

크리프 균열성장 모델에 대한 확률론적 수명예측 프로그램

김건영*, 壓子哲雄**, 강명수***

Probabilistic Remaining Life Assessment Program for Creep Crack Growth

Kun Young Kim*, Tetsuo Shoji**, and Myung Soo Kang***

ABSTRACT

This paper describes a probabilistic remaining life assessment program for the creep crack growth. The probabilistic life assessment program is developed to increase the reliability of life assessment. The probabilistic life assessment involves some uncertainties, such as, initial crack size, material properties, and loading condition, and a triangle distribution function is used for random variable generation. The resulting information provides the engineer with an assessment of the probability of structural failure as a function of operating time given the uncertainties in the input data. This study forms basis of the probabilistic life assessment technique and will be extended to other damage mechanisms.

Key Words : Probabilistic Life Assessment(확률론적 수명평가), Deterministic Life Assessment(결정론적 수명평가), Creep Crack Growth(크리프 균열성장), Uncertainty(불확실성), Probabilistic Density Function(확률밀도함수), Cumulative Distribution Function(누적분포함수), Triangle Distribution Function(삼각분포함수)

1. 서론

최근, 장기간의 운전이력을 갖는 노후화된 화력발전 설비를 부정기적으로 운전하게 되는 경우가 증가하고 있다. 이러한 부정기적인 운전 방식은 설비의 운전-정지 형태가 반복되므로 빈번한 설비의 기동 및 정지 등의 과도 운전 시에 발생하는 피로, 크리프, 열변형 등에 의해 설비의 손상을 가속시키게 된다. 그러므로, 발전설비의 노후화 현상을 방

지하고 설비 수명을 연장하기 위해서는 설비의 노후화 현상 및 정확한 수명예측에 대한 연구가 절실히 요구된다.

현재, 국내에는 15년 이상의 운전이력을 갖는 화력발전소가 절반을 넘고 있는 실정인데, 이러한 노후 설비를 폐기하고 새로운 설비를 건설하려면 경제적 부담 외에도 신축에 따른 법적 절차가 까다로워, 기존의 노후설비를 폐기하지 않고 수명을 연장하여 사용하는 경우가 많게 되었다. 따라서 노후

* 대한검사기술(주)
** 日本 東北大學校
*** 한국전력공사 전력연구원

설비의 수명평가 기술(life assessment technology)에 대한 연구가 더욱 활발하게 진행되고 있으며, 노후화된 발전설비의 안전성 판단 및 잔여수명평가에 대한 고급 기술을 개발하면 설비의 수명연장 운전 을 통한 경제성 확보, 설비 손상에 의한 고장 발생 예측 기능 확보, 발전 설비의 효율적인 관리 체계 확보 등의 효과를 얻을 수 있을 것이다.

최근에는, 손상이 일어날 확률을 운전시간의 함수로 계산하는 연구가 진행되고 있으며, 확률론적 해석 알고리즘과 균열성장 알고리즘을 결합하여 수명평가에 적용하는 확률론적 수명평가에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다.^{(1)~(4)} 확률론적 수명평가는 검사기술, 보수절차, 검사주기 및 고장해결(troubleshooting)과 같은 설비의 유지보수(maintenance)에 관련된 위험고려 결정(risk-based decisions)에 중요한 정보를 제공해 준다. 확률론적 수명평가는 재료 물성치, 형상, 환경, 하중조건 등과 같은 불확실성과 변동 가능성을 고려하여 해석을 수행하며, 일정 시간 운전 후 구조물의 손상 가능성을 예측할 수 있다.

본 논문에서는 화력발전설비의 손상해석 및 수명평가에 확률론적 해석 개념을 도입하여 해석의 신뢰성을 높이고자 확률론적 예측 모델을 제시하여 잔존수명예측 및 안전성 평가를 할 수 있는 수명평가 프로그램을 소개하였으며, 크리프 균열 성장 모델에 대한 확률론적 수명예측 프로그램의 개요를 설명하였다.

2. 확률론적 수명예측법

2.1 확률론적 수명예측법 개요

발전설비, 석유화학설비 및 중화학설비등 산업 구조물의 손상은 피로 또는 크리프 균열성장에 의하여 종종 발생하고 있다. 구조물의 설계와 운전 에 있어서 하나의 중요한 특성(변수)은 손상에 이르는 사이클수, 즉, “수명”이라고 하는 임계균열길이에 도달할 때까지의 사이클 수이다. 수명을 평가하는 과정에는 초기균열 발생시기 및 위치, 초기균열크기, 균열 형상비, 균열성장과 관련된 재료상수, 재료 물성치 및 하중조건 등과 같은 수많은 불확실한 변수들이 포함되어 있다. 확률론적 수명예측은 입력자료에 불확실성을 포함시킴으로서 구조물의 손상 확률을 운전시간의 함수로 제시하여 준다.

한편, 설비 운영에 있어서 검사와 보수는 중요

한 분야이다. 결함을 검출해 내고 결함을 포함한 설비를 보수하는 것은 설비의 수명을 상당히 증가시킬 수 있다. 그러나, 검사과정에도 상당한 불확실성이 포함되어 있다. 즉, 어느 정도의 균열이 검출될 수 있는지, 또는 어느 정도 이하의 균열은 검출될 수 없는지에 대한 불확실성이 존재하므로 다른 크기의 결함이 검출될 확률을 정의하여야 한다. 검사와 보수과정에는 비용이 수반되므로 특별한 검사 방법의 특성 및 효과를 미리 파악해 놓아야 하며 검사비용을 최소로 하고, 최적의 효과를 낼 수 있는 검사 계획을 세워야 한다.

최근, 확률론적 수명평가 프로그램을 개발하여 불확실성을 포함하고 있는 운전시간의 함수로 구조물의 손상이 일어날 확률을 해석하는 확률론적 잔존수명예측이 활발히 진행되고 있다.

구조물에 발견된 초기균열길이 a_i , 균열성장속도 da/dt , 임계균열길이 a_c , 등 포함된 모든 변수의 값을 알 수 있다면 구조물의 잔존수명을 정확히 예측할 수 있는데, 이러한 예측방법을 결정론적(deterministic) 수명예측법이라 한다. 그러나, 초기 균열길이, 균열 성장속도등 포함된 변수 값을 정확히 알 수 없으나 일정한 범위 값, 즉 분포함수를 구할 수 있다면 확률론적 해석을 도입하여 잔존수명을 해석하는데, 이러한 예측방법을 확률론적(probabilistic) 수명예측법이라 한다.

즉, 균열성장속도의 값이 불확실하다면 균열성장속도의 확률분포함수(probabilistic distribution function) 값을 근거로 균열성장을 예측하여 최종 균열길이를 구한 후 임계균열길이와 비교하여 손상 여부를 결정할 수 있다. 확률론적 수명평가법은 이러한 과정을 충분히 많이 반복 수행하여 1년 후, 2년 후, 또는 10년 후 손상이 일어날 확률을 구하여 잔존수명을 예측하는 것이다.

일반적으로 결정론적인 수명평가는 종종 아주 낮은 잔존수명이 나오는데, 이것은 손상을 피하기 위하여 보수적인 수명평가 자료를 이용하고자 하는 요구 때문이다. 반면에 확률론적 수명평가는 확률 밀도함수로 표시되는 수명평가 자료에 불확실한 정도를 부여함으로써 잔존수명 계산에 상응하는 불확실한 정도를 포함시켜 균열을 포함한 설비의 앞으로의 사용에 대한 신뢰성 및 정량적인 평가를 가능하게 해준다. 확률론적 수명평가는 일정한 기간 동안 운전 후의 손상 확률은 균열을 포함하고 있는 요소를 제거할 것인지를 결정하거나, 설비 보수에

우선 순위를 정하거나, 설비를 계속 운전할 것인지, 보수할 것인지, 교체할 것인가에 대한 경제적인 판단(분석)을 하는데 중요한 역할을 한다.

2.2 랜덤 변수 생성

확률론적 수명평가에 있어서 불확실한 변수의 값을 설정하는 과정을 랜덤 변수 생성(random variable generation)이라고 한다. 랜덤 변수 생성은 확률밀도함수(probabilistic density function ; PDF)를 이용하여 불확실한 변수의 값을 구할 수 있다.

확률밀도함수에는 정규분포(Gaussian distribution)나 Weibull distribution이 일반적으로 적용되고 있으나 본 연구에서는 이들을 단순화시킨 삼각분포함수(triangle distribution function)를 이용하였는데, 삼각분포 함수는 확률밀도함수중 가장 쉽게 널리 적용되고 있다. Fig. 1은 삼각분포함수의 개략도를 나타낸 것으로서 Fig. 1 (a)는 확률밀도함수 선도이고, Fig. 1 (b)는 누적분포함수 선도이다. Fig. 1에서 a_{min} 과 a_{max} 는 랜덤 변수 a 의 최소값과 최대값을 의미하며, a_{mode} 는 확률밀도함수가 최대인 값, 즉 가장 빈번하게 발생하는 랜덤 변수 a 값을 의미한다. 그리고, 확률밀도함수의 면적은 1이다. 일반적으로 랜덤 변수 생성의 과정 및 랜덤 변수의 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

랜덤 변수의 확률밀도함수가 최대인 값 a_{mode} 의 확률빈도 값을 f^* 라고 하면, 삼각형의 면적은 1이므로

$$\frac{1}{2} f^* (a_{max} - a_{min}) = 1 \tag{1}$$

따라서,

$$f^* = \frac{2}{(a_{max} - a_{min})} \tag{2}$$

누적분포함수 값 F^* 는 a_{mode} 왼쪽 삼각형의 면적과 같으므로

$$F^* = \frac{1}{2} \frac{2}{(a_{max} - a_{min})} (a_{mode} - a_{min}) \tag{3}$$

따라서 다음 식과 같이 된다.

$$F^* = \frac{(a_{mode} - a_{min})}{(a_{max} - a_{min})} \tag{4}$$

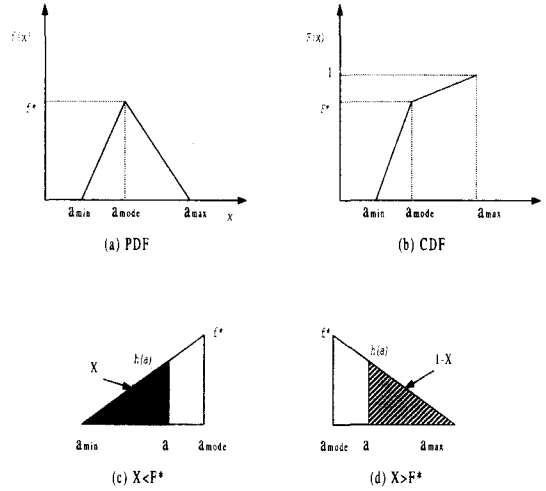


Fig. 1 Schematic diagrams of triangle probabilistic density function.

랜덤 변수 a 의 누적분포함수 값을 X 라고 하면, X 를 다음과 같이 표시한다.

$$X = \text{Rnd}(0, 1) \tag{5}$$

i) 만일, $X < F^*$ 이라면, X 는 Fig. 1 (c)와 같은 삼각형의 면적이므로

$$\frac{h(a)}{f^*} = \frac{(a - a_{min})}{(a_{mode} - a_{min})} \tag{6}$$

따라서, 랜덤 변수 a 의 확률빈도의 값 $h(a)$ 는

$$h(a) = \frac{f^*(a - a_{min})}{(a_{mode} - a_{min})} \tag{7}$$

랜덤 변수 a 의 누적분포함수 값, X 는

$$X = \frac{1}{2} (a - a_{min}) \frac{f^*(a - a_{min})}{(a_{mode} - a_{min})} \tag{8}$$

식(2)를 식(8)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$X = (a - a_{min})^2 \frac{1}{(a_{max} - a_{min})(a_{mode} - a_{min})} \tag{9}$$

식(9)에서 랜덤 변수 a 를 구하면,

$$a = a_{\min} + ((a_{\max} - a_{\min})(a_{\text{mode}} - a_{\min})X)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

ii) 만일, $X > F^*$ 이라면, $(1-X)$ 는 Fig. 1 (d)와 같은 삼각형의 면적이므로

$$\frac{h(a)}{f^*} = \frac{(a_{\max} - a)}{(a_{\max} - a_{\text{mode}})} \quad (11)$$

따라서, 랜덤 변수 a 의 확률빈도의 값 $h(a)$ 는

$$h(a) = \frac{f^*(a_{\max} - a)}{(a_{\max} - a_{\text{mode}})} \quad (12)$$

삼각형의 면적 $1-X$ 는

$$1 - X = \frac{1}{2}(a_{\max} - a) \frac{f^*(a_{\max} - a)}{(a_{\max} - a_{\text{mode}})} \quad (13)$$

식(2)를 식(13)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$1 - X = (a_{\max} - a)^2 \frac{1}{(a_{\max} - a_{\text{mode}})(a_{\max} - a_{\min})} \quad (14)$$

식(14)에서 랜덤 변수 a 를 구하면,

$$a = a_{\max} - ((a_{\max} - a_{\text{mode}})(a_{\max} - a_{\min})(1 - X))^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

이상과 같은 방법으로 랜덤 변수 a 값을 구할 수 있다.

3. 확률론적 수명예측 프로그램

3.1 크리프 균열 성장

구조물의 크리프 균열 성장을 평가하는데 실험에서 얻은 데이터가 사용될 수 있다면 여러 가지 균열형상과 하중조건에 대한 크리프 균열 성장 데이터와 관련이 있는 시간에 의존하는 파괴역학 변수 $C(t)$ 가 필수적이다. 비록 응력확대계수 K 가 피로균열성장을 해석하는데 잘 적용되어 왔지만, 크리프 균열 성장을 해석하는데는 적절하게 사용되지 못하였다. 정적인 하중조건하에서 크리프 균열 성장률을 해석하는데 가장 잘 적용된 변수는 C^* 와 J 이다.

크리프와 소성의 유사성은 정상상태 크리프 (steady-state creep) 해는 동등한 완전 소성 해의 소성 변형률과 변위를 시간에 대한 미분항으로 대치함으로써 얻을 수 있음을 암시한다. 그러나, 정의에 의하면, 2차 크리프(secondary creep)에 해당하는 C^* 에 대한 정상상태(steady-state) 해는 분명히 시간 t 를 포함하고 있지 않다. Ehlers and Riedel은 변수 $C(t \rightarrow 0)$ 에 대하여 연구하였는데, 변수 $C(t \rightarrow 0)$ 는 변수 $C(t \rightarrow 0) \gg C^*$ 인 짧은 시간의 천이조건하에서의 크리프 균열 선단의 응력장을 설명하고, 탄성변형에 대하여 크리프 변형으로 대치함으로써 응력이완이 일어난다고 발표하였다. 천이상태와 정상상태에 대한 두 변수는 간단하게 합할 수 있고, 변수 $C(t)$ 에 대한 근사 해는 다음 식과 같이 모든 시간 t 에 대하여 적용할 수 있다.

$$C(t) = C(t \rightarrow 0) + C^* \quad (16)$$

Riedel은 식(16)의 $C(t \rightarrow 0)$ 를 다음과 같이 표기하였다.

$$C(t \rightarrow 0) = \frac{J_e}{(n+1)t} \quad (17)$$

여기서, J_e 는 J-integral의 선형 탄성 값으로 다음과 같다.

$$J_e = \frac{K^2}{E'} \quad (18)$$

식(18)에서 K 는 응력확대계수, E' 는 평면응력 상태인 경우는 $E'=E$ 이고, 평면변형 상태인 경우는 $E'=E/(1-\nu^2)$, ν 는 Poisson's ratio 이다.

식(17)에서 변수 n 은 다음과 같은 Power law에서의 지수이다.

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \quad (19)$$

여기서, A 는 재료상수이고, σ 는 적용응력이다.

식(16)에서 시간 $t \rightarrow 0$ 인 초기 상태인 경우에는 좌측항, 즉 K 가 주요 변수가 되며, 시간이 경과하여 $t \rightarrow \infty$ 로 가게 되면 좌측항은 0이 되어 C^* 가 주요 변수가 된다.

크리프 균열을 포함하고 있는 구조물의 결정론적 (deterministic) 수명평가는 다음 식과 같은 크리프 균열 전파법칙 식을 시간에 대하여 적분함으로써 구할 수 있다.

$$\frac{da}{dt} = H C(t)^q \quad (20)$$

여기서, H 와 q 는 재료상수이다.

3.2 프로그램 작성 방법 및 절차

크리프 균열 성장에 대한 수명예측 프로그램 작성은 먼저, 확률론적 해석방법을 적용하지 않고, 수명예측 식에 관련된 모든 변수의 값을 알고 있는 가장 단순한 결정론적 수명예측 모델(deterministic model)에 대하여 작성하였다.

즉, 초기 균열길이 a_i , 균열성장속도 da/dt 의 값을 알고 있다면, 일정한 시간 후(1년, 2년, ..., 10년 후)의 균열길이 a_f 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a_f = a_i + da/dt \times \Delta t \quad (21)$$

식(21)과 같이 구한 최종 균열길이 a_f 와 임계균열길이 a_c 를 비교하여 손상여부를 확인하는 프로그램을 작성하였다.

이와 같은 식을 검토한 후 확률론적 수명예측 프로그램에 적용하였는데, 확률분포함수중 가장 쉽게 널리 적용되고 있는 삼각분포함수에 대하여 랜덤 변수를 만들어 확률론적 수명예측 프로그램을 작성하였다. 즉, 초기균열길이 a_i , 균열성장속도 da/dt 및 임계균열길이 a_c 값의 최소값(min), 최대값(max) 및 가장 빈번하게 일어나는 값(mode)을 입력하여 충분히 많은 반복시행을 수행하여 최종 균열길이와 임계 균열길이를 비교한 후 손상여부를 결정하여 일정한 시간 후 손상이 일어날 확률을 구하는 프로그램이다. 삼각분포함수 랜덤 변수의 확률론적 수명예측 프로그램의 입력 및 출력 화면은 Fig. 2와 같다.

이와 같은 확률론적 수명예측 프로그램 작성절차를 검토한 후 크리프 균열 성장에 대한 확률론적 수명예측 프로그램을 작성하였다. 크리프 균열 성장에 대한 수명예측은 균열이 발생한 후 손상이 일어날 때까지의 잔존수명을 결정하는 크리프 균열의 전파수명을 평가하였는데, 크리프 균열 성장에 대한 수명예측 프로그램 작성은 먼저, 크리프 균열전파 법칙 식, 식(20)의 시간에 의존하는 파괴역학 변수 $C(t)$ 를 결정하는 것으로 시작하였다.

$$\frac{da}{dt} = H C(t)^n \quad (20)$$

크리프 상태의 작용하는 하중과 하중 작용시간 사이의 관계 선도는 Fig. 3과 같고, 시간에 의존하는 파괴역학 변수 $C(t)$ 와 시간 사이의 관계 선도는 Fig. 4와 같으며, 균열성장속도 da/dt 와 시간 사이의 관계 선도는 Fig. 5와 같다.

	500	0	0
0	2,953	0	0
5	5,318	0	0
8	7,763	0	0
10	10,234	96	096
11	12,610	645	645
19	15,010	894	894
18	17,586	991	991
20	19,915	1,000	1
26	22,509	1,000	1
29	24,740	1,000	1

Fig. 2 Input and output table of simple crack growth by triangle probabilistic density function.

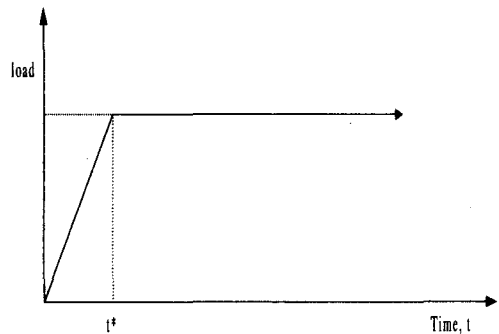


Fig. 3 Relation between load and time under creep loading.

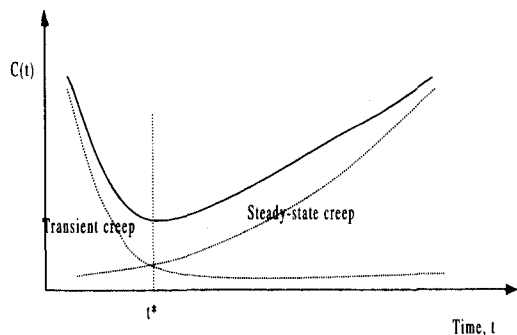


Fig. 4 Relation between $C(t)$ and time under creep loading.

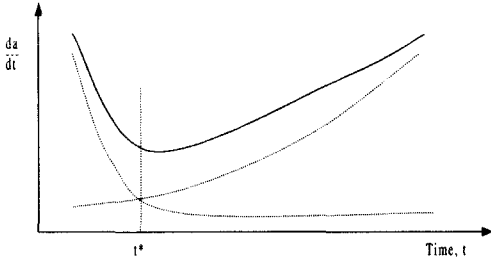


Fig. 5 Relation between crack growth rate and time under creep loading.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 $C(t)$ 는 천이 크리프 (transient creep)에 대한 값과 정상상태 크리프 (steady-state creep)에 대한 값을 선형적으로 더한 값과 같으므로 식(20)에서 $C(t)$ 는 천이 크리프($t \rightarrow 0$)에 대한 값, $C(t \rightarrow 0)$ 과 정상상태 크리프($t \rightarrow \infty$)에 대한 값, $C(t \rightarrow \infty)$, 즉 C^* 를 구분하여 선형적으로 더하여야 한다.

$$\frac{da}{dt} = H [C(t \rightarrow 0) + C(t \rightarrow \infty)]^q \quad (22)$$

식(22)에서 천이상태인 $C(t \rightarrow 0)$ 는

$$C(t \rightarrow 0) = \frac{K^2}{E} \frac{1}{n+1} \frac{1}{t} \quad (23)$$

정상상태인 $C(t \rightarrow \infty)$ 는^{(5),(6)}

$$C(t \rightarrow \infty) = K^2 \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} \quad (24)$$

식(24)에서 $\dot{\epsilon}$ 는

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \quad (25)$$

그리고, 응력확대계수 K 는 무한판인 경우 다음과 같다.

$$K = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a_i} \quad (26)$$

그러므로 $C(t)$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$C(t) = \frac{K^2}{E} \frac{1}{n+1} \frac{1}{t} + K^2 \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} \quad (27)$$

그리고, 크리프 균열전파 법칙 식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{da}{dt} = H \left[\frac{K^2}{E} \frac{1}{n+1} \frac{1}{t} + K^2 \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} \right]^q \quad (28)$$



Fig. 6 Input table for material properties of creep crack growth.

따라서, 일정한 시간후의 최종균열길이 a_f 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$a_f = a_i + H \left[\frac{K^2}{E} \frac{1}{n+1} \frac{1}{t} + K^2 \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} \right]^q \times \Delta t \quad (29)$$

이와 같이 구한 최종 균열길이에 대한 응력확대계수 K 를 계산하여 파괴인성 K_{Ic} 와 비교하여 손상이 여부를 확인할 수 있도록 프로그램을 작성하였다.

3.3 입력 · 출력 데이터 및 결과 분석

크리프 균열성장에 대한 확률론적 수명예측 프로그램의 입력화면은 재료 물성치에 대한 입력과 초기 균열길이, 운전조건, 반복계산수 등과 같은 일반 입력자료에 대하여 입력할 수 있도록 구성하였다. 재료 물성치에 대한 입력화면은 Fig. 6과 같고, 일반 입력자료에 대한 입력화면은 Fig. 7과 같다.

재료 물성치에 대한 입력 데이터 중 정확한 값을 알기 어려운 크리프 법칙 식 $\dot{\epsilon} = A \sigma^n$ 의 재료상수 A , 크리프 균열성장에 대한 식, 식(28)의 재료상수 H 및 파괴인성 K_{Ic} 등은 랜덤 변수로 선정하여 각각의 min, max, mode 값을 입력할 수 있도록 입력화면을 구성하였고, 정확한 값을 얻을 수 있는 변수들 탄성계수 E , 크리프 법칙 식의 지수 n 및 식(28)의 재료상수 q 등은 결정론적 변수(deterministic variable)로 정하여 입력할 수 있도록 입력화면을 구성하였다. 일반 입력자료에 대한 입력 데이터중 정

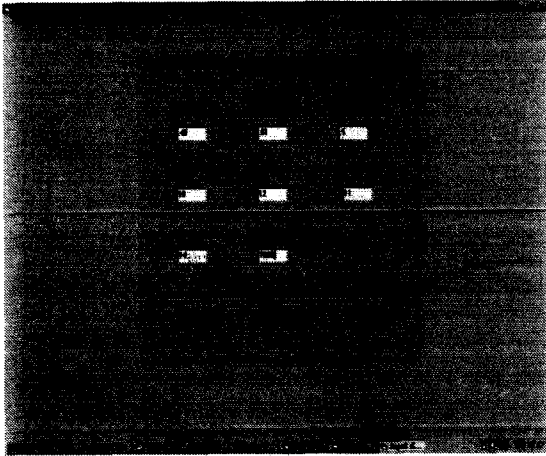


Fig. 7 Input table for operating and loading condition of creep crack growth.

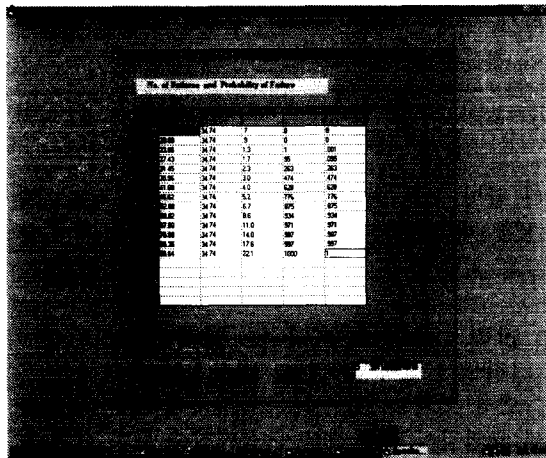


Fig. 8 Output table of creep crack growth.

확한 값을 알기 어려운 초기균열길이 a_i 및 적용응력 σ_a 는 랜덤 변수로 선정하여 각각의 min, max, mode 값을 입력할 수 있도록 하였고, 정확한 값을 알 수 있는 변수들인 최종 계산년도 L 및 반복계산 수 N 은 결정 변수로 선정하여 입력할 수 있도록 입력화면을 구성하였다.

출력화면은 Fig. 8과 같으며, 일정 기간 후 균열의 성장 경향 및 손상이 일어날 확률을 보여 주고 있다. 즉, 1년 후, 2년 후,.... 10년 후의 균열의 성장 정도, 그 때의 응력확대계수 값, 반복 시행중 손상

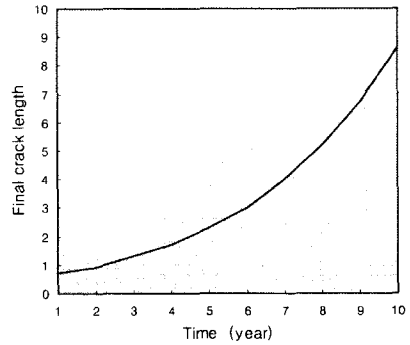


Fig. 9 Final crack length over time of creep crack growth.

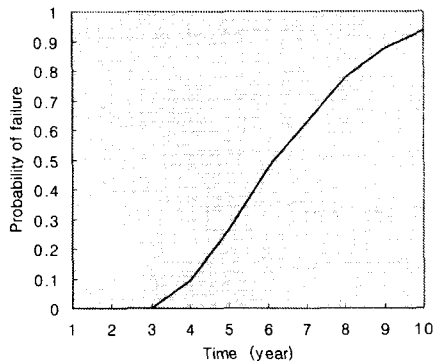


Fig. 10 Probability of failure over time of creep crack growth.

이 일어난 횟수 및 손상이 발생할 확률을 하나의 도표로 표시하였다. Fig. 9는 차후의 운전연수에 대한 균열성장 정도를 보여주는 선도이고, Fig. 10은 차후 운전연수에 대한 손상확률을 보여주는 선도이다. 이와 같은 선도는 균열의 성장정도 및 손상 확률을 제시하여 줌으로써 설비 운영자로 하여금 정비 및 보수에 대한 결정에 도움을 줄 수 있도록 하였다.

4. 결론

화력발전설비의 손상해석 및 수명평가의 신뢰성을 높이기 위하여 수명평가 식에 확률론적 해석 개념을 도입한 확률론적 수명평가 프로그램을 개발

하였다. 확률론적 수명평가는 입력자료에 불확실성을 포함시킴으로서 구조물의 손상 확률을 운전시간의 함수로 제시하며, 해석결과 균열의 성장정도 및 손상 확률을 제시함으로써 설비 운영자로 하여금 정비 및 보수에 대한 결정에 도움을 줄 수 있도록 하였다.

크리프 균열성장 모델에 대한 수명예측 프로그램의 개발로 발전설비 주요 부품에 대한 확률론적 수명평가 기술의 기반을 구축하였으며, 차후 좀더 정확한 수명평가식 적용 및 정확한 입력 데이터 수집 방안을 모색하고, 다른 손상기구에 대한 확률론적 수명평가 프로그램 개발을 수행할 계획이다.

참고문헌

1. Probabilistic Structural Analysis of Fatigue and Fracture, H. Millwater, Y. Wu and J. Cardinal, AIAA, AIAA-94-1057, 1994.
2. Structural System Reliability Calculation Using a Probabilistic Fault Tree Analysis Method, T. Tornig, Y.-T. Wu and H. Millwater, AIAA, AIAA-92-2410, 1992.
3. Application of Advanced Probabilistic Fracture Mechanics to Life Evaluation of Turbine Rotor Blade Attachments, H.R. Millwater, Y.-T. Wu, J.W. Cardinal, G.G. Chell, Transactions of the ASME, Vol. 118, 1996.
4. 강명수, 김덕진, 하정수, "피로균열 성장에 대한 확률론적 수명평가 프로그램 개발," 대한기계학회 98년도 추계학술대회논문집 A, pp. 334-339, 1998.
5. Application of Reference Stress and Probabilistic Methodologies to Assessing Creep Crack Growth, G.G. Chell, C.J. Kuhlman, H.R. Millwater, D.S. Riha, ASTM STP 1297, pp. 54-73, 1997.
6. Characterization of Creep Fatigue Crack Growth Behavior Using the C_1 Parameter, K.B. Yoon, Georgia Institute of Technology, pp. 67-108, 1990.