

연직운동 격자난류의 특성

Characteristics of vertically oscillating-grid turbulence

이용근*, 김창완**

1. 서론.

연직운동 격자난류(vertically oscillating-grid turbulence)는 흔히 밀폐된 용기 안에서 연직방향으로 왕복운동하는 격자에 의하여 발생한다. 난류의 특성이 공간적으로 균일하다는 이론적인 단순함과 적은 비용으로 난류와 관련된 실험에 필요한 환경을 얻을 수 있다는 경제성으로 인하여 연직운동 격자난류는 아주 다양한 실험환경에서 사용이 되어왔다. 예를 들면 부유사의 특성, 경계면을 통해서 이루어지는 혼합(Hopfinger와 Toly, 1976; Nokes, 1988), 오염물의 물리적·화학적 반응 등의 연구에 이용되었다.

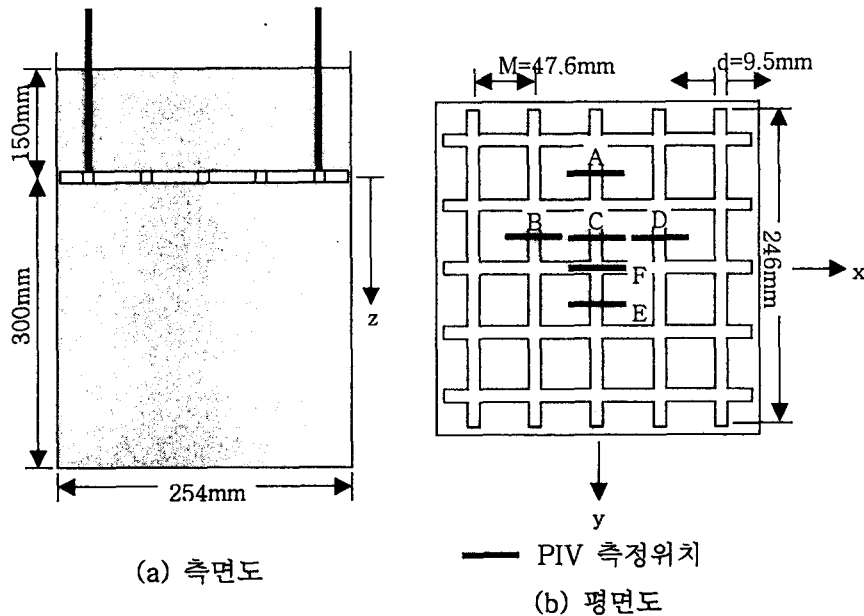


그림 1. 연직운동 격자난류 실험장치 개요

연직운동 격자난류에 대하여 현재까지 여러 가지 모형들이 제시되었다(Thompson과 Turner, 1975; Hopfinger과 Toly, 1976; Matsunaga 등, 1999; Cheng과 Law, 2000). 이 중에서 보편적으로 받아들여지고 있는 모형은 1976년에 Hopfinger와 Toly에 의하여 제시된 모형으로 다음과 같다.

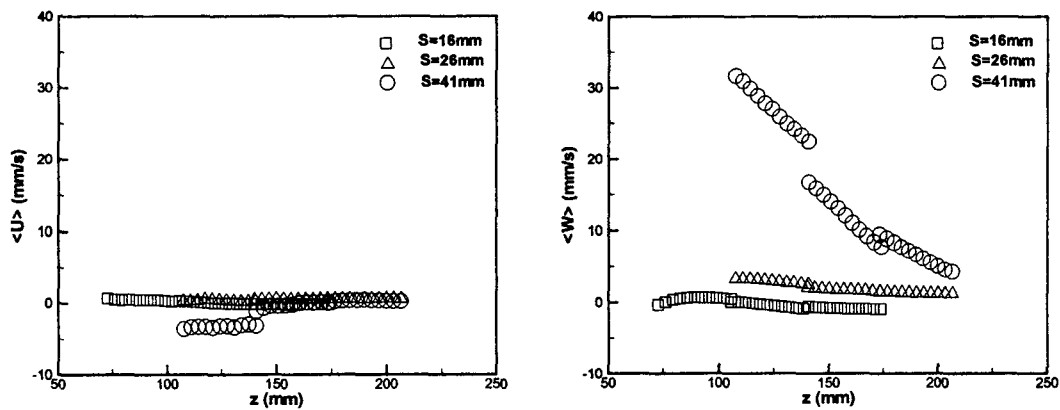
* 비희원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원
 ** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 수석연구원

$$\frac{\langle u \rangle}{fS} = \left(\frac{z}{\sqrt{SM}} \right)^{-1}$$

위의 식에서 격자의 길이는 M , 격자의 연직운동거리는 S , 연직운동의 주기는 f , 격자로부터의 연직거리는 z (참고 그림 1)로, 수평방향 난류강도는 u , $\langle u \rangle$ 는 격자로부터 거리(z)가 동일한 평면에서 평균된 것을 의미하며, 격자로부터의 거리의 지수의 절대값을 감소지수(decay exponent)로 정의된다. 이후로는 이 모형을 HP 모형으로 부르도록 하겠다. 위의 식에서 HP 모형은 $\langle u \rangle$ 는 격자로부터의 거리에 대하여 -1 승으로 변화한다는 것을 예측하였다. 다시말해서 $\langle u \rangle$ 의 감소지수는 1인 것이다.

다양한 환경에서 사용되어 온 연직운동 격자난류(vertically oscillating-grid turbulence)는 이론적으로 단순하기는 하지만 난류의 특성에 대하여 여러 가지 의문점들이 제기되었다. 연직운동 격자난류의 특성중에서 가장 중요하다고 볼 수 있는 감소지수(decay exponent)에 대한 실험 결과가 0.8에서 2.5까지 발표되었다. 이와 더불어 연직운동 격자난류의 감소지수가 격자운동거리(S)에 영향을 받는다(Nokes, 1988)는 발표도 있어서 연직운동 격자난류의 초기조건 종속성에 대한 의문이 제기되었다. 연직운동 격자난류의 유용성과 밀접하게 관련된 난류특성의 균일성과 이와 관련된 2차류 발생에 대해서도 의문점들이 제기되었다. 연직운동 격자난류의 특성이 본격적으로 연구되기 시작한 1975년 이후 연직운동 격자난류의 특성과약을 위한 연구와 위에 열거된 문제점들과 관련된 연구가 진행되어 여러 가지 모형들이 제안되었지만 아직까지 난류특성이 명확하게 정립이 되었다고 볼 수 없다.

본 연구에서는 실험변수를 격자의 연직운동거리(S)로 채택하여 연직운동거리(S)가 연직운동 격자난류에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구는 다른 여러 실험을 통하여 개선된 격자를 사용였다. 사용된 연직운동거리(S)는 16 mm, 26 mm와 41 mm이고 격자의 운동주기(f)는 4 Hz이다. 본 연구에서는 한 평면상에서 여러 지점(multi-points)에서 동시에 유속을 측정할 수 있는 유속측정 장치인 PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용하였다. 이번 연구에 이용된 PIV는 유체에 섞여서 유체와 함께 움직이는 미세한 입자를 시간차를 두고 찍은 두장의 디지털 영상을 합성한 한 개의 이미지(double-exposed image)의 자기상관성(auto-correlation)을 이용하여 유속을 측정한다.



(a) 수평방향

(b) 연직방향

그림 2. 단면평균유속의 격자운동거리에 따른 변화

2. 실험결과.

이차원 PIV로 측정된 연직운동 격자흐름(vertically oscillating-grid flows)의 특성, 즉 시간과 공간에 대하여 평균된 유속분포, 난류강도의 격자로부터의 연직거리(z)에 대한 변화등이 얻어졌다. 그림 2는 연직운동 격자난류의 단면평균유속(cross-sectionally averaged velocity)의 격자로부터의 거리(z)에 따른 변화를 연직운동거리에 대하여 공간적 변화 변화를 보여주고 있다. 단면평균유속은 한 평면에서 공간적으로 흐름특성이 균일하다는 가정하에 얻어졌다. 수평방향 평균유속의 경우에는 약 150 mm 이후로는 모든 연직운동거리(S)에 대하여 거의 영에 가깝다. 하지만 연직방향의 경우, S 가 작은 경우(16과 26 mm)에는 유속이 거의 없다. S 가 큰 경우(41 mm)에는 z 가 약 150 mm 이후에도 뚜렷하게 유속이 있는 것을 알 수 있고 이것이 2차류를 발생시키는 것으로 보인다.

그림 3은 3개의 연직운동거리(16, 26과 41 mm)에 대하여 단면평균 난류강도의 변화를 보여주고 있다. $\langle u \rangle$ 와 z 는 HP 모형에 근거하여 무차원화되었다. 수평축과 연직축이 대수를 이용하여 표시되었으므로 측정된 결과의 경사가 감소지수가 된다. 본 연구에서 얻어진 난류강도의 감소지수는 각 S 에 대하여 각각 다르게 나타났다. z 가 $2M$ 이후, 수평방향 난류강도는 S 가 16, 26과 41 mm로 증가함에 따라서 2.0, 1.7, 1.4로 감소하여 HP 모형이 예측하는 감소지수인 1에 가까워짐을 알 수 있다. 연직방향 또한 비슷한 경향을 나타내었다. 이러한 경향을 나타내는 이유는 S 가 증가함에 따라서 발생하는 난류운동에너지가 증가하게 되고 따라서 난류레이놀즈수($\langle u \rangle l / \nu$)도 또한 증가하게 되며 거리에 따라서 불변하게 될 가능성이 높다. 따라서 S 가 증가함에 따라서 HP 모형의 가정을 만족시킬 수 있게되어 감소지수가 HP 모형의 감소지수에 접근하게 되는 것 같다.

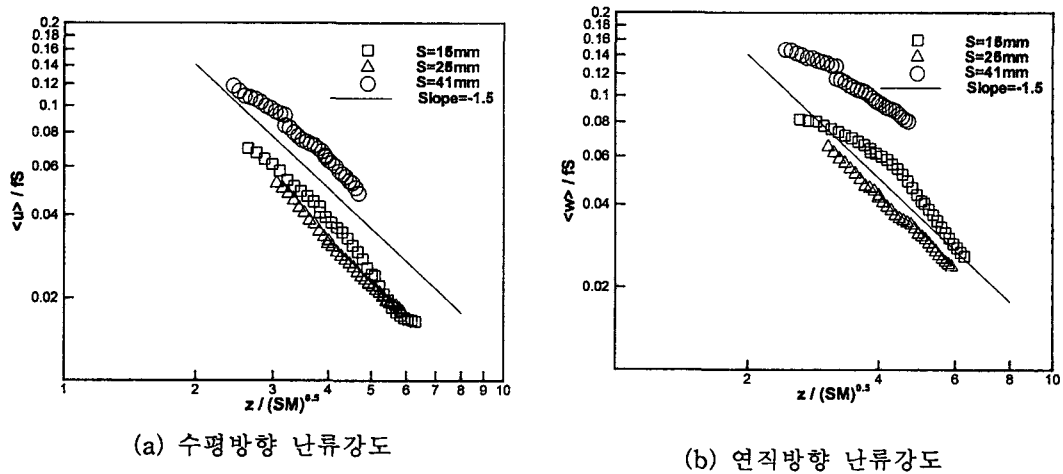
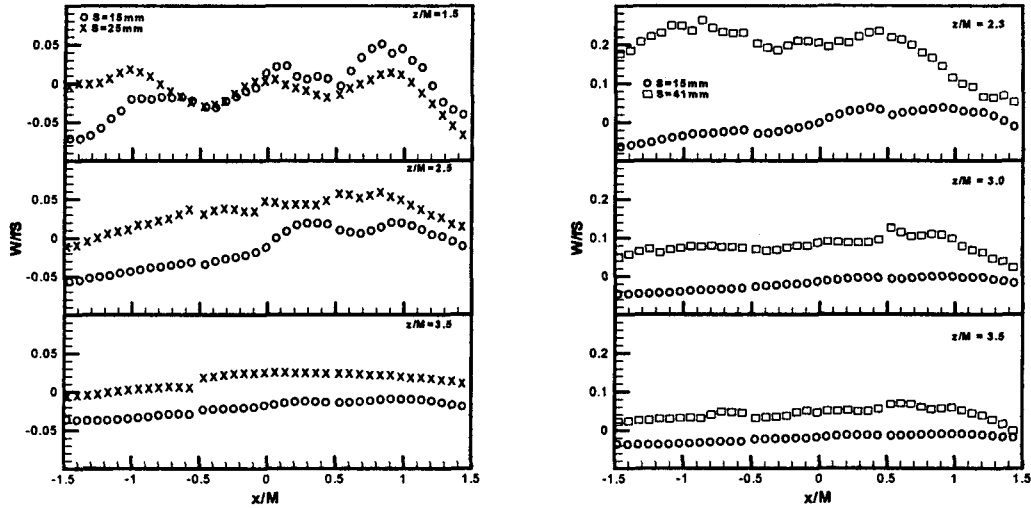


그림 3. 단면평균 난류강도(turbulence intensity)의 격자운동거리(stroke)에 따른 변화

이제까지 단면평균된 유속과 난류강도의 변화를 살펴보았다. 이러한 결과는 난류의 특성이 한 단면에서 균일하다는 가정하에서 얻어진 결과이다. 이제부터는 난류의 균일성에 대하여 살펴보도록 하겠다. 그림 4는 연직방향으로 3 지점에서의 시간평균된 연직방향유속의 수평방향분포를 보여준다. $S=16$ 과 26 mm인 경우, 단면평균된 수평 및 연직방향유속은 $z=100$ mm 이전부터 거의 없음을 알 수 있었지만, $z=1.5M$ 에서 시간평균된 유속은 격자의 기둥아래($x/M=0$ 과 ± 1)에서는 국부최대(local maximum)를 보이고 있다. 이와 같은 유속분포는 쉘의 유속분포와 비슷함을 알 수

있다. 이러한 격자형태의 영향은 z 가 증가함에 따라서 없어지는 것 같다. 하지만 국부적인 켈이 합쳐진 듯하다. S 가 41 mm인 경우에는 상대적으로 연직방향의 유속이 전체적으로 크게 나타나고 있다. 시간평균된 유속분포를 살펴본 결과 유속이 한 단면에서 균일하지 못함을 알 수 있고, 또한 S 가 큰 경우에는 유속이 상대적으로 불균일하며 큰 것을 알 수 있다.



(a) $S = 16$ 과 26 mm

(b) $S = 16$ 과 41 mm

그림 4. 시간평균 연직방향 유속분포

3. 결론.

연직방향 격자난류의 단면평균된 유속과 난류강도의 거리에 따른 변화와 시간평균된 유속분포가 이차원 PIV를 이용하여 조사되었다. 본 연구에서는 연직운동 격자난류의 특성이 S 에 영향을 받는 것을 알 수 있었고 또한 흔히 가정되는 것과는 다르게 난류의 특성이 한 단면에서 상당히 불균일한 것을 알 수 있었다. 앞으로 연직운동 격자난류가 난류와 관련된 다양한 실험에 유용하게 사용되기 위해서는 이러한 불균일성의 원인을 밝혀져야하고 이 흐름의 특성에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 본다.

4. 참고문헌.

Hopfinger, E. J.와 Toly, J.-A., 1976, Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces. *Journal of Fluid Mechanics* 78, 155-175.

Matsunaga, N., Sugihara, Y., Komatsu, T.와 Masuda, A., 1999, Quantitative properties of oscillating-grid turbulence in a homogeneous fluid. *Fluid Dynamics Research* 25, 147-165.

Nokes, R. I., 1988, On the entrainment rate across a density interface. *Journal of Fluid Mechanics* 188, 185-204.

Thompson, S. M.와 Turner, J. S., 1975, Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid. *Journal of Fluid Mechanics* 67, 349-368.

Cheng, N.-S.와 Law, A. W.-K., 2001, Measurements of turbulence generated by oscillating grid.