

# 공장환기용 선회 제트 디퓨저의 유동 특성에 관한 실험 연구

## An Experimental Study on the Flow Characteristics of a Swirl-Jet Diffuser

이 춘 식\*, 정 종 수\*, 정 시 영\*\*, 홍 기 혁\*  
C. S. Lee, J. Jurng, S.Y.Jeong, K.H.Hong,

**Key words :** Diffuser(디퓨저), Swirl Jet(선회 제트), Factory Ventilation(공장환기), Swirl(선회), Swirl Number(선회수)

### Abstract

An experimental study is performed on the flow characteristics of a swirl-jet diffuser for factory ventilation. Swirl number ranges from 0(nonswirl jet) to 0.6 when the angle of swirl vane is 60 degree.

As swirl becomes strong, the maximum velocity in the plane perpendicular to jet axis decreases fast and the uniformity of velocity becomes good, particularly in the ventilated area. The similarity in velocity profiles has been found for axial velocity from even when swirl number equals 0.6. The flow characteristics of the swirl-jet which has the swirl number of 0.6 is thought to be the best among these three swirl numbers for factory ventilation. However, the pressure drop in the diffuser increases as the swirl becomes strong. This should be considered in the design of the total ventilation system including a duct system.

### 기 호 설 명

$d, d_h$  : 디퓨저 및 허브의 직경 [mm]  
 $k$  : 속도 분포식 Eq.(2)의 상수  
 $k_1, k_2$  : 속도 분포식 Eq.(3)의 상수들  
 $r$  : 제트 중심축으로부터의 반경 방향거리 [mm]  
 $r_{1/2}$  : 1/2 속도점 반경방향 위치 [half velocity radius, mm]

$S$  : 선회수 [swirl number]  
 $u$  : 축방향 유속 [axial velocity, m/s]  
 $u_m$  : 단면상의 최대 축방향 유속 [m/s]  
 $u_o$  : 디퓨저 출구에서의 평균 유속 [m/s]  
 $x$  : 디퓨저 출구로부터의 축방향 거리 [axial distance, m]

### 회람문자

$\theta$  : 선회의 [swirl vane] 각 [degree]  
 $\Delta p$  : 디퓨저 통과 압력 손실 [pressure drop] [mmAq]

\* 한국과학기술연구원  
 \*\* 서강대학교 기계공학과

## 1. 서 론

대형 강당, 공항의 대합실, 공장의 조립 라인 등의 대형 공간에서의 공조 및 환기를 위해서는 공조가 이루어진(ait-conditioned) 신선한 공기(fresh-air)를 공급하여야 할 필요가 있다. 신선한 공기를 공조 및 환기가 필요한 공간에 공급하는데 필요한 기구가 바로 디퓨저이다. 공조 설비를 경제적으로 하기 위해서는 덕트 배관 등을 가능한한 줄일 수 있도록 적은 수의 디퓨저를 사용하여 넓은 면적의 대상 공간에 필요한 만큼의 신선한 공기를 배분하는 것이 매우 중요하다. 대상 공간의 크기 및 대상 인원이 정해지면 대략 필요한 공기 공급량이 결정되므로 디퓨저의 수에 따라 디퓨저 1개 당의 공기 유량이 결정된다.

선회 유동은 가스터빈 연소기, 산업용 버너 등 연소기에서 연료와 공기 간의 혼합을 촉진할 목적으로 매우 폭넓게 사용되어 왔으며 최근에는 엔진 실린더 등의 경우에서도 이러한 유동 특성을 이용하여 설계하는 예가 매우 많다. 선회 제트 유동은 제트 출구부에서의 축방향 운동량이 동일한 유량의 원형 제트(round jet)등에 비해 작으므로 제트 중심부에서의 최대 유속이 빨리 감소하고 제트의 폭이 넓어져서 비교적 넓은 영역에서 균일한 유동을 얻을 수 있다. 이러한 특징은 대량의 공기를 공급하여야 하는 경우 하나의 디퓨저가 담당할 수 있는 대상면적을 넓게 할 수 있다는 면에서 환기용의 디퓨저로서 매우 우수한 특징을 가지고 있다고 할 수 있다.<sup>1)</sup>

본 연구에서는 새로운 형식의 디퓨저를 설계하기 위한 기초 자료로서 사용하기 위하여 선회 제트 유동에 대한 실험을 수행하였다. 선회 제트 유동에 대한 종래의 연구들은 선회 연소기에 관련된 연구가 대부분이다.<sup>2-3)</sup> 선회 연소기의 경우에는 연구의 주목적이 제트 출구로부터 가능한한 짧은 거리에서 연료와 공기의 혼합을 향상시키려는 것이므로 거의 대부분의 연구가 연료와 공기의 혼합 과정에서 가장 중요한 부분인 제트의 출구 부근에 집중되어 왔다. 이와는 달리 공조 및 환기에 사용되는 디퓨저의 경우에는 관심의 주 대상이 제트 출구로부터 수 미터에서 최대 수십미터까지 떨어진 공간이므로 이러한 기존의 연구 결과를 그대로 이용하는 것에는

한계가 있다. 본 연구에서는 선회 제트 디퓨저의 출구로부터 충분히 떨어진 환기 대상 공간에서의 선회 제트의 유동 특성을 파악하기 위한 방법으로 유속 측정 등의 실험적 방법으로 연구를 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구의 대상으로 실험에 사용한 디퓨저는 직경 150mm의 원형으로, 내부에는 유동에 선회를 주기 위한 6개의 선회익(swirl vane)이 설치되어 있다. Fig.1은 디퓨저의 형상을 개략적으로 나타내는 그림이다. 선회익의 폭은 60-80°, 선회익각(angle of swirl vane)은 0-60°로 변경하여 실험을 수행하였다.

선회도를 나타내는 지표로는 선회수(swirl number)가 널리 사용되고 있다. 선회수는 단위시간당의 축방향 운동량(axial momentum flux)에 대한 접선방향 운동량(tangential momentum flux)의 비(ratio)로 정의된다. 본 연구에서 사용한 허브(hub)가 있는 선회 발생기(swirler)의 선회수는 다음 식으로 계산할 수 있다.<sup>1)</sup>(Fig.2 참조)

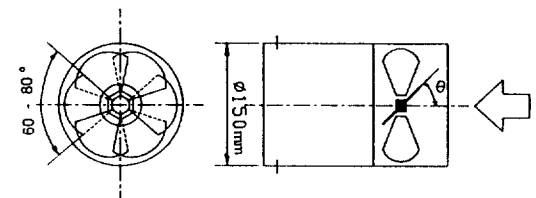


Fig.1 Schematic diagram of a swirl-jet diffuser

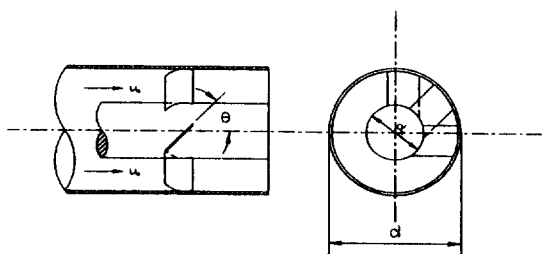


Fig.2 Schematic diagram of a swirler

$$S = \frac{1}{3} \frac{1 - (d_h/d)^3}{\{1 - (d_h/d)^2\}^{3/2}} \tan \theta \quad (1)$$

이 식에서  $d$ ,  $d_h$ 는 디퓨저와 허브의 직경,  $\theta$ 는 선회익각(angle of swirl vane)을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 선회 발생기는 허브 직경비  $d_h/d=0.25$ 이므로 선회익각에 따른 선회수는 다음의 Table 1로 주어진다.

Table 1 Swirl numbers at various angles of swirl vane( $d_h/d=0.25$ )

$\theta$	0	15	30	45	60	75	90
S	0	0.094	0.202	0.350	0.610	1.310	$\infty$

실험 장치는 송풍기, 공급 유량을 측정하기 위한 오리피스 유량계, 디퓨저에 공급되는 공기를 균일하게 하기 위한 정류 격자 등으로 구성되어 있으며 Fig.3은 실험 장치의 개략적인 구성도이다. 실험에 사용한 송풍기는 소비동력 0.2kW, 최대 유량은 500m<sup>3</sup>/hr이다. 실험시 디퓨저의 공기통과 유량의 측정은 표준 오리피스 유량계를 사용하여 수행하였다. 오리피스 유량계의 직경비(관 내경에 대한 오리피스 공 직경의 비)는 0.6으로, 오리피스를 통과하는 유량의 점정은 벨 마우스(bell mouth) 형태의 흡입구 측에서 피토 관(pitot tube)으로 측정한 유속 분포를 적분하여 주어진 수두차에서의 유량을 구하여 검정 곡선(calibration curve)를 구하여 사용하였다. 오리피스 유량계와 송풍기 흡입구 사이의 유로에 유량 조절용 댐퍼를 설치하여 유량을 조절하였다. 유속 분포의 측정은 열선 유속계(hot-wire anemometer, KANOMAX Model 24-6111)와 3 공 피토 관을 병행하여 사용하였다.

### 3. 결과 및 검토

본 연구에서는 선회 제트 디퓨저로부터 분출되는 선회 제트의 기본적인 유동 특성을 파악하고, 선회수를 서로 다르게 한 디퓨저로부터 분출되는 선회 제트 유동의 유동 특성의 변화 및 디퓨저에서의 압력 손실에 대한 영향을 검토하기 위하여 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 우선 선회 디퓨저의 선회익각을 변화시키고 선회 제트의 유속 분포에 대한 측정을

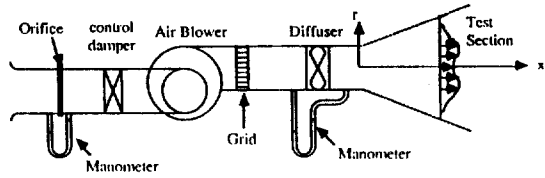


Fig.3 Experimental apparatus

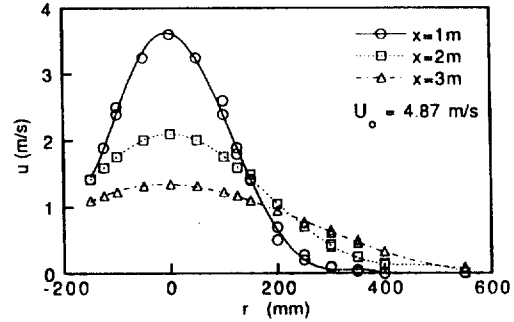


Fig.4 Radial profiles of axial velocity(nonswirl jet)

수행하여 선회수의 변화에 따른 유동 특성의 변화에 대하여 검토하였다.

디퓨저의 선회익각을 0°로 하면 선회수는 0이 되므로 디퓨저로부터 분출되는 유동은 비선회 제트의 특성을 보이게 된다. Fig.4는 이러한 비선회 제트 유동에 대해 디퓨저 출구로부터 각각 1, 2 및 3m 떨어진 위치에서의 축방향 유속  $u$ 의 반경 방향 분포를 측정한 결과를 나타내는 그림이다. 이 그림에서 각 단면에서의 유속 분포가 상사성(similarity)을 가지는 것을 관찰할 수 있는데, 이러한 상사성에 의해 각 단면에서의 축방향 유속의 반경 방향 분포는 다음 식으로 나타낸 error curve로 표시할수 있다는 것이 알려져 있다.<sup>2)</sup>

$$\frac{u}{u_m} = \exp \left[ -\frac{r^2}{r_{1/2}^2} \ln(2) \right] \quad (2)$$

이 식에서  $u_m$ 은 각 단면에서의 최대 속도를,  $r$ 은 반경 방향의 거리를 나타내며  $r_{1/2}$ 은 half velocity radius로  $u=u_m/2$ 인 위치에서의  $r$ 값을 나타낸다.

Fig.5는 중심축 상의 속도  $u_m$ 으로 무차원화한 유속의 반경 방향 분포는 나타낸 그림으로 반경 방향 좌표를  $r_{1/2}$  값으로 무차원화한 것이다. 실선

으로 나타낸 것은 식 (2)의 error curve로 측정치와 상당히 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

한편 Fig5에서 비선회 제트의 축방향 유속의 반경 방향 분포를 보면 중심축 상에서 최대 속도를 나타내고 있는데, 중심축 상의 유속  $u_m$ 을 제트의 축방향분포를 나타낸 것이 Fig.6이다. 디퓨저 출구로부터의 거리를  $x$ 라고 하면  $u_m$ 은  $x$ 값이 커짐에 따라  $1/x$ 에 비례하여 작아지는 것을 나타내고 있으며 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{u_m}{u_o} = k \frac{d}{x} \quad (3)$$

그림에서 점선으로 나타낸 선은 비례상수  $k$ 의 값이 6.2인 경우를 나타내고 있는데 비교적 실험치와 잘 일치하고 있다. Kerr and Fraser<sup>2)</sup>는 많은 실험을 수행한 결과 6.2-6.7의 비례상수값을 제시하고 있으며 본 연구에서의 실험 결과는 이 범위와 일치하는 것을 알 수 있다.

선회 제트 디퓨저의 선회각을 변화시키면 디퓨저로부터 분출되는 제트의 선회수가 변화한다.

Fig.7(a)-(c)는 선회각을 변화시킨 경우의 선회 제트의 유속 분포의 측정 결과를 나타낸 그림이다. (a)는 선회각이 30°인 경우의 제트의 축방향 유속 분포의 실험 결과로 이 경우는 선회수가 0.2 정도로 선회가 비교적 크지 않으므로 비선회 제트 유동의 결과인 Fig.4의 경우와 비교하여 유속 분포 형상 자체에는 큰 변화가 없다. 그러나 중심축 상에서 나타나는 한 평면에서의 최대 속도는 제트 출구로부터 동일한 거리에서 약 1/2 정도로 빨리

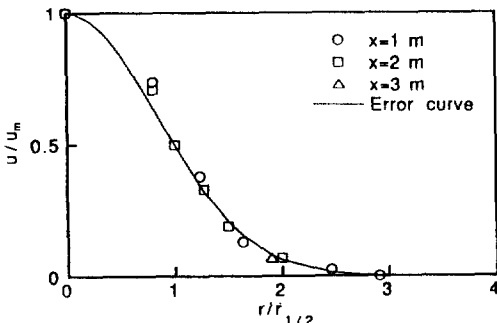


Fig.5 Nondimensionalized radial profiles of axial velocity compared with the error curve

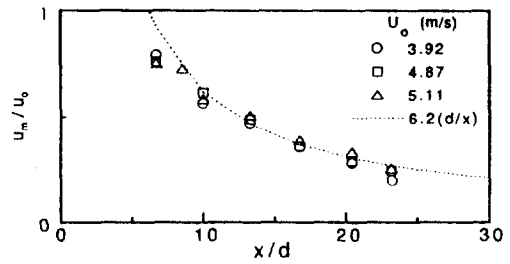
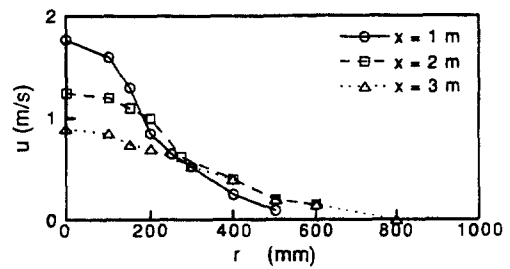
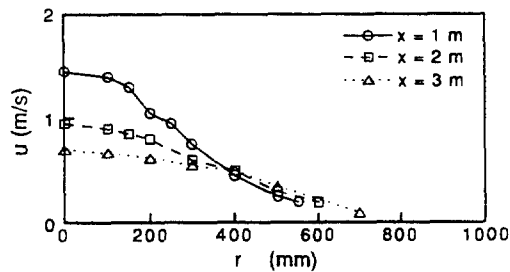


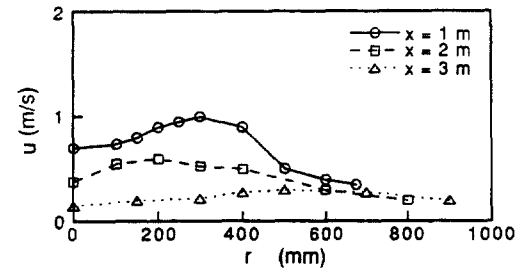
Fig.6 Axial velocity on the jet axis(nonswirl jet)



(a) S=0.202(30°)



(b) S=0.350(45°)



(c) S=0.610(60°)

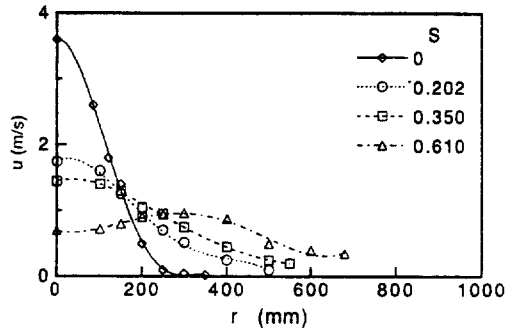
Fig.7 Radial profiles of axial velocity with different swirl number, S=0.202, 0.350 and 0.61

감소하는 것을 관찰할 수 있다.

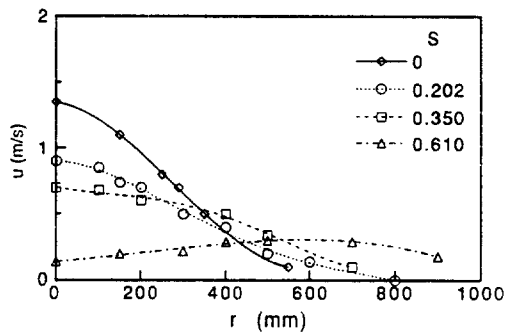
한편 Fig.7(c)는 선회수가 0.6 정도로 상당히 큰 선회각각 60°인 경우의 유속의 반경 방향 분포이다. 이 경우의 유속 분포는 비선회 제트 유동의 경우와는 매우 다른 것을 관찰할 수 있다. 본 논문에는 측정 결과를 나타내지 않았으나 디퓨저의 출구 근처에서 유속을 측정해 보면 재순환 영역이 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 디퓨저 출구로부터 상당히 떨어진 거리에서도 이 영향이 상당히 남아 있어서,  $x=1\text{m}$  및  $2\text{m}$ 에서의 유속의 반경 방향 분포가 소위 말안장 형태가 되어 중심축 부근에서 약간 작은 값을 나타내는 점이 특징이다. 이 그림에서 보면 디퓨저 출구로부터 3m 떨어진 평면에서의 유속 분포가 전체적으로 0.2-0.3m/s 정도의 균일한 유속 분포를 나타내고 있는데, 이렇게 0.2m/s 정도의 균일한 유속 분포가 공조 및 환기용의 디퓨저로서의 특성으로서 가장 적합하다고 할 수 있다. Fig.7(b)는 선회각각 45°인 경우의 유속 분포로, 30° 및 60°인 경우의 중간적인 형태를 나타내고 있다.

선회수의 차이에 따라 동일한 평면에서의 유속 분포를 서로 비교해 보면, 선회각의 변경, 즉 선회수의 차이에 따른 유동 특성의 변화를 좀더 명확하게 관찰할 수 있다.

Fig.8(a) 및 (b)는 여러가지 선회수에 대해  $x=1\text{m}$  및 3m에서의 유속 분포들을 비교한 그림이다. Fig.8(a)는  $x=1\text{m}$ 에서의 유속 분포를 나타내고 있는데 선회수가 크지 않은 선회각각 45° 이하의 약선회 제트 유동의 유속 분포와 비교하면 강선회가 걸려 있는 선회각각 60°의 유속 분포는 중심축 부근부터 주변부까지 거의 차이가 없이 유사한 값을 가지는 것을 관찰할 수 있다. 앞서 지적한 대로 실제 환기에 적합한 디퓨저의 특성은 디퓨저 출구로부터 충분히 떨어져 있는 환기 대상 공간에서 0.2-0.3m/s 정도의 균일한 유속 분포를 가지는 것이다.  $x=3\text{m}$ 에서의 유속 분포들을 비교한 Fig.8(b)를 보면 강선회가 걸린 선회각각 60°인 디퓨저로부터의 유동이 이러한 특성에 가까운 형태이므로, 실험의 대상이 된 선회 디퓨저 중에서는 강선회가 걸린 선회각각 60°인 디퓨저가 특성이 가장 우수하다고 할 수 있다. 선회수가 더 큰 경우 더욱 우수한 환기 특성을 나타내는가에 대해서는 지속적인 연구를 수행할



(a)  $x=1\text{m}$



(b)  $x=3\text{m}$

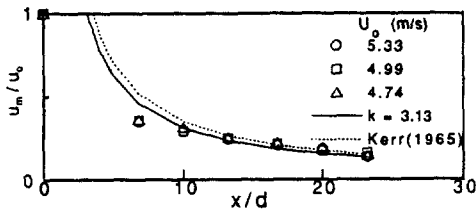
Fig.8 Radial profiles of axial velocity with various swirl number,  $S=0, 0.202, 0.350$  and  $0.61$

예정이다.

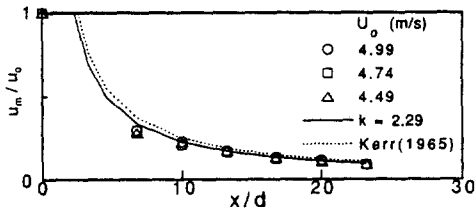
Fig.9는 선회수가 서로 다른 선회 유동에 대하여 출구로부터의 거리에 따라 제트 중심축 상에서의 유속 변화를 나타낸 그림이다. 이 그림에서  $x$ 축은 디퓨저 직경으로 무차원화시킨 출구로부터의 거리를 나타내며,  $y$ 축은 디퓨저 출구에서의 평균 유속으로 무차원화한 중심축 상의 유속을 나타내고 있다. 이 그림에서 선회수가 커짐에 따라 제트의

Table 2 Experimental correlation constant of swirl jets

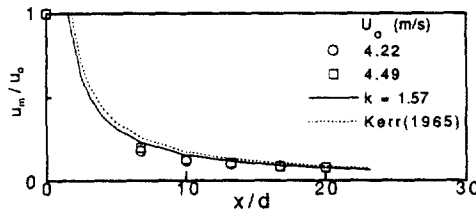
$\theta$	0	30	45
$S$	0.202	0.350	0.610
Present study	3.13	2.29	1.57
Kerr's result(1)	3.52	2.53	1.77



(a)  $S=0.202(30^\circ)$



(b)  $S=0.350(45^\circ)$



(c)  $S=0.610(60^\circ)$

Fig.9 Axial profiles of axial velocity with different swirl number,  $S=0.202, 0.350$  and  $0.61$

유속이 더욱 빨리 감소하는 것을 알 수 있다. 한편, 실선으로 나타낸 것은 식 (2)를 근거로 최소 자승법 (least square method)으로 실험 상수  $k$ 를 구하고 이것을, 점선으로 나타낸 Kerr and Fraser<sup>2)</sup>의 연구 결과와 비교한 것이다.

선회 제트의  $x$ 단면에서의 최대 속도  $u_m$ 은 선회 수  $S$ 의 함수로 나타낼 수 있으며, 식 (2)의 실험 상수  $k$ 를 변형하여 다음 식과 같은 형태가 된다.<sup>2)</sup>

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{k_1}{1+k_2S} \frac{d}{x} \quad (4)$$

이 식에서  $k_1, k_2$ 는 선회수에는 무관한 실험 상수이며, 비선회 제트에서는  $k=k_1$ 가 된다. 따라서 본 연구에서는 선회수가 서로 다른 선회 유동에 대하여 출구로부터의 거리에 따른 유속의 변화를 나타낸 Fig.9의 측정 결과를 식 (3)을 근거로 하여 정리하였으며, Fig.10은 결과를 한 그림에 나타낸 그림으로 여러 종류의 선회수( $S=0.202, 0.351$  및  $0.61$ )와 출구로부터의 거리가 각각 다른 위치에서의 측정 결과를 무차원화하여 나타낸 결과이다. 이 그림에서 실험 결과의 상관 관계가 매우 높다는 것을 알 수 있으며, 실선으로 나타낸 것은 식 (3)을 근거로 실험 결과로부터 최소 자승법을 적용하여 얻은 곡선으로 실험 상수는 각각  $k_1=6.2$  및  $k_2=4.8$ 이다. 점선은 Kerr and Fraser<sup>2)</sup>의 실험 결과로 비교를 위하여 함께 나타냈는데 본 연구의 결과와

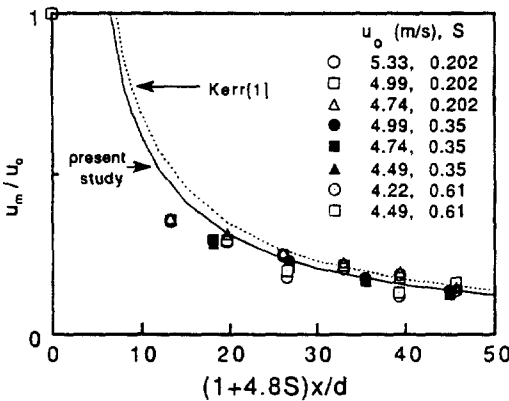


Fig.10 Axial profile of centerline velocity of swirler jets ( $S=0.202, 0.35$  and  $0.61$ )

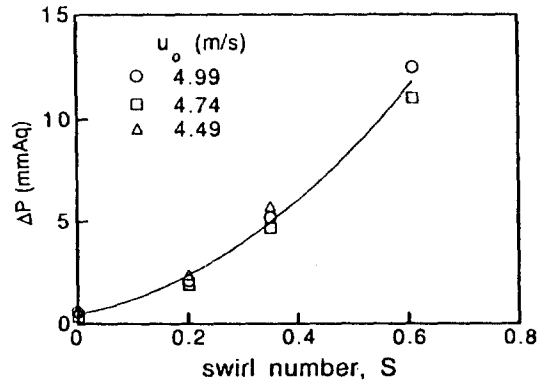


Fig.11 Pressure drop of the swirler with various swirl numbers

꼭선의 형태 자체에는 큰 차이가 없으며 전체적으로 약간 평행이동된 형태라는 것을 알 수 있다.

한편 본 연구에서는 선회수의 변경에 따른 디퓨저의 압력 손실에 대한 측정을 수행하였다. 선회 디퓨저의 경우 선회수의 증가에 따라 선회발생기 (swirler) 부분에서의 압력 손실이 증가하고, 이에 따라 전체 디퓨저의 압력 손실이 커진다는 것이 보고되어 있다. 디퓨저의 통과 압력 손실은 전체 환기 시스템의 송풍기 및 덕트 시스템의 설계 시에 중요한 요소이므로 디퓨저의 설계 및 개발을 위해서는 디퓨저의 압력 손실 특성에 대한 연구가 필요하다. 대략적으로는 선회발생기 통과 시의 압력 손실은 선회수  $S$ 의 제곱에 비례하여 증가하는 것이 알려져 있으며, Fig.11로 나타낸 본 연구에서의 측정 결과도 이러한 경향을 잘 나타내고 있다. 따라서 선회 제트 디퓨저의 경우 유동의 분배 측면에서는 매우 우수한 특성을가지고 있으나 디퓨저의 압력 손실이 증가한다는 면에서 불리한 점이 있으므로 실제 설계에서는 이러한 점 등을 고려하여야 할 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 새로운 형식의 디퓨저를 설계하기 위한 기초 자료로서 선회 제트 디퓨저의 출구로부터 충분히 떨어진 환기 대상 공간에서의 선회 제트 유동의 특성을 파악하기 위해 실험적 방법으로 연구를 수행하였다. 우선 선회각이 변화할 때 선회수의 차이에 따른 제트의 유속 분포를 측정하여, 선회 제트의 축방향 유속  $u$ 의 각 단면에서의 반경 방향 분포가 상사성(similarity)을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 선회수가 비교적 크지 않으면 비선회 제트 유동의 유속 분포와 형태 자체에는 큰 변화가 없으나 동일한 평면에서의 최대 유속은 빨리 감소한다. 선회각을  $60^\circ$ 로 하면 선회수는 약 0.6으로 강선회 제트의 유동 특성을 나타내며

실제 환기시 가장 중요한 디퓨저 출구로부터 3m 정도 충분히 떨어져 있는 위치에서의 유속 분포가 비교적 저속으로 0.2-0.3m/s 정도의 균일한 유속 분포가 되므로 강선회가 걸린 디퓨저가 환기용 디퓨저로서의 특성이 우수하다고 할 수 있다. 그러나 선회수가 이보다 더 큰 경우 더욱 우수한 환기 특성을 나타내는가에 대해서는 계속적인 연구를 수행할 예정이다. 또한 본 연구 결과 선회 발생기 통과 시의 압력 손실이 선회수  $S$ 의 제곱에 비례하여 증가하는 현상이 관찰되었다. 그러므로 강선회를 사용하는 경우 디퓨저 통과 시의 압력 손실이 증가한다는 면에서 불리하므로 실제 설계에서는 이러한 점까지를 고려하여야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술처에서 시행한 특정연구개발 사업의 결과로 이에 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표하는 바이다.

#### 참 고 문 헌

1. Ricou, F.P. and Spalding, D.B., 1961, "Measurement of entrainment by axisymmetrical turbulent jets", *Journal of Fluid Mechanics*, V. 11, pp. 21-28.
2. Kerr, N.M. and Fraser, D., 1965, "Swirl, part I : effect on axisymmetric turbulent jet", *Journal of the Institute of Fuel*, V. 38, pp. 519-526.
3. Kerr, N.M., 1965, "Swirl, part II : effect on flame performance and the modellig of swirling flames", *Journal of the Institute of Fuel*, V. 38, pp. 527-538.
4. Rajaratnam, N., 1976, "Turbulent jets", Elsevier Scientific Pub. Co.
5. 이춘식, 정종수, 홍기혁 등, 1990, "특수 공장에 대한 고효율 냉난방 및 환기시스템의 개발", KIST 연구보고서, M385-3961-2, 과학기술처.