

길이 대 직경 비와 입구 모서리 반경에 따른 회전 오리피스스의 송출 특성

하경표* · 강세원* · 고상근**

(1999년 12월 29일 접수)

Discharge Characteristics of Rotating Orifices with Length-to-Diameter Ratios and Inlet Corner Radii

Kyoung-Pyo Ha, Sewon Kang and S. Ken Kauh

Key Words : Discharge Coefficient (송출계수), Rotating Orifice (회전 오리피스), Rotation Number (회전 수), Length-to-diameter Ratio (길이 대 직경 비), Corner Radius (모서리 반경)

Abstract

The effect of rotation on the discharge coefficient of orifices with various length-to-diameter ratios and two different inlet corner radii was studied. Length-to-diameter ratios of the orifices range from 0.2 to 10, while the inlet shapes are square edged, or round edges of radius-to-diameter ratio of 0.5. From the experiment, we found that rotational discharge coefficient and Rotation number, when based on ideal exit velocity of the orifice considering momentum transfer from the rotor, describe the effect of rotation very well. In this study, the discharge coefficients of rotating orifices are shown to behave similar to those of the well-known non-rotating orifices. For both rotating and non-rotating orifices, the discharge coefficients increase with the length-to-diameter ratio until a maximum is reached. The flow reattachments in the relatively short orifices are responsible for the increase. The coefficient then decreases with the length-to-diameter ratio due to the friction loss along the orifice bore. The length-to-diameter ratio that yields maximum discharge coefficient, however, increases with the Rotation number because the increased flow-approaching angle requires larger length-to-diameter ratio for complete reattachment. The length-to-diameter ratio for complete reattachment is shorter for round edged orifices than that of square edged orifices by about a unit length-to-diameter ratio.

기호설명

A : 면적[m²]
 A_h : 오리피스 단면적[m²]
 A' : 전면 투영 면적[m²]
 C_d : 송출계수
 $C_{d,rot}$: 회전 송출계수
 d : 오리피스 직경[mm]
 l : 오리피스 길이[mm]
 m_l : 상수

\dot{m} : 질량 유량[kg/s]
 P_1 : 상류 압력[Pa]
 P_2 : 하류 압력[Pa]
 R : 공기의 기체 상수[kJ/kg·K]
 R_h : 오리피스 회전 반경[mm]
 Ro : 로테이션 수(Rotation number)
 Ro_{rot} : 회전 로테이션 수(rotational Rotation number)
 r : 오리피스 입구 모서리 반경[mm]
 T_1 : 상류 온도[K]
 T_{rot} : 회전성 온도(rotational temperature)[K]
 V_h : 이론적인 오리피스 축방향 유속[m/s]
 π : 압력비(=P₁/P₂)
 γ : 공기의 비열비
 ϕ : 유동 유입각[deg]

* 회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 서울대학교 기계공학과

E-mail: kauh@gong.snu.ac.kr

TEL: (02) 880-7115 FAX: (02) 883-0179

ω : 오리피스 회전 속도[rad/s]

ψ : 각도[deg]

1. 서론

터빈 블레이드 냉각 기술의 발달은 터빈 입구 온도(turbine inlet temperature)를 재료의 한계 온도 이상으로 높였고, 이를 통해 효율의 향상을 가져왔다. 그러나, 냉각 등의 목적으로 사용되는 내부 공기 시스템(internal air system)에 의해 소비되는 일은 압축기 일의 약 20% 정도를 차지하므로, 내부 공기 시스템에 대한 정확한 설계는 고성능 터빈 개발에 필수적인 요소이다. 또한 대형 전동기의 효과적인 냉각을 위해 설계된 내부 통풍구를 지나는 유량에 대한 정보는 전동기 설계를 위해 반드시 필요한 자료이다. 터빈이나 전동기의 오리피스(orifice)는 회전하는 것과 회전하지 않는 것으로 구성되어 있고, 이들 오리피스의 송출계수(discharge coefficient)로부터 각 유로를 지나는 유량을 구할 수 있다.

송출 특성에 영향을 주는 인자들과 관련하여 Lichtarowicz et al.⁽¹⁾와 McGreehan & Schotsch⁽²⁾와 Hay & Lampard⁽³⁾ 등이 선행된 연구들을 정리하였다. 이들을 종합하여 송출 특성에 영향을 주는 중요한 인자를 나열하면, 길이 대 직경 비, 입출구의 형상, 입출구에서의 직교류(crossflow), 오리피스에서의 Re수, 그리고 오리피스의 회전 등이다.

Lichtarowicz et al.⁽¹⁾은 길이 대 직경 비가 0.5~10.0이고, 비압축성이며, 공동이 발생하지 않는 유동(non-cavitating flow)에 대한 송출계수를 정리하여, 설계 자료로 사용할 수 있는 상관식을 제시하였다. Lichtarowicz et al.⁽¹⁾에 따르면 오리피스 벽을 따른 압력 변화는 크게 세가지로 요약할 수 있다. 이는 수축된 단면으로 유체를 가속하는데 필요한 압력, 전체 또는 일부의 재부착 시 회복되는 압력, 그리고 오리피스 벽을 따라 발생하는 마찰에 의한 압력 손실로 구분된다. 직각 모서리의 경우 길이 대 직경 비가 약 2일 때, 송출계수는 최대값을 가진다. 이보다 긴 오리피스는 벽면에서의 마찰에 의한 압력 손실로 길이 대 직경 비가 증가할수록 송출계수가 감소하는 경향을 보인다. 길이가 짧은 오리피스에서는 재부착에 의한 압력 회복의 정도에 따라 길이 대 직경 비가 증가할수록 송출계수가 증가한다. 그러므로, 재부착에 의한 압력 회복이 충분히 일어나고, 벽면을 따른 마찰 손실이 적은, 길이 대 직경 비가 2인 경우가 최대의 송출계수를 보인다.

McGreehan & Schotsch⁽²⁾는 긴 오리피스의 회전

효과와 입구의 등근 모서리 형상의 영향과 길이 대 직경 비 등 여러 변수들의 임의의 조합에 따라 적용이 가능한 송출계수 상관식을 제시하였다. 입구 형상이 등근 모서리를 갖는 오리피스의 경우, 입구 등근 모서리 반경의 오리피스 직경에 대한 비(r/d)가 0.5 이상이면 송출계수가 더 이상 증가하지 않는다는 것을 보였다. Hay et al.⁽⁴⁾은 오리피스 입구에서의 등근 모서리가 12.5~16%의 송출계수 증가를 보이는 반면, 출구에서의 등근 모서리는 최대 3.5%의 증가만을 보임을 밝혔다.

Hay et al.⁽⁴⁾은 또한 입출구에서 등근 모서리를 갖는 오리피스에서 직교류의 영향에 대해 고찰하였다. 이들은 오리피스 입출구에서의 직교류의 존재에 기인하는 추가적 손실(additional loss)을 정의하였다. 추가적 손실은 직교류가 존재하는 경우에 직교류가 존재하지 않을 때 만큼의 질량 유량을 얻기 위해 추가적으로 요구되는 압력차와 관련된다. 이들은 직교류와 오리피스 제트와의 운동량 비와 추가적 손실의 관계를 살펴보고, 이를 이용해 직교류가 존재하는 경우에 송출계수를 예측하는 방법을 제시하였다. Hay et al.⁽⁵⁾은 오리피스의 입구에서 입사각이 30°, 60°, 90° 인 경우에 대해 직교류의 효과에 대한 연구를 수행하였다. 입구에서의 직교류가 출구에서의 직교류에 비해 훨씬 더 큰 영향을 미침을 밝혔다.

Lichtarowicz et al.⁽¹⁾은 Re수에 따른 송출계수의 거동을 정리하였다. 길이 대 직경 비가 1보다 큰 경우에는 Re수가 커짐에 따라 송출계수가 점점 커지다가 수렴하는 경향을 나타낸다. 여기서 송출계수가 더 이상 증가하지 않는 Re수는 길이 대 직경 비가 커짐에 따라 커지고, 대략적으로 10^3 에서 10^4 의 범위 내에 존재한다. 길이 대 직경 비가 1보다 작은 경우에는 이와는 달리 Re수 700 근처에서 송출계수가 최대값을 가지고 이보다 큰 Re수에서는 송출계수가 감소하다가 일정한 값에 수렴한다.

Meyfarth & Shine⁽⁶⁾은 회전 오리피스의 송출계수를 오리피스를 통과하는 유체의 속도와 오리피스의 회전 속도의 비로 표현하였다. 그러나 이들은 오리피스의 길이가 짧은 경우에 국한된 실험을 수행하였다. Wiles⁽⁷⁾는 오리피스의 회전효과를 고찰하기 위한 실험을 수행하였는데, 실험에 사용된 오리피스는 재부착을 막기 위해 단면이 확대 되는 오리피스를 이용하였다. 오리피스를 통과하는 유체 속도에 대한 오리피스 회전 속도의 비가 증가할수록 송출계수가 감소하는 결과를 얻었다. Wittig et al.⁽⁸⁾은 고속으로 회전하는 오리피스의 송출계수를 실험적, 수치 해석적으로 구하였다. 이들은 동

일한 길이 대 직경 비에서는 속도비가 커질수록 송출계수가 작아지는 경향을 확인했다. 또한 회전에 의한 송출계수의 감소가 가장 큰 곳은 길이 대 직경 비가 1 근처임을 보였다. Jakobý et al.⁽⁹⁾은 둥근 모서리를 갖는 회전 오리피스스의 송출 특성에 대해 고찰하여 회전에 의해 송출계수가 향상됨을 보였다. 이들은 회전 오리피스가 일을 받아서 이론적 유량보다 더 많은 유량이 흐르는 것을 보정하기 위해 송출계수를 다시 정의 하였다. 즉, 이론적 유량을 구할 때 회전일을 받아서 축방향 속도가 증가된 것을 기준으로 삼았다. Maeng et al.⁽¹⁰⁾은 길이 대 직경 비가 10인 회전 오리피스스의 송출 특성에 대해 고찰하였다. Jakobý et al.⁽⁹⁾과 같이 이론적 유량을 구할 때 회전일을 받아서 축방향 속도가 증가된 것을 기준으로 삼았다. 오리피스가 회전함에 따라 추가적으로 발생하는 손실을 Ro수와 압축성 인자의 함수로 표현하여 회전수에 관계없이 잘 표현됨을 확인하였다. 또한 입구 형상을 둥근 모서리로 바꿈에 따라 직각 모서리에 비해 증가하는 송출계수를 구하였고, 이는 Ro수의 함수로 주어짐을 확인하였다.

본 연구에서는 길이 대 직경 비가 다른 오리피스가 회전할 때의 송출 거동을 살폈다. 이때 길이 대 직경 비는 정지 상태를 기준으로 재부착이 충분히 일어나지 않는 것으로 알려져 있는 짧은 오리피스로부터 회전일을 받아 송출계수의 상승이 충분한 긴 오리피스까지 실험이 수행되었다. 오리피스 입구형상은 정지 상태에서 송출계수의 차이가 크게 보이는 직각 모서리와 모서리 반경 대 직경의 비(r/d)가 0.5인 둥근 모서리에 대해 실험되

었다. 또한 Ro수 범위는 Wittig et al.⁽⁸⁾과 Jakobý et al.⁽⁹⁾과 Maeng et al.⁽¹⁰⁾이 실험한 것보다 넓은 Ro수 범위에서 실험이 수행되었고, 이를 통해 송출계수가 Ro수에 따라 크게 변하는 것을 관찰하였다. 그 외 실험의 조건을 Table 1에 보였다.

2. 실험장치

회전 오리피스의 송출 특성을 파악하기 위해 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하고 실험을 수행하였다. 공기는 송풍기에 의해 공급되고, 공기의 질량 유량을 조절하기 위해 인버터(inverter)로 송풍기 구동 전동기 입력 주파수를 제어하였다. 송풍기에서 나온 공기는 대기 온도와 송풍기의 작동 조건에 따라 온도 편차가 심하므로 열교환기를 통과시켜 온도를 일정하게 유지시킬 필요가 있다. 열교환기는 물을 냉매로 하고, 물의 온도는 항온조에서 제어 된다. 온도와 유량이 제어된 공기는 유량계와 유동 안정화 챔버(settling chamber)를 거쳐 모형 전동기에 축 방향으로 공급된다. 유량은 1%의 측정 오차⁽¹¹⁾를 갖는 층류 유량계(laminar flow meter)를 이용하여 측정하였다. 층류 유량계 상류의 절대압과 온도, 상 하류의 차압을 측정하여 유량계를 통과하는 질량 유량을 구한다. 여기

Table 1 Parameters of experimental setup

Parameters [unit]	Dimension
Orifice bore diameter, d [mm]	10
Orifice bore length, l [mm]	2, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 50, 100
Inlet corner radius of orifice bore, r [mm]	0, 5
Number of orifice bores	4, 8
Pitch circle radius of orifice bores, R_b [mm]	60
Rotor diameter [mm]	160
Stator inner diameter [mm]	161
Cavity diameter [mm]	200
Rotational speed of rotor [rpm]	0, 150, 300, ..., 3600
Pressure ratio, Π	1.001, 1.002, 1.005, 1.01
Reynolds number at orifice bore, Re	8,000 ~ 27,000

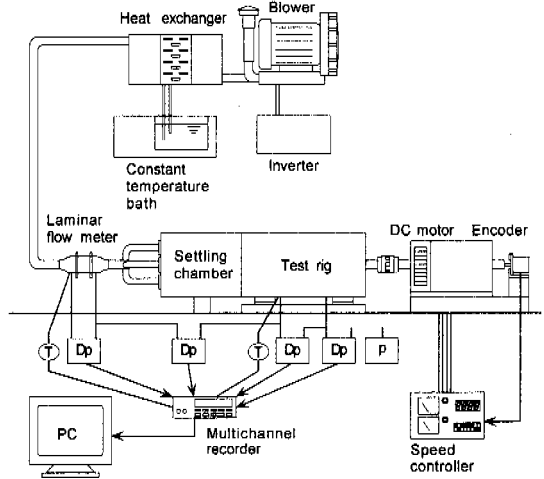


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

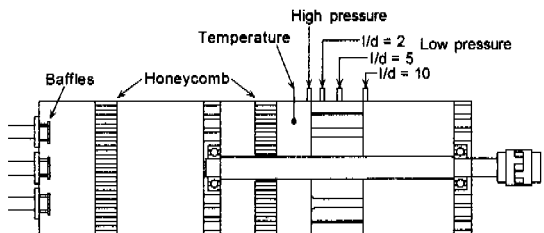


Fig. 2 Detailed view of test rig

서 유량계 상류의 절대압은 Fig. 1에 보인 바와 같이 구하였다. 대기압은 절대압계로 측정하였고, 온도는 T형 열전대(copper-constantan)를 이용하여 측정하였다.

측정부의 상세 도면을 Fig. 2에 보였다. 측방향으로 유입된 공기는 유동 안정화를 위해 설치된 첫 번째 허니콤(honeycomb)을 지나서 베어링 외륜을 지지하는 하우징(housing)에 가공된 구멍을 통과한다. 회전축 주위의 두 번째 허니콤을 통과한 유동은 회전 오리피스와, 회전자 고정자 사이 간극을 통과한다. 오리피스 상류와 하류의 압력 측정 위치를 Fig. 2에 나타내었다. 본 실험에서는 오리피스의 직경을 고정시키고 오리피스의 길이를 바꾸어 길이 대 직경 비를 변경시켰다. 이때 오리피스 상류의 압력 측정 위치는 고정시키고, 하류 압력 측정 위치를 오리피스의 길이에 따라 바꾸었다.

또한 회전 오리피스 만을 지나는 유량을 측정하고자 할 때, 회전자와 고정자 사이 간극을 지나는 유량을 구할 필요가 있다. 본 연구에서는 회전자 오리피스의 개수가 다른 두 번의 실험을 통해 간극과 회전 오리피스를 지나는 유량을 구하였다. 이로 인해 발생하는 오차와 질량 유량 측정에 따른 오차, 이상적인 질량 유량 계산시 발생하는 오차 등을 고려한 회전 송출계수의 상대 불확실성은 약 3.1%이다.⁽¹¹⁾

3. 송출계수와 Ro수의 정의

송출계수는 오리피스를 통과하는 질량 유량과 주어진 열역학적 조건에서의 이상적인 질량 유량의 비로 다음과 같이 정의된다.⁽⁸⁻¹¹⁾

$$C_d = \frac{\dot{m}}{P_2 A_h} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{RT_1} \frac{\gamma-1}{\gamma} \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} \quad (1)$$

그러나, 회전 오리피스는 회전일을 받아 이상적인 유량이 증가하므로, 회전 송출계수(rotational discharge coefficient)를 새로 정의한다.^(10, 11)

$$C_{d,rot} = \frac{\dot{m}}{P_2 A_h} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{RT_1} \frac{\gamma-1}{\gamma} \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \left(1 + \frac{T_{rot}}{T_1} \right) - 1 \right)} \quad (2)$$

한편 오리피스를 통과하는 이상적인 유동의 측방향 속도 대 오리피스의 회전 속도의 비는 회전 오리피스의 송출 거동을 설명하는데 아주 유용한 변수로써, 이를 Ro수로 정의하면 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁰⁾

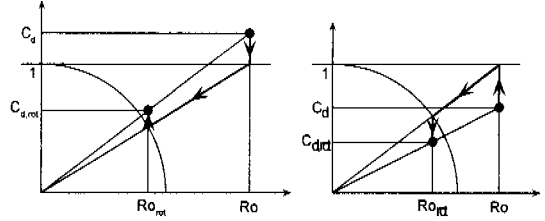


Fig. 3 Graphical representation of transform of Rotation number, discharge coefficient into rotational Rotation number, rotational discharge coefficient

$$Ro = \frac{R_h \omega}{V_h} = R_h \omega \sqrt{\frac{2\gamma R T_1}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{1}{\Pi} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right)} \quad (3)$$

또한, 회전일을 받는 것을 고려하여 회전 송출계수를 정의한 것처럼 회전 Ro수(rotational Rotation number)를 도입하면

$$Ro_{rot} = R_h \omega \sqrt{\frac{2\gamma R T_1}{\gamma-1} \left(\left(1 + \frac{T_{rot}}{T_1} \right) - \left(\frac{1}{\Pi} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right)} \quad (4)$$

가 된다. 이때 회전일을 고려한 변수들과 고려하지 않은 변수들 사이에는 다음과 같은 관계가 성립하고,

$$Ro_{rot} = \frac{Ro}{\sqrt{1 + Ro^2}} \quad (5)$$

$$C_{d,rot} = \frac{C_d}{\sqrt{1 + Ro^2}} \quad (6)$$

이를 도식화하면 Fig. 3과 같이 표현된다.

4. 송출계수의 거동

오리피스를 지나는 유동이 공기, 즉 압축성 유동이므로 송출계수는 압력비에 영향을 받는다.⁽¹⁰⁾ 또한 오리피스 양단 압력차에 따라 Re수가 바뀌고, 이는 송출계수에 영향을 주므로⁽¹⁾ 압력비는 송출계수를 결정하는 중요한 인자가 된다. 본 연구에서는 압력비 1.001에서 1.01까지 실험을 수행하였다. 그러나 본 실험의 압력비 범위에서는 Ro수에 따른 송출계수의 변화가 압력비에 따른 변화보다 훨씬 크고, Maeng et al.⁽¹⁰⁾의 결과에서 보여지는 압력비에 따른 송출계수의 변화 또한 본 실험의 경우에서 보인 Ro수에 따른 변화만큼 크지 않으므로, 본 연구에서는 Ro수에 따른 송출계수의 변화에 초점을 맞추었다. 압력비가 커지면 동일한 Ro수를 얻기 위해 더 높은 회전수에서 실험을 수행하여야 하므로 본 연구에서는 압력비 1.001에서의 실험 자료를 통해, 넓은 Ro수 범위 내에서 Ro

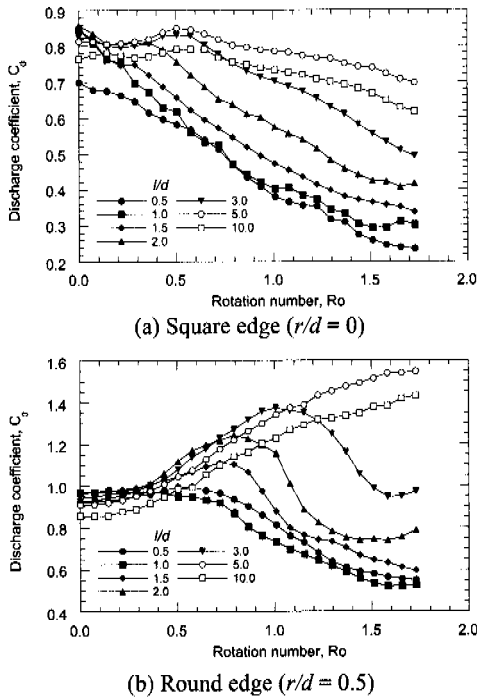


Fig. 4 Discharge coefficient for different inlet corner radius with length-to-diameter ratio and Rotation number

수에 따른 송출계수의 거동을 살펴 보았다.

본 연구에서 실험이 이루어진 압력비는 매우 낮기 때문에, 송풍기 입력 주파수를 조절하여 압력비를 맞추는 데는 한계가 있다. 본 연구에서는 주어진 압력비에서의 송출계수를 얻기 위해 그 압력비 근처에서 세 번의 실험을 수행한 후, 이들 자료의 내삽(interpolation)을 통해 송출계수를 구하였다. 세 번의 실험은 정해진 압력차의 $\pm 10\%$ 이내에서 수행되었고, 이 구간에서 송출계수는 압력비와 선형의 관계를 가질 뿐만 아니라 압력비에 따른 변화가 작으므로, 이 방법으로 인해 발생하는 오차는 무시할 만 하다.

4.1 Ro 수에 따른 송출계수의 거동

McGreehan & Schotsch⁽²⁾는 가스터빈 내 오리피스 의 여러 인자가 가스터빈 내부 유동 시스템에 미치는 영향에 대한 연구에서 오리피스의 회전 속도와 오리피스를 지나는 이상적인 유동의 축방향 속도 비에 따른 송출계수의 변화를 상관식으로 제시 하였다. 그러나 Fig. 4(a), (b)에 보인 바와 같이 회전 오리피스의 송출계수는 Ro 수, 즉, 속도 비에 따라 달라질 뿐만 아니라 길이 대 직경 비의 영향도 많이 받으므로 McGreehan & Schotsch⁽²⁾에 의해 제안된 속도 비 만에 따른 송출계수의 거동은 회전 오리피스의 송출 특성을 충분히 설명하지 못한

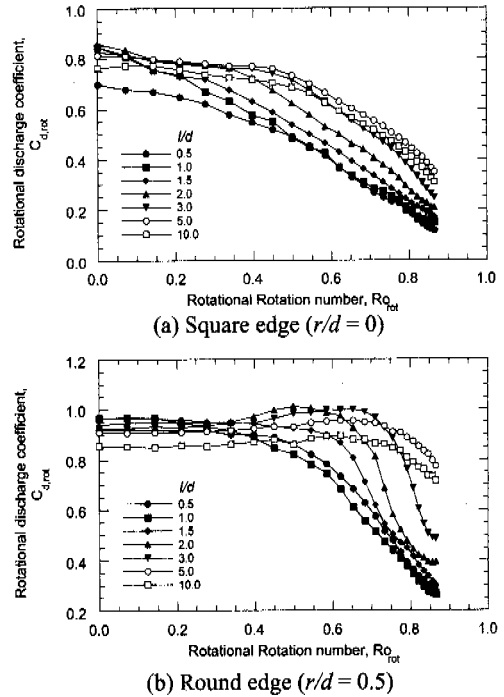
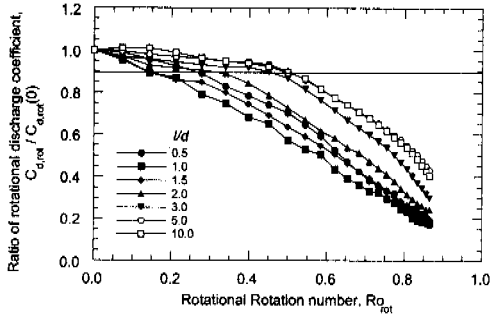


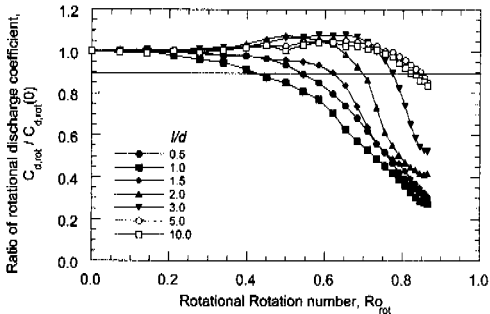
Fig. 5 Rotational discharge coefficient for different inlet corner radius with length-to-diameter ratio and rotational Rotation number

다. 본 실험의 결과와 비교해 보면, McGreehan & Schotsch⁽²⁾가 상관식을 구할 때 사용한 실험자료는 길이 대 직경 비가 약 1 근처인 짧은 오리피스의 경우인 것으로 판단된다. 그러므로 긴 오리피스의 경우를 포함하는 새로운 상관식이 요구된다.

Ro 수에 따른 송출계수의 거동은 두 가지의 서로 상반되게 작용하는 효과, 즉, 오리피스가 회전 일을 받아 축방향 유속이 증가하고, 이로 말미암아 송출계수가 증가하는 효과와 오리피스 입구에서의 유동각의 증가로 베나콘트랙타에서 유로가 좁아져 송출계수가 감소하는 효과의 영향을 크게 받는다. 이 두 효과에 의한 송출계수의 거동이 Fig. 4(a), (b)에 아주 잘 나타났다. 둥근 모서리를 갖고, 길이 대 직경 비가 클수록 회전일을 받아 송출계수가 증가하는 경향이 뚜렷하고, 직각 모서리를 갖고, 길이 대 직경 비가 작을수록 송출계수가 증가함 없이 감소만 하는 경향이 강하다. 길이 대 직경 비가 5.0인 경우와 10.0인 경우는, 두 가지 오리피스 입구형상 모두, Ro 수에 따른 송출계수의 거동이 동일하다. 모든 Ro 수에 대해 두 길이 대 직경 비에서의 송출계수의 차가 거의 일정하다. 그러므로 Ro 수에 관계 없이 길이 대 직경 비가 5.0, 10.0인 오리피스는 긴 오리피스로 생각할 수 있다. 또한 직각 모서리의 경우 길이 대 직경 비



(a) Square edge ($r/d = 0$)



(b) Round edge ($r/d = 0.5$)

Fig. 6 Percentage decrease of rotational discharge coefficient with rotational Rotation number

가 3.0일 때, 둥근 모서리의 경우 길이 대 직경 비가 2.0, 3.0일 때는 낮은 Ro 수에서는 앞에서 언급한 긴 오리피스스의 거동을 잘 따르다가 일정한 Ro 수 보다 커지면 송출 특성이 나빠진다. 여기서, 회전 오리피스스는 길이 대 직경 비와 Ro 수에 따라 회전일을 충분히 받아 높은 송출계수를 내는 영역과 그렇지 못한 영역으로 나눌 수 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 4(b)에서 송출계수가 1보다 큰 영역이 많이 존재함을 볼 수 있다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 송출계수를 정의할 때 회전일을 받아 오리피스스 내부 유동의 축방향 속도가 증가하는 것을 고려하지 않았기 때문이다. 회전일을 고려한 회전 송출계수와 회전 Ro 수로 송출 특성을 다시 표현하면, Fig. 5(a), (b)와 같이 된다.

Fig. 5(a), (b)에서 입구 형상과 회전 Ro 수에 따른 회전 송출계수의 거동을 보였다. 오리피스스의 길이 대 직경 비가 큰 경우, 직각 모서리의 오리피스스는 Fig. 5(a)에서 보인 바와 같이 회전 Ro 수가 증가하면 회전 송출계수는 순 감소의 경향을 따른다. 이와는 달리 Fig. 5(b)의 둥근 모서리의 오리피스스는 넓은 회전 Ro 수 범위에서 거의 일정한 회전 송출계수를 갖는다. 이러한 현상은 입구 형상과 유동 유입각에 따라 베나콘텍타의 크기가 달라지기 때문에 발생한다. 즉, 박리점의 위치가 모서리에

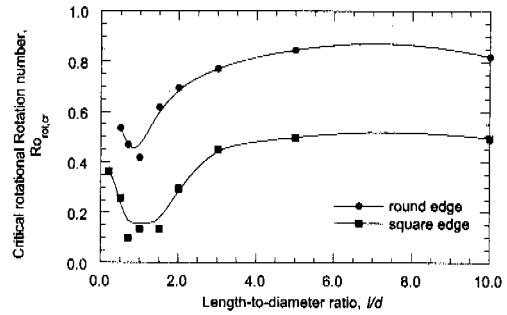


Fig. 7 Critical rotational Rotation number distribution with length-to-diameter ratio

고정되는 직각 모서리의 오리피스스는 유동 유입각이 커지면 오리피스스 내부 흡입면에서의 재순환 영역이 커져서 송출계수의 감소를 초래하는데 반해 둥근 모서리의 오리피스스는 회전 Ro 수가 0.7 이하로 유동 유입각이 크지 않을 때는 직각 모서리의 오리피스스에 비해 재순환 영역 크기의 유동 유입각에 따른 변화가 작으므로 송출계수의 변화도 작게 나타난다.

회전 오리피스스가 회전함에 따라 회전 송출계수가 감소하는 것을 고려하기 위해 Ro 수 0일 때의 송출계수를 기준으로 90%가 되는 회전 Ro 수를 임계 회전 Ro 수(critical rotational Rotation number)로 정의하였다. 임계 회전 Ro 수를 구하기 위해 Fig. 5(a), (b)의 회전 송출계수를 회전 Ro 수가 0일 때의 값으로 무차원화하면 Fig. 6(a), (b)가 된다. Fig. 6(a), (b)에서 직선은 회전 송출계수가 정지 송출계수의 90%가 되는 선이다. 임계 회전 Ro 수를 구해 길이 대 직경 비에 따라 표시하면 Fig. 7이 된다. Fig. 7의 곡선 아래 부분은 오리피스스의 정지 상태 송출계수와 비교하여 10% 이내의 차이를 보이는 영역이다. 둥근 모서리의 오리피스스가 넓은 영역에서 송출계수의 변동이 작음을 알 수 있다. 또한 길이 대 직경 비가 1 근처에서 회전 Ro 수에 따른 송출계수의 변화가 가장 심한 것을 알 수 있는데, 이 영역에서는 회전 Ro 수에 따라 유동의 재부착 정도가 많이 차이 나기 때문이다. 길이 대 직경 비가 1보다 작은 경우에는 회전 Ro 수에 무관하게 전 영역에서 재부착이 오리피스스 내부에서 일어나지 않고, 길이 대 직경 비가 1보다 큰 경우에는 대체로 오리피스스 내부에서 유동이 재부착 되는데 반해, 길이 대 직경 비가 1 근처에서는 정지한 오리피스스에서는 재부착이 내부에서 형성되지만, 회전하는 오리피스스에서는 재부착이 일어나지 않으므로 오리피스스의 회전에 따라 송출계수의 차가 크게 나타난다.

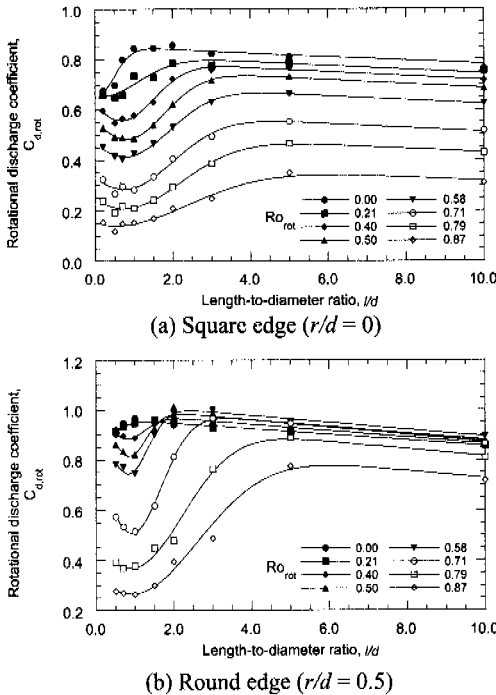


Fig. 8 Influence of length-to-diameter ratio on rotational discharge coefficient with rotational number

4.2 재부착 정도에 따른 송출계수의 거동

송출계수는 길이 대 직경 비에 따라 큰 영향을 받는다. 길이 대 직경 비에 따라 송출계수는 증가하는 구간과 감소하는 구간으로 나눌 수 있다. 짧은 오리피스에서는 길이 대 직경 비가 증가할수록 오리피스 내부에서 유동 재부착에 의한 압력 회복이 커져서 송출계수가 증가하고, 유동이 완전히 재부착 되는 길이 대 직경 비에서 송출계수는 최대값을 갖는다. 이보다 큰 길이 대 직경 비에서는 벽면 마찰에 의한 압력 손실 증가로 길이 대 직경 비가 증가할수록 송출계수가 감소한다.

오리피스 길이 대 직경 비에 따른 회전 송출계수의 거동을 동일한 회전 Ro수에 따라 Fig. 8(a), (b)에 보였다. Fig. 8(a), (b)의 실선은 실험값의 수치 근사이다. 이때 식의 형태를 가정하는 것은 아주 중요한데, McGreehan & Schotsch⁽²⁾에 의해 제시된 긴 오리피스의 길이 대 직경 비에 따른 송출계수의 변화와 유사한 형태로 가정하였다.

$$C_{d,rot} = m_1 - m_2 \cdot \frac{l}{d} - m_3 \cdot e^{-\left(\frac{l}{d} - m_4\right)^2} / m_5^2 \quad (7)$$

여기서 m_i 들은 상수이다. m_2 는 긴 오리피스의 송출계수가 길이 대 직경 비에 따라 변하는 율과 관련되는 것으로 Fig. 9에서 보인 바와 같이 송출계

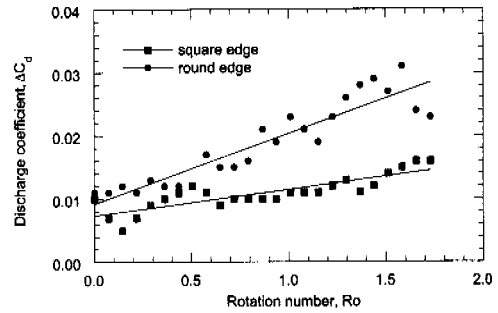


Fig. 9 Discharge coefficient decrease rate with the length-to-diameter ratio of long orifice with Rotation number

수는 Ro 수에 따라 선형의 관계를 갖는다. Fig. 9에서 직각 모서리이고, Ro 수가 0인 정지 오리피스의 경우에 길이 대 직경 비에 따른 송출계수 감소율이 약 0.008의 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 Lichtarowicz et al.⁽¹⁾과 McGreehan & Schotsch⁽²⁾의 결과와 일치한다. 식 (7)의 그 밖의 상수들은 수치근사를 통해 구한다.

Fig. 8(a)에서 회전 Ro 수가 0인 경우, 즉, 정지 오리피스의 경우는 Lichtarowicz et al.⁽¹⁾에 의해 정리된 정지 오리피스와 동일한 거동을 보임을 알 수 있다. 그러나 회전 Ro 수가 증가하면 회전 송출계수는 뚜렷한 2가지 특징을 보인다. 즉, 회전 송출계수의 최대값을 갖는 길이 대 직경 비가 커지고, 송출계수의 최대값이 작아진다. 회전 오리피스의 길이 대 직경 비에 따른 회전 송출계수의 최대값은 재부착 정도와 밀접한 관련이 있다.

회전 송출계수가 최대값이 되는 길이 대 직경 비보다 짧은 오리피스에서는 오리피스가 길어질수록 재부착 정도가 점점 커지고, 이로 인해 재순환 영역에서의 압력이 감소하여 베나콘트랙타가 축소되므로 송출 특성이 향상된다. 이러한 현상은 유동의 유입각, 즉, 회전 Ro 수에 상관없이 모든 회전 Ro 수에서 공통적으로 나타난다. 그러나 오리피스가 회전하면 유동 재부착은 오리피스 내부에서 원주 방향으로 비대칭적으로 발생한다. 회전 Ro 수가 커지면 압력면에서는 재부착 길이가 짧아지고, 흡입면에서는 재부착 길이가 길어진다. 오리피스의 송출계수는 흡입면의 재부착 길이가 결정하므로 회전 Ro 수가 증가할수록 재부착이 완전히 일어나는 길이 대 직경 비가 커지는데, 이를 Fig. 10에 보였다. 이때 회전 송출계수의 최대값은 식 (7)으로 근사한 식으로부터 구하였다. 수치 근사식에 따라 최대값을 내는 길이 대 직경 비가 많이 달라질 수 있으나 전체적인 경향은 Fig. 10과 비슷하다. 입구 형상이 둥근 모서리의 경우가 완전 재부착에

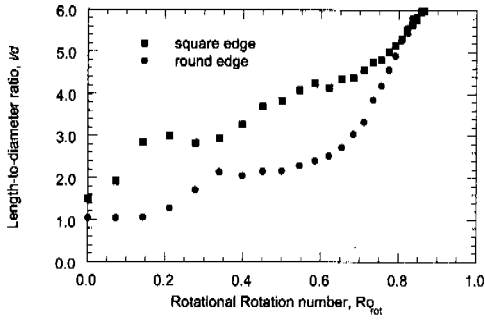


Fig. 10 Length-to-diameter ratio for maximum rotational discharge coefficient

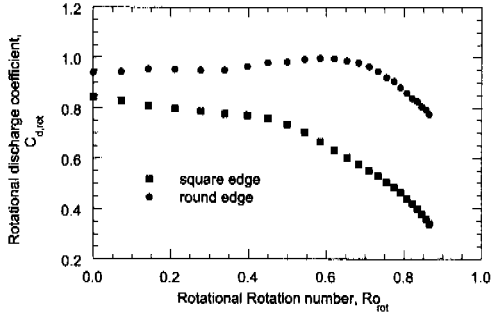


Fig. 11 Maximum rotational discharge coefficient with rotational Rotation number

도달하는 길이 대 직경 비가 직각 모서리의 경우보다 작음을 확인할 수 있다.

회전 송출계수의 최대값이 회전 Ro 수에 따라 작아지는 것은 유동 유입각의 증가로 인해 베나콘트랙타에서의 유로가 좁아지기 때문이다. 이러한 현상은 직각 모서리의 경우가 둥근 모서리에 비해 훨씬 더 심한데, 이는 직각 모서리는 유동 유입각에 무관하게 박리가 일어나는 곳이 항상 일정하고, 이에 따라 유입각이 커지면 재순환 영역도 커져서 회전 송출계수의 최대값이 낮아진다. 이와는 달리 둥근 모서리는 박리가 일어나지 않거나, 박리점이 흡입면 쪽으로 옮겨져서 재순환 영역의 크기가 최대한 억제되므로 회전 송출계수의 최대값이 낮아지는 정도가 직각 모서리의 경우에 비해 적다. 회전 Ro 수에 따른 회전 송출계수의 최대값을 Fig. 11에 보였다. 이 최대값 역시 수치 근사에 의한 값으로 엄밀한 의미의 최대값은 아니다. 그러나 Fig. 5(a), (b)와 Fig. 11을 비교해 보면, Fig. 5(a), (b)에서 회전 Ro 수의 최대값들을 연결한 선이 Fig. 11과 거의 일치하므로 수치 근사에 따른 오차는 Fig. 10과는 달리 크지 않음을 알 수 있다. 둥근 모서리의 오리피스스의 경우는 회전 Ro 수에 따른 회전 송출계수 최대값의 변화가 적는데 반해 직각 모서리의 경우는 변화가 큼을 확인할 수 있다.

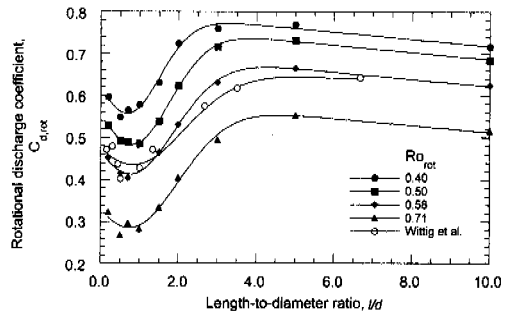


Fig. 12 Discharge behavior of short orifices

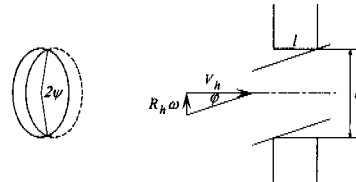


Fig. 13 Projected area in flow direction

4.3 짧은 오리피스스의 송출 특성

길이 대 직경 비가 아주 작아서 오리피스 내부에서 재부착이 충분히 일어나지 못하는 경우에 대해 살펴보자. Fig. 8(a), (b)에 보인 바와 같이 회전 Ro 수가 0보다 크고 길이 대 직경 비가 1 이하인 경우에 오리피스 길이가 늘어남에 따라 회전 송출계수가 감소하는 구간이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 12에 보인 바와 같이 Wittig et al.⁽⁶⁾의 결과에서도 나타난다. Fig. 12에서 Wittig et al.⁽⁶⁾의 결과는 회전 효과를 고려하여 회전 송출계수로 변환한 값이다. Wittig et al.⁽⁶⁾의 결과에서 Ro 수는 0.6인 경우이며, 이를 회전 Ro 수로 환산하면 0.51이 되고, 이때 압력비는 1.2이다. 본 실험의 결과와 약간의 차이를 보이는 것은 이 압력비의 차이에 기인한 것으로 보인다.

짧은 오리피스스에서 이와 같이 길이 대 압력 비가 증가해도 송출계수가 감소하는 구간이 존재하는 것은 유동 유입각으로 전사영(projection)한 면적이 길이 대 직경 비에 따른 변화율과 관련된다. 즉, 회전 Ro 수가 0보다 크고, 길이 대 직경 비가 1.0 이하의 구간에서는 오리피스스의 길이가 증가함에 따라 재부착의 정도가 커지는 것 보다, 유동 유입각으로의 전사영 면적의 감소율이 더 커서 회전 송출계수의 감소가 일어난다. 송출계수를 구할 때 유동 단면적을 Ro 수에 무관하게 일정하다고 두고 계산을 하는데, Fig. 13에서 보는 바와 같이 Ro 수가 커지면 유동 유입 방향으로 전사영한 면적이 줄어들고, 이때 길이 대 직경 비가 증가하면 유로가 더 좁아짐을 알 수 있다. 그러므로 재부착

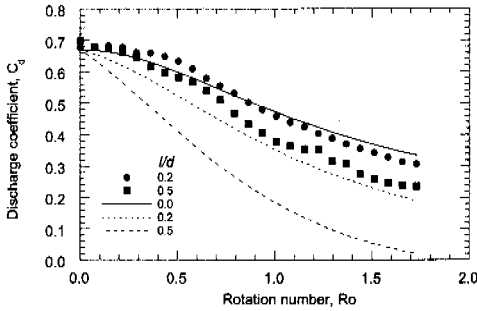


Fig. 14 Discharge coefficient and projected area ratio of short orifices

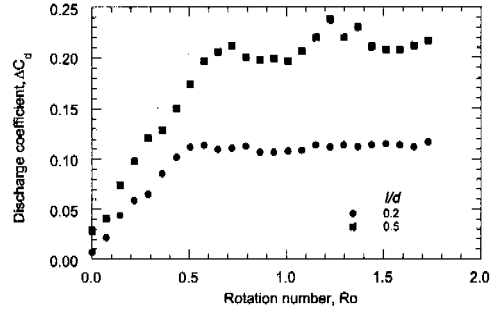


Fig. 15 Discharge coefficient differences between measured and calculated from projected area ratio

이 거의 일어나지 않는 짧은 오리피스에서는 길이 대 직경 비가 커지면 송출계수가 감소한다. 여기서 줄어든 면적비를 Ro 수와 길이 대 직경 비에 따라 구하면,

$$\frac{A'}{A} = \frac{1}{\pi} (2\psi - \sin 2\psi) \cdot \cos \phi \quad (8)$$

where, $\cos \psi = \frac{l}{d} \tan \phi$, $\tan \phi = Ro$

로 표현된다.

Fig. 14에 실험으로 구한 송출계수와 면적 변화율로부터 구한 송출계수의 예측값을 보였다. Fig. 14에서 점으로 표현한 것은 실험값이고, 선으로 표현한 것은 예측값이다. 이때 예측값은 Fig. 8(a)의 회전 Ro 수가 0인 경우의 길이 대 직경 비에 따른 송출계수로부터 길이 대 직경 비가 0인 송출계수를 구하고, 식 (8)에서 구한 면적 변화율을 곱해서 구했다. 실험값과 예측값 모두 길이 대 직경 비가 커짐에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 길이 대 직경 비가 커지면 송출계수 실험값의 감소 폭이 줄어들어 Fig. 15에 보인 것과 같이 실험값과 예측값의 차이가 커진다. 이는 길이 대 직경 비가 커지면서 재부착에 의한 송출계수의 증가가 중요한 역할을 하기 때문이다.

유동 유입 방향으로의 전사영 면적과 재부착 이외에도 짧은 오리피스의 송출계수에 영향을 줄 수 있는 인자가 더 있을 수 있다. 예를 들어, 동일한 면적의 원과 타원은 송출계수가 다르므로 단순한 면적에 기반한 이상과 같은 해석은 엄밀한 해석이 아니다. 또한 오리피스 입구에서 오리피스의 회전에 의해 유도되는 유동이 존재할 수 있으므로, Ro 수가 정확한 유동의 유입각과 차이를 보일 수 있다. 그러나 이러한 요인들에 대한 영향은 현단계에서는 정확히 알 수 없으므로 정성적으로 짧은 오리피스에서 길이 대 직경 비가 커지면 송출계수가 감소하는 구간이 존재하고, 이는 유동 유입 방향으로 전사영 된 면적의 감소와 연관되어 있다고

할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 회전 오리피스의 회전 Ro 수, 길이 대 직경 비, 입구 형상이 회전 송출계수에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 오리피스가 회전하면 회전 축으로부터 일을 받아 회전 송출계수가 증가하는 영향과, 유동 유입각이 커지기 때문에 회전 송출계수가 감소하는 영향을 동시에 받는다. 이 두 영향의 크기를 결정해 주는 인자가 길이 대 직경 비와 입구 형상이다. 길이가 길고 입구 곡률 반경이 큰 오리피스가 회전일을 받아 송출계수가 증가하는 구간이 넓고, 이와는 반대로, 길이가 짧고 직각 모서리의 오리피스가 입구 손실에 의해 송출계수가 감소하는 경향이 강하다. 임계 회전 Ro 수를 정의하여 주어진 길이 대 직경 비에서 송출계수의 변동이 작은 영역을 구하였다. 직각 모서리와 둥근 모서리의 오리피스 모두 길이 대 직경 비가 1.0 근처에서 송출계수의 변동이 가장 심한 것을 알 수 있다.

회전 송출계수는 오리피스의 길이 대 직경 비에 따라 오리피스 내부에서 재부착 정도가 달라지고, 이에 따라 회전 송출계수가 크게 바뀐다. 회전 오리피스에서의 유동은 정지 오리피스와는 달리 오리피스 내부에서 원주 방향으로 비대칭적으로 형성된다. 그러므로 재부착이 되는 위치도 정지 오리피스와는 큰 차이를 보이고, 회전 Ro 수에 따라 재부착이 완전히 일어나는데 필요한 길이 대 직경 비가 달라진다. 본 연구에서는 이를 실험 자료의 수치 근사로부터 구하였다. 회전 오리피스에서 유동이 완전히 재부착 되는 길이 대 직경 비보다 짧은 오리피스에서는 길이 대 직경 비에 따라 송출계수가 증가하고, 재부착이 완전히 일어난 길이 대 직경 비에서 회전 송출계수의 최대값을 가지며, 이보다 큰 길이 대 직경 비에서는 벽면 마

찰에 의한 압력 손실로 송출계수가 감소한다. 회전 송출계수의 최대값은 등근 모서리의 오리피스에의 경우가 넓은 회전 Ro 수에서 1에 가까운 값을 가지고, 직각 모서리의 오리피스는 회전 Ro 수에 따라 순감소의 경향을 따른다.

길이 대 직경 비가 작은 오리피스는 재부착에 의한 송출계수의 상승 정도가 미미하고, 또한 회전 Ro 수가 0보다 큰 경우 길이 대 직경 비가 증가함에 따라 유동 유입 방향으로 전사영 된 면적의 감소율이 증가하므로, 길이 대 직경 비가 증가해도 오히려 송출계수가 감소하는 구간이 존재한다.

참고문헌

- (1) Lichtarowicz, A., Duggins, R. K., and Markland, E., 1965, "Discharge Coefficients for Incompressible Non-Cavitating Flow Through Long Orifices," *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 210~219.
- (2) McGreehan, W. F., and Schotsch, M. J., 1988, "Flow Characteristics of Long Orifices with Rotation and Corner Radiusing," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 213~217.
- (3) Hay, N., and Lampard, D., 1998, "Discharge Coefficient of Turbine Cooling Holes: A Review," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 314~319.
- (4) Hay, N., Khaldi, A., and Lampard, D., 1987, "Effect of Crossflows on the Discharge Coefficients of Film Cooling Holes with Rounded Entries or Exits," *2nd ASME/JSME Thermal Engineering Conference*, Hawaii, pp. 369~374.
- (5) Hay, N., Lampard, D., and Benmansour, S., 1983, "Effect of Crossflows on the Discharge Coefficient of Film Cooling Holes," *Journal of Engineering for Power*, Vol. 105, pp. 243~248.
- (6) Meyfarth, P. F., and Shine, A. J., 1965, "Experimental Study of Flow Through Moving Orifices," *Journal of Basic Engineering*, Dec., pp. 1082~1083.
- (7) Wiles, W. F., 1976, "Flow Through Holes in Rotating Discs," *Thermofluids Conference*, Hobart, pp. 21~24.
- (8) Wittig, S., Kim, S., Jakoby, R., and Weißert, I., 1996, "Experimental and Numerical Study of Orifice Discharge Coefficients in High-Speed Rotating Disks," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 400~407.
- (9) Jakoby, R., Geis, T., Kim, S., and Wittig, S., 1997, "Discharge Coefficients of Rotating Orifices with Radiused Inlet Corners," *Thirteenth International Symposium on Airbreathing Engines (ISABE XIII)*, Tennessee, USA.
- (10) Maeng, D. J., Lee, J. S., Jakoby, R., Kim, S., and Wittig, S., 1998, "Characteristics of Discharge Coefficient in a Rotating Disk System," *ASME Paper No. 98-GT-266* (accepted for publication in the Transactions of the ASME).
- (11) Ha, K.-P., 1999, *A Comprehensive Thermal Analysis on an Induction Motor with Axial Cooling Passages*, Ph. D. Thesis, Seoul National University (in Korean).