

【 論文 】

각종 Nozzle 을 통하여 저장조내로 유입되는
BUOYANT JETS 의 유동해석

Flow analysis of Buoyant Jets into
Storage Tank through Variable Nozzles

박 이 동* 조 운**
Ee-Tong Pak Woon Cho

ABSTRACT

The Buoyant Jets were analysed experimentally changing flow rate (0.0291/s, 0.0371/s, 0.0451/s), ratio of nozzle tip area to throat area (aspect ratio $\beta=0.4, 1.0, 1.9$), and also the temperature difference ($\Delta T=T_i - T_\infty$) between the temperature of the inflow water into the storage tank (1mx1mx3m) and the mean temperature of the water in the storage tank were changed as 25°C, 35°C and 45°C.

The more aspect ratio decreased, the more the trajectories of Buoyant Jets centerline were decreased and not the more the trajectories of Buoyant Jets centerline were influenced by the increment of the difference of the temperature.

The more aspect ratio decreased, the more the half widths and dilution ratio of Buoyant Jets were increased and not the more the half widths and dilution ratio of Buoyant Jets were influenced by the increment of the difference of the temperature.

Fr number is the factor that can predict the flow pattern over the whole flow field. And yet for the consideration the near field of Buoyant Jets flow pattern is dominated by magnitude of momentum and buoyancy force.

NOMENCLATURE

A_1 : Nozzle area at the throat (mm)
 A_2 : Nozzle area at the tip (mm)
 B' : Half width of jets in plane nominal to jets trajectory (mm)

D : Diameter of nozzle ($\beta = 1.0$) (mm)
 Fr : Densimetric Froude number
 r : Distance in vertical plane from jets centerline (mm)
 S : Dilution ratio ($\rho_a - \rho_j / \rho_a - \rho$)
 T_i : Temperature of working fluid (°C)
 T_∞ : Temperature of ambient (°C)
 U_i : Entrainment velocity

* 정회원 성균관 대학교 기계공학과
** 성균관대학교 대학원 기계공학과

- U_x^* : x component of jets velocity off centerline (m/sec)
- U_y^* : y component of jets velocity off centerline (m/sec)
- α : Entrainment coefficient
- β : Aspect ratio (A_2/A_1)
- θ : Inclination of jets centerline to horizontal direction (degree)
- λ : Spread ratio between density and velocity profiles
- ρ : Centerline density of jets (kg/m^3)
- ρ^* : Jets density off centerline (kg/m^3)
- ρ_a : Density of ambient fluid (kg/m^3)
- ρ_j : Exist density (kg/m^3)

1. 서 론

현대에 이르러 에너지에 대한 수요는 급증하고 있는 반면에 에너지량은 한정되어 있어서 에너지 문제는 과학자들에게 점점 더 중요한 문제로 등장하게 되었다.

결국 새로운 에너지를 개발한다거나 기존의 에너지를 효과적으로 이용하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 열에너지 저장 시스템의 개발에 있어서 에너지를 저장하는 방법은 현열로써 저장하는 방법과 잠열로써 저장하는 방법이 있는데 현열저장의 형태 중에서 특히 혼합저장형태로써 고온의 물을 저장조내에 저장시킬 경우 유입구로 부터 유입될때의 유동형태는 작동 유체와 주위 유체와의 온도차에 의한 Buoyant jets 유동이며 이에 대해서는 유입구의 방향¹⁾, 주위조건²⁾, 유입구의 초기특성^{3) 4)} 등을 변수로 하여 연구가 진행되어 왔다.

한편 유입구의 형상⁵⁾에 대해서는 round인 경우와 plane(slot)형상에 대한 연구를 통해 이론식들이 제시된 바 있다.

지금까지는 에너지 저장문제를 취급할 때 단지 최종적인 결과를 해석하여 성층도와 안정성 문제등을 다루어 왔다. 따라서 본 연구에서는 작동 유체의 유입이 완료될때 까지의 과정에서 나타나는 Buoyant Jets 유동에 있어서 유입구의 형상비를 변화시킴에 따라 일어나는 유동형태 즉 유동중심축의 궤적, 유동폭, Dilution ratio 등을 측정하여 각각의 유입구 형상에 대해 비교 분석하고 유동율과 작동유체와 주위 유체의 온도차등을 변수로 사용해 에너지 저장조내에서 유입구 형상변화에 따른 Buoyant Jets 유동의 해석을 함으로써 효과적인 에너지 관리에 기여하고자 한다.

본 실험에서 폭 1m, 높이 1m, 길이 3m인 저장조를 사용하여 저장조내 밀도성층이 이루어 지지않고 흐름이 없는 주위 유체내로 유입수 온도 $T_i(T_i > T_\infty)$ 를 round형상의 유입구를 통하여 강제유입 시키고 3단계의 유동률변화 ($Q = 0.029 \text{ l/s}, 0.037 \text{ l/s}, 0.045 \text{ l/s}$), 3단계의 온도변화 ($\Delta T = 25^\circ\text{C}, 35^\circ\text{C}, 45^\circ\text{C}$)를 변수로 하여 형상비를 0.4, 1.0, 1.9 등으로 변화시킴에 따라 일어나는 Buoyant jets 의 유동 중심축 궤적, 유동폭, Dilution ratio 등을 측정하여 유동 형태를 해석하고자 한다.

2. 유동영역에 적용되는 관련이론

2.1 지배방정식

2차원 정상상태의 Buoyant Jets 유동에 서의 지배방정식은 다음과 같다.

- * Conservation of volume flux

$$d/dx \left[\int_0^\infty 2U^* (\pi r) dr \right] = 2\pi bU_i$$
- * Conservation of horizontal mometum

$$d/dx \left[\int_0^\infty 2\rho^* U_x^{*2} (\pi r) dr \right] = 0$$
- * Conservation of vertical momentum

$$d/dx \left[\int_0^\infty 2\rho^* U_x^* U_y^* (\pi r) dr \right] = \int_0^\infty 2g (\rho_a - \rho^*) (\pi r) dr$$

* Conservation of density deficiency

$$d/dx [\int_0^\infty 2(\rho_a - \rho^*) Ux^* (\pi r) dr] = 0$$

2.2 Buoyant jets 유동의 특성

Submerged horizontal buoyant jets의 유동해석은 다음과 같은 세가지 Similarity assumption과 하나의 Entrainment assumption을 사용한다. 즉 유동이 완전히 형성된 영역 이후에서는 jets유동의 수직 단면에 걸친 속도, 밀도 등의 Profile은 Gauss 분포를 이루고 주위유체의 Entrainment velocity는 유동축 중심속도와 폭에 비례한다.

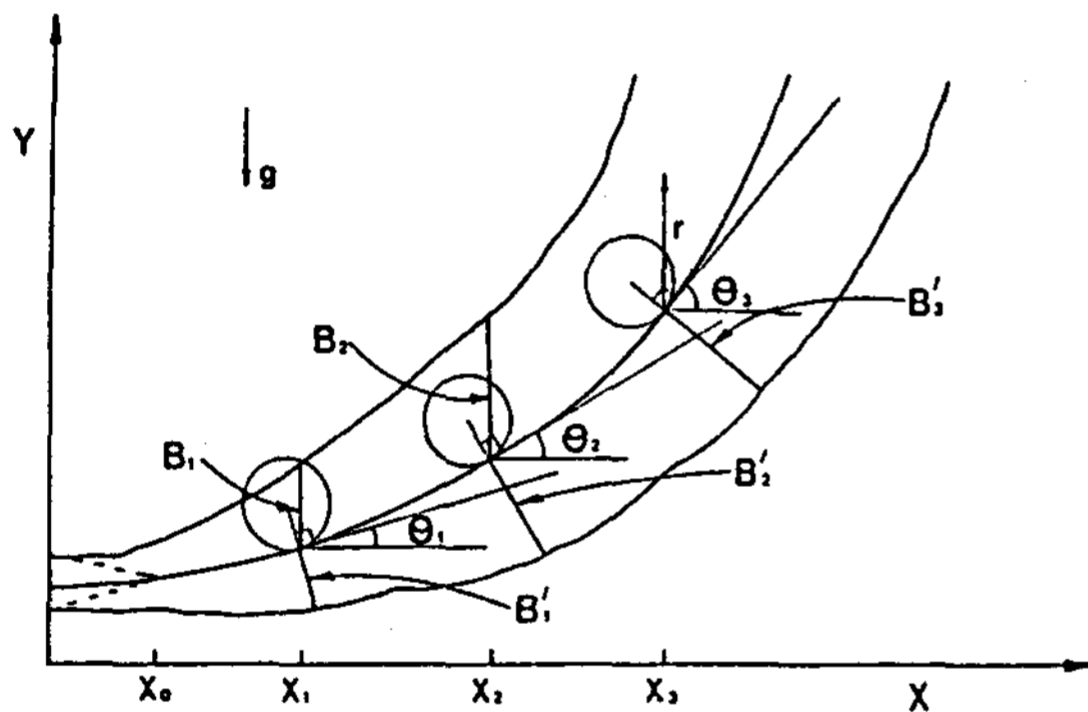


Fig. 2.1 Definition sketch for Buoyant jets in quiescent

$$Ux^* = Ux \exp(-r^2/B^2)$$

$$Uy^* = Uy \exp(-r^2/B^2)$$

$$\rho_a - \rho^* = (\rho_a - \rho^*) \exp(-r^2/\lambda^2 B^2)$$

$$Ui = \alpha Ux$$

윗 식에서 B는 수평 방향에 대해 수직인 유동의 반폭이고 r는 유동 수직단면의 임의위치에서의 반경이다. λ는 Mass에 대한 난류 확산계수와 Momentum에 의한 난류 확산 계수의 비로써 1.16의 상수 값으로 제시된 바 있다. Entrainment coefficient $\alpha = \{ (0.057 \cos \theta)^2 + (0.082 \sin \theta)^2 \}^{1/2}$ 이다.

Fig 2.1에서는 Buoyant jets의 유동특

성치들을 나타내고 있다.

2.3 Analytical Solution

Buoyant Jets 유동에 있어서 유동이 완전히 형성된 영역 이후에서는 속도, 온도, 좌표, 유동계적 등의 물성치들의 변동값이 하나의 기하학적인 변수만으로 무차원화되어 표시할 수 있다.

결국 앞절의 세가지 Similarity assumption과 하나의 Entrainment assumption을 사용하여 지배방정식에 포함된 미지수들을 무차원화된 좌표 X만의 함수로 표시할 수 있다.

The coordinates of Y

$$Y - Y_0/D = 1 + \lambda^2/Fr^2 [0.5(X - X_0/D)^2 + \sqrt{2\alpha/3}(X - X_0/D)^3]$$

Width of Buoyant Jets

$$B'/D = \frac{\sqrt{2/2 + 2\alpha}(X - X_0/D)}{\{1 + \{1 + \lambda^2/Fr^2[(X - X_0/D)^2 + \sqrt{2\alpha}(X - X_0/D)^3]\}^{1/2}}$$

Dilution ratio at Buoyant jets

$$S = 2\lambda^2 / (1 + \lambda^2) \cdot [1 + 2\sqrt{2\alpha}(X - X_0/D)]$$

Buoyant Jets 유동의 기울기 정도는 노즐 출구에서의 관성력과 부력의 비인 Fr 수에 의해 조정된다. Fr 수가 ∞인 경우 기울기는 0이며 유동은 Nonbuoyant Free Jets이고 Fr 수가 0인 경우에는 부력이 완전히 지배하는 Pure Plumes 유동이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치의 구성요소

실험장치의 구성은 자동항온수조, 저장조, 형상비를 3 단계로 변화시킨 노즐과 순환호스, Grid sheet, 카메라, 사진용 전구, 기록장치로서 Hybrid Recorder 등이 있다. 이와같은 실험장치의 개요도는 Fig. 3.1과 같다.

저장조는 직육면체로 구성되어 있으며 윗면

은 자유표면이다. 저장조의 크기는 폭 1.0 m, 길이 3.0 m이며 12mm 두께의 안전강화유리로 제작하였다. 따라서 저장조내로 유입되는 작동유체의 유동형상을 시각적으로 관찰이 가능하다.

노즐은 열전도율이 작고 제작상 용이함 때문에 Plastic 봉을 사용하여 노즐의 Tip 부분에

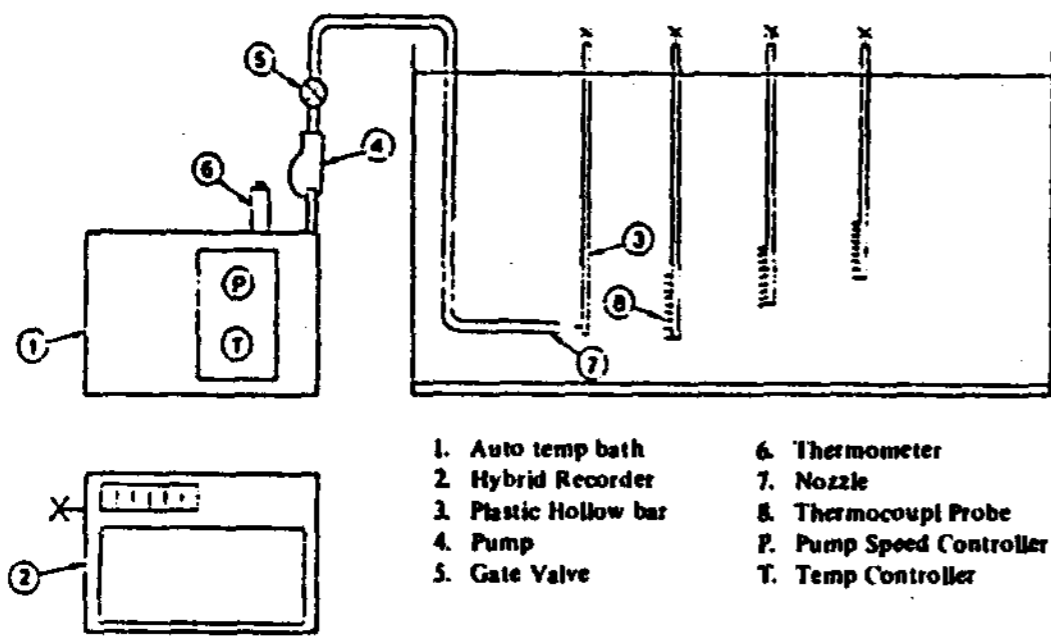


Fig. 3.1 Skelton of Experimental Apparatus

을 형상비에 따라 55 mm 의 길이로 제작하여 같은 직경, 같은 재질의 원형관과 연결시키므로써 유동이 완전히 형성될 수 있도록 충분히 길게 제작하였으며 노즐위치는 수조 바닥으로부터 20 cm 상단, 수조폭의 중앙에 고정시켜서 유동이 수조벽이나 바닥의 영향을 받지 않도록 하였다. 또한 노즐을 수평으로 고정하기 위하여 2개의 평행한 아크릴판을 사용하였다. Fig. 3.2는 형상변화를 나타내고 있다.

본 실험에서 사용된 자동 항온수조는 45×35×25 (cm) 의 용량을 갖고 있으며 유입수 저장탱크 역할은 물론 자동 수온 온도 조절기가 부착되어 있어서 사용하고자 하는 온도에 Setting 하면 정밀하게 자동 Control되며 또한 순환 Pump가 부착되어 있어서 자동 항온수 조내 물의 온도를 균일하게 할수 있고 Pump 회전수에 따라 유출되는 유량을 단계적으로 조정할 수가 있어서 Buoyant Jets 유동을 형성하는데 아주 적절하다.

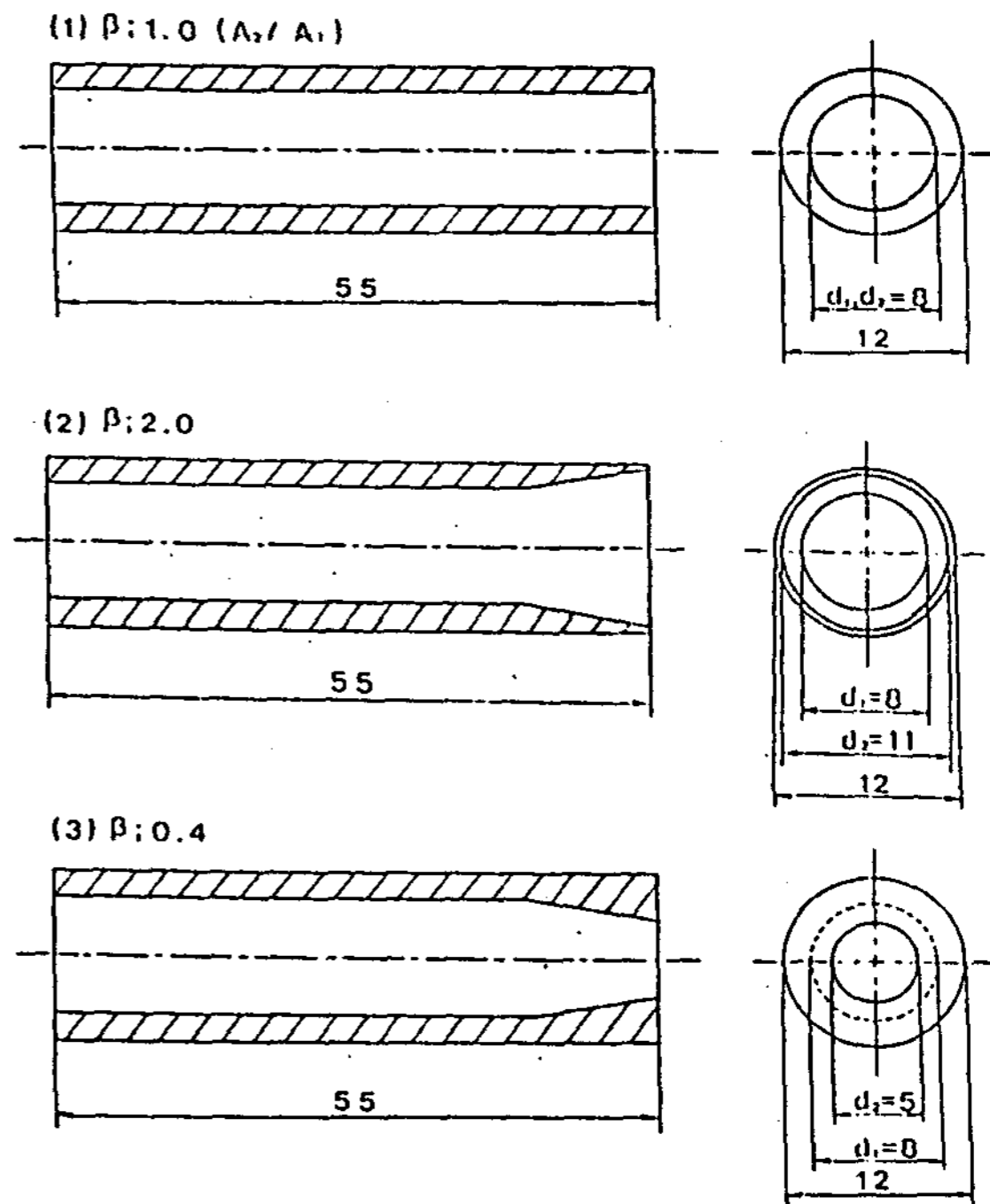


Fig. 3.2 Variation of nozzle aspect

3.2 실험방법

3.2.1 유동 중심축의 온도측정

온도 측정은 직경 8 mm인 아크릴 봉속에 수직적으로 Thermocouple을 2 cm 간격으로 8개를 설치하고 Fig.3.1 처럼 이 Thermocouple rake를 유동장내 각 특정위치에 설치하여 이를 Hybrid Recorder에 연결 하여 측정하였다. 사용된 Thermocouple은 28개의 T형이며 측정위치는 유동 중심축의 온도를 측정하기 위하여 Pump speed와 작동유체와 주위유체의 온도차에 따라서 위치를 변화시켜 측정하였다.

3.2.2 유동 특성치의 가시적 측정

저장조내로 유입되는 작동유체의 유동에 대한 가시적 관찰을 위하여 유입수 저장탱크 역할을 한 자동 항온수조 내에 염료를 혼합하였으며 유동에 대하여 보다 정밀한 관찰을 위하여 실험 수조내의 Fresh water와 밀도가 거의 비

스한 용해된 염료를 선택하기 위하여 Pycnometer를 사용하여 용해된 염료의 밀도를 측정하였다.

이상과 같이 염료가 혼합된 작동유체의 유동형태는 수조뒷면에 부착된 Grid sheet에 대비되어 유동형태를 가시적으로 측정할 수 있을 뿐만 아니라 온도 측정치로부터 유동의 중심축과 경계면도 관찰할 수 있었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유동해석

4.1.1 유동 중심축의 궤적

Fig. 4.1, 4.2, 4.3에서 유동이 진행됨에 따라 모든 노즐에 대해 유동 중심축의 궤적이 증가함을 보여주고 있다.

Fig. 4.1과 4.2는 유동률이 일정한 상태에서 작동유체와 주위유체의 온도차를 증가시킴에 따라 노즐 형상 모두에 대해 Buoyancy의 증가로 말미암아 Momentum의 영향보다

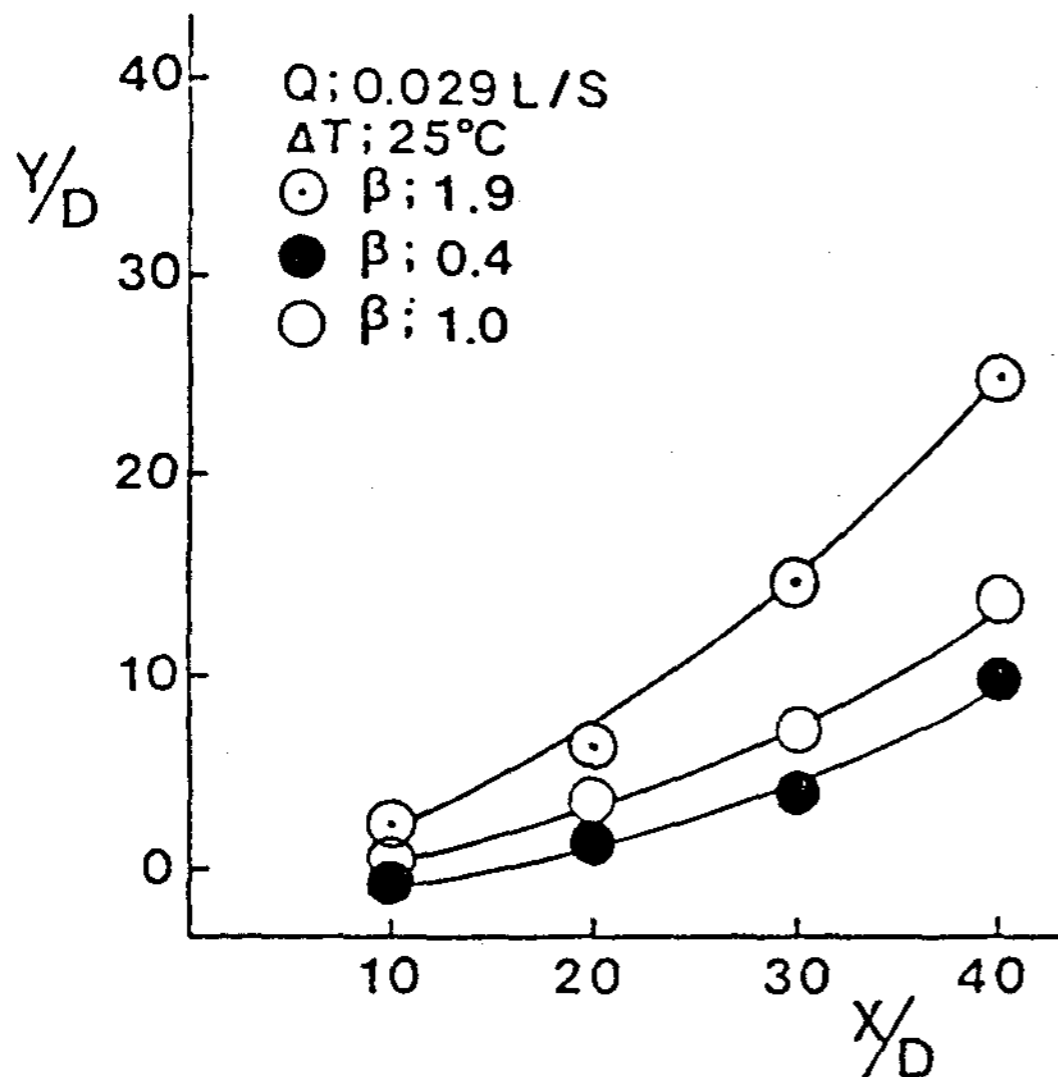


Fig. 4.1 Variation of the Buoyant jets center-line trajectory as a function of nozzle aspect.

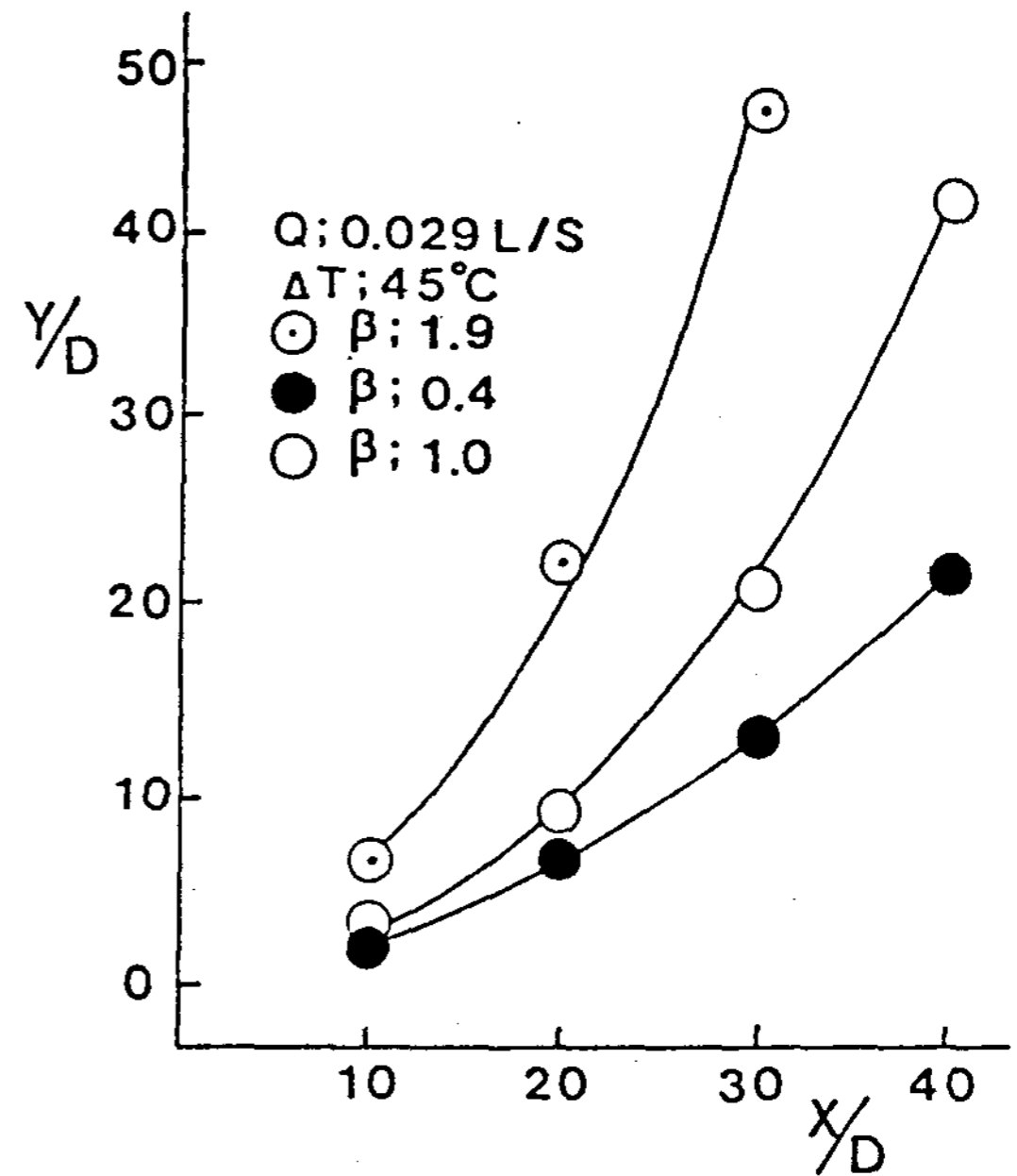


Fig. 4.2 Variation of the Buoyant jets center-line trajectory as a function of nozzle aspect

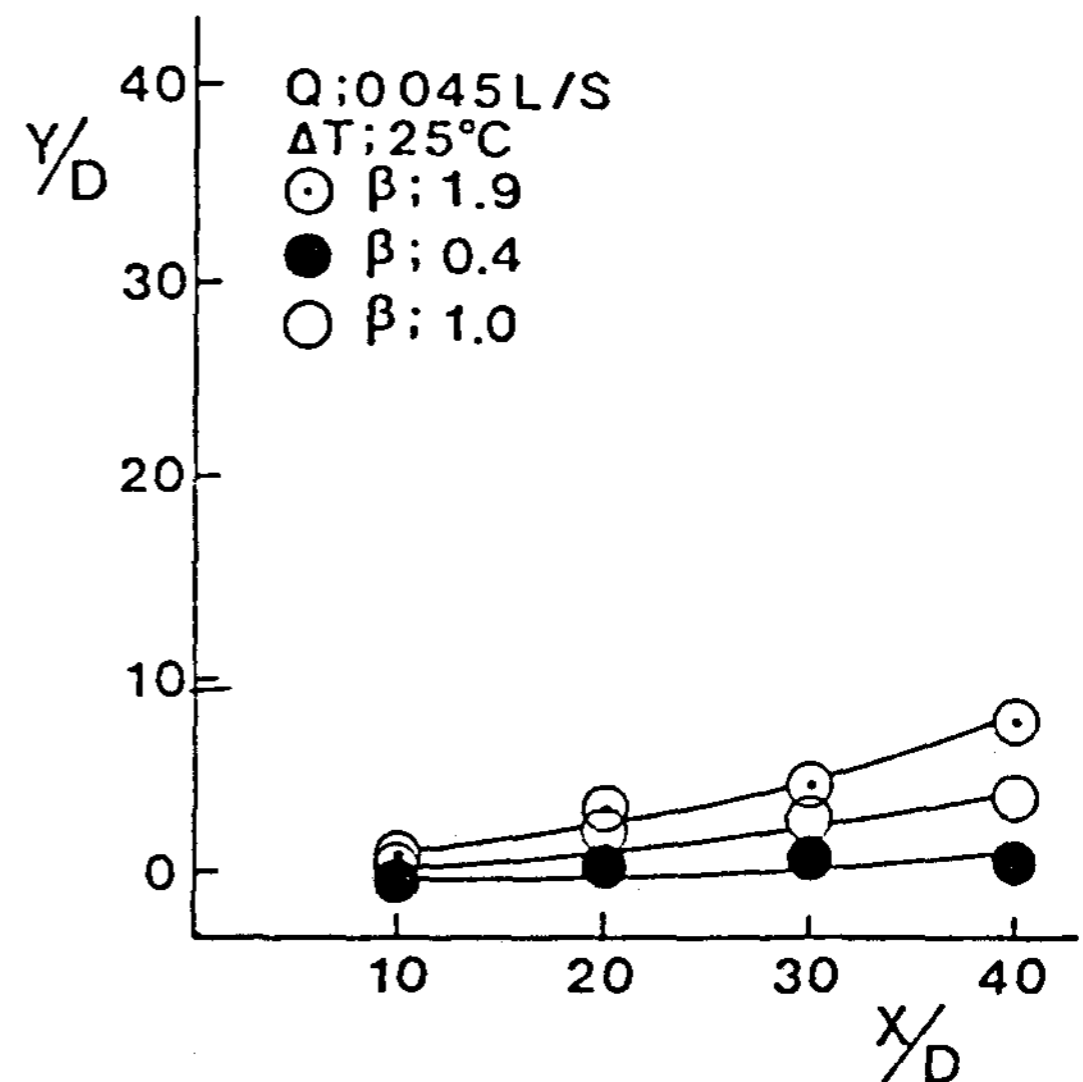


Fig. 4.3 Variation of the Buoyant jets center-line trajectory as a function of nozzle aspect

Buoyancy의 영향이 커짐에 따라 유동의 기울기는 모두 증가하여 유동중심축의 궤적이 증가함을 보이고 있다. 또한 모든 노즐에 대해

일정하게 작동유체와 주위유체의 온도차가 증가 되더라도 노즐의 형상비에 따라서 그 영향이 다르게 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.1 과 4.3 은 노즐형상 모두에 대해 유동률의 증가로 인해 유동중심축의 궤적이 작아 짐을 보이고 있으며 노즐형상에 대해서 유동률 증가에 따른 유동 기울기의 감소율이 다르게 나타남을 볼 수 있다.

4.1.2 유동폭

Fig. 4.4, 4.5, 4.6 에서 Buoyant Jets 의 유동폭은 유동이 진행됨에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 유동이 완전히 형성된 영역 이후에서 점성의 영향을 받은 영역이 유동장 전체로 확장됨에 따라 작동 유체내로 유입되는 주위 유체의 Entrainment 에 의하여 유동폭이 증가하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4.4 와 4.5 에서 유동율이 일정한 상태에서 작동유체와 주위유체의 온도차를 증가시키면 에 따라 노즐형상 모두에 대해 유동폭이 안정

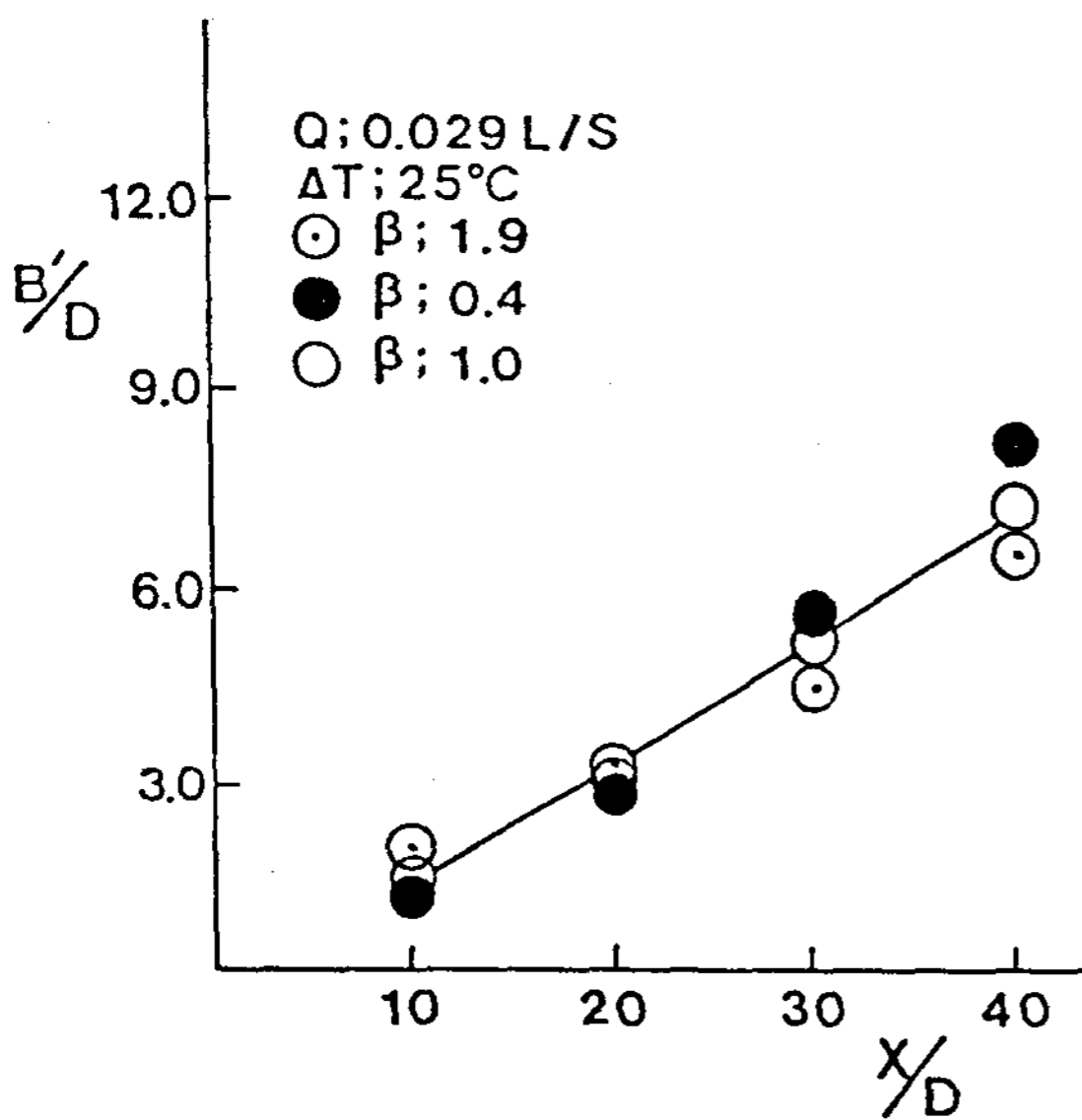


Fig. 4.4 Variation of the Buoyant jets half width as a function of nozzle aspect

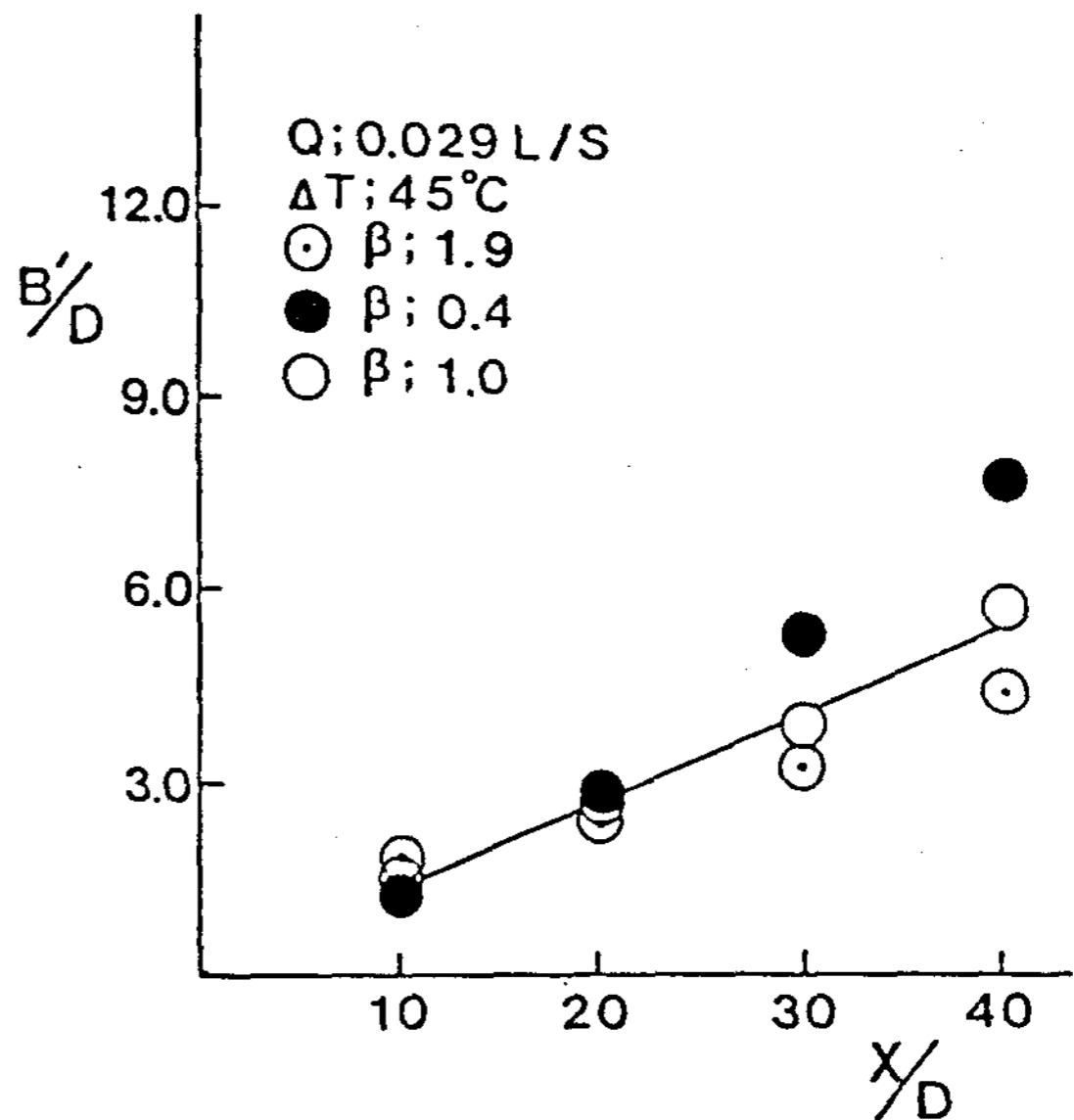


Fig. 4.5 Variation of the Buoyant jets half width as a function of nozzle aspect

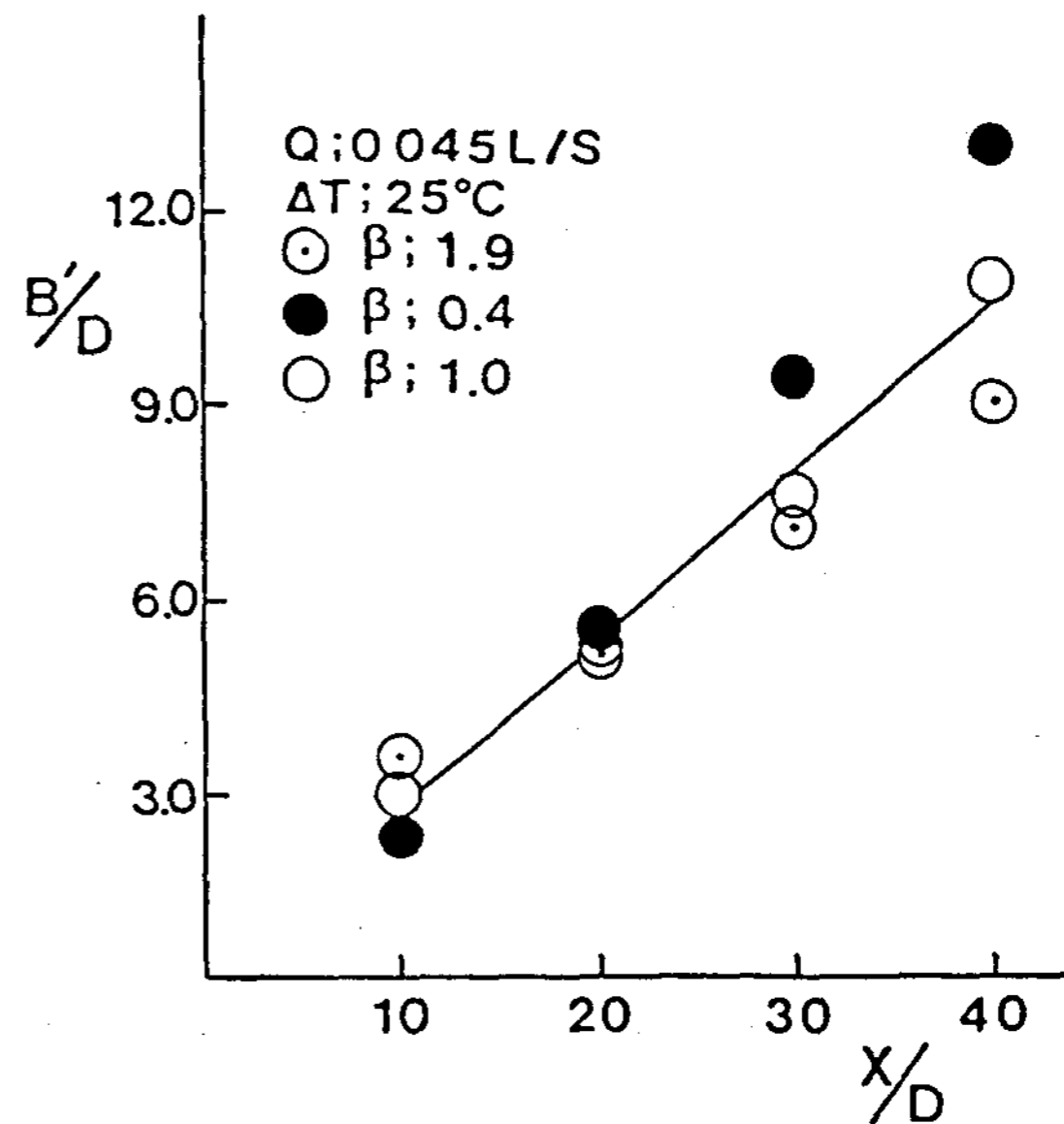


Fig. 4.6 Variation of the Buoyant jets half width as a function of nozzle aspect

하게 나타남을 알 수 있다.

노즐형상 모두에 대해 작동유체와 주위유체의 온도차에 따른 유동폭의 감소율은 각각 다르게 나타남을 알 수 있다. Fig. 4.4 와 4.6 에서는 노즐형상 모두에 대해 유동장내 각 특

정 위치에서 유동폭의 증가를 보여주고 있으며 같은 크기의 유동율을 증가시키더라도 노즐형상에 따라서 서로 다른 영향을 받게됨을 알 수 있다.

4.1.3 유동 중심축의 Dilution ratio

각각의 노즐형상에 따라 유동이 진행되는 동안 Dilution ratio S 값이 증가함을 Fig. 4.7 과 4.8 에서 보여주고 있다.

노즐 단면적 감소로 인해 형상비가 1.0인 경우보다 더 큰 유동속도를 갖는 형상비 0.4인 경우에는 유동장 경계면 부근에서 더욱 큰 속도구배를 갖음으로써 높은 밀도를 갖는 주위유체의 Entrainment를 더욱 크게 일으켜 유동중심축의 밀도의 증가는 형상비가 1.0인 경우보다 더 크게 나타난다.

작동유체의 온도와 실험수조내 정지유체의 평균온도와의 차이가 클수록 유동경계면 부근에서의 점성이 낮아 작동유체와 주위유체의 중심축 밀도의 증가는 작게 나타남을 알 수 있다.

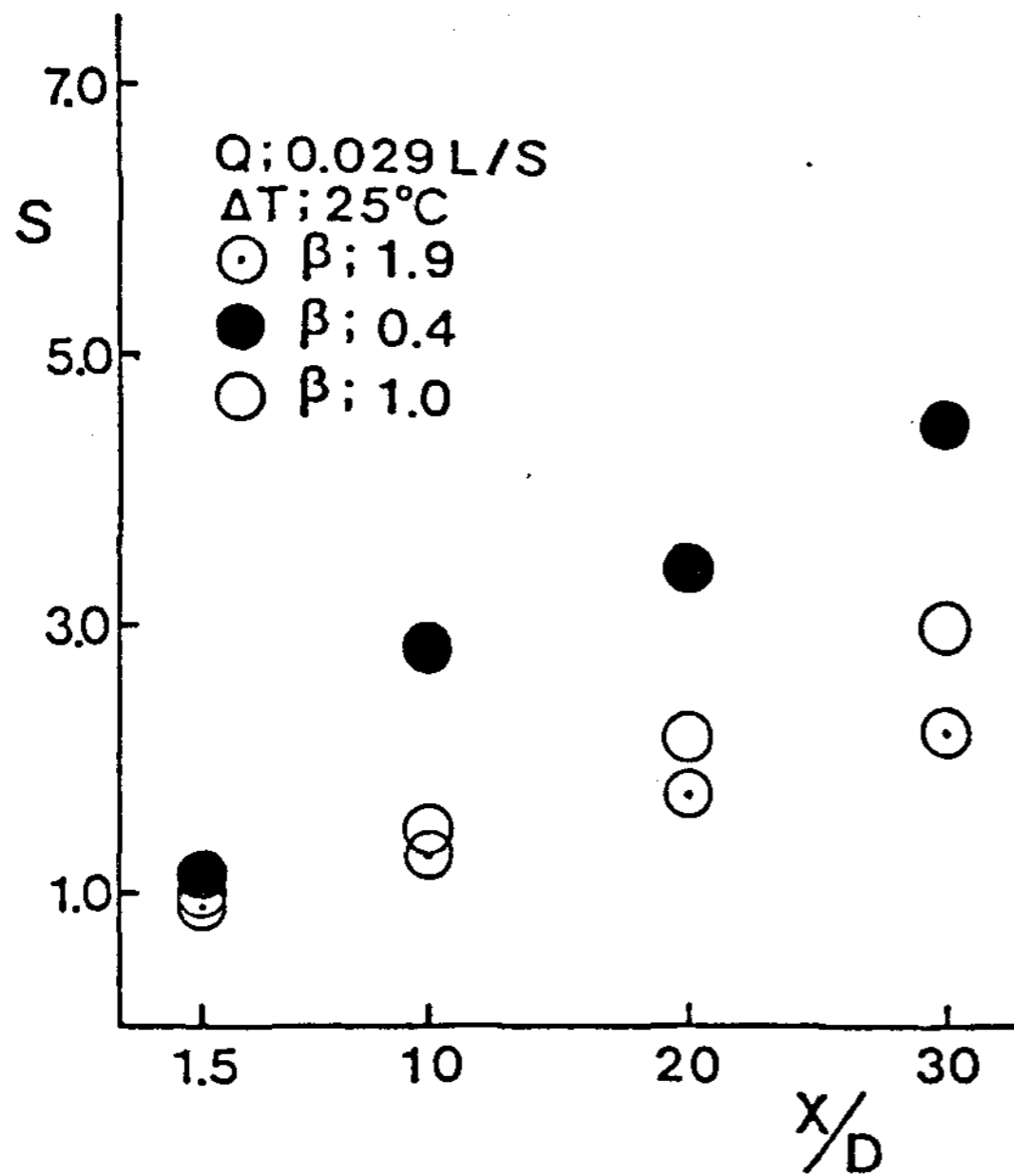


Fig. 4.7 Dilution ratio for near field of Buoyant jets

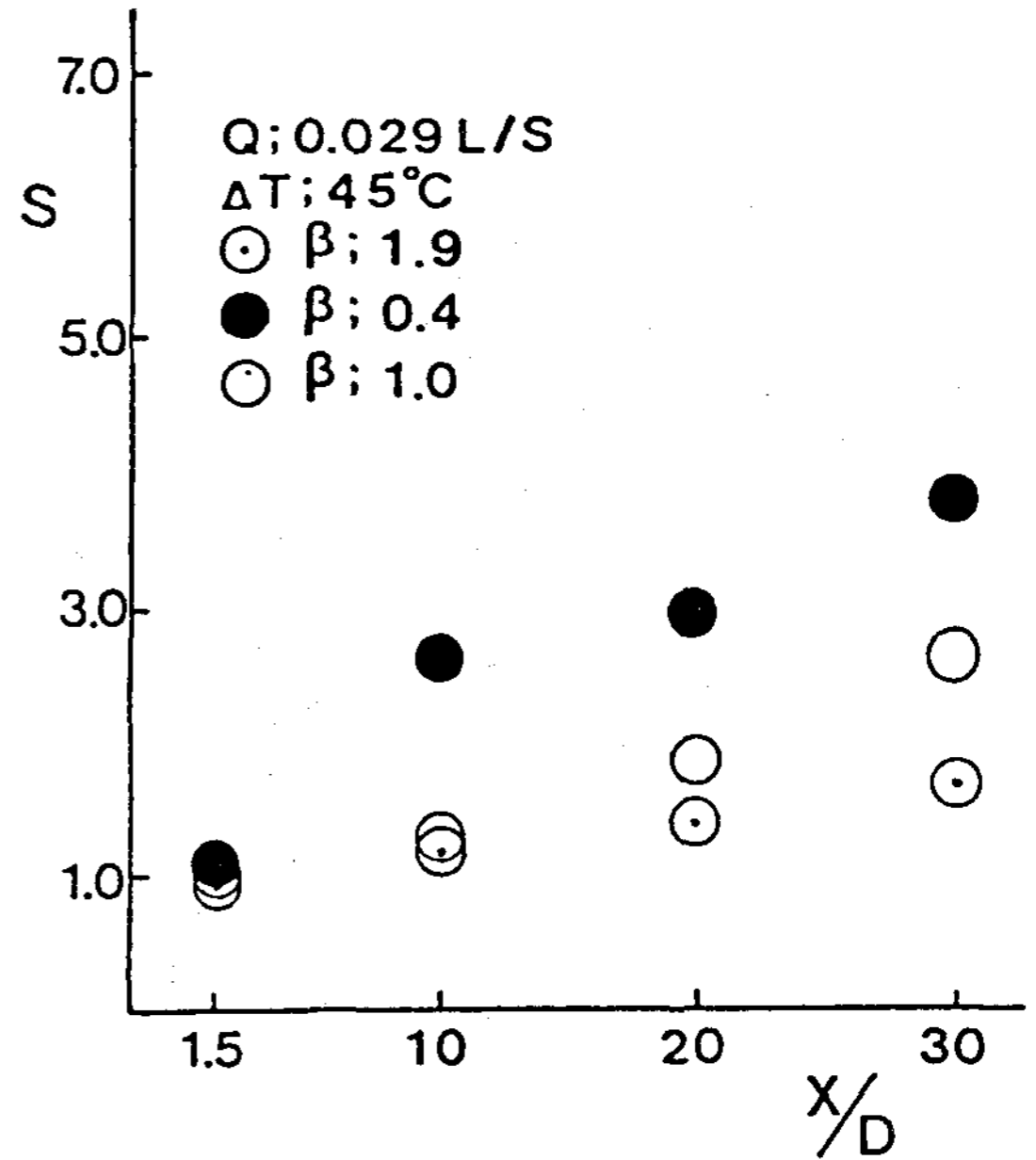


Fig. 4.8 Dilution ratio for near field of Buoyant jets

4.2 Fr에 대한 고찰

Fig. 4.9는 본 실험에서 사용된 실험조건중 노즐 출구에서 거의 같은 Fr 수를 가지고 있

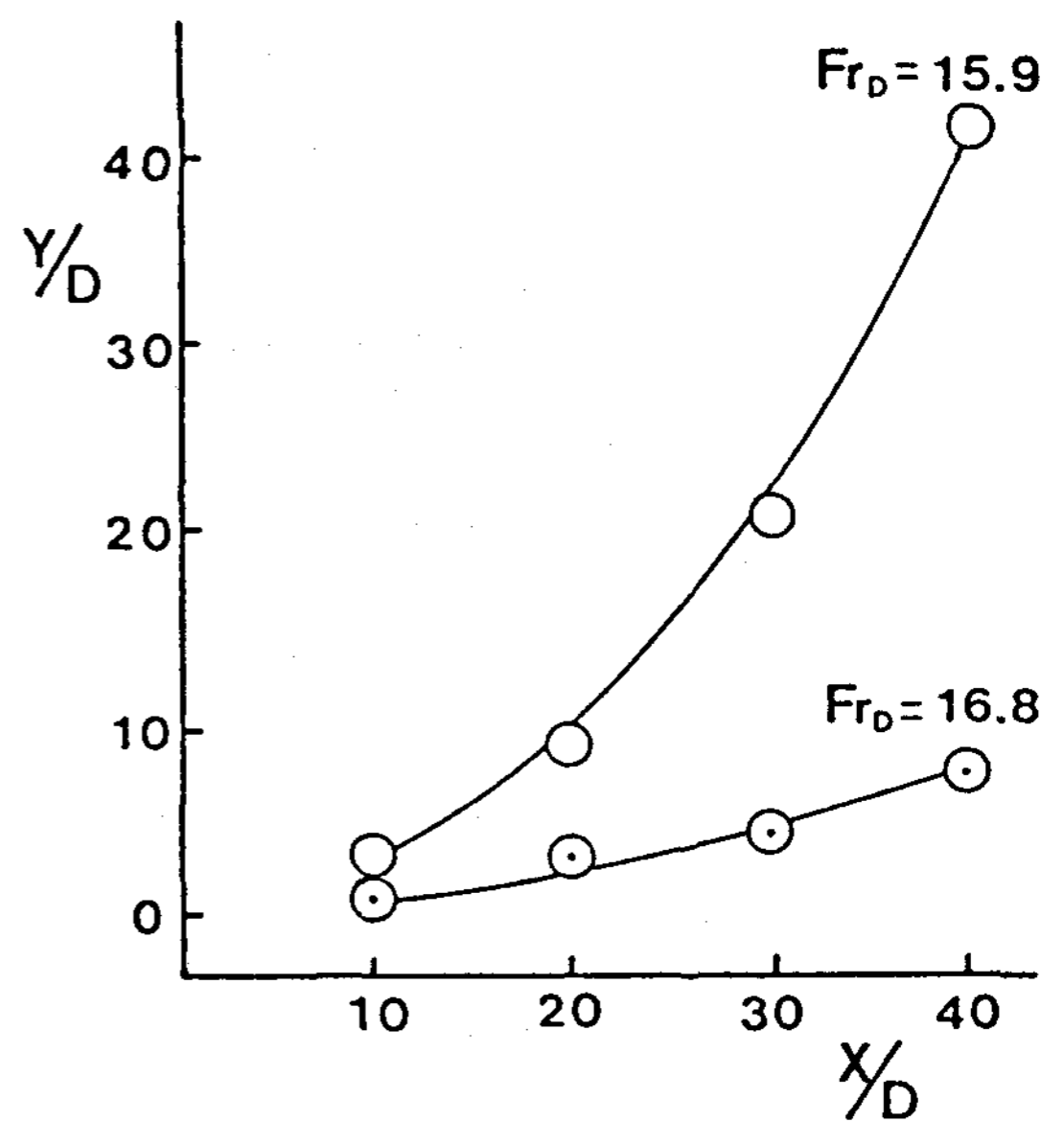


Fig. 4.9 Comparison of Buoyant jets centerline trajectory with Froude number.

음에도 불구하고 유동의 형태가 각각 다르게 나타남을 보이고 있다. 이것은 같은 Fr 수를 가진 노즐출구로 부터 유동이 진행될 때 유동장 전체에 걸쳐서는 어떠한 상사법칙이 성립된다고 하더라도 노즐출구에서 가까운 영역은 Buoyant Jets 유동형태를 결정하는 아주 중요한 영역이므로 이 영역을 고려할 때는 Momentum 과 Buoyancy 의 상대적 크기가 고려되어야 함을 뜻한다.

또한 Chan 의 이론해 6) 는 같은 Fr 수를 갖는 본 실험에서 행한 조건에 대해서도 다양하게 나타남을 보여주는데 이것은 각 예측이 선정된 Fr 수에서 실행된 실험으로부터 얻은 실험치들과는 일치하고 유동폭의 결과보다는 유동좌표에 대해서 더욱 다양하게 나타났다.

Fig. 4.10, 4.11, 4.12에서는 본 실험에서 측정된 Entrainment coefficient와 선정된 Fr 수를 사용해 Buoyant Jets 의 유동중심축의 궤적, 유동폭, Dilution ratio 등에 대한 Chan, D.T.L 의 이론해와 측정치를 비교한 것인데 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

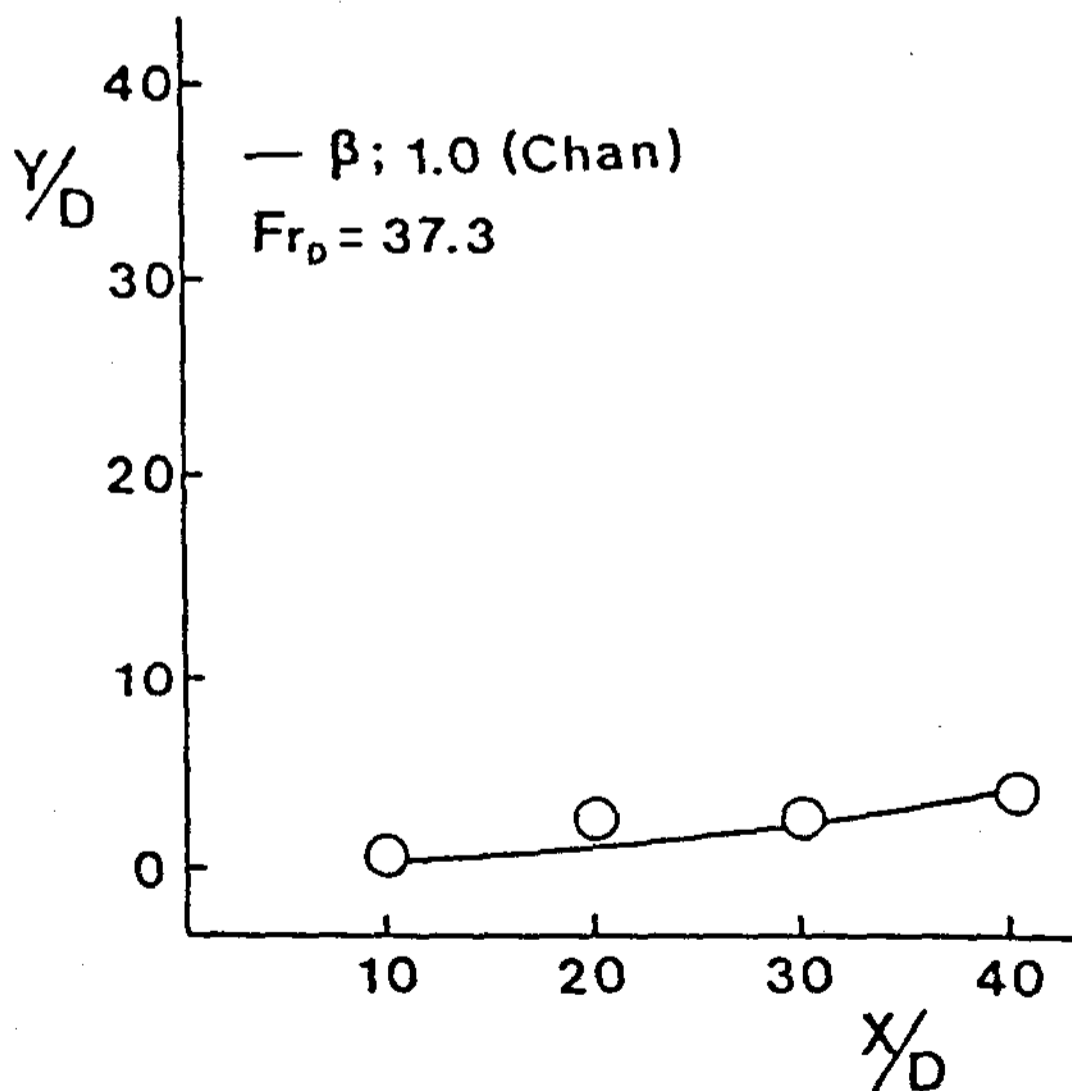


Fig. 4.10 Analytical prediction of Buoyant jets centerline trajectory

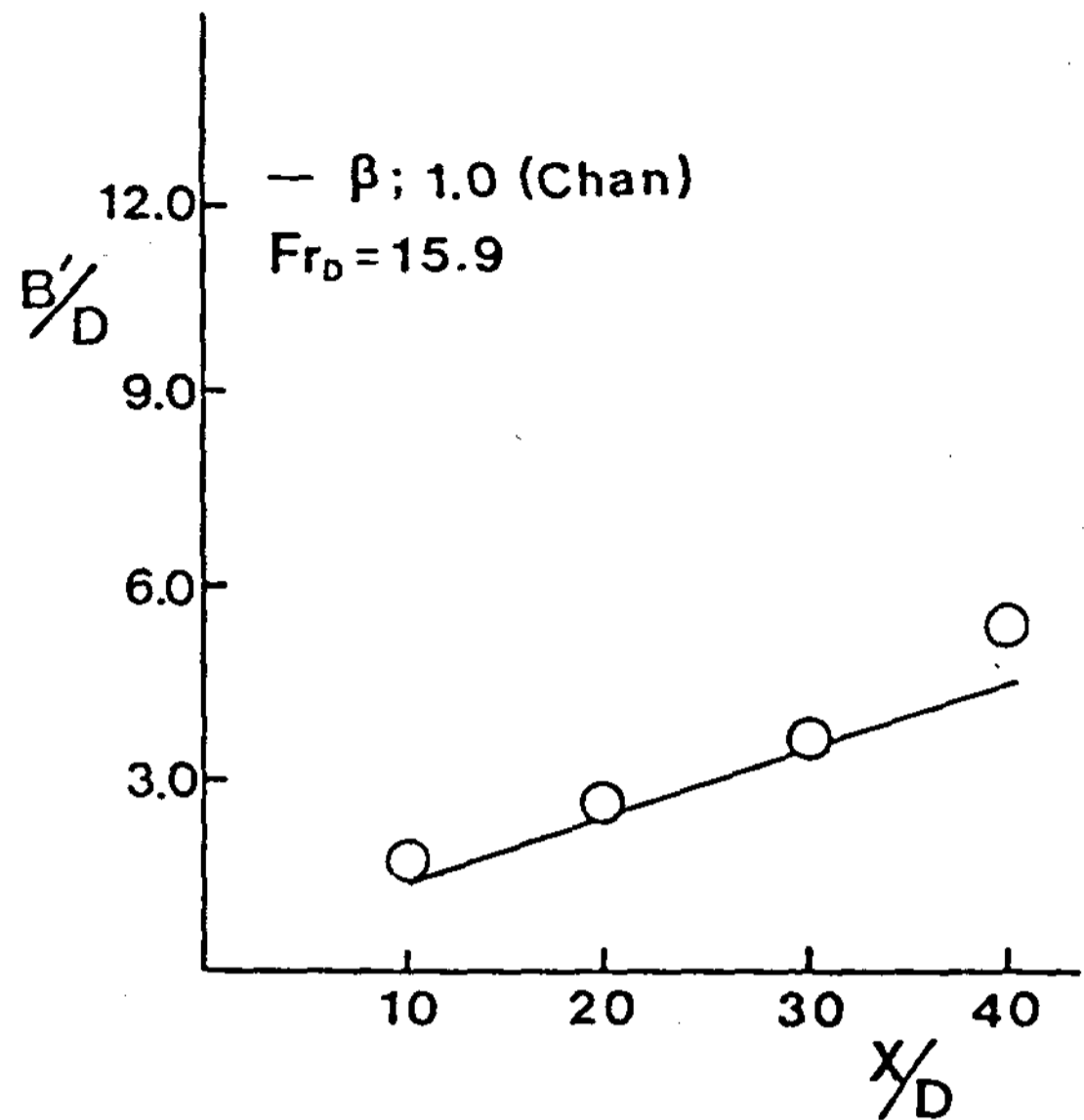


Fig. 4.11 Analytical prediction of Buoyant jets half width

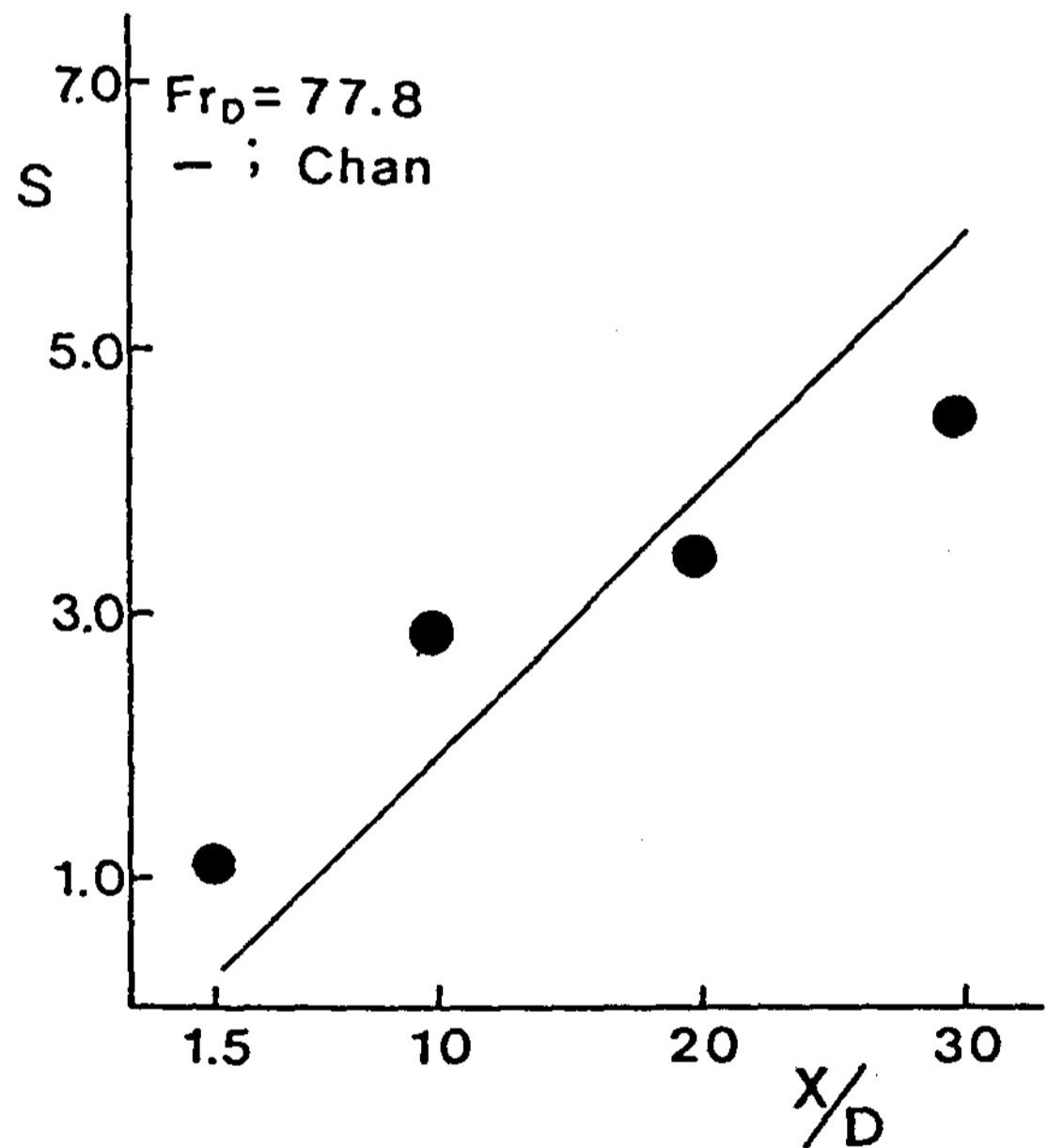


Fig. 4.12 Analytical prediction of Buoyant jets Dilution ratio

5. 결론

(1) 노즐형상 모두에 대해 유동률 증가에 따라 유동 중심축의 궤적은 작아지고 작동유체와 주위유체의 온도차 증가에 따라서는 유동 중심

축의 궤적은 증가함을 알 수 있었다. 또한 형상비가 작을수록 유동 중심축의 궤적은 작아지고 작동유체와 주위유체의 온도차 증가나 유동을 증가하는 중심축의 궤적을 결정하는데 더 적은 영향을 끼침을 알 수 있다.

(2) 노즐형상 모두에 대해 유동률 증가에 따라 유동폭은 증가하고 작동유체와 주위유체의 온도차 증가에 따라 유동폭은 안정하게 나타났으며 형상비가 작을수록 유동폭의 증가율은 더 크고 작동유체와 주위유체의 온도차 증가나 유동을 증가하는 유동폭을 결정하는데 더 작은 영향을 미침을 알 수 있었다.

(3) 노즐형상 모두에 대해 유동률 증가에 따라 Dilution ratio 값은 증가하였고 작동유체와 주위 유체의 온도차 증가에 따라 Dilution ratio 값은 감소함을 알 수 있다. 또한 형상비가 작을수록 Dilution ratio 값은 더 크고 작동유체와 주위유체의 온도차 증가는 Dilution ratio 값의 변화에 더 작은 영향을 미침을 알 수 있었다.

(4) Fr 수는 유동장 전체에 걸친 유동형태를 예측할 수 있는 인자이지만 노즐 출구에서 가까운 영역을 고려할 때는 Momentum과 Buoyancy의 상대적 크기에 의해 결정됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 1989년도 “대체에너지기술개발사업”의 연구비지원에 의하여 연구된 것의 일부이며 관계제위께 감사드리는 바이다.

REFERENCE

1. G. Abraham, "Horizontal Jets in Stagnant Fluid of Other Density," Proceedings ASCE, Journal of Hydraulics Division, 91, HY4, July, pp. 138-154, 1965.
2. G.T. Csandy, "Effect of Plume rise on ground level pollution," Atmos. Env. 7, pp. 1-16, 1973.
3. M.A. Shirazi, R.A. Mcquivey, and T.N. Keefer, "Heated Water Jet in coflowing turbulent stream", J. Hydraul. Div. ASCE. 100, pp. 919-934, 1975.
4. W.E. Hart, "Jets discharge into a fluid with a density gradient," ASCE Journal of Hydraulics Div. vol. 87, HY6, pp. 191-200, 1961.
5. L.J.S. Bradbury, "The Structure of a self preserving turbulent plane Jet." J. Fluid Mech. 23, pp. 31-61, 1965.
6. D.T.L. Chan and J.F. Kennedy, "Submerged Buoyant Jets in Quiescent Fluids," ASCE Journal of Hydraulics Div. HY6, pp. 733-747, 1975.