

# 가진되는 와류발생기에 의한 채널내의 유동 특성

방창훈<sup>†</sup> · 김정수<sup>\*</sup> · 추홍록<sup>\*\*</sup>

경북전문대학 소방안전관리과 · <sup>\*</sup>한국산업안전공단 · <sup>\*\*</sup>대구보건대학 소방안전관리과  
(2006. 9. 29. 접수 / 2007. 3. 2. 채택)

## The Characteristics of Fluid Flow in a Channel by Oscillating Vortex Generator

Chang-Hoon Bang<sup>†</sup> · Jung-Soo Kim<sup>\*</sup> · Hong-Lok Choo<sup>\*\*</sup>

Department of Fire Safety Management, Kyungpook College

<sup>\*</sup>Deagu branch, Korea Occupational Safety and Health Agency

<sup>\*\*</sup>Department of Fire Safety Management, Daegu Health College

(Received September 29, 2006 / Accepted March 2, 2007)

**Abstract** : A problem of a unsteady time-dependent flow in a channel is of practical importance and widely considered in the design of devices such as heat exchangers, duct, and electronic equipments. The characteristics of fluid flow in channel with oscillating vortex generator was investigated experimentally. The main object of this study was to investigate the effect of the excited frequency, the excited amplitude, and Reynolds numbers on the generated frequency. Flow patterns were visualized using smoke generator and generated frequencies were measured using hot wire anemometer. When the excited frequency is increased, excited amplitude decreased and Reynolds number increased, the strength of PSD of generated frequency is decreased.

**Key Words** : unsteady time-dependent flow, excited frequency, oscillating vortex generator

### 기호설명

- $A$  : 무차원 진폭( $A=a/d$ )
- $d$  : 와류발생기의 폭[m]
- $F$  : 주파수[Hz]
- $f_e$  : 가진 주파수[Hz]
- $Re$  : 레이놀즈수
- $t$  : 시간[s]
- $u$  : 속도[m/s]
- $x$  : 하류방향 거리[m]
- $\alpha$  : 접근각[°]

### 하첨자

- $d_{vg}$  : 와류발생기
- $e$  : 가진 주파수
- $in$  : 외기조건

### 1. 서론

최근의 열교환기는 산업적 용도의 다양화로 인하여 고밀도화, 고집적화 추세에 있다. 특히 이러한 경향은 연료전지, 이동통신 등의 분야에서 더욱 경박 단소화가 요구되고 있는 실정이다.

기존 열교환기의 열시스템에서 열교환 및 열 방출이 일어날 경우에 냉각유체의 유속이 느리거나 유로가 협소하면 유동은 와류가 없고 안정한 층류흐름을 보이게 된다. 이러한 시공간적 와류 발생이 없는 정상상태의 층류유동 하에서는 작동유체의 혼합효과가 작아 고온의 열원으로부터 저온의 냉각유체로의 대류 열전달이 활발히 이루어지지 못한다. 따라서 일상적으로 대류 열전달을 촉진시키기 위하여 작동유체의 유속을 증가시켜 난류로 천이시킴으로써 작동유체의 상호혼합을 증진하는 방법이 보편적이지만, 최근의 초소형화, 경량화의 추세로 인하여 열교환기의 냉각에 적용하기에는 신뢰도와 소음발생의 측면에서 적당치 않다. 또한 새로운 장치들에 의해

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
bangch@hanmir.com

서 생성되는 열은 기존의 장치들보다 일반적으로 수 배 이상 많아서 기기의 안전성에서 중요한 문제가 되고 있다. 따라서 여러 가지 제약 조건을 만족하고 단순한 구조로 열전달을 향상시킬 방법이 절실히 요구되고 있다.

유체의 혼합을 증대시키는 방식으로는 와류발생기를 이용하는 방식, 유동에 첨가물을 첨가하는 방식, 유로 표면진동, 유체자체를 가진 시키는 방법 등이 있다. 이들 방식의 특징은 진동을 유발하기 위한 추가적인 동력이나 와류발생기에 의한 압력강하를 보상하기 위한 추가동력이 소요되지만 전체 시스템을 크게 바꾸지 않고 유동의 불안정성을 크게 증가시킬 수 있어 소형 열교환 시스템에 적용하기가 용이하다.

유체에 의해서 야기되는 진동 및 유동현상은 열 시스템에 치명적인 손상을 줄 수 있어 이를 방지하기 위하여 기존의 연구들<sup>1,2)</sup>은 대부분 유동에서 발생하는 전단층의 박리를 억제하려는 방향으로 연구가 진행되어왔다. 그러나 최근에는 열시스템을 구성하는 재료의 발달로 유체의 진동이 열시스템에 미치는 나쁜 영향은 어느 정도 극복되었고 오히려 이들의 진동현상을 열전달에 적극적으로 활용하는 방향으로 연구가 진행되고 있다<sup>3,6)</sup>.

그러나 기존의 연구들에서는 가진에 따른 열전달 향상을 수치해석적으로 연구하거나 몇몇 가진 주파수 및 진폭에 대한 개별적인 연구를 수행하여 가진 주파수, 진폭, 레이놀즈수 및 받음각에 따른 열전달 향상에 대한 체계적인 연구를 수행하지 못했다. 따라서 가진되는 와류발생기를 이용한 체계적인 열전달 향상에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 가진 주파수, 진폭, 레이놀즈수 및 받음각에 따른 발생 주파수 및 유동형태를 조사하여 열교환기 개발의 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

실험장치는 상류의 와류발생기가 가진되는 경우와 정지한 경우에 발생주파수를 측정하기 위하여 설계되었다. 또한 상류의 가진되는 와류발생기에 의한 유체 유동을 가시화할 수 있도록 만들어졌다.

Fig. 1은 가진 발생장치가 장착된 전체 실험장치 개략도이다. 실험장치는 크게 실험부<sup>Ⓐ</sup>, 데이터처리부<sup>Ⓑ</sup>, 전원공급부<sup>Ⓒ</sup>, 유동 및 가진제어부<sup>Ⓓ</sup>, 가시화

측정부<sup>Ⓔ</sup>로 구성된다.

Fig. 2는 실험부<sup>Ⓐ</sup>를 상세하게 나타낸 그림이다. 풍동은 균일 유동이 발생할 수 있도록 제작된 개방형 흡입식 풍동(open-circuit suction type wind tunnel)이다. 채널 입구부는 균일 유동이 발생할 수 있도록 벨마우스와 철망 및 2.7×2.7mm 사각형 허니콤(honey comb)을 부착하였다.

채널의 길이는 375mm, 높이와 폭은 117mm×127mm로 하였다. 채널 입구에는 유입 공기의 온도를 측정하기 위하여 2개의 K형 열전대를 배치하였다. 유입 공기의 온도는 25±0.5°C내로 유지되도록 하여 입구 공기의 영향을 최소화하였다.

이 때 공기의 유속은 Fig. 2에서처럼 채널입구에 열선풍속계(VELOCICALC Plus, TSI, INC.)설치하여 측정하였다. 출구 플레넘을 지난 공기는 플렉시블 호스를 이용하여 송풍기에 연결하여 송풍기에서 발생하는 진동이 시험부에 영향을 미치지 않도록 하였다.

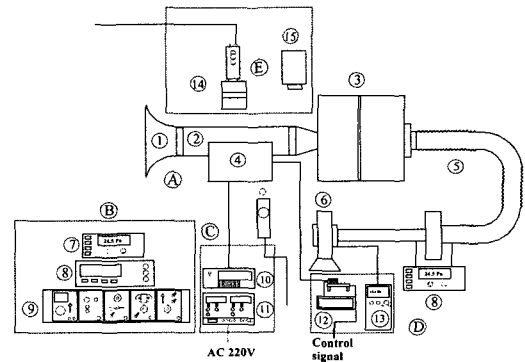


Fig. 1. Schematic diagram of overall experimental apparatus for forced convection.

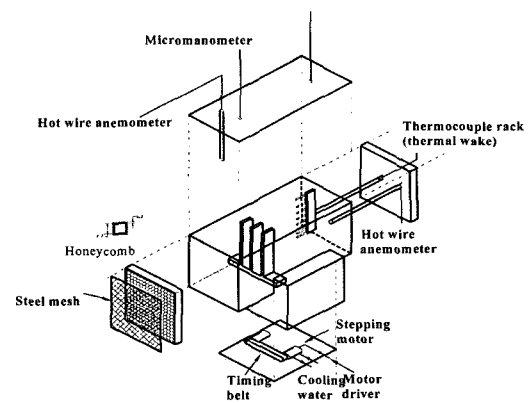


Fig. 2. Detail of test section.

유동가진 발생기는 채널의 하부에 설치되어 있으며 구성은 스텝모터, 선형가이드, 다이밍벨트로 되어 있고 스텝모터는 과열을 막기 위해 냉각장치 부속되어 있다.

채널의 입·출구에서 압력강하를 측정하기 위한 마이크로마노미터(FCO 12)을 사용하였다. 또한 유량을 보정하기 위하여 송풍기 전단에 오리피스 유량계를 설치하여 마이크로 마노미터로 데이터를 처리하였다. 유동 가진 발생기 뒷부분에 열선속측계(KANOMAX anemometer Model 1011)를 설치하여 가진 주파수와 유동에 의해 생성되는 고유 주파수 및 이들의 상호간섭에 의한 주파수변화 등을 측정하였다. 이 때 측정된 데이터는 A/D 변환기에 의해 변환되어 개인용 컴퓨터에 저장되고 이 값은 FFT 변환 프로그램을 이용하여 처리된다. 열선프로브는 와류발생기에서  $x = d_{ch}$  하류에 와류발생기의 좌측 후단부에 설치 시켰다.

영상 및 열 화상 처리부⑥는 영상처리를 위해서 해상도 CCD 카메라(Mythos)와 CCD 카메라에서 얻은 영상을 처리하기 위한 영상 처리장치(Omega co., buz)로 구성되어 있다. 영상처리용 CCD카메라에는 영상을 확대시키기 위하여 확대 렌즈가 부착되어 있다. 본 실험에 사용한 CCD 카메라는 320×240 픽셀의 해상도로 초당 30 프레임으로 촬영되며 전자셔터의 노출시간은 1/60~1/10,000초이다. 광원으로 30mW의 He-Ne레이저(Melles Griot 05-LHP-925-S,  $\lambda=6328 \text{ \AA}$ )를 사용하였다. 레이저에서 발생한 빔은 원형유리봉(cylindrical lens)을 통하여 일정한 폭의 슬릿광으로 만들어지고, 이 슬릿광이 채널내의 촬영할 위치에 평면광으로 조사된다.

스모크와이어법에 의한 유동가시화에 사용한 열선은 직경 5 $\mu\text{m}$ 인 니켈 60%-크롬 40% 열저항선을 사용하였다. 열선은 와류발생기의 전단에 위치시키고 연기발생입자는 파라핀오일을 사용하였다. 전원은 직류 35V를 사용하였다. 실험범위내에서 최대한 부력의 효과를 방지하기 위해 가시화 실험동안 가열면을 가열하지 않고 실험을 하였다.

**2.2. 실험 방법 및 실험 범위**

발생주파수에 영향을 미치는 기본적인 인자는 가진주파수, 가진진폭, 레이놀즈수 및 받음각 등이다. Table 1에 실험범위와 조건을 요약하여 나타내었다.

본 실험에서 유동 속도의 범위는 0.32~0.95m/s이고 채널의 수력직경은 0.1189m이다. 이에 대한 채널

**Table 1:** Parameters and ranges of experiment

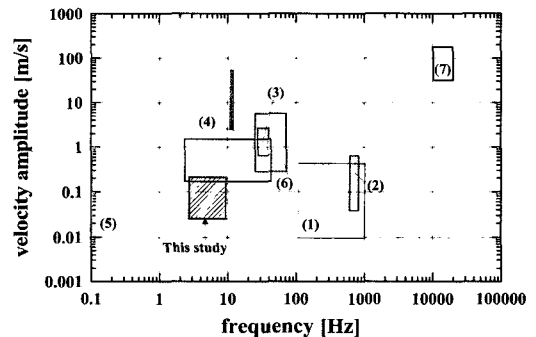
Parameters	Ranges
Inlet air velocity, $\mu$ in	0.32~0.95m/s
Vortex generator Reynolds number, $Re_{d_{vg}}$	103~305
Oscillating frequency, $f_c$	1.5~8.4Hz
Angle of oscillating vortex generator	0°, 15°, 20°, 25°

레이놀즈수는  $Re_{D_{ch}}=2,452\sim7,262$ 이고 와류발생기의 폭을 기준으로한 레이놀즈수는  $Re_{d_{vg}}=103\sim306$ 이다.

가진 주파수는 실험장치의 제약조건과 공진 주파수에 의한 실험장치의 손상을 고려하여 1.5~8.4Hz로 변화시키며 실험하였다. 진폭은 1스텝 당 0.3mm 변동이 있으므로 9.6~16.2mm로 변화시키며 실험을 수행하였다.

Fig. 3은 실험범위를 나타낸 그림이다. 실험범위는 주파수와 진폭속도를 기준으로 빗금친 부분에서 수행되었다. 그림에 나타난 다른 실험범위는 기존의 논문<sup>7)</sup>에서 실험한 범위로 Table 2에 나타나 있다.

가진되는 난류발생기의 유동방향에 대한 경사각은 0°, 15°, 20°, 25°로 구성하였다. 이 경우 각 경사각 변화에 따른 방해율(blockage ratio)은 20%, 25.9%,



**Fig. 3.** Frequency and velocity ranges of different papers dealing with heat transfer in oscillating flows<sup>7)</sup>.

**Table 2.** Overview of the different parameter ranges in the previous papers<sup>7)</sup>

Author	Frequency range [Hz]	Velocity range [m/s]
(1) Goldmann	100~1,000	0.003~0.45
(2) Muller	512~768	0.05~0.7
(3) Trasher	20~40	up to 4
(4) Armaly	up to 20	up to 2.68
(5) Hutton	up to 0.24	1
(6) Elger	25~70	0.2~5.6
(7) Uhlenwinkel	10,000~20,000	30~130

34.2%, 42.3%로 나타났다. 가진되는 와류발생기의 형태는 기둥의 뒤에 발생하는 근접-후류(near-wake)의 형태를 결정짓는 중요한 변수이고 이로 인하여 채널벽면의 열전달에 중요한 영향을 준다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 본 실험의 타당성을 검증하기 위하여 와류발생기가 없는 경우에 대한 평판의 속도분포를 측정하였으며, 그 결과를 Blasius 이론식에 의한 속도 분포와 비교하였다.

가진되는 와류 발생기의 하류방향에서 와류 방출 과정을 정성적으로 관찰하고 열선 풍속계로 측정한 PSD(Power Spectrum Density)와 사이의 상관성을 고찰하기 위하여 스모크와이어법을 이용하여 유동의 형태를 CCD카메라로 가시화 하였다.

Fig. 5는  $f_e=2.5\text{Hz}$ ,  $A=1.92$ , 와류발생기를 기준으로한 레이놀즈수가 103일 때 시간에 따른 유동변화를 나타낸 사진이다.

와류발생기가 좌에서 우로 이동함에 따라 와류가 와류발생기 좌측 끝단에서 발생하고 주유동이 우측으로 이동함에 따라 주유동방향으로 진행한다. 또한 와류발생기가 우에서 좌로 이동할 경우 와류는 우측에서 발생하여 좌측으로 이동한다.

가진된 와류발생기에서 생성된 와류는 하류로 이동함에 따라 측면방향으로 넓게 확산된다. 이에 따라 가진에 의해 발생된 와류는 와류발생기의 하류방향으로 유동의 혼합을 증대시키지만 하류방향으로 이동할수록 약화되어 와류발생기에서 어느 정도

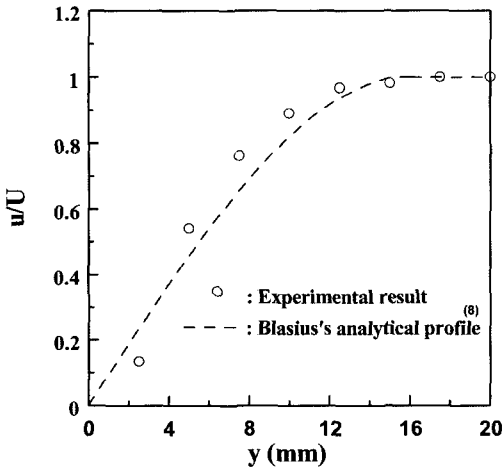


Fig. 4. Mean Velocity profile at  $x=0.225\text{m}$ , steady state for  $Re_{d,v}=103$ .

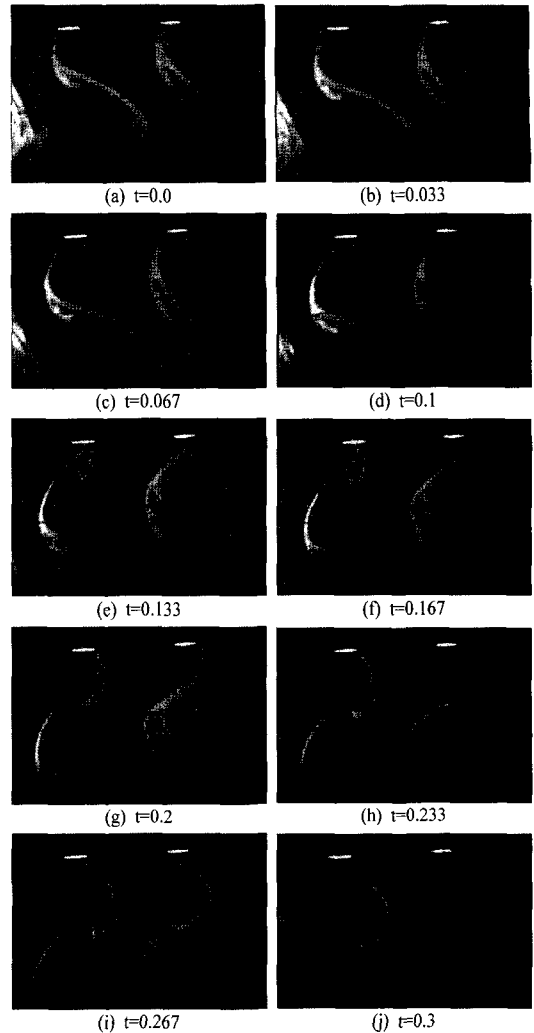


Fig. 5. Top view of flow visualization on oscillating vortex generator for  $f_e=2.5\text{Hz}$ ,  $A=1.92$ ,  $Re_{d,v}=103$ .

거리까지는 열전달을 향상시킬 것으로 예측할 수 있다. 이러한 유동형태는 전체 실험된 범위에서 유사하게 나타나고 있으며 주파수, 진폭, 레이놀즈수 및 받음각에 따라 다소의 차이를 나타내었다.

Fig. 6은  $Re_{d,v}=103$ , 무차원 진폭이 3.24이고 와류발생기가 2.5Hz 및 8.4Hz로 가진 될 경우, 가진 주파수에 따른 유동가시화와 PSD분포를 나타낸 그림이다.

가진 주파수  $f_e$ 가 2.5Hz일 때, 와류발생기 후단에서 발생하는 와류는 하류방향으로  $x \leq d_{vg}$  범위에서는 와류발생기의 폭( $d_{vg}$ )보다 작게 변동하고 와류발생기 사이로 유출되는 유동의 주유동방향은 x방향에 대해 약  $12^\circ$  정도 변동되어 나타나지만, 가진 주

과수  $f_c$ 가 8.4Hz로 증가한 경우, 와류발생기 후단에서 발생하는 와류는 하류방향으로  $x \leq d_{vg}$  범위에서 와류발생기의 폭보다 약 2배정도 변동하고 와류발생기 사이로 유출되는 유동의 주유동방향 또한 x방향에 대해 약 45°정도 변동하는 것으로 나타났다.

따라서 가진 주과수가 증가하면 와류의 범위도 확대되고 주유동방향도 변화가 심하게 발생하므로 유동의 혼합효과가 증가하여 가열면의 열전달도 상승할 것으로 예측된다. 그러나  $f_c$ 가 2.5Hz일 때, 가진 주과수가 유동의 고유 주과수 3.4Hz에 근접하여 유동형태나 주과수 분석으로부터 유동이 매우 불안정해지고 있음을 알 수 있고 더욱이 고유 주과수의 강도가 가진 주과수가 8.4Hz일 때보다 증가함을 알 수 있어 가진 주과수가 고유 주과수와 일치할 경우 열전달이 향상될 것을 기대할 수 있으나 유동의 고유 주과수와 동일 주과수에서 실험을 수행할 수 없어 유동공진에 따른 열전달 향상은 확인할 수 없었다. 이는 고유 주과수와 동일한 주과수로 유동을 가진하게 되면 공진주과수가 발생하나 실험장치가 심하게 진동하므로 실험의 정확성을 상실하게 되기 때문이다.

이와 같은 현상은 진폭이 증가할 경우에도 유사하게 발생하고 있어 가진 주과수에 따른 영향은 와류발생의 빈도를 증대시켜 유동의 혼합효과를 가져올 수 있으나 가진 주과수가 증가할 경우 유동의 고유 주과수와 멀어짐에 따라 고유 주과수 및 가진 주과수의 강도는 상대적으로 약화되어 불안정성은 감소하게 된다. 따라서 혼합효과 증가의 기대되지만

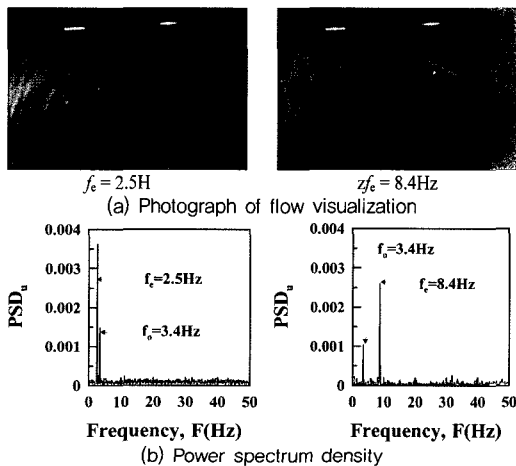


Fig. 6. Flow visualization and power spectrum density in the near wake region when vortex generator is oscillated for  $Re_{Dg}=103$ ,  $A=3.24$ .

불안정성의 감소로 인하여 가열면의 열전달 향상에 크게 영향을 주지 않을 것으로 예상된다.

Fig. 7은  $Re_{Dg}=103$ 이고 와류발생기가  $A=1.92$  및 3.24로 가진 될 경우, 와류발생기의 진폭에 따른 유동가시화와 PSD분포를 나타낸 그림이다.

진폭이 증가한 경우 하류방향으로 발생하는 와류의 폭이 증가하고 와류형태가 하류방향으로 일정한 형태를 유지한다. 그러나 와류발생기의 진폭이 작은 경우 다수의 와류가 연속적으로 발생하고 근접하여 발생한 와류가 상호 부착되면서 불규칙적인 형상을 보여준다.

따라서 와류발생기의 진폭이 증가하면 가열면의 온도변화가 주기적으로 나타날 것으로 예상되며 열전달은 일정기간 후 주기적 변동을 보여줄 것이다. 그러나 와류발생기의 진폭이 작은 경우, 유동의 불안정성은 증가하나 유동의 진폭이 감소하여 혼합효과가 감소하므로 경계층 외부의 차가운 유체가 경계층 내로 이동이 감소하여 가열면의 열전달은 감소할 것으로 생각된다.

동일한 가진 주과수와 레이놀즈수에서 발생하는 유동의 고유 주과수와 가진 주과수는 동일한 값을 나타내지만 PSD의 크기는 진폭이 큰 경우 고유 주과수와 가진 주과수에서 좀 더 높은 값을 나타낸다. 이는 진폭이 증가함에 따라 와류발생기의 후단에서 발생하는 와류의 강도가 증가하기 때문에 동일한 지점을 통과하는 와류 방출주과수의 PSD가 증가한 것으로 생각된다. 따라서 와류발생기의 진폭이 증가하면 와류발생기에서 방출되는 주과수는 동일하지만 상대적인 PSD값의 증가로부터 확인할 수 있듯 유동

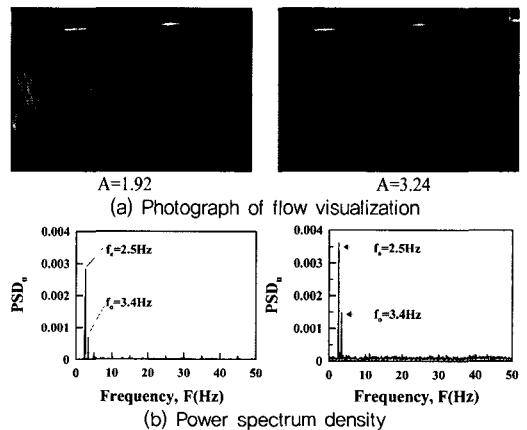


Fig. 7. Flow visualization and power spectrum density in the near wake region when vortex generator is oscillated for  $Re_{Dg}=103$ ,  $f_c=2.5$ Hz.

의 와류강도가 증가하여 가열면의 냉각이 증대될 것으로 생각된다. 와류발생기의 진폭이 증가함에 따라 좌우로 와류의 진폭이 증가하여 측면의 차가운 유동이 가열면으로 유입될 수 있게 하므로 열전달의 향상을 예상할 수 있다.

결과적으로 와류발생기의 진폭에 따른 유동의 좌우변동폭과 방출주파수의 PSD의 크기로부터 와류발생기의 진폭이 열전달향상에 크게 영향을 줄 것으로 예상되며 실험된 범위 내에서 열전달향상에 가장 중요한 영향을 미칠 것으로 생각된다.

Fig. 8은  $Re_{d_w}=103$ 이고 와류발생기가 고정된 경우일 때, 유동시각화와 측정 주파수에 따른 PSD분포를 받음각에 따라 나타낸 그림이다.

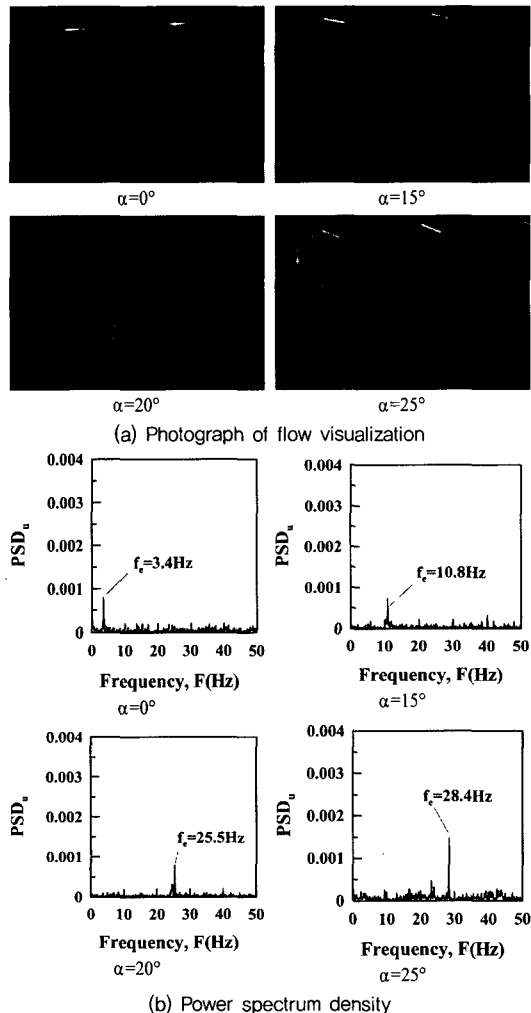


Fig. 8. Flow visualization and power spectrum density in the near wake region at steady state for  $Re_{d_w}=103$ .

받음각이 증가함에 따라 와류발생기 후단 쪽에는 재순환 영역이 더욱 증가하고 유동의 불안정성이 증가하는 것으로 나타난다. 이와 같은 현상은 유동에서 발생하는 주파수를 분석함으로써 더욱 분명해진다. 받음각이 0°, 15°, 20°, 25°로 증가함에 따라 고유주파수는 각각 3.4Hz, 10.8Hz, 25.5Hz, 28.4Hz로 증가하여 나타났다. 특히 받음각이 0°에서 15°로 증가함에 따라 고유 주파수는 거의 3배 이상 증가하고 15°에서 20°로 증가함에 따라 약 2.4배 증가함을 보여준다. 받음각이 0°일 때에 대해  $f_{\alpha=15}/f_{\alpha=0}=3.18$ ,  $f_{\alpha=20}/f_{\alpha=0}=7.51$ ,  $f_{\alpha=25}/f_{\alpha=0}=8.37$ 이므로 유체가 이동하는 거리를 고려할 때 받음각이 20°이상일 때는 열선이 놓여진 위치에서 두개이상의 와열이 교대로 지나감을 알 수 있다. 즉, 받음각이 25°일 때 와류발생기의 선단에서 하류까지의 거리가 22.66mm이고 유동속도가 320mm/s가 되므로 한 개의 와열이 지나가는 경우 약 14.1Hz가 발생하게 된다. 20°에서 25.5Hz가 발생하기 위해서는 두 개의 와열이 발생하여야 가능하기 때문이다.

또한 유동의 받음각이 증가하면 유동방해율(Blockage ratio)Br은 각각 20%, 25.9%, 34.2%, 42.3%로 나타나 받음각의 증가는 유동 흐름에 정체현상을 유발시켜 상대적으로 하류지역에 유속이 낮아지는 결과를 유발시키게 된다.

따라서 받음각의 증가는 유동의 불안정성을 증대시켜 열전달을 향상시킬 것으로 예상되나 유동방해율 또한 증가함으로써 이들의 상호작용에 의한 최적의 받음각이 있을 것으로 예상할 수 있고 와류발생기가 가진될 경우 고정될 때보다 열전달은 증가될 것으로 예상되지만 받음각이 일정 값 이상 증가할 경우 열전달 향상은 오히려 감소할 것으로 예상할 수 있다. 즉, 가진되지 않을 경우, 와류발생기의 받음각이 증가하면 고유 주파수가 증가하여 열전달이 어느 정도 향상될 것이고 이를 가진 시킬 경우 열전달은 조금 증가할 것이기 때문에 오히려 열전달 향상은 감소하게 될 것이다.

Fig. 9는 받음각이 0°, 진폭 A=1.92, 가진 주파수가  $f_c=2.5$ Hz일 때 와류발생기의 폭을 기준으로한 레이놀즈수  $Re_{d_w}$ 가 103에서 305로 변환에 따른 속도신호를 연속적으로 측정하여 파워 스펙트럼밀도(PSD)를 분석한 결과를 나타내는 그림이다.

전반적으로 레이놀즈수가 증가함에 따라 발생하는 고유주파수는 증가하고 있다. 이는 유동속도가 증가함에 따라 와류발생기에서 방출되는 와의 수가 증가하기 때문이다.

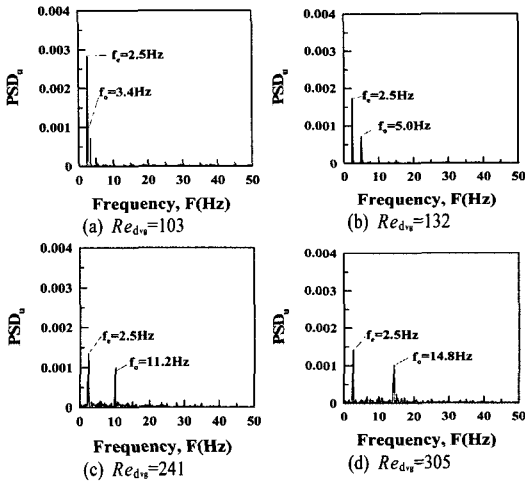


Fig. 9. Power spectrum density in the near wake region when vortex generator is oscillated for  $f_v=2.5\text{Hz}$ ,  $A=1.92$ ,  $\alpha=0^\circ$ .

또한 레이놀즈수가 증가함에 따라 나타나는 파워 스펙트럼밀도의 크기는 감소하고 있으나 레이놀즈수가 241 이후에는 거의 동일 값을 나타내고 있다. 이는 유동의 고유 주파수와 와류발생기의 가진 주파수가 비슷한 값을 갖게되면 유동공진으로 가진 주파수의 값을 증가시키는 효과를 나타내는 것으로 생각된다. 반면 레이놀즈수가 증가하여 유동공진이 되는 경우 고유 주파수는 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 가진 주파수가 강화되면서 고유 주파수가 억제되는 것으로 사료된다. 따라서 레이놀즈수가 증가하더라도 가진 주파수와 고유 주파수가 어느 정도 범위에서 유사한 값을 갖는가에 따라 열전달에 영향을 줄 것으로 예상되나 가진 주파수가 열전달에 지배적인 영향을 주지 않을 경우 일반적인 등열유속 평판 위의 열전달현상에서와 같이 레이놀즈수 증가하면 비례적으로 열전달이 증가할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

와류발생기의 가진 주파수, 가진 진폭, 받음각 및 레이놀즈수에 따른 유동 가시화와 진동 주파수 발생 형태에 대한 PSD분석을 통하여 유동특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가시화를 통하여 얻은 가진 주파수와 고속푸리에 변환을 통하여 얻은 가진 주파수는 최대 8.8%내에서 잘 일치하고 있다.
- 2) 와류발생기의 진폭이 증가하면 방출되는 와류의 가진 주파수와 고유 주파수의 PSD강도가 동시에

증가한다.

3) 와류발생기의 받음각이 증가함에 따라 와류발생기의 후단에서 측정된 고유 주파수는 증가한다. 또한 받음각의 증가는 유동방해율을 증가시켜 와류발생기의 후단에서 경계층 내의 속도분포를 감소시킨다.

4) 낮은 레이놀즈수에서는 와류발생기의 고유 주파수가 가진 주파수에 근접하여 전체적인 PSD강도가 증가하지만 레이놀즈수가 큰 경우 고유 주파수가 증가하여 가진 주파수에서 멀어져 전체적인 PSD강도가 낮아진다.

#### 참고문헌

- 1) R. Zdero, O. F. Turan, and D. G. Havard, "Toward Understanding Galloping: Near-Wake Study of Oscillating Smooth and Stranded Circular Cylinders in Forced Motion", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 19, pp. 28~43, 1995.
- 2) M. d. Mahbub Alam, M. Moriya, K. Takai, and H. Sakamoto, "Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number", *J. of wind engineering and industrial aerodynamics*, Vol. 91, pp. 139~154, 2003.
- 3) S. J. Yang, "Numerical study of heat transfer enhancement in a channel flow using an oscillating vortex generator", *Heat and Mass Transfer* Vol. 39, pp. 257~265, 2003.
- 4) W. S. Fu, W. W. Ke and K. N. Wang, "Laminar forced convection in a channel with a moving block", *Int. J. Heat and Mass Transfer* Vol. 44, pp. 2385~2394, 2001.
- 5) W. S. Fu, and K. N. Wang, "An investigation of a block moving back and forth on a heat plate under a slot jet, Part II(the effects of block moving distance and vacant distance)", *Int. J. Heat Mass Transfer* Vol. 44, pp. 4649~4665, 2001.
- 6) A. Klaczak, "Report from experiments on heat transfer by forced vibrations of exchangers", *Heat and Mass transfer* Vol. 32, pp. 477~480, 1997.
- 7) V. Uhlenwinkel, R. Meng, and K. Bauchhage, "Investigation of Heat Transfer from Circular Cylinders in High Power 10kHz and 20kHz Acoustic Resonant Fields", *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 39, pp. 771~779, 2000.
- 8) 손병진, 맹주성, 이상환, "형성유체역학", 길중당, 1992.