

◆특집◆ 기어

선박/해양플랜트용 FD FAN의 기어식 베인 댐퍼 성능 개선에 관한 연구

장성철^{*,#}, 정완보^{**}, 이중섭^{***}

*한국폴리텍대학 항공캠퍼스, ** 한국폴리텍1대학 인천캠퍼스, ***경남과학기술대학교

A Study on Performance Improvement of Gear Type Vane Damper in Marine/Offshore FD Fan

Sung-Cheol Jang^{*,#}, Wan-Bo Jung^{**}, Chung-Sub Yi^{***}

*Korea Aviation Polytechnic College Dept. of Aviation Mechatronics, **Korea Polytechnic 1 College Dept. of Aviation Mechatronic, *** Gyeongnam National Univ. of Science and Tech.

(Received 4 February 2015; received in revised form 17 February 2015; accepted 27 February 2015)

ABSTRACT

In this study, we developed a gear-type vane damper which replaces the link type through a proper gear design by means of a finite element analysis. We analyzed the fluid flow according to the amount of angular displacement. torque and backlash problems were addressed in conjunction with the pinion as a structural improvement of the forced draft fan (FD FAN). Through an environmental test, . Also, results nearly identical to those in the test could be drawn when using a numerical method. Finally, we compared the gear driving result with simulation results. objective of the present study is to identify a nonlinear flow rate control method for a gear-type vane damper and to propose a damper shape which offers linear flow rate control. This study is related to the development of a gear-type vane damper of the change-link type in a forced draft fan.

Key words : Marine Forced Draft Fan(선박용 강제통풍팬), Gear Type Vane Damper(기어식 베인 댐퍼), Link Type(링크식), Vane Shaft(베인축), Torque(토크)

1. 서 론

강제 통풍 팬(FD FAN)은 배출 압력을 이용하여 가스나 공기를 가압하여 목적인 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 유량조절 밸브이다.

Corresponding Author : scjang@kopo.ac.kr
Tel: +82-55-830-3477, Fax: +82-55-8303414

최근 대부분의 선박에는 링크식 베인 댐퍼를 사용하여 유량을 자동 또는 수동으로 조절할 수 있는 팬이 적용되고 있다. 그러나 초기 0~20 각도에서 베인의 각도를 제어하는 링크의 불균형으로 인해 베인이 짧은 순간에 갑자기 열림으로서 순간적으로 많은 유량이 보일러 내부에 유입되기 때문에 불완전 연소로 인해 매연발생이 심각한 상태이다.

FD FAN의 베인 각도를 정밀하게 조절하는 댐퍼에 관한 연구는 쉘 시스템의 성능 향상을 위해서 매우 중요함에도 불구하고 이와 관련된 연구는 매우 부족한 실정이다. FD FAN의 댐퍼에 관한 연구로서 Jang 등^(1~3)은 고성능 기어식 베인 댐퍼 구동에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 링크식을 대체한 기어식 베인 댐퍼를 개발하기 위해서 기어식 베인 댐퍼에서 발생하는 토크를 분석한 후 구조해석을 수행하고, 환경 시험에 대한 기초 성능실험을 수행하여 개발품에 적절한 액추에이터를 선정하였다.

2. 베인댐퍼의 토크 분석

Fig. 1은 FD FAN의 플렌지, 보스, 베인을 나타내는 그림이다. 베인의 개수는 총 12개이고, 베인을 지지하는 피니언 축도 베인의 개수와 동일하다. Fig. 2는 Fig. 1의 베인에 작용하는 전달 토크를 구하기 위해서 베인의 형상을 단면 1차모멘트로 하여 도심을 구하기 위한 형상을 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 것과 같이 베인 댐퍼에 유체가 흡입될 경우 단면적 A_1 에 작용하는 힘은 힘의 평형에 의해 서로 상쇄되어 없어지지만 단면적 A_2 에 작용하는 힘은 사각형과 삼각형의 합으로 작용한다. 베인 댐퍼의 흡입쪽 수두는 20mmAq이므로 압력 $P=0.002\text{kg/cm}^2$ 로 작용한다. 따라서 베인에 작용하는 힘은 149.74N이다. 베인의 개수가 총 12개이므로 베인 1개에 작용하는 힘은 12.47N으로 나타낼 수 있다. 베인에 작용하는 토크를 구하기 위해서 Fig. 2를 참고하여 단면 1차모멘트의 A_1 과 A_2 의 도심은 식 (1)로 구할 수 있다.

$$G_x = \bar{y}_1 A_1 + \bar{y}_2 A_2 + \dots \int_A \bar{y} dA = \bar{y} A \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{\bar{y}_1 A_1 + \bar{y}_2 A_2}{A_1 + A_2} = 7.9\text{cm}$$

베인 1개에 작용하는 토크는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$T_z = F_z \times \bar{y} = 12.47 \times 0.079 = 0.98\text{Nm} \quad (2)$$

기어식 베인 댐퍼는 Fig. 3과 같이 피니언 12개중 1개가 회전하면 나머지 피니언 11개가 동시에 회전하므로 모터에 작용하는 동력은 0.495PS이다. 베인의 자중이 고려될 경우 베인 1개의 무게는 3kg이므로 베인 1개에 작용하는 토크는 식 (3)과 같다.

$$T_z = (F_z + W_z) \times \bar{y} \quad (3)$$

$$= (12.47 + 3) \times 0.079 = 1.22\text{Nm}$$

자중이 고려될 경우 베인의 갯수가 12개이므로 전체 발생하는 토크는 식 (4)로 구할 수 있다.

$$T_t = T_z \times 12 = 1.22 \times 12 = 14.64\text{Nm} \quad (4)$$

자중이 고려될 경우 동력은 0.61PS(0.45kW)로 나타낼 수 있다.

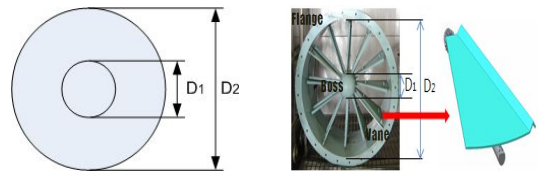


Fig. 1 Flange, boss, vane of vane damper

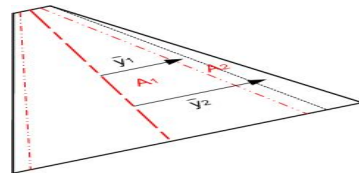


Fig. 2 Area 1'st moment of vane

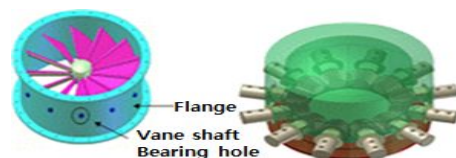


Fig. 3 Operating of gear type vane damper

3. 구조해석

3.1 베벨기어의 강도 평가

베벨 기어의 강도는 이(tooth)의 굽힘강도, 치면의 면압강도, 스크링 강도, 마모에 대한 강도 등을 들 수 있는데, 본 연구에서는 비교적 강도평가 방법이 잘 정비되어 있는 AGMA규격⁽⁴⁻⁶⁾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	20 mm	
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
Poisson'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⁾.

$$S_{tP} = \frac{2T_P K_a P_d K_s K_m}{K_v F d K_x J_p} \quad \text{for pinion} \quad (5)$$

$$S_{tG} = \frac{2T_G K_a P_d K_s K_m}{K_v F D K_x J_p} \quad \text{for gear} \quad (6)$$

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 (7)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⁽⁴⁾.

$$S_{wt} = \frac{S_{at} K_L}{K_R K_T} \quad (7)$$

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.

3.3 면압강도

면압강도 평가식은 Hertz의 접촉응력식에 기초를 두고, 접촉면의 접촉응력은 식 (8)과 같이 계산한다⁽⁶⁾.

$$S_c = C_p C_b \sqrt{\frac{2T_D C_a \left(\frac{T_P}{T_D}\right)^z}{C_v} \frac{1}{F d^2} \frac{C_s C_m C_{xc} C_f}{I}} \quad (8)$$

여기서, C_p 는 재료의 탄성계수, C_b 는 응력조정상수, T_D 는 설계피니언 토크, z 는 하중지수, C_{xc} 는 크라우닝 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 (9) 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. 사용접촉응력 S_{wc} 은 900.87 MPa, S_c 는 751.31 MPa 나타나 안전한 것으로 평가된다.

$$S_{wc} = \frac{S_{ac} C_L C_H}{C_T C_R} \quad (9)$$

3.4 CAE 해석 및 결과

Fig. 4는 구조해석을 수행하기 위해 Inventor를 사용하여 3D 모델링을 후 ANSYS Workbench를 이용하여 FEM해석을 수행하였다. 기어와 피니언에서의 이의 접촉, 핀과 피니언, 핀과 축의 접촉하는 부위를 적용하여 해석을 수행하였다. 경계조건은 기어와 피니언 Z축으로 하여 회전 변위 제외하고 나머지 변위를 구속하였다. SCM415 재료는 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.

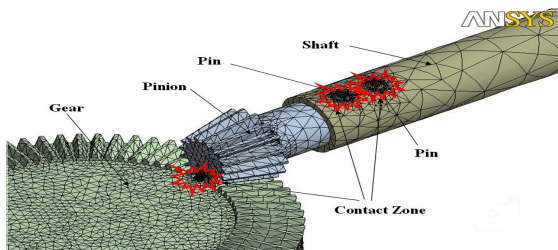
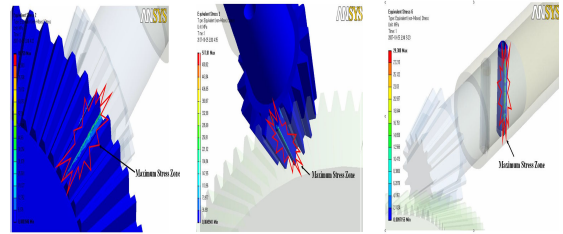


Fig. 4 Bevel gear FEM



(a)Gear ress Level (b)Pinion tress Level (c)Pin Stress Level

Fig. 5 Gear, pinion & pin stress level

SCM415의 항복강도는 599.84 MPa로 각 부품의 최대응력 값이 이에 미치지 못하므로 안전하다고 판단된다.

4. 성능실험

4.1 베인 설계 및 조립

기존의 베인 가공은 철판을 플라즈마로 절단한 후 벤딩하여 생산하였다. 그러나 Fig. 6 (a)와 같이 베인과 베인이 겹칠 때 선으로 접촉되기 때문에 유동에 의한 압력을 받으면 틈이 생겨 누설을 막기에는 한계가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Fig. 6 (b)와 같이 누설유량을 최소화 시키기 위해 베인과 베인이 겹치도록 면접촉을 하여 누설유량을 최대한 방지할 수 있는 구조로 설계하였다. 따라서 기존의 벤딩에 의한 가공이 어려워 금형을 제작하여 베인을 가공하였다.

Fig. 7 (a)는 베인을 제작하기 위한 금형을 나타낸 것이다. Fig. 7 (b)는 개선 전의 벤딩에 의한 베인 형상과 금형에 의하여 개선되어진 베인 형상을 나타내 것이다. 개선된 베인은 금형에 의하여 일정한 제작품이 나오므로 치수 정밀도가 정확하여 불량률을 줄일 수가 있었고 누설유량 또한 기존에 비해 10% 정도 감소시킬 수 있었다.

Fig. 8은 회전축과 베인을 체결하는 방식에 대해 개선된 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8 (a)의 용접방식은 기타 부품이 없기 때문에 가격경쟁력이 있는 방식이나 용접과정에서 발생하는 열응력에 의해

베인이 뒤틀리는 현상이 발생하였다. Fig. 8 (b)와 같이 U-볼트를 사용하여 체결하는 방식으로 변경하였으나 체결력이 약하고, 회전축과 U-볼트와의 접촉면적이 좁아 베인이 뒤틀어지는 상황이 발생하였다. 따라서 최종적으로 (a)와 (b)가 가지고 있는 문제점을 해결하기 위해 (c)와 같이 클램프를 적용하여 회전축과 베인의 구속력을 강화시킬 수 있었다.

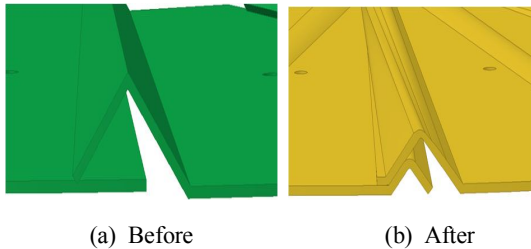


Fig. 6 Improvement of vane shapes

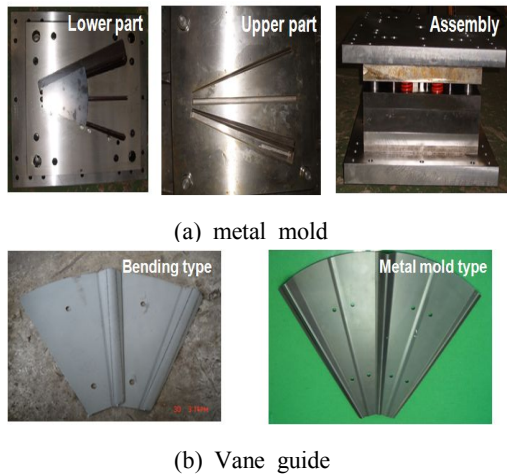


Fig. 7 Metal mold and vane shape

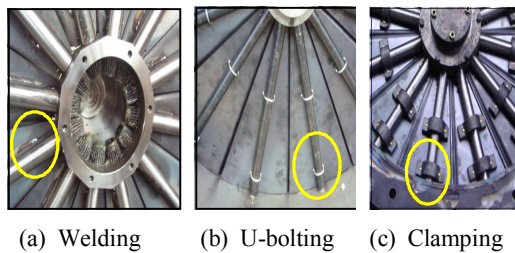


Fig. 8 Improvement process of vane combine

4.2 베인댐퍼 환경시험

선박은 국내뿐만 아니라 전세계를 운항하고 있다. 따라서 개발된 베인댐퍼의 성능을 확인하기 환경시험을 (재)한국조선기자재연구원에서 건조고온 시험, 온습도시험, 저온시험 총 3가지에 대한 시험을 Table 3과 같은 시험규격으로 수행하였으며, Fig. 9는 환경시험 장면을 나타낸 것이다. 건조고온 시험은 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 3시간동안 규정온도인 $55.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 로 도달 하였을 때 상대습도는 95% 이상이다. 저온시험은 ICE 60068-2-1에 의해 시험하였으며, 시험환경은 온습도시험 주변환경과 동일하며, 시험결과 (재)한국조선해양기자재연구원 에서 합격 판정을 받았다.



Fig. 9 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
Damper Heat	ICE 60068-2-30, 2005, Environmental Testing-Damp Heat, Cycle(12h+12h Cycle)
Cold	ICE 60068-2-1, 1994, Environmental Testing-Cold

4.3 액추에이터 선정 기초 성능실험

설계사양에서 선택된 액추에이터 타입에 대해 베인덤퍼가 열릴 때와 닫힐 때에 대한 유량변화를 확인하기 위해 Fig. 10과 같은 송풍기 시험장치를 사용하여 베인덤퍼 Opening ratio에 대하여 유량을 측정하였다. 시험장치는 KS B 6311의 규정에 따라 송출덕트 직경은 $\phi=600\text{mm}$ 이고, 길이는 7,926mm인 시험장치를 구성하였다⁷⁾.

Fig. 11은 전자식 액추에이터의 베인덤퍼가 닫혔다가 열릴 경우와 열렸다가 닫힐 경우에 대한 베인덤퍼 Opening ratio에 대한 유량을 측정한 결과이다. 실험결과 전자식 액추에이터를 적용할 경우 베인덤퍼 Opening ratio 50% 이전에서 유량차가 발생함을 확인할 수 있었다. Opening ratio 50% 이하에서는 베인덤퍼의 개폐각도가 작기 때문에 많은 부하가 발생하게 된다. 유량차이는 베인덤퍼가 열려 있다가 닫힐 때 유량이 증가하는 현상이 발생하였으며, 이는 베인덤퍼의 기어에서 발생하는 백래쉬와 전자식 액추에이터의 기어 백래쉬가 합쳐져 풍압에 의해 베인덤퍼가 지정각도에 도달하지 못하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 12는 공압식 액추에이터를 적용하였을 경우에 대한 유량을 측정한 결과이다. 전자식 액추에이터에 비해 베인덤퍼의 개폐방향에 따른 유량차이가 적은 것을 확인할 수 있었다. 또한 개폐초기 전자식 액추에이터에 비해 유량증가 기울기가 보다 완만하게 이루어짐을 확인할 수 있었다. 그러나 공압식 액추에이터도 마찬가지로 개폐방향에 따른 유량차이가 발생하였고, 이것 또한 베인덤퍼의 기어 백래쉬에 의한 결과로 판단된다.

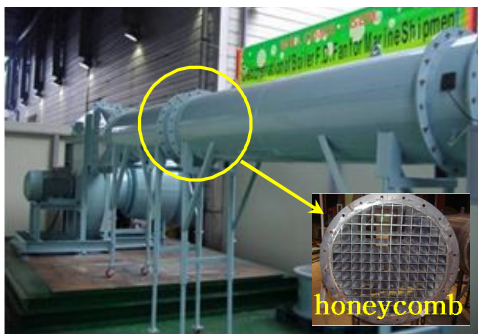


Fig. 10 Experimental setup for fan test

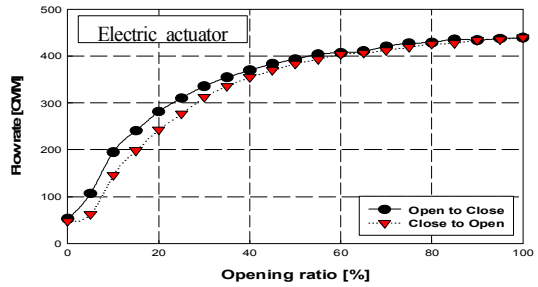


Fig. 11 Comparison of flow rate by using electric actuator

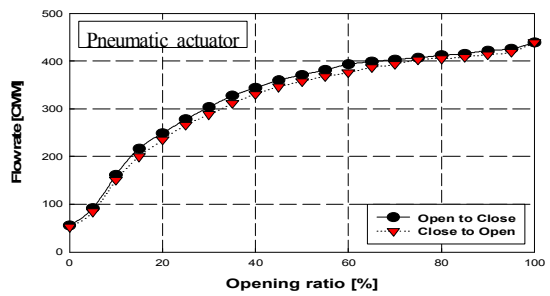


Fig. 12 Comparison of flow rate by using pneumatic actuator

5. 결론

본 연구에서는 링크식을 대체한 기어식 베인덤퍼를 개발하기 위해서 기어식 베인덤퍼에서 발생하는 토크를 분석한 후 구조해석을 수행하고, 환경시험에 대한 기초 성능실험을 수행하여 개발품의 적절한 액추에이터를 선정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. FD FAN의 베인덤퍼에 발생하는 전체 토크는 11.83Nm이고, 모터의 동력은 0.496PS로 나타났으며, 베인의 자중이 고려될 경우 전체토크는 14.64Nm이고, 동력은 0.61PS인 것을 알 수 있었다.
2. 구조해석 결과 기어 이의 접촉부위에 생기는 최대 응력 값은 89.25 MPa이고, 피니언의 최대 응력 값은 517.81 MPa이고, 핀의 최대응력 값은

29.31 MPa이고, SCM415의 항복강도는 599.84 MPa로 각 부품의 최대응력 값이 이에 미치지 못하므로 안전한 것을 알 수 있었다.

3. 개선된 베인은 금형에 의하여 일정한 제작품이 나오므로 치수 정밀도가 정확하여 불량률을 줄일 수가 있었고 누설유량 또한 기존에 비해 10% 정도 감소시킬 수 있었다.
4. 베인 댐퍼의 보스부와 베인을 개발하고 환경시험을 통하여 작동상태를 확인한 결과 고온건조 시험, 온습도시험, 저온시험 결과 정상적인 작동이 이루어져 활용성이 높은 것을 알 수 있었다.
5. 실험을 통하여 전자식과 공압식 액추에이터의 유량을 측정하였고, 공압식의 경우 전자식 액추에이터에 비해 베인댐퍼의 개폐방향에 따른 유량차이가 적음을 확인할 수 있었다.

References

1. Jang, S. C., Cho, H. D., and Kim, N. K., "Development of Gear Type Vane Damper Change Link Type in FD Fan,"KSMTE, Vol. 13, No. 1, pp.104. 2007.
2. Jang, S. C., Han, S. H., and Kim, J. W., "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. 2010.
3. Yi, C. S., Hong, J. K., Suh, J. S., Shin, Y. I. and Park, Y. S., "Effect of Cut off Angle on the Flow Characteristic of Turbo-Fan", Conference Proceedings of KSME Spring Annual 09TE068), pp.311. 2009.
4. Dudley, D. W., Hanbook of Practical Gear Design, McGraw-Hill. 1984.
5. ANSI/AGMA 2003-A86, Rating the Pitting and Bend inf Strength of Generated Straight Bevel, ZEROL Bevel, and Spiral Bevel Gear Teeth.
6. ANSI/AGMA 2005-B88, Design Manual For Bevel Gears, 1988.
7. KS, Testing Methods for Industrial Fans, KS B 6311, KSSN, Korea, 2006.