

<論 文>

# 凝縮을 隨伴하는 超音速 노즐흐름의 全壓損失

姜 昌 壽\* · 權 純 範\*

(1988年 2月 13日 接受)

## Total Pressure Loss in a Supersonic Nozzle Flow with Condensation

Chang Soo Kang and Soon Bum Kwon

**Key Words** : Compressible fluid(壓縮性 流體), Homogeneous Condensation(均一凝縮), Total Pressure Loss(全壓損失), Condensation Shock Wave(凝縮衝擊波), Supersonic Nozzle Flow(超音速 노즐흐름)

### Abstract

A rapid expansion of moist air or steam in a supersonic nozzle gives rise to condensation, and the total pressure of the flow is decreased due to this irreversibility of condensation phenomenon. In the present paper, the loss in total pressure during the condensation process has been studied, by numerical analysis and pressure measurement, in the case of moist air expanding in a supersonic nozzle. The effects of the degree of supersaturation at the stagnation condition and expansion rate of the nozzle on the total pressure loss have been studied. The length of the region where the total pressure decreases during the condensation process is longer than that of the nonequilibrium condensation region, and of difference between the length of these two increases with the increase of the degree of supersaturation at the stagnation condition. Furthermore, the larger the expansion rate of the nozzle and the higher the temperature and the degree of supersaturation at the reservoir are, the larger the total pressure loss of the flow becomes. And, it is turned out that the total pressure loss be about 2 to 8 percent in the present study.

### 기 호 설 명

$A$ : 노즐의 단면적 혹은 응축개시점	$J$ : 응축핵 생성률
$B$ : 비평형 응축 종료점	$L$ : 잠열
$C$ : 전압강하 종료점	$N$ : Abogadro 수
$C_i$ : 액적의 비열	$P$ : 압력
$C_{po}$ : 습공기의 비열	$R$ : 일반가스 상수
$E$ : 엔탈피	$R^*$ : 원호 노즐의 곡률 반경
$g$ : 액상의 질량비	$r$ : 액적의 반경
$h$ : 엔탈피	$r^*$ : 액적의 임계 반경
$h^*$ : 노즐 목의 높이	$\bar{r}$ : 액적 평균 반경
	$s$ : 과포화도
	$T$ : 온도
	$t$ : 시간

\*正會員, 慶北大學校 工科大学 機械工學科

- $u$  :  $x$ 방향 속도 성분
- $x$  : 노즐 목으로 부터의 거리
- $\alpha$  : Thermal accommodation coefficient
- $\beta$  : 분자의 충돌율
- $\gamma$  : 비열비
- $\Gamma$  : Accommodation coefficient for nucleation
- $k$  : Boltzmann 상수
- $\eta$  : 표면장력 계수
- $\sigma$  : 표면장력
- $\rho$  : 밀도
- $\xi$  : 응축계수
- $w_{01}$  : 정체점 비습도
- $\mu$  : 분자량

첨 자

- 01 : 정체점의 값
- $o$  : 국소의 값
- $a$  : 공기
- 1 : 액적
- $s$  : 포화상태
- $v$  : 증기
- $\infty$  : 무한평면

1. 序 論

水蒸氣 혹은 濕空氣와 같은 凝縮性 氣體를 超音速 노즐로써 急激히 膨脹시키면 凝縮性 氣體는 飽和狀態에 達하여도 凝縮이 일어나지 않고 過飽和狀態로 된다. 이 過飽和狀態의 흐름은 대단히 不安定하므로 흐름 自身의 어떤 미소 攪亂에 의하여 多數의 凝縮核이 非平衡 過程으로서 生成되어 凝縮이 進行된다.

한편, 非平衡 凝縮過程은 엔트로피의 增加가 隨伴되는 非可逆 過程이므로 흐름은 全壓損失이 일어나게 된다.

이와 같은 凝縮에 의한 全壓降下의 現象은 터어빈의 効率<sup>(1-3)</sup> 혹은 凝縮性 氣體의 相變化를 隨伴하는 노즐흐름<sup>(4)</sup> 등과 關聯되어 工學上 대단히 重要한 問題이다.

그러나 全壓損失이 일어나는 메카니즘과 全壓損失에 미치는 停滯點의 溫度, 過飽和度 및 노즐의 膨脹率의 效果 등은 아직 完全히 研究되어 있지 않은 狀態이다.

따라서 本 研究에서는 作動流體로서 濕空氣를 使

用하였을때 隨伴되는 凝縮에 의한 全壓損失을 實驗과 數值解釋을 통하여 停滯點에 있어서의 濕空氣의 溫度, 過飽和度 및 노즐 膨脹率의 效果와 液滴 質量比 ( $g$ )과의 關係로서 究明하였다.

2. 實驗裝置

Fig. 1은 本 研究에서 使用한 大氣吸入式風洞을 圖式的으로 나타낸 것으로서 Reservoir와 흡입탱크의 用量은 各各 15m<sup>3</sup>와 2m<sup>3</sup>이며 停滯點에 相當하는 Reservoir에서는 過飽和度( $s_{01}$ )와 溫度( $T_{01}$ )를 調節하기 위하여 蒸氣發生器와 加熱器가 設置되어 있다.

Fig. 2는 피토우프로브(Pitot probe)의 詳細를

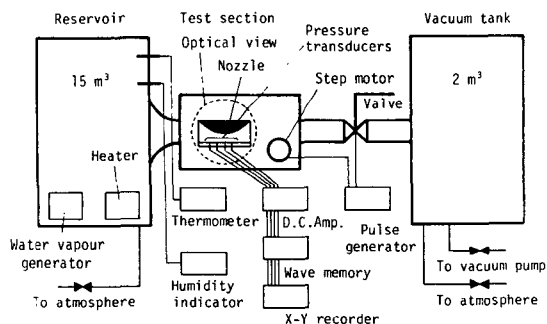


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

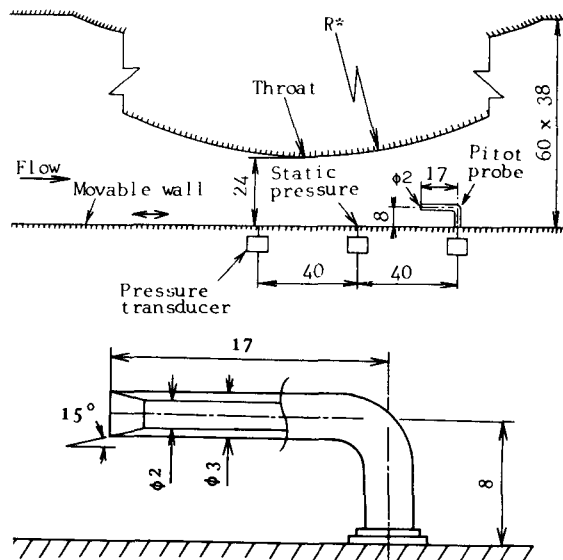


Fig. 2 Configuration of test section and Pitot probe

나타낸 그림이다.

紙面に 垂直方向의 幅이 38mm, 높이가 60mm의 Duct의 上壁에는 曲率半徑이  $R^*$ 인 円弧노즐이 設置되어 있으며, 노즐목의 높이  $h^*$ 는 48mm(Half 노즐목의 높이는 24mm)이다.

흐름 方向의 靜壓을 測定하기 위하여 노즐 中心軸에 相當하는 下部壁에는 40mm 間隔으로 3個의 半導體 壓力變換器가 設置되어 있으며, 스텝모터에 의하여 下部壁이 2mm 間隔으로 수평移動 하도록 되어 있으므로 흐름의 中心에 相當하는 노즐 中心軸上의 靜壓을 120mm에 걸쳐 測定 可能하게 되어 있다.

한편, 全壓을 測定할 경우에는 Fig. 2에 나타낸 피토우프로우브를 靜壓 測定孔에 挿入하여 使用하였다.

흐름이 超音速인 경우에는 피토우프로우브 입구 前方에는 離脫 衝擊波가 발생하므로 實在의 全壓은 Rayleigh Pitot formula를 使用하여 求하였다. 흐름이 超音速인지의 판단은 測定한 靜壓을 使用하였다.

可視化 方法으로는 Schlieren法을 使用하였다.

### 3. 數值解析

濕空氣를 円弧노즐을 통하여 膨脹 시켰으며, 노즐 入口의 停滯點에 있어서의 濕空氣의 壓力( $P_{01}$ ), 溫度( $T_{01}$ ), 濕空氣에 포함되는 水蒸氣의 量 즉, 過飽和度( $s_{01}$ : 水蒸氣의 分壓과 그 溫度에 對한 飽和壓力의 比)와 노즐의 膨脹率( $\dot{p} = -\frac{1}{p} \frac{dp}{dt}$ )를 計算의 變數로 하여 數值解析하였다.

數值解析의 경우에는 다음과 같은 假定을 하였다.

- (1) 흐름은 一次元 定常 非粘性 斷熱 흐름이다.
- (2) 氣相과 液相 사이의 速度差는 無視할 수 있을 정도로 적다.
- (3) 氣液 二相流 中에서 液相의 體積은 氣相의 體積에 比해 無視할 수 있을 정도로 적다.
- (4) 液滴內部에는 溫度勾配가 存在하지 않는다.
- (5) 氣相과 液相의 溫度差는 적지만 非平衡 凝縮過程에 의한 全壓損失을 正確히 하기 위하여 溫度差는 考慮한다.
- (6) 液滴은 球의 形態이다.

#### 3.1 基礎方程式

連續方程式

$$\frac{d}{dx}(\rho u A) = 0 \quad (1)$$

運動量方程式

$$\rho u \frac{du}{dx} + \frac{dp}{dx} = 0 \quad (3)$$

에너지 方程式

$$u \frac{du}{dx} + \frac{dh}{dx} = 0 \quad (3)$$

여기서  $\rho$ ,  $u$ ,  $p$ ,  $h$ ,  $A$  및  $x$ 는 各各 濕空氣의 密度, 速度, 靜壓, 엔탈피, 노즐 斷面積과 노즐목 부터의 거리이다.

狀態方程式은 濕空氣를 完全가스라 假定하면 式(4)와 같다.

$$p = \left( \frac{1-w_{01}}{\mu_a} + \frac{w_{01}-g}{\mu_v} \right) \rho RT \quad (4)$$

$w_{01}$ ,  $g$ ,  $\mu_a$ ,  $\mu_v$  및  $R$ 은 各各 濕空氣의 停滯點에 있어서의 比濕度, 液相의 質量比(液相의 質量/液相과 氣相의 質量의 合), 空氣의 分子量, 蒸氣의 分子量과 一般가스常數이다.

또  $L$ 을 蒸發潛熱,  $C_e$ 을 液相의 比熱,  $T$ 와  $T_e$ 을 各各 氣相과 液相의 溫度라 하면 氣液二相流의 單位質量當의 局所 全엔탈피  $h_{01}$ 은 式(5)로 된다.

$$h_{01} = \frac{u^2}{2} + C_{p0}T + gC_e(T_e - T) = \text{constant} \quad (5)$$

여기서  $C_{p0}$ 은 濕空氣의 比熱로서 本 研究에서는 一定하다고 하였다.

蒸發潛熱  $L$ 은 Gyarmathy<sup>(5)</sup>가 壓力의 함수로 나타낸 式(6)을 使用 하였다.

$$L(p) = 2.253 \times 10^6 - 5.72 \times 10^4 (\ln p - 10) - 4.6 \times 10^3 (\ln p - 10)^2 \text{ Joule/kg} \quad (6)$$

여기서 靜壓  $p$ 의 單位는  $\text{N/m}^2$ 이다.

#### 3.2 核生成率, 液滴의 臨界半徑 및 表面張力

單位時間, 單位體積當 生成되는 凝縮核의 數( $J$ )는 式(7)과 같다<sup>(6)</sup>.

$$J = \Gamma J_c \quad (7)$$

여기서  $\Gamma$ 는 Accommodation coefficient for nucleation<sup>(7)</sup>이고,  $J_c$ 는 古典理論의 核生成率로서 本 研究에서는 Volmer<sup>(8)</sup>의 式을 使用 하였다.

$$J_c = \left( \frac{2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{N^{\frac{3}{2}}}{R^2} \left( \frac{P_v}{T} \right)^2 \frac{(\sigma \mu_v)^{\frac{1}{2}}}{\rho_e} \exp \left( -\frac{4\pi r^*{}^2 \sigma}{3kT} \right) \quad (8)$$

여기서  $N$ ,  $p_v$ ,  $\sigma$ ,  $\rho_e$ ,  $k$  및  $r^*$ 는 各各 Abogadro數, 蒸氣分壓, 液滴의 表面張力, 液滴의

密度, Boltzmann常數 및 液滴의 臨界半徑이다.

$P_s$ 를 溫度  $T$ 에 對한 飽和壓力 이라 하면 臨界半徑  $r^*$ 은 式 (9)로 나타낼수 있다<sup>(8)</sup>.

$$r^* = \frac{2\sigma}{\rho_e R_v T \ln(P_v/P_s)} \quad (9)$$

여기서  $R_v$ 는 蒸氣의 氣常數이다.

또 半徑이 대단히 작은 液滴의 表面張力  $\sigma$ 는 無限平面液滴의 表面張力  $\sigma_\infty$ 와 表面張力係數  $\eta$ 를 使用하여 다음과 같이 求하였다<sup>(9)</sup>.

$$\sigma = \eta \sigma_\infty \quad (10)$$

$\sigma_\infty$ 는 式 (11)과 같이 表示된다<sup>(9)</sup>.

$$\sigma_\infty = 7.56 - 0.0192 T (^{\circ}\text{C}) \quad \text{N/m}^2 \quad (11)$$

### 3.3 液滴의 成長

濕空氣中の 水蒸氣와 空氣分子의 Thermal accommodation coefficients<sup>(10)</sup>를  $\alpha_v, \alpha_a$ 로 하여 液滴에 에너지 保存法則을 適用하면 式 (12)와 같이 된다<sup>(9)</sup>.

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} \rho_e \frac{r C_e}{R_v T} u \frac{dT_e}{dx} &= K \xi \beta_v \left(1 - \frac{\beta_e T_e}{\beta_o T}\right) \\ &- K (1 - \xi) \beta_v \alpha_v \left(\frac{T_e}{T} - 1\right) - K \beta_a \alpha_a \\ &\left(\frac{T_e}{T} - 1\right) - \rho_e u \frac{dr}{dx} \left(\frac{\gamma v}{\gamma_o - 1} RT - L\right) \frac{1}{R_v} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 첨자  $v, a, e$ 은 各各 蒸氣, 空氣, 液滴을 의미하고,  $\xi$ 는 液滴表面에 衝突하는 蒸氣分子가 附着되는 程度를 나타내는 凝縮係數이며,  $\gamma_o$ 는 蒸氣의 比熱比,  $\beta$ 는 單位時間當 液滴의 單位面積에 衝突하는 分子數로서  $\beta = P/\sqrt{2\pi RT}$ ,  $K^{(9)}$ 는  $\frac{1}{2}(r_v+1)/(r_v-1)$ 이다.

非平衡 過程으로 生成된 凝縮核은 주위의 蒸氣分子가 衝突 附着함으로써 成長한다.

液滴의 半徑을  $r$ 이라하고 液滴 表面積에 對한 蒸氣分子의 流入과 流出에 따른 質量의 變化를 考慮하면 液積의 成長速度  $dr/dt$ 는 다음과 같이 된다.

$$u \frac{dr}{dx} = \frac{\xi}{u \rho_e} (P_v/\sqrt{2\pi R_v T} - P_e/\sqrt{2\pi R_v T_e}) \quad (13)$$

여기서  $P_e$ 는 液滴과 주위의 氣體가 平衡狀態로 있다고 假定했을 때의 液滴 表面에 있어서의 假想的인 飽和壓力으로서 Helmholtz에 의하면

$$P_e = P_\infty(T_e) \exp(2\sigma/\rho_l R_v T_e) \quad (14)$$

$P_\infty(T_e)$ 은 溫度  $T_e$ 의 液相에 對한 無限平面에 있어서의 飽和壓力으로서 Clausius-Clapeyron 式으로 부터 求할 수 있다.

### 3.4 엔트로피와 全壓損失

凝縮이 隨伴되는 混合氣體의 單位質量當의 엔트로피는 蒸氣와 空氣分子 各各의 엔트로피를 考慮하여 다음 式으로 計算 하였다<sup>(11)</sup>.

$$\begin{aligned} E &= E_{o1} + (1 - w_{o1}) R_a \ln\left(\frac{T^{\gamma a} (r_a)^{(\gamma a - 1)}}{P_a}\right) \\ &+ (w_{o1} - g) R_v \ln\left(\frac{T^{\gamma v} (r_v)^{(\gamma v - 1)}}{P_v}\right) \\ &+ g \left(-\frac{1}{r} \frac{3}{\rho_e} \frac{\partial \sigma}{\partial T}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

右邊의 마지막 項은 微小液滴의 表面에 있어서의 엔트로피 (즉, 表面張力에 의한 엔트로피)이다. 液滴自身의 內部 엔트로피는 無視했다.

$E_{o1}$ 은 基準 엔트로피로서 本 研究에서는 停滯點의 값을 基準 엔트로피로 하였으며, 局所全壓은 基準 엔트로피로 부터의 增加  $\Delta E$ 를 計算하여 다음 式으로부터 求하였다.

$$\frac{\Delta E}{R_{av}} = \left(\frac{E - E_{o1}}{R_{av}}\right) = \ell n(P_{o1}/P_o) \quad (15)$$

여기서  $R_{av}$ 는 濕空氣의 氣常數,  $P_{o1}, P_o$ 는 各各 停滯點에 있어서의 壓力 및 局所全壓이다.

計算은 Runge-Kutta-Gill法을 使用하여 노즐목부터 시작하였으며 計算의 始發點인 노즐목의 狀態量은 흐름이 노즐목에서 폐쇄 狀態라 假定하여 求하였다.

또 노즐목에서의 假想的인 液滴의 溫度(노즐목에서는 液滴이 存在하지 않음)는 氣體의 溫度와 같다고 하였으며, 凝縮衝擊波가 發生하는 경우에는 衝擊波 前後에 Rankine-Hugoniot 關係式을 適用하여 衝擊波 直後의 狀態量을 求하였다.

本 研究에 使用한 計算과 實驗條件 및 諸 係數값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specification of nozzle and numerical condition

Nozzle	$R^*$ mm	$h^*$ mm	$T_{o1}$ K	$s_{o1}$	Coeff.
N1	80	48	280	0.3	$\alpha_o = 1$ $\alpha_a = 0.93$ $\eta = 1.24$ $\xi = 0.9$ $r = 10^8$
N2	160	48			
N3	400	48	298	0.7	

4. 結果 및 考察

Fig. 3는 노즐 N2, 停滯點에 있어서의 溫度  $T_{01} = 288K$ , 過飽和度  $s_{01} = 0.4$ 와  $0.6$ 인 경우의 實驗과 計算 結果를 나타낸 것이다.

가로軸의  $x$ 는 노즐목으로 부터의 거리, 세로軸은 靜壓  $p$ , 局所 全壓  $P_0$ , 液相의 質量比  $g$ , 局所 過飽和度  $s$ , 凝縮核 生成率  $J$ 와 平均 液滴半徑  $\bar{r}$ 의 分布를 나타내고 있다.

曲線上的 點 A, B, C는 各各 凝縮 開始點, 非平衡 凝縮과 全壓降下가 끝나는 點을 의미 한다. 즉, 凝縮 開始點 A는 凝縮核 生成率  $J$ 가 最大로 되는 點이고, 非平衡 凝縮의 종료點 B는 局所 過飽和度  $s$ 가 1로 되는 點이며, 全壓降下가 종료되는 點 C는 노즐 中心軸 미소거리  $dx$ 에 對한 全壓降下量  $dP_0$ 의 절대값 ( $|dP_0/dx|$ )이 0.05로 되는 點으로 하였다.

Fig. 3의 (a)는 停滯點 過飽和度  $s_{01} = 0.6$ 인 경우의 Schlieren 사진이며 약한 凝縮 衝擊波가 發生하고 있으나 境界層의 效果 때문에 靜壓의 점프現象은 나타나고 있지 않다.

또한 靜壓分布는 液相의 質量比  $g$ 의 分布로 부터 알 수 있는 바와 같이 凝縮 開始點 A부터 等엔트로피 흐름으로 부터 이탈하기 시작하여 특히  $s_{01} = 0.6$ 인 경우에는 非平衡 凝縮이 종료되는 B點에서 最大로 되는 變化를 나타내고 있다.

局所 全壓( $P_0/P_{01}$ )分布는 凝縮 開始點 A까지는 等엔트로피 흐름이므로 全壓 降下가 일어나지 않다가 凝縮이 開始됨과 동시에 全壓降下가 시작된다. 특히 非平衡 凝縮領域인 A~B 區間에서 그 降下率은 크며, 非平衡 凝縮이 끝나는 B點 以後에도 계속되는 平衡 凝縮에 의한 흐름의 加熱效果 때문에 조금씩 全壓이 감소되고 있음을 나타내고 있다.

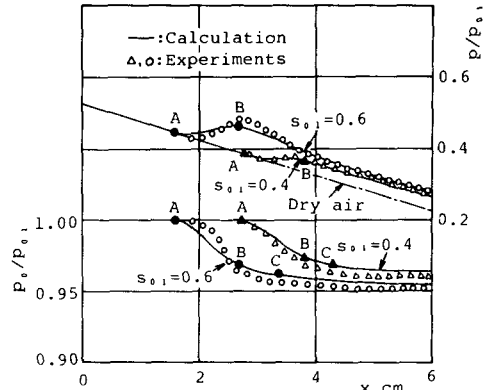
한편 平衡 凝縮이 거의 끝나는 點 C 以後는 全壓이 거의 一定하게 된다.

全壓 分布에 있어서 實驗值보다 計算值가 全壓의 降下量이 다소 적게 나타나고 있는것은 計算에서 考慮치 않은 液滴과 주위의 氣體 사이의 速度差에 의한 抗力, 피토우프로우브 입구 部分의 不完全한 design에 의한 損失, 노즐 壁과 흐름과의 마찰에 의한 損失 등의 效果라고 생각된다.

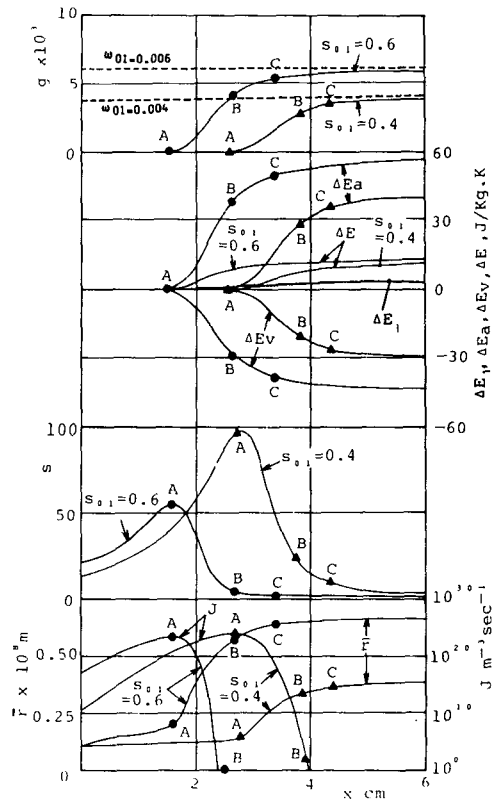
混合氣體中 空氣의 엔트로피 變化  $\Delta E_a$ 는 높은 局所 過飽和度( $s$ )에서 無數의 凝縮 核이 非平衡



(a) Schlieren photograph



(b) Distribution of static and total pressure



(c) Variation of properties

Fig. 3 Distribution of flow properties ( $T_{01} = 288K$ ,  $P_1 = 101.3KPa$ , Nozzle N2)

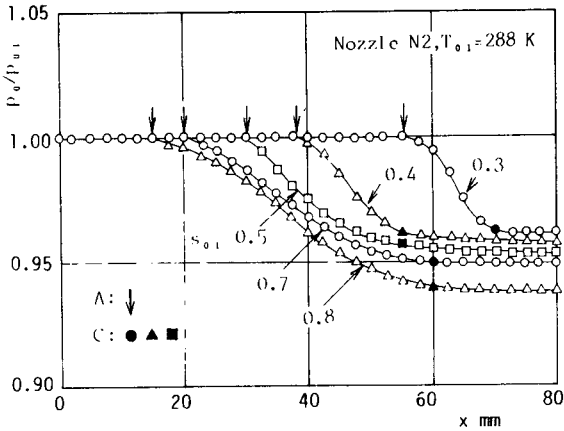


Fig. 4 Influence of supersaturation upon total pressure

過程으로 生成되는 凝縮 開始點으로 부터 急激히 增加 하지만 凝縮에 의해 水蒸氣의 絕對量이 줄어들므로 凝縮 開始點으로 부터 急激히 감소됨을 나타내고 있다. 表面張力에 의해 야기되는 엔트로피의 增加  $\Delta E_e$ 은  $\Delta E_a$  혹은  $\Delta E_v$ 에 비해 無視할 수 있을 정도로 적게 됨을 보였으나 위 三者의 합인  $\Delta E (= \Delta E_v + \Delta E_a + \Delta E_e)$ 는 增加한다.

한편, 液滴의 平均半徑  $\bar{r}$ 는 非平衡 凝縮 領域에 서의 높은 局所 過飽和度의 영향 때문에 蒸氣 分子가 液滴 表面에 衝突하는 個數가 많아지므로 非平衡 凝縮 領域에서 急激히 커지는 것을 나타내고 있다.

全壓 降下量은 停滯點에 있어서의 過飽和度  $s_{01}$ 이 높을수록 크게됨을 보이고 있다.

이것은 半徑이 작은 無數의 凝縮核이 生成될때의 表面張力에 起因하는 非可逆의인 일과 液相의 質量比  $g$ 의 增加에 따른 潛熱 放出에 의한 흐름의 加熱 등이 원인 이라고 생각된다.

Fig. 4는 동일한 노즐과 停滯點 溫度에 대하여 停滯點 過飽和度  $s_{01}$ 을 變化시킨 경우의 全壓의 노즐 中心 軸方向 變化를 實驗에 의하여 求한 結果이다.

Fig. 4에서 알 수 있는 바와같이  $s_{01}$ 이 클수록 凝縮 開始點 즉, 全壓 降下가 일어나기 시작하는 位置는 노즐목에 가깝게 되고 降下量은 크게 되지만 그 기울기는 완만하게 됨을 보이고 있다.

이것은 동일한  $T_{01}$ ,  $P_{01}$ (=101.3KPa)과 노즐인 경우에는  $s_{01}$ 이 클수록 初期 停滯點에 있어서의 比 濕度  $w_{01}$ 이 크게 되어 凝縮에 의해 生成되는 液相의 質量比  $g$ 가 크게 되기 때문이라고 생각된다.

그러나 일단 全壓 降下가 일어나면 그 기울기

( $|dp_0/dx|$ )는  $s_{01}$ 이 낮을수록 보다 높은 局所 過飽和度에서 凝縮이 일어나므로 크게 된다.

Fig. 5는 노즐의 膨脹率( $= -\frac{1}{p} \frac{dp}{dt}$ )<sup>(13)</sup>을 變化시킨 경우의 全壓分布를 實驗에 의해 求한 結果이다.

Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 동일한  $T_{01}$ 과  $P_{01}$ 인 경우에는 膨脹率이 큰 N2의 경우가 N3에 비해 全壓 降下의 開始點은 노즐목에 가깝게 되고 그 降下量도 크게 된다.

이것은 같은  $w_{01}$ 인 경우에는 노즐 膨脹率이 클수록 노즐목에 가까운 位置에서도 높은 局所 過飽和度로 되고, 이 높은 局所 過飽和度에서 凝縮이 開始되어 非平衡 過程이 強化되는 結果라고 생각된다.

Fig. 6과 7은  $T_{01}$ 과  $s_{01}$ 을 變數로 하여 求한 實驗과 計算의 結果이다.

같은 條件下에서는  $T_{01}$ 과  $s_{01}$ 의 增加와 더불어

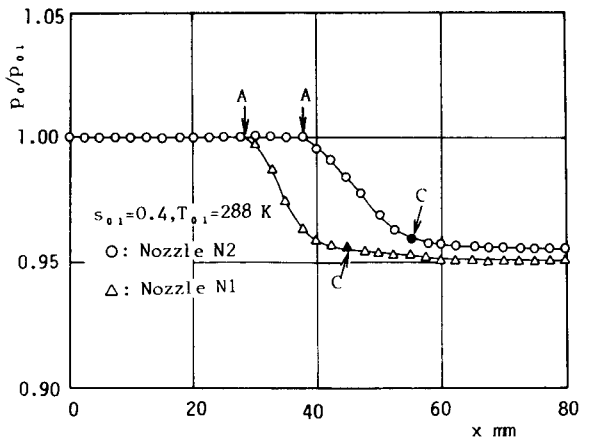


Fig. 5 Influence of supersaturation upon total pressure

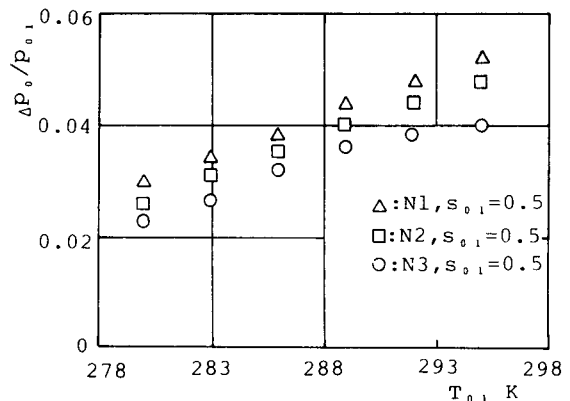


Fig. 6 Effect of stagnation temperature

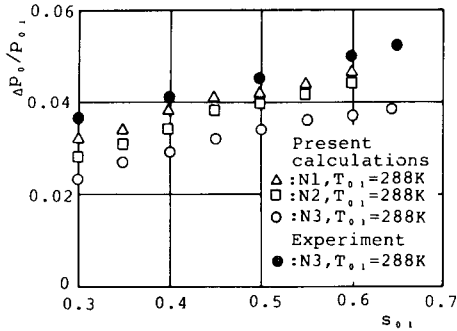


Fig. 7 Effect of stagnation supersaturation

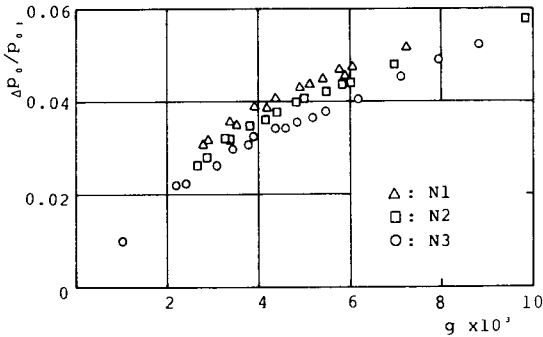


Fig. 8 Relationship between total pressure loss and liquid mass fraction

停滯點에 있어서의 比濕度  $w_{01}$ 이 크게되므로 結果的으로 全壓損失이 크게 되며 計算의 경우가 實驗의 경우 보다 全壓 降下率이 적게 된다.

Fig. 8은 全壓 損失을 液相의 質量比  $g$ 에 대하여 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 全壓 降下率 ( $\Delta P_0/P_{01}$ )은 液相의 質量比  $g$ 에 의존 하고,  $g$ 가 클수록 그 降下量도 크게됨을 알 수 있다.

이것은 液相의 質量比  $g$ 가 클수록 液滴을 生成하기 위하여 使用된 非可逆의인 일과 潛熱 放出에 의해 야기된 흐름의 加熱效果가 크게되기 때문이다.

### 5. 結 論

凝縮性 氣體를 超音速 노즐로써 急激히 加速 膨脹시킬때 야기되는 凝縮에 의한 全壓損失에 미치는  $s_{01}$ ,  $T_{01}$ ,  $g$  및 노즐 膨脹율의 영향을 研究한 結果는 다음과 같다.

(1) 노즐 흐름에서, 凝縮이 開始되면 全壓는 凝

縮開始點으로부터 감소하기 시작하며 특히 非平衡 凝縮領域에서 急激히 감소하고 平衡 凝縮領域에서는 거의 一定한 값으로 된다.

(2)  $T_{01}$ 과  $s_{01}$ 이 높을수록 停滯點에서 포함될 수 있는 初期 水蒸氣量이 크게 되므로 全壓損失은 크게 된다.

(3) 停滯點에 있어서의 溫度  $T_{01}$ 과 過飽和度  $s_{01}$ 이 同一한 경우에는 노즐의 膨脹率이 클수록 全壓損失은 크게 된다.

### 참 고 문 헌

- (1) Ikeda, T, and Suzuki, A., 1973, "Some Findings on the Flow Behaviors of Last-Stage Turbine Buckets by Linear Cascade Tests in Steam", Instn. Mech. Engrs., C 26173, pp. 46~55.
- (2) Troyanovskii, B.M., 1980, "Influence of Wetness on Efficiency of Steam Turbines", Combustion, pp. 30~35.
- (3) Kawagoe, S., Matsuo, K., Kwon, S.B., Setoguchi, T. "Supersonic Flows with and Without Oblique Shock Wave", Proc. Int. Conf. on Fluid Mech., Peking Univ, Press, Beijing China, pp. 1107~1112.
- (4) Deych, M.Y., Saltanov, G.A., Stepanchuk, V.F. and Orlova, V.M., 1969, 3, "Study of Energy Losses in Condensation Discontinuities and Shock in the Flow of Wet Steam", pp. 135~143.
- (5) Gyarmathy, G., 1973. "Kondensationsstoß-Diagramme für Wasserdampf-Strömungen", Forsch. Ing. Wes., pp. 105~114.
- (6) Courtney, W.G., 1963, "Homogeneous Nucleation from Simple and Complex Systems", AIAA Heterogeneous Combustion Conf., pp. 678~699.
- (7) Kotake, S. and Glass, I. I., 1981, "Flows with Nucleation and Condensation", Prog. Aerospace, Sc., Vol. 19, Pergamon Press, pp. 129~196.
- (8) Volmer, M., 1969, "Nonequilibrium Flow, Part, 1", Ed. by Wegener, P.P., Marcel Dekker, pp. 163~242.
- (9) Hill, P.G., 1966, "Gondensation of Water Vapour during Supersonic Expansion in Nozzles", J, Fluid Mech., Vol. 25, Part 3, pp. 593~620.
- (10) Wachman, H.Y., 1962, 2, "The Thermal Accommodation Coefficient; A Critical Survey", ARS Journal, pp. 2~12.
- (11) 權純範, 松尾一泰, 川越茂敏, 松尾繁, 1987, "凝縮을 伴う 라할 노즐 流れ의 全壓損失 (第 2 報, 數值解釋)", 日本機械學會論文集(B), 第53卷, 第489號, pp. 1516~1520.

(12) Defay, R., Progogine, I., Bellemans, A. and Everett, D.A., 1966, "Surface Tension and Adsorption", Longmans, pp. 40~54.

(13) Moore, M.J. and Sieverding, C.H, 1976, "Two-phase Steam Flow in Turbines and Sepsators", McGraw-Hill, pp. 127~189.