

## 에어젯트 직기에서 가속관 직경변화에 따른 주노즐의 유동특성

### Flow Characteristics of the Main Nozzle with different Acceleration Tube and Diameter in an Air-Jet Loom

정석윤\*, 김경훈\*  
S. Y. Jeong, K. H. Kim

#### Abstract

The Air-jet loom represents a major step in the development of shutterless weaving due to its ability to weave a wide range of yarns at high speeds. The Air-jet weaving involves, inserting a pre-measured length of yarn through the wrap, is sheds by means of compressed air. The analysis of air flow characteristic of the main nozzle and acceleration tube is required for the loom performance. In this paper We examined the effect of the main nozzle with different acceleration tubes as well as diameters. And also, we compared the performance of straight type tube with laval type tube and of according to be suction hole on the acceleration tube, respectively.

Key Words : Nozzle, Air-Jet Loom, Air-jet weaving, Acceleration Tube, Shutterless weaving

#### 1. 서론

높은 생산성과 광범위한 제직성, 우수한 직물 품질, 그리고 편리한 조작성과 대기중의 공기를 사용함으로써 공해가 없으며 자동화가 가장 많이 된 장점으로 고압의 공기를 이용하는 에어젯트 직기에 대한 연구가 근래에 들어 많이 진행되고 있다. 그러나 연구가 거듭됨과 동시에 많은 문제점들이 발생되고 있으며, 이 중에서도 특히 검토 되어야 할 사항은 고압공기의 과다소모로 인한 소음 및 진동과 경제성의 저하 등의 원인이 되는 주노즐의 설계에 있다. 에어젯트 직기에서의 가장 큰 문제점은 위사물 어떻게 효율적으로 멀리까지 또한 확실하게 비추시킬 것인가 하는 것이다.<sup>(1)</sup> 이를 위해서는 주노즐에서의 유동특성을 정확하게 파악해야 한다.<sup>(2)</sup> 이 문제에 대해서 많은 공학자들이 연

구한 실험결과들이 많이 알려져 있으나<sup>(3)</sup>, 정밀한 기자재의 부족과 현 시대에는 맞지 않는 데이터들이 많아 새로운 연구가 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 우리가 과거에서부터 연구되어진 결과들과<sup>(4)-(7)</sup> 가속관의 내경 변화, Straight tube type pipe 와 Laval tube type pipe의 비교 검토, 또한 가속관 출구에서의 흡입공 설치유무, 가속관 출구의 유동분포 등을 검토·실측하여 보다 나은 해석으로서 최적의 에어젯트직기 노즐을 설계함이 목적이다.

#### 2. 실험

##### 2.1 실험장치

##### 2.1.1 분사 공기압력 조절장치

압축공기는 그림 1과 같이 공기원인 콤프레서로부터 에어휠타, 공기탱크, 압력조절기, 압

\* Dept. of mechanical Eng, Kyung-Hee Univ

벽계, 면적형 유량계를 거쳐 주노즐로 유도된다. 솔레노이드밸브를 설치하여 유동이 적당한 시간간격으로 간헐류가 아니고 정상 분사류가 되도록 하였다.

2.1.2 노즐과 니들 및 가속관

그림 2에서와 같이 주노즐은 노즐본체, 니들, 가속관 등의 크게 세 부분으로 구성되어 있으며 그림 2에서 (a)는 주노즐의 니들 부분, (b)는 노즐본체와 가속관, (c)는 주노즐, (d)는 가속관에서 공기압력을 측정하기 위해 뚫은 구멍의 확대도를 보인다.

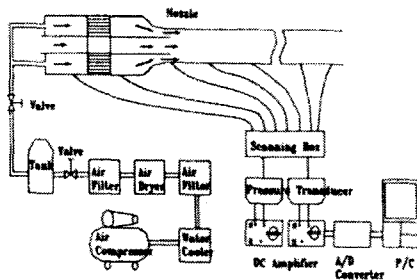


Fig 1. Schematic outline of experimental apparatus

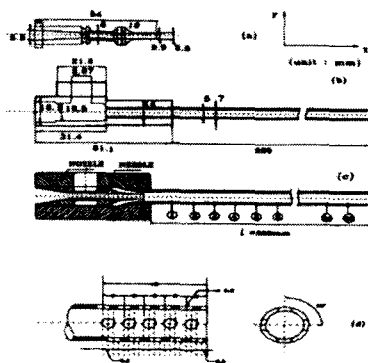


Fig 2. Configuration and dimension of main nozzle

니들은 그 중심부에 워사 봉로를 가지며, 그 선단부는 가늘게 테이퍼 상태로 가공하여 노즐

본체에 삽입시켰다. 노즐 본체의 공기 삽입구 (Fig. 2(c)의 ㉑)로부터 들어온 압축공기는 제 1공기 집합부 ㉒로부터 니들의 외주를 따라 유동하며, 니들 외주표면에 방사상으로 배치된 정류자의 사이를 통과한 후, 제 2공기 집합부 ㉓를 경유해서 테이퍼 주위로 진행되어 나간다. 테이퍼 주위 봉로는 니들의 선단부로 진행함에 따라 봉로 단면적이 좁아진다.

그 후 공기의 유동은 가속관내로 이어지기 때문에 봉로가 급격하게 확대된다. 가속관내의 유동은 관의 직경이 일정하기 때문에 Fanno 유동이 되며, 최종적으로 가속관 출구를 거쳐 대기 중으로 방출된다.

그림 2에 나타난 주노즐 각부의 치수는 니들 선단부 외경  $d_0=3.5\text{mm}$ , 내경  $d_1=2.9\text{mm}$ , 가속관 내경  $D=4.0\text{mm}$ , 가속관 길이  $L=270\text{mm}$ 이며 또한 가속관의 내경을 변화시키기 위하여 (즉  $D=3.0\text{mm}$  로 하기 위하여) 별도의 니들 선단부가 설계 제작되었다.

2.2 실험방법

그림 2(c)에 나타난 주노즐내의 유동을 해석하기 위하여 주노즐의 제 1공기 집합부, 제 2공기 집합부 그리고 니들선단에 각각 직경 0.8mm의 정압측정공을 하나씩 설치한다. 또한 그림 2(c)에 나타난 주노즐 본체에 같이 붙어 있는 가속관에는 벽면정압 측정을 위하여  $\phi$  0.8mm의 정압 측정공이 설정되어 있다.

즉, 니들 선단을 원점으로 해서 그림 2(c)에서 볼 수 있듯이 노즐바디 제 1, 제 2공기 집합부에서  $x=-21\text{mm}$ 와  $-13\text{mm}$ 의 위치, 또한 가속관 위  $x=15\text{mm}$ 의 위치 (1)로부터 10mm간격으로 (2)(3)⋯(24)합계 24개소이다. 압력 측정시에는 소정의 측정공 이외의 구멍은 막아 놓고 측정하였다.

3. 노즐관내의 영역에 따른 유동분류

주노즐은 에어제트 직기에 있어서 처음 실용 선택하여 워사를 경사내로 투입시키는 중요한

역할을 한다. 주노즐의 형태는 노즐 본체의 공기 삽입구(제 1공기 집합부), 니들의 테이퍼 유로부(제 2공기 집합부), 니들 끝단에서의 최소 단면적부에서 가속관으로 이어진다.

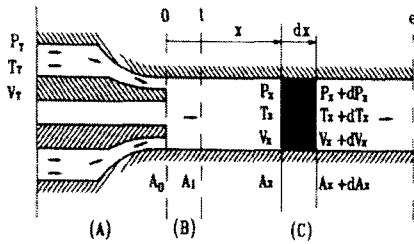


Fig 3. Classification of flow in main nozzle

메인 노즐의 유동을 해석하는 데 있어서 그 부분을 그림 3과 같이 크게 세 부분으로 나누어 생각할 수 있다. 그 첫번째인 A영역은 노즐 바다내로부터 니들의 선단부까지의 노즐 외벽과 니들에 둘러 쌓인 환상의 테이퍼 유로부인 축소노즐유동이고, B영역은 니들의 선단에서 환상류가 급격하게 확산한 후 니들의 위사봉로부터의 흡인류와 혼합되어 균일한 유동이 되는 노즐 가속관 입구부까지의 영역으로 노즐의 단면이 급격하게 확대되는 급확대관 유동이다. 그리고 마지막으로 균일하게 혼합된 가속관 입구로부터 출구까지의 영역으로서 관벽에서의 마찰이 발생하는 단면적이 일정한 관내 단열 유동으로 Fanno유동부분이다.

### 3.1 영역 A의 유동 - 축소노즐내의 유동

축소노즐(Converging nozzle)은 유동의 방향에 따라 단면적이 서서히 감소하여 출구측에서 단면적 최소부(Slot부)가 되는 노즐을 말한다. 공기 탱크의 조건을 정체조건으로 하고 노즐의 공급압력  $P_T$ 을 변화시키에 따라 축소노즐의 출구단, 즉 니들선단에서 유속이 음속에 달하는 데 이 때의 분류의 압력을 임계압력  $P^*$ 라 하면 축소 노즐의 유동은 크게 세 가지로 나누어서 해석할 수 있다.

공급압력  $P_T$ 가 완만하게 상승하면 목 부위 압력은 목 부위에서 음속으로 되게 할 임계치  $P^*$ 보다 더 높다. 노즐 내에서의 유동은 전체에 걸쳐 아음속이 되고, 질량유량은 아음속 등엔트로피유동으로 예측되며 임계치보다는 더 작다. 만일 공급압력  $P_T$ 가 임계압력  $P^*$ 와 정확히 같다면 목 부위에서는 음속이 되고 노즐 출구에서의 유동도 음속이 된다. 이 때 질량유량은 최대치에 이른다. 목 부위의 상류유동은 아음속유동으로 국소면적비에 근거한 등엔트로피유동으로 해석한다. 마지막으로 만일 공급압력이 임계압력  $P^*$ 보다 높다면 노즐은 최대 목 부위 질량유량에서 질식(Choke)되기 때문에 더 이상 반응할 수 없다. 목 부위의 압력은  $P^*$ 로서 음속으로 남아 있으며 노즐압력의 분포는 임계압력과 동일한 경우에서와 같은 분포를 나타낸다. 출구의 분류가 초음속이므로 노즐 내에서의 질식된 유동조건에 영향을 미칠 수 있는 어떠한 변화도 상류로 보낼 수 없게 된다.

따라서 축소노즐유동에서는 그림 3에서 단면 T의 압력  $P_T$ 와 단면 0의 압력  $P_0$ 간의 비율에 의해 단면 0의 유동이 달라진다. 그러므로 각 조건에 따른 단면 0의 유동의 제약을 구할 수 있다.

단면 0의 유동은 아음속 또는  $M_0=1$ 의 임계상태가 된다. 아음속인 경우에는  $P_0=P_1$ 으로 놓는다. 따라서 에너지식은 다음과 같다.

$$h_0 + \frac{V_0^2}{2} = h_T \tag{3.1.1}$$

여기서 단면 0의 유속  $V_0$ 는 정체점의 압력  $P_T$ , 온도  $T_T$  및 가속관 입구의 압력  $P_1(=P_0)$ 로부터 구할 수 있다.

$$\frac{P_T}{P_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M_0^2\right)^{k/(k-1)} \tag{3.1.2}$$

윗 식으로부터 마하수  $M_0$ 를 구할 수 있고, 다음의 식으로부터 단면 0의 유동의 제약을 구한다.

$$T_0 = T_T / (1 + \frac{k-1}{2} M_0^2) \quad (3.1.3)$$

$$\rho_0 = \rho_T / (1 + \frac{k-1}{2} M_0^2)^{1/(k-1)} \quad (3.1.4)$$

$$C_0 = \sqrt{kRT_0} \quad (3.1.5)$$

단면 0의 유동이 임계상태인 경우는 단면 0의 유동의 제량은  $M_0=1$ 로 놓고 뒷식으로부터 구한다.

### 3.2 영역 B의 유동 - 급확대관 유동

니들 선단출 나온 분류는 가속관 입구부에서 급확대관 유로가 되어 유동은 급격하게 확대된다. 본 실험의 노즐에서는 니들 선단 최소단면적부(Slot부) 외경과 가속관 내경과의 비, 즉 확대관비가 비교적 작기 때문에 니들 Slot부가 아음속영역에서는 그림 3에 표시한 Slot부 단면 0의 압력  $P_0$ 를 가속관 입구의 균일한 유동부 단면 1의 압력의 실측치  $P_1$ 와 같다고 가정하고, 또한 음속영역에서는  $P_0$ 가 임계압력이 된것으로서 유동의 제량을 산출한다.

단면 0과 단면 1 사이의 검사체적에서 기본 방정식은 다음과 같다.

$$\rho_0 V_0 A_0 = \rho_1 V_1 A_1 = \dot{m} \quad (3.2.1)$$

$$\int_0^1 \frac{dP}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{V_0^2}{2} \quad (3.2.2)$$

$$h_0 + \frac{V_0^2}{2} = h_1 + \frac{V_1^2}{2} \quad \text{or}$$

$$\frac{C_0^2}{k-1} + \frac{V_0^2}{2} = \frac{C_1^2}{k-1} + \frac{V_1^2}{2} \quad (3.2.3)$$

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{A_0 M_0}{A_1 M_1} \sqrt{\frac{2+(k-1)M_0^2}{2+(k-1)M_1^2}} \quad (3.2.4)$$

뒷 식에 단면 0와 단면 1의 단면적  $A_0, A_1$ , 전항에서 얻어진 단면 0의 유동의 제량  $M_0, P_0$ 를 그리고 단면 1의 벽면 정압치  $P_1$ 를 대입시키면 단면 1의 마하수  $M_1$ 를 구한다. 마하수  $M_1$ 을 아래의 식에 대입하여 단면 1의 유동의 제량을 구할 수 있다.

$$T_1 = T_0 \cdot \frac{(1 + \frac{k-1}{2} M_0^2)}{(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2)} \quad (3.2.5)$$

$$V_1 = \sqrt{kRT_1} \quad (3.2.6)$$

$$\rho_1 = \frac{P_1}{RT_1} \quad (3.2.7)$$

### 3.3 영역 C의 유동-Fanno유동

가속관내에서의 유동의 특징은 단면적이 일정한 가속관통로에 유체가 외부와의 열전달이 없고 마찰유동을 하는 Fanno유동으로 해석한다. 노즐내의 유동은 등엔트로피유동으로 가정하고 일정단면유로에서 Fanno유동이 이루어질 때 유동거리  $X$ 에 따르는 압력변화는 일정한 배압에 대해서는 노즐출구의 압력에 따라 결정된다.

노즐출구의 압력이 어느 한계 즉 임계압력까지 높아지면 노즐과 유로에서 다 같이 압력이 감소하고, 노즐 출구압력이 임계압력이 되면 가속관 출구에서 마하수가 1이 된다. 노즐출구의 압력을 이보다 더 높이면 출구에서 이미 음속에 도달하였으므로 노즐과 덕트내의 유동조건을 변화시키지 않고서는 질량유량을 증가시키지 못한다. 즉 유동은 질식된다. 이러한 마하수의 증가는 관내 마찰에 의한 유동방향으로 벽면경계층의 발달로 인하여 유로내의 유효 단면적이 감소하기 때문이다.

Fanno유동을 지배하는 기본방정식은 다음과 같다.

$$\rho dV + Vd\rho = 0 \quad (3.3.1)$$

$$-\frac{dF_f}{A} - dP = \rho V dV \quad \text{or}$$

$$dP + \rho V dV = -\left(\frac{f dx}{D_H}\right) \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3.3.2)$$

$$dh + d\left(\frac{V^2}{2}\right) = 0 \quad (3.3.3)$$

두 단면 사이에 작용하는 마찰의 효과를 마하수의 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{f}{D_H} dx = \frac{2}{kM^2} \frac{1-M^2}{1+\frac{k-1}{2}M^2} \frac{dM}{M} \quad (3.3.4)$$

유로 출구단에서 유동조건이 음속유동이 되는, 즉 질식유동이 되는 유로를 가정한 출구단 (M=1이 되는 단면)을 기준으로 하여 마하수가 M인 단면까지의 거리를 L\*라 가정하면 뒷 식 (3.3.4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{fL^*}{D_H} = \frac{1-M^2}{kM^2} + \frac{k+1}{2k} \ln\left[\frac{(k+1)M^2}{2+(k-1)M^2}\right] \quad (3.3.5)$$

기준조건으로서 임계상태를 택하고 임계조건에서의 성분량을 각각 P\*, ρ\*, T\*로 표시하면 임의의 단면에서의 유동조건은 다음과 같이 마하수의 함수로 표시할 수 있다.

$$\frac{T}{T^*} = \frac{k+1}{2+(k-1)M^2} \quad (3.3.6)$$

$$\frac{P}{P^*} = \frac{1}{M} \left[ \frac{k+1}{2+(k-1)M^2} \right]^{1/2} \quad (3.3.7)$$

$$\frac{\rho}{\rho^*} = \frac{1}{M} \left[ \frac{2+(k-1)M^2}{k+1} \right]^{1/2} \quad (3.3.8)$$

뒷 식에서 임의의 단면 x에서의 마하수를 구

할 수 있다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 가속관 내경 변화에 따른 유동 분석

##### 4.1.1 직경 4mm에서의 유동 분석

가속관의 내경 4mm인 경우에서의 유동은 그림 4에서 알 수 있듯이 Fanno유동이 안정된 Pr=5kg/cm<sup>2</sup>의 경우에 있어서 임계거리 L\*=195.67mm을 얻을 수 있었다. 그리고 가속관내의 Fanno유동 영역에서는 그림 5와 같이 마하수 M이 서서히 증가함을 알 수 있다. 결과 가속관 출구에서 마하수 M은 최대가 되고, 임계거리 지점에서 Choke가 일어남을 알 수 있다.

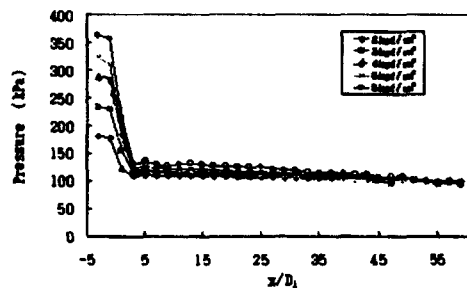


Fig. 4. Distribution of static pressure on wall surface along x-axis (D<sub>1</sub>=4mm)

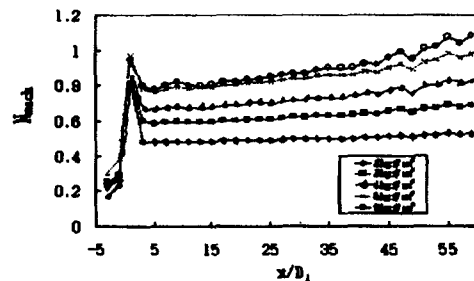


Fig. 5. Distribution of Mach number along x-axis (D<sub>1</sub>=4mm)

그러나 이런 조건에서는 압축공기의 소비량이 매우 많고, 위사의 직진성과 추진력의 결여가 큰 문제로 대두되었다. 또한 기존 제품과

비교해볼 때 직경 4mm의 가속관이 최적상태가 아니라면 임계거리의 의미도 퇴색되고 있음을 알 수 있었고, 되도록이면  $P_T$ 를 크게 하지 않는 것이 바람직하다고 생각되어  $P_T < 5\text{kg/cm}^2$ 의 범주에서 임계거리를 찾아야 할 것이다.

4.1.2 직경 3mm에서의 유동분석

가속관의 직경 3mm에서는 직경 4mm에서 지적될 수 있었던 압축공기의 과다 소모량과 같은 문제점들이 다소 보완되고(그림 6참조), 임계거리가  $L^*=177.8\text{ mm}$  정도로 약간 수정되었다(그림 7참조). 이것은 앞선 실험과 마찬가지로 임계거리 이후의 유동이 일정하지 못한 것과 잘 일치하는 결과이다.

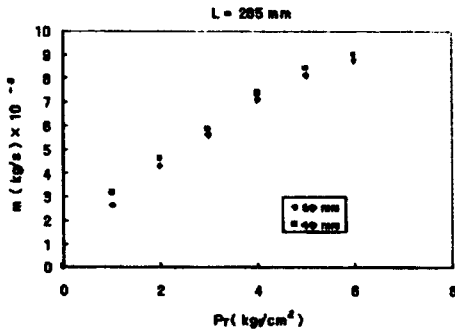


Fig. 6. Distribution of mass flow rate

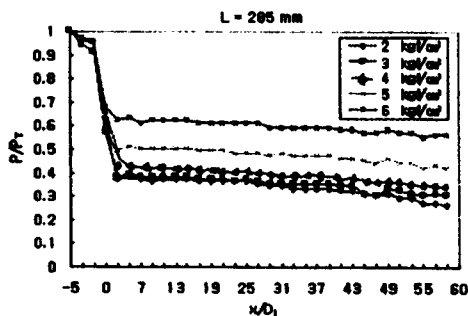


Fig. 7. Distribution of static pressure on wall surface along x-axis ( $D_1=3\text{mm}$ )

가속관 출구에서의 속도는 임계거리  $L^*$ 에서의 속도보다 크게되고, 그 이후의 유동은 불안

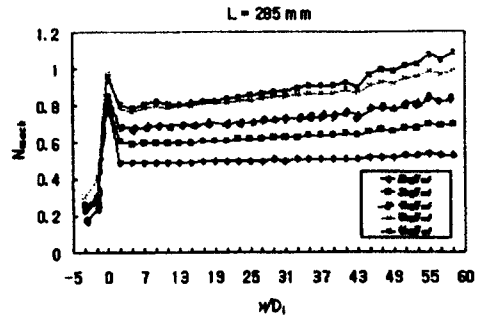


Fig. 8. Distribution of Mach number along x-axis ( $D_1=3\text{mm}$ )

정하게 되었다. 마찬가지로 마하수 M에 있어서도 choke가 되는 지점이 짧아졌으나(그림 8참조), 성능의 혁신은 기대만큼 미치지 못했다. 이는 가속관의 내경이 줄어들면 관내마찰력의 증가로 임계거리가 짧아짐을 확인할 수 있다.

4.2 Straight type tube와 Laval type tube 내의 유동비교분석

과거 Uno등<sup>(8),(9)</sup>의 연구내용을 살펴보면 Straight tube type 이 Laval tube type 보다 성능이 훨씬 뛰어난 것을 제시하고 있으나 당시에는 Laval의 각도  $\theta$ 가 너무 크고, Laval tube의 상대길이가 짧음 등의 사항들이 문제점으로 지적되었다.

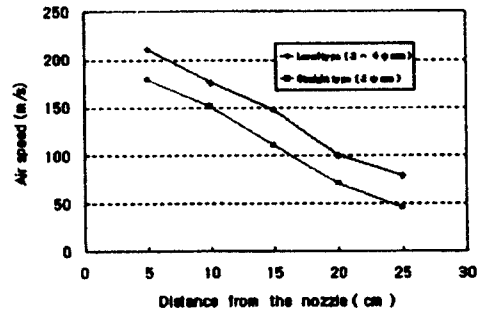


Fig. 9. Comparison of Laval type tube and Straight type tube

본 연구에서는 이를 개선하여 가속관 입구내

경  $D_i = 3\text{mm}$ , 가속관 출구내경  $D_o = 4\text{mm}$  그리고 가속관 tube 길이를  $L = 85 \sim 190\text{mm}$  까지 4종류로 선택하여 실측해 본 결과, 압축공기의 속도가 전체적으로 20% 상승하였고 더불어 실에 작용하는 추진력도 훨씬 강하여짐을 알 수 있었으며 (그림 9참조), 이는 Fanno 유동의 상태에서 이를 파악할 수 있듯이 유동이 출구 쪽으로 진행될수록 마찰력이 증가하므로 내경의 증대로 마찰력의 증가를 피할 수 있다고 생각된다.

### 4.3 가속관 흡입공의 효과

위사의 효율적인 비주거리의 확보를 위하여 일부 가속관의 입구 쪽에 흡입구멍을 뚫는 것이, 가속관 임계거리 이후에서의 유동의 불안정성에 대한 대책의 일환으로 간주되어 왔다. 그러나 본 연구를 통하여 살펴보면, 가속관의 내경변화에는 관계없이 가속관의 길이가 짧은 경우에는 그림 10과 11에서 확인할 수 있듯이 흡입공이 없는 쪽이 가속관내의 유동분포가 안정되었으며 가속관 길이 150 mm 이내, 가속관의 길이가 길어질수록 흡입공이 있는 쪽이 가속관내의 유동분포가 안정화 되었다.

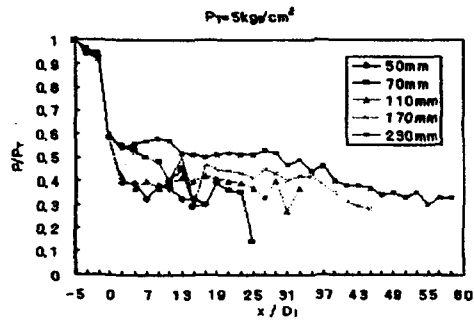


Fig.10. Distribution of static pressure on wall surface along x-axis with suction hole ( $D_i=4\text{mm}$ )

이는 가속관내의 유동이 Fanno 유동으로서, 유동이 출구쪽으로 진행됨에 따라 가속관이 길어지면 마찰력이 증가하여 choke현상에 가깝게 되므로 흡입공의 설치로 유동의 불안정성을 피

할 수 있게 된다.

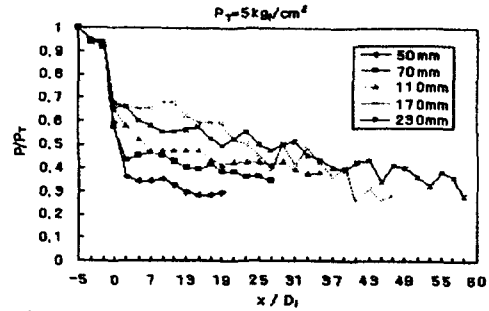


Fig.11. Distribution of static pressure on wall surface along x-axis without suction hole ( $D_i=4\text{mm}$ )

### 5. 결 론

본 연구에서는 에어제트기관의 위입성능을 향상시키기 위하여 에어제트노즐의 최적설계에 그 목적이 있으며 특히 가속관의 내경변화 따른 성능의 차이, 가속관 tube type 등을 해석하였으며 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 압축공기의 탱크압력  $P_t$ 를 크게 하지 않는 것이 바람직하다고 생각되었고, 직경 4mm에 있어서의 문제점들이 직경을 3mm로 수정했을 경우에 많이 보완되었다.
- (2) 가속관의 내경이 4<sup>mm</sup>인 경우에는  $L^*=195.67 (5\text{kg/cm}^2)$ , 가속관의 내경이 3<sup>mm</sup>인 경우에는  $L^*=177.8(5\text{kg/cm}^2)$ 와 같은 임계거리가 실험적으로 증명되었다. 그러나 이런 임계거리의 차이가 노즐 성능의 향상에 직결된다고 볼 수만은 없다고 생각된다.
- (3) 가속관의 내경이 3<sup>mm</sup>인 쪽이 압축공기의 소모량에 있어서는 훨씬 적게 나타났으며, 생산성이 월등함을 알 수 있으나 가속관의 임계거리는 다소 짧게 나타났다.
- (4) Laval tube type 이 Straight tube type 보다 압축공기의 속도가 전체적으로 20%상승되었고, 실에 작용되어지는 추진력도 훨씬 강해졌음을 알 수 있었다.
- (5) 가속관 입구쪽의 흡입공은 가속관의 길이에 따라 유무가 결정되어야 하며, 가속관이

150mm 이상일 때에는 흡입공이 있는 것이 유리 함을 알았다.

## 6. 참고문헌

1. T. Ishida, *Textile News. Jpn.*, 8, 1982
2. V. Duxbury, P. Lord, and T. Vaswani, *J. Textile Inst.*, 50, 558, 1959
3. M. Salama, S. Adanur, and M. H. Mohamed, *Textile Res. J.*, 57, 44, 1987
4. 松本外 2名, "同軸噴流に関する研究(第1報, 空氣-空氣同軸噴流の實驗", 日本 機械學會 論文, vol.38, No.311, pp1753~1761, 1972
5. Kwan, A. S. H. and Ko, N.W.M., "Coherent Structure in Subsonic Coaxial Jets", *J. Sound Vib.*, vol.48, pp203~210, 1976
6. Champagne, F. H. and Wygnarski, I. J., "An experimental Investigation of Coaxial Turbulent Jets" *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.14, pp1445~1452, 1971
7. Williams, T. J., Ali, M. R. M. H., and Anderson, J. S., "Noise and Flow Characteristics of Coaxial Jets", *J. Mech. Eng. Sci.*, vol.11 pp.133~142, 1969
8. M. Uno, *J. Textile Machin. Soc. Jpn.*, 7, 1961
9. M. Uno, *J. Textile Machin. Soc. Jpn.*, 18, 1972