

'98 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

터빈로터의 확률론적 파괴역학 해석 기법에 관한 연구

정성규, 김현수, 진태은

한국전력기술주식회사

경기도 용인시 구성면 마북리 360-9

송기욱

한전전력연구원

대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

가동중인 터빈로터의 계속운전/보수/교체여부 등을 판단하기 위해 해외에서는 결정론적 방법에 확률론적 파괴역학 해석방법을 이용하여 잔여수명을 평가하고 있다. 한편 국내에서는 현재까지 결정론적 방법을 주로 활용하고 있으며, 향후 확률론적 평가방법의 도입이 예상된다. 이러한 배경에서 본 논문에서는 터빈로터의 수명평가에 확률론적 파괴역학 해석기법을 이용하기 위한 기초연구로 터빈로터를 대상으로 응력해석, 결정론적 파괴해석 및 확률론적 파괴해석을 수행하였다.

1. 서론

전력수요 변화에 대응하여 가동되고 있는 발전설비는 빈번한 기동, 정지 및 빠른 부하변동 그리고 이러한 상황의 반복으로 인해 설비 내에 각종 손상이 누적되어 건전성이 상실된다. 특히 터빈로터의 경우 예기치 못한 사고발생시 장시간의 전력공급 중단으로 인한 경제적인 손실이 막대하기 때문에 이에 대한 건전성의 확보는 무엇보다도 중요하다. 이러한 배경에서 국내외에서는 설비의 효율적인 운전과 예기치 못한 사고를 미연에 방지하기 위해 수명예측 프로그램을 개발하여 사용하고 있다.

그러나, 이러한 기존의 평가 프로그램은 결정론적 파괴역학 해석기법을 이용한 것으로, 실제 존재하는 불확실성 요인을 고려하지 못하기 때문에 평가결과의 신뢰성에 한계가 있으며, 또한 정기검사 주기를 보수적으로 결정하여 불필요한 운전정지로 인한 경제적인 손실을 초래하고 있다. 이러한 이유 때문에 미국의 EPRI 등에서는 불확실성을 고려한 확률론적 파괴역학 기법을 사용하여 터빈로터 수명예측 프로그램을 개발하였으며, 이를 적용함으로써, 설비의 안전성 및 경제성을 제고시키고 있다.

현재, 국내에서 개발된 수명평가 프로그램은 결정론적 파괴역학 해석을 기초로 한 것이 대부분이며, 확률론적 파괴역학 기법을 적용하여 개발한 사례가 많지 않으므로, 본 연구에서는 수명평가시 중대한 영향을 미칠 수 있는 재료 파괴인성 등의 불확실성 요소를 고려한 확률론적 파괴역학 해석기법을 적용하여 터빈로터를 시범적으로 평가하였다.

2. 확률론적 파괴역학 해석 개요

본 연구에서 적용한 확률론적 파괴역학 해석기법은 응력해석 결과를 이용하는 결정론적 파괴역학 해석 및 확률론적 파괴역학 해석분야로 구분하였으며, 결정론적 파괴역학 해석결과는 터빈로터의 파손확률 계산을 위해 수행될 몬테카를로 시뮬레이션에 대한 입력 값으로 사용된다. 파손확률 평가를 위한 몬테카를로 시뮬레이션은 결합 깊이별 응력확대계수와 터빈로터 재료 파괴인성의 불확실성 편차와의 비교를 위한 수많은 결정론적 계산을 수행하도록 한 것이다. 본 연구에서 터빈로터의 파손확률을 산출하기 위해 적용한 평가모듈은 그림 1과 같다.

2.1 시뮬레이션 모델

파손확률을 평가하는 대표적인 방법으로 시뮬레이션을 통해 관련 매개변수를 무작위로 추출하여 비교하는 몬테카를로 기법을 이용하였다.

시뮬레이션 절차는 터빈로터의 특정 결합에 대해 과도상태동안 응력확대계수를 산출하고, 운전년수 증가로 인한 결합성장 평가를 수행한다. 각각의 성장된 결합선단에서의 작용 응력확대계수는 표본 추출된 파괴인성치 (K_{IC})와 비교하며, K_{IC} 가 작용 응력확대계수보다 작은 경우 결합발생 또는 파손으로 간주한다. 만일 응력확대계수가 파괴인성치보다 작으면 그 경우는 파손이 일어나지 않고 시행횟수만 추가되며, 이러한 과정은 터빈로터의 파손이 일어나거나 과도상태가 끝날 때까지 계속 반복되어 파손확률을 산출한다. 해석 과정의 각 단계는 로터의 파손이 발생할 수 있는지를 결정하기 위한 계산이며, 이러한 반복계산은 사용자가 지정한 횟수만큼 수행된다.

터빈로터의 파손확률은 로터의 파손횟수를 총 해석횟수로 나눈 값이며, 실제 가동중인 터빈로터에서 각 기동, 정지와 같은 운전조건 발생횟수 누적으로 인하여 결합깊이는 성장하고 재료파괴인성은 감소하므로써 파손확률은 증가된다. 추정된 로터 파손확률의 타당성은 파괴역학 알고리즘의 정확성 및 임의 변수들에 대한 확률분포의 정확성에 달려있다. 본 연구에서 사용된 주요 분포 함수 및 결정론적 평가모듈은 다음과 같다.

2.1.1 초기 결합깊이 분포

일반적으로 터빈로터의 초기 결합깊이 분포는 터빈로터 제작자의 경험과 비파괴검사법에 근거를 두어 정량화 할 수 있으나, 각 발전소 터빈로터의 결합분포가 일정치 않으므로, 본 연구에서는 초기결합 깊이별 분포확률을 입력변수로 처리하였다.

2.1.2 시뮬레이션 수 및 결합 수

로터 파손확률을 계산하기 위해 본 연구에서는 결합 발생수 또는 로터 파손 수를 시뮬레이션 수행횟수로 나누어 계산하였으며, 이를 위해 사용자가 지정한 만큼의 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 하였다.

한편, 시뮬레이션된 전체 결합에 대한 파손확률을 계산하기 위해서는 사용자가 각 결합깊이별 파손개수를 더하고, 이를 시뮬레이션수로 나누어 평가하여야 한다. 이러한 각 깊이별 결합 수는 시뮬레이션 수와 결합깊이별 분포확률 그리고 로터내 평균 결합 수를 곱하여 산출되며, 터빈로터 전체의 파손확률평가는 총 파손 수를 시뮬레이션 횟수로 나눈 값이다.

2.1.3 파괴인성치

온도와 Fracture Appearance Transition Temperature(FATT)의 함수로서 결합발생에 대한 파괴인성치(K_{IC})의 평균값 함수는 그림 2와 같으며[1], 평균값에 대한 K_{IC} 의 분포는 사용자에게 의해

정의된 표준편차를 가지는 정규분포라고 가정한다. 본 연구에서는 특정 결합에 대한 파괴개시인성이 각 시간구간마다 서로 연관되도록 구성되었다. 그러나 평균값은 각 시간구간에서의 온도에 따라 변하므로, 결합이 성장하면 새로운 결합깊이에 대해서 평균값에 대한 인성치의 변화량을 다시 시뮬레이션 한다.

2.2 응력확대계수 평가 모듈

결정론적 및 확률론적 파괴해석을 통한 터빈로터의 건전성 판단을 위해서는 재료 파괴인성치와 비교를 위한 결합선단에서의 응력확대계수(K_I) 계산이 선행되어야 한다. K_I 계산식은 결합이 존재하는 위치, 결합형상, 결합방향 등에 따라 형태가 매우 다양하고 복잡하므로, 본 연구에서는 이를 용이하게 계산하기 위해, 우선적으로 주어진 응력데이터를 사용하여 터빈 증공로터 내부 및 외부 표면결합에 대한 K_I 를 평가할 수 있는 K_I 계산 모듈을 구축하였으며, 이 결과를 확률론적 프로그램에 적용하였다. 본 모듈에서 사용한 식은 Raju-Newman[2]식이며, 참고문헌[3]을 참조하여 응력확대계수 평가모듈을 구축하였다.

2.3 피로결합성장 평가 모듈

운전년수 증가시 기동, 정지 횟수 누적으로 인한 초기결합 성장 계산을 통해 터빈로터의 잔여수명은 물론, 초기결합 성장으로 인해 증가된 파손확률 등을 평가할 수 있다. 따라서 이러한 결합성장 평가는 매우 중요한 모듈로서 본 연구에서는 Paris' law[4]를 이용한 결합성장 평가모듈을 개발하여 확률론적 평가시 반영하였다. 본 모듈은 터빈로터의 기동, 정지 횟수, 발견된 초기결합에 대한 형상과 크기 및 운전환경을 사용자가 입력하여, 평가하고자 하는 시점에서의 성장된 결합깊이를 산출하고, 이에 대해 확률론적 해석을 수행하도록 한 것이다. 이와 같이 결합성장 평가를 위해 각 운전환경별 재료상수는 터빈 로터강 재료인 Cr-Mo-V강의 피로결합 성장률 곡선을 적용하였다[5]. 한편, 기동, 정지 횟수 증가로 인한 성장된 결합깊이를 산출하는 모듈은 참고문헌[3]을 참조하였다.

3. 터빈로터 파손확률평가

본 연구에서는 확률론적 파괴역학 해석기법을 이용하여 터빈의 가장 일반적인 4가지 운전조건(Cold, Warm, Hot, Very Hot Start)을 대상으로 터빈로터 증공축의 가상결합에 대해 운전년수 증가에 따른 파손확률을 산출하였다. 파손확률 평가를 위해서 다음과 같이 응력해석, 응력확대계수 및 피로결합성장 평가 그리고 이를 이용한 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

3.1 응력해석

터빈로터의 각 기동, 정지 운전조건으로부터 부위별로 재료 깊이에 따른 온도 및 응력분포를 산출하고 터빈로터의 결정론적 및 확률론적 수명을 평가하기 위해 본 연구에서는 유한요소해석코드인 ABAQUS를 사용하여 해석을 수행하였다. 8절점 2차원 축대칭 요소(CAX8)를 사용한 유한요소모델은 그림 3과 같으며, Hypermesh를 사용하여 요소망을 구성하였고, 특히 관심 대상부위인 터빈로터의 증공축 부위는 조밀하게 생성하였다. 이러한 모델을 사용하여 각 운전조건별 응력해석을 수행하였으며, 해석결과는 냉기기동에 대해서만 대표적으로 그림 4에 제시하였다.

3.2 결정론적 파괴해석

결정론적 파괴해석은 응력확대계수 평가 및 결합성장 평가모듈을 이용하여 수행하였으며, 이에

대한 기본 입력데이터는 운전조건별 재료 두께 및 시간에 따른 응력이다. 결정론적 해석결과는 파손확률 평가시 요구되는 운전조건별 결함깊이 및 시간 함수의 응력확대계수 값과 운전년수 증가로 인해 성장된 결함깊이이다.

3.2.1 응력확대계수

각 운전조건에 대한 응력해석 결과로부터, 응력확대계수를 계산하기 위해 사용된 대표적인 결함 형상비는 1:6이었으며, 냉기기동에 대해 주요 시간별 각 결함깊이의 함수로 나타낸 산출결과는 그림 5와 같다. 그림 5는 로터중공축 내부 표면결함에 대해 각 가동시간 동안 결함각도(ϕ)별로 산출된 응력확대계수 중 가장 큰 값을 선정한 것이다. 성장된 결함에 대한 응력확대계수는 파손확률 산출을 위해 재료 파괴인성치 분포와 비교하는데 사용된다.

3.2.2 피로결함성장

운전년수 증가에 따라 운전조건 반복횟수 증가로 인한 결함깊이의 성장은 잔여수명의 단축 및 파손확률 증가의 원인이 된다. 이러한 결함성장의 원인으로서는 운전조건에 따라 크립 및 응력부식결함도 주 원인이 될 수 있으나, 본 연구에서는 확률론적 해석방법에 중점을 두어 우선적으로 피로결함 성장만 고려하여 평가하였다. 그림 6은 Cr-Mo-V 재료에 대해 각 운전조건 반복횟수로 인한 초기결함별 성장깊이를 제시한 것으로, 이는 파괴인성치와 비교를 통해 결정론적 해석에 의한 잔여수명을 예측할 수 있다. 아울러 본 결과는 운전년수에 따른 성장된 결함에 대해 파손확률을 산출하는데 사용된다.

3.3 확률론적 파괴해석

본 연구에서 터빈로터 파손은 중공축 내부에 존재하는 결함 때문에 일어난다고 가정하였다. 터빈로터 중공축의 결함은 터빈로터의 수명을 좌우하므로 본 평가에서는 중공로터 내부표면에 초점을 맞추어 해석을 수행하였으며, 선택된 임의 결함에 대한 응력확대계수 및 파괴인성의 추출 값을 가지고 수많은 결정론적 해석을 수행함으로써 파손확률을 추정하였다.

본 연구에서는 터빈로터 내에 1개 이상의 초기결함이 존재한다는 가정 하에 터빈로터의 파손확률을 추정하였으며, 열취화로 인한 로터 재료의 손상이 터빈로터 파손 확률에 있어 가장 중요한 인자이므로 운전년수 증가에 따라 FATT증가로 인한 파괴인성이 감소하는 것을 반영하여 평가하였다. 본 연구에서 파손확률 평가를 위해 사용된 주요 입력데이터는 다음과 같다.

3.3.1 확률론적 파괴역학 해석에 사용된 주요 입력데이터

초기 결함깊이 분포 및 총 결함수

초기 결함깊이 분포는 터빈로터 제작자의 경험과 비파괴 검사결과를 토대로 구성되지만, 본 연구에서는 다음 표 1에서와 같이 가정하여 각 결함깊이별로 분포확률을 입력하였다. 이는 추후 실제 해당 터빈로터의 결함분포로 대체하여 평가할 수 있다. 본 연구에서 수행한 시뮬레이션 수는 10만회였으며, 로터의 평균 결함 수는 1개로 가정하여 총 10만개의 결함이 모의되도록 하였다. 여기서 모의된 10만개의 결함은 표 1에서 제시한 결함깊이별로 각각 나뉘어지고, 이들 결함은 운전년수 증가로 인한 결함성장 후, 해당 응력확대계수를 산출하여 파괴인성치와 비교된다.

파괴인성치 분포

파괴인성과 온도와의 관계는 그림 2를 참조하여 평가하였다. 확률론적 해석시 파괴인성치는

평균값의 15%의 표준편차 내에서 추출하여 응력확대계수와 비교를 통해 파손확률을 산출하였다.

표 1. 터빈로터 중공축 내부표면의 결함크기 분포(사용자 정의)

결함크기, in	결함크기별 존재확률	모의된 결함수
1.0	0.55	55,000
2.0	0.20	20,000
2.5	0.15	15,000
3.0	0.06	6,000
3.5	0.04	4,000
계	1.00	100,000

3.3.2 확률론적 파괴역학 해석결과

터빈로터강의 중공축 내부결함에 의한 운전조건 누적횟수별 파손확률(P(F/E))을 평가하기 위해, 본 연구에서는 성장된 결함깊이에 대해 가장 심각한 운전조건을 대상으로 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 특정 운전시간(500cycle)에서 초기 결함깊이별 파손 개수 및 파손확률 산출결과는 표 2와 같고, 운전년수 증가로 인한 결함깊이의 성장과 열취화로 인한 FATT 증가로 인해 저하된 파괴인성치를 사용하여 평가한 파손확률은 그림 7과 같다. 본 평가결과로부터 초기결함 깊이가 클수록 파손확률이 크게 도출되었으며, 전체 파손확률에 큰 영향을 주는 인자는 결함깊이성장 및 파괴인성치의 저하가 주 원인인 것으로 나타났다.

표 2. 특정시간에서 결함크기별 파손 결함수 및 파손확률

결함크기, in	파손 개수	총 모의된 결함수	파손확률(%)
1.0	3	70,000	0.511
2.0	22	15,000	
2.5	84	10,000	
3.0	89	4,000	
3.5	313	1,000	
계	511	100,000	

4. 결론 및 토의사항

터빈로터의 계속운전/보수/교체 여부를 판단하기 위해 결정론적 파괴해석을 기초로 한, 확률론적 파괴역학 해석기법을 이용하여 시범적으로 터빈로터의 건전성을 평가한 결과, 재료의 불확실성 고려시 운전조건 누적횟수에 따른 결함 성장깊이 및 결함깊이별 파손확률을 파악할 수 있었다. 현재 국내화전에서 운전중인 터빈로터의 65% 이상이 10년이상 운전중이며, 법정 운전기간인 15년 이상된 것도 55%를 상회하고 있는 현황과 운전년수가 점차 증가하고 있는 원전터빈 등을 고려할 때 보다 신뢰성 있고, 경제적인 터빈로터의 운영을 위해 본 연구에서 수행한 평가기법을 통하여 안전성은 물론 정기점검 기간 재조정 등으로 인한 경제적 이득 효과가 매우 클 것으로 판단된다.

본 연구의 확률론적 파괴해석은 피로결함성장만 평가하였으며, 또한 불확실 분포는 결함 및 파괴인성치만 고려하였으나, 추후 크립 및 복합요인으로 인한 손상, 응력해석, 온도, 비파괴검사 등의 불확실성을 반영할 예정이다. 한편, 본 연구에서 적용한 몬테카를로 시뮬레이션 기법은 터빈 뿐만 아니라 보일러, 원자로압력용기, 발전설비 주요배관 등 대부분의 구조물에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] H.D. Greenberg, E.T. Wessel, and W.H. Pryle, "Fracture Toughness of Turbine Generator Rotor Forgings", Engg. Fract.Mech., Vol 1, 1970, p653.
- [2] Y.Murakami : "Stress Intensity Factor Handbook", Vol. 2, 1987.
- [3] 정성규, 진태은, "원전가동중검사 수명평가 지침서 작성을 위한 기기평가 프로그램 개발", 97추계 원자력학회 학술발표 논문집, Vol 2. 1997, p504.
- [4] P.C. Paris and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Journal of Basic Engineering, December 1963.
- [5] R. Viswanathan, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components", ASM International, 1989, p282.

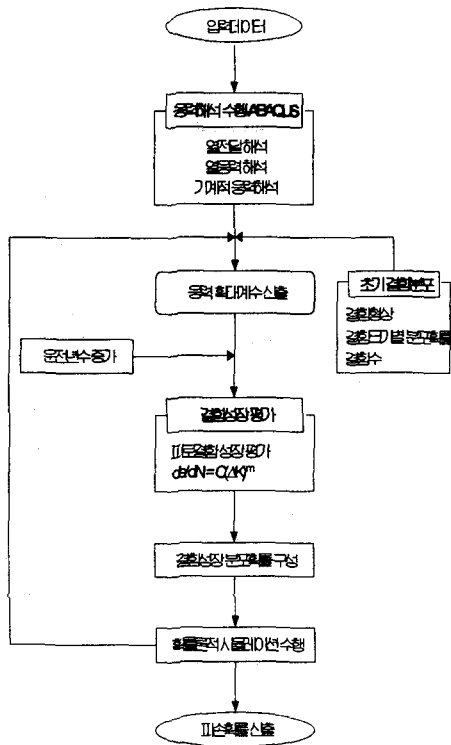


그림 1. 확률론적 평가 모듈

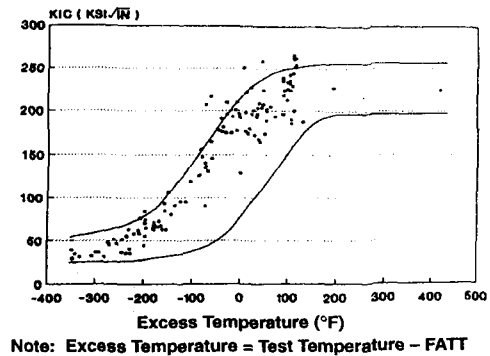


그림 2. 터빈 로터강의 파괴인성치

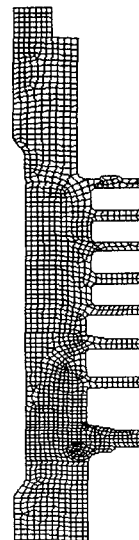


그림 3. 터빈 로터의 유한요소모델

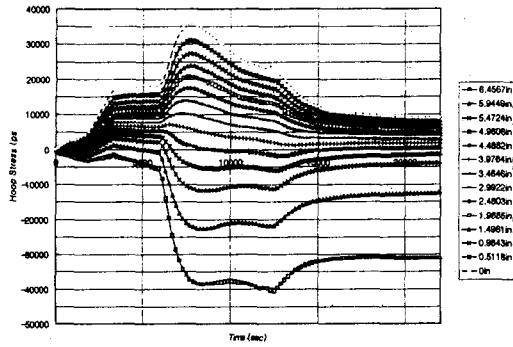


그림 4. 냉기기동에 대한 응력해석결과

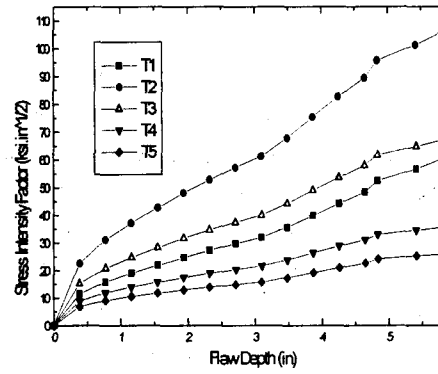


그림 5. 냉기기동시 응력확대계수

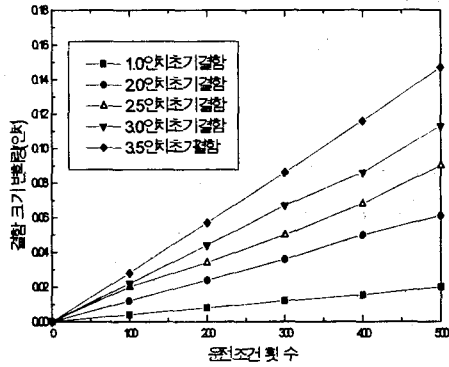


그림 6. 운전조건 누적에 따른 초기결함별 결함크기 변화량

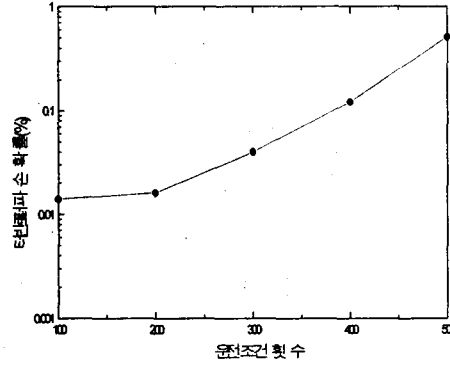


그림 7. 운전조건 누적에 따른 터빈로터의 파손확률