

위험도 평가기술을 이용한 증기터빈 정비 최적화

김 범 신 · 한전 전력연구원 발전기계그룹, 선임연구원

_e-mail : kimbs@kepri.re.kr

최근 플랜트 산업에서 정비에 대한 인식이 단순한 고장의 수리에서 생산성 향상을 위한 투자로 전환되면서 정비업무에 대한 관리의 중요성이 부각되고 있다. 일찍이 미국의 가트너 그룹에서는 설비를 기업의 중요 자산으로 간주하고 정비를 포함한 일련의 관리활동을 기업의 가치향상을 위한 자산관리 활동으로 새로운 패러다임의 변환을 주장하였으며 이와 발맞추어 여러 가지 정비관리 기술들이 재조명되고 있다. 이 글에서는 정비관리기술 중 플랜트 산업에서 점차적으로 적용범위를 넓혀 가고 있는 위험도 평가기술을 소개하고자 한다.

위험도 평가기술은 대상에 대한 위험성의 정도를 평가하여 투자의 시급성과 적절한 투자의 규모를 결정하는 기술이다. 화력발전소와 같은 플랜트 산업에서 평가 대상은 증기터빈, 보일러, 대형 팬, 펌프 등과 같은 설비들이며 이 설비들의 위험성을 고장이 발생할 빈도의 측면과 고장이 발생하였을 경우 수반하는 피해 규모의 측면에서 평가하는 것이 위험도 평가 기술이다. 위험도 평가 기술은 미국의 석유 화학산업에서 치명적인 사고를 예방하기 위해 고안 발전되었으나 현재는 다양한 산업에서 적용되고 있으며 특히 화력발전분야

에서는 고장의 비용적 측면에 관점을 둔 정비 최적화 시스템이 많은 관심을 모으고 있다. 이 글에서는 화력발전소에서 대규모 정비비용의 투자를 결정하는 증기터빈의 정비최적화에 위험도 평가기술의 적용방법을 소개함으로써 위험도 평가기술을 이용한 정비최적화의 이해를 돕고자 한다.

증기터빈 정비관리 현황

일반적으로 화력발전소와 원자력발전소를 비교할 때 가장 빈번히 이용되는 두 발전소 간의 차이점 중의 하나는 어느 설비가 가장 중요한 설비인가를 가름하

는 것이다. 원자력발전소는 안전성과 위험성 그리고 정비 수행의 까다로움 때문에 증기발생기능을 수행하는 원자로를 가장 중요한 설비로 꼽고 화력발전소는 이와는 다르게 효율에 미치는 영향, 높은 정비기술, 긴 정지기간과 같은 이유로 증기터빈을 가장 중요한 설비로 꼽는다.

실제 화력발전소 증기터빈은 고온 고압의 가혹한 환경에서 운전되는 설비로 고가의 취득비용이 필요하며 발전소의 사용수명을 결정짓는 기준이 되는 중요한 설비이다. 따라서 화력발전소에서는 증기터빈을 빼놓고 정비를 논할 수 없을 만큼 중요한 설비이

기는 하나 제작사 권고사항을 빼면 자체적인 정비기준이 전혀 없는 정비기술의 사각지대에 있는 설비이기도 하다. 보일러의 경우 미국 ASME 압력용기 코드, 영국의 R5, R6 코드, 독일의 TRD 및 SP 코드 등을 통해 공식적으로 설계기준 및 평가기준이 발표된 반면 증기터빈에 대해서는 공개된 내용이 거의 없기 때문에 설비를 운영하는 발전사는 기본적인 조립과 분해 및 검사기술을 제작사의 권고에 전적으로 의존할 수밖에 없는 것이다.

증기터빈은 중요도가 큰 만큼 수익성에 미치는 영향도 크다. 증기터빈의 정비에는 장기간의 정지가 필요하기 때문에 정기적인 예방 분해검사를 위해서는 대규모 정비비용뿐만 아니라 발전손실도 감수해야 한다. 현재 대부분의 증기터빈은 고·중압 터빈의 경우 매 6년마다 분해정비를 수행하고 저압터빈의 경우는 매 2년마다 분해 정비를 수행한다. 이러한 정비주기 역시 제작사의 권고사항에 기초하며 왜 이러한 주기로 분해점검을 수행해야 하는지에 대한 자체적인 기준은 없다.

최근 미국을 비롯한 유럽 선진국들은 PCC(Post Construction Code; 가동 후 기준)의 제정에 많은 관심을 기울이고 있다. PCC는 말 그대로 발전소 건설 후 적용되는 코드로서 설계 기준 코드와는 다른 개념이다. PCC를 구성하는 코드로 FFS(Fitness

For Service; 사용적합성) 코드가 있다. FFS는 사용적합성이라는 뜻으로 설비의 운용 후 사용상 적합한지를 평가하는 코드이다. 이와는 달리 설계를 위한 FFP(Fitness For Purpose; 목적적합성) 코드가 있다. FFP는 운영목적에 부합하는지를 평가하는 코드이다.

PCC가 최근 관심을 끄는 것은 제작사들의 권고가 보수적인 측면이 강해 유지보수에 과잉비용의 투자가 의심되고 필요 이상의 빈번한 정비가 오히려 고장발생을 증가시킨다는 의혹이 제기되고 있기 때문이다. 더욱이 노후설비의 경우 제작사 보장수명을 초과하여 사용하게 되면 마땅히 설비관리에 적용할 기준이 없기 때문에 이를 만족시킬 새로운 코드의 출현이 절실한 것이다.

우리나라 역시 표준석탄화력 증기터빈의 경우 매 6년마다 설비 전체를 분해점검하고 매 2년마다 저압터빈을 분해점검하는 것은 과잉정비라는 의견이 강하게 제기되고 있으며 선진국들과 마찬가지로 계획예방정비공사 직후 오히려 고장률이 증가하는 현상도 발생하고 있다. 또한 30년 이상 운영되고 있는 발전설비가 점차적으로 증가하고 있어 노후설비에 대한 운영기준이 필요한 형편이다.

증기터빈 위험도 평가

위험도는 설비의 고장발생확률

과 고장피해규모-주로 피해 비용-의 곱으로 정의된다. 일반적으로 설비의 고장은 부품의 고장으로 인해 발생하므로 설비의 위험도를 평가하기 위해서는 부품의 위험도를 평가하여야 한다. 증기터빈은 일반적으로 운전압력에 따라 고압, 중압, 저압 증기터빈으로 구성된다. 현재 국내에서 가장 많은 수가 운영되고 있는 500MW급 증기터빈의 경우 고압과 중압터빈은 하나의 로터와 외부 케이싱을 사용하며 내부 케이싱으로 분리되어 있다. 물론 이와 달리 고압과 중압터빈이 별도의 로터와 케이싱을 사용하는 경우도 있다. 이 글에서는 우리나라에 가장 많이 도입되었으며 대용량으로 화력발전 부하의 기저를 이루고 있는 500MW급 표준석탄화력 증기터빈을 논의의 주 대상으로 할 것이다.

증기터빈의 적정 정비시기를 예측하기 위해서는 무엇보다 먼저 증기터빈의 손상형태와 원인 그리고 진전에 대해 살펴보아야 한다. 증기터빈의 대표적인 손상형태와 손상기구는 다음과 같다.

○ 균열

- 열기계 피로(Thermo-Mechanical Fatigue)
- 크리프(Creep)
- 부식 피로(Corrosion Fatigue)
- 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking)
- 마모피로(Fretting Fatigue)

○ 감육

- 침식 (산화 스케일, 액적)[Erosion(Oxide Scale, Water Droplet)]
- 부식(Corrosion)
- 마모/러빙(Wear/Rubbing)

균열을 발생시키는 손상기구의 하나인 열기계 피로는 주로 기동 및 정지 시 고온의 증기와 저온의 부품 간의 열전달로 인한 주기적으로 발생하는 열응력이 주원인이며 주로 고온부품의 수명을 결정짓는다. 크리프(creep)는 지속적인 응력이 작용하는 부품이 고온에 장시간 운전될 때 발생하며 역시 고온부품의 수명을 결정짓는 중요한 손상기구이다. 부식피로는 부식환경에서 주기적인 응력이 작용하는 경우 발생하며 응력부식균열은 부식환경에서 지속적인 응력이 작용하는 경우 발생한다. 마모피로는 기계적으로 접촉하고 있는 접촉면 사이의 작은 틈새(5~50 μ m)로 인해 발생하는 불규칙적인 응력작용에 의해 발생한다.

감육을 발생시키는 손상기구인 침식은 주로 열교환 튜브에서 발생하는 산화 스케일이 기동 중에 탈락하여 터빈으로 유입되어 발생된다. 또한 증기 중의 습분이 응결되면서 발생한 물방울에 의해 감육이 발생하기도 한다. 부식은 습분이나 증기 중 함유된 미량의 물질들에 의해 환경이 조성되며 마모/러빙은 회전설비와 고정체 간의 기계적 접촉에 의해

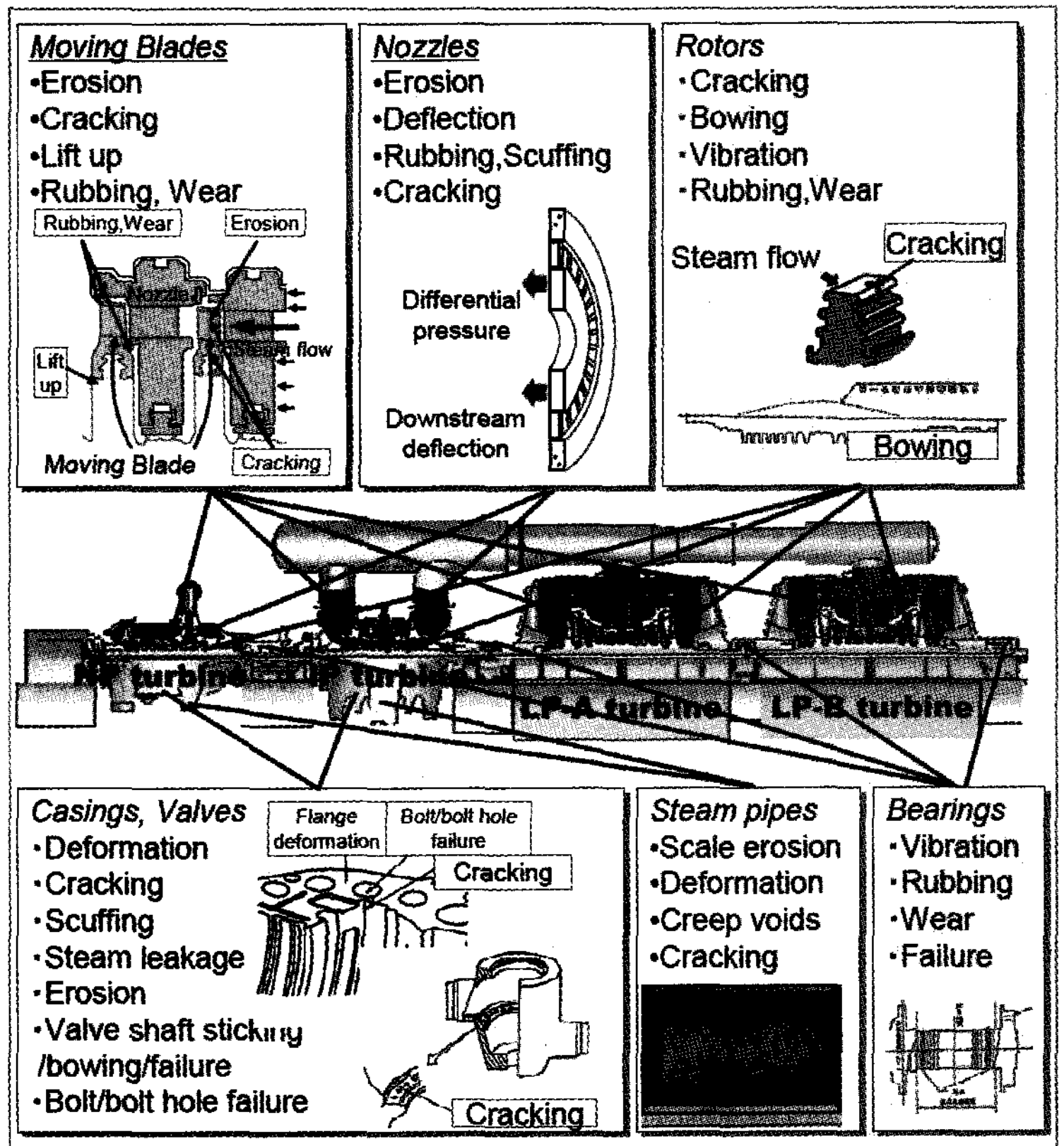


그림 1 증기터빈 구성부품 각 부분의 주요 손상기구(출처 : 메이조 대학 후지야마 카주나리 교수, 화력발전소 증기터빈 위험도기반 정비계획 프로그램 개발, 2007 전력연구원)

주로 발생된다.(그림 1)

설비의 위험도는 설비에서 발생할 수 있는 고장확률과 고장발생에 따른 피해의 곱으로 정의한다. 설비의 고장은 크게 두 가지로 나뉘어 고려할 수 있다. 하나는 경년열화로 인한 고장이다. 설비의 기능수행을 위한 물성이 사용시간 또는 사용회수 증가로 인한 저하에 의해 발생된다. 다른 하나는 사용기간 중 무작위적으로 발생하는 고장이다. 이러한 고장은 주로 전기, 전자, 제어설비에서 나타나며 대부분 열화기구

가 존재하지 않고 뚜렷한 고장 전 징후가 나타나지 않는다.

위험도 평가 대상이 되는 고장은 전자와 같은 고장이다. 후자의 고장에 대해서도 물론 위험도 평가 측면에서 접근하고자 하는 시도는 있으나 아직 보편화되지 않고 있다.

경년열화로 인한 고장은 대부분 손상기구와 연관을 가지고 있다. 고·중압 증기터빈 로터의 경우 중요한 고장으로 1단 디스크 그루브에서 열기계 피로에 의한 균열손상이 있고 로터 보어에서

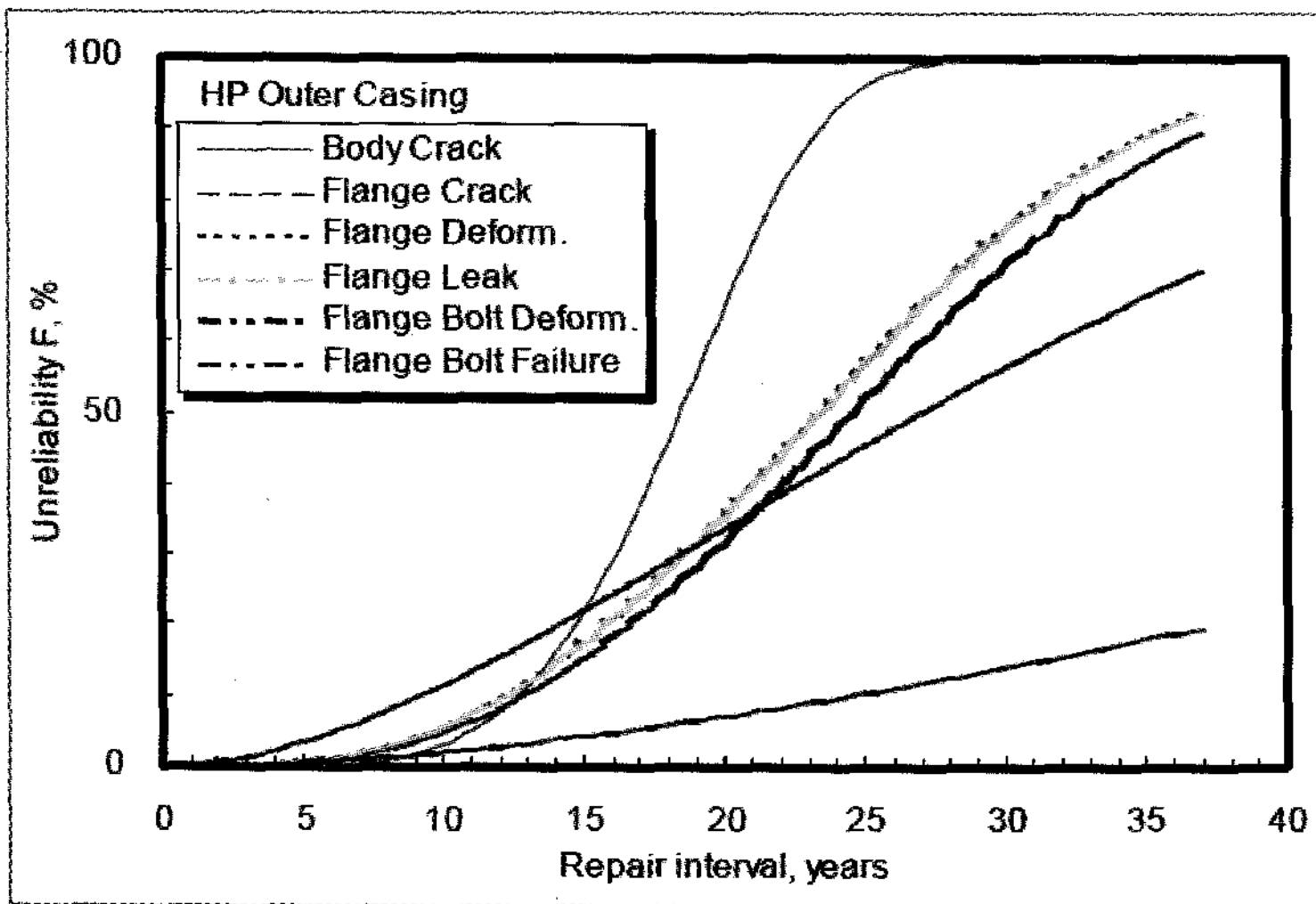


그림 2 증기터빈 외부 게이싱에서 계산된 다양한 손상기구들의 고장 확률(출처 : 메이조 대학 후지야마 카주나리 교수, 화력발전소 증기터빈 위험도기반 정비계획 프로그램 개발, 2007 전력연구원)

크리프에 의한 균열손상 또는 변형이 있다. 균열 손상이나 변형은 직접적인 고장이라 할 수 없지만 증기터빈의 높은 진동으로 인한 불시정지 및 더 나아가서 로터 파열에 의한 대형사고의 원인이 된다.

이 외에도 노즐블록 및 1단 동익과 정익의 침식, 밸런스 홀의 침부식 등 여러 가지 손상기구가 있으나 고·중압 증기터빈에서 열기계 피로와 크리프만큼 수명에 영향을 미치는 손상기구는 없다. 따라서 설비의 위험도를 평가하기 위해서는 유력한 손상 기구인 크리프와 열기계 피로에 대한 발생확률을 계산하여야 한다.

크리프와 열기계 피로는 일반적으로 사용시간과 사용회수 증가에 따라 설비의 손상을 증가시키지만 운전방법과 환경영향에 따라 손상의 크기가 정확히 시간

과 회수에 비례하지는 않는다. 반면 경도는 증기터빈의 재질과 같은 저합금강의 강도와 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 경도변화를 통해 재질의 강도변화를 예측할 수 있으며 확률론적인 파괴역학을 이용하면 손쉽게 크리프와 열기계 피로에 의한 손상발생확률을 예측할 수 있다.

고장에 대한 피해는 화력발전 특성상 주로 발전량 손실과 복구비용 및 부대 정비비용으로 평가할 수 있다. 복구비용은 주로 정비자재 및 대체 설비의 구매비용이고 부대정비비용은 복구를 위한 분해 및 조립과 검사비용이다. 이 외에도 비용을 산출하는 여러 가지 복잡한 식들이 제안되었으나 위험도 평가의 목적은 위험도를 최소화할 수 있는 정비주기 및 관리방안을 수립하는 것이므로 손실비용의 정확도를 높이기 위해

복잡한 수식을 사용하여 과도한 시간과 노력을 투자하는 것은 바람직하지 못하다고 판단된다.(그림 2)

증기터빈 정비 최적화

증기터빈은 특성상 운전 중 정비 및 검사가 불가능하고 정지 중 검사를 시행하더라도 오랜 정지기간이 필요하다. 우리나라에서 증기터빈은 계획예방정비공사 중에만 검사 및 정비를 수행한다. 따라서 증기터빈의 정비와 검사를 최적화하기 위해서는 먼저 설비상태를 고려한 적절한 계획예방정비공사 시기를 결정하여야 한다. 만약 고장피해를 비용 또는 비용과 증가의 지표로 고려할 수 있다면 위험도는 설비 운영자가 부담해야 할 비용으로 설명될 수 있다. 그러나 위험비용은 잠재적인 가상의 비용이고 실제 운영자는 정비비용을 부담한다. 물론 이 두 비용은 설비 운영자가 모두 부담해야 하는 비용이며 최적 정비시기라는 것은 이 두 비용의 합이 가장 작아지는 시기를 의미한다. 이러한 시기가 발생하는 이유는 일반적으로 정비비용은 정비 수행 후 운전시간이 증가할수록 연당 정비비용이 감소하는 반면 고장발생에 따른 위험도 비용은 점차 증가하게 되므로 어느 특정시기에는 두 비용의 합이 최소화되는 시점이 발생하기 때문이다.

정비의 최적시기가 결정되면 위험도가 가장 높은 부품의 손상 기구에 대해 검사계획을 수립할 수 있다. 대개 정비자원 - 비용, 기간, 인력 등 - 은 한정적이므로 제한된 자원을 이용하여 높은 위험도의 부품 손상기구에 검사 및 정비를 집중하는 것이 바람직하다. 이러한 기준으로 설비의 정지계획과 검사 및 분해정비 범위를 결정하는 것이 장기적인 측면에서 제작사의 보수적인 기준이나 과거 정비관행을 기준으로 결정하는 것보다 합리적이다.(그림 3)

그러나 현재의 계획예방정비공사 주기와 공기는 설비의 상태와는 크게 관련 없이 고정 주기에 의해 시행되고 있다. 상업운전 초기의 설비나 상업운전이 시작된 후 20년이 넘은 설비나 거의 동일한 주기, 동일한 공기로 정비작업을 수행한다. 실제 이러한 정비 환경에서 검사주기를 이용하여 정비주기를 선정한다는 것은 매우 요원하다.

최적 검사시기를 이용하여 정비시기를 선정하기 위해서는 먼저 현재 운영되고 있는 고정주기 정비방법에서 벗어나야 한다. 설비의 정비주기가 도래하면 자동

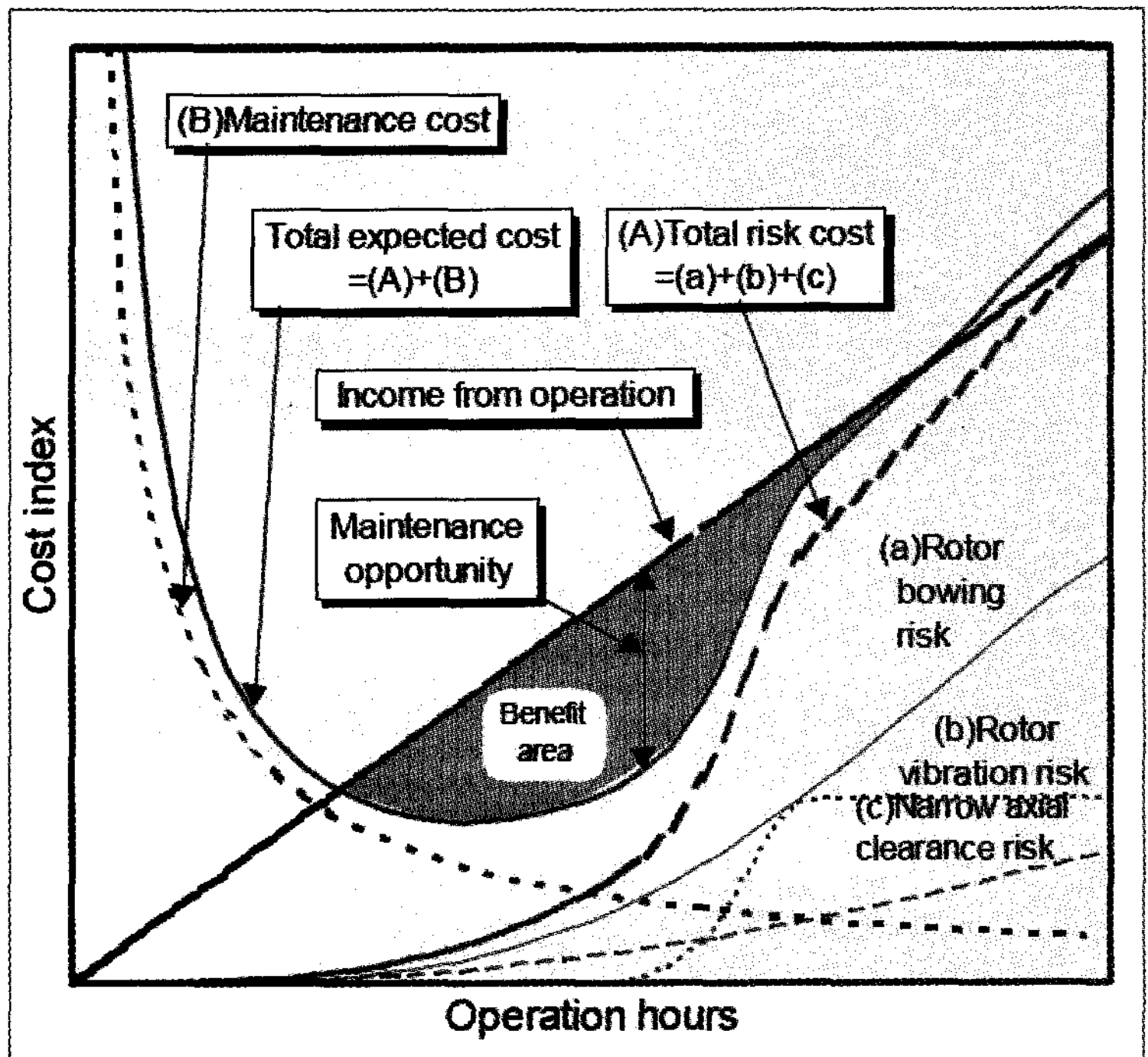


그림 3 정비비용과 위험비용의 특성을 고려한 정비 최적화 개념(출처 : 메이조 대학 후지야마 카주나리 교수, 화력발전소 증기터빈 위험도기반 정비계획 프로그램 개발, 2007 전력연구원)

적으로 분해하고 분해가 되었으니 검사를 시행한다는 개념은 최적화와는 너무 거리가 멀다. 앞서 언급한 바와 같이 잦은 정비가 오히려 터빈, 발전기와 같은 중요 설비의 고장을 증대시킨다는 조사결과도 있었다.

지금 무엇보다 발전운영자 입장에서 유의해야 할 점은 선진국의 계획예방 정비공사 - 장기간 정

지 중 정비공사 - 주기 및 공기를 무조건적으로 수용하는 것은 매우 위험하다. 자체적인 분석과 평가없이 '선진국이니까' 라는 단 하나의 이유로 따라가면 선진국임에도 최근까지 대형사고로 많은 인명을 앗아가는 과오의 전철을 밟게 될 가능성이 매우 크다.