

다공판 유로 내의 유동한계(CCFL)에 대한 실험적 연구

양 승 우, 이 진 기, 권 정 태*, 김 상 념**, 강 용 태***

경희대학교 대학원, *호서대학교 기계공학부, **경희대학교 기계·산업시스템 공학부

The Experimental Study on The Counter-Current Flow Limit in The Flow Path with a Porous Plate

Seung-Woo Yang, Jin-Ki Lee, Jeong-Tae Kwon*, Sang Nyung Kim**, Yong Tae Kang***

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Kyung-gi 449-701, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Ho Seo University, Chung-nam 336-795, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Kyung-gi 449-701, Korea

(Received August 3, 2006; Revision received December 13, 2006)

ABSTRACT: A set of experiments of counter-current flow limit (CCFL) was performed to improve the drawbacks of Wallis' correlation which neglected 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 was observed by changing the shape of porous plate using air and water. The results show that as the size of porous increases, CCFL with a round shape of the porous plate start to disappear. In this study, the CCFL correlation was calculated and the corresponding CCFL map was developed based on the experimental results.

Key words: Counter-current flow limit(유동한계), Porous plate(다공판), Flow map(유동지도), Experimental correlation(실험적 상관식)

기 호 설 명

그리스 문자

A : 면적 [m^2]
 C : CCFL 조건에 대한 상관식 계수
 D : 직경 [m]
 g : 중력가속도 [m/s^2]
 J : 유속 [m/s]
 J^* : 무차원 표면유속
 m : CCFL 조건에 대한 상관식 계수

α : TSP에 대한 총면적의 비
 ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

G : 기류
 L : 액류
 $total$: 전체 시험부
 TSP : 시험부 지지판

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-201-8106

E-mail address: ytkang@khu.ac.kr

1. 서 론

현재 Canada Deuteriumoxide-Uranium(CANDU)

형 가압 중수로 원자로로는 우리나라의 월성 원자력 발전소에서 채용되고 있다. 경수로 원자로와 큰 차이는 없지만 운전중에도 연료봉을 교체할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 그러나 이러한 CANDU형 원자력발전소에서 연료봉의 상부의곽 영역(Zone)에 핵연료 교체 등과 같은 과일과정이 존재할 경우, 해당영역의 출력을 제어하는 액체영역 제어 계통의 격실수위 및 국부출력이 급등하여 특정기간(1~5일) 동안 주기적으로 흔들리다 급락하는 불안정 현상(Cycling)이 발생한다.⁽¹⁻²⁾ 이러한 불안정 현상이 발생되면 원자로가 정상적으로 제어되지 않기 때문에 운전자를 불안하게 함은 물론 원자력발전소의 안정성과 경제성에 악영향을 미쳐 결국 신뢰성을 떨어뜨리는 결과를 가져온다.⁽³⁾

현재 국내외 대부분의 CANDU형 원자로에서 이와 같은 불안정 현상이 발생되고 있으나 AECL (Atomic Energy of Canada Limited)과 COG (CANDU Owner Group)에서도 정확한 원인규명과 대책이 제시되지 못하고 있다. 다만 핵연료 교체 전에 해당영역의 격실수위를 인위적으로 낮춘다거나 불안정 현상이 발생했을 경우 독물질(Gd)을 투입하여 현상을 완화시키는 등의 임시방편에만 의존하고 있다. 또한 투입된 독물질은 중성자를 흡수한 후 방사능폐기물이 되기 때문에 폐기물 발생 증가의 한 원인이 되고 있다.⁽⁴⁾

이러한 CANDU형 원자로의 불안정 현상에 영향을 주는 상반류 유동한계(Counter-Current Flow Limit, CCFL)에 관한 연구에는 Walli's Correlation⁽⁵⁾이 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 위상관식은 격실의 주입구 모양에 국한되어 있어 격

실 내부에 다공판이 있는 CANDU형 원자로에 적용하기가 힘들다. 따라서 본 연구에서는 액체 제어 계통 내의 지지판에서 유동한계 발생 메커니즘을 기류(He), 액류(H₂O) 및 유동면적(A_D) 조절에 따른 CCFL 실험 및 2상 유동해석모델을 통하여 이론적으로 규명하고, CANDU형 원자로 설계시 유량의 변화에 따른 적절한 다공판 설계조건을 제시하고자 한다.

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 펌프를 통해 격실 내의 경수를 수조로 보내는 구조이다. 각각의 배관에는 유량계와 밸브를 설치하여 유출입량을 조절할 수 있다. 또한 유출입 배관에

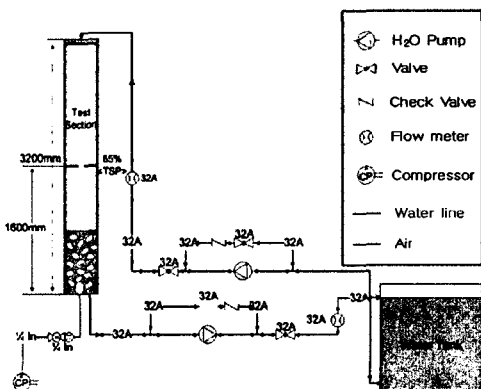


Fig. 1 Experimental apparatus.

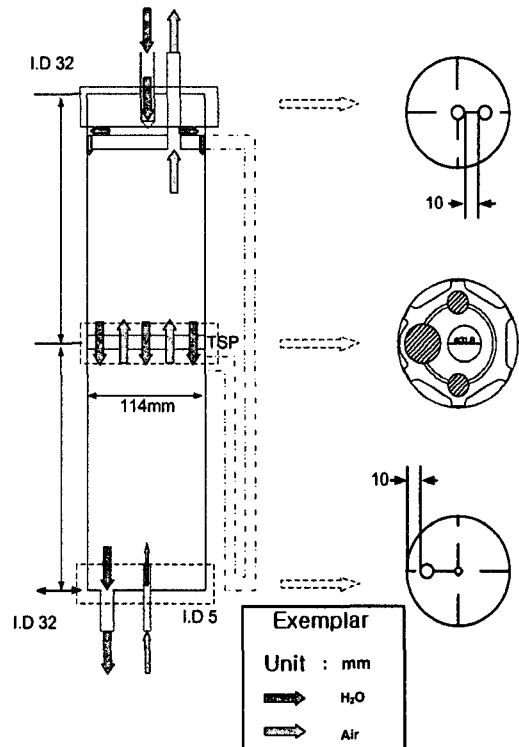


Fig. 2 The shape of TSP.

는 각각 외부로 빠지는 배관을 설치하여 유량보정이 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 공기는 밀도, 점성 등의 물성치 차이가 있으나 두 기체 모두 밀도가 낮은 단순 기체로 가정할 수 있기 때문에 격실 내에서의 유동현상은 유사하다고 할 수 있다. 공기의 공급은 압축기를 사용하였으며 압축기의 토출압력이 매우 크기(약 1 MPa) 때문에 토출관 앞에 압력조절기(Regulator)를 설치하여 압축공기의 압력을 대기압(0.1 MPa)까지 낮춘 후 격실 하부로 공급하고 격실을 통과한 공기는 상부의 배관을 통해 대기로 빠져나가는 구조로 구성하였다. 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. 2는 시험부의 단면을 나타낸다. 격실은 두께 3mm의 원통형 아크릴 파이프를 사용하였다. 실제 격실과 동일하게 격실 상부에서 유입된 경수가 액류 분배기에 의해 격실 벽면을 타고 흘러 내려 격실 하부로 배출되게 설계하였으며, 경수

계통의 입·출구는 내경이 32mm인 동파이프를 사용하였고, 공기 계통의 입구는 내경 5mm, 출구는 내경 32mm인 동파이프를 사용하였다. 시험부(TSP)는 10mm의 두께로 제작하였고 시험부와 원통형 아크릴은 일체형을 사용하여 누수에 의한 실험오차를 줄였다. 점선으로 표시된 것은 유동한계 발생시 TSP 하부와 상부와의 차압을 얻기 위하여 설치한 차압계 계통을 나타낸다.

2.2 실험방법

유동한계란 기체와 공기의 상반된 유동이 경계면에서 발생된 응력에 의하여 더 이상 흐르지 못하는 현상을 의미한다. 본 연구에서는 유동한계가 발생되지 않는 안정영역(Stable), 요동이 발생하는 천이영역(Transition), 그리고 완전한 유동한계가 발생하는 불안정영역(Unstable)의 세 구간으로 나누어 측정하였다. 유동한계의 판단기준은 가시화 과정을 통하여 액류와 기류가 완전히 분리되는 시점을 기준으로 하였다.

초기 실험에서는 시험부 길이의 30%로 수위를 고정시킨 후 경수의 유입량을 늘려 80%에 도달시켰다. 다시 수위를 고정시키고 공기의 유량을 변경하면서 유동한계를 관찰하였을 때 수위변동은 발생하지만 유동한계는 발생하지 않았다. 또한 본 실험에서는 공기의 유량을 일정하게 설정한 후 초기 실험과 동일하게 30%에서 80%까지 수위를 상승시키는 반복실험을 통하여 유동한계를 관측하였다.⁽⁶⁾

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

Fig. 3은 실험에서 사용된 TSP의 형상이다. Table 1에 각 형상에 대한 조건들이 나타나 있다. TSP I은 현재 원자력에서 사용 중인 조건이며, TSP II와 TSP IV는 TSP I에 비하여 공기 출입구의 면적을 각각 10%, 20% 증가시켜 가공

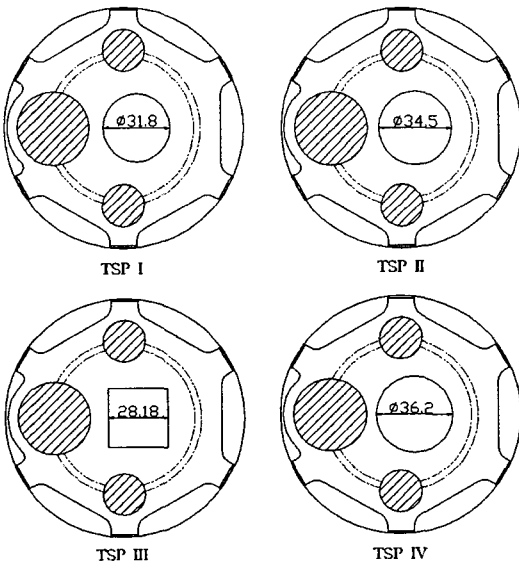


Fig. 3 The shape of TSP.

Table 1 Geometry of the TSP

	TSP type	Inner diameter (m)	Area (m ²)
TSP I	Circle	0.0318	0.0029
TSP II	Circle	0.0345	0.0031
TSP III	Square	Side length 0.02818	0.0029
TSP IV	Circle	0.0362	0.0032

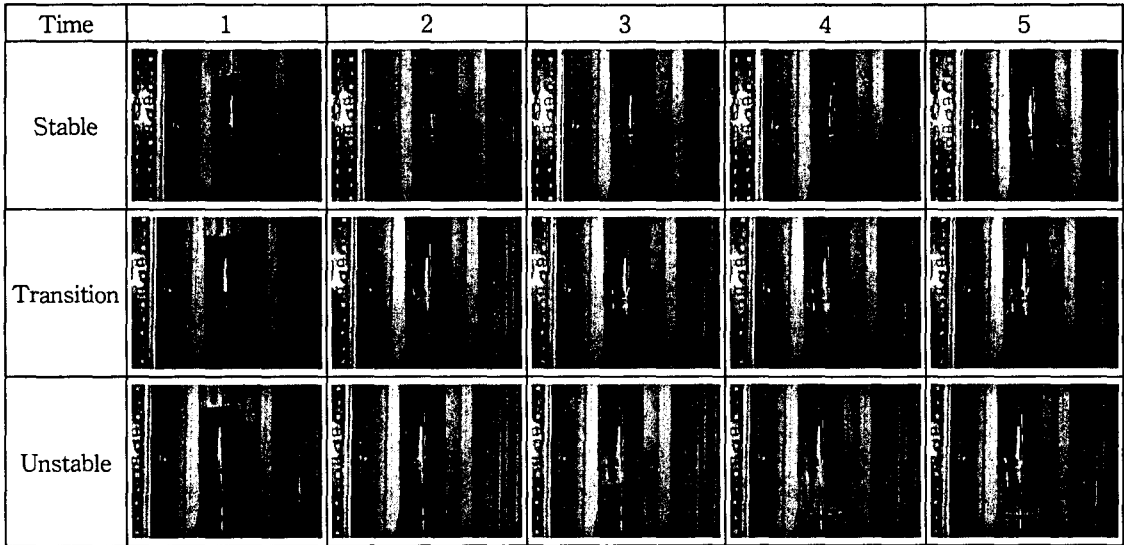


Fig. 4 Visualization result of CCFL experiment.

하였다. 선행연구^(3,6)에서 TSP의 전체 출입구 면적을 10% 증가시켜 실험한 결과 유동한계의 발생이 현저하게 감소하는 것을 볼 수 있었는데,⁽⁶⁾ 이럴 경우 TSP의 강도에 문제가 발생할 것으로 보여⁽⁷⁻⁹⁾ 본 실험에서는 중심부의 공기 출입구 면적만을 증가시켜 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구의 불안정 현상 모사실험에서는 특정한 경수 배출량과 공기 유입량에서 격실 내의 경수와 공기의 흐름에 유동한계 현상이 발생함을 확인 하였다. Fig. 4는 본 유동한계 실험의 가시화 결과이며, 3가지 유동으로 구분하였다. 경수 배출량과 공기 유입량을 일정 간격으로 변화시키면서 동일한 실험을 반복하여 유동한계 현상이 발생하는 경수 배출량과 공기 유입량의 범위를 확인하였다. 실험 결과 격실 내의 경수와 공기의 흐름 사이에 발생하는 유동한계 현상은 경수 배출량이 클수록, 그리고 공기유입량이 적을수록 잘 발생 되는 것으로 확인되었다.

Fig. 5는 이러한 각각의 TSP에 따른 유동한계 발생의 경계를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 공기의 출구가 가장 큰 TSP IV에서 유동한계의 발생이 가장 적은 것을 볼 수 있다. 이는 출입구의 면적이 커짐에 따라 TSP를 통과

할 수 있는 물과 공기의 유량이 증가하기 때문에 나타나는 현상이라 할 수 있다. TSP I과 동일면적의 사각 통로를 가진 TSP III에서는 유동한계의 발생이 더 작음을 관측할 수 있었다. 이는 통로의 면적뿐만 아니라 통로의 형상도 유동한계 발생 변수가 됨을 의미하며, 지금까지의 연구 결과로는 원형 통로에서 유동한계의 발생이 가장 낮음을 알 수 있다. Fig. 6은 각각의 TSP 유동한계 발생지점에 관한 Walli's Correlation⁽⁴⁾ 형태의 실험적 상관식을 나타낸다. 각각의 상관식의 실효성을 검증하기 위하여 실험값과 상관식 값의 비교를 통해 $\pm 10\%$ 이내의 오차범위 내에서 일

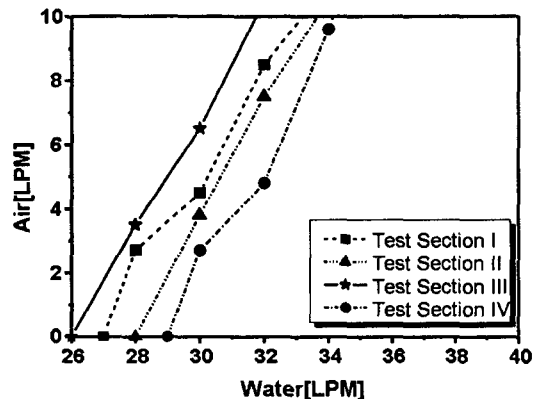


Fig. 5 CCFL map.

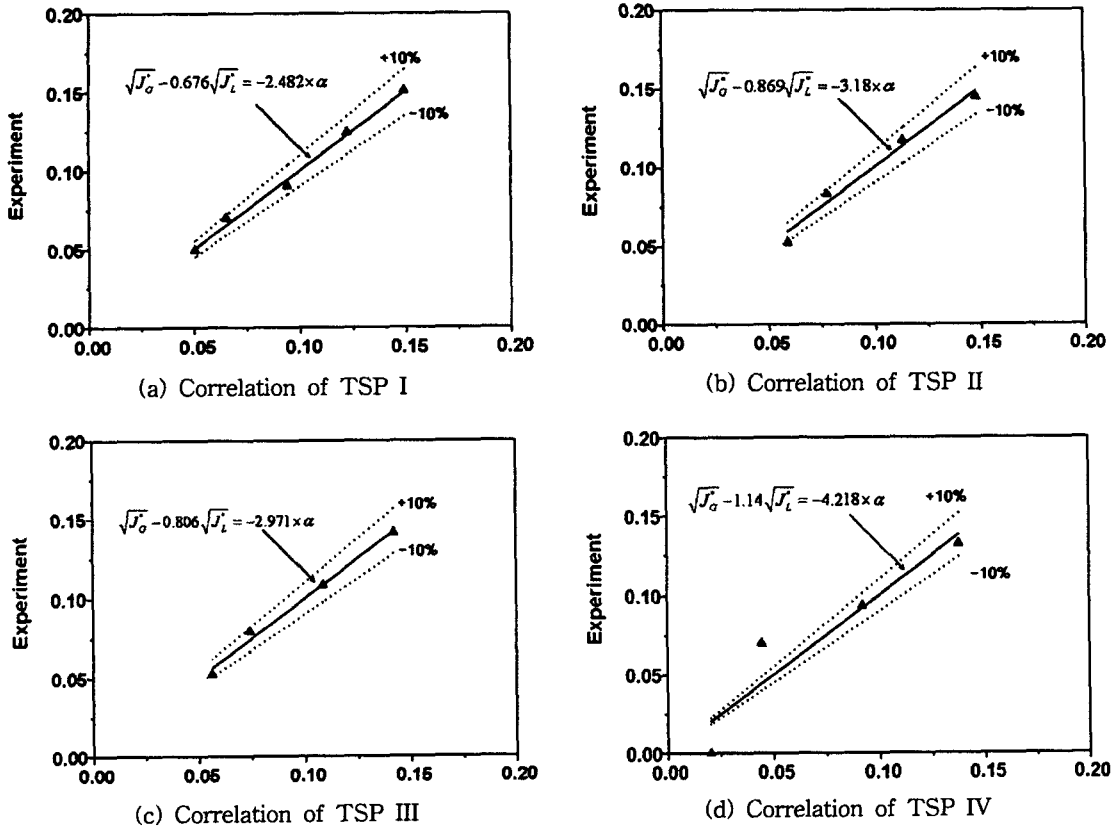


Fig. 6 Experimental result vs correlation.

치함을 확인하였다. 본 실험에서 개발된 상관식의 각 계수들이 Table 2에 나타나 있다.

Fig. 7는 개발된 상관식들을 이용하여 $1.2 < \sqrt{J_L^*} < 1.35$ 의 범위에서 값을 비교한 결과로서 실험결과와 같이 TSP III에서 CCFL의 발생이 가장 낮게 나타남을 볼 수 있으며, 그래프 또한 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 본 상관식의 개

Table 2 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
TSP IV	-1.14	-4.218	0.3316

$$\sqrt{J_G^*} + m\sqrt{J_L^*} = C\alpha, \left(\alpha = \frac{A_{TSP}}{A_{Total}} \right)$$

($0 < \sqrt{J_G^*} < 0.20$, $1.2 < \sqrt{J_L^*} < 1.35$)

발을 통하여 TSP의 원형 형상에서 재료의 한계가 허용되는 범위 내에서 면적을 증가시킬 때 유동한계 발생지점에 대한 예측이 가능하다. 또한 유동한계 발생시 액류와 기류의 유량조절로 안정

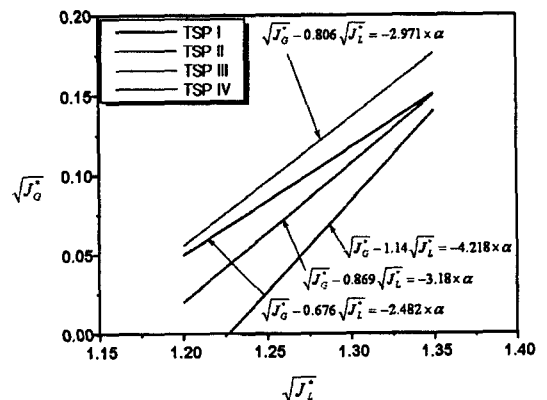


Fig. 7 CCFL map for experimental correlation.

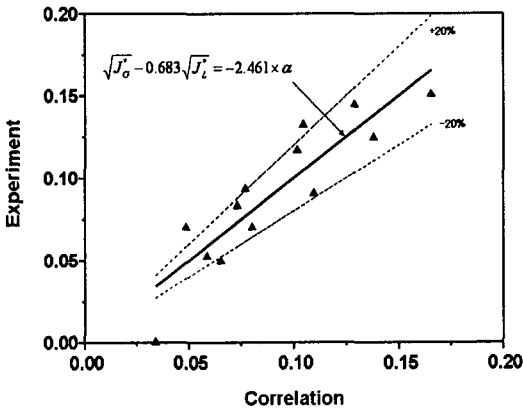


Fig. 8 CCFL correlation for circular shape TSP.

영역의 유량범위를 설정하게 함으로써 유동한계를 제거할 수 있는 기준을 제시할 수 있다.

Fig. 8은 개발된 상관식과 실험값 간의 비교를 나타내며, 두 값은 ±20% 내에서 일치함을 볼 수 있다. 본 실험의 TSP 중 원형 형상의 유로를 가진 I, II, IV에 대하여 TSP 원형 유로면적 α의 변화에 따른 실험적 상관식을 아래와 같이 개발하였다.

$$\sqrt{J_G^*} - 0.683\sqrt{J_L^*} = -2.461\alpha \quad (1)$$

(0.3069 ≤ α ≤ 0.3316, 원형 형상)

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

본 상관식은 TSP의 원형 형상에서 유동한계 방지를 위하여 유량변화에 따른 다공판 설계조건을 선정하는 데 적용될 수 있다.

4. 결 론

다공판 유로 내의 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 유동한계조건이 달라진다. 원형 다공판의 성능이 사각형 다공판보다 우수하게 나타났다.
- (3) 다공판의 면적 및 형상에 따른 CCFL 지도

를 개발하였다. 이를 통하여 원자로 운전시 유동한계가 발생하지 않도록 유량에 따른 적절한 운전조건을 제시할 수 있다.

(4) 실험을 통하여 각 다공판의 유로면적 및 형상에 따른 상관식을 개발하였다. 상관식은 ±20% 범위 안에서 실험값과 일치하였다.

후 기

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

참고문헌

1. Darlington NGS Unit 4 Flux Tilt Events, Oct. 30-31, 2001, COG/AECL CANDU Liquid Zone Control Workshop.
2. LZC system instability of Wolsung-2, 1999, Korea Hydro and Nuclear Power (KHNP), Report.
3. Oh, Y. K., Cho, S. J., Kim, S. N. and Lee, J. W., 1991, Counter-current flow limit of a vertical two phase (water/air) flow, Journal of The Korea Society of Mechanical Engineers, Vol. 15, pp. 308-322.
4. Wolsung-1 Nuclear Generating Station Liquid Zone Control System, Sep. 1979, Atomic Energy of Canada Limited (AECL).
5. Bergles, A. E., 1969, Two Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries, Hemisphere Publishing Company, pp. 1-34.
6. The Technical Development of CANDU Reactor Operation Performance, 2005 Ministry of Science & Technology (MOST).
7. Cheadle, B. A., Colman, C. E. and Licht, H., 1982, Nuclear Technology, Vol. 57, pp. 413-425.
8. Ibrahim, E. F. and Cheadle, B. A., 1985, Canadian Metall Quar., Vol. 23, pp. 273-281.
9. Kim, S. S., Han, D. J. and Kim, D. H., 1991, Variation problem and counterplan in the CANDU, Journal of Korea Nuclear Society, Vol. 23, pp. 95-105.