'2000춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 노심 조건에 대한 국부조건 CHF 상관식 개발

Development of a Local Parameter CHF Correlation Applicable to SMART Core Conditions

황대현, 유연종, 지성균
한국원자력연구소
대전시 유성구 유성우체국 사서함 105호

요 약

정방형 집합체에 대한 CHF 실험 자료를 사용하여, 질량 유속이 비교적 작은 SMART 노심 운전 조건에 적용 가능한 국부조건 CHF 상관식을 개발하였다. CHF 발생 위치의 국부 열수력 조건은 부수로 해석 코드인 MATRA로 분석하였다. 고유속 조건에서 개발된 상관식은 저유속 조건에서 CHF를 크게 예측하는 경향을 보이는데, 저유속 조건에 대한 보정 인자를 개발하여 예측 정확도를 개선하였다. 그리고 혼합날개에 대한 보정인자를 도입하여 혼합날개가 CHF에 미치는 영향을 평가하였다. 새로이 개발된 SR-1 상관식은 비선형 회귀분석 모형을 사용하여 최적화 하였으며, 통계적 평가 및 예측 경향 분석을 통하여 모형의 타당성을 검증하였다. SR-1 상관식의 한계 DNBR은 전체 2518 개 실험 자료에 대하여 1.228, SMART 노심 조건을 포함하는 706 개의 저유속 실험 자료($G<1500\ kg/m^2/s$)에 대하여 1.331로 평가되었다.

Abstract

A local parameter CHF correlation is developed for the analysis of SMART core condition which is characterized by the low RCS flow rate. The subchannel analysis code, MATRA, is used for the analysis of the local thermal-hydraulic conditions in the square-lattice test bundles. A correction factor is devised to improve the prediction accuracy at low mass velocity conditions at which the high velocity CHF correlations tend to overpredict the CHF values considerably. In addition, a spacer grid correction factor is introduced for the evaluation of the mixing vane effects on CHF. A new CHF correlation, named SR-1, is fitted by a nonlinear regression technique, and validated by statistical tests and the analysis of parametric trends. The correlation limit DNBRs are evaluated as 1.228 for all data of 2518 points, and 1.331 for low velocity data($G<1500\ kg/m^2/s$) including SMART core conditions.

1. 서론

SMART(System integrated Modular Advanced ReacTor) 노심은 기존 국내 경수로 노심에 비하여 출력 밀도가 낮고 핵연료 길이가 짧으며, 특히 열수력적 관점에서 보면 정상 상태 노심 입구

유속이 상당히 낮은 조건에서 운전되는 특징을 갖고 있다. CHF는 일반적으로 질량 유속과 선형적 비례 관계를 갖으며, 그 기울기는 고유속과 저유속 조건에서 확연히 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다[1]. 저유속 조건에서 CHF는 거의 환상 유동에서의 액막 증발 현상에 의해 발생하며, CHF와 질량 유속의 관계는 임계 건도가 1이 되는 에너지 보존식에 의해 표현되는 관계와 거의 유사한 것으로 나타난다. 이에 비하여 고유속 조건에서 CHF는 주로 핵비등 이탈 현상에 의해 발생하며, 이 경우 질량 유속 변화에 대한 CHF 변화를 나타내는 곡선의 기울기는 저유속 조건에서의 기울기보다 작다. 이러한 특징은 여러 가지 실험을 통하여 관찰된 바 있으며, 기존의 원형관에 대한 상관식 중에서도 유속 조건에 따라 상관식 형태가 달라지는 경우를 찾아볼 수 있다[1,2]. 이러한 현상은 봉 집합체에서도 발견할 수 있는데, 그림 1은 5x5 집합체에 대한 CHF 실험 자료[3]를 고유속 조건에서 개발된 집합체 CHF 상관식(KRB-1[4]) 및 원형관에 대한 CHF table[5]에 의한 예측 결과와 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 KRB-1 상관식을 저유속 조건으로 연장시키면 CHF를 상당히 크게 예측하는 것으로 나타났다. 원형관에 대한 CHF 실험 자료를 잘 나타내고 있는 CHF table은 집합체 실험 자료와 아주 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 SMART 노심과 같은 저유속 조건에 적용할 수 있는 국부조건 CHF 상관식을 개발하였다. 상관식 개발에 사용된 실험 자료는 문헌 조사 등을 통하여 수집된 것이며, 실험 집합체 내의 국부 열수력장은 부수로 해석 코드인 MATRA[6]로 분석하였다. 상관식은 수집된 자료를 특성별로 분류한 후, 상관식 기본 형태 개발, 저유속 및 혼합날개 보정 인자 개발, 그리고 상관식의 통계적 검증 등의 단계적 평가를 통하여 개발하였다.

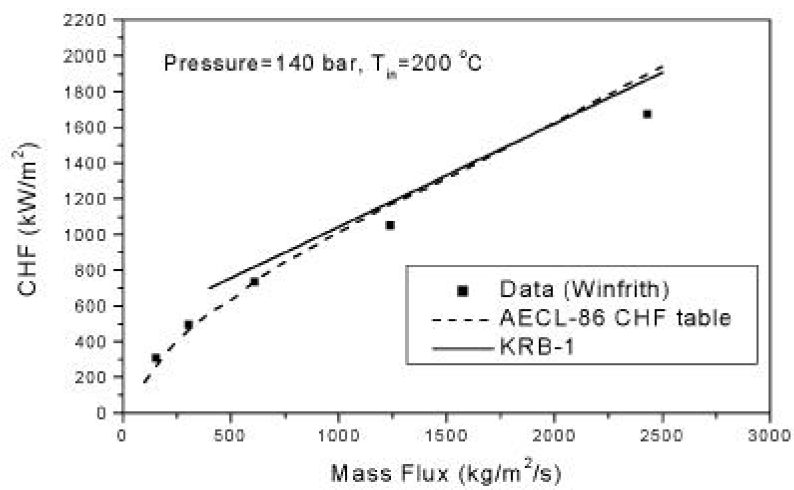

그림 1. 유속 변화에 대한 CHF 변화 경향

2. 집합체 CHF 실험 자료

2.1 수집된 실험 자료 내용

국부 조건 CHF 상관식 개발을 위하여 수집된 정방형 집합체 기하 형태 및 실험 조건은 표 1에 정리하였다. 수집된 실험 자료는 혼합날개 부착 여부에 따라 두 그룹으로 구분하였으며, 분석에 사용된 실험 자료는 모두 2518 개로서, 혼합날개가 부착된 집합체 자료는 1738 개, 혼합날개가 없는 집합체 자료는 780 개이다. 실험 자료의 범위는 압력: 69 171 bar, 질량 유속: 470 4973 $kg/m^2/s$, 가열 길이: 1.37 4.27 m로서 SMART 노심 운전 조건을 포함하고 있다. 실험 집합체 단면 형태는 그림 2에 제시하였다.

표 1. 상관식 개발에 사용된 정방형 집합체 CHF 실험 자료

TS	Configu-ration	Axial profile	Grid spacing [mm]	Heated length [m]	Rod dia./pitch [mm]	Mixing vane	Pressure (bar)	Mass flux (kg/m2/s)	# of data
156	TYP-5X5	UNIFORM	660	4.27	9.5/12.6	R	103 167	1343 4928	73
157	TYP-5X5	UNIFORM	660	2.44	9.5/12.6	R	103 167	1372 4893	78
158	THM 5X5	UNIFORM	660	2.44	9.5/12.6	R	103 168	1342 4713	68
160	TYP-5X5	UNIFORM	559	2.44	9.5/12.6	R	103 167	1369 4874	67
161	TYP-5X5	UNIFORM	559	4.27	9.5/12.6	R	103 167	1335 4973	70
162	THM 5X5	COSINE	559	4.27	9.5/12.6	R	103 166	1340 3403	47
164	TYP-5X5	COSINE	559	4.27	9.5/12.6	R	103 167	1380 3578	54
13	THM 5X5	UNIFORM	534	3.0	10.8/14.3	P	70 161	522 3511	88
20	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	S	70 165	1094 3665	61
29	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	S	70 165	560 3694	111
30	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	F1	69 165	573 3693	100
31	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	70 167	579 3722	97
33	TYP-5X5	UNIFORM	534	3.0	9.5/12.7	F1	70 166	597 3863	102
37	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	69 167	578 3673	99
38	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	70 166	609 3836	95
39	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	F1	69 166	602 3848	104
40	THM 5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	100 166	551 3477	77
41	THM 5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	100 166	544 3505	79
43	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	159 165	1240 3829	31
46	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	160 165	1237 3793	29
47	THM 5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	140 165	1152 3497	49
48	THM 5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	139 165	1138 3505	49
515	THM 21	UNIFORM	381	1.83	10.7/14.3	unknown	69 157	675 3987	54
516	THM 21	UNIFORM	381	1.83	10.7/14.3	unknown	69 158	661 3975	56
3	THM 5X5	UNIFORM	534	3.0	10.8/14.3	None	70 160	471 3460	90
7	TYP-5X5	UNIFORM	534	3.0	10.8/14.3	None	70 160	512 3191	42
11	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	None	71 171	511 3361	81
14	THM 5X5	UNIFORM	534	3.0	10.8/14.3	None	70 160	470 3451	65
16	THM 5X5	UNIFORM	534	3.0	10.8/14.3	None	70 160	501 3431	65
19	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	None	70 167	487 3594	83
21	TYP-5X5	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	None	70 165	494 3558	88
22	TYP-6X6	UNIFORM	545	3.0	9.5/12.7	None	69 162	513 3376	78
512	TYP-21	UNIFORM	254	1.83	10.7/14.3	unknown	69 158	547 4029	57
513	THM 21	UNIFORM	254	1.83	10.7/14.3	unknown	69 160	545 3910	54
514	THM 21	UNIFORM	254	1.37	10.7/14.3	unknown	69 158	1041 3934	38
517	TYP-21	Non-uni	254	1.83	10.7/14.3	unknown	103 158	786 3727	39

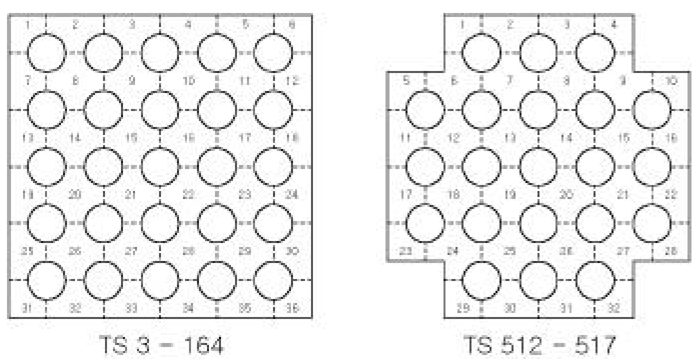

그림 2 실험 집합체 단면 형태

집합체 실험자료를 분석하려면 지지격자에 대한 정보가 필요하다. CHF 발생 위치의 국부 열수력장 예측에 사용되는 부수로 해석 코드에는 지지격자의 난류혼합인자 및 압력 손실 계수가 사용되며, 특히 난류혼합인자가 중요한 변수이다. KWU 실험 자료(TS 3 48)에는 열혼합 실험 자료가 일부 포함되어 있으며 이로부터 난류혼합인자를 평가한 바 있다[7]. 그리고 Westinghouse 실험 집합체(TS 156 164)에 대한 난류 혼합 인자는 WCAP 자료[8]에 제시되어 있다. 그러나 EPRI 보고서[9]에 나타난 실험 자료(TS 512 517)에는 지지격자의 압력 손실 계수는 제시되어 있으나, 혼

합 날개에 대한 정보가 없으므로 TS 512 517에 대한 난류혼합인자의 크기를 평가할 수 없다. 난류혼합 인자는 국부 열수력장 해석에 필수적이므로 본 연구에서는 지지격자 압력 손실 계수의 크기로부터 혼합날개 부착 여부를 판단하여, 이로부터 난류혼합인자의 크기를 적절히 가정하였다. 즉, TS 512 517은 동일한 봉 직경 및 봉간 거리로 구성된 집합체들인데 지지격자 압력 손실 계수가 0.57로서 작은 집합체들은 혼합날개가 없는 것으로 가정하였으며, 이 경우의 대표적인 난류혼합인자 값으로서 0.005를 적용하였다. 압력손실 계수가 1.73 1.91로서 큰 집합체들은 혼합날개가 부착된 것으로 가정하여 난류혼합인자 값은 0.05를 적용하였다[10].

2.2 MATRA 코드를 사용한 실험 집합체 국부 열수력장 해석

CHF 발생 위치에서의 국부 열수력적 조건은 부수로 해석 코드인 MATRA 코드를 사용하여 분석하였으며, 부수로 해석 모형은 그림 2에 제시한 바와 같다. MATRA 코드로 분석한 실험 집합체 내의 부수로 출구 건도 및 질량 유속의 분포를 보면 그림 3에서 보듯이 난류혼합인자(TDC)의 크기에 따라 크게 달라지는 것으로 나타났다. 혼합 날개가 부착된 경우에 해당하는 TDC=0.05인 경우 부수로 간의 에너지 및 운동량 교환에 의해 출구 건도 및 질량 유속 분포가 상당히 균일해지는 것을 알 수 있다. MATRA 코드로 계산한 CHF 발생 위치에서의 국부 열수력 조건은 국부조건 CHF 상관식 개발에 사용된다.

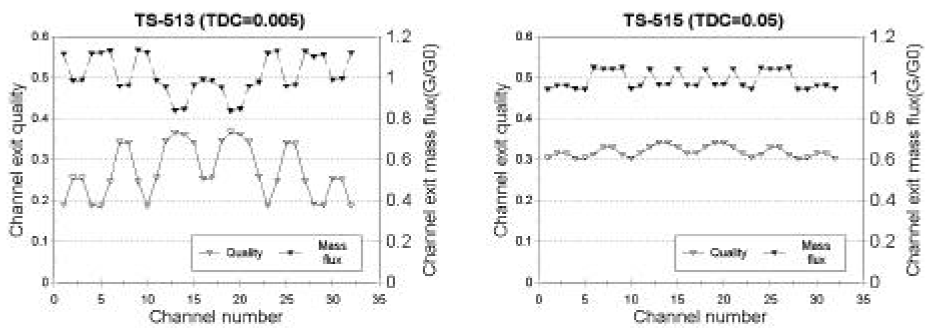

그림 3. MATRA 코드로 분석한 실험집합체 국부 열수력 조건

3. CHF 상관식 개발 및 검증

실험 자료는 CHF에 영향을 주는 주요 변수 특성에 따라 아래와 같이 4 개의 그룹으로 구분하였다. 본 연구에서 저유속과 고유속의 경계는 1356 kg/m^2/s로 선정하였으며, 이는 집합체 실험 자료를 기존 경수로 조건에서 개발된 KRB-1 CHF 상관식으로 분석한 결과 P/M의 분산이 급격하게 증가하기 시작하는 위치를 선정한 것으로서, 그림 1에 예시한 바와 같이 고유속 상관식이 CHF를 크게 예측하기 시작하는 조건과 유사하다.

	Uniform APS		Non-uniform APS
	High velocity (G>1356 kg/m^2/s)	Low velocity (G≤1356 kg/m^2/s)	
MV grids	A	B	D
No MV grids	C		

이러한 실험 자료 분류로부터 상관식 개발은 단계적 평가를 통하여 수행하였다. 즉, A-그룹 자료를 사용하여 상관식 기본 형태($q''_{CHF,BASE}$)를 개발하고, B-그룹 자료를 사용하여 저유속 보정 인자(F_G)를 개발하며, C-그룹 자료를 사용하여 혼합날개 보정 인자(F_{SG})를 개발하고, 다음으로

D-그룹 자료를 사용하여 비균일 축방향 출력분포 보정 인자(F_{NU})의 성능을 평가하였다. 이로부터 SR-1 상관식 형태를 아래와 같이 표현하였다.

$$q''_{CHF} = q''_{CHF,BASE} \cdot \frac{F_G \cdot F_{SG}}{F_{NU}} \quad (1)$$

3.1 SR-1 상관식 기본 형태 개발

SR-1 상관식의 기본 형태는 혼합 날개가 부착된 지지격자를 사용하는 축방향 균일 출력 분포 실험 자료 중 집합체 평균 질량 유속이 1356 kg/m^2/s 보다 큰 고유속 조건에 해당하는 1255 개 실험 자료(A-그룹 자료)를 사용하여 개발하였다. 상관식의 함수 형태는 KRB-1 상관식과 동일하며, 이는 국부조건 CHF 상관식이 나타내는 두 가지 뚜렷한 경향을 고려하여 결정된 것이다. 첫째는 CHF와 국부 건도 간의 관계로서 다른 모든 조건이 동일한 경우 CHF는 국부 건도에 반비례하는 경향을 보인다. 둘째는 CHF와 질량 유속 간의 관계로서, 동일한 국부 조건에서 질량 유속이 증가하면 국부 건도가 낮은 경우에는 CHF가 증가하나, 국부 건도가 높은 경우에는 CHF가 감소하는 경향을 보인다. 이는 CHF가 서로 다른 물리적 현상에 의해 지배되기 때문인데, 이러한 경향을 고려하기 위하여 상관식의 기본 함수 형태는 아래와 같이 선정되었다.

$$q''_{CHF,BASE} = A_1 - A_2 \cdot G \cdot \chi + a_{11} \cdot G. \quad (2)$$

여기서,

$$A_1 = a_{10} + a_1 L + a_2\left(\frac{P}{1000}\right) + a_3 D_{he} + a_4 D_{hy} + a_5 \tanh\left[a_{12}(d_g + g_{sp}) + a_{13}\right],$$

$$A_2 = a_6\left(\frac{P}{1000}\right) + a_7 L\left(\frac{P}{1000}\right) + a_8 L + a_9\left(\frac{P}{1000}\right)^2.$$

상관식은 3 가지 물성치(P, G, χ)와 5 가지 기하 형태 변수(L, D_{he}, D_{hy}, d_g, g_{sp})를 포함하는 8 개의 독립 변수들로 구성된 비선형 함수 형태이며, 실험 자료로부터 상관식 계수를 최적화하기 위하여 비선형 회귀분석 프로그램인 FITZ 코드[11]를 사용하였다. 비선형 회귀분석 모형은 계수의 초기치 설정에 따라 여러 가지 해를 가질 수 있는데, 본 분석에서는 KRB-1 상관식의 계수들을 초기치로 선정하였으며, 그 결과 SR-1 상관식 기본 형태의 계수들은 참고문헌[12]에 제시한 바와 같이 평가되었다.

상관식의 예측 성능은 1255 개 실험 자료에 대하여 P/M의 평균 및 표준 편차가 각각 1.001 및 0.100으로 평가되었다. 상관식의 타당성을 통계적인 관점에서 검증하기 위하여 잔차(residual) 분석을 수행하였다. 회귀 분석 모형이 타당하게 설정되었다면 잔차의 모평균은 0 이고 잔차 모집단은 정규분포를 하는 것으로 알려져 있다[13]. CHF 상관식의 잔차는 측정된 CHF와 예측된 CHF의 차이로 정의된다. 잔차의 모평균에 대한 추정은 t-test로 수행하였다. 잔차의 표본평균 및 표본표준편차를 각각 $\bar{x}$ 및 s라 하고 모평균 $\mu=0$을 귀무가설(null hypothesis)로 설정하면

$$t = \frac{\bar{x} - 0}{s/\sqrt{n}}$$

의 절대값이 t-분포 상의 임계값인 $t_{\alpha/2,n-1}$ 보다 작을 때 유의 수준 α로서 귀무가설을 채택하게 된다. 분석 결과 SR-1 기본 상관식의 t 값은 2.513으로 평가되었으며, 이로부터 유의 수준 1%로서 잔차의 모평균이 0으로 추정될 수 있는 것으로 나타났다. 모집단의 분포가 정규 분포를 하는지에 대한 추정은 D'-test[14]를 사용하여 수행하였다. D'-test는 모집단이 정규 분포를 한다는 것을 귀무가설로 설정하고, 표본의 D' 값을 계산하여 이를 D'의 한계치와 비교하여 가설 검증을 수행하는 것이다. 표본 자료로부터 D' 값은 다음과 같이 간단히 평가할 수 있다. 먼저 변수(random variable)들을 오름차순으로 배열한 후 S^2과 T를 아래와 같이 계산한다.

$$S^2 = \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}{n}, \qquad T = \sum_{i=1}^{n}\left\{i - \frac{n+1}{2}\right\} x_i .$$

이로부터 D'=T/S로 평가한다. 분석 결과 SR-1 기본 상관식의 D' 값은 D' 한계치의 최소값보다 약간 작은 것으로 나타났으며, 이는 정규 분포보다 더 중심으로 치우친 분포를 하는 것을 의미한다. 상관식 P/M의 분포도 이와 유사한 것으로 나타났다.

일반적으로 상관식 한계 DNBR 계산에 사용되는 Owen's one-sided tolerance factor[15]는 모집단이 정규 분포를 할 경우에 적용되는 것이며, 정규 분포가 아닌 경우에는 distribution free에 대한 tolerance limit을 구하는 방법[16]을 적용해야 한다. 이 방법은 신뢰도를 g, 확률을 P 라하고, 표본의 크기가 n 일 때

$$g \le I_{1-P}(m, n-m+1) \tag{3}$$

을 만족하는 m을 구하여 내림차순으로 배열된 변수(P/M)의 m 번째 값을 tolerance limit으로 정하는 것이다. 여기서 I_{1-P}는 incomplete Bessel function 이며, 여러 가지 확률 조건에 대하여 이 값을 평가한 결과는 참고문헌 [16]에 제시되어 있다. 이 방법을 SR-1 기본 상관식에 적용하면, 95% 확률과 95% 신뢰도로서 m=51로 구해지며, 이로부터 P/M의 tolerance limit은 1.191으로 결정되었다. 그림 4는 압력, 질량 유속, 그리고 국부 건도에 대한 SR-1 기본 상관식의 P/M 분포 경향을 보인 것이다. 각각의 독립 변수들에 대하여 P/M의 평균에 대하여 대체로 균일한 분포 특성을 갖는 것으로 나타났으며, 이로부터 상관식의 타당성을 확인할 수 있다.

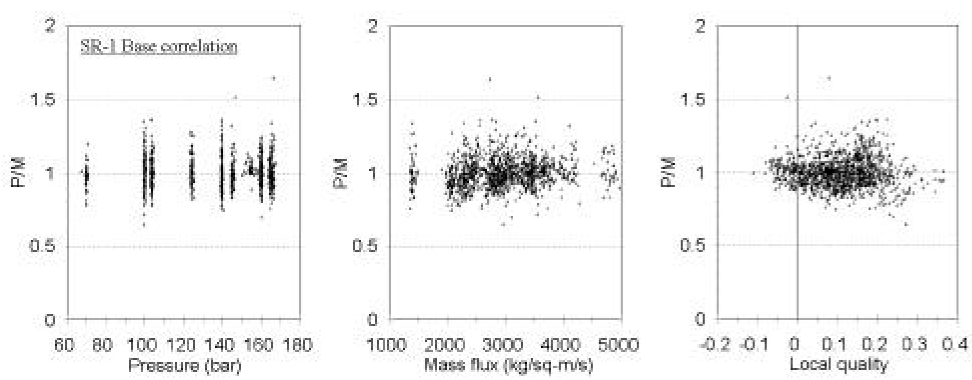

그림 4. SR-1 기본 상관식의 CHF 예측 경향

3.2 저유속 보정 인자 개발

그림 1에서 나타낸 바와 같이 저유속 조건에서 질량 유속 변화에 대한 CHF 변화는 고유속의 경우보다 커지는 것을 알 수 있으며, 실제로 고유속 조건 실험 자료로부터 개발한 SR-1 기본 상관식을 저유속 조건 실험 자료 (B-그룹 자료)에 적용한 결과 유속이 낮아질수록 CHF를 높게 예측하는 경향을 보였다. 이를 보정하기 위하여 본 연구에서는 저유속 조건에 대한 보정 인자를 아래와 같이 유속비에 대한 지수함수 형태로 가정하였다.

$$F_G = \left(\frac{G}{G_{ref}}\right)^A \tag{4}$$

여기서 G_{ref}는 저유속 영향이 나타나기 시작하는 기준 유량으로서 본 연구에서는 실험 자료에 대한 예측 경향 분석을 통하여 이를 1356 kg/m^2/s으로 설정하였다. Katto의 원형관에 대한 연구[2]에 의하면 고유속 상관식과 저유속 상관식의 경계는 아래와 같은 관계식으로 표현되며, Katto 상

관식 중 L-regime과 H-regime 상관식은 이 지점을 기준으로 서로 다른 기울기를 갖는다.

$$\left(\frac{G_{limit}^2 L}{\sigma\rho_f}\right)^{0.29} < \frac{0.4(\rho_g/\rho_f)^{0.133}}{D/L + 0.0031} \quad (5)$$

본 연구에서 도입한 지수 함수 형태의 유속 보정 인자는 질량 유속이 0일 때 CHF도 0이 되며, Katto 상관식의 경우와는 달리 유속 변화에 대한 CHF 변화를 나타내는 기울기가 연속적으로 변하여 질량 유속이 G_{ref}에 도달하면 고유속 상관식의 기울기와 같아지는 것으로 가정하고 있다. 따라서 G_{limit}은 0과 G_{ref} 사이의 임의의 값을 갖게 되는데, SMART 노심 정상 운전 조건에서 G_{limit}을 평가한 결과 그 크기는 본 연구에서 설정한 G_{ref}의 약 1/2 정도에 해당하는 것으로 나타났다.

이론적 관점에서 최적 보정 인자는 실험치와 동일한 예측치를 제공해야 하므로 아래와 같은 관계식이 성립한다.

$$q''_M = q''_{CHF,BASE} \cdot \left(\frac{G}{G_{ref}}\right)^A . \quad (6)$$

따라서,

$$1 = \left(\frac{P}{M}\right)_{BASE} \cdot \left(\frac{G}{G_{ref}}\right)^A , \quad (7)$$

즉,

$$\ln\frac{P}{M} = -A \ln\frac{G}{G_{ref}} \quad (8)$$

을 구할 수 있다. 저유속 실험 자료 분석 결과 그림 5-(a)에서 보듯이 지수 A의 평균 최적치는 0.43으로 평가되었다. 이 보정 인자를 실험 자료에 적용한 결과 그림 5-(b)에서 보듯이 P/M은 boiling number(B_o)에 대하여 감소하는 경향을 보였다. 따라서 A는 상수가 아닌 B_o의 함수 형태로 아래와 같이 나타내었으며, 여기서 $B_o = q''\times 10^3/(G\,h_{fg})$으로 정의하였다.

$$F_G = \left(\frac{G}{G_{ref}}\right)^{a - b\cdot B_o} \quad (9)$$

그림 5-(b)에서 보듯이 대략 B_o=1 근처에서 P/M의 보정치가 1.0에 가까우므로, 경계조건으로서 a-b=0.43을 적용하였다. 그 결과 기울기 b의 최적치는 그림 5-(c)에서 보듯이 0.38로 평가되었다. 이러한 과정을 거쳐 저유속 보정 인자는 아래와 같이 결정되었다.

$$F_G = \left(\frac{G}{G_{ref}}\right)^{0.81 - 0.38\cdot B_o} \quad (10)$$

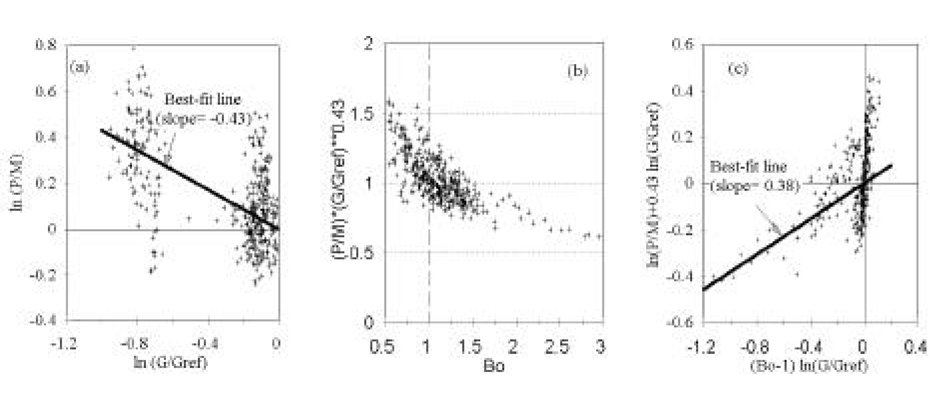

그림 5. 저유속 보정 인자 최적화

이 보정 인자를 SR-1 기본 상관식과 함께 저유속 자료에 적용한 결과 그림 6에서 보듯이 보정 인자를 적용하지 않은 경우에 비하여 저유속 조건에서 CHF를 적절히 예측하는 것으로 나타났다.

유속이 아주 낮은 경우에 CHF는 수로 내의 액체가 완전히 증발하는 조건, 즉 출구 건도가 1.0인 조건에 수렴하는 경향을 나타낸다. 따라서 저유속 영역에서 CHF는 상관식으로 계산된 값과 출구 건도가 1에 해당하는 값 중에서 작은 값으로 결정하였다.

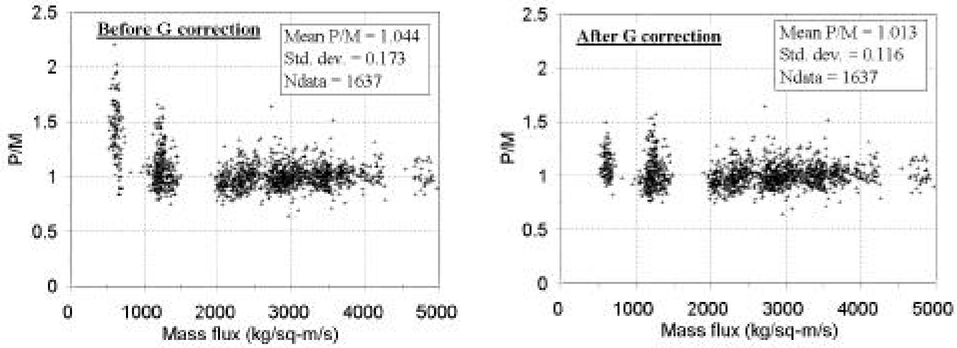

그림 6. 저유속 보정 인자의 예측 성능 평가

3.3 혼합날개 보정 인자 개발

KWU 실험 자료를 분석한 결과 혼합날개(mixing vane)가 부착된 집합체의 CHF 크기는 동일한 입구 조건에서 혼합 날개가 없는 경우에 비하여 10 20% 정도 높은 것으로 나타났다[7]. 앞 절에서 SR-1 기본 상관식 및 저유속 보정 인자는 혼합날개가 부착된 실험 집합체 자료로부터 개발한 것이다. 그러나 SMART 노심에 혼합날개가 없는 KOFA 연료를 그대로 적용할 경우 이를 분석할 수 있는 국부조건 상관식이 필요하므로, 본 절에서는 국부조건 상관식에 대한 혼합날개 보정 인자를 개발하였다.

혼합날개가 없는 실험집합체에 대한 741 개의 CHF 실험 자료(C-그룹 자료)를 수집하였으며, 이 실험 자료를 SR-1 기본 상관식 및 저유속 보정 인자를 사용하여 분석한 결과 그림 7-(a)에서 보듯이 전반적으로 약 10% 정도 CHF를 크게 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 혼합날개가 없는 경우 혼합날개 보정 인자는 $F_{SG} = 0.9$으로 평가되었으며, 이를 적용한 결과 SR-1 상관식의 예측 성능은 그림 7-(b)에서 보듯이 P/M의 평균 및 표준 편차가 각각 1.00 및 0.107로 나타났다.

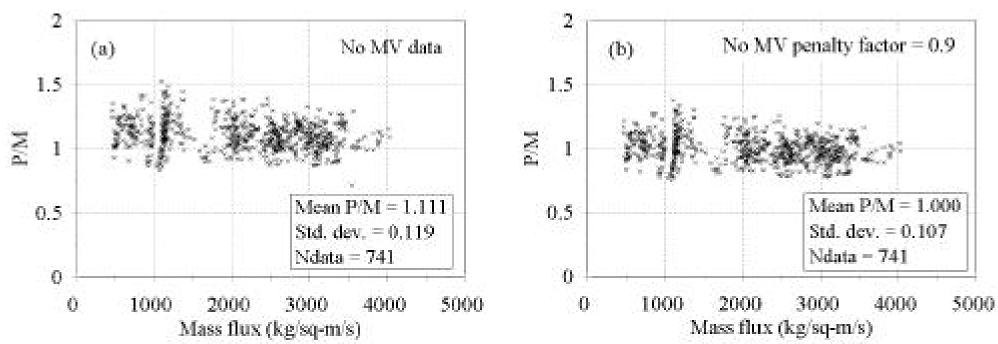

그림 7. 혼합 날개 보정 인자의 평가

3.4 비균일 축방향 출력 분포 보정 인자 평가

축방향 비균일 출력 분포가 CHF에 미치는 영향은 Tong의 F-factor 방법론[17]을 사용하여 보

정하였다. 즉,

$$F_{NU} = \frac{C}{q''_{local} \cdot (1 - e^{-C \cdot Z_{CHF}})} \int_{Z_{ONB}}^{Z_{CHF}} q''(z) e^{-C \cdot (Z_{CHF} - z)} dz, \qquad (11)$$

여기서,

$$C = 0.15 \frac{(1 - \chi_{CHF})^{4.31}}{G^{0.478}} \quad inch^{-1}.$$

수집된 축방향 비균일 출력 분포 실험 자료 중 보정 인자의 적용 범위를 고려한 140 개 자료에 대한 평가 결과는 축방향 출력 분포 형태와 함께 그림 8에 제시하였다. 그림에서 보듯이 혼합날개 부착 여부에 따라 평균 오차는 약 5% 이내, 표준편차는 약 12% 이내로서 적절한 예측 성능을 보이고 있으며, 비록 자료의 범위는 충분하지 않으나 Tong F-factor가 현재 대부분의 경수로 노심에 널리 적용되고 있는 점을 고려하면 SMART 노심 CHF 해석에서도 적용 가능할 것으로 판단된다.

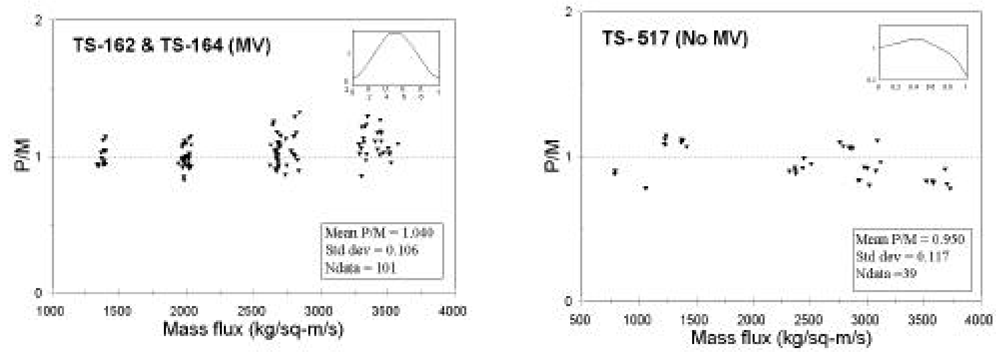

그림 8. 축방향 비균일 출력 분포 보정 인자 평가

3.5 SR-1 CHF 상관식

SMART 노심에 적용하기 위하여 MATRA 코드로 분석한 국부 열수력장 조건에 근거하여 개발된 SR-1 상관식의 최종 형태는 표 2와 같으며, 상관식 개발에 사용된 2518 개 실험 자료의 범위는 아래와 같다.

Pressure(bar):	68 to 171,
Mass flux(kg/m^2/s):	470 to 4973,
Critical quality:	-0.21 to 0.70,
Heat flux(kW/m^2):	513 to 4380,
Heated length(m):	1.37 to 4.27,
Hydraulic diameter(mm):	9.5 to 13.6,
Heated equivalent diameter(mm):	11.8 to 15.7,
Grid spacing(m):	0.25 to 0.55.

주요 상관식 변수들에 대한 영역별 돗수 분포는 그림 9에 제시하였다. SR-1 상관식의 압력 및 유속에 대한 적용 범위는 기존 KRB-1 상관식에 비하여 상당히 확장되었다. SR-1 상관식으로 예측된 P/M의 분포 경향은 그림 10에 제시하였다.

3.6 상관식 한계 DNBR

실험 자료 분석 결과 나타난 여러 가지 자료 군에 대한 P/M의 통계량은 표 3에 정리하였다. 표에서 G-그룹 자료는 질량 유속이 1500 kg/m^2/s 이하에 해당하는 실험 자료들을 모은 것으로서,

P/M의 불확실도는 저유속 조건에서 큰 것으로 나타났다. 따라서 보수적인 설계를 위하여 SMART 노심 설계에 적용할 상관식의 불확실도 크기는 G-그룹 자료 평가 결과로부터 결정하였다.

표 2. SR-1 CHF 상관식

$$q''_{CHF} = \min\left\{ q''_{CHF,BASE} \times \frac{F_G \cdot F_{SG}}{F_{NU}} ,\ q''_{evap} \right\}$$

where,

$$q''_{CHF,BASE} = a_1 L + a_2 (P/1000) + a_3 D_{he} + a_4 D_{hy} + a_5 \tanh[a_{12}(d_g + g_{sp}) + a_{13}]$$
$$- [a_6 (P/1000) + a_7 L (P/1000) + a_8 L + a_9 (P/1000)^2] \cdot G \cdot \chi + a_{10} + a_{11} G$$

$$F_G = \left(\frac{G}{G_{ref}}\right)^{(0.81 - 0.38 \cdot B_o)} \quad , \text{for } G < G_{ref}$$
$$= 1.0 \quad , \text{for } G \geq G_{ref}$$

F_{SG} = 1.0 for mixing vaned spacer grid,
= 0.9 for non-mixing vaned spacer grid.

F_{NU} = 1.0 for uniform axial power shape,

$$= \frac{C}{q''_{local} \cdot (1 - e^{-C \cdot Z_{CHF}})} \int_{Z_{ONB}}^{Z_{CHF}} q''(z)\, e^{-C \cdot (Z_{CHF} - z)} dz$$

$$\text{where, } C = 0.15 \frac{(1 - \chi_{CHF})^{4.31}}{G^{0.478}} \quad inch^{-1}$$

$$q''_{evap} = \left(\frac{d_{he}}{4L}\right) G\, h_{fg} \left(1 + \frac{\triangle h_{sub}}{h_{fg}}\right)$$

q''_{CHF} = critical heat flux (MBtu/hr/ft^2)	D_{he} = heated equiv. diameter (inch)
P = pressure (psia)	d_g = distance from CHF to last grid (inch)
G = mass flux (Mlb/hr/ft^2)	g_{sp} = grid spacing (inch)
χ = local quality	G_{ref} = 1.0 Mlb/hr/ft^2
L = heated length (ft)	Bo = boiling number; $q'' \times 10^3 / (G \cdot h_{fg})$
D_{hy} = hydraulic diameter (inch)	

상관식 한계 DNBR은 DNB 설계 기준에 근거하여 결정해야 한다. 만일 P/M의 모집단이 정규분포를 한다면 상관식 한계 DNBR은 one-sided tolerance limit 개념을 적용하여 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$DNBR_{cor} = \overline{\left(\frac{P}{M}\right)} + k_{95/95} \cdot s \qquad (12)$$

여기서, $DNBR_{cor}$은 상관식 한계 DNBR, $k_{95/95}$는 95% 확률과 95% 신뢰도로서 결정되는 Owen의 one-sided tolerance limit factor[15]이며, s 는 P/M의 표본 표준 편차이다. 이 관계식에 따르면 표 3의 G-그룹 및 H-그룹에 해당하는 상관식 한계 DNBR은 각각 1.281 및 1.203으로 평가된다.

그러나, G-그룹 및 H-그룹의 P/M에 대하여 D'-test를 통한 모집단 정규분포 검사를 수행한 결과 유의수준 5%에서 정규 분포하지 않는 것으로 나타났다. 그림 11은 이들을 정규 분포 곡선과 비교한 것이다. P/M의 모집단이 정규 분포하지 않으므로 상관식 한계 DNBR은 non-parametric tolerance limit 결정 방법론[16]을 적용하여 평가하였다. 그 결과 G-그룹 및 H-그룹의 상관식 한계 DNBR은 각각 1.331 및 1.228로 나타났다. P/M은 DNBR과 같은 의미를 가지므로, G-그룹 및 H-그룹의 상관식 한계 DNBR을 M vs. P 좌표로 표현하면 그림 12와 같이 나타난다. 상관식 한계 DNBR은, DNBR 값이 한계 DNBR과 같아지는 경우 95% 이상의 신뢰도로서 실제로 CHF가 발생할 확률이 5% 이하가 되도록 설정되어야 한다. 그림 12에 나타낸 모든 실험 점들은 실제로 CHF가 발생한 경우들을 표시한 것인데, DNBR이 상관식 한계 DNBR 보다 큰 경우에도 실제로 CHF가 발생한 경우는 그림에서 tolerance limit을 나타내는 점선의 아래 영역에 나타나며, 이들은 DNB 설계 기준에 따라 5%보다 작아야 한다. G-그룹 및 H-그룹의 상관식 한계 DNBR에 대하여

이들은 각각 3.7% 및 4.4%로 나타났으며, 이로부터 한계 DNBR이 적절히 설정되었음을 알 수 있다.

표 3. SR-1 상관식의 P/M 통계량

자료 그룹	자료 내용	자료 수	평균 P/M	표준 편차
A	MV & 고유속 자료 (SR-1 기본 형태 개발 자료)	1255	1.001	0.0999
B	MV & 저유속 자료 (저유속 보정 인자 개발 자료)	382	1.053	0.1519
C	No-MV & Uniform APS 자료 (혼합날개 보정 인자 개발 자료)	741	1.000	0.1073
D	Non-uniform APS 자료 (비균일 APS 보정 인자 평가 자료)	140	1.015	0.1160
E	모든 MV 자료	1738	1.014	0.1158
F	모든 No-MV 자료	780	0.997	0.1083
G	모든 저유속 자료 (G < 1500 $kg/m^2/s$)	706	1.040	0.1380
H	모든 자료	2518	1.009	0.1138

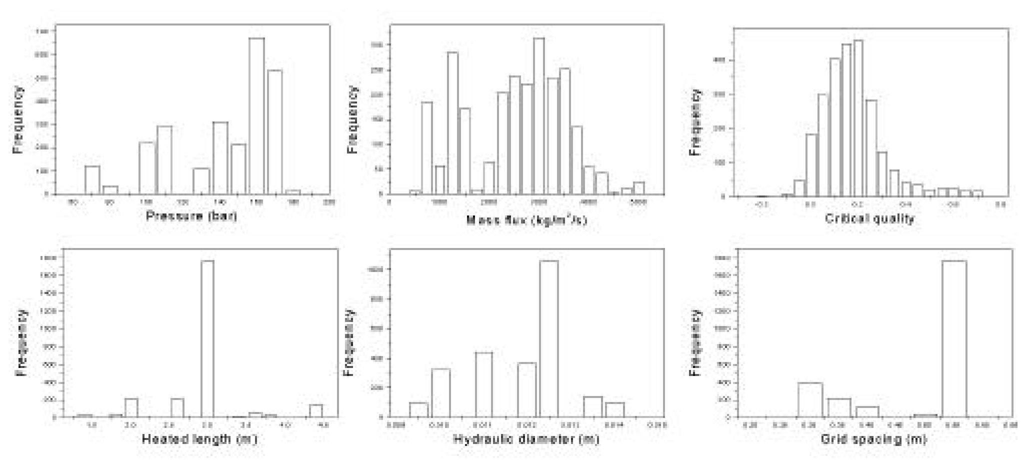

그림 9. 상관식 변수들에 대한 실험 자료 돗수 분포

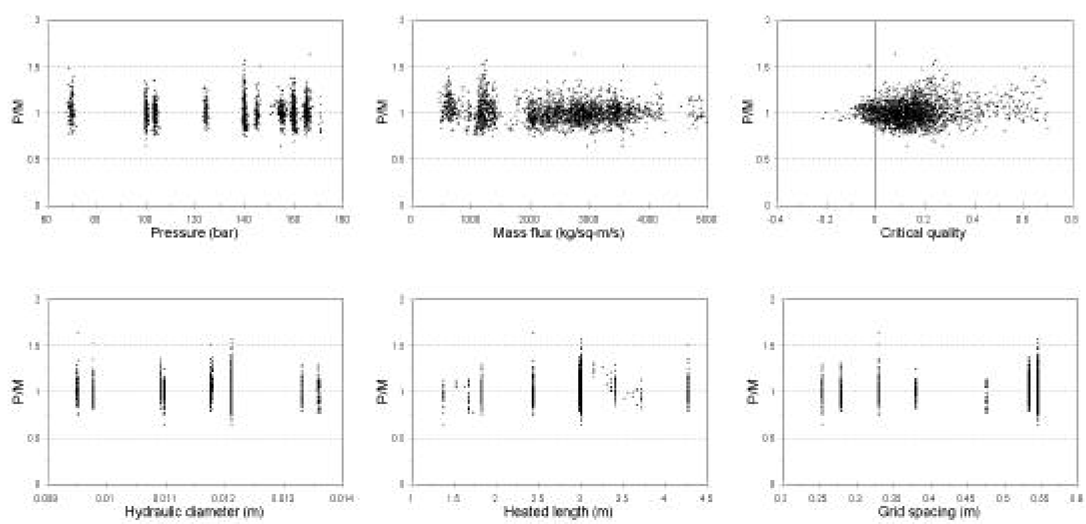

그림 10. SR-1 CHF 상관식의 예측 경향

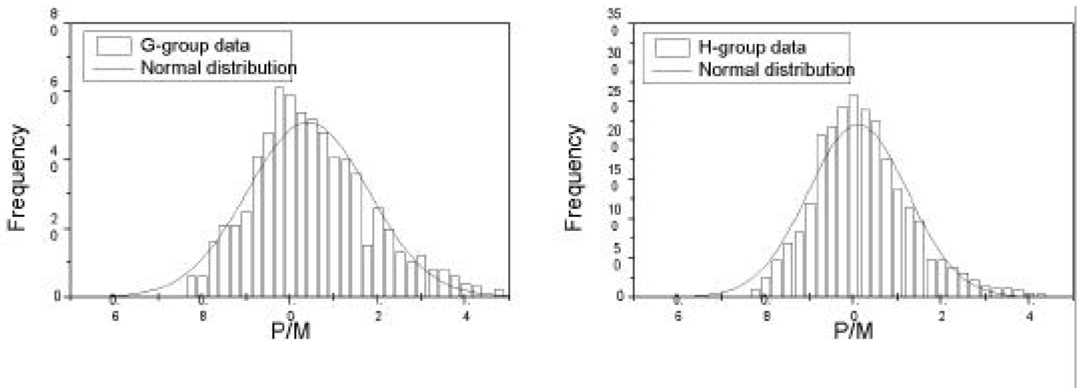

그림 11. SR-1 **상관식** P/M**의 돗수 분포**

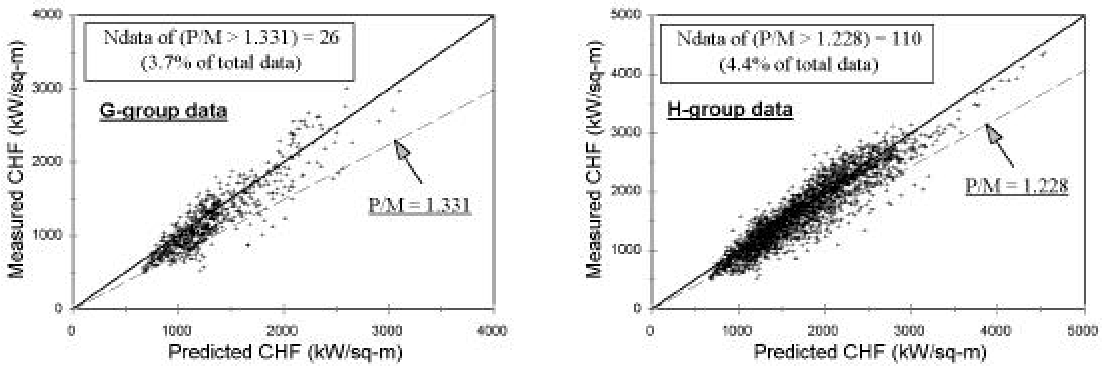

그림 12. SR-1 **상관식의 한계** DNBR **검증**

4. 결론

본 연구를 통하여 얻은 주요 결론은 아래와 같이 요약할 수 있다.

(1) SMART **노심 해석에 적용할 국부조건** CHF **상관식 개발을 위하여 정방형 실험 집합체에 대한** 2518 **개의** CHF **실험 자료를 수집하였으며, 부수로 해석 코드인** MATRA **코드를 사용하여 국부조건** CHF data base**를 구축하였다.**

(2) **저유속 조건에 대한 보정 인자를 도입한** SR-1 CHF **상관식을 개발하였다. 또한 혼합날개의 영향을 보정하는 인자를 도출하였으며, 축방향 비균일 출력 분포 영향을 보정하기 위하여** Tong F-factor **방법론을 적용하였다.**

(3) **전체 실험자료에 대하여** SR-1 **상관식의 한계** DNBR**은** 1.228**로 평가되었으며,** G< 1500 $kg/m^2/s$ **이하인 저유속 조건에서 한계** DNBR**은** 1.331**로 평가되었다.**

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Macbeth, R.V., The burnout phenomenon in forced-convection boiling, Advances in Chemical Engineering 7, 207-293, 1968.

[2] Katto, Y., A generalized correlation of critical heat flux for the forced convection boiling in vertical uniformly heated round tubes, Int. J. Heat Mass Transfer 21, 1527-1542, 1978.

[3] Bowditch, F.H. & D.J. Mogford, An experimental and analytical study of fluid flow and critical heat flux in PWR fuel elements, AEEW-R2050 (1987).

[4] Hwang, D.H., et. al., Evaluation of thermal margin in a KOFA-loaded core by a multichannel analysis methodology, J. KNS 27, 518-531 (1995).

[5] Groeneveld, D.C., et. al., 1986 AECL-UO critical heat flux lookup table, Heat Transfer Engineering 7, 46-62 (1986).

[6] Yoo, Y.J., et al., Development of a subchannel analysis code MATRA applicable to PWRs and ALWRs, J. KNS 31, 314-327 (1999).

[7] **황대현**, **외**, **임계열속 해석 체제 개선** Vol. 1, KAERI/TR-233/91 (1991).

[8] Motley, F.E., et al., Critical heat flux testing of 17x17 fuel assembly geometry with 22-inch grid spacing, WCAP-8536 (1975).

[9] Fighetti, C.F. & D.G. Reddy, Parametric study of CHF data Vol. 3, EPRI NP-2609 (1982).

[10] **황대현**, **외**, **노심 열수력장 및 임계열속 해석 체제 개선**, KAERI/RR-980/90 (1990).

[11] Van de Berg, H.R., FITZ(NLINZ) Non-linear least square curve fitting code - IBM PC version, FPE-85-021 (1985).

[12] **황대현**, SMART **노심** CHF **해석 체계 개발**: I. SR-1 CHF **상관식 개발**, SMART-CA-CA120-07 Rev.0, **설계 계산서** (2000).

[13] Draper, N.R. & H. Smith, Applied Regression Analysis, 2nd ed., Chapter 3., John Wiley & Sons Inc. (1981).

[14] ANS, Assessment of the Assumption of Normality (Employing individual observed values), ANSI N15.15 (1974).

[15] Owen D.B., Factors for One-Sided Tolerance Limits and for Variables Sampling Plans, SCR-607 (1963).

[16] Somerville P.N., Tables for Obtaining Non-Parametric Tolerance Limits, Annals of Mathematical Statistics 29, pp.599 (1958).

[17] Tong, L.S., Boiling crisis and critical heat flux, TID-25887 (1972).