

선박용 강제통풍 팬의 기어식 베인댐퍼 성능평가

Development of Gear-Type Vane Dampers to Replace Link-Type Vane Dampers in Marine FD Fans

허남수(경남과학기술대학교 기계공학과), 장성철*,
이경준(한국폴리텍IV대학 충주캠퍼스)

Hur Nam-Soo(Gyeongnam National University of Science and Technolgy,
Department of Mechanical Engineering), Jang Sung-Cheol*,
Lee Kyung-Jun(Korea IV Polytechnic Dept. of Machine System)

〈Abstract〉

Thus, this study aimed to develop a gear-type vane damper in order to replace the link-type vane damper. To achieve this goal, the torque generated in a gear-type vane damper was analyzed, and a structural analysis was conducted. In addition, the fluid flow was analyzed according to the changes in the vane's angle, and experimental tests such as a dry-heat test and cold test were conducted considering the operating conditions of the vessels. Moreover, an appropriate actuator was selected for the developed gear-type vane damper, and studies on the reduction in the backlash due to the facing-pressure adjustment length and flow rate and leakage test due to the vane's angle were conducted.

Keywords :

Marine boiler, Forced-draft(FD) fan, Damper, Valve, Link, Incomplete combustion, Soot

† 교신저자, 한국폴리텍IV대학 충주캠퍼스 기계시스템공학과 교수 †Sung-Cheol Jang(corresponding author) : Department of Mechanical System Engineering, Polytech4, Chungjoo Camp.
E-mail : jsc@kopo.ac.kr, Tel : 043-850-4280 E-mail : jsc@kopo.ac.kr, Tel : 043-850-4280

1. 서 론

강제통풍 팬(FD FAN)은 배출 압력을 이용하여 가스나 공기를 가압하여 목적한 곳으로 이송할 때 쓰이는 장치이며, 흡입 유량을 제어하기 위해서 베인 댐퍼를 사용하고 있다. 베인 댐퍼는 선박 보일러 내부의 완전 연소를 위하여, 베인의 개폐 각도를 조절하여 공기의 흡입 유량을 제어하는 유량 조절 밸브이다. 선박 기자재에서도 최근 에너지 절감의 필요성이 증대됨에 따라 FD FAN 역시 동력 소모가 적은 동시에 효율이 높은 제품이 개발되고 있다. 따라서 FD FAN은 동력 소모를 줄이기 위하여 외부 부하 조건의 변동에 따라 공기의 유량 조절이 가능하도록 개발되는 것이 바람직하다. 이와 같은 FD FAN이 선박에 사용되면 운항 중에 외부 부하 조건의 변화가 심하더라도 효과적으로 외부 부하 조건을 조절할 수 있기 때문에 동력 절감 효과가 크게 나타난다.

FD FAN의 베인 각도를 정밀하게 조절하는 댐퍼에 관한 연구는 팬 시스템의 성능 향상을 위해서 매우 중요함에도 불구하고 이와 관련된 연구는 매우 부족한 실정이다. FD FAN의 댐퍼에 관한 연구로서 Jang 등^(1,2)은 고성능 기어식 베인 댐퍼 구동기에 관한 연구를 수행하였고, Yi 등⁽³⁾은 생산성 향상에 관한 연구를 수행하였으며, Witt 등⁽⁴⁾은 유동해석 관련 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 기존의 링크식을 대체한 기어식 베인 댐퍼를 개발하기 위해서 기어식 베인 댐퍼 내부에서 발생하는 기어의 강도평가 및 구조 유동해석을 수행하였다. 또한 기어식 베인댐퍼에 장착된 공압 및 전자식 액추에이터의 기밀 성능평가를 통해 품질 및 생산성 향상을 도모하였다.

2. 구조 및 유동해석

2.1 굽힘강도

베벨기어의 설계수명동안에 이뿌리(tooth root)에서 굽힘응력에 의한 절손이 발생하지 않도록 AGMA 규격의 굽힘강도 평가 식을 적용 평가하였다⁽⁵⁾.

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

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

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)로 S_{wt} 계산되며, 식에서 S_{at} 는 시험치차에서 평가된 허용굽힘 응력을 나타내고, K_L, K_T, K_R 은 각각 굽힘에 대한 수명계수, 온도계수, 신뢰도계수를 나타낸다⁽⁶⁾.

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

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

2.1 면압강도

면압강도 평가식은 Hertz의 접촉응력식에 기초를 두고, 접촉면의 접촉응력은 식 (4)과 같이 계산한다⁽⁶⁾.

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

여기서, C_p 는 재질의 탄성계수, C_b 는 응력조정상수, T_D 는 설계피니언 토크, z 는 하중지수, C_{xc} 는 크라운링 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 견딜 수 있는 사용접촉응력은 식 (4)로 S_{wc} 계산되며, 식에서 S_{ac} 는 시험치차에서 평가된 접촉피로한계⁽⁷⁾를 나타내고, C_L, C_T, C_R, C_H 은 각각 면압에 대한 수명계수, 온도계수, 신뢰도계수, 경도비계수를 나타낸다⁽⁸⁾.

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

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

2.3 CAE 해석 및 결과

Fig. 1은 구조해석을 수행하기 위해 Inventor를 사용하여 3D 모델링을 작업한 후 ANSYS Workbench를 이용하여 FEM해석을 수행한 결과이다. 기어와 피니언에서의 이의 접촉, 핀과 피니언, 핀과 축의 접촉하는 부위를 적용하여 해석을 수행하였다. 경계조건은 기어와 피니언을 Z축으로 하여 회전 변위 제외하고 나머지 변위를 구속하였다.

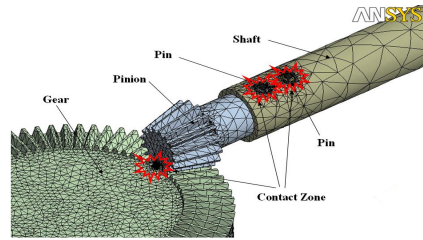
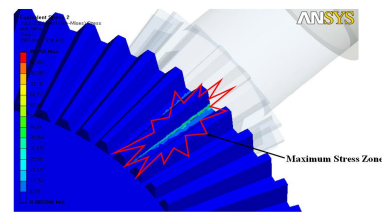


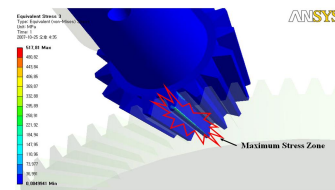
Fig. 1 Bevel gear FEM

SCM415 재질은 소성항복 조건에 잘 만족한다고 가정하고 등가응력 값을 기준으로 평가하였다.

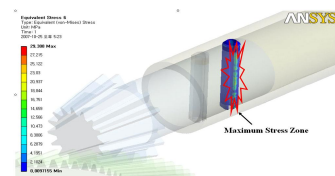
Fig. 2 (a), (b), (c)는 각 부품에서 최대응력 값을 보여주는 것이다. 기어 이의 접촉부위에 생기는 최대 응력 값은 89.25MPa이며, 피니언 이의 최대 응력 값은 517.81MPa 이고, 핀에 걸리는 최대 응력 값은 29.31 MPa로 확인되었다. SCM415의 항복강도는 599.84 MPa로 각 부품의 최대응력 값이 이에 미치지 못하므로 안전하다고 판단된다.



(a) Gear Stress Level



(b) Pinion Stress Level



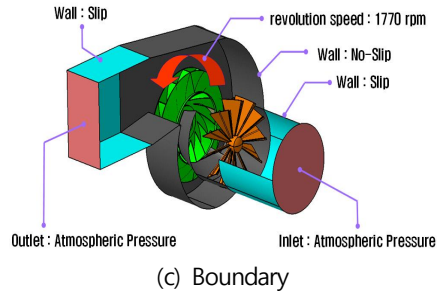
(c) Pin Stress Level

Fig. 2 Gear, pinion & pin stress level

2.4 CFD 해석결과

일반적으로 유동해석을 수행하기 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 1,770rpm의 고정회전수를 가지고 있기 때문에 정상 상태로 가정하여 MRF(Multiple 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.

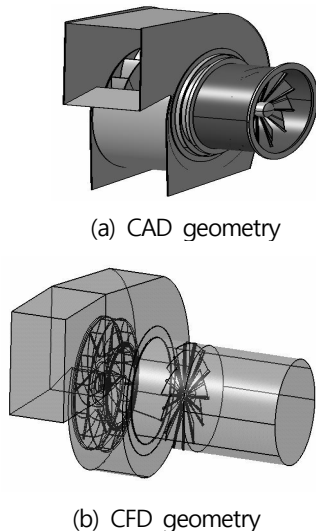
Fig. 3은 CFD 계산을 위한 기하학적 모델과 경계조건을 나타내고 있다. 유체영역만 계산하기 때문에 실제모델에서 솔리드 영역을 제외시켜 모델링이 수행되고, 경계 조건시 부여되는 입-출구의 대기압이 균일하게 발생되기 위해 각각 1m씩 입-출구를 확장 하였다. 임펠러의 회전수는 1770rpm으로 일정하게 회전되고, 임의 확장시킨 입-출구 공기층의 벽면은 슬립 조건으로 가정하였다.



(c) Boundary

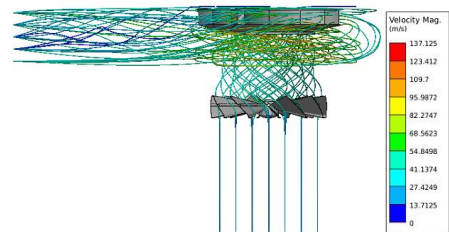
Fig. 3 Computational geometry and Boundary

Fig. 4는 기어식 베인덤퍼를 장착하여 베인이 가장 많은 토크를 받을 각도가 20° 와 45° 일 경우에 대한 입자추적 결과를 나타내고 있다. 그 결과 베인이 안내깃 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.

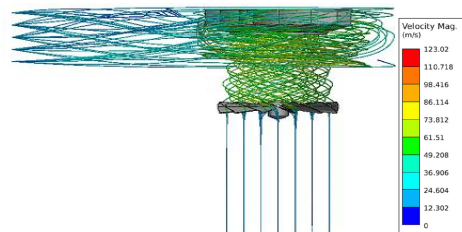


(a) CAD geometry

(b) CFD geometry



(a) 20 deg



(b) 45 deg

Fig. 4 Comparison of particle tracking in FD Fan

3. 베인뎀퍼의 기밀 성능평가

설계사양에서 선택된 액추에이터 타입에 대해 베인뎀퍼가 열릴 때와 닫힐 때에 대한 유량변화를 확인하기 위해 Fig. 5와 같은 송풍기 시험장치를 사용하여 베인뎀퍼 Opening ratio에 대하여 유량을 측정하였다. 시험장치는 KS B 6311의 규정에 따라 송출덕트 직경은 $\phi=600\text{mm}$ 이고, 길이는 7,926mm인 시험장치를 구성하였다⁽⁹⁾.



Fig. 5 Experimental setup for fan test

Fig. 6은 전자식 액추에이터의 베인뎀퍼가 닫혔다가 열릴 경우와 열렸다가 닫힐 경우에 대한 베인뎀퍼 Opening ratio에 대한 유량을 측정한 결과이다. 실험결과 전자식 액추에이터를 적용할 경우 베인뎀퍼 Opening ratio 50% 이전에서 유량차가 발생함을 확인할 수 있었다. Opening ratio 50% 이하에서는 베인뎀퍼의 개폐각도가 작기 때문에 많은 부하가 발생하게 된다. 유량차이는 베인뎀퍼가 열려 있다가 닫힐 때 유량이 증가하는 현상이 발생하였으며, 이는 베인뎀퍼의 기어에서 발생하는 백래쉬와 전자식 액추에이터의 기어 백래쉬가 합쳐져 풍압에 의해 베인뎀퍼가 지정각도에 도달하지 못하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 공압식 액추에이터를 적용하였을 경우에 대한 유량을 측정한 결과이다. 전자식 액추에이터에 비해 베인뎀퍼의 개폐방향에 따른 유량 차이가 적은 것을 확인할 수 있었다. 또한 개폐초

기 전자식 액추에이터에 비해 유량증가 기울기가 보다 완만하게 이루어짐을 확인할 수 있었다. 그러나 공압식 액추에이터도 마찬가지로 개폐방향에 따른 유량차이가 발생하였고, 이것 또한 베인뎀퍼의 기어 백래쉬에 의한 결과로 판단된다.

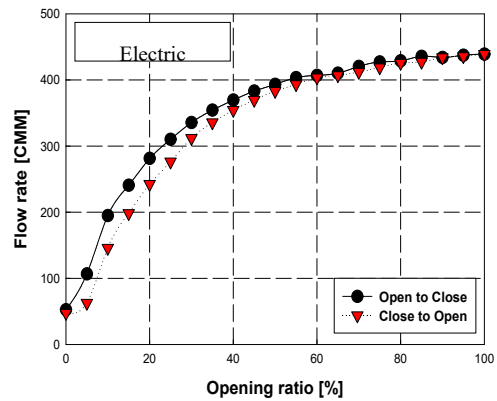


Fig. 6 Comparison of flow rate by using electric actuator

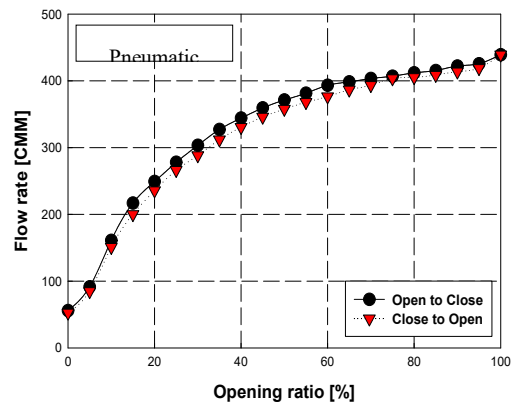


Fig. 7 Comparison of flow rate by using pneumatic actuator

Fig. 8은 기존의 링크식 베인뎀퍼와 개발된 기어식 베인뎀퍼의 각도에 따른 유량을 측정을 나타낸 실험결과이다. 베인의 개폐각도는 Fig. 6~7의 실험결과에서 규명된 것과 같이 공압식 액추에이터를 사용하였다.

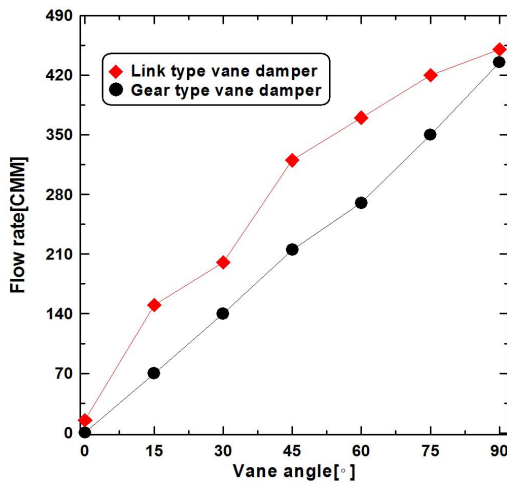


Fig. 8 Flow rate measurement of link & Gear type vane damper

앞에서 설명한 것과 같이 링크식의 경우 베인의 각도가 0도일 경우 누설유량이 12CMM 넘게 발생이 되나 기어식의 경우 누설유량이 거의 없는 것을 알 수 있다. 이것은 링크식의 경우 베인을 벤딩가공 해서 선접촉에 의한 누설을 방지하나, 기어식의 경우 프레스로 가공하여 면접촉을 하기 때문에 누설유량이 4CMM이하로 감소했기 때문이다. 또한 기어식의 경우 베인 각도에 따른 유량이 거의 선형적으로 증가하고 있으나 링크식의 경우 15도 및 45도의 각도에서 유량이 불규칙한 것을 알 수 있다. 이것은 초기 0~15도 및 45도 각도에서 베인의 각도를 제어하는 링크의 불균형으로 인해 베인이 짧은 순간에 갑자기 열림으로서 순간적으로 많은 유량이 보일러 내부에 유입되기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 링크식을 대체한 기어식 베인 댐퍼를 개발하기 위해서 기어식 베인 댐퍼

내부에서 발생하는 기어의 강도평가 및 구조 유동 해석을 수행하였다. 또한 기어식 베인댐퍼에 장착된 공압 및 전자식 액추에이터의 기밀 성능평가를 통해 품질 및 생산성 향상을 도모하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 구조해석 결과 기어 이의 접촉부위에 생기는 최대 응력 값은 89.25 MPa이고, 피니언의 최대 응력 값은 517.81 MPa이고, 핀의 최대 응력 값은 29.31 MPa이고, SCM415의 항복강도는 599.84 MPa로 각 부품의 최대응력 값이 이에 미치지 못하므로 안전한 것을 알 수 있었다.
2. CFD 결과 베인의 열림 각도가 작을수록 압력이 증가하고, 각도가 클수록 유동저항이 적게 발생하여 압력이 낮아지게 되는 것을 알 수 있었다.
3. 실험을 통하여 전자식과 공압식 액추에이터의 유량을 측정하였고, 공압식의 경우 전자식 액추에이터에 비해 베인댐퍼의 개폐방향에 따른 유량차가 적음을 확인할 수 있었다.
4. 기어식 베인 댐퍼의 경우 베인 각도에 따른 유량이 거의 선형적으로 증가하고 있으나 링크식의 경우 15도 및 45도의 각도에서 유량이 불규칙한 것은 초기 0~15도 및 45도 각도에서 베인의 각도를 제어하는 링크의 불균형으로 인해 베인이 짧은 순간에 갑자기 열림으로서 순간적으로 많은 유량이 보일러 내부에 유입되기 때문이다.

후 기

본 연구는 2016년도 경남과학기술대학교 대학 회계연구비 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사함을 전합니다.

참고문헌

- [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)" KSMTE J. 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(KSME 09TE068), pp. 311~318.
- [4] P. J. Witt, C. G. Solnordal, L. J. Mittoni, S. Finn, J. Pluta, 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.
- [5] Dudley, D.W., 1984, Handbook of Practical Gear Design, McGraw-Hill.
- [6] ANSI/AGMA 2003-A86, 1988, Rating the Pitting and Bendinf Strength of Generated Straight Bevel, ZEROL Bevel, and Spiral Bevel Gear Teeth.
- [7] ANSI/AGMA 2005-B88, 1988, Design Manual For Bevel Gears
- [8] Choong Hyun Kim, Hyo Sok Ahn and Tae Hyong Chong, 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.
- [9] KS, 2006, Testing Methods for Industrial Fans, KS B 6311, KSSN, Korea.

(접수:2016.09.21.,수정:2016.10.12, 게재확정:2016.11.03)