

Inlet Cone Vortex 에 의한 500 MW 급 발전용 보일러 헨-덕트 시스템의 과대진동

김철홍*, 주영호*, 변형현*

Excessive Vibration of the Fan-duct Systems in 500 MW Power Plant Boilers Due to Inlet Cone Vortex

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. 서론

화력발전소에서 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 정격 유량의 원활한 흐름과 압력손실을 적게 하고 열팽창에 대하여도 충분히 고려되어야 한다. 특히, 팬(fan)주위에 위치한 덕트는 내부 압력맥동 (pressure pulsation)에 의해 심각한 덕트 진동을 유발시켜 피로손상을 야기시켜 전력 생산에 심각한 영향을 미치기도 한다. 이와 같이 덕트 진동을 야기시키는 압력맥동은 몇 가지 요인에 의해 발생한다. 주요 요인 중 하나는 팬 입구측의 상류 2

차 유동(upstream secondary flow)이다. 2차 유동은 발생 위치에 따라 inlet cone vortex, inlet box vortex 및 선회실속(rotating stall)으로 구분된다. 주로 1.5 m 이상의 직경을 가진 inlet vane controlled fan에서 발생하는 inlet cone vortex는 inlet vane 개도 40~60 %에서 비정상적으로 압력맥동이 증가하는 특징이 있다. 그리고 Inlet box vortex에 의한 압력맥동은 inlet vane controlled 및 inlet damper controlled fan에서 발생하고, 특징으로서는 개도에 따라 비례적으로 압력맥동이 증가한다. 선회실속은 주로 inlet damper controlled fan에서 많이 발생한다. 특히, backward airfoil 형상의 blade를 가진 팬에서 자주 발생한다. 압력맥동은 control damper 개도 0~30 %에서 높고, 30 % 이상 댐퍼 개도에서 압력맥동은 정상이다⁽¹⁾.

이상과 같이 열거한 것 이외에 과도한 압력맥동을 유발시키는 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. 따라서 급격한 유동변화가 생기고

* 한국중공업(주) 기술연구원

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

이 유동변화에 의해 진동이 발생할 수 있다. 이 경우 해결방안으로서는 덕트 내부의 유동을 좋게 하기 위해 vane 을 설치한다. 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, 관군(tube bank)에서 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⁾.

본 연구에서는 실제 운전 중인 화력발전소의 보일러 Primary Air Fan-Duct(P.A. Fan-Duct)에서 발생한 inlet cone vortex 에 의한 duct 진동 및 압력맥동 특성에 대해 파악하였고, 효과적인 대책 수립 후 진동 및 압력맥동 저감에 대해 서술하였다.

2. 현장 실험

Fig. 1 에 화력 500 MW 발전용 보일러의 P.A. duct/fan 시스템을 나타내었다. 본 시스템은 P.A. fan 에서 송풍된 공기를 미분기를 거쳐 보일러 연소로까지 이송하는 설비이다. P.A. fan 는 Table 1 에 나타낸 것과 같이 양흡입 원심형으로 1800 rpm 으로 회전하는 전기 모터와 직결로 체결되어 있고, 풍량은 팬 입구측에 설치된 vane 의 개도로서 조절하는 inlet vane controlled 형이다. Inlet vane 는 로터의 축방향으로 설치되어 있고, inlet vane 의 개도

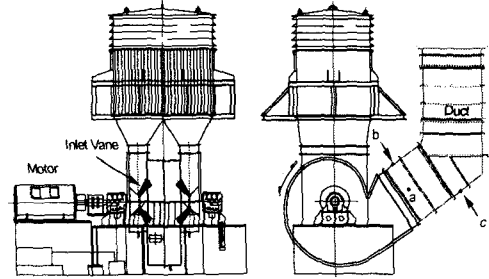


Fig. 1 Schematic of fan-duct system

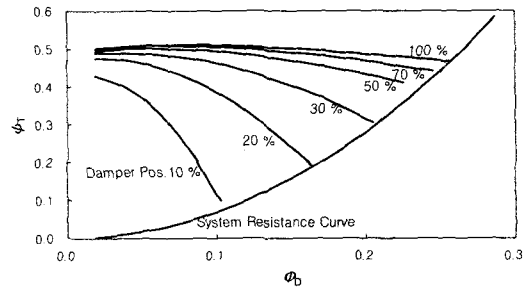


Fig. 2 Performance and system resistance curve of fan-duct system

가 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. 1 에 진동 및 압력맥동 위치를 나타내었다. 압력은 팬 출구 측 덕트의 a, b, c점에 구멍(hole)을 뚫어 변동압력을 측정할 수 있는 piezo형압력센서(PCB112A04)를 설치하였다. 측정된 압력맥동은 신호분석기(HP35670A)를 통해 분석하였다.

Fig. 2 에 P.A. Fan 의 무차원 성능곡선과 시스템 저항곡선(system resistance curve)을 나타내었다.

그림의 시스템저항곡선은 보일러가 정상 운전 중일 때 팬 및 덕트시스템의 저항곡선을 나타낸 것이다. 본 연구에서 팬 개도에 따른 압력맥동과 진동을 측정할 때 실제 운전 조건과 유사한 조건인 시스템 저항곡선에 가깝도록 시스템을 설정하여 수행하였다. 그리고 inlet vane 에 의해 발생하는 inlet cone vortex 의 특성을 관찰하기 위해 inlet vane 을 10~100 %까지 단계별로 개도를 조절하면

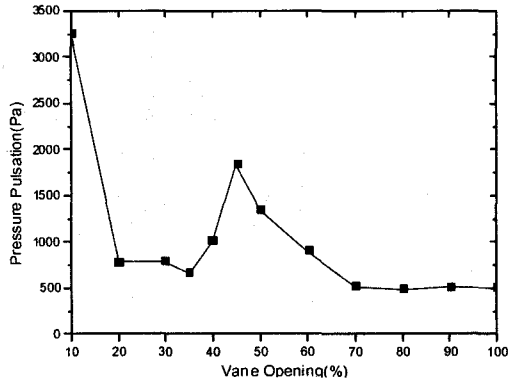


Fig.3 Overall pressure pulsation at the discharge fan

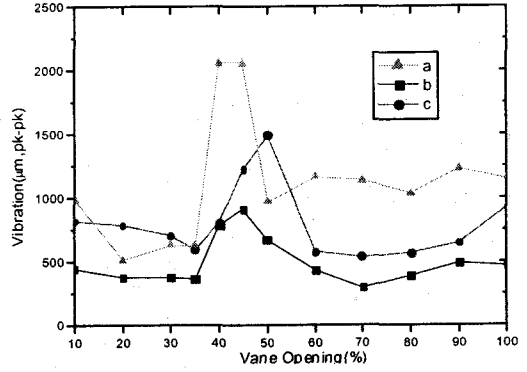


Fig. 6 Overall vibrations at the outlet duct

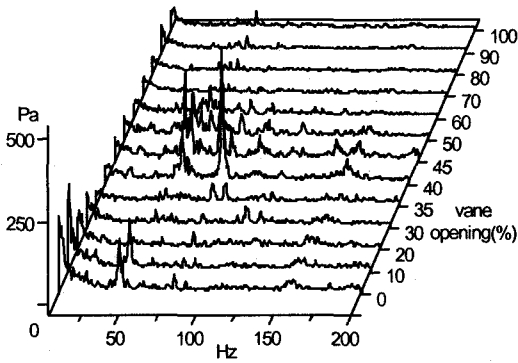


Fig. 4 Waterfall plot of pressure pulsation

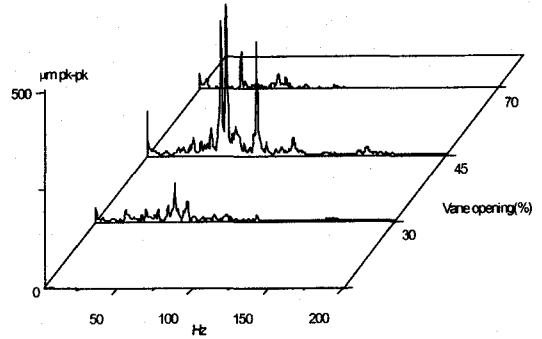


Fig. 7 Vibration spectrums of measuring point b

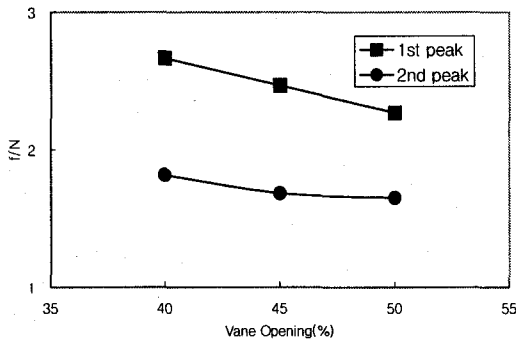


Fig. 5 Frequency of pressure pulsation with vane opening

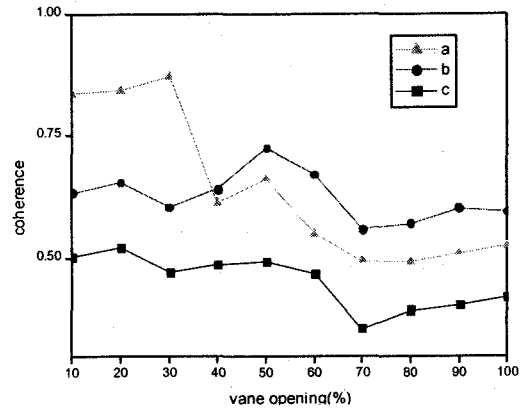
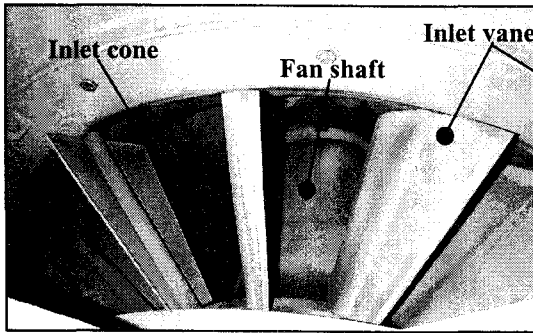
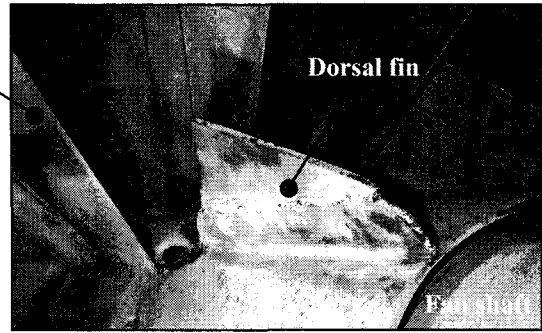


Fig. 8 Coherence between vibration and pressure pulsation



(a) Before dorsal fin set-up



(b) After dorsal fin set-up

Fig. 9 Inlet vane controlled fan

서 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 점에서 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, 이때 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⁾.

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 측정한 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 a 의 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 측정한 진동 스펙트럼을 개도 30, 45, 70 %에 대해 Fig. 7 에 나타내었는데, 진동치가 가장 높은 개도 45 %에서는 주진동수가 50.5, 74 Hz 임을 알 수 있다. 이 주파수는 개도 45 %에서 압력맥동 주파수와 일치하고 있다. 이것은 전형적으로 inlet cone vortex 에 의해 발생된 과도한 압력맥동이 덕트 진동의 가진원으로서 작용하고 있음을 알 수 있다.

Inlet cone vortex 발생과 덕트 진동의 상관관계를 확인하기 위해 a, b 점에서 측정한 압력맥동과 덕트진동 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.

3.3 대책 후 압력맥동 특성

Inlet cone vortex 의 발생 원인에 대한 이론은 아직 정확한 정설은 없지만, 여러 문헌에 의하면

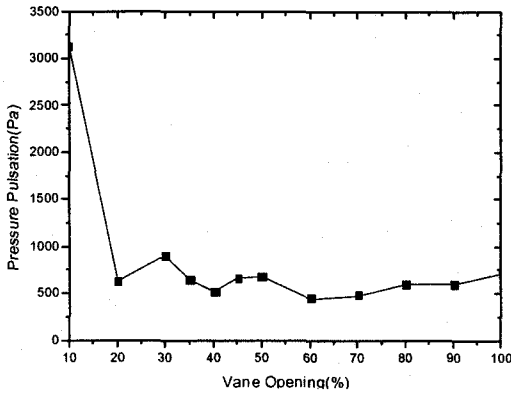


Fig. 10 Overall pressure pulsation at the discharge fan

inlet vane 하류에서 발생한 흡입 소용돌이의 세차 운동이 원인으로 소용돌이가 임펠러를 통과하면서 주기적으로 생성된 vortex는 높은 압력맥동을 발생시키는 것으로 보고 되고 있다³⁾. Inlet cone vortex는 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 fin을 설치하는 것이다. Fig. 9은 dorsal fin 설치 전후의 P.A. fan 흡입 부분에 대해 나타난 사진이다.

Inlet cone vortex를 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. 10에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 inlet cone vortex가 발생하는 구간인 40~60%에서의 과대한 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-pk이었던 점에 비해 680 Pa 0-pk 이하로 감소하였다. 또한 압력맥동 주파수는 이산적인 분포가 아닌 broad band를 형태로 나타냈다.

Fan의 inlet cone vortex에 의해 야기된 압력맥동은 dorsal fin 설치로 상당히 감소했음을 확인하였고, 덕트 진동의 가진원이 제거됨에 따라 진동 또한 매우 감소할 것으로 예측할 수 있다. Fig. 11

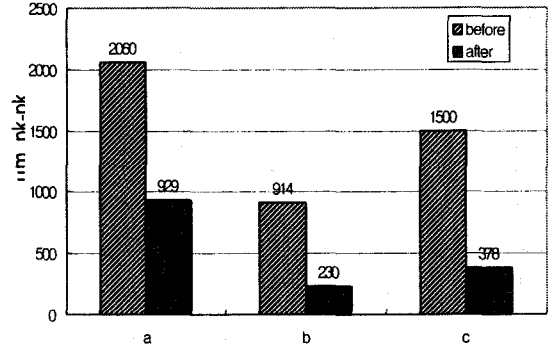


Fig. 11 Comparison of overall vibration between before and after dorsal fin set-up

에 dorsal fin 설치 전후, a, b, c 점에서 측정한 덕트 최대 진동치를 비교하였다. 그림과 같이 dorsal fin 설치에 따라 가진원이 제거되므로 진동치가 상당히 감소했음을 알 수 있다.

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 vortex라는 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 진동문제 중 inlet cone vortex는 압력맥동이 다른 요인에 비해 비교적 크고 팬 출구 측 덕트를 진동시켜 피로손상을 야기시킨다.

2) Inlet cone vortex는 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 vane 후단에서 발생하는 inlet cone vortex

는 dorsal fin 를 설치함으로써 방지할 수 있음을 제시하였다.

참고 문헌

- (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.