

**W-3 R Grid 및 WRB-1 상관식간, 결정론적 열설계방법론 및 통계적
열설계방법론간의 열적여유도 비교**

**Comparison of Thermal Margin for W-3 R Grid and WRB-1
Correlations, for STDP & ITDP, RTDP method**

송동수

전력연구원

대전광역시 유성구 전민동 103-16

요 약

16×16 표준연료를 장전하고 STDP(Standard Thermal Design Procedure) 열설계방법론을 사용하던 고리 2호기에 대하여 ITDP(Improved Thermal Design Procedure) 방법론을 적용하여 DNBR 민감도를 분석하고, W-3 R grid 및 WRB-1 상관식 상호간의 열적 여유도를 비교하기 위하여 몇 가지 Cases를 선택하여 설계한계 DNBR과 최소 DNBR의 여유도를 상호 비교하였다. 그리고 STDP와 ITDP간 비교 및 STDP와 RTDP(Revised Thermal Design Procedure)간의 열적 여유도를 비교하였다. W-3 R grid 및 WRB-1 상관식 상호간의 여유도를 비교한 결과 WRB-1 상관식을 사용할 경우 약 7.8 %정도의 열적여유도가 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 STDP 방법론과 ITDP 방법론을 비교한 결과 ITDP 방법론을 채택함으로써 약 12 %의 DNBR 여유도를 더 확보할 수 있음을 확인하였고, STDP와 RTDP를 비교할 경우는 58.9 % 까지 DNBR 여유도를 추가 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

Abstract

DNBR sensitivity studies were performed and Design Limit DNBRs were calculated by W-3 R grid and WRB-1 DNB correlations using ITDP(Improved Thermal Design Procedure) for 16 ×16 standard fuel assembly. The results of ITDP design limits using W-3 R grid and WRB-1 correlation were found to be 1.541(typical)/1.464(thimble) and 1.37(typical)/1.36(thimble) respectively. For thermal margin comparison, between W-3 R grid and WRB-1 correlation, minimum DNBRs for several cases were calculated and compared with Design Limit DNBR. It is found that around 7.8 % of thermal margin can be increase by correlation change W3-R to WRB-1. The additional thermal margin of 12-58 % can be obtained by adoption the RTDP or ITDP instead of STDP procedure.

I. 서론

노심열수력 설계분야에서 DNBR 여유도는 연료의 종류와 열설계방법론 그리고 CHF 상관식을 어떻게 정하느냐에 따라서 상당히 달라질 수 있다. 현재 국내 WH형 원전에서 사용하는 연료는 OFA, Standard 그리고 V5H형 연료 등을 사용하며, 열설계방법론은 STDP, ITDP, RTDP 등을 채택하고 있고, 연료의 종류에 따라서 사용되는 상관식도 다르다. 즉 W-3 R grid 및 WRB-1, WRB-2 상관식 등을 사용하고 있다.

그리고 노심 열수력설계에서 중요한 요소 중에 하나는 각 운전변수(출력, 온도, 압력, 유량, 우회 유량, 출력분포)들에 대한 민감도 분석을 수행하는 것이다. 이것을 근거로 정확한 설계한계 DNBR을 계산 할 수 있기 때문이다.

최근 웨스팅하우스형 표준연료(16X16)를 사용하는 고리 2호기 원전에서 열설계 방법론을 기존의 STDP (Standard Thermal Design Procedure)에서 ITDP(Improved Thermal Design Procedure)로 변경하게 됨에 따라 각 운전변수들에 대한 DNBR 민감도를 분석하게 되었다.

본 논문에서는 각 운전변수들에 대한 DNBR 민감도를 분석하는 방법과 그 결과를 이용하여 설계한계 DNBR을 계산하는 방법을 검토해보았다. 그리고 WRB-1 및 W-3 R-grid 상관관계식 상호간의 DNBR 여유도를 비교하기 위하여 Design Limit DNBR과 최소 DNBR 값을 비교하여 어느 정도 DNBR 여유도가 증가하는지 살펴보았다. 그리고 결정론적인 열설계방법인 STDP와 통계적 열설계방법인 ITDP/RTDP와 DNBR 여유도를 비교 평가하였다.

II. 열설계방법론

DNB 설계기준은 원자로가 정상 및 과도상태로 운전 중에 최고출력을 생성하는 연료봉의 최소 DNBR 값이 DNB 상관식으로부터 예측한 DNBR 제한치보다 크를 95%의 신뢰도와 95%의 확률로 보여주어 DNB가 발생하지 않음을 보장하도록 되어 있다.

한편, 최소 DNBR은 계산에 사용되는 변수들의 불확실도로 인하여 확률분포를 갖는 난변수가 되며, 이 최소 DNBR 의 불확실도를 DNB 설계기준에 반영하는 방법이 노심 열설계방법이다.

노심 열설계방법은 불확실도 처리방법에 따라 결정론적인 방법과 통계론적인 방법으로 구분할 수 있다. 결정론적 방법에서는 노심의 최고온 핵연료봉의 DNB 발생확률을 정량적으로 평가하지 않고 단지 5% 이하인 것만을 입증하는 데에 비해, 통계론적 열설계방법에서는 핵연료봉의 DNB 발생확률을 정량적으로 평가하여 DNB 발생확률이 5% 이하가 되는 설계 한계 DNBR(Design Limit DNBR)을 설정하고 있다. 웨스팅하우스는 전자의 예로 STDP(Standard Thermal Design Procedure)를 적용하고 있으며 후자의 예로는 ITDP, RTDP, 그리고 mini-RTDP 등을 설계에 적용하고 있다.

가. 결정론적 방법 (Deterministic Method, STDP)

STDP 방법론에서 설계 한계 DNBR 은 DNB 발생확률이 5% 일 때의 DNBR 값으로 설정되며, 노심 최소 DNBR 의 평가는 모든 입력변수들을 DNBR 값을 작게 하는 방향으로 95%수준으로 설정된 값을 이용하여 수행한다. 즉,

$$\text{노심최소 DNBR} = f(X_j; X_j = X_{j, 95/95})$$

여기서,

$$X_{j, 95/95} = 95\% \text{ 신뢰도에서 평가된 } X_j \text{의 하한 혹은 상한 } 95\% \text{ 값}$$

$$= \mu_j \pm 1.645\sigma_j = \bar{X}_j + k_{95/95} S_{X_j} .$$

이러한 결정론적인 방법으로 계산되는 최소 DNBR값은 모든 입력변수들이 동시에 같은 장소에서 DNBR에 보수적인 값을 갖는 경우를 가정하므로, 실제 고온부 연료봉의 최소 DNBR 이 위와 같이 평가된 최소 DNBR 보다 낮을 확률은 상대적으로 매우 낮다.

나. 통계론적 방법 (Statistical Method, ITDP)

통계적 열설계방법에서는 노심내 최고온 연료봉의 DNB 발생확률을 정량적으로 평가하여 DNB 발생확률이 5% 이하가 되도록 다음 변수들의 불확실도를 통계적으로 결합하여 설계 한계 DNBR 을 설정한다.

- 발전소 운전변수: 원자로 냉각재유량, 노심출력, 냉각재온도, 계통압력, 유효 노심 냉각유량
- 핵적, 열적변수: $F^{N_{\Delta H}}$
- 제조변수: $F^{E_{\Delta H,j}}$
- THINC-IV 및 과도해석 code
- 상관식 불확실도

따라서 노심내 최소 DNBR 분석은 설계한계 DNBR 설정시의 불확실도가 고려된 모든 변수의 정격치를 사용하여 평가한다. 즉,

$$\text{노심최소 DNBR} = f(X_j; X_j = \mu_j)$$

여기서,

μ_j = 각 설계변수의 정격치

ITDP는 최소 DNBR의 하한 95%값과 CHF 상관식 불확실도, 1/(M/P) 분포의 상한 95%값이 같게 되는 최소 DNBR 분포의 중앙값(입력변수의 평균값으로 평가된 값)을 설계 한계 DNBR 로 설정한다. 한편 최소 DNBR의 분산은 최소 DNBR 정격치에 비례하므로 다음과 같이 DNBR 불확실도 인자를 고려하여 평가한다.

$$y = DNBR / DNBR_{nom} = C \prod_j X_j^{S_j}$$

여기서,

$$S_j = \frac{\partial y}{y} \bigg/ \frac{\partial X_j}{X_j} = \frac{\partial \ln y}{\partial \ln X_j}$$

y의 분포를 정규분포로 가정하고 상기 S_j 의 식을 선형근사하여 변수들의 평균 (μ_j)과 표준편차 (σ_j), 그리고 민감도 (S_j)로부터 y의 평균 (μ_y)과 표준편차 (σ_y)를 구할수 있으며 95/95 기준을 만족하는 DNBR 은 아래와 같이 주어진다.

$$DNBR_{95/95} = DNBR_{nom} \times (\mu_y - 1.645 \sigma_y)$$

따라서 $DNBR_{95/95} = 1/(M/P)_{95/95}$ 을 고려하면 ITDP에 의한 설계 한계 DNBR은 다음과 같이 결정된다.

$$\text{설계한계 DNBR} = \frac{\text{CHF 상관식 한계 DNBR}}{\mu_y - 1.645 \sigma_y}$$

또는, 일반적으로 $\mu_y = 1.0$ 이므로

$$\text{설계한계 DNBR} = \frac{\text{CHF 상관식 한계 DNBR}}{1 - 1.645 (\sigma_y / \mu_y)}$$

이때 측정치와 예측치의 비교로 평가되는 상관식의 불확실도는 결정론적으로 처리하며, 변화계수(Coefficient of Variation)는 각 변수들의 민감도 중 각각의 노심 운전조건들에서 가장 보수적인 값을 사용하여 결정한다.

STDP 와 W-3 계열 CHF 상관식을 사용할 경우, 상관식 한계 DNBR로서 1.3을 적용해 왔으나, 374-inch 연료봉 직경을 갖는 집합체에 대한 CHF test 결과에 따라 16X16 STD 핵연료 집합체에 대해 1.28의 적용이 가능한 것으로 확인되었다.

통계적 열설계방법에서는 노심내 최고온 연료봉의 DNB 발생확률을 정량적으로 평가하여 DNB 발생확률이 5% 이하가 되도록 변수들의 불확실도를 통계적으로 결합하고 설계한계 DNBR을 설정한 후, 설계한계 DNBR 설정시 불확실도가 반영된 모든 변수들의 정격치를 사용하여 노심내 최소 DNBR을 평가한다.

본 논문에서는 통계적인 열설계 방법론을 적용하므로 이에 따른 열수력설계 인자들이 추가되었다. 특히, 통계적 열설계 방법론에서는 DNBR 제한치 생산시 압력, 온도, 출력 및 유량에 대한 random 불확실도를 고려하므로 안전해석 DNBR 제한치가 기존의 방법론에 의해 설정된 값과 다른 값으로 설정된다.

III. DNBR 민감도 분석 및 설계한계 DNBR 계산

각 운전변수에 대한 DNBR 민감도를 분석하기 위하여 다음과 같은 7가지 경우에 대하여 열수력 분석 초기조건을 설정하였다. 이를 위하여 사용한 열수력분석 전산 코드는 THINC-IV이다.

1. Core Limits - High Power High Pressure.
2. Core Limits - High Power Low Pressure.
3. Core Limits - Low Power High Pressure.
4. Core Limits - Low Power Low Pressure.
5. Loss of Flow Conditions with Flow Rate fixed.
6. Loss of Flow Conditions with Tin fixed.
7. Static Rod Misalignment Conditions.

이때 각각의 경우에 대한 초기조건(출력준위, 노심 압력, 유량, 반경방향 및 축방향 출력분포 및 온도 등)은 다음과 같다.

Case	Power	Core Pressure	Flow	FdH	Tin	Axial Shape
1	1.2	2400	195600	1.49	563.85	1.55 cosine
2	1.2	1775	195600	1.49	530.0	1.55 cosine
3	0.93	2400	195600	1.49	606.0	1.55 cosine
4	1.05	1775	195600	1.49	557.0	1.55 cosine
5	1.0	2250	148499	1.49	563.0	1.55 cosine
6	1.0	2250	133000	1.49	550.85	1.55 cosine
7	1.0	2270	195600	1.79	557.0	1.55 cosine

각 운전 변수에 대한 DNBR 민감도를 나타내는 수식은 아래와 같다.

$$S = \frac{\ln \frac{DNBR_2}{DNBR_1}}{\ln \frac{y_2}{y_1}} \quad (1)$$

여기서,

DNBR₁ = DNBR at sensitivity conditions

DNBR₂ = DNBR at base conditions

y₁ = parameter at sensitivity conditions

y₂ = parameter at base conditions

각 운전변수에 대한 민감도가 정해지면, 설계한계(Design Limit) DNBR을 다음 식에 의해 계산하게 된다.

가. 개선된 열설계방법론(Improved Thermal Design Procedure)

$$Design\ Limit\ DNBR = \frac{Correlation\ Limit\ DNBR}{Fu} = \frac{1.3}{Fu} \quad (2)$$

여기서,

$$Fu(DNBR\ Uncertainty\ Factor) = 1.0 - 1.645 * S * \frac{s}{m}$$

$$S * \frac{s}{m} = \sqrt{\sum (S)^2 * (\sigma/\mu)^2}$$

S = sensitivity

s = standard deviation

m = mean value

1.3 = W-3 R grid DNBR Correlation Limit DNBR

나. RTDP

RTDP의 DNB 상관식 통계적 특성은 상관식 불확실도와 발전소 운전변수 불확실도를 동시에 통계적조합을 하는 것으로써 $m_{M/P}$ 와 sample standard deviations($s_{M/P}$)를 사용하는 것이고, 불확실도 인자 통계변수 μ_y 와 σ_y 는 ITDP와 같은 방법으로 사용한다.

$$Design\ Limit\ DNBR = \left[\frac{1}{\mu_{M/P} (1 - 1.645 \sigma_y / \mu_y)} \right] \quad (3)$$

여기서,

z : coefficient of variation

$\mu_{M/P}$: nominal parameter

W-3 R grid 에대한 각 case 별 DNBR 계산결과는 다음과 같다.

<u>Sensitivity Study Cases</u>	<u>DNBR(thm/typ)</u>
1, Core Limits - High Power High Pressure,	1,740 / 1,507
2, Core Limits - High Power Low Pressure,	1,630 / 1,493
3, Core Limits - Low Power High Pressure,	1,542 / 1,496
4, Core Limits - Low Power Low Pressure,	1,559 / 1,519
5, Loss of Flow Conditions with Flow Rate fixed,	1,559 / 1,502
6, Loss of Flow Conditions with Tin fixed,	1,556 / 1,504
7, Static Rod Misalignment Conditions,	1,696 / 1,497

V. 불확실도 (Uncertainties)

다음의 압력, 온도, 출력, 유량에 대한 불확실도는 ITDP 방법으로 생산된 것으로 DNBR 계산을 위해 사용된 값이다.

- 가압기 압력 불확실도 : +/-39.7 psi (random), +10.3psi(bias)
- 냉각재 평균온도 불확실도 : +/-3.8 °F (random), -1.2 F(bias)
- 원자로 출력 불확실도 : +/-2.0 % (random), no bias
- 원자로계통 유량 불확실도 : +/-3.0 % (random), no bias

표 1. 각 운전변수에 대한 평균 값 및 불확실도

Parameter	Mean (m)	Uncertainty (u)	k value	Sigma (s)	s/m
Power	1	0.02	2	0.01	0.01
Temperature	550.85	3.8	2	1.9	0.003449215
Pressure	2270	39.7	2	19.85	0.008744493
Flow	1	0.03	2	0.015	0.015
1-Bypass	0.965	0.015	1.732	0.00866051	0.00897462
FNdH	1.49	0.0596(4%)	1.645	0.036231	0.024316109
FDHEI	1	0.03(3%)	1.645	0.01823708	0.018237082
THINC-IV	1			0.02	0.02
Trans code	1			0.005	0.005

Mean (m): Nominal value

Uncertainty (u): u

k value : 2 = 2 sided nominal distribution, 1.732=uniform distribution, 1.645=1 sided nominal distribution

Sigma (s): Standard deviation = u/k

VI. 분석 결과 및 토의

W-3 R grid 와 WRB-1 상관식 간의 DNBR 여유도 비교와 표준 열설계방법론(STDP)와 개선 열설계방법론(ITDP) 그리고 개정된 열설계방법론(RTDP)에 대한 DNBR 여유도 비교를 위하여 표 2, 3, 4와 같이 설계한계 DNBR을 계산하였다.

가. W-3 R-grid 상관식에 대한 설계한계 DNBR (ITDP)

표 2. DNBR 민감도 및 설계한계 DNBR 계산 결과(W-3 R-grid, ITDP)

Parameter	Mean (m)	Sigma (s)	s/m	Limiting Sensitivity (S)		(S*s/m)**2	
				Thm	Typ	Thm	Typ
Power	1	0.01	0.01	-1.83405	-2.4717	0.0003364	0.0006109
Temperature	550.85	1.9	0.003449	-7.42858	-12.6725	0.0006565	0.0019106
Pressure	2270	19.85	0.008744	1.276639	2.186384	0.0001246	0.0003655
Flow	1	0.015	0.015	1.159783	1.747046	0.0003026	0.0006867
l-Bypass	0.965	0.00866	0.0089746	1.154008	1.747913	0.0001073	0.0002461
FNdH	1.49	0.03623	0.024316	-1.91425	-2.68267	0.0021666	0.0042552
FDHE1	1	0.018237	0.018237	-1.25531	-1.29339	0.0005241	0.0005564
THINC-IV	1	0.02	0.02			0.0004	0.0004000
Trans Code	1	0.005	0.005			0.000025	0.0000250
TOTAL=						0.0046432	0.0090565
s*sigma/mean = $\sqrt{\sum(S)^2 + (\sigma/\mu)^2}$						0.0681407	0.0951654
Fu=1.0-1.645* $\sqrt{\sum(S)^2 + (\sigma/\mu)^2}$						0.8879084	0.8434528
Design limit DNBR = Correlation Limit DNBR/Fu=1.3/Fu						1.464	1.541

W-3 R-grid 상관식에서 Thimble cell에서의 DNBR 값이 Typical cell과 비교하여 많이 차이가 남을 볼 수 있는데, 이는 W-3 R-grid 상관식에서 Cold wall factor가 보수적이기 때문이라고 생각된다.

나. WRB-1 Correlation 에 의한 설계한계 DNBR (ITDP)

표 3. DNBR 민감도 및 설계한계 DNBR 계산 결과(WRB-1, ITDP)

Parameter	Mean	Sigma	Sigma/Mean	Sensitivity (typ/thm)	(S*s/m) ² (typ/thm)
Power	1.0	0.01	0.01	-2.5018/-2.3905	0.000626/0.000571
Temperature	550.85	1.9	0.003449	-9.2839/-8.1141	0.001025/0.000783
Pressure	2270	19.85	0.008744	2.3016/1.9379	0.000405/0.000287
Flow	1.0	0.015	0.015	1.6679/1.4915	0.000626/0.000501
Pypass	0.965	0.00866	0.008975	1.6178/1.4206	0.000211/0.000163
FdH	1.49	0.03623	0.024316	-2.5866/-2.4715	0.003956/0.003612
FQE, FDHE1	1.0	0.01824	0.018237	-1.2497/-1.2837	0.000519/0.000548
THINC-IV	1.0	0.02	0.02	1.0000/1.0000	0.000400/0.000400
TA Code	1.0	0.005	0.005	1.0000/1.0000	0.000025/0.000025
Total					0.007793/0.006890

Design Limit DNBR (ITDP) = 1.369(typ)/1.355(thm)

표 4. WRB-1 상관식을 이용한 Design Limit DNBR (RTDP)

Sensitivity Case	Design Limit DNBR (typ/thm)
1. High Power High Pressure	1,241/1,232
2. High Power Low Pressure	1,235/1,226
3. Low Power High Pressure	1,234/1,226
4. Low Power Low Pressure	1,233/1,223
5. Loss of Flow Accident	1,235/1,227
6. Static Rod Misalignment	1,241/1,235
7. Dropped Rod Accident	1,249/1,237

Design Limit DNBR (RTDP) = 1.25/1.24(typ/thm)

표 5. W-3 R-grid 및 WRB-1 CHF 상관식 간의 DNBR여유도 비교

Core Condition	Minimum DNBR (W-3 R-grid, ITDP)	Minimum DNBR (WRB-1, ITDP)	DNBR여유도 비교 (%)*
Nominal	2,743/2,164	2,745/2,558	22.5/41.0 증가
High power High pressure	1,886/1,590	1,888/1,816	15.5/25.4 증가
Low power Low pressure	1,780/1,664	1,892/1,887	22.7/25.6 증가
Loss of flow	1,796/1,726	1,738/1,703	10.4/7.8 증가
Design Limit DNBR	1,541/1,464	1,369/1,355	

$$* \left(\frac{\text{Min. DNBR}}{\text{D.L DNBR}} - 1 \right) \times 100$$

표 5. 에서 보는 바와 같이 같은 열수력 조건에서 WRB-1 상관식을 사용할 경우 W-3 -R grid 상관식에 비하여 상당히 많은 DNBR여유도가 증가하는 것으로 나타났다.

DNBR 여유도를 비교하기 위하여 다음의 3가지 경우에 대하여 각각 DNBR을 계산하여 보았다.

- W-3 R-grid 상관식, STDP
- W-3 R-grid 상관식, ITDP
- WRB-1 상관식, RTDP

표 6. STDP, ITDP 및 RTDP 방법론에 대한 Minimum DNBR 비교

Core Condition	Minimum DNBR (W-3 R-grid, STDP)	Minimum DNBR (W-3 R-grid, ITDP)	Minimum DNBR (WRB-1, RTDP)
Nominal	1,970/1,645	2,743/2,164	2,745/2,558
Design Limit DNBR	1.3 (Safety Limit DNBR)	1,541/1,464	1.25/1.24

* W-3 R grid 상관식의 한계 DNBR 1.3 에는 9.1%의 Generic Margin이 포함되어 있음.

다. STDP 와 ITDP 방법간의 DNBR여유도 비교

본 논문에서는 기존의 W-3 R- grid, 열설계방법(STDP)에 비하여 새로 적용하는 W-3 R-grid, 열설계방법(ITDP) 간의 DNBR 여유도는 약 12.1 % 정도 증가하는 것으로 나타났다.

일반적으로 열설계방법론으로써 ITDP를 적용할 경우 STDP의 경우에 비해서 약 8% 가량의 추가적인 DNBR 여유도 확보가 가능하다고 알려져 있다.

라. STDP 와 RTDP 방법간의 DNBR여유도 비교

WRB-1 적용, 열설계방법론을 RTDP를 채택할 경우 W-3 R-grid 적용, STDP에 비해서 58% 까지 DNBR여유도가 증가하는 것을 볼 수 있다.

VII. 결론

W-3 계열 상관식 및 ITDP, WRB-1 상관식 및 ITDP, 그리고 WRB-1 상관식 및 RTDP 열설계 방법론에 의한 설계한계 DNBR을 계산하여 각각에 대한 DNBR여유도를 계산하여 보았다.

W-3 R grid 상관식과 WRB-1 상관식을 비교할 때 DNBR여유도는 최소 7.8 %정도 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 금번 고리 2호기에 적용하는 W-3 R-grid 상관식, ITDP 열설계방법론을 채택함으로써 기존의 STDP에 비하여 12% 정도 DNBR여유도가 증가하는 것으로 나타났다.

고리 2호기와 동일형인 유고연방의 KRSKO 발전소의 경우는 현재 WRB-1상관식 및 ITDP를 적용하고있고 장차 RTDP를 적용할 계획인 것으로 알려지고 있다. 국내발전소에 대해서도 상관식은 W-3계열보다는 WRB-1이나 WRB-2를 사용하며, 열설계방법은 결정론적인 방법보다는 통계적 열설계 방법인 ITDP나 RTDP를 채택하는 것이 DNBR여유도를 확보하는 측면에서 유리한 것으로 나타났다. 이와 같이 DNBR여유도를 많이 확보 할 수 있다면 이를 발전소 설계제한치를 완화한다든지, 출력증강 또는 설계변경 등 여러 가지로 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Reference

1. Westinghouse, "Thermal-Hydraulic Design Procedure Manual", Vol.1, Vol.2, 1990
2. Westinghouse, "Thermal-Hydraulic Design Computer Code Manual", Vol.1, Vol.2, 1990
3. Westinghouse, "Thermal-Hydraulic Engineering Service Manual", Vol.1, Vol.2, 1990
4. KNFC, "Kori unit 2 T/H Design basis", 1998.