확산관 방류구 형상에 따른 난류제트의 혼합특성

○류시완[1]/서일원[2]/박용성[3]

1. 서론

다양한 형태의 방류구에서 고속으로 분사되는 흐름인 제트는 자유난류(free turbulence)의 한 분야로서 많은 연구가 수행되어 왔다(Daily와 Harleman, 1966). 일반적으로 제트의 흐름특성은 그림 1에 도시한 바와 같이 흐름확립영역(zone of flow establishment, ZFE)과 확립흐름영역(zone of established flow, ZEF)의 두 영역으로 분할하여 각각의 특성을 설명한다(Fischer 등, 1979). 이제까지 제트에 관한 연구는 이론적인 접근이 보다 용이한 확립흐름영역에 집중되어왔다. 원형부력제트에 대한 Morton 등(1956)에 의한 선구적인 연구가 수행된 후, 많은 연구자들이 이론적, 실험적, 그리고 수치적 연구를 통해서 확립흐름영역에서의 제트의 희석률, 제트궤적, 유속분포, 난류특성 등에 대해 상세하게 규명하였다(Fischer 등, 1979; List, 1982; Papanicolaou 등, 1988). 한편 방류구에 가까운 영역인 흐름확립영역에 대한 연구들은 주로 흐름의 난류특성을 규명하는데 집중되어왔다. Crow 등(1971), Weigraber 등(1998)은 유동장가시화기법 및 실험연구를 통하여 이 영역에서 난류흐름의 거동양상과 진화과정이 난류의 조직적 구조(turbulent coherent structure)에 의해 결정되고, 이러한 특성이 확립흐름영역에서의 제트거동에도 영향을 준다고 주장한 바 있다.

방류구의 기하학적인 형상과 방류특성에 의해 결정되는 난류제트의 초기조건은 이후의 흐름진화과정에 결정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 특히, 이러한 초기조건의 영향은 확립흐름영역에서보다 흐름확립영역에서 더욱 크게 나타난다. Hussain 등(1977)은 평면제트에 관한 실험적 연구를 통해서 방류구 근역(near field)에서 제트의 시간평균특성 및 난류특성이 초기방류조건과 밀접한 함수관계를 가짐을 밝혀낸 바 있다. 한편, 확립흐름영역에서는 일반적으로 제트의 흐름특성이 초기조건에 별로 영향을 받지 않는 것으로 간주하고, 자기상사가정(self-similarity assumption)을 사용하여 이론을 전개하여 왔다. Yang 등(1999)은 방류구 유입부의 종단형상에 따라 제트의 특성이 상이하게 나타남을 보고한 바 있다. 또한 Gutmark 등(1999)은 방류구 단면을 사각형이나 타원형 등으로 제작하여 비원형제트(noncircular jet)에 관한 연구를 수행한 바 있다. 따라서 방류구의 종·횡단 형상과 방류조건에 따른 초기조건을 변화시켜 근역에서 제트의 초기혼합특성을 변화시켜 희석률을 극대화시킬 수 있다면 이는 공학적으로 매우 유용한 기술이 될 것이다.

본 연구에서는 방류구의 형상에 따른 초기조건이 제트의 혼합거동에 미치는 영향을 체계적으로 규명하기 위하여 다양한 종단형상을 가지는 방류구에 대한 실험을 수행하였다. 실험에서는 각각의 방류구에서 방류된 제트의 시간평균특성 및 난류특성을 세부적으로 분석하였다. 유속 및 난류의 측정은 PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용하였으며, 흐름확립영역 및 확립흐름영역에서 제트의 흐름특성을 규명하는데 주력하였다.

2. 이론적 배경

확립흐름영역에서 자기상사가정을 적용하면, 중심선 유속이 거리에 반비례함을 보일 수 있다(Rajanatnam, 1976; Chan 등, 1998). 따라서 일반적으로 중심선 평균유속 U_c는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_c = L_0 U_0 / x, \quad x > L_0 \tag{1}$$

여기에서, U_0는 방류유속이고, L_0는 제트핵(potential core)의 길이이다. L_0의 값은 연구자에 따라서 다소 차이가

1) 서울대학교 공과대학원 지구환경시스템공학부 박사과정(siwan@plaza1.snu.ac.kr)
2) 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수(seoilwon@plaza.snu.ac.kr)
3) 서울대학교 공과대학원 지구환경시스템공학부 석사(pang@n4tec.co.kr)

있지만, 일반적으로 방류공 지름의 6~7배 정도로 알려져 있다.

제트의 중심선유속에 대한 횡방향 분포는 자기상사성에 근거하여 다음과 같은 함수 형태로 나타낼 수 있다.

$$U/U_c = f(r/x) \tag{2}$$

여기서 U는 종방향 평균유속이다. 함수 f의 형태로는 식 (3)에서와 같이 Gaussian 형태의 함수가 가장 많이 적용되고 있다.

$$U/U_c = \exp[-c(r/x)^2] \tag{3}$$

여기서 c는 실험에 의해 결정되는 상수로서 연구자에 따라서 48~108의 범위를 갖는 다양한 값이 제시되었다(Seo 등, 2001). Seo 등(2001)은 제트흐름을 2차원 경계층흐름으로 가정하고 이에 대한 연속방정식과 운동방정식을 지배방정식으로 하고 여기에 흐름함수(stream function)을 도입한 후 해석적인 해를 유도하였다. 유도된 해석해는 다음 식과 같다.

$$U/U_c = 1/[1+58.0(r/x)^2]^2 \tag{4}$$

식 (4)는 Daily와 Harleman(1966)이 제안한 이론식과 매우 근사한 형태임을 보여 주고 있다.

3. 실험장치 및 실험조건

방류구 근역에서의 난류제트의 거동을 정밀하게 측정하기 위해서 PIV시스템을 이용하였다. 실험수조는 길이 6.0 m, 폭 1.2 m, 높이 0.8 m 로서 측면 및 바닥면은 강화유리로 제작하여 레이저의 투시 및 카메라에 의한 영상취득이 용이하도록 제작하였다. 방류수는 정수두유지기능이 있는 수조를 통하여 공급하였으며 오벌기어식 유량계(유량측정범위: 0.0064~0.139 l/s)를 이용하여 공급유량을 측정하였다.

본 실험에서 방류구 모형은 종단형상에 따라서 크게 직선방류구와 나선형(spiral) 방류구의 두가지로 분류되며, 직선방류구는 다시 유입부형태에 따라서 종구형(round entrance)과 직각형(square entrance)으로 분류된다(그림 2참조). 나선형(spiral) 방류구는 방류구내부에 용수철을 삽입하여 나선형의 흐름을 유도하였다. 방류구 모형의 횡단형태는 모두 원형이며, 직경은 모두 5 mm이다. 방류구 모형의 길이는 12.5, 20.0, 35.0 mm의 세 가지로 제작하여 방류구 길이에 따른 제트의 특성을 규명하고자 하였다. 방류구는 실험수조 바닥에 위치한 장방형 혼합챔버(길이 85 cm, 폭 15 cm, 높이 10 cm)의 상부에 부착하여 제트를 방류함으로써 방류구를 방류수 공급관에 직접 연결할 경우 발생하는 흐름의 조기확립을 미연에 방지하고자 하였다.

PIV는 이전의 유동장가시화기법이 유동장의 정성적인 관찰에 그쳤던 것을 정량적으로 분석할 수 있도록 한 유속측정장비로서 1990년대에 들어서 유체역학 분야에서 활발히 응용되고 있다(Buchhave, 1992). PIV는 레이저 및 CCD 카메라 등 측정에 필요한 장비들을 유동장 외부에 설치하기 때문에 기존에 사용되던 유속측정장치는 달리 흐름을 교란시키지 않고 유속을 측정할 수 있다. 또한, LDV와 같은 비교란유속측정장비들이 특정한 한 지점에서의 유속 측정만이 가능한 반면, PIV는 동시에 수백에서 수천 지점의 유속측정이 가능하여 특정 시각에서의 전체 유속장의 측정이 가능하다. 그림 3은 일반적인 PIV시스템의 구성을 보여준다. 본 연구에서의 유동장 측정은 평균비중이 1이고 직경이 8~12μm인 유리입자를 유체에 혼합한 후 레이저 광선을 투사하여 흐름 중의 입자에 의해 반사된 레이저 광선을 CCD카메라를 이용하여 촬영하였다. 이렇게 촬영된 영상들을 분석하여 입자들의 이동거리를 구하여 유속자료를 얻게 된다. 본 연구에서는 영상을 얻기 위한 광원으로 Nd-YAG 레이저를 이용하였으며, 카메라는 1000×1016 해상도로 초당 30 프레임을 찍는 CCD카메라(Kodak Megaplus 1.0 ES)를 사용하였다.

본 연구에서는 방류구의 종단형상에 따라서 각각 3가지씩 총 9가지의 실험을 수행하였다. 실험조건은 표 1에 요약한 바와 같다. 모든 실험경우에 대하여 주변수의 수심은 72 cm로 동일하게 유지하였고, 제트의 평균방류유속 U_0는 108.5~160.9 cm/s 범위의 값을 취했다. 표 1에 나타낸 U_0는 유량계에 의해 측정된 평균유속으로서 이는 PIV에 의해 측정된 평균유속과 일치하는 것으로 나타났다. 방류되는 제트의 레이놀즈수(Reynolds number)는 5,845~8,221의 범위에 있으며, 이는 난류흐름을 충분히 보장하는 것으로 판단된다.

4. 실험결과분석

각 방류구의 형상에 따른 x방향 평균유속의 횡분포를 그림 4에 도시하였다. 그림 4에 나타난 바와 같이, 종구형방류구의 경우 방류초기에는 모자모양(top-hat)의 분포를 보이며 흐름이 확립되어감에 따라 유속분포는 점차 Gaussian 함수 형태로 접근함을 알 수 있다. 직각형방류구의 경우 종구형방류구와 유사한 유속분포를 나타낸다. 즉, 방류초기에는 모자모양의 분포를 보이며 흐름이 확립되어감에 따라 유속분포는 점차 Gaussian 함수 형태로 바뀌어 가는데, 제트핵의 길이가 종구형 방류구에 비해 다소 짧은 것을 알 수 있다. 나선형방류구의 경우에는 전체적으로 흐름이 매우 빨리 확립됨을 관찰할 수 있다. 이는 방류구 내에 형성된 나선형 유동에 의하여 방류구 내에서 이미 완전난류흐름이 확립되어 방류되기 때문으로 판단된다.

확립흐름영역(ZEF)에서의 흐름의 자기상사성을 규명하기 위해서 그림 5에 각 방류구에 대하여 연직위치별(x/d_p) 무차원화된 유속을 r/x에 대해 도시하였다. 그림 5에는 Gaussian 근사해와 해석해를 함께 도시하였다. Gaussian 근사해의 경우, 최소제곱법을 이용하여 측정된 자료에 최적 맞춤시킨 것이다. 이렇게 결정된 Gaussian 근사해의 상수 c는 각각, 종구형방류구의 경우 82.2, 직각형방류구의 경우 76.7, 그리고 나선형방류구의 경우 68.5이다. Gaussian 근사해와 해석해 모두 측정된 자료와 비교적 잘 일치하고 있다. 나선형방류구의 유속분포는 다소 산포성을 보이고 있으나, 확립흐름영역에서의 각 방류구에 대한 유속의 횡분포들이 매우 유사하며, Gaussian 근사해의 상수 c의 값 또한 상당히 비슷하다. 즉, $x/d_p=6\sim7$인 지점을 지난 후에는 방류구의 기하학적 형상의 차이가 유속의 횡분포에 미치는 영향이 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

각 방류구별 x방향 상대난류강도를 그림 6에 도시하였다. 여기서 상대난류강도는 다음과 같이 정의된다.

$$x\text{방향상대난류강도}=\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0}=\frac{1}{U_0}\left[\frac{1}{T}\int_0^T u'^2 dt\right]^{1/2} \tag{5}$$

여기서, u'은 난류변동성분으로서 다음과 같이 정의된다.

$$u'=U-\overline{U}=U-\frac{1}{T}\int_0^T U dt \tag{6}$$

여기서 U는 x방향 순간속도, $\overline{U}$는 시간평균속도, T는 난류변동성분을 평균하기 위한 시간 간격이다.

일반적으로, 제트의 난류강도는 방류초기 전단층에서 유발된 불안정성에 의해서 발생하여 제트가 진화해감에 따라 급격하게 증가한다고 알려져 있다(Lozanova 등, 1998). 동일한 현상이 본 실험의 종구형 및 직각형방류구의 경우에서 관찰되었는데, 방류초기에는 상대난류강도가 제트와 주변유체의 경계를 이루는 전단층에 집중되어 있다가 점차 제트의 중심선으로 이동함을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 Yang 등(1999)이 LDV(Laser Doppler Velocimeter)를 이용하여 측정한 제트의 난류특성과도 유사한 것이다. 그림에는 제트의 경계를 제트의 반폭으로 정의하여 점선으로 표시하였다. 여기서 제트의 반폭은 제트의 중심선에서부터 유속이 중심선 유속의 $1/e$배가 되는 지점까지의 폭으로 정의하였다(Fischer 등, 1979). 대략, $x/d_p=10$인 지점 이후에는 난류가 제트의 중심까지 침투하여 비교적 편평한 모양을 보여준다. 그러나, 나선형방류구의 경우에는 그림 6 c)에서 볼 수 있는 바와 같이, 매우 특이한 난류구조를 갖고 있다. 즉, 방류초기부터 제트중심선에서 최대난류강도가 나타나며, 상대난류강도가 매우 커서 종구형 및 직각형방류구의 경우의 2~3배의 값을 보여주고 있다. 이러한 난류강도의 횡분포는 평균유속분포와 비슷한 형상을 보이는데, 이는 방류구 내에 삽입된 용수철에 의하여 방류구 내에서 부터 이미 완전난류흐름이 확립되어 방류초기부터 제트의 중심까지 난류가 침투하였기 때문으로 생각된다. 그림 7은 방류구별 난류강도분포를 보여주고 있다. 그림 7에 제시된 난류강도분포를 통해서도 전술한 바와 같은 난류거동을 살펴볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 다양한 종단형상을 갖는 방류구에서 방류된 원형난류제트의 유속 및 난류특성을 규명하고자 PIV를 사용하여 제트의 유속장을 측정하여 분석하였다. 실험결과를 분석하여 발견한 사실은 다음과 같다. 세 가지 종류의 방류구에서 방류되는 제트의 진화과정이 매우 상이하게 발생하는 것으로 밝혀졌는데, 종구형방류구와 직각형방류구의

경우에는 방류초기구간에서는 포텐셜흐름을 유지하는 흐름확립영역이 나타나고, 제트가 진화한 후에 와열이 관찰되고 있으나, 나선형방류구의 경우에는 방류초기부터 제트의 내부에서 난류가 발달하여 흐름확립영역을 거의 나타나지 않고 있다. 이러한 사실은 방류구 형상에 따른 x방향 평균유속의 횡분포 분석결과에서도 확연하게 나타나고 있다. 즉, 종구형방류구 및 직각형방류구의 경우 방류초기에는 모자모양의 분포를 보이고 흐름이 확립되어감에 따라 유속분포는 점차 Gaussian 함수 형태로 접근해가는 반면, 나선형방류구의 경우에는 방류초기구간부터 Gaussian분포를 보이는데, 이는 방류구내에 형성된 나선형 유동에 의하여 방류구내에서 이미 완전난류흐름이 확립되어 방류되기 때문으로 판단된다.

제트의 난류특성을 분석한 결과, 종구형 및 직각형방류구의 경우 방류초기에는 난류강도가 제트와 주변유체의 경계를 이루는 전단층에서 최대값을 보이다가 제트가 진화해감에 따라 점차 제트의 중심부로 침투하여 $x/d_p=10$인 지점 이후에는 난류가 제트의 중심까지 발달하여 난류강도의 횡분포가 편평한 모양을 보여준다. 그러나 나선형방류구의 경우에는 방류초기부터 제트의 중심선에서 최대난류강도가 나타나며, 상대난류강도가 매우 커서 종구형 및 직각형방류구의 경우의 2~3배의 값을 보여주고 있다. 이는 방류구내에서 이미 완전난류흐름이 확립되어 방류초기부터 제트의 중심까지 난류가 침투하였기 때문으로 판단된다. 본 연구에서 밝혀진 결과를 실제의 하수확산관 설계 및 시공에 적용하면, 별도의 기계적인 장치 없이 방류구의 종단형상만을 개선함으로써 하수확산관이나 온배수확산관 등의 혼합거동을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 환경처의 환경공학기술개발사업(G-7)의 연구비 지원과 서울대학교 공학연구소의 연구지원에 의해 수행된 결과로 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 서일원, 류시완 (2000). "국내외 하수해양방류시설의 현황 및 효율." **대한토목학회지 학술기사**, 제48권, 4호, pp. 17-22.
2. Buchhave, P. (1992). "Particle Image Velocimetry-Status and Trends." *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 5, pp. 586-604.
3. Chan, C. H. C., and Lam, K. M. (1998). "Centerline Velocity Decay of a Circular Jet in a Counterflowing Stream." *Phys. Fluids*, Vol. 10, No. 3, Part 2, pp. 225-236.
4. Crow, S. C., and Champagne, F. H. (1971). "Orderly Structure in Jet Turbulence." *J. Fluid Mech.*, Vol. 48, Part 3, pp. 547-591.
5. Daily, J. W., and Harleman, D. R. F. (1973). *Fluid Dynamics*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
6. Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brooks, N. H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, New York, N. Y.
7. Gutmark, E. J., and Grinstein, F. F. (1999). "Flow Control with Noncircular Jets." *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 31, pp. 239-272.
8. Hussain, A. K. M. F., and Clark, A. R. (1977). "Upstream Influence on the Near Field of a Plane Turbulent Jet." *Phys. Fluids*, Vol. 20, No. 9, pp. 1416-1426.
9. Hussein, H. J., Capp, S. P., and George, W. K. (1994). "Velocity Measurements in a High Reynolds Number, Momentum-Conserving, Axisymmetric, Turbulent Jet." *J. Fluid Mech.*, Vol. 258, pp. 31-75.
10. Inoue, M., and Su, T. (1983). "Mixing Characteristics of Negatively Buoyant Swirling Plume." *J. Hydr. Engrg*, ASCE, Vol. 109, No. 7, pp. 1049-1056.
11. List, E. J. (1982). "Turbulent Jets and Plumes." *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 14, pp. 189-212.
12. Morton, B. R., Taylor, G. I., and Turner, J. S. (1956). "Turbulent Gravitational Convection from Maintained and Instantaneous Sources." *Proc. Royal Society*, Vol. A234, pp. 1-23.
13. Papanicolaou, P. J., and List, E. J. (1988). "Investigations of Round Vertical Turbulent Buoyant Jets." *J. Fluid Mech.*, Vol. 195, pp. 341-391.

14. Rajaratnam, N. (1976). *Turbulent Jets*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
15. Seo, I. W., Gadalrab, M. S., Lyu, S., and Park, Y. S. (2001). "Theoretical and Experimental Investigations of Velocity Distributions for Round Jets." *Water Engrg. Res.*, KWRA (submitted).
16. Weisgraber, T. H., and Liepmann, D. (1998). "Turbulent Structure during Transition to Self-Similarity in a Round Jet." *Exp. in Fluids*, Vol. 24, pp. 210-224.
17. Yang, G., Choi, M., and Lee, J. S. (1999). "An Experimental Study of Slot Jet Impinging Cooling on Concave Surface: Effects of Nozzle Configuration and Curvature." *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 2199-2209.

표 1. 난류제트 실험조건

Case	l_p/d_p	ΔT (°C)	U_0 (cm/s)	Re
PR-01	2.5	1.03	148.1	6763
PR-02	4.0	0.20	151.4	8221
PR-03	7.0	1.03	146.6	7951
PS-01	2.5	1.16	147.3	6652
PS-02	4.0	0.26	137.3	7443
PS-03	7.0	0.10	144.6	7837
SS-01	2.5	0.78	148.8	6709
SS-02	4.0	0.64	108.5	5936
SS-03	7.0	1.05	160.9	5845

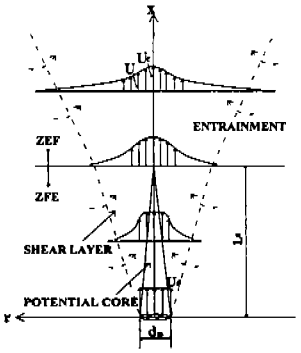
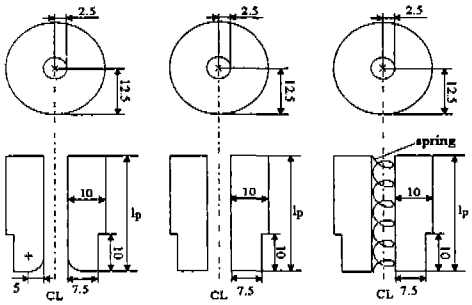


그림 1. 원형제트의 개념도



l_p = 12.5, 20, 35

a)종구형 방류구 b)직각형 방류구 c)나선형방류구

그림 2. 방류구 모형 (단위 : mm)

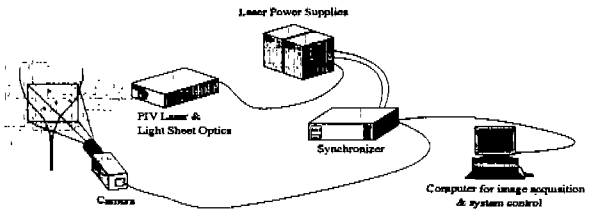
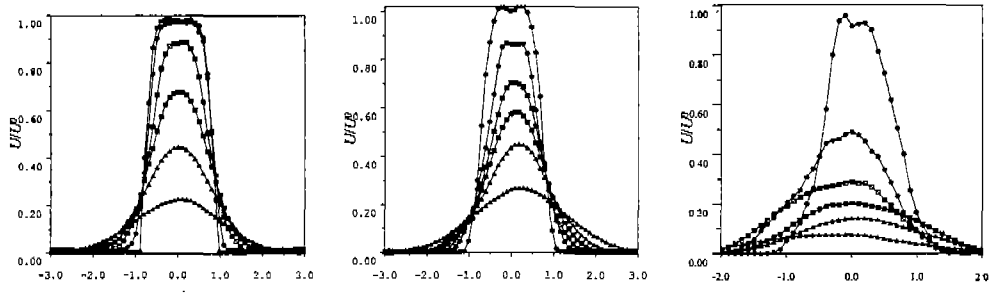
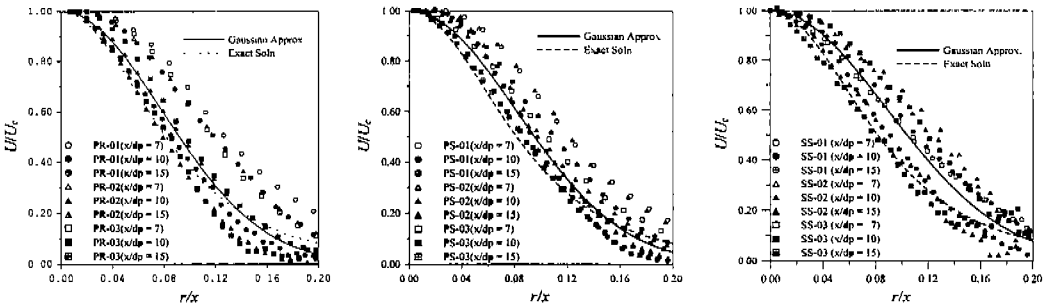


그림 3. PIV 시스템의 구성



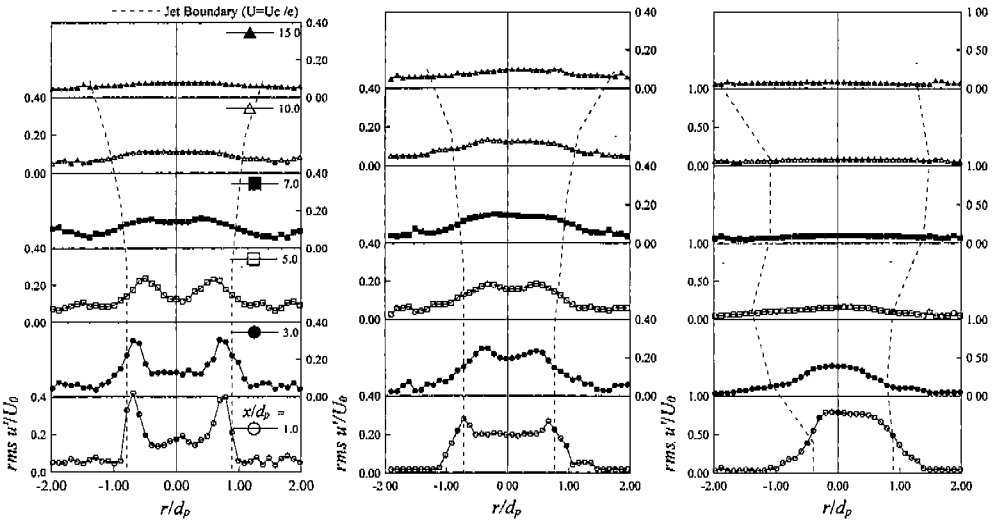
a) PR-02 b) PS-02 c) SS-02

그림 4. x방향 유속의 횡분포



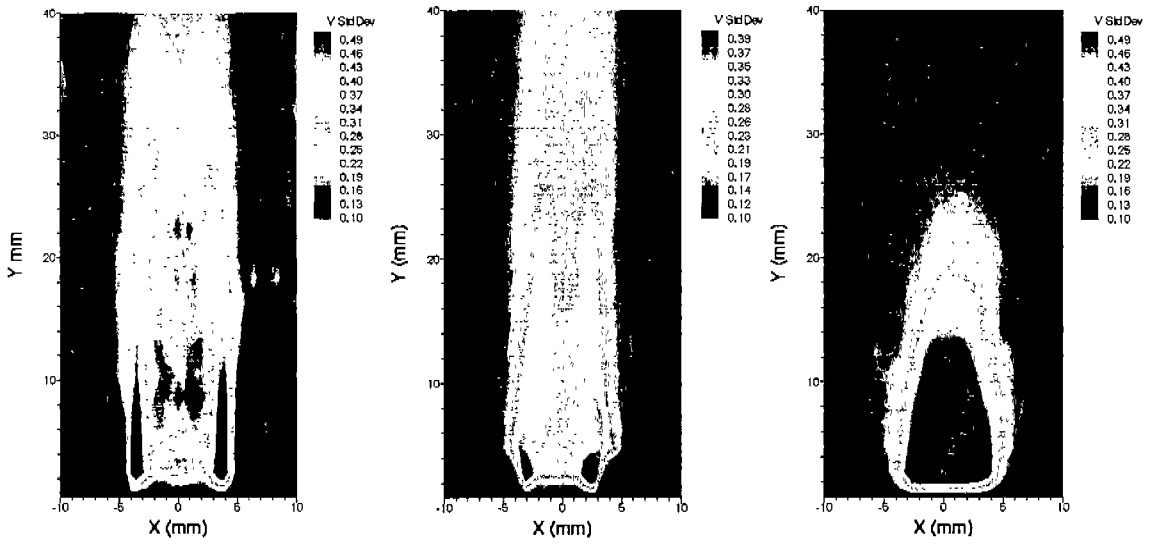
a) PR seires　　b) PS series　　c) SS series

그림 5. x방향 유속의 횡분포의 자기상사성



a) PR-02　　b) PS-02　　c) SS-02

그림 6. x방향 상대난류강도의 진화과정 (Series 02)



a) PR-02　　b) PS-02　　c) SS-02

그림 7. 난류강도분포