2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

과도상태에서 HT9 핵연료 피복관 파단의 Weibull 확률 평가

Weibull Analysis of HT9 Fuel Cladding Rupture under Transient Conditions

권형문, 이병운, 이동욱, 김영일

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

김용수

한양대학교 원자력공학과
서울시 성동구 행당동 17

요 약

이 연구의 목적은 액체금속로 핵연료 피복관의 거동특성과 관련, 과도상태 실험데이터를 분석하는 방법론을 고찰하고 확률적인 설계기준의 근거를 마련하는 것이다. ANL 에서 수행한 WPF(Whole Pin Furnace) 과도상태 실험 데이터를 이용하여 누적손상평가와 Weibull 확률평가를 수행하였고, 이 평가방법을 통해, 공정반응층 두께에 대한 유효 피복관 감육 정도를 평가하는 방법을 제시하였다. 연구결과, 공정반응층의 100% 피복관 감육은 보수적인 평가방법이며, 90% 부근의 피복관 감육일 때의 피복관 두께가 유효두께로 평가된다.

Abstract

The object of this study is to estimate the methods that are required to transient condition experiment data analysis and to establish the probabilistic design limit of the cladding rupture. Cumulative damage estimation and Weibull probability estimation of WPF (Whole Pin Furnace) transient condition experiment data are performed. Probabilistic methods were derived with these analyses to determine the effective thickness reduction due to eutectic penetration depth. In the results, it is found that 100% cladding reduction of eutectic penetration depth is conservative. About 90% cladding reduction of the eutectic penetration depth is favorable as a thickness of cladding.

1. 개론

한국 원자력 연구소에서 개발 중에 있는 액체금속로 KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor)의 핵연료봉 재료로, 열전도도가 우수한 금속연료심과 조사성능이 매우 뛰어난 HT9 피복관이 선정되었다. HT9 피복관은 기존에 LMR 피복관 재료로 제시되었던 316SS에 비해, 저온에서의 조사크립 성능은 매우 뛰어나지만 640°C 이상 고온영역에서의 열적크립 특성은 오히려 좋지않은 것으로 알려져 있다[1,2]. 이 연구의 목적은 과도 운전 조건에서의 KALIMER 핵연료 피복관 거동특성과 관련된 과도상태 실험 데이터를 분석하는 방법론의 고찰과, 확률적인 설계기준의 근거를 마련하는 것으로, 이 연구를 통해 KALIMER 과도운전 상황에 해당하는 고온환경에서의 액체금속로 피복관 건전성 평가를 수행하였다

평가방법을 요약하면 다음과 같다. 과도실험 데이터인 WPF (Whole Pin Furnace) 데이터를 과도상관식에 적용하여 누적손상율을 계산하고, median rank 결정방법에 따라 실험데이터의 누적분포함수 값을 결정한다. 누적손상율, 누적분포함수 값은 확률분석도구의 하나인 Weibull 확률 그래프(paper)에 표시하고, Weibull 확률 그래프에 표시된 데이터를 회귀하여 Weibull 분포의 변수(parameter)를 결정한다. 이렇게 결정된 Weibull 분포를 이용하여 임의의 누적손상율에 해당하는 누적분포함수 값을 산출할 수 있게 되는데, 이 값은 과도상태에서 연료봉의 파손 확률값이다. 위 과정을 통해 평가한 데이터를 설계기준과 비교하여 핵연료봉의 노내 건전성 여부를 확인할 수 있다.

2. 과도상태 실험

미국 ANL 과 웨스팅하우스사(Westinghouse)는 금속연료봉에 대한 과도상태의 손상정도를 평가하기 위해, 여러 실험을 수행하였다. 그 중 FCTT(Fuel Cladding Transient Tester)에서 수행된 실험은 금속연료/HT9 연료봉에 대한 과도운전 조건일 때의 상관식을 수립하기 위해 수행되었고, WPF 실험은 과도상태에서의 연료봉 거동을 모의하기 위해서 EBR-II 에서 조사된 금속연료봉을 온도 이력에 따라 연료봉 외부에서 열을 가하여 수행되었다.

2.1 FCTT(Fuel Cladding Transient Tester) 실험[3,4]

FCTT 실험의 모든 시편은 370°C에서 원하는 유지온도(hold temperature)까지 5.6°C/s 의 온도상승 속도로 가열되었고, 500°C에서 1050°C까지의 유지온도 영역에서 실험이 수행되었다. 그리고 압력은 1050°C 고온에서는 18.8 ~ 39.5 MPa 영역에서, 비교적 저온인 500°C에서는 486.7 ~ 517.7 MPa 영역에서 실험이 수행되었다.

FCTT 실험 결과인 그림 1은 각 유지온도에 따른 Dorn parameter의 응력 의존성을 보여준다. 그림에서 점선은 온도유지시간이 0인 온도상승실험 데이터의 선형회귀선(linear fitting line)이고, 점선 위로 가지처럼 뻗어있는 선은 온도상승 후 유지 실험 데이터의 선형회귀선이다.

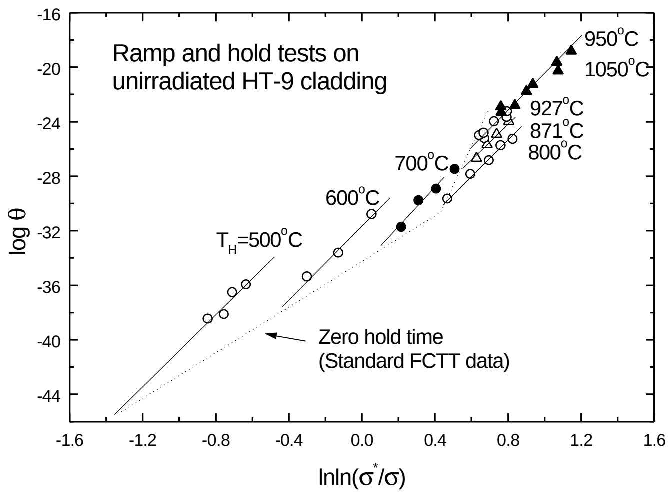

그림 1 Dorn parameter의 응력 의존성 (FCTT 데이터)

비조사 HT9 피복관의 온도상승 후 유지 실험의 과도상관식은 다음과 같다.

$$\ln q = A + B\ln\left[\ln\left(\frac{s^*}{s}\right)\right] \qquad (1)$$

$$t_r = q\exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \qquad (2)$$

B = 12.47

Q = 70,170 cal/mole

σ^* = 730 Mpa

$$A = 24.942 - 0.153T_H + 9.488\times10^{-5}T_H^2 \qquad T_H < 871\ ^\circ C$$

$$= -36.1 + 1.5\tanh\left[\frac{(T_H - 871)}{80}\right] \qquad 871\ ^\circ C < T_H < 1050\ ^\circ C \qquad (3)$$

2.2 WPF(Whole Pin Furnace) 실험[5,6,7]

WPF 실험은 과도상태에서의 연료봉 거동을 모의하기 위해서 온도 이력에 따라 6 개(FM1~FM6)의 연료봉 외부에서 열을 가하여 수행되었다. FM1~FM3 실험 연료봉은 초기온도 500°C 에서 6°C/s 의 온도상승속도로 820°C 까지 가열되었고, 고연소도(11.4 a/o) 인 FM4 실험 연료봉은 770°C 까지 가열되였다. FM1~FM3 실험의 주요파손기구는 공정반응에 의한 국부적인 피복관 얇아짐 현상(cladding thinning)과 핵분열 기체로 인한 응력이었고, FM4 실험의 경우 피복관의 24%의 공정반응층이 형성되기는 했지만, 파단부위가 플레넘 영역이기 때문에, 주요파손기구는 피복관 얇아짐 현상이 포함되지 않은 핵분열기체로 인한 응력인 것으로 추정되었다.

FM5 실험은 EBR-II Mark-V 구동핵연료가 설계기준사고인 유량상실사고 UN-1에서 피복관 손상이 일어나지 않음을 확인하기 위한 검증실험으로 그림 2와 같은 온도 이력에 따라 온도가 제어되어 EBR-II의 유량상실사고가 모사되었다. 실험결과, 피복관의 최대 변형량은 0.6%, 최대 공정반응층은 0.15%로 EBR-II Mark-V 구동핵연료가 유량상실사고 UN-1 환경에서 경미한 손상만 입는 것을 보여주었다. FM6실험은 특별히 작은 플레넘/연료 부피비(1.0), 고연소도(11.3 a/o) 환경에서 연료봉의 거동을 평가하기 위한 실험으로 장시간 지속되는 과도사고를 모의하기 위해 유지온도를 비교적 낮은 670°C로 하여 수행되었다. 실험종료후 플레넘 압력은 517°C일 때 14.4Mpa이었고, 파단은 발생하지 않았다.

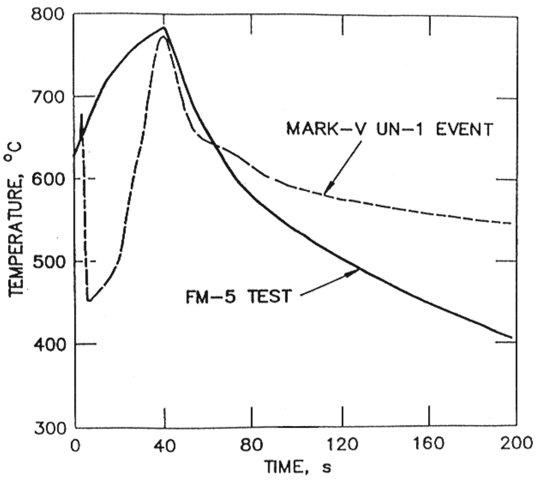

그림 2 FM5 실험의 온도 이력

표 1은 WPF의 실험조건과 결과를 정리한 표이다.

표 1. WPF 실험조건과 결과

	첨두연소도 (a/o)	플레넘에 대한 연료비	유지온도 (°C)	실험시간 (min)	공정반응층 (피복관 두께 %비)
FM1	3.0	1.0	820	67 [f]	64
FM2	3.0	1.0	820	112 [f]	67
FM3	2.2	1.4	820	146 [f]	65
FM4	11.4	1.5	770	68 [f]	24
FM5	11.4	1.5	ramp to 780, cool	3	0
FM6	11.3	1.0	670	2160	0

[f] 파손 데이터

3. 누적손상평가

누적손상평가는 손상정도를 파손시간에 대한 경과시간으로 정의하고 각 온도, 압력 영역에서의 손상정도를 더하여 누적손상정도를 나타낸다. 다음 식은 일반적인 누적손상율(CDF, Cumulative Damage Fraction)을 평가하는 식이다.

$$CDF = \int_0^t \frac{dt}{t_r(s, T)} \qquad (4)$$

이 때, 파손을 의미하는 누적손상율의 기준값은 1.0 이며, 파손 데이터의 누적손상율을 분포로 나타낸다면 1.0 을 median(50%)으로 하여 일정한 분포를 보여줄 것이다.

4. Weibull 분석[8,9]

실험조건과 상이한 과도운전 조건에서 얻은 상관식은 파손 예측의 신뢰도를 떨어뜨리며, 또한 누적손상율이 1 보다 작은 경우, 상관식 자체의 불확실성(uncertainty)에 의해 결정되는 파손 누적손상율의 분포 형태에 따라 파손가능성은 달라지게 된다. 따라서 10% 누적파손확률(B10)까지의 누적손상율, 또는 1% 누적파손확률(B1)까지의 누적손상율을 설계기준으로 사용하는 것이 더 합당할 것으로 여겨진다.

Weibull 분포는 여러가지 파손율 분포곡선 모양(failure rate curve shapes)을 표현할 수 있기 때문에 파손분석에 적합하다. Weibull 분포 파라미터의 하나인 β값에 따라 그 모양이 달라지는데, β값이 1 이면 지수분포(exponential distribution)에 해당하며, β값이 3.44 이면 정규분포(normal distribution)에 해당하게 된다. 결국 Weibull 분포는 지수분포와 정규분포의 일반적인 형태라고 할 수 있다.

Weibull 누적분포함수(cumulative distribution function) 식은 다음과 같다[8].

$$F(t) = 1 - e^{-(t/h)^{b}} \tag{5}$$

η = 지표수명(characterisctic life or scale parameter)

β = 형상변수(shape parameter)

t = 시간

Weibull 분포는 분석이 용이한 그래프를 제공한다. 수명변수에 대한 누적분포함수를 보여주는 이 그래프는, 단일 기구(mechanism)에 의한 데이터일 때, 선형 그래프를 보여준다.

이 그래프의 기본이 되는 개념은 다음과 같다[9].

$$R = e^{-\left(\frac{t_i - t_0}{h}\right)^{b}}, \ t_0 = 0 \tag{6}$$

R = 신뢰도(Reliability)

$$\ln\frac{1}{R} = \left(\frac{t_i}{h}\right)^{b} \tag{7}$$

$$\ln\ln\frac{1}{R} = b\ln t_i - b\ln h \tag{8}$$

$$y = A\,x + B \tag{9}$$

식 (8)는 식 (9)는 같은 선형적인 형태이기 때문에, 이를 이용하여 선형 그래프를 그릴 수 있다. β는 선형그래프의 기울기가 되는데, 그 값이 1 보다 작으면 유아 사망률(infant mortality)처럼 위해도는 수명변수 값이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여주게 되고, 그 값이 1 보다 큰 것은 위해도가 수명변수 값에 따라 증가하는 경향을 의미한다. 또한 Weibull 변수인 η는 63.2%가 파손되었을 때의 수명으로 정의된다.

실험데이터를 사용하여 Weibull 분석을 하려면, 해당 데이터의 누적분포함수값을 결정해야 한다. 그래프상의 X-좌표값은 실험데이터 가운데 수명변수의 조건을 갖춘 데이터로 하고 Y-좌표값은 계산된 누적분포함수값을 사용한다. 누적분포함수 계산 방법으로는 median rank 방법이 선호되고 있는데, 이 방법은 binomial expansion을 이용한 방법이다.

$$
\begin{aligned}
&(R+F)^{N_0} = [(1-F)+F]^{N_0} \\
&= (1-F)^{N_0} + N_0 F (1-F)^{N_0-1} + \frac{N_0(N_0-1)}{2!} F^2 (1-F)^{N_0-2} + \cdots \\
&= 0.50
\end{aligned}
\tag{10}
$$

F = 누적분포함수(cumulative distribution function)

식 (10)에서 rank값만큼 binomial expansion 항을 남겨두고, 그 합이 0.5라고 하여 F를 구한다. 그 값이 누적분포함수값이다. 이 방법은 항(term)이 증가할수록 구하기가 매우 어려워지기 때문에 Benard는 근사값을 구하는 공식을 만들어 냈다. 공식은 다음과 같다[8].

$$
F = \frac{i - 0.3}{N_0 + 0.4} \tag{11}
$$

실험 도중 중단된 데이터는 파손시간을 알 수 없기 때문에 확률분포계산을 할 때 생략되기 쉽다. 하지만 중단된 실험일지라도 실험이 진행된 시간까지는 파손 없이 건전성을 유지했으므로 아무런 의미가 없다고 말할 수는 없다. 실험진행 시간까지 실험의 건전성이 유지된 정도를 확률분포곡선에 포함시켜야 합당하며, Weibull 분석은 파손되지 않은 실험데이터를 분포에 반영하는 방법을 제공한다.

Leonard Johnson은 이런 영향을 평가하기 위해, 순번(rank)이 늘어나는 정도를 다음과 같이 정의하였다.

$$
\text{Rank Increment} = \frac{(\text{N}+1) - (\text{Previous adjusted rank})}{1 + (\text{number of items beyond previous suspended item})} \tag{12}
$$

이후 Drew Auth는 Leonard Johnson의 공식을 간단하게 만들어서, 순번 증가분(rank increment)의 계산없이 순번을 계산할 수 있게 하였다. 식 (13)는 Auth의 공식이다[8].

$$
\text{Adjusted Rank} = \frac{(\text{Inverse Rank}) \times (\text{Previous Adjusted Rank}) + (N+1)}{(\text{Inverse Rank}) + 1} \tag{13}
$$

여기서 Inverse Rank란 N_0값부터 내림차순으로 매긴 순번을 의미한다.

위 식을 통해 구한 rank값을 Benard 근사식을 사용하여 누적분포함수 값을 구하면 된다. 일반적으로 중단된 실험데이터를 첨가하면 η값이 증가하여 그래프가 오른쪽으로 이동하게 되고, β값은 그다지 큰 영향을 받지 않는다.

5. WPF 실험 분석 결과

WPF 실험 데이터와 누적손상율 계산을 위해 적용할 과도상관식은 모두 과도상황을 모사하기 위한 온도상승 후 유지실험이다. 만약 과도상관식이 과도하게 평가(over-estimation)하는 경향을 갖고 있다면, 파손 누적손상율에 대한 확률적인 분석에 의해서 일반적인 파손 기준값 1이 아닌, 보수적인 평가에 따른 파손 누적손상율 분포의 median값에 해당하는 새로운 파손 기준값을 제시하게 될 것이다. 일련의 Weibull 확률평가는 미국의 Fulton Findings 사에서 개발한 Weibull Smith 코드를 사용하여 수행하였다[10].

5.1 WPF의 누적손상율 평가

핵연료봉의 누적손상율을 계산하려면 우선 실험에서 유지온도(hold temperature), 봉내압, 공정반응(eutectic reaction)층 두께를 알아야 한다. 봉내압 계산을 위한 핵분열기체 방출량은, WPF 데이터의 과도상태 전(pre-transient) 정상상태 원자로에서의 연료봉 첨두연소도와 연료봉 dimension 데이터를 MACSIS(A Metallic Fuel Performance Analysis Code for Simulating In-Reactor Behavior under Steady-State Conditions) 코드의 입력값으로 사용하여 계산하였다[2]. MASIS 코드를 통해 계산한 핵분열기체 방출량과, EBR-II에 장전하기 전, 대기온도환경에서의 봉내압 1기압 조건을 사용하여 과도실험전인 정상상태의 수명말기(End of life)에서의 봉내압을 구하였다. 표 2는 첨두연소도, 핵분열기체 방출량, 수명말기에서의 봉내압과 해당 온도를 보여준다.

표 2 WPF 실험데이터의 핵분열기체 방출량(MASIS 코드) 및 WPF 과도실험전, 수명말기에서의 봉내압과 해당 온도

	첨두 연소도 (a/o)	fission gas release (cc at STP)	봉내압 (MPa)	온도 (^oC)
FM1	3.0	30.07	4.7218	820
FM2	3.0	30.07	4.7218	820
FM3	2.2	19.67	2.4077	820
FM4	11.4	136.47	12.7993	770
FM5	11.4	136.47	12.7993	770
FM6	11.3	135.27	14.4	517

WPF 실험 데이터의 누적손상율을 평가하기 전에, FM1~FM3의 주요 파손기구로 작용한 공정반응을 평가할 필요가 있을 것이다. 이상영역(two phase region)과 Lanthanide 과도층으로 구성[11]되어 있는 공정반응층에 의한 피복관 강도의 감소 정도를 정량화한 자료가 현재, 없는 실정이다. 이 연구에서는 피복관 얇아짐 정도를 평가하기 위해 유효두께(effective thickness)의 개념을 도입해 보았다. 우선, 공정반응으로 인해 brittle해진 층이 전혀 피복관 강도에 기여하지 못하는 100% 피복관 얇아짐에서부터 brittle 영역의 50% 두께가 감소된, 50% 피복관 얇아짐의 경우까지 누적손상율을 계산해 보았다.

공정반응에 의한 피복관 얇아짐 현상을 누적손상율 계산에 적용하기 위해 Fortran 코드를 사용하여 시간에 따른, 피복관 얇아짐 현상으로 인한 hoop stress의 증가를 평가하였다. 유지온도와 시간에 따라 증가하는 hoop stress를 사용하여 각각의 미소구간에서의 누적손상율을 계산하고, 이를 적분하여 누적손상율을 평가하였다. 표 3은 계산된 누적손상율을 정리한 표이다.

표 3 WPF 실험데이터의 누적손상율

CDF	100%*	90%*	80%*	70%*	60%*	50%*
FM1	6.9551	3.4953	2.0353	1.3114	0.9091	0.6657
FM2	23.5477	10.0256	5.1770	3.0432	1.9603	1.3514
FM3	1.1236	0.5986	0.3623	0.2396	0.1690	0.1251
FM4	5.3616					
FM6	1.2989					

*cladding thinning of eutectic penetration depth

공정반응이 아닌 봉내압이 주요 파손기구인 FM4의 경우 일반적인 파손 기준값 1보다 큰 5.3616이었고, 파손되지 않은 실험데이터인 FM6 조차도 1보다 큰 값이었다. 이것은 누적손상평가에 적용한 과도상관식의 보수적인 경향을 보여주는 결과이다.

5.2 공정반응에 의한 피복관 얇아짐 정도의 확률론적 결정 방법

한가지 상관식으로 파손 누적손상율의 분포를 평가할 경우, 파손기구가 달라지면 그에 따른 불확실성(uncertainty) 또한 달라지기 때문에, 그 분포의 형태(shape)도 달라질 것이다. 이

러한 형태를 결정하는 Weibull 변수는 형상변수, β이다. 따라서 온도 증가에 의한 봉내압 증가가 주요 파손기구인 데이터의 분포와 공정반응, 봉내압이 주요파손기구인 데이터의 분포는 서로 다른 β값을 갖게 될 것이다. 하지만 같은 상관식으로 평가했다면, 분포의 형태가 달라지더라도 누적손상평가에서 파손을 의미하는 파손 기준값은 같아야 한다. 다시 말하면, 두 분포의 median값이 같아야 함을 의미한다.

공정반응에 의한 피복관 얇아짐을 확률론적으로 결정하는 첫번째 방법은, 봉내압만이 주요파손기구인 데이터의 분포와 공정반응, 봉내압이 주요파손기구인 데이터의 분포의 median값이 일치하도록 피복관 얇아짐 정도를 조절하는 방법이다.

그리고 두 분포의 데이터를 하나의 Weibull 분포에 함께 표시했을 경우, 두 분포의 median값이 가까워질수록 형상변수, β값은 커진다. 두 분포를 한 Weibull 분포에 표시하고 형상변수, β값이 가장 커지도록 피복관 얇아짐 정도를 조절하는 방법이 두번째 방법이다. 이때, 보다 정확한 결정을 위해서는 공정반응에 의한 얇아짐 정도에 따라 누적손상율의 변위가 커야한다. 그러므로써 두 분포의 median값의 차이가 커짐에 따라 β값의 감소 경향이 증폭된다. 또한 피복관 얇아짐 현상이 발생하지 않는 데이터를 제외했을 경우, 공정반응층에 대한 피복관 얇아짐 정도의 조절에 따른 Weibull 분포의 β값은 그 차이가 작아야 한다.

5.3 누적손상율의 Weibull 분석

WPF 데이터의 누적분포함수 값을 결정하기 위해 median rank 방법을 사용하였다. 다음은 90% 피복관 얇아짐일 때의 누적분포함수 값을 정리한 표이다.

표 4 WPF 실험데이터의 누적분포함수 값 (90% 피복관 얇아짐)

	CDF	Rank	Median Rank
FM3	0.5986	1	12.96
FM6	1.2989	suspended	
FM1	3.4953	2.250	36.11
FM4	5.3616	3.667	59.26
FM2	10.0256	4.833	82.41

파손되지 않고 실험 중에 중지된 데이터 FM6도 함께 평가하였고, Benard 근사식을 이용하

여 누적분포함수(unreliability) 값을 구하였다. 표 5는 피복관 얇아짐 정도에 따른 median rank값을 보여준다.

표 5 WPF 실험데이터의 median rank

	100% ~ 70%*	60% ~ 50%*
Median Rank	12.96	12.96
	36.11	31.48
	59.26	56.17
	82.41	80.86

*cladding thinning of eutectic penetration depth

WPF의 각 데이터의 누적손상율과 누적분포함수 값을 Weibull 그래프에 표시한 후, rank regression method에 의해 회귀하면 각 그래프 구할 수 있고, 임의의 누적손상율에 대한 누적분포함수 값을 얻을 수 있다. MLE(Maximum Likelihood Estimation) 회귀방법은 sample size가 10이 넘어야 형상변수 평가가 rank regression method보다 정확한 것으로 알려져 있기 때문에, WPF의 표본수(sample size)가 4임을 감안하여, 회귀방법으로 rank regression method를 선택하였다.

표 6은 피복관 얇아짐 정도에 따른 Weibull 분포 파라미터 값들을 정리한 표이다.

표 6 Weibull parameter

	100%*	90%*	80%*	70%*	60%*	50%*
β	0.880	0.908	0.887	0.802	0.733	0.686
η	10.875	6.190	4.104	3.114	2.771	2.305
Mean	11.59	6.48	4.35	3.52	3.36	2.98
Median	7.17	4.13	2.72	1.97	1.68	1.35
std. Deviation	13.21	7.15	4.92	4.43	4.67	4.46

표 6의 결과를 보면, 공정반응층 두께의 90% 피복관 얇아짐의 경우, 형상변수 β값이 가장 큰 것을 알 수 있다. FM4의 누적손상율 5.3616은 표에서 100%와 90% 피복관 얇아짐 정도에 대한 두 분포의 median값 사이값으로, 공정반응에 의한 brittle 영역이 피복관 강도에 조금이나마 기여하고 있다는 것을 보여준다.

100%, 90% 피복관 얇아짐의 경우, median값은 각각 7.17, 4.13으로 일반적인 파손 기준값 1보다 크게 평가되었다. 이 값은 과도상관식의 보수적인 정도를 보여주는 값이다. 또한 피복관 얇아짐 정도가 줄어듦에 따라 η(F=63.2%)값은 크게 줄어들었고, β값은 90%이하에서 역시 값이 작아졌다. β값은 Weibull plot의 기울기로서 누적손상율이 작은 값일 때, 누적분포함수 값에 큰 영향을 미칠 것으로 보인다.

WPF 데이터의 확률평가를 통해서, 공정반응층의 90% 부근의 피복관 얇아짐이 유효두께로 추정되지만, 표본수가 작기 때문에, 정확한 피복관 얇아짐 정도를 평가하기에는 불확실성이 크다. 다만, 이번 평가는 100% 피복관 얇아짐이 과도한 평가 경향을 지니고 있음을 암시하고 있다. 그림은 90% 피복관 얇아짐일 때의 Weibull 그래프이다.

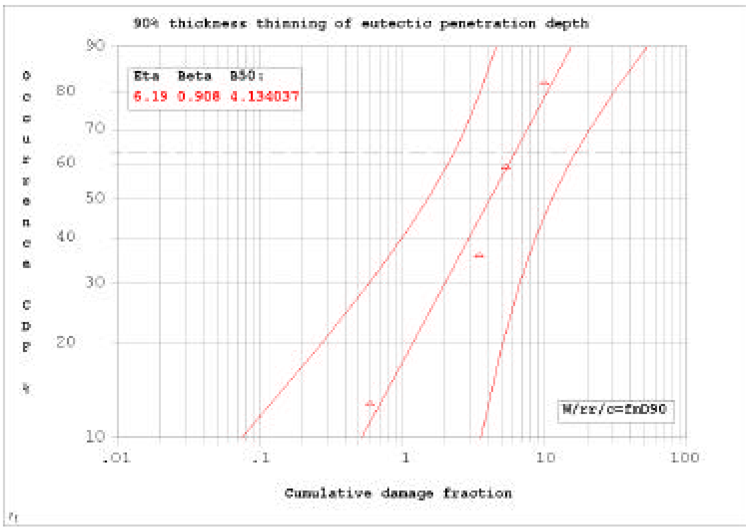

그림 3 공정반응층의 90% 피복관 얇아짐일 때의 Weibull plot

5.4 FM5의 누적손상율과 PRISM 연료봉의 확률 설계기준 비교

PRISM 핵연료봉의 확률 설계기준 가운데, 파손과 같은 major damage의 제한조건은 '<u>10% 이하의 연료봉이 파손될 확률이 95%가 넘어야 한다.</u>' 이다. 이 조건은 Weibull 분포에서 누적분포함수 값 10%에 해당하는 지점으로 90% 신뢰구간의 upper bound를 의미한다고 볼 수 있다. 각 Weibull plot을 통해 확률 설계기준에 해당하는 누적손상율을 구하면, 표 8의

굵은 숫자로 된 누적분포함수 값과 일치한다.

표 7　10% 확률 설계기준에 해당하는 누적손상율

CDF	100%*	90%*	80%*	70%*	60%*	50%*
Confidence 90%	0.1155 ~ 6.1404	7.504×10^{-2} ~ 3.5895	4.403×10^{-2} ~ 2.3957	2.066×10^{-2} ~ 1.7137	1.177×10^{-2} ~ 1.4056	6.687×10^{-3} ~ 1.1205

*cladding thinning of eutectic penetration depth

Major damage의 확률 설계기준에 해당하는, 90% 신뢰구간 upper bound 부분의 누적손상율은 오히려 피복관 얇아짐 정도가 줄어듦에 따라 그 값이 작아지고 있는데, 이는 피복관 얇아짐 정도가 줄어들면서, Weibull 분포의 β값이 작아지기 때문일 것이다. 그림 4는 확률 설계기준과 FM5의 누적손상율을 비교한 그림이다.

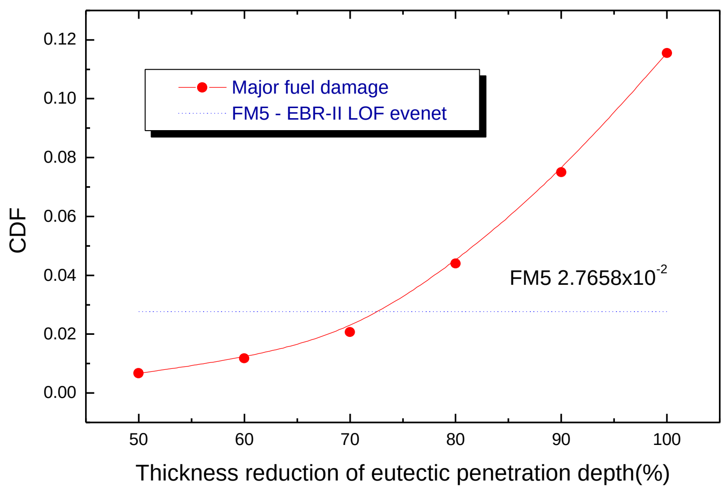

그림 4　FM5 누적손상율과 10% 확률 설계기준 비교

유량상실사고(LOF, Loss Of Flow accident)에서 건전성을 유지하는지를 알아보기 위한 실증실험인 FM5 실험을 해당 온도 이력을 따라 과도상관식을 적용한 결과 누적손상율은 2.7657×10^{-2} 이었다. 이 값은 80% 이상의 피복관 얇아짐일 때의 90% 신뢰구간 upper bound 부분의 누적손상율 보다 작은 값이다. 결국 80% 이상에서 건전성을 유지한다는 의미이다. FM5 실험이 경미한 손상만 있을 뿐 파손되지 않았고, 유효두께로 여겨지는 공정반

응층의 90% 피복관 얇아짐은 건전성 구간에 있다. 이는 β값에 의한 유효두께 결정방법과 잘 일치되는 결과이다.

6. 결론

누적손상율에 대한 Weibull 파손 확률분포는, 해석에 사용된 상관식이 지닌 과도하게 평가하는 경향을 수정할 수 있는 도구를 제공한다. 과도한 평가 경향은 Weibull 분포의 median 값을 일반적인 누적손상율 파손 기준값인 1 보다 큰 값이 되게한다. 그로 인하여, 50% 파손을 의미하는 파손 기준값은 1 보다 큰 값으로 수정되고, 상관식의 과도한 평가 경향은 사라지게 된다.

누적손상율의 확률적 평가방법은 상관식의 불확실성과 과도평가 경향을 모두 포함하고 있기 때문에, 상관식 자체의 평가방법에 비해 신뢰성이 높다고 판단된다.

WPF 과도상태 실험 데이터의 누적손상율을 계산할 때, 공정반응에 의한 피복관 얇아짐 현상은 평가방법에 따라 계산결과에 매우 민감한 차이를 보여주었다. 공정반응에 의한 피복관 얇아짐 정도를 평가하기 위해 다음과 같은 확률적인 방법을 제시하였다.

- 공정반응이 주요 파손기구인 Weibull 분포와 봉내압만이 주요 파손기구인 Weibull 분포의 median값이 일치하도록, 피복관 얇아짐 정도를 조절한다.
- 두 분포를 하나의 Weibull 확률 그래프에 표시했을 때, β값이 가장 큰 값이 나오도록 피복관 얇아짐 정도를 조절한다.

WPF 데이터의 Weibull 분포를 피복관 얇아짐 정도에 따라 평가하였더니, 90% 피복관 얇아짐일 때, 형상변수 β값이 0.908로, 가장 큰 값이었다. 그리고 파손기구로 공정반응의 영향이 제외된 FM4의 CDF값은 공정반응층의 100%와 90% 피복관 감육일 때의 median값 사이에 위치해 있었다. 이러한 경향은 공정반응층 전부가 강도를 완전히 상실한 것이 아니라는 것을 보여준다. 다시 말해서, 100% 피복관 얇아짐은 보수적인 경향을 갖는 것으로 보여지며, 공정반응층에 대한 강도실험을 통해서, 피복관 얇아짐 정도를 평가할 필요성이 있다고 평가된다.

EBR-II의 LOF 사고를 모의한 FM5 실험 데이터의 누적손상율은 공정반응층 두께의 80% d 이상의 피복관 얇아짐의 경우, 10% 확률 설계기준을 넘지 않았다. 또한 피복관 얇아짐 정도가 증가할 때 보수성을 갖는 누적손상율 계산결과에 비해, 10% 확률 설계기준값은 피복관 얇아짐 정도가 감소함에 따라 더 보수성을 띄었다. 피복관 얇아짐 정도의 감소로 인해 η값이나 median값이 감소함에도 불구하고 이런 경향을 보여주는 것은 확률설계기준이 β값에 매우 민감함을 보여주는 것이다.

현재 HT9의 노내 거동 및 과도상태 연구가 아직 미흡하고 실험자료가 부족한 실정이다. 보다 정확한 확률 평가을 위해서는 더 많은 실험자료를 보유해야 하며, 확률적 평가방법 역시

누적손상율과 관련하여 더욱 더 보완되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Raymond J. Puigh, “In-Reactor Creep of Selected Ferritic Alloys”, Effects of Radiation on Materials: Twelfth International Symposium, ASTM STP 870, American Society for Testing and Materials, 1985, pp. 7~18

[2] 황완, 이병운 외, “온도와 조사량에 따른 HT-9 핵연료봉 변형 분석”, 2000 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2000

[3] N.S. Cannon, Simulated Transient Behavior of HT9 Cladding, WHC-SA-0127-FP, Westinghouse Hanford Company, 1988

[4] F.H. Huang, Transient Failure Behavior of HT9, WHC-SA-2513-FP, Westinghouse Hanford Company, 1994

[5] Y.Y. Liu et al., “Behavior of EBR-II Mk-V-type fuel elements in simulated loss-of-flow test”, Journal of Nuclear Materials, 204 (1993) 194~202

[6] J.M. Kramer et al., “Modeling the behavior of metallic fast reactor fuels during extended transients”, Journal of Nuclear Materials, 204 (1993) 203~211

[7] Y.Y. Liu et al., Whole-Pin Furnace System: An Experimental Facility For Studying Irradiated Fuel Pin-Behavior under Potential Reactor Accident Conditions, CONP-900804—24, 1990

[8] Robert B. Abernethy et al., The New Weibull Handbook; 2nd Edition, Gulf Publishing Company, 1996

[9] Robert A. Mitchell, Introduction to Weibull Analysis, Pratt&Whitney Aircraft, 1967

[10] Robert B. Abernethy, PlayTIME With SuperSMITH; 2nd Edition, Wes Fulton, 1997

[11] A.B. Cohen, “Fuel/cladding compatibility in U-19Pu-10Zr/HT9-clad fuel at elevated temperature”, Journal of Nuclear Materials, 204 (1993) 244~251