

무선계측기법을 이용한 회전 송출공의 압력계수 측정

하경표[†] · 구남희* · 고상근**

(2003 년 2 월 7 일 접수, 2003 년 6 월 30 일 심사완료)

Measurement of Pressure Coefficient in Rotating Discharge Hole by Telemetric Method

Kyoung-Pyo Ha, Namhee Ku and S. Ken Kauh

Key Words : Telemetry (무선계측기), Rotating Discharge Hole (회전 송출공), Pressure Coefficient (압력계수), Discharge Coefficient (송출계수), Piezoresistive Pressure Sensor (압전 압력계)

Abstract

Pressure coefficient in a rotating discharge hole was measured to gain insight into the influence of rotation on the discharge characteristics of rotating discharge holes. Pressures inside the hole were measured by a telemetry system that had been developed by the authors. The telemetry system is characterized by the diversity of applicable sensor type. In the present study, the telemetry system was modified to measure static pressure using piezoresistive pressure sensors. The pressure sensor is affected by centrifugal force and change of orientation relative to the gravity. The orientation of sensor installation for minimum rotating effect and zero gravity effect was found out from the test. Pressure coefficients in a rotating discharge hole were measured in longitudinal direction as well as circumferential direction at various rotating speeds and three different pressure ratios. From the results, the behaviors of pressure coefficient that cannot be observed by a non-rotating setup were presented. It was also shown that the discharge characteristics of rotating discharge hole is much more influenced by the Rotation number irrespective of pressure ratio.

기호설명	
A	: 곡선 맞춤 상수[V/Pa]
A_h	: 송출공 단면적[m ²]
B	: 곡선 맞춤 상수[V]
C_d	: 송출계수
$C_{d,rot}$: 회전 송출계수
C_p	: 압력계수
\dot{m}	: 질량 유량[kg/s]
N	: 측정 회수
P	: 압력[Pa]
P_1	: 송출공 상류 압력[Pa]
P_2	: 송출공 하류 압력[Pa]
P_g	: 압력 센서의 중력 효과[Pa]
P_r	: 압력 센서의 원심력 효과[Pa]
P_{ref}	: 보정 시험 시의 기준 압력[Pa]
R	: 공기의 기체 상수[kJ/kg·K]
R_h	: 송출공 회전 반경[m]
Ro	: 로테이션 수(Rotation number)
Ro_{rot}	: 회전 로테이션 수(Rotational Ro number)
T_1	: 송출공 상류 온도[K]
V	: 압력 변환기 출력 전압[V]
V_b	: 이론적인 송출공 내부 축방향 유속[m/s]
Π	: 압력비(= P_1/P_2)
γ	: 공기의 비열비
θ, ϕ, ψ	: 압력 센서 장착 각도[deg]
Ω	: 압력 센서 장착 축의 회전 각도[deg]
ω	: 송출공 회전 속도[rad/s]
	약어
	SEE : 표준 추정 오차(Standard Error of Estimation)

[†] 책임저자, 회원, 현대자동차 파워트레인연구소

E-mail: kapha@hyundai-motor.com

TEL: (031)369-4521 FAX: (031)369-4503

* 서울대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 서울대학교 기계공학과

1. 서론

가스터빈이나 대형 전동기 등의 회전기기는 기기 구성품의 냉각을 위해 고정자와 회전자에 냉각 공기의 전달 통로, 즉, 송출공을 갖고 있다. 냉각 공기의 공급을 위해서는 추가의 압축기 일 또는 별도의 냉각 팬 구동을 필요로 하므로, 송출공 설계 시, 냉각 성능과 소요 동력을 고려하여 송출 유량에 대한 최적화가 필요하다. 이를 위해서는 비회전 송출공 및 회전 송출공의 송출 특성에 대한 이해가 요구된다.

송출 특성은 송출공 양단의 열역학적 변수들로 표현되는 송출계수로 주로 설명되고 있으나,⁽¹⁻³⁾ 송출공 내부 압력 분포로부터 구하는 압력계수로 보다 잘 설명될 수 있다. 송출공 내부 압력 변화는 송출공 입구 수축 단면으로 유체를 가속하는데 필요한 압력, 유동 재부착 시 회복되는 압력, 그리고 송출공 벽면으로의 마찰에 의한 압력 손실로 요약될 수 있다.⁽¹⁾ 송출공 양단의 여러 인자에 따라 송출계수가 결정되는데,⁽¹⁻³⁾ 이는 송출공 내부에서 재순환 영역의 크기, 재부착 위치, 재부착에 의한 압력 회복, 벽면에서의 마찰 손실 등 송출공 벽면 압력 분포 변화에 기인하므로, 송출계수와 압력계수를 동시에 고찰함으로써 송출 특성에 대해 보다 깊이 있는 이해를 할 수 있다.

회전하지 않는 송출공에 대해 Lichtarowicz *et al.*⁽¹⁾ 은 송출공 길이 대 직경비에 따른 송출공 벽면 압력계수를 구해 유동의 재부착과 송출 특성에 대해 설명하였다. 한편, 회전축으로부터 회전 반경만큼 떨어진 위치에 중심축이 존재하는 회전 송출공의 경우에는 송출공 입구 형상과 송출공 길이 대 직경비에 따라 차이는 있지만, 회전의 영향으로 송출 특성이 비회전 송출공과 큰 차이를 보인다.⁽⁴⁻⁶⁾ 회전 송출공의 내부 압력 분포는 원주방향으로 일정하지 않고 비 대칭적으로 발달하는데, 이로 인해 비회전 송출공의 특성과 차이를 보이게 되므로, 회전 송출공의 특성을 파악하기 위해서는 내부 압력 분포를 길이별, 원주별로 측정할 필요가 있다. 그러나 회전체에서의 압력 측정의 어려움으로 인해 회전 송출공의 압력 분포에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

회전체에서의 압력 측정은 회전체와 정지체 간 압력을 직접 전달할 수 있는 장치(PTD: Pressure Transfer Device)를 이용할 수 있으나,⁽⁹⁾ 이 장치는 기밀 유지 장치에서의 발열 등의 문제로 인해 정밀한 압력 측정에 어려움이 따른다. 본 연구에서는 압력 신호를 전기신호로 변환하여 전달할 수 있는 무선계측기⁽⁷⁾ 이용하여 회전 송출공의 압

력 분포를 측정하고자 한다. 회전 무선계측기의 기술 동향을 살펴보면, 열전대를 이용한 온도 측정 분야와 스트레인게이지를 이용한 응력 측정 분야는 이미 상용화되어 널리 사용되고 있다.⁽¹⁰⁾ 그러나 송출공의 압력 계수를 측정할 수 있는 정압 측정용 무선계측기는 아직 보고된 바 없다. 회전체의 압력 측정 장치는 다른 물리량 측정 장치와는 달리 회전 효과가 존재하므로, 이에 대한 연구가 선행될 필요가 있다.

그러므로 본 연구에서는 회전 송출공의 벽면 정압을 측정하여 압력계수를 구할 수 있는 압력 측정용 무선계측기를 개발하고, 압력 측정 장치의 회전 효과를 규명하여, 회전체에서의 압력 측정 시스템을 구축하고자 한다. 아울러 송출공의 회전에 따른 송출계수와 압력계수 거동에 대해 고찰하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

회전 송출공에서의 송출계수와 압력계수를 측정하기 위한 실험 장치를 Fig. 1에 보였다. 송풍기에 의해 공급된 공기는 열교환기, 유량계, 유동 안정화 챔버를 거쳐 회전 송출공으로 유입된다. 공기의 유량은 송풍기 구동 전동기의 전원 주파수를 제어하는 방식으로 조절하였는데, 전동기 주파수 제어 방식만으로는 회전 송출공 상하류간 압력비를 설정치에 정확하게 맞추는 것이 어려우므로, 설정 압력비 근처에서 3 회의 실험을 수행하고, 이 결과를 내삽하여 설정 압력비에서의 송출계수를 구했다. 3 회의 실험은 설정 압력비의 $\pm 10\%$ 이내에서 수행되었고, 이 구간에서 송출계수는 압력비에 따른 변화가 작고, 선형적이라 볼 수 있으므로, 이 방법으로 인한 오차는 무시할 수 있다.

열교환기에서 공기는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 로 제어되는데, 정밀한 공기 온도 제어를 위해 열교환기 냉매 온도와 시험실 온도를 항온조와 공조기 등으로 제어하

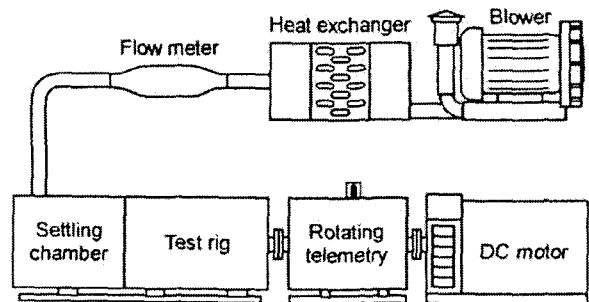


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

였다. 공기의 질량 유량은 1%의 측정오차를 갖는 층류 유량계를 이용하여 측정하였다.⁽⁷⁾ 유량 측정 후 공기는 유동 안정화 챔버를 거쳐 회전 송출공에 축방향으로 공급된다.

회전 송출공 내부 압력 분포를 측정하기 위해, 압력 측정용 회전 무선계측기를 테스트 리그 회전자와 직결하였다. 테스트 리그 회전자와 회전 무선계측기는 직류 전동기로 구동되는데, 직류 전동기는 전용 제어기로 회전수를 제어하였다.

송출계수와 압력계수를 측정하기 위한 테스트 리그의 상세도를 Fig. 2에 보였다. 회전 송출공의 송출계수를 구하기 위해 송출공 상류와 하류의 압력과 온도 등이 측정되었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 유입된 유량은 회전 송출공과 고정자와 회전자 사이 간극으로 나뉘지는데, 회전 송출공을 통과하는 유량을 구하기 위해서, 본 시험 전에 각 시험 조건별 간극을 통과하는 유량을 별도로 측정하였다.

회전 송출공 내부 압력계수를 측정하기 위해 송출공 내부에 길이 방향으로 다섯 개의 압력 탭을 설치하였다. 회전 송출공은 회전자와 별도로 가공되어, 압력 탭 설치 각도를 변경하여 회전 송출공을 회전자에 장착할 수 있다. 다섯 지점의 압력을 측정하기 위해 다섯 개의 압력 센서가 테스트 리그 내에 설치되었고, 압력 측정을 위한 압력 전달관은 테스트 리그 내부에만 존재하고, 테스트 리그 외부의 회전 무선계측기와는 전선으로만 연결된다. 사용된 압력 센서는 차압 센서인데 기준 압력은 송출공 하류 압력을 기준으로 하였다.

2.2 변수의 정의

송출계수(C_d)는 주어진 열역학적 조건에서 송출공을 통과하는 이상적인 질량 유량과 실제 질량 유량 \dot{m} 의 비로 다음과 같이 정의된다.⁽⁴⁻⁷⁾

$$C_d = \dot{m} \cdot \frac{\sqrt{T_1}}{P_1 A_h} \bigg/ \sqrt{\frac{2\gamma}{(\gamma-1)R} \left[\left(\frac{1}{\Pi}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{1}{\Pi}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (1)$$

여기서, P_1 , T_1 은 송출공 상류의 압력과 온도이고, A_h 는 송출공의 면적, γ 와 R 은 각각 공기의 비열비

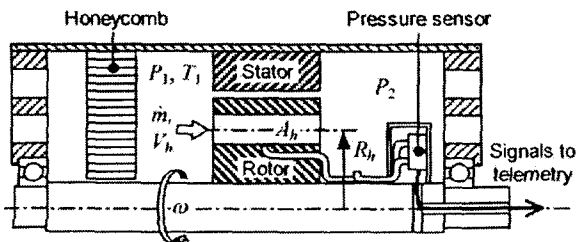


Fig. 2 Detailed drawing of test rig

와 기체 상수를 나타낸다. 또한 압력비 Π 는 송출공 상류 압력과 하류 압력(P_2)의 비로써 다음과 같이 정의 된다.

$$\Pi = P_1 / P_2 \quad (2)$$

압력계수(C_p)는 송출공 내부 압력(P)의 송출공 양단 압력차에 대한 무차원 압력으로 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{P - P_2}{P_1 - P_2} \quad (3)$$

한편, Ro 수는 회전 송출공의 송출 특성을 설명하는데 유용한 변수인데, 주어진 열역학적 조건에서 송출공을 통과하는 이상적인 유동의 축방향 속도(V_h)와 송출공의 회전 속도의 비로 다음과 같이 정의된다.^(6,7)

$$Ro = \frac{R_h \omega}{V_h} = R_h \omega \bigg/ \sqrt{\frac{2\gamma RT_1}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{1}{\Pi}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (4)$$

여기서, R_h 는 송출공의 회전 반경을 나타내고, ω 는 송출공의 회전 속도를 나타낸다.

또한, 회전 송출공은 회전축으로부터 일을 받아 이상적인 축방향 유속이 증가하게 되는데, 이를 고려하여 회전 송출계수($C_{d,rot}$)와 회전 Ro 수(Ro_{rot})를 정의할 수 있다. 이들 변수는 송출계수, Ro 수를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁸⁾

$$C_{d,rot} = \frac{C_d}{\sqrt{1 + Ro^2}} \quad (5)$$

$$Ro_{rot} = \frac{Ro}{\sqrt{1 + Ro^2}} \quad (6)$$

2.3 회전 무선계측기

본 연구에서는 회전 송출공 내부 압력을 측정하기 위해 압력 측정용 회전 무선계측기를 이용하였다.⁽⁷⁾ 회전 무선계측기의 개략도를 Fig. 3에 보였다.

회전 무선계측기는 기능적으로 제어, 통신, 전원, 센서 모듈로 구성된다. 제어 모듈은 마이크로 프로세서, 메모리, 입출력 IC 등으로 구성되어 있으며, 프로그램된 로직에 따라 무선계측기 각 구성요소를 제어한다. 또한 데이터의 획득, 저장, 송신 등 측정 데이터 관리와 시스템을 진단하는 역할을 수행한다.

통신 모듈은 무선으로 정지부와 회전부 간 데이터를 전송한다. 통신 수단으로는 적외선 트랜지스터와 적외선 다이오드를 이용하였다. 통신은 양방향으로 이루어지고, 직렬 통신 규약(RS-232)을 따르

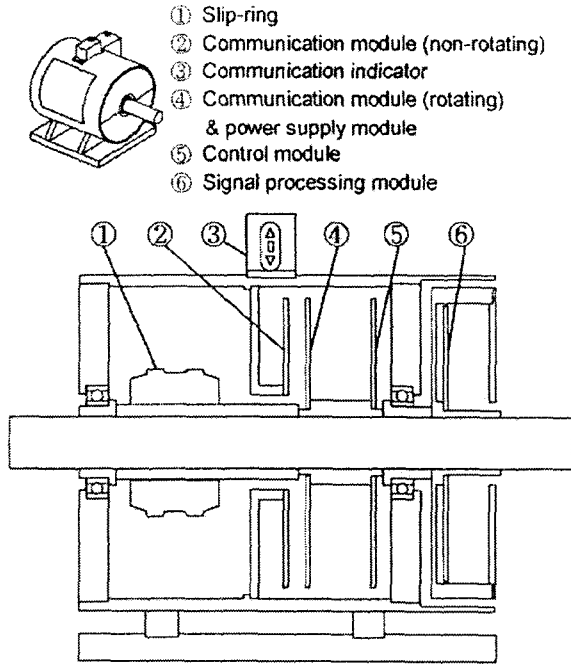


Fig. 3 Schematic diagram of rotating telemetry system

며, 축의 회전 속도에 무관하게 일정한 통신 속도로 데이터를 전송하는 특징을 갖고 있다.

전원 모듈은 무선계측기 회로에 전원을 공급하는 역할을 담당하는데, Fig. 3 에 보인 바와 같이, 본 실험에서는 슬립링으로 전원을 공급 받는 방식을 이용하였다. 본 무선계측기는 발전기 방식을 기본으로 하지만, 본 실험에서는 정지 상태에서도 측정이 가능해야 하므로, 회전 시에만 적용할 수 있는 발전기 방식은 사용할 수 없었다. 전원 모듈은 슬립링에 의해 공급된 단일 전원으로 압력센서와 무선계측기 구성 요소들의 다양한 전원 요구를 충족시킬 수 있도록 다양한 출력 전압을 공급한다.

Fig. 3 의 회전 무선계측기에서 제어, 통신, 전원 모듈은 측정 물리량과 무관하게 거의 동일한 회로적 구성을 갖는 반면,⁽⁷⁾ 센서 모듈은 측정 물리량에 따라 적합한 회로를 필요로 하는데, 본 실험에서는 송출공 내부 압력을 측정하기 위해 Fig. 4 와 같은 구성을 갖는 센서 모듈을 개발하였다. 본 실험의 경우 압력비가 낮아 송출공 내부 압력이 크지 않으므로, 감도가 좋고 동적 특성이 우수한 압전 저항형(piezoresistive) 압력 변환기를 이용하였다. 센서 모듈은 Fig. 4 와 같이 브리지로 구성된 압력 변환기에 전압을 인가하는 수단, 브리지 출력에서 발생하는 동상의 노이즈를 제거하고 신호를 증폭하는 차동 증폭기, 다채널 압력 신호를 하나의 AD 변환기로 읽기 위해 도입된 아날로그 멀티플렉서, 측정 전압을 디지털로 변환시키기 위한

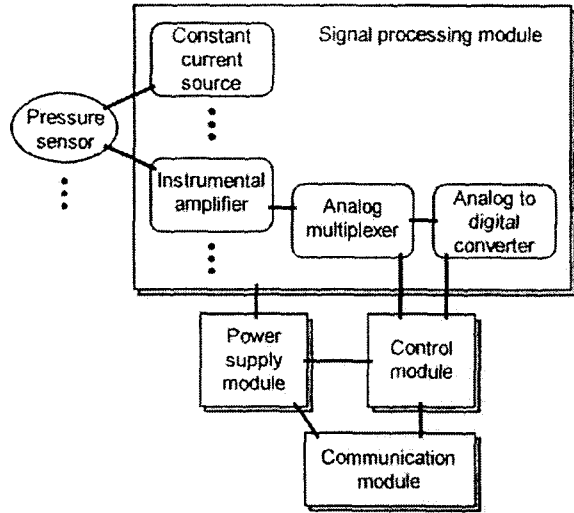


Fig. 4 Block diagram of signal processing module

AD 변환기 등으로 구성되어 있다. Fig. 4 에 보인 바와 같이, 아날로그 멀티플렉서의 채널 전환은 제어 모듈에 의해 이루어지고, AD 변환기의 디지털 출력은 제어 모듈로 보내진다. 그리고 전원 모듈로부터 신호 처리 모듈 구동을 위한 전원을 공급 받는다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 압력 변환기의 회전 보정

압력 변화를 감지하기 위해 물질의 탄성 변형을 이용하는 압력 센서에는 부르돈 관(Bourdon tube), 벨로즈(bellows), 캡슐(capsule), 다이어프램(diaphragm) 등이 있다.⁽¹¹⁾ 이 중 압력 신호를 전기 신호로 변환하는 것이 가장 용이한 다이어프램 형 압력 센서가 정밀 압력 측정 분야에서 널리 사용되고 있다. 다이어프램 형 압력 변환기에는 금속재의 다이어프램 양면에 스트레인게이지를 부착한 방식, 압력에 반응하는 금속재의 다이어프램 면과 압력에 무관하게 설치된 전극면 간 커패시턴스 변화를 감지하는 방식, 다이어프램의 변형이 유발하는 압전 물질의 정전 용량 변화를 감지하는 방식, 그리고 본 실험에서 사용한 것처럼 실리콘 웨이퍼 표면에 압전 물질을 확산시켜 만든 압전 저항형 압력 변환기 등이 있다.⁽¹²⁾

압전 저항형 압력 변환기는 응답 특성이 빠르고, 감도가 좋으며, 높은 선형성을 갖는 장점이 있다. 본 실험에서는 압력 변환기 보정 실험을 위해 풍동에서 정밀 압력계와 비교하였다. Fig. 5 에 보인 것처럼 본 연구에서 사용된 압력 변환기는 높

은 선형성을 가진다. 보정 실험 결과로부터 식 (5)와 같이 정의되는 표준 추정 오차(SEE: standard error of estimation)를 구해보면,⁽¹²⁾ 약 0.5Pa의 값을 갖고, 이는 측정 범위 내에서 약 0.1%의 수준이다. 즉, 본 압력 변환기는 선형성이 매우 뛰어나다.

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (V_i - A \cdot P_{ref,i} - B)^2}{N-2}} \quad (5)$$

여기서, V_i 는 압력 변환기 출력 전압, $P_{ref,i}$ 는 기준 압력, A, B 는 곡선 맞춤 상수, N 은 측정회수를 의미한다.

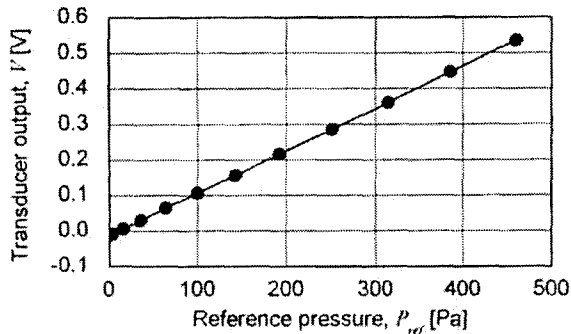
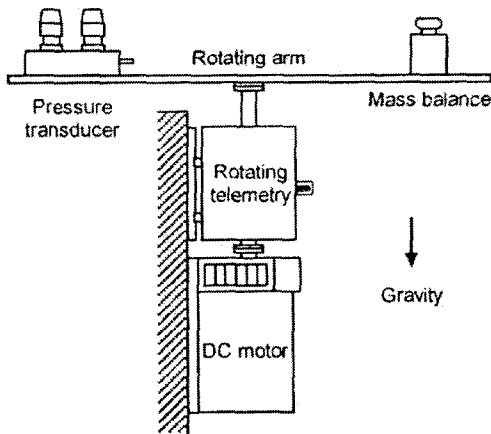
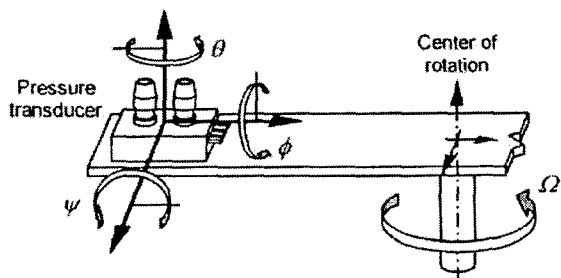


Fig. 5 Wind tunnel calibration of pressure transducer



(a) Experimental setup

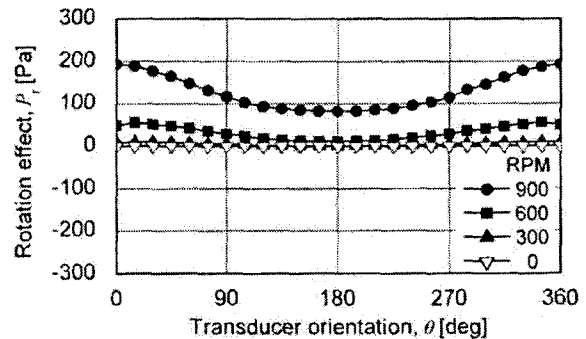


(b) Transducer orientation

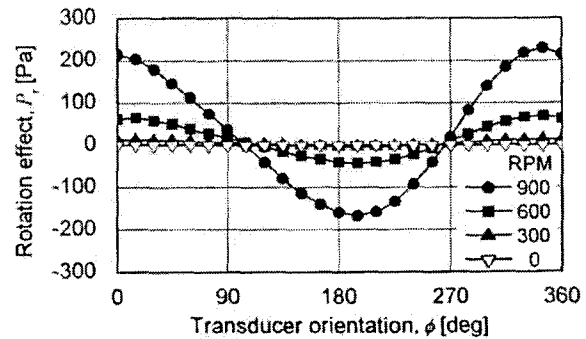
Fig. 6 Experimental setup for compensation of rotation effect of pressure transducer

압전 저항형 압력 변환기를 포함한 전술한 모든 압력 변환기는 압력 센서 양단의 압력차에 비례하는 힘을 받아 변형이 일어나는데, 압력 센서는 압력 외의 힘에 의해서도 변형이 일어날 수 있다. 본 실험에서처럼 압력 변환기를 회전체에 장착하여 압력을 측정하고자 하는 경우에는 압력 센서가 원심력과 중력 방향의 변화에 따라 변형되는 것을 고려하여야 한다. 보통의 경우 압력 센서의 길이가 작으므로 원심력이나 중력의 영향이 크지 않지만, 본 실험은 작은 압력 변화를 측정하고자 하므로, 원심력과 중력 방향의 변화에 따라 유발되는 오신호에 대한 대책이 필요하다.

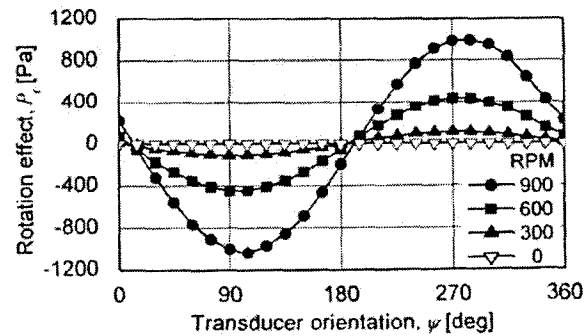
본 연구에서는 원심력에 의한 압력 센서의 신



(a) Rotation effect with θ ($\phi = 0, \psi = 0$)



(b) Rotation effect with ϕ ($\theta = 0, \psi = 0$)



(c) Rotation effect with ψ ($\theta = 0, \phi = 0$)

Fig. 7 Rotation effect of pressure transducer with rotating speed and transducer orientation

호 변화를 측정하기 위해 Fig. 6(a)와 같은 실험 장치를 구성하였다. 압력 센서가 장착된 보를 직류 전동기로 회전 시키면서 무선계측기로 압력 센서 신호 변화를 측정하였다. 이 때 압력 센서의 양단에 동일한 크기의 압력이 가해지도록 두 압력 입력 측을 단락 시켰고, 압력 센서의 중력에 의한 영향을 없애기 위해 회전 보를 수평으로 설치하였다.

압력 센서의 자세에 따른 원심력 효과를 Fig. 6(b)와 같이 센서를 세 회전 방향에 대해 15° 간격으로 장착하여 측정하였다. 센서 회전 속도와 센서 장착 각도별 원심력 효과를 Fig. 7에 나타내었다. 압력 센서의 원심력 효과는 회전수에 따라 증가하며, 원심력 효과가 최소가 되는 압력 센서의 장착 각이 존재함을 알 수 있다. 압력 센서 장착 각은 압력 감지 소자가 아닌 압력 센서 몸체의 각도이므로, Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 원심력 효과가 최소가 되는 장착 각이 정확하게 90°의 배수에서 나타나지 않을 수도 있다. 각 압력 센서마다 압력 감지 소자와 압력 센서 몸체가 이루는 각이 다르므로, 압력 센서는 사용 전에 회전 보정 실험을 필요로 한다.

원심력의 효과는 다이어프램 법선 벡터가 회전 보의 반경 벡터와 수직을 이루는 방향, 즉, Fig. 6(b)에서 회전 방향의 중심축 θ, ψ 방향일 때 최소가 된다. 원심력에 의한 압력 신호의 왜곡을 최소화하는 데는 이 두 방향이 모두 가능하나, 압력 센서가 회전하면서 중력의 방향이 바뀌는 것을 추가적으로 고려할 필요가 있다. 본 실험은 Fig. 1과 Fig. 2처럼 회전 축이 수평으로 놓이므로, 다이어프램의 법선 벡터가 축 회전에 따라 중력 방향과 이루는 각이 지속적으로 바뀌는 경우에는 다이어프램에 가해지는 힘의 크기도 지속적으로 바뀌게 된다. 회전 축의 자세에 따라 압력 센서에 유발되는 중력 효과를 Fig. 8에 보였다. 중력 효과는 축 회전에 따라 변동되는 성분이므로 원심력 효과

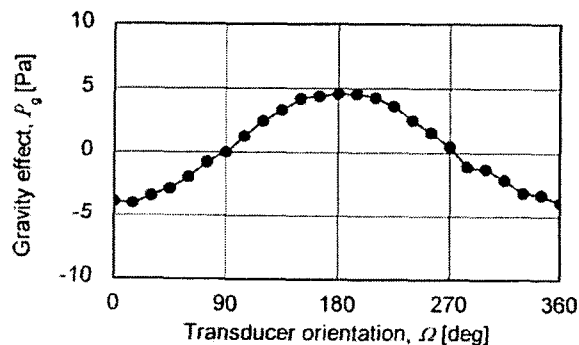


Fig. 8 Gravity effect of pressure transducer with transducer orientation

와는 달리 보정 될 수 없다. 그러므로 압력 센서 장착 시 원심력의 효과는 다소 존재하더라도 중력 효과는 발생하지 않는 장착 각을 찾을 필요가 있다. 본 실험에서는 중력 효과가 존재하지 않고 원심력 효과가 최소가 되는 방향, 즉, 다이어프램의 법선 벡터가 회전축의 중심 벡터와 평행한 방향으로 압력 변환기를 장착하고, 잔존하는 원심력 효과는 측정하여 보정하였다.

3.2 회전 송출공의 압력계수 특성

회전 송출공에 유입되는 유동은 Fig. 9에 보인 것처럼 송출공 양단의 압력차에 의해 유발되는 축방향 유속(V_h)과 송출공 이동 속도($R_h\omega$)의 두 성분을 갖는다. 그러므로 회전하는 송출공의 내면은 유동이 접근하는 면을 압력면, 그 맞은편을 흡입면으로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 송출공 내면을 Fig. 9와 같이 압력면, 흡입면, 외측면, 내측면으로 정의하였다.

송출공 회전 속도에 따른 각 송출공 내면에서의 압력계수를 Fig. 10에 보였다. 송출공이 회전하지 않는 경우에는 Fig. 10(a)와 같이 송출공 내면 4면 모두 동일한 압력계수 거동을 보인다. 또한 입구에서 박리된 유동이 재부착 되기 이전의 재순환 영역, 유동 재부착에 의한 압력 회복, 송출공 벽면에서의 압력 손실로 인한 압력 감소의 경향이 잘 나타난다.

한편, Fig. 10(b), (c)에서 송출공이 회전하는 경우에는 송출공 내면의 압력계수가 비대칭적으로 발달됨을 알 수 있다. 그러나 회전 송출공의 경우에도 송출공 입구에 재순환 영역이 존재하고, 유동 재부착에 의한 압력 회복이 발생하며, 벽면에서의 압력 손실에 의한 압력 감소가 나타나는 현상은 비회전 송출공과 동일함을 알 수 있다. 또한 외측면과 내측면에 비해 유동이 접근하는 압력면은 압력이 높고 흡입면은 압력이 낮는데, 이러한 경향은 Ro 수가 증가함에 따라 더욱 심화된다. 그러나

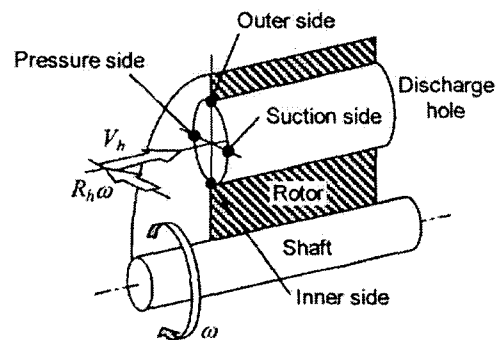
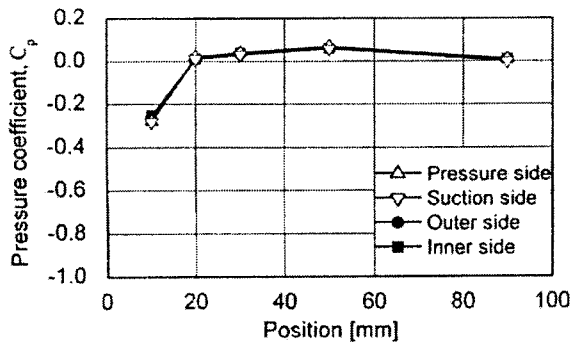
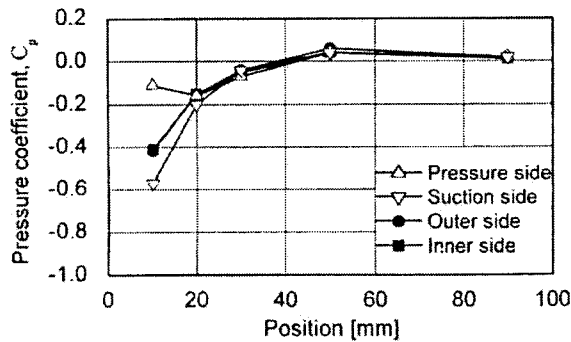


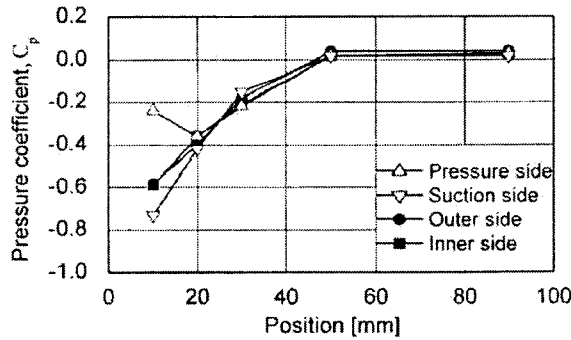
Fig. 9 Description of measurement side of pressure coefficient



(a) Non-rotating (Ro = 0)



(b) 900RPM (Ro = 0.20)



(c) 1800RPM (Ro = 0.39)

Fig. 10 Pressure coefficient of discharge hole in longitudinal direction with rotation speed

유동이 송출공 길이 방향으로 진행하면서 대칭으로 전환되는데, 이로부터 송출공 내부 원주 방향 압력 불균형을 해소하기 위해 원주 방향으로의 유동이 발생됨을 알 수 있다. Fig. 10의 경우는 길이 대 직경비가 충분히 길어서, Ro 수 0.39 범위 이내에서는 원주 방향으로의 압력 불균형이 해소되기 때문에 송출공 후반부에서는 원주 방향 압력차가 없어진다. 그러나 Fig. 10에서 짐작할 수 있는 바와 같이, Ro 수가 증가하면 송출공 50mm 위치의 압력계수가 감소하는데, 이로부터 Ro 수의 증가는 유동의 완전 재부착을 저해하는 것을 알 수 있다. 또한 송출공 입구 재순환 영역 압력계수가 Ro 수 증가에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이는

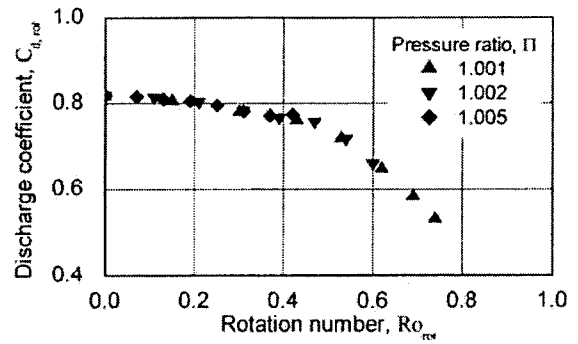
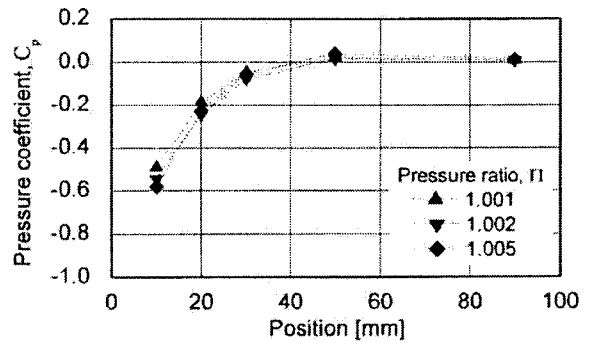
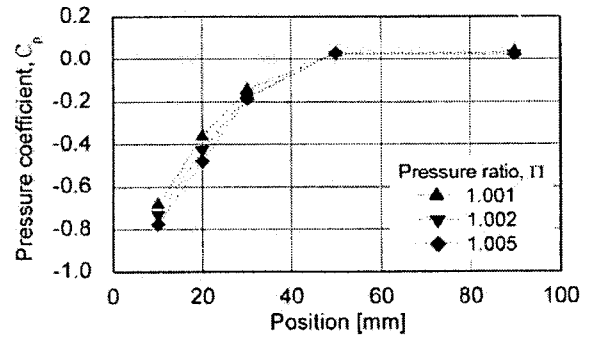


Fig. 11 Discharge coefficient with Rotation number



(a) Ro = 0.20



(b) Ro = 0.39

Fig. 12 Pressure coefficient of suction side with Rotation number and pressure ratio

유동 유입각 증가에 따른 베나콘트랙타에서의 최소 단면적 감소에 따른 것인데, 이로 인해 Fig. 11에 보인 것처럼 Ro 수가 증가함에 따라 송출계수가 감소하게 된다.

또한 Fig. 11에서 Ro 수에 따른 송출계수의 거동이 압력비에 무관하게 나타남을 알 수 있다. 동일한 회전수에서도 압력비가 커서 축방향 유속이 증가하면 Ro 수가 작아지는데, Fig. 11에서 볼 수 있는 바와 같이 송출계수는 압력비 또는 회전수에 무관하게 동일 Ro 수에서 동일한 거동을 보인다. 한편, 송출공 내부 흡입면의 압력계수 측정 결과를 Fig. 12에 보였는데, 압력계수도 압력비에 무관

하게 동일 Ro 수에서 유사한 거동을 보인다. Ro 수는 송출공 입구에서의 속도의 비, 즉 송출공 입구로 접근하는 유동의 각도를 나타내므로, 회전 송출공의 특성은 송출공 입구로 접근하는 유동각에 따라 결정된다는 것을 알 수 있다. 이는 송출 특성이 입구에서의 유동의 박리와 이로 인한 베나 콘트랙타의 형성, 그리고 유동의 재부착과 밀접한 관련이 있다는 것을 의미한다.

4. 결 론

(1) 본 연구에서는 회전체 내부의 정압을 측정할 수 있는 무선계측기를 개발하였으며, 이를 통해 회전 송출공의 압력계수를 측정하였다. 본 무선계측기는 측정 정밀도와 선형성이 높은 압전 저항형 압력계를 이용하여, 회전 송출공 내부 5 지점의 압력을 동시에 측정한다. 본 무선계측기는 마이크로프로세서에 의해 작동되고, 디지털 양방향 통신이 가능하므로 작동성과 측정 정밀도 측면에서 높은 신뢰성을 갖는다.

(2) 회전체의 압력을 측정하기 위해 본 연구와 같이 회전체에 부착된 압력 센서를 이용하는 경우에는, 압력 센서가 원심력의 영향을 받아 추가적인 신호가 발생된다. 이는 센서 장착 방향에 크게 영향을 받는데, 압력 감지부 변형 방향과 원심력 방향이 수직이 되도록 센서를 설치하면 원심력 효과를 최소화 할 수 있다. 그리고, 잔존하는 원심력 효과는 보정 실험을 통해 보상할 수 있다.

(3) 회전축이 수평으로 설치된 경우에는 압력 센서가 중력 방향의 변화에 따라 추가적인 신호가 발생할 수 있다. 이 신호는 축 회전에 따라 압력 측정 결과의 섭동 성분을 유발하므로, 이 성분은 반드시 제거하여야 한다. 원심력 효과를 최소화하고 중력의 효과를 발생시키지 않기 위해서는 압력 감지부 변형 방향이 축방향과 일치해야 한다.

(4) 회전 송출공의 압력계수로부터 송출공 내부 압력은 재순환, 재부착, 압력 손실에 따라 변하는 것을 확인하였고, 이는 잘 알려진 비회전 송출공에서의 경향과 동일함을 보였다. 그러나 회전 송출공에서는 비대칭적인 압력 분포가 나타나는데, 입구 영역에서는 압력면, 내외측면, 흡입면 순으로 압력계수가 높게 나타나지만, 길이 방향으로 진행함에 따라 원주 방향 압력차가 해소된다.

(5) 회전 송출공의 송출계수는 회전 Ro 수에 따라 동일한 거동을 나타낸다. 압력계수도 회전 Ro 수에 따라 동일한 거동을 보이는데, 이로부터 송

출공 입구로 접근하는 유동각이 동일하면 송출공 입구에서의 유동의 박리와 재부착도 동일한 현상을 보이고, 이로 인해 송출계수도 동일한 값을 나타낼 수 있다.

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) 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.
- (5) 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.
- (6) 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*.
- (7) Ha, K.-P., 1999, "A Comprehensive Thermal Analysis on an Induction Motor with Axial Cooling Passages," Ph. D. Thesis, Seoul National University (in Korean).
- (8) Ha, K.-P., Kang, S. and Kauh, S. K., 2000, "Discharge Characteristics of Rotating Orifices with Length-to-Diameter Ratios and Inlet Corner Radii," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 24, No. 7, pp. 957~966 (in Korean)
- (9) Lakshminarayana, B., 1980, "Techniques for Aerodynamic and Turbulence Measurements in Turbomachinery Rotors," *Measurement Methods in Rotating Components of Turbomachinery* (Edited by Lakshminarayana, B.), pp. 5~29.
- (10) *User's Manual*, Telemetrie Elektronik GmbH. (<http://www.datatel-telemetry.de>)
- (11) Figliola, R. S. and Beasley, D. E., 1995, *Theory and Design for Mechanical Measurements*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (12) Coleman, H. W. and Steele, W. G., Jr., 1989, *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, John Wiley & Sons, Inc., New York.