

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 18, No. 3, 1998

三次元 水噴流의 衝突 壓力 分布 特性에 關한 研究

이종수*, 최국광**

* 안동정보대학 기계과

** 인천대학교 기계공학과

A Study on the Characteristic of Impinging Pressure Distribution in the Three Dimensional Impinging Water Jet

J. S. Lee*, K. K. Choi**

* *Andong Institute of Infor. Tech*

** *Incheon University*

요 약

축류비가 5이고 형상비가 7인 長方形 노즐을 사용하여 연직 상향의 3차원 자유 충돌 수분류계를 구성하였다. 수평 충돌판에 상향의 장방형 충돌수분류가 충돌할 때, 보조수를 동반하지 않은 단일수분류 및 보조수를 동반하는 수분류에 대하여 노즐-충돌판 사이의 거리, 노즐출구 속도를 변수로하여 노즐의 긴변 방향과 짧은 변 방향에 대하여 전압 및 정압 분포를 측정하였다. 이때 충돌판상에서 정압이 영이 되는 국소 위치까지의 거리인 충돌 반폭을 구하고, 최고 압력을 나타내는 정체점을 기준으로 무차원 정압 분포식을 제시하였다. 또한 각 실험조건에서 정체점상에서의 충돌속도를 구하였으며, 충돌속도는 노즐-전열면간 거리가 증가함에 따라 감소하며 그 감쇄율은 삼차원 자유 분류의 특성감쇄 영역의 유동 특성을 갖는다.

Abstract

The purpose of this research is to investigate the characteristics of static and total pressure distribution in the upward free water jet system impinged on a downward flat plate. The rectangular nozzle was used and its contraction and aspect ratio was five and about seven respectively. Experimental conditions considered were jet velocity, distance between nozzle and flat plate, height of supplementary water.

It was founded that pressure distribution on the flat plate had the Gaussian curve when the pressure at stagnation point and impinging half width were chosen as the scaling parameters. The maximum pressure was shown at the stagnation point. The central impingement velocity decreased with the increment of distance between nozzle and flat plate, and its slop of decay was similar to that of characteristics decay region in the three-dimensional free jet.

Nomenclature

- $b_{1/2}$: Y-방향 충돌 반폭
- B_i, B : 노즐의 입구 및 출구 단면의 단축 길이
- $B_{1/2}$: 노즐 출구 단면 단축의 반폭
- $l_{1/2}$: X-방향의 충돌 반폭
- $L, L_{1/2}$: 노즐 출구 단면의 장변 길이와 장변의 절반 길이
- P_s, P_{os} : 국소 및 정체점에서 정압
- P_{ot} : 정체점에서 총압
- S : 보조수층 높이
- S_{in}, S_{out} : 노즐 입구 및 출구의面積
- V_o : 노즐 출구 속도
- V_c, V_{ci} : 噴流의 중심선상에서 자유분류 속도와 분류의 충돌 속도
- X, Y, Z : 노즐 중심을 원점으로한 3-次元 직각 좌표계
- $Ar = \frac{L}{B}$: 노즐의 형상비
- $Cr = \frac{S_{in}}{S_{out}}$: 노즐의 축류비

1. 서 론

충돌분류는 태양열을 현열, 충열하기 위한 충열 시스템을 비롯하여 항공분야에서는 다단로켓트의 分離, 로켓트 발사대, V/STOL 항공기 엔진의 배기, 분체도장산업, 목표물의 파괴 및 해체작업, 연질재료의 절단, 선박 해양 구조물의 부착물의 제거, 결석 분쇄 제거 및 피부 절개, 터널굴착공사, 해저암반준설, 암석천공 등에 응용된다.

열전달의 응용으로는 제철, 제지, 직물, 유리산업, 버블-잉크젯트 프린터 등의 가열이나 건조 및 고온금속, 개스터어빈깃, 중성자빔 반사체 (Neutron beam targets), 금형, 고효율 항공기의 발전기 코일, 절삭공구와 가공재료의 열변형 방지, 급속 심냉각 외과료법, VLSI 고밀도 전자부품 등 생각이 있다.^{1~2)}

噴流는 그 응용 방법이나 분류계를 구성하는 因子로서는 노즐의 출구 형상, 자유분류 형태, 분류 유체, 분류가 충돌되는 대상의 形狀, 충돌면과 분류 사이의 기하학적 배치 상태와 분류의 상대적 운동성, 분류 유체와 주위 유체와의 확산성 (Entrainment) 등이 있다. 이러한 분류의 구분에서 자유분류로서 축대칭인 원형분류의 경우는 포

텐살 코어와 코어 외주부의 혼합 영역, 천이영역, 相似 영역으로 구성되어 있다.

그러나 노즐의 형상비($Ar=L/B$)가 매우 큰 노즐로부터 분사되는 분류의 단면 형태가 축대칭 분류도, 장방형 분류도 아닌 분류의 형태를 3차원 분류(Three-Dimensional Jet)라고 한다. 이러한 3차원 분류는 노즐의 형상비(Ar)가 약 1인 노즐, 즉 정방형 노즐로부터 분사되는 분류를 블러프 분류(Bluff Jet)라 하고, 형상비가 5보다 크고 10보다 작은 노즐로부터 분사되는 분류를 장방형 분류, 반면 형상비가 10 이상인 노즐로부터의 분사되어 분류 단면이 타원 형상을 나타내는 분류를 슬렌더 분류(Slender jet)로 구분하고 있다. 이러한 三次元 噴流에 대한 노즐의 형상비와 속도분포를 나타내는 분류 구조는 Fig. 1(A), (B)와 같으며, 원형 분류와 마찬가지로 3개의 噴流領域으로 나누어진다.³⁻⁵⁾

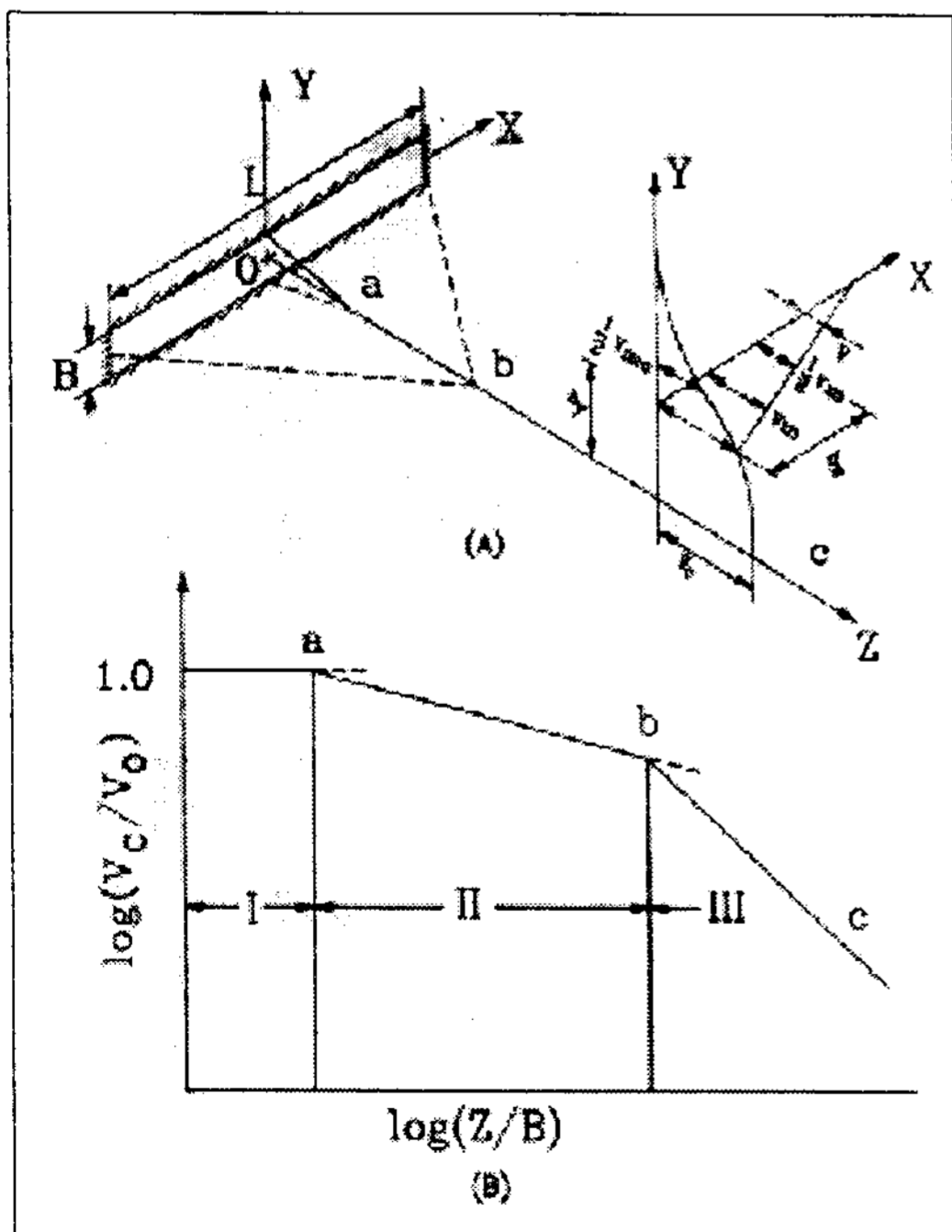


Fig. 1. Schematic representation of the flow fields of 3-dimensional free jet.

삼차원 장방형 분류의 제1영역은 噴流 중심의 축선상의 속도(V_c)와 노즐출구의 분류속도 (efflux)인 V_0 가 거의 같은 속도를 나타내는 영역을 포텐셜 코어 영역(Potential core region)으로서 그림에서 oa 영역이며, 제2영역은 분류의 흐름 방향의 거리가 증가함에 따라 속도 변화가 선형적으로 변화하는 ab 영역이며, 분류 중심선상의 속도 (V_c)가 二次元 噴流의 경우와 거의 동일한 比率로 분류 중심선 방향(Z방향)의 거리가 증가함에 따라서 감소하는 영역으로서 특성감쇄영역(Characteristic decay region)또는 이차원 분류형 감쇄영역(Plane jet-type decay region)이라고 한다.

제3영역은 b점 이후의 영역으로서 분류의 축선상의 속도 (V_c)가 분류의 유동방향(Z)으로 진행됨에 따라 감소하는 영역인데, 그 감쇄율은 축대칭 원형 분류의 경우와 같이 상사를 이루는 영역으로서 축대칭형 감쇄영역(Axisymmetric-type decay region)이라고 한다.³⁻⁵⁾

Krothapalli등⁴⁾에 의하면 삼차원 자유분류에서 포텐셜코어(potential core)영역은 노즐 폭의 4배 ($Z=4B$)인 영역까지, 이차원 분류 형태의 영역은 노즐폭의 60배($4B \leq Z \leq 60B$)까지 이며, 축대칭 분류 영역(相似 領域)은 노즐폭의 60배($Z \geq 60B$) 이후의 영역이라고 제시하고 있다. 이러한 경계 값들은 노즐의 형상비나, 노즐입구의 형태, 노즐 출구에서 난류 강도, 레이놀즈수, 噴流가 噴出되는 주위 유체등의 유동장의 特性에 따라 변화한다. 이와같은 삼차원 분류의 어떤 領域內에 노즐-충돌판 거리에 따라서 충돌압력이 달라지며, 노즐로부터 분사되는 분류가 대기중에 방출하는 자유충돌수분류(Free impinging water jet)의 유동장의 구조는 Fig. 2와 같다.

이 그림에서 노즐로부터의 자유분류는 충돌판에 충돌하고 충돌 이후의 분류는 충돌판상을 흐르면서 경계층이 형성된다. 분류가 평판에 충돌하

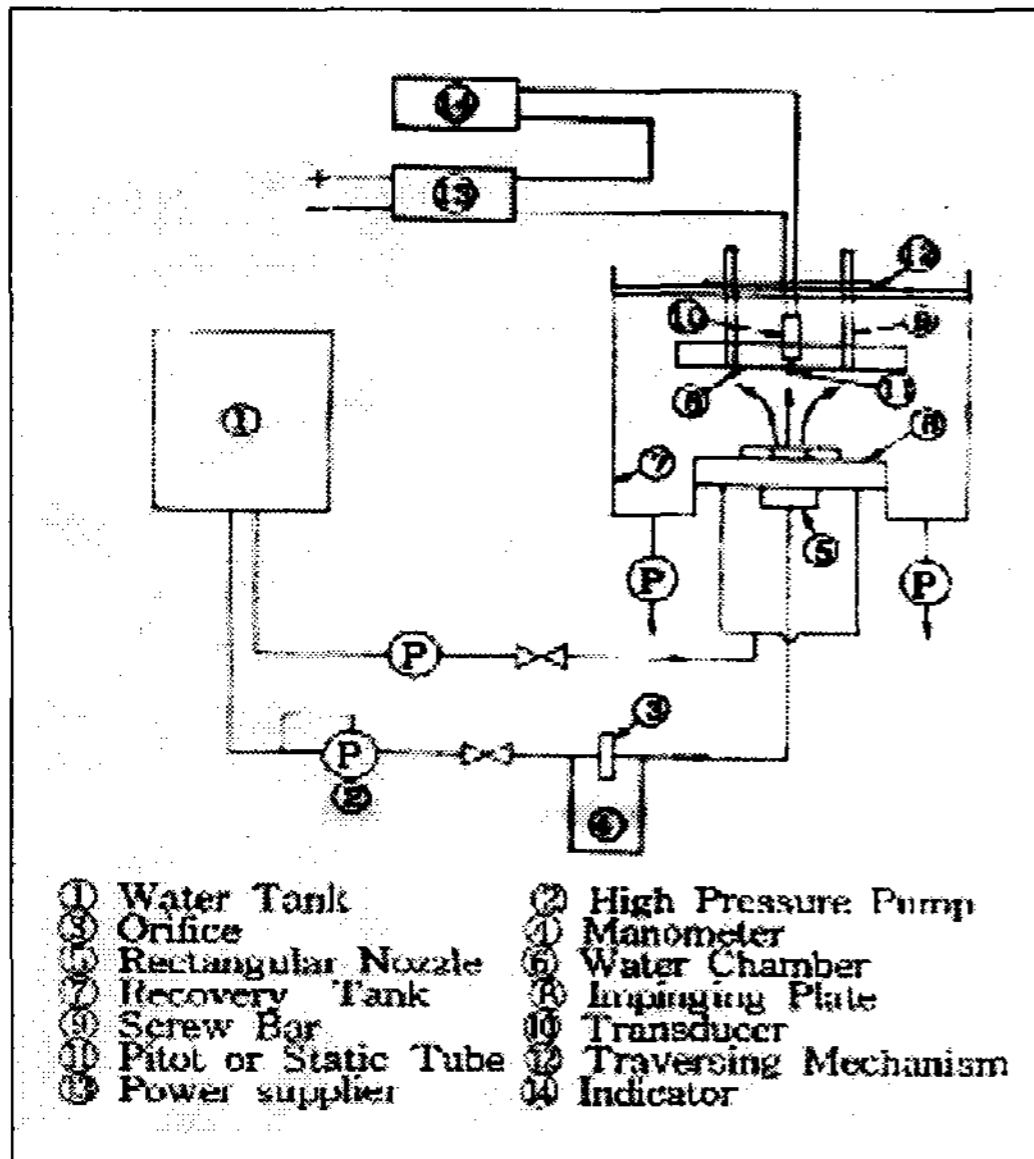


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus for pressure measurements.

는 충돌 영역부터 경계층의 전개는 서브머지드 충돌 분류(Submerged impinging jet)와 자유충돌분류(Free impinging jet)와는 근본적으로 달라서, 전자는 분류가 주위 유체와 확산(Entrainment)으로 인하여 분류 유체가 평판에 충돌하기 전에 유체역학적 및 물질전달의 특성이 변화된다. 이 때 유동은 3개 영역 즉, 자유 분류 영역(Free jet region), 충돌 영역(Impinging jet region)과 충돌 후 분류 유체가 벽면을 따라서 하류로 유동함에 따라 확산되면서 최대 속도가 감소하는 벽면분류 영역(Wall jet region)으로 구분된다.^{6,7)} 그러나 후자는²⁾ 자유분류영역(Free jet region), 분류 중심의 충돌점으로부터 거리(X)가 노즐 출구 단면의 반폭($B_{1/2}$)에 해당하는 거리내의 영역인 정체점 영역(Stagnation region)으로서, 主流速度가 정체점의 零에서 자유속도까지 증가한다. 이 영역에서 X가 $B_{1/2}$ 보다 아주 작은 경우, 주류 속도(U_s)가 X에 따라 선형적으로 증가하는 無限流體(Infinite fluid)의 정체점 흐름으로 近似된다. 그리고 평판 영역(Flat-plate region)은 분류 중심

의 충돌점(정체점)으로부터 거리(X)가 노즐 반폭($B_{1/2}$)보다 큰 이 영역에서는 분류의 주류 속도(U_s)와 自由速度가 같게되는 영역이며 이 영역을 경계층 유동 영역이라 한다. 천이영역(Transition region)은 경계층 두께가 액막 두께와 같게 되는 영역이며, 상사 영역(Similarity region)은 무차원 속도 분포가 변화하지 않고 크기만 변화한다. 수력 도약 영역(Hydraulic jump region)은 평판상의 액막 두께가 갑자기 증가하는 영역이다.

이와같은 충돌 분류 유동장을 지배하는 인자는 압력구배와 충돌판에 형성되는 경계층의 발달, 난류 강도 등에 따라 달라지며, 또한 분류계를 구성하는 분류 형식에 따라 다른 특성을 나타낸다. 이와 같은 특성을 갖는 충돌 분류의 유체역학적인 연구는 Strand⁸⁾가 실시한 이차원 분류의 충돌에서 평판상의 속도 변화 및 압력 구배를 나타내는 이론적 연구를 비롯하여, 永井⁹⁾등은 노즐-충돌면 사이의 거리를 노즐 내경(D)과 동일하게 했을 때, 평면상의 임의의 점에서의 평균유속, 액막 두께 및 천이점에 대한 실험식을 제시하였다.

杜河 등¹⁰⁾은 원주 벽면을 따라서 유동하는 이차원 분류의 流動 特性에서 노즐폭을 변화 시킬때 코안다(Coanda)효과에 의하여 코어(Core)영역은 노즐폭의 증가에 따라 원주벽 근처로 이동된다고 하였다. Rask¹¹⁾는 원주 벽면 분류의 가시화 실험에서 유동을 포텐셜 코어(Potential core)영역, 혼합 영역(Mixing region), 박리점 영역(Separation region), 역류영역(Backflow region)으로 구분하였다. Donaldson 등⁷⁾은 경사 충돌 공기 분류의 연구에서 노즐-충돌판 사이의 일정한 거리에서 평판상의 최대 압력위치에 미치는 경사각의 영향을 고찰하였다. 稻村 등¹²⁾은 자유 경사 충돌 수분류에서 분류가 고체 벽면에 형성된 液膜流의 두께에 대하여 이론해석 및 측정법에 의하여 측정된 結果 액막두께에 큰 차이가 나타났지만, 정성적으로는 같은 경향을 나타내고 있다. 충돌분류에서 분류의 방향이 주로 하향식인데 비하여

Garrad 등¹³⁾은 상향 원형노즐을 이용한 서브머지드 수분류에서 상부의 수면 높이까지 속도 분포를 구하였다.

그러나 장방형 노즐에 의해 보조수 층을 통과한 상향 수분류가 그후 자유분류로서 평판상에 충돌 할 때 압력분포 및 충돌속도에 관한 연구는 아직 보고 되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 축류비가 5이고 형상비가 6.7인 長方形 노즐에 의하여 분사되는 장방형의 3차원 자유 분류의 유동 특성을 구명하기 위해서 노즐-충돌판 사이의 거리 변화에 따라서 보조수를 동반하지 않은 단일수분류 및 보조수 동반 수분류를 충돌시켰을 때, 각각의 노즐출구 속도에 대하여 전압 및 정압 분포를 측정하였다. 이 측정 압력으로부터 분류의 유동 방향으로의 정체점에서의 충돌속도와, 노즐로부터 일정한 도달거리를 갖는 위치에서 충돌판 상에서 정압이 0이 되는 거리인 충돌 반폭을 측정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

노즐의 축류비와 노즐 출구 형상비가 각각 5와 6.7인 장방형 노즐을 이용하여 三次元의 연직 상향 장방형 수분류의 충돌 압력 분포를 측정하는 실험을 수행하였다. 즉 노즐과 충돌판과의 거리(Z/B), 장방형의 노즐로부터 분사되는 주분류가 일정한 깊이로 되어 있는 보조수층을 통과하여 주분류와 보조수의 혼합에 의한 서브머지드 효과를 발휘하게 하는 보조수층 높이(S/B), 노즐 출구 속도(V_0)에 대하여 衝突板上에서의 무차원 정체점 선상의 X/B, Y/B의 각 위치에 대하여 전압과 정압을 3차원 직각 좌표 상에서 측정하였다.

자유분류와 서브머지드 분류가 혼합된 분류의 압력분포를 측정하는 3차원 압력측정 실험장치는 Fig. 3와 같다.

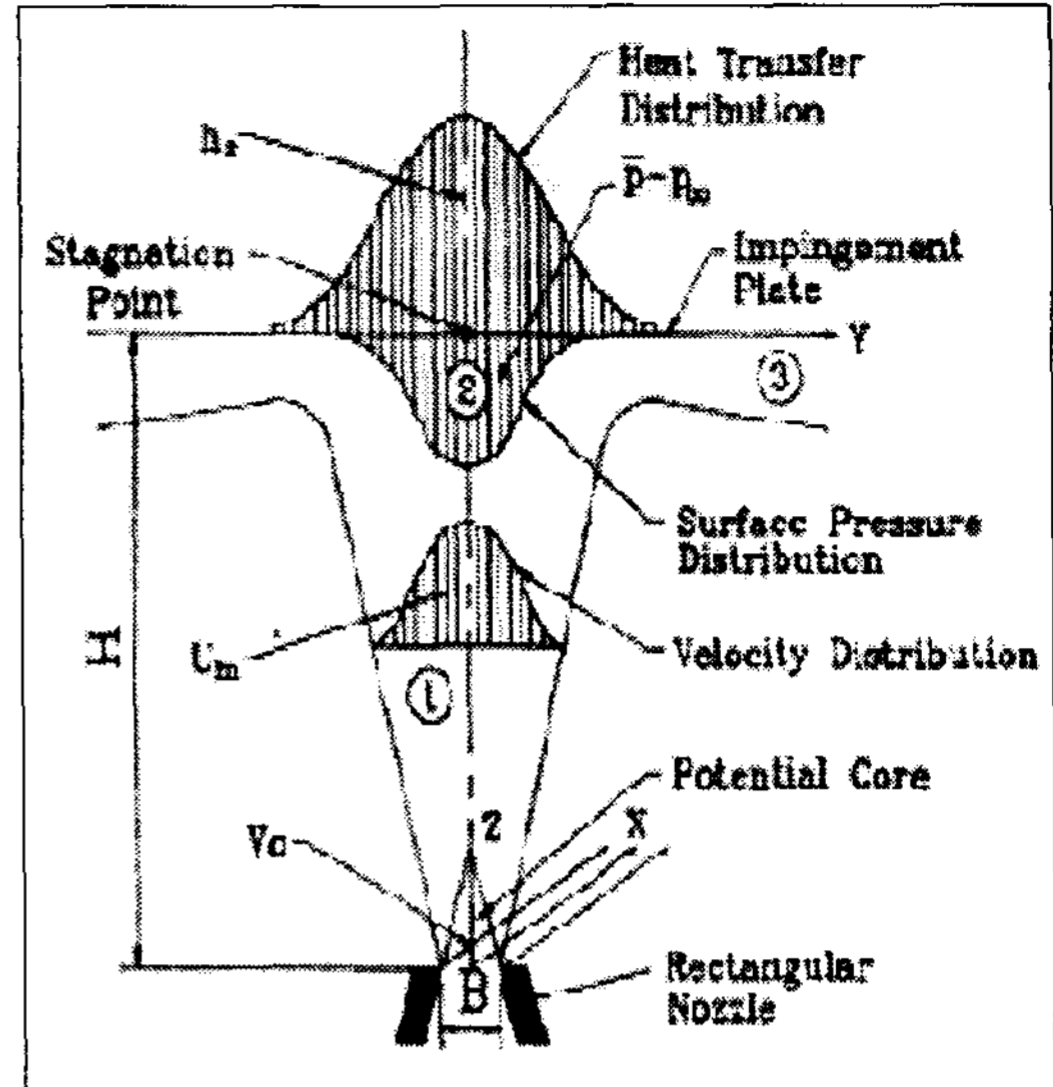


Fig. 3. Free impingement water jet configuration in the upward 3-dimensional coordinate system.

그림에서 저장수조 ①에서 상온의 물을 주펌프 (Wescon, SF-3700, 5HP, 1720rpm) ②를 이용하여 加壓하며, 이 때 펌프에서 발생하는 높은 축회전으로 말미암아 발생하는 진동이 분류에 영향을 주는것을 최소한 방지하기 위해서 고압펌프의 설치시 방진 시설과 플렉시블 조인트를 하였다. 가압수는 오리피스(NO. SS-29-101, YAMATAKE) ③을 통과하여 長方形 노즐 ⑤에서 분출 된다. 이 때 노즐출구에서의 噴流速度는 오리피스③의 전후의 壓力差를 마노미터④에 나타난 수은 액주차에 의하여 계산하였다. 노즐에서 분출된 自由噴流와 衝突噴流의 유동형태는 Fig. 1과 2에 나타낸 바와 같이 삼차원성을 갖고 있으므로, 투명아크릴(200×160×10)로 제작된 충돌판⑧은 삼차원 공간내의 좌표로 이동이 가능하도록 설계하였다. 즉 노즐과 충돌판 사이의 거리(Z)는 4개의 Z방향 이송봉⑨를 충돌판에 설치하여 연직으로 이동되도록 하였으며, 일정한 노즐-충돌판 사이의 도달거리에서 X, Y방향의 측정거리의 이동은 좌표 이동 장치⑩를 이용하였다. 결국 충돌판

⑧은 ⑨, ⑫에 의하여 Fig. 2와 같은 3차원 X, Y, Z 공간내에서의 이동이 가능하게 된다.

보조수를 사용하는 경우는 장방형의 노즐⑤로부터 분사되는 주분류가 분출하는 동안 보조 수조⑥에 일정한 높이의 보조수층 높이가 되도록 유량을 조절하여, 주분류가 보조 수조⑥의 보조 수층을 통과하면서 자유분류는 서브머지드 효과에 의하여 주위의 보조수와 혼합 확산되어 분출되므로, 이때 소비된 유량 만큼 계속하여 보조 수조내의 유량을 공급함으로써 보조 수조내의 보조 수층 높이를 일정하게 유지 시킨다.

그리고 자유 분류가 충돌하는 충돌면상에서 압력을 測定하기 위하여 노즐의 기하학적 圖心의 연장선위에 충돌판의 도심이 일치되도록 하고, 충돌판상의 도심에 $\phi 1.25\text{mm}$ 의 구멍을 뚫고, 이곳에 全壓 및 靜壓 測定用 피토크관⑩을 插入하였다. 충돌 압력은 피토크관⑩에 연결된 압력 트랜스듀서(PT-100) ⑩에서 발생한 起電力을 인디케이터⑭에서 측정하였다.

本 實驗에서 사용된 장방형 노즐⑤는 배관과 노즐을 연결시키는 디퓨저에 연결되며, 디퓨저로부터 노즐의 입구와 출구는 장방형의 단면 형상을 갖는다. 이러한 장방형 노즐은 박리나 이차류의 발생이 일어나지 않도록 하기 위하여 축류비를 5로 하였고, 노즐 출구 단면에서 긴변길이(L)와 짧은변 길이(B)가 각각 20 mm, 3 mm, 노즐입구에서 출구까지의 노즐 길이(L_N)는 50 mm로 하였다. 또한 노즐출구에서 균일한 속도분포가 얻어지도록 식(1)과 같은 정현 곡선식을 사용하여 노즐의 내부 벽면을 설계하여 제작하였다.

$$H_i = \frac{H_{in} + H_{out}}{2} + \frac{H_{in} - H_{out}}{2} \sin\left(0.5 - \frac{L_i}{L_N}\right)\pi \quad (1)$$

H_i: 노즐의 입구에서 i등분제 요소의 노즐 높이[mm]
 H_{in}, H_{out}: 노즐의 입구 높이[15mm]와 출구 높이[3mm]
 L_i: 노즐 입구 위치에서 i번째 요소까지의 길이[mm]

본 실험에서 상대 좌표계의 정의는 Fig. 1과 Fig. 2의 삼차원 자유 분류와 三次元 自由 衝突 噴流의 구조에 나타난 바와 같이 장방형 분류의 기하학적 도심을 원점으로 하여 분류의 하류방향, 즉 노즐에서 충돌판까지의 거리를 Z, 충돌판의 圖心(노즐도심)에서 충돌판(노즐)길이 방향을 X 방향, 충돌판(노즐)의 폭 방향을 Y방향으로 정하고, X=Y=0, 즉 충돌판의 기하학적 도심은 정체점(Stagnation point)을 나타낸다. 이와 같은, X, Y, Z 방향의 거리는 장방형 노즐의 幅(B)로 무차원화 하여 무차원 좌표계 X/B, Y/B, Z/B로 나타내었다. 또한 보조수를 사용하는 경우 보조 수조내의 자유 수면까지의 수심을 무차원화한 보조수 층 높이는 S/B로 表示하였다.

연직 상향의 좌표 이동계에서 Fig. 3의 좌표 이송장치⑫는 충돌면의 X,Y좌표 이송시에 정밀성을 기하기 위하여 내외 프레임을 만들고, X방향 이송은 외부 프레임에 고정된 마이크로미터를 이용하여 내부프레임을 이송하였다. Y방향의 이송은 내부 프레임에 고정된 마이크로미터를 이용하여 중앙 내부의 프레임을 이송함으로써 요구하는 X,Y 좌표상에 충돌면을 고정하였다. 또한 장방형 노즐-충돌판간 거리(Z)는 스크루바를 이용하여 조정하였으며, 정확한 그 간격하이트 게이지로 검증하였다.

3. 실험결과 및 고찰

삼차원 자유 수분류를 연직 상향으로 충돌판에 충돌시켰을 때 충돌판상에서 분류 방향의 압력 분포 특성을 고찰하기 위하여 충돌판을 Fig. 1과 같은 삼차원 자유분류의 제2영역인 二次元 特性 감쇄영역(Fig. 1에서 a→b 영역)내에 설치하였을 때, 일반적으로 Fig. 2의 ②領域에 표시한 정압 분포를 갖는 것으로 알려지고 있다.

壓力은 X/B, Y/B, Z/B, S/B 및 噴流 速度를

실험변수로 하고 충돌판상의 도심에서 X, Y방향으로 충돌판 직전에서의 정체점선을 따라서 全壓(P_t)과 靜壓(P_s)을 측정하였다.

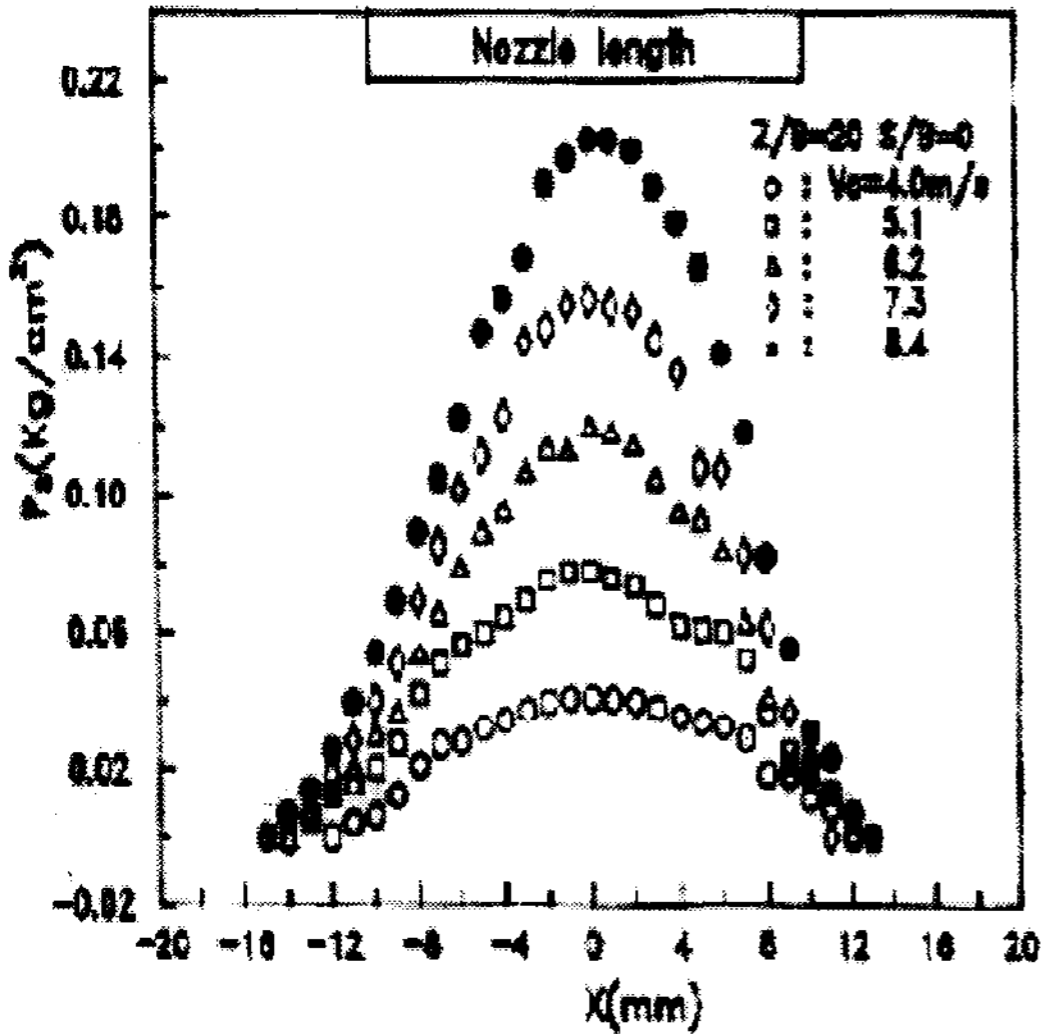


Fig. 4. Static pressure distributions along the impingement surface for $Z/B=20$ and $S/B=0$ in X-direction.

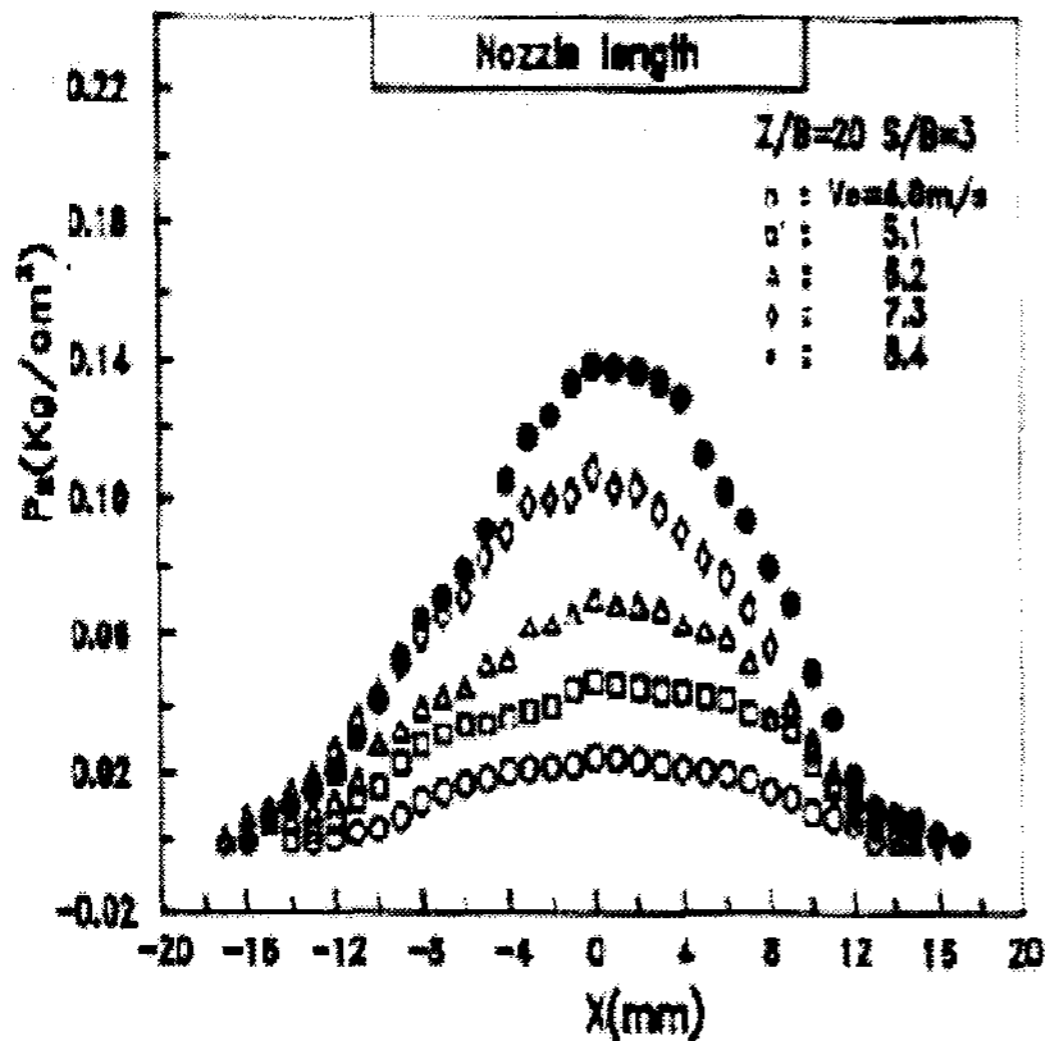


Fig. 5. Static pressure distributions along the impingement surface for $Z/B=20$ and $S/B=3$ in X-direction.

Fig. 4는 노즐-전열면간 사이의 도달거리(Z/B)가 20이고, 보조수를 사용하지 않은 單一水噴流($S/B=0$)의 조건에서 충돌판상의 정체점선 즉 $Z/B=20, Y=0$ 인 상태에서 여러 가지 噴流 速度에 대하여 노즐의 긴변 방향(X방향)으로의 靜壓 分布를 나타낸 것이다. 이 선도에서 동일한 속도 조건에서 최고 압력을 나타내는 정체점을 기준으로 대칭형의 靜壓 分布를 나타내고 있으며, 또한 분류 속도가 증가하면 충돌판상에서 靜壓도 증가하고 있으나, 정체점 근방에서는 분류속도의 증가에 따라 정압의 증가율이 높고 정체점에서 멀어질수록 국소 위치에서는 속도변화에 대한 정압 증가율이 둔화되어 정압이 零이 되는 領域에서는 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 이 때 기하학적 도심의 최고 압력을 나타내는 정체점으로부터 거리 X가 증가함에 따라서 靜壓이 감소되어 어떤 국소위치 X에서 정압이 零이 되는 X방향 국소 위치를 충돌 반폭($1/2$)이라 정의하며, 이 영역을 충돌영역이라 칭하기로 한다. 충돌 반폭은 모든 속도 조건에서 약 14mm 이므로 충돌폭은 약 28mm 이다.

마찬가지로 Fig. 5는 노보조수를 사용한 경우로서 노즐-충돌판 사이의 거리 $Z/B=20$ 이고 무차원의 보조수층 높이가 $S/B=3$ 일 때, 속도의 영향을 나타낸 선도이다. $S/B=0$ 인 그림4에 비하여 속도의 증가율에 따른 靜壓의 증가율은 주분류가 보조수층을 통과하면서 운동량이 감소되어 全般적으로 작게 나타나고 있으며, 동일한 노즐출구 速度에 대하여 정체점 압력은 감소하였으나, 충돌 영역은 -16 mm에서 +16 mm로서 좌우로 약간 增大되어 보조수를 사용함에 따라 충돌 반폭이 증대함을 알 수 있다. Fig. 6은 노즐-충돌판 사이의 도달거리 $Z/B=20$ 이고 噴流 速度 8.4 m/s로 일정한 상태에서 단일 수분류가 補助水를 동반하여 서브머지드에 의한 분류의 확산 효과를 나타내게 하는 경우에 보조수층의 높이의 影響을 나타낸 것이다. 이 靜壓 分布에서 정체점 부근에

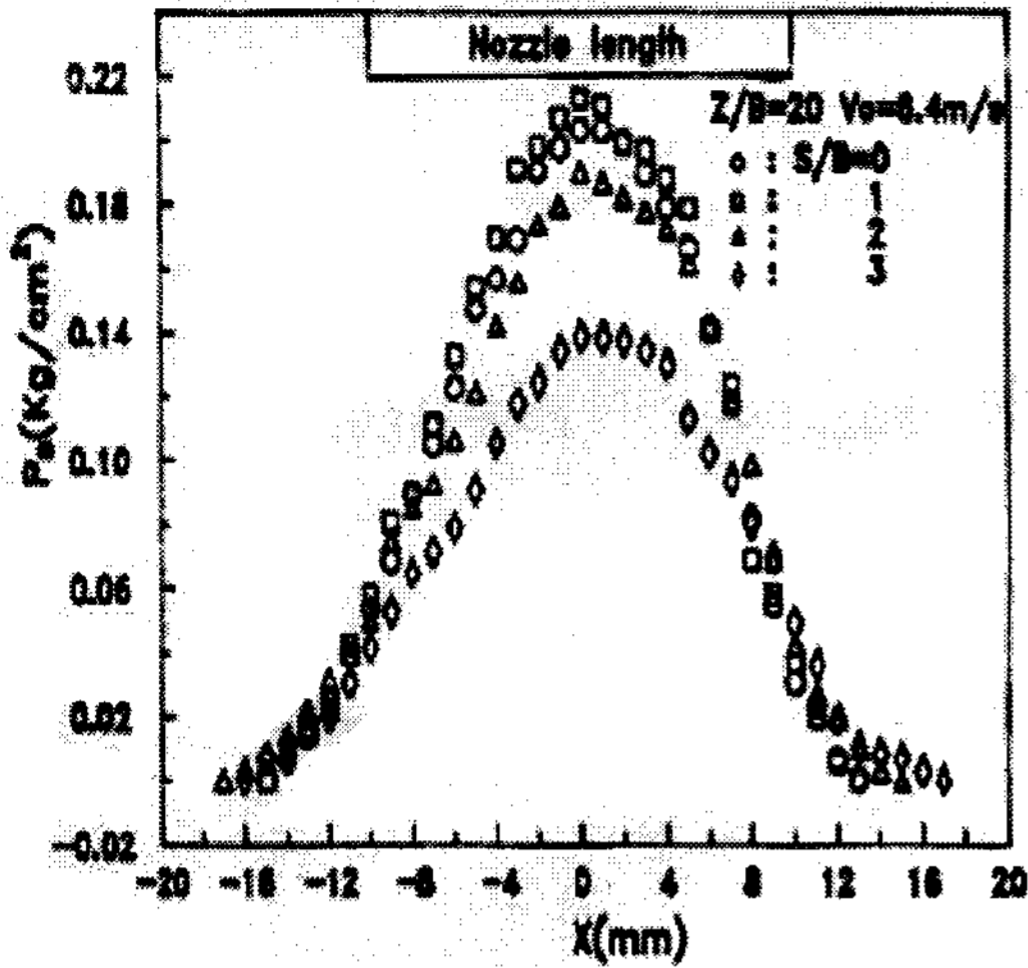


Fig. 6. Static pressure distributions along the impingement surface for $Z/B = 20$ and $V_0 = 8.4\text{m/s}$ in X-direction.

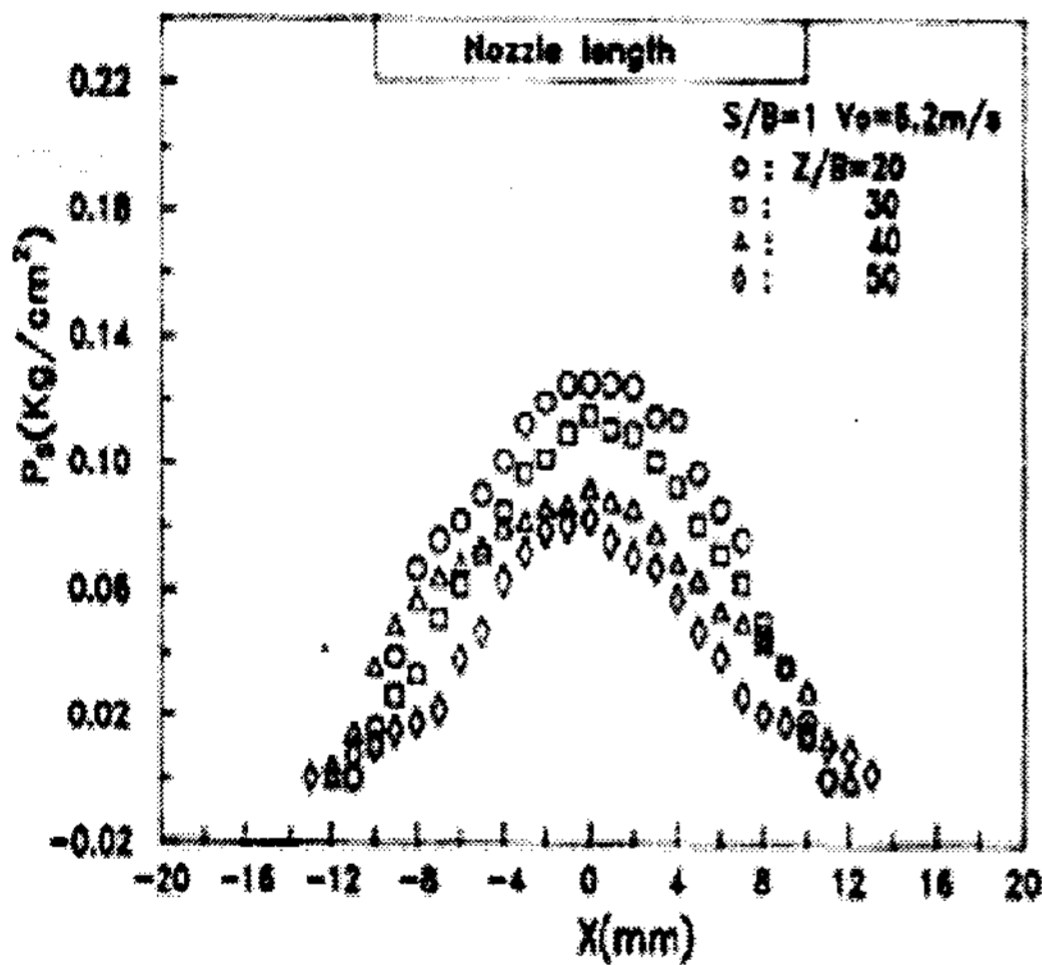


Fig. 7. Static pressure distributions along the impingement surface for $S/B = 1$ and $V_0 = 6.2\text{m/s}$ in X-direction.

서는 補助水를 사용한 경우인 $S/B = 1$ 에서 단일 수분류($S/B = 0$)의 경우 보다 靜壓이 더 높게 나타나고 있어, 적절한 보조수층 높이에서는 정체점 근방에서 압력 상승 효과가 있음을 알았다. 반면에 X가 증가함에 따라 전압은 X가 4~10

mm 사이에서는 다소 급격한 감소를 나타내고, $X = 10\text{mm}$ 근방에서는 S/B 의 영향이 다소 둔화되어 완만한 정압의 감소를 나타낸다. Fig. 7은 $S/B = 1$, $V_0 = 6.2\text{m/s}$ 로 일정한 상태에서 노즐-충돌판 사이의 거리(Z/B)가 정압분포에 미치는 영향을 나타낸것으로서, 모든 X범위에서 Z/B 가 증가하면 衝突板 위의 국소 정압은 전반적으로 감소하는 경향이 있다.

Fig. 8은 노즐의 짧은 변 方向, 즉 Y방향에 관한 靜壓 分布로서 노즐의 긴변 方向에 관한 경향과 유사하며, $Z/B = 40$, $S/B = 0$ 으로 일정한 상태에서 噴流速度의 영향을 나타내고 있다. 이 선도에서 정체점 주위에서는 속도의 증가에 따른 압력의 증가율이 현저히 높게 나타나고 있으며, 충돌판상의 하류 영역으로 갈수록 속도의 증가에 따른 靜壓의 增加는 작게 나타나고 있다. 그러나 노즐폭 방향의 충돌 영역은 분류속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이 선도에서 충돌폭은 $-4\text{mm} \leq Y \leq 4\text{mm}$ 의 범위로서 노즐의 짧은변 方向(Y방향)에서 충돌 반폭은 4mm, 충돌폭은 8mm 정도이다. Fig. 9에는 $Z/B = 20$, $V_0 = 7.3\text{m/s}$ 인 상태에서 補助水層 깊이의 영향을 나타낸 線圖이다. Y방향의 靜壓 分布에서도 X방향과 마찬가지로 보조수층 높이가 $S/B = 1$ 인 조건에서 정체점 부근의 靜壓이 가장 높게 나타나고 있으며, 보조수층 높이가 增加하면 衝突 領域이 다소 증대하고 있다.

Fig. 10은 보조수를 사용하지 않은 단일 수분류 $S/B = 0$, $V_0 = 7.3\text{m/s}$ 로 일정한 상태에서 Y방향에서의 정압 분포를 노즐-충돌판 사이의 도달거리인 Z/B 의 영향을 나타낸 線圖이다. 이 그림에서 Z/B 가 증가함에 따라 정체점 근방 영역($-1\text{mm} \leq Y \leq 1\text{mm}$)에서는 노즐-충돌판간 거리가 증대함에 따라 정압의 감소 현상을 나타내고 있다. 그러나 Y가 증가함에 따라 Z/B 의 변화에 다른 정압의 변화는 불규칙한 변화를 나타내지만 정압이 영이되는 衝突 領域은 다소 증가하는 경

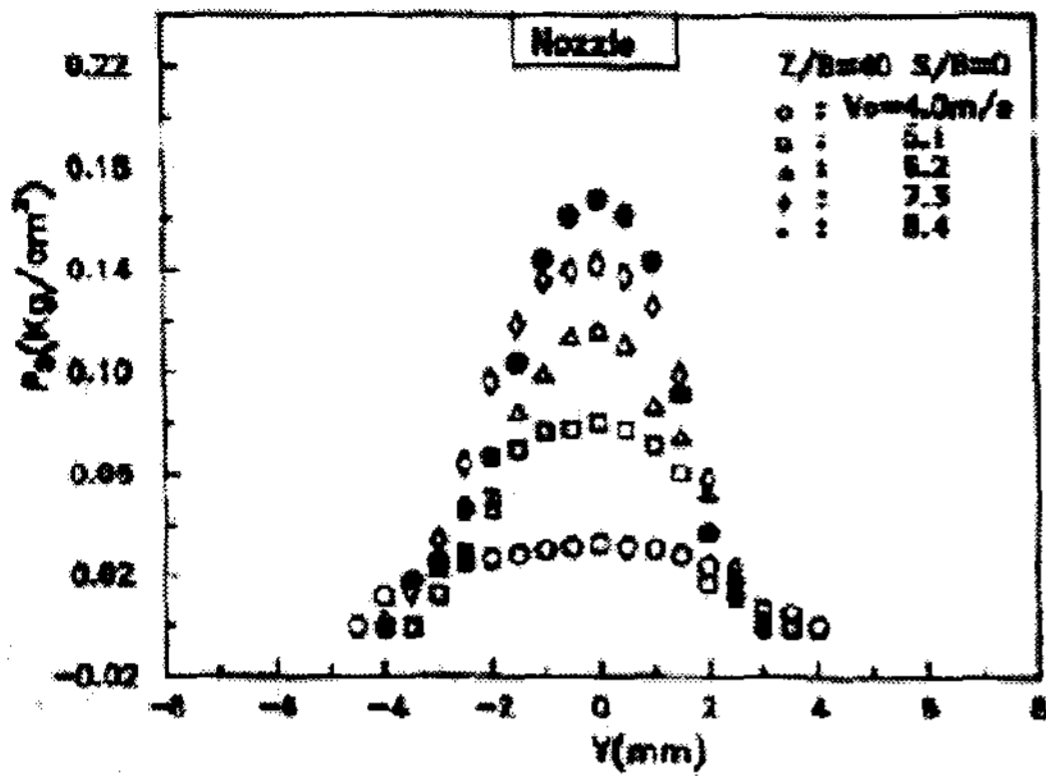


Fig. 8. Static pressure distributions for $Z/B = 40$ and $S/B = 0$ in Y-direction.

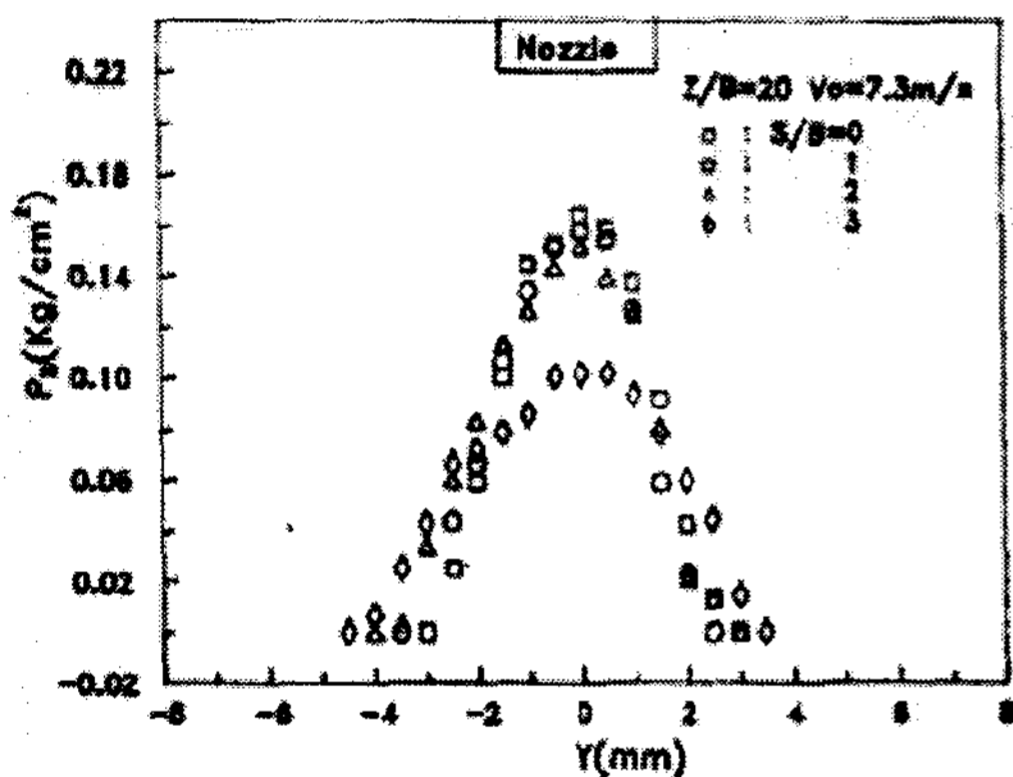


Fig. 9. Static pressure distributions for $Z/B = 20$ and $Vo = 7.3\text{m/s}$ in Y-direction.

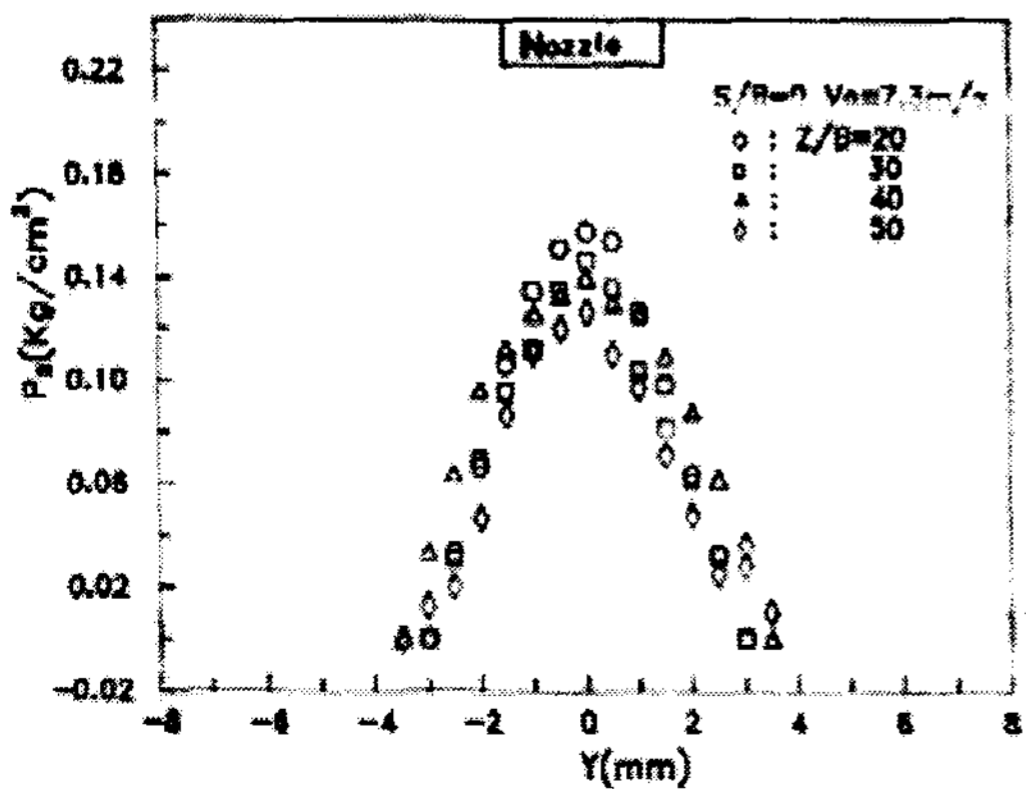


Fig. 10. Static pressure distributions for various Z/B in Y-direction.

향을 나타낸다.

노즐의 긴변 방향(X방향)과 짧은변 방향(Y방향)의 충돌 반폭인 $l_{1/2}$, $b_{1/2}$ 을 노즐의 짧은변 길이(B)로 무차원화 했을 때, 무차원 충돌 반폭의 범위는 Fig. 4~Fig. 10에서 살펴본 바와 같이 본 실험 범위내에서 다음과 같이 表示된다.

X방향 무차원 충돌 반폭:

$$l_{1/2}/B = 4.27 \pm 0.46 \quad (2)$$

Y방향 무차원 충돌 반폭:

$$b_{1/2}/B = 1.23 \pm 0.20 \quad (3)$$

式(2), (3)에서 노즐-충돌판 사이의 거리와 보조수층 높이, 분류 속도는 충돌 반폭에 약간의 영향을 미치고 있으며, 그 편차는 이들 변수의 영향을 나타내고 있다. 또한 분류의 충돌반폭의 편차를 발생시키는 요인은, 분류중의 와구조에 의해 비대칭성으로 되며¹⁴⁾ 또한 가압 펌프에서 전해지는 진동에 의해 분류의 단면내에서 등압력선의 이동에 의해서도 비대칭성이 나타나는 것으로 추론 된다. 이와 같은 원인에 의하여 幾何學的 정체점과 분류의 충돌판에서 최대 압력점에 해당하는 정체점과는 아주 미소한 차이가 있지만 噴流의 와류 발생이나 전파되는 噴流의 振動은 이력 현상(hysteresis)이므로 본 연구에서는 일치하는 것으로 간주하였다.

Fig. 4~Fig. 10에 나타난 바와 같이 X방향 및 Y방향의 靜壓을 각각의 조건에서 충돌판상의 국소 정압을 최대 압력점인 정체점의 압력(P_{os})으로 無次元化 시키고, 또한 X방향, Y방향의 국소 좌표를 각각의 조건에서 X방향 충돌 반폭($l_{1/2}$) 및 Y방향 충돌 반폭($b_{1/2}$)으로 無次元化 하였을 때, Fig. 11은 X-방향의 停滯點線을 따라서, Fig. 12는 Y-방향의 정체점선을 따라서 정압분포를 나타낸 것으로서 무차원 정압분포(P_s/P_{os})는 가우스의 正規分布(Gaussian distribution)의 형상을 나타내고 있다. 이 선도에서 무차원 정압 분포를 나타내는 관계식은 X, Y방향의 각각에 대하여, 노

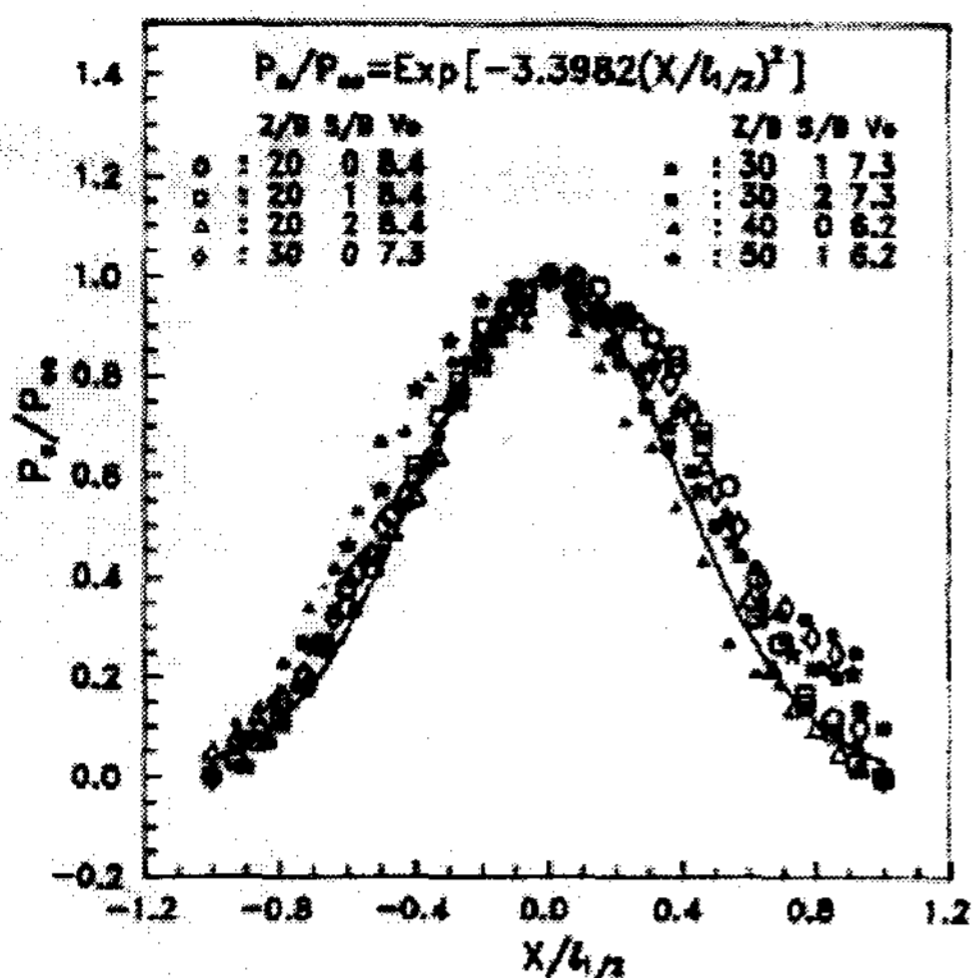


Fig. 11. Nondimensional static pressure distributions in X-direction.

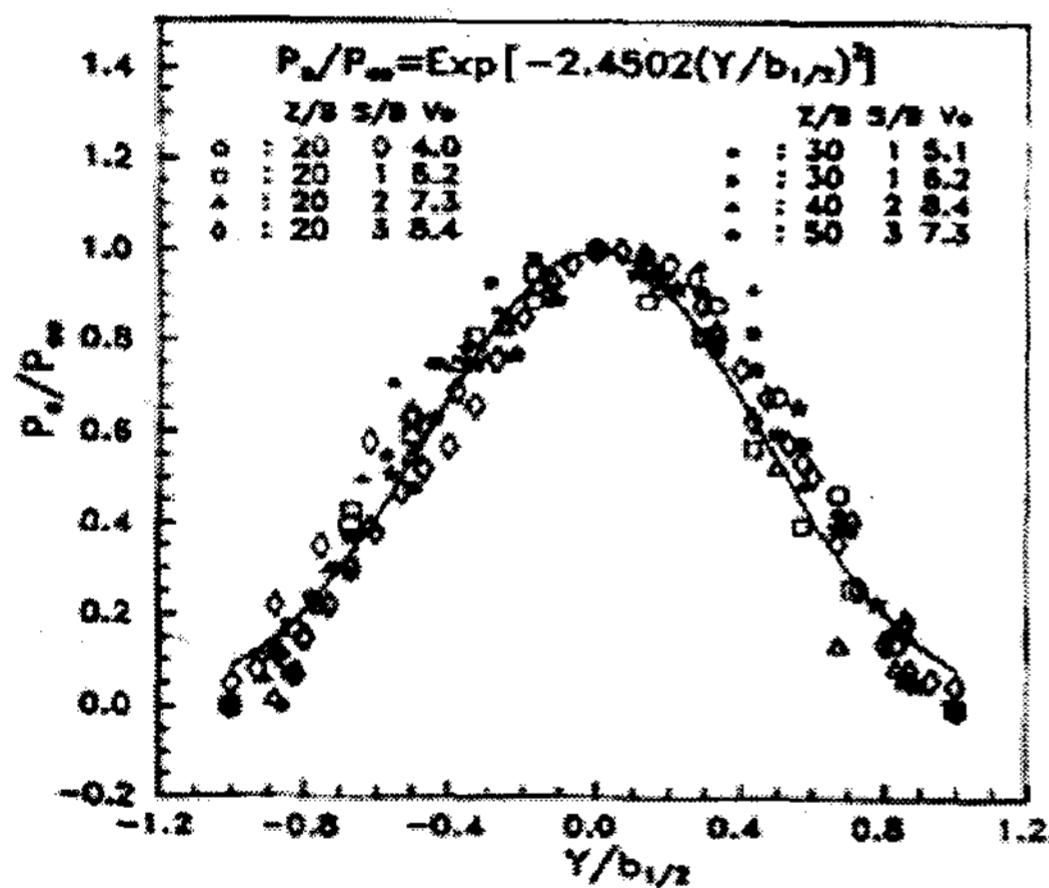


Fig. 12. Nondimensional static pressure distributions in Y-direction.

즐-충돌판 사이의 도달거리, 보조수층 높이, 분류 속도에 관계없이 다음식으로 나타낼 수 있다.

X방향의 무차원 정압 분포:

$$\frac{P_s}{P_{os}} = e^{[-3.3982(X/l_{1/2})^2]} \quad (4)$$

Y방향의 무차원 정압 분포:

$$\frac{P_s}{P_{os}} = e^{[-2.4502(Y/b_{1/2})^2]} \quad (5)$$

또한 본 연구에서는 Fig. 1의 (A)에서 나타낸 바와 같이 즉 \overline{OZ} 의 중심선을 따라서 측정된 분류의 축선상에서 충돌 속도(V_{ci})를 충돌판 직전에서 전압과 정압의 차이 동압으로 구한 噴流의 軸方向 速度로 정의 하여 다음의 식으로 구하였다.

$$V_{ci} = \sqrt{\frac{2g(P_{ot} - P_s)}{\gamma_w}} \quad (6)$$

실험에서 측정된 정압과 전압에 의하여 식(6)으로 계산한 분류의 축선상에서의 충돌속도는 노즐-충돌판 사이의 거리(Z/B)의 증가에 따라 감소한다. 그 減少率을 검토하기 위하여, 종축은 분류 축선상의 충돌 속도(V_{ci})를 노즐 출구 속도(V_0)로 무차원화하여 표시하고, 횡축에는 노즐-충돌판 사이의 도달거리 Z/B 로 취했을 때, Fig. 13은 보조수를 사용하지 않은 $S/B=0$ 인 경우에 분류속도의 변화에 관계없이, Fig. 14는 일정한 噴流速度의 경우에 보조수 층의 변화에 관계없이 분류 축선상의 무차원 충돌속도(V_{ci}/V_0)는 유사한 변화율을 갖는다. 따라서 본 실험의 모든 速度 및 補助水 層에 대하여 圖式해 본 결과 Fig. 15와 같은 에러바의 精度에서 Z/B 의 변화에 따른 충돌속도의 관계식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{V_{ci}}{V_0} = 1.48513 \left(\frac{Z}{B}\right)^{-0.31} \quad (7)$$

式(7)에서 분류 축선상 거리 즉 노즐-충돌판간 거리가 증가함에 따라 본 실험에서의 감소 기울기는 -0.31로 나타났다. Trentacoste³⁾는 노즐의 형상비 $Ar=10$ 인 장방형 노즐을 이용한 자유 분류 실험에서 제2영역에서 -0.33, 제3영역에서는 -1로 나타내고 있으며, 제2영역의 감소기울기가 본 실험의 값과 근사함을 알 수 있다.

따라서 본 실험의 경우는 장방형 노즐의 형상비가 6.7이라는 점과 감소 기울기가 -0.31이라는 점을 감안하면 노즐-충돌판 사이의 거리가 본 실험

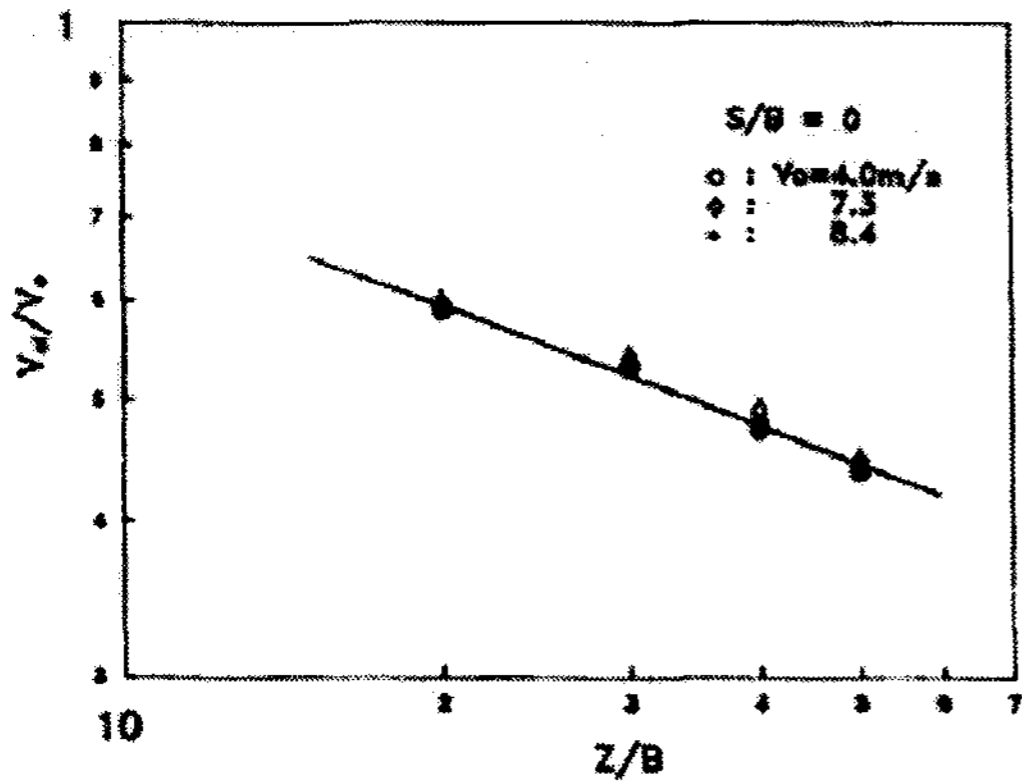


Fig. 13. Decay of axial impingement jet velocity in stagnation point($S/B = 0$).

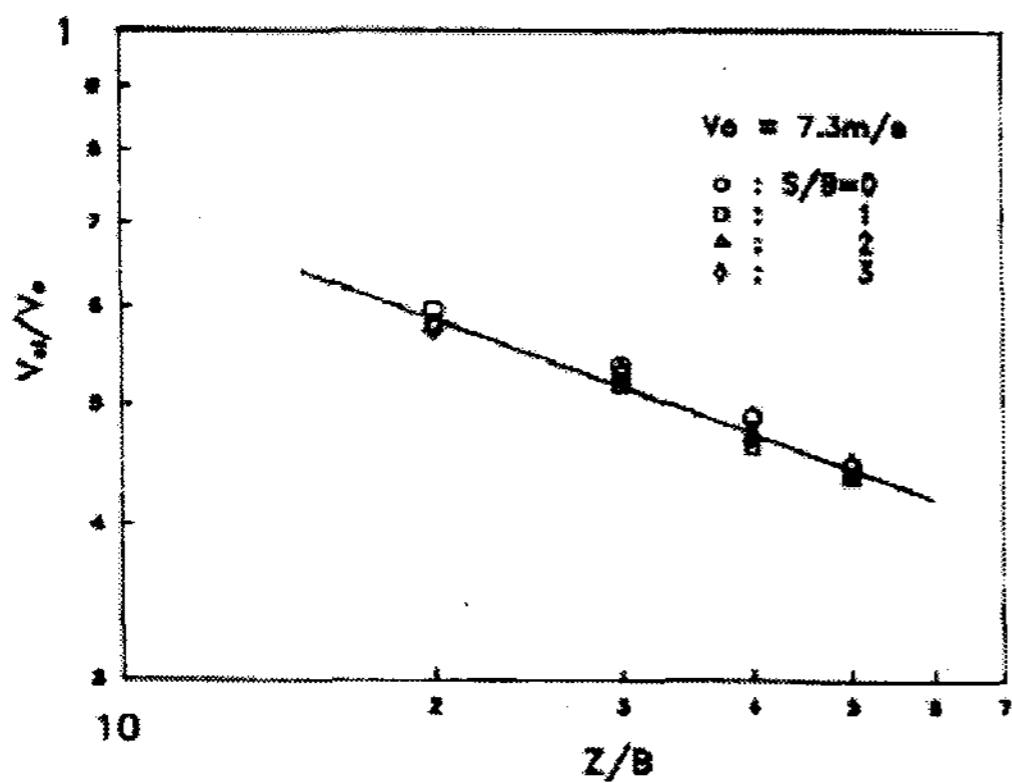


Fig. 14. Decay of axial impingement jet velocity in stagnation point($V_0 = 7.3\text{m/s}$).

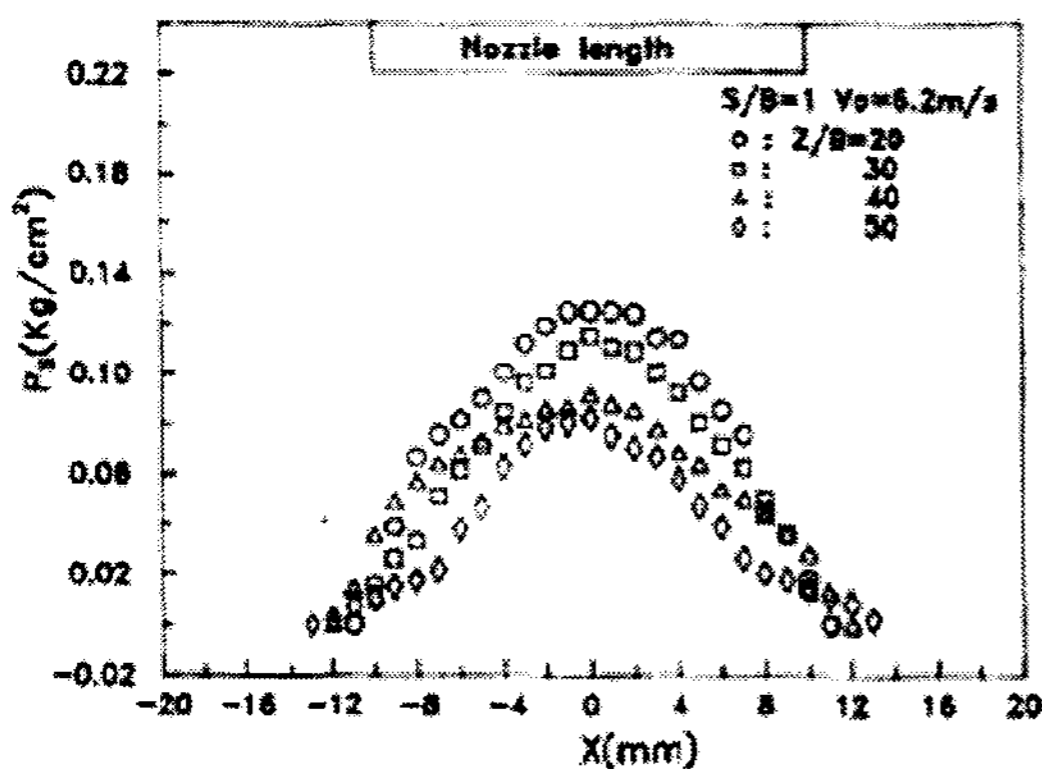


Fig. 15. Decay of axial impingement velocity along the center line of the impinging jet for various V_0 and S/B .

힘의 범위인 $Z/B=20\sim50$ 의 영역은 三次元 自由 噴流의 제2영역, 즉 특성감쇄영역의 흐름 특성과 일치한다고 생각된다.

4. 결 론

본 논문은 연직 상향의 단일 수분류($S/B=0$) 및 보조수 동반 수분류의 三次元 自由 衝突 水噴流의 압력 분포 특성에 관한 실험에서, 충돌판이 삼차원 자유 분류의 이차원 분류형 감쇄영역내에 있을 때, 정체점을 중심으로 충돌 분류의 정압분포를 노즐의 긴변 방향과 짧은변 방향으로 측정하였다. 또한 분류의 중심선의 유동방향으로 노즐과 충돌 판 사이의 거리에 따른 분류의 충돌 속도에 대한 실험적 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 충돌판 直前에서 정압 분포는 정체점을 기준으로 對稱形의 壓力 分布를 나타낸다.
- (2) 노즐-衝突板 사이의 거리, 보조수 층의 높이 및 분류 속도는 충돌 반쪽에 큰 영향을 주지 않았다.
- (3) 충돌 반쪽을 노즐 쪽으로 무차원화 했을 때 X방향 및 Y방향의 무차원 충돌 반쪽을 정량화 하였다.
- (4) 정체점을 포함하는 분류의 중심선상에서 X-방향 및 Y-방향의 무차원 정압분포는 가우스의 정규분포(Gaussian distribution)형상으로 나타나며 그 분포식은 각각 식(4) 및 식(5)로 표시 할 수 있다.
- (5) 분류의 축선상에서 무차원 충돌속도는 노즐-충돌판 사이의 거리가 증가함에 따라 식(7)과 같이 감소하며, 그 감소 기울기 -0.31 은 본 실험 범위에서 삼차원 자유분류의 제2영역인 특성 감쇄영역의 유동 특성을 갖는다.

참 고 문 헌

1. J. Stevens and B. W. Webb, 1991, "Local Heat Transfer Coefficients Under an Axisymmetric, Single Phase Liquid Jet," *Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.113, pp.71~78.
2. X. S. Wang, Z. Dagan and L. M. Jiji, 1989, "Heat transfer between a circular free impinging jet, and a solid surface with nonuniform wall temperature or wall heat flux -1. Solution for the stagnation region," *Int.J. Heat Mass Transfer*, Vol.32, No.7, pp.1351~1360.
3. Trentacoste, N. and Sforza, M.P., 1967, "Further experimental results for three dimensional free jets," *AIAA Journal*, Vol. 5, pp.885~891.
4. A. Krothapalli, D. Baganoff and K. Karamcheti, 1981, "On the mixing of a rectangular jet," *J. Fluid Mech.*, Vol.107, pp.201~220.
5. N. Rajaratnam, 1976, *Turbulent Jets*, Elsevier, Amsterdam, pp. 267~292.
6. M. D. Deshpande and R. N. Vaishnav, 1982, "Submerged laminar jet impingement on a plane," *J. Fluid Mech.*, Vol.114, pp.213~236.
7. C.D. Donaldson and R.S. Snedeker, 1971, "A study of free jet impingement. Part1. Mean properties of free and impinging jets.," *J. Fluid Mech.*, Vol. 45, Part 2, pp.281~319.
8. T. Strand, 1962, "Inviscid-Incompressible-Flow Theory of Static Two Dimensional Solid Jets in Proximity to the Ground," *J. Aerospace Science*, 29-2, pp.170~174.
9. 永井四郎, 河合彌, 谷口熏, 1955, "水噴流による冷却について," 『日本機械學會論文集』(第2部), 21卷 104號, pp.310~315.
10. 杜河內 敏彦, 小野原 美德, 加藤 征三, 1988, "圓柱壁面に沿う噴流の流動特性(第1報, 速度および壓力分布)," 『日本機械學會論文集』(B編), 54卷, 500號, pp.783~790.
11. R. B. Rask, R. J. Goldstein and M.Y. Jabbari, 1990, "Flow and Mass Transfer in a Curved Wall Jet," *Proc. 9th Int. Heat Transfer Conf.*, Jerusalem, pp.377~382.
12. 稻村隆夫, 永井伸樹, 砂永秀明, 増淵匡彦, 1991, "液體噴流の壁面衝突によって形成される液膜の拳動に關する研究(第1報, 單一噴流の斜め衝突による壁面上の液膜厚さの變化)," 『日本機械學會論文集』(B篇), 57卷 536號, pp.1327~1331.
13. A. D. Garrad and M.A. Patrick, 1983, "The Velocity field produced by a submerged jet directed upwards at a free surface," *Int.J. Heat Mass Transfer*, Vol.26, No.7, pp.1029~1036.
14. 豊田國昭, F. Hussain, 1989, "非圓形噴流中の渦構造に關する研究," 『日本機械學會論文集』(B編), 55卷, 514號, pp.1542~1545.

A Study on the Characteristic of Impinging Pressure Distribution in the Three Dimensional Impinging Water Jet

J. S. Lee^{*}, K. K. Choi^{**}

^{*} *Andong Institute of Infor. Tech*

^{**} *Incheon University*

Abstract

The purpose of this research is to investigate the characteristics of static and total pressure distribution in the upward free water jet system impinged on a downward flat plate. The rectangular nozzle was used and its contraction and aspect ratio was five and about seven respectively. Experimental conditions considered were jet velocity, distance between nozzle and flat plate, height of supplementary water.

It was founded that pressure distribution on the flat plate had the Gaussian curve when the pressure at stagnation point and impinging half width were chosen as the scaling parameters. The maximum pressure was shown at the stagnation point. The central impingement velocity decreased with the increment of distance between nozzle and flat plate, and its slop of decay was similar to that of characteristics decay region in the three-dimensional free jet.