

분사류의 중심선 유동특성에 관한 실험적 연구 Experimental Study on the Centerline Flow Characteristics of Jets

김 동 식*
Dong-Sik Kim

〈Abstract〉

The flow characteristics on the centerline in case of free jet, sudden expansion jet and impinging jet have been investigated. Centerline flow behaviors and similarities with mean velocities, turbulent intensities, shear stresses, isotropic structures and turbulent kinetic energies on the streamwise direction were looked into and compared with three jets. The results show that mean velocities have represented potential core and decayed with similar gradients. The turbulent intensities and shear stresses were presented peak values in the self-preserving region, and then they were in decay. Anisotropy in the initial region were possible returned to isotropy patterns with asymptotic approach in the downstream region. It has been found that the turbulent kinetic energies for the three cases of jet existed in the similarity and they coincided with Gaussian profile.

Key Words : *centerline flow characteristic, turbulent decay, turbulent kinetic energy, similarity*

1. 서 론

내부유동에서 외부 흐름으로 발달되면서 이뤄지는 분사류는 머플러, 관류유동, 엔진 노즐유동처럼 유로 단면적이 확대 또는 축소형태로 변화되거나 외부제한 없이 자유분사 되는 경우 등으로, 제품 공정상 필요한 열전달 및 냉각장치, 연료와 공기혼합 분사장치등 여러 공학적 분야에서 응용

되고 있다. 분사류는 대기압 조건으로 분사되기 때문에 압력변환이 무시될 수 있으며 분사류 기능이 먼 하류까지 유지되면서 전개되는 특성이 있다. 또한, 단시간 내에 자기보존성 있는 유동구조를 얻을 수 있기 때문에 유체계측 장비와 풍동을 이용하는 실험에서 대표적인 모델로 활용되고 있다.

일반적으로 분사류는 초기조건에 민감한 유동

* 정회원, 포항1대학 자동차과 부교수, 工博
영남대학교 졸업
791-711 경북 포항시 흥해읍 죽천동 55
E-mail : kimds@pohang.ac.kr
054-245-1124

* Associate Prof. of Automotive eng.
Pohang College, ph.D
55, Jukchun-Dong, Hunghae-Eup, Buk-ku, Pohang,
Kyung-buk, 791-711, Korea

으로 알려져 있으며 이들에 대한 연구^{[1][2]}가 다양하게 이뤄지고 있다. 분사류의 유동구조를 축방향으로는 초기 전개구간, 자기보존구간, 소멸구간으로 나뉘지며, 초기와 자기보존구간에서 반경방향으로 코어영역, 전단영역 및 경계영역으로 구분되고 있다. 유동에 인위적인 제한 없이 자유로이 성장하는 자유분사류 유동특성^{[3][4][5]}, 유동이 확대되면서 제한벽면을 만나는 급확대분사류^{[6][7]}는 확대각도, 확대비에 따른 연구, 충돌분사류는 유체가 충돌벽면으로 유입되는 각도, 벽면거리 및 벽면형상에 따른 연구^{[8][9]} 등으로 많은 연구가 진행되었다.

분사류 초기상태에 영향을 미칠 수 있는 인자에 대한 연구로는 가상원점, 초기 노즐유동상태, 내향외류영향 등을 들 수 있다. 전개구간에서는 포텐셜 코어 존재, 분사류 퍼짐각 등이^{[10][11]}, 자기보존영역에서는 평균속도와 난류속도의 반경방향에 대한 상사성^[12]과 난류에너지 분배^[13] 등을 통한 상사성 해석에 필요한 인자선택 방식^[14] 등을 논하고 있다.

이들 대부분의 연구는 분사류 종류에 따라서 다루는 관점과 영역을 달리하며, 주로 반경방향의 평균속도와 난류구조 분석을 통하여 유동특성과 상사성에 대하여 해석하고 있다.

분사류에 있어서 중심선 부근의 유동은 먼 하류에서의 감쇠특성을 상당한 정도 예측을 가능하게 하고 에너지 대부분을 이 영역에서 함유하면서 흐르기 때문에 중심선에서 나타날 수 있는 유동특성을 자세히 분석할 필요가 있다. 또한, 자유로이 성장하는 자유분사류, 제한벽면이 있는 급확대 분사류 그리고 충돌벽면이 있는 충돌분사류간의 유동특성과 상사성을 서로 비교해보는 것도 상당히 의미가 있다고 생각된다.

본 연구에서는, 자유분사류, 급확대분사류 그리고 충돌분사류가 되도록 유동장을 구성하고, 이들 분사류에서 중심선을 따르는 실험을 통하여 중심선 유동특성을 고찰하고 분사류간에 상사성이 존재하는지를 알고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 유동안정화장치 및 측정부 구성

원심식 송풍기, 벌집망 및 스크린들로 구성된 유동안정화장치에 이어진 수축부를 통과하여 분사류가 전개되도록 하였다. 수축부에서 부터 어떤

제한 없이 발달되는 자유분사류, 급확대되는 관을 부착한 급확대분사류 그리고 유동축에 벽면을 세워 충돌분사류가 되도록 세팅하였으며 실험은 순차적으로 하였다.

1차 수축부 하류 방향에 스크린, 벌집망 그리고 충분한 유동전개구간으로 유동을 안정화시킨 후 장방형 그리드(솔리디티 35%, 메쉬 0.0254m, 압력 계수 3)를 통과시킴으로 유동상태가 등방성 상태가 되도록 하였다. 이후 2차 수축부(Morel 타입, 직경 37mm)에서 분출되도록 하였다. 각 분사류의 장치와 측정점을 Fig.1에 도시하였다. 수축부에 90° 급확대관을 연결하여 급확대 분사류가 되도록 하였다. 노즐출구에 대한 확대비(D/d)는 5이며 관 길이는 분사류의 확산각이 약 9° 분산폭을 갖는 것으로 판단하여 노즐직경의 23배로 하였다. 충돌분사류는 유동축에 대하여 H=15d에 위치한 직각 벽면에서 이루어지며 분사류가 중심선에 대하여 대칭성을 갖도록 하였다. 표면조도 영향을 고려하여 벽면을 매끄럽게 펄팅처리 하고, 구조물에 고정함으로 충격 운동량에 의한 불안정 요소를 방지하였다. 충돌벽면의 중심높이는 노즐출구 중심높이로 높임으로 바닥에서 반향 될 수도 있는 내향외류의 영향을 최소화하였다.

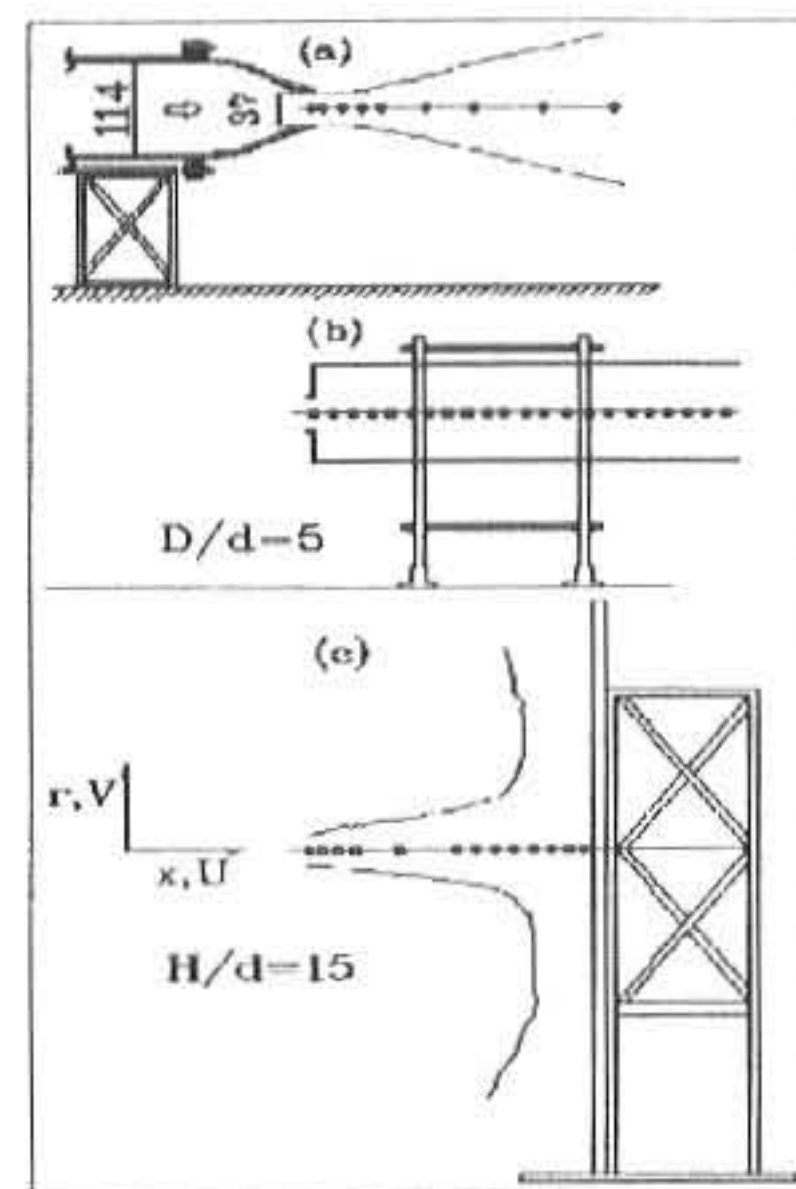


Fig. 1 Schematic of jet apparatus and measuring points (a) nozzle and free jet, b) expansion jet, c) impinging jet)

2.2 계측장치, 데이터 추출 및 처리방법

열선유속계(Kanomax 7000)로 평균속도 및 난

류성분을 계측하였다. 열선은 직경 $5\mu\text{m}$, 유효 측정 길이 1.2 mm, 중횡비가 240 인 X-형(자유분사류, 급확대분사류는 직선형, 충돌분사류는 7형)을 사용하였다. 정밀 이송장치에 장착하여 유동 축방향으로 이송하였다. 유동방향에 대하여 열선의 요잉방향과 피칭방향에 대하여 방향민감도 보정이 필요하다. 속도보정은 고속영역에서는 캘리브레이터로 저속영역은 압력변환기(Baratron형 223B)로 실험한 후 속도-전압 사이의 상관관계를 각각 구한 후 중복되도록 매칭 시켰다. 이 결과를 최소자승법으로 다항식을 구하였다. 각도 보정에서는 일정한 유동속도에서 최저 전압을 나타내는 각도를 유동축에 대해서 수직방향으로 관측하고 이 위치부터 2° 간격으로 90° 까지 회전시켰을 때의 전압을 가지고 상관관계를 구하였다. 한편, 충돌분사류 측정에서는 벽면 근접 구간에서 유동이 열선의 유효 측정 범위를 벗어날 수도 있으며, 반사유동으로 인한 간섭영향이 있을 수 있으므로 실제 유입속도와 감지속도 사이에 수정 보정방법을 사용하였다.

센서 출력신호는 가변증폭기와 저역 주파수필터를 통하여 정류된 신호로 변환된 후 12비트(최상력 2.2mV) A/D 변환기를 통과하고 이에 온 라인된 컴퓨터로 연산처리 되었다. 적절한 샘플링 조건으로서 모멘트 측정에서는 독립적인 데이터가 필요하다. 데이터 추출시간은 실험으로 산정된 적분시간척도(τ)에 2배한 후 안전계수와 와류(eddy) 주파수를 고려하여 10Hz로 결정하였다. 실험 결과에서 나타날 수 있는 CTA시스템 오차와 데이터 샘플링 조건에 의한 오차 그리고 실험조건에서 있을 수 있는 오차 등에 주의를 하였다.

3. 유동장 조건 및 영역 선정

상류에서 발생하는 교란은 초기의 유동구조와 분사후 경계층 생성에 영향을 나타내므로 가능한 일관성 있는 초기조건이 되도록 하였다. 기준전압 이상에서는 자동적으로 데이터 수집이 피해지만, 스펙트럼 분석기를 모니터링 하여 안정된 유동상태 결과일 때 데이터를 샘플링 하였다. 중심선상 한 위치에서 측정 후 다음 측정점으로 이송하였으며, 대칭 분사류가 되도록 중심선 선정에 주의를 하였다. 초기조건과 측정위치는 Table 1에 요약하였다.

Table.1 Experimental conditions and measuring regions

	FREE JET	EXPANSION JET	IMPINGING JET
Measuring Axial Distance	~ 15d	~ 15d D/d=5	~ 14.7d H/d = 15
Re _d	1×10^5	1×10^5	1.5×10^5
Exit Turbulent Intensity (for U ₀)	1 %	0.3-0.5 %	0.56 %

자유분사류는 축방향으로 $x=0.5d-15d$ 사이 계측하였으며, 출구의 평균속도 U_0 와 출구직경 d 로 계산한 레이놀즈수 Re_d 는 1×10^5 이다. 급확대 분사류는 확대비가 5인 경우로 Re_d 수는 1.0×10^5 , 축방향 측정은 22d 까지 행하였다. 장시간 실험으로 인하여 배경압력 상태가 달라질 수도 있는데 열선유속계의 기준 출력전압을 각 실험마다 $\pm 1\%$ 범위를 벗어나지 않도록 유량을 약간씩 조절하므로써 가능한 동일한 출구상태가 되도록 하였다.

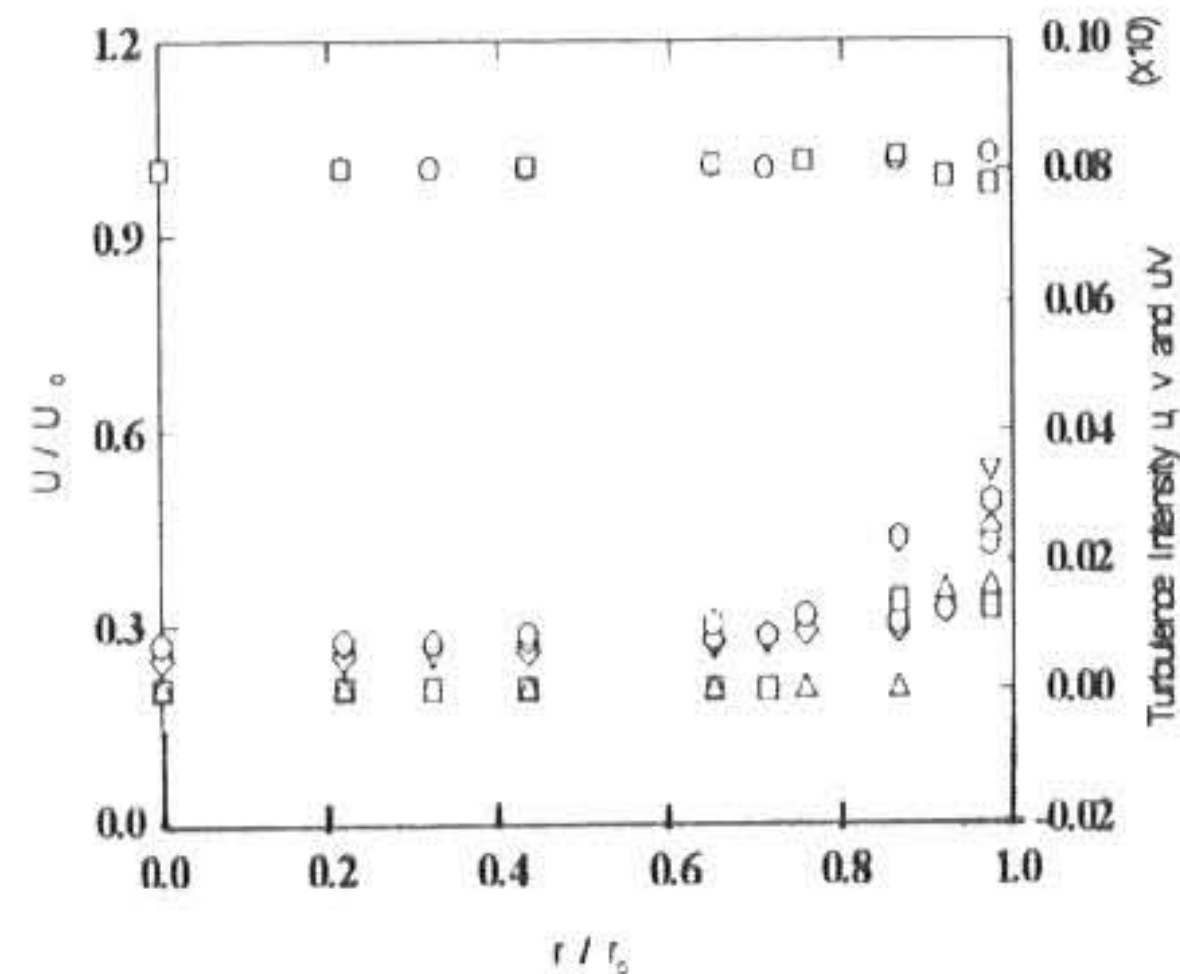


Fig. 2 Flow initial condition at jet exit for symmetry and measurement direction

upper symbol: mean vel. U; \circ -left; \square -right, direction lower symbol: tur. intensity ∇ ,u-left; \diamond ,u-right; \boxtimes ,v-left; \circ ,v-right; \square ,u'v'-left; \triangle ,u'v'-right(from exit)

Fig. 2는 출구단면에서 유동의 편향도와 대칭성을 파악한 결과이다. 노즐 중심에서 왼쪽방향으로 노즐 가장자리까지 측정하고, 다시 중심에서 오른쪽방향으로 노즐 가장자리까지 측정한 결과이다. 평균속도는 약 2% 이하의 불균일도를, 난류강도는 0.3~0.5%의 낮은 세기를 가졌다. 충돌분사류 실험에서 벽면 가까이에서는 계측

스텝을 0.3d로 작게 하였으며 Re_d 수는 1.5×10^5 일 때 출구 난류도는 낮고 최대 난류강도는 0.56% 크기이다. 난류성분에서 노즐에지 영향이 일부 있지만, 평균속도와 난류성분들은 균일한 상태로 대칭성 있는 유동으로 판단되었으며 측정방향에 의한 영향은 없는 것으로 판단하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 중심선 평균속도

중심선 평균속도(Mean velocity) U_c 의 천이 과정을 노즐출구속도 U_0 로 무차원화 한 Fig. 3에서 자유분사류, 급확대 분사류 그리고 충돌분사류 각 경우를 노즐출구로부터 축방향 거리 x/d 로 도시하였다. 자유분사류는 초기에 tophat 분포와 포텐셜 코어가 동시에 거의 같은 구간에서 존재하였으며, 속도감쇠가 일찍 발생하고 전체적으로는 지속적인 감쇠 추세를 나타낸다. 확대비 5인 급확대 분사류는 포텐셜 코어가 $x=4d$ 정도까지 유지되다가 $22d$ 근처에서 15%까지 쇠퇴하는 것으로 보아 점근적인 감쇠법칙을 따른 후 일정한 크기인 균질유동으로 전개할 가능성을 보이고 있다. 충돌벽면 위치가 $H=15d$ 에 있는 충돌분사류는 벽면이 위치한 거리가 발달 유동이 될 수 있는 거리에 위치하기 때문에 자유분사류의 특징이 어느 정도 유지되다가 벽면 근방에서 급격한 감쇠를 보였다. 축방향 평균속도에 대한 벽면의 영향이 나타나는 위치는 벽면 근처에서 열선의 안정성을 고려하여 조밀하게

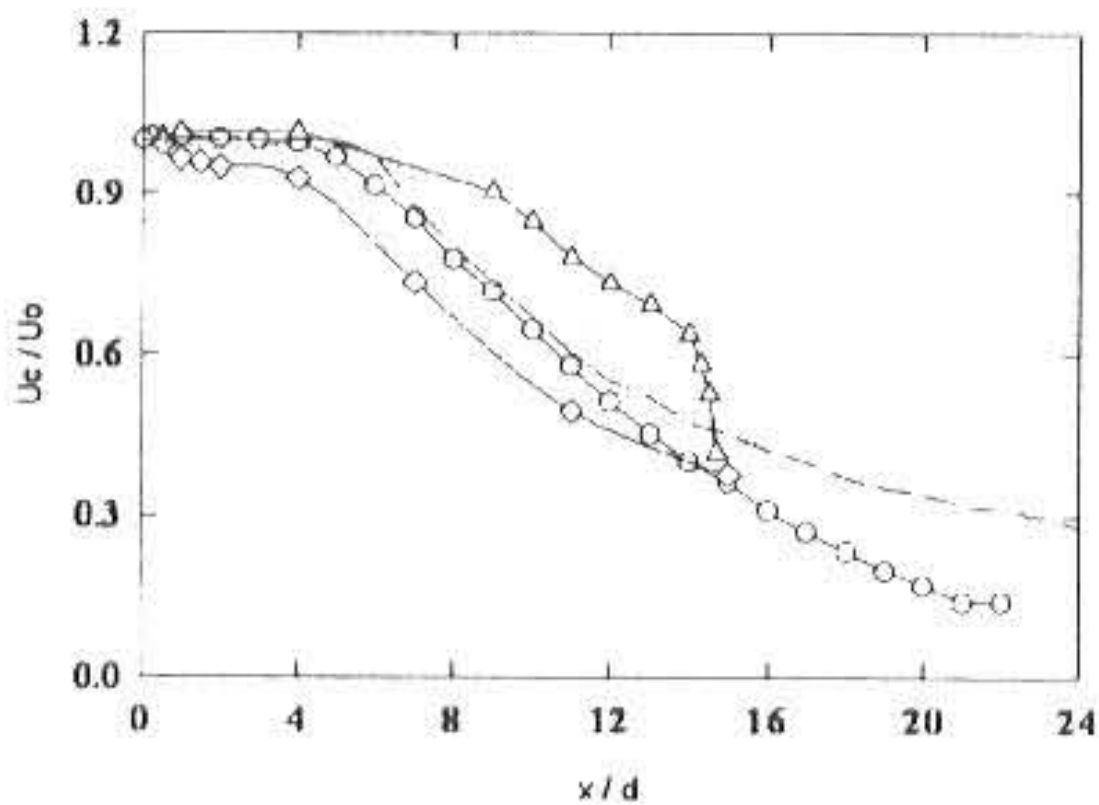


Fig. 3 Comparison of centerline axial mean velocities along the jet centerline
 ◇: free jet, ○:sudden expansion jet, △:impinging jet, ... : Crow, - - : Donaldson

측정하지 않아 정확한 위치 판단은 곤란하지만, 평균속도의 감쇠추세로 보아서 $x/H=0.8 \sim 0.83$ 부근인 것으로 판단된다. 한편, 자유분사류로 실험한 Crow와 Donaldson 경우와 비교해보면, 본 실험에서 극초기 감쇠가 크게 나타났으며 전개구간에서의 감쇠율은 비슷한 경향으로 나타났으며, 다른 분사류 경우도 비슷한 감쇠추세를 가졌다. 노즐형상에 따라 분출유동패턴이 약간 다르므로 존재하는 차이가 있는 것 같다. 포텐셜코어는 각 경우 약 $x=4 \sim 5d$ 위치까지 존재하는 것으로 나타났다.

4.2 중심선 난류강도

중심선상의 축방향 난류강도(Turbulent intensity) 천이과정을 나타낸 Fig. 4에서, 자유분사류는 축방향 난류강도 u 가 $1.5d$ 에서부터 증가하여 약 $7d$ 에서 최대치를 나타낸 후 $11d$ 까지는 거의 같은 크기의 난류도로 유지되다가 이후 감쇠하였다. 이 결과로 보아 초기에서부터 주위 경계유체의 유입이 증가하여 난류생성이 활발해지는 것으로 판단된다. 급확대분사류의 천이과정을 보면, $x=3d$ 에서 부터 난류강도가 증가하기 시작하여 $9d$ 에서 최대치를 나타낸 후 그 절대크기는 전체적으로 완만하게 감쇠하였다. 이것은 확대관 벽면이 있음으로 인해서, 주에너지의 상당한 부분이 중심선 영역에 함유되어 있다가 하류로 갈수록 단면 전 영역으로 확산되어져 가는 것으로 판단된다. 충돌 분사류는 자유 분사류의 난류강도 증가 추세와 같은 경향으로 성장하지만, 계속 증가하다가 벽면영향이 나타나는 $x/H=80 \sim 83\%$ 위치에서 급감쇠 하였다. 자유분사류에서 난류강도가 큰 상태로 일정하게 유지되는 영역은 내향외류가 증대한 원인이지만, 충돌분사류에서 계속 증가하는 것은 보존구간에서는 주위 유체 유입이 있을 후 벽면에 충돌한 유체가 급히 유입되어 난류강도가 증가하는 것으로 판단된다. 즉, 확대 분사류는 내향외류의 영향이 없었지만, 자유분사류는 초기부터 충돌분사류는 유동이 벽면에 충돌 후 바로 순환되어 난류성분 성장률이 커진 것으로 알 수 있다.

Fig. 5의 반경방향 난류강도 v 의 중심선상 변화를 보면 Fig. 4의 축방향 난류강도 u 와 비교해서 생성과 쇠퇴과정이 유사한 천이과정을

거치지만, 그 절대적인 크기는 자유분사류와 충돌분사류의 세기는 그대로 유지되고 있는 반면에 급확대분사류는 축방향 성분 u 에 비하여 약 50% 크기를 지니면서 완만한 감쇠를 하였다. 이 결과는 제한벽면이 있는 분사류 경우는 유동압력으로 u 성분은 신장(stretching)되는 반면 v 성분은 수축(compression)되고 있는 것으로 분석된다.

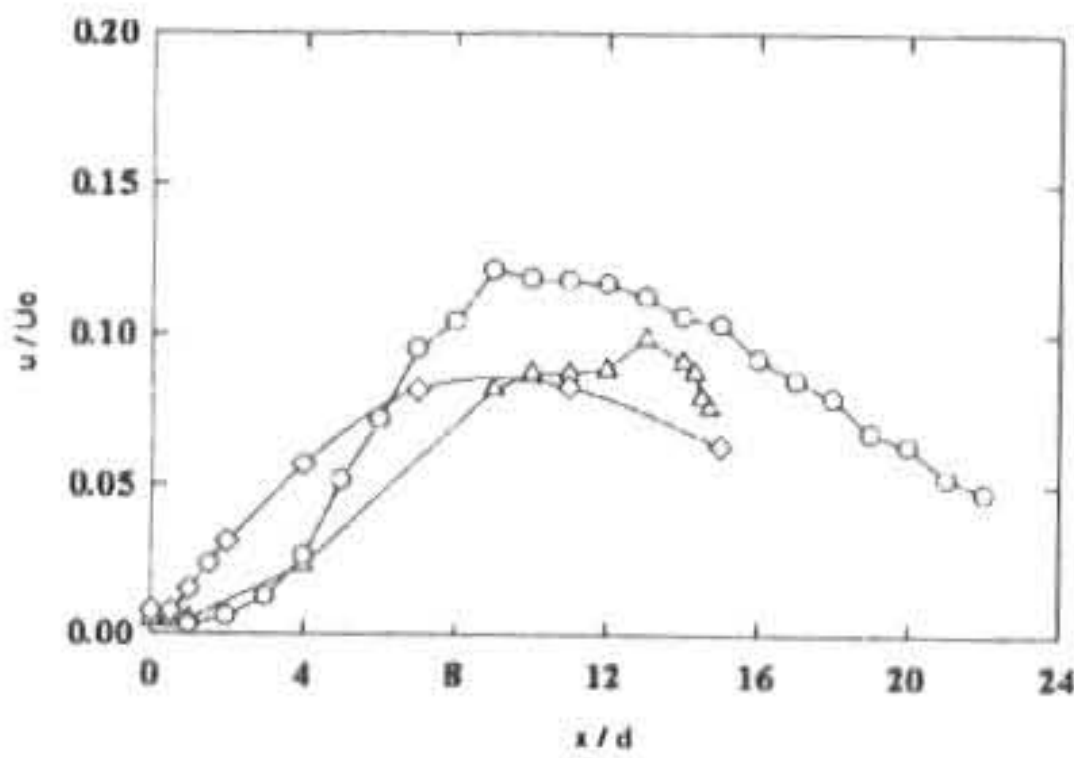


Fig. 4 Comparison of centerline axial turbulent intensities along the jet centerline

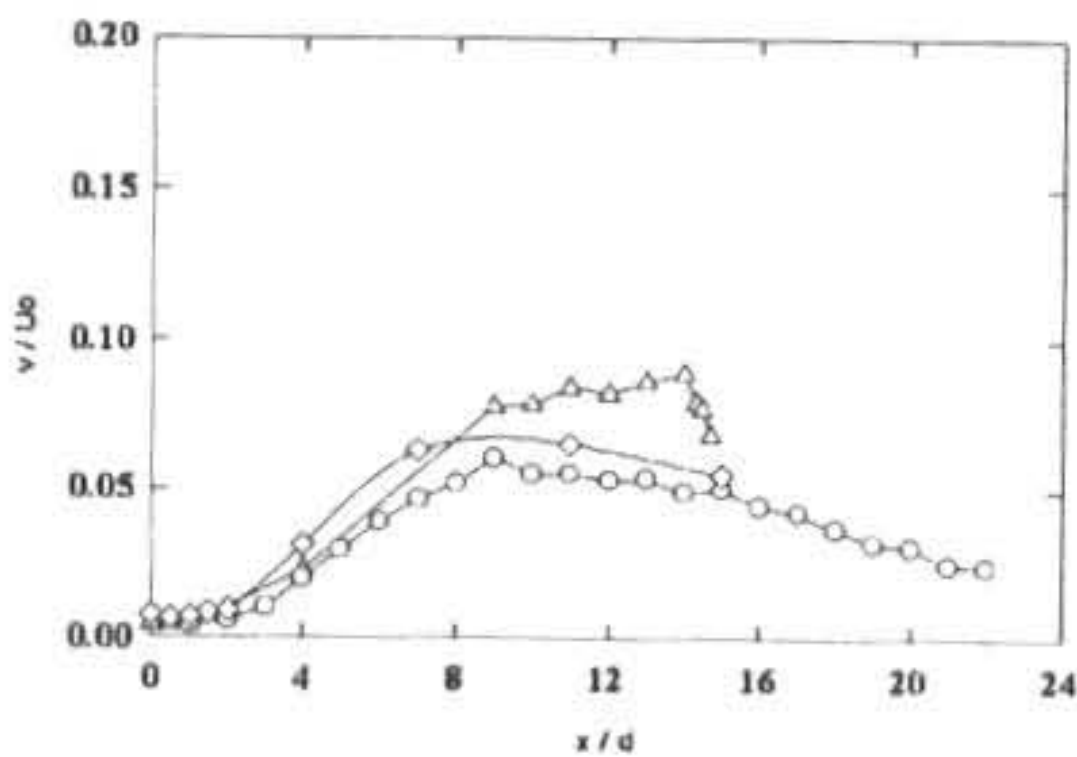


Fig. 5 Comparison of centerline radial turbulent intensities along the jet centerline

4.3 중심선 레이놀드 전단응력

중심선 레이놀드 전단응력분포(Reynolds shear stresses)를 나타낸 Fig. 6에서, 자유분사류는 섭동속도인 전단응력 성분이 난류강도 경우와 같은 추세를 발달하였으며, $x=7\sim 11d$ 부근에서 매우 활발히 생성되었다. 급확대분사류 경우는 난류생성 후 감쇠되어져 가는 경향으로 보아서 중심에 있어서의 난류생성은 초기영역, 약 $4d\sim 12d$ 사이에서 이미 대다수 이루어진 것으로 알 수 있다. 충돌분사류에서의 전단응력 천이과정

은 Fig. 3의 평균속도 분포에서 보는바와 같이 충돌벽면 영향이 나타나는 $0.8H$ 부근에서 난류 전단응력의 분산과 변형이 큰 것으로 나타나고 있다. $15d$ 이후 하류에서의 경향과 비교해서 판단하여 볼 때, 초기에 발달된 큰 eddy형식들이 벽면에서 분파되고 그 영향이 오히려 상류로 전달되므로 전단응력 성장이 지속된 것으로 판단된다. 또한, 증가와 감소 추세를 갖는 자유분사류와 충돌분사류의 난류전단응력 세기는 급확대분사류 경우 보다 섭동성분의 변화폭이 그다지 크지 않는 것은 빨리 균질류로 진행되고 있는 이유로 판단된다.

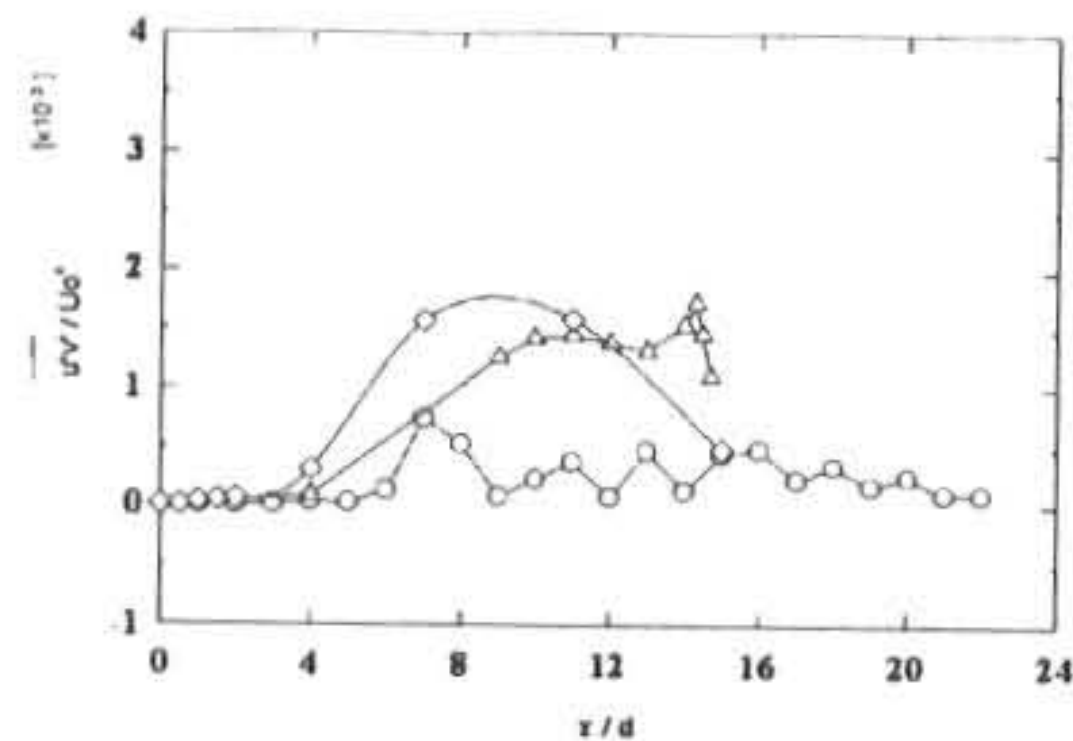


Fig. 6 Comparison of centerline Reynolds stresses along the jet centerline

4.4 중심선 등방성

분사형태에 따른 중심선 유동의 난류성분에 대한 등방성(Isotropy) 여부를 판단하기 위해, 축방향 난류강도 u 와 반경방향 난류강도 v 에 대하여 $I = \frac{u^2}{2 \cdot v^2}$ 으로 정의하였을 때 결과를

Fig. 7에 도시하였다. 자유분사류는 수축부에서 나온 유동의 난류강도 u 성분이 급격하게 신장하여 $x=4d$ 이전 초기영역에서 비등방성이 나타났지만, 자기보존영역으로 갈수록 $I=1$ 크기에 수렴하는 것으로 보아 등방성이 회복되어져 가는 것으로 판단된다. 급확대분사류는 $x=4d$ 부근에서 등방성을 순간적으로 나타내지만 $x=7d$ 에서 하류로 갈수록 u 와 v 강도 차이가 커짐으로 비등방성이 자유분사류때 보다 더 크며, 등방성으로의 회복율이 자유분사류 경우보다 지연된 상태로 일어난다. 이러한 현상은 급확대분사류의 제한벽면 영향으로 발생한 반경방향의

난류강도 변화가 중심선 영역까지 그 영향이 나타나고 있는 것으로 판단된다. 충돌분사류는 난류강도 u 와 v 의 크기가 비슷하게 성장하므로 등방성 있는 유동으로 수렴할 가능성을 보였고 충돌벽면 영향이라고 판단할 결과는 보이지 않았다. 지금까지 본바와 같이, 초기영역에서는 불안정한 전단층 생성으로 인하여 비등방성이 야기되었으며 이후 대규모 난류구조가 분파되어 미세구조로 전환됨에 따라 등방성 구조로 수렴할 가능성을 보인다.

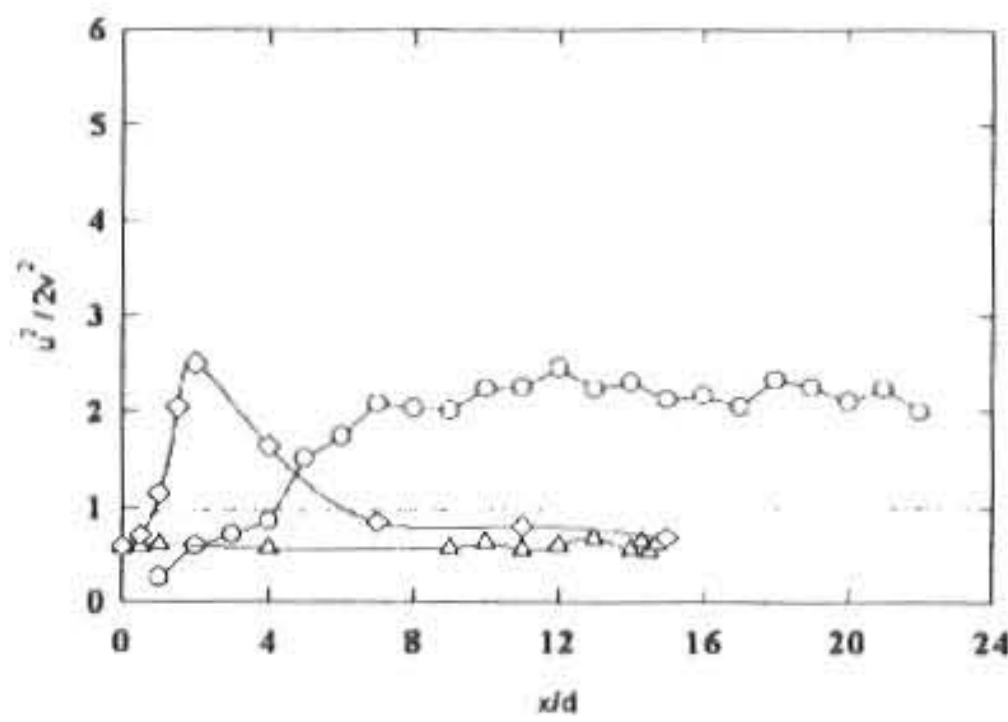


Fig. 7 Comparison of isotropic behaviors of centerline turbulence along the jet centerline

4.5 중심선 난류 운동에너지

중심선에서의 난류 운동에너지 변화과정을 Fig. 8에 표현하였다. 원형노즐을 사용한 분사류에서 반경방향 난류강도 v 는 원주방향 난류강도 w 가 크기가 같았으므로, 난류운동에너지 (Turbulent kinetic energy)를 다음 같이 정의하였다.

$$T.K.E. = \frac{(u^2 + 2 \cdot v^2)}{2}$$

자유분사류의 운동에너지 변화는 난류강도 변화 결과로서, 초기유동에서 부터 증가하여 최대치를 나타내는 $x=7\sim 11d$ 부근에서 혼합영역이 확장되면서 난류생성과 거동이 활발하며 주에너지를 함유한 영역이 된다. 이후 하류에서는 감쇠추세를 가졌다. 확대분사류 경우에는 분사류의 모멘텀 영향이 유동배압 영향보다 훨씬 크므로 난류 운동에너지의 최고치는 축방향으로 $x=(6\sim 8)d$ 에서 일어났다. 급확대분사류에서는 초기에 상승하다가 Fig. 8의 결과처럼 감쇠하고 있으며 자기보존 구간에서는

특정한 크기에 수렴할 가능성을 보인다. 충돌벽면 위치가 자기보존구간인 비교적 먼 거리 $15d$ 에 위치함으로 난류 운동에너지는 자유분사류 때와 같이 난류성분이 충분히 성장한 상태에서 벽면을 만나며 그에 따른 상대적인 세기는 벽면부근에서 크게 발생하고 있다.

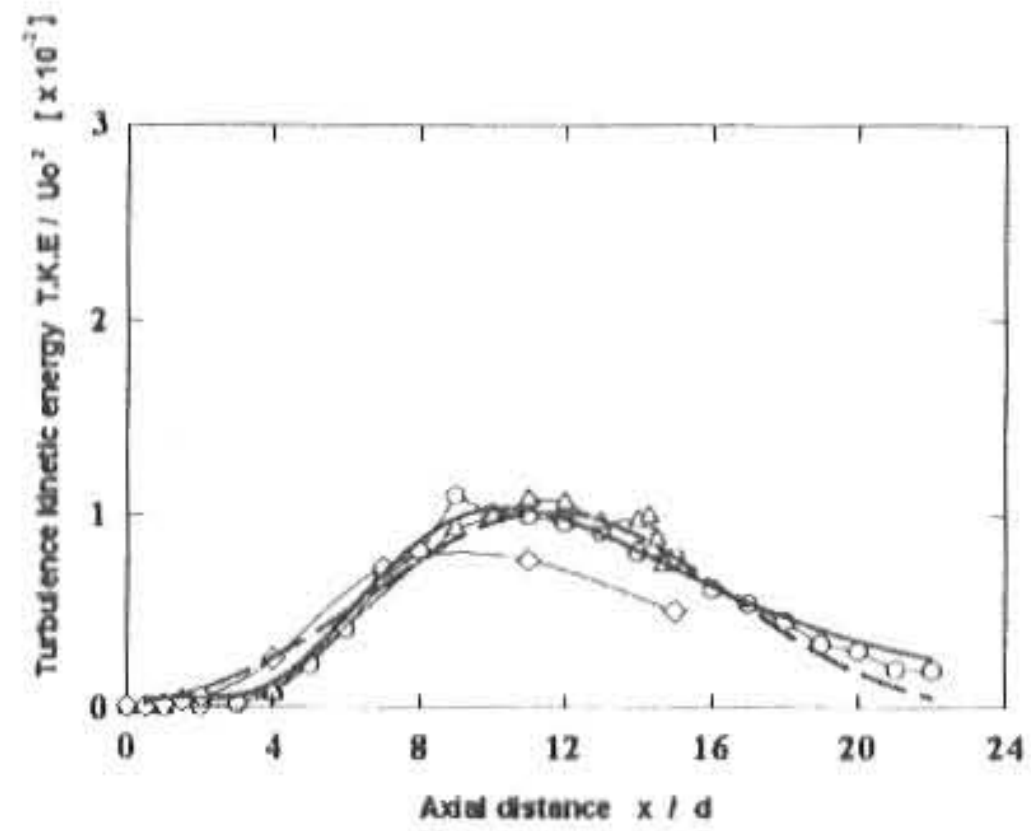


Fig. 8 Comparison of centerline turbulent kinetic energies along the jet centerline \diamond :free jet, \circ :sudden expansion jet, \triangle :impinging jet
---:Gaussian distribution

최고치는 $x=9\sim 12d$ 에서 일어났다. 자기보존 구간에서 일정한 크기로 유지되는 추세로 보아서 운동에너지의 증가율보다 감쇠율이 지연된 상태로서 주유동 영역에서 대부분의 에너지가 실려 흘러가고 있음이 입증된다. 즉, 충돌분사류와 확대분사류는 중심선 부근영역에 주에너지대를 형성하여 하류로 가는 반면, 자유분사류는 벽면제한이 없으므로 운동에너지가 넓게 퍼져서 하류로 흘러간다. 3종류의 분사류는 서로에 대하여 상사성을 가지고 있으며, 또한 가우시안 곡선형태에 상사성을 가졌다.

5. 요약 및 결론

유동장 구성을 자유분사류, 급확대분사류 그리고 충돌분사류로 하고, 초기영역과 자기보존 영역에서 중심선 유동을 중심으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

중심선 평균속도는 점근적 감쇠법칙을 따르는 결과를 보였으며 급확대관 분사류가 다른 분사류 보다 더 큰 감쇠율을 나타냈다. 축방향 및 반경방향 난류강도 u 와 v 의 거동은 자유분

사류와 급확대 분사류는 자기보존 영역인 약 7d~9d에서 최대 크기로 생성되었으며, 충돌분사류는 충돌벽면 직전까지 증가하다가 이 영역에서 급감되하였다. 레이놀드 전단응력의 발달 과정은 포텐셜코어(4~5d)가 지난 자기보존영역에서 부터 활발히 생성되었으며, 급확대 분사류의 경우 변화폭이 작고 빈번한 것으로 보아 이른 관내유동으로 전개되는 것으로 판단된다.

유동의 등방성 성질은 극초기에서의 비등방성을 극복하고 자기보존구간에서 등방성으로 수렴할 가능성을 확인하였다. 난류운동에너지의 성장과 쇠퇴과정을 통하여 보았을 때 각 분사류는 서로 가우신안 분포 형태로 상사성이 존재하였다.

참고문헌

- 1) Wygnanski, I. and Fiedler, H. : Some Measurements in the Self-Preserving Jet. *J. Fluid Mechanics*, 38, pp.577-612 (1969)
- 2) Davies, P. O. A. L., Fisher, M. J, and Barratt, M. J. : The Characteristics of the Turbulence in the mixing region of a round jet. *J. F. M.*, 15, pp.337-367 (1962)
- 3) Crow, S. C. and Champagne, F. H. : Orderly structure in jet turbulence. *J. Fluid Mechanics*, 48-3, pp.547-591 (1971)
- 4) 한용운 : 중심유동 거동에 따른 원형난류분사류의 초기유동특성. 대한기계학회 '98년도 유체공학 부문 학술강연회 강연집, pp.57-66 (1998)
- 5) Donaldson, C. D. and Snedekar, R. S. : A study of free jet impingement. Part 1. Mean properties of free and impinging jets. *J. Fluid Mechanics*, 45, pp.281-319 (1971)
- 6) Yang, B. T., Yu, M. H. : The Flow field in suddenly enlarged combustion Chamber. *AIAA J.*,21(1), pp.92-97 (1983)
- 7) Moon, L. F., Rudinger,G. : Velocity Distribution in an abruptly Expanding Circular Duct. *J. of Fluids Eng.*Trans. ASME, 99(1), pp.226-230 (1977)
- 8) 田中敏雄, 川合靖司, 田中榮一, 井上吉弘 : 圓柱壁面噴流と平板の衝突に關する研究. 日本機械學會論文集(B編), 56(524), 965 (1990)
- 9) Popiel, C. O. and Trass, O. : The Effect of ordered Structure of Turbulence on Momentum, Heat and Mass Transfer on Impinging round Jets, *Heat Transfer(VI)*, Hemisphere, 141 (1982)
- 10) Back, L. H., Roschke, E. J. : Shear-layer flow regimes and wave instabilities and reattachment lengths downstream of an Abrupt Circular Channel Expansion. *J. of Appl. Mechanics, Trans. ASME*, 94 E, pp.677-681 (1972)
- 11) Donaldson, C. D., Snedekar, R. S. and Margolis, D. P. : A study of free jet impingement. Part 2. Free jet turbulent structure and impingement heat transfer. *J. Fluid Mechanics*, 45, pp.477-512 (1971)
- 12) Rodi, W. : A New Method of Analyzing Hot-wire Signals in Highly Turbulent Flow and Its Evaluation in a Round Jets. *DISA Information*, 19, pp.9-18 (1975)
- 13) Han, Y. O., Nam, K. D., Kim, D. S. : Turbulent Kinetic Energy Balance along the Centerline of Axisymmetric Flows, *Eng. Turbulence Modelling and Exp.2*, Ed., Rodi, Martelli, Elsevier Sci. Publisher, Italy, pp.497-498(1993)
- 14) 김동식, 한용운 : 축대칭 급확대관으로 분사되는 난류분사류의 초기유동 특성. 대한기계학회논문집, 18(12), pp.3335-3344 (1994)

(2001년 6월 26일 접수, 2001년 11월 26일 채택)