

## 고압, 고유속에서 균일가열 수직 원형관의 임계열유속 예측 상관식 개발

이성우\*, 김동국, 심재우<sup>1</sup>  
한국에너지기술연구원, <sup>1</sup>단국대학교 화학공학과  
(rainmast@kier.re.kr\*)

### Development of CHF Correlation for Uniformly Heated Vertical Round Tube at High Pressure and High Mass Flux

Sung-Woo Lee\*, Dong-Kook Kim, W.Jaewoo Shim<sup>1</sup>  
Korea Institute of Energy Research, <sup>1</sup>Dankook University  
(rainmast@kier.re.kr\*)

#### 서론

열전달 기기에서 가열면의 온도나 압력 또는 유량 등 유체의 유동조건이 갑자기 변하면 가열면은 액체가 아닌 기체에 노출되면서 열전달 효율이 급격히 저하되게 된다. 따라서 높은 열전달율을 요구하는 비등 열전달장치에서 생성되거나 가해지는 열을 제거하지 않을 경우에는 가열면의 심각한 손상을 초래하게 되고, 결국 가열면의 물리적 파괴를 가져오게 된다. 이러한 현상을 임계열유속(critical heat flux : CHF)이라 한다. 현재까지 임계열유속에 관한 많은 연구가 이루어져 왔으나 아직까지 전 유동범위에서 임계열유속을 정확하게 예측할 수 있는 상관식은 개발되어지지 못했고, 제한된 범위에서 개발된 상관식을 사용하고 있다. 본 연구는 기존 수집된 데이터[1] 중 특정 범위의 데이터 유효성 검사와 경향성 분석을 통해 기존의 대표적 임계열유속 예측 상관식과 비교 분석하였고, 새로운 상관식을 제안하였다. 본 실험에 사용된 데이터는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. 실험에 사용된 임계열유속 데이터베이스

	Data points		P (bar)	D (mm)	L (m)	G (kg/m <sup>2</sup> s)	q <sub>c</sub> (MW/m <sup>2</sup> )	X
Thompson & Macbeth	610	min	70.31	1.91	0.04	2011.44	1.39	-0.82
		max	189.56	11.46	3.05	10587.23	14.76	0.45
Becker	470	min	70.00	10.00	1.00	2003.00	0.48	-0.20
		max	200.00	10.01	4.97	8111.00	5.48	0.45
LOBIV	157	min	86.18	10.47	0.635	2005.86	1.25	-0.06
		max	124.79	10.47	1.524	3410.92	3.74	0.16
AE-177	16	min	70.00	9.98	1.00	2013.40	1.95	0.03
		max	89.23	9.98	3.50	4204.00	19.16	0.891
Griffel	67	min	82.76	6.22	0.91	2562.84	1.55	-0.03
		max	103.45	12.80	1.93	9966.60	7.82	0.19
CISE	2	min	70.05	8.07	0.65	3008.10	2.07	0.17
		max	70.12	8.07	0.65	3015.10	2.79	0.23
Total	1322	min	70	1.91	0.04	2003.00	0.48	-0.82
		max	200	12.80	4.97	10587.23	19.16	0.81

## 본론

### 1. 새로운 상관식

새로운 상관식은 높은 압력( $P \geq 70\text{bar}$ )과 높은 유속( $G \geq 2003\text{kg/m}^2\text{s}$ )조건에서의 임계열유속 데이터베이스를 사용하여 임계열유속을 예측하기 위해 개발되었다. 새로운 예측 상관식은 실제 질량 흐름, 관직경, 출구건도 그리고 두 개의 매개변수를 갖는 압력에 의존한다. 새로운 상관식은 직경 1.905~14.072mm, 관길이 0.035~4.996m, 압력 70~200bar, 질량유속 2003~10587kg/m<sup>2</sup>s, 임계열유속 0.48~19.16MW/m<sup>2</sup>, 출구건도 -0.457~0.806 조건의 균일가열 수직 원형관에서 실험되었다. 변수들의 경향을 분석한 결과 임계열유속은 열역학적 건도가 아닌 실제 증기의 질량 흐름에 의존하는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 임계열유속은  $\sqrt{GX_t}$ 의 영향을 매우 크게 받는 것을 확인할 수 있었으며 적절한 보정인자를 사용한 결과 함수의 경향성이 우수해 지는 것을 발견하였다. 이를 바탕으로 새로운 상관식을 제안하였다.

$$q_c = \frac{\alpha}{D^{K_1}} \exp\left[-\gamma \left\{ \sqrt{GX_t(1+X_t^2)} \right\}^{K_2}\right]$$

여기서

$$\alpha = -0.5912 + 8.12638(P/P_c) - 7.26608(P/P_c)^2$$

$$\gamma = 0.0987 - 0.58691(P/P_c) + 1.98084(P/P_c)^2 - 1.54275(P/P_c)^3$$

$$K_1 = -1.72278 + 0.37875(\ln G) - 0.01254(\ln G)^2$$

$$K_2 = 1.00554 - 0.22567X_t + 0.40853X_t^2$$

$X_t$ : 실제 증기의 질량분율       $P_c$ : 물의 임계압력 [bar]

## 2. 다른 상관식과의 비교

지난 50여년 동안 수많은 임계열유속 예측 상관식이 발표되었으며, 각각의 상관식은 적용 가능한 영역이 함께 제시되었고, 그 영역을 벗어나면 예측 정확도가 크게 감소하는 경향이 있다. 따라서 기존에 발표된 예측 상관식 중에서 적용 가능하면서도 현재 널리 쓰이고 있는 대표적인 상관식을 수집하여 새로 개발된 상관식과 비교하였다. 여기에는 Biasi 상관식, Shah 상관식을 비교하였다.

Biasi[2]는 계의 압력(system pressure)에서 예측 상관식을 제안하였다. 이 상관식에 실험 범위의 데이터를 적용했을 때의 임계열유속 실험값과 예측값을 Fig. 1에 나타내었다.

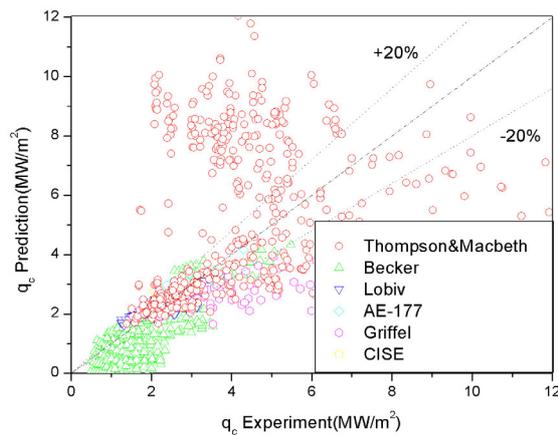


Fig. 1. Prediction vs. Experimental CHF data by Biasi correlation

Shah[3]의 일반화 상관식은 1979년에 발표되었으며 다시 1987년에 수정되었다. 이 상관식에 실험 데이터를 적용했을 때 임계열유속의 실험값과 예측값을 Fig. 2에 나타내었다.

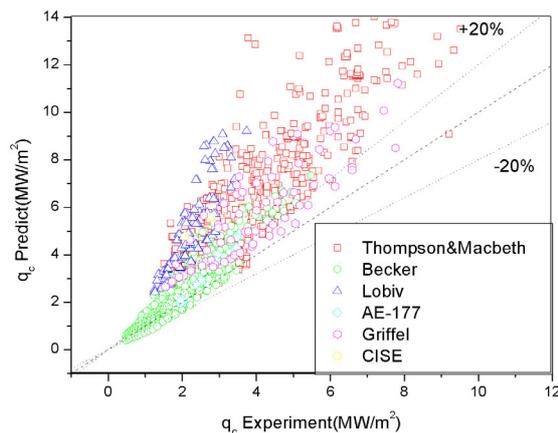


Fig. 2. Prediction vs. Experimental CHF data by Shah correlation

새로 개발된 상관식을 사용했을 때 임계열유속 예측값과 실험값은 Fig. 3에 나타내었다.

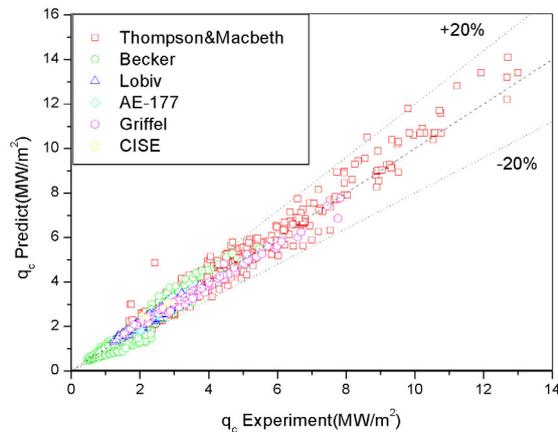


Fig. 3. Prediction vs. Experimental CHF data by New correlation

### 결론

현재 사용되는 대표적인 임계열유속 상관식들을 수집한 데이터베이스를 이용해 새로운 상관식과 비교하였다. 데이터의 유효성 검사화 경향성 분석을 토대로 기존의 예측 상관식을 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Average &amp; RMS Error of CHF correlations

	Average Error(%)	RMS Error(%)
Biasi Correlation	0.95	22.95
Shah Correlation	-1.50	20.57
New Correlation	0.04	12.22

기존의 임계열유속 예측 상관식과 새로 개발된 예측상관식을 비교, 분석한 결과 새로 개발된 상관식이 상대적으로 높은 정확도를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

1. Joo, SK, Development and analysis of a uniform CHF database, JIEC, Vol. 8, No. 3, pp. 268-275, 2002
2. L. Biasi et al, A new correlation for round tubes and uniform heating and its comparison with world data. Part 3. Energia Nucleare, 14(9), pp. 530-536, 1967
3. M. M. Shah, Improved general correlation for critical heat flux during upflow in uniformly heated vertical tubes, Heat and Fluid Flow, Vol. 8, No. 4, pp. 326-335, 1987