

# 에어제트 직기의 노즐 설계기술

송 동 주 · 구 본 감

## A Brief Introduction to Nozzle Design in Air Jet Loom

Dong-Joo Song · Bon-Gam Gu



- 송동주(영남대학교 기계공학과)
- 1954년생
- 항공우주공학의 공기열역학을 전공하였으며, 압축성유체유동에 대한 전산유체역학적 해석에 관심을 가지고 있다.



- 구본감[쌍용중공업(주) 섬유기계연구소]
- 1960년생
- 에어제트 직기 개발 분야에 관심을 가지고 있다.

### 1. 머리말

섬유기계산업에 있어서 에어 제트 기류를 이용하여 위사 위입을 처음 이용한 것이 1929년에 처음 발표되었으나 상업적으로는 활용되지 못하고 약 20여 년 전부터 기술의 발달로 체코 등지에서 상업적인 기계가 만들어지기 시작하였다. 이때의 기계는 거의가 기계식이었으며, 경제적으로는 다른 직기에 비해 큰 장점이 없다가 점차 가공기술의 발달과 전자산업의 발달로 인하여 최근에는 직기 중에서 최첨단의 기계로 인식되어지고 있다.

에어제트 직기는 공기압축기에서 생산한 고압의 공기를 이용하여 노즐에서 공기의 추진력과 실의 표면 마찰력으로 위사를 경사 사이로 이동시키는 직기이며, 높은 생산성과 견직, 면직, 모직, 타올 직물 등을 제직할 수 있는 광범위한 제직성, 직물 품질의 우수성, 편리한 조작성과 대기중의 공기를 사용함으로써 공해를 일으키지 않으며, 자동화가 가장 많이 되어 있어 현재는 물론 앞으로도

제직산업에 많이 활용될 것이다. 에어제트 직기는 공기를 매체로 사용하고 있기 때문에 워터제트 직기로는 불가능한 스핀(spun)직물이나 친수성 필라멘트 직물 등의 제직도 가능하다. 그러나 공기는 밀도가 물에 비하여 매우 낮으므로(약 1000분의 1 정도) 대기중으로의 확산이 빨라서 추진속도가 급격히 저하되고, 공기의 점성계수도 물의 1/50에 불과하여 공기의 소비가 많아진다. 따라서 압축기의 전력비가 많아 제직비용이 비싸지는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하려면 공기의 이용 효율을 최대한 높이는 것이 모든 에어제트 연구자의 기술적인 과제이며, 계속 연구되어야 할 과제이다. 특히 노즐에서 분사되는 공기유동의 급격한 확산을 막고 유입되는 위사를 연속적으로 끊기지 않고 보낼 수 있는 분사류의 방향, 속도제어 등이 중요하게 된다. 또한 주노즐의 형태, 보조노즐의 출구모양, 전자 밸브의 응답속도, 바디(reed)의 형상, 보조노즐의 위치, 제어 방법 등 공기 소모량을 줄이고자 하는 연구를 하고 있다. 이 모든 방법에 대하여 개별적, 전체적인 체계 종합에 대하여 이론적으로 해석

되고 실험을 통한 검증이 필요하다.

에어제트 직기는 고속으로 다양한 위사를 제작할 수 있는 능력 때문에 셔틀없는 제작기의 발전에 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 제작방법은 압축기로부터의 압축공기를 이용하여 일정한 길이의 원사를 연속적으로 경사에 보내는 과정으로 이루어진다. 실용화된 에어제트직기의 위입방식은 크게 세 가지로 나눌 수 있다.

주노즐-에어가이드 방식(단일 노즐 폐쇄 에어가이드 방식), 주노즐-보조노즐-변형바디(다중노즐-에어가이드 방식), 주노즐-보조노즐-에어가이드(다중노즐 폐쇄 에어가이드 방식<sup>(1))</sup> 등

첫째방식은 주노즐로부터 분사된 에어제트를 에어가이드에 의하여 공기의 확산과 속도의 감속을 억제하여 일정길이의 위사를 가이드내에 연속적으로 날려 보내는 방식으로 폐쇄 에어가이드의 성격상 공기소모량이 적은 장점이 있다.

둘째방식은 주노즐에 의해 분사된 위사를 변형바디의 溝部分에 연속적으로 날려 보내는 중간에 위치한 몇 개의 보조노즐에서 공기를 추가로 분사하여 위입시키는 방법이다. 이 방법은 보조노즐의 적절한 배치로 초광폭의 제작까지 가능하다. 에어가이드를 사용하지 않기 때문에 경필라멘트 직물과 경사에 인터레이스(interlace) 가공사를 사용한 직물은 거의 이 방법을 사용한다.

셋째방식은 위 두 방법의 중간적인 방식이다. 이러한 에어제트 직기는 높은 생산성으로 인하여 단품종 대량생산 직물 제작에 적합한 방식이다. 이 글에서는 이러한 에어제트 직기에 대하여 주요장치를 소개하고 주로 주노즐의 여러 형상이 노즐 성능에 미치는 영향에 대하여 언급하고자 한다.

## 2. 에어제트 직기의 주요장치 및 구간별 유동 특성

에어제트 직기의 작동원리 및 관련된 물리

적현상, 즉 에어제트의 추진력과 위사의 위입 방법은 다음과 같이 설명될 수 있다.

### 2.1 에어제트의 추진력

에어제트 직기의 원리는 실의 표면과 유체의 마찰저항으로 실에 발생하는 추진력을 이용하여 위사를 투입하는 것이다. 실의 후반부가 파지되어 있을 때 실에 작용하는 추진력( $F$ )은 분사 속도( $V$ )의 자승에 비례한다.<sup>(2)</sup>

$$F \cong \rho f D L V^2 \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 실의 표면 마찰계수,  $D$ 는 실의 직경,  $L$ 는 노즐로부터 실의 돌출 길이,  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $V_a - V_s$ 는 에어제트와 실의 상대속도를 나타낸다.

위 식에서 알 수 있는 바와 같이 공기의 밀도와 마찰계수는 물보다 훨씬 작으므로 추진력( $F$ )을 크게 하기 위해서는 에어제트 속도( $V_a$ )를 크게 해야 한다. 또한 마찰계수가 큰 방적사가 에어제트직기에 적합하다는 것을 알 수 있다.

노즐에서 나오는 공기의 속도는 음속을 돌파하기 어렵고 초음속 기류를 사용한다 해도 유속은 노즐에서 나오는 즉시 확산되어 급속히 저하된다. 이 같은 상태에서 실을 투입하면 노즐에서 멀어질수록 실의 앞부분은 추진력을 상실하고 뒷부분은 계속 밀어 붙여 앞부분이 구부러지거나 구겨져서 위입이 불안정하게 된다.

### 2.2 위입 방법

위사는 위사 패키지에서 직접 해사되고 일회분 위사(one pick) 측정장치에 의해 연속적으로 측정 후 고정 드럼 위에 감기어 저장된다. 저장된 일회분의 위사는 주노즐에서 에어제트에 의해 빠져나온다. 압축기의 압축공기는 직기에 공급되며, 직기에서는 조정

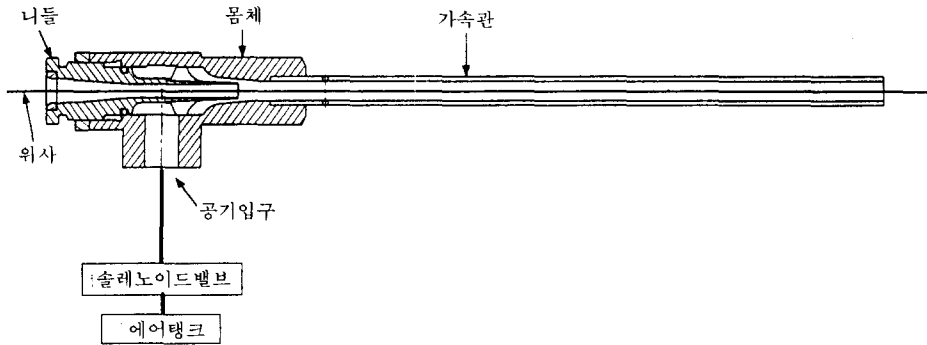


그림 1 주노즐의 전형적 형상

장치(regulator)에 의해 일정압력으로 탱크에서 파이프를 거쳐 주노즐로 보내진다. 주노즐을 통과한 분사 기류는 에어가이드(air guide)에 의해 확산이 제어되어 속도가 조정되면서 고속으로 흐르게 된다. 위사는 이 공기흐름에 편승하여 노즐의 반대편까지 똑바로 투입된다. 제작조건에 따라 위사의 속도가 저하되거나 불안정하게 될 경우 중간 보조 노즐에 의해 재 가속되므로 안정된 고속 위입이 가능하게 된다. 위입완료된 순간 위사선단에 사단긴장장치에 의해 적당한 장력이 주어지고 위입된 위사는 바디(reed)침이 이루어짐과 동시에 노즐 측에서는 매회 절단하게 되어 있다.

### 2.3 주노즐(main nozzle)

주노즐은 에어 제트 직기의 위입에 있어서 처음 실을 선택하여 경사 내로 투입시키는 중요한 역할을 한다.

주노즐의 모양은 그림 1과 같고 공기유동은 보통  $2\sim 4\text{kgf/cm}^2$ 의 압력으로 에어 탱크에서 2way 솔레노이드 밸브, 노즐 본체의 공기 삽입구, 니들의 테이프 유로부를 지나서, 니들 끝부분에서는 최소 단면적이 되며, 그 직후에 니들의 위사 사로에서 공기 흐름과 위사가 혼합하여 가속관으로 들어간다. 여기서 유로면적은 급격히 확대되지만, 그

하류는 가속관의 단면적이 일정하고 공기유동은 가속관 출구에서 대기 상태로 자유롭게 분출되어 위입이 시작된다.

주노즐의 재질은 보통 스테인리스 스틸로 만들어지며, 실이 많이 닿는 곳은 세라믹링이 부착되어 마모를 방지한다. 또한 형태는 실의 재질과 굵기에 따라 여러가지가 있다. 즉 필라멘트사일 경우는 니들의 굵기가 작고

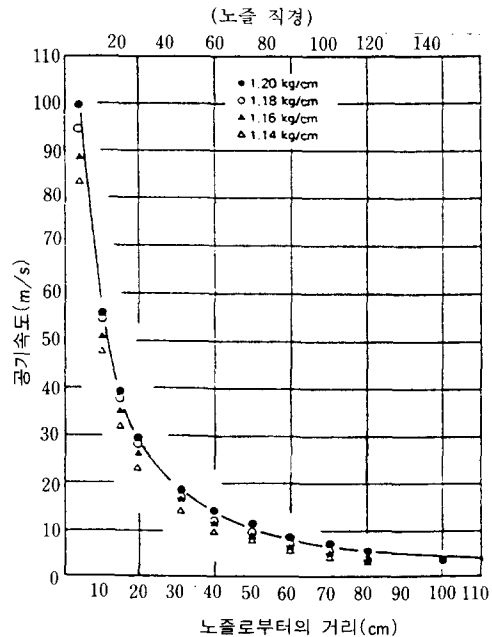


그림 2 Maxbo형태 노즐에서 분사된 에어 제트의 측방향 속도분포

가속관의 길이가 짧으며, 면사나 굵은 실일 경우에는 니들의 굵기가 크고 가속관의 튜브가 길며, 위사가 연사물이나 고속의 제직에는 주노즐을 직렬로 2개를 설치하여 2중 속도를 내게 하여 가속시키는 경우도 있다. 그림 2는 송풍기에 연결되어 있는 Maxbo 형태 노즐로부터 분사되는 에어제트의 축방향 속도분포를 나타내는 그림이다(Ishida<sup>(3)</sup> 참조). 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 노즐로부터 분사되어 대기중으로 방출된 공기 유동의 축방향속도는 노즐을 떠나자마자 급격히 떨어지게 된다. 노즐로부터 100cm 떨어진 곳의 속도는 초기속도의 약 1/20 정도까지 떨어짐을 알 수 있다.

## 2.4 변형바디(reed) 및 에어가이드(air guide)

에어제트가 주노즐로부터 분사된 후 유속은 급속한 유동의 팽창으로 평균 속도가 급속히 저하된다. 앞절에서 설명된 바와 같이 Maxbo 형태 노즐(0.68mm 내경×21mm길

이)에서 분사된 에어제트는 급속히 속도가 저하된다. 또한 위사를 균일하게 멀리 보내기 위하여 정체점 압력을 높이고, 보조 노즐 등을 쓰게 되면 압축 공기를 많이 사용하게 되어 전기 소모가 매우 높아지게 된다. 따라서 최초 분사된 에어제트의 속도를 유지하게 하는 장치는 경비 절감 측면에 있어서 매우 필요하다고 할 수 있다. 에어제트 직기의 분사된 공기의 급격한 확산을 막아주기 위한 장치는 두 가지로 나눌 수 있다: 공개채널(open channel)인 변형 바디(그림 3 참조)와 폐쇄형 에어 가이드(confuser). 현재 대부분의 직기는 변형 바디를 이용하고 있으나 Nissan 등 몇몇 제작자들은 폐쇄 에어 가이드를 사용하고 있는데 그 이유는 주노즐의 높은 효율과 저가의 표준 바디 사용의 용이성, 낮은 결함률, 쉽게 섬유를 바꿀 수 있는 호환성 때문이다.

직기의 고속화와 직물의 품질을 위해서는 무엇보다도 고품질의 바디(reed)가 요구된다. 바디는 내구성과 탄력성, 내마모성, 진동충격이 강하며, 압축공기의 흐름이 안정적

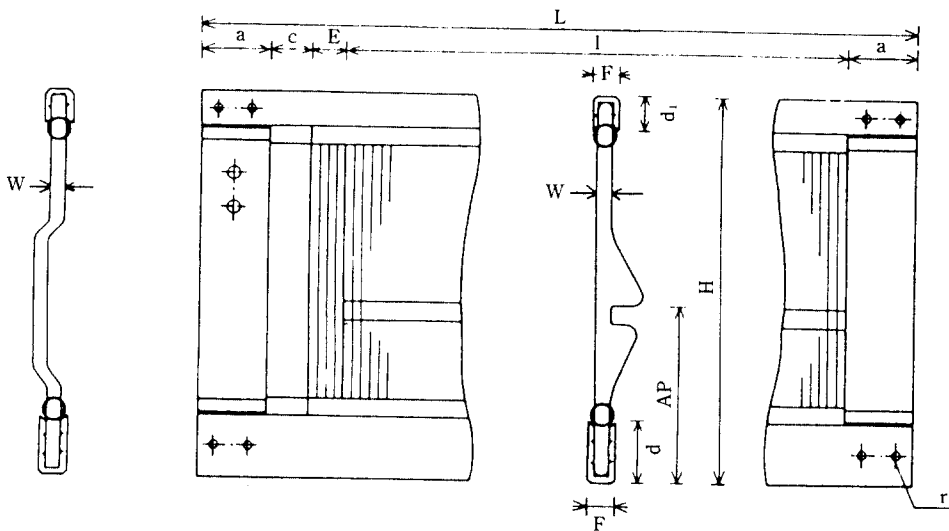


그림 3 에어제트 직기에 주로 쓰이는 전형적인 바디형상

이며, 에너지의 성력화를 기해야 한다. 그래서 에어제트형 바디는 다른 직기의 바디와는 옆모양이 다르게 되어 있다.

그림 3은 주로 많이 사용되는 에어제트 직기용 바디로서 모양이 터널(tunnel)형으로, 압축공기의 퍼짐을 방지하여줌으로써 위사를 멀리까지 날려 보내주게 된다. 바디살의 재질은 SUS301을 사용하여 녹발생과 경도를 높이며, 표면은 연마처리를 하여 위사와 경사의 마찰계수를 줄이며, 위입부의 시작점에서 약 10cm 정도를 내마모성이 강한 특수도금(Hv 1000~1200) 처리를 한다. 바디살의 두께는 0.12~0.6mm가 있으며, 간격은 경사의 밀도 및 통경방법에 따라 달라진다.

에어가이드(air guide)는 방적사용(플라스틱제)과 필라멘트사용(알루미늄제)의 두 종류 있다. 방적사용 에어가이드에서는 유연한 순(舌)부가 있고 이것에 의해 기류 및 위사가 상부의 간극으로부터 외부로 유출되는 것을 방지한다. 에어 가이드는 블록 형태로 구성되어 베이스 위에 일정한 간격으로 1열로 고정되어 있다.

에어가이드에 영향을 미치는 인자는 경사 개구의(warpsed) 크기, 에어가이드의 직경 및 가이드 판(guide plate) 간극을 들 수 있다. Ishida<sup>(3)</sup>에 의하면 가장 적합한 에어가이드의 크기는 노즐 직경의 3~4배이고 판간극은 적은 공간 즉 2mm일 때이다. 가장 좋은 것은 노즐로부터의 거리에 따라 직경이 변하는 것일 것이다.

### 2.5 보조노즐(sub nozzle)

변형바디와 보조노즐 병용방식의 에어제트 직기에서는 주노즐에서 분사된 압축공기는 밀도가 낮아 대기압으로의 유동의 확산에 의하여 속도가 급격히 저하되므로 위사를 직기 길이인 약 2m 정도까지 보내주기가 어렵다. 통상 보조노즐, 에어가이드 혹은 바디침 등이 없을 때 에어제트 유동의 급격한 확산으

로 인하여 초기 공기 속도의 1/20 이하로 감소하게 되므로 위입되는 위사의 선단 속도가 급격하게 떨어져 후단의 빠른 속도 이하로 감소하게 되어 위사의 좌굴(buckling)이 발생하여 실이 구부러지게 된다. 그래서 중간 중간에 보조노즐(sub nozzle)을 20~30 개 정도 부착하여 릴레이형태로 공기를 분사하여 위사를 끝까지 보내주게 된다.

보조노즐과 에어 가이드를 사용하였을 경우 분사된 공기의 축방향속도 분포를 그림 4에서<sup>(4)</sup> 볼 수 있는데 주노즐만 쓰는 경우에 비하여 보조노즐과 에어가이드를 동시에 사용하였을 경우 40cm 가량 떨어진 곳의 속도가 주노즐만 쓸 경우 초기 속도의 1/4에 비해 초기 속도의 약 1/2 정도까지 유지되는 것을 알 수 있다.

보조노즐은 그림 5와 같이 공기 출구의 형상에 원형, 다공형, 사각형, 타원형 등이 있

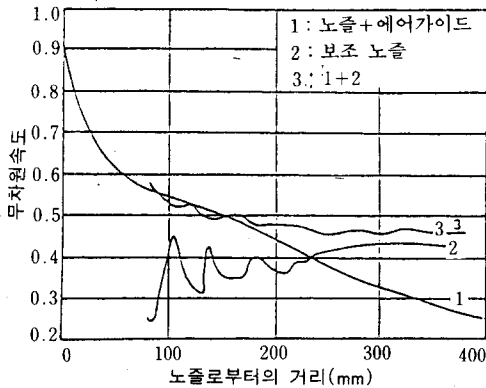


그림 4 몇 가지 조건에서 축방향 속도분포 (Investa)

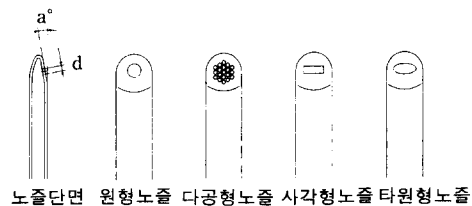


그림 5 보조노즐 그림

으며, 실의 종류에 따라 여러가지가 사용된다. 분사류는 출구의 형상과 경사각도 및 공급 공기의 압력에 따라 속도와 분류축의 각도, 공기의 퍼짐 정도가 다르게 나타나며, 보통 면직(cotton)일 경우에는 원형 노즐을 사용하고, 필라멘트(filament)직물일 경우에는 다공형 노즐이 많이 사용되나 타원형은 제작비가 많이 드는 단점이 있다. 또한 노즐의 재질은 스테인리스 스틸이 많이 사용되나 유리섬유(glass fiber)와 같이 강한 실에는 내마모성이 강한 세라믹으로 된 제품도 있다. 그리고 직기 제작 회사에 따라 조금씩 사양이 다르므로 호환성이 없다.

### 2.6 압축기

에어제트 직기에서 가장 중요한 구성장치 중 하나가 압축공기를 공급하는 압축기이다. 압축공기의 효율적인 사용은 에어제트 직기 유지비용 절감에 중요한 역할을 한다. 압축기는 기계의 설치 대수, 기종, 직물 품종 및 회전수 등에 의해 소요 공기량을 결정한다. 총소비량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$V = V_1 \cdot K_n \cdot K_z \cdot K_R \cdot n$$

여기서,  $V_1$ 은 직기 한 대의 소비량,  $K_n$ 은 직기의 가동률,  $K_z$ 는 배관내 공기의 손실 계수( $\approx 1.1$ ),  $K_R$ 는 예비계수(1.1-1.2),  $n$ 은 직기 대수를 나타낸다.

압축 공기는 에어제트 직기의 가장 중요한 위입수단이다. 청정해야 하고 일정한 공기압으로 감압되어 직기에 공급되고, 밸브를 거쳐 각 노즐에 공급된다.

위사는 노즐을 통과하고 경사의 개구 안을 지나게 되므로 이음 매듭, 풍면 슬러브 등은 위입 과정에서 여러가지 문제의 주요 원인이 된다. 또 고속화로 인한 바디의 요동 운동의 증가는 경사 절단의 원인을 가져오게 된다. 직기 실내의 온도, 습도에 유의해야 하고 청정한 실내 공기를 유지해야 한다.

### 3. 주노즐의 구조 및 공기 역학적 특성

앞절에서 언급된 주노즐, 변형바디 및 에어 가이드, 보조 노즐은 모두 에어제트 직기의 공기분사, 확산방지, 보조분사의 역할을 하여 위사의 성공적 비주(飛走)를 이룩하도록 한다. 그 중에서도 가장 중요한 것은 주노즐의 성능개선이라고 할 수 있는데 이것은 위사를 비주시키는 주요소이기 때문이다. 주노즐은 위사의 초기 투입속도와 압축공기를 가속시키는 장치로서 압축공기 효율을 높이기 위하여 적절한 설계가 이루어져야 하는 중요한 부분이다. 특히 고속의 에어 제트가 분사될 때 확산을 제어하기 위하여 반경방향으로의 축방향속도분포의 조절이 중요하다. 또한 압축기로부터의 공기주입부(air inlet)가 비대칭으로 되어 있음에도 불구하고 축대칭 유동이 주노즐을 통하여 분사될 수 있게 하는 형상설계는 국내 직기업체에서 해결되어야 할 주요한 연구분야이다. 에너지 절약 관점에서 주노즐에서의 최초 분사 속도는 고압, 고속에 의한 위사의 파괴를 방지하고 높은 공기압을 유지하기 위한 전기소모를 줄이기 위하여 가능한한 낮아야 한다. 에어제트 직기에서 사용되는 주노즐은 그림 6에 있는 바와 같이 일반적인 노즐의 형상과는 다르다. 니들(yarn tube)이 있어서 주유동과 니들내 유동을 구분해 주고 서로 다른 경계층

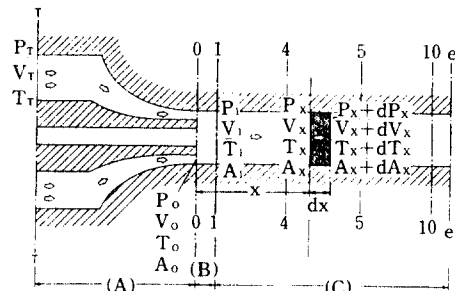


그림 6 주노즐의 개략도

을 발달시킴으로써 유동에너지를 소모하기 때문에 이 노즐의 성능 또한 통상적인 노즐과는 다르게 된다. 노즐내의 실제유동형상은 니들을 통한 공기의 유동으로 매우 복잡하다. 니들을 포함한 실제 형상에 대한 실험 혹은 유동해석은 복잡성으로 인하여 일반적인 노즐의 유동을 연구할 때에는 통상 니들이 달혀진 것으로 가정하여 해석한다 (Mohamed와 Salama<sup>(6)</sup>). 노즐유동해석은 주로 압축공기 공급압력과 노즐축에서의 분사속도와와의 관계, 니들의 존재로 인한 노즐 성능에 대한 영향, 노즐직경과 에어가이드직경 비의 영향, 제트와 에어가이드 간의 상호작용현상, 가속관의 길이와 직경, 노즐의 직경 등 노즐형상과 제작방법에 따른 유동특성의 영향 등에 관하여 연구하는 데 중점을 두고 있다. 이러한 노즐의 설계목표는 위사를 보낼 수 있는 범위내에서 노즐의 크기가 가능하면 작아야하며, 공기소모율을 줄이고 높은 공기 속도를 얻기 위하여 가속관의 내경은 작아야 한다. 주노즐의 구조는 아래 그림과 같이 개략적으로 표현할 수 있다.

Mohamed와 Salama<sup>(6)</sup>에 의하면 가속관의 길이가 증가하면 주노즐출구에서 공기속도와 난류가 감소하며, 가속관의 직경이 증가하면 공기속도는 감소하고 난류는 증가한다. 에어가이드 직경과 노즐직경의 비는 유량에 영향을 미치며, 그 비율이 클수록 공기제트에 의한 유동의 비말등반(entrapment)이 크게 된다. 니들 끝은 니들 내에 흡입을 초래할 수 있는 위치에 놓여 져야만 한다. 그럼으로써 니들을 통해서도 공기유동이 주유동에 더해질 수 있어야 한다.

주노즐의 공기 역학적 특성을 연구한 Ishida와 Okajima<sup>(4)</sup>의 논문을 인용하여 각 구간별 공기역학적 유동 특성을 살펴보면 다음과 같다(그림 6 참조). 주노즐에 위사가 투입될 경우 공기탱크 압력, 삼입속도, 초기 루프(loop)길이의 위사 속도에 대한 영향은 Salama 등<sup>(9)</sup>으로부터 구할 수 있다.

### 3.1 구간 A에서의 유동특성(노즐벽과 니들에 둘러싸인 수축노즐 유동 영역)

공기탱크로부터 니들 끝에 이르기까지 정압이 점진적으로 감소하며, 유동은 점진적으로 가속하게 되며, 최소단면적 부분에서(목,  $x/D=0$ ) 최대 속도를 얻게 된다. 정체 압력 ( $P_t$ )를 증가시켰을 때 최소단면적 부분에서 임계속도 마하수  $M=1$ 에 도달하며, 압력을 더 증가시켰을 때도 유동의 속도는 초크되었기 때문에, 즉, 주어진 노즐에 대하여 최대 보낼 수 있는 질량유량에 도달했기 때문에 더 이상 증가하지 않는다. 이 때 목(throat)에서의 압력은 다음과 같다.

$$x/D=0 \text{에서 } P=0.528P_t \quad (3)$$

목이  $x/D=0$ 에 위치하게 설계하면, 가속도관( $x/D=5$ )의 압력  $P_1(x/D=5)$ 이 줄어든다 해도 니들 끝에서는  $P_0$ 가 임계압력으로 유지된다.

### 3.2 구간 B에서의 유동특성(유로면적이 급격하게 확대하는 영역)

Uno 등<sup>(7)</sup>의 실험에 의하면 그림 7에 있는 바와 같이 Laval관보다는 평행관내에서 유동 속도가 특히  $l/d=5$ 때 더욱 빨랐음을 발

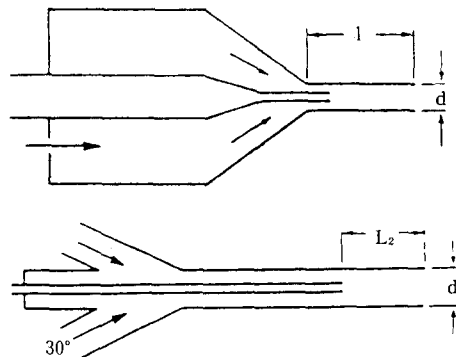


그림 7 Uno 등<sup>(7)</sup>이 사용한 주노즐의 형상

겼다(여기서  $l$ 은 가속관 길이이고  $d$ 는 가속관의 직경). 이 구관 유동 특성을 설명하기 위하여 사용된 주노즐은 관확산율(tube diffusion ratio)이 1.67로서 비교적 작은 편이다.

이 영역에서는 유동의 급팽창에 의해  $x/D=5$ 에서의 유속은 니들끝에서의 속도보다 탱크 압력에 관계없이 항상 낮으며, 다음과 같은 전형적인 현상을 볼 수 있다.

- $P_t < 3\text{kgf/cm}^2$  :  $x/D=5$  지점에서 속도의 감속이  $P_t$ 가  $3\text{kgf/cm}^2$ 보다 클 경우보다 현저하다.
- $P_t \approx 3\text{kgf/cm}^2$  : 목에서 임계조건조달,
- $P_t > 4\text{kgf/cm}^2$  :  $x/D=5$ 에서 유동의 속도는 탱크 압력에 관계없이 변화 없다.

### 3.3 구간 C에서의 유동특성(가속관 내에서의 유동)

$x/D=5$ 에서 탱크압력을 변화시켜도 모든 유속은 음속보다 낮으며, 그 후 속도가 증가하였는데 이것은 마찰저항에 의한 효과로 생각된다(Fanno 유동) : 경계층이 관내 유동 방향으로 발달되어 감에 따라 실질적인 유효 단면적이 감소하게 되므로 유동이 가속화된다. 예를 들어 노즐탱크 압력이  $4\text{kgf/cm}^2$ 에 도달하면 목에서 속도가 음속이 되며, 초크현상이 보여지게 된다. Fanno유동은 아음속 유동인 경우 유동단면적이 감소하게 되므로 유동 방향으로 속도는 증가하게 된다. 그러나 가속관내에서의 유동은 음속을 초과할 수 없다. 따라서, 초크현상을 조절하기 위하여 입구의 유속을 조절할 필요가 있다.

압축성,  $1-D$ , 점성마찰 유동시(Fanno 유동) 임의 장소의 임계가속관길이 혹은 마찰계수를 계산할 때 출구가 초크된다고 했을 때 얻을 수 있는 니들 출구 마하수는  $M=0.68$ 이며, 이는 실험치 정압으로부터 계산한 값  $0.70 \sim 0.74$ 로 매우 유사하다. 따라서, 원통형 에어제트 직기 주노즐의 해석 결과 목

현상이 두 군데에서 발생할 수 있게 된다 :

- ① 니들 끝, ② 가속관출구(Fanno현상으로 인해)

$P_t = 3\text{kgf/cm}^2$  : 니들 끝에서만 발생,

$P_t \geq 4\text{kgf/cm}^2$  : 니들 끝과 가속관 출구 두군데서 발생.

### 3.4 가속관 길이의 영향

$L=50, 110, 170\text{mm}$ 을 가진 가속관을 이용하여 실험한 결과<sup>(4)</sup>로부터 위 Fanno 유동 현상을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 니들 끝에서만 초크된 경우

$P_t = 2, 3\text{kgf/cm}^2$  출구에서 대기압으로서 서히 감소함

- (1)  $P_t$ 가  $3\text{kgf/cm}^2$ 보다 클 경우 노즐 출구에서의 유속은 가속관길이에 상관없이 일정하다.

- (2) 같은  $P_t$ 일 경우에  $x/D=5$ 지점의 정압은 관의 길이가 길수록 높았다. 이는 긴 가속관길이에 의한 수두손실(head loss)을 이기기 위해서는 정압이 높아야만 하기 때문이다. 따라서,  $x/D=5$ 에서 유속은 긴 가속관일 경우에 작아야 한다. (베르누이 법칙 참조)

- (3) 니들 끝(모)에서 임계속도(음속)가 도달하기 위해서는  $x/D=5$ 의 정압  $P_t$ 이 매우 중요하며, 이  $P_t$ 은 가속관이 길수록 증가한다. 즉 긴 가속관에서 니들 끝부분의 속도를 임계속도로 되게하기 위해서는  $P_t$ 를 더 올려주어야 한다. 참고로, 임계속도에 도달하기 위한  $P_t$ 의 값을 이들의 실험으로부터 인용하면 다음과 같다.

$L=170\text{mm}$ ,  $P_t=3.5\text{kgf/cm}^2$  이상,

$L=110\text{mm}$ ,  $P_t=3.0\text{kgf/cm}^2$  이상,

$L=50\text{mm}$ ,  $P_t=2.5\text{kgf/cm}^2$  이상.

- 2) 니들 끝과 가속관 출구에서 이중 초크가 일어날 경우



$L=170\text{mm}$ ,  $P_t \geq 4.0\text{kgf/cm}^2$  이중 초크,

$L=50\text{mm}$ ,  $P_t \geq 5.0\text{kgf/cm}^2$  초음속으로 유동가속후 내벽의 마찰로 인하여 감속되어 출구에서 음속에 접근한다.

Uno<sup>(6)</sup>의 그림 7b의 주노즐 길이의 공기속도에 대한 영향에 대한 연구에서도 주노즐의 가속관의 길이가( $L_2/d$ ) 커질수록 공기속도가 증가하였음을 발견하였다. 위사에 대한 추진력도  $L_2/d$ 가 증가할수록 증가하였다.

### 3.5 노즐에서의 충격파 발생

$L=70\text{mm}$ ,  $P_t \geq 5\text{kgf/cm}^2$  : 유동이 니들 끝에서 가속하여 초음속 유동이 된 후 충격파가 발생하여 유속을 떨어뜨리고 압력을 상승시켜준다. 후에 출구에서 초크 된다. 유동이 가속관 중간에서 초크되지 않고 항상 튜브 출구에서만 초크되므로 충격파를 가정해야만 설명된다. (Fanno유동으로는 설명안됨) 가속관내에서의 유동은 경계층의 발달과 경계층/충격파의 상호작용에 의한 압력의 급격한 증가가 경계층을 두껍게 만들기 때문이다. 경사충격파가 발생되고, 반사파가 간섭하여 전체적으로 아음속유동으로 서서히 변한다.

### 4. 맺음말

주노즐내의 공기제트의 효율을 높이기 위해, 주노즐 제트 속도는 높을수록 높은 마찰력을 초래하여 위사의 속도를 증가시킨다. 가속관의 길이가 증가하면 노즐출구에서의 공기의 속도와 난류가 감소하며; 가속관의 직경이 증가할 때에는 공기속도가 감소하며 난류는 증가한다. 탱크압력, 가속관의 길이 등 유동조건에 따라 유동은 니들 끝과 가속관 출구에서 이중 초크( $M=1$ )가 발생할 수 있다. 에어가이드 직경과 노즐직경의 그 비

율이 클수록 제트에 의한 유동의 비말동반(entrainment)이 크게 된다.

실제 노즐직기내의 유동은 위사를 동반한 유동이므로 위와 같은 정성적인 설명에 위사의 물성치에 따른 고려를 반드시 하여야만 한다. 현장에서의 노즐설계는 노즐형상 자체의 영향은 물론 각종 위사의 물성치에 맞는 압축공기 압력 최적조건이 무엇인가를 찾는 일도 매우 중요하다.

### 참고문헌

- (1) 유종걸, 1986, "Jet Loom의 현황과 문제," 트리론 월보, 12월호, pp. 16~21.
- (2) 유홍근, 1989, "에어제트 직기의 현황," 한국섬유공학회지, 제26권, 제 2호, pp. 62~69.
- (3) Ishida, T., 1982, "Air-Jet Loom, Present and Future, Part 3: How Air-Jet Expands in the Shed," JTN, Aug, pp. 85~87.
- (4) Ishida, M. and Okajima, A., 1994, "Flow Characteristics of the Main Nozzle in an Air-Jet Loom, Part I: Measuring Flow in the Main Nozzle," *Textile Research Journal*, Vol. 64, No. 1, pp. 10~20.
- (5) Mohamed, M. H. and Salama, M., 1986, "Mechanics of a Single Nozzle Air-Jet Filling Insertion System, Part I: Nozzle Design and Performance," *Textile Research Journal*, Vol. 56, No. 1, pp. 683~690.
- (6) Salama, M., Adanur, S., and Mohamed, M. H., 1987, "Mechanics of Single Nozzle Air-Jet Filling Insertion System, Part III: Yarn Insertion Through Tube," *Textile Research Journal*, Vol. 57, pp. 44~54.
- (7) Uno, M. et al., 1961, "A Study in Air-Jet Loom," *J. Textile Machinery Soc. Jpn.* 7(1), 28A.

- (8) Uno, M., 1972, "A Study on Air-Jet Loom with Substreams Added, Part 1: Deriving the Equation of Motion for Wefe," *J. Textile Machin. Soc. Jpn.* 18(2),

