

## 좁은 유로에서의 플러딩 상관식

### **Flooding Correlations in Narrow Channel**

김수형, 백원필, 장순홍

한국과학기술원  
대전광역시 유성구 구성동 373-1

#### 요 약

간극에서의 열전달은 원자력발전소의 중대사고 및 여러 분야에서 중요한 현상으로 고려되고있으며, 간극에서의 임계열유속은 간극에서의 열전달의 한계를 나타내게된다. 바닥이 막히 유로의 경우, 플러딩에 의한 임계열유속이 발생하며 플러딩 상관식을 이용하여 예측이 가능하다. 본 연구에서는 간극에서의 플러딩 실험에 대한 자료를 수집 분석하여 간극에서의 플러딩에 영향을 미치는 인자를 파악하고 플러딩 상관식을 개발하였으며, 플러딩에 의한 임계열유속값과 비교하였다.

#### Abstract

Heat transfer in narrow gap is considered as important phenomena in severe accidents in nuclear power plants. Also in heat removal of electric chip. Critical heat flux(CHF) in narrow gap limits the maximum heat transfer rate in narrow channel. In case of closed bottom channel, flooding limited CHF occurrence is observed. Flooding correlations will be helpful to predict the CHF in closed bottom channel. In present study, flooding data for narrow channel geometry were collected and the work to recognize the effect of the span,  $w$  and gap size,  $s$  were performed. And new flooding correlations were suggested for high-aspect-ratio geometry. Also, flooding correlation was applied to flooding limited CHF data.

#### I. 서 론

간극에서의 열전달의 특징은 낮은 온도차이에도 불구하고 일반적인 수조비등에 비하여 높은 열전달능력을 보이는 것이다. 그러나 벽면의 온도가 증가하게되면 수조비등에 비하여 낮은 열유속에서 임계열유속 현상이 발생하게 된다. 간극에서의 열전달 현상 및 임계열유속에 대한 실험 및 연구가 여러 분야에서 수행되어왔다. 슈퍼 컴퓨터에서 높은 밀도의 Multi-Chip Modules의 냉각이나 높은 열유속을 발생하는 Modular Electronics, 고에너지 X-ray와 여러 가지 진단 기구 등에서의 간극에 의한 열전달과 항공우주 분야에서의 높은 열유속의 열교환기 및 위성의 냉각 분야에서도 연구되고 있다. 원자력분야에서는 판형 연구용 원자로의 냉각이나 증기발생기 튜브와 Baffle Plate 사이에서의 열전달 등의 분야

에서 연구가 수행되어왔다.

바닥이 막힌 유로의 경우 플러딩(Flooding)에 의한 임계열유속이 발생하는 것이, 하향 반구형 간극 실험인 SONATA-IV와 Fujita 등의 연구에서 관찰되었다. 간극에서의 플러딩 상관식은 이러한 바닥이 막힌 간극유로에서의 임계열유속 예측에 도움이 된다. 현재 간극에서의 플러딩 실험이 여러 연구자에 의하여 수행되었으나 적용하기 적절한 상관식이 존재하지 않으며, 서로 다른 특성 길이(Characteristic Length)를 기준으로 하고있어 비교가 곤란한 실정이다.

본 연구에서는 좁은 유로(얇은 사각 유로, 환상관)에서의 간극의 크기,  $s$ 와 유로의 전폭(全幅, span),  $w$ 가 플러딩에 미치는 영향을 파악하고 수집된 데이터를 이용하여 새로운 상관식을 도출하고 평가하였으며, 플러딩에 의한 임계열유속 데이터와 비교하였다.

## II. 기존 연구

좁은 유로에서의 플러딩 현상에 대하여 이론적인 연구와 실험적인 연구가 여러 연구자들에 의하여 수행되었다. 이론적인 연구는 Ritcher[1] 등과 Mishma[2]가 수행하였으며, 실험적인 연구는 Sudo 등[3,4], Osakabe 등 [5,6,7]과 Mishima[2], Koizumi[8], 이승진 등[9]에 의하여 수행되었다. 실험적인 연구에서는 대부분의 실험자들이 Wallis[10] type의 상관식을 사용하였으며 다음과 같다.

$$j_g^{*1/2} + wj_f^{*1/2} = C \quad (1)$$

$$j_i^* = \frac{\rho_f^{1/2} j_i}{[gD^*(\rho_f - \rho_g)]^{1/2}} \quad (i = f \text{ or } g)$$

여기서  $D^*$ 는 특성길이(Characteristic Length)이다.

여러 연구자들이 제안한 좁은 유로에서의 플러딩 상관식과 실험데이터들에 대하여 표 1에 표시하였다. 상관식들에 의하여 볼 수 있듯이, 실험자들에 따라서 다양한 특성길이 가 사용되어졌다. Mishima[2]는 유로의 전폭(Span)의 두배에 해당하는 길이( $2w$ )를 특성길 이로 이용하였으며 Osakabe 등[5,6]은 전폭, Sudo 등[4]은 간극의 크기( $s$ )를 특성길 이로 이용하였다. 좁은 유로에서의 플러딩 현상은 유로의 길이의 영향은 거의 받지 않았으나 간극의 크기가 매우 작은 경우 유로 입구에서의 수두의 영향을 받는 것으로 나타났다. [Koizumi, 8]. 따라서 간극에서의 플러딩(Top Flooding)에 영향을 미치는 주요 인자는 간극의 크기( $s$ )와 전폭( $w$ )인 것을 알 수 있다. Osakabe[7] 등은 유로의 전폭이 증가함에 따라 "Unit Cell"이 관찰된다고 주장하였다. 이는 전폭의 영향이 길이가 증가함에 따라 사라지며 Taylor 불안정성 길이와 같은 특정한 길이에 의하여 플러딩 현상이 결정될 것으로 주장하였다.

### III. 플러딩 상관식

#### 3.1 플러딩 데이터 수집

문헌 조사를 통하여 플러딩 데이터(Data)를 수집하였으며 수집된 데이터의 개수는 표 1에 나타내었다. 총 데이터의 개수는 738개였다. 각 실험자마다 다른 특성길이를 이용하고있어서 공통적인 기준이 필요하여 Osakabe 등[6]이 제안한 Kutateladze 수를 이용한 상관식을 이용하였으며 다음과 같다.

$$Ku_g^{*1/2} + mKu_f^{*1/2} = C' \quad (2)$$

$$\text{여기서 } C' = C \left[ D^{*2} / \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/8}$$

$$Ku_i = \frac{\rho_i^{1/2} U_i}{[g\sigma(\rho_f - \rho_g)]^{1/4}} \quad (i = f \text{ or } g)$$

위 식의 m과 C는 식 (1)의 m과 C와 동일하다. m은 위 식의 기울기를 나타내는 식으로 상관식의 형태를 변화시켜도 값이 달라지지 않는 것을 볼 수 있다. 식(1)은 유로의 영향이 무차원겉보기속도에 포함되어지는 반면에 식(2)는 m과 C'에 나타나게 된다.

수집된 데이터를 그림 1에 나타내었으며 간극의 크기와 전폭에 따른 데이터 분포를 그림 2에 나타내었다. 그림 1에서 보면 Koizumi 등[8]의 데이터가 다른 실험결과에 비하여 매우 다른 결과를 보인다. 그림 2에서 데이터 분포를 보면 간극의 크기가 10 mm 이하이고 전폭의 길이가 약 150 mm 이하일 경우 데이터가 고르게 분포되어 있다.

#### 3.2 상관식 개발

유로의 형태와 상관식의 계수, m과 C'의 관계를 파악하기 위하여 유로의 형태가 같은 데이터별로 따로 각각의 계수를 구하였으며 그 결과를 그림 3과 4에 나타내었다. 그림 3은 유로의 형태에 따른 m값과 C'값을 나타내었으며 그림 4에는 얻어진 m, C'값을 이용하여 다시 그래프를 그린 것이다. s/w의 값이 0.02 이하일 경우의 값들은 다른 데이터들과 많은 편차를 보이고있는데 이 데이터들은 대부분 Koizumi[8] 등의 환상관 데이터이다. 상관식을 개발하기 위하여 Koizumi[8] 등의 데이터는 제외하고 계산하였으며, 환상관 데이터에 관련하여 3.4에 논의한다.

그림 5는 전폭과 m, C' 값의 관계를 보여준다. 약 320 mm 에서의 값들은 Koizumi[8] 등의 환상관 데이터이다. 그림에서 보면 전폭이 길어짐에 따라 m과 C'의 값이 증가하다가 30 mm 이상이 되면 값의 변화가 별로 없는 것을 알 수 있다. 그리고 100 mm 이상이 되면 m과 C' 값이 감소하는 경향을 보이기는 하나 Koizumi[8] 등의 데이터가 다른 값들에 비하여 다른 특성을 나타내므로 확신하기는 어렵다. 또한 100 mm 이상의 값들은 환상관 데이터만 존재하고 데이터의 개수가 작으므로 경향을 파악하기 어렵다. 따라서 일단 전폭이 30-100 mm 일 경우의 상관식을 개발하였다.

m, C'과 s 또는 w와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
m &\propto \delta^{0.1826} \\
&\propto \omega^{-0.1711} \\
C^* &\propto \delta^{0.03434} \\
&\propto \omega^{-0.05128}
\end{aligned}$$

위의 관계를 바탕으로 하여 상관식을 작성하면 다음과 같다.

$$K_{ef}^{1/2} + 1.175 \frac{\delta^{0.1826}}{\omega^{0.1711}} K_{ef}^{1/2} = 1.5812 \frac{\delta^{0.03434}}{\omega^{0.05128}} \quad (3)$$

Error를 다음과 같은 방법으로 정의하였다.

$$Error = \frac{K_{ef}^{*1/2} + mK_{ef}^{*1/2}}{C^*} - 1 \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 Error를 계산하여 결과를 표 2에 나타내고, 분포는 그림 6에 나타내었다.

### 3.3 다른 상관식과의 비교

상관식을 비교하기 위하여 표 1의 Mishima [2], Sudo 등[4], Osakabe 등[6]의 상관식을 이용하였으며, 사각유로에서의 데이터를 이용하여 비교를 수행하였다. 위의 세가지 상관식과 개발된 상관식의 Error를 비교한 것을 표 2에 나타내었으며 데이터의 분포를 그림 7, 8, 9에 나타내었다.

Sudo 등의 상관식이 매우 큰 편차를 보였으며, 나머지 상관식들은 비교적 비슷한 예측 성능을 보였다. 그중 식 (3)의 예측성능이 가장 좋은 것으로 나타났다.

### 3.4 환상관 데이터

이승진 등[9]은 환상관에서의 플러딩 실험을 수행하였다. 환상관의 직경은 500 mm 였고 간극의 크기는 1.0 mm 였다. 그 결과로 다음과 같은 상관식을 제안하였다.

$$\begin{aligned}
\dot{m}_f < 0.25 \text{ kg/s 일 때} \\
&K_{ef}^{*1/2} + 0.37K_{ef}^{*1/2} = 2.25 \\
\dot{m}_f > 0.25 \text{ kg/s 일 때} \\
&K_{ef}^{*1/2} + 1.12K_{ef}^{*1/2} = 3.78
\end{aligned}$$

위의 상관식과 Koizumi[2] 등과 Osakabe[6] 등의 환상관 데이터를 비교한 것이 그림 10이다. 서로 비슷한 간극 크기에서 실험을 수행하였으며 전폭의 길이가 달랐다. 그림에서 보면 Koizumi[2] 등은 간극의 크기가 0.5 mm 이상으로 다양한 크기에서 실험이 이루어졌으며 Osakabe[6] 등도 간극의 크기가 2.5 mm 이상의 다양한 조건에서 이루어졌다. 각 실험자마다 데이터 군의 위치가 달랐으나 환상관의 지름과 플러딩 데이터 간의 선형적인 상관관계를 발견하기 어렵다.

### 3.5 임계열유속 데이터와의 비교

플러딩에 의한 임계열유속 데이터를 수집하였으며 표 3에 나타내었다. 플러딩 상관식을 이용한 임계열유속 예측을 위하여 액체와 기체의 질량유속이 같다고 가정하여 임계열유속 상관식을 유도하면 다음과 같다.

$$G_f = G_g = \frac{qL}{sh_{fg}}$$

$$q = \frac{sh_{fg}}{L} \frac{C^2 [g\sigma(\rho_f - \rho_g)]^{1/4}}{(1/\rho_g^{1/4} + m/\rho_f^{1/4})^2} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 임계열유속을 예측한 결과는 다음과 같으며 그림 11에 표시하였다.

평균	표준 편차	RMS
21.8 %	50.8 %	54.3 %

대부분의 값이  $\pm 30\%$  내에 포함되는 것을 알 수 있으며, 임계열유속 값을 높게 예측하는 경향이 있다. 30% 이상의 오차를 보이는 경우는 환상관일 경우가 많았다.

## V. Conclusion

좁은 유로(얇은 사각 유로, 환상관)에서의 간극의 크기,  $s$ 와 유로의 전폭(全幅, span),  $w$ 가 플러딩에 미치는 영향을 파악하기 위하여 자료를 수집하고 분석하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 간극 유로에서의 플러딩에는 간극의 크기와 유로의 전폭이 중요한 변수이다.
- 2) 플러딩 데이터를 분석하기 위하여 Kutateladze 수를 이용한 상관식을 사용하였으며, 간극 유로의 플러딩에서는 사용하기 유용한 것으로 판단된다.
- 3) 수집한 데이터를 이용하여 플러딩 상관식을 개발하였으며, 실험결과를 10% 이내로 예측하였으며, 다른 상관식과 비교하여 우수한 것으로 나타났다.
- 4) 플러딩에 의한 간극에서의 임계열유속 데이터에 플러딩 상관식에 적용한 결과, 임계열유속 값을 높게 예측하였다.

### Reference

- [1] H.J. Richter, "Flooding in tubes and annuli", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 7, No. 6, pp. 647-658, 1981.
- [2] K. Mishima, *Boiling Burnout at Low Flow Rate and Low Pressure Conditions*, Doctoral Dissertation at Kyoto University, 1984.
- [3] Y. Sudo and M. Kaminaga, "A CHF characteristic for downward flow in a narrow vertical rectangular channel heated from both sides", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 15, No. 5, pp. 755-766, 1989.
- [4] Y. Sudo, T. Usui, M. Kaminaga, "Experimental study of fallin gwater limitation under a counter-current flow in a vertical rectangular channel", *JSME Int. J. Series II*, Vol. 34, No. 2, pp. 169-174, 1991.
- [5] M. Osakabe, Y. Kawasaki, "Top flooding in thin rectangular and annular passages", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 15, No. 5, pp. 747-754, 1989.
- [6] M. Osakabe, T. Kubo, H. Baba, "Top flooding in thin rectangular channels", *JSME Int. J. Series II*, Vol. 37, No. 3, pp. 491-496, 1994.
- [7] M. Osakabe, H. Futamata, "Effect of inserted rod and cross flow on top flooding of pipe", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 5, pp. 883-891, 1996.
- [8] Y. Koizumi, H. Nishida, H. Ohtake, T. Miyashita, "Gravitational water penetration into narrow-gap annular flow passages with upward gas flow", 8th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Vol. 1, pp. 48-52, Kyoto, Japan, September 30- October 4, 1997.
- [9] P.B. Whalley, *Two-Phase Flow and Heat Transfer*, Oxford University Press, 1996.
- [10] 이승진, 박래준, 김상백, 강경호, 정지환, "대형 환상관 간극에서 CCFL에 대한 실험 연구", 한국원자력학회, 춘계학술발표회, 1999.
- [11] 장순홍, 백원필, 양수형, 김수형, 정용훈, "간극에서의 임계열유속에 관한 실험적 연구", KAERI/CM-190/97.

### 감사의 글

본 연구는 원자력연구소의 노내 노심용융물 냉각 실험 과제의 일환으로 수행하였습니다.

표 1. 플러딩 실험

	Characteristic Length	m	C	Channel Geometry	Gap Size [mm]	Span [mm]	No. of Data
Mishima [1984]	2w	1	0.6	Rectangular	1.5, 2.4, 5.0	40	56
Osakabe & Kawasaki [1989]	w	0.8	0.58	Rectangular	1, 5, 10	100	133
Sudo et al. [1991]*	s	$0.5+0.0015 \times Bo^{1.3}$	$0.66(s/w)^{-0.4}$	Rectangular	2.3, 5.3, 8.3, 12.3	33, 66	153
Osakabe et al. [1994]**	w	$0.3Bo^{1/3}$	0.58	Rectangular	2, 5, 10	10 - 100	194
Osakabe et al. [1996]	w	0.46	0.4	Annulus	2.5, 5.0, 7, 10, 17	$\pi(50-s)$	90
Koizumi et al. [1998]	-	-	-	Annulus	0.5, 1.0, 2.0, 5.0	314	112

\*  $Y=1.3\exp(-2.1X)$ ,  $X = (m/C)^{1/2}$ ,  $Y = (1/C)^{1/2}$ ,  $Bo = \frac{gsw(\rho_f - \rho_g)}{\sigma}$

\*\*  $Bo = \frac{g w^2 (\rho_f - \rho_g)}{\sigma}$

표 2. Error

	평균 (%)	표준 편차 (%)	RMS (%)
식 (3)	2.26	9.75	10.0
Mishima	0.72	13.2	13.3
Sudo et al.	-0.65	38.6	38.6
Osakabe et al.	3.96	15.1	15.6

표 4. 플러딩에 의한 임계열유속 데이터

	Geometry	Length (mm)	Width (mm)	Gapsize (mm)
Fujita	Rect. channel	30	30	0.3, 0.6, 1.0, 2.0
		120	30	0.6, 1.0, 2.0, 5.0
Chang	Annulus	76.2	79.8	0.32, 0.80, 2.58
Asm dlov	Rect. channel	67, 187, 397	200	0.5, 1.0, 2.0, 5.0

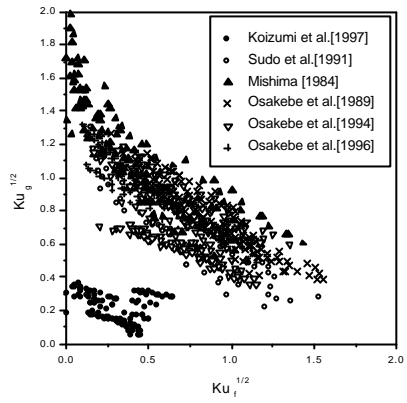


그림 1. 전체 데이터

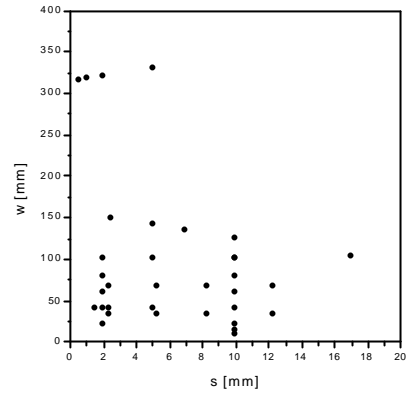


그림 2. 데이터의 분포

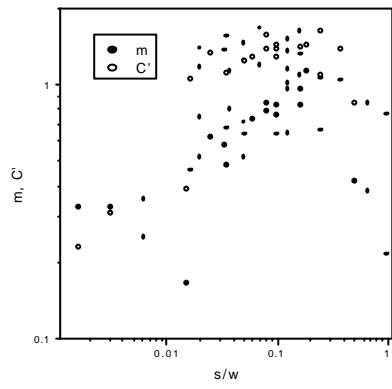


그림 3. m과 C'의 분포

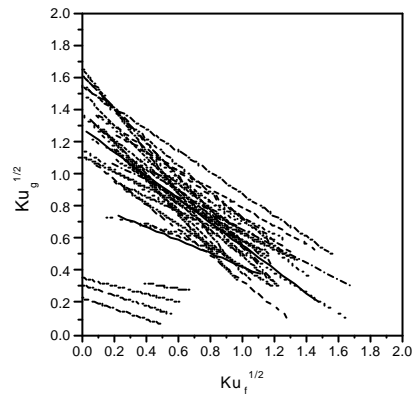


그림 4. Fitting Lines

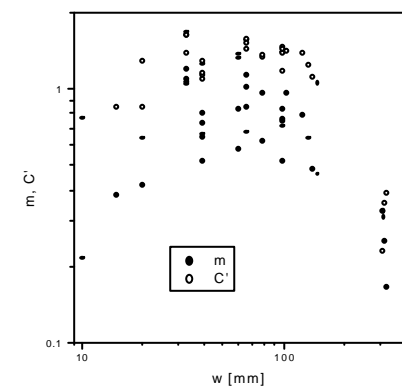


그림 5. 유로의 전폭과 m, C'

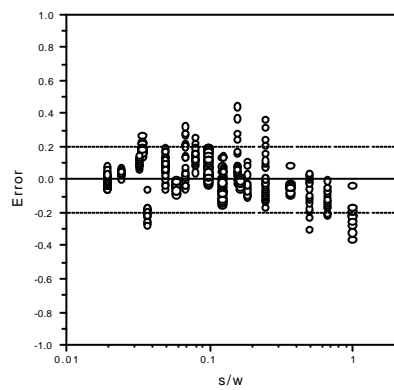


그림 6. 식 (3)의 결과



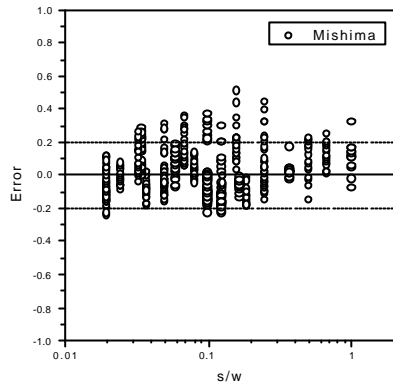


그림 7. Mishima 상관식

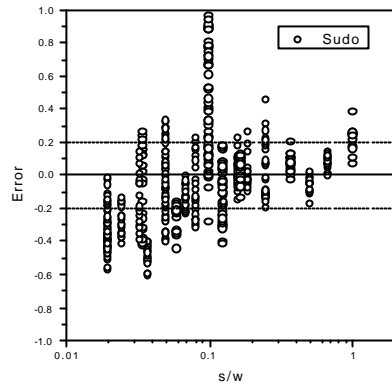


그림 8. Sudo 등의 상관식

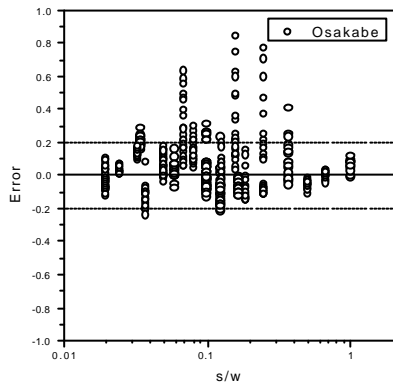


그림 9. Osakabe 등의 상관식

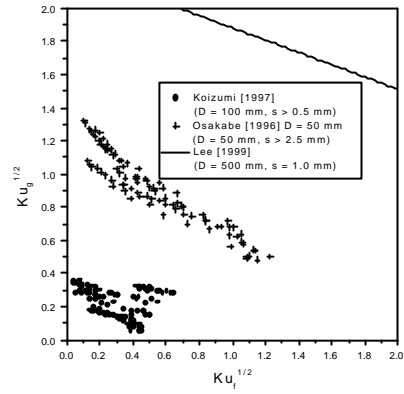


그림 10. 환상관 데이터

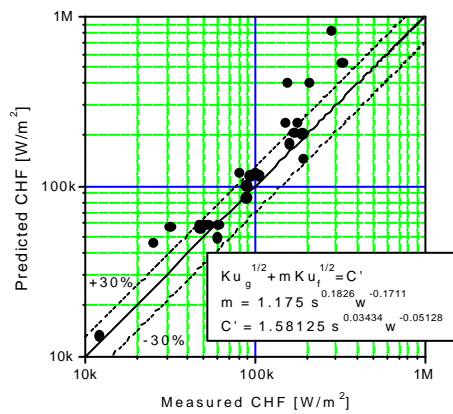


그림 11. 식(5)에 의한 CHF 예측