

온풍난방기용 Gun식 가스버너의 스월유동장에 대한 5공압력프로브의 측정[§]

김 장 권*[†] · 오 석 형**

* 군산대학교 동력기계시스템공학과, ** 군산대학교 기계공학부

Measurements of Five-Hole Pressure Probe on Swirling Flow Fields of Gun-Type Gas Burner for Furnace

Jang Kweon Kim*[†] and Seok Hyung Oh**

* Dept. of Power System Engineering, Kunsan Nat'l Univ.

** School of Mechanical Engineering, Kunsan Nat'l Univ.

(Received June 27, 2014 ; Revised August 26, 2014 ; Accepted August 28, 2014)

Key Words: Calibration Map(교정지도), Five-Hole Pressure Probe(FHPP, 5공압력프로브), Gun-Type Gas Burner(GTGB, 건식가스버너), Non-Nulling Calibration Method(넢널링교정방법), Slit(슬릿), Swirl Flow(스월유동), Swirl Vane(스월베인)

초록: 이 연구는 Gun식 가스버너의 스월유동장을 연소실과 화염이 없는 상태에서 직선형 5공압력프로브의 측정을 통해 고찰하였다. 직선형 5공압력프로브에 의한 속도 및 정압성분들은 넢널링 교정방법에 의해 연산하였으며, X형 열선프로브와 전산유체역학의 해석에 의한 결과들과 비교하였다. 결과적으로 Gun식 가스버너의 중심부에서 스월유동장에 대해 5공압력프로브에 의한 속도 및 정압의 측정값들은 비교적 X형 열선프로브에 의한 경우보다는 좋은 성능을 보였으나 전산유체역학의 해석에 의한 경우보다는 다소 미흡한 결과를 보였다.

Abstract: This study investigated the swirling flow fields of a gun-type gas burner (GTGB) without a combustion chamber under cold flow conditions. Three velocity components and the static pressure were measured with a straight-type five-hole pressure probe (GHPP) using a non-nulling calibration method and compared with the results of an X-type hot-wire probe (X-probe) and computational fluid dynamics (CFD). The GHPP measured the velocity and static pressure for the swirling flow of the central region of the GTGB better than the X-probe but produced slightly worse results than the CFD.

1. 서 론

Gun식 가스버너(이하 GTGB라고 함)는 중심부에 회전유동을 일으키는 다수의 스월베인(swirl vane)이 설치된 배플판(baffle plate)이 있으며, 배플판 외주에는 유동축 방향으로 제트(jet)를 형성시키는 다수의 슬릿 slit)들로 구성되어 있다.^(1,2) 따라서 GTGB는 스월유동을 이용하는 대표적인 버너로

현재 업소용 가스난방기 등에서 널리 적용되고 있다. 그 이유는 스월유동이 버너 중심부에서 유동축방향으로 역압력기울기를 발생시켜 유동축방향의 속도성분을 급속히 감소시킴으로 역유동(reverse flow)을 수반하는 재순환영역(re-circulation flow)과 높은 난류를 형성시킨다고 잘 알려져 있기 때문이다.⁽³⁻⁷⁾ 이로 인해 화염면을 형성하는 재순환영역의 경계면에서는 Entrainment을 및 연료와 공기의 혼합을 급속도로 증대시켜 큰 확산능력을 제공하기 때문에, 결과적으로 화염의 길이를 짧게 하고, 화염을 안정화시켜 희박연소를 가능케 하는 효과가 있다고 잘 알려져 있다.^(6,7)

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 호남지회 춘계 학술대회(2014. 5. 9., 군산대) 발표논문임.

† Corresponding Author, flowkim@kunsan.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

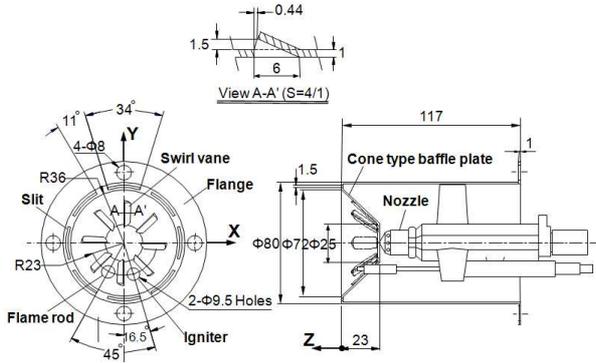


Fig. 1 Configuration of a GTGB

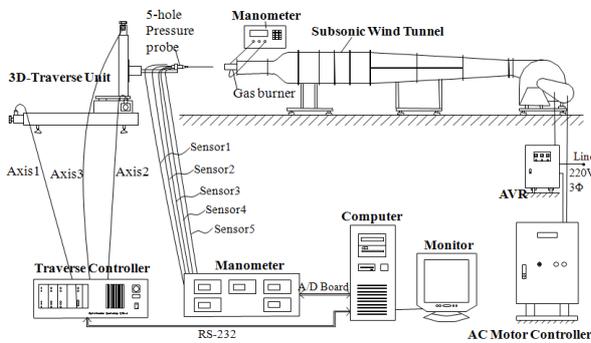


Fig. 2 Data acquisition system using a FHPP

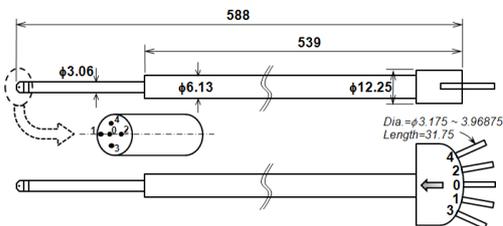


Fig. 3 Geometry of a FHPP

본 연구에서는 GTGB의 스윙유동장을 정확히 측정하고자 유동방향성을 반영한 3차원 평균속도성분뿐만 아니라 정압까지도 동시에 얻을 수 있는 직선형 5공압력프로브(이하 FHPP라고 함)⁽⁸⁻¹⁰⁾를 사용하였다. 이 FHPP는 레이저유속계, 입자영상유속계 및 열선풍속계에 비해 저가형으로 역유동이나 재순환유동 및 스윙이 동반된 유동장내에서도 널리 사용되고 있다. 따라서 이번 연구에서는 유동 확산각을 나타내는 요각(yaw angle) 및 피치각(pitch angle)들이 $\pm 80^\circ$ 까지 확대된 교정지도를 가지고 FHPP에 의한 속도측정의 신뢰성을 GTGB의 스윙유동장을 통해 확보하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 기 발표된 열선풍속계의 측정에 의한 실험결과들^(1,2)과 전산유체역학(이하 CFD라고 함)으로 수치해석을 수행한 결과⁽¹¹⁾

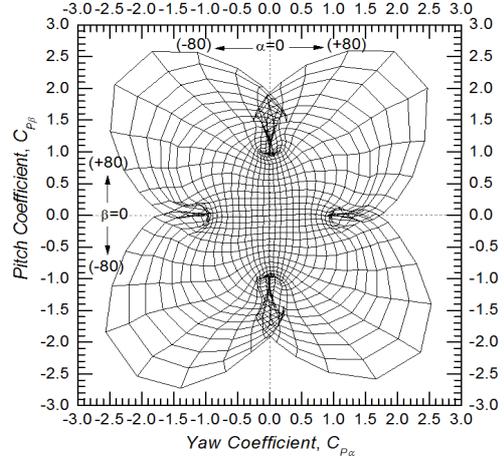


Fig. 4 Calibration map of a FHPP

와도 상호 비교하여 FHPP의 속도측정에 대한 신뢰성과 문제점을 함께 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험에 사용한 난방능력 15,000 kcal/hr급 가스난방기용 GTGB의 형상 및 제원을 나타낸 그림이다. 이 GTGB의 중심부 선단은 45° 로 경사진 콘(cone)형 배플판의 역할을 하며, 배플판 외주에는 45° 간격으로 배치된 8개의 공기분출 슬릿들로 구성되어 있다. 또 이 배플판은 중심에서부터 직경 25 mm까지는 막혀 있으며, 그 이후 직경 57.8 mm까지는 스윙베인 8개가 45° 간격으로 배치되어 있다. 이번 연구에서는 화염검지봉(flame rod)과 점화장치(igniter)를 제거하고 그 구멍들을 메운 후, 실험에 사용하였다.

Fig. 2는 GTGB의 유동장을 직선형 FHPP로 자동 측정하기 위해 사용한 데이터 획득 시스템이다.⁽⁸⁾ 여기서 아음속풍동은 인버터(inverter) 방식으로 구동되며, 5마력 원심형 송풍기와 확산부, 정류실, 수축부, 시험부로 각각 구성되어 있다. 또 3차원 자동이송장치(Dantec 41T50 & 41T75)는 RS-232C로 연결된 컴퓨터(P4, Win-XP)제어를 통해 미리 입력된 3차원 위치좌표에 따라 FHPP를 자동 이송시키며, 컴퓨터에는 FHPP와 연결된 5대의 압력계(Furness, FCO332)들로부터 압력을 얻기 위해 A/D변환카드(Keithley, KPCI-3101)가 내장되어 있다. 한편, 계측과정 및 속도데이터 연산 등의 모든 과정은 Testpoint(Keithley, V.4.5) 소프트웨어를 이용하여 만들어진 전용 계측프로그램을

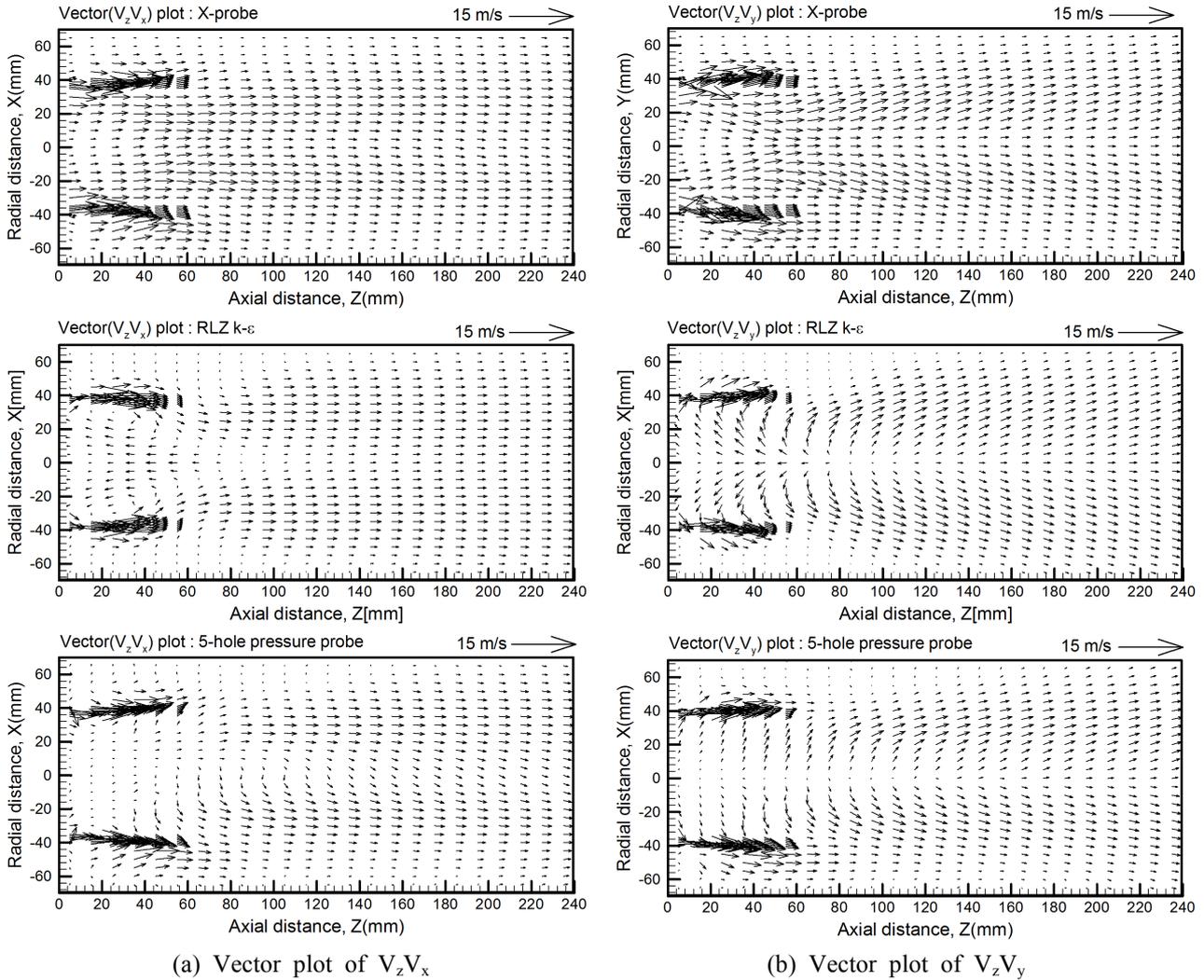


Fig. 5 Comparison of vector plots in the X-Z plane

사용하였다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

Fig. 3은 이번 연구에서 사용한 직선형 FHPP (United Sensor Corp., USNH-F-172 0346)에 대한 형상과 상세 제원을 나타낸 그림이다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 여기서 FHPP선단부에는 5개의 압력측정용 구멍들이 형성되어 있는데, 중앙부의 직경은 0.508 mm이며, 나머지 4개의 직경들은 모두 0.4064 mm이다.

2.2 실험방법

Fig. 4는 직선형 FHPP를 사용하면서도 널널링 (non-nulling)방법으로 요각(α)과 피치각(β)을 모두 $\pm 80^\circ$ 까지 확장하여 속도 및 정압성분들을 동시에 얻기 위해 사용한 교정지도이다.⁽⁹⁾ 이 연구에서는 Fig. 4의 교정지도를 $\pm 45^\circ$ 에 해당하는 중심부 교정 지도 이외에 4개의 상한들에 속하는 각 교정지도 들을 포함한 총 5개의 영역들로 분할한 후, 각각의

분할영역에 해당하는 교정지도들을 3차원커브피팅 (curve-fitting) 프로그램인 TableCurve3D⁽¹²⁾로 근사함 수를 만들어 요각과 피치각의 유효유동각을 $\pm 80^\circ$ 까지 확장시킬 수 있는 기 발표된 새로운 교정방법⁽⁹⁾을 사용하였다. 그밖에 자세한 내용은 참고문헌 (9)를 이용하였다. 한편, 아음속풍동의 속도조정은 Fig. 2와 같이 풍동시험부에 설치된 GTGB의 원통측면에 설치된 압력탭(tap)에서 실제 가스난방기에서 연소용 공기로 사용되는 공기량 450 l/min을 공급하였을 때, 얻어지는 압력 164 Pa을 기준으로 하였다.^(1,2) 또 압력계(manometer)들로부터 압력들을 차례로 읽기 위해 사용한 A/D변환기(converter)의 샘플링(sampling) 주파수는 채널(channel)당 10 kHz였으며, 샘플링 수는 채널당 32,768개였다. 한편, 주어진 일정한 풍량 조건하에서 X-Z평면 및 X-Y평면(Fig. 1 참조)으로 FHPP를 이송한 모든 정보들

은 기 발표된 실험결과들^(1,2)과 공유하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평균속도분포

Fig. 5는 GTGB의 출구로부터 형성된 유동장을 각 유동축방향(Z)의 위치에서 반경방향(X)으로 수평면인 X-Z평면내에서 각 방향 평균속도성분들로 얻어진 벡터(vector)분포들을 나타낸 그림이다. 여기서 FHPP로 측정된 결과들의 비교대상은 X-형 열선센서(이하 X-probe라고 함)를 사용하여 열선 풍속계로 측정된 결과들^(1,2)과 CFD해석결과⁽¹¹⁾들이다. 특히 CFD해석결과는 비압축성, 3차원 정상 상태에서 realizable(이하 RLZ라고 함) k-ε 난류모델로 해석한 결과이다.

축방향 평균속도성분(V_z)과 반경방향 평균속도 성분(V_x)으로 그려진 Fig. 5(a) 및 축방향 평균속도 성분(V_z)과 수직방향 평균속도 성분(V_y)으로 그려진 Fig. 5(b)의 벡터분포로부터 알 수 있는 가장 큰 차이점은 스월베인의 회전유동을 슬릿부의 빠른 제트가 에워싸아 형성되는 GTGB의 중심부 유동분포에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 즉, RLZ k-ε의 난류모델로 해석한 CFD의 벡터분포들에서는 스월베인의 회전유동으로 인해 역유동을 보이는 재순환유동영역이 축방향거리 약 Z=85 mm이내에서 잘 나타남을 알 수 있다. 반면에 X-probe의 경우에는 모두 하류방향으로 흐르는 비교적 큰 속도를 나타내, X-probe로는 역유동의 크기를 정확히 감지하는데 한계가 있음을 알 수 있다. 이것은 X-probe의 방향성이 단지 45°로 경사진 두 센서들에 미치는 풍속의 세기를 자체 연산규칙을 통해 얻어진 속도크기에 따라 양(+), 음(-)으로 판단하기 때문이다.⁽¹³⁾ 그러나 FHPP로 측정된 경우에는 역시 역유동 모습은 명확히 확인할 수 없지만 X-probe보다는 다소 나은 속도분해능을 갖는다는 것을 알 수 있다. 한편, 스월베인에 의한 회전유동의 영향이 줄어드는 X-Z평면내의 영역일수록 유동모습은 모두 유사한 크기분포를 보여주고 있다.

Fig. 6은 유동축방향 Z=55 mm에서 형성된 유동장을 X-probe와 FHPP로 측정된 그리고 CFD로 해석된 각각의 V_x 와 V_y 로 그려진 벡터모습과 평균속도크기(V)를 함께 비교한 그림이다. 여기서 평균속도크기는 $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ 로 정의하

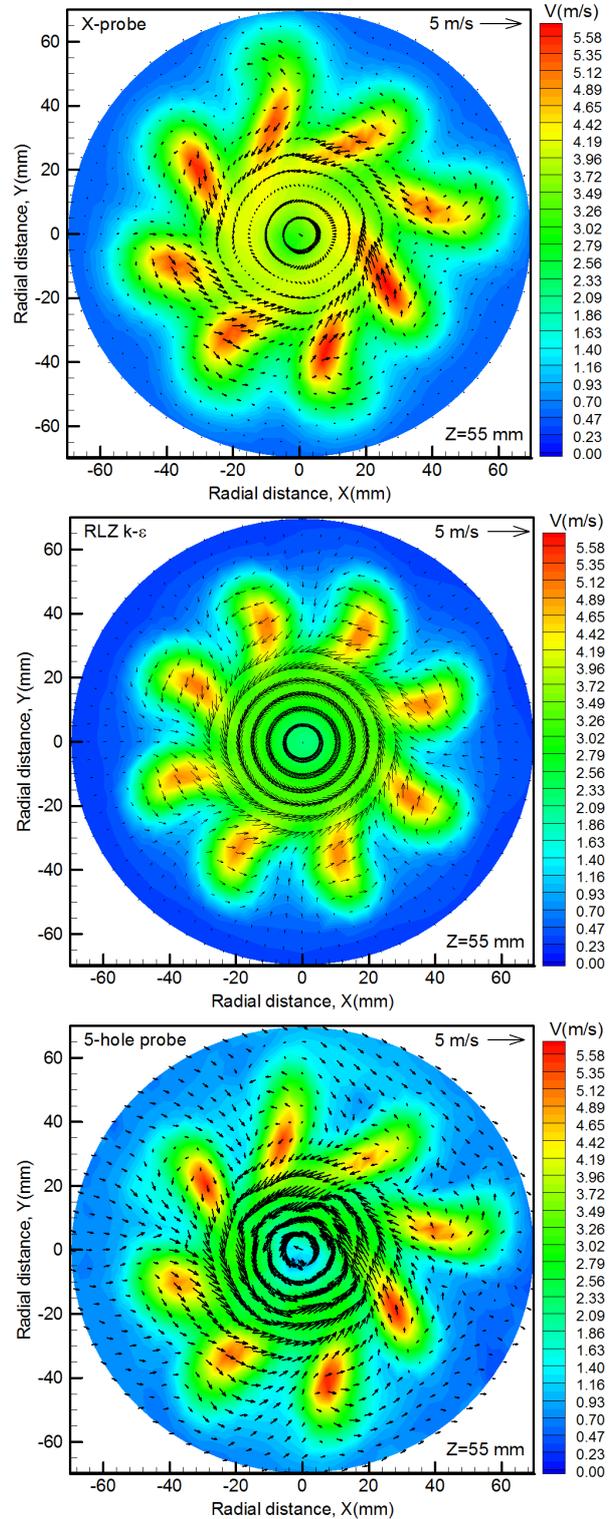


Fig. 6 Comparison of vector V_xV_y plots in the X-Y plane

였다. 회전 유동하는 벡터모습은 3가지 모두 잘 나타나 있지만, FHPP의 경우는 GTGB 중심부에서 CFD결과와 비슷한 크기를 보여주므로 X-

probe보다 회전속도의 감지능력이 더 우수함을 알 수 있다. 한편, FHPP와 X-probe의 평균속도크기는 그 분포모습이 거의 유사하지만 분포된 영역의 크기는 다소 차이를 보여주고 있다. 그러나 CFD의 경우는 두 경우와 분포모습이 다소 차이가 있어, 현재의 CFD 결과가 완벽하게 GTGB의 유동장을 보여주지 못함을 알 수 있다.

Fig. 7은 GTGB의 출구로부터 유동축방향으로 9군데의 각 위치에서 반경방향의 거리 증가에 따라 FHPP에 의해 얻어진 축방향 평균속도성분 V_z 의 분포들을 X-probe로 측정한 결과들^(1,2)과 CFD해석 결과⁽¹¹⁾를 가지고 상호 비교한 그림들이다. 여기서 나타난 FHPP에 의한 V_z 의 크기 및 분포형상은 GTGB의 슬릿부 외곽의 경우 X-probe 및 RLZ k- ϵ 해석결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 GTGB 안쪽의 경우 Z=85 mm이전에서 FHPP에 의한 V_z 는 X-probe에 의한 결과보다 작은 반면 RLZ k- ϵ 의 해석결과보다 큰 크기를 나타내고

있다. 특히 회전유동의 영향이 강한 GTGB의 중심부에서 V_z 는 음(-)의 값을 나타내 역유동을 보여주므로 약 Z=85~95 mm⁽¹⁰⁾이전까지는 재순환유동(recirculation flow)이 존재함을 잘 알 수 있다. 그러나 FHPP에 의한 V_z 는 동일 위치에서 완전한 음(-)의 크기까지는 보여주지 못해 역유동이나 재순환유동특성을 정확히 확인할 수는 없지만, 그래도 X-probe의 성능보다는 더 우수하다는 것을 알 수 있다. 또 Z=85 mm이후에서는 3가지 결과가 점차 서로 일치해가지만, 특히 FHPP에 의한 결과가 더 빨리 해석결과와 일치함을 알 수 있다.

3.2 정압분포

Fig. 8은 GTGB의 출구로부터 유동축방향으로 9군데의 각 위치에서 반경방향의 거리 증가에 따라 FHPP에 의해 얻어진 정압(P_s)의 분포를 RLZ k- ϵ 으로 해석한 결과와 상호 비교한 그림이다.

GTGB 출구에 근접한 Z=5 mm에서는 버너 슬

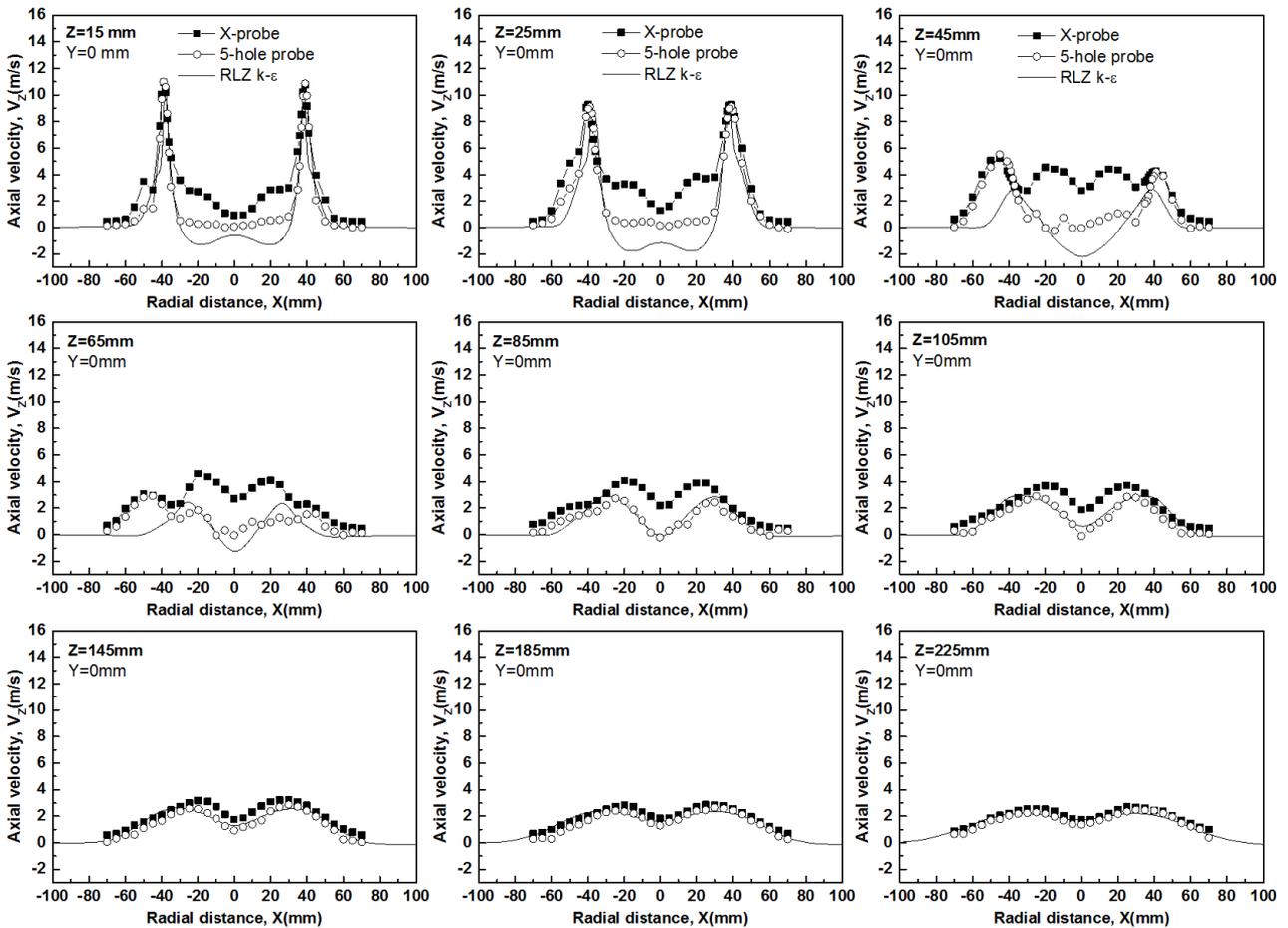


Fig. 7 Axial mean velocity component profiles along the radial distance

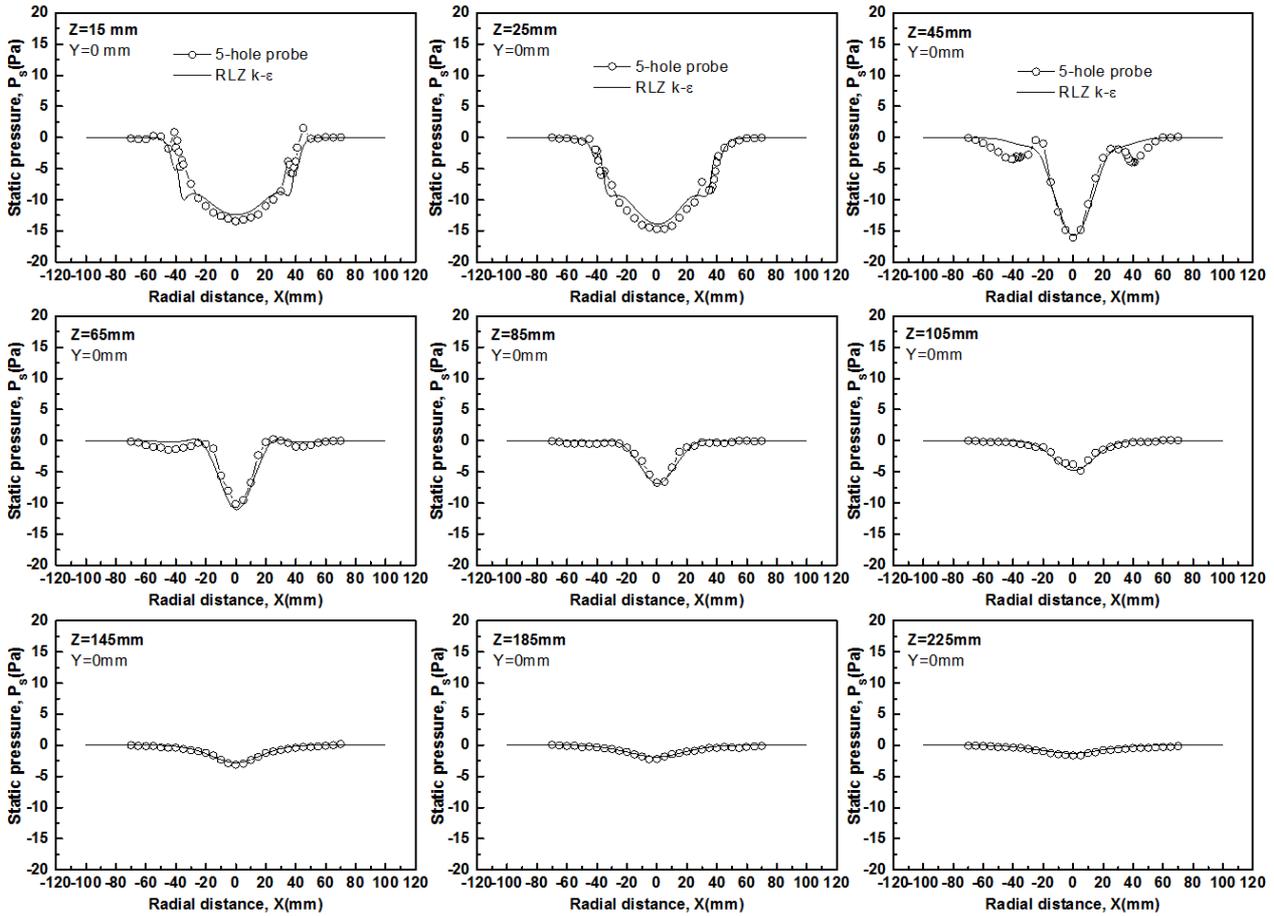


Fig. 8 Static pressure profiles along the radial distance

릿부에서 분출하는 빠른 제트로 인해 이를 FHPP로 측정 시 FHPP가 다소 흔들릴 수가 있어 계측 오차가 반영된 결과로 정압측정값이 해석결과보다 더 큰 크기를 보여주었으나,⁽¹⁰⁾ 이 같은 영향은 Z=15 mm에서도 약간은 존재하는 것으로 보인다. 또한 슬릿부의 빠른 속도가 줄어들어 상대적으로 스윙베인에 의한 회전유동의 영향이 강하게 나타나는 Z=35⁽¹⁰⁾~45 mm에서의 정압측정값은 해석결과와 다소 차이를 보이고 있다. 그러나 슬릿부의 빠른 제트와 스윙베인의 회전유동이 서로 혼합되어 하나의 유동으로 발달해가는 Z=85 mm 이후부터는 축방향 거리가 증가함에 따라 FHPP에 의한 정압분포는 대체로 해석결과와 일치해감을 알 수 있다.

4. 결 론

GTGB의 스윙유동장을 FHPP로 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 스윙베인에 의한 회전유동의 영향이 적은 GTGB의 슬릿부 외곽부에서 FHPP의 측정에 의한 축방향 평균속도성분의 분포는 X-probe 및 난류 모델 RLZ k-ε의 해석결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.
- (2) 회전유동의 영향이 강한 GTGB의 중심부에서 역유동을 예측하는 FHPP의 속도분해 성능은 CFD해석보다는 다소 떨어지지만 X-probe보다는 더 우수하다는 것을 알 수 있다.
- (3) FHPP에 의한 정압측정은 비교적 CFD해석결과와 일치하므로 X-probe의 결점을 보완할 수 있어 GTGB의 스윙유동장을 FHPP로 충분히 측정 가능하다는 점을 알 수 있다.

참고문헌
(References)

(1) Kim, J. K., 2009, "Investigation on the Turbulent Swirling Flow Field within the Combustion Chamber of a Gun-Type Gas Burner," *Trans. Korean Soc.*

- Mech. Eng. B*, Vol. 33, No. 9, pp. 666~673.
- (2) Kim, J. K., 2008, "Investigation of the Turbulence Characteristics in the Swirling Flow of a Gun-Type Gas Burner with Two Different Hot-Wire Probes," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 180~189.
- (3) Beer, J. M. and Chigier, N. A., 1972, *Combustion Aerodynamics*, John Wiley & Sons, pp. 102~146.
- (4) Lefebvre, A. H., 1983, *Gas Turbine Combustion*, Hemisphere, pp. 126~135.
- (5) Syred, N. and Beer, J. M., 1974, "Combustion in Swirling Flows; A Review," *Combustion and Flame*, Vol. 23, pp. 143~201.
- (6) Feyedelem, M. S. and Sarpkaya, T., 1998, "Free- and Near-Free-Surface Swirling Turbulent Jets," *AIAA J.*, Vol. 36, No. 3, pp. 359~364.
- (7) Gursul, I., 1996, "Effect of Nonaxisymmetric Forcing on a Swirling Jet with Vortex Breakdown," *Trans. of the ASME (J. of Fluids Eng.)*, Vol. 118, pp. 316~323.
- (8) Kim, J. K., Oh, S. H. and Jeong, K. J., 2006 "Measurement System Development for Three-Dimensional Flow Velocity Components Using Straight-Type Five-Hole Pressure Probe," *J. of the KSPSE*, Vol. 10, No. 4, pp. 56~64.
- (9) Kim, J. K. and Oh, S. H., 2014, "The Performance Assessment of a Straight-Type Five- Hole Pressure Probe Using a Zone Partition and Two-Dimensional Curve-Fitting Functions," *J. of the KSPSE*, Vol. 18, No. 1, pp. 22~31.
- (10) Kim, J. K. and Oh, S. H., 2014, "Measurements on the Swirling Flow Fields of a Gun-Type Gas Burner by Using 5-Hole Pressure Probe," *Proceedings of the KSME 2014 Spring Annual Meeting*, May 9, pp. 63~66, KSME 2014R1018.
- (11) Kim, J. K. and Oh, S. H., 2014, "Evaluation of Turbulent Models on the Swirling Flow of a Gun-Type Gas Burner According to the Mesh Size," *J. of the KSPSE*, Vol. 18, No. 3, pp. 59~65.
- (12) SYSTAT Software Inc., 2002, *TableCurve3D User's Manual*, Ver.4 for Windows.
- (13) Dantec, 2000, *Streamline Installation and User's Guide*, Dantec Measurement Technology A/S.