

입구 형상에 따른 회전 송출공의 송출특성 연구

강세원* · 하경표* · 고상근**

A study on Discharge Characteristics of Rotating Discharge Hole with inlet edge shape

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

Key Words: rotating discharge hole(회전 송출공), discharge coefficient(송출 계수), inlet shape(입구 형상)

Abstract

A study on discharge characteristics of a rotating discharge hole is very important to enhance the performance of an induction motor which have external forced cooling system. The discharge characteristics of rotating discharge holes are influenced by rotating speed, length-to-diameter ratio, inlet shape of rotor holes, etc. An experimental study on the effect of chamfered inlet edge of rotor inlet part with various depth-to-diameter and inlet chamfered edge angle is conducted. Depth-to-diameter ratios range from 0 to 0.5 and inlet chamfered edge angle range from 0 to 60. As a result, there is an optimal design point of inlet chamfered edge depth. And the inlet edge angle for maximum discharge coefficient is influenced mainly by the rotating speed of discharge holes.

기호설명	
A	area of rotor holes
a	speed of sound
C_d	discharge coefficient
$C_{d,rot}$	Rotational Discharge coefficient
D	diameter of rotor hole
L	rotor length
\dot{m}	mass flow rate
\dot{m}_{th}	ideal mass flow rate
P	absolute pressure
ΔP	pressure difference
R	specific gas constant
R_h	pitch circle radius of discharge hole

Ro	Rotation number
Ro_{rot}	rotational Rotation number
Π	pressure ratio
T_{rot}	rotating temperature
T_h	temperature of air at discharge hole
W	inlet edge depth
V	velocity
γ	specific heat ratio for air
θ	inlet edge angle
ω	revolution speed

1. 서론

1.1 서론

현대 산업에서 유도전동기가 차지하는 비중은 매우 크므로 이 유도 전동기의 수명과 효율을 향상시키는 것이 아주 중요하다. 특히 열에 의한 수명과 효율의 감소를 줄이기 위해서는 적절한

* 서울대학교 대학원 기계공학과

** 서울대학교 기계공학과

냉각설계가 필요하다. 그런데 견인전동기용 대형의 전동기는 전폐형의 설계만으로는 충분한 냉각 효과를 가지기 어렵기 때문에 외부에서 냉각공기를 주입하는 것이 필요하다. 이 경우 냉각공기가 유입되는 상황에서의 열 해석이 필요한데, 이를 위하여 먼저 유도 전동기 내부 유동에 대한 연구가 선행되어야 한다. 전동기 내부의 냉각 공기는 회전자 송출공, 고정자 송출공, 회전자와 고정자 사이의 간극을 통해서 흐르게 된다. 이들 중 고정자 송출공의 경우 정지상태에 있는 송출공을 통해 유체가 통과하는 것이므로 그 송출거동은 쉽게 알 수 있고 많은 선행 연구가 이루어져 있다. 그러나 회전자 송출공과 간극의 경우 회전자의 회전이 송출계수에 영향을 끼치므로 정지상태 송출공과 같이 해석하기에는 어려움이 있다. 따라서 이들에 대한 연구가 필요하다.

1.2 선행연구

Lichtarowicz et al.⁽⁴⁾, McGreehan & Schotsch⁽²⁾, Hay & Lampard⁽⁵⁾ 등에 따르면 회전자 홀의 송출 특성에 영향을 주는 인자에는 송출공의 회전, 길이 대 직경 비, 압력비, 레이놀즈 수, 입·출구 형상 등이 있다.

Hay & Spencer⁽⁶⁾는 정지상태 오리피스의 입구 형상에 따른 영향을 평가하였다. 둥근 모서리 입구 형상과 모따기된 입구 형상에 대한 연구를 수행하였고 그 결과 송출계수가 10~30% 증가된 것을 확인하였다. 모따기된 입구 형상의 각도와 깊이의 영향을 파악하였고 30° 근처에서 최대의 송출계수를 가질 것을 예측하였다.

회전자 냉각 송출공의 경우 회전하는 통 오리피스로 간주할 수 있고 이것을 통과하는 공기의 송출특성에 대한 연구가 필요하다. 회전하는 오리피스의 송출특성에 대한 선행연구로서 Wittig⁽³⁾, McGreehan & Schotsch⁽²⁾, Maeng^(6,7), Ryu⁽⁸⁾, Ha⁽⁹⁾ 등이 있다.

McGreehan & Schotsch⁽²⁾는 송출계수에 영향을 끼치는 여러 변수들의 조합에 따라 적용 가능한 송출계수의 상관 식을 제시하였다. Maeng⁽⁶⁾은 길이 대 직경 비 10을 가지는 분사홀에 대해 회전수와 압력비를 변화시키면서 송출계수의 거동을 파악하였다. 회전 송출계수를 도입하여 송출공의 회전에 의한 회전 운동량 전달을 고려하였다. Ha⁽⁹⁾는 회전 로테이션 수와 회전 송출계수의 관

계를 파악하고, 임계 로테이션 수를 도입하여 송출계수의 안정성을 나타내는 회전 영역을 파악하였다. 또 입구 형상에 따라 회전 로테이션 수에 따라 재부착이 완전히 일어나는 길이 대 직경 비를 구하였다. 그러나 직각 모서리 입구와 둥근 모서리 입구의 경우만 다루었고, 모따기된 입구 형상에 대하여는 다루지 않았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 실제 유도 전동기의 경우 회전자 핀, 엔드 와인딩, 고정자 홀 등이 설치되어 있어서 회전자 송출공만의 영향을 고찰하기가 어려우므로 이들을 모두 제거시킨 유도 전동기 모형을 제작하였다. 전동기 모형에 외부 공기를 공급하기 위한 송풍기가 있고 이를 제어하기 위해서 인버터를 설치하였다. 실험에서도 도입한 각종 무차원 변수의 경우 송풍기로부터 유입되는 유입공기의 온도에 민감한 반응을 보인다. 이 때문에 유입공기의 온도를 일정수준에서 유지시켜주기 위한 물을 냉매로 사용하는 열 교환기를 사용하였다. 이 때 물의 온도는 항온조를 설치하여 유지시켜 주었다.

층류 유량계(laminar flow meter)를 설치하고 유량계 상·하류 압력차와 유량계 상류의 절대압 및 온도를 측정함으로써 실제로 전동기 모형에 공급되는 질량 유량을 측정했다.

전동기 모형의 회전자를 구동하기 위해 직류 전동기를 사용하였다. 인코더를 통해 이 직류 전동기의 회전속도를 측정하고 자체 제작한 V40 CPU 보드와 카운터를 이용해 회전수를 제어했

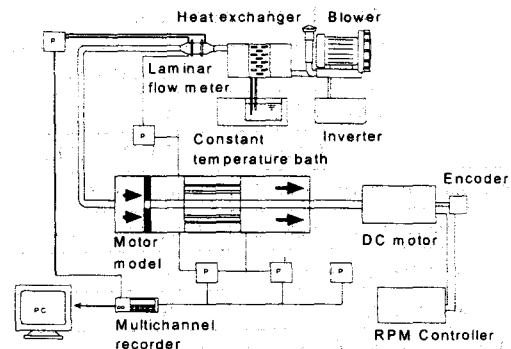


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

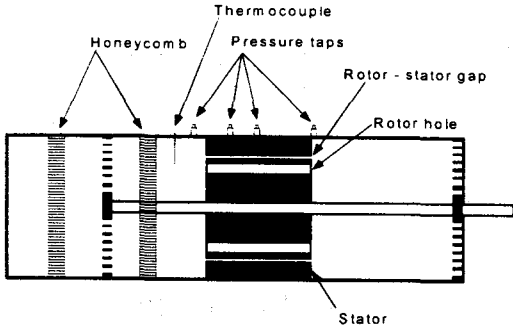


Fig. 2 Detailed view of test rig

다. PWM 방식을 사용하여 전력을 제어하고 이를 평활 회로를 거치게 하여 직류로 변환시켰다.

충류 유량계의 상·하류, 충류 유량계의 하류와 전동기 모형의 상류, 전동기 모형의 회전자 상·하류, 회전자 하류와 대기와의 사이에 각각 MKS사의 차압계(0~10torr)를 설치하였다. 또 대기의 절대압을 측정하기 위해 SENSOTEC 사의 절대압계를 사용하였다. 이렇게 얻어진 자료는 다채널 자료 획득장치를 통해 PC로 전달된다. 캐비티 상단과 하단의 압력비를 구하기 위해 절대압계와 차압계로 측정된 압력을 합하여 상단과 하단의 절대압을 계산하였다.

Fig. 2는 유도 전동기 모형을 보다 자세히 나타낸 것이다. 유입 공기는 축방향으로 공급되어 2개의 허니콤(honeycomb)을 통과하면서 균일하게 회전자 입구에 공급된다. 회전자 입구에 압력 탭을 설치하여 회전자 상단의 압력을 측정할 수 있도록 했다. 또 회전자 하단의 압력 탭의 경우 길이 대 직경 비의 변화에 대응할 수 있도록 축방향으로 4군데에 설치했고 각각의 위치에서 다시 반경방향으로 4개의 압력 탭을 설치해 이들의 평균으로 회전자 하단의 압력을 결정하도록 했다.

Table 1 Parameters of experimental rotor

Parameters	Dimension
Discharge hole diameter, D [mm]	10
Discharge hole length, L [mm]	5.10.20.30.50.100
Inlet chamfered corner depth, W [mm]	0. 2. 3. 5
Inlet chamfered corner angle, θ [°]	0. 30. 45 .60
Number of discharge holes	4
rotor diameter, [mm]	160
Pitch circle radius of discharge hole, Rh [mm]	60

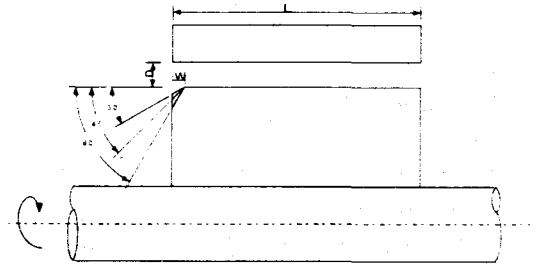


Fig. 3 Geometry of rotating discharge hole: chamfered inlet

2.2 회전자

회전자 형상의 변화를 Table 1에 나타내었다. 회전자에는 축방향으로 직경 10mm인 송출공 4개를 뚫었다. 길이가 다른 여섯 개의 회전자가 있고 각각의 회전자에 총 16개의 송출공을 설치하였다. 이들을 4개씩 짝을 지워 같은 입구 형상으로 가공하여 하나의 회전자에 4개씩의 송출공만을 개방하고 실험을 수행하였다.

회전 송출공의 길이에 따른 영향을 고찰하기 위해 회전자의 길이를 6단계로 조정하였다. 또 입구 형상을 모따기된 형태로 가공하여 입구 형상에 따른 영향을 고찰하고자 하였다. Fig. 3은 입구 모따기된 형상을 나타낸 것이다.

2.2 실험방법 및 고려인자

각각의 깊이와 각도에 대한 입구 형상의 조합에 대해 0rpm~3600rpm 사이를 150rpm 간격으로 회전속도를 조정하여 실험을 수행하였다. 모든 회전수에서 ± 3 rpm 이내로 제어하였고, 이는 1% 오차 이내이므로 회전수의 변화에 따른 오차는 무시할 수 있을 것이다. 압력비는 매우 낮은 값($\beta = 1.001$)을 가지므로 압력비를 정확히 유지하는 것이 어려움이 있다. 따라서 여기서는 압력비 1.0011 근처, 1.001 근처, 1.0009 근처에서 3번의 실험을 수행하고 이들의 결과를 내삽하여 압력비 1.001에서의 유량과 송출계수를 계산하였다. 이러한 내삽 방법은 낮은 압력비의 경우 압력비에 따른 영향이 길이 대 직경 비, 회전수에 따른 영향, 입구 형상에 따른 영향 등에 비해 미미하므로 큰 오차를 유발하지 않는다.

3. 회전 송출공에서 송출계수의 거동

3.1 회전 송출계수와 회전 로테이션수

송출계수(discharge coefficient)는 실제로 송출공을 통과하는 질량유량과 주어진 열역학적 조건에서의 이상적인 질량유량의 비로 정의된다.

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

그러나, 회전 오리피스에는 회전일을 받아 이상적인 유량이 증가하므로, 회전 송출계수(rotational discharge coefficient)를 새로 정의한다.

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

회전 송출공에서 송출특성을 표현하는 인자로서 로테이션 수(Rotation number)를 많이 사용한다. 이것은 송출공에서 유동의 축방향 속도 대 송출공의 회전속도의 비인데

$$Ro = \frac{R_h \omega}{V_h} = R_h \omega \sqrt{\frac{2\gamma RT_1}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{1}{\Pi} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}$$

로 표현할 수 있다.

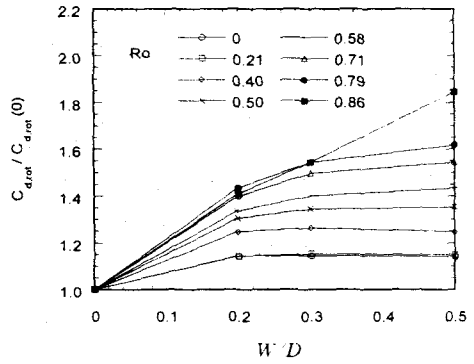
송출계수와 마찬가지로 회전 일을 받아서 축방향 유속이 증가하므로 이를 반영하기 위해 회전 로테이션 수(rotational Rotation number)를 도입하여야 한다.

$$Ro_{rot} = \frac{R_h \omega}{V_h} = R_h \omega \sqrt{\frac{2\gamma RT_1}{\gamma-1} \left(\left(1 + \frac{T_{rot}}{T_1} \right) - \left(\frac{1}{\Pi} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}$$

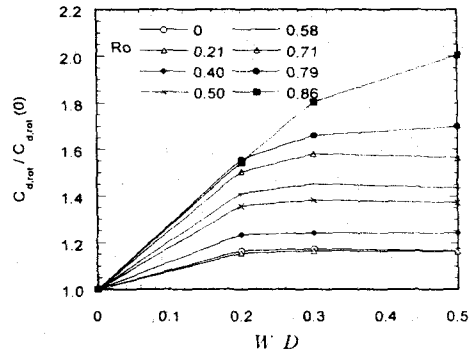
3.2 입구형상에 따른 송출계수의 거동

3.2.1 깊이 대 직경 비

입구 형상에서 깊이 대 직경 비(W/D)에 대한 영향을 평가하였다. Fig. 4는 회전자 길이 대 직경 비가 10인 경우 같은 로테이션 수에서 깊이 대 직경 비에 따라 회전 송출계수의 거동을 표현한 것이다. 정규화를 위해서 직각 모서리 입구를 기준으로 회전 송출계수의 비를 표현하였다. 그림에서 깊이 대 직경 비가 커짐에 따라 송출계수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 낮은 로테이션 수에서는 깊이에 따른 영향이 상대적으로 작지만 로테이션 수가 커짐에 따라 그 영향이 증가한다. 이러한 경향은 입구 입사각이 30°와 45°인 경우 모두에서 보이는데 다만 30°의 경우가 증가율이 작을 뿐이다. 깊이가 깊어질수록 송출계수의 크기가 커지고, 회전수가 커질수록 깊이에 따른 영향이 더 커지는 현상은 유동의 재부착과 판



(a) $L/D = 10$, $\theta = 30^\circ$



(b) $L/D = 10$, $\theta = 45^\circ$

Fig. 4 Percentage increase of rotational discharge coefficient with different inlet depth-to-diameter ratio

런이 깊다. 깊이가 깊어질수록 회전일을 받는 부분에 비해 유동의 재순환 영역이 상대적으로 작아지게 되므로 송출계수가 증가하는 것이다. 또 회전수가 증가함에 따라 입구에서의 입사각이 커지게 되는데 이때 입구 모따기 부분의 깊이 대 직경 비가 클수록 입사각의 크기를 일정하게 고정시켜주는 효과가 발생한다.

깊이에 따른 송출계수의 증가 경향은 McGreehan & Schotsch²⁾의 정지상태 둥근 모서리 입구형상의 경우와 흡사하다. 둥근 모서리 입구의 경우 송출계수가 더 이상 증가하지 않는 부분이 반경 대 직경 비 0.5인 부분에서 나타나지만, 모따기된 입구형상의 경우는 이 부분이 더 빨리 나타나는 경향을 보인다. 즉 낮은 로테이션 수에서는 깊이 대 직경 비 0.2 정도에서 이미 송출계수의 증가

폭이 작아지는 것을 알 수 있다. 또 많은 로테이션 수 범위에서 길이 대 직경 비 0.3과 0.5의 값은 큰 차이를 보이지 않는다. 다만 회전수가 증가하면 그 차이는 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 따라서 회전자에서 모따기 깊이에도 기계적으로 송출계수가 가장 커지는 깊이와 전기적인 자기 저항 사이에 최적화된 깊이를 발견할 수 있을 것이다. 송출계수의 측면에서는 깊이가 깊을수록 송출계수가 증가하지만 그 크기가 길이 대 직경 비 0.3보다 큰 경우에는 송출계수의 증가율이 미미하다.

3.2.2 각도 대 직경 비

입구 형상의 영향 중 입구의 모따기된 각도의 영향을 평가하였다. Fig. 6은 회전 송출계수를 각도에 따라 표현한 것이다. 그림에서 실선은 Cubic spline 방법을 사용하여 내삽하여 구현하였다. 길이 대 직경 비 10, 5인 경우에 각각의 회전 로테이션 수에 따른 경우를 나타내었다. 입구 깊이에 따른 송출계수가 가장 큰 길이 대 직경 비 0.5일 때 직각 모서리 입구의 경우를 0°로 하고 30°, 45°, 60° 일 경우를 표현하였다. Hay & Spencer⁴는 다시 직각 모서리 입구 형상이며 길이가 짧아진 경우를 90°로 간주하여 예측한 값을 사용하였다. 여기서도 같은 방법을 사용하여 그 값을 예상하여 표현하였다.

이 때 회전 송출공의 길이 변화에 대한 회전 송출계수 값을 구하기 위해 $Ha^{(n)}$ 가 가정한 길이 대 직경 비와 회전 송출계수사이의 수치 근사식

$$C_{d,rot} = m_1 - m_2 \frac{L}{D} - m_3 \cdot e^{-\frac{1}{m_4} (\frac{L}{D} - m_5)}$$

을 도입하여 모따기된 입구의 경우에 적용시켰다. 여기서 구한 근사식을 사용하여 각각의 경우 90° 일 때의 송출계수 값을 예측하였다.

길이 대 직경 비가 충분히 큰 경우는 회전자 길이가 짧아지는 것에 비하여 송출계수의 변동폭이 매우 작으므로(Fig. 5) 직각 모서리의 경우의 송출계수를 다시 90°에서의 송출계수라고 간주하여 사용하여도 무방하다. 그러나 길이 대 직경 비가 짧은 경우에는 이에 따른 변화가 크기 때문에 반드시 90°인 경우를 확인하여 각도에 따른 영향을 평가하여야 한다.

입구 모따기 각도에 따라 송출계수가 최대값이 되는 각도를 구할 수 있다. 최대치를 가지는 각도가 회전 로테이션 수에 따라 달라진다. 회전

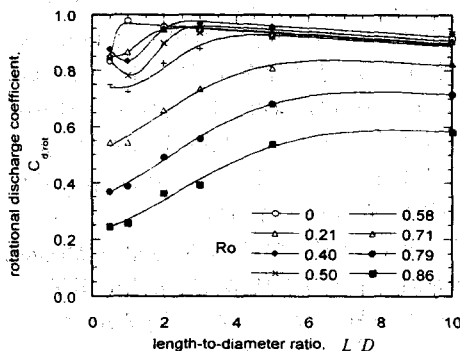
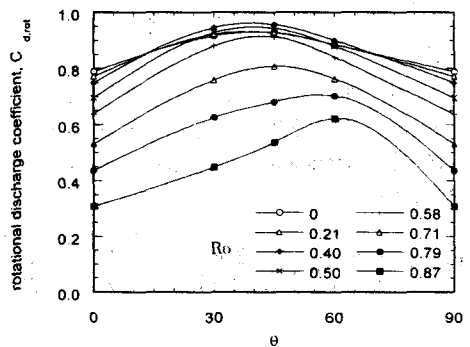
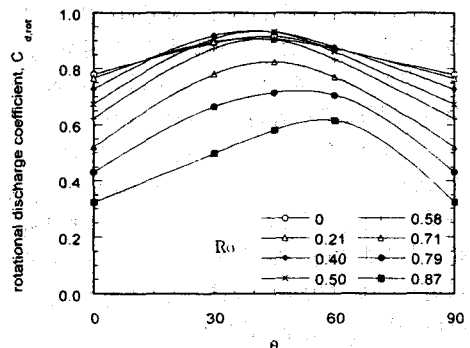


Fig. 5 Rotational discharge coefficient with different length-to-diameter ratio ($W/D = 0.5, \theta = 45^\circ$)



(a) $L/D = 5, W/D = 0.3$



(b) $L/D = 10, W/D = 0.3$

Fig. 6 Variation of rotational discharge coefficient with chamfered inlet angle

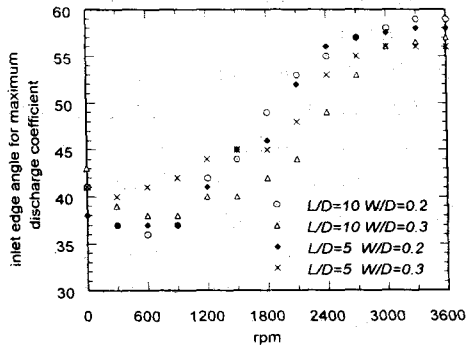


Fig. 7 Inlet edge angle for maximum rotational discharge coefficient

로테이션 수가 커질수록 최대값을 가지는 각도가 커진다. 이것은 유동 유입각의 영향을 최소로 줄여주는 입구 형상이 존재함을 나타낸다. 낮은 로테이션 수에서는 40° 근처에서 최대치를 가지고, 로테이션 수가 커질수록 최대치를 가지는 각도가 커지게 된다. 그 증가 경향은 55° 이상에서는 둔화되는 경향을 보인다.

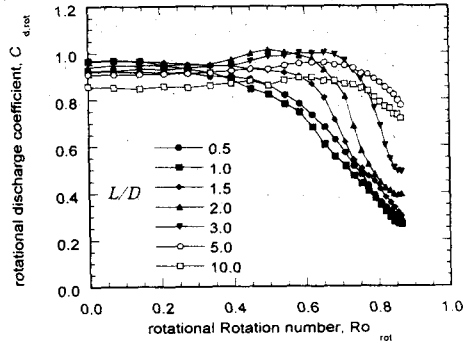
실제 유도 전동기의 설계에 적용할 수 있도록 회전자의 rpm과 입구 깊이에 따라 송출계수의 최대값을 가지는 각도를 구하였다. Fig. 7은 이 값들을 그림으로 표현한 것이다.

3.3.3 곡면을 가진 입구와의 비교

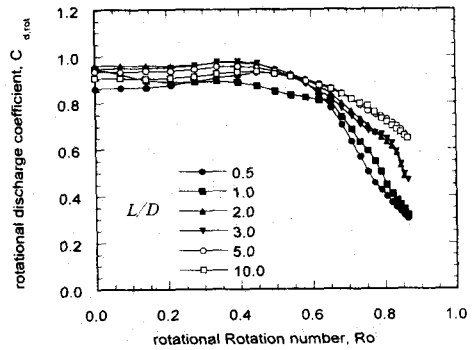
$Ha^{(a)}$ 는 회전 송출공이 회전함에 따라 회전 송출계수의 값이 감소하는 것을 고려하기 위하여 정지상태 송출계수의 90%가 되는 회전 로테이션 수를 임계 회전 로테이션 수(critical rotational Rotation number, $Ro_{rot, cr}$)로 정의하였다.

Fig. 9은 임계 회전 로테이션 수를 표현한 것이다. 그림에서 곡선의 위 부분의 회전 로테이션 수에서는 회전 송출계수의 변화가 심하고, 그 아래 부분은 로테이션 수에 따른 회전 송출계수의 변화가 작은 구간을 나타낸다.

직각 모서리 입구, 둥근 모서리 입구, 모따기된 입구의 경우 모두를 표현하였다. 둥근 모서리의 경우 가장 큰 임계 로테이션 수를 가지고, 직각 모서리의 경우가 가장 작은 값을 가진다. 모따기된 입구의 경우에는 직각 모서리와 둥근 모서리의 중간 정도의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이것은 입구에서의 재순환 영역과 관련이 있다.



(a) round edge ($\tau/D = 0.5$)



(b) chamfered edge ($W/D=0.5, L/D=10, \theta = 45^\circ$)

Fig. 8 Rotational discharge coefficient with rotational Rotation number, comparison of round inlet edge with chamfered inlet edge

둥근 모서리의 경우 유동의 입사각에 따라 박리점이 이동한다. 그러나 직각 모서리의 경우에는 박리점이 고정되어 있기 때문에 유동 유입각에

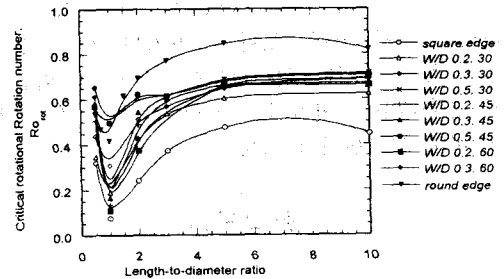


Fig. 9 Critical rotational Rotation number distribution with length-to-diameter ratio

따라 큰 재순환 영역을 만들어 베나콘트랙타에서의 유로가 축소되는 효과가 발생하는 것이다. 모따기된 입구의 경우는 박리점의 위치가 고정되어 있기는 하지만, 모따기에 의해 유도의 방향을 보다 송출공의 방향과 가깝게 유지할 수 있다. 때문에 송출계수의 변화가 둥근 모서리의 경우보다는 크지만, 직각모서리의 경우에 비해서는 작은 것을 알 수 있다.

4. 결론

- (1) 길이 대 직경 비, 로테이션 수에 대한 경향은 모따기된 입구형상에서도 선행연구와 정성적으로 일치한다. 즉 회전 로테이션 수가 증가하고 길이 대 직경비가 커질수록 송출계수는 증가하고 회전 로테이션 수가 감소하고 길이 대 직경비가 작을수록 송출계수는 감소하는 경향을 나타낸다.
- (2) 입구 모따기 부분의 깊이 대 직경 비에 따라 송출계수가 커지는 경향을 보인다. 이 때 회전 로테이션 수가 클수록 회전 송출계수의 증가정도가 큰 것을 볼 수 있다. 그런데 깊이 대 직경 비 0.3이상에서는 증가율이 둔화된다. 이것은 회전 송출공의 입구 모따기 깊이에 어떤 적절한 설계 점이 존재할 수 있다는 것을 보여준다.
- (3) 입구 모따기 각도에 따라 송출계수가 최대값을 가지는 부분이 존재한다. 낮은 로테이션 수에서는 35° 부근에서 최대값을 갖고, 로테이션 수가 증가할수록 최대값을 가지는 각도가 증가하는 경향을 보인다. 그러나 전반적으로 50° ~ 55° 사이에서 넓은 영역의 로테이션 수에서 최대값을 갖는다.
- (4) 임계 회전 로테이션 수를 도입하여 회전 송출계수의 값이 회전 송출공이 회전함에 따라 감소하는 정도를 고려하였다. 모따기된 입구 형상일 경우 둥근 모서리 입구보다는 회전수에 따른 회전 송출계수의 변화가 크지만 직각 모서리 입구에 비해서는 변화가 적다.

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) W. F. McGreehan, M. J. Schotsch, 1988, "Flow Characteristics of Long Orifices With Rotation and Corner Radiusing", *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 110, pp213-217
- (3) Hay, N., and Lampard, D., 1998, "Discharge Coefficient of Turbine Cooling Holes: A Review", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 314-319.
- (4) N. Hay and A. Spencer, 1992, "Discharge Coefficients of Cooling Holes with Radiused and Chamfered Inlets", *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 114, No. 4, pp701-706
- (5) Wittig, S., Kim, S., Jakoby, R., and Weiert, I., 1996, "Experimental and Numerical Study of Orifice Discharge Coefficients in High-Speed Rotating Disks", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 400-407.
- (6) Maeng, D. J., 1998, "Flow characteristics and Discharge Behaviors of Highly Rotating Turbine Cavity System with Discharge Holes", Ph. D. Thesis, Seoul National University
- (7) Maeng, D. J., Lee, J.S., Jakoby, R., Kim., S., and Witting, S., 1998, "Characteristics of Discharge Coefficient in a Rotation Disk System", ASME Paper No. 98-GT-266
- (8) Ryu, H. D., 1999, "Study on the Discharge Behaviors of the Induction Motor with Axial Cooling Channels in stator and Rotor", M. S Thesis, Seoul National University
- (9) Ha, K. P., 1999, "A Comprehensive Thermal Analysis on an Induction Motor with Axial Cooling Passages", Ph. D. Thesis, Seoul National University
- (10) Jakoby, R., Geis, T., Kin, S., and Witting, S., 1997, "Discharge Coefficients of Rotating Orifices with Radiused Inlet Corners," Thirteenth International Symposium on Airbreathing Engines (ISABE XIII), Tennessee, USA.
- (1) Lichtarowicz, A., Duggins, R. K., and Markland, E., 1965, "Discharge Coefficients for Incompressible Non-Cavitating Flow Through Long Orifices", *Journal of Mechanical*