

환상류-간헐류 천이 모델이 드라이아웃 모델에 미치는 영향 평가

우 상 익*, 임 인 철

Evaluation of the Effect of Annular-to-Intermittent Flow Transition Model on the Dryout Model

S.I. WU

The initial conditions such as the film thickness and the void fraction at the onset of annular flow are required for the analytical dryout model. The Disturbance Wave Instability model(DWI model) is one of the model describing the Annular-to-Intermittent Flow regime Transition(AIFT). The experimental CHF conditions for the uniformly heated tube were compared with the predictions by the modified Levy model, for which the initial conditions at AIFT were estimated by the DWI model. For the flow through long tubes with small inlet subcooling, the effect of AIFT model on the dryout prediction was little. However, the use of DWI model gave better prediction of CHF in a short tube.

Key Words: 드라이아웃(Dryout), 임계 열속(CHF), 환상류-간헐류 천이(AIFT), 교란파 불안정 모델(DWI model), 과냉각(Subcooling), 튜브(Tube)

1. 서 론

환상류에서의 액막의 거동과 드라이아웃 현상은 그림 1과 같다. 환상류에서는 계면 구조가 상대적으로 간단하여, 환상류에서의 드라이아웃을 예측하기 위한 해석적인 모델의 개발이 많이 시도되었다. Levy 모델[1]이나 Katto가 제안한 수정된 Levy 모델[2]이 대표적인 예이다. 해석적인 모델을 사용하여 드라이아웃 현상을 예측하기 위해서는 여러 가지 변수가 필요하며 간헐류가 환상류로 바뀔 때의 유동 조건도 이들 변수의 하나이다. 그러나 이들 모델에 있어 간헐류가 환상류로 바뀌는 조건은 이상 유동 천이와 관련된 기저에 대한

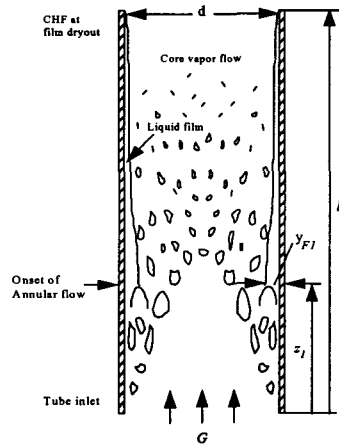


Fig. 1 Critical heat flux and liquid film behavior in an annular flow

* 한국원자력연구소
* E-mail :siwu@kaeri.re.kr

고려없이 정해진 것이다. 환상류와 간헐류의 경계지역에서 액막표면에 존재하는 대표적인 파동인 교란파의 불안정 현상을 천이현상의 지배기구라고 가정하고 이 불안정 현상을 특성방정식의 포물선형 파괴이론으로 설명함으로써 환상류-간헐류 천이를 설명하는 DWI(Disturbance Wave Instability) 모델이 개발된 바 있다[3]. 개발된 환상류-간헐류 천이 모델을 Katto가 제안한 수정된 Levy 모델에 적용하고 과냉각상태에서의 비등이 증기 건도에 미치는 영향을 고려하여 계산된 임계열속과 임계열속 실험결과를 비교하였다.

2. 이론

2.1 CHF 현상의 분류

Bennet 등[4]은 수직관에서 CHF가 발생할 때의 열속과 건도의 관계에 따라 그림 2와 같이 CHF를 몇 가지 영역으로 분리하였다. I 및 III 영역에서는 곡선의 기울기가 급하지 않지만 II 영역에서는 기울기가 매우 급하여 CHF 값이 크게 변하더라도 출구 건도는 크게 바뀌지 않는다. Hewitt[5]는 I-III 영역은 환상류에서의 드라이아웃에 해당하며 IV 영역은 벽면에서의 기포 군집에 의한 CHF에 해당한다고 설명하였다. I 영역에서는 액적(liquid droplet)의 점착(entrainment)과 액막의 증발이 CHF를 좌우한다. II 영역에서는 수직관 상류에서의 액체의 흐름이 CHF에 기여하며, III 영역에서는 환상류로 천이가 일어날 때 이탈된 액적이 CHF에 영향을 미친다. 관의 길이와 직경이 비가 작아지고 입구 과냉각도가 클수록 CHF가 일어나는 영역은 I에서 III 쪽으로 이동한다.

2.2 DWI 모델

수직관에서의 AIFT 현상을 설명하기 위하여 여러 가지 모델이 개발된 바 있으나 이 현상을 지배하는 지배 방정식으로부터 유도된 모델은 없었다. 따라서, 환상류를 기술하는 지배 방정식을 출발점으로 하여 AIFT 현상을 예측하는 모델이 개발된 바 있다. 환상류와 간헐류의 경계지역에서 액막표면에 존재하는 대표적인 파동인 교란파의 불안정 현상을 천이현상의 지배기구라고 가정하고 이 불안정 현상을 특성방정식의 포물선형 파괴이

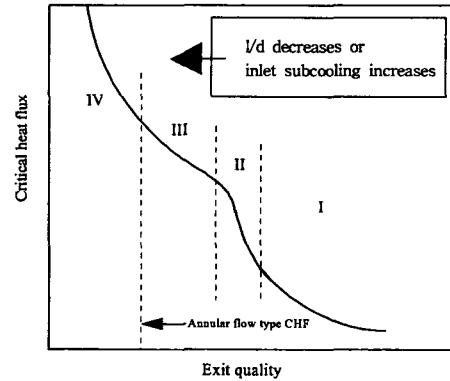


Fig. 2 Curve of critical heat flux as a function of exit quality for uniformly heated tubes[4]

론으로 설명하였다. 천이가 발생할 때의 기체 유속에 대하여 실험결과와 다른 상관식의 예측치와 개발한 모델의 예측치를 비교하여 개발한 모델을 검증하였다. 검증 결과, 개발된 모델의 예측치는 다른 상관식들의 예측치 보다 실험결과와 더 잘 일치하고 천이현상에 대한 유체의 물성, 유동관의 기하학적 형상 및 액체 유속의 영향이 개발된 모델에 잘 반영되어 있음이 입증된 바 있다[3].

2.3 수정된 Levy 모델과 DWI의 적용

수직관에서의 드라이아웃을 예측하기 위하여 개발된 Levy 모델[1]은 아래의 현상에 대한 여러 가지 모델로 구성되어 있다.

- 액적 이탈/점착 현상
- AIFT가 일어날 때의 액막 두께
- 액막 flux, 계면 전단력 및 액막 두께의 관계

Katto[2]는 Levy 모델을 이용한 CHF 예측값이 그림 2의 III 영역에서는 실험값보다 너무 높으며 이는 Levy 모델이 드라이아웃이 발생하는 임계 액막 두께를 너무 얇게 산정한다고 지적하였다. Katto[2]는 외부 유동에서 포화 비등이 일어날 때의 액막의 두께[6]를 임계 액막 두께로 사용할 것을 제안하였다. 그는 또한, 관의 형상이나 유동 조건에 관계없이 기포율이 0.6이 되면 AIFT가 일어난다고 가정하였다.

본 논문에서는 AIFT가 일어나는 조건은 DWI 모델을 이용하여 찾고 Katto가 제안한 수정된 Levy 모델을 사용하여 CHF를 예측하였다. 또한, 과냉각 비등 효과는 Bowring[7] 모형을 이용하여 고려하였

다. 이 모형에 의하면 평형 건도(equilibrium quality)가 실제 건도(true)와 같아지는 지점은 아래의 관계식에 의하여 결정된다.

$$z^* = \frac{Gc_{pf}D}{4} \left[\frac{(\Delta T_{SUB})_i}{q_c} + \frac{\eta \rho_f}{G\epsilon} \right] \quad (1)$$

이 식에서 ϵ 은 기포의 요동(agitation)에 의하여 전달되는 열과 잠열에 의한 열전달의 비이다. Paul과 Abdel-Khalik[8]은 pool boiling의 경우에 표면 열속이 클때에는 이 값이 매우 작음을 보였다. 이는 유동 비등의 경우에도 적용된다고 판단된다.

3. 드라이아웃의 예측

3.1 실험 자료

본 논문에서는 Katto[2]가 수정된 Levy 모델을 평가하는데 사용한 Wurtz[9]의 임계 열속 실험 자료, Thompson과 Macbeth[10]의 임계 열속 실험 자료를 사용하였다. 이들 실험 자료는 표 1 및 표 2와 같다.

3.2 실험 자료와 예측치의 비교

임계 열속에 대한 예측치와 실험치를 그림 3에 비교하여 나타내었다. DWI 모델을 사용한 예측에 있어서는 ϵ 의 값이 1.0인 경우와 0.001인 경우를 비교하였다. 이 그림에서 영역 I 및 II에 해당하는 드라이아웃에 있어서는 초기 액막 두께에 대한 예측과 과냉각 비등을 고려하는 것이 전혀 임계 열속 예측 값에 영향을 미치지 않으나 영역 III에 해당하는 임계 열속의 예측에 있어서는 영향을 많이 줄을 알 수 있다. DWI 모델을 AIFT 예측에 사용하고 기포의 요동(agitation)에 의한 열전달을 무시할 때에 예측치가 실험치에 제일 근접하였다. 그림 4에는 임계 열속이 발생할 때의 출구 건도 예측치와 실험치를 비교하였다. 이 그림에서도 역시 같은 경향을 관찰할 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 입구에서의 과냉각도가 낮고 길이가 긴 관의 경

우 AIFT 모델의 선택이 임계열속에 미치는 영향은 매우 작다.

- (2) 길이가 짧은 관에서의 드라이아웃에 의한 임계 열속을 예측할 경우에는 AIFT 모델의 선택과 과냉각 비등 모형의 선택이 영향을 미친다.
- (3) AIFT의 예측에 있어 환상류에 대한 지배 방정식으로부터 유도된 DWI 모델을 사용하는 것이 드라이아웃 예측에 더 효과적이다.
- (4) 과냉각 비등을 고려할 때에는 기포의 요동에 의한 열전달을 무시해도 된다.

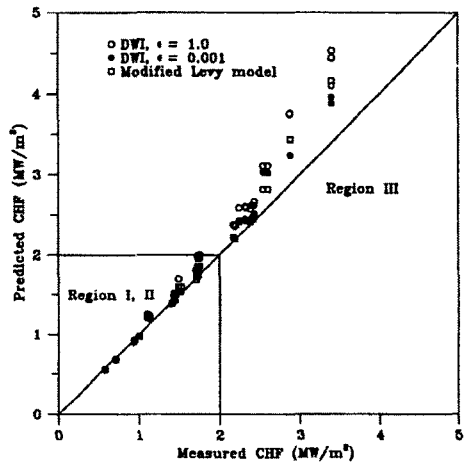


Fig. 3 Comparison of the predicted CHF with the experimental CHF

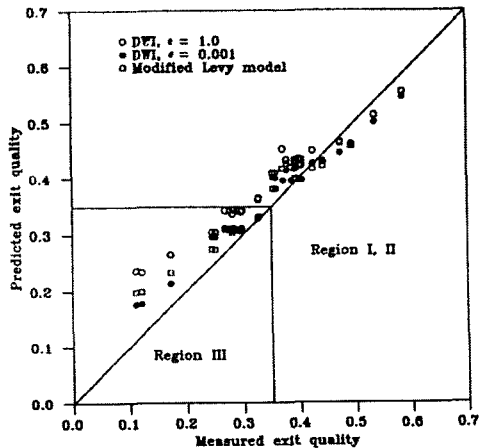


Fig. 4 Comparison of the predicted exit quality at dryout with the experimental data

Table 1 Wurtz의 실험 자료



Pipe dia. (m)	Pipe length (m)	Pressure (MPa)	Mass flux (kg/m ² s)	Exit quality	Inlet subcooling (kJ/kg)	CHF (MW/m ²)
0.01	2.020	7.00	2000	0.425	53.0	1.713
0.01	4.020	7.00	2000	0.474	53.0	0.943
0.01	4.020	7.00	2000	0.443	476.3	1.406
0.01	6.000	7.00	2000	0.535	53.0	0.711
0.01	6.000	7.00	2000	0.494	476.3	0.998
0.01	8.000	7.00	2000	0.585	53.0	0.579

Table 2 Thompson과 Macbeth의 실험자료

Pipe dia. (m)	Pipe length (m)	Pressure (MPa)	Mass flux (kg/m ² s)	Exit quality	Inlet subcooling (kJ/kg)	CHF (MW/m ²)
0.01	0.864	6.72	2020.4	0.122	346.2	3.3992
0.01	0.864	7.06	2020.4	0.112	363.2	3.3992
0.01	0.841	6.89	2006.9	0.172	182.1	2.8837
0.01	0.841	6.86	2009.6	0.173	179.8	2.8837
0.01	0.841	6.99	2027.2	0.251	20.5	2.5997
0.01	0.841	7.03	2027.2	0.254	20.5	2.5366
0.01	1.727	6.86	1982.5	0.353	22.8	1.7321
0.01	1.727	6.99	1990.6	0.358	25.0	1.7573
0.01	1.727	6.86	2009.6	0.276	311.8	2.3189
0.01	1.727	6.86	2010.9	0.281	339.1	2.4294
0.01	1.727	6.89	2012.3	0.283	305.0	2.3284
0.01	1.727	6.96	2012.3	0.289	318.6	2.3978
0.01	1.727	6.86	2104.5	0.326	175.3	2.1738
0.01	1.727	6.75	2065.2	0.298	275.4	2.3757
0.01	1.727	6.93	2073.3	0.296	293.6	2.4230
0.01	1.727	6.93	2076.0	0.268	279.9	2.2432
0.01	1.727	6.86	2086.9	0.327	170.7	2.1864
0.01	3.048	6.79	2023.2	0.393	352.8	1.7195
0.01	3.048	6.96	2031.3	0.386	254.9	1.5176
0.01	3.048	6.99	2031.3	0.371	261.7	1.4892
0.01	3.048	6.82	2036.7	0.401	177.5	1.4261
0.01	3.048	6.86	2036.7	0.405	184.4	1.4481
0.01	3.048	6.89	2036.7	0.395	29.6	1.1326
0.01	3.048	6.93	2038.1	0.393	361.9	1.7416
0.01	3.048	6.86	2039.4	0.378	34.1	1.0979

후기

본 연구는 정부의 출연금에 의한 기관고유사업으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

[1] Levy, S. et al, "Prediction of critical heat flux for annular flow in vertical pipe," EPRI-NP-1619 (1980).
 [2] Katto, Y., "Prediction of critical heat flux for

annular flow in tubes taking into account the critical liquid film thickness concept," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.27-6, (1984), p.883-891.

[3] Lim, I.C. and No, H.C, "A disturbance wave instability model for annular-to-intermittent flow transition in vertical two-phase flow system," *J. Nucl. Sci. and Tech*, Vol.33-12, (1996), p.903-914.
 [4] Bennet, A.W. et al, "Studies of burnout in boiling heat transfer," *Trans. Instn Chem. Engrs*, Vol.45, (1967), p.319-339.
 [5] Hewitt, G.H., "Burnout", sec. 6.4 of *Handbook of Multiphase Systems*, Hemisphere, Washington DC, (1982).
 [6] Hamamura, Y. and Katto, Y., "A new hydrodynamic model of critical heat flux, applicable widely to both pool and forced convection boiling on submerged bodies in saturated liquids," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.26-3, (1983), p.389-399.
 [7] Bowring, R.W., "Physical model based on bubble detachment and calculation of steam voidage in the subcooled region of a heated channel," OECD Halden Reactor Project report, HPR-10, (1962).
 [8] Paul, D.D. and Abdel-Khalik, S.L., "A statistical analysis of saturated nucleate boiling along a heated wire," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.26-4, (1983), p.509-519.
 [9] Wurtz, J., "An experimental and theoretical investigation of annular steam-water flow in tubes and annuli at 30 to 90 bar," RISO-372, (1978). al
 [10] Thompson, B. and Macbeth, R.V., "Boiling water heat transfer burnout in uniformly heated round tubes," AEEW-R-356, (1964).