

시험관을 이용한 송풍기의 성능측정방법

최정구*, 김태영*

1. 송풍기 성능시험방법의 의미

송풍기나 압축기는 기체에 에너지를 주어 압력이 낮은 곳으로부터 높은 곳으로 송출하는 기계이다. 이는 기계적 에너지를 기체에 주어서 전압(압력 및 속도에너지)을 증가시키는 기계를 송풍기 또는 압축기라 하고, 반대로 전압을 이용하여 기계적 에너지를 내게 하는 기계를 공기터빈(air turbine) 또는 풍차로 분류한다. 작동원리는 액체를 취급하는 펌프와 같다.

단 기체는 압축성이므로 압축, 팽창에 따라 온도변화가 생김으로 인하여 기계의 소요 동력이 증대된다. 원심 및 축류 송풍기는 비교적 적은 유량에서부터 아주 많은 유량의 공기나 Gas를 순환시키는데 주로 사용되며, 각종 건물의 환기, 냉·난방 시스템, 공장의 생산설비 가동 등 기계공학의 거의 모든 분야에서 적용되므로 송풍기의 정확한 성능시험 방법 및 성능 특성을 이해하는 일은 무엇보다도 중요하다. 송풍기에 대한 실험실에서의 성능시험 측정방법은 주로 다음의 세 가지로 이루어지는데 이 교재에서는 흡입관 및 토출관을 갖는 송풍기의 Actual Test 방법에 대하여 다루기 한다.

- ① 실제 송풍기를 규정 회전수 및 상온 또는 규정 온도조건에서 시험하는 방법.
- ② 송풍기의 회전속도를 변화시킨 후 회전수 변화에 따른 풍량, 전압, 축동력 등을 규정회전수로 환산하는 방법.
- ③ 모델송풍기를 사용하여 성능시험을 실시하고 규정된 규격에 의해 실제송풍기의 상태로 성능을 환산하는 방법

2. 송풍기 성능시험에 필요한 시험 및 측정장비의 준비 (흡입 및 토출 시험관에 의한 시험방법)

2.1 풍량 측정장비

- 1) KS B 6311 송풍기 시험 및 검사방법에 따른 시험관
- 2) 이형 연결관 (Converging Connecting Duct)
- 3) Anemometer 및 열선 풍속계

2.2 압력측정장비

- 1) 경사 마노미터 (미압계) 또는 디지털 마노미터
- 2) U자관 마노미터 (수주 및 수은주) 또는 디지털 마노미터
- 3) 피토 관 (Pitot Tube)
- 4) 기압계, 습도계

2.3 전류 및 동력 측정장비

- 1) Digital Hook Meter or Multi Tester Meter
- 2) 전압계 (Voltage Meter)
- 3) 전류계 (Current Meter)
- 4) Control Panel
- 5) 현추식 (Cradal Type) 또는 비틀림 탁상식 반동 동력계
- 6) 토크미터 및 교정전동기 (Calibrated Motor)

2.4 기타 상태 측정장비

- 1) 진동계 (Vibration Level Meter)
- 2) 소음계 (Noise Level Meter)
- 3) 회전계 (Digital Strobe Scope)
- 4) 온도계 (디지털 온도계)

(주)삼원이앤비 기술연구소

3. 송풍기 시험관의 준비

3.1 토출 시험관의 경우

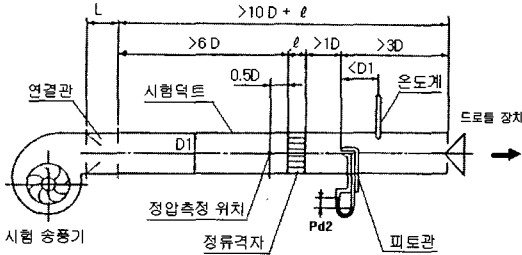


Fig. 1 토출 시험관 장치 (구형)

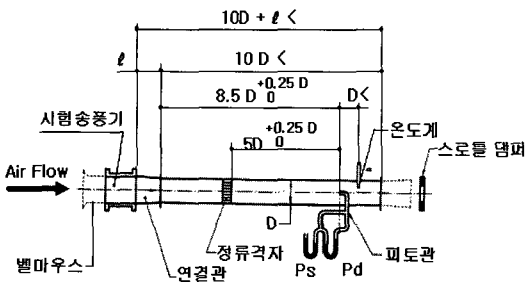


Fig. 2 토출 시험관 장치 (신형, 2001년 이후)

3.2 시험관의 구성 조건

- 1) 토출 시험관의 경우는 토출구 단면적의 5% 이내에서 시험관을 선정하고 흡입시험관의 경우는 송풍기 흡입구 단면적보다 7.5% 이상 12.5% 이하의 범위에서 선정한다.
- 2) 연결 덕트를 사용 할 경우 축소관은 덕트 축과 7.5°를 초과해서는 안되며, 확대관은 덕트 축과 3.5°를 초과해서는 안된다.

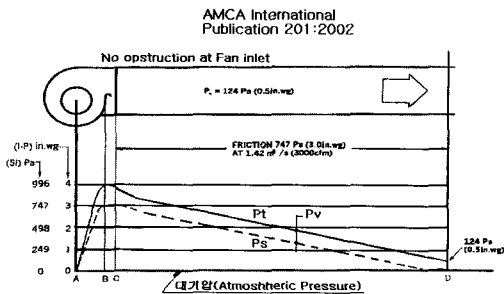


Fig. 3 토출시험관 압력측정 분포

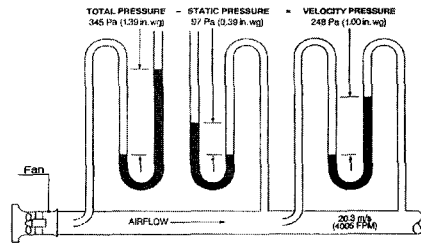


Fig. 4 토출시험관 전압-정압-동압 분포도

3.3 흡입시험관의 경우

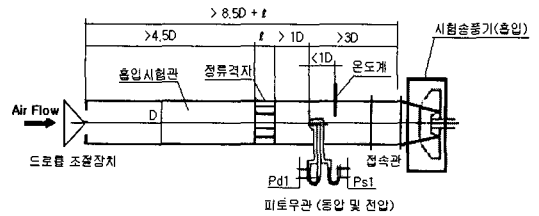


Fig. 5 흡입시험관 장치 (구형)

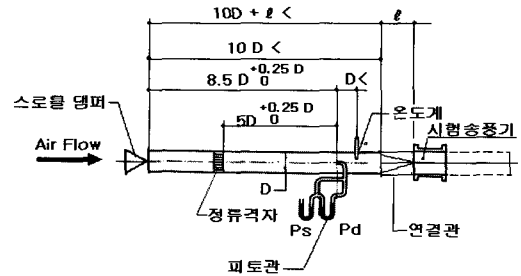


Fig. 6 흡입시험관 장치 (신형, 2001년 이후)

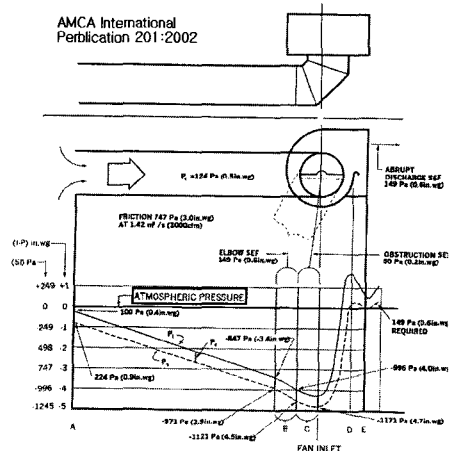


Fig. 7 흡입시험관 압력측정 분포

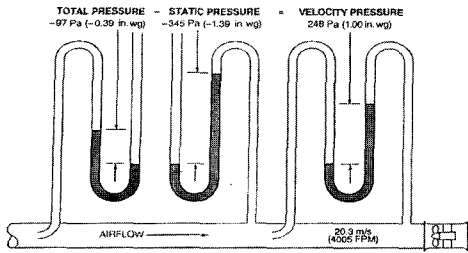


Fig. 8 흡입시험 전압-정압-동압분포도

- 3) 시험관 내 KS B 6311 (2001)의 그림 12 규격에 따라 정류격자를 반드시 설치하여야 하고, 피토티관 및 정압 측정위치는 정류격자의 하류 끝 단부터 상류 쪽으로 시험관 직경의 5~5.25배 사이에 위치 시켜야 한다.
- 4) 송풍기 토출구가 사각 단면인 경우 등가 직경으로 환산한다. (a, b는 사각 락트의 가로, 세로를 나타낸다)

$$D = \sqrt{\frac{1 \cdot a \cdot b}{\pi}}$$

3.4 피토티관 (Pitot Tube)의 구조 및 원리

피토티관 (Pitot Tube)이란 유체 (流體) 흐름의 총압 (總壓)과 정압 (靜壓)의 차이를 측정하고 그것에서 유속 (流速)을 구하는 장치이다. 1728년 프랑스의 H. 피토티가 발명하였다.

아래그림과 같이 끝부분의 정면과 측면에 구멍을 뚫은 관을 말한다. 이것을 유체의 흐름에 따라 놓으

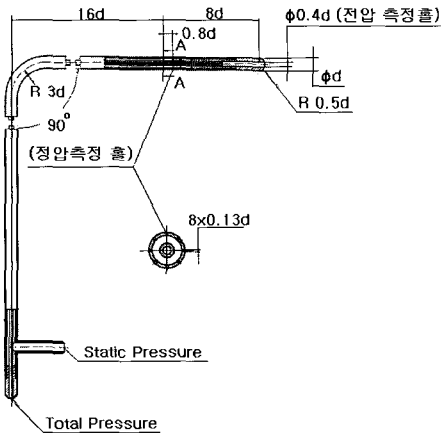


Fig. 9 피토티관(Pitot Tube)의 구조 (KS B 6311 2001)

면 정면에 뚫은 구멍 A에는 유체의 정압 (Static Pressure)과 동압 (Dynamic Pressure)을 더한 총압이, 측면 구멍에는 정압이 걸리므로 양쪽의 압력차를 측정함으로써 베르누이의 정리에 따라 흐름의 속도가 구해진다. 풍속의 측정, 항공기·선박 등의 속도계 (대기속도계·유압식 측정기)에 이용되고, 유속의 측정을 바탕으로 흐름의 양을 재는 유량계에도 사용된다.

3.5 시험관에서 피토티관의 이송 및 측정위치

시험관 내 피토티관의 측정점 이송 위치는 아래 그림 10과 같이 대수 선형법칙에 따라 각 지점에 대하여 위치되어 있다. 이들 각 위치에서 측정된 속도의 산출평균 값은 여러 가지 속도 분포에 대한 그 측정 단면을 흐르는 평균 속도가 된다.

4. 시험실에서 송풍기성능 측정항목

- 1) 시험실의 대기조건 측정 (대기압, 온도, 습도, 흡입공기 비중량)
- 2) 시험관의 직경
- 3) 압력측정(정압, 동압)
- 4) 회전수
- 5) 토출온도 측정

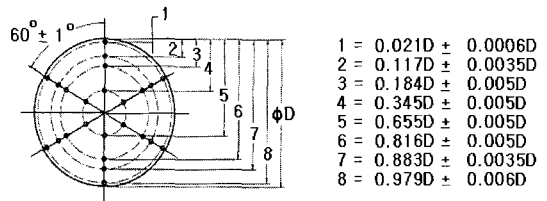


Fig. 10 시험관 내 피토티관 이송위치

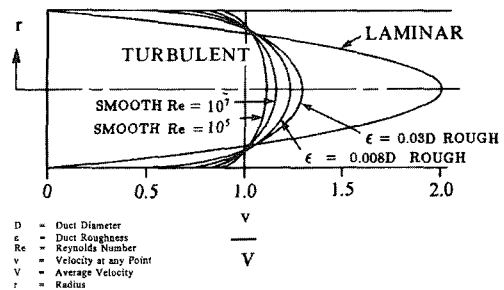


Fig. 11 시험관로 내 조도 및 레이놀드 수에 따른 속도분포

- 6) 시험상태의 전압, 전류측정
- 7) 기계적 상태 측정 (베어링온도, 소음, 진동, 누설 상태 시험)

5. 시험실에서 송풍기 성능측정 방법 및 요령

- 1) 측정 전 시험실의 대기압 (ρ_0), 시험실 온도, 습도를 측정한다. 대기 밀도 (ρ_0) 는 보통 시험장소에서 측정한 건구온도 (t_{d0}), 습구온도 (t_w), 및 대기압 (P_b)으로부터 다음공식을 사용하여 결정하여야 한다.

포화증기압

$$P_e = 3.25t_{w0}^2 + 18.6t_{w0} + 692 \text{ [Pa]}$$

증기의 분압

$$P_p = P_e - P_b \left(\frac{t_{d0} - t_{w0}}{1.500} \right) \text{ [Pa]}$$

대기밀도

$$\rho_0 = \frac{P_b - 0.378 P_p}{R(t_{d0} + 273.2)} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

(R: 기체 상수 287.3 J/kg · K이다)

위 포화증기압 계산공식은 5~30℃ 사이의 t_{w0} 범위 내에서 비교적 정확한 증기의 분압 (P_e)의 값을 제공해 준다.

- 2) 원심형 송풍기의 시험은 시험관의 스톱을 조절장치 (댐퍼)를 완전히 닫고 송풍기를 기동한다. 그러나 축류형 송풍기의 경우 댐퍼를 완전히 닫고 기동하면 기동 후 송풍기의 전류가 정적전류 이상으로 되는 경우가 있으므로 댐퍼를 완전히 열고 기동하여야 한다.
단, 압력비가 높은 고압 송풍기의 경우 댐퍼를 닫으면 Surging이 발생할 수도 있으므로 이 경우는 Surging 영역 밖의 최저 댐퍼 개도로 송풍기를 기동한다.
- 3) 송풍기 기동과 동시에 기동전류 (Starting Current) 및 기동시간 (Starting Time)을 측정한다.
- 4) 시험관에서 최고 정압 (Static Pressure)을 측정한다.
- 5) 시험관의 공기 밀도 (ρ)를 측정한다. 대기 밀도 (ρ_0)를 시험관 단면 x에서의 압력 (P_{sx})과 온도 (t_{dx})에 대한 값으로 보정하여 계산한다.

- 6) 송풍기의 공기밀도
송풍기의 공기 밀도 (ρ)는 대기밀도 (ρ_0), 송풍기 입구전압 (P_{d1}), 그리고 송풍기 입구의 정체온도 (t_{11})로부터 다음식을 사용하여 계산한다.

$$\rho_x = \rho_0 \left(\frac{t_{d0} + 273.2}{t_{dx} + 273.2} \right) \left(\frac{P_{sx} + P_b}{P_b} \right) \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{P_{d1} + P_b}{P_b} \right) \left(\frac{t_{d0} + 273.2}{t_{11} + 273.2} \right) \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

- 7) 송풍기의 성능 측정포인트
송풍기 사양점 (규정상태) 앞 단에서 4~5 포인트, 사양점을 지나 1~2 포인트 및 Damper Full Open 상태까지 총 6~7 포인트에 걸쳐 스톱을 조절 장치를 열어가며 각 포인트에 걸쳐 정압, 동압, 전류 및 전압, 회전수, 진동 및 소음, 베어링 온도를 측정하고 기록한다.

- ① 동압 : 평균속도에 대응하는 동압 (P_{v3})은 각 각 측정한 압력 (P_{v3-n})의 제곱근을 합한 다음, 측정횟수 (n)로 나눈 제곱근 평균값을 제곱한 제곱근 평균방법으로 계산한다.

▶ 피토판으로 측정된 동압 횟수의 평균값 산출방법

$$P_v = \left(\frac{\sum \sqrt{P_v}}{n} \right)^2 \text{ [Pa]}$$

▶ 시험실에서 규정풍량 (100%)일 때, 예상 동압 산출방법

$$\therefore P_r = \frac{V^2 \rho}{2g} \text{ [mm.Aq]}$$

- ② 유속 (Flow Velocity)의 환산
평균속도 (V_3)는 횡단면에서의 공기밀도 (ρ_3)와 이 단면에서의 동압 (P_{v3})을 가지고 다음 공식으로 환산한다.

$$V_3 = \sqrt{\frac{2g P_{v3}}{\rho_3}} \text{ [m/s]}$$

(참자 3은 측정위치에서의 비중량 및 유속임)

③ 송풍기 유량 (Flow)의 환산

$$Q = 60 V_3 \left(\frac{\pi D_3^2}{4} \right) \left(\frac{\rho_3}{\rho} \right) \text{ [m}^3\text{/min]}$$

(ρ : 송풍기의 공기 밀도 kg/m³)

④ 송풍기의 소요동력 측정

각 측정 점에서 전류 및 전압을 측정하고 다음과 같이 소요동력을 환산한다. 원칙적으로는 송풍기 소요동력의 측정은 측정값 2%의 정확도를 갖는 반동동력계 및 회전력 검출 소자로 측정된 회전력 (토크미터) 또는 교정 전동기 (Calibrated Motor)에서 측정된 전기적 입력으로부터 결정되어야 하나, 이러한 실험설비가 마련이 되지 않은 경우는 아래의 공식과 같이 시험모터의 결선 (R,S,T상)에서 후크 미터로 직접 전류 (Current) 및 전압 (Voltage)을 측정하여 모터의 효율 및 역률을 대입하여 송풍기의 출력을 환산한다.

$$P = \frac{\sqrt{3} E I \eta_m \cos\phi}{1,000} [kw]$$

E : 측정전압의 평균값 [V]
I : 측정전류의 평균값 $(R+S+T/3)$ [A]
 η_m : 모터의 효율 [%], 모터 메이커의 자료에 의함
 $\cos\phi$: 모터의 역률 (Power Factor) [%]

⑤ 송풍기의 출력 (H_0) 환산

만일 공기를 비압축성이라 가정하면 송풍기 출력 (H_0)은 송풍기 유량 (Q)과 전압 (P_t)과 의 곱에 비례할 것이다. 그러나 공기는 압축성 유체이기 때문에 열역학적 효과가 출력에 영향을 미치게 된다. 그러므로 출력을 Q , P_t , K_p 에 비례하도록 압축계수 K_p 를 사용하여야 한다.

$$x = \frac{P_t}{P_{t1} + P_b}$$

$$z = \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \left(\frac{H/Q}{P_{t1} + P_b}\right)$$

들 사용 하여 다음과 같은 식으로 결정 할 수 있다.

$$K_p = \left(\frac{\epsilon(1+x)}{x}\right) \left(\frac{z}{\epsilon(1+z)}\right)$$

⑥ 헤드 (Head, H) [m]

헤드란 송풍기의 흡입구와 토출구 사이에 압축과정으로 임펠러에 의해 단위중량의 기체에 얻어지는 가역적 상사량 [kg · m/kg]을 말하며, 그 기체柱의 높이로 표시되는 것을 헤드 (Head, H)라고 부른다.

$$H = \frac{P_{t2}}{\rho} [m]$$

H : 헤드(Head), [m]
 P_{t2} : 송풍기 전압 [mmAq]
 ρ : 흡입공기 비중량 [kg/m³]

그러나 이것은, 토출 절대압력과 흡입절대압력의 비, 즉 압력비가 약 1.03 (약 310 mmAq) 이하에 국한된다.

압력비 1.03이란 $P_2/P_1=1.03$ 이기 때문에 P_1 (표준대기압) 760 mmHg (=10,332 mmAq)을 기준할 때, 송풍기의 절대압력은

$$P_2 = 10,332 * 1.03 = 10,642 \text{ mmAq}$$

$$\therefore P_2 = 10,642 - 10,332 = 310 \text{ mmAq가 된다.}$$

또한 압력비가 1.03 이상의 압력에서는 송풍기의 압축과정을 단열 변화라 하면 그 단열 변화는 아래의 식으로 표시할 수 있다.

$$H_{ad} = \frac{k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] [m]$$

H_{ad} : 단열 헤드 [m]

k : 단열지수 C_p/C_v

(공기의 경우 $k = 0.24/0.172 = 1.4$ 이다)

P_2, P_1 : 토출 및 흡입 절대전압 [mmAq]

ρ_1 : 흡입공기 비중량 [kg/m³]

⑦ 송풍기의 효율 (Efficiency of Fan)

송풍기의 이론공기동력은 압력비 (P_2/P_1) 1.03 미만의 경우는 다음식으로 구할 수 있다.

$$L = \frac{Q P_t}{6,120}$$

또한, 압력비가 1.03 이상인 경우는 다음과 같이 이론 공기동력을 구한다.

$$L_{ad} = \frac{k}{k-1} \frac{Q P_1}{6,120} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] [kW]$$

Q : 풍량 [m³/min]

P_t : 전압 [mmAq]

송풍기의 전압효율 계산

$$\eta_t = \frac{Q P_t K_p}{H}$$

H : 송풍기 출력 [kW]
Kp : 압축계수

또는,

$$\eta_t = \frac{L \text{ or } Lad}{L_s} \times 100 \quad [\%]$$

L, Lad : 이론 공기동력 [kW]
Ls : 소요동력 (축동력) [kW]

6. 송풍기의 시험성능을 규정상태로 환산하는 방법

시험실 내에서 시험하는 동안 공기 비중량과 회전속도는 측정할 때마다 약간씩 변화할 수 있다. 그러므로 시험조건 하에서 계산한 결과들을 규정상태의 비중량 (ρ) 이나 규정상태의 회전수 (Nc)로 환산하여 송풍기의 성능을 표시하여야 한다. 이것은 규정상태의 비중량 (ρ)이 실제 시험 비중량 (ρ)의 10% 이내, 규정 회전수 (Nc)는 시험 회전수 (N)의 5% 이내일 때 의미를 갖는다.

$$Q_c = Q \left(\frac{N_c}{N} \right) \left(\frac{K_p}{K_{pc}} \right) \quad [m^3/min]$$

$$P_{tc} = P_t \left(\frac{N_c}{N} \right)^2 \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right) \left(\frac{K_p}{K_{pc}} \right) \quad [mm.Aq] \text{ or } [Pa]$$

$$H_c = H \left(\frac{N_c}{N} \right)^3 \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right) \left(\frac{K_p}{K_{pc}} \right) \quad [kW]$$

$$P_{sc} = P_t - P_v \quad [mm.Aq] \text{ or } [Pa]$$

7. 송풍기 성능의 판정기준

7.1 풍량 및 압력 판정기준 (I)

송풍기 전압 혹은 정압, 또는 유량의 허용범위가 특별히 제한되어 있지 않은 경우에는 모든 조건이 규정상태 이상의 성능이어야 한다.

7.2 풍량 및 압력 판정기준 (II)

송풍기 전압 혹은 정압, 또는 풍량의 허용범위가 특

별히 제한되는 경우는 성능곡선이 다음 중 어느 한 조건을 만족시켜야 한다.

- 1) 규정송풍기 전압 또는 정압의 풍량이 규정 풍량의 100% 이상, 110% 이하여야 한다.
- 2) 규정송풍기 전압 또는 정압이 규정전압 또는 정압의 100% 이상, 106% 이하여야 한다.

7.3 축동력 판정기준

소요동력은 규정 풍량에서 전동기의 규정동력을 초과하지 않아야 한다.

7.4 운전상태 판정기준

- 1) 베어링 온도는 지정이 없는 경우에는 주위 공기 온도보다 40℃ 이상 높지 않아야 한다.
- 2) 진동은 특별히 규정이 없는 한 아래의 진동허용값을 참조한다.

참고 : 진진폭 a[μm]와 진동 속도 v[mm/s]의 관계는 다음과 같다.

$$v = \frac{a \omega}{2 \times 10^3} = \frac{a \pi N}{6 \times 10^4}$$

여기서 ω : 각속도 = $\frac{2\pi N}{60}$ [rad/s]

N : 송풍기 회전수

진동의 허용값 (참고치) (KS B 6311 :2001)

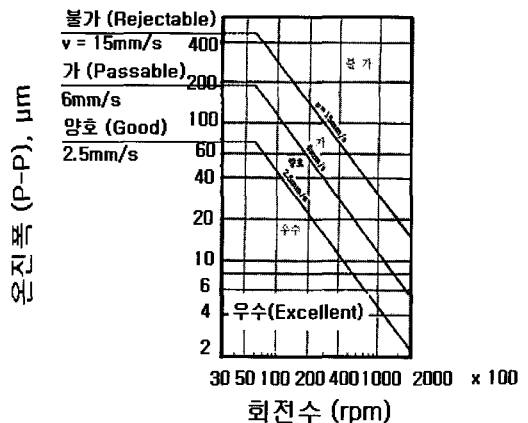


Fig. 12 진동의 허용값(참고)