‘2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

소구경 Square Edge Orifice 를 통한 과냉각수의 임계유동에 관한 실험적 연구

An Experimental Investigation of Critical Flow of Subcooled Water through Square Edge Orifices with Small Diameters

박 춘경, 최 남현, 조 석, 양 선규, 정 문기

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

소구경 Square Edge Orifice 를 통한 임계유동에 대한 현상을 연구하고, 소형실험장치에서 사용할 모의 파단부 설계자료를 생산하기 위하여 Blowdown and Condensation (B&C) Loop 에서 임계유동실험을 수행하였다. 실험에서는 총 8 가지의 Orifice 가 사용되었으며 정상상태 및 Blowdown 실험이 수행되었다. 정상상태 실험결과 소구경 Square Edge Orifice 에서의 임계질량유속은 방출계수 및 초기조건으로 예측될 수 있었으며, 이를 바탕으로 임계질량유속 상관관계식을 개발하였다. 상관관계식은 본 연구에서의 Blowdown Test 결과와 외부 연구자료를 이용하여 평가되었다. 그 결과 본 상관관계식은 Square Edge Orifice 와 길이가 아주 짧은 Pipe 에서의 임계유속을 정확하게 예측할 수 있다고 판단되었다. 기존 모의 파단부 형상을 검토하였으며, 이를 바탕으로 최적 파단부 설계방안을 제시하였다

Abstract

To study critical flow phenomena in square edge orifices, and to generate technical data to evaluate the performance of break simulator design for small break accidents in a scaled test facility, critical flow tests have been performed at the Blowdown and Condensation (B&C) Loop. Eight different shape square edge orifices were used for steady state and blowdown critical flow tests. The steady state critical flow data show that critical mass flux can be expressed as a function of discharge coefficient and initial condition. Based upon the test results, a semi-empirical model has been developed. Comparison between the blowdown test data and the model predictions shows that the critical mass flux for square edge orifices with small diameters can be accurately predicted. In addition, the model can correctly calculates critical mass flux through medium size pipe with very short length. Existing break nozzles were investigated and provision for the design of break nozzle for a small scale test facility has been suggested

1. 서론

고온, 고압의 액체를 수용하는 관이나 용기가 파손되면 액체는 파단부를 통하여 외부로 방출되며 이 때 방출되는 유량은 임계유동현상에 의하여 제한된다. 임계유동현상은 원자력발전소에서의 냉각재상실사고나 화학산업 또는 발전소에서의 배기 밸브 설계 등에서 매우 중요한 역할을 하기 때문에 현재까지 많은 연구가 수행되어 왔다.

단상 압축성유체에 대한 임계유동현상은 잘 알려져 있다. 그러나 2 상 물-증기 혼합물의 임계유동현상에 대한 이론은 아직 잘 정립되어 있지 않다. Elias and Lellouche [1] 가 수행한 연구에 의하면 현존하는 어느 모델도 실험자료를 오차 20 % 이내로 예측하지 못하고 있다. 한편 박 등은 최근 과냉각수의 임계질량유속이 방출계수와 무차원냉각도로 표현될 수 있다고 주장하고 간단한 임계질량유속 예측 상관관계식을 제시하였다 [2-4]. 또한 그들은 자체 및 외부 임계유동자료를 사용하여 그 상관관계식의 타당성을 입증한 바 있다. 이 상관관계식은 길이 (L) 가 어느 정도 길고 ($L \geq 40\ mm$), 길이/직경비 (L/d) 가 큰 ($L/d \geq 10$) 경우의 임계유동에 대하여는 정확도가 높다고 알려졌다 (상대오차 8 % 이내).

한편, 이 상관관계식은 길이가 아주 짧은 노즐이나 파이프 ($L/d < 10$) 에서의 임계질량유속을 과소평가하는 경향이 있다. Flashing 을 동반하지 않는 찬 물이 흐를 때, 노즐 길이가 아주 짧으면 (예, Sharp Orifice) 유량이 상대적으로 작으며, L/d 가 1 내지 2 정도까지는 유량이 급격히 증가하고, L/d 가 계속 증가하면 마찰에 의하여 유량이 서서히 감소한다고 알려졌다 [5,6,]. 한편 포화수의 경우에는 L/d 가 12 까지는 유량이 변화하지 않으며, 그 유량은 찬 물이 흐를 때에 대한 유량보다 작다고 알려져 있다 [6]. 그러나 L/d 가 작은 Square Edge Orifice 에서의 온도변화에 따른 유량변화에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

원자력발전소에서의 소형파단 냉각재상실사고의 경우, 파단부가 아주 작지 않다면, 파단부의 L/d 는 매우 작게 된다. 예로 한국표준원전의 경우 저온관의 내경 (d) 은 30” 이고 두께 (L) 는 2.7” 이다. 따라서 표준원전에서 2” 및 6” 파단이 발생한다면 파단부의 L/d 는 각각 1.35 및 0.45 가 되며 L 은 항상 2.7” 가 된다. 즉 파단부의 형상은 Square Edge Orifice 와 유사한 형태가 된다. 따라서 Square Edge Orifice 에서의 임계유동현상에 대한 정확한 이해가 발전소 안전성 해석에 중요하다.

한국원자력연구소에서는 원자력발전소의 안전성 확보 및 운전성 향상을 도모하기 위하여 종합실험장치를 설계하고 있다 [7]. 이 실험장치는 원형발전소를 약 1/200 로 축소한 형태가 될 것으로 예상되며, 이 시설에서 소형파단 냉각재상실사고를 수행할 예정으로 있다. 이러한 시설에서 소형파단 냉각재상실사고를 적절하게 모의하기 위하여는 파단부를 통한 유체 방출을 잘 재현하여야 한다. 따라서 원자력발전소에서 예상되는 Square Edge Orifice 형태에서의 임계유동현상을 이해하고, 실험시설의 모의 파단부 설계를 위한 자료를 생산하기 위하여 임계유동실험을 Blowdown and Condensation (B&C) Loop 에서 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험조건

임계유동실험은 정상상태 임계유동실험과 Blowdown 실험으로 구성되었으며, 원자력연구소에 설치되어 있는 B&C Loop 에서 수행되었다. B&C Loop 은 다목적 실험장치로 이 장치에서는 밸브 성능실험, 임계유동실험, 증기분사기 (Sparger) 성능실험, 사고시 가압기 거동실험 등이 수행될 수 있다 [8]. 임계유동실험은 B&C Loop 내 가압기, 실험부 (Test Section) 와 배관, 질소공급장치, 응축수조, 계측 및 자료수집장치를 사용하여 수행되었다 (그림 1 참조).

고온, 고압의 물을 수용하는 가압기에는 내부에 전기 Heater 가 설치되어 있으며, 체적은 0.85 m^3 이고 설계온도 및 압력은 370 °C, 17.8 MPa 이다. 가압기와 실험부는 2” Sch. 160 Pipe 로 연결되었으며, 실험부에 Square Edge Orifice 가 부착된다. 가압기의 물은 내부 전기 Heater 에 의하여 실험조건까지 가열, 가압된 후 유량계와 실험부를 통과하여 응축수조로 분사된다. 응축수조는 직경이 3 m 이고 높이가 4 m 인 원통형 수조로 대기로 개방되어 있으며, 실험부를 통한 유체는 응축수조 내 물이나 대기로 분사된다. 정상상태 임계유동실험시 가압기를 일정압력으로 유지시켜주는 질소공급장치는 질소용기와 압력 Regulator, 압력조절밸브, 및 배관으로 구성되었다.

가압기 내부와 출구, 유량계 입구, 및 실험부 입구와 출구에서는 유체온도가 계측되었으며, 실험

부 전단에는 Venturi 형식의 유량계가 설치되었다. 또한 가압기 상부와 유량계 입구, 및 실험부 전후에는 압력계가 설치되었다. B&C Loop 은 폐쇄형 실험시설로 응축수조와 연결된 밸브 (급속개방밸브: QOV) 가 개방되지 않는 한 Loop 내 유체는 순환하지 않는다. 따라서 가압기와 실험부 사이의 배관 내부와 실험부에서의 유체온도를 조절하기 위하여 Tracer Heater 가 배관에 설치되었다. QOV 는 공기로 작동되는 밸브로 열림시간은 1 초 미만이다.

본 연구에서 사용된 Orifice 의 모양은 그림 2 와 같으며, 총 8 가지 크기의 Square Edge Orifice 가 사용되었다. Orifice 의 내경 (*d*) 과 두께 (*L*), 및 실험부 입구 내경 (*D*) 이 표 1 에 명시되어 있다. 주요 실험 인자는 실험부 입구 내경, Orifice 내경, 두께, 및 가압기 내부 물 온도와 압력이다. 정상상태 임계유동실험에서 물온도는 20 °*C* 에서 포화온도까지 변화되었으며, 4 단계 압력 (2, 3, 4 ,5 *MPa*) 상태에서 실험이 수행되었다. Blowdown 실험에서 압력은 5.4 *MPa* 에서 15.7 MPa 까지 변화시켰으며, 초기 과냉도는 5 °*C* 에서 153 °*C* 까지 다양하게 변화시켰다. 정상상태 실험에서는 8 개의 Orifice 가 모두 사용되었으며 총 327 번의 실험이 수행되었다. Blowdown 실험에서는 *L/d* 가 1 인 3 개의 Orifice (Orifice 1, 2, 8) 만 사용되었으며, 다양한 과냉도와 압력조건하에서, 총 28 회의 실험이 수행되었다.

표 1. Orifice 사양

Orifice 번호	입구 내경, D (*mm*)	Orifice 내경, d (*mm*)	Orifice 두께, L (*mm*)	*L/d*
1	38.1	4	4	1
2	38.1	8	8	1
3	38.1	4	8	2
4	19.05	8	4	0.5
5	19.05	4	4	1
6	19.05	2	4	2
7	9.5	4	2	0.5
8	9.5	2	2	1

가압기 내부의 물을 실험조건까지 가열하고, 가압기 내부 압력을 실험조건까지 가압한 다음 QOV 를 개방하여 임계유동실험을 수행하였다. 정상상태 실험에서는 질소공급계통을 가압기와 계속 연결시켜 실험시 가압기 압력을 일정하게 유지하였다. Blowdown 실험에서는 가압기 압력이 실험조건에 도달하면 질소공급계통을 단절시킨 후 실험을 수행하였다. 실험 준비과정에서, 비응축성 기체가 임계유동에 미치는 영향을 배제하기 위하여, 가압기 내 물 온도가 100 °*C* 에 도달하면, 가압기를 대기와 개방시킨 후 가압기 내 전기 Heater 를 계속 가동시켜, 20 여분 정도 물을 비등시키므로 물속의 기체를 제거하였다. 정상상태 실험은 각 경우에 대하여 약 1 분간 수행되었으며, 정상상태 여부를 실험 후 즉각 확인하였다. Data Acquisition System 으로는 HP-VXI Controller (V743i/100) 가 사용되었다.

3. 실험 결과 해석

3.1 찬 물 유동에 대한 Orifice 방출계수 ($C_{d,ref}$)

Flashing 을 동반하지 않는 유동에서의 유량은 방출계수에 좌우되며, 이 방출계수는 유로의 기하학적 형태에 따라 크게 달라진다. 표 2 는 참고문헌 5 에 주어진 계산식을 이용하여 계산된 방출계수와 찬 물 (20 °*C* 물) 이 유로를 흐를 때 측정된 방출계수 값을 비교하고 있다. 표에서 보는 바와 같이 계산된 값과 측정치는 서로 잘 일치하지는 않는다.

이는 가공상 문제로 인하여 발생된 것으로 추정된다. 즉 방출계수는 Orifice 입구측의 Sharpness 에 따라 크게 변화하는 것으로 알려졌다. 따라서 Sharpness 가 작을 경우 방출계수는 이론식에 의한 계산 값보다 크게 된다 (이론식에 의한 방출계수 값은 Sharpness 가 최대인 경우를 기준으로 계산되었다). 한편 소구경 Orifice 에서의 표면상태는 방출계수에 막대한 영향을 주며, 표면이 정밀하게 가공되지 않는 경우 방출계수는 이론 값보다 작아진다. 특히 2 번 Orifice 의 경우 이론치와 측정치와의 차이가 크다 (이론치의 80 %). 실험이 끝난 후 확인 결과 2 번 Orifice 의 내경의 표면 일부가 매우 거칠게 가공되어 있음을 발견하였다.

Complete Turbulence Region 에 대한 마찰계수 값은 유량과 상관없이 일정하다고 알려져 있다. 따라서, 이론식에 의하면 이러한 Region 에서, 주어진 Orifice 에서의 방출계수 값은 유량과 상관 없이 일정하여야 한다. 한편, 본 연구에 사용된 Orifice 에서의 Reynolds Number 는 10^5 보다 컸으며 직경은 8 mm 이하이다. 이러한 범위의 Reynolds Number 와 8 mm 이하의 직경을 갖는 상용파이프에서의 마찰계수는 일정하며 [5], 따라서 주어진 Orifice 에 대한 방출계수의 값은 일정하여야 한다. 그러나 본 연구에 사용된 Orifice 에서의 방출계수 값은 일반적으로 압력이 커질수록 (또는 유량이 증가할수록) 감소하는 경향을 보이고 있다 (표 2). 또한 Blowdown 실험에서 추정한 고압상태에서의 방출계수도 압력이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 유량이 증가함에 따라 방출계수가 감소하는 현상은 Rohloff [9] 등의 연구에서도 목격된 바 있다. 이에 대한 원인 규명이 필요하다고 생각된다.

표 2. Orifice 방출계수

압력 (*MPa*)	T/S 1	T/S 2	T/S 3	T/S 4	T/S 5	T/S 6	T/S 7	T/S 8
2.0	0.74	0.62	0.79	0.64	0.74	0.88	0.69	0.79
3.0	0.73	0.61	-	0.64	-	0.85	0.68	0.78
4.0	0.72	0.61	0.74	0.63	0.71	0.85	0.67	0.77
5.0	0.72	0.60	0.74	-	0.71	0.85	0.67	0.78
이론식	0.75	0.76	0.79	0.67	0.76	0.79	0.66	0.76

3.2 유체 초기조건의 영향

일반적으로 임계유동은 Orifice 후단의 Back Pressure 에 해당하는 압력에 대한 포화온도 이상의 유체가 실험부를 흐를 때 발생할 것으로 예상된다. 따라서 본 실험에서는 유체의 초기 온도가 100 °C 이상이 되면 임계유동이 시작할 것으로 추정된다. 1 번 Orifice 에서 얻어진 유량을 초기 온도 및 압력의 함수로 그림 3 에 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 유량은 같은 온도에 대하여 압력이 높을수록 크며, 같은 압력 조건에서는 온도가 커질수록 감소하였다. 또한 그림에서 Flashing 을 동반하는 유동이나 그렇지 않은 유동의 근본적인 유량 변화는 발견되지 않았다. 즉 Flashing 이 발생하여도 유량은 획기적으로 감소하지는 않는다. 이러한 경향은 길이가 길고 *L/d* 가 큰 형상의 유로에서의 임계유동에서 확인된 바 있다 [2-4]. 다른 7 종류의 Orifice 에서도 이와 같은 경향이 동일하게 나타나고 있다.

3.3 Orifice 형상의 영향

길이가 긴 유로에서 임계 유량은 길이 (*L*) 가 증가할수록 감소하는 것으로 알려져 있다. 그림 4 는 직경이 같고 길이가 서로 다른 3 개의 Orifice 에서, 일정한 압력 조건 (5 *MPa*) 하에서, 측정된 온도에 따른 유량의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Orifice 에서는 길이가 짧을수록 (또는 *L/d* 가 작을수록) 유량이 작게 측정되었다. 상온의 유체 유동의 경우 이러한 경향은 예상된 바와 같다. 즉 Orifice 의 경우 *L/d* 가 2 보다 작으면 Flow Resistance 가 급격히 증가하기 때문이다. 이와 같은 경향은 표 3 에서의 이론식 난에 표시된 방출계수 값으로도 확인된다. 한편 *L/d* 가 작을수록 유량이 감소하는 현상은 Flashing 을 동반하는 유동에서도 Non-Flashing 유동에서와 동일하게 발생하고 있다. 따라서, 직경이 같을 경우, Orifice 에서의 임계유량은 길이가 짧을수록 감소하는 경향을 보인다.

길이가 긴 유로에서 직경 (*d*) 이 임계유량에 미치는 영향에 대한 확실한 결론은 존재하지 않는다. Square Edge Orifice 에서 *L/d* 가 일정한 경우에 대한 온도에 따른 유속의 변화가 그림 5 에 도시되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이, *L/d* 가 일정한 경우, 직경이 작을수록 질량유속 (Mass Flux) 이 커지는 경향을 보이고 있다. 한편, 이론식으로 계산된 방출계수를 비교하면 3 가지 실험부에 대한 방출계수 값은 거의 같다. 따라서 최소한 Non-Flashing 유동에 대한 유속은 서로 같아야 하나 실험결과는 그렇지 않다. 이러한 현상은, 전술한 바와 같이, Orifice 가공도가 서로 틀리기 때문에 발생한 것으로 생각된다. 즉 Orifice 입구에서의 Sharpness 나 내경의 표면조도 등이 서로 틀리기 때문에 전체적인 방출계수 값에 차이가 발생하였고, 이에 따라 유속에 차이가 발생한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는, 직경이 임계유동에 미치는 영향을 평가할 수 없었다.

3.4 Blowdown 실험 결과

총 28 회의 Blowdown 실험이 3 종류의 Orifice 를 사용하여 수행되었다. 사용된 실험부는 8, 1, 2 번 Orifice 로 직경이 각각 2, 4, 8 *mm* 이고 *L/d* 가 1 로 일정하다. 이 실험은 원자력발전소의 소형 냉각재 상실사고를 모의하는 파단부를 설계하기 위한 자료를 얻기 위하여 수행되었다. 실험은 가압기내 유체의 상태를 실험조건과 일치시킨 후 QOV 를 개방하여 수행되었다. 실험중 질소공급장치는 가압기와 단절되었으며, 가압기와 실험부 사이의 배관에는 Tracer Heater 가 부착되어 배관온도를 가압기내 유체 온도와 같게 유지하도록 하였다.

1 번 Orifice 를 사용한 실험 (2 번 Blowdown 실험) 에서 측정한 가압기 압력, 유량변화, 및 유체 온도 변화가 그림 6-8 에 주어져 있다. 1.7 초에 밸브가 개방되면 가압기 압력 (11.8 *MPa*) 은 급격히 감소한 후 약간의 정체상태를 유지하다가 일정한 속도로 감소하였으며, 최종 압력은 9.5 MPa 였다. Blowdown 시 유량 변화는 그림 7 에 주어져 있다. 밸브가 개방되면, 약간의 시간 간격을 두고, 유량이 최대치에 도달한 후 급격하게 감소하다가 다시 증가하기 시작하였다. 이러한 현상은 밸브 개방 특성과 유동 천이 현상 때문에 발생한 것으로 추측된다. Blowdown 이 진행되면 가압기내 압력이 감소하고 또한 과냉도가 감소하기 때문에 유량은 천천히 감소한다.

가압기 출구에서의 물 온도는 실험기간동안 거의 일정한 값 (298 ℃) 을 유지하고 있다. 이에 반하여 실험부 입구의 유체 온도는 Blowdown 이 시작할 때의 가압기 유체온도보다 훨씬 낮은 온도 (255 ℃) 로 유지되다가 QOV 가 열려 배관 내부의 물이 밀려 실험부를 통과함에 따라 급격히 가압기 내부의 유체온도로 접근하고 (294 ℃) 있다. 한편 유량계 입구의 유체 온도는 약 280 ℃ 에서 밸브가 열림과 동시에 가압기 출구온도로 상승되었다. Blowdown 전 및 초기에 실험부 입구에서의 유체 온도가 낮은 이유는 배관을 가열하는 Tracer Heater 의 용량 및 설치방법이 부적절하였기 때문으로 생각된다.

Blowdown 이 시작하고 약 15 초가 경과하면 실험부 입구의 유체온도는 가압기 유체온도와 근접하여 일정 온도차 (10 ℃) 이내로 유지되었다. 실험부에서의 과냉도는 Blowdown 초기에는 상당히

크다가 (75 ℃) 가압기 물이 실험부에 도달하면서 감소하기 시작하였다. 즉 실험부 입구에서의 유체온도가 증가하고, 포화온도는 가압기 압력이 감소함에 따라 계속 감소하기 때문에 과냉도도 따라서 감소하였다. 최종 과냉도는 12 ℃ 로 실험기간 동안 실험부 입구에서의 유체는 과냉각 (Subcooled) 상태를 유지하였다.

나머지 27 개의 Blowdown 실험결과도 2 번 Blowdown 실험결과와 매우 유사하다. 다만 과냉도가 작은 경우, 압력이나 유량은 과냉도가 큰 경우에 비하여 서서히 감소하였다. 즉, 같은 압력 및 실험부에서, 과냉도가 작을수록 유량은 작았으며, 압력변화도 따라서 작았다. 모든 Blowdown 실험에서의 실험부 입구에서의 유체는 과냉각 상태를 유지하였다.

4. 임계질량유속 상관관계식 개발

4.1 Square Edge Orifice 에 대한 임계질량유속 상관관계식

길이가 길고 *L/d* 가 큰 유로에 대한 임계질량유속은 무차원질량유속 (G^*) 과 무차원과냉도 (DT^*_{sub}) 로 표시할 수 있음을 박 등은 증명한 바 있다 [2-4]. 무차원질량유속과 무차원과냉도는 다음과 같이 정의된다.

$$G^* = \frac{G}{G_{ref}} \tag{1}$$

$$\Delta T^*_{sub} = \frac{\Delta T_{sub}}{T_{sat} - T_{ref}} \tag{2}$$

여기서,

$$G_{ref} = C_{d,ref}\{2\,r\,(P_o - P_b)\}^{0.5}_{ref} \tag{3}$$

이러한 인자가 소구경 Square Edge Orifice 에도 적용될 수 있는 지 여부를 확인하기 위하여 본 연구에서 도출된 실험결과를 해석하였다. 그림 9 는 그림 3 에 표시한 실험자료를 G^* - DT^*_{sub} 좌표로 표시한 그림이고, 그림 10 은 그림 5 에서의 자료를 전환한 그림이다. 그림들에서 보는 바와 같이 유체의 상태나 실험부의 형상과 상관없이, 소구경 Square Edge Orifice 에서의 무차원질량유속은 무차원과냉도 만의 함수로 표시할 수 있다. 따라서, 소구경 Square Edge Orifice 에서의 임계유동에서 유체의 초기조건은 무차원과냉도로 대표될 수 있으며, 또한 실험부 Geometry 는 방출계수 ($C_{d,ref}$) 로 표현될 수 있다. 즉 동일한 초기 유체조건에서, 각기 다른 두 유로에서의 찬 물이 흐를 때의 방출계수가 서로 같으면, 임계질량유속은 서로 같게 된다.

8 개 Orifices 에서 수행된 정상상태 임계유동실험에서 얻어진 유량자료를 G^*-DT^*_{sub} 좌표로 환산하여 그림 11 에 표시하였으며 Curve Fitting 을 통하여 다음과 같은 임계질량유속 상관관계식을 얻었다.

$$G_c = C_{d,ref}\{2\,r\,(P_o - P_b)\}^{0.5}_{ref}\left[1.04 - \frac{3.28}{1 + \exp\{(\Delta T^*_{sub} + 1.1)/0.488\}}\right] \tag{4}$$

사용된 자료는 총 327 개이고, 상관관계식에 대한 상대평균값은 0.00, 상대 표준편차는 0.02 이다.

이 상관관계식은 길이가 긴 유로에 대하여 유도된 상관식과 동일한 형태를 취하고 있다. 다만 이 상관식에 의해 계산된 유속은 같은 초기조건에서의 긴 유로에 대한 유속보다 훨씬 더 크다.

4.2 임계질량유속 상관관계식 평가

도출된 소구경 Square Edge Orifice 에 대한 임계질량유속 상관관계식을 검증하기 위하여 본 연구에서 수행된 Blowdown 실험자료와 외부에서 수행된 연구에서 도출된 실험자료를 평가하였다. 상관관계식에서의 P_o, T_o 값은 Orifice 입구에서의 압력 및 온도이고, T_{sat} 는 P_o 에 대한 포화온도 값이다. 한편 P_b 는 0.103 *MPa* 로 가정하였다. Blowdown 실험에서 $C_{d,ref}$ 값은 가압기의 물이 Orifice 입구에 도달하였을 때를 기준으로 역산하고 실험기간동안 변화하지 않는다고 가정하였다. 한편 외부 실험자료에 대하여는 이론식으로 $C_{d,ref}$ 값을 구하거나, 또는 가장 높은 과냉도를 갖는 경우에 대한 $C_{d,ref}$ 값을 상관관계식으로 구하고 그 값을 전 자료에 대하여 동일하게 적용하였다.

2 번 Orifice 에서의, 압력이 높고 (15.2 *MPa*) 온도가 높은 경우 (323 °*C*) 에 대한, 실험시 측정한 유량과 예측치와의 비교가 그림 12 에 주어져 있다. 상관관계식은 Blowdown 초기의 유량을 과대평가하며, 또한 후기의 유량도 어느 정도 과대 예측하고 있다. 초기 유량을 과대 평가하는 이유는 상관관계식이 밸브 개방 특성과 유동천이 현상을 고려하지 못하기 때문이다. 즉, 상관관계식은, 밸브의 개방여부와 밸브 개방에 따른 유동천이현상을 고려하지 않고, 기계적으로 초기조건과 방출계수만으로 유량을 계산하기 때문에 이러한 과대예측 현상이 발생한다. 한편 후기 유량을 약간 과대평가하는 이유는 상관관계식의 원천적인 특성 때문이다. 즉 관계식은 과냉도가 아주 작은 영역에서 유량을 과대평가하는 경향이 있는 것으로 밝혀졌다. 그러나 오차는 그렇게 크지 않으며, 관계식은 실험시 측정된 유량의 변화를 대체적으로 잘 예측하고 있다고 생각된다.

그림 7 은 1 번 Orifice 에 대한 상관관계식에 의한 예측치와 실험자료를 비교하여 준다. 상관식은 이 실험에서의 유량을, 실험 초기를 제외하고는, 잘 예측하고 있다. Blowdown 초기에 유량을 과대 평가하는 경향은 2 번 실험부의 경우와 동일하다. 나머지 Blowdown 실험에 대하여 상관식을 적용한 결과 상기한 것과 동일한 결과를 얻었다. 따라서 본 상관관계식은 본 연구에서 수행된 여러 Orifice 형상 및 초기조건에 대한 임계유량을 잘 예측하고 있다고 생각된다. 특히 과냉도가 큰 경우에 대하여는 유량을 잘 예측한다. 한편 상관식은 과냉도가 아주 작아지면 과대예측하는 경향이 있다. 그러나 오차범위는 크지 않다.

매우 짧은 길이를 갖으면서 *L/d* 가 2 보다 작은 실험부에 대한 임계유동 실험 자료는 그리 많지 않다. 본 연구에서는 이 중 Sozzi & Sutherland [10] 의 실험자료와 Xu [11], 및 Shrock [12] 의 Venturi 실험자료를 대상으로 상관관계식을 평가하였다. 그림 13 은 직경이 12.7 *mm* 이고 길이가 4.7 *mm* 인 아주 짧은 Pipe 에 대한 실험자료를 상관식에 의한 예측치와 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 상관식은 이러한 Pipe 에 대한 임계유량도 잘 예측하고 있다 (이 계산에서는 이론식으로 계산된 하나의 방출계수가 사용되었다). 그 밖에 Elliptic Entrance 를 갖고 그 외각에 아주 짧은 Pipe 가 달려 있는 경우 (*d*=12.7 *mm*, *L*=0, 및 12.7 *mm*) 를 평가한 결과 상대 표준편차 7 % 이내로 유량을 예측할 수 있었다.

Xu 및 Schrock 등은 짧은 (전 길이 100 *mm* 이하, Throat 내경 6.4 *mm* 이하) Venturi 를 사용하여 임계유동현상을 조사하였다. 그림 14 는 상관식과 Xu 의 실험자료를 비교하고 있으며, 상관식은 상대표준편차 6 % 이내로 임계 유량을 예측하고 있다. 또한 Schrock 등이 수행한 실험 자료도 상관관계식은 잘 예측하고 있다.

임계질량유속 상관관계식을 본 연구에서의 자료와 외부 실험자료를 사용하여 평가한 결과 본 상관관계식은 *L/d* 가 2 이하인 Square Edge Orifice 와 길이가 매우 짧은 파이프에서의 임계유량을 잘 예측하고 있다고 판단되었다. 본 식이 이렇게 길이가 짧은 기하학적 구조를 가진 시험부에서의 유량을 잘 예측할 수 있다는 사실은, 기하학적 구조는 방출계수로 대표되며, 또한 초기조건은 무

차원과냉도로 대표된다는 본 상관관계식의 기본 가정이 타당하다는 것을 입증한다

5. 파단부 설계 방안

원자력발전소의 냉각재상실사고시 원자로 용기내 유체는 파단부를 통하여 외부로 방출된다. 냉각재상실에 따른 노심 및 원자로냉각재통에서의 각종 열수력학적 현상은 방출되는 유체의 양에 따라 변화하기 때문에, 냉각재상실사고를 소형 실험장치로 모의하기 위하여는 파단부를 통하여 방출되는 유체의 양과 전체보유량 (Water Inventory) 의 비가 원형과 실험시설에서 동일하여야 한다. 따라서 실험장치의 파단 모의부 설계는 매우 신중하게 결정되어야 한다.

전술한 바와 같이 발전소에서 소형파단 냉각재상실사고가 발생하면 그 때 파단부의 형상은 대체로 Square Edge Orifice 형식의 유로가 된다. 냉각재 상실사고시 파단부를 통하여 방출되는 유량은, 본 연구를 통하여, 방출계수와 초기조건의 함수로 정의 될 수 있음을 증명하였다. 따라서 실제 파단부에서의 방출계수와 모형 파단부에서의 방출계수는, 모형에서 파단부 면적이 체적비로 축소되었다면, 서로 동일하여야 한다. 만약 이 두 값이 서로 다를 경우 파단부로 방출되는 유체의 유속은 서로 틀리며, 이 경우 실험시설은 실제 발전소의 냉각재방출에 따른 각종 열수력현상을 재현할 수 없게 된다.

예로, 일본의 대표적인 원자력발전소 관련 종합실험시설인 LSTF 시설에서는 파단부로 Sharp Edge Orifice 를 사용한다 [13]. 이에 반하여 불란서의 BETHSY 시설에서는 Smooth Entrance 를 갖는 파이프로 파단부를 모의하고 있으며 [14], 이 두 시설에서의 파단부 면적은 Volume Scale 된 값을 사용하고 있다. 원자력 발전소의 대표적인 소형파단 냉각재상실사고중 하나인 2” 파단사고의 경우를 모의할 때, 두 파단부 형태에서의 방출계수는 각각 0.61 (LSTF) 과 0.88 (BETHSY) 이 된다. 이에 반하여 실제 발전소에서 이러한 파단이 발생한 경우, 파단부가 Sharp Edge Orifice 형태이라면, 방출계수의 값은 0.79 가 된다. 따라서 LSTF 의 경우 2” 파단 모의 사고시 방출되는 유량은 실제의 78 % 에 불과하며 따라서 LSTF 에서의 Blowdown 은 실제보다 천천히 진행될 것이다. 이에 반하여 BETHSY 의 경우는 실제보다 약간 빠르게 Blowdown 이 진행한다.

또 다른 대표적 사고중 하나인 6” 파단의 경우 실제 발전소, LSTF, 및 BETHSY 에서의 방출계수는 0.66, 0.63, 및 0.94 가 된다. 따라서 LSTF 의 경우 6” 파단 사고는 실제와 매우 비슷하게 진행되는 데 반하여, BETHSY 에서는 실제의 140 % 유량이 외부로 방출된다. 따라서 BETHSY 의 Blowdown 은 매우 빠르게 진행될 것으로 예상된다.

이상과 같이 실험장치의 모의 파단부 형상은 실제 발전소를 실험장치로 모의하는 데 매우 중요하다. 따라서 실험장치의 모의 파단부 형태는 원형에서의 형태를 축소한 모양으로 제작하여 방출계수가 원형과 모형에서 서로 같도록 하는 것이 좋다고 생각된다. 즉 파단부 형상을 Square Edge Orifice 로 제작하는 것이 바람직하다고 사료된다. 이러한 형상을 채택하면 파단부 설치 및 교체가 매우 용이하게 되는 장점이 있다. 만약 파단부가 Square Edge Orifice 형태를 취할 수 없는 경우, 예로 BETHSY 와 같은 Long Nozzle 형상을 취할 경우, 파단부의 방출계수는 원형에서의 방출계수와 같도록 설계되어야 한다. 또는 LSTF 와 같이 Sharp Edge Orifice 를 파단부로 사용할 경우에는, 사고 종류에 따라서는 방출유량을 보존하기 위하여, 파단부 직경을 적절하게 증감시킬 필요가 있다.

6. 결론

소구경 Square Edge Orifice 를 통한 임계유동에 대한 현상을 연구하고, 소형실험장치에서 사용할 모의 파단부 설계자료를 생산하기 위하여 Blowdown and Condensation (B&C) Loop 에서 임계유동실

험을 수행하였다. 실험에서는 총 8 가지의 Orifice 가 사용되었으며 정상상태 임계유동실험 및 Blowdown 실험이 수행되었다.

정상상태 실험결과 소구경 Square Edge Orifice 에서의 임계질량유속은 실험부의 방출계수 및 유체의 초기조건으로 예측될 수 있었으며, 이 결과를 사용하여 임계질량유속 상관관계식을 개발하였다. 상관관계식은 본 연구에서의 Blowdown Test 결과와 길이가 아주 짧은 실험부를 사용한 외부의 연구자료를 사용하여 평가되었다. 그 결과 본 상관관계식은 Square Edge Orifice 와 길이가 아주 짧은 Pipe 에서의 Blowdown 시 임계유속을 정확하게 예측할 수 있었다.

대형 발전소나 화학 공장에서의 관 파단에 따른 열수력현상을 재현하기 위한 실험장치에서 파단부의 설계는 매우 중요하다. 기존의 파단부 모의장치를 조사하였으며, 최적 파단부 설계방안을 제시하였다.

Acknowledgement

This project has been carried out under the Nuclear R&D Program by MOST

Nomenclature

$C_{d,ref}$	discharge coefficient of 20 °C water, $(f \times L/d + K)_{ref}^{-0.5}$
D	test section inlet diameter, mm
d	test section inside diameter, mm
f	friction factor
G_c	critical mass flux, kg/m^2-s
G	mass flux, kg/m^2-s
G_{ref}	mass flux of 20 °C water, kg/m^2-s
G^*	dimensionless mass flux, G/G_{ref}
K	test section form loss coefficient
L	test section length, mm
P_o	stagnation pressure, Pa
P_b	back pressure, Pa
ref	refer to ambient temperature (20 °C)
T_o	stagnation temperature, °C
T_{ref}	ambient temperature, 20 °C
T_{sat}	saturation temperature corresponding to P_o
DT_{sub}	subcooling, $T_{sat} - T_o$
DT^*_{sub}	dimensionless subcooling, $DT_{sub} /(T_{sat} - T_{ref})$
r	density of water, kg/m^3

References

[1] E. Elias and G.S. Lellouche, "Two-Phase Critical Flow," Int. J. Multi-phase Flow, Vol. 20, Suppl., pp. 91-168, 1994

[2] C.K. Park, “An Experimental Investigation of Critical Flow Rates of Subcooled Water through Short Pipes with Small Diameters,” Ph. D. Thesis, KAIST, Korea, 1997

[3] C.K. Park, J.W. Park, M.K. Chung, and M.H. Chun, “An Empirical Correlation for Critical Flow Rates of Subcooled Water Through Short Pipes with Small Diameters,” J. Kor. Nucl. Soc., Vol. 29, No. 1, pp. 35-44, 1997

[4] C.K. Park et al., “Investigation of Two-Phase Critical Mass Flux,” KAERI/TR-887/97, 1997

[5] I.E. Idelchick, “Handbook of Hydraulic Resistance,” 2nd Edition, Hemisphere Publishing Corporation, 1986

[6] H. Uchida, and H. Nariai, “Discharge of Saturated Water Through Pipes and Orifices,” Proc. of the Third International Heat Transfer Conference, Vol. 5, pp. 1-12, 1966

[7] 송철화 외, “열수력 종합실험장치 척도해석,” 내부보고서, 53192-FS0-DA001, Rev. 0, WS-2, 열수력안전연구팀, 한국원자력연구소, 1999

[8] 박춘경, 송철화, 조석, 천세영, 정문기, “고압증기 방출 및 응축 실험장치의 구축,” KAERI /TR-941/98, 한국원자력연구소, 1997

[9] T.J. Rohloff and I. Catton, "Low Pressure Differential Discharge Characteristics of Saturated Liquids Passing Through Orifices," Transactions of the ASME, Vol. 118, pp. 520-525, 1996

[10] G.L. Sozzi, and W.A. Sutherland, "Critical Flow of Saturated and Subcooled Water at High Pressure," NEDO-13418, 1975

[11] J.L. Xu, T.K. Chen, and X.J. Chen, “Critical Flow in Convergent-Divergent Nozzles with Cavity Nucleation Model,” Experimental Thermal and Fluid Science 1997; 14: 166-173

[12] V.E. Schrock, E.S. Starkman, and R.A. Brown, "Flashing Flow of Initially Subcooled Water in Convergent-Divergent Nozzles," J. of Heat Transfer, Vol. 99, No. 2, May 1977

[13] ROSA IV Group, “ROSA-IV Large Scale Test Facility (LSTF) System Description,” JAERI-M 84-237, January 1985

[14] BETHSY Team, "Selected Results from Characterization Tests of the BETHSY Break Nozzles (2" and 6") Conducted in the Super Moby-Dick Facility," Addendum to NOTE SETh/LES/90-104, CEN Grenoble, 1990

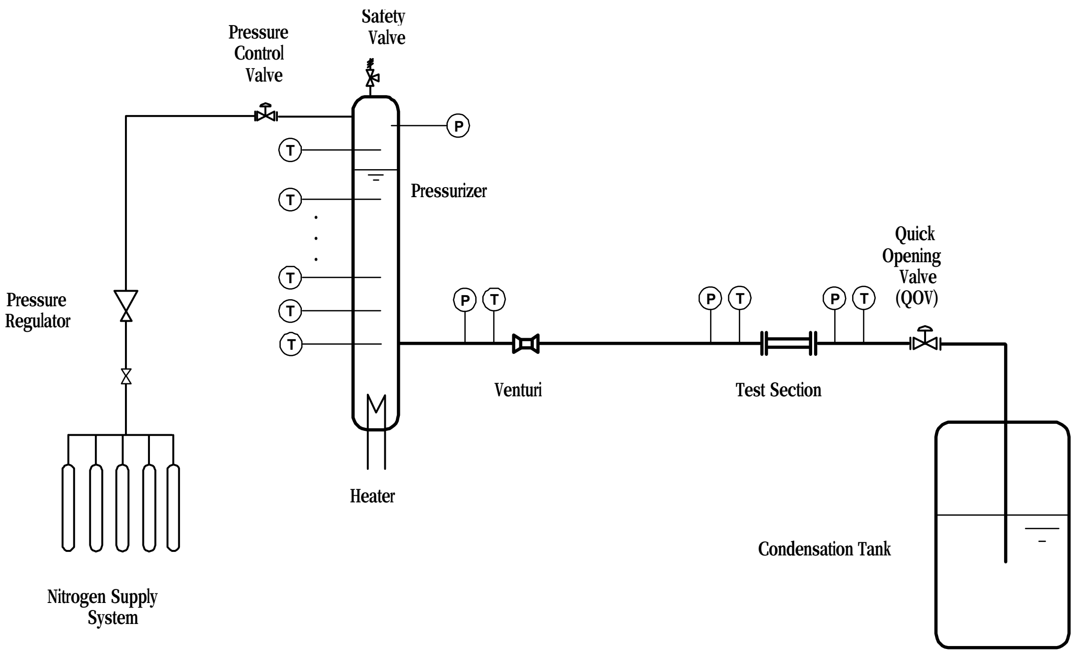

Fig. 1.   Schematic Diagram of Blowdown and Condensation (B&C) Loop

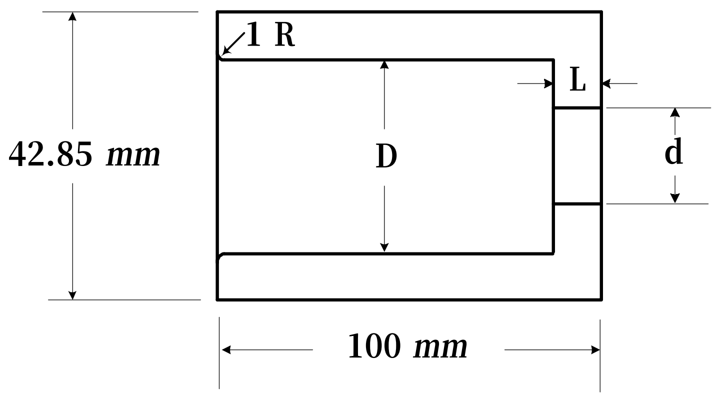

Fig. 2.   Test Section Geometry

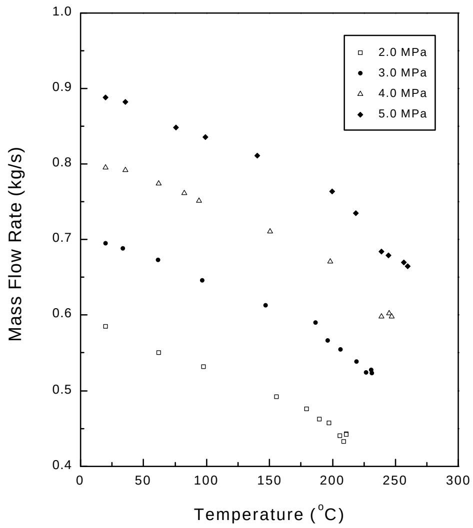

Fig. 3. Mass Flow Rate vs. Temperature for Test Section No. 1 (d=4 mm, L=4 mm)

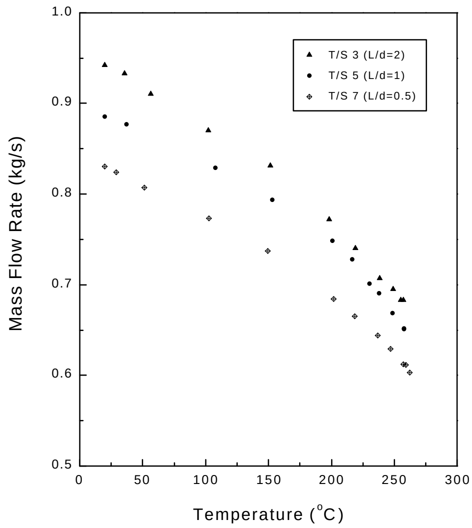

Fig. 4. Test Section Length Effect on Critical Mass Mass Flow Rate

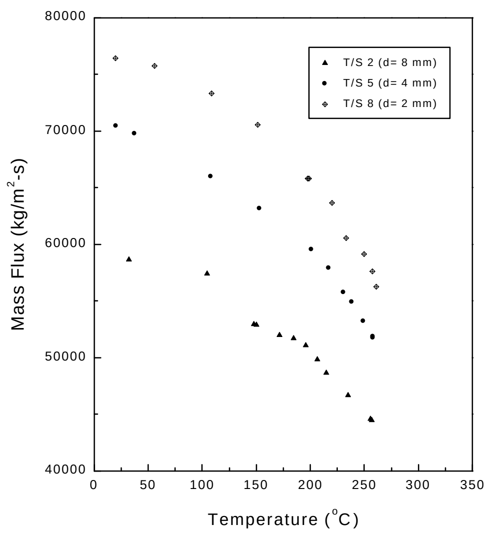

Fig. 5. Test Section Diameter Effect on Critical Mass Flux

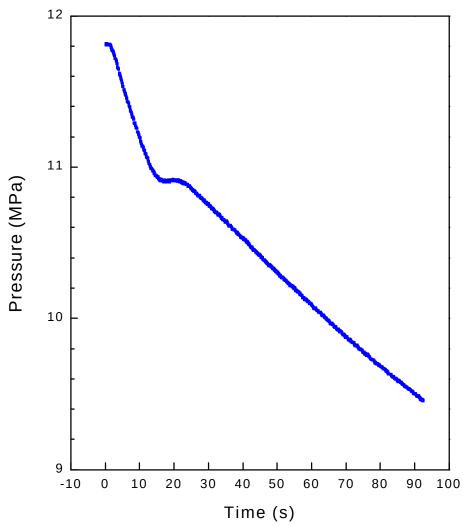

Fig. 6. Pressure Variation during Blowdown Test No. 2 (P_o=11.8 MPa, T_o=298 ^oC)

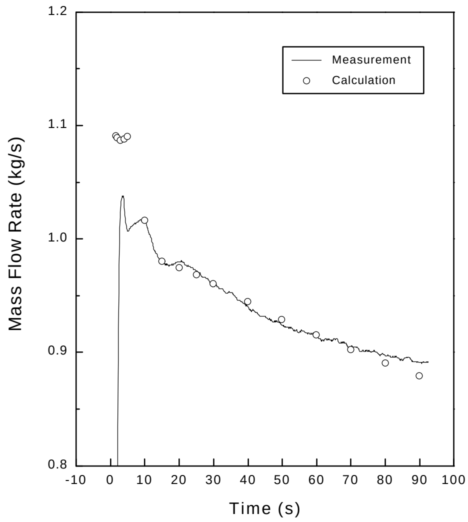

Fig. 7. Mass Flow Rate vs. Time during Blowdown Test No. 2

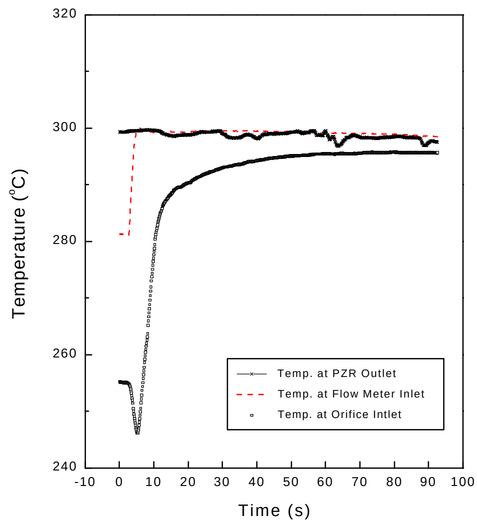

Fig. 8. Fluid Temperature vs. Time during Blowdown Test No. 2

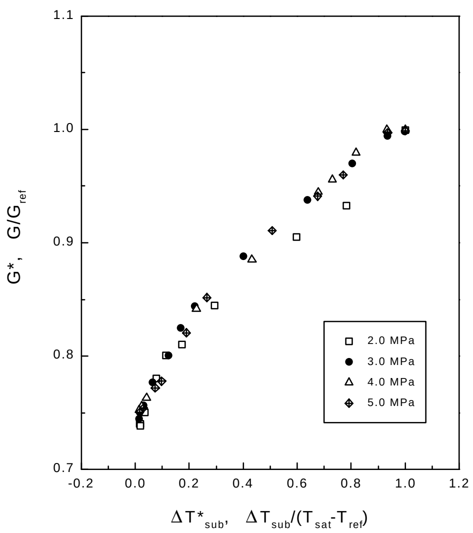

Fig. 9. Dimensionless Mass Flux vs. Dimensionless Subcooling during Steady State Tests for Test Section No. 1

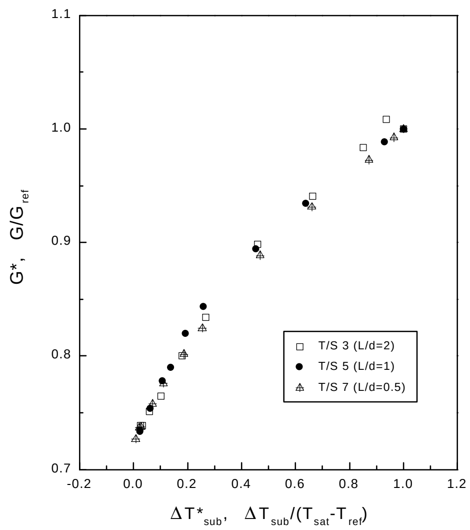

Fig. 10. Dimensionless Mass Flux vs. Dimensionless Subcooling during Steady State Tests for the Same *L/d* Test Sections

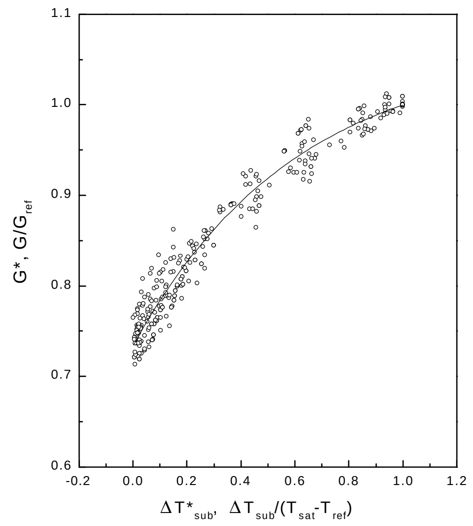

Fig. 11. Dimensionless Mass Flux vs. Dimensionless Subcooling during Steady State Tests

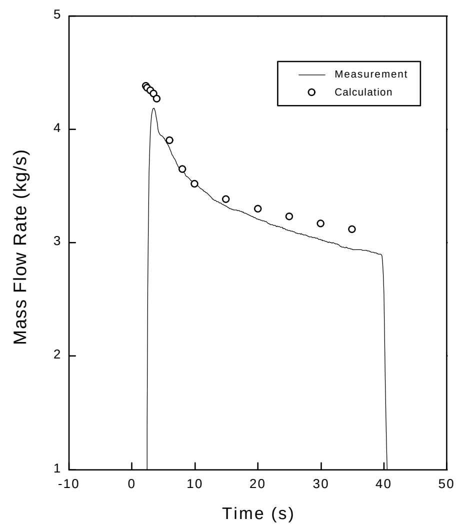

Fig. 12. Comparison between Model Prediction and Blowdown Test No. 12 (P_o=15.2 *MPa*, T_o=323 ^oC)

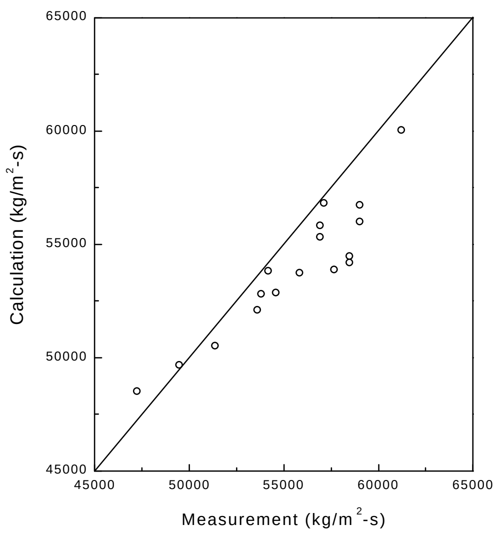

Fig. 13. Comparison between Model Prediction and Test Result of Sozzi and Sutherland for Short Pipe [10]

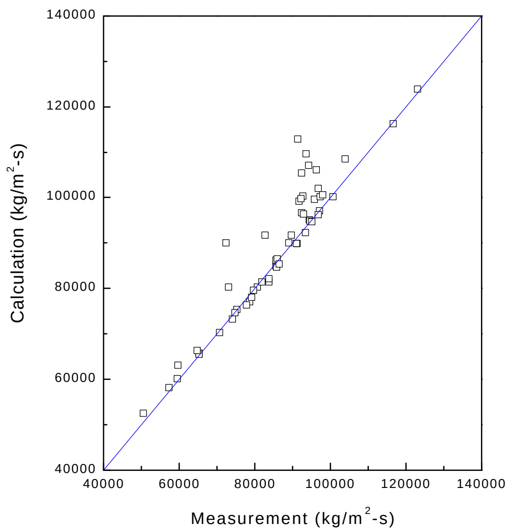

Fig. 14. Comparison between Model Prediction and Test Result of Xu et al. [11]