

핵연료집합체 지지격자 압력손실계수의 해석적 예측 방법

Analytical Prediction of Fuel Assembly Spacer Grid Loss Coefficient

임종선, 남기일, 박성규, 권정택, 박응준
한전원자력연료(주)
대전광역시 유성구 덕진동 493

요 약

경수로에 장전되는 핵연료집합체 부품 중 지지격자 압력손실계수의 해석적 예측 모형에 대해 연구하였다. 유체가 지지격자와 시험단면의 벽 사이를 지날 때 발생하는 압력손실을 지지격자 내부 압력손실과 분리하여 고려하였고, 레이놀즈수 영역별로 예측 성능을 향상시키기 위해 적절한 마찰손실계수를 다르게 적용하였다. 해석적 모형으로 예측한 지지격자의 압력손실계수를 세 가지 형태 지지격자의 5×5, 16×16(또는 17×17) 배열에 대한 압력강하시험 결과로부터 생산한 압력손실계수와 비교함으로써 그 타당성을 검증하였다. 해석적 모형에 의한 지지격자 압력손실계수 예측결과는 국내에서 사용되는 지지격자의 형태에 대한 시험결과와 잘 일치하였으며, 노심조건인 레이놀즈수 500,000에서 압력손실계수의 오차범위는 5×5의 경우 최대 12%, 실제 크기의 경우 최대 7%였다. 해석적 예측 모형은 향후 핵연료집합체 개발 및 설계개선 시 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract

The analytical prediction model of the fuel assembly spacer grid pressure loss coefficient has been studied. The pressure loss of gap between the test section wall and spacer grid was separated from the current model and the different friction drag coefficient on spacer straps from high Reynolds number region were used to low Reynolds number region. The analytical model has been verified based on the hydraulic pressure drop test results for the spacer grids of three types for 5x5, 16x16(or 17x17) arrays. The analytical model predicts the pressure loss coefficients obtained from test results within the maximum errors of 12% and 7% for 5x5 test bundle and full size bundle, respectively, at Reynolds number 500,000 of the core operating condition. This result shows that the analytical model can be used for research and design change of the nuclear fuel assembly.

1. 서 론

원자로에 장전되는 핵연료집합체는 핵연료봉, 제어봉 안내관, 계측기 안내관, 지지격자, 상단고정체 및 하단고정체로 이루어져 있다. 이들 부품 중 지지격자들은 안내관에 고정되어 핵연료봉들을 지지하고, 난류 및 부수로 간 교차류를 형성하여 열에너지 교환을 촉진시키는 역할을 함으로써 핵연료집합체의 열적 성능을 결정짓는 중요한 부품이다. 반면 지지격자들에 의한 압력손실은 일반적으로 전체 핵연료집합체 총 압력손실의 50% 이상을 차지하기 때문에, 이로 인한 수력하중은 핵연료 및 노심의 건전성과 관련된 중요한 인자이기도 하다.

본 논문에서는 지지격자 압력손실계수의 해석적 예측 모형에 대해 연구하였다. 해석적 모형으로 예측한 지지격자의 압력손실계수를 각각 5x5와 16x16 또는 17x17 봉 배열을 가진 세 가지 형태의 지지격자에 대한 압력강하시험 결과로부터 생산한 압력손실계수와 비교함으로써 그 타당성을 검증하였다.

2. 해석적 예측 방법

기존의 해석적 모형은 여러 가지가 있으나 그 중 실제 설계에 적용되고 있는 해석적 모형¹⁾을 근거로 하였다. 복잡한 구조의 지지격자 내부의 압력손실은 그 구성품 각각의 마찰과 형상에 의한 압력손실의 합으로 계산한다. 자유유동(Free Flow)에서 지지격자에 미치는 총 항력을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{총 항력, } D_{grid} &= \text{지지격자 판의 마찰 항력, } D_{fgrid} \\
 &+ \text{지지격자 부품들의 형상 항력, } D_{pgrid} \\
 &+ \text{지지격자 내 간섭 항력, } D_{int} \\
 &+ \text{지지격자 내 비-지지격자 부품의 마찰 항력, } D_{frod} \\
 &+ \text{지지격자 판과 벽의 마찰 항력, } D_{fgap}
 \end{aligned}$$

따라서 해석적 모형의 지지격자의 총 손실계수는 각 요소의 손실계수들의 합이다.

$$K_{grid} = K_{fgrid} + K_{pgrid} + K_{int} + K_{frod} + K_{fgap} \quad (1)$$

2.1 지지격자 판의 마찰항력에 의한 압력손실계수

길이가 L 이고 폭이 b 인 평판의 한쪽 면을 흐르는 유체에 대해 단위 폭 당 총 항력 D_x 와 항력 계수 C_D 는 다음 식에 의해 정의된다.

$$C_D = \frac{D_x}{\frac{1}{2} \rho V^2 L b} \quad (2)$$

식(2)로부터 집합체의 봉 영역을 기준으로 한 무차원 압력손실계수는 다음과 같이 정의된다.

$$K_x = \frac{D_x}{\left(\frac{\rho V_{core}^2}{2} A_{core} \right)} \quad (3)$$

레이놀즈수가 높은 영역에서 지지격자 판 위를 흐르는 난류 유체의 경계층에서 마찰항력계수 C_f 는 다음 식²⁾을 사용한다.

$$C_f = 0.074 Re_l^{-0.20} \quad 10^5 < Re_l < 10^7 \quad (4)$$

집합체의 붕 영역에서의 평균 속도와 수력직경을 기준물리량으로 식(2)에 적용하고 밀도와 점성계수를 상수로 놓으면 다음 식과 같다.

$$D_{fgrid} = 0.074 Re_l^{-0.20} \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) A_{wetted} \quad (5)$$

한편,

$$\left(\frac{V}{V_{core}} \right)^2 = \left(\frac{1}{1-\beta} \right)^2 \quad (6)$$

따라서 식(3), 식(5), 식(6)에 따라,

$$K_{fgrid} = 0.074 (Re_{core})^{-0.20} \left(\frac{1}{1-\beta} \right)^{1.80} \left(\frac{D_{Hcore}}{L} \right)^{0.20} \left(\frac{A_{wetted}}{A_{core}} \right)$$

레이놀즈수가 낮은 영역에서는 식(19)의 마찰항력계수를 적용한다.

$$C_f = 0.1582 Re_l^{-0.25} \quad 4000 < Re_l < 10^5$$

$$K_{fgrid} = 0.1582 (Re_{core})^{-0.25} \left(\frac{1}{1-\beta} \right)^{1.75} \left(\frac{D_{Hcore}}{L} \right)^{0.25} \left(\frac{A_{wetted}}{A_{core}} \right)$$

2.2 지지격자의 형상 항력에 의한 압력손실계수

형상항력은 레이놀즈수에 거의 영향이 없다고 가정하고, 마찰항력 식의 K_{fgrid} 로부터 레이놀즈수에 의한 의존성을 제거하고 유로봉쇄면적을 고려하면^{1,3,4)}, 지지격자 부품들의 형상 항력에 의한 압력손실계수는 다음과 같이 표현된다.

$$K_{bgrid} = C_{D_p} \left(\frac{1}{1-\beta} \right)^2 \frac{A_{projected}}{A_{core}}$$

여기서, 형상 항력 계수 C_{D_p} 는 실험상수이다. 지지격자의 형상 항력에 의한 압력손실계수는 각 부품의 형상 항력에 의한 압력손실계수들의 합이다. 즉,

$$K_{bgrid} = K_{pstrip} + K_{pweld} + K_{pdimple} + K_{pstring} + K_{ptap} + K_{pvane}$$

여기서, *strip*은 지지격자 판, *weld*는 지지격자 판간 교차점에 있는 용접점, *dimple*은 붕 지지용

활 모양의 아치나 덤플, *spring*은 봉 지지용 스프링, *tap*은 지지격자 외곽의 판에 달린 탭, 그리고 *vane*은 유동혼합날개를 의미한다.

2.3 간섭 항력에 의한 압력손실계수

유동장에 잠겨 있는 물체들은 서로 가까이 접해 있는 경우 서로의 경계층을 교란시킨다⁵⁾. 지지격자의 경우 지지격자 판과 봉 사이에 일어나는 이 현상은 부가적인 항력을 유발시킨다. 이러한 간섭 항력에 의한 압력손실계수의 계산에는 다음 식¹⁾이 사용된다.

$$K_{int} = C_{int} \frac{4(\text{pitch})(L)(N)}{A_{core}}$$

2.4 지지격자 내 봉 마찰 항력에 의한 압력손실계수

이 압력손실계수는 지지격자 높이만큼의 영역에서 지지격자 외의 봉들에 대한 마찰 항력으로 인해 발생하는 압력손실을 나타낸다. 지지격자 판에서의 불완전 발달 유동과 봉에서의 완전발달 (Fully Developed) 유동을 가정하고 적당한 판에 해당하는 마찰계수 상관식을 사용한다. 이때 지지격자 내의 수력직경 D_h 와 레이놀즈수가 적용된다¹⁾.

$$K_{f rods} = f_g \left(\frac{A_{wetted, non-grid}}{4A_{core}} \right) \left(\frac{1}{1-\beta} \right)^3$$

이상에서 언급된 K_{fgrid} , K_{pgrid} , K_{int} , $K_{f rods}$ 의 합으로 계산되는 K_{grid} 에는 지지격자 내에서의 봉의 마찰이 포함된다. 지지격자만의 압력손실을 구하기 위해 K_{grid} 에 포함되는 봉 마찰에 의한 손실을 제거하였는데 이를 위해 위 식과는 달리 봉만 존재하는 위치에서의 수력직경 D_{Hcore} 를 이용한 다음의 압력손실계수를 K_{grid} 로부터 빼준다.

$$K_{fr} = f_o \left(\frac{L_{grid}}{D_{Hcore}} \right)$$

2.5 지지격자 판과 벽의 마찰 항력에 의한 압력손실계수

지지격자 내부 및 지지격자와 시험단면 벽 사이로 흐르는 유체에 대한 비가역적 손실을 따로 분리하였다. 수력직경과 지지격자와 시험단면 벽 사이 간격에 대한 민감도 조사 결과는 그림 1에 나타나 있다. 이 결과에 따르면, 지지격자와 시험단면 벽 사이 간격에 따라 지지격자의 압력손실계수는 다르게 해석되어야 한다.

그림 2와 같은 구조의 두 평행한 평판 내 층류유동에서 평판의 마찰계수는 다음 식과 같이 정의된다^{2,6,7)}.

$$f = \frac{48}{Re_h} \quad (7)$$

여기서, 두 평판 내 수력직경을 정의하면,

$$D_h = \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{4A}{P_{wetted}} = \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{4bh}{2b+2h} = \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{4h}{2+2h/b} = 2h = 2 * gap \quad (8)$$

식(8)로부터 층류유동에서의 두 평판 내 마찰계수는 다음과 같이 표현된다.

$$f_{pb} = \frac{96}{Re_{Dh}} \quad (9)$$

한편, 난류유동조건에서 Overlap Layer의 속도분포는 대수법칙 (Logarithmic Law)에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$u^+ = \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{y u^*}{\nu}\right) + B = \frac{1}{\alpha} \ln(y^+) + B \quad (10)$$

광범위한 레이놀즈수와 기하형상에 대한 시험자료들로부터 상수 α 와 B는 각각 0.41와 5.0으로 알려져 있다^{2,6,7}. 이 상수들과 Darcy의 마찰계수에 대한 식(11)을 이용하면 Overlap Layer에서의 해석적인 평균유속과 마찰계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{V_{mean}}{u^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (11)$$

그런데 $Re_{Dh} = \frac{\rho V_{mean} D_h}{\mu}$ 이므로,

$$u^* = \frac{\nu Re_{Dh}}{\sqrt{\frac{8}{f}}(2h)} \quad (12)$$

로 표현할 수 있고 식(10)과 식(12)로부터 평균유속은 다음과 같다.

$$V_{mean} = \frac{\nu Re_{Dh}}{\sqrt{\frac{8}{f}}(2h)} \left(\frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{Re_{Dh} \sqrt{f}}{4\sqrt{8}}\right) - \frac{1}{\alpha} + B \right) \quad (13)$$

해석적인 마찰계수 식은 식(11)과 식(13)으로부터 다음 식과 같이 유도된다.

$$f_{pb} = (1.99 \log_{10}(Re_{Dh} \sqrt{f_{pb}}) - 1.186)^{-2} \quad (14)$$

Blasius는 시험자료를 근거로 매끈한 원형관 내 유동에 대한 식(14)에 상응하는 식(15)를 제안하였다⁷.

$$f=0.3164Re_d^{-0.25} \quad 4000 < Re_d < 10^5 \quad (15)$$

위 식은 관에 적용되는데, 여기서는 이를 두 개의 평판 형상에 적용하기 위해 다음 식들을 사용하였다.

$$C_f = \frac{\tau_w}{\left(\frac{1}{2} \rho V^2\right)} = \frac{f}{4} \quad (16)$$

$$D_{fgap} = 2C_f \left(\frac{\rho V_{gap}^2}{2}\right) A_{wetted, gap} \quad (17)$$

따라서 식(14), 식(16), 그리고 식(17)로부터 다음의 두 평판에서의 마찰항력이 구해진다.

$$D_{fgap} = \frac{f_{fp}}{2} \left(\frac{\rho V_{gap}^2}{2}\right) A_{wetted, gap} \quad (18)$$

또는,

$$D_{fgap} = (0.1582 Re_{Dh}^{-0.25}) \left(\frac{\rho V_{gap}^2}{2}\right) A_{wetted, gap} \quad 4000 < Re_{Dh} < 10^5 \quad (19)$$

지지격자의 압력손실계수 예측 모형을 지지격자 내부 영역과 지지격자와 시험단면의 벽(두 평판) 사이영역으로 나누어 고려하기 위해 지지격자와 시험단면의 벽 사이로 흐르는 난류유동에 대해 압력손실계수를 기준영역인 봉 영역의 속도(Velocity Head)와 유로면적에 대해 식(18)을 사용하여 식(3)과 같이 정의하면,

$$K_{fgap} = \frac{\frac{f_{fp}}{2} V_{gap}^2 A_{wetted, gap}}{V_{core}^2 A_{core}}$$

질량 보존식과 레이놀즈수의 정의로부터,

$$K_{fgap} = \frac{f_{fp}}{2} \left(\frac{Re_{gap}}{Re_{core}}\right)^2 \left(\frac{D_{h, core}}{D_{h, gap}}\right)^2 \frac{A_{wetted, gap}}{A_{core}} \quad (20)$$

$V_{sg, inner} = V_{sg}$ 를 가정하면,

$$\frac{Re_{gap}}{Re_{core}} = \left(\frac{A_{core}}{D_{h, core}} - \frac{V_{sg}}{V_{core}} \frac{A_{sg, inner}}{D_{h, core}}\right) \left(\frac{D_{h, gap}}{A_{gap}}\right) \quad (21)$$

식(6), 식(20)과 식(21)로부터 K_{fgap} 은 다음과 같다.

$$K_{fgap} = \frac{f_{fp}}{2} \left(\frac{1}{A_{gap}} \left(A_{core} - \frac{A_{sg, inner}}{1-\beta}\right)\right)^2 \frac{A_{wetted, gap}}{A_{core}}$$

위 식은 시험단면에서 지지격자의 압력손실계수를 산출할 때 적용되며, 시험단면의 벽이 없는 원자로 조건의 지지격자 압력손실계수를 산출할 때는 지지격자 판 외곽 네 면의 마찰저항은 지지격자 내부로 포함시켜 계산한다.

3. 압력강하 시험 결과

3.1 압력강하 시험

5x5 시험장치는 폐쇄 유로를 형성하고 상온에서 수력시험을 수행할 수 있도록 설계되어 있다. 시험집합체는 핵연료집합체(16x16 또는 17x17)의 부분을 떼어내어 만든 5x5 배열의 봉 다발 형태이다. 즉 봉의 외경, 봉 간격, 지지격자 판 모양 등은 그대로이고 그 배열의 크기와 봉 다발의 길이가 다르다. 하류의 2개 지지격자들에 대하여 4개 구간의 압력강하량을 측정하였다. 시험단면내로 흐르는 유속이 주요 제어변수가 되며 그 범위는 3 ~ 8 m/s 이다. 루프의 압력은 시험단면 직전의 수평 유로관 내에서 0.4 MPa(gage) 이하로 유지된다. 물의 일정한 밀도를 유지하기 위해 물의 온도를 21℃로 조정한다.

16x16과 17x17 집합체 시험의 경우에는 시험단면부의 상단 및 하단은 각각 원자로의 노심 상부 지지판과 노심 하부 지지구조를 모사할 수 있도록 설계한다. 시험단면부의 길이 또한 실제 원자로의 노심을 모사할 수 있도록 설계한다. 시험집합체의 정압공위치는 각 부품의 압력강하량을 측정하도록 설치되어 있다. 압력강하 시험은 66 ℃와 121 ℃에서 각각 유량을 바꿔가면서 시험하였다. 66 ℃에서는 3,785 lpm에서 시작하여 약 8,560 lpm 정도 까지, 121 ℃에서는 4,164 lpm에서 시작하여 약 8,710 lpm 정도 까지 379 lpm 씩 유량을 증가시키며 수행되었다. 레이놀즈수 범위는 30,000 ~ 290,000이다. 노심조건은 레이놀즈수가 약 500,000으로 시험결과로부터 외삽하여 설계에 적용하는데 이는 기존 고온시험의 경험과 압력손실계수의 민감도가 레이놀즈수가 높은 영역에서는 매우 작아진다는 사실에 근거하여 타당하다.

3.2 시험 결과

시험집합체들의 기하형상자료는 표 1과 같으며 지지격자에 대한 압력손실계수는 압력강하량 측정값들로부터 다음과 같이 계산한다.

$$K_{span} = \frac{DP_{x-y}}{VH_{core}}$$

$$K_{bare\ rod\ friction} = \frac{DP_{x-y}}{VH_{core}}$$

$$K_{grid} = K_{span} - K_{bare\ rod\ friction}$$

여기서 x, y 는 정압공의 위치이다. 각 배열 및 각 형태별 압력강하 시험 결과는 그림 3과 4에 예측결과와 비교하여 나타내었다.

4. 해석적 예측 방법의 검증 및 응용

5x5 지지격자에 대한 해석적 모형에 의한 예측 결과와 시험결과는 그림 3에 비교하여 나타냈으며 노심조건인 레이놀즈수 $Re = 500,000$ 일 때의 해석적 모형에 의한 예측결과와 시험결과는 표 2에 정리하였다. 해석적인 모형은 서로 다른 기하형태를 가진 5x5 배열에 대한 시험결과를 노심조건에서 최대 12% 이내로 잘 예측하였다. 또한, 해석적인 모형은 레이놀즈수가 증가하면서 압력손실계수가 점차 감소되는 추이를 비교적 잘 예측하였다.

실제 크기(16x16 또는 17x17)의 지지격자에 대한 해석적 모형에 의한 예측 결과와 시험결과는 그림 4에 비교하여 나타냈으며 노심 조건인 레이놀즈수 $Re = 500,000$ 일 때의 해석적 모형에 의한 예측결과와 시험결과는 표 3에 정리하였다. 해석적인 모형은 서로 다른 기하형태의 실제 크기 지지격자에 대한 시험결과를 노심조건에서 $\pm 7\%$ 이내로 잘 예측하였다.

시험결과와 해석적 예측결과, 압력손실계수는 S형과 P형의 경우에는 배열 크기에 따라 큰 차이를 보인 반면, H형의 경우에는 거의 동일하였다. 그 원인은 시험에 쓰인 지지격자의 기하형상과 시험단면부 구성의 차이[표 1]이다. 즉 배열의 크기, 시험단면 벽과 지지격자의 간격, 안내관의 유무와 크기 및 개수, 이에 따른 시험단면의 유로면적과 수력직경 등 여러 가지 변수들에 의해 동일한 형태의 지지격자 형태인 경우라도 서로 다른 압력손실이 발생한다.

위 시험자료 분석으로부터 그 중 가장 큰 영향을 미치는 변수는 시험단면 벽과 지지격자의 간격으로서 이 값이 작을수록 압력손실이 크게 측정된다고 판단된다. 본 논문의 해석적 예측모형은 이 같은 시험단면 구성의 영향을 잘 반영하고 있기 때문에 압력강하 시험 전에 시험단면을 설계할 때나 서로 다른 형태의 지지격자 압력손실계수를 비교할 때 유용하게 적용될 수 있다.

5. 해석적 예측 모형의 응용

지지격자를 지나는 유체가 시험단면 벽과 지지격자 사이를 지날 때의 압력손실은 그 간격이 작을수록 커지게 된다. 따라서 4절에서 기술된 시험단면 벽과 지지격자의 간격의 차이에 따른 압력손실계수의 차이를 이해하기 위해 해석적 모형의 변수인 5x5 시험단면의 봉 유로면적에 대해 보정하였다. 즉,

$$K'_{grid} = \frac{K_{grid}}{A_{core}^2} \left(A_{core} - gap \left(width + \frac{width - gap}{2} \right) \right)^2$$

여기서 gap 은 시험단면 벽과 5x5 지지격자의 간격, $width$ 는 시험단면의 폭이다. 그 결과는 그림 5에 나타나 있으며 보정 후 결과는 실제 크기의 지지격자 시험결과와 비교했을 때 최대 12%내로 유사하였다.

6. 결론 및 논의

해석적 모형으로 예측한 지지격자의 압력손실계수를 세 가지 형태의 지지격자에 대한 압력강하 시험 결과로부터 생산한 압력손실계수와 비교함으로써 그 타당성을 검증하였다. 해석적 모형에 의

한 지지격자 압력손실계수 예측결과는 국내 핵연료집합체의 세 가지 지지격자 형태에 대하여 시험결과와 잘 일치하였다. 레이놀즈수가 500,000일 때 압력손실계수의 오차범위는 5x5의 경우 최대 12%, 실제 크기의 경우 최대 7%였다. 이 모형을 응용하면 5x5 배열의 지지격자로부터 실제 크기의 지지격자에 대한 압력손실계수도 최대 12%의 오차범위 내에서 예측 가능하였다. 따라서 이 해석적 예측 모형은 핵연료집합체 개발 및 설계개선 시 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

Nomenclature

A_{core} : 집합체내의 붕 영역의 유효면적
 $A_{grid\ blockage}$: 지지격자에 의한 축 방향 최대 유효 붕쇄면적
 $A_{projected}$: 지지격자 각 구성품의 투상면적
 A_{wetted} : 지지격자 판의 접수면적
 $A_{wetted,non-grid}$: 지지격자 내 비-지지격자 부품의 접수면적
 $\beta = A_{grid\ blockage} / A_{core}$
 C_{Dp} : 지지격자 각 구성품의 형상 항력 계수
 C_f : 지지격자 판의 마찰 항력 계수
 $C_{int} = 0.00175$: 간섭 항력 계수⁸⁾
 D_{fgrid} : 지지격자 판에 의한 마찰 항력
 D_h : 판, 지지격자 판-시험단면 벽에서의 수력 등가직경
 D_{Hcore} : bare rod 영역의 수력 등가직경
 f_g : Moody의 마찰곡선의 지지격자 내부의 붕 마찰계수
 f_o : Moody의 마찰곡선의 bare rod 영역의 붕 마찰계수
 f_{pp} : 두 평행한 지지격자 판-시험단면 벽 내의 마찰계수
 K : 압력손실계수
 L : 지지격자 판의 길이(높이)
 N : 붕 개수 + 안내판 개수
 $pitch$: 붕 간격
 Re_{core} : 집합체 붕 영역의 레이놀즈수
 $Re_l = \frac{\rho VL}{\mu}$: 국부 레이놀즈수

Re_d : 원형관에서의 레이놀즈수
 Re_n : 평판에서의 레이놀즈수
 Re_{Dh} : 두 평행한 평판에서의 레이놀즈수
 V_{core} : 집합체 붕 영역의 유속
 VH : 수두(Velocity Head)
 V_{mean} : 두 평행한 평판 내의 평균 유속

하첨자

bare rod : 지지격자 없이 붕만 있는 집합체(붕다발) 영역
core : 노심조건, 집합체(붕다발)의 *bare rod*와 같은 의미
d : 판 직경
f : 마찰
fgap : 시험단면 벽과 지지격자 사이에서의 마찰
gap : 시험단면 벽과 지지격자 사이
grid : 지지격자
l : 국부(Local)
mean : 평균(Average)
p : 지지격자 구성 부품
sg, inner : 지지격자 내부
span : 지지격자와 지지격자의 간격
wetted : 물에 접함

참고문헌

- [1] 권 정택 외 2인, "16x16 HID-1B 지지격자 압력손실계수 결정을 위한 ABB-CE 수력 시험", KAERI-TR-546/95, 한국원자력연구소, September 1995.
- [2] Schlichting, H., "Boundary Layer Theory", 6th Ed, p599, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [3] K. Rehme, "Pressure Drop Correlations for Fuel Element Spacers", Nuclear Technology, Vol. 17, January 1973.
- [4] T. H. Chun, D. S. Oh, "A Pressure Drop Model for Spacer Grids with and without Flow Mixing Vanes", J. of Nuclear Science and Technology, Vol. 35, No. 7, pp. 508~510, July 1998.
- [5] Hoener, S. F., "Fluid-Dynamic Drag", 2nd Ed., Chapters, 3, 5, 8, 10, Published by Author, 1965.
- [6] White, F. M., "Fluid Mechanics", Second. Edition.
- [7] White, F. M., "Viscous Fluid Flow", McGraw-Hill, New York, 1974.
- [8] Sherman, A., "Interference of Wing and Fuselage from Tests of 28 Combinations in the NACA Variable Density Tunnel", NACA Technical Report No. 575, 1936.

표 1. 압력강하시험에 쓰인 지지격자들의 기하형상 차이

집합체 형태	S 형		P 형		H 형	
봉 배열 크기	5x5	16x16	5x5	16x16	5x5	17x17
(mm)	69.9 x 69.9	208 x 208	69.9 x 69.9	208 x 208	65.0 x 65.0	214.6 x 214.6 (Rx: 215.0x215.0)
- (mm)	2.49	0.330	2.57	0.584	0.787	0.406
	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
	25	236	25	236	25	264
(mm)	9.70	9.70	9.50	9.50	9.50	9.50
	0	5(2x2 size)	0	5(2x2 size)	0	25(1x1 size)
(mm)	NA	24.9	NA	24.9	NA	12.04
(cm ²)	30.305	232.86 (Rx: 232.86)	31.071	240.09 (Rx: 240.09)	24.562	244.98 (Rx: 246.83)
(cm)	104.1	841.5	102.5	826.5	100.6	968.5
가 (mm)	11.64	11.07	12.12	11.62	9.764	10.20
가 (mm)	-	12.28	-	12.92	-	11.19

표 2. 5x5 지지격자에 대한 K_{grid} 의 예측결과와 시험결과

K_{grid} at Re = 500,000	S형	P형	H형
해석적 예측결과 (시험조건)	0.565	0.747	0.995
시험 결과 (외삽한 결과)	0.506	0.750	0.975
(예측결과-시험결과)/시험결과*100, %	11.7	-0.4	2.1

표 3. 실제 크기의 지지격자에 대한 K_{grid} 의 예측결과와 시험결과

K_{grid} at Re = 500,000	S형	P형	H형
해석적 예측결과 (시험조건)	0.807	0.952	1.015
시험 결과 (외삽한 결과)	0.758	0.998	0.970
(예측결과-시험결과)/시험결과*100, %	6.5	-4.6	4.6

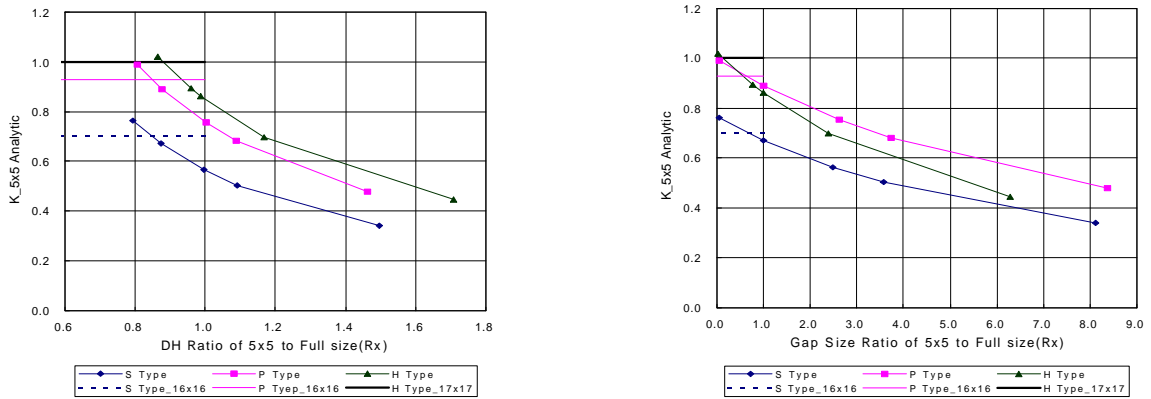


그림 1. 5x5 시험집합체의 수력직경과 지지격자-벽 간격의 압력손실계수에 대한 민감도

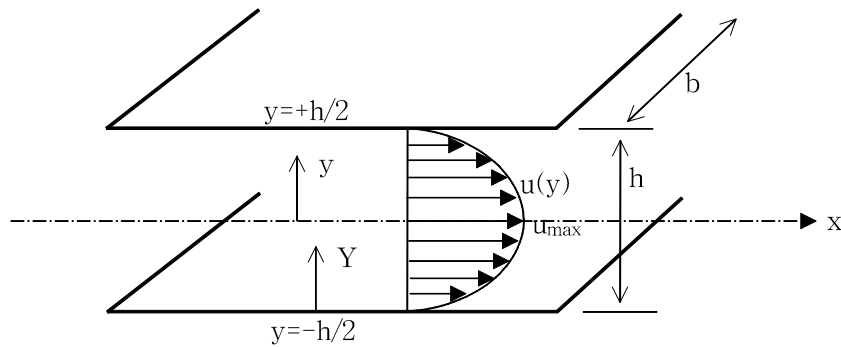


그림 2. 평행한 평판 사이의 완전발달 유동⁶⁾

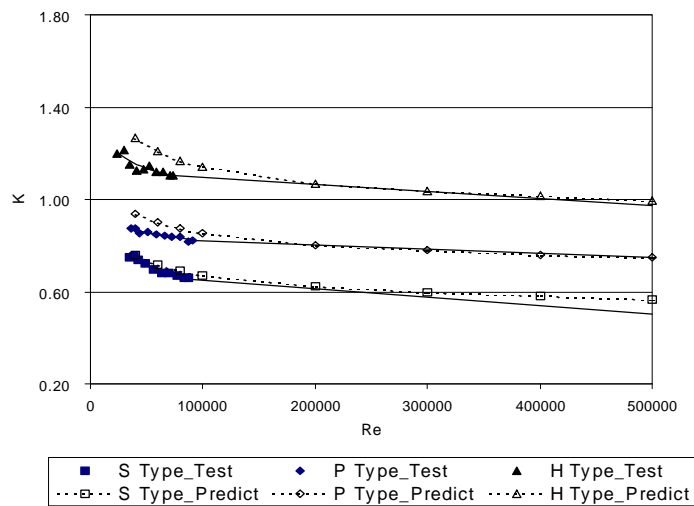


그림 3. 5x5 지지격자 시험 결과와 해석적 예측결과

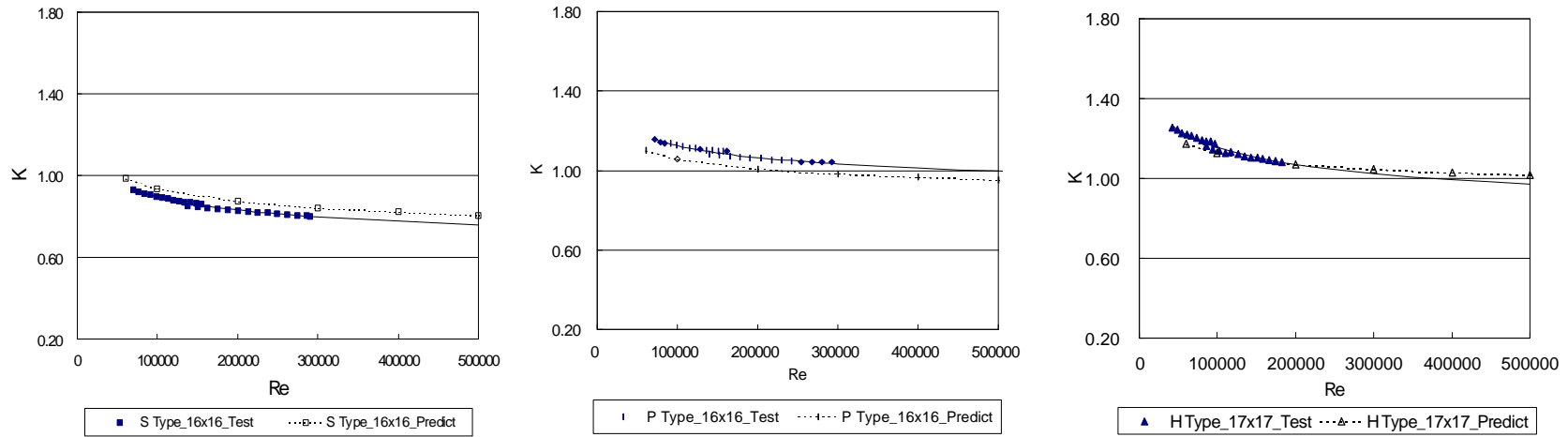


그림 4. 실제 크기의 지지격자 시험결과와 해석적 예측결과

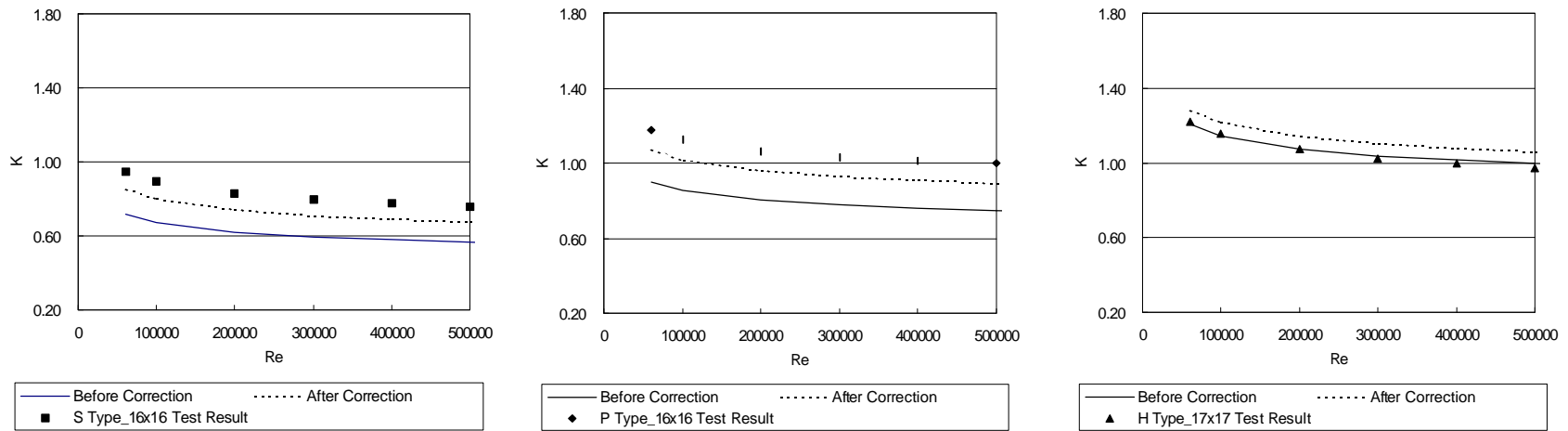


그림 5. 보정된 5x5 지지격자 해석적 예측결과와 실제 크기의 지지격자 시험결과