

접촉한 두 평면과 균열한 틈새에서의 유동마찰계수 비교[§]

남호윤^{*†}·최병해^{*}·김종범^{*}·이용범^{*}

* 한국원자력연구원

Comparison of the Friction-Loss Coefficient for the Gap of Two Contact Surfaces and a Crack

Ho-Yun Nam^{*†}, Byoung-Hae Choi^{*}, Jong-Bum Kim^{*} and Young-Bum Lee^{*}

* Korea Atomic Energy Research Institute

(Received April 13, 2011 ; Revised June 8, 2011 ; Accepted July 21, 2011)

Key Words: Double Wall Tube(이중벽관), Friction Coefficient(유동마찰계수), Leak Rate(누설률), Micro Gap(미세 틈새)

초록: 이중벽관 증기발생기에서 전열관의 내관과 외관 사이의 틈새에 채워진 헬륨가스의 압력변동으로 전열관의 파손을 감지하는 방법이 개발되고 있다. 이 현상을 모사하기 위해 압력으로 밀착된 두 평면 사이의 미세한 틈새에서의 누설률을 측정하여 실험식을 개발하였다. 이 실험식에서는 틈새의 간격과 유동마찰계수가 표면조도에 의해 상호 결합된 형태로 기술되는데, 간단한 평판접촉 모델을 사용하여 유동마찰계수 식을 분리하였다. 이 실험식과 균열에서의 누설률 예측에 사용되고 있는 기존의 유동마찰계수 관련 실험식들을 상호 비교하였다. 레이놀즈 수의 적용범위가 상이함에도 불구하고 개발한 실험식이 0.1~0.35 에서는 레이놀즈 수가 높은 경우에 적용되는 실험식들과 유사한 값을 보였다.

Abstract: A leak-detection method has been developed by measuring the pressure variation between the inner and outer heat-transfer tubes of a double-wall tube steam generator. An experiment was carried out to measure the leak rate in the gap between two surfaces pressed with a hydraulic press in order to simulate the phenomena, and a correlation was determined for the leak rate in a micro gap. However, in the correlation, the gap width and friction coefficient were coupled with the surface roughness, which affects the two parameters. The two parameters were separated using a surface-contact model to develop a correlation for the friction coefficient. The correlation was compared with the existing correlations used for crack analysis. Although the applied ranges of Reynolds numbers were different, the developed correlation for Reynolds numbers of 0.1–0.35 showed similar tendencies to existing correlations used for higher Reynolds numbers.

- 기호설명 -

d_h	: 수력직경 (m)	P_C	: 접촉압력 (Pa)
dP	: 차압 (Pa)	P_F	: 초기압력 (Pa)
E	: 탄성계수 (Pa)	P_o	: 시험시편 내부에서 압력 (Pa)
f	: 유동마찰계수	P_∞	: 대기압력 (Pa)
G	: 질량유량 (kg/s)	r	: 반경방향 거리 (m)
L	: 유로길이 (m)	r_1	: 시험시편 내경 (m)
P	: 압력 (Pa)	r_2	: 시험시편 외경 (m)
		S_m	: 표면조도의 폭 (m)
		V	: 속도 (m/s)
		δ	: 틈새 간격 (m)
		ε	: 표면조도 (m)
		μ	: 동점성계수 (kg/m-sec)
		ρ	: 밀도 (kg/m ³)

§이 논문은 2011년도 대한기계학회 유체공학부문 춘계 학술대회(2011. 4. 15.-16., 포항공대) 발표논문임

† Corresponding Author, hynam@kaeri.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

ρ_o : 시험시편 내부에서 밀도 (kg/m^3)
 σ_y : 재료의 항복응력 (Pa)

1. 서론

소듐냉각 고속로에서는 증기발생기의 신뢰성을 높이기 위한 방안 중 하나로 전열관을 이중벽관으로 하는 연구가 수행되고 있다. 반응성이 강한 두 유체 사이에 두 겹의 방호막을 형성시켜 전열관 파손으로 인한 소듐-물 반응사고 확률을 줄임으로써 증기발생기의 신뢰성을 향상시키는 개념이다.

내관과 외관 사이에 형성된 틈새에는 열전달 성능을 향상시키기 위해 제작시 생성된 잔류응력을 그대로 유지시킨 채로 헬륨가스를 채운다. 증기발생기의 물 측의 압력은 16.5MPa, 소듐 측은 대기압이므로 틈새에 채워진 헬륨가스의 압력을 2MPa 정도로 유지할 경우, 외관이 파손되면 헬륨가스의 압력이 감소하고, 내관이 파손되면 압력이 증가하므로 이 압력 변동만으로 전열관의 파손을 온라인으로 상시 감지할 수 있어 증기발생기의 신뢰성을 더욱 향상시킬 수 있다.⁽¹⁾

Fig. 1은 이중벽관의 형상이다. 헬륨가스의 유동이 용이하도록 외관의 내벽에 길이방향으로 폭과 높이가 각각 1mm, 0.3mm 정도인 4개의 홈을 설치하고, 각 전열관의 하부에서 이 홈들이 서로 연결되는 플레넘을 만들어 압력을 측정한다. 홈과 홈 사이에서 내관 또는 외관이 파손되어 증기 또는 헬륨가스가 누설할 경우에, 내관과 외관의 틈새를 통과한 후에 홈에 들어가고 다시 플레넘으로 흐르게 된다. 헬륨가스나 증기가 잔류응력이 존재하는 미세한 틈새로 통과하여야 하므로 홈에서의 유동저항은 틈새에서의 유동저항에 비하여 매우 적다. 그러므로 전열관의 길이가 길지라도 유동저항의 주요 요소는 틈새에서의 유동저항이고, 유동저항이 가장 클 경우는 홈과 홈 사이의 중앙에서 균열이 발생할 경우이다.

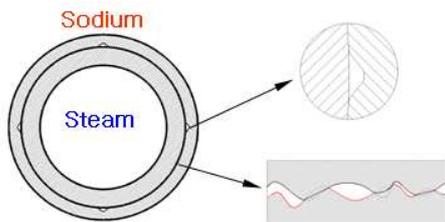


Fig. 1 Geometry of a double wall tube

상기 감지방법을 적용하려면 잔류응력이 존재하는 미세한 틈새로 통과하는 헬륨가스나 증기의 누설률(leak rate)을 결정하여야 하는데 주요인자는 유동마찰계수이다. 이중벽관을 설계하는데 있어서 사용하는 관의 표면조도는 1 μm 정도, 잔류응력은 15-20MPa 정도로 유지한다. 미세한 틈새에서의 누설을 연구하는 분야로는, 패키징에서의 누설에 대한 연구와 재료의 균열로 발생한 누설에 대한 연구가 있다. 패키징에서는 틈새가 아주 미세하여 누설률이 매우 적어 분자의 자유경로와 틈새의 수력직경과의 비로 나타내는 Knudsen 수가 주요인자이다.^(2,3) 그러므로 이는 이중벽관의 틈새에는 적용할 수 없는 범위이다.

균열에서의 누설률은 균열의 간격과 형태에 많은 영향을 받는다. 균열의 문제에서 다루어지는 틈새의 간격은 수십 μm 정도이고, 균열의 형태가 주요한 인자이다.⁽⁴⁻⁶⁾ 증기발생기의 비교적 넓은 균열에 대한 연구에서,⁽⁷⁾ $L/d_h < 75$ 인 조건에서는 오리피스 모델을 적용하여 $K = (fL/d_h)^{-1/2}$ 으로 정의되는 유동계수(flow coefficient: K)가 상수인 0.6 이었고, $L/d_h > 75$ 인 조건에는 L/d_h 의 영향을 고려하였다. 균열이 비교적 적은 경우에 대한 실험에서는 유속에 따라 유동계수가 다르게 나타났다. 즉, 낮은 유속에서 유동계수는 0.015 이었다.⁽⁸⁾

균열에서 누설률을 연구한 Li 등⁽⁹⁾의 연구에서는 Mach 수가 낮으면 유동마찰계수로 $f=96/Re$ 를 사용하였고, Mach 수가 높으면 유동마찰계수를 상대조도(ϵ/d_h)의 함수만으로 기술하였다. 고압 관의 균열에 대해 연구한 문헌⁽¹⁰⁾에서는 누설률을 계산하는데 레이놀즈수에 무관한 Moody의 임계유속 모델을 적용하였다. 이외에 많은 문헌에서는 Nikuradse의 유동마찰계수나 이를 보완한 실험식들을 사용하고 있다.

이 논문에서는 이중벽관에서의 누설률을 모사하기 위해 가압되는 두 개의 맞붙은 평판의 틈새에서 누설되는 헬륨가스의 양을 측정하였다. 실험인자는 인발 시에 가해지는 압력을 모사한 초기압력, 잔류응력을 모사하는 접촉압력, 평판의 표면조도 및 레이놀즈수이다. 미세한 틈새에서의 유동마찰계수를 기술하는 실험식을 개발하여 기존의 균열 문제에서 적용되었던 실험식들과 비교하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험장치와 시편은 Fig. 2에 보이는 것과 같이 두 개의 환형 평판을 마주 붙인 상태에서 유압기

로 밀착시켰다. 흡이 형성된 내부에 헬륨가스를 주입하고 틈새로 누설되는 헬륨가스의 양을 측정하였다. 시편은 증기발생기의 전열관으로 사용되는 재질인 9Cr-1Mo-V 강으로 제작하였다. 시편의 내경은 11mm, 외경은 25mm 이다. 시편의 지지대는 고강도 재질인 SK11 강으로 만든 후에 열처리하여 강도를 높였다.

시편을 가공한 후에 접촉면을 연마하고, 시편의 평면성을 조사하기 위하여 253MPa 로 압착한 상태에서 헬륨가스로 2MPa 압력을 가하면서 누설률을 측정하였다. 이 시험에서 누설률이 0.01cc/s 이하인 시편을 선택하여 Blast 방법으로 시편의 표면을 설정한 표면조도로 가공하였다.

2.2 실험범위 및 오차

표면조도가 모두 다른 7 개의 시편들을 0.082-1.25μm 범위에서 제작하여 사용하였다. 초기압력은 0~531MPa 범위에서 6~10 번 바꾸었고, 접촉압력은 5.05~24MPa 범위에서 5 번 설정치를 변화시키면서 측정하였다. 유량을 변화시키기 위하여 헬륨가스의 압력을 0.1~2.1 MPa 범위에서 5 번 설정치를 바꾸었다. 이 실험에서 틈새의 수력직경으로 정의된 레이놀즈수의 범위는 0.0045~35 이었다.

설정된 표면조도를 갖는 시편을 고압 유압계를 사용하여 설정한 초기압력으로 15 분 이상 가압한 후에 누설이 정상상태에 도달하면 저압 유압계로 교체하였다. 저압 유압계로 시편을 설정한 접촉압력으로 가압한 후에 헬륨가스의 압력을 변화시키면서 누설률을 측정하였다. 접촉압력을 변화시킬 때마다 질량유량계의 영점을 보정하였다.

이 실험에서는 총 925 개의 데이터를 생산하였다. 각 시편의 표면조도와 조도의 폭은 40 번 측정하였는데, 95% 신뢰도를 갖는 표면조도의 오차는

6.4%, 조도의 폭의 오차는 11% 이었다. 유량은 낮은 범위에서는 10%, 높은 범위에서는 2% 오차를 가졌고, 가압하는 압력은 최대 2.25%, 최소 1.25%의 오차를 가졌다.

3. 실험결과 분석

3.1 누설률

압력강하와 유속의 관계에서 유동마찰계수는 공학적으로 다음과 같다.

$$dP = \frac{1}{2} f \rho \frac{dr}{d_h} V^2 \tag{1}$$

유로의 폭이 넓고, 간격이 좁을 경우에는 수력직경은 폭(δ)의 약 2 배이다. 즉, $d_h = 2\delta$ 이다. 유동마찰계수는 레이놀즈수(Re)로 다음과 같이 기술된다.

$$f = \frac{B}{Re^C} \tag{2}$$

여기에서 B 와 C 는 양수이고, 또한 B 는 표면조도의 함수로 기술되기도 한다. Fig. 2 에서와 같이 이 실험에 사용된 시편에서의 유동은 원통좌표계로 기술된다.

이 실험에서는 표면조도, 초기압력, 접촉압력을 처음 설정한 값으로 유지한 상태에서 헬륨가스의 압력을 조절하여 유량을 각각 5 번 변화시키면서 차압($dP = P_o - P_e$)과 질량유량을 측정하였다. 식 (2) 에서 C 값은 질량유량에는 무관하므로, 질량유량을 변화시키면서 최소사승법으로 C 값을 도출하여 Fig. 3 에 도시하였다.

이 그림에서 C 값은 1.31 정도이었고, 사용한 185 개의 데이터의 표준편차는 4.4×10^{-2} 이다. C 값을 간단하게 표시하기 위하여 상수 C 값을 4/3 으로

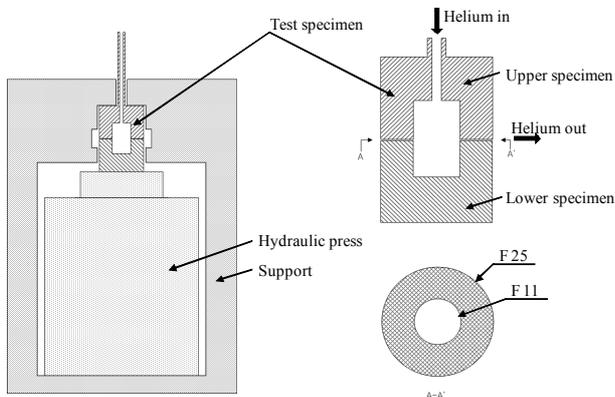


Fig. 2 Experimental rig and test specimen

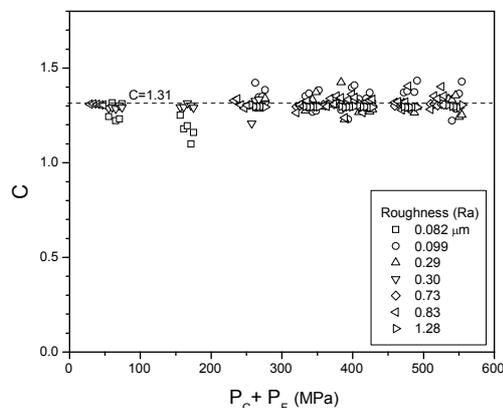


Fig. 3 C value in the relation of the friction coefficient and Reynolds number

정하여도 실험 데이터의 분석결과에서는 그 오차가 미미하였다. 그러므로 식 (2)는 미세한 틈새에서는 식 (3)과 같이 기술된다.

$$f = \frac{B}{Re^{4/3}} \quad (3)$$

시험시편의 내경 r_1 에서 외경 r_2 방향으로 헬륨가스가 흐를 경우, 임의의 위치 r 에서의 질량유량은 $G=2\pi r\delta\rho V$ 이다. 단열조건으로 가정하면 위치 r 에서의 압축성 가스인 헬륨가스의 밀도 $\rho(r)$ 는 $\rho(r)=\rho_o P(r)/P_o$ 로 기술된다. 수력직경으로 정의되는 레이놀즈수는 $Re=d_h\rho V/\mu$ 이므로 이 관계들을 식 (1)에 대입하여 양변을 적분하면, 질량유량에 대해 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$G = \left[\left(\frac{\delta^3}{B} \right) \frac{8\pi^{2/3}}{3\mu^{4/3}} \frac{\rho_o}{P_o} \left(\frac{P_o^2 - P_\infty^2}{r_2^{1/3} - r_1^{1/3}} \right) \right]^{3/2} \quad (4)$$

여기에서 틈새의 간격 δ 는 표면조도, 초기압력 및 접촉압력의 함수이고, B 는 표면조도의 함수로 기술된다. 그러므로 두 변수는 표면조도로 상호 연관되어 있다. 이 실험에서는 δ 과 B 를 상호 분리하여 측정하지 못하고 B 로 정량화된 틈새의 간격 ($\delta/B^{1/3}$)에 대해 다음과 같은 식을 개발하였다.⁽¹¹⁾

$$\frac{\delta}{B^{1/3}} = \alpha [1 - 0.6(1 + 0.9\sqrt{\varepsilon/S_m}) \left(\frac{P_F}{\sigma_y} \right)^{1/4}] \quad (5)$$

여기에서

$$\begin{aligned} \alpha &\equiv (0.73 \times 10^{-6} + 2.2\varepsilon) F_{pc} F_{ov} \\ F_{pc} &\equiv \exp[-5.75(1 + 5.29 \frac{\varepsilon}{S_m}) \frac{P_c}{E}] \\ F_{ov} &\equiv 1 + \frac{(1/40)(P_F/\sigma_y)^2}{(1/3)(\varepsilon/S_m)^{1/2} + P_c/\sigma_y} \end{aligned} \quad (6)$$

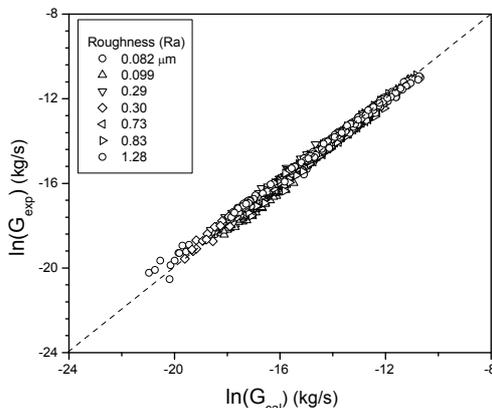


Fig. 4 Comparison of the calculated mass flow rate with measured mass flow rate

식 (4)에 식 (5)를 대입하여 실험 데이터와 비교한 것이 Fig. 4 이다. 헬륨가스는 단열조건에서 $P_o/\rho_o=2077.3K$ 이며, K 는 Kelvin 온도이다. 이 분석에는 925 개의 데이터를 사용하였고 상대표준편차는 1.2% 이었다.

3.2 유동마찰계수

식 (5)에서 틈새의 간격 δ 와 유동마찰계수의 상수인 B 를 분리하기 위하여 Fig. 5 와 같은 평판접촉 모델을 가정하였다. 즉, 표면조도가 ε , 조도의 폭이 S_m 인 표면돌기가 균일하게 분포한 두 평판이 밀착하는 모델이다. 요철이 있는 두 평판이 맞붙어 힘을 받을 경우에 재질의 항복강도 이상이면 표면돌기는 찌그러지게 된다.

외부의 힘이 작용하지 않는 상태에서 두 평판의 표면돌기의 꼭지점과 꼭지점이 만날 경우, 유로의 폭이 S_m 이면 유로의 면적은 $A_F=2\varepsilon S_m$ 이다. 그러나 꼭지점과 골이 만날 확률도 있으므로 실제의 넓이는 이 넓이의 1/2 로 가정하였다. 즉, $A_F=\varepsilon S_m$ 이다. 유로의 폭 S_m 에서 유체가 접촉하는 페리미터(P_m)은 $P_m=4(S_m^2/4+4\varepsilon^2)^{1/2}$ 이다. 수력직경은 $d_h=4A_F/P_m$ 으로 정의되므로 위의 관계식에서 수력직경은,

$$d_h = \frac{2\varepsilon}{\sqrt{1+(4\varepsilon/S_m)^2}} \quad (7)$$

유로의 폭이 넓고, 간격이 좁을 경우 수력직경은 폭의 약 2 배이다. 그러므로 외부의 힘이 가해지지 않았을 경우에 틈새의 간격 δ 은

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1+(4\varepsilon/S_m)^2}} \quad (8)$$

식 (5)에서 외부에서 압력을 가하지 않을 경우에는 $P_F=0, F_{pc}=1, F_{ov}=1$ 이므로 이 식을 정리하면,

$$\frac{\delta}{B^{1/3}} = 0.73 \times 10^{-6} + 2.2\varepsilon \quad (9)$$

식 (8)과 (9)에서 B 을 도출하여 식 (3)에 대입하면 두 개의 접한 평판의 틈새에서의 유동마찰계수는 다음과 같다.

$$f = \frac{1}{Re^{4/3}} \left[\frac{\varepsilon/\sqrt{1+(4\varepsilon/S_m)^2}}{0.73 \times 10^{-6} + 2.2\varepsilon} \right]^3 \quad (10)$$

4. 비교 및 검토

4.1 기존 유동마찰계수 분석

실험을 통해 개발한 식 (10)의 적용범위는 기존

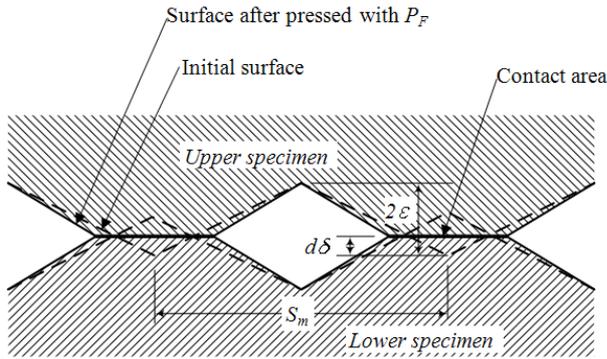


Fig. 5 Surface-contact model

의 유동마찰계수에 관한 실험식들의 적용범위와 많은 차이점이 있다. 이중벽관 또는 균열로 인하여 누설이 문제시되는 시스템에서는 증기발생기에서와 같이 높은 압력으로 유지되다가 균열로 인해 대기로 누설되는 경우가 대부분이다. 이 경우 압력차이가 크고 관의 두께와 같은 규모인 유로가 짧아 유속은 매우 빠르나 틈새의 간격이 매우 작기 때문에 레이놀즈수가 매우 낮다.

이 실험에서의 레이놀즈수의 범위는 0.0045~35 이었다. 실험식들은 대부분 거시규모(macro scale)에서 개발되어 수력직경은 수 cm 이상의 규모이지만 유속이 낮아서 층류를 형성하는 경우가 대부분이다. 또한 서로 밀착한 두 벽면 사이에서의 상대조도(ϵ/d_h)는 0.5 정도인데 비해 기존의 실험식들은 상대조도가 0.05 보다 적은 조건에서 적용된다.

기존의 실험식들이 실험범위를 충족하지 못하지만 균열해석에 사용되고 있는 실험식들의 확장 가능성을 조사하기 위하여 Idelchik 의 문헌⁽¹²⁾에 수록된 실험식들을 Table 1 에 정리하였다. 유속이 빠를 경우에 유동마찰계수를 기술하는 대표적인 것이 Blasius 실험식이다. 이 식은 레이놀즈수가 2300 이상에서 적용되므로 균열에서의 누설을 해석하는 데는 사용되지 않으나 유속 측면에서는 유사하다. 레이놀즈수가 2300 보다 낮은 층류에서는 Hagen-Poiseuille 식이 사용되지만 표면조도를 고려하지 않았고, 유속이 매우 낮은 경우에 적용된다.

균열해석에서는 Nikuradse 실험식과 이 식을 여러 조건에 따라 보완한 실험식들이 많이 사용된다. 거시규모 시스템에서 레이놀즈수와 표면조도를 고려한 대표적인 것으로 상대조도가 0.05 보다 적고, 레이놀즈수가 아래와 같은 범위에서 적용된다.

$$\frac{26.9}{(\epsilon/d_h)^{1.143}} \leq Re \leq \frac{217-382\ln(\epsilon/d_h)}{\epsilon/d_h} \quad (11)$$

Table 1 Existing correlations

Author	Equation	Eqs
Blasius	$f = 0.3164 / Re^{1/4}$	(12)
Hagen-Poiseuille	$f = 64 / Re$	(13)
Nikuradse	$f = \frac{1}{[a + b \lg(Re \sqrt{f}) + c \lg(\epsilon/d_h)]^2}$	(14)
Prandle-Nikuradse	$f = \frac{1}{[2 \lg(3.7 / (\epsilon/d_h))]^2}$	(15)
Filonenko-Altshul	$f = \frac{1}{[1.8 \ln(Re) - 1.64]^2}$	(16)
Colebrook-White	$f = \frac{1}{[2 \lg(2.51 Re \sqrt{f}) + (\epsilon/d_h) / 3.7]^2}$	(17)
Van Karman	$f = \frac{1}{[2 \lg(0.5 \epsilon/d_h) + 1.74]^2}$	(18)
Samoilenko	$f = \frac{4.4 \exp[-0.00275 / (\epsilon/d_h)]}{Re^{0.595}}$	(19)
Altshul-1	$f = 0.11(\epsilon/d_h + 68 / Re)^{1/4}$	(20)
Altshul-2	$f = \frac{1}{[1.8 \lg(10 / (\epsilon/d_h))]^2}$	(21)

식 (11)에서 상대조도를 0.5 로 가정하면 레이놀즈수는 60 보다 높아야 한다. Nikuradse 실험식에서 a, b, c 은 변수 $(\epsilon/d_h)Re^{1/2}$ 의 값에 따라 5 단계로 나누어 결정되는 상수이다. 상대조도가 낮을 경우 즉, 이 변수의 값이 3.6~10 범위에서는 $c=0$ 이 되고, 이 보다 증가하면 음수로 절대값이 점점 증가하게 된다. 즉, 상대조도가 증가할수록 유동마찰계수가 커진다. b 값은 이 변수가 증가할수록 감소하다가 변수가 191 이상에서는 영이 되어 레이놀즈수의 영향이 사라지게 된다.

Prandle-Nikuradse 실험식은 상대조도가 0.05 보다 적은 원형 관에서 레이놀즈수가 $560/(\epsilon/d_h)$ 보다 큰 경우에 적용되는 식이다. 이 식은 Nikuradse 실험식에서 a 와 b 가 영이 되는 경우이다. Filonenko-Altshul 실험식은 표면조도가 낮은 원형 관에서 레이놀즈수가 4000 보다 높을 경우에 적용된다. Colebrook-White 실험식은 표면조도가 균일하지 않는 원형관에서 상대조도가 0.05 보다 낮고, 레이놀즈수가 3000 보다 큰 영역에서 적용된다.

Van Karman 실험식은 레이놀즈수가 적고 상대조도가 높은 경우에 적용되지만 레이놀즈수에 무관하다. Samoilenko 실험식은 천이영역에서 상대조도가 0.007~0.025 범위에서 적용되고, 상대조도를 0.5 로 가정하면 레이놀즈수의 적용범위는 760~1251 이다. Altshul-1 실험식은 Colebrook-White 실험식과 같이 표면조도가 균일하지 않는 원형관에서 상대조도가 0.05 보다 낮고, 레이놀즈수가 3000 보다 큰 영역에서, Altshul-2 실험식은 $(\epsilon/d_h)Re^{1/2}$ 가 191 보다 높은 영역에서 적용된다.

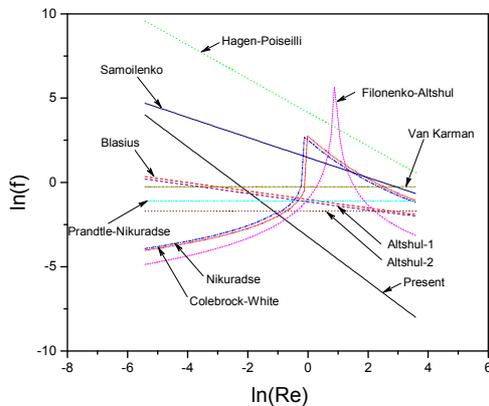


Fig. 6 Comparison of the developed friction coefficient with existing that

4.2 유동마찰계수 비교

적용범위를 비교하면, 상대조도는 실험이 실험식들의 적용범위보다 10 배 정도 크고, Reynolds 수는 유일하게 Hagen-Poiseuille 식을 만족시키나 속도는 이 식의 적용범위보다 대단히 빠르다. 균열에서도 상대조도가 크고, 유속은 빠르나 레이놀즈수가 적은 경우에 해당한다. 유동특성으로 비교할 때에 균열의 틈새와 두 평판의 접촉이 다른 점은, 균열에서는 돌출한 부분과 상대 면의 골이 마주보는 형태이나 두 평판에서는 불규칙하게 접촉한다.

적용범위를 고려하지 않고 Table 1 에 기술된 유동마찰계수들과 개발한 식 (10)을 비교한 것이 Fig. 6 이다. 이 비교에서는 표면조도는 $1\mu\text{m}$, 상대조도는 0.5 를 적용하였고, 레이놀즈수의 범위는 실험과 동일한 범위인 0.0045~35 이다.

층류에서 사용되는 Hagen-Poiseuille 및 Samoilenko 실험식들은 실험범위에서 개발한 실험식보다 매우 높은 값을 나타낸다. 그 외의 모든 실험식들은 레이놀즈수가 0.1~0.35 범위보다 많거나 적을 경우에는 개발한 실험식과 차이를 보인다. 즉, 레이놀즈수가 이 범위보다 높으면 기존 실험식들의 유동마찰계수가 개발한 실험식보다 높지만 이 보다 적으면 적은 값을 나타낸다. Blasius 와 Altshul-1 실험식들은 같은 경향을 보이고, 레이놀즈수에 무관한 Van Karman, Prandtl-Nikuradse 및 Altshul-2 실험식들은 상대조도가 0.5 일 경우에는 서로 유동마찰계수가 최대 4.2 배 정도의 차이가 있다. Nikuradse 와 Colebrook-White 실험식들은 같은 경향을 보이지만, 레이놀즈수가 1 이하에서는 레이놀즈수가 증가할수록 감소하는 경향을 보여 레이놀즈수가 1 보다 적은 범위에서는 적용하기 어렵다. Filonenko-

Altshul 실험식도 레이놀즈수가 2.7 정도 이하에서는 급격히 감소하는 경향을 보인다.

5. 결론

표면조도가 적은 두 평판이 외압으로 밀착된 틈새에서의 누설률을 예측하는 실험식을 개발하였고, 이 실험식을 평판접촉 모델을 사용하여 유동마찰계수에 관한 실험식을 개발하였다. 실험범위에서 비교한 결과, 개발한 실험식은 낮은 레이놀즈수에 적용되는 실험식들보다 낮은 값을 나타내지만, 레이놀즈수의 적용범위가 다름에도 불구하고 0.1~0.35 범위에서는 레이놀즈수가 높은 범위에 적용되는 실험식들과 유사한 경향을 갖는 것으로 나타났다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부의 지원을 받아 원자력연구개발 사업을 통해 수행되었다.

참고문헌

- (1) Nam, H., Choi, B. and Kim, J., 2010, "On the Design Concept Technology Development of a Double Wall Tube Steam Generator," *Trans. of the KSME (A)*, 34(9), 1217~1225.
- (2) Grine, L. and Bouzid, A., 2009, "Correlation of Gaseous Mass Leak Rates Through Micro and Nano-Porous Gaskets," *Proc. of ASME: Pressure Vessel and Piping Conf.*, Prague, Czech.
- (3) Cazauran, X, Birembaut, Y. and Hahn, R., Kockelmann, H., Moritz, S., 2009, "Gas Leakage Correlation," *Proc. of ASME: Pressure Vessel and Piping Conf.*, Prague, Czech.
- (4) Rahman, S., Ghadiali, N., Wilkowski, G.M. and Paul, D.A., 1997, "Computer Model for Probabilistic Leak-Rate Analysis of Nuclear Piping and Piping Welds," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 70, 209~221.
- (5) Rudland, D.L., Wilkowski, G. and Scott, P., 2002, "Effects of Crack Morphology on Leak-Rate Calculations in LBB Evaluations," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 79, 99~102.
- (6) Beck, S.B.M., Bagshaw, N.M. and Yates, J.R., 2005, "Explicit Equations for Leak Rates Through Narrow Crack," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 82, 565~570.
- (7) Majumdar, S., Kasza, K., Bakhtiari, S., Park, J.Y., Oras, J., Franklin, J., Yulak, C. and Shack, W.J., 2009, "Stambaugh M. Steam Generator Tube Integrity Issues: Pressurization Rate Effects, Failure Maps, Leak Rate Correlation Models, and Leak Rates in Restricted Areas," *NUREG/CR-6879*,

- U.S. NRC.
- (8) Chang, Y.S., Jeong, J.U., Kim, Y.J., Hwang, S.S. and Kim, H.P., 2010, "Enhancement of Leak Rate Estimation Model for Corroded Cracked Thin Tubes," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 87, 52~57.
- (9) Li, X., Shi, S., Zhang, Z. and Li, X., 2010, "Leak Rate Calculation for LBB Analysis in High Temperature Gas-cooled Reactors," *Nuclear Engineering Design*, 240, 3231~3237.
- (10) Narabayashi, K., Fujii, M., Matsumoto, K. and Horimizu, Y., 1991, "Experimental Study on Leak Flow Model Through Fatigue Crack in Pipe," *Nuclear Engineering Design*, 28, 17~27.
- (11) Nam, H., Kim, J., Choi, B., Kim, J. and Lee, Y., 2010, "Experimental Investigation of the Leak Detection Capability for a Double Tube," *KAERI/TR-4160/2010*.
- (12) Idelchik, I.E., 1986, "Handbook of Hydraulic Resistance," *Hemisphere Publishing Co.*, New York, 57~112.