서화되지는 않았지만 설비의 신뢰성에 영향을 주는 설비의 오류를 잘 알고 있는 설비 관계자들을 접촉하는 것이 중요하다.

두 번째 단계는 정성적인 위험도 평가 단계로서 이 단계에서는 설비의 자료 및 이력을 검토하는데 설비의 자료 검토는 일반 사항(설계, 시공 및 사용 이력 등), 안전과 관련된 사항(유지보수 이력, 사고 발생 이력) 및 진단관련 사항(과거 진단 시기, 사용된 검사기법 등)을 검토한다. 특히 설비 사용중의 상태(압력, 온도 등)가 기록되어 있으면, 이를 검토하여 잠재 위험도를 쉽게 예측할 수 있으므로 자료 및 이력 검토는 효과적인 안전진단에 매우 중요하다. 또한, 설비검사 관련 법규 사항을 검토하며, 향후 운영전략 및 목표를 인식하여야 한다. 이상의 지식을 기초로 노출위험도를 정성적으로 평가한다. 설비 요소의 목록을 작성한 후, 각각의 취약 손상기구를 파악하여 파손확률을 예측 평가한다. 이때 파손확률은 일반적인 데이터 경향만을 동원하고, 사고이력, 설계조건, 시공자 및 사용기간 등을 일차적으로 고려하여 개략적으로만 예측 평가한다. 따라서 이 단계에서는 위험도의 평가 결과는 각 진단 대상부위의 위험도의 거시적인 등급 분류로 요약되어 나타나게 된다.

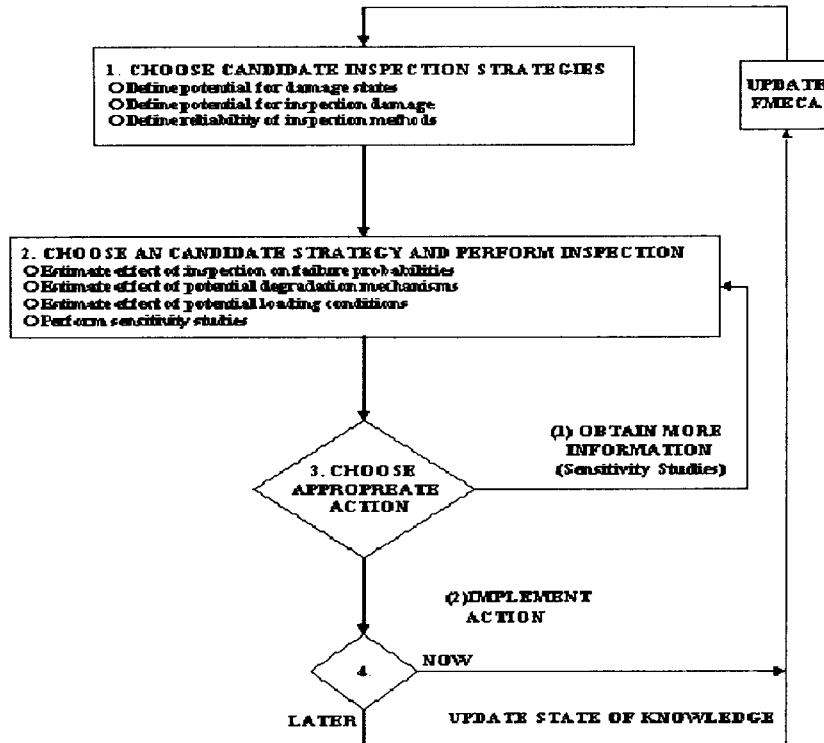
세 번째 단계는 RBI에 필요한 정보들을 효과적으로 통합하여 위험도를 정량적으로 평가하고 검사 계획을 수립하는 단계이다. 노출위험도의 일차적인 정성적 평가결과 낮은 노출위험도를 갖는 설비 요소의 경우에는 노출위험도의 더욱 상세한 평가가 필요하지 않으나, 중간 또는 높은 위험도를 갖는 요소의 경우에는 고급해석을 사용한 정량적인 평가법을 적용해야 한다. 정량적인 평가법은 통계파괴역학에 근거한 계산 등에 의한 해석적인 방법과 기존 데이터베이스 통계에 의한 신뢰성 공학을 사용한 방법이 사용된다. 이러한 해석적 모델이나 신뢰성 데이터베이스가 없는 경우에는, 실제 현장검사 중에 설비 상태를 검사하여 노출위험도를 실측으로 평가하여야 한다. 노출위험도의 정량적 평가를 위한 파손확률의 정량적 평가가 항상 수행 가능한 것은 아니며 계산에 의한 확률평가 모델이 정립되어 있고 재료 데이터베이스가 확보되어 있는 경우에만 <그림 4>와 같은 절차를 거쳐 수행할 수 있다. 파손확률 계산에 사용되는 각각의 입력 데이터(압력, 응력, 재료물성, 부식물성 데이터, 피로물성 데이터)는 각각 고유의 확률론적 데이터 산포를 갖고 있으므로 이러한 데이터의 흐트러짐을 고려한 확률론적 방법으로 파손 확률을 계산해야 한다. 한 예로써 통계파괴역학에 자주 사용되는 몬테칼로법 등이 사용될 수 있을 것이다. <그림 5>에는 여러 가지 경로를 통해 얻은 정보를 구성하여 정량적인 파손확률 평가를 수행하는 방법을 나타내었다. 파손이 발생한 경우의 예상되는 손실은 앞에서 설명한 손실 비용 등이 포함된다. 이상과 같이 정량적으로 평가된 파손확률 및 파손손실을 곱하여 노출위험도를 정량적으로 평가하게 된다. 시스템에 대한 정보는 설계값, 운전 이력 및 이전의 검사결과, 구조물의 신뢰도 및 위험도 해석결과, 파손 유형 및 파손 원인, 파손 확률 등으로부터 얻어진다.



<그림 4> 정량적인 파손확률의 평가



<그림 5> 정량적 위험성 평가를 위한 정보의 통합



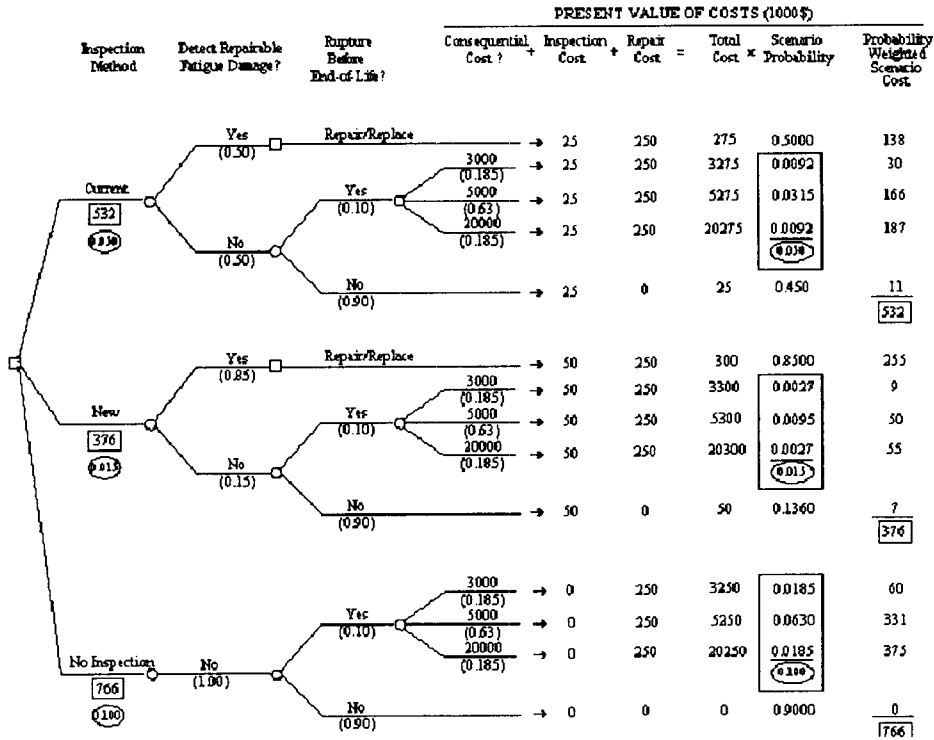
<그림 6> 검사 프로그램의 개발

정량적으로 위험도를 평가하여 각각의 요소들에 등급이 부여되어 몇 개의 집단으로 분류되면 각 요소들의 집단에 대한 검사 프로그램을 개발하는 네 번째 단계로 넘어간다. 이 절차는 <그림 6>과 같이 세 단계로 구분된다. 즉, 1) 검사 빈도와 검사절차, 장비, 검사자의 수준 등의 검사방법 및 샘플링 절차 등을 정의하여 몇 가지의 잠정적인 검사 계획을 수립하고, 2) 이 검사 계획중 신뢰도가 있는 하나의 검사 계획을 채택하여 검사를 수행하며, 3) 설비의 보수 혹은 교체와 같은 적절한 조치를 취하고, 정량적 위험도 평가 단계에 검사 결과를 반영하여 위험도를 재평가한다.

세가지의 잠정적인 설비검사 방법중 하나를 결정하는 예를 그림 7에 나타내었다. 잠정적인 검사 방법으로 "검사 안함", "현재 검사방법", "새로운 검사방법"이 선택되었다. 새로운 검사방법의 경우 현재의 검사방법보다 결함검출 가능성이 높은 반면 시행 비용도 많이 든다. 검사를 실시하지 않는 경우 결함검출 가능성은 낮은 반면 시행 비용은 들지 않는다.

<그림 7>은 검사방법 결정 절차를 결정하는 나뭇가지구조를 나타내며, 세 가지 방법 중 하나를 선택하는 과정에는 불확실성이 포함된다. 왼쪽 끝에서 시작하여 특정 경로를 따라가다 보면 전체 비용이라는 하나의 결정 기준에 이른다. 각 경로 가지에 표시되어 있는 확률은 그 경로를 따라갈 가능성을 나타내며, 이 과정에는 수치적인 계산

과정이 포함된다.



<그림 7> 검사방법을 결정하기 위한 나뭇가지 구조

이 예의 경우에는 새로운 검사방법을 적용하는 경우 가장 적은 비용(\$375,000)이 드는 것으로 기대되었으며, 현재의 검사방법의 경우는 \$532,000의 비용이 드는 것으로 기대되었다. 검사를 실시하지 않는 방법의 경우는 기대비용이 가장 높은 반면 (\$766,000) 파손될 확률은 가장 높은 것으로 평가되었으며, 이 방법은 고려에서 제외되었다. 본 해석 결과 설비의 수명이 다하기 전에 파손이 일어날 확률이 높아서 새로운 검사방법을 적용하여 검사비용이 증가하여도 결과적으로 설비를 유지하는 비용은 감소한다는 것을 알 수 있다. 앞에서 언급한 불확실성은 검사방법을 결정하는 데 중요한 변수가 될 수 있지만 민감도 해석(sensitivity analysis)을 통해서 줄일 수 있을 것이다. 이러한 과정을 통해 차기 RBI 진단계획을 각 설비 요소에 따라 구체적으로 수립하며, 노출 위험도가 높은 경우 위험도 감소를 위한 종합적 방안을 강구하여 실시하는 지속적인 위험도 및 안전성 관리를 수행한다.

3. 결론

이 연구에서는 전통적인 결정론적 방법에 의한 설비의 수명평가에서 필연적으로 발

생하는 과도한 보수성을 줄임으로서 설비의 장수명화 및 경제성을 높일 수 있는 RBI 기법에 대하여 설명하였다. 현재 국내에서 수행되고 있는 노후 발전소 수명진단 절차에는 여러 가지 개선의 여지가 있는데 그중 한가지가 일반 비파괴 검사 및 표면복제 검사 부위가 과다하게 많아 진단의 효율 및 경제성이 떨어진다는 점이다. 따라서 진단 계획 수립 시에 최소의 비용으로 최대의 안전성 확보를 얻을 수 있도록 RBI를 적극적으로 도입하여 적용하여야 한다. 현재 국내의 RBI 분야기술은 화력 발전 분야가 원자력 등에 비해 뒤떨어져 있는 상황이며 이웃 일본과 비교해 봐도 RBI분야 산학연 교류 활동은 많이 뒤져 있는 상태이다. 지난 몇 년간의 IMF 사태는 경제적 어려움 외에도 기술 발전의 공백을 남겼으며 이제 이를 극복해야 할 때이다. RBI 기법을 도입한다 하더라도 설비의 위험성 관리를 주기적 검사를 통해 실시하는 것이므로 항상 안전성을 확보할 수 없는 제한적인 면이 있다. 따라서, 향후에는 안전성 진단의 정기적 실시 외에도 설계자료, 사용/사고이력, 유지보수 이력 등 각종 설비 관련 자료를 데이터베이스화하고 설비의 취약부위로부터 실시간으로 운전조건을 입력받아 설비의 상태를 항상 모니터링할 수 있는 온라인 모니터링 시스템과 설비 관리시스템의 구축에 관심을 가져야 할 것이다.