

4각 덕트내에서 난류 맥동유동의 난류특성에 관한연구

A Study on Turbulent Characteristics of Turbulent Pulsating Flows in a Square Duct

박길문* 고영하**
G. M. Park, Y. H. Go

ABSTRACT

Turbulent characteristics of turbulent pulsating flows were studied experimentally in a square duct. Velocity waveforms, velocity profiles, and turbulent intensity of turbulent pulsating flow were investigated by using a hot-wire anemometer with data acquisition and a processing system in a square duct with a ratio of 1 (40mm x 40mm) to 4,000mm long. Turbulent components were shown to be larger in decelerating than in accelerating regions and also larger for a large phase of velocity and U'_{rms} distribution of turbulent flow. The effect of velocity amplitude ratio does not exist for specified time $\{\theta(z')\}$, amplitude ratio ($|U'_{rms.os.1}|/|U_{m.os.1}|$), and phase difference ($\angle U'_{rms.os.1} - \angle U_{m.os.1}$) in either turbulent oscillating or cross-sectional mean velocity components. The effect of dimensionless angular frequency for specified time $\{\theta(z')\}$ can be disregarded because the dimensionless angular frequency does not affect the specified time. The velocity distributions of turbulent pulsating flows for various time-averaged Reynolds numbers are in approximate agreement with the velocity distributions for equivalent Reynolds numbers and 1/7th power law of steady flow.

기 호 설 명

A_1	: Ratio of Velocity Amplitude ($= u_{m.os.1} / u_{m.ta} $)	u^*	: Friction Velocity
a	: Duct Half Width	u, v, w	: Velocity Components of x, y and z Axis, Respectively
b	: Duct Half Height	x, y, z	: Cartesian Coordinates of Test Section
D_h	: Hydraulic Diameter $\{=4ab/(a+b)\}$	z'	: z/b
f	: Frequency	$\theta(z')$: Specified Time
$K(z')$: Coefficient of Equation(1)	ρ	: Density
Re	: Reynolds Number ($=u_m \cdot D_h/\nu$)	ν	: Kinematic Viscosity
t	: Time	ω	: Angular Frequency of Pulsating Flow
		ω'	: Dimensionless Angular Frequency ($= (D_h/2)^2 \cdot \omega/\nu$)

* 정회원, 조선대학교 기계공학과

** 조선대학교 대학원

<하첨자>

- m* : Sectional Area Averaged Value
- os* : Oscillating Components
- rms* : Root Mean Square Value
- ta* : Instantaneous Time-averaged Value of a Period
- ' : Fluctuation Components
- 1 : Fundamental Value in Finite Fourier Series
- : Mean Value of Phase Angle

1. 서론

첨단 산업분야인 항공산업과 정밀기계공업이 급진적이고 획기적으로 발전됨에 따라 각종 기계공업시설이 대형화, 강력에너지화 및 고성능화를 요구하고 있다. 특히 산업현장의 덕트유동에서 발생한 비정상 난류유동(Unsteady Turbulent Flow)의 유동특성을 정확하게 규명한 자료는 덕트설계 및 유체기계장치 설계와 효율적인 운전에 있어서 중요한 기초자료가 될 수 있을 것으로 사료된다. 일반적으로 유체기계의 송풍기 및 펌프 등의 운전에서 사동과 정지시에 관로내의 유체유동과 로켓트 및 제트항공기 등의 맥동연소에 의한 유동과 왕복동 기관의 배기관 유동 및 유압관로에 있어서 맥동현상으로 인한 유동은 모두 비정상유동이므로, 최근 비정상유동에 대한 연구가 수치적 및 실험적으로 많이 진행되고 있다.^{1),2)}

비정상 유동 중에서 난류 맥동유동은 연소기에서 열효율의 증가, 교반기 및 반응탑 등에서 물질전달의 증가와 열교환기 등에서 열전달을 증가시킬 뿐아니라 관로유동에서는 압력손실을 크게하고, 수직 및 유격작용에 의하여 과도유동을 발생시켜 관로의 수명을 단축시키는 단점이 있으므로, 액체 추진 로켓트의 노즐유동 및 왕복동 기관의 배기관 유동해석에 많이 응용되고 있다. 본 실험실에서는 일련적으로 Park³⁾이 정 4각 덕트 입구 영역에서 발달되어 가고있는 층류 정상유동과 비정

상유동의 유동특성을 연구하여 속도분포와 입구길이에 대한 이론과 실험적인 연구를 하였고, Choi⁴⁾가 정 4각 덕트의 완전 발달된 입구의 영향을 받지 않는 영역에서 천이 정상유동과 비정상유동에 대한 속도파형을 기초로 하여 임계레이놀즈수, 관마찰계수, 속도분포, 전단응력분포를 이론 및 실험적으로 결과 분석하였으며, Yoo⁵⁾는 정 4각 덕트의 발달되어 가고 있는 입구영역에서 천이 정상유동과 비정상유동의 속도분포, 전단응력분포, 압력분포를 이론 및 실험적으로 연구하여 천이 정상유동과 비정상유동의 입구길이에 대한 실험식을 제안하였다.

측정기의 고감도와 성능향상에 따라 She-mer⁶⁾는 원관내 난류 맥동유동에 대한 레이놀즈 응력을 연구 발표하였고, Mizushina⁷⁾는 원관내에서 난류 맥동유동의 유동해석에 대한 연구를 발표하였다. 일반적으로 원관의 난류 맥동유동에 대한 연구는 많이 진행되고 있는 반면에^{10),11)} 정 4각단면 덕트내에서 난류 맥동유동의 난류특성에 대한 연구결과는 거의 없는 것으로 사료된다. 특히, 유체 관료계의 비정상유동의 특성은 연구한 자료가 유체기계와 열기관에 연결된 정 4각단면 덕트의 최적 설계에 필수적인 자료가 될 것이므로, 본 연구는 정 4각 단면 덕트내의 난류 맥동유동에 대한 유동특성을 규명하기 위하여 속도 진폭비와 무차원 각주파수 및 시간평균 레이놀즈수가 난류 맥동유동의 난류 특성에 미치는 영향을 열선풍속계와 오실로그래프를 이용하여 실험적으로 고찰하여 규명하였다.

2. 기초이론

정상유동에 있어서 난류의 *rms* 값(Root Mean Square Value), U'_{rms} 와 관횡단면 평균 속도; \bar{U}_m 의 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$U'_{rms} = K(z') \bar{U}_m \dots\dots\dots (1)$$

그런데 맥동유동인 경우에 있어서 측정결과로부터 알 수 있지만, 주파수가 대단히 낮은

경우는 U'_{rms} 와 \bar{U}_m 사이에 위상차가 존재하기 때문에 식(1)로부터 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$U'_{rms} = K(z') \bar{U}_m - \theta(z') = \frac{\partial U'_{rms}}{\partial t} \dots (2)$$

여기에서, $\theta(z')$ 는 특성시간을 의미한다. 그리고, 식(2)는 Shemer⁵⁾의 시간지연을 고려한 모델을 인용한 것이다. 식(2)에서 난류 맥동유동은 정상유동과 진동유동의 합성으로 이루어진 유동이므로, U'_{rms} 와 \bar{U}_m 을 다음과 같이 표시하였다.⁹⁾

$$U'_{rms} = U'_{rms, ta} + U'_{rms, os} \dots (3)$$

여기서, 진동유동은 $U'_{rms, os} = |U'_{rms, os, 1}| \cdot e^{i(\omega t + \angle U'_{rms, os, 1})}$ 로 표시된다. 그리고, 평균속도에 대해서도 정상유동과 진동유동의 합성이므로,

$$\bar{U}_m = \bar{U}_m, ta + \bar{U}_m, os \dots (4)$$

여기서, 진동유동은 $\bar{U}_m, os = |\bar{U}_m, os, 1| \cdot e^{i(\omega t + \angle \bar{U}_m, os, 1)}$ 로 표시된다.

식(3)과 식(4)를 식(2)에 대입하고, 시간평균 성분과 진동성분을 분리하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} U'_{rms, ta} &= K(z') \bar{U}_m, ta \dots (5) \\ |U'_{rms, os, 1}| \cdot e^{i(\omega t + \angle U'_{rms, os, 1})} &= K(z') |\bar{U}_m, os, 1| \cdot e^{i(\omega t + \angle \bar{U}_m, os, 1)} \\ &\quad - i\omega \theta(z') |U'_{rms, os, 1}| \cdot e^{i(\omega t + \angle U'_{rms, os, 1})} \dots (6) \end{aligned}$$

여기에서, 진동성분에 대한 난류성분과 관 횡단면 평균속도성분의 관계를 얻기 위하여 식(6)의 우변항을 변형하여 다시 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} |U'_{rms, os, 1}| \cdot e^{i(\omega t + \angle U'_{rms, os, 1})} &= \frac{K(z')}{1 + i\omega \theta(z')} \cdot |\bar{U}_m, os, 1| \cdot e^{i(\omega t + \angle \bar{U}_m, os, 1)} \\ &= \frac{K(z')}{\sqrt{1 + \omega^2 \theta^2(z')}} \cdot |\bar{U}_m, os, 1| \cdot e^{i(\omega t + \angle \bar{U}_m, os, 1)} \dots (7) \end{aligned}$$

식(7)에서 진동성분의 $|U'_{rms, os, 1}|$ 과 $|\bar{U}_m, os, 1|$

의 관계와 $\omega \theta(z')$ 는 다음과 같다.

$$\frac{|U'_{rms, os, 1}|}{|\bar{U}_m, os, 1|} + \frac{K(z')}{\sqrt{1 + \omega^2 \theta^2(z')}} \dots (8)$$

$$\theta(z') = \frac{1}{\omega} \tan \{ \angle \bar{U}_m, os, 1 - \angle U'_{rms, os, 1} \} \dots (9)$$

3. 실험

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 있으며, 덕트길이(L)가 4,000 mm이며 덕트 횡단면(2a + 2b)가 40 × 40 mm인 정 4각단면 덕트로서 매끄러운 아크릴로 제작하였다. 본 실험에서 사용된 관로계는 흡입형으로 작동유체는 공기이며, 덕트 입구에는 매끄러운 유입관을 설치하여 공기의 유입유동을 원활하도록 하였다. 유량조절을 하기 위하여 유량제어 밸브를 설치하였고, 덕트 유동에서 발생하는 맥동현상이 송풍기에 전달되는 것을 방지하고 일정한 유동이 이루어지도록 송풍기 앞에 서어지탱크를 설치하였다. 정상유동과 진동유동을 합성시켜서 맥동유동을 발생하였고, 정상유동은 송풍기에 의하여 흡입유동으로 발생하였으며, 진동유동은 피스톤-크랭크형 가진기에 의하여 발생시켰다. 정상유동에서는 유량제어 밸브를 사용하여 유속을 조절하였고, 진동유동에서는 무단 변속기를 사용하여 진동유동의 각 진동수를 조절하면서 실험조건을 변화하여 실험하였다. 그리고, Fig. 2에 나타난 것처럼 열선의 센서를 삽입하기 위하여 직경 5.4 mm의 구멍을 y' = 0에서 축방향을 따라 200 mm 간격으로 뚫었다. 피스톤 운동의 위상각을 표시한 위상표시(Time Mark)는 피스톤 가진기에 부착하였고, 원주상에 등간격

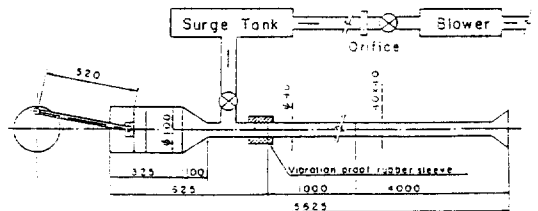


Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Apparatus

($\pi/6$)으로 12개의 구멍을 만든 다음, 회전 원판의 양측면에 투광기와 수광기를 설치하여 오실로 그래프 기록기에 등간격이 표시되도록 하였다. 또한, 본 연구에서 사용한 시험덕트의 좌표계는 Fig. 3에 나타냈는데, 축방향을 x 축으로 하고, 그축에 직각인 방향을 각각 y 축, z 축으로 하여 그들 방향의 속도 성분을 u, v, w 라고 하였다. 그리고, 실험을 실시하기 전에 정확한 자료를 얻기 위하여 항상 열선 풍속계의 보정을 실행한 다음, 본 실험을 실행하였는데, 이에 대한 보정곡선은 Fig. 4와 같다. 또한 맥동유동의 통계적 자료처리를 위하여 열선 풍속계에서 200 주기의 아날로그 출력신호와 위상표시 신호를 외부 트랙커로써 A/D 변환기에 의하여 1 주기를 12 등분한 각위상에 있어서 속도의 위상평균값과 난류의 rms 값을 구했는데, 이들의 자료처리장치에 대한 계통도는 Fig. 5에 나타났다. 정상 유동의 관형단면 평균속도, $\bar{U}_{m,s}$ 와 맥동유동의 관형단면 평균속도 \bar{U}_m 은 속도, \bar{U} 를 Si-

mpson 공식을 이용해서 관형단면 평균을 구하였다. U'_{rms} 와 \bar{U}_m 의 진폭과 위상각은 1 주기마다 12개의 측정값을 얻어서 주파수 성분까지 Fourier 전개를 하여 근사시켜서 해를 구하였다. 정 4각 덕트내의 맥동유동을 규정하는 변수는 시간평균 레이놀즈수($Re, \tau a$)와 무차원 각주파수(ω') 및 속도진폭비(A_1)인데, 이들 세가지 변수의 변화범위를 본 실험에서는 Table 1과 같이 실험조건을 설정하여 실험하였다.

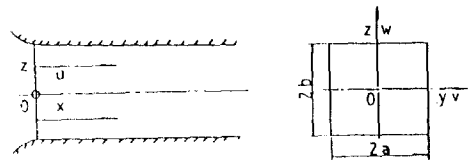


Fig. 3. Coordinate System of Tested Square Duct

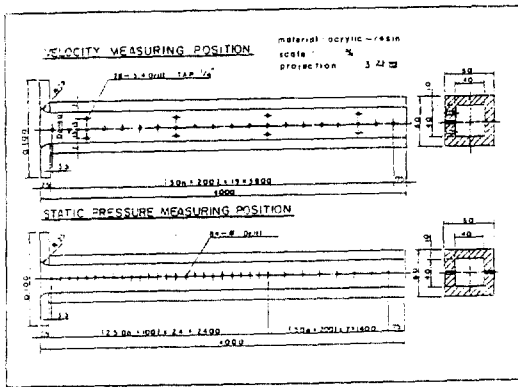


Fig. 2. Position of Velocity and Static Pressure Measurements

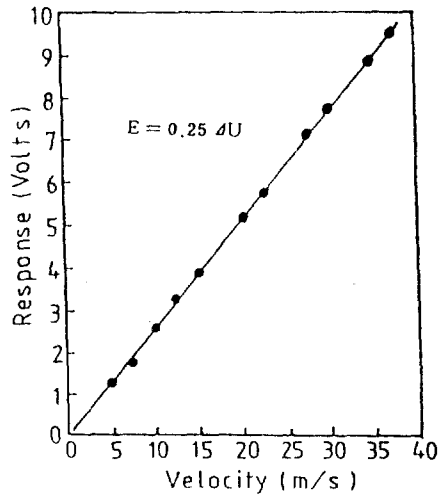


Fig. 4. Calibration Curve of Linearized Response of CTA Hot-wire Anemometer

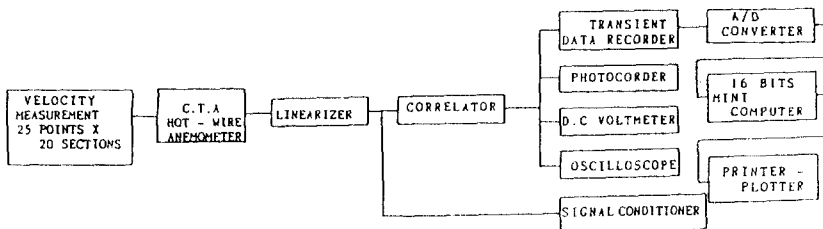


Fig. 5. Diagram of Data Acquisition and Processing System

Table 1. Experimental Conditions

Run	f(Hz)	$\sqrt{\omega'}$	Re. t_a	A_1
1			36.100	0.257
2			36.000	0.522
3	2.08	18.61	35.900	0.802
4			58.700	0.533
5			70.300	0.334
6			84.500	0.266
7			76.000	0.264
8	1.02	13.03	70.600	0.284
9			35.100	0.248
10			18.900	0.326
11	0.299	7.05	36.500	0.262

4. 결과 및 고찰

4.1 속도진폭비(A_1)의 영향

난류 정상유동에서 난류 rms 값의 분포를 Laufer⁶⁾와 Pennel¹⁰⁾의 실험결과와 비교하여 Fig. 6에 나타냈는데, 동일한 경향을 볼 수 있었고, Fig. 7과 Fig. 8에는 실험조건이 무차원 각주파수($\sqrt{\omega'}$)가 18.61이고, 시간평균 레이놀즈수(Re, t_a)가 36100과 36000이며 속도진폭비(A_1)가 0.257과 0.522인 경우에 무차원 덕트 횡방향의 위치(z')를 변화시켜 가면서 얻은 속도파형과 속도분포 및 난류 rms 값 분포를 나타내었다. 여기에서 속도가 큰 위상에서 난류성분이 크고, 가속영역에 비해서 감속영역쪽이 난류성분이 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 9에는 실험조건이 무차원 각주파수($\sqrt{\omega'}$)가 18.61이고, 시간평균 레이놀즈수(Re, t_a)가 35900이며, 속도진폭비(A_1)가 0.802인 경우에 난류특성 결과를 나타내어 고찰하여 보면, 가속유동영역에서 재충류화가 나타나고, 난류성분의 rms 값 분포는 덕트의 횡단면 전체에 걸쳐서 약간 작게 나타남을 알 수 있다. 그리고, Fig. 10에는 Table 1에 표시된 실험 1, 2 및 3에 대한 시간평균 성분과 진동성분의 실험결과를 정상유동의 속도분포와 비교하여 나타냈는데, 거의 일치하고 있음을 알 수 있고, Fig. 11과 Fig. 12에는 실험

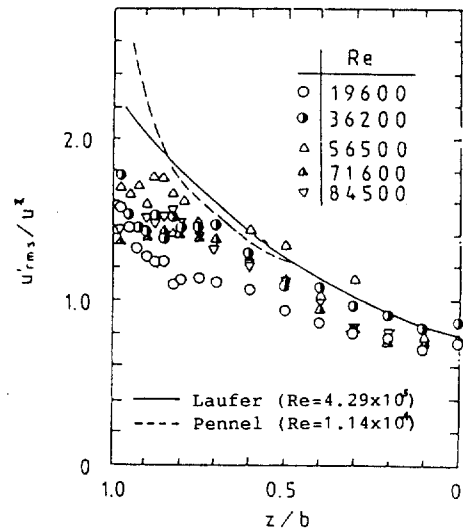


Fig. 6. RMS Value Profile of Turbulent Steady Flow

1, 2 및 3에 대한 시간평균성분과 진동성분을 나타냈는데, 실험 2에서의 속도 진폭비가 실험 1보다 2배가 되지만, 두 성분이 거의 일치함을 알 수 있었고, 재충류화가 나타나는 실험 3에서도 유사한 결과를 보여주고 있는데, 이들의 결과로부터 속도진폭비(A_1)는 난류성분의 진동성분과 덕트 횡단면 평균속도의 진동성분과의 진폭비($|U'_{rms,os,1}|/|U_{m,os,1}|$)와 위상차($\angle U'_{rms,os,1} - \angle U_{m,os,1}$)에 영향을 크게 미치지 않음을 알 수 있었다.

4.2 무차원 각주파수(ω')의 영향

Fig. 13에는 무차원 각주파수($\sqrt{\omega'}$)를 18.61, 13.03과 7.05로 변화시켜가면서 실험한 결과로부터 위상차의 측정값을 얻은다음 식(10)에서 특정시간 $\{\theta(z')\}$ 을 계산하여 얻은 값을 비교했는데, 측정값에 약간의 산란된 분포를 나타내고 있지만 거의 차이가 없어서 본 실험에서 사용된 주파수 범위내에서는 $\theta(z')$ 에 미치는 주파수의 영향은 무시될 수 있다고 사료된다. 또한 Fig. 13에서 거의 유사한 시간평균 레이놀즈수를 가진 실험 2와 실험 3의 $\theta(z')$ 에 대한 분포도 실험 1, 9 및 11의 분포와 거의 일치하였는데, 이들의 결과로부터 특성시간 $\{\theta(z')\}$ 에 대한 속도진폭비(A_1)의 영향은 없다

고 생각할 수 있다. 그러므로, 맥동유동의 가속도(dU_m/dt)는 그 주파수(f)와 진폭($|U_{m,os}|$)에 의존하지만, 특성시간($\theta(z)$)는 유동의 가속도에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. Fig. 14는 무차원 각주파수($\sqrt{\omega'}$)가 13.03과 7.05이고, 시간평균 레이놀즈수(Re, τ_a)가 35100과 36500이며, 속도진폭비(A_1)가 0.248과 0.262인 경우에 대한 실험 9와 실험 11에 있어서 난류성분의 시간평균 성분분포를 나타내었고, Fig. 15에는 실험 1, 9 및 11의 난류 진동성분에 대한 분포를 나타내었다. Fig. 14에서 실선은 레이놀즈수가 36000이고 파선은 레이놀즈수가 36400인 경우의 정상유동 분포인데, 이들의 결과로부터 실험 9와 실험 11에 있어서 난류성분의 시간평균 성분분포와 유사한 레이놀즈수를 가진 정상유동분포는 거의 잘 일치함을 알 수 있고, Fig. 15에서는 측정값과 계산결과가 관벽 부근을 제외하고 거의 일치함을 고찰하였다.

4.3 시간평균 레이놀즈수(Re, τ_a)의 영향

Fig. 16에는 무차원 각주파수($\sqrt{\omega'}$)가 18.61이고, 시간평균 레이놀즈수가 58700, 70300과 84,500인 경우의 실험 4, 5 및 6에 대한 난류의 시간평균 성분분포를 나타내고, Fig. 17에는 난류진동성분의 분포를 나타냈으며, 무차원 각주파수($\sqrt{\omega'}$)가 13.03이고, 시간평균 레이놀즈수(Re, τ_a)가 각각 76000, 70600, 35100, 및 18900인 경우의 실험 7, 8, 9 및 10에 대한 난류 시간평균 성분분포는 Fig. 18에 표시하였고, 난류 진동성분 분포는 Fig. 19에 나타내었다. Fig. 16과 Fig. 18에 표시된 실험결과로부터 여러가지 시간평균 레이놀즈수와 유사한 레이놀즈수를 가진 정상유동의 난류성분 분포와 난류 시간평균성분 분포가 거의 일치함을 고찰하였고, 식(6)에 나타난 적용조건을 만족하였다. 또한 Fig. 17과 Fig. 19에서도 본 연구에 적용한 이론식의 계산결과와 측정값이 관벽 부근을 제외하고 잘 일치하고 있음을 고찰하였다.

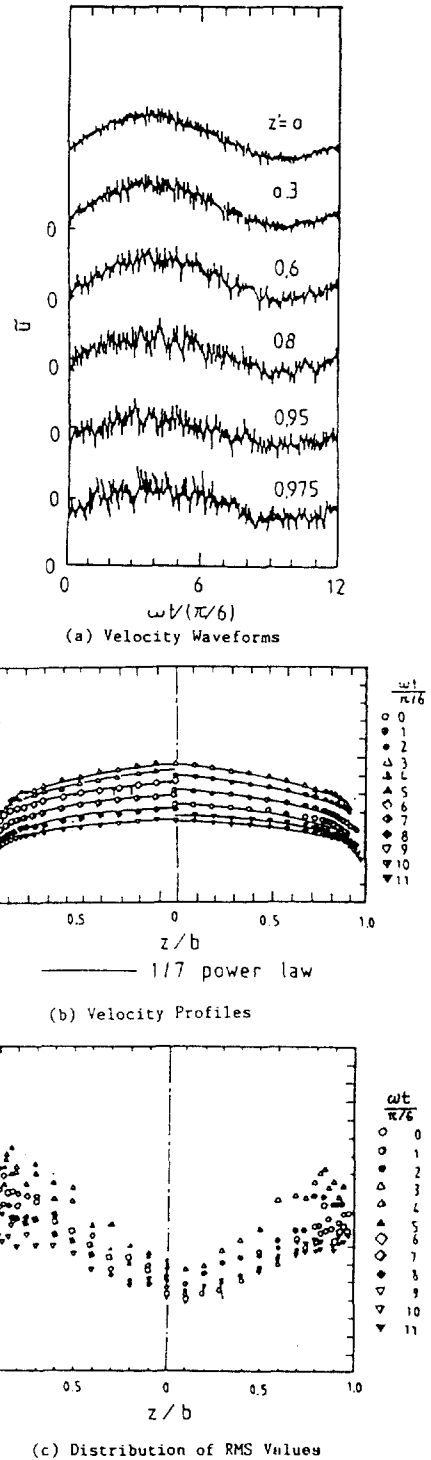
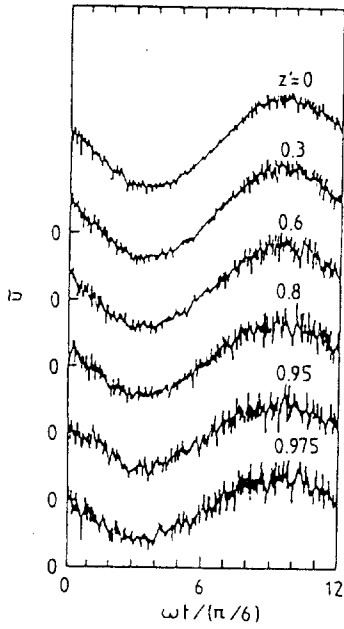
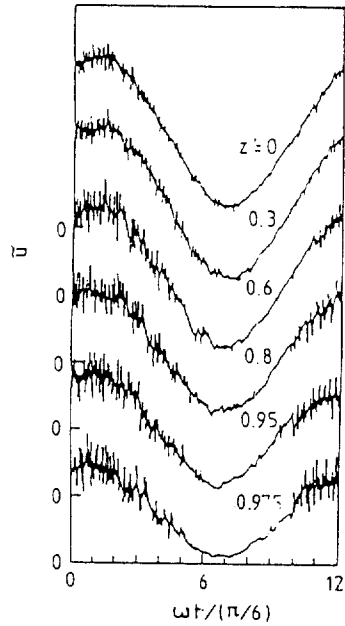


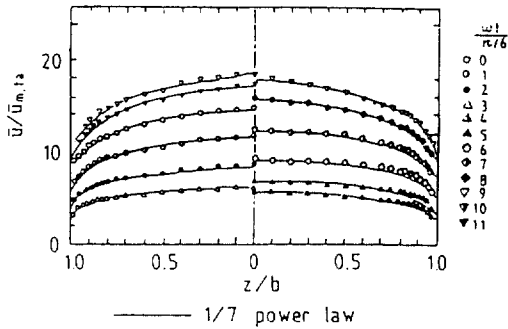
Fig. 7. Velocity Waveforms, Velocity Profiles, and Distribution of RMS Values for Turbulent Pulsating Flow of Run 1



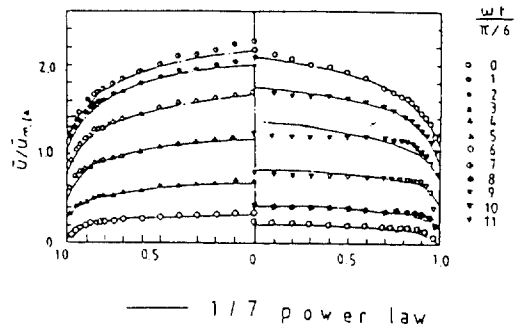
(a) Velocity Waveforms



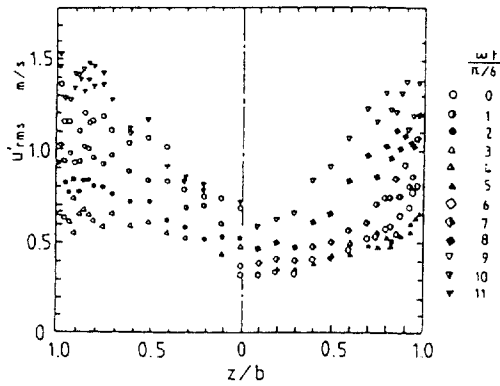
(a) velocity Waveforms



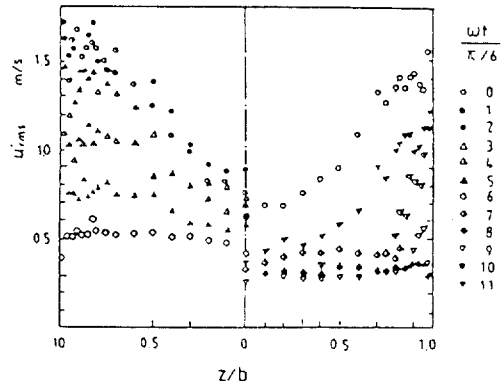
(b) Velocity Profiles



(b) Velocity Profiles



(c) Distribution of RMS Values



(c) Distribution of RMS Values

Fig. 8. Velocity Waveforms, Velocity Profiles, and Distribution of RMS Values for Turbulent Pulsating Flow of Run 2

Fig. 9. Velocity Waveforms, Velocity Profiles, and Distribution of RMS Values for Turbulent Pulsating Flow of Run 3

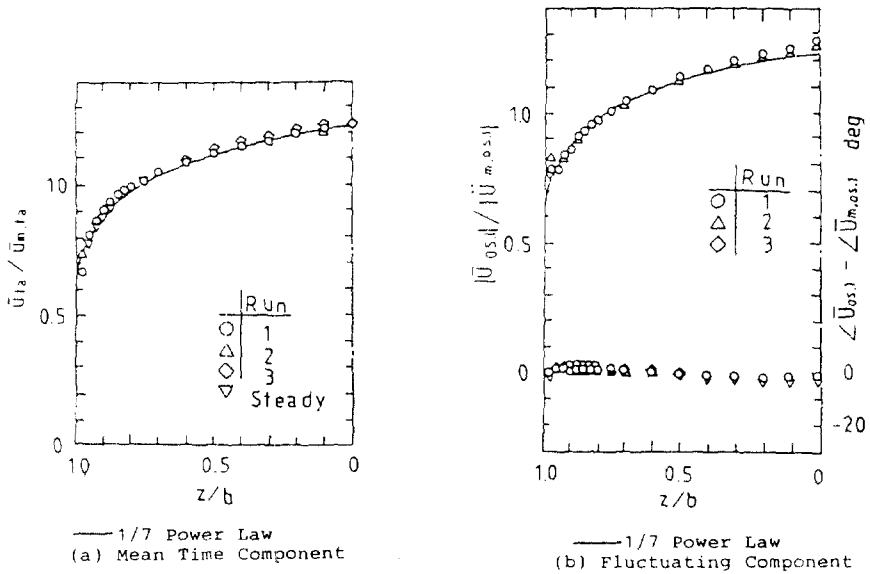


Fig. 10. Mean Time Components and Fluctuating Components of Velocity for Turbulent Pulsating Flow

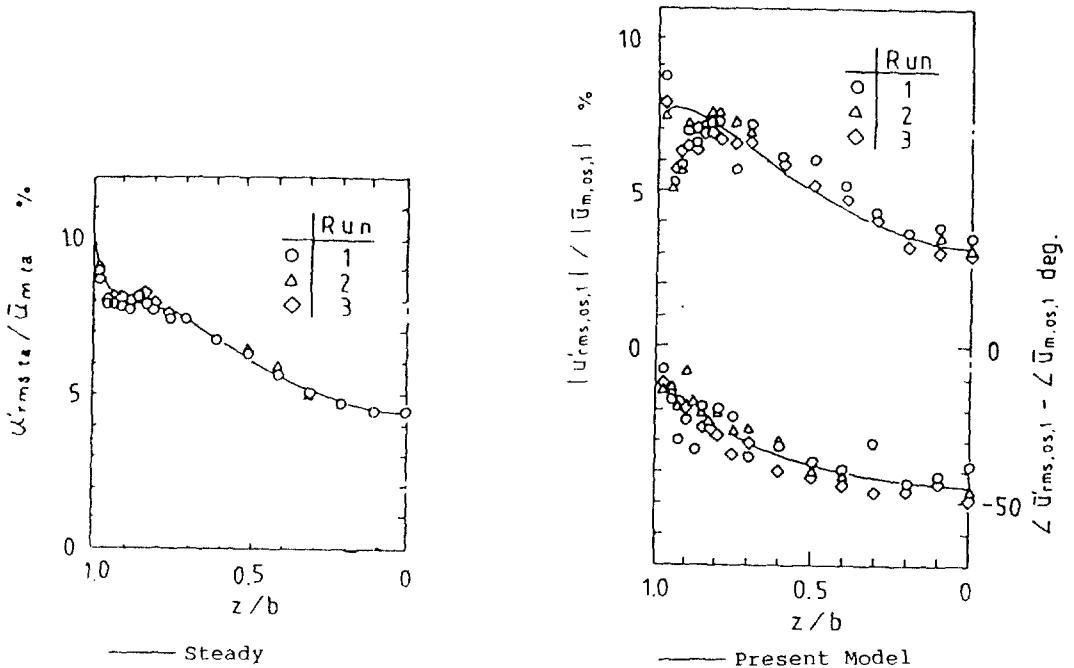


Fig. 11. Mean Time Value Profiles of Turbulent Flows of Runs 1, 2 & 3

Fig. 12. Fluctuating Component Profiles of Turbulent Flows of Runs 1, 2 & 3

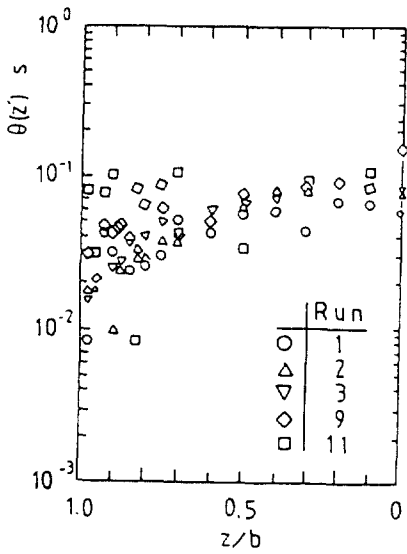


Fig. 13. Profiles of Specified Time of $\theta(z')$

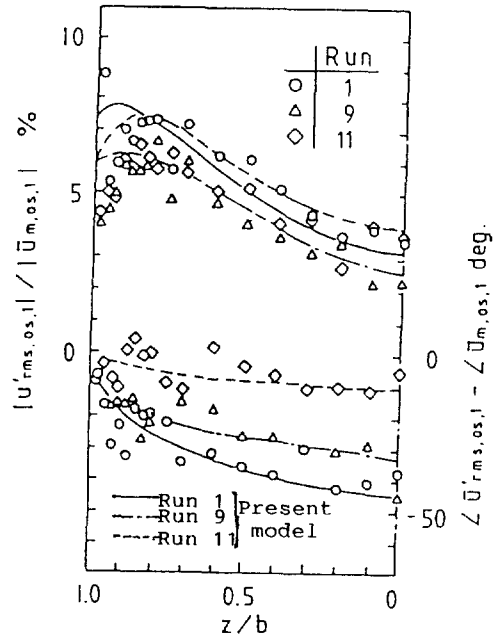


Fig. 15. Fluctuating Component Profiles of Turbulent Flows of Runs 1, 9 & 11

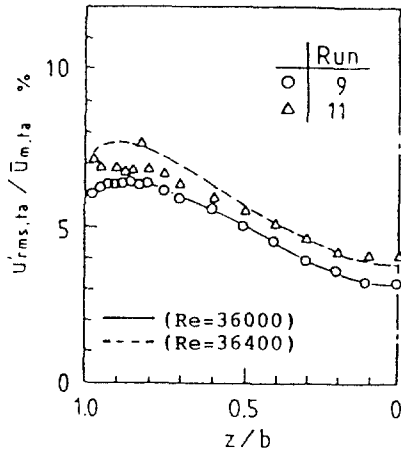


Fig. 14. Mean Time Value Profiles of Turbulent Flows of Runs 9 & 11

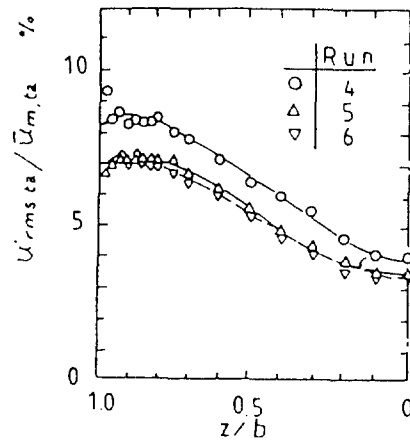


Fig. 16. Mean Time Value Profiles of Turbulent Flows of Runs 4, 5 & 6

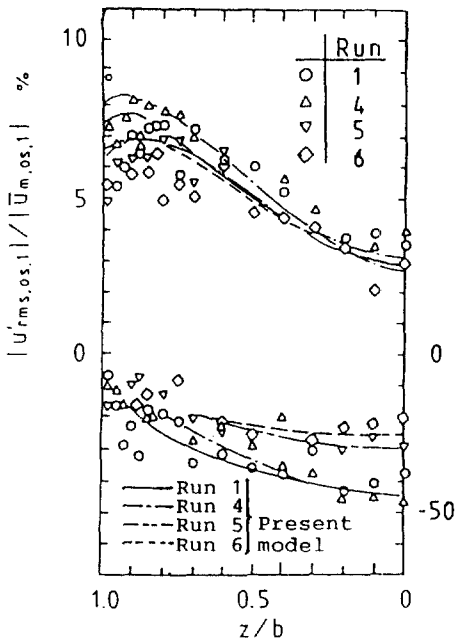


Fig. 17. Fluctuating Component Profiles of Turbulent Flows of Runs 1, 4, 5 & 6

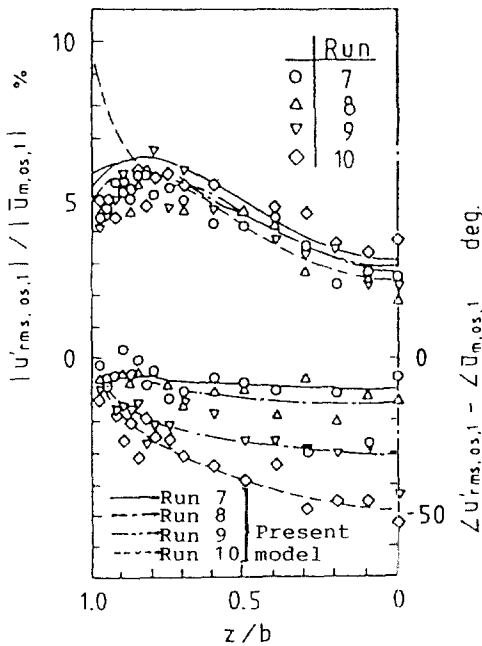


Fig. 19. Fluctuating Component Profiles of Turbulent Flows of Runs 7, 8, 9 & 10

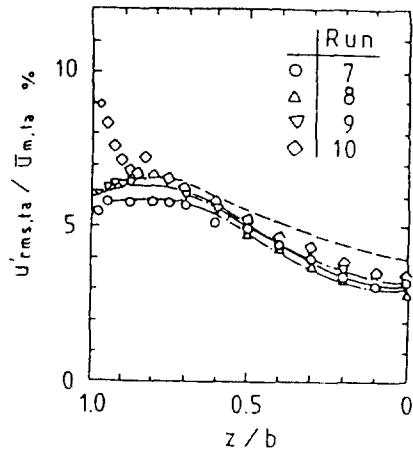


Fig. 18. Mean Time Value Profiles of Turbulent Flows of Runs 7, 8, 9 & 10

5. 결 론

정 4 각단면 덕트내에서 난류맥동유동에 대한 난류특성을 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 난류 맥동유동의 속도분포와 U'_{rms} 분포에서 속도가 큰 위상에서는 난류성분이 크고, 가속영역에 비해서 감속영역쪽이 난류성분이 크게 나타났다.

2. 속도진폭비 (A_1)는 난류성분의 진동성분과 덕트 횡단면 평균속도의 진동성분과의 진폭비 ($|U'_{rms,os,1}|/|U_{m,os,1}|$)와 위상차 ($\angle U'_{rms,os,1} - \angle U_{m,os,1}$) 및 특성시간 $\{\theta(z)\}$ 에 영향을 크게 미치지 않았다.

3. 주파수가 다른 난류 맥동유동에서 위상차로 구한 특성시간 $\{\theta(z)\}$ 분포는 잘 일치하므로, 특성시간 $\{\theta(z)\}$ 에 대한 주파수의 영향은 무시할 수 있다고 사료된다.

4. 난류 맥동유동의 평균속도분포는 1/7 승근법칙에 비교적 잘 일치하였고, 여러가지 시간평균 레이놀즈수 (Re_{ta})에 대한 난류 시간평균성분 분포는 유사한 레이놀즈수를 가진 정상유동의 난류성분분포와 거의 일치하였다.

참 고 문 헌

1. Klein, A.: "REVIEW: Turbulent Developing Pipe Flow", *ASME, J. Fluid Eng.*, Vol. 103, pp. 243-249, 1981.
2. Ohmi, M., Kyomen, S., Iguchi, M., and Usui, T. : "Experimental Study of Eddy Viscosity Distribution in Pulsating Pipe Flow", *Tech. Reports of the OSAKA University*, Vol. 33, No. 1729, pp. 359-365, 1983.
3. Park, G.M.: "Flow Characteristics of Developing Laminar Unsteady Flow in a Square Duct", Ph.D. Thesis, Korea Univ., 1987.
4. Choi, J.H.: "A Study on Flow Characteristics of Transitional Unsteady Flow in a Square Duct", Ph.D. Thesis, Chosun Univ., 1988.
5. Yoo, Y.T.: "A Study on Flow Characteristics of Developing Transitional Steady oscillatory, and Pulsating Flows in Entrance Region of a Square Duct", Ph.D. Thesis, Chosun Univ. 1989.
6. Laufer, J.: "The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow", *NACA Report 1174*, 1953.
7. Kirmse, R.E.: "Investigation of Pulsating Turbulent Pipe Flow", *ASME, J. Fluid Eng.*, 1978.
8. Shemer, L. and Wygnanski, I.: "On the Pulsating Flow in a Pipe", *3rd Symposium on Turbulent Shear Flows*, Univ. California, pp. 8-13, 1981.
9. Mizushima, T., Maruyama, T., and Shiozaki, Y.: "Pulsating Turbulent Flow in a Tube", *J. Chemical Eng.*, Vol. 6, No. 6, pp. 487-494, 1973.
10. Pennel, W.T., Sparrow, E.M., and Eckert, E.R.G.: "Turbulence Intensity and Time-mean Velocity Distribution in Low Reynolds Number Turbulent Pipe Flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 1067-1074, 1971.
11. Mizushima, T., Maruyama, T., and Hirasawa, H.: "Structure of the Turbulence in Pulsating Pipe Flow", *J. Chemical Eng.*, Vol. 8, No. 3, pp. 210-216, 1975.