

## 측면 오리피스에서의 압력강하 특성에 관한 실험적 연구

# Experimental Study on the Pressure Drop Characteristics of a Side Orifice

남호윤, 김종만, 서경원, 최석기, 최종현

한국원자력연구소  
대전시 유성구 덕진동 150

### 요 약

이 논문은 관의 벽면에 여러 개 설치된 측면 오리피스에서 발생하는 압력강하에 대해 기술하였다. 형상과 배열이 다른 17 종류의 측면 오리피스에서 측정된 실험자료를 이용하여 측면 오리피스의 압력강하 특성을 분석하였고, 한 개의 식으로 전 유량범위를 기술할 수 있는 압력손실계수에 관한 실험식을 개발하였다. 오리피스를 기준으로 한 Reynolds 수의 범위는 2000에서 350,000이었다. Reynolds 수가 30,000보다 높으면 형상계수(geometry factor)가 주된 영향을 미쳤으나 Reynolds 수가 낮아질수록 Reynolds 수의 영향이 증가되고 낮은 유량에서는 Reynolds 수가 주된 영향을 미쳤다. 실험자료에서 오리피스의 수가 증가하면 압력손실계수가 증가하는 경향이 있었지만 종적배열의 영향은 뚜렷하지 않았다. 실험식은  $\pm 10\%$  오차범위를 갖으며, Reynolds 수가 낮은 영역에서 오차가 주로 발생하였다.

### Abstract

This paper presents the pressure drop characteristics at the side orifices located at the wall of pipe. The characteristics of pressure drop at the side orifices are analyzed using the experimental data measured from 17 different types of side orifices which have different geometric shapes and arrangements, and a correlation which covers the whole flow range by one equation is developed. The range of Reynolds number based on the hydraulic diameter of orifice is 200-350,000. It is found that the geometric factor was the most important parameter for pressure drop when the Reynolds number is larger than 300,000. As the Reynolds number becomes smaller, the effect of Reynolds number becomes larger, and when the Reynolds number is small, the Reynolds number was the most important parameter for pressure drop at the side orifices. The measured data show the trend that the pressure drop coefficient increases as the number of orifices increases, and the effect of longitudinal array was not clearly shown. The experimental data have error range of  $\pm 10\%$  and the most of error occurred in a region where the Reynolds number is small.

## 1. 서 론

액체금속로에서는 각각의 핵연료집합체 내부에 흐르는 소듐의 유량을 조절하고 또한 이상사고 시 소듐의 기포가 전파되는 것을 방지하기 위하여 핵연료봉들을 육각형 덕트 내부에 삽입하여 핵연료집합체를 만든다. 이 핵연료집합체의 하부에는 유량을 조절하기 위한 한 방법으로 여러 개의 노즐로 구성된 측면 오리피스스가 설치되어 있다. 기존의 액체금속들에서는 노형의 특색에 맞게 측면 오리피스의 설계가 다르다. 이 측면 오리피스에서의 압력강하는 구멍의 규격, 형태, 배열, 개수 등 기하학적 면에서 많은 영향을 받게된다. 핵연료집합체에서의 압력강하는 정상운전에서의 유량 조절용 뿐만 아니라 천이상태와 자연순환시의 유동재분배 시에도 원자로 안전에 매우 중요한 요소이므로 모든 유량범위에서 측면 오리피스의 압력강하 계수를 정확히 측정하여야 한다. 그러나 기존 발표된 자료를 액체금속로 설계와 안전해석에 실용적으로 적용하는데는 극히 한정되어 있고, 그 값들이 큰 차이를 보이고 있다.

단상 유동조건에서 기하학적인 구조에 따른 시스템의 압력강하에 관해서 일반적으로 광범위하게 이용되는 자료 중의 하나가 Idelchik[1]의 Handbook이다. 이 책에서 측면 오리피스에 관한 자료는 원통 관의 측면에 직사각형 오리피스스가 한 개 또는 두 개가 있는 경우의 자료를 제시하였다. 오리피스를 기준으로 한 Reynolds 수가 10,000 이상인 범위에서 사용할 수 있으며, 오리피스와 원통관의 면적비율 및 오리피스의 폭과 높이의 비율을 알면 도표에서 구할 수 있다. 이 도표에 의하면 구조에 따라 압력강하 계수가 1.56부터 335까지 변한다. 그러나 액체금속로에서는 오리피스와 원통관의 면적비가 0.15 정도 되는 측면 오리피스스가 6개 내지 9개 있는 형태가 보편적이다.

이 연구의 목적은 측면 오리피스에서의 압력강하를 측정한 두 개의 실험자료를 이용하여 압력강하 특성을 분석하고 실험식을 개발하는데 있다. 첫 실험은 기초연구로 낮은 유량범위에서 여러 종류의 측면 오리피스를 사용하여 실험을 수행하였다. 오리피스의 수는 1개에서 6개까지 이었고, 오리피스의 모양은 원형, 모서리가 둥근 사각형, 직사각형 3종류이었다. 오리피스스가 6개인 경우에는 배열을 사각배열 및 엇갈린 사각 배열 등 2종류에 관해 실험하였다. 기하학적인 구조면에서 보면 총 16종류에 관해 실험자료를 생산하였다. 두 번째 실험은 KALIMER 예비설계에 설정된 규격으로 핵연료집합체를 실규모로 만들어 원자로에서의 Reynolds 수보다 높은 범위까지 물을 사용하여 실험을 수행하였다. 이 형상은 내경이 80mm 정도인 원통의 측면에 9개의 모서리가 둥근 사각형 측면 오리피스스가 횡적으로 3개 종적으로 3개씩 엇갈린 배열로 설치된 형태이었다. 이 실험자료들의 전 구간을 한개의 식으로 기술할 수 있는 실험식을 개발하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 실험-1의 실험부

이 연구에 사용한 실험자료들은 두 개의 별도의 실험들에서 생산되었다. 두 개의 실험에서 작동유체로는 물을 사용하였다. 실험-1에서 수행한 실험부는 그림.1에 보이고 있다. 전체적인 모양은 하부에서 물이 들어오는 큰 탱크의 상부에 한 쪽이 막혀 있는 내경 80mm인 관의 측면에 오리피스스가 설치된 형태이다. 탱크의 하부로 들어온 물은 오리피스를 통과하여 관속으로 들어와 하류(down flow)를 형성하고 다시 펌프, 유량계를 거쳐 탱크로 순환된다. 오리피스의 형상은 원형(circle), 모서리가 둥근 사각형(rounded rectangular) 및 직사각형(rectangular) 등 세 종류를 사용하였고, 각각의 경우에 대해 측면에는 1개, 2개, 3개, 4개 또는 6개의 오리피스를 설치하였다. 오리피스스가 4개일 때까지는 횡적 방향(traverse direction)인 관의 원주방향으로 균일한 각도로 설치하였고, 6개일 때는 횡적 방향으로 3개, 종적 방향(longitudinal direction)으로 2개를 설치하였다. 오리피스 6개를 설치할 때에는 사각배열(regular array)과 엇갈린 배열(staggered array)로 오리피스

를 설치하였다. 그러므로 총 16 종류의 측면 오리피스에 대해 실험자료를 생산하였다. 각 실험에서 사용한 오리피스들의 규격과 배치는 표.1에 기술되어 있다.

유량 측정에는 마그네틱 유량계를 사용하였고, 차압은 OMEGA 모델 차압계를 사용하였는데 낮은 유량범위의 차압계(5“ H<sub>2</sub>O)와 높은 유량범위의 차압계(30“ H<sub>2</sub>O)를 병렬로 설치하여 차압범위에 맞게 사용하였다. 오리피스에서의 Reynolds 수가 2000~50000인 유량범위에서 529개의 실험자료를 생산하였다. 온도는 20℃를 유지하였다.

## 2.2 실험-2의 실험부

이 실험에서는 KALIMER의 예비설계를 기준으로 실규모 모의 핵연료집합체를 제작하여 실험을 수행하였다. 모서리가 둥근 사각형태의 오리피스가 9개가 엇갈림 배열로 그림.2와 같이 설치되어 있다. 상하의 둥근 모서리는 반원을 형성하고, 높이가 4.06cm, 폭이 1.91cm이다. 종적으로 3개, 횡적으로 3개의 오리피스로 구성되어 있으며 엇갈린 형태의 배열을 이루고 있다. 이 그림의 오른쪽은 이 측면 오리피스의 형상을 보이고 있고, 규격은 표.1에 기술되어 있다. 유량은 병렬로 설치한 3개의 터바인 유량계로 측정하였다. 차압은 OMEGA 모델 차압계로 유량범위에 따라 2종류를 병렬로 설치하여 사용하였고, 온도는 25℃에서 36℃로 변화하여 온도도 동시에 측정하였다. 오리피스에서의 Reynolds 수가 10000~350,000인 유량범위에서 134개의 실험자료를 생산하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 측면 오리피스에서의 압력강하

액체금속로에서와 같이 측면 오리피스를 통과한 유체가 한 쪽이 막혀 90°로 휘어져 한 방향으로만 흘러가는 하류(down flow)가 형성되는 경우에는 직관형 배관에 설치된 오리피스나 갑작스런 확장관보다도 압력강하가 더욱 높다. 이 측면 오리피스를 통과한 유체는 제트를 형성하면서 모든 방향으로 흩어져 관의 막힌 부분에서는 유로의 방향이 180°바뀌는 소용돌이가 일어나고, 또한 인접한 관의 벽면 부근에서도 양 측면에 두 개의 소용돌이가 일어난다. 그러므로 문헌[2]에 의하면 하류관의 직경( $d_d$ )과 오리피스의 수력학적 직경의 비와 오리피스에서 막힌 곳까지의 거리도 주요한 인자이다. 측면 오리피스가 한 개인 경우 오리피스와 하류관의 면적의 비가 0.8보다 적을 때에는 면적의 비가 높을수록 압력손실계수가 증가하고, 오리피스의 폭과 하류관의 직경의 비가 적을수록 압력손실계수가 증가한다. Idelchik[1]은 그의 실험에서 마주본 두 개의 측면 오리피스에서 발생하는 압력강하가 한 개인 때의 압력강하보다 높게 나타났는데 이는 위와 같은 경우로 면적의 비가 높기 때문에 일어난 현상이라 설명하고 있다.

측면 오리피스의 압력강하는 세부적으로는 여러 가지 영향을 고려할 수 있으나 크게 나누어 다음과 같은 영향을 실험식 개발에 고려할 필요가 있다. 첫째로 가장 큰 영향은 단일 오리피스 자체에서의 압력강하이므로, 둘째는 오리피스와 하류관의 규격의 비, 셋째는 오리피스의 횡적 배열의 영향, 넷째는 종적 배열의 영향 등으로 볼 수 있다.

위에서 인용한 문헌과 실험자료에 의하면, 측면 오리피스에서의 압력강하는 높은 Reynolds 수에서는 Reynolds 수에 거의 영향을 받지 않으므로 압력손실계수는 형상계수(geometry factor:  $F_g$ )에 거의 의존한다. 그러나 낮은 Reynolds 수에는 이 무차원수가 감소하면 증가하는 경향을 보이므로 이를 식으로 나타내면 예상되는 측면 오리피스의 압력손실계수( $f_{or}$ )는 다음과 같은 형태로 나타난다.

$$f_{or} = (1. + F_{Re})F_g \quad (1)$$

여기에서  $F_{Re}$ 는 압력손실계수에 미치는 Reynolds 수의 영향을 나타내므로 Reynolds 수가 높으면 영으로 수렴하고, 낮으면 증가하는 현상을 보여야 한다. 형상계수  $F_g$ 는 위에서 기술한 영향을 고려하여 다음과 같이 표시한다.

$$F_g = F_d * F_o + F_c + F_r \quad (2)$$

$F_o$ 는 단일 오리피스에서 발생하는 압력손실계수이고,  $F_d$ 는 하류관과 오리피스 관계에 따른 영향을 나타내며,  $F_c$ 는 횡적배열에 따른 영향을,  $F_r$ 는 종적배열에 따른 영향을 각각 나타낸다.

### 3.2 압력강하 인자

직관에 오리피스가 한 개 설치되어 있을 경우에 압력강하가  $\Delta p$ , 오리피스에서의 유속이  $v_o$ , 유체의 밀도가  $\rho$ 이면 이 오리피스의 압력손실계수는 일반적으로 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} F_o &= \frac{\Delta p}{\rho v_o^2 / 2} \\ &= \zeta' \left(1 - \frac{A_o}{A_1}\right) + \left(1 - \frac{A_o}{A_2}\right)^2 + \tau \left(1 - \frac{A_o}{A_1}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{A_o}{A_2}\right) + \zeta_{fr} \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 하첨자 1는 입구조건, o는 오리피스, 2는 하류유동에서의 조건을 나타낸다. A는 면적을 나타내고,  $\zeta'$ 는 오리피스의 형상과 오리피스의 입구 edge에 따라 변하는 함수로 대개 0.5에서 1.0까지 변한다.  $\zeta_{fr}$ 는 오리피스에서 유동마찰에 의한 압력손실 계수이므로 오리피스의 두께와 직경의 비가 적으면 무시될 수 있다.  $\tau$ 는 오리피스의 두께 등 유동이 오리피스를 통과할 때 미치는 형상에 관계된 계수로 오리피스의 두께와 수력학적 직경의 비( $t_o/d_h$ )가 0.4 이하일 때에는 참고문헌[1]의 Diagram 4-12에서 다음과 같이 기술된다.

$$\tau = 1.4 - 0.8 \frac{t_o}{d_h} \quad (4)$$

오리피스 상류의 유입부분이 넓을 경우 즉,  $A_i = \infty$ 일 경우에 마찰계수를 무시하면( $\zeta_{fr} = 0$ .) 식(3)은 다음과 같이 된다.

$$F_o = \zeta' + \left(1 - \frac{A_o}{A_d}\right)^2 + \tau \left(1 - \frac{A_o}{A_d}\right) \quad (5)$$

앞에서 인용한 참고문헌에서 오리피스와 하류관의 면적의 비가 높을수록 압력손실계수가 증가하므로 이 문헌의 graph와 실험자료로 고려할 때 그 영향은  $(A_o/A_d)^{1/3}$  정도에 비례한다. 압력에 미치는 영향이 수력학적 직경에 더 민감하므로  $A_o$  대신  $d_h^2$ 을 사용하면  $(d_h^2/A_d)^{1/3}$ 에 비례하게 된다. 이 인자를 식(5)에 고려하면

$$F_d F_o = \left[ \zeta' + \left(1 - \frac{A_o}{A_2}\right)^2 + \tau \left(1 - \frac{A_o}{A_2}\right) \right] (d_h^2/A_d)^{1/3} \quad (6)$$

실험과 비교하여  $\zeta'$ 의 값은 원형 오리피스에서는 0.6을 사각 오리피스와 둥근 모서리 오리피스에서는 1.0을 실험식에 사용하였다. 이 식에서  $A_o/A_2$ 는 form loss factor로 주요한 인자이다. 오리피스가 한 개인 경우에는 분사되는 제트가 관의 벽면까지 닿지만 2개 이상인 경우에는 관의 중심까지 닿으므로 오리피스가 한 개인 경우에는  $A_2$ 를 하류유로의 전 면적과 같게 즉,  $A_2 = A_d$  사용하였고, 오리피스가 2개 이상인 경우에는 하류유로 면적의 1/2 즉,  $A_2 = A_d/2$  을 사용하였다.

그림.3은 Reynolds 수가 압력강하에 미치는 영향이 적은 부분 즉, Reynolds 수가 30,000 이상에서 각 오리피스의 평균 압력손실계수를 나타낸 것이다. 여기에서 x-축은 오리피스의 개수이다. 오리피스의 수가 증가하면 압력손실계수가 증가하는 형태를 보이고 있다. 참고문헌[1]의 diagram 4-22에서는 횡적배열과 종적배열 두 경우에 원형 스크린과 수평으로 유체가 흘러 스크린을 통과할 때 주 유속과 스크린에서의 유속의 비율( $v_\infty/v_{screen}$ )로 압력손실계수를 graph를 제시하였다. 이 비율이 증가하면 약간 압력손실계수가 감소하다가 0.5에 최소가 되고 1.에서 0일 때와 같아지며, 비율이 더욱 증가하면 선형적으로 증가한다. 그러나 이 수치를 직접 실험식에 활용하기에는 문제점이 있다. 실험자료를 분석하여 보면,  $A_o/A_d$ 가 0.2 미만인 경우에 횡적배열의 영향( $F_c$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_c = 2.5 (n_c - 1)^{2/3} \frac{A_o}{A_d} \quad (7)$$

하류 유로의 방향과 같은 방향인 종적배열의 영향은 분석하는 자료가 부족하여 여기에서는 몇 개의 실험적인 현상을 토대로 기술하였다. 실험에서는 종적배열이 한 개인 경우보다는 여러 개인 경우에서의 압력손실계수가 약간 높았으나 2개인 경우와 3개인 경우에는 차이를 분별할 수 없었다. 둥근 모서리 사각 오리피스에서는 엇물린 배열인 경우가 사각배열보다 이 계수가 높았으나 원형일 경우에는 엇물린 배열의 경우가 약간 낮았다. 그러므로 종적배열의 영향은 종적배열의 개수, 횡적배열과 종적배열의 비, 오리피스 사이의 피치( $p_s$ )의 영향 및 오리피스의 높이( $h$ )와 폭( $w$ )의 비로 기술될 수 있다.  $p_s/d_h$ 가 높으면 확장관의 경우와 같이 form loss factor가 증가할 수 있고, 오리피스의 길이가 길면 맞은 편 노즐에의 영향 등으로 압력손실계수가 증가할 수 있다. 이를 실험자료와 비교하여 영향을 나타내면 종적배열의 영향( $F_r$ )은 다음과 같다.

$$F_r = 0.14 (n_r - 1)^{1/4} \frac{n_c}{n_r} \frac{h}{w} \frac{p_s}{d_h} \quad (8)$$

### 3.3 실험식 개발 및 검토

식(6), (7), (8)을 식(2)에 삽입하여 정리하면 측면 오리피스의 형상계수  $F_g$ 는 다음과 같다.

$$F_g = \left[ \zeta' + \left(1 - \frac{A_o}{A_2}\right)^2 + \tau \left(1 - \frac{A_o}{A_2}\right) \right] (d_h^2/A_d)^{1/3} + 2.5 (n_c - 1)^{2/3} \frac{A_o}{A_d} + 0.14 (n_r - 1)^{1/4} \frac{n_c}{n_r} \frac{h}{w} \frac{p_s}{d_h} \quad (9)$$

실험에서 구한 모든 압력손실계수( $f_{exp}$ )를 형상계수( $F_g$ )로 나누어  $Re (A_{o,t}/A_d)^{1/4}$ 에 대해 이 값이 30,000 미만인 값에서 정리하면 그림.4와 같다. 여기에서  $A_{o,t}$ 는 측면 오리피스 전체면적을 나타낸다. 이 그림에서 측면 오리피스의 압력손실계수가 형상계수로만 구성되면 y-축은 1이 된다. 그러므로 이 값이 1보다 다른 것은 Reynolds 수의 영향을 나타낸다. 식(1)의 형태로 실험치를 fitting하면 Reynolds 영향( $F_{Re}$ )은 다음과 같다.

$$F_{Re} = \frac{4.5 \times 10^6}{[Re (\frac{A_{o,t}}{A_d})^{1/4}]^{7/4}} \quad (10)$$

식(10)을 식(1)에 대입하면 측면 오리피스의 압력손실계수에 대한 실험식은 다음과 같이 기술된다.

$$f_{or} = F_g [ 1. + \frac{4.5 \times 10^6}{[Re (\frac{A_{o,t}}{A_d})^{1/4}]^{7/4}} ] \quad (11)$$

이 실험식으로 계산한 압력강하와 실험치를 비교한 것이 그림.5이다. 이 실험식은 ASME 오차계산 방법에 따라 실험치를 기술하는데 95%의 신뢰성을 갖기 위해서는  $\pm 10\%$ 의 오차를 갖는다. 이 오차의 대부분은 압력강하가 낮은 즉, Reynolds 수가 20,000 이하인 경우에서 발생하였다

#### 4. 결 론

- (1) 규격과 형상이 다른 17종류의 측면 오리피스에서 측정한 661개의 실험자료를 사용하여 측면 오리피스의 압력손실계수를 한 개의 식으로 기술하는 실험식을 개발하였다.
- (2) 압력손실계수는 형상계수(geometry factor)와 Reynolds 수에 따른 영향으로 나누어지고, 낮은 Reynolds 수에는 Reynolds 수의 영향이 높고, Reynolds 수가 높을수록 형상계수(geometry factor)의 영향이 높았다.
- (3) 실험식으로 실험치를 기술할 때 오차범위는  $\pm 10\%$  이내이고, 오차의 대부분은 낮은 Reynolds 수의 범위에서 발생하였다.
- (4) 종적배열의 영향을 기술하는 식은 실험자료가 충분하지 못하여 실험식에 충분히 반영하지 못하였다. 이에 대한 연구가 차후에 필요하다.

#### 참고문헌

1. I. E. Idelchik, et al., "Handbook of Hydraulic Resistance," Second Edition, Hemisphere Pub. Co., 1987.
2. Khanzhonkov V. I. and Davydonko N. I., "Resistance of Side Orifices of the Thermal Section of a Pipeline," Prom. Arodin., no.15, 38-46, Oborongiz, Moscow, 1959.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.

표.1 노즐의 규격 및 배치

Number of Nozzle		1	2	3	4	6 regular	6 staggered	9 staggered
Number of Row		1	1	1	1	2	2	3
Shape (unit: cm)								
Circle	dia.	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	-
	pitch	-	-	-	-	5.4	5.4	-
	end gap	3.2	3.2	3.2	3.2	0.5	0.5	-
Rounded Rectangular	wide	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.91
	height	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.06
	pitch	-	-	-	-	5.4	5.4	5.45
	end gap	2.7	2.7	2.7	2.7	0.	0.	2.3
Rectangular	wide	2.0	1.8	1.8	1.8	-	-	-
	height	4.0	4.0	4.0	4.0	-	-	-
	pitch	-	-	-	-	-	-	-
	end gap	2.7	2.7	2.7	2.7	-	-	-

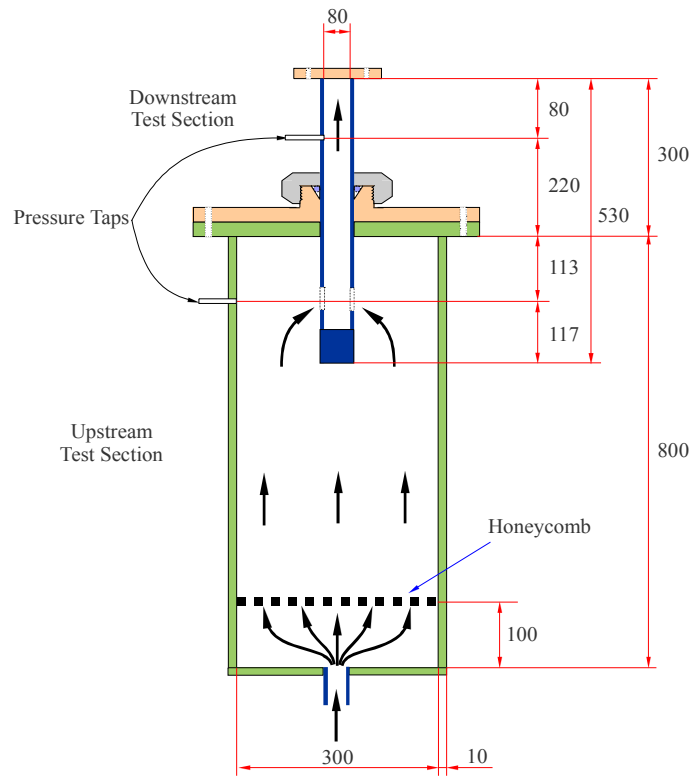


그림.1 실험-1에서 사용한 실험부의 형상과 규격

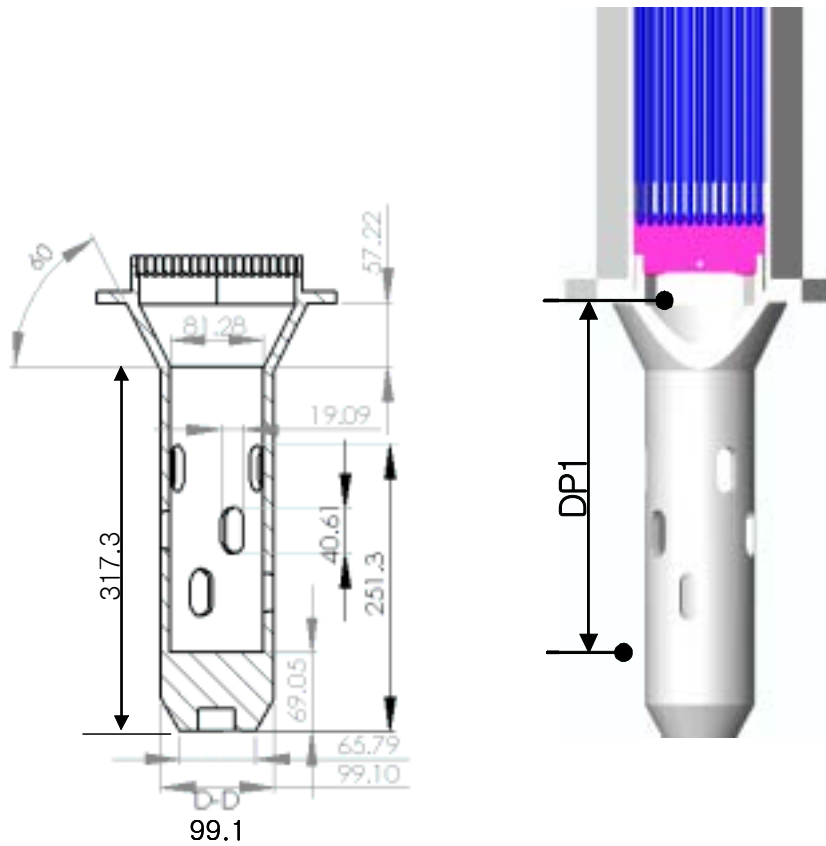


그림.2 실험-2에서 사용한 실험모의 핵연료집합의 형상과 규격



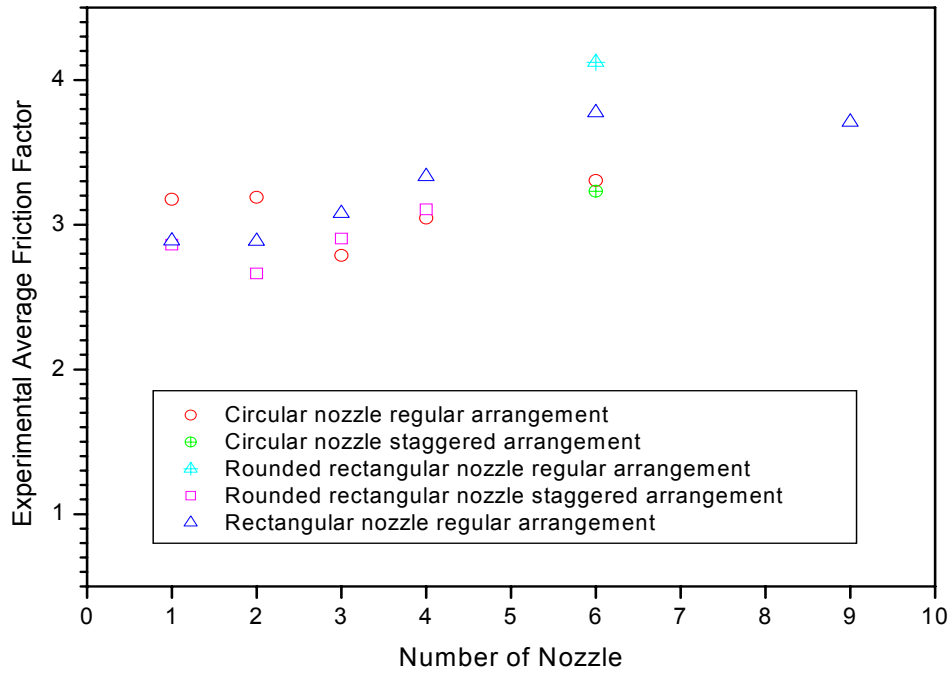


그림.3 Reynolds 수가 30,000 이상일 때 측면 오리피스의 형상에 따른 실험치의 평균 압력손실계수

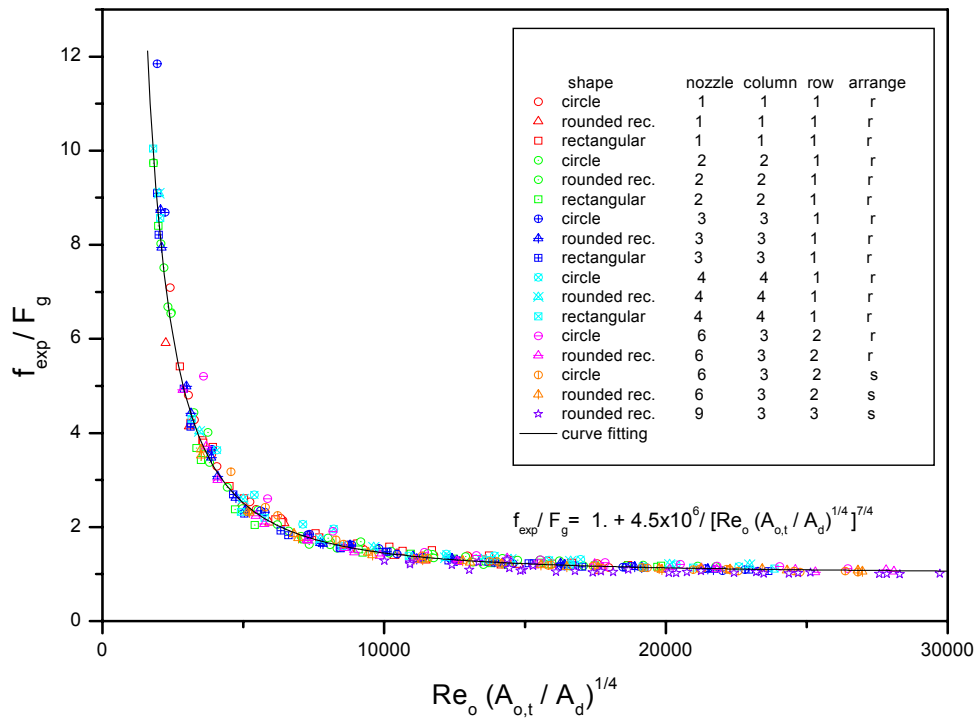


그림.4 측면 오리피스의 압력손실계수에 미치는 Reynolds수의 영향 및 관계식

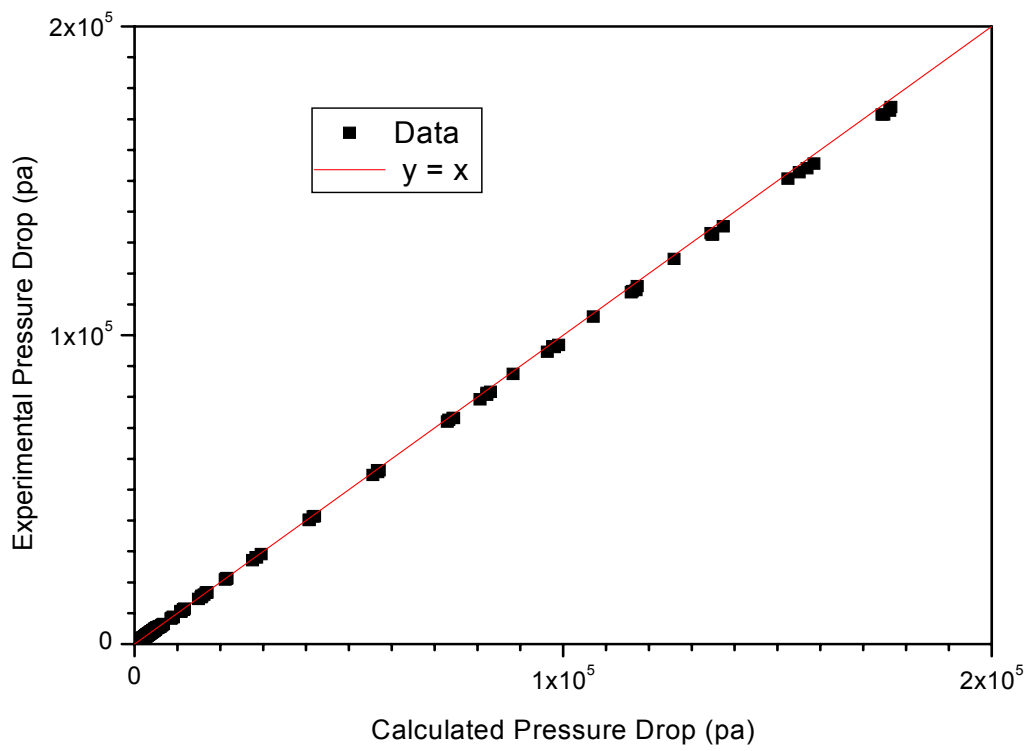


그림.5 측면 오리피스에 의한 압력강하를 기술하는 실험식과 실험치의 비교