

팬 소음

이 승 배 (인하대학교 기계공학과)

1. 머리 말

우리의 일상생활에서 제일 쉽게 접할 수 있는 유체기계 중의 하나가 팬(fan)일 것이다. ISO 13349에 나타난 팬의 정의를 살펴보면, "팬은 기계적인 에너지를 받아서 날개(blade)들과 함께 취부된 한 개 혹은 여러 회전차(impeller)에 의해 공기 혹은 다른 기체가 연속적으로 흐르도록 기계에 에너지를 사용하며 단위질량당 일에너지가 25 KJ/kg내의 범위를 갖는다"라고 설명된다. 일반적으로 국내에서는 토출압력이 1,000 mmAq(10 kPa) 이하의 것을 팬이라 하고, 1,000~10,000 mmAq(10~100 kPa) 범위의 것을 블로워라고 한다. 팬을 포함한 이러한 송풍기는 회전차를 통과하는 기류의 방향에 따라 축류식, 원심식, 사류식, 횡류식으로 다시 구분된다.

국내에는 약 수백개의 송풍기 제조 회사가 있으며, 이들 대부분은 외국회사의 자료를 이용하여 송풍기를 제작하거나, 설계된 제품을 스케치하여 제작하고 있으며 시험설비도 갖추지 못하고 있는 곳이 대부분이다. 송풍기 기술은 크게 설계기술과 생산(제조)기술로 나눌 수 있으며, 설계기술은 유체역학적 설계, 저소음설계, 베어링 등 로터부 저진동설계 등 여러 종류의 핵심기술로 이루어진다. 송풍기를 제작, 판매하는 중소기업체 뿐만 아니라 여러 종류의 소형팬을 사용하는 대기업 중심의 가전업체에서도 제품을 설계하는 과정에서 외국과의 기술 제휴로 그 설계 데이터를 들여오거나, 타 회사의 자료를 입수하여 유체기계의 기본이론을 바탕으로 이를 응용, 생산을 해 오고 있다. 그러나 송풍기의 용도가 다양해지고 개방된 시장내에서 그 기술경쟁 또한 치열해짐에 따라 생산기술에 의한 가격 경쟁력 이외에 성능, 소음이나 품질차별화를 더불어 요구하고 있다.

최근 들어 대기업에서는 가전제품에 여러 종류의

팬이 사용되고, 이들은 가전제품에서 중요한 기능을 수행하고 있을 뿐만 아니라 주요한 소음원이라는 관점에서 저소음화에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 따라서 본 글에서는 주로 풍량이 100 m³/min 미만의 팬소음에 대한 현재의 연구동향을 분석하려고 한다.

2. 팬 소음 측정 방법

그동안 팬소음 측정절차를 표준화하려는 많은 시도가 있어 왔으며 그 가운데는 팬소음 측정을 위한 잔향실 방법인 AMCA Standard 300-85 그리고 덕트 내부에서 측정하는 방법인 ANSI/AMCA 330-86규격, ISO 5136 등이 그것들이다. 소형팬과 같은 공기 유동장치(air-moving device)에 대하여는 ANSI Test Plenum이 부하조건에서의 팬소음방사를 측정하기 위하여 사용되며, 이 측정방법은 ANSI S12.11-1987에 설명되어 있다. 소형 프로펠러 팬과 원심형 팬에 의한 소음 계측을 이용, 소음상사성 연구하기 위해 Lee 등⁽³⁾은 ANSI Test Plenum 방법을 사용하였다.

그러나 일반적으로 팬은 덕트와 연결되어 소음이 방사되므로 이러한 덕트의 임피던스(impedence)가 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 이러한 덕트 내부에서의 소음파워측정을 위하여 ISO 5136에서는 원형 단면을 갖으며 덕트 끝부분에 음향이 무반사되도록 고안된 장치 내에서의 측정을 규정하고 있다. 또한 측정하는 마이크로폰에서의 난류압력변동에 의한 영향을 최소화하기 위하여, nose cone을 측정용 튜브의 상부에 설치한 후 튜브 벽면에 설치한 슬릿을 통하여 음압이 전달되도록 고안된 장치를 마이크로폰에 연결하여 사용한다. 음압파워레벨은 1/3옥타브밴드 파워 혹은 A 가중 파워측정으로 이루어지며, 1/3옥타브밴드의 중심주파수 범위는 100 Hz에서 10,000 Hz까지이다. 또한 덕트 끝부분에 설치된 무반사장

치(anechoic termination)는 각 옥타브중심 주파수에서 허용되는 최대 반사계수내의 것이어야 한다.

3. 웬소음의 음향학적 상사성

주문 생산하는 중소기업체에서 발주된 웬의 성능을 만족하도록 설계를 하거나, 가전업체 등의 각 제품에 필요한 웬의 설계와 개발의 단계에서 웬에 의해 발생하는 예측 소음레벨을 평가하는 문제가 대두된다. 이와 같은 평가는 주어진 시스템에 필요한 웬의 적용성이나, 만약 필요하다면 소음저감을 위한 최적화 방법을 선택하는데 요구된다. 따라서 음향학적 상사성에 기초를 둔 다양한 근사화된 계산방법이나, 공기역학과 웬의 소음변수들 사이의 실험적인 관계식들이 매우 유용하게 활용되어진다. 예를 들면 축류웬의 경우 다른 변수들을 고정시키고 로터의 반경을 두 배로 만들면 소음이 약 6 dB 가량 증가하며, 날개수를 두 배로 만들면 3 dB 가량, 날개코드 길이를 두 배로 길게하면 약 3 dB 가량, 대표적인 피치각을 1° 증가시키면 2 dB 가량 증가한다는 등의 기본적인 예측이다.

Madison⁽⁴⁾은 웬으로부터 발생하는 소음파위가 $(\Delta P_s)^2 Q$ 에 비례한다고 하는 웬소음법칙을 확립하였다. 여기서 ΔP_s 는 웬에 의한 정압상승, Q 는 유량이다. 이 관계는 로터를 지나는 공기유동이 기하학적 상사성을 갖는 웬들에서는 상사하다는 가정에서 유도되었으며, 임펠러 끝단속도 V_{tip} 와 임펠러 직경 D 으로 표시하면 $D^2 (V_{tip})^5$ 에 비례하게 된다. Maling⁽⁵⁾은 Π 이론을 사용하여 소음파위는 $D^{0.33} (V_{tip})^{5.67}$ 에 비례한다고 하였다. 따라서 웬소음파위의 날개끝단 지수는 자유음장의 단극음원의 지수인 (V_{tip}) 의 4승도, 쌍극음원의 (V_{tip}) 의 6승도, 더욱이 사극음원의 (V_{tip}) 의 8승도 아님을 알 수 있다. 이러한 소음법칙 지수에서의 불일치는 주로 고려되는 주파수범위, 유량계수의 범위, 그리고 웬의 크기의 다양한 범위에서 기인되어진다. Lee⁽³⁾에 의하면 소형 원심웬의 경우는 유량범위에 관계없이 소음파위가 (V_{tip}) 의 6.68승에 비례한다고 하였다. 상기의 기술은 주로 원심형 웬에 적용되는 것으로, 축류형 웬의 경우에는 약간 낮은 지수값을 갖으며 특히 풍량이 $50 \text{ m}^3/\text{min}$ 이하의 프로펠러형 웬에서는 유량범위에 따라서 웬날개 위의 유동모드의 변화로 인한 상사성 지수의 급격한 변화가 있게 된다. 예를 들면 냉장고, 전자렌지 등에 사용되는 소형프로펠러웬은 유량계수($\phi = Q/(ND^3)$)가 약 0.3 이내에서 작동하여 축방향의

유동보다는 반경방향의 유동이 우세하며, 에어컨 실외기와 같이 고유량계수에서 작동하는 프로펠러웬은 축방향의 유동이 약간 우세한 축류웬의 유동패턴을 갖는다. (강신형 등⁽¹⁰⁾) 따라서 소음도 작동유량 범위에 알맞는 상사식의 계수를 선택하는 것이 바람직하다.

4. 입구유입조건

입구유입조건 변화는 웬, 압축기, 펌프 등의 유체기계에서 설계 작동점으로부터 이탈의 원인이 되며, 특히 회전하는 스톨이나 서지현상 부근의 유량범위에서 웬이 작동할 때 입구조건 주기적인 변화는 유동의 불안정모드를 가진하며, 성능 및 소음을 악화시킨다.

Ariga 등⁽⁶⁾은 입구유동 불균일 형태 중 허브측 불균일성, 끝단측 불균일성, 그리고 회전방향의 불균일성에 대하여 저속회전의 압축기의 임펠러 내부유동속도를 계측하였으며, 특히 입구유동 불균일성은 효율 및 서지(surge)한계에 부정적인 영향을 미친다고 하였다. 조강래 등⁽⁷⁾은 두 가지 형태의 프로펠러 웬에 대하여 덕트 입구의 상대위치, 덕트 주의의 배플의 크기가 웬의 특성 및 덕트 입구 전방의 유동장에 미치는 영향을 연구하였다. Atassi 등⁽⁸⁾은 불균일 유입조건시에는 아음속 유동내의 이차원 에어포일로부터의 소음방사특성을 계산하였다. 그에 따르면 고주파수의 입구유동조건시 비결집(non-compact)의 영향으로 인한 다중방향성을 갖는다.

Kiya 등⁽⁹⁾은 후류와 물체의 상호작용소음을 연구하기 위하여 엇물림 방식으로 배치된 실린더열 중 상류의 실린더에서 웨딩되는 와류와 하류실린더의 상호작용에 의한 소음실험을 수행하였다. 또한 최근에는 저속의 축류웬 저소음화를 위해 날개스weep(sweep)을 사용하는데, 이 경우 웬상류에 장애물 설치시 장애물의 웬과의 거리, 설치방향에 따른 sweep 날개의 소음저감 효과에 대한 영향이 Wright 등⁽¹¹⁾에 의해 분석된 바 있다.

5. 웬 소음이론

난류 유동소음은 크게 제트에서의 소음과 같은 난류 전단유동에 의한 것과 잠수함 음향센서, 자동차차체에 의한 공력소음, 웬날개에 의한 소음 등과 같은 물체표면과의 상호작용으로 인한 것으로 구분된다. 상기의 난류 유동소음 중 웬날개에 의한 소음과

같은 로터(rotor)소음은 난류유동장을 통과함으로 발생하는 비정상적 표면압력분포의 난류유입소음(turbulent injection noise)과 난류경계층 및 날개후단과의 상호작용에 의한 소음, 삼차원 비정상 끝단(tip) 유동으로 인한 끝단소음, 그리고 비정상적 혹은 주기적인 부하로 인한 이산소음으로 구분된다.

Lee⁽³⁾는 팬에서의 광대역 소음 및 이산소음을 소음원 함수와 소음전파 함수로 분해하여, 각 유량계수에 따른 소음의 특성으로부터 날개 주위의 유동구조를 제안하였다. 또한 최근 연구에서 Lee⁽¹²⁾는 소음원의 방향성 특성을 파악하기 위해, 교호상관계수기법(cross-correlation)을 이용하여 조직화된 유동구조로 인한 소음방향성을 계측하였다. 최근 선진국에서는 항공기 터보프롭팬이나 헬리콥터 날개의 소음을 해석하여 예측하는 기술을 자동차용 라디에타 냉각팬의 저소음 설계에 적용하는 등 이 분야의 연구가 더욱 활발해지고 있다. 즉 회전하는 날개에 의한 광대역소음은 날개 위에 이극소음원을 분포시키는 Ffowcs Williams⁽¹³⁾의 방법과 이차원 및 삼차원 에어포일 소음실험에서 얻어진 결과를 스케일링하는 시성적 방법으로 크게 양분된다. 또한 이산소음계산은 주로 헬리콥터 소음을 예측하기 위해 NASA Langley Research Center에서 개발한 WOPWOP 프로그램이 주로 사용된다. 그러나 상기방법 모두 날개주위의 정확한 난류유동장으로부터 계산된 날개 표면 변동압력을 이용하는 원거리장 소음계산과는 거리가 있다.

임펠러가 회전하는 원심팬의 경우는 3절 팬소음의 음향학적 상사성에서 설명한 바와 같이 프로펠러팬보다 소음상사성이 유량계수의 변화에 의한 영향을 적게 받는다. 즉 원심형 팬은 임펠러에 가해지는 주기적인 양력의 변화가 날개통과주파수(blade passage frequency)로 나타나며, 임펠러의 회전에 의해 유발된 난류유동의 교란과 임펠러 날개 끝단에서 흘러지는 후류와류에 의한 비정상압력의 교란은 광대역소음으로 나타난다. 따라서 근사적 소음계산에서 사용되는 압력변동의 상관면적(correlation area)과 와류가 흘러지는 무차원 주파수인 스트롤(strouhal)수가 유량계산에 따른 영향을 받지 않고 일정한 이극소음원 분포를 나타낸다. 따라서 임펠러 날개는 이산와류(discrete vortex)로 케이싱은 용출패널(source panel)로 모사하여 임펠러 각 요소에서의 힘을 계산한 후 Lawson 등⁽¹⁴⁾의 공식을 사용하여 소음을 예측하는 이덕주 등⁽¹⁵⁾의 방법은 합리적 접근이다.

6. 팬의 최적설계

축류형 팬중 많이 사용되는 프로펠러팬의 성능과 관련된 변수들 중 유속관련 변수는 평균축방향 속도 (V_a), 유입스월속도(V_{oi}), 유출스월속도(V_{oo})가 있으며, 팬 형상과 관련된 변수들로는 날개유입각도(β_i), 날개유출각도(β_o), 캠버각(θ), 스테저각(ζ), 이탈각(δ), 영각(α), 코드길이(L), 코드피치비, 스윙각 등이 있다. 따라서 모든 프로펠러팬의 설계는 작동점에서 필요한 성능을 발휘하도록 이들 변수들을 조합하는 것이다. 그러나 많은 수의 변수로 인해 각 변수들의 성능에 대한 독립적 영향의 평가는 매우 어려우며, 특히 소음에의 기여도 평가는 거의 연구가 전무한 실정이다. 이러한 프로펠러팬의 설계는 다음과 같은 순서로 이루어지는 것이 바람직하다. 즉 작동점에서의 주어진 유량 Q 및 정압상승 ΔP 를 이용하여 2차원 설계를 하며, 이를 이용하면 2가지의 변수를 변화시킬 수가 있다. (예를 들면, 회전수와 유입각 등) 이와 같이 설계변수를 이용하여 작동점에서의 효율이 최고인 형상을 기준 팬으로부터 설계변수를 변경하여 얻게 된다.

일반적으로 팬에 의한 소음은 팬에 걸리는 양력과 연관이 있으며, 이를 수식으로 표현하면,

$$E = \frac{\rho_o}{48\pi a_o^3} \int_{SPAN} CW^3 \left(\left[\frac{\partial C_L}{\partial t} \right]^2 \right) dy$$

로 표시될 수가 있다. Fukano(1975) 등⁽¹⁶⁾은 팬의 레이놀즈수를 이용하여 난류소음을 예측하는 식을 유도하였다. 그러나 Fukano 등의 방법에서 사용하는 압력변동양들의 상관면적(correlation area)이나 스트롤수가 유량계수가 변하면서 유동모드가 바뀔때 따라 일정치 않으며, 구조적 유동구조로 인한 사극 이상의 소음원의 기여가 현저해지는 소음현상을 원심형팬에서와 같이 쉽게 도식화하기가 쉽지 않다.

Lee(1995) 등⁽³⁾은 최근 양력계수변화의 크기를 예측하여 실제 소음크기를 구하는 방법을 유도한 바가 있다. 또한 팬소음의 날개통과주파수의 하모닉 성분의 소음은 이극소음원을 분포하여 예측이 가능하다. 따라서 일차적으로 설계된 팬 날개의 양력의 크기와 가장 큰 에너지를 갖는 주파수성분을 이용하여 비소음을 예측하여 형상을 1차적으로 저소음이 되도록 한다.

첫단계에서 제안된 팬의 형상을 기초로 하여 반경방향으로의 속도성분의 존재와 설계 물리량들의 반경방향으로의 변화를 고려한 설계가 있도록 한다.

이 단계에서는 스위프각의 조정으로 날개 위의 유동이 날개끝단 유동을 가능한 많이 일어나지 않도록 하며, 유출스윙에너지가 정압으로 가능하면 많이 회복하도록 설계한다. 소음의 크기에는 양력의 크기와 에너지를 갖고 있는 길이 스케일이 중요하지만, 소음의 방향성은 피치코드비에 의해 많이 좌우된다. 따라서 2차 설계에서는 주로 스위프각과 피치코드비의 반경방향의 변화에 따른 소음의 증감을 Mock-up제작 및 시험에 의해 파악한 후 최종 설계안을 확정하는 것이 일반적이다.

또한 원심형팬의 형상과 관련된 변수들로는 웬의 내경(D_i), 외경(D_o), 입구각(β_i), 출구각(β_o), 입구쪽 폭(b_1), 출구쪽 폭(b_2) 등이 있으며, 이승배(1995) 등⁽¹⁷⁾은 무차원의 소음 파워 스펙트럼을 소음원함수와 소음전파 함수로 분해한 후, 고려되는 유량계수의 범위에서 음향학적 상사성을 갖는 소음원함수의 저주파영역에 속한 주요 스트롤수에서의 dB 레벨을 목적함수로 정하여 Formal Approximation 방법을 이용하여 최적설계를 수행하였다.

다익웬의 일종인 횡류웬은 일반적으로 얻어지는 압력상승이 동일 주속의 다른 종류웬에 비해 비교적 높기 때문에 원하는 압력상승을 얻기 위해 웬의 직경과 작동회전수를 작게 할 수 있는 특징을 갖고 있다. 그리고 웬과 함께 유로구조를 형성하는 스테빌라이저와 케이싱 등 덕트구조가 횡류웬의 성능 및 소음 특성에 큰 영향을 주므로, 웬날개와 스테빌라이저 구조와의 간섭 등에 대한 연구가 활발하며, 특히 상호간섭에 의한 이차유동의 제어를 통한 소음저감 연구가 진행중이다.

7. 웬소음저감 및 제어

프로펠러웬과 관련된 소음저감을 위해서 Sato 등⁽¹⁸⁾은 벨마우스와 웬의 상대적 무차원 거리비, 무차원 반경비, 무차원 폭비 뿐만 아니라 이차유동이 일어나지 않도록 하는 입구부 설계에 의해 1~2 dB의 소음저감을 발표한 바 있다. Hasemann 등⁽¹⁹⁾은 날개팁간극 유동부근에 난류 발생기를 설치하여 기존에 끝단 유동에 의한 날개통과 주파수의 0.7배, 1.4배에서의 협대역소음을 분산시켜 최소 1~2 dB의 성과를 거두었다고 보고한 바가 있다. 최근 일본 다이킨사에서는 프로펠러웬의 압력면상에 곱보(dimple)형상을 구성하여 난류경계층의 발달을 억제시켜 난류소음을 약 2 dB 가량 개선하였다. 이와 같은 소극적 소음제어외에도 최근 Gad-el-Hak(1996) 등⁽²⁰⁾에 의

해 유동제어를 통한 유동소음 적극제어가 활발하게 연구되고 있다. 즉 reactive feedback 제어를 이용하여 난류경계층에서의 소음원인 구조적 와류유동을 용출 및 흡입장치 등을 이용 혹은 극소형의 액츄에이터를 통해 제어하는 소음원제어가 연구되고 있다.

8. 맺 음 말

본 글에서는 송풍기 관련 산업체 및 가전업체의 최근 국내외 시장경쟁력 향상의 필수불가결 조건인 웬소음 저감에 대한 최근 연구동향을 간략하게 살펴 보았다. 이러한 소음저감을 위한 체계적인 연구에 대한 집중적 투자와 아울러 현실적 여건을 고려한 웬소음 평가 및 규격의 표준화 작업이 절실하다 하겠다.

참 고 문 헌

- (1) International Standards Organization, ISO 5136 Acoustics-Determination of Sound Power Radiated into a Duct by Fans-In-Duct Method, 1990.
- (2) "American National Standard Method for the Measurement of Noise Emitted by Small AMDs," ANSI S12-1987(ASA 72-1987), Acoustical Society of America, 1987.
- (3) Lee, S. and Jin, S.-H., 1995, "An Experimental Study of Flow Structures in Small Cooling Fans Using Acoustical Similarity," ASME NCA Vol. 21, p. 3.
- (4) Madison, R. D., 1949, Fan Engineering, Fifth Edition, Buffalo Forge Company, U.S.A.
- (5) Maling, G. C., 1963, "Dimensional Analysis of Blower Noise," Journal of Acoust. Soc. Am., Vol. 35, p. 1556.
- (6) Ariga, I., Kasai, N., Masuda, S., Watanabe, Y. and Watanabe, I., 1983, "The Effect of Inlet Distortion on the Performance Characteristics of a Centrifugal Compressor," Journal of Engineering for Power, Vol. 105, p. 223.
- (7) 김종수, 조강래, 1995, "덕트의 입구조건이 웬의 특성에 미치는 영향," 공기조화냉동공학논문집 제7권 제2호, p. 217.
- (8) Davis, C. M. and Atassi, H. M., 1991, "The Far Field Acoustic Pressure of an Airfoil in Nonuniform Subsonic Flows," ASME NCA, Vol.

- 11, p. 107.
- (9) Mcchizuki, O. and Kiya, M., 1995, "Aerodynamic Sound Generated by Wake-Body Interaction," ASME NCA, Vol. 19, p. 23.
- (10) 강신형, 김진권, 이승배, 1996, "뒷판이 소형 프로펠러팬의 성능특성에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 제20권 제3호.
- (11) Agboola, F. and Wright, T., 1995, "The Acoustic Properties of Loe Speed Axial Fans with Swept Blades," ASME NCA, Vol. 21, p. 11.
- (12) Lee, S., Jin, S.-H., Choi, J.-K. and Kim, Y.-C., 1996, "The Cross-correlation of Fluctuating Lift with Radiated Sound in Cooling Fan," ASME FED, Vol. 237.
- (13) Ffowcs Williams, J. E. and Hawkings, D. L., 1969, "Theory Relating to the Noise of Rotating Machinery," Journal of Sound and Vib., Vol. 10, p. 10.
- (14) Lowson, M. V., 1965, "The Sound Field for Singularities in Motion," Proc. R. Soc., London, Ser. A, Vol. 286, p. 559.
- (15) 이덕주, 전완호, 1995, "저소음 원심팬 개발을 위한 유동 및 소음해석," 한국과학기술원 연구보고서.
- (16) Fukano, T., Kodama, Y. and Takamatsu, Y., "Noise Generated by Low Pressure Axial Flow Fans," J. Sound and Vib., Vol. 56, p. 261.
- (17) 이승배, 김용철, 이승갑, 박윤서, 1995, "최적화 알고리즘을 이용한 저소음 원심팬 형상 최적설계," 대한기계학회 추계학술대회논문집(II), p. 521.
- (18) Sato, S. and Kinoshita, K., 1994, "Improvement in Performance of Propeller Fans for Outdoor Units of Airconditioners," Proc. of the 4th Asian Int'l Conference on Fluid Machinery, p. 166.
- (19) Hasemann, H., Hagelstein, D. and Rautenberg, M., 1995, "Noise Reduction in Axial Cooling Fans," Proc. Second Int'l, p. 713.
- (20) Gad-el-Hak, M., 1996, "Modern Developments in Flow Control," Applied Mech. Rev. Vol. 49, p. 365.
- (21) Risi, J. D., Burdisso, R. A. and Fuller, C. R., 1996, "Analytical Investigation of Active Control of Radiated Inlet Fan," J. Acoust. Soc. A., Vol. 99, p. 408.