산업용 유량제어 송풍기 베인댐퍼 개발에 관한 연구

이중섭⁺, 정인국⁺⁺, 윤지훈⁺⁺, 서정세^{*}, 장성철⁺⁺⁺

(논문접수일 2011. 07. 12, 수정일 2011. 07. 29, 심사완료일 2011. 08. 02)

A Study on Development of Vane Damper for Industry Flow Control Fan

Chung Seob Yi⁺, In Guk Jeong⁺⁺, Ji Hun Yun⁺⁺, Jeong Se Suh^{*}, Sung Cheol Jang⁺⁺⁺

Abstract

In this study, it was conducted to design each components of vane damper for industrial flow control fan and the flow rates were analysed by experimental and numerical method. Through environmental test, it could be confirmed that the designed vane damper was appropriate. Also, almost identical results with test could be drawn from numerical method. Finally, flow rates of electric and pneumatic actuator were measured by test. As the results, difference of flow rate according to opening ratio was smaller in pneumatic actuator than that in electric actuator.

Key Words : Vane damper(베인댐퍼), Flow control(유량제어), Fan(송풍기), Actuator(액츄에이터)

1. 서 론

산업용 송풍기에서 유량을 제어하기 위해 일반적으로 베인댐퍼(Vane damper)를 사용하여 요구되는 작동유체의 유량을 제어하고 있다. 보다 정밀한 유량을 제어하기 위해서는 인버터 모터(Invert motor)를 사용하여 임펠러의 회전수를 직접 제어하는 방법도 있을 수 있으나 모터가격이 크게 상승하므로 산업용 송풍기에서는 현재 사용하지 않는 방식이다.

송풍기에서 토출되는 유량제어를 필요로 하는 설비에는 여러 가지 있을 수 있으나 본 연구에서는 강제급기가 필요한 산업용 보일러, 소각기 등에 적용되는 유량제어 송풍기에 대한 개발내용을 소개하고자 한다. 이러한 송풍기의 경우 급기되는 외부공기의 유량을 보일러 및 소각기의 연소조건에 맞추기 위해 유량을 조절할 필요가 있다. 이는 결국 연소에 필요한 공기량을 제

어함으로써 연소조건을 맞춰주는 중요한 설비 중에 하나이다.

이러한 유량제어의 핵심은 베인댐퍼이며, 이는 펌프에서 밸브와 같은 역할을 담당하게 된다. 유량제어의 핵심은 필요한 유량을 얼마나 정확하게 전달하는가에 달려있다.

현재 산업용 송풍기의 경우 대량생산 체제에서 개발되고, 생산되는 것이 아니라 설비설계 사양에 맞도록 주문 생산되고 있으며, 현재까지 수작업에 의한 임가공 방식으로 많이 생산되고 있다.

결국, 이러한 작업방식으로 인해 제품품질이 균일하지 않아 성능 또한 미소한 차이로 균일성을 확보하지 못하고 있는 것이 현실이다. 따라서 이러한 문제를 극복하고, 성능을 향상시킬 수 있는 유량제어 송풍기의 개발이 필요했고, 링크기구를 사용하여 유량을 베인을 통해 제어하는 방식에서 기어구동방식으로 대체하여 유량을 베인을 통해 제어하는 방식을 前報⁽¹⁻³⁾에서

⁺ 경상대학교 BK21(첨단기계항공)

⁺⁺ 경상대학교 대학원

^{*} 교신저자, 경상대학교 기계공학부, 공학연구원(ERI) (jssuh@gnu.ac.kr)

주소: 경상남도 진주시 가좌동 진주대로 501

⁺⁺⁺ 한국항공폴리텍대학 항공메카트로닉스과

Fig. 1 Vane damper type for flow control

기술한바 있다.

우선 링크식의 경우 베인에 연결된 12개의 축을 링크로 연결하여 액추에이터의 동력을 전달하여 제어하는 타입이 일반적으로 많이 사용되고 있으며, 이는 간단한 기구학적 연결 알고리즘을 통한 정밀한 제어가 가능하지만 실제 용접가공 시 열 변형에 의한 정밀도 저하가 발생하여 가공 오차가 크게 발생하게 된다. 이러한 경우 베인각도가 정확하게 배열되지 않아 유량 제어가 어렵게 된다. 따라서 유량제어에 목적을 두고 성능개선을 하기 위해서 링크식 베인댐퍼를 기어식 베인댐퍼로 변경하면 보다 정밀한 제어가 가능하게 될 것으로 판단되어 개발에 착수하였다.

기어식 베인댐퍼는 기존의 용접에 의존한 링크식 베인댐퍼 생산기술을 대체하기 위해 기어식 베인댐퍼는 최대한 조립식으로 개발을 추진하였다. 그러나 조립공정 시 발생하는 생산기술 측면의 문제점이 발생할 수 있기 때문에 기어 자체 및 조립 시 발생할 수 있는 문제점을 해결하고, 초기 개발모델에 대한 불합리한 조건들을 수정 및 보완하여 구조개선에 따른 품질향상을 모색하고 나아가 생산성 향상에 기여할 수 있도록 설계하는 것을 목표로 하였다.

링크식 베인댐퍼와 기어식 베인댐퍼를 각각 나타내면 Fig. 1의 (a), (b)와 같다. 기어식의 경우 댐퍼 외부에 링크가 없기 때문에 외형상 링크식에 비해 단순해 보인다. 그러나 실제 기어식 베인댐퍼는 조립식이기 때문에 구조는 더 복잡하다.

2. 베인댐퍼 설계

2.1 보스부 설계

베인댐퍼는 총 12개의 베인과 축 그리고 한 개의 보스와 유로를 형성하는 플랜지 등으로 구성 되어 있고, 작동원리는 12개의 축을 베벨기어를 이용하여 한 개의 피니언을 통해 토크를 기어에서 나머지 총 11개의 피니언으로 전달하여 구동하여 제어하게 된다. Table 1은 댐퍼를 구성하는 요소에 대한 제원이며 Fig. 2는 보스부를 나타내고 있다.

보스 내부에 피니언과 기어를 조립한 후 베어링과 베어링 판

Table 1 Part of specification in the damper

	Material	Quantity	Assembly type
Boss	SS400	1	Welding
Vane	SS400	12	Welding
Shaft	SS400	12	-
Gear	SCM415	1	Bearing
Pinion	SCM415	12	Spring pin
Spring pin	JIS $\phi 5$	26	-
Flange	SS400	1	Bolting
Boss bracket	SS400	4	Bolting

Fig. 2 Assembly schematic of boss parts

(a) before

(b) after

Fig. 3 Improvement of boss parts

을 위치시키고 면압조절부(Backlash adjust)를 보스의 텀에 볼트로 체결하면 피니언과 기어의 거리가 최대가 된다. 이 때 회전력은 적지만 헐거움 상태가 커지게 된다. 이러한 베벨 기어의 높이를 조절하기 위해 면압 조절부에 있는 무브 볼트(Headless bolt)를 조이게 되면 베어링 하부에 있는 베어링 판(Bearing plate)을 밀면서 기어의 높이를 조절할 수 있게 설계하였다. 이러한 구조는 대량생산과 요소들에 대한 가공과정과 정밀도에 따라서 기어의 조립상태와 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 조절이 가능하도록 설계하였다.

Fig. 3(a)의 경우 초기설계 형상으로서 보스와 베인을 조립하였을 때 공극(Air gap)이 발생하여 누설 유량이 발생하고 베인을 완전 닫았을 때 이 공극으로 통과하는 유동에 의해 소음 발생하는 것으로 판단되어 (b)와 같이 보스를 12면체로 가공을 하여 Air Gap을 없앴으로써 소음 저감과 누설 유량을 최대한 억제할 수 있도록 설계하였다.

2.2 베인 설계 및 조립

기존의 베인가공은 철판을 플라즈마로 절단한 후 벤딩하여 생산하였다. 그러나 Fig. 4(a)와 같이 베인과 베인이 겹칠 때 선으로 접촉되기 때문에 유동에 의한 압력을 받으면 틈이 생겨 누설을 막기에 한계가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 (b)와 같이 누설유량을 최대한 막기 위해 베인과 베인이 겹치도록 하여 누설유량을 최대한 막을 수 있는 구조로 설계하였다. 따라서 기존 벤딩에 의한 가공이 어려워 금형으로 베인을 제작하였다.

베인을 제작하기 위해 Fig. 5(a)와 같은 금형을 개발하였으며, (b)는 개선 전의 베인 형상과 금형에 의하여 제작되어진 개선된 베인 형상이다. 개선된 베인은 금형에 의하여 일정한 제작품이 나오므로 불량률을 줄일 수가 있다.

회전축과 베인을 체결하는 방식에 대해 개발 과정에서 개선된 과정은 Fig. 6과 같으며, (a)의 용접방식은 기타 부품이 없기 때문에 가격경쟁력이 있는 방식이나 용접과정에서 발생하는 열응력에 의해 베인이 뒤틀리는 현상이 발생하였다. 또한 (b)와 같이 U-볼트를 사용하여 체결하는 방식으로 변경하였으나 체결력이 약하고, 회전축과 U-볼트와의 접촉면적이 좁아 베인이 돌아가는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 최종적으로 (a)와 (b)

Fig. 4 Improvement of vane shapes

Fig. 5 Metal mold and vane shape

가 가지고 있는 문제점을 해결하기 위해 (c)와 같이 클램프를 적용하여 회전축과 베인의 구속력을 강화시킬 수 있었다.

회전축을 댐퍼 외곽에서 지지하고, 위치를 잡기 위한 힌지에 대한 개발과정에서 개선된 과정은 Fig. 7과 같다. (a)와 같이 용접을 통해 회전축과 연결하였으나, 용접열에 의한 열응력 발

Fig. 6 Improvement process of vane combine

Fig. 7 Improvement process of outer hinge

Fig. 8 Exclusive jig for vane damper assembling

생으로 인해 회전축에 변형이 발생하여 회전축의 회전이 원활하지 못한 결과를 초래하였다. 따라서 (b)와 같이 힌지 외곽에 일부 점용접을 한 후 Stud볼트를 사용하여 축을 정렬하는 방식을 채택하였으나, 역시 용접에 의한 변형이 발생하였고, 추후 유지보수를 실시할 때 회전축이 분해되지 않는 단점을 가지고 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 (c)와 같이 전체 조립식으로 개발하였으며, 그 결과 회전축과 힌지의 조립시 회전축 정렬이 유리해 졌으며, 조립시간 또한 단축할 수 있었다.

베인댐퍼를 조립하기 위한 전용지그를 Fig. 8과 같이 개발하였다. 전용지그를 개발한 이유는 누설유량을 최대한 막기 위해서 베인댐퍼를 구성하고 있는 부품들의 조립이 보다 정확하게 이루어져야 되기 때문이며, 조립시간 단축을 통한 생산성 향상을 기대할 수 있었다.

2.3 액츄에이터 선정

송풍기에서 댐퍼는 풍량을 제어하고, 댐퍼는 액츄에이터가 제어하게 되며, Fig. 9(a)와 같이 일반적으로 공압식(Pneumatic)을 많이 채택하고 있다. 그 이유는 베인의 빠른 개폐가 가능하기 때문이며, (b)와 같은 구조의 전자식(Electronic)에 비해 단순하기 때문에 내구성이 좋기 때문이다. 그러나 공압식은 설치시 요구되는 공압이 필요하기 때문에 공압 라인과 압축기가 필

Fig. 9 Actuator type for vane damper

Table 2 Specification of actuator types

	Pneumatic	Electric
Type	Vane-Shaft	Worm Gear
Torque	500N-m	500N-m
Opening time	12sec	15sec
Control	4-20mA	4-20mA
Handling power	5bar	1.1A

요하여 부수적인 장치가 추가되는 반면 전자식은 전원만 필요하기 때문에 별도의 부수장치가 필요없는 장점도 있다. 전자식은 공압식과 달리 모터를 통해 기어로 최종 힘이 전달되는 구조로 되어있다. 따라서 구조가 복잡하고, 가격이 비싼 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서 2가지 타입에 대한 액츄에이터에 대한 성능을 확인하고자 하였으며, Table 2와 같은 사양을 선정하였다.

3. 베인댐퍼 환경시험

개발된 베인댐퍼의 성능을 확인하기 환경시험을 (재)한국조선기자재연구원에서 건조고온시험, 온습도시험, 저온시험 총 3가지에 대한 시험을 Table 3과 같은 시험규격으로 수행하였으며, Fig. 10은 환경시험 장면을 보여주고 있다.

건조고온시험은 ICE 60068-2-2에 의해 시험하였고, 시험온도는 $70.0 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 의 환경조건을 챔버 내에서 2시간 동안 가한 후 시험조건에서 작동상태를 확인하였다. 또한 온습도시험은 ICE 60068-2-30에 의해 시험하였으며, 시험환경은 주변온도 $25.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 이고, 습도는 $54 \pm 5\%$ RH였다. 시험온도는 3시간동

Fig. 10 Environmental test apparatus for vane damper

Table 3 Environment testing codes

Item	Test Code
Dry Heat	ICE 60068-2-2, 1994, Basic Environment Testing Procedure Dry Heat
Damp Heat	ICE 60068-2-30, 2005, Environmental Testing-Damp Heat, Cycle(12h+12h Cycle)
Cold	ICE 60068-2-1, 1994, Environmental Testing-Cold

Fig. 11 Temperature profile of damp and heating test

Fig. 12 Temperature profile of cold test

안 규정온도인 $55.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 로 도달 하였을 때 상대습도는 95% 이상으로 Fig. 11과 같은 온습도 시험 온도곡선 상태에서 시험한 후 작동상태를 확인하였다.

마지막으로 저온시험은 ICE 60068-2-1에 의해 시험하였으며, 시험환경은 온습도시험 주변환경과 동일하다. 이 시험은 Fig. 12와 같은 저온시험 온도곡선에 따라 환경을 조성한 후 작동상태를 확인하는 것으로 3가지 환경시험 결과 (재)한국조선기자재 연구원으로부터 적합 판정을 받았다.

4. 송풍기 유동해석

4.1 유동해석 모델

정상상태 유동해석을 수행하여 베인뎀퍼를 설치한 송풍기에 대한 유동상태를 파악하기 위한 지배방정식으로는 연속방정식, 운동량방정식, 난류에너지방정식, 난류소산방정식 그리고 에너지방정식이 사용되었다. 여기서 난류모델은 Realizable $k-\epsilon$ two layer 모델을 적용하였고, 속도와 압력의 연결은 Segregated 알고리즘을 채택하였다. 또한 작동유체에 대한 밀도변화는 온도와 압력에 영향을 받는 이상기체 상태방정식을 적용하였다.

임펠러에 회전력을 부여하기 위해 MRF기법을 적용하여 제어체적인 격자를 회전시키지 않고도 임펠러의 회전효과를 부여하여 정상상태에서 송풍기에 대한 유동해석을 상용코드인 STAR-

Fig. 13 Comparison of experiment and CFD result

CCM+를 사용하여 수행하였다.

송풍기는 항상 일정하게 유동이 흡입되고 토출되는 특성이 있기 때문에 MRF를 사용한 계산이 공학적으로 타당성이 있으며⁽⁴⁻⁶⁾, 특히, 본 연구의 주된 관심인 전반적인 유동형태를 파악하기 위한 계산에서 효율적인 해석결과를 도출할 수 있다.

4.2 경계조건

송풍기에 대한 유동해석의 범위는 베인각도가 $0^\circ \sim 90^\circ$ 까지 25° 씩 증가시켜 수치해석을 수행하였으며, 송풍기 입-출구는 온도는 25°C 상태인 대기압으로 설정하였다.

송풍기 케이싱과 임펠러 사이에 물리량을 전달받을 수 있는 Interface를 설치하여 이를 경계로 임펠러가 1,770rpm으로 회전할 수 있도록 경계조건을 부여하였고, 케이싱의 벽면은 모두 단열조건을 부여하였다. 또한 해석 값의 수렴판정은 잔차 값이 10^{-3} 이하로 설정하였다.⁽⁴⁻⁶⁾

4.3 유동해석결과 및 고찰

베인뎀퍼 Opening ratio에 대한 유량을 측정한 시험결과와 유동해석 결과를 Fig. 13과 같이 비교하였다. 유동해석 결과 실험결과와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 유량이 높게 나타났다. 이는 실제 송풍기와 달리 누설유량이 없기 때문인 것으로 판단되며, 전반적으로 유동해석 결과가 실험결과에 비해 약 5.2% 정도 오차가 발생하였다. 따라서 베인뎀퍼 설계에 대한 검증은 유동해석을 통해 확인할 수 있었다.

5. 엑추에이터 성능비교

5.1 송풍기 유량측정

설계사양에서 선택된 엑추에이터 타입에 대해 베인뎀퍼가 열릴 때와 닫힐 때에 대한 유량변화를 확인하기 위해 Fig. 14와 같은

Fig. 14 Experimental setup for fan test

Fig. 15 Comparison of flow rate by using electric actuator

송풍기 시험장치를 사용하여 베인댐퍼 Opening ratio에 대하여 유량을 측정하였다. 시험장치는 KS B 6311의 규정에 따라 송출덕트 직경은 $\phi=600\text{mm}$ 이고, 길이는 7,926mm인 시험장치를 구성하였다⁽⁷⁾.

5.2 유량측정 결과 및 고찰

전자식 액추에이터가 베인댐퍼가 닫혔다가 열릴 경우와 열렸다가 닫힐 경우에 대하여 베인댐퍼 Opening ratio에 대한 유량을 측정한 결과 Fig. 15와 같다.

시험결과 전자식 액추에이터를 적용할 경우 베인댐퍼 Opening ratio 50% 이전에서 유량차가 발생함을 확인할 수 있었다. Opening ratio 50% 이하에서는 베인댐퍼의 개폐각도가 작기 때문에 많은 부하가 발생하게 된다. 유량차는 베인댐퍼가 열려 있다가 닫힐 때 유량이 증가하는 현상이 발생하였으며, 이는 베인댐퍼의 기어에서 발생하는 백래쉬와 전자식 액추에이터의 기어 백래쉬가 합쳐져 풍압에 의해 베인댐퍼가 지정각도에 도달하지 못하

Fig. 16 Comparison of flow rate by using pneumatic actuator

였기 때문에 판단된다.

공압식 액추에이터를 적용하였을 경우에 대한 유량을 측정한 결과는 Fig. 16과 같다. 전자식 액추에이터에 비해 베인댐퍼의 개폐방향에 따른 유량차가 적은 것을 확인할 수 있었다. 또한 개폐초기 전자식 액추에이터에 비해 유량증가 기울기가 보다 완만하게 이루어짐을 확인할 수 있었다. 그러나 공압식 액추에이터도 마찬가지로 개폐방향에 따른 유량차가 발생하였고, 이 또한 베인댐퍼의 기어 백래쉬에 의한 결과로 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 산업용 송풍기의 유량제어에 사용되는 기어식 베인댐퍼 개발을 목적으로 각 요소를 설계하고, 이를 시험과 해석을 통하여 검증 및 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 세부적인 결론은 도출할 수 있었다.

- (1) 베인 댐퍼의 보스부와 베인을 설계하고 환경시험을 통하여 작동상태를 확인한 결과 고온건조시험, 온습도시험, 저온 시험 결과 정상적인 작동이 이루어졌다.
- (2) 송풍기 유동해석을 수행하여 시험결과와 비교하였고, 비교적 동일한 결과를 도출하였다. 따라서 베인댐퍼 설계에 대한 검증을 유동해석을 통해 수행하였다.
- (3) 시험을 통하여 전자식과 공압식 액추에이터의 유량을 측정하였고, 공압식의 경우 전자식액추에이터에 비해 베인댐퍼의 개폐방향에 따른 유량차가 적음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 경상대학교 2단계 BK21사업 지원으로 이루어졌으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Jang, S. C., Cho, H. D., and Kim, N. K., 2007, "Development of Gear Type Vane Damper Change Link Type in FD Fan," *KSMTE*, Vol. 13, No. 1, pp. 104~109.
- (2) Jang, S. C., Han, S. H., and Kim, J. W., 2010, "A Study on Performance Improvement of Gear Type Vane Damper in FD Fan(Productivity Increases & Construction Improvement)," *J. of the KSMTE*, Vol. 19, No. 1, pp. 134~139.
- (3) Yi, C. S., Hong, J. K., Suh, J. S., Shin, Y. I., and Park, Y. S., 2009, "Effect of Cutoff Angle on the Flow Characteristic of Turbo-Fan," *Conference Proceedings of KSME Spring Annual Meeting*, pp. 311~318.
- (4) Maeng, J. S., Yoon, J. Y., Ahn, T. J., Yoon, J. E., and Hahn, D. J., 1999, "An Experimental Study for Flow Characteristics Inside the Rotor of a Multi Blade Fan/Scroll System," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 23, No. 5, pp. 646~652.
- (5) Kim, C. H, Ahn, H. S., and Chong T. H., 2003, "On a Method for the Durability Enhancement of Plastic Spur Gear using Finite Element Analysis," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 2, pp. 223~230.
- (6) Witt, P. J., Solnordal, C. G., Mittoni, L. J., Finn, S., and Pluta, J., 2006, "Optimising the Design of Fume Extraction Hoods Using a Combination of Engineering and CFD Modelling," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 30, No. 11, pp. 1167~1179.
- (7) KS, 2006, *Testing Methods for Industrial Fans*, KS B 6311, KSSN, Korea.