

균질한 등방향성 난류 생성 및 특성 변화 분석

이훈상* · 한규호* · 박한준* · 정현균* · 황원태†

Generation and Characterization of Homogeneous Isotropic Turbulence

HoonSang Lee*, KyuHo Han*, Han June Park*, HyunKyun Jung* and Wontae Hwang†

Abstract Homogeneous and isotropic turbulence (HIT) with no mean flow is a very useful type of flow for basic turbulence research. However, it is difficult to generate HIT in the lab. In this study, we implemented HIT in a confined box through synthetic jet actuators using sub-woofer speakers. Characteristics of HIT are varied depending on the strength of the jets. We used 2D PIV to measure the velocity field. Turbulence statistics such as homogeneity, isotropy ratio, turbulence kinetic energy, dissipation rate, Taylor microscale, Kolmogorov scale, and velocity correlation coefficient were calculated. Most of the turbulence statistics increased exponentially according to the strength of the jets, and the Taylor Reynolds number reached up to 185.

Key Words : Homogeneous isotropic turbulence (균질한 등방향성 난류), Synthetic jet (합성 제트), Particle image velocimetry (입자 영상 유속계), Turbulence statistics (난류 통계치)

기호설명

C_s	Smagorinsky constant
$F_{ii}(r)$	Longitudinal velocity correlation coefficient
$G_{ii}(r)$	Lateral velocity correlation coefficient
$H(x, y)$	Homogeneity
$I_{ij}(x, y)$	Isotropy ratio
Re_λ	Taylor microscale Reynolds number
\tilde{S}_{mn}	Resolved scale strain rate tensor
$k(x, y)$	Turbulence kinetic energy

$k(x, y)$	Turbulence kinetic energy
S_{ij}	Fluctuating rate of strain tensor
u'_i	Velocity fluctuation
$u_{i,rms}$	rms velocity at i direction
Δ	Filter size (Interrogation window size at PIV)
$\varepsilon(x, y)$	Dissipation rate
ε_{SGS}	Sub-grid scale dissipation rate
η	Kolmogorov length scale
λ	Taylor microscale
ν	Kinematic viscosity

† Corresponding author:

Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University
Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University
E-mail: wthwang@snu.ac.kr

* Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University

1 서론

자연과 일상생활에서 접하는 대부분의 유동은 난류이다. 난류를 이해하고 이에 대한 이론을 정립하는 것은 다양한 분야에서 활용될 수 있으며 그 효용성이 뛰어나다. 그러나 난류는 무작위한 특성을 가지기 때문에 이를 이론적으로 나타내는데 한계가 있다. 특히 입자가 섞인 유동, 연소가 포함된

유동 등 다양한 환경에서는 이러한 어려움이 더욱 커진다.

균질하고 등방향성 난류 (Homogeneous and isotropic turbulence HIT)는 가장 간단한 형태의 이상적인 난류이다.⁽¹⁾ HIT는 균질성과 등방향성의 성질을 가지기 때문에 복잡한 난류 이론을 비교적 간단하게 만들 수 있으며, 난류에 대한 기본적인 이해를 증진시킨다.⁽²⁾ 그러나 HIT를 현실에서 구현하는 것은 어려운 일이기 때문에 대부분의 연구에서는 DNS (direct numerical simulation)를 이용하여 이를 구현하고 있다. 비록 시뮬레이션을 통한 다양한 연구가 진행되고 있음에도 이를 실험적으로 실증하기 위해, 실험실에서 HIT를 만들고자 하는 노력은 현재까지 계속되고 있다.

HIT를 실험적으로 생성하는 고전적인 방법은 풍동에 격자를 설치하여 격자 난류 (grid turbulence)를 발생시키는 것이다. 격자 난류는 잘 알려진 균질한 난류이다. Roach⁽³⁾은 격자를 이용하여 발생시킨 난류의 power spectra와 velocity correlation 함수를 분석하여, 이러한 난류가 등방향성을 가지는 것을 확인하였다. Srdic⁽⁴⁾은 기존의 격자 난류의 단점인 급격한 decay를 해결하기 위해 유리 상자의 양 끝에 oscillating grid를 장착하여 난류를 발생시켰다. 비록 상자 중앙에서 유동이 완벽히 균질하지 않았지만 등방향성을 띄고 평균 유동이 0에 가까운 결과를 얻었다.

Birouk⁽⁵⁾과 Fallon⁽⁶⁾은 평균 유동이 없으면서 HIT에 근접한 유동을 만들기 위해 새로운 실험 장치를 고안하였다. 그들은 정육면체 상자의 각 꼭지점에 상자 중심을 향하도록 fan을 부착하였다. Fan이 만드는 유동은 상자 중앙에서 합쳐져 작은 영역에서 HIT를 생성하였다. 두 방향의 RMS (root-mean-square) 속도의 비율로 계산한 등방향성 값은 각각 0.95와 0.94로, 등방향성을 나타내는 1에 매우 근접하였으며 Taylor microscale Reynolds 수 (Re_λ)는 각각 110과 50으로 나타났다.

Hwang⁽¹⁾은 fan 대신 서브 우퍼 스피커 (sub-woofer speaker)를 이용한 synthetic jet actuator로 실험 장비를 제작하였다. 이러한 방법은 fan 내부에 입자가 끼어서 손상을 주는 문제를 해결할 수 있기 때문에, 입자가 섞인 유동에 관한 연구가 가능하다는

점을 강조하였다. 해당 실험 기구를 통해 구현한 HIT는 등방향성이 1.03, Taylor microscale 레이놀즈 수 (Re_λ)는 218로, fan을 통해 제작한 실험기구에 비해 더욱 좋은 결과를 얻었다.

HIT를 활용한 다양한 연구를 수행하기 위해선 원하는 유동 특성을 쉽게 제어할 수 있어야 한다. 그렇기 때문에 특정 조건에서 유동의 변화를 파악하는 것은 매우 중요하다. Fan을 이용하여 HIT를 구현했던 여러 선행연구에서는 fan의 rpm을 변화시켜 난류의 특성 변화를 예측한 바 있다.⁽⁷⁻⁸⁾ 그러나 Synthetic jet로 발생하는 유동은 fan이 만드는 유동과 차이가 있기 때문에 각각이 만드는 HIT의 특성에도 차이가 존재할 수 있다.

이번 연구에서는 synthetic jet으로 구현한 HIT의 유동 특성을 분석하는 것을 목표로 하였다. Synthetic jet을 구성하는 스피커는 파워 input에 따라 발생하는 제트의 출구 속도와 난류 강도 등이 변화한다. 제트의 유동 변화는 상자 중앙에 생성되는 HIT의 난류 통계치의 변화로 이어진다. 균질성, 등방향성을 비롯하여 난류 운동에너지, 소산율, Taylor microscale, Kolmogorov scale 그리고 velocity correlation를 계산하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 균질한 등방향성 난류 생성 장치 및 PIV

Hwang⁽¹⁾이 제시한 concept을 인용하여 Fig. 1의 (a)와 같이 난류 상자를 제작하였다. 상자는 한 변의 길이가 380 mm인 정육면체 아크릴의 8개의 꼭지점을 잘라서 제작하였다. 잘린 꼭지점에는 서브 우퍼 스피커 (Peerless, 60W max power, 30W rms power, frequency response 60-5,000 Hz)를 통해 제작한 synthetic jet actuator (Fig. 1 (b))를 부착하였다. 제트 유동은 스피커의 진동판이 만드는 streaming motion에 의해 발생한다. 진동판이 당겨질 때, 주변 유체는 제트로 흡입되며 이후 진동판이 이를 밀어내면서 총 질량 flux 없이 선형 모멘텀 flux를 가지는 유동을 발생시킨다. 유동은 아크릴로 제작한 ejector tube와 그 끝에 부착된 격자를 지나면서 정류된 제트를 형성한다. 각 꼭지점에서 발생한

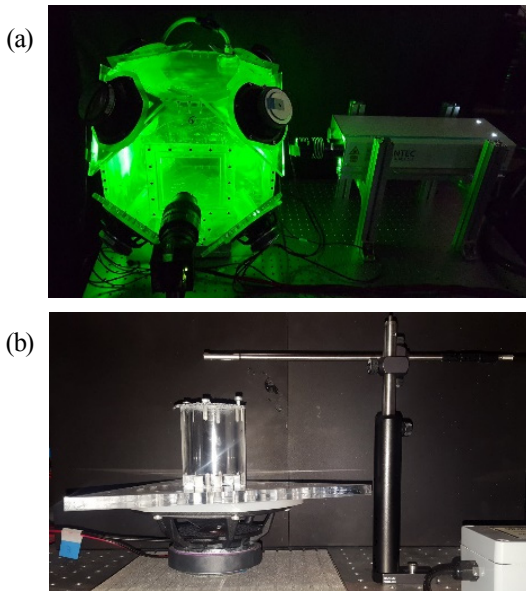


Fig. 1. (a) HIT test chamber and PIV system
(b) Synthetic jet actuator and how-wire anemometry

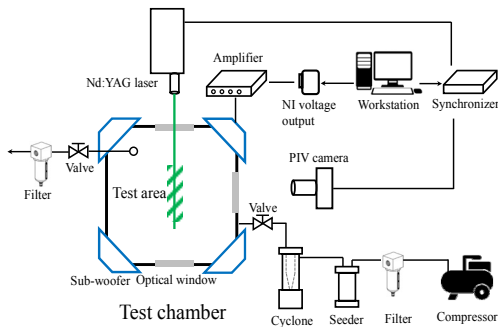


Fig. 2. Experimental setup

제트는 상자 중심부에 모여 HIT를 이룬다. HIT의 유동 특성을 파악하기 위해 3개의 상자 면에는 가시화 창을 설치하였다.

유동 계측을 위해 2D 입자영상유속계 (PIV)를 이용하였다. Fig. 2는 실험 모식도 (schematic)를 보여준다. PIV에 사용한 입자 (tracer particle)는 직경 $0.3 \mu\text{m}$ 의 산화 알루미늄이다. 입자는 seeder속에서 압축공기를 만나 cyclone으로 이동하여, 크기가 큰 입자를 제거한 후 상자 속에 뿌려진다. 그림과 같이 상자 중앙부의 $38 \times 38 \text{ mm}^2$ 영역을 촬영하기 위해, Nikon 렌즈 (105mm macro lens, f2.8)가 장착된

2048*2048의 12 bit 카메라 (Vieworks, VH-4MC-M/C 20, pixel size $7.4 \mu\text{m}$)가 사용되었다. 광원으로는 532nm 파장을 갖는 Nd:YAG laser (Dantec, DualPower 65-15, energy 65 mJ/pulse, 15Hz repetition rate)를 채택하였다.

PIV를 통해 얻은 입자 이미지는 오픈 소스 소프트웨어인 PIVlab(9)을 이용하여 분석하였다. 분석에는 window deformation 기술을 활용한 FFT를 사용하여, 초기 64 px (50% overlap)에서 최종적으로 32 px (50% overlap)의 상관 영역 (interrogation window)으로 계산하였다. 시간 간격 (time interval)은 jet의 세기에 따라 변경하였으며, 에러 백터 검출은 표준편차 필터 (standard deviation filter)와 국소 중간 값 필터 (local median filter)를 통해 시행하였다. 분석된 이미지 중 에러 백터의 개수가 전체 백터 개수의 0.5% 이상인 경우, 난류 통계치 계산에서 배제하였다. 각 실험 케이스에서 설정한 시간 간격과 계산에 사용한 이미지 쌍의 개수는 Table. 1에 나타내었다.

2.2 실험 조건

Synthetic jet를 형성하는 스피커는 입력 신호에 따라 출력이 변화한다. 아날로그 전압 출력 모듈 (NI 9264, 16 channel, maximum voltage 10 V)은 90-110 Hz 범위에서 랜덤 주파수를 갖는 $2 V_{pp}$ 사인파 (sine wave)를 발생시킨다. 이 신호는 파워 앰프 (Behringer EPQ-304, 4 channel, 4×75 Watts into 4 ohms)를 통해 증폭되어 출력된다. 앰프의 출력은 0-28 dB까지 조절이 가능하며, 이번 연구에서는 12부터 28 dB까지 4 dB씩 증가시키며 jet의 세기를 제어하였다. 앰프의 출력에 따른 jet의 출구 속도 변화를 계측하기 위해 열선 유속계를 이용하였다.

Table 1. Experimental conditions and PIV setting

Case	Amp. Power (dB)	Time interval (μs)	Image pairs (pairs)
1	12	30	1,159
2	16	30	1,140
3	20	20	1,080
4	24	20	980
5	28	20	936

Fig. 1의 (b)와 같이 제트의 출구로부터 45 mm 떨어진 지점에서 20초 동안 속도를 측정하였으며, 이를 통해 평균 속도와 RMS 속도를 계산하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 Synthetic jet의 출구 속도 변화

Fig. 3은 열선 유속계로 측정된 synthetic jet의 평균, RMS 출구 속도를 입력 파워에 따라 나타낸 그래프이다. 그래프의 y축은 모두 로그 스케일이다. 제트에 공급되는 파워가 증가함에 따라 출구 속도는 지수적으로 증가하는 경향을 보였으나, 파워가 최대 값 근처에 도달하면서 증가율이 감소하였다. RMS 속도 역시 제트의 세기에 따라 값이 증가하는 경향을 보였으나 공급 파워가 28 dB인 경우, 우퍼 스피커와 앰프의 기계적인 한계로 인해 그 전 단계에 비해 소량 감소하였다.

3.2 균질성과 등방향성

균질성과 등방향성은 다음의 식을 통하여 정량적으로 나타낼 수 있다.

$$H(x, y) = u_{rms}(x, y) / \overline{u_{rms}(x, y)} \quad (1)$$

$$I_{ij}(x, y) = u_{i,rms}(x, y) / u_{j,rms}(x, y) \quad (2)$$

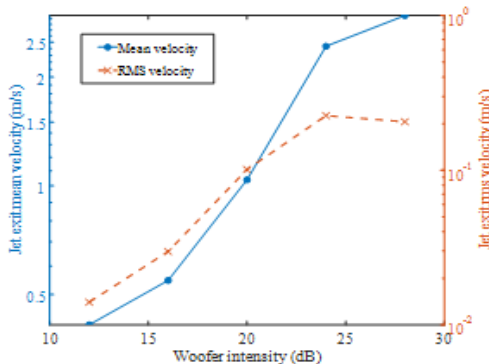


Fig. 3. The mean and rms exit velocity of the synthetic jet as a function of input power

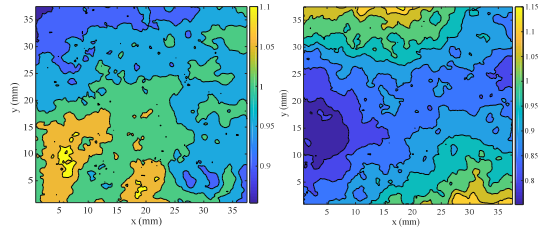


Fig. 4. The contour of (a) homogeneity, $k(x, y) / \overline{k(x, y)}$ and (b) isotropy ratio, $u_{1,rms} / u_{2,rms}$ in experimental case 5

여기서 H는 균질성을, I는 등방향성을 나타내며, 속도 u의 첨자인 i, j와 rms는 각각 i, j 방향과 root mean square를 나타낸다. Overbar는 공간 평균을 뜻한다. 균질성은 rms 속도뿐만 아니라, 난류 운동 에너지, 소산율 등 다양한 난류 통계치를 사용하여 나타낼 수 있다. 이 두 값이 관심 영역 (ROI)에서 모두 1을 나타내면 해당영역에서 균질하고 등방향성을 가지는 난류로 볼 수 있다. Fig. 4의 (a)와 (b)는 각각 case 5 실험에서 계산한 균질성과 등방향성을 보여준다. 균질성은 난류 운동에너지를 이용하여 계산하였으며, 그 범위는 0.85-1.12로 나타났다. 등방향성의 범위는 0.75-1.19로, 균질성에 비해 분포 범위가 다소 크지만, 1에 근접하는 결과를 얻었다.

Fig. 5는 제트의 세기에 따른 (a) 균질성과 (b) 등방향성의 상대도수분포를 보여준다. 검정색 점선은 x축 값이 1인 지점을 나타낸다. 균질성의 경우, 그림 5의 (a)에서 보이는 바와 같이 제트의 세기 변화와 무관하게 모든 조건에서 비슷한 분포를 보였다. 이와 반대로, 등방향성은 제트의 세기가 증가함에 따라 공간 평균 값이 1에서 멀어지는 것을 확인할 수 있다. 특히 $I_{12}(x, y)$ 값은 감소하는 방향으로 변화하며, 이는 제트의 세기가 커지면서 $u_{2,rms}(x, y)$ 값이 $u_{1,rms}(x, y)$ 에 비해 증가함을 알 수 있다. Fig. 6은 스피커 세기에 따른 등방향성의 공간 평균을 나타낸 그래프이다. 여기서 에러바는 등방향성의 공간 분포 범위를 나타낸다. 초기 $\overline{I_{12}(x, y)}$ 는 0.99로 1에 매우 가까우나, 세기가 증가함에 따라 0.92까지 감소함을 확인할 수 있다.

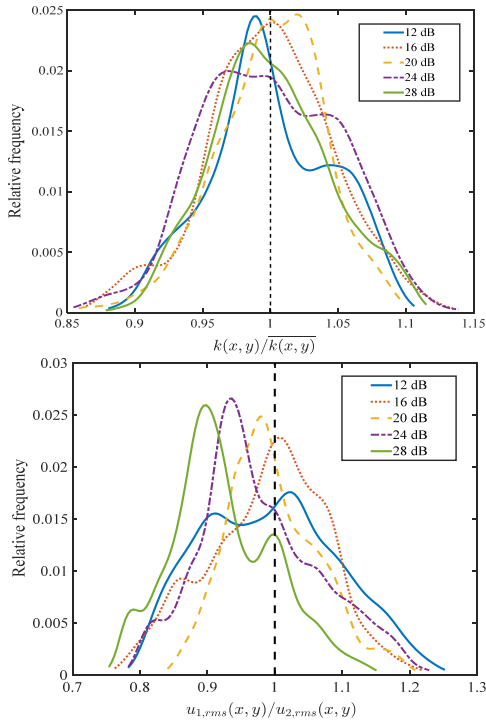


Fig. 5. Relative frequency distribution of (a) homogeneity (b) isotropy ratio as a function of woofer power intensity

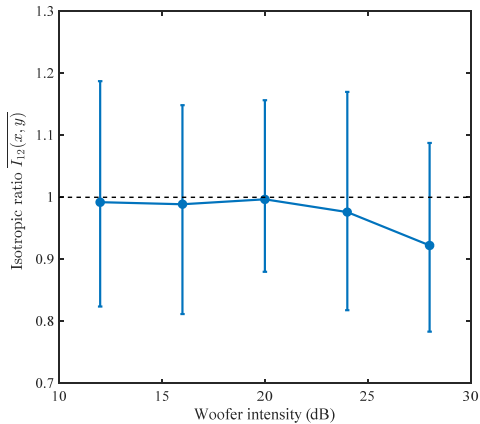


Fig. 6. Spatial average of isotropy ratio as a function of woofer intensity

3.3 난류 운동에너지와 소산율

난류 운동에너지는 단위 질량당 속도 섭동 성분 (fluctuating velocity)에 의한 운동에너지를 나타내

며 이는 Reynolds stress tensor의 대각합의 절반으로 식 (3)과 같이 정의된다.⁽¹⁰⁾

$$k(x, y) = \frac{1}{2} \langle u_i' u_i' \rangle \quad (3)$$

여기서 u' 과 $\langle \rangle$ 은 각각 속도의 섭동 성분과 앙상블 평균 (ensemble average)을 뜻한다. 식 (3)을 계산하기 위해선, 세 방향의 속도 성분이 모두 필요하다. HIT를 생성하는 상자는 대칭 구조를 가지기 때문에 x와 y 방향 속도를 이용하여 등방향성을 검증함으로써 x, z 혹은 y, z에서의 등방향성을 가정할 수 있다. 등방향성의 가정은 식 (4)와 (5)를 만족시키고 이를 식 (3)에 대입하여 난류 운동에너지에 관한 식 (6)을 얻는다.

$$u_{1,rms} \approx u_{2,rms} \approx u_{3,rms} \quad (4)$$

$$u_{3,rms}^2 \approx \frac{1}{2} (u_{1,rms}^2 + u_{2,rms}^2) \quad (5)$$

$$k \approx \frac{3}{4} \langle u_{1,rms}^2 + u_{2,rms}^2 \rangle \quad (6)$$

난류의 소산율은 단위 시간당 난류 운동에너지가 열에너지로 소산되는 양을 의미한다. 소산율은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\varepsilon = 2\nu \langle s_{ij} s_{ij} \rangle \quad (7)$$

ν 는 공기의 동점성 계수 (kinematic viscosity)이며 s_{ij} 는 strain rate tensor로 식 (8)로 정의된다.

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

그러나 strain rate을 식 (7)과 (8)을 이용하여 직접적으로 구하기 위해서는 공간 분해능이 난류의 가장 작은 eddy scale을 나타내는 Kolmogorov length scale보다 작아야 정확한 계산이 가능하다.⁽¹¹⁾ 다시 말해, 일반적인 PIV와 같이 공간 분해능이 Kolmogorov scale보다 큰 경우, 간접적인 방법을

통해 이를 측정해야 한다. 소산율을 간접적으로 계산하는 방법은 다양하게 개발되었으며^(7,11-12), 본 연구에서는 간단하게 계산이 가능한 large eddy PIV method(11)를 통해 계산하였다. 식 (9)부터 (12)를 이용하여 간접적으로 소산율을 구하였다.

$$\varepsilon \approx \langle \varepsilon_{SGS} \rangle = -2 \langle \tau_{ij} \bar{S}_{ij} \rangle \quad (9)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

$$\tau_{ij} = -C_s^2 \Delta^2 \bar{S}_{ij} \sqrt{2 \bar{S}_{mn} \bar{S}_{mn}} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_{mn} \bar{S}_{mn} = & 2 \left(\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_2} \right)^2 \\ & + 2 \left(\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1} \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_2} \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_1} \right)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

ε_{SGS} 는 sub-grid scale 소산율을 의미하며, τ_{ij} , \bar{S}_{ij} 는 각각 sub-grid scale에서의 응력과 resolved scale에서의 strain rate을 뜻한다. τ_{ij} 는 sub-grid scale stress를 나타내며, LES에서 Smagorinsky model로 알려진 식 (10)을 통해 구할 수 있다. 여기서 C_s 는 Smagorinsky 상수를 나타내며, 이는 필터의 크기인 Δ 에 비례한다. 이 상수는 이전 선행연구를 참고하여 0.17로 정하였다.^(1,7,11) Δ 는 PIV의 상관영역의 크기를 나타내며, 본 연구에서는 최종 상관영역의 크기인 32px에 상응하는 길이를 대입하였다. 식 (11)의 $\bar{S}_{mn} \bar{S}_{mn}$ 는 식 (10)의 정의와 등방향성 가정을 이용하여 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 7은 난류 운동에너지와 소산율을 스피커의 세기에 따라 나타낸 그래프이다. 그래프의 y축은 모두 로그 스케일이며, 각 데이터 점은 해당 난류 통계치의 공간 평균 (spatial average) 값을 나타낸다. 평균 값의 에러를 줄이기 위해, 값이 지나치게 크거나 작은 5%의 데이터는 배제하여 계산하였다. 에러바는 계산에 사용된 95% 데이터 범위를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 난류 운동에너지와 소산율은 비슷한 개형을 가진다. 세기가 약할 때에는 변화 자체가 거의 없지만 세기가 증가함에 따라 지수적으로 증가하는 경향을 보였다.

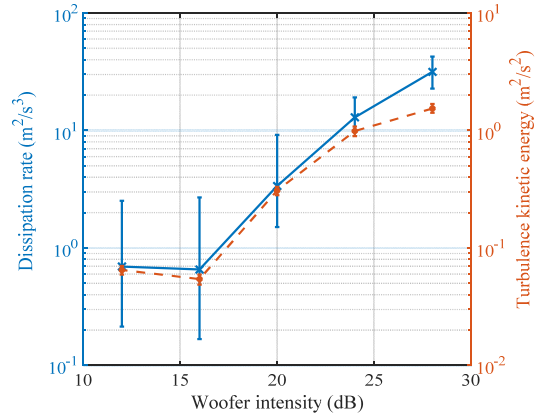


Fig. 7. Spatial average of dissipation rate and turbulence kinetic energy for various experimental cases

3.4 Taylor microscale 과 Kolmogorov scale

Taylor microscale과 Kolmogorov scale은 난류의 대표적인 스케일이다. Taylor microscale은 뚜렷한 물리적인 의미를 가지지 않지만, 이를 기반으로 계산한 Taylor microscale 레이놀즈 수는 많은 HIT 연구에서 유동을 무차원화하기 위해 사용된다.⁽¹⁰⁾ Taylor microscale은 난류 운동에너지와 소산율에 관한 함수로, length scale (λ)과 Reynolds (Re_λ) 수는 각각 아래와 같이 정의된다.

$$\lambda = \left(\frac{10\nu k(x, y)}{\varepsilon(x, y)} \right)^{1/2} \quad (13)$$

$$Re_\lambda = \frac{\lambda(2k(x, y)/3)^{1/2}}{\nu} \quad (14)$$

여기서 ν 는 작동유체의 동점성계수 (kinematic viscosity)로, 실온 (room temperature)에서 공기의 동점성 계수인 $1.568 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$ 으로 계산하였다.

Kolmogorov scale은 난류에서 가장 작은 스케일을 뜻한다. Kolmogorov scale에서는 점성이 가장 지배적으로 작용하며, 난류 운동에너지는 열로 소산된다. Kolmogorov length scale (η)과 time scale (τ_k)의 정의는 다음과 같다.

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon(x, y)} \right)^{1/4} \quad (15)$$

$$\tau_k = \left(\frac{v}{\varepsilon(x, y)} \right)^{1/2} \quad (16)$$

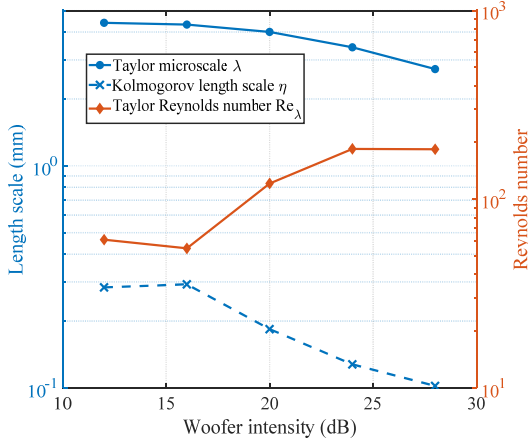


Fig. 8. Taylor microscale, Reynolds number and Kolmogorov length scale for experimental cases

Fig. 8은 스피커의 세기에 따른 Taylor microscale, 레이놀즈 수 그리고 Kolmogorov length scale을 보여준다. 소산율을 통해 예상 가능하듯이, 각 스케일 값은 지수적으로 감소하였다. Taylor scale은 최대 4.40 mm에서 최소 2.73 mm까지 감소하였으며 Kolmogorov scale은 최소 0.10 mm까지 감소하였다. 레이놀즈 수의 경우, 세기의 증가에 따라 전반적으로 값의 크기가 증가하는 경향을 가지나, 세기가 최대인 경우 증가하지 않고 소량 감소하였다. Taylor Reynolds 수는 우퍼의 공급 파워가 24 dB일 때 185 로 최대 값을 가졌다.

3.5 Velocity correlation tensor

Velocity correlation은 서로 다른 지점에 떨어진 속도간의 상관관계를 나타낸다. 이 함수는 난류의 large scale에 대한 정보를 나타낸다. 또한 이를 rms 속도의 제곱으로 normalize한 속도상관계수 (velocity correlation coefficient)는 적분하여 integral scale을 구하는데 사용할 수 있다. 각종 난류 스케일들은

서로 다른 유동을 비교할 때 특히 유용하게 사용된다.⁽¹³⁾ Correlation coefficient의 정의는 식 (17)~(20)에 나타내었다. 식 (17)와 (18)은 종방향 속도상관계수 (longitudinal velocity correlation coefficient)를, 식 (19)과 (20)은 횡방향 속도상관계수 (lateral velocity correlation coefficient)이다.

$$F_{11}(r) = \frac{\langle u'_1(x_1, x_2)u'_1(x_1 + r, x_2) \rangle}{\overline{u_{1,RMS}^2}} \quad (17)$$

$$F_{22}(r) = \frac{\langle u'_2(x_1, x_2)u'_2(x_1, x_2 + r) \rangle}{\overline{u_{2,RMS}^2}} \quad (18)$$

$$G_{11}(r) = \frac{\langle u'_1(x_1, x_2)u'_1(x_1, x_2 + r) \rangle}{\overline{u_{1,RMS}^2}} \quad (19)$$

$$G_{22}(r) = \frac{\langle u'_2(x_1, x_2)u'_2(x_1 + r, x_2) \rangle}{\overline{u_{2,RMS}^2}} \quad (20)$$

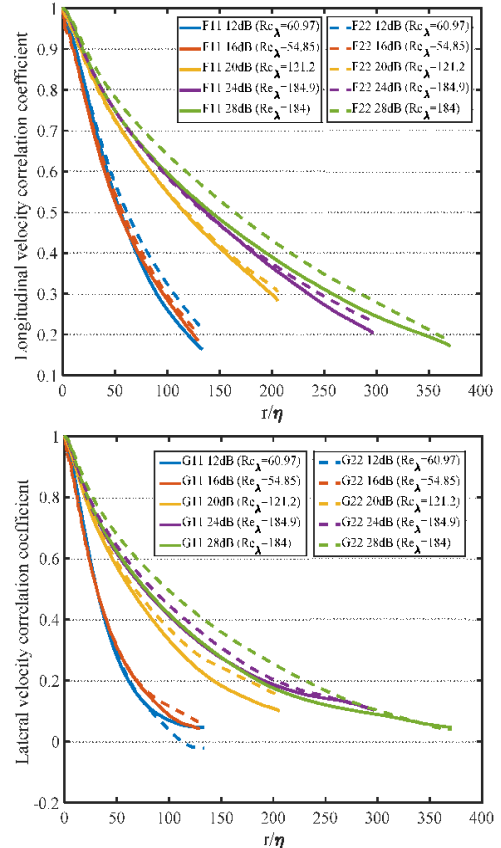


Fig. 9. (a) Longitudinal velocity correlation coefficient (b) Lateral velocity correlation coefficient

Fig. 9의 (a)와 (b)는 각각 종방향 속도상관계수와 횡방향 속도상관계수를 나타낸 그래프이다. 현재의 실험에서는 대부분의 상관계수 함수가 0에 수렴하지 못하였기 때문에 large scale과 integral scale에 대해서는 계산을 수행하지 못하였다. 방향이 같은 두 개의 속도상관계수는 같은 실험 조건에서 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 Re_c 의 크기가 비슷한 12 dB과 16 dB 실험, 24 dB과 28 dB 실험의 상관계수 곡선은 거의 일치하게 나타났으며, 스피커의 세기가 증가할수록 즉, Re_c 가 증가할수록 상관계수의 감소량이 줄어 곡선이 완만하게 나타났다. 이는 시뮬레이션을 통한 선행연구에서의 결과와 일치함을 확인하였다.⁽¹⁾

4. 결론

본 연구에서는 서브 우퍼 스피커를 사용한 synthetic jet actuator를 이용하여, 균질한 등방향성 난류를 생성하고 제트의 세기 변화에 따른 난류 통계치의 변화를 관찰하였다. 난류 통계치로는 균질성, 등방향성, 난류 운동에너지, 소산율, Taylor microscale, Kolmogorov scale 그리고 velocity correlation을 계산하였다. Synthetic jet의 출구속도는 입력 파워에 따라 지수적인 증가를 보였다. 균질성과 등방향성은 각각 0.85-1.12, 0.75-1.19의 범위를 가지며, 1에 근접하게 나타났다. 제트의 세기가 증가하는 경우, 균질성에는 거의 차이가 없었으나 등방향성이 줄어드는 경향을 보였다. 난류 운동에너지와 소산율은 스피커 세기 변화에 따른 변화 개형이 거의 일치하게 나타났다. 두 통계치 역시 16 dB이상의 파워에서 지수적인 증가를 보였다. 이들을 기반으로 하는 Taylor microscale과 Kolmogorov length scale 역시 제트 세기와는 지수적인 관계를 가졌으며, 각각 2.73 mm, 0.10 mm까지 작게 나타났다. Taylor 레이놀즈 수는 제트 공급 파워가 24 dB 일 때 185의 최대치를 가졌다. 속도 상관계수는 Taylor 레이놀즈에 따라 그래프의 개형이 결정되었으며, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 그래프의 곡선은 완만해지는 경향이 있었다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2017R1A2B4007372, No. 2017R1A4A1015523)

REFERENCE

- 1) Hwang, W. and Eaton, J. K., 2004, "Creating homogeneous and isotropic turbulence without a mean flow," *Exp. Fluids*, Vol. 36, pp. 444-454.
- 2) Hinze, J. O., 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill, pp. 176-177.
- 3) Roach, P. E., 1986, "The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids," *Int. Journal of heat and fluid flow*, 8 (2), pp. 82-92.
- 4) Srdic, A., Fernando, H. J. S. and Montenegro, L., 1996, "Generation of nearly isotropic turbulence using two oscillating grids," *Exp. Fluids*, Vol. 20, pp. 395-397.
- 5) Birouk, M., Chauveau, C., Sarh, B., Quilgars, A. and Gokalp, I., 1996, "Turbulence effects on the vaporization of monocomponent single droplets," *Combust. Sci. Tech*, Vols. 113-114, pp. 413-428.
- 6) Fallon, T. and Rogers, C. B., 2002, "Turbulence-induced preferential concentration of solid particles in microgravity conditions," *Exp. Fluids*, Vol. 33, pp. 233-241.
- 7) De Jong, J., Cao, L., Woodward, S. H., Salazar, J. P. L. C., Collins, L. R. and Meng, H., 2009, "Dissipation rate estimation from PIV in zero-mean isotropic turbulence," *Exp. Fluids*, Vol. 46, pp. 499-515.
- 8) Dou, Z., Pecenek, Z. K., Cao, L., Woodward, S. H., Liang, Z., and Meng, H., 2016, "PIV measurement of high-Reynolds-number homogeneous and isotropic turbulence in an enclosed flow apparatus with fan agitation," *Measurement Science and Technology*, Vol. 27(3), 035305.
- 9) Thielicke, W. and Stamhuis, E. J., 2014, "PIVlab

- towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB,” *Journal of Open Research Software*, 2 (1), Art. e30.
- 10) Pope, S. B., 2000, *Turbulent flows*, Cambridge University Press, pp. 88, 200.
 - 11) Sheng, J., Meng, H. and Fox, F. O., 2000, “A large eddy PIV method for turbulence dissipation rate estimation,” *Chem. Eng. Sci.*, pp. 4423~4434.
 - 12) Xu, D. and Chen, J., 2013, “Accurate estimate of turbulent dissipation rate using PIV data,” *Experimental thermal and fluid science*, Vol. 44, pp. 662~672.
 - 13) Mathieu, J., and Scott, J., 2000, “An introduction to turbulent flow,” Cambridge University Press, pp. 61~63.