2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

증기발생기 세관 프레팅 마모에 대한 확률론적 건전성평가

Probabilistic Integrity Assessment for Fretting Wear of Steam Generator Tubes

김영종, 이정윤
GNEC기술사사무소
대전광역시 유성구 덕진동 150
정한섭, 박치용
한국전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소의 일반적인 증기발생기는 1차측과 2차측을 분리하는 압력경계를 이루는 약 4000개의 세관을 포함하고 있다. 유동 진동으로 인한 프레팅 마모는 증기발생기 세관의 수명을 단축시키며 발전소의 정지를 유발시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 세관의 마모의 예측해석을 위해 측정매개변수의 불확실성을 다루는 확률론적 방법을 제안하였다. 이들 세관의 건전성을 평가하고 수명을 예측하기 위해 Monte Carlo모사를 수행하였으며 파열압력-마모깊이 관계식에 대한 민감도해석을 수행하였다.

Abstract

A typical steam generator in a nuclear power station consists of about 4000 tubes which form the pressure boundary separating the light water in the secondary circuit from the primary circuit water. Fretting wear due to flow induced vibration may reduce the life of steam generator tubes and cause plant shutdown. For the predictive analysis of wear of tubes, a probabilistic method is proposed taking into account the uncertainties of the measurement parameters. Monte Carlo simulations are performed to evaluate the integrity and the life expectancy of these tubes and a sensitivity analysis is done on burst pressure-wear depth correlations.

1. 서 론

원자력발전소에 사용되고 있는 증기발생기 세관, 열교환기 세관, 원자로 내부 구조물 등에는 단상 및 2상 유체의 복잡한 유동 특성으로 인하여 극심한 진동이 발생하고 있다.

이러한 유동 진동은 유체흐름 중에 존재하는 세관과 세관고정을 위한 지지구조물 사이에 기계적인 마모손상을 유발함으로써 세관 및 기타설비의 수명을 단축시키는 주요원인으로 작용하고 있다. 특히, 유동 진동과 관련한 프레팅 마모 손상은 원자

력 발전소의 주요기기를 포함한 대부분의 산업체 주요기기에서 확인되고 있으며 전력생산에 중요한 역할을 담당하고 있는 증기발생기 세관에서 심각한 문제점을 야기시킨다. 프레팅 마모는 증기발생기 유형에 관계없이 국내외 대부분의 발전소 증기발생기 세관에서 경험하고 있으며, 이로 인하여 발전소를 정지시키는 사례도 속출하는 등 발전사업자에게 많은 경제적인 어려움을 주고 있다. 국내 가동원전에서 가장 주요한 관막음 원인은 세관 지지구조물에서의 프레팅 마모인 것으로 알려져 있다. 그러나 불확실성이 많이 개입되어 있는 프레팅 마모 손상에 대하여 확률론적으로 접근한 연구는 그리 많지 않다[1]. 따라서, 본 논문에서는 증기발생기 세관에서 심각한 문제가 되고 있는 프레팅 마모 건전성평가에 대한 확률론적 건전성평가기술을 개발하여 증기발생기 프레팅 마모에 대하여 건전성을 확보하는데 도움을 주고자 한다.

2. 세관 마모에 대한 확률론적 평가방법

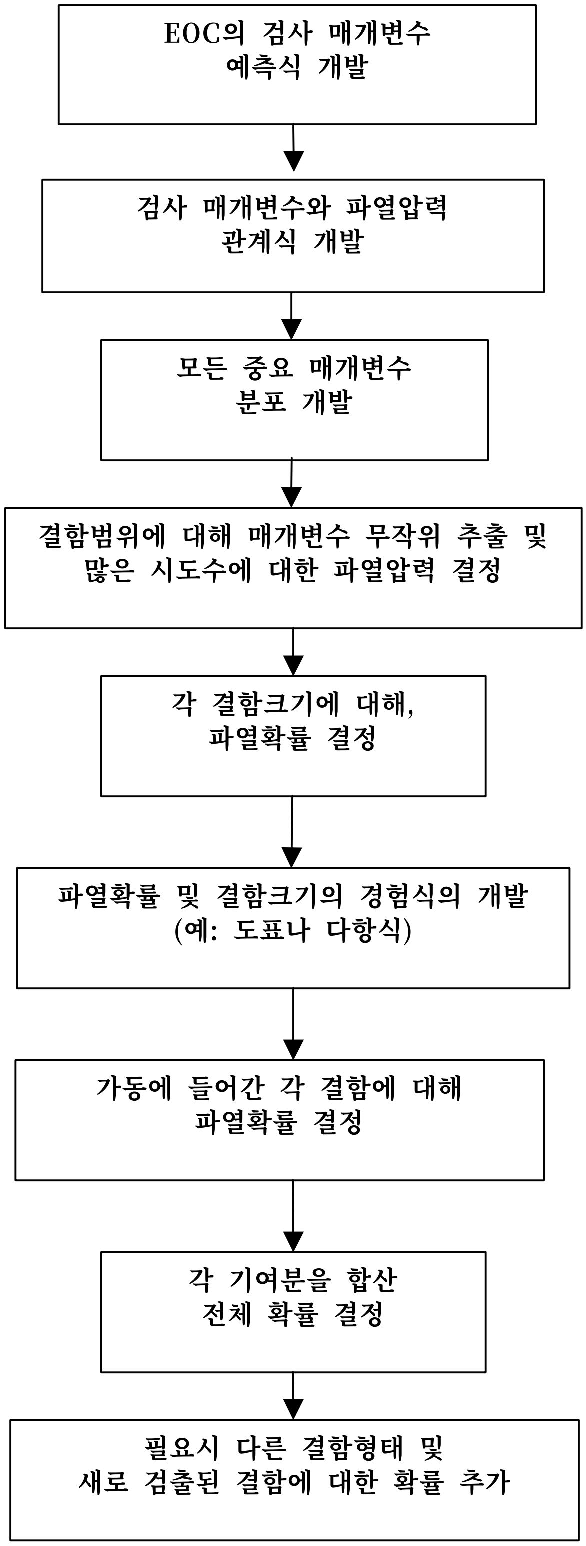
보통의 결정론적 방법은 운전압력의 3배와 사고압력의 1.4배를 적용한 압력을 유지할 수 있는 결함을 최대 허용결함으로 보며 여기에 검사 및 균열성장에 대한 여유를 추가한다. 결정론적 평가는 한계 값을 설정할 때 파열과 결함크기의 상호관계, 결함 성장 허용값, 검사오차와 같은 적용 매개변수들에 95%의 신뢰도를 포함시킨다. 이는 가동에 들어간 결함의 파열압력이 사고압력에 미치지 못하여 사고 시 누설의 발생을 방지하기 위한 것이다. 그러나 결정론적 방법에 사용된 보수성의 정도는 보통 정량화 할 수 없으며 가동에 들어간 결함 세관의 사고조건에서의 파열될 확률은 알지 못한다. 좀더 정확히 보수성과 위험도를 평가하려면 가동에 들어간 세관의 파열 위험도를 정량화 하는 확률적인 방법을 사용할 수 있다.

확률적인 해석은 모든 세관 특성과 이들의 분포가 정량화 될 수 있다는 가정에 기초한다. 몬테칼로 해석은 운전주기 초기에 보빈 전압, 균열길이 등과 같은 측정 검사변수를 기반으로 파열압력 분포를 결정하기 위해 수행된다. 이러한 값으로 SLB와 같은 사고조건에서 세관이 일차측에서 이차측으로 파열이 발생할 수 있는 확률이 운전 주기말 시점에서 계산될 수 있다. 수리한계는 최대허용 파열확률 값에 근거한다. 참고로 스웨덴의 경우 최대허용 파열확률은 가동에 들어간 모든 결함과 이들이 운전 중 성장하는 것을 고려하여 1% 이내로 하고 있다. 최대허용 파열확률은 규제기관의 승인이 필요하다.

일반적으로 이전에 감지된 결함에 의한 파열확률은 세관의 전체 파열확률을 지배한다. 이 경우 새로운 결함과 감지되지 못한 결함은 무시될 수 있다. 그러나 급속열화 모드에서는 이전의 감지 안된 큰 결함과 이들이 전체 파열 확률에 기여하는 것에 관한 통계적 모델을 개발하는 것이 필요할 수 있다.

이전에 발견된 결함만을 고려하여 확률적으로 해석을 하면 과정은 Fig.1과 같다. 먼저, 다음 운전주기 동안 결함크기에 영향을 주는 모든 요소를 정량화 하는 수식이 있어야 한다. 예를 들면 EPRI에서는 결함에 대한 수리한계를 다음과 같이 설정하고 있다.

Fig. 1 기존 검출된 결함의 파열확률 결정



$$V_{RL} + V_{NDE} + V_{CG} = V_{SL}$$

여기서

V_{RL} = 세관 수리 전압한계

V_{NDE} = 검사 절차 관련 측정오차

V_{CG} = 다음 주기까지 예상 전압 증가량

V_{SL} = 적절한 안전여유를 감안한 파열압력-보빈 전압 관계식의 구조적인 한계 전압

측정오차는 검사기술 및 평가자의 해석상의 오차를 나타낸다. 그러므로 다음 운전 주기말의 결함크기는 보빈전압의 성장과 측정 오차값이 포함되어야 한다.

다음으로, 파열압력과 적절한 검사매개변수에 대한 관계식은 실험자료의 분포에 대하여 계산된 평균 및 표준편차로부터 결정되어야 한다. 성장률과 검사오차도 이들 분포에 대한 평균과 표준편차로부터 결정되어야 한다. 예를 들면 성장률은 단일결함에 대하여 측정한 크기를 비교하여 여러 주기에 대해 현장에서 수행한 검사결과를 통해 결정될 수 있다. 평균 및 표준편차는 이후 이들 결함에 대한 모든 자료를 분석하고 그 결과의 분포를 검토하여 구할 수 있다.

몬테칼로 해석은 이후 평균 및 표준편차를 기반으로 수식의 각 매개변수 분포를 표본추출하여 수행된다. 위의 사례에서 전압성장률과 측정오차는 0과 1사이에서 무작위적으로 선택하여 표본추출 될 수 있다. 이 수는 평균과 표준편차로 나타내는 표준 정규분포의 수로 변환된다. 그 후 이는 특별한 항의 표준편차를 곱하고 해석에 사용되기 위한 값을 주도록 그 평균에 더해진다. 계산된 전압성장률은 이후 전체 예상 성장 값을 찾기 위해 다음운전 예상 주기길이를 곱하고 성장 및 오차값이 측정된 보빈 전압에 더하여 다음 주기말에 예상되는 전압을 찾는다. 다음, 전압크기에 대한 파열압력 분포는 같은 방법으로 그 균열의 예상 파열압력을 주기위해 표본추출 된다.

이 과정은 반복횟수가 매우 크고 특정 값과 같거나 이보다 낮은 파열압력 확률은 파열압력이 요구 값 보다 낮은 결과수를 합하여 구하며 이 수를 전체 결과로 나누어 계산된다. 예를 들면 2650psi에 해당하는 SLB 사고차압에서 세관 파열이 발생되는 결함의 확률이 요구되면 그 파열확률은 2650psi와 같거나 이 이하에서 파열되는 파열압력을 갖는 결과 수를 합하여 전체 표본결과로 나누어 구한다. 이 과정이 결함크기의 범위에서 반복되면 특정형태 결함에 대한 보수기준은 모든 결함이 가동되는 것을 고려하여 특정차압에 대해 요구되는 파열확률을 주는 값으로 결정될 수 있다. 발전소에 존재하는 결함의 종류와 열화정도에 따라 여러 결함에 대해 여러 수준의 위험도가 적용될 수 있다.

특정 결함크기에 대해 파열압력에 대한 누적분포를 계산하기 위해 위와 같은 과정을 따를 수 있다. 확률론적 접근은 결정론적인 접근에서 필요로 하는 일정한 보수성의 수준과 안전계수와 관련한 불확실성을 제거하는 장점이 있다. 결정론적인 접근은 보수성이 알려지지 않은 일련의 보수적인 한계값을 활용하므로 보수성의 수준을 알지 못한다. 확률론적 접근에서는 중앙의 또는 최대예상 거동이 중앙 주위의 전체 변수영역과 함께 모델 되므로 결과적인 전체 확률을 찾을 수 있고 어떤 결과

의 확률에 근거한 정보에 따른 판단을 할 수 있다. 이는 세관 파열이 허용되는 수준의 세관파손 위험의 량으로 수리기준이 결정될 수 있게 한다. 한편, 세관 파열 전체 확률은 모든 결함종류에 대해 분석될 것을 요구한다. 이는 해석적인 부담이 될 수 있다.

기존 결함에 대한 확률론적 접근은 증기발생기 검사에서 사용된 결함크기 변수에 관한 수리기준 공식으로 파열압력의 상관관계 분포를 찾는 것이다. 프레팅 마모에 대한 대체수리기준을 결정론적으로 다음과 같이 계산한다.

최대허용마모(두께의 %) = A - B - C

A = 마모결함을 모사한 세관 파열시험에 의한 최대허용 마모
B = ECT 허용 불확실도
C = 검사 주기간의 허용 성장률

이 경우 확률적 방법의 적용을 위해서는 보빈으로 현재 관통깊이와 세관 파열압력의 상호관계가 먼저 있어야 한다. 다음, 실제 결함깊이와 측정 깊이의 차이를 결정하는 시험을 수행하여야 한다. 이 분포의 평균 및 표준편차는 ECT의 불확실도에 반영되어야 한다. 마지막으로 결함성장을 주기검사자료를 이용하여 결정할 필요가 있다. 결과적인 차이로 결함성장률분포의 평균 및 표준편차가 계산된다.

다음, 수리한계공식은 다음주기말의 파열압력을 찾는데 사용된다. 사용되는 공식은

결함깊이(EOC) = 결함깊이(BOC)+오차+성장량

확률해석은 몬테칼로 기법을 사용하여 각각의 예상수치를 얻도록 측정오차와 성장분포를 표본추출 하여 수행되며 그 결과는 검사 중 측정된 결함깊이에 더해진다. 이 값이 EOC에 예상되는 깊이이며 위에서 발견된 상호관계를 사용하여 파열압력으로 변환하며 이들의 표준편차도 보빈에 의한 깊이와 파열압력 관계오차와 관련한 불확실도를 고려하도록 표본추출 된다. 이 과정이 많은 회수 반복된다. 이 결과를 기반으로 특정 압력에서 세관파열 확률이 찾아지며 최대 요구 파열확률에 근거한 수리한계가 결정된다. 이는 증기발생기 모든 결함에 대해 최대 파열확률에 근거할 수도 있으며 이로서 실제 수리기준은 다중결함 존재가능성을 고려하여 허용파열확률 값 보다 작게 설정될 수도 있다. 파열관계, 측정오차, 결함성장 뿐 아니라 파열압력을 결정하는 다른 주요변수에 대한 분포를 찾기 위한 충분한 자료가 활용가능하다면 다른 종류의 결함에도 같은 기법이 적용될 수 있다. 분포가 결정될 수 있는 한, 어떠한 세관 또는 결함변수도 결함의 파열가능성에 대한 보다 정확한 아이디어를 주기위한 몬테칼로 방법을 사용하여 표본추출 될 수 있다.

3. 해석 프로그램

3.1 무작위 표준정규분포 표본추출

해석 프로그램을 만들기 위해서는 우선 무작위 표준정규분포를 생성하는 프로그램을 작성해야 한다. 본 논문에서는 무작위 표준정규분포를 생성하기 위해 Polar

Method[2]를 사용하였다. 각 변수의 평균 및 표준편차를 가진 숫자를 구하기 위해 사용되는 정규분포가 적절히 생성되는지를 점검하였다. 0.05의 간격으로 200개의 bin을 설정하여, 각 생성된 무작위수가 해당 bin에 위치하도록 하여 각 bin의 생성확률을 구하였다. 정규분포이기 때문에 X=0에서 최대 생성확률을 보여야 하며, $X = \pm\infty$ 에서는 생성확률이 거의 0이 되어야 한다. Fig.2는 그 분포를 나타내며 정규분포가 생성되는 것을 볼 수 있다. 이 분포가 정규분포인지 점검하기 위해 X가 증가하면서 누적확률분포를 구하여 각 X값에 대하여 표준 정규분포곡선(식(1))의 누적분포를 빼, 그 결과를 Fig.3에 나타내었다. Fig.3는 100,000개 이상의 표본 및 0.05의 간격의 bin에 대한 최대 오차는 0.15%이하임을 보이고 있다. 이 작은 오차는 표준 정규분포가 Polar Method를 통하여 생성되며 몬테칼로 해석의 모든 변수에 사용될 수 있음을 입증한다. 100,000개 이상의 표본 및 0.05의 간격의 bin으로 몬테칼로 해석을 수행할 경우 충분히 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

다음은 표준 정규분포곡선의 식을 나타내고 있다.

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2p}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{s} \right)^2 \right] \qquad (1)$$

여기서

m = 평균

s = 표준편차

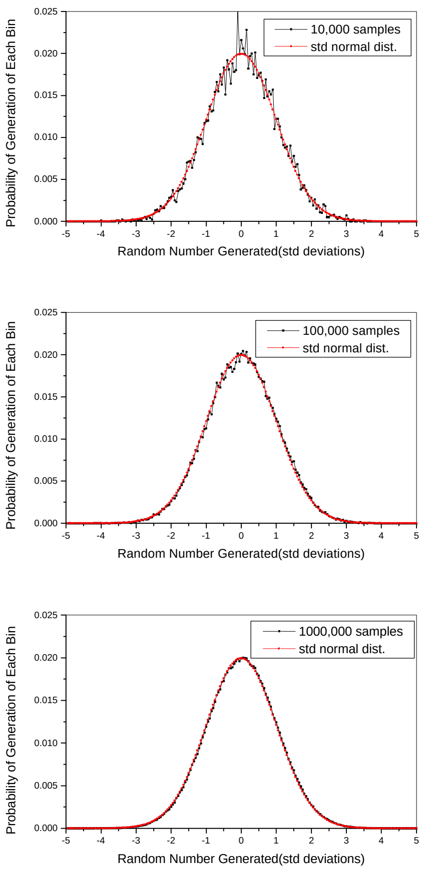


Fig. 2 정규분포 무작위수 생성시험(0.05 간격 bin)

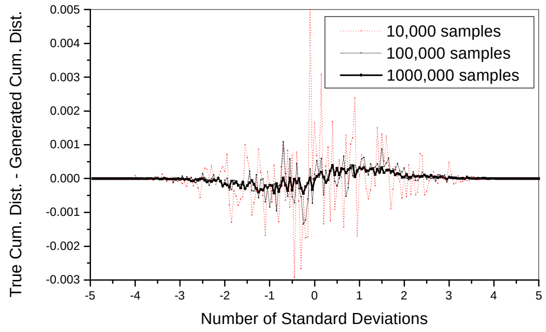


Fig. 3 정규분포 무작위수 생성의 오차(0.05 간격 bin)

3.2 프레팅 마모 건전성평가 프로그램

3.1절에서 기술한 무작위 표준정규분포를 생성하는 프로그램을 기반으로 프레팅 마모 건전성평가 프로그램을 작성하였으며 구조건전성기준[3]을 기반으로 다음의 2개 1차와 2차 차압에서 프레팅 깊이의 함수로 세관 파열확률을 결정하기 위해 프레팅 마모 건전성평가를 수행하였다.

(1) 증기관 파단 압력의 1.4배
(2) 정상운전압력의 3배

기존 결함에 대한 확률론적 접근은 증기발생기 검사에서 사용된 결함크기 변수에 관한 수리기준 공식으로 파열압력의 상관관계 분포를 찾는 것이다. 증기발생기 건전성평가 지침의 프레팅 마모 평가식은 다음과 같다.

최대허용마모 = A-B-C

A = 마모결함을 모사한 세관 파열시험에 의한 최대허용 마모
B = ECT 허용 불확실도
C = 검사 주기간의 허용 성장률

이 경우 확률론적 방법을 사용하기 위해서는 차기 운전주기 말의 프레팅 마모 깊이는 초기 깊이로부터 결정되어야 하며 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식을 사용하여 파열압력으로 변환되어야 한다. 프레팅 마모 깊이를 계산하기 위해 사용되는 공식은 다음과 같다.

프레팅 마모깊이(EOC) = 프레팅 마모깊이(BOC)+B+C

여기서 BOC 프레팅 마모 깊이는 현 검사동안의 보빈코일로 측정된 결함깊이이며 EOC 프레팅 마모 깊이는 세관의 파열압력을 결정하기 위해 사용된다. 이 계산은 각 프레팅 마모깊이와 관련된 파열압력의 분포를 구하기 위해 BOC에 존재하는 각 프레팅 마모깊이에 대하여 많은 회수 반복된다. 그 결과는 특정 차압에서 최대 희망 파열확률을 기반으로 이 결함형태에 대한 보수한도를 설정하는 데 사용될 수 있

다.

3.3 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식

확률론적 마모건전성평가 프로그램을 적용하기 위하여 3가지의 서로 다른 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식을 사용할 경우, 확률론적 마모 건전성평가 결과를 비교하기 위해 다음의 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식을 사용하였다.

1. Ontario Hydro 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식

Ontario Hydro에 의해 개발된 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식을 사용하였으며 3가지 다른 형상의 인공결함에 기반을 하고있다. 520° F에서 수행된 26번의 시험의 결과를 기반으로 다음과 같은 실험식을 얻었다.

$$P_{burst,\exp erimental} = 96.943[1-w]^{0.6078+0.0557w}$$

여기서 파열압력은 MPa-gauge이며, w는 0과 1사이의 무차원 분률깊이이며 이식의 표준편차는 15.8%이다.

2. EPRI 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식[4]

본 예제에서는 아래의 2경우에 대하여 t=1.27mm, L=10mm, R_m=10.46mm 및 $S_y + S_u$=912MPa를 사용하였다.

<u>주어진 길이의 360°균일감육(EPRI1)</u> Fig.4의 (1)

$$P_N = 0.598(1-h)^b \quad \text{여기서} \quad b = 1 - e^{\frac{a\,l}{\sqrt{1-h}}}$$

$$P_N = \frac{P_B R_m}{(S_y + S_u)t} \qquad l = \frac{L}{\sqrt{R_m t}}$$

a 의 평균값 = -0.139

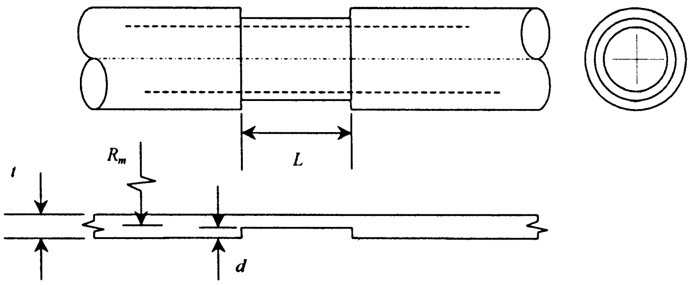
a 의 표준편차 = 0.0543

<u>제한된 원주방향 범위의 축방향 감육(EPRI2)</u> Fig.4의 (2)

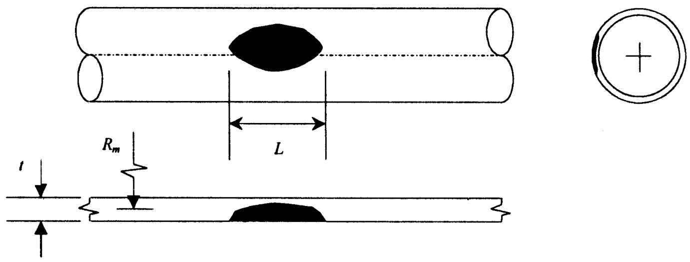
$$P_B = 0.58(S_y + S_u)\frac{t}{R_i}\left(1 - \frac{L}{L+2t}h\right) + 291\,\text{psi}$$

이 관계식의 불확실도에 대한 자료가 없어 2%표준편차로 가정하여 사용하였다.

상기의 3 관계식을 Fig.5에 도표로 비교하였다. Ontario Hydro 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식은 EPRI 관계식에 비하여 상대적으로 보수적인 결과를 보이고 있다. 제한된 원주방향 범위의 축방향 감육(EPRI2) 관계식은 선형의 관계식으로 나타나는데 깊은 결함의 경우(80%이상) 과도한 보수성을 나타낸다.



(1) 주어진 길이의 360°균일 감육(EPRI1)



(2) 제한된 원주방향 범위의 축방향 감육(EPRI2)

Fig. 4 증기발생기 세관 감육

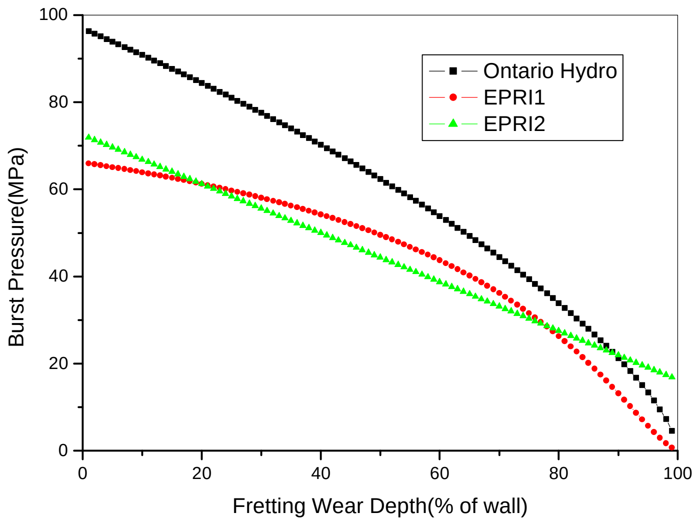


Fig. 5 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식의 비교

3.4 프레트 마모 성장률 및 불확실도

프레트 마모 성장률은 계산의 편의를 위해 발전소에서 관심을 가진 두께의 35%이상의 프레팅 마모 깊이만을 사용하였다. 본 예제에서 사용된 평균 성장률은 3.5%두께/년의 표준편차를 가진 5.0%두께/년이다. 확률론적 해석을 수행하기 위해 실제 증기발생기에는 음의 결함성장이 있을 수 없기 때문에 모든 음의 성장률을 0으로 설정하여 이들 값이 사용하였다.

확률해석은 몬테칼로 기법을 사용하여 각각의 예상수치를 얻도록 측정오차와 성장분포를 표본추출 하여 수행되며 그 결과는 검사 중 측정된 결함깊이에 더해진다. 이 값이 EOC에 예상되는 깊이이며 위에서 발견된 상호관계를 사용하여 파열압력으로 변환하며 이들의 표준편차도 보빈에 의한 깊이와 파열압력 관계오차와 관련한 불확실도를 고려하도록 표본추출 된다. 이 과정이 많은 회수 반복된다. 이 결과를 기반으로 특정 압력에서 세관파열 확률이 구해지며 최대 요구 파열확률에 근거한 수리한계가 결정된다. 이는 증기발생기 모든 결함에 대해 최대 파열확률에 근거할 수도 있으며 이로서 실제 수리기준은 다중결함 존재가능성을 고려하여 허용파열확률 값 보다 작게 설정될 수도 있다. 파열관계, 측정오차, 결함성장 뿐 아니라 파열압력을 결정하는 다른 주요변수에 대한 분포를 찾기 위한 충분한 자료가 활용가능하다면 다른 종류의 결함에도 같은 기법이 적용될 수 있다. 분포가 결정될 수 있는 한, 어떠한 세관 또는 결함변수도 결함의 파열가능성에 대한 보다 정확한 아이디어를 주기위한 몬테칼로 방법을 사용하여 표본추출 될 수 있다.

본 예제에서는 실제 발전소에서 사용된 불확실도 값에 근사한 값을 기준으로 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식 3 경우에 대하여 Monte Carlo분석을 시행하였다.

측정 불확실도의 평균은 두께의 3.0%이며 표준편차는 두께의 5.0%를 사용하였다. 이것은 실제 프레팅 마모깊이는 대체로 측정깊이보다 크다는 것을 의미한다.

차압값은 결정론적 보수한도를 계산하기 위해 사용된 해석 및 LOCA사고시 Level C&D 최대 차압에서 취했다. 정상운전 ΔP 는 9.2 MPa이며, 증기관 파단사고 ΔP 는 10.7 MPa이다. 정상운전 ΔP 는 실제 5 MPa이나 기동이나 기동정지 동안 일어나는 가능한 과도를 고려하여 더 큰 값이 사용된다.

증기관 파단사고 ΔP 에서 파열확률을 계산하는 예제를 아래에 기술하였다. 우선 위에서 기술한 바와 같이, 표본추출 해야 되는 3개의 매개변수가 있다: 측정오차, 결함성장 및 파열압력 관계식이다. 물론 더 많은 매개변수가 있을 수 있다. 본 예제에서는 3개의 매개변수를 사용하여 Monte Carlo분석을 시행하였다. 그러므로, Polar방법이 무작위 수가 쌍으로 구해져야 하기 때문에 4개의 무작위 수를 생성할 필요가 있다.

4. 결과 및 논의

파열확률을 결정하기 위하여, 3장의 과정이 많은 회수 반복된다. 증기관 파단사고 ΔP 에서 파열확률을 원하면, 세관의 파열압력이 10.7 MPa보다 작거나 같은 전체 회수를 파열확률을 주기위해 계산된 파열압력 회수로 나눈다. 두께 100%보다 큰

프레트 깊이는 실제 결함이 관통보다 더 깊을 수 없기 때문에 두께 100%로 감소시킨다. 프레트 깊이 35%에서 100%까지 1%단위로 분석을 시행하였다. Fig. 6 및 7은 각 프레팅 마모 깊이에 대하여 100,000회수의 표본을 취하였다.

Fig. 6은 세관의 파열압력이 10.7 MPa의 증기관 파단사고압력의 1.4배인 구조건전성기준보다 작을 확률을 보여준다. 그림에서 본 바와 같이 Ontario Hydro 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식을 사용할 경우 두께의 70%에서 세관의 파열압력이 이 한도보다 작을 확률이 1%이내이며 EPRI1 관계식을 사용할 경우 65%, EPRI2 관계식을 사용할 경우 74%이다. EPRI1 관계식을 사용할 경우 보수적임을 알 수 있다.

Figure 7은 세관의 파열압력이 9.2 MPa의 정상운전압력차의 3배인 구조건전성기준보다 작을 확률을 보여준다. 그림에서 본 바와 같이 Ontario Hydro 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식을 사용할 경우 두께의 57%에서 세관의 파열압력이 이 한도보다 작을 확률이 1%이내이며 EPRI1 관계식을 사용할 경우 53%, EPRI2 관계식을 사용할 경우 57%에서 이 한도보다 작을 확률이 1%이내이다. 같은 조건에서 매개변수에 대하여 90%하한치를 사용하여 결정론적(산술적 방법)으로 가동평가를 할 경우, Ontario Hydro 프레팅 마모 깊이-파열압력 관계식을 사용할 경우 두께의 50%, EPRI1 관계식을 사용할 경우 51%, EPRI2 관계식을 사용할 경우 56%가 정비기준으로 계산되었다. 통계자료의 정확도가 계산결과에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Monte Carlo모사에 의한 결과와 비교하면 전반적으로 보수적으로 평가되는 것을 알 수 있다. 따라서 Monte Carlo모사에 의한 확률론적 평가가 불확실도에 대한 정량화 및 결정론적 평가의 보수성을 완화시키는 것을 볼 수 있다.

위의 결과는 보수지침(40%)의 보수성을 나타내주며 구조건전성기준을 만족치 못할 확률을 기반으로 보수한도를 증가시킬 수 있는 가능성을 제안한다. 그러나 그것은 관계식의 매개변수에 대한 통계자료의 질과 량에 달려있다.

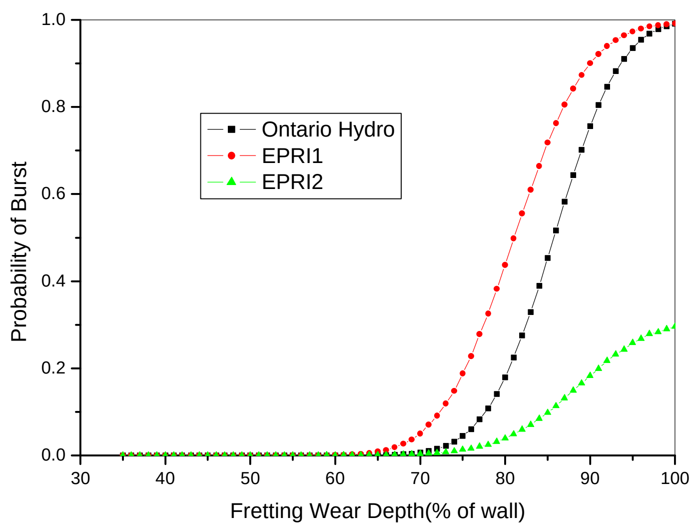


Fig. 6 SLB*1.4압력에서 파열확률(100,000 samples, 1% fret depth interval)

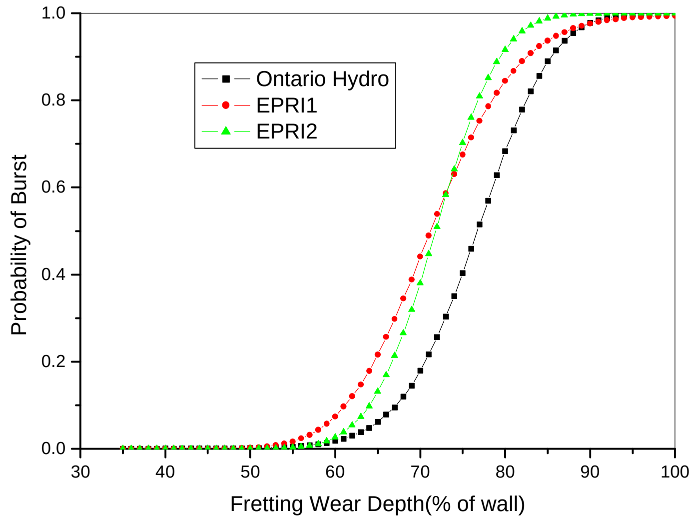


Fig. 7 정상압력차*3에서 파열확률(100,000 samples, 1% fret depth interval)

5. 결론

유동진동관련 프레팅 마모 손상은 발전소의 주요기기를 포함한 대부분의 산업체 주요기기에서 확인되고 있으며, 국내외 원전의 증기발생기 세관에서 프레팅 마모로 인한 관막음사례가 속출하고 있지만 1980년대 이전까지는 이에 대한 많은 연구가 수행되지 않았다. 최근에 이르러서야 유동진동관련 프레팅 마모의 주요 매개변수로 작용하는 진동유발기구의 중요성을 인식하여 원자력 발전소의 증기발생기 분야를 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있다.

증기발생기 세관의 유동진동으로 인한 프레팅 마모 손상특성을 이해하고 세관의 잔여수명을 평가하기 위해서는 세관과 지지구조물의 기계적인 상호특성을 정량화 한 후 세관의 프레팅 마모의 주요 매개변수 및 압력조건이 세관의 계속운전여부에 만족하는지를 검토해야 한다.

이에 따라 본 논문에서는 증기발생기 세관 마모에 대한 확률론적 건전성평가 해석 프로그램을 개발하여 프로그램의 유효성을 확인하고 증기발생기 세관 마모에 대하여 시범 적용한 결과, 실제 발전소의 증기발생기 프레팅 마모 손상의 건전성평가에 직접 적용할 수 있는 결과를 얻었다. 앞으로 이 프로그램을 실제 발전소에 시범 적용하여 문제점을 보완하고 통계자료를 확보하면 국내 확률론적 건전성평가기술 확보에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

6. 참고문서

1. Th. Payen and E. de Langre, “A Probabilistic Approach for the Computation of Non-Linear Vibration of Tubes under Cross Flow”, PVP-Vol. 328 Flow-Induced Vibration ASME, (1996) 337-346

2. Averill M. Law and W. David Kelton, "Simulation Modeling and Analysis", Second Edition, McGraw-Hill, Inc., 1991.

3. "Steam Generator Integraty Assessment Guidelines", EPRI Report, Revision 1

4. "Steam Generator Degradation Specific Management Flaw Handbook", EPRI Report (to be published).