'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

비균일 가열 수직 환상관에서 유동 과도기 상태에서의 임계열유속에 대한 실험 연구

Experimental Study on CHF at Flow Transient in Vertical Annulus with Axial Heat Flux Distributions

문상기, 천세영, 박종국, 양선규, 정문기

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요약

비균일하게 가열되는 수직 환상관에서 유량과도기 상태에서의 임계열유속에 대한 실험 연구를 수행하였다. 본 실험의 목적은 정상상태에서의 임계열유속과 유량과도 상태에서의 임계열유속의 차이를 정량화하고, 유량과도기가 임계열유속에 미치는 영향을 연구하는 데 있다. 고리 3/4호기의 주냉각재펌프의 Coastdown 곡선을 기준으로 하여, Normal, Fast 및 Slow의 세 가지 유량과도기 모드에 대하여 유량과도기 임계열유속 실험을 수행하였다. 대부분의 임계열유속 조건은 Annular-Mist 유동양식에서 발생하며, Liquid Film Dryout에 의해 임계열유속이 발생하였다. 질량유속의 감소율이 가장 작을 경우에 임계열유속 발생시점은 가장 느리고, 반면 임계질량유속은 가장 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한, 느린 유량과도기 상태에서 정상상태의 임계열유속 조건에 가장 근접하였다. 유량과도기 상태에서의 임계질량유속은 대부분 정상상태의 값보다 작게 나타났다. 그러나, 압력이 낮을 경우에는 반대의 경향이 발생하였다.

Abstract

An experimental study on critical heat flux (CHF) under flow transient modes has been performed for water flow in an non-uniformly heated vertical annulus under low-flow and a wide range of pressure conditions. The objectives of this study are to compare the flow transient CHF with steady-state CHF, and to investigate the effects of flow transient modes on the CHF. The flow transient modes are based on the flow coastdown curves of Kori 3/4 Nuclear Power Plant RCP (reactor coolant pump). The flow transient CHF experiment has been performed for three kinds of flow transient modes such as normal, fast and slow transients. Most of the CHFs occurred in the annular-mist flow regime and the possible CHF mechanism is thought to be liquid film dryout. For flow transient modes with smallest flow rate decrease (slow mode), the time-to-CHF is latest, but the critical mass flux has largest value that is close to the steady-state CHF data. Most of critical mass fluxes at CHF conditions are smaller than those for the steady-state CHF data. However, the opposite trend has been observed for low pressure conditions.

1. 서론

지금까지의 임계열유속 연구는 주로 원자력 발전소의 운전조건을 대상으로 수행되었다. 그러나, 원자력발전소의 LOCA(Loss of Coolant Accident) 및 운전 과도기에서 발생하는 저유량 조건에서의 임계열유속 거동은 비교적 명확하지 않다. 저유속 조건에서의 임계열유속은 부력의 영향, 다양한 유동 불안정성의 발생 등으로 인하여 더욱 복잡한 거동을 보인다. 지금까지 수행된 대부분의

저유량 조건에서의 임계열유속에 대한 실험 연구는 주로 대기압의 낮은 압력조건에서 이루어졌다. 따라서 광범위한 압력조건하에서 저유량 조건에서의 임계열유속에 대한 체계적인 연구와 실험 데이터의 확보가 필요하다.

실제 원자력발전소에서의 임계열유속은 유량, 출력, 압력 혹은 이들의 조합으로 이루어진 과도기상태에서 발생한다. 그러므로, 임계열유속에 대한 과도기상태의 영향은 원자력발전소의 사고 조건에서의 임계열유속 연구에 매우 중요하다(Chang et al., 1998). 그러나, 대부분의 임계열유속 실험 데이터는 준정상상태(Quasi-Steady-State)에서 얻어지고 있다. 지금까지의 과도기 임계열유속에 대한 연구는 주로 과도기의 변화율에 따른 임계열유속의 변화와 정상상태 임계열유속 상관식을 이용하여 과도기 임계열유속을 예측하기 위한 보정계수(Correction Factor)의 연구 등에 대해 이루어졌다(Serizawa, 1983; Kataoka et al, 1983; Celta et al., 1987; Chang et al, 1989).

최근 한국원자력연구소에서는 고온, 고압 임계열유속 실험장치를 이용하여 수직환상관에서의 저유량 임계열유속 실험을 수행하였다(천세영 등, 1999; 문상기 등, 1999). 이 실험에서는 수직방향 열유속분포가 균일할 경우와 대칭 코사인분포(Symmetric Cosine Distribution)를 갖는 동일한 기하학적 형상을 갖는 수직환상관에서 임계열유속 실험을 수행하였다. 본 연구는 이러한 실험 연구의 연장으로서, 유동과도기가 발생하는 상황에서의 임계열유속에 대한 실험을 수행하였다. 유동과도기는 고리 3/4호기 원자로냉각재펌프의 Flow Coastdown을 모사하였다. Flow Coastdown 곡선의 유량감소율을 변화시켜 유량감소율에 따른 임계열유속의 거동을 저유속 조건 및 광범위한 압력조건에서 살펴보았다.

2. 실험장치 및 실험방법

임계열유속 실험장치는 한국원자력연구소의 RCS 열수력 Loop를 사용하였으며, 실험장치는 그림 1에 나타난 것처럼 순환펌프(Circulating Pump), 예열기(Preheater), 시험관, 기수분리기(Steam/Water Separator), 응축기, 가압기, 열교환기 등으로 이루어져 있다(천세영 등, 1999; 문상기 등, 1999). 유량의 측정은 오리피스 유량계를 사용하였으며, 저유량영역에서 관찰되는 유동의 진동은 시험관 입구에 설치된 밸브를 Throttling하여 제거하였다. 실험장치의 계통압력은 가압기에 설치된 40 kW의 가열봉을 사용하여 조절하였다. 본 연구에 사용된 시험관은 핵연료봉을 모의하도록 수직방향 출력분포를 갖는 길이 1843 mm의 가열봉이 환상유로 내부에 장전되어 있는 구조이다. 그림 2는 시험관의 구조 및 열전대의 위치를 보여준다. 가열봉에는 표면 온도를 측정하고 임계열유속을 검출하기 위해 Sheath 직경이 0.5 mm인 K-Type 비접지형 열전대가 6개 부착되어 있다. 수직방향 출력분포는 10개의 Step으로 균일하게 나뉘어져 있으며, 대칭적인 Cosine 분포를 모사한다. 시험관은 내부에 설치된 저항선에 교류를 통과시켜 간접적으로 가열된다. 그림 3은 가열봉의 열유속 분포 및 열전대의 위치를 보여주고 있다. 또한 그림 3에는 정규화된 열유속 분포에 대한 근사식이 나타나 있다.

유량과도기 상태에서의 임계열유속 실험은 다음과 같은 순서와 방법으로 수행된다. 시험관 입구의 유량, 온도, 압력 및 출력을 설정된 초기 조건에 맞춘 다음, 유동과도기의 시작과 함께 순환펌프의 회전속도 변화시켜 질량유속을 유동과도기 곡선에 따라 감소시킨다. 이 때 질량유속을 제외한 열유속을 포함한 모든 변수는 동일한 값으로 유지시킨다. 유량과도기 시작점에서 질량유속은 650 혹은 550 kg/m^2s로 유지시키고, 순환펌프 회전속도의 초기값은 1300 rpm으로 유지시켰다. 유량이 감소함에 따라 임계열유속이 발생하면 Burnout 검출기에 의해 전력공급을 80 % 수준으로 낮추거나 전원을 자동적으로 정지시킨다. 또한 임계열유속이 발생하면 시험관의 Burnout을 방지하기 위해 유량을 초기조건으로 자동적으로 증가시킨다. 임계열유속 발생 판단 조건은 가열봉의 표면 온도가 지속적으로 급격히 상승하는 경향으로 판단하며, 본 실험에서는 표면 온도가 포화온도보다 약 110 K이상 상승하면 CHF가 발생한 것으로 판단하였다.

그림 4는 고리 3/4호기의 원자로냉각재펌프의 Coastdown 곡선을 바탕으로 초기유량에 대한 임

의의 시간에서의 유량의 비를 보여준다. 여기서 Normal 모드는 고리 3/4호기의 원자로냉각재펌프의 Coastdown 곡선에 의한 초기유량에 대한 시간에 따른 유량의 비를 모사하는 유량과도기 모드를 지칭하며, Fast와 Slow 유동과도기는 Normal 모드 곡선을 각각 제곱 혹은 제곱근하여 설정하였다. 이러한 세 가지 유동과도기의 모드를 이용하여 유량감소율에 따른 임계열유속의 변화를 관찰하였다. Slow 모드는 비교적 잘 모사할 수 있었으나, Fast와 Normal 모드는 그림 4의 이상적인 곡선과는 약간의 차이를 보였다. 이는 펌프의 회전속도 변화, 이에 따른 유량 변화 및 루프에서의 압력강하가 서로 영향을 미치고, 펌프의 반응시간이 빠르지 않아서 이상적인 유량과도 곡선을 유지하기가 어려웠기 때문이다. 그림 5는 유동과도기에 따른 가열봉 벽면 온도의 거동을 보여준다. 질량유속이 초기 값에서 감소함에 따라 어느 정도 시간이 경과하면 가열봉 벽면 온도가 급격히 증가하여 임계열유속 조건에 도달함을 알 수 있다. 본 실험에서는 임계열유속 조건을 벽면온도가 증가하기 시작하는 시점보다는 벽면온도가 110 K이상 되는 조건을 임계열유속 조건으로 하였다. 따라서 벽면온도가 증가하기 시작하는 시점과 본 실험에서 정의한 임계열유속 조건에서의 임계질량유속은 약간의 차이를 보일 수 있다. 여기서 임계질량유속은 임계열유속이 일어나는 지점에서의 질량유속을 의미한다.

본 연구에서는 다음과 같은 조건에서 약 118개의 임계열유속 실험 데이터를 얻었다.

- 시험관 내부직경 (D_i) : 9.53 mm
- 시험관 외부직경 (D_o) : 19.4 mm
- 시험관 가열길이 (L_H) : 1843 mm
- 수직방향 출력분포 : 비균일 (10 Step Symmetric Cosine Distribution)
- 계통 압력 (P) : 0.55, 1.9, 5.9, 9.9 MPa
- 초기 질량유속 (G_o) : 550, 650 kg/m^{2}s
- 입구 과냉도 (ΔH_{in}) : 86.9, 212.3, 353.7 kJ/kg
- 출구에서의 임계건도 (X_C) : 0.039 - 0.558

본 실험의 주요 측정변수인 압력, 유량, 온도 및 전력의 측정 불확실도(Uncertainty)는 각각 자료처리장치(Data Acquisition System) 지시치의 ±0.3 %, ±1.5 %, 0.6 % 및 ±1.0 % 이하였다.

3. 실험결과 및 논의

<u>유동과도기 모드에 따른 임계열유속 발생 시점(Time-to-CHF)</u>

그림 6은 동일한 입구 과냉도, 가열봉 출력 및 계통 압력조건에서 유동과도기 모드에 따른 임계열유속의 발생 시간(Time-to-CHF)을 보여준다. 그림에서 나타난 바와 같이 유동과도기의 감소율이 가장 큰 Fast 모드에서 가장 빨리 임계열유속이 발생하고, 감소율이 가장 작은 Slow 모드에서 가장 늦게 임계열유속이 발생하고 있다. 그러나, 임계열유속 발생 시점에서의 질량유속은 반대의 경향을 보여준다. 즉, 임계열유속 조건에서의 임계질량유속은 Slow 모드에서 가장 큰 값을 가지며, 반면에 Fast 모드에서 가장 작은 값을 보인다. 이러한 세 가지 유동모드에서의 임계질량유속은 동일한 입구 과냉도, 계통 압력 및 가열봉 출력(동일한 열유속)을 갖는 정상상태 실험에서의 질량유속보다 대부분 작은 값을 가진다.

<u>초기 유량의 변화에 따른 영향</u>

초기 정상상태의 질량유속을 변화시켜 초기 질량유속이 임계열유속 조건에 미치는 영향을 살펴보았다. 그림 7은 입구 과냉도, 계통 압력 및 열유속의 초기값이 서로 동일하지만, 유량과도기가 시작되는 초기 질량유속이 각각 650, 550 kg/m^{2}s으로 서로 다를 경우에 각 유량과도기 모드에 따른 임계질량유속의 변화를 보여준다. 초기 질량유속의 비는 서로 크게 다르지만, 임계열유속이 발생하는 임계질량유속의 비는 약 1.015로 거의 차이가 없었다. 가열봉의 총출력과 입구 과냉도가 동일하기 때문에 낮은 질량유속일 경우에 시험대 출구에서의 초기 건도가 약 1.3 - 3.0배 정도 높

게 나타난다. 그러나, 임계조건에서의 출구건도의 비는 0.996으로 거의 같은 값을 보였다. 즉, 초기조건인 질량유속 및 출구건도가 서로 다르지만, 유량과도기에서 임계열유속 조건에서의 임계질량유속 및 출구의 임계건도는 초기조건에 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 그러나, 임계조건에 도달하는 시간은 낮은 초기유량일 경우가 더 빨라, 그 비가 약 0.756이었다. 또한 그림을 자세히 살펴보면 높은 열유속일수록 모드에 따른 임계질량유속 값의 차이가 적어짐을 알 수 있다. 따라서 열유속이 높은 경우에는 유량과도기의 모드에 따른 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다.

<u>임계열유속 조건에서의 유동 양식</u>

그림 8과 9는 서로 다른 계통압력하에서 Mishima와 Ishii(1984)의 유동양식선도를 이용하여 구한 임계열유속 조건에서의 유동 양식을 보여준다. 대부분의 임계열유속 조건이 출구 근처에서 발생하기 때문에 유량양식선도는 출구를 기준으로 구하였다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 임계열유속은 Annular-Mist Flow Regime에서 발생하고 있다. 이는 정상상태 실험에서와 동일한 결과를 보여준다. 따라서 가열봉의 벽면에 액막이 존재하고, 유량이 감소함에 따라 액막이 고갈되면서 임계조건에 도달하는 Liquid Film Dryout 메커니즘에 의해 임계열유속이 발생함을 알 수 있다.

<u>변수 경향 및 정상상태 실험 데이터와의 비교</u>

그림 10과 11은 동일한 압력 및 열유속 조건에서 각 모드별로 입구 과냉도에 따른 임계질량유속과 임계건도를 보여준다. 그림에 나타난 것처럼 입구 과냉도가 증가함에 따라 임계질량유속은 감소하고, 임계건도는 증가한다. 또한 각 모드별로 Slow 모드일 때 가장 큰 임계질량유속과 가장 작은 임계건도를 가지며, Fast 모드일 경우에 가장 작은 임계질량유속과 가장 큰 임계건도를 가짐을 알 수 있다.

동일한 기하학적 형상을 갖는 시험관을 사용하여 정상상태에서 수행한 임계열유속 실험 데이터와 유량 과도기에서의 임계열유속 데이터를 비교하였다(천세영 등, 1999; 문상기 등, 1999). 표 1은 동일한 입구 과냉도, 압력 및 열유속조건에서 각 모드에 따른 유량과도기의 임계질량유속과 정상상태 임계질량유속의 비를 각 조건에서의 평균값으로 보여준다. 여기서 하첨자 FT와 ST는 각각 유량과도기 상태와 정상상태를 의미한다. 또한 표에는 동일한 조건에서의 유량과도기의 임계건도와 정상상태 임계건도의 비의 평균값을 보여준다. 표에 나타난 것처럼 유량과도기의 임계조건은 정상상태보다 낮은 질량유속에서 발생한다. 이에 따라 출구에서의 임계건도는 유량과도기에서 더 높은 값을 갖는다. 동일한 압력, 입구 과냉도 및 열유속 조건에서 각 모드에 따라 질량유속의 감소율이 가장 큰 Fast 모드에서 가장 낮은 임계질량유속을 가지며, 질량유속의 감소율이 가장 작은 Slow 모드에서 가장 높은 임계질량유속을 갖는다. 임계건도는 이와는 반대의 경향을 나타낸다. 그림 12 ~ 14는 위의 임계질량유속비의 평균값을 압력에 따라서 각 모드별로 보여준다. 그림에 나타난 바와 같이 압력이 가장 낮은 경우에는 유량과도기의 임계질량유속이 정상상태의 값보다 크게 나타난다. 그러나, 낮은 압력을 제외한 다른 압력영역에서는 대부분의 유량과도기 임계질량유속이 정상상태의 값보다 작은 값을 가진다. 그림 15 ~ 17에는 임계건도의 비를 보여주며, 가장 낮은 압력의 경우를 제외하고는, 대부분 유량과도기에서의 임계건도가 정상상태의 값보다 크게 나타난다.

4. 결론

저유속 및 광범위한 계통 압력조건에서 비균일 수직 열유속 분포를 갖는 수직 환상관에서 유동과도기 상태가 임계열유속에 미치는 영향을 조사하기 위해 실험을 수행하였다. 유동과도기는 고리 3/4호기의 원자로냉각재펌프의 Coastdown 곡선을 기준으로, 유량감소율이 서로 다른 세 가지 모드에 대하여 실험을 수행하였다. 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 질량유속의 감소율이 가장 큰 Fast 모드에서 임계열유속 조건이 가장 빨리 발생하고, 감소율이 낮은 Slow 모드에서 가장 늦게 임계열유속이 발생하였다.

2) 그러나, 임계열유속 발생 시점에서의 임계질량유속의 값은 반대의 경향을 보이며, Slow 모드일 경우에 가장 큰 질량유속 값을 가진다.
3) 현재까지 수행된 실험 범위에서는 유동과도기 상태에서의 임계질량유속은 대부분 정상상태에서의 임계질량유속보다 작은 값을 가지는 것으로 나타났다. 즉, 동일한 계통압력, 질량유속 및 입구 과냉도를 가지더라도, 유동과도기에서는 더 낮은 질량유속에서 임계열유속이 발생하는 Delay를 가짐을 알 수 있다.
4) 초기 질량유속의 값이 유동과도기 상태의 임계열유속 조건에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있었다.
5) 현재까지의 수행된 실험의 임계열유속 조건에서의 유동양식은 Annular-Mist 유동양식으로, 임계열유속 메커니즘은 Liquid Film Dryout이었다.
6) 입구 과냉도가 증가함에 따라 임계질량유속은 감소하고, 임계건도는 증가한다. 또한 질량유속의 감소율이 가장 작을 경우에 가장 큰 임계질량유속과 가장 작은 임계건도를 가진다
7) 계통의 압력이 낮을 경우에는 유량과도 상태에서의 임계질량유속은 정상상태의 경우보다 더 크게 나타났다. 그러나, 다른 압력조건에서는 유량과도 상태에서의 임계질량유속은 정상상태의 값보다 작게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

문상기, 천세영 등 (1999), "내부 가열 수직 환상관에서 수직 방향 열유속분포가 임계열유속에 미치는 영향에 대한 실험 연구," 대한기계학회, '99년도 충청지부 추계학술대회 논문집, pp. 15-22, 충북대학교.

천세영, 문상기 등 (1999), "저유속 및 광범위한 압력조건하에서 비균일 가열 수직 환상유로에서의 임계열유속," '99 춘계학술발표회, 한국원자력학회.

Celtata G. P. et al. (1987), "CHF during flow rate, pressure and power transients in heated channels," ENEA Report RT/THEM/81/1.

Chang S. H. et al. (1989), "Transient effects modelling of critical heat flux," *Nucl. Eng. Des.*, **113**, 51.

Chang, S. H. and Baek, W. P. (1998), "Perspective on critical hat flux research for nuclear rectors," *Proc. of NTHAS98: First Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulic and Safety*, Pusan, Korea, October 21-24.

Kataoka I. et al. (1983), "Transient boiling heat transfer under forced convection," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **26**.

Mishima, K. and Ishii, M. (1984), "Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes." *Int. J. Heat Mass Transfer*, **27**[5], 723-737.

Serizawa, A. (1983), "Theoretical prediction of maximum heat flux in power transient," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **26**, 921.

표 1. 유량과도기 임계열유속과 정상상태 임계열유속의 압력에 따른 비교

입구 과냉도 (kJ/kg)	압력 (kPa)	G_{C_FT}/G_{C_ST} (-)			X_{C_FT}/X_{C_ST} (-)		
		Fast	Normal	Slow	Fast	Normal	Slow
86.88	1882	0.82	0.84	0.95	1.28	1.22	1.07
	5945	0.84	0.85	0.94	1.22	1.21	1.08
212.27	552	1.02	0.92	1.04	0.98	1.16	0.98
	1882	0.82	0.90	0.94	1.36	1.18	1.10
	5945	0.87	0.90	0.93	1.21	1.15	1.09
	9865	0.84	0.84	0.95	1.28	1.30	1.11
353.66	552	1.01	1.02	1.13	1.03	0.98	0.76
	1882	0.85	0.89	0.93	1.34	1.22	1.13
	5945	0.85	0.89	0.96	1.29	1.19	1.06
	9865	0.84	0.88	0.93	1.35	1.28	1.14

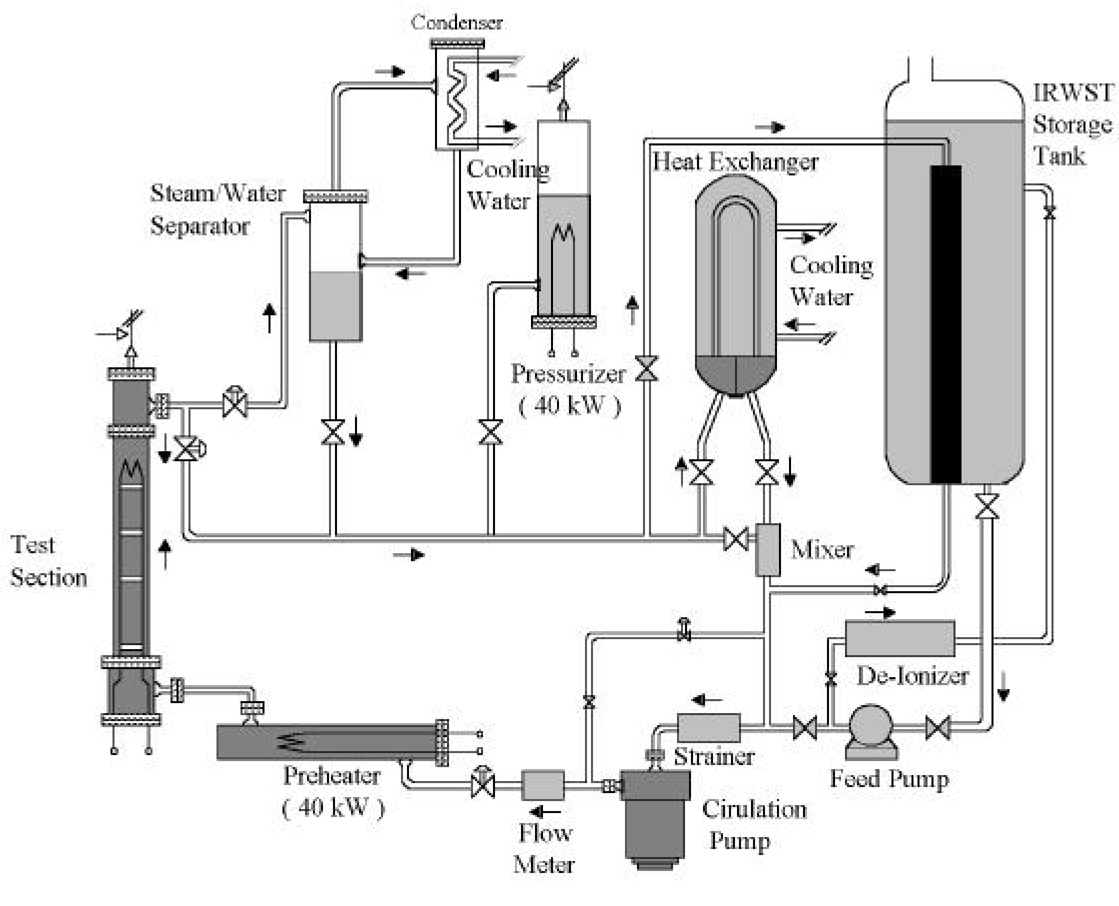

그림 1. 한국원자력연구소 RCS 열수력 Loop

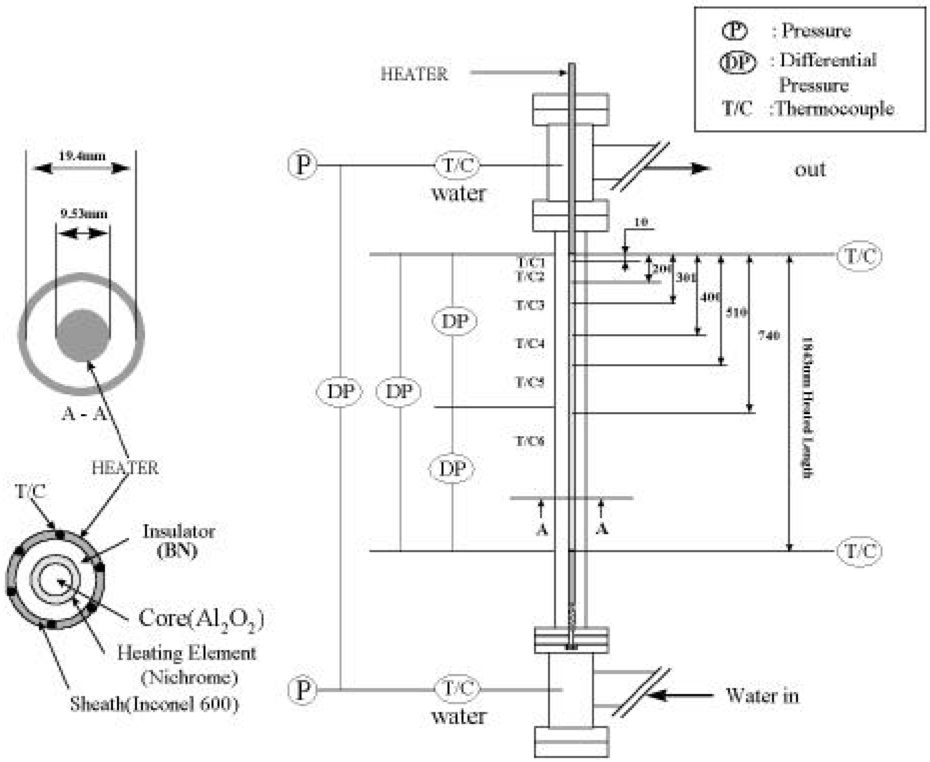

그림 2. 가열봉의 구조 및 열전대 위치

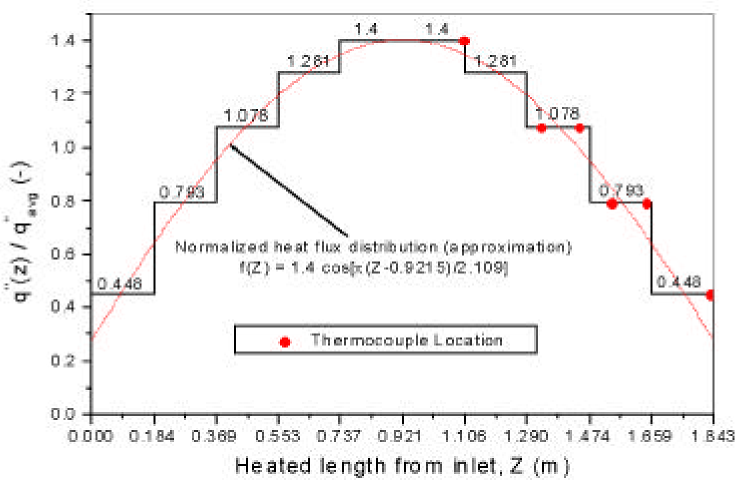

그림 3. 수직방향 열유속 분포

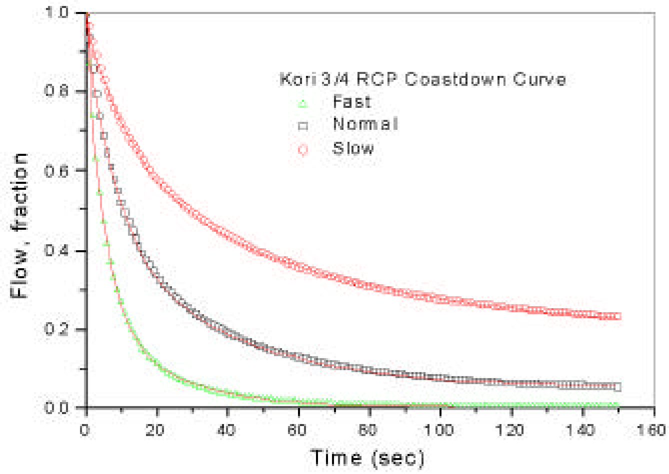

그림 4. 유량과도기 모사 곡선 (고리 3/4호기)

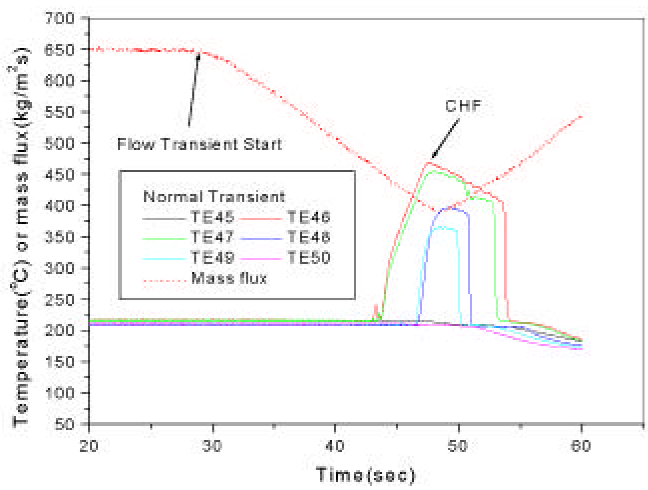

그림 5. 유동과도기에서 질량유속 및 벽면온도의 변화

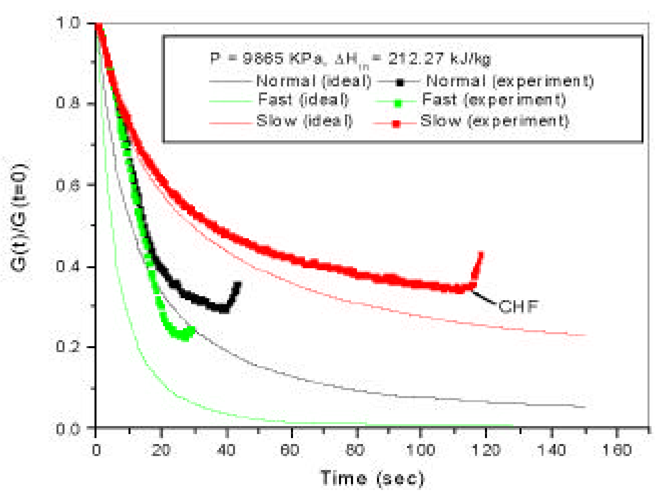

그림 6. 유동과도기 모드에 따른 임계열유속 발생시점

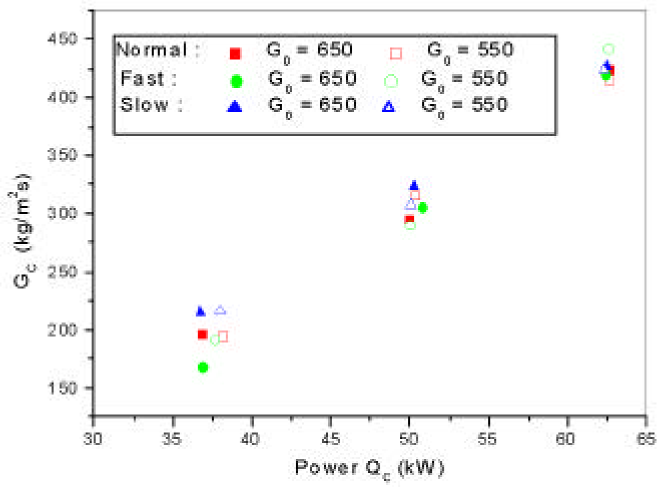

그림 7. **초기 질량유속의 변화에 따른 임계질량유속**

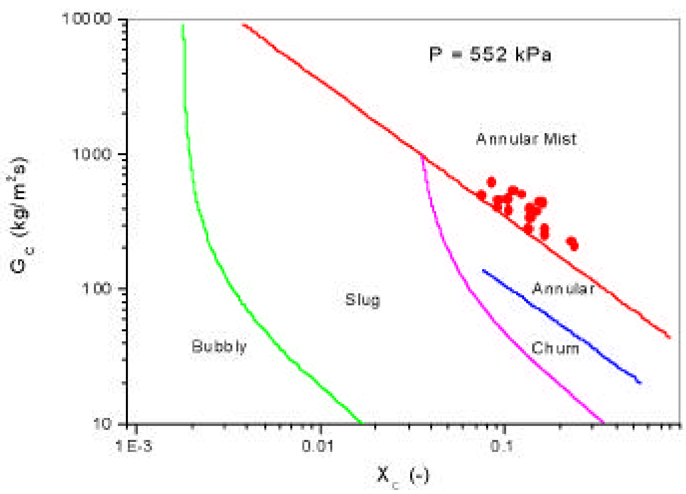

그림 8. **임계열유속 조건에서의 유동 양식**(P = 552 kPa)

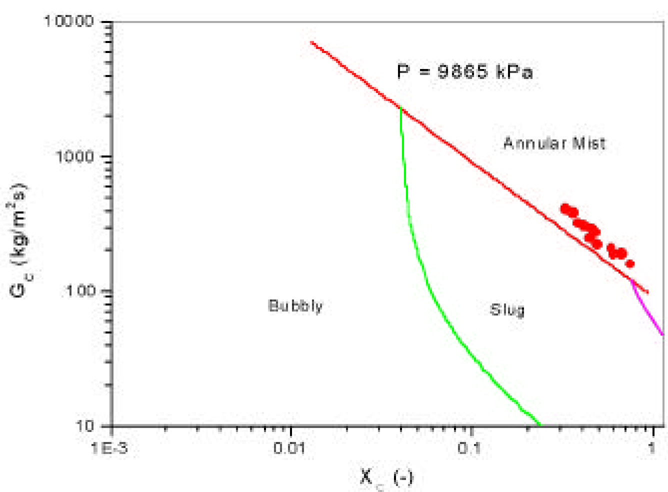

그림 9. **임계열유속 조건에서의 유동 양식**(P = 9865 kPa)

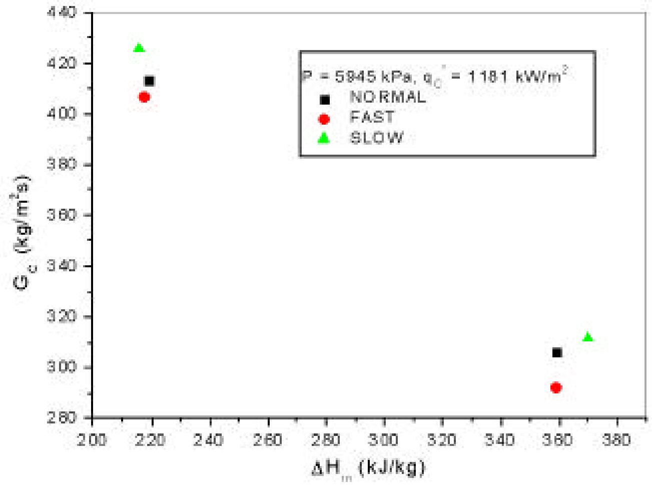

그림 10. **입구 과냉도에 따른 임계질량유속**

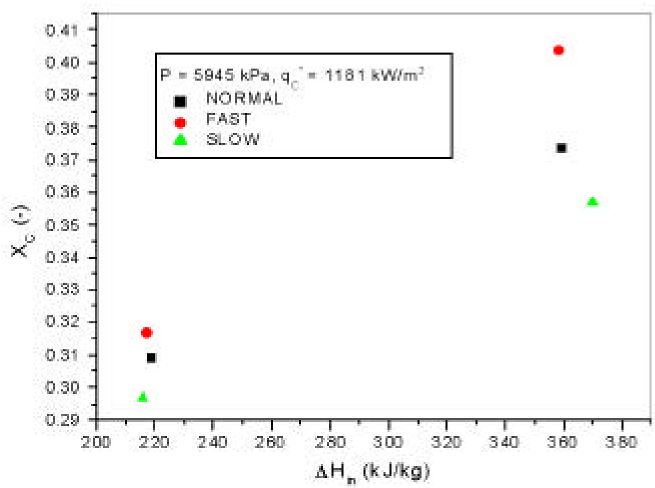

그림 11. **입구 과냉도에 따른 임계건도**

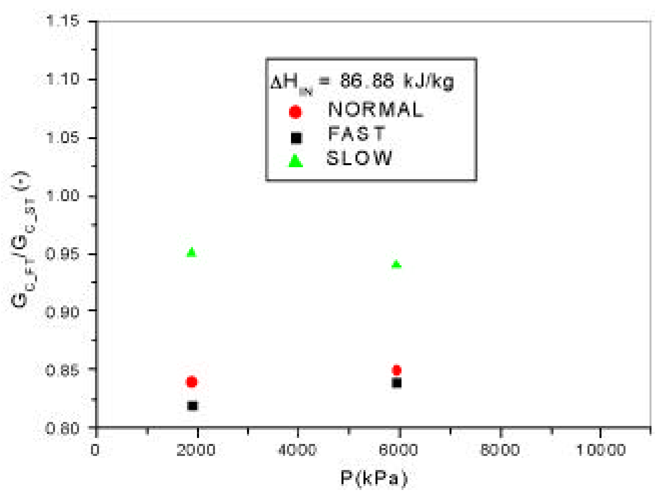

그림 12. **유량과도기 임계질량유속과 정상상태 임계질량유속의 비교**

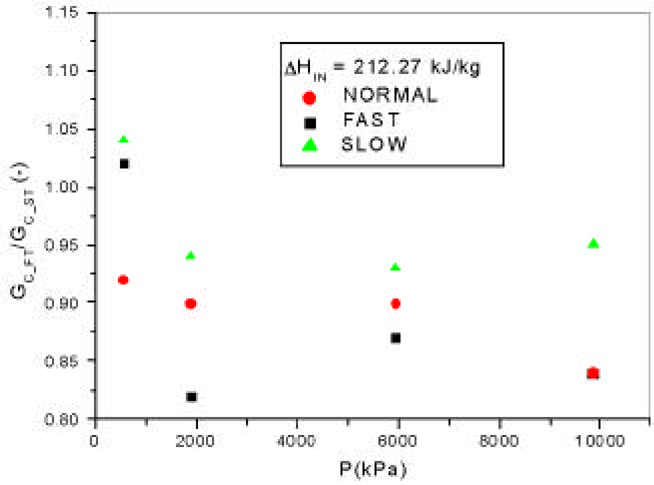

그림 13. 유량과도기 임계질량유속과 정상상태 임계질량유속의 비교

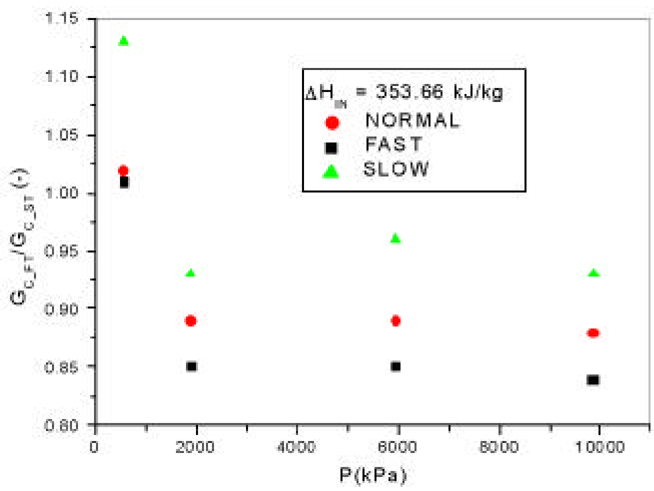

그림 14. 유량과도기 임계질량유속과 정상상태 임계질량유속의 비교

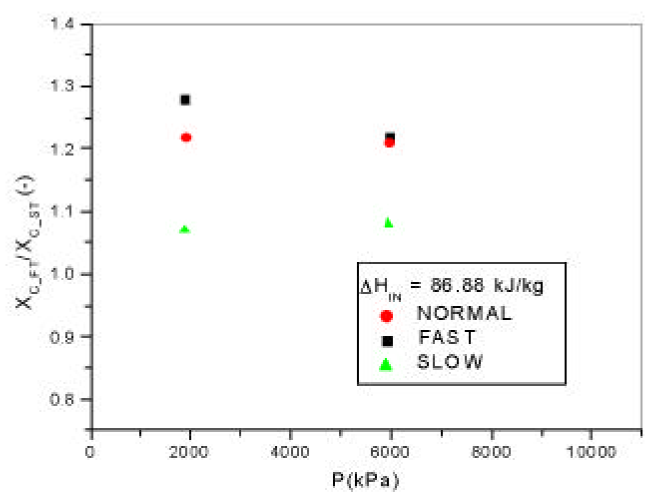

그림 15. 유량과도기 임계건도와 정상상태 임계건도의 비교

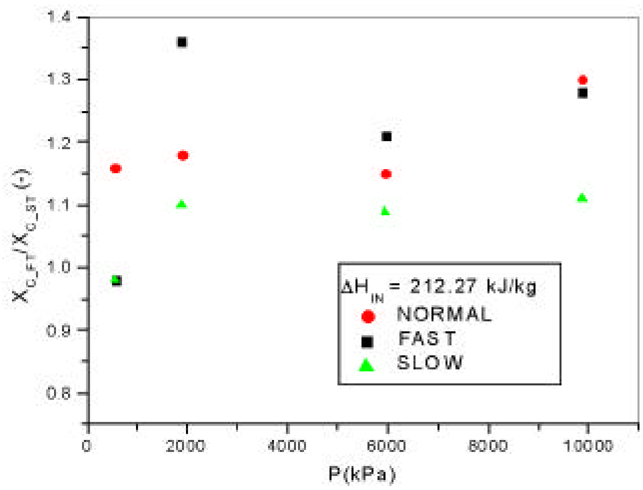

그림 16. **유량과도기 임계건도와 정상상태 임계건도의 비교**

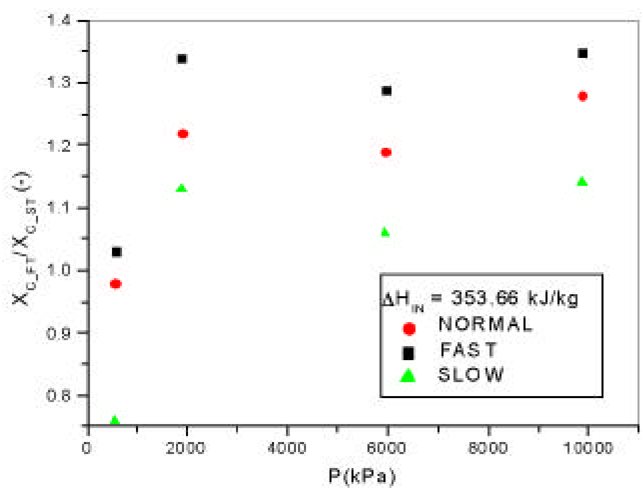

그림 17. **유량과도기 임계건도와 정상상태 임계건도의 비교**