

화력 발전용 보일러 Duct/Fan 시스템의 진동현상에 대한 연구: Inlet Vortex 에 의한 과대진동 사례

°김 철 홍*, 주 영 호**, 변 형 현**

A Study on the Vibration Phenomena of the Duct-fan Systems in Fossil Fueled Boilers: Inlet Vortex Induced Excessive Vibration

Cheol Hong Kim , Young Ho Ju and Hyung Hyun Byun

Key Words : Centrifugal Fan(원심형 팬), Primary Air Duct(P.A.덕트), Inlet Vortex(입구측 와류), Pressure Pulsation(압력맥동)

ABSTRACT

During the operation, fatigue failures and cracks of duct plate due to excessive duct vibration occurred in the fan-duct systems of fossil fueled boilers. We measured static pressure variation(pressure pulsation) in the outlet, and also measured vibration at the outlet duct of a centrifugal fan. It was found that strong pressure pulsation caused by the inlet vortex occurred in inlet vane of centrifugal fan in the middle range of vane opening. Thus, excessive duct vibration is caused by strong pressure pulsation. In this paper, it is shown that the frequency and amplitude of pressure pulsation depend mainly on vane opening and are compared with duct vibration. Also, effective solution for reducing pressure pulsation and vibration are presented.

1. 서 론

1.1 개요

화력발전소에서는 사용되는 덕트(duct)는 연료를 연소시키기 위한 공기 및 연소된 가스를 굴뚝(stack)까지 배출시키는 통로로서 매우 중요한 설비이다. 따라서 덕트는 압력손실이 적은 구조로 설계되어야 하고 경제성을 고려하여 적정크기로 제작해야 한다. 또한 최대연속 운전하에서 진동과 누설(leakage)이 없는 견고한 구조로 되어야 하며 정격유량의 원활한 흐름과 압력손실을 적게 하고 열팽창에 대하여도 충분히 고려되어야 한다. 특히, 팬(fan)주위에 위치한 덕트는 팬 및 덕트 문제로 인해 진동이 매우 심하게 발생하여 피로손상을 야기시켜 전력 생산에 심각한 영향을 미치기도 한다. 한 예로서 D 화력발전소의 보일러 Primary Air Duct(P.A. Duct)에서 운전 중 진동이 심해 지속적으로 덕트 plate 및 stiffener의 크랙(crack)과 파손을 야기시켰다. 현장에서 수 차례 걸쳐 덕트 보강 및 보수 작업을 수행하였으나, 계속해서 덕트 plate 및

stiffener가 파손되는 현상이 발생하였다. 여러 번의 현장 측정 및 종합적인 원인 분석 결과, 팬 자체의 inlet vane에서 유체 유동에 의한 과도한 압력맥동에 의한 진동 발생, 그리고 과도한 진동은 덕트 plate의 피로파괴에 이르게 한 것으로 밝혀졌다.

본 연구에서는 대형 원심형 팬 및 덕트 시스템에서 발생할 수 있는 여러 진동 사례를 발생했던 현상에 따라 분류하고, 그 해답을 열거하였다. 그리고 각 원인에 대한 개략적 가설을 제시하였다. 또한 발생하였던 현장 사례를 측정결과, 원인분석 및 그 대책에 대해 서술하였다.

1.2 Duct/Fan의 진동 현상

팬에서 발생된 압력변동은 덕트 plate 및 팬 케이싱(casing)의 진동을 야기시킨다. 매우 큰 압력맥동은 몇 가지 요인에 의해 발생한다. 주요요인 중 하나는 팬 입구측의 상류 2차 유동(upstream secondary flow)이다. 2차 유동은 정확한 발생 위치에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다⁽¹⁾.

* 정회원, 한국중공업(주) 기술연구원
** 한국중공업(주) 기술연구원

a) Inlet cone vortex :

이 문제는 1.5 m 이상의 큰 직경을 가진 inlet vane controlled fan 에서만 나타난다. Inlet cone vortex 의 가장 뚜렷한 특징은 진동은 Fig. 1a 와 같이 부분부하인 중간 작동영역에서만 발생하는 것으로 발생영역은 팬 제작사에 따라 다소 차이가 있다. 대개 30 %이하 vane 개도에서는 압력맥동은 작고, 30 %에서 증가하여 50 % vane 개도에서 최고 높다. 50 %에서 70 %까지 vane 개도에서 압력맥동은 감소한다. 약 70 % vane 개도에서 압력맥동은 다시 정상상태로 된다. 두 번째 특징은 압력맥동이 비정상적으로 매우 크다는 것이다. 보통, 정상상태인 경우 0.25~0.5 kPa 의 압력맥동이 발생되는 데 비해 inlet cone vortex 의 경우 압력맥동이 클 경우 약 12 kPa 정도 발생되고, 이 높은 압력맥동은 덕트 plate, stiffener 및 지지구조물의 진동을 크게 야기시켜 크랙을 발생시킨다. 맥동주파수는 다소 팬 제작사에 따라 차이가 있으나 팬 운전주파수의 0.5~5 배의 이산 주파수 성분을 가진다고 보고되고 있다.

b) Inlet box vortex :

Inlet box vortex 에 의한 압력맥동은 inlet vane controlled 및 inlet damper controlled fan 에서 발생한다. 구별짓는 특징은 Fig. 1b 와 같이 개도에 따라 압력맥동이 증가한다. 진동은 팬의 상류 및 하류 양쪽에서 발생한다. 덕트내의 압력맥동은 중간정도로 보통 1 kPa 이하의 작은 값을 가진다. 덕트 plate 및 stiffener 가 크게 진동이 발생하지만 구조적 손상은 발생하지 않는다. 이 문제와 관계한 맥동주파수의 형태는 항상 random 이라고 보고되고 있다. 이 문제에 대한 원인은 inlet box 에서 vortex 가 발생되어 폭이 좁아지는 fan inlet cone 을 통과하면서 흐름이 가속되어 vortex 가 매우 크게 증폭된다.

c) 선회실속(rotating stall) :

선회실속은 주로 inlet damper controlled fan 에서 많이 발생한다. 특히, backward airfoil 형상의 blade 를 가진 팬에서 자주 발생한다. 압력맥동은 control damper 개도 0~30 %에서 높고, 30 %이상 댐퍼 개도에서 압력맥동은 정상이다. 그리고 선회실속에 의해 발생한 진동은 inlet cone vortex 와 inlet box vortex 에 의한 진동의 중간 이상으로 압력맥동의 크기는 0.5~1.5 kPa 정도이다.

이상과 같이 열거한 것 이외에 주로 언급될 수 있는 기타 다른 몇 가지 요인은 다음과 같다. 첫 번째로 좋지 않은 팬의 입구측 흐름이다. 일반적으로 한정된 공간에 덕트 및 팬을 설치하기 때문에 덕트가 이상적인 흐름을 유지하도록 설치하는 경우는 드물다. 대부분 급하게 꺾이거나 회전하는 덕트가 대부분이다. 이와 같이 덕트의 형상이 복잡하

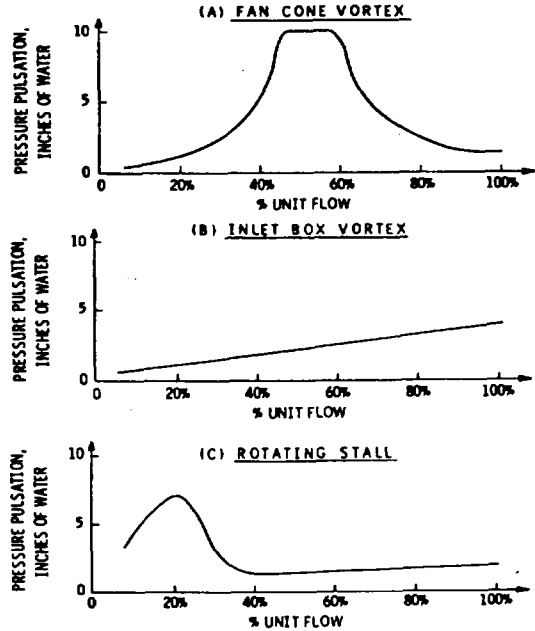


Fig. 1 Vibration as a function of flow

고 꺾일 때, 유동에 의해 진동이 발생할 수 있다. 이 경우 해결방안으로서는 덕트가 꺾이기 전 덕트 상류측에 덕트 내부에 vane 을 설치하여 진동을 줄일 수 있다. 대개 경험에 의하면 덕트 및 팬 자체의 기계적 문제로 인해서만 덕트가 진동하지는 않는다. 대형 발전용 보일러에서 주로 많이 겪을 수 있는 것은 보일러 열전달 관군에서 발생한 vortex shedding, 보일러 버너 맥동(burner pulsation)에 의해 보일러와 연결된 각종 덕트가 진동할 수가 있다. 특히, 튜브군에서 발생한 vortex shedding 이 보일러의 음향모드가 일치하여 음향공진 현상이 발생할 경우 보일러 backpass 에 연결된 가스 덕트는 매우 큰 진동 및 소음을 유발하기도 한다. 이외 덕트와 팬의 부적절한 조립, 설치에 기인하여 진동을 발생시킬 수 있다⁽²⁾.

2. 현장 실험

Fig. 2 에 화력 500 MW 발전용 보일러의 P.A. duct/fan 시스템을 나타내었다. 본 시스템은 P.A. fan 에서 송풍된 공기를 미분기를 거쳐 보일러 연소로 까지 이송하는 설비이다. P.A. fan 는 Table 1 에 나타낸 것과 같이 양흡입 원심형으로 1800 rpm 으로 회전하는 전기 모터와 직결로 체결되어 있고, 풍량은

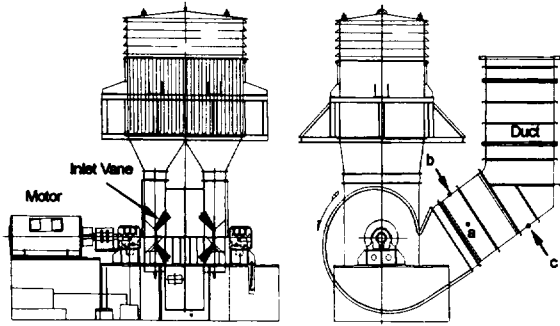


Fig. 2 Schematic of fan-duct system

팬 입구측에 설치된 vane 의 개도로서 조절하는 inlet vane controlled 형이다. Inlet vane 는 로터의 축방향으로 설치되어 있고, inlet vane 의 개도가 0 %일 때는 vane 의 각도는 0°으로써 완전히 닫히고, 100 %에서는 vane 각도는 75°으로써 흡입되는 공기는 임펠러 로터 회전방향의 접선방향으로 흐른다.

실험은 fan 입구측의 inlet vane 에서 발생하는 inlet cone vortex 에 주안점을 두어 팬 출구측 덕트에서 진동, 압력맥동을 inlet vane 개도에 따라 측정하였다. Fig. 2 에 진동 및 압력맥동 위치를 나타내었다. 압력은 팬 출구 측 덕트의 a, b, c 점에 구멍(hole)을 뚫어 변동압력을 측정할 수 있는 piezo 형 압력센서(PCB112A04)를 설치하였다. 측정된 압력맥동은 데이터 레코더(data recorder)에 저장한 후, FFT analyzer(HP35670A)를 통해 분석하였다.

실제 상업 운전 중일 때는 보일러의 출력에 따라 P.A. fan 의 개도가 자동으로 조절되고, P.A. fan 출구측에서 보일러 연소로까지 연결된 덕트의 중간에 설치된 댐퍼는 운전 조건에 따라 적절히 조절된다.

Table 1 Specifications of fan

Type	Centrifugal (Double Suction)
Method of output control	Inlet vane damper
Type of impeller	Airfoil
Impeller tip diameter	1620 mm
Number of blades	14 x 2
Rotating speed	1790 rpm
Motor rating	1400 kW
Capacity	4828 m ³ /min

본 연구에서는 P.A. fan 의 inlet vane 개도에 따른 덕트 내의 압력 변동에 주안점을 두었으므로, inlet vane 이외의 다른 댐퍼는 실험을 수행할 때 항상 100 % 개도를 유지하도록 설정하여 댐퍼 영향이 없도록 하였다. Inlet vane 에 의해 발생하는 inlet cone vortex 의 특성을 관찰하기 위해 inlet vane 을 10~100 %까지 단계별로 개도를 조절하면서 팬 출구 측 덕트 내의 압력변동 및 덕트 진동을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력맥동 특성

Inlet vane 개도에 따라 b 점에서 측정한 압력맥동의 크기를 Fig. 3 에 나타내었다. Inlet vane 개도 40 %에서 증가하여 60 %에 감소하고 있고, 개도 45 %에서 최대 overall 압력맥동은 1832 Pa 0-p 로서 가장 크다. 이는 팬의 부분부하에서 발생하는 inlet cone vortex 가 발생하고 있음을 시사하고 있다. B 점 에서 측정한 압력맥동을 vane 개도에 따라 4 번의 averaging 하여 스펙트럼 분석한 결과를 Fig. 4 의 waterfall plot 으로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 압력맥동 진폭이 클 때는 압력맥동 주파수는 이산적으로 분포하고, 압력맥동 진폭이 작을 때는 맥동 주파수는 넓게 분포하고 있다. 특히, 개도 45 %에서 압력맥동의 진폭이 가장 크고, 이 때 진동수는 50.5, 74 Hz 이다. Inlet vortex 가 발생하고 있는 부분부하인 40~60 %의 개도에 대하여 b 점에서 측정한 압력맥동 스펙트럼의 가장 큰 진폭과 두 번째 크기의 진폭에 대한 주파수를 Fig. 5 에 나타내었다. Inlet vane 의 개도 증가함에 따라 압력맥동 주파수는 점점 감소하고, 맥동주파수는 팬 운전 주파수의 약 1.5~2.5x 성분을 나타내고 있으며 이는 Chen 의 결과와 동일하다⁽³⁾.

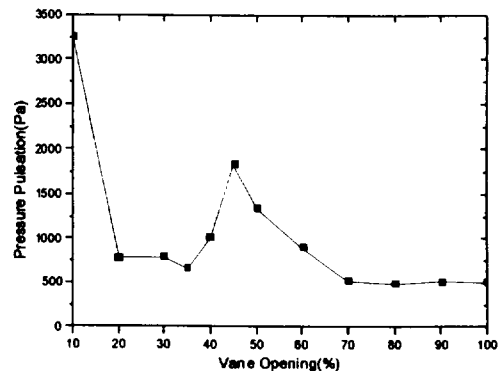


Fig.3 Overall pressure pulsation at the discharge fan

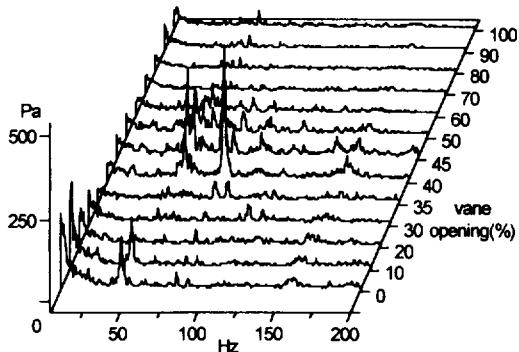


Fig. 4 Waterfall plot of pressure pulsation

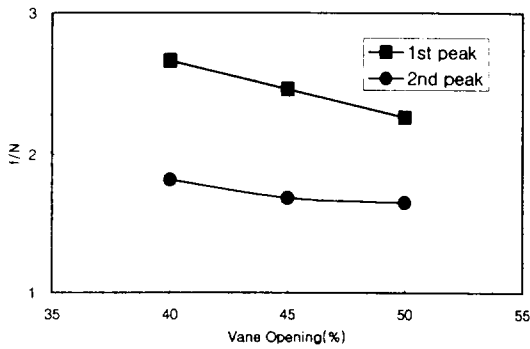


Fig. 5 Frequency of pressure pulsation with vane opening

3.2 압력맥동 및 진동 관계

팬의 inlet cone vortex 에 의해 야기된 압력맥동은 덕트 진동의 가진원으로서 작용하게 된다. Fig. 6 에 a, b, c 점에서 측정된 덕트 overall 진동치를 inlet vane 개도에 따라 나타내었다. 그림과 같이 압력맥동과 같은 경향으로 개도 40~60 %에서 진동치가 크게 증가됨을 알 수 있다. Stiffener 사이의 거리, 덕트 폭, 위치에 따라 덕트 진동치는 차이가 있지만 옆면 a의 진동치는 개도 45 %에서 최대 2060 μm pk-pk, b 위치는 개도 45 %에서 최대 914 μm pk-pk, c 위치는 개도 50 %에서 최대 1500 μm pk-pk 이다. 이와 같이 압력맥동이 가장 크게 발생하는 개도 45 %에서 덕트 진동이 가장 높다는 것을 알 수 있다. B 점에서 측정된 진동 스펙트럼을 개도 30, 45, 70 %에 대해 Fig. 7 에 나타내었는데, 진동치가 가장 높은 개도 45 %에서는 주진동수가 50.5, 74 Hz 입을 알 수 있다. 이 주파수는 개도 45 %에서 압력맥동 주파수와 일치하고 있다. 이것은 전형적으로 inlet cone vortex 에 의해 발생된 과대한 압력맥동이 덕트 진동의 가진원으로서 작용하고 있음을 알 수 있다.

Inlet cone vortex 발생과 덕트 진동의 상관관계를

확인하기 위해 a, b 점에서 측정된 압력맥동과 덕트 진동 사이의 코히런스(coherence)를 분석하였다. Fig. 8 은 a, b, c 점에서 측정하여 얻은 주파수 30~100 Hz 사이의 코히런스 값을 산술평균한 값을 나타낸 것이다. 그림을 보면 측정 위치마다 다소 차이는 있지만 저개도와 중간개도에서 코히런스가 높고, 개도가 증가할수록 코히런스가 낮아지고 있다. 즉, 팬의 저부하에서는 팬에서 발생된 압력맥동이 덕트 진동의 주원인이 되고 있음을 알 수 있다.

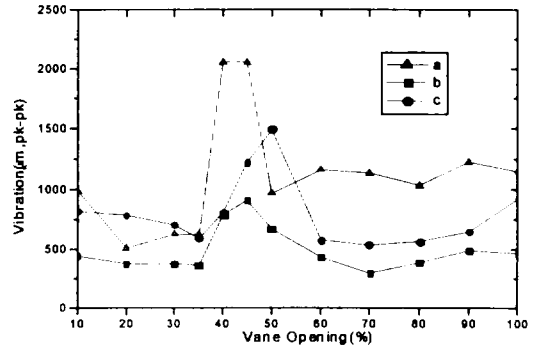


Fig. 6 Overall vibrations at the outlet duct

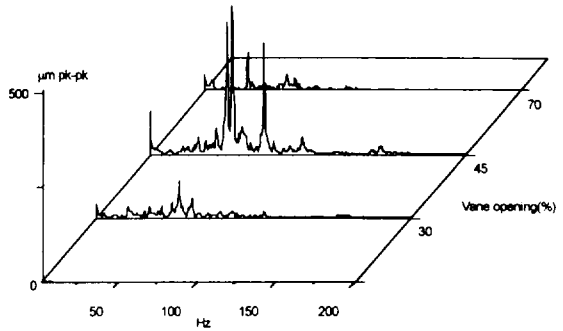


Fig. 7 Vibration spectra of measuring point b

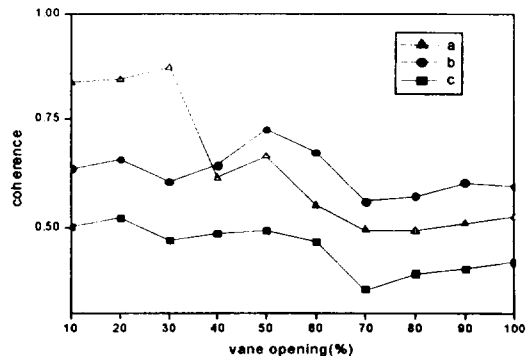


Fig. 8 Coherence between vibration and pressure pulsation

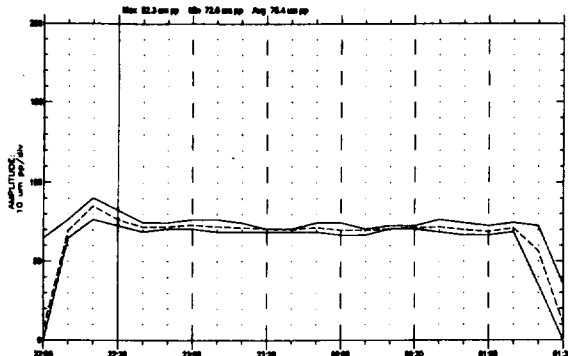


Fig. 9 Inboard x-direction shaft vibration of P. A. fan

지금까지 팬 출구 덕트의 진동문제에 대해 언급 했는데, 대개 팬 내부에서 발생한 압력맥동은 팬 케이싱과 임펠러 로터의 진동을 수반할 것으로 생각할 수 있다. 그러나 팬 내부에서 발생한 inlet cone vortex 로 인한 과도한 압력맥동은 심각한 덕트 진동을 야기시키지만, 여러 문헌⁽¹⁾⁽²⁾ 및 경험으로는 임펠러 로터 및 베어링은 전혀 진동이 발생 하지 않았다. Fig. 9 는 팬에서 inlet cone vortex 가 발생, 과도한 압력맥동으로 덕트가 심하게 진동할 때, 임펠러 로터의 시간에 따른 축진동 진동추이를 나타낸 것이다. 주로 운전주파수의 1x 성분이며 약 80 μm pk-pk 내외의 작은 축진동을 보였다. 이와 같은 이유로 문제 접근 단계에서 팬 자체의 문제를 간과하고 덕트 자체의 문제로만 접근할 경우, 문제 해결을 위한 방안 제시를 어렵게 할 수 있다.

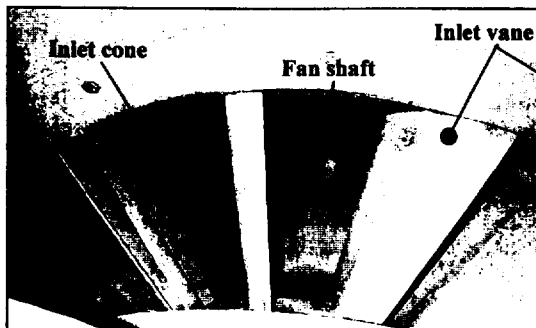
3.3 Inlet cone vortex 대책

Inlet cone vortex 의 발생 원인에 대한 이론은 아직 정확한 정설은 없지만, 여러 문헌에 의하면 inlet vane 하류에서 발생한 흡입 소용돌이의 세차운동

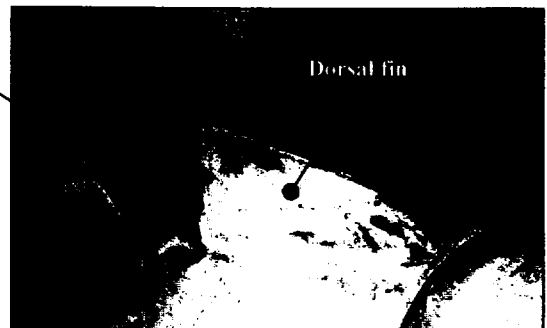
이 원인으로 소용돌이가 임펠러를 통과하면서 주기적으로 생성된 vortex 는 높은 압력맥동을 발생 시킨다. Inlet cone vortex 는 임펠러의 회전이나 임펠러 내의 흐름에 직접 관계없는 inlet vane 하류의 선회류 현상이므로 이를 방지하기 위해서는 inlet cone 내의 유동에 대해 대책을 실시해야 한다. 가장 일반적 대책으로는 inlet vane 후단에 소용돌이 발생을 억제하도록 회전축 반경방향으로 dorsal fin 을 설치하는 것이다. Fig. 10 은 dorsal fin 설치 전후의 P.A. fan 흡입부분에 대해 나타낸 사진이다.

Inlet cone vortex 를 억제시키기 위한 dorsal fin 설치 후, 덕트 내의 압력맥동 및 덕트 진동 변화 추이를 관찰하였다. Dorsal fin 설치 전후의 변화를 정량적으로 관찰하기 위해 dorsal fin 설치 전의 시험 조건과 동일한 조건으로 팬 개도를 변화시키면서 시험을 실시하였다. Dorsal fin 설치 후, inlet vane 개도를 변화시키면서 a, b 점에서 측정한 압력맥동을 Fig. 11 에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 inlet cone vortex 가 발생하는 구간인 40~60%에서의 과도한 압력맥동은 완전히 사라졌음을 확인할 수 있다. 그리고 전체적으로 압력맥동은 상당히 감소하였음을 알 수 있다. Dorsal fin 설치 전에 개도 45%부근에서 최대 압력맥동이 1832 Pa 0-pk 이었던 점에 비해 680 Pa 0-pk 이하로 감소하였다. 또한 압력맥동 주파수는 이산적인 분포가 아닌 broad band 를 형태로 나타났다.

Fan 의 inlet cone vortex 에 의해 야기된 압력맥동은 dorsal fin 설치로 상당히 감소했음을 확인하였고, 덕트 진동의 가진원이 제거됨에 따라 진동 또한 매우 감소할 것으로 예측할 수 있다. Fig. 12 에 dorsal fin 설치 후, a, b, c 점에서 측정한 덕트 진동치를 inlet vane 개도에 따라 나타내었다. 그림과 같이 압력맥동 경향과 마찬가지로 dorsal fin 설치 전 개도 40~60%에서 매우 큰 진동치가 상당히 감소했음을 알 수 있다.



(a) Before dorsal fin set-up



(b) After dorsal fin set-up

Fig. 10 Inlet vane controlled fan

옆면 덕트 a 의 진동치는 dorsal fin 설치 전 개도 45 %에서 최대 2060 μm pk-pk 이었으나 설치 후 929 μm pk-pk 로, b 위치는 최대 914 μm pk-pk 에서 230 μm pk-pk 로, c 위치는 최대 1500 μm pk-pk 에서 378 μm pk-pk 로 감소하였다.

a 점에서 덕트 진동은 덕트 plate 의 고유진동수가 100 Hz 이내에 여러 국부적 모드(local mode)가 존재 하기 때문에 저주파의 broad band 형태를 가진 압력 맥동에 의해 국부적 공진이 발생하여 다소 진동치가 높다. 다른 b, c 점의 덕트 plate 는 고유진동수가 100 Hz 이상에서 여러 국부적 모드가 있기 때문에 저주파 broad band 의 압력맥동 가진력에 의한 공진은 발생하지 않아 진동치는 개도에 따라 작고 일정하게 유지됨을 보여 주고 있다.

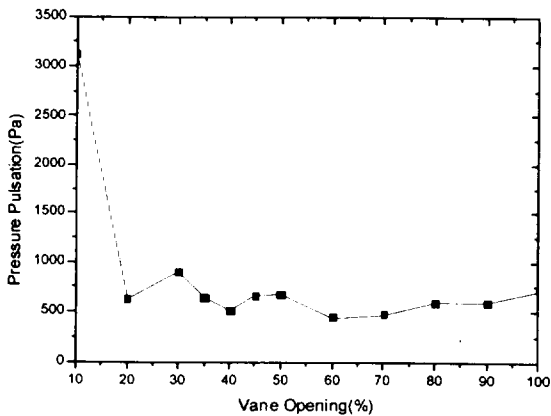


Fig. 11 Overall pressure pulsation at the discharge fan

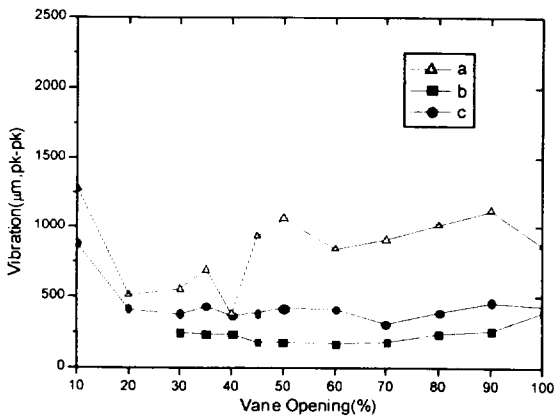


Fig. 12 Overall vibration at the outlet duct

4. 결론

본 연구에서 대형 원심형 팬 및 덕트에서 발생할 수 있는 진동에 대해 여러 현상에 따라 분류하고, 효과적으로 해결할 수 있는 방안에 대하여 서술하였다. 특히, 실제 현장에서 경험했던 inlet cone vortex 라는 대형 원심형 팬에서 발생할 수 있는 특별한 현상에 대해 현장 측정 및 분석을 통해 문제를 해결하였던 사례를 서술하였다. 이상의 사례로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대형 원심형 팬에서 발생할 수 있는 여러 진동 문제 중 inlet cone vortex 는 압력맥동이 다른 요인에 비해 비교적 크고 팬 출구 측 덕트를 진동시켜 피로손상을 야기시킨다.
- 2) Inlet cone vortex 는 부분부하 영역에서 발생되며, 압력맥동은 개도 45 %에서 가장 크고, 개도 30 % 이하 및 70 %이상에서 감소하며 이에 따른 덕트 진동은 압력맥동 경향과 동일하다.
- 3) 압력맥동 주파수는 팬 운전주파수의 약 1.5 ~ 2.5x 성분으로 이산적 분포를 가지며, vane 개도가 증가할수록 압력맥동 주파수는 감소한다.
- 4) Inlet cone vortex 는 inlet vane 후단에서 발생한 흡입 소용돌이의 세차운동이 원인이며, 따라서 inlet cone 내의 유동을 제어할 수 있는 dorsal fin 설치로 inlet cone vortex 를 방지할 수 있음을 제시하였다.

Inlet cone vortex 의 사례는 과도한 덕트 진동에 비해 상대적으로 팬 케이싱 및 로터는 진동이 발생하지 않는다. 따라서, 초기 문제 접근 단계에서 팬 자체 문제를 간과할 경우 경제적, 시간적 손실을 입을 수 있기 때문에 보일러 제작사, 팬 제작사, 시스템 운전원과 함께 협력하여 다각적인 시각으로 접근해야 문제를 보다 효과적으로 해결할 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Rogers, J.D. and Gilkey, C. H., "A Summary of Experiences with Fan Induced Duct Vibrations on Fossil Fueled Boilers," American Power Conf., April 1975.
- (2) Chen, Y. N., "Flow-Induced Vibrations and Noise in Tube-Bank Heat Exchangers Due to Von Karman Streets," ASME, 1967.
- (3) Chen, P., Soundra-Nayagam, Bolton, A. N., and Simpson, H. C., "A Study of the Inlet Vortex In a Centrifugal Fan," 11th Australasian Fluid Mechanics Conf., Australia, 1992.