

다공판 유로내의 유동한계(CCFL)에 대한 실험적 연구

이진기, 양승우, 권정태*, 강용태†
경희대학교 대학원, *호서대학교, †경희대학교 기계·산업시스템 공학부

The experimental study on the counter-current flow limit
in the flow path with a porous plate

Jin-Ki Lee, Seung-Woo Yang, Jung-Tae Kwon*, Yong Tae Kang†
Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Kyung gi 449-701, Korea
*Department of Mechanical Engineering, Ho Seo University, Chung-nam 336-795, Korea

ABSTRACT: Experiments of Counter-Current Flow Limit(CCFL or Flooding) is performed to improve the drawbacks of Wallis'Correlation which neglects the effects of channel size, channel length, injection method and the boundary conditions at the inlet of liquid and gas phase. In this study, CCFL is observed by changing shape of porous plate using air and water. Results show that as the size of porous increases, CCFL with round shape of the porous plate decreases. In the present study, a CCFL correlation is developed and the CCFL map is proposed based on the present experimental results. developed by this experimental study.

Key words: CCFL, CANDU, 유동한계, 다공판, 원자력발전

———— 기 호 설 명 ————

J : 유속 [m/s]
 J^* : 무차원 표면 유속
 C : CCFL조건에 대한 상관식 계수
 m : CCFL조건에 대한 상관식 계수
 A : 면적 [m^2]
 g : 중력 가속도 [m/s^2]
 D : 직경 [m]

그리스 문자

α : TSP에 대한 종면적의 비
 ρ : 밀도 [kg/m^3]

하 첨 자

L : Liquid
 G : Gas
Total : Total test section
TSP : 관지지판

†Corresponding author
Tel.: +82-31-201-2990 FAX: +82-31-201-2990
E-mail address : ytkang@khu.ac.kr

1. 서론

현재 CANDU형 가압 중수로 원자로는 우리나라의 월성 원자력 발전소에서 채용되고 있다. 경

수로 원자로와 큰 차이는 없지만 운전 중에도 연료봉을 교체할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 그러나 이러한 CANDU형 원자력 발전소에서 칼렌드리아(Calandria)의 상부의곽 영역에 핵연료 교체 등과 같은 (+)반응도 상입이 있을 경우 액체영역제어계통의 격실 수위 및 국부출력이 급등하여 주기적으로 흔들리다(Cycling) 급락하는 불안정 현상이 발생한다. 이러한 불안정 현상이 발생되면 원자로가 정상적으로 제어되지 않기 때문에 운전자를 불안하게 함은 물론 원자력 발전소의 안정성과 경제성에 악영향을 미쳐 결국 신뢰성을 떨어뜨리는 결과를 가져온다.

현재 국내의 대부분의 CANDU형 원자로에서 이와 같은 불안정 현상이 발생되고 있으나 AEC L (Atomic Energy of Canada Limited)과 COG (CANDU Owner Group)에서도 정확한 원인 규명과 대책이 제시되지 못하고 있다. 다만 핵연료 교체 전에 해당 영역의 격실 수위를 인위적으로 낮춘다거나 불안정 현상이 발생했을 경우 독물질(Gd)을 투입하여 현상을 완화시키는 등의 임시방편에만 의존하고 있다. 또한 투입된 독물질은 중성자를 흡수한 후 방사능 폐기물이 되기 때문에 폐기물 발생 증가의 한 원인이 되고 있다.

이러한 CANDU형 원자로의 불안정 현상에 영향을 주는 상반류 유동한계 (CCFL, Counter - Current Flow Limit)에 관한 연구에는 Walli's의 Correlation⁽¹⁵⁾이 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 본상관식은 격실의 주입구 모양에 국한되어 있어 격실 내부에 다공판이 있는 CANDU형 원자로에 적용하기가 힘들다. 따라서 본 연구에서는 액체제어계통내의 지지판에서 유동한계 발생 메커니즘을 기류(He), 액류(H₂O) 및 유동면적(A_p) 조절에 따른 플러딩(Flooding) 실험을 통하여 CANDU형 원자로에서 적용할 수 있는 최적의 다공판 설계조건을 제시한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치의 전체 구성은 Fig. 1과 같이 경수순환 계통과 공기순환 계통으로 구성하였다. 경수순환 계통은 수조(Water Tank)에서 펌프를 통해 격실 상부로 경수를 공급하고 격실 하부의 펌프

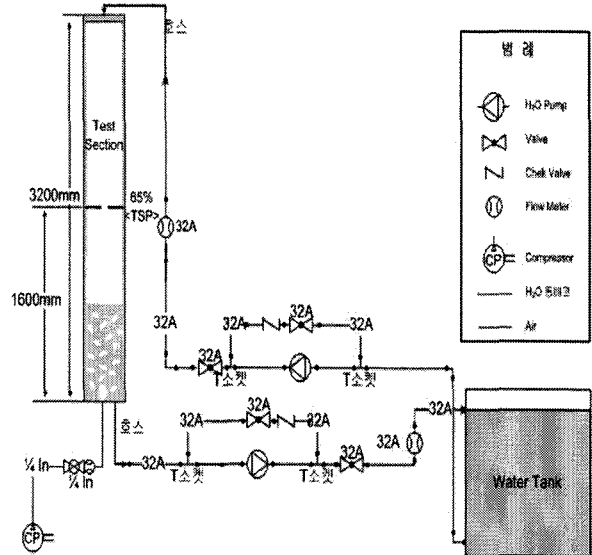


Fig. 1 Experimental apparatus

를 통해 격실내의 경수를 수조로 보내는 구조이다. 각각의 배관에는 유량계와 밸브를 설치하여 유출입량을 조절할 수 있다. 또한 유출입 배관에는 각각 외부로 빠지는 배관을 설치하여 유량 보정(Calibration)이 용이하도록 구성하였고, 펌프의 출입구에 바이패스 라인을 설치하여 유량조절시 걸리는 펌프의 부하를 줄이고 유량이 일정하게 공급될 수 있도록 하였다.

헬륨순환 계통의 경우 헬륨 대신 압축공기를 사용하였다. 물론 헬륨과 공기가 밀도, 점성 등 물성치의 차이가 있으나 두 기체 모두 밀도가 낮은 단순 기체(이상 기체: Ideal Gas)로 가정할 수 있기 때문에 격실 내에서의 유동 현상은 동일하다고 할 수 있다. 공기의 공급은 압축기를 사용하였으며 압축기의 토출압력이 매우 크기(약 1MPa)때문에 토출관 앞에 압력조절기(Regulator)를 설치하여 압축공기의 압력을 대기압(0.1MPa)까지 낮춘 후 격실하부로 공급하고 격실을 통과한 공기는 상부의 배관을 통해 대기로 빠져나간다. 따라서 배출관에는 밸브 및 유량계를 설치하지 않았다. 공기 공급관의 경우 경수 공급관과 마찬가지로 유량계와 밸브를 설치하여 유량을 조절하고 외부로 빠지는 배관을 설치하여 유량을 보정할 수 있는 구조로 구성하였다.

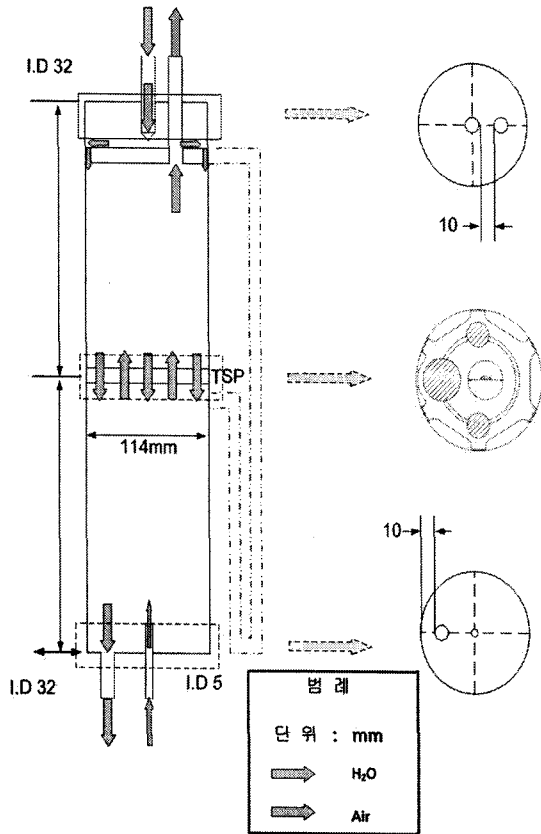


Fig. 2 Test Section

격실은 두께 3 mm의 원통형 아크릴 파이프를 사용하였고 격실 내부에 존재하는 경수와 헬륨의 유출입 배관은 큰 오차가 없는 관계로 생략하였다. 실제 격실과 동일하게 격실 상부에서 유입된 경수가 분류기에 의해 격실 벽면을 타고 흘러내려 격실 하부로 배출되게 설계 하였으며 경수 계통의 입·출구는 내경이 32mm인 동 파이프를 사용하였고, Air 계통의 입구는 내경 5 mm, 출구는 내경 32 mm인 동 파이프 사용하였다. 관지 지판은 10 mm의 두께로 제작하였고 관지 지판과 원통형 아크릴은 선행연구와 달리 일체형을 사용하여 누수에 의한 실험오차를 줄였다.

점선으로 표시된 것은 유동한계발생시 시험판 (Test section plate, TSP)하부와 섹션 상부와의 차압을 얻기 위하여 우레탄 호스를 설치하였다.

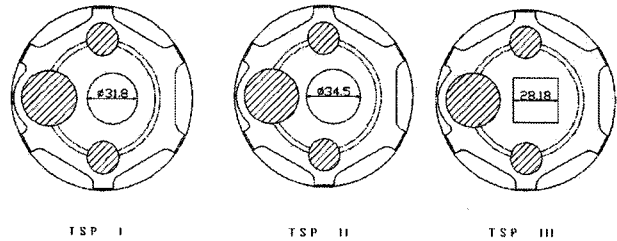


Fig. 3 The shape of TSP

2.2 실험 방법

Fig. 2는 시험부를 나타낸다. 1차 실험에서는 액류를 시험부 총길이의 30%에서 액류를 고정시킨 후 경수의 유입량을 늘려 80%에 도달 시켰다. 다시 수위를 고정시키고 공기의 유량을 변경하면서 유동한계를 관찰하였다. 이때 수위 변동은 발생하지만 유동한계는 발생하지 않았다. 또한 2차 실험에서는 공기의 유량을 일정하게 설정한 후 1차 실험과 동일하게 30%에서 80%까지 수위를 상승시키는 실험을 반복하여 시행 하였다.

이러한 2차 실험에서 유동한계의 발생을 관측할 수 있었다. 따라서 본 실험에서는 2차 실험과 동일한 방법으로 유동한계 관측실험을 수행하였다.

하부의 공기입구는 하부 경수의 출구에서 공기가 경수와 함께 유출되는 것을 방지하기 위하여 격벽을 사용하여 내측으로 높게 올렸다.

Fig. 3은 실험에서 사용된 TSP의 형상이다. TSP I는 기존에 사용되는 TSP의 형상과 동일 형상이다. TSP II는 TSP I에 비하여 공기 출입구의 면적을 10%정도 증가시켜 가공하였다. TSP III는 TSP I과 중심의 공기 출입구의 면적과 동일한 정사각형의 형상으로 가공하였다.

TSP의 전체출입구 면적을 10% 증가시켜 실험한 결과 유동한계의 발생이 현저하게 감소하는 것을 볼 수 있었는데, 이럴 경우 TSP의 강도에 문제가 발생할 것으로 보여 본 실험에서는 중심부의 공기 출입구 면적만을 증가시켜 실험을 수행하였다.

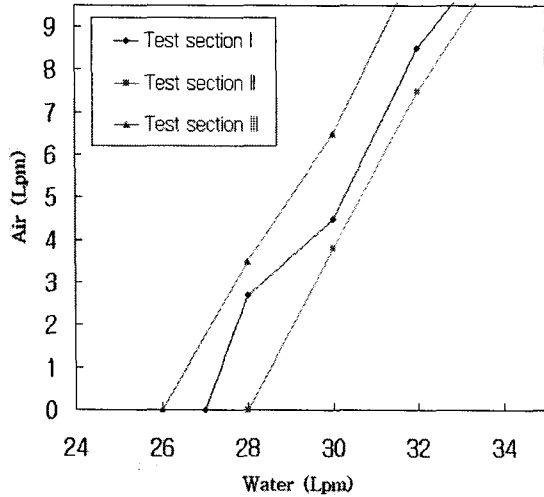


Fig. 4 CCFL Map

3. 실험결과 및 고찰

불안정 현상 모사실험에서 특정한 경수 배출량과 공기 유입량에서 격실내의 경수와 공기의 흐름에 이상 현상이 발생함을 확인 하였다. 이에 따라 경수 배출량과 공기 유입량을 일정 간격으로 변화시키면서 동일한 실험을 반복하여 이상 현상이 발생하는 경수 배출량과 공기 유입량의 범위를 확인하였다.

실험 결과 격실내의 경수와 공기의 흐름에 발생하는 이상 현상은 경수 배출량 및 공기 유입량의 유량에 따라 결정됨을 확인하였다. 특히 격실에서 배출되는 경수의 유량에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4 는 각각의 TSP에 따른 유동한계 발생의 경계를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 공기의 출구가 가장 큰 TSP II에서 유동한계의 발생이 가장 적은 것을 볼 수 있다. 이는 출입구의 면적이 커짐에 따라 TSP를 통과할 수 있는 물과 공기의 유량이 증가하기 때문에 나타나는 현상이라 할 수 있다. TSP I과 과 동일면적의 사각 통로를 가진 TSP III에서는 유동한계의 발생이 더 잦음을 관측할 수 있었다. 따라서 통로의 면적뿐만 아니라 통로의 형상에도 유동한계 발생 변수가 있음을 확인 할 수 있었고, 현재까지는 원형 통로에서 유동한계의 발생이 가장 낮음을 알 수 있다.

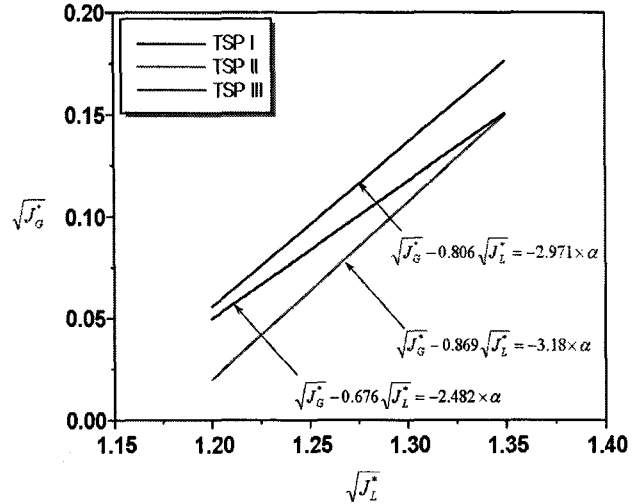


Fig. 5 CCFL Map for experimental correlation

본 실험을 통하여 각각의 TSP 유동한계 발생 지점에 관한 실험적 상관식을 Table 1과 같이 개발하였다.

$$\sqrt{J_G^*} + m\sqrt{J_L^*} = C\alpha \quad (1)$$

$$J^* = \frac{J \cdot \rho^{1/2}}{[g \cdot D (\rho_L - \rho_G)]^{1/2}} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{A_{TSP}}{A_{Total}} \quad (3)$$

Table 1. CCFL Correlation

	C	m	α
TSP I	-0.676	-2.482	0.3069
TSP II	-0.869	-3.180	0.3217
TSP III	-0.806	-2.971	0.3069

각각의 상관식의 실효성을 검증하기 위하여 실험값과 상관식값의 비교를 통해 $0 < \sqrt{J_G^*} < 0.20$
 $1.2 < \sqrt{J_L^*} < 1.35$ 에 대하여 $\pm 10\%$ 의 오차범위 내에서 일치함을 알 수 있다.

Fig.5는 본 연구에서 구한 상관식들을 이용하여 $1.2 < \sqrt{J_L^*} < 1.35$ 의 범위에서 값을 비교한 결과로써 실험결과와 같이 TSP II에서 CCFL의 발생이 가장 낮게 나타남을 볼 수 있으며, 그래프 또한 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 실험식을 통해서도 헬륨의 상반유동량에 대한 CCFL의 발생조건을 알 수 있다.

4. 결 론

다공판 유로내의 유동한계(CCFL)에 관한 실험 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 다공판의 면적이 넓어지면 유동할 수 있는 물과 공기의 유량이 많아져 유동한계의 발생이 낮아진다.
- (2) 동일 면적의 다공판에서도 다공판 형상에 따라 유동한계 조건이 달라진다. 지금까지는 중앙 통로가 원형이 다공판 성능이 가장 좋게 나타났다.
- (3) 실험을 통하여 다공판의 면적 및 형상에 따른 CCFL Map을 개발하였다. 이를 통하여 원자로 운전 시 유동한계가 발생하지 않도록 하는 최적운전조건을 제시하였다.
- (4) 실험을 통하여 각 다공판의 유로 면적 및 형상에 따른 아래와 같은 상관식을 개발하였다.

$$\sqrt{J_G^*} - 0.676\sqrt{J_L^*} = -2.482\alpha$$

< TSP I, $\alpha = 0.3069$, 원형형상 >

$$\sqrt{J_G^*} - 0.869\sqrt{J_L^*} = -3.18\alpha$$

< TSP II, $\alpha = 0.3217$, 원형형상 >

$$\sqrt{J_G^*} - 0.806\sqrt{J_L^*} = -2.971\alpha$$

< TSP III, $\alpha = 0.3069$, 사각형상 >

$$\text{where, } J^* = \frac{J \cdot \rho^{1/2}}{[g \cdot D (\rho_L - \rho_G)]^{1/2}}$$

이러한 상관식은 $\pm 10\%$ 범위 안에서 실험값과 일치함을 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 2004년도 산업자원부 전력산업연구개발사업(R-2004-B-201) 전력선행기술에 의하여 이루어진 연구로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Unit 1 Shutdown Event form 05. Jan. 2001, Caused by LZC System Malfunction, CNE-PROD CERNAVODA
2. Zone #1 Operating Data of Wolsong-2 (2003-11-21~22), Korea Hydro and Nuclear Power(KHNP)
3. Zone #13 Operating Data of Wolsong-2 (2002-10-30~31), Korea Hydro and Nuclear Power(KHNP)
4. Darlington NGS Unit 4 Flux Tilt Events, Oct. 30-31, 2001, COG/AECL CANDU Liquid Zone Control Workshop
5. LZC system instability of Wolsong-2, 1999, Korea Hydro and Nuclear Power(KHNP) Report
6. CANDU 6 Liquid Zone Control Units, 1995, Atomic Energy of Canada Limited(AECL), Jan.
7. Wolsung-1 Nuclear Generating Station Liquid Zone Control System, Sep. 1979, Atomic Energy of Canada Limited(AECL)
8. Final Safety Analysis Report Wolsung Unit 2, 3 & 4, Korea Electric Power Corporation (KEPCO)
9. Zone Control Assy. 2 Zone Assembly General Arrangement (XX-31751-2-1-GA-E), Atomic Energy of Canada Limited(AECL)
10. Reactivity Control Units. Zone Control Assy Baffle 2 (2 Zone) (XX-31751-28-1-DD-C), Atomic Energy of Canada Limited(AECL)

11. CANDU 6 Generating Station Physisc Design Manual (86-03310-DM-000 Rev.1_, Atomic Energy of Canada Limited(AECL)
12. B. Rouben, RFSP Program Description (TTR-370, Rev 1), 1995, Atomic Energy of Canada Limited(AECL)
13. Lamarsh, John R. 1983, Introduction to NUCL EAR ENGINEERING
14. James J. Duderstadt & Louis J. Hamilton, 1976, Nuclear Reactor Analysis
15. Graham. B. Wallis, 1969, One-diminsional Two-phase Flow
16. Yool-Kwon Oh, Sang-Jin Cho, Sang-Nyung, Kim and Jong-Won Lee, 1990, Counter- Current Flow Limit of a Vertical Two Phase(Water/Air)Flow
17. R. W. Fox, A. T. McDonald, 1992, Introduction to Fluid Mechanics
18. D.A. Jenkins, B. Rouben, 1993, Reactor Fueling Simulation Program(RFSP) User's Manual, Atomic Energy of Canada Limited(AECL)
19. Richard Nicholls, October 30-31 2001, COG Workshop on Liquid Zone Control System Gentilly 2 Experience