

FD FAN에서 기어식 베인 댐퍼의 성능개선에 관한 연구 - 생산 및 구조 융합형 기술 -

장성철⁺, 한상호*, 김진우**

(논문접수일 2009. 11. 26, 심사완료일 2010. 01. 28)

A Study on Performance Improvement of Gear Type Vane Damper in FD Fan - Productivity Increases & Construction Improvement -

Sung-Cheol Jang⁺, Sang-Ho Han*, Jin-Woo Kim**

Abstract

In this study, we developed the gear type vane damper replacing the link type through gear design using Finite Element Analysis(FEA). FEA about the pinion and the vane shaft in the boss of gear type damper for quality improvement was accomplished. We analyzed fluid flow according to angular displacement. Caught the problem of the torque and backlash bring to the pinion as structure improvement of the forced draft fan(FD FAN). Finally, we compared the gear driving result with simulation. It is the objective of the present study to identify a nonlinear flow rate control of gear type vane damper and to suggest a damper shape with a linear flow rate control. This study is related to the development of gear type vane damper change link type in forced draft fan.

Key Words : Forced Draft Fan(선박용 강제통풍팬), Gear Type Vane Damper(기어식 베인 댐퍼), Link Type(링크식), Vane Shaft(베인축), Fluid Flow(유체유동), FEA(유한요소해석)

1. 서론

前報⁽¹⁾에서는 링크식을 대체한 기어식 베인 댐퍼의 개발에 관한 연구로서 베인 축에서 발생하는 토크 및 동력, 구조

해석을 수행하여 기어설계에 관한 기초 연구를 수행하였다.

선박 보일러용 자동 가변형 FD FAN에서 흡입유량을 조절하는 기어식 베인 댐퍼에 관한 연구는 Jang 등⁽²⁾이 수행한 연구 외에는 국내외적으로 수행된 경우가 없는 것으로 조사

+ 한국폴리텍항공대학 항공메카트로닉스과 (scjang@kopo.ac.kr)
주소: 664-708 경남 사천시 이금동 438번지

* 한국폴리텍항공대학 항공정비과

** 한국기술교육대학 산학협력단

되었다. 그러나 링크식을 대체한 기어식으로 베인 댐퍼를 개발할 경우 이의 간섭(interference), 언더컷(undercut), 물림롤, 미끄럼을, 백래쉬(backlash) 등의 설계 인자를 규명하는 것은 기술적 과제이다.

본 연구에서는 기어식 베인 댐퍼의 성능 개선을 위해서 기어식 베인 댐퍼의 보스 내부에 장착된 피니언과 베인 축의 구조해석을 수행하고, 베인의 각도 변화에 따른 유체 유동을 분석하였다. 또한 피니언에서 발생하는 토크 및 백래쉬 발생 현상의 문제점을 파악하여, FD FAN의 구조개선에 따른 생산성 향상에 관한 기술 융합 연구를 수행하였다.

2. 기어식 베인 댐퍼의 설계

Fig. 1 (a)는 베인 댐퍼의 전체적인 형상을 나타낸 것이다. 보스 내부에 장착된 기어의 개수는 총 12개이고, 기어를 연결하는 축의 개수도 이와 동일하며, 그림에 나타난 것처럼 플랜지 외부에는 베인 축을 지지하는 베어링이 용접되어 베

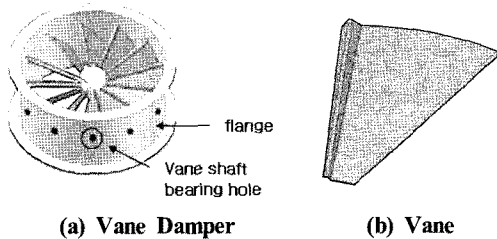


Fig. 1 Gear Type Vane Damper

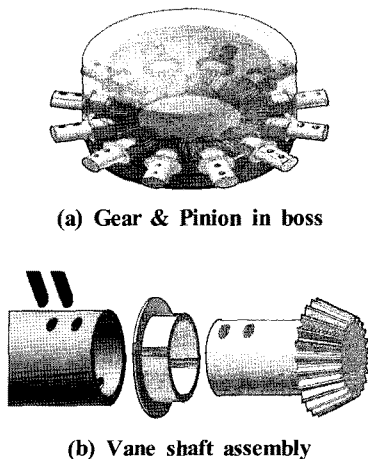


Fig. 2 Shape of boss

인의 각도를 조절할 수 있게 설계하였다.

Fig. 1 (b)는 Fig. 1 (a)의 보스 내부에 장착된 기어와 연결되는 축 위에 장착된 베인의 형상을 나타낸 것이다. 베인의 두께는 2.3mm이고, 플랜지 외부보다 보스 내부쪽으로 갈수록 테이퍼 지게 절곡 된 것을 알 수 있다. 이것은 베인의 두께가 너무 두꺼우면 강성이 커져서 베인과 베인이 접촉되는 부분에서 완전 밀폐가 힘든 점을 고려한 것이다. 또한 절곡이 테이퍼지게 설계된 것은 베인을 열고 닫을 때 베인의 간섭을 최대한 억제시키기 위해서이며, 베인 축과 베인은 U볼트로 체결하여 기존의 용접작업에 비해 작업자의 공정을 감소시키고자 하였다.

Fig. 2 (a), (b)는 보스 내부에 장착된 기어와 피니언의 형상을 나타낸 것이다. 12개의 피니언 중에서 1개가 액추에이터와 연결되어 나머지 11개에 동력을 전달하는 구조이다. 보스에는 피니언이 관통할 수 있도록 12개의 홈을 가공하였으며, 홈 주위에는 베인의 형상 및 누설유량을 감소시키기 위해서 평면이 되도록 밀링 가공하였다. 이의 간섭, 언더컷, 백래쉬를 방지하기 위해서 기어의 치형 부분은 래핑 가공하여 이러한 현상을 최소화 하도록 하였다. 그리고 보스 내부에 장착된 기어와 피니언의 동력전달을 용이하게 전달하기 위해서 윤활 그리스를 주입하였다. 또한 주입된 윤활 그리스는 피니언과 연결된 베인 축으로 누설이 발생할 수 있으므로 테프론 부시를 삽입하였다. 피니언과 베인축의 연결은 스프링 핀으로 체결하여 조립을 용이하게 하고자 하였다. 향후 Fig. 2 (a) 형태의 보스는 조립품 형태로 보관이 가능하기 때문에 제품 생산성 향상에 큰 도움이 되리라 생각된다.

Fig. 3은 베인 댐퍼 조립시 플랜지와 보스의 중심점을 구속하는 과정을 나타낸 것이다. 조립된 보스를 플랜지의 높이만큼 구속한 상태에서 베인 축만 조립하게 되면 동일한 크기로 구속되어, 플랜지와 보스의 중심점은 맞추어 지는 구조이다.

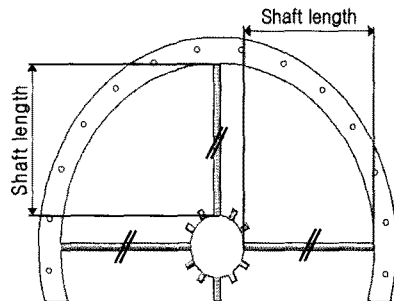


Fig. 3 Top view of gear type vane damper

3. 베벨 기어의 강도평가

3.1 베벨기어의 강도

베벨 기어의 강도는 이(tooth)의 굽힘강도, 치면의 면압강도, 스코링 강도, 마모에 대한 강도 등을 들 수 있는데, 본 연구에서는 비교적 강도평가 방법이 잘 정비되어 있는 AGMA규격⁽³⁻⁵⁾의 강도평가 방법을 사용하여 베벨기어의 강도 중 굽힘강도 및 면압강도를 고려하였다. Table 1은 피니언과 기어의 형상에 관한 자료이며, Table 2는 재료 SCM415에 관한 물성치를 나타낸 것이다.

Table 1 Bevel gear data

Parameter		Pinion	Gear
Number of teeth	N	16ea	72ea
Speed	rpm	1	0.2
Torsional moment	N·m	11.8	52.4
Transmission ratio	i	4.5	
Angle of shaft axes	Σ [°]	90	
Transverse pressure angle	ϕ [°]	20	
Module	m_{et}	1.75	
Face with	F	20mm	
Pitch cone angle	δ	12.528	77.472
Tip diameter	D_{am} [mm]	31.375	126.759
Pitch diameter	D_m [mm]	23.661	106.476
Root diameter	D_{fm} [mm]	23.9	125.089
Cone length	C_m [mm]	62.625	12.292

Table 2 Material properties

Material properties	SCM415(JIS)
Tensile Strength(Ultimate) [MPa]	799.79
Tensile Strength(Yield) [MPa]	599.84
Tooth Hardness - core [HB]	237
Tooth Hardness - side [HB]	645
Allowable Bending Stress [MPa]	380
Allowable Contact Stress [MPa]	1300
Young's Modulus [GPa]	206.842
Poison's Ratio	0.3

3.2 굽힘강도

베벨기어의 설계수명동안에 이뿌리(tooth root)에서 굽힘응력에 의한 절손이 발생하지 않도록 AGMA 규격의 굽힘강도 평가 식을 적용 평가하였다.⁽⁴⁾

$$S_{tP} = \frac{2T_P K_a P_d K_s K_m}{K_v F d K_x J_p} \text{ for pinion} \quad (1)$$

$$S_{tG} = \frac{2T_G K_a P_d K_s K_m}{K_v F D K_x J_p} \text{ for gear} \quad (2)$$

여기서, P_d 는 지름피치, F 는 치폭, d 및 D 는 각각 피니언과 기어의 피치원 지름, T_P, T_G 는 피니언과 기어의 작용토크, K_v 는 내부동하중 계수, K_a 는 외부동하중계수, K_s 는 치수효과 계수, K_m 는 하중분포 계수, K_x 는 곡률 계수, J_p 와 J_G 는 각각 피니언과 기어에서 굽힘강도의 형상계수를 나타낸다.

베벨 기어가 굽힘에 견딜 수 있는 사용굽힘 응력은 식 (3)으로 S_{wt} 계산되며, 식에서 S_{at} 는 시험치차에서 평가된 허용 굽힘 응력을 나타내고, K_L, K_T, K_R 은 각각 굽힘에 대한 수명계수, 온도계수, 신뢰도계수를 나타낸다.⁽⁴⁾

$$S_{wt} = \frac{S_{at} K_L}{K_K K_R} \quad (3)$$

사용굽힘 응력 피니언과 기어의 S_{wt} 은 304.47MPa, 339.77MPa이며, S_{tP} 와 S_{tG} 는 각각 120.03MPa, 145.48MPa로 나타나 안전한 것으로 평가된다.

3.3 면압강도

면압강도 평가식은 Hertz의 접촉응력식에 기초를 두고, 접촉면의 접촉응력은 식 (4)와 같이 계산한다.⁽⁴⁾

$$S_c = C_p C_b \sqrt{\frac{2T_D C_a \left(\frac{T_P}{T_D}\right)^z}{C_v} \frac{1}{F d^2} \frac{C_s C_m C_{xc} C_f}{I}} \quad (4)$$

여기에서, C_p 는 재료의 탄성계수, C_b 는 응력조정상수, T_D 는 설계피니언 토크, z 는 하중지수, C_{xc} 는 크라운잉 계수, C_f 는 치면상태 계수, I 는 면압강도의 형상 계수, C_a, C_v, C_s, C_m 은 각각 면압강도의 외부 동하중계수, 내부 동하중계수, 치수계수, 하중분포계수를 나타낸다. 베벨기어가 피팅에 견

덜 수 있는 사용접촉응력은 식 (4)로 S_{wc} 계산되며, 식에서 S_{ac} 는 시험치차에서 평가된 접촉피로한계를 나타내고, C_L , C_T , C_R , C_H 은 각각 면압에 대한 수명계수, 온도계수, 신뢰도계수, 경도비계수를 나타낸다.⁽⁴⁾

사용접촉응력 S_{wc} 은 900.87MPa, S_c 는 751.31MPa 나타나 안전한 것으로 평가된다.

$$S_{wc} = \frac{S_{ac} C_L C_H}{C_T C_R} \quad (5)$$

4. CAE/CFD 해석

4.1 CAE 모델링^(6,7)

Fig. 4는 구조해석을 하기위해 Inventor를 사용하여 3D 모델링을 후 ANSYS Workbench를 이용하여 FEM해석을 수행하였다.

4.1.1 경계조건 및 하중조건

기어와 피니언에서의 이의 접촉, 핀과 피니언, 핀과 축의 접촉하는 부위를 적용하여 해석을 수행하였다. 경계조건은 기어와 피니언 Z축으로 하여 회전 변위 제외하고 나머지 변위를 구속하였다.

4.1.2 응력해석 결과

SCM415 재질은 소성항복 조건에 잘 만족한다고 가정하고 등가응력 값을 기준으로 평가하였다. Fig. 5 (a), (b), (c)는 각 부품에서 최대응력 값을 보여주는 것이다. 기어 이의 접촉부위에 생기는 최대 응력 값은 89.25MPa이며, 피니언 이의 최대 응력 값은 517.81MPa 이고, 핀에 걸리는 최대응력 값은 29.31MPa로 확인되었다. SCM415의 항복강도는 599.84MPa로 각 부품의 최대응력 값이 이에 미치지 못하므로 안전하다고 판단된다.

4.2 CFD 모델링

일반적으로 유동해석을 해석하기 위해서는 유체 영역의 형상을 모델링한 후 적절한 경계조건을 부여하여 수치해석을 수행하게 된다. 이때 연속 방정식, 운동에너지 방정식, 난류에너지 방정식과 난류소산 방정식을 지배방정식으로 계산하게 되며, 속도와 압력에 대한 연결은 SIMPLE 알고리즘을 사용한다. 회전체인 임펠러의 경우 1770rpm의 고정회전수를 가지고 있기 때문에 정상 상태로 가정하여 MRF(Multiple

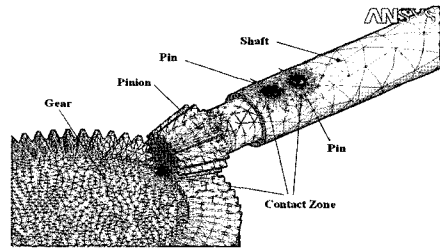
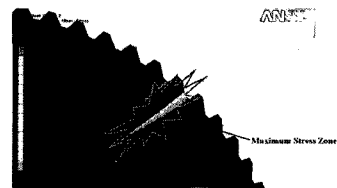
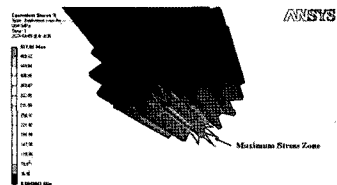


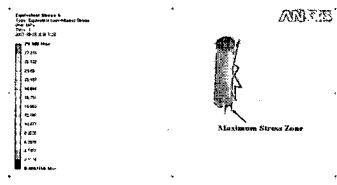
Fig. 4 Bevel gear FEM



(a) Gear Stress Level



(b) Pinion Stress Level



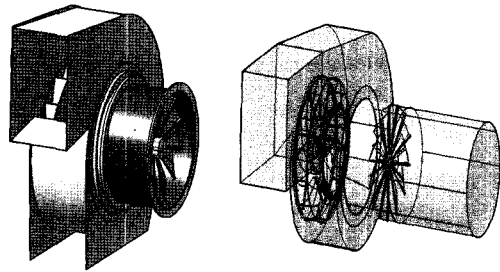
(c) Pin Stress Level

Fig. 5 Gear, pinion & pin stress level

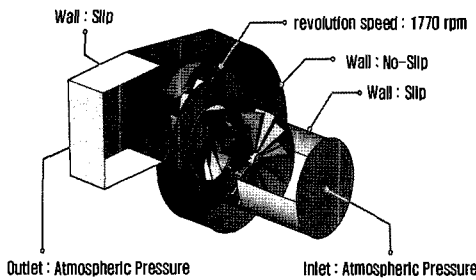
Rotating Frame) Method를 사용하였고, 이때 케이싱과 임펠러 영역의 회전속도가 다른 두 영역이므로 Implicit 방법을 통해 회전효과를 부여하여 범용 CFD Tool인 STAR-CD를 사용하여 계산을 수행하였다.

4.2.1 CFD 결과

Fig. 6은 CFD 계산을 위한 기하학적 모델과 경계조건을 나타내고 있다. 유체영역만 계산하기 때문에 실제모델에서 솔리드 영역을 제외시켜 모델링이 수행되고, 경계 조건 시 부여되는 입-출구의 대기압이 균일하게 발생되기 위해 각각



(a) CAD geometry (b) CFD geometry



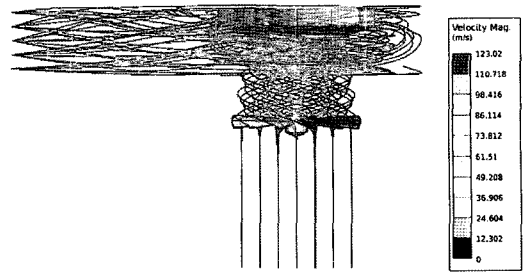
(c) Boundary

Fig. 6 Computational geometry and Boundary conditions

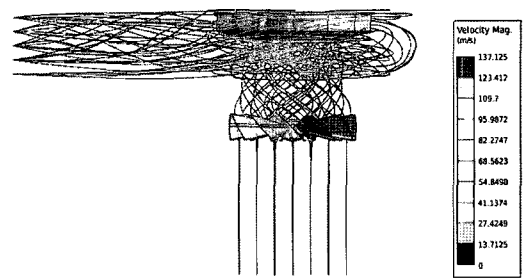
1m씩 입-출구를 확장 하였다. 임펠러의 회전수는 1770rpm으로 일정하게 회전되고, 임의 확장시킨 입-출구 공기층의 벽면은 슬립 조건으로 가정하였다.

Fig. 7은 베인 각도가 20°와 45°일 경우에 대한 입자추적 결과를 나타내고 있다. 그 결과 베인이 안내 및 역할을 하여 직선으로 유입되는 대기의 공기가 베인을 통과하면서 회전하게 된다. 결국 베인의 각도에 따라 임펠러 입구측에 발생하는 공기의 회전수가 달라지고, 결국 유체가 임펠러에 도달하는 시간이 달라짐을 알 수 있었다.

Fig. 8은 베인과 임펠러 표면에 받는 전압분포를 나타내고 있다. 베인의 각도가 작을수록 베인 앞쪽은 높은 압력을 받게 되고, 베인 뒤쪽은 진공이 높게 발생됨을 확인할 수 있었다. 이는 임펠러에서 흡입하기 때문에 진공이 발생하게 되고, 결국 베인의 뒷면을 당기게 된다. 따라서 베인의 전-후단에서 발생하는 전압의 차를 Fig. 9와 같이 나타내면 베인이 20° 열렸을 때 45°에 비해 중심에서 약 2500Pa의 차이가 발생하였고, 벽면쪽으로 이동하면서 차이가 감소하는 경향을 보여주고 있었다. 여기서 벽면에서 베인이 20°일 경우 특이하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 대기에서 유입되는 작동유체의 유입각도가 작아 벽면으로 강하게 부

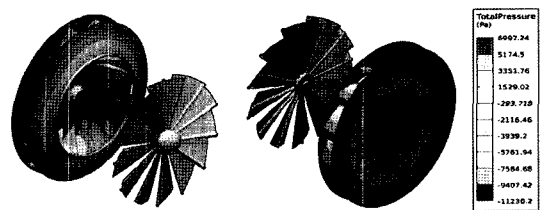


(a) 20 deg

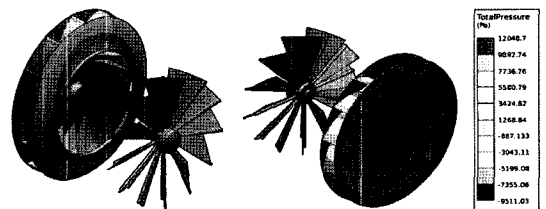


(b) 45 deg

Fig. 7 Comparison of particle tracking in FD Fan



(a) 20 deg



(b) 45 deg

Fig. 8 Comparison of total pressure distribution at impeller and vane

딛기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 베인의 열림 각도가 작을수록 압력이 증가하고, 각도가 클수록 유동저항이 적게 발생하여 압력이 낮아지게 됨을 확인할 수 있었다.

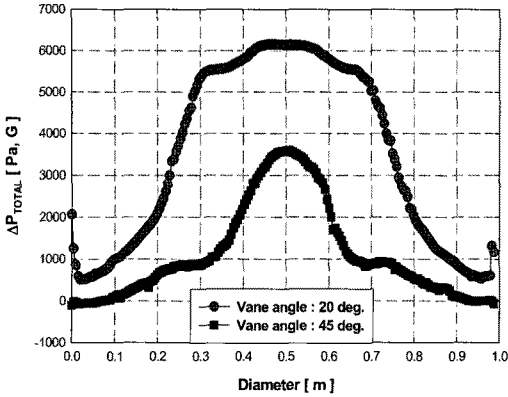


Fig. 9 Comparison of total pressure difference at vane in-out face

5. 결론

연구에서는 기어식 베인 댐퍼의 성능 개선을 위해서 기어식 베인 댐퍼의 보스 내부에 장착된 피니언과 베인 축의 구조해석을 수행하고, 베인의 각도 변화에 따른 유체 유동을 분석한 후 피니언에서 발생하는 토크 및 백래쉬 발생 현상의 문제점을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기어의 치형을 래핑 가공하여 언더컷 및 백래쉬를 방지하였고, 기어와 피니언이 장착된 보스는 조립품 형태로 보관이 가능하기 때문에 제품의 생산성이 향상되도록 설계하였다.
- (2) 구조해석 결과 기어 이의 접촉부위에 생기는 최대 응력 값은 89.25MPa이고, 피니언의 최대 응력 값은 517.81 MPa이고, 핀의 최대응력 값은 29.31MPa이고, SCM

- 415의 항복강도는 599.84MPa로 각 부품의 최대응력 값이 이에 미치지 못하므로 안전한 것을 알 수 있었다.
- (3) CFD 결과 베인의 열림 각도가 작을수록 압력이 증가하고, 각도가 클수록 유동저항이 적게 발생하여 압력이 낮아지게 되는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (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., 2007, *Damper Type Flow Rate*, KR Patent:10-001065
- (3) Dudley, D. W., 1984, *Hanbook of Practical Gear Design*, McGraw-Hill, USA.
- (4) ANSI/AGMA 1988, 2003-A86, Rating the Pitting and Bending Strength of Generated Straight Bevel, ZEROL Bevel, and Spiral Bevel Gear Teeth, International Organization for Standardization, USA.
- (5) ANSI/AGMA 1988, 2005-B88, *Design Manual For Bevel Gears*, International Organization for Standardization, USA.
- (6) 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.
- (7) Lee, H. Y., Yeo, H. T., and Hur, K. D., 2006, "Design and analysis of Reduction Gear with Double Reduction Planetary Gears," *Conference Proceedings of KSME Fall Annual Meeting*, pp. 12~16.