

화력 발전용 보일러 덕트-팬 시스템의 진동현상에 대한 연구 : 입구측 와류에 의한 과대진동 사례

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

김 철 홍† · 주 영 호*

Cheol Hong Kim and Young Ho Ju

(2002년 11월 23일 접수 : 2003년 2월 17일 심사완료)

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 a fan-duct system 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 정격 유량의 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.

본 사례에서는 운전 중인 보일러 P.A.덕트(primary air duct)에서 운전 중 진동이 심해 지속적으로 덕트 및 보강재(stiffener)의 크랙(crack)과 파손을 야기시켰다. 현장에서 수 차례 걸쳐 덕트 보강 및 보수 작업을 수행하였으나, 계속해서 덕트 및 보강재가 파손되는 현상이 발생하였다. 여러 번의 현장 측정 및 종합적인 원인 분석 결과, 팬 자체의 입구측 베인(inlet vane)에서 유체 유동에 의한 과도한 압력맥동 (pressure pulsation)에 의한 진동 발생, 그리고 과도한 진동은 덕트의 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 원

† 책임저자, 정회원, 두산중공업(주) 기술연구원

E-mail : cheolhongkim@doosanheavy.com

Tel : (055) 278-3713, Fax : (055) 278-8593

* 두산중공업(주) 기술연구원

인에 대한 개략적 가설을 서술하였다. 또한 발생하였던 현장 사례를 중심으로 측정결과, 원인분석 및 그 대책에 대해 서술하였다.

1.2 팬-덕트의 진동 현상

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

(1) 입구측 콘 와류(inlet cone vortex)

이 문제는 1.5 m 이상의 큰 직경을 가진 입구측 베인으로 풍량을 조절하는 팬(inlet vane controlled fan)에서만 나타난다. 입구측 콘 와류의 가장 뚜렷한 특징은 진동은 Fig. 1(a)와 같이 부분부하인 중간 작동영역에서만 발생하는 것으로 발생 영역은 팬 제작사에 따라 다소 차이가 있다. 대개 30 %이하 베인 개도(vane opening)에서는 압력맥동은 작고, 30 %에서 증가하여 50 % 베인 개도에서 최고 높다. 50 %에서 70 %까지 베인 개도에서 압력맥동은 감소한다.

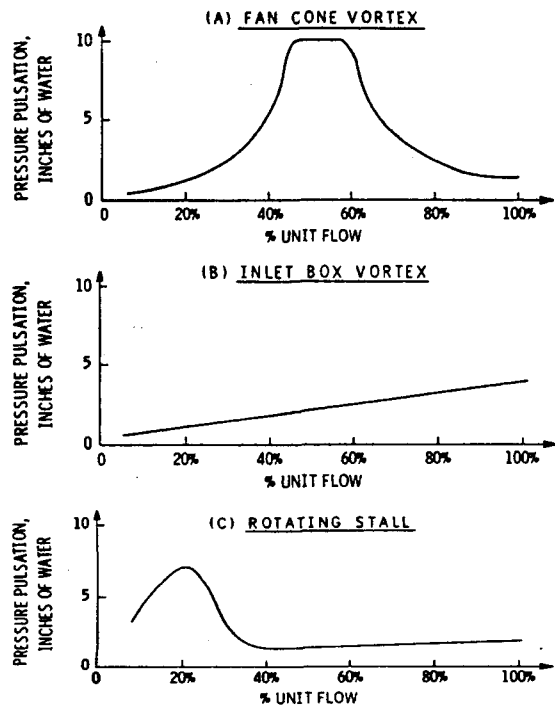


Fig. 1 Vibration as a function of flow

약 70 % 베인 개도에서 압력맥동은 다시 정상상태로 된다. 두 번째 특징은 압력맥동이 비정상적으로 매우 크다는 것이다. 보통, 정상상태인 경우 0.25~0.5 kPa의 압력맥동이 발생되는 데 비해 입구측 콘 와류의 경우 압력맥동이 클 경우 약 12 kPa정도 발생되고, 이 높은 압력맥동은 덕트, 보강재 및 지지구조물의 진동을 크게 야기시켜 크랙을 발생시킨다. 맥동주파수는 다소 팬 제작사에 따라 차이가 있으나 팬 운전주파수의 0.5~5배의 이산 주파수 성분을 가진다고 보고되고 있다.⁽¹⁾

입구측 콘 와류의 발생 원인은 Fig. 2(a)의 팬 개략도에서와 같이 입구측 베인 하류에서 발생한 와류는 팬의 축계 주위로 주기적으로 휘돌리는 세차운동을 하고, 와류는 임펠러를 통과하면서 높은 압력맥동을 발생시킨다고 문헌에서 보고하고 있다. 이 현상은 흔히 세면대의 배수구에서 쉽게 관찰할 수 있는 것으로 와류를 발생시키면서 유체가 급격히 좁아지는 곳을 통과할 때 발생된다.⁽¹⁾

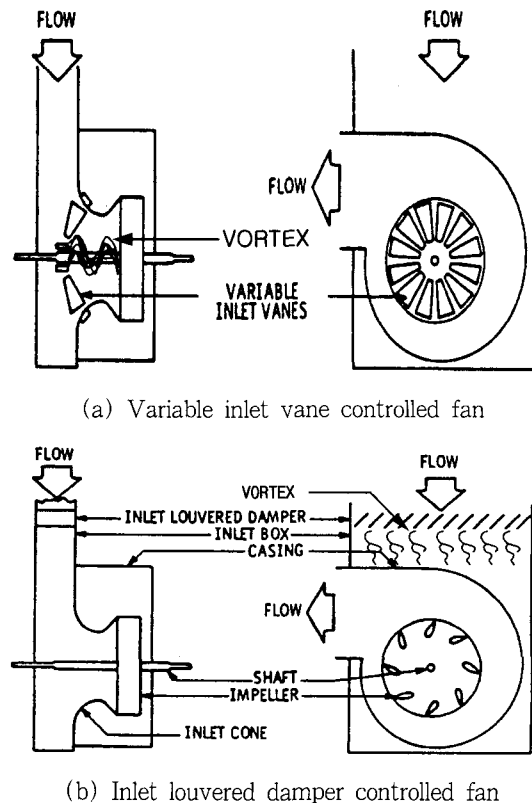


Fig. 2 Schematic of variable inlet vane and inlet louvered damper controlled fan

(2) 입구측 박스 와류(inlet box vortex)

입구측 박스 와류에 의한 압력맥동은 Fig. 2(b)와 같이 입구측 배인 조절 팬 및 입구측 댐퍼 조절 팬(inlet damper controlled fan)에서 발생한다. 구별 짓는 특징은 Fig. 1(b)와 같이 개도에 따라 압력맥동이 증가한다. 진동은 팬의 상류 및 하류 양쪽에서 발생한다. 덕트 내의 압력맥동은 중간 정도로 보통 1 kPa 이하의 작은 값을 가진다. 덕트 및 보강재가 크게 진동이 발생하지만 구조적 손상은 발생하지 않는다. 이 문제와 관계한 맥동주파수의 형태는 항상 랜덤(random)이라고 보고되고 있다.⁽¹⁾ 이 문제에 대한 원인은 입구측 박스(inlet box)에 위치한 댐퍼 후단에서 와류가 발생되어 폭이 좁아지는 입구측 콘(inlet cone)을 통과하면서 흐름이 가속되어 와류가 매우 크게 증폭된다. 입구측 박스 와류는 Fig. 2(a)와 같이 입구측 배인 후단부에서 발생하는 입구측 콘 와류와 크게 차이가 있다.

(3) 선회실속(rotating stall)

선회실속은 주로 입구측 댐퍼로 조절되는 팬에서 많이 발생한다. 특히, 후방 날개(backward airfoil)형상의 블레이드(blade)를 가진 팬에서 자주 발생한다. 또한, 설계된 팬 용량에 비해 훨씬 적은 용량으로 운전할 때 선회실속이 발생된다. 압력맥동은 댐퍼 개도 0~30 %에서 높고, 30 % 이상 댐퍼 개도에서 압력맥동은 정상이다. 그리고 선회실속에 의해 발생한 진동은 입구측 콘 와류와 입구측 박스 와류에 의한 진동의 중간 이상으로 압력맥동의 크기는 0.5~1.5 kPa 정도이다.⁽¹⁾

이상과 같이 열거한 것 이외에 주로 언급될 수 있는 기타 다른 몇 가지 요인은 다음과 같다. 첫 번째로 팬 입구측의 유동흐름이 좋지 않을 경우이다. 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 복잡하고 꺾일 때, 유동에 의해 진동이 발생할 수 있다. 이 경우 해결방안으로서는 덕트가 꺾이기 전 상류측 덕트 내부에 배인을 설치하여 진동을 줄일 수 있다. 대개 경험에 의하면 덕트 및 팬 자체의 기계적 문제로 인해서만 덕트 진동이 발생하지는 않는다. 대형 발전용 보일러에서 주로 많이 꺾을 수 있는 것은 보일러 열

전달 관군(tube bank)에서 발생한 와류, 보일러 버너 맥동(burner pulsation)에 의해 보일러와 연결된 각종 덕트가 진동할 수가 있다.^(1,2) 특히, 관군에서 발생한 와류가 보일러의 음향모드(acoustic cavity)와 일치하여 음향공진 현상이 발생할 경우 보일러 후단부에 연결된 가스 덕트는 매우 큰 진동 및 소음을 유발하기도 한다.^(2~4) 이외 덕트와 팬의 부적절한 조립, 설치에 기인하여 진동이 발생할 수 있다.

2. 현장 실험

Fig. 3에 화력500 MW발전용 보일러의 P.A. 덕트-팬 시스템을 나타내었다. 본 시스템은 P.A. 팬에서 송풍된 공기를 미분기를 거쳐 보일러 연소로까지 이송하는 설비이다. P.A. 팬은 Table 1에 나타난 것과 같이 양흡입 원심형(double suction centrifugal)으로 1800 rpm으로 회전하는 전기 모터와 직결로 체결되어 있고, 풍량은 팬 입구측에 설치된 배인의 개도로서 조절하는 입구 배인 조절형이다. 입구측 배인은 로터의 축방향으로 설치되어 있고, 입구측 배인의 개도가 0 %일 때는 배인의 각도는 0°으로써 완전히 닫히고, 100 %에서는 배인 각도는 75°으로써 흡입되는 공기는 임펠러 로터 회전방향의 접선방향으로 흐른다. 실험은 팬 입구측의 입구측 배인에서 발생하는 입구측 콘 와류에 주안점을 두어 팬 출구측 덕트에서 진동, 압력맥동을 입구측 배인 개도에 따라 측정하였다. Fig. 3에 진동 및 압력맥동 위치를 나타내었다. 압력은 팬 출구 측 덕트의 a, b, c점에 구멍(hole)을 뚫어 변동압력을 측정할 수 있는 압전형(piezo type) 압력센서를 설치하였다. 측정된 압력맥동은 데이터 레코더(data recorder)에 저장한 후, 신호분석기(FFT analyzer)를 통해 분석하였다.

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

본 연구에서는 P.A. 팬의 입구측 배인 개도에 따른 덕트 내의 압력 변동에 주안점을 두었으므로, 입구측 배인 이외의 다른 댐퍼는 실험을 수행할 때 항상 100 % 개도를 유지하도록 설정하여 댐퍼 영향이 없도록 하였다. 입구측 배인에 의해 발생하는 입구측 콘 와류의 특성을 관찰하기 위해 입구측 배인을 10~100

%까지 단계별로 개도를 조절하면서 팬 출구 측 덕트 내의 압력변동 및 덕트 진동을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력맥동 특성

입구측 배인 개도에 따라 b 점에서 측정된 압력맥동의 크기를 Fig. 4에 나타내었다. 입구측 배인 개도 40 %에서 증가하여 60 %에 감소하고 있고, 개도 45 %에서 최대 총합(overall)압력맥동은 1832 Pa 0-p로서 크다. 이는 팬의 부분부하에서 발생하는 입구측 큰 와류가 발생하고 있음을 시사하고 있다. 또한 그림에서 배인 개도 10 %에서 압력맥동이 크게 나타나고 있는데 이 이유는 설계된 팬 용량에 비해 훨씬 적은 용량으로 운전하게 되어 흔히 알고 있는 선회실속이 발생하여 토출압력이 지나치게 높아져 발생한 것으로 사료된다. 대형 화력발전용 보일러 연소로에 사용되고 본 설비는 전력 생산이라는 특수성 때문에 상시운전 중에는 2개의 팬-덕트시스템으로 각각 설계용량의 50 %으로 병렬 운전하고 긴급 보수 등의 비상 운전시는 1개의 팬-덕트시스템 만으로 100 % 팬 용

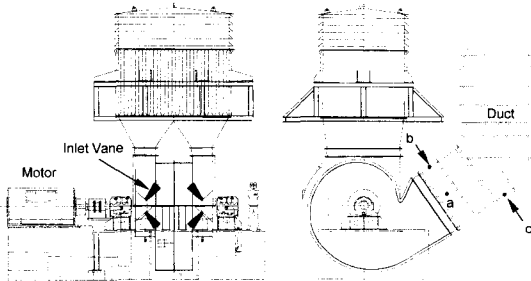


Fig. 3 Schematic of fan-duct system

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 × 2
Rotating speed	1790 rpm
Motor rating	1400 kW
Capacity	4828 m ³ /min

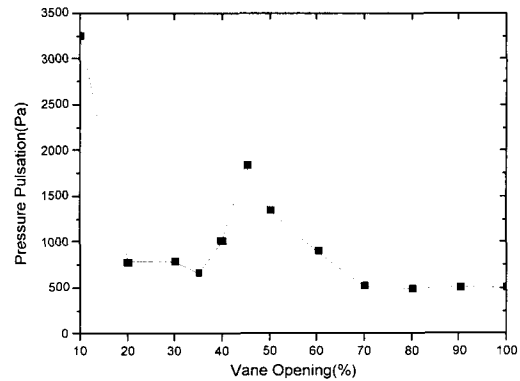


Fig. 4 Overall pressure pulsation at the discharge

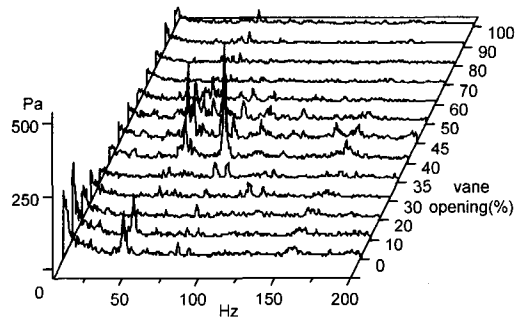


Fig. 5 Waterfall plot of pressure pulsation

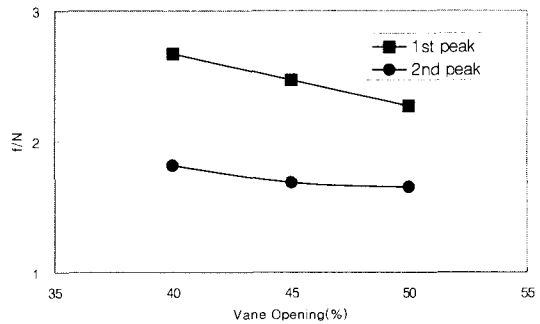


Fig. 6 Frequency of pressure pulsation with vane opening

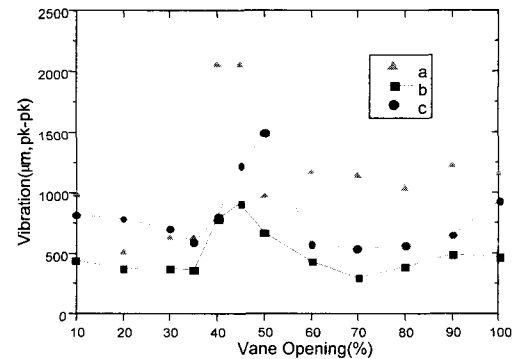


Fig. 7 Overall vibrations at the outlet duct

량으로 운전한다. 따라서 상시운전일 때의 용량 50%는 배인 개도 40~60%로서 본 연구에서 가장 문제시 되고, 배인 개도 10% 이하에서는 운전하지 않기 때문에 본 연구에서는 이에 대한 상세한 서술은 생략한다.

B점에서 측정된 압력맥동을 배인 개도에 따라 4번의 평균하여 스펙트럼 분석한 결과를 Fig. 5의 워터폴(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 Hz이다. 입구측 와류가 발생하고 있는 부분 부하인 40~60%의 개도에 대하여 b점에서 측정된 압력맥동 스펙트럼의 가장 큰 진폭과 두 번째 크기의 진폭에 대한 주파수를 Fig. 6에 나타내었다. 입구측 배인의 개도 증가함에 따라 압력맥동 주파수는 점점 감소하고, 맥동주파수는 팬 운전 주파수의 약 1.5~2.5x 성분을 나타내고 있으며 이는 Chen의 결과⁽⁵⁾와 동일하다.

3.2 압력맥동 및 진동 관계

팬의 입구측 콘 와류에 의해 야기된 압력맥동은 덕트 진동의 가진원으로서 작용하게 된다. Fig. 7에 a, b, c점에서 측정된 덕트 총합 진동치를 입구측 배인 개도에 따라 나타내었다. 그림과 같이 압력맥동과 같은 경향으로 개도 40~60%에서 진동치가 크게 증가됨을 알 수 있다. 보강재 사이의 거리, 덕트 폭, 위치에 따라 덕트 진동치는 차이가 있지만 옆면 a의 진동치는 개도 45%에서 최대 2060 μm pk-pk, b위치는 개도 45%에서 최대 914 μm pk-pk, c위치는 개도 50%에서 최대 1500 μm pk-pk이다. 이와 같이 압력맥동이 크게 발생하는 개도 45%에서 덕트 진동이

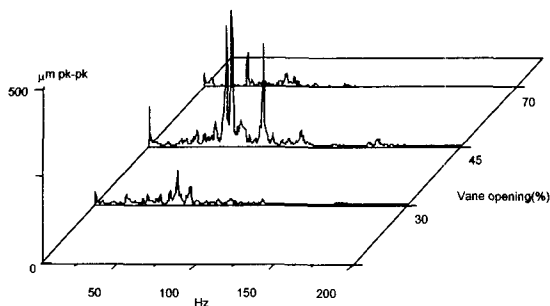


Fig. 8 Vibration spectrums of measuring point b

가장 높다는 것을 알 수 있다. B점에서 측정된 진동 스펙트럼을 개도 30, 45, 70%에 대해 Fig. 8에 나타내었는데, 진동치가 가장 높은 개도 45%에서는 주진동수가 50.5, 74 Hz임을 알 수 있다. 이 주파수는 개도 45%에서 압력맥동 주파수와 일치하고 있다. 이것은 전형적으로 입구측 콘 와류에 의해 발생된 과대한 압력맥동이 덕트 진동의 가진원으로서 작용하고 있음을 알 수 있다.

입구측 콘 와류 발생과 덕트 진동의 상관관계를 확인하기 위해 a, b점에서 측정된 압력맥동과 덕트진동 사이의 코히런스(coherence)를 분석하였다. Fig. 9는 a, b, c점에서 측정하여 얻은 주파수 30~100 Hz사이의 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.

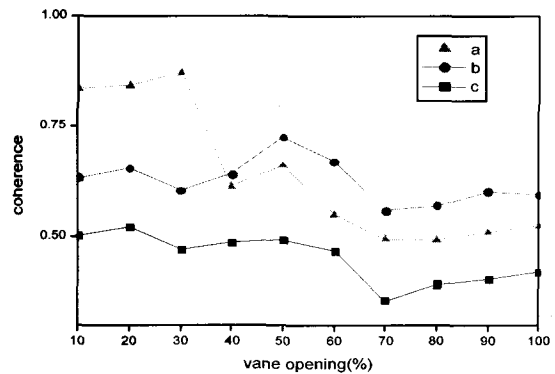


Fig. 9 Coherence between vibration and pressure pulsation

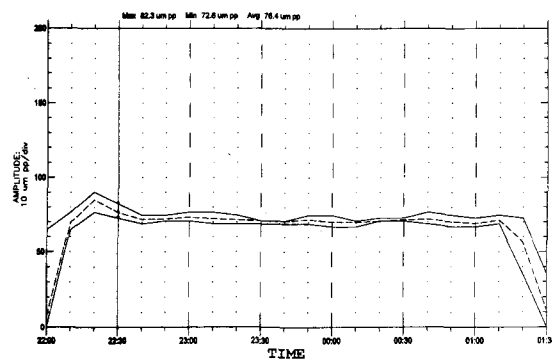


Fig. 10 Inboard x-direction shaft vibration of P. A. fan

지금까지 웬 출구 덕트의 진동문제에 대해 언급했는데, 대개 웬 내부에서 발생한 압력맥동은 웬 케이싱과 임펠러 로터의 진동을 수반할 것으로 생각할 수 있다. 그러나 웬 내부에서 발생한 입구측 큰 와류로 인한 과도한 압력맥동은 심각한 덕트 진동을 야기시키지만, 여러 문헌^(1,5) 및 경험으로는 임펠러 로터 및 베어링은 전혀 진동이 발생하지 않았다. Fig. 10은 웬에서 입구측 큰 와류가 발생, 과도한 압력맥동으로 덕트가 심하게 진동할 때, 임펠러 로터의 시간에 따른 축진동 진동추이를 나타낸 것이다. 주로 운전주파수의 1x 성분이며 약 80 μ m pk-pk 내외의 작은 축진동을 보였다. 이와 같은 이유로 문제 접근 단계에서 웬 자체의 문제를 간과하고 덕트 자체의 문제로만 접근할 경우, 문제 해결을 위한 방안 제시를 어렵게 할 수 있다.

3.3 대책

입구측 큰 와류의 발생 원인에 대한 이론은 아직

정확한 정설은 없지만, 여러 문헌^(1,5)에 의하면 입구측 베인 하류에서 발생한 흡입 소용돌이의 세차운동이 원인으로 소용돌이가 임펠러를 통과하면서 주기적으로 생성된 와류는 높은 압력맥동을 발생시킨다는 것이다. 입구측 큰 와류는 임펠러의 회전이나 임펠러 내의 흐름에 직접 관계없는 입구측 베인 하류의 선회류(swirling flow) 현상이므로 이를 방지하기 위해서는 입구측 콘 내의 유동에 대해 대책을 실시해야 한다. 가장 일반적 대책으로는 입구측 베인 후단에 소용돌이 발생을 억제하도록 회전축 반경방향으로 도설핀(dorsal fin)을 설치하는 것이다.^(1,5) Fig. 11은 도설핀 설치 전후의 P.A. 웬 흡입부분에 대해 나타낸 사진이다.

입구측 큰 와류를 억제시키기 위한 도설핀 설치 후, 덕트 내의 압력맥동 및 덕트 진동 변화 추이를 관찰하였다. 도설핀 설치 전후의 변화를 정량적으로 관찰하기 위해 도설핀 설치 전의 시험조건과 동일한 조건으로 웬 개도를 변화시키면서 시험을 실시하였다.

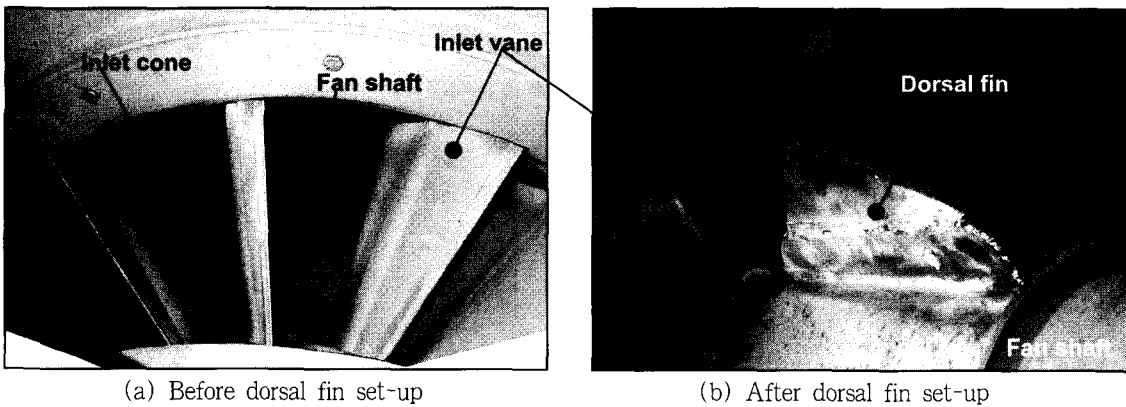


Fig. 11 Inlet vane controlled fan

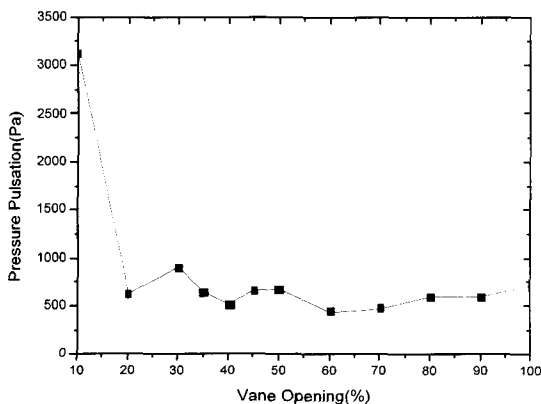


Fig. 12 Overall pressure pulsation at the discharge fan

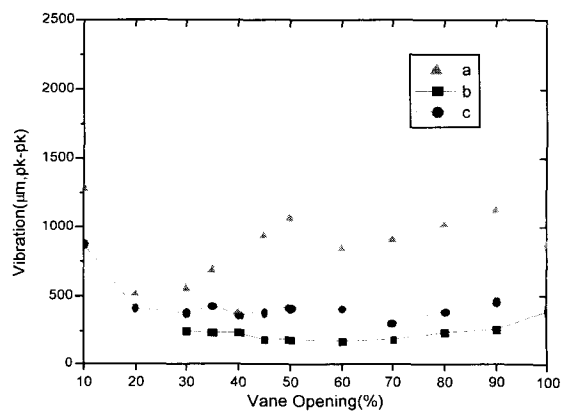


Fig. 13 Overall vibrations at the outlet duct

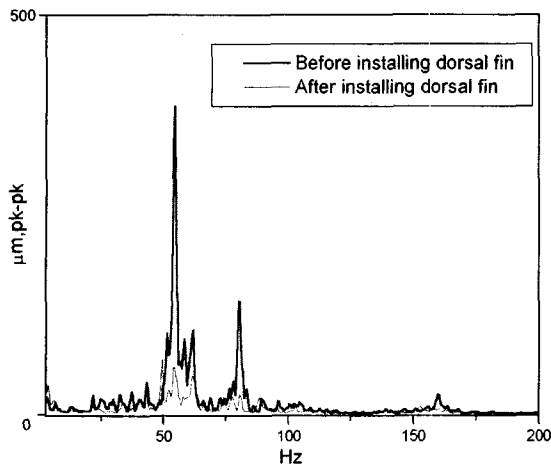


Fig. 14 Comparison of vibration spectrum between before and after installing dorsal fin at vane opening 40 %

도설 핀 설치 후, 입구측 베인 개도를 변화시키면서 a, b점에서 측정된 압력맥동을 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 입구측 콘 와류가 발생하는 구간인 40~60 %에서의 과도한 압력맥동은 완전히 사라졌음을 확인할 수 있다. 그리고 전체적으로 압력맥동은 상당히 감소하였음을 알 수 있다. 도설 핀 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 광대역(broad band) 분포로 나타났다.

팬의 입구측 콘 와류에 의해 야기된 압력맥동은 도설 핀 설치로 상당히 감소했음을 확인하였고, 덕트 진동의 가진원이 제거됨에 따라 진동 또한 매우 감소할 것으로 예측할 수 있다. Fig. 13에 도설 핀 설치 후, a, b, c점에서 측정된 덕트 진동치를 입구측 베인 개도에 따라 나타내었다. 그림과 같이 압력맥동 경향과 마찬가지로 도설 핀 설치 전 개도 40~60 %에서 매우 큰 진동치가 상당히 감소했음을 알 수 있다. 또한 Fig. 14에 베인 개도 40 %에서 도설 핀 설치 전의 진동 스펙트럼을 함께 나타내었는데, 도설 핀 설치 전의 큰 진폭을 가진 진동 성분은 완전히 사라졌음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

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 입구측 콘 와류라는 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 입구측 콘 와류는 압력맥동이 다른 요인에 비해 비교적 크고 팬 출구 측 덕트를 진동시켜 피로 손상을 야기시킨다.

(2) 입구측 콘 와류는 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, 베인 개도가 증가할수록 압력맥동 주파수는 감소한다.

(4) 입구측 콘 와류는 입구측 베인 후단에서 발생한 흡입 소용돌이의 세차운동이 원인이며, 따라서 입구측 콘 내의 유동을 제어할 수 있는 도설 핀 설치로 입구측 콘 와류를 방지할 수 있음을 제시하였다.

입구측 콘 와류의 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 수가 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Rogers, J. D. and Gilkey, C. H., 1975, "A Summary of Experiences with Fan Induced Duct Vibrations on Fossil Fueled Boilers," American Power Conference, Combustion Engineering Publication, TIS-4512.
- (2) Chen, Y. N., 1967, "Flow-induced Vibrations and Noise in Tube-bank Heat Exchangers Due to Von Karman Streets," ASME, 67-VIBR-48.
- (3) 장한기, 김승한, 이재현, 양정렬, 1999, "열교환

기에서의 유동유발 진동 저감,” 한국소음진동공학회논문집, 제 9 권, 제 6 호, pp. 1200~1209.

(4) 김철홍, 방경보, 주영호, 변형현, 2000, “75 MW급 발전용 보일러 관군에서의 음향공진에 의한 진동/소음 사례연구,” 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 150~155.

(5) Chen, P., Soundra-Nayagam, Bolton, A. N. and Simpson, H. C., 1992, “A Study of the Inlet

Vortex In a Centrifugal Fan,” Proceedings of the 11th Australasian Fluid Mechanics Conference, Australia, pp. 841~844.

(6) 김철홍, 주영호, 변형현, 2000, “화력 발전용 보일러 Duct/Fan 시스템의 진동현상에 대한 연구-Inlet vortex에 의한 과대진동 사례,” 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 82~87.