

## 제연용 벽부형 축류 송풍기 설계 및 시험결과

정철영\*† · 이경용\*\* · 국정근\*\*\*

# Design And Test Results of Wall Mounted Axial Flow Fan for Smoke Ventilation

Cherl-Young Jeong\*†, Kyoung-Yong Lee\*\*, Jeong-Keun Kook\*\*\*

Key Words : Axial Fan(축류 송풍기), Setting Angle(설치각), Wall-Mounted(벽부형), Smoke Ventilation(제연), High Temperature(고온)

### ABSTRACT

The NACA 65 series 6-digit airfoil was newly designed and applied. After designing the airfoil, 3D CFD flow analysis was performed to confirm the amount of change from the existing reference model, and the safety of the impeller at high temperature was reviewed through structural analysis. The three-dimensional flow analysis(CFD) is an incompressible steady-state analysis using ANSYS CFX 19.1 commercial software, and it is analyzed based on the SST RM (shear stress transport reattachment modification) turbulence model. The aerodynamic performance test was performed using a multi-nozzle chamber according to the AMCA 210-16 standard(free inlet/free outlet). The power was calculated by the rotation speed and the torque measured by the dynamometer. As a result of the test, the flow rate was more than 25000CMH, the static pressure efficiency was 57.1%, the static pressure was 254Pa and normal operation was confirmed at 300°C for 128 minutes. It was confirmed as a result of structural analysis that the safety factor was maintained over 1.51 even at a high temperature of 300°C.

### 1. 서 론

지하공간의 면적 증가와 더불어 지하공간 활용성 극대화를 위하여 기존의 기계실 설치형 축류 송풍기 및 원심형 송풍기의 설치방식은 점차 벽부형 송풍기의 설계와 시공으로 변화되고 있으며 화재에 대비한 제연용 송풍기의 설치가 증가하고 있는 추세이다. 기존의 행거타입 또는 벽부용 환기 송풍기는 다양한 성능조건을 만족시키기 위하여 벨트 구동 방식을 적용하여 왔다.

법률적 요구에 따라 환기량을 만족하기 위하여 화재에 대비한 고온 상황에서의 운전성능을 고려하지 않고 설치되는 경우가 많았다. 그러나 근래의 지하공간 화재사고 및 인명피해의 문제점이 대두되면서 외국산의 벽부형 축류 송풍기는



(a) Propeller type Wall Mounted Fan



(b) Centrifugal type Hanger Fan

Fig. 1 Fan for Smoke Ventilators

전문 수입사를 통해 국내에 유통되고 있다.

국내에서는 기존의 지하공간 환기용 송풍기로 Fig. 1과 같은 형태의 제품들이 주를 이루었다. 해외의 경우에는 제연용 송풍기에 대하여 벨트구동 방식이 엄격히 제한되고 있으며

\* (주)금성풍력 기술연구소 & 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (Technical R&D Center of Gumsung Poongryuck Co., LTD. & Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Kongju University)

\*\* 한국생산기술연구원 청정기술연구소 탄소중립산업기술연구부 (Carbon Neutral Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology)

\*\*\* 한국기술교육대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Korea University of Education and Technology)

† 교신저자, E-mail : heavyfan@naver.com

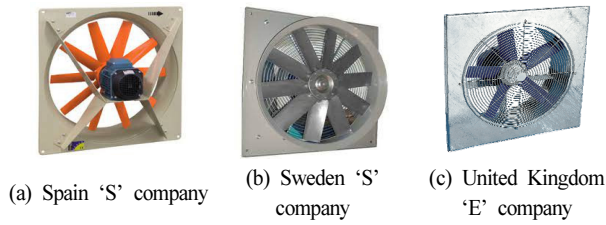


Fig. 2 Over Seas Wall Mounted Axial Fans

모터 축 직결식이나 커플링 직결방식을 주로 사용하여 고온 상황에서의 운전시간에 대한 인증이 이루어지고 있다.

국내의 경우 제연용 송풍기에 대한 인증이 미비하여 유럽의 CE인증 또는 미국의 UL인증을 획득한 제품이 수입되어 설치되고 있는 상황이다. 국내에 수입되는 벽부형 축류 송풍기 제품들은 주로 유럽연합 다국적 기업의 제품들로 파악되고 있다.

외산 벽부형 제품들은 Fig. 2와 같은 형태로 제작되고 있으며 고온 가동 신뢰성 시험을 완료하여 CE 인증을 획득한 제품들이다.

본 연구는 국내에 수요가 예상되는 고온용 벽부 축류 송풍기 신규개발을 위하여 기초설계 및 유동해석, 고온 조건에서의 구조안전성 검토를 위한 해석, 실물 제작 및 시험 진행을 통한 설계의 타당성을 검토하였다.

## 2. 설 계

### 2.1 기본설계

지하공간의 환기 및 제연에 사용되는 벽부형 송풍기의 경우 지하공간의 형태, 면적, 설치위치 및 환기구의 형태에 따라 유량과 압력을 달리한다. 국내의 건설현장에서 적용되는 설계방법을 검토한 결과 출구 BDD(Back Draft Damper)의 유무에 따라 송풍기의 정압은 약 50~250Pa 정도로 파악되었다. 유량은 공간의 체적에 따라 모듈식 설치가 가능할 것으로 판단되어 선진사들의 카탈로그를 참조하여 결정하였다.

Table 1은 설계에 반영된 수치이다. 기계실이 없는 구조

Table 1 Design specifications of a wall-mounted axial fan

| Design specification       | Value  | Remark                                |
|----------------------------|--------|---------------------------------------|
| Specific speed ( $N_s$ )   | 3.90   | $\omega\sqrt{Q}/(P_t/\rho)^{3/4}$ [-] |
| Volume flow rate ( $Q$ )   | 25,000 | [m <sup>3</sup> /hr]                  |
| Rotation speed (N)         | 880    | [min <sup>-1</sup> ]                  |
| Static pressure ( $P_s$ )  | 250.0  | [Pa]                                  |
| Total pressure ( $P_t$ )   | 296.3  | [Pa]                                  |
| Hub / Tip ratio            | 0.41   | [-]                                   |
| Impeller Diameter( $D_i$ ) | 994    | [mm]                                  |
| Number of blades(Z)        | 10     | [-]                                   |
| Tip clearance              | 3      | [mm]                                  |

로 설치되기 때문에 저소음화 및 모터 직결형태를 고려하여 모터 극수별 회전수에 적합하도록 최대한 회전수를 낮게 설정하였다. 축류 송풍기의 케이싱과 임펠러 팁과 하우징 간 간극(Clearance)은 송풍기의 효율에 매우 중요한 설계변수이며 간극이 작을수록 효율과 압력이 상승하는 것으로 보고되고 있다. 그러나 제연용 송풍기의 경우에는 고온에서의 열팽창을 고려하여 일반적인 축류 송풍기보다 다소 크게 설정하였다.

### 2.2 참조모델의 선정

본 연구에서는 3차원 유동해석을 진행하여 신규 제품의 개발을 목적으로 진행되었다. 3차원 유동해석은 실험으로 확인할 수 없는 유체의 흐름이나 압력분포, 날개 후단의 난류의 거동 등을 확인할 수 있는 매우 유용한 도구로서 근래에 들어 많이 적용되고 있다. 그러나 컴퓨터 시뮬레이션은 적용 난류모델 또는 입출구의 적용조건, 간략화된 해석형상 등에 따라 실험과의 오차를 수반하게 된다. 따라서 시험결과와 해석결과의 오차 또는 경향성 분석이 필요하였으며 참조모델의 시험결과와 유동해석 비교분석을 시행하여 오차를 보정하는 방법을 적용하였다.

참조용 모델은 유럽의 N사 모델을 선정하였다. N사 임펠러를 성능시험 진행 후 유동해석을 위해 날개 및 허브를 3차원 측정을 통해 3D모델링으로 구현하는 역설계를 진행하였다. 3차원 측정으로 반경방향 위치별로 적용된 익형모델을 구하였으나 정확히 일치된 모델을 찾을 수 없었다. 가장 비슷한 모델로는 NACA 65계열의 익형으로 추정되었다. 이는 제조사에서의 제조과정 중 익형 변형이나 3차원 측정 후 형상 모델링 과정에서 오차산입 등으로 추정된다.

Fig. 3은 참조 모델의 각 반경방향 위치별 익형 분포를 추

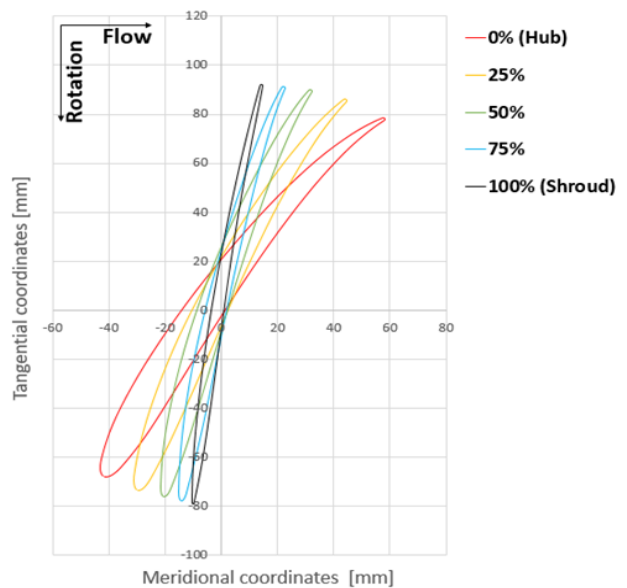


Fig. 3 Airfoil distribution by section of the reference model

정한 결과이다. 전연(Leading Edge)은 전형적인 NACA 65 계열 익형보다 완만한 타원의 형태를 보이고 있으며 후연(Trailing Edge)부분의 약 0.8~1.5 mm 정도의 반호 형태를 적용하여 다이캐스팅 공법으로 제작되어 있었다.

### 2.3 신규 익형 설계

신규모델의 익형은 참조모델의 시험결과보다 높은 압력과 유량을 목적으로 설정하였기 때문에 기존의 참조모델 익형보다 양력계수(Lift Coefficient)가 높은 익형으로 선정하였다. 익형모델은 NACA-6digit 모델을 적용하였으며 후연부부에는 중력주조에 의한 주조성을 확보하기 위하여 2.5~3 mm 정도의 간극을 설정하였다. 설치각과 관련하여 각 반경방향 위치별 공기유동속도와 회전수를 감안하여 1차 설정하였고 3차원 유동해석을 통하여 각 반경방향 위치별 설치각을 약간씩 조정하였으며 최종 익형의 위치별 분포는 아래 Fig. 4와 같다.

## 3. 3차원 유동 수치해석

### 3.1 3차원 유동해석조건

3차원 유동해석(CFD)은 참여기관인 한국생산기술연구원

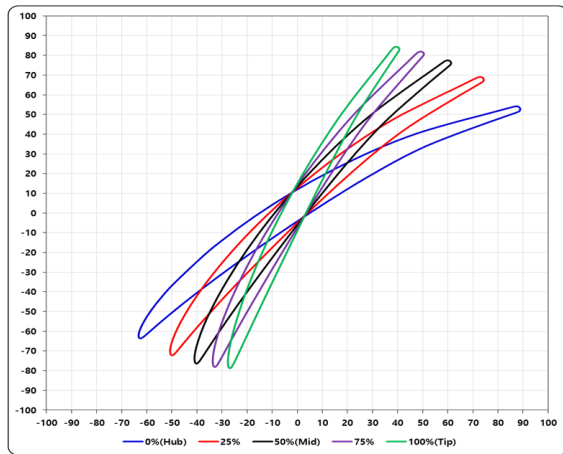


Fig. 4 Airfoil distribution by section of the New model

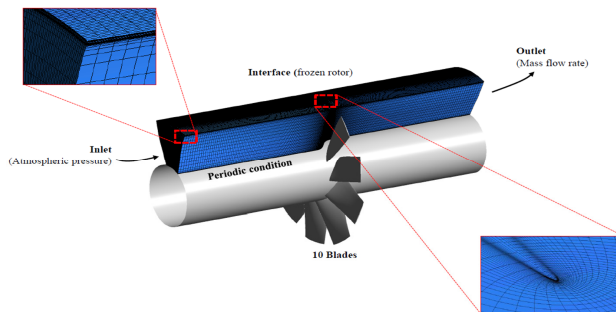


Fig. 5 3D flow analysis conditions of Part

에서 수행하였으며 상용 소프트웨어(ANSYS CFX 19.1)를 활용한 비압축성 정상상태 해석을 진행하였다.  $k-\omega$  기반의 SST RM(Shear Stress Transport Reattachment Modification) 난류 모델을 적용하였으며 입구 및 출구에 각각 대기압 및 질량유량 조건을 부여하였다.

3D 유동해석에 사용된 형상구현 조건은 각각 Fig. 5 및 6이며 Fig. 5는 날개 특성만을 고려하기 위해 입구부를 단순화시킨 형상이고 Fig. 6은 실험조건과 동일하게 임펠러 전단에 모터(Motor)가 설치된 형상 및 입구 벨마우스를 고려한 형상이다. 해석 결과는 part(Fig. 5) 및 full(Fig.6)로 구분하였다.

### 3.2 3차원 유동해석 결과

Fig. 7(a)는 참조모델의 시험결과와 전산해석상의 경향차

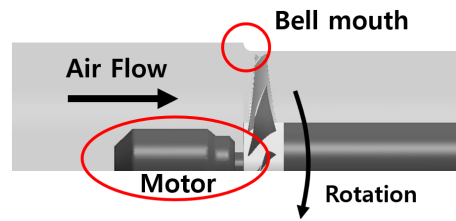
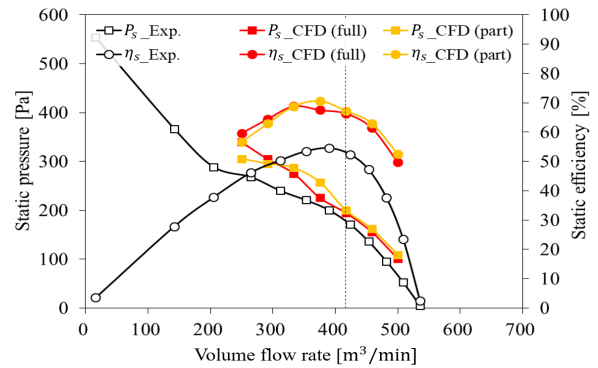
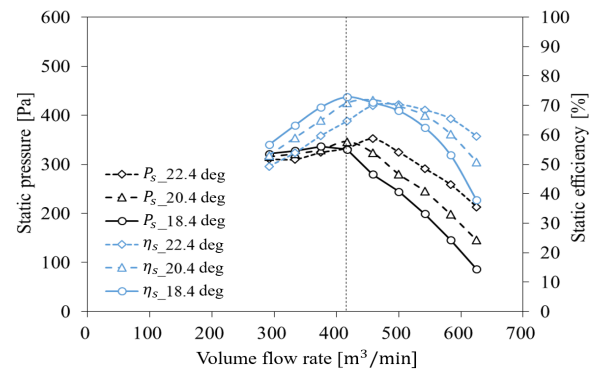


Fig. 6 3D flow analysis conditions of Full



(a) Test results and CFD analysis of the reference model



(b) CFD analysis result of new model

Fig. 7 Performance comparison prediction of reference model and new model

이 확인한 결과이며 정압효율은 전산해석 결과에서 약 15% 가량 높게 나타나는 경향을 보였으며 유량 압력곡선은 설계 지점에서 경향은 비슷하지만 박리가 시작되어 서징(Surging)이 발달되는 지점에서는 정압이 시험결과보다 다소 높게 나오는 것을 확인하였다.

유동입구의 모터 설치 유무에 따라 약간의 차이가 발생되지만 경향성에서 큰 차이를 보이지 않음으로 해석의 편이성 및 신속성을 위해 신규모델의 유동해석에도 Fig. 5와 같이 설정된 상태로 진행하였다. Fig. 7(b)는 신규로 설계된 익형을 같은 조건으로 해석하였을 경우 추정되는 예상성능을 도식화하였다. 설치각 22.4°, 20.4°, 및 18.4°에 따른 성능곡선을 나타낸다. 성능곡선은 설치각이 감소할수록 전반적으로 저유량 영역으로 이동하는 경향을 보인다. 이는 설치각 변화에 따라 최적의 입사각을 형성하는 유량 점에서 고성능을 보이는 축류팬의 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

설치각 18.4° 결과는 설계 유량 점에서 서징영역을 벗어나며 가장 우수한 성능을 보인다. 이는 기본설계의 요구 성능을 상회하는 수치로 요구정압인 250Pa보다 70Pa 이상의 여유가 있으므로 실제 제작상의 오차나 익형 성형의 오차, 전산해석 결과와의 차이를 감안하더라도 요구 성능을 만족할 수 있을 것으로 판단하였다.

#### 4. 구조해석

구조해석은 참여기관인 한국기술교육대학교에서 수행하였으며 상용 소프트웨어(ANSYS Mechanical 2020 R2)를 활용하여 회전에 의한 원심력 및 고온 상황에서의 열응력 등을 포함하여 해석을 수행하였다.

##### 4.1 허브의 리브 보강 검토

일반적으로 허브는 하나의 모델을 필요에 따라 회전수와 날개의 길이를 조절하여 송풍기 모델별로 적용하게 된다. 따라서 허브의 설계에는 강성이 튼튼하고 견고하게 설계하고자 허브 내부에 리브(Ribs)를 보강 설치하여 강성을 높이는 방향으로 초기설계를 시행하였다.

Fig. 8은 보강 리브 유무에 따른 허브의 3차원 모델링을 보여주고 있다. 해석은 ANSYS Workbench를 사용하여 허브의 회전중심을 고정한 후 3,600 rpm의 회전조건을 부가하였다. Fig. 9(a) 및 (b)는 허브의 내부에 리브 보강이 적용된 모델과 적용되지 않은 모델의 Von-Mises 등가응력을 나타낸 그림이다. Fig. 10(a) 및 (b)는 리브가 적용된 모델과 제외된 모델의 안전계수를 나타낸 그림이다. 최대응력은 보강 리브가 설치된 모델에서 71.605 MPa, 보강 리브가 설치되지 않은 모델은 70.303 MPa로 나타났으며 안전계수도 각각 2.1228과 2.1621로 리브가 설치되지 않은 모델의 구조 안전

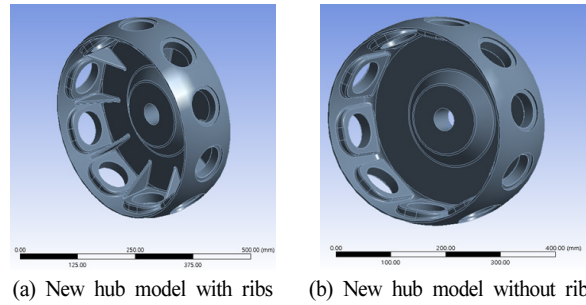


Fig. 8 Hub modeling for rib application review

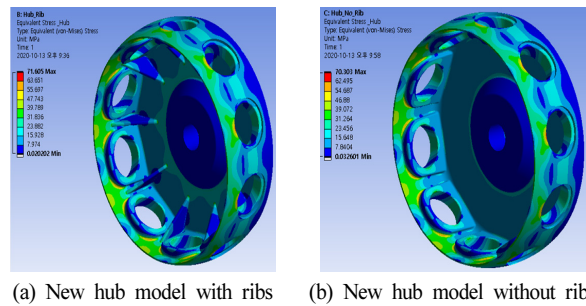


Fig. 9 Maximum Stress Distribution

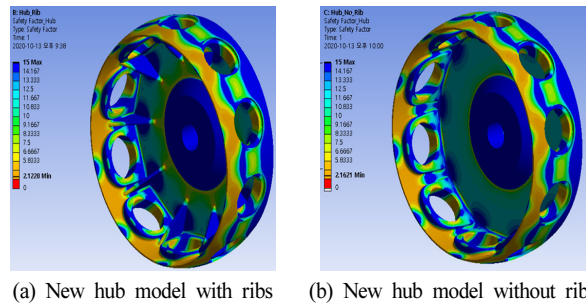


Fig. 10 Safety Factor Distribution

성이 유리한 결과를 도출하였다.

최대응력 및 최소 안전계수 발생하는 위치가 주판과 림의 결합부에 발생될 것으로 예상하여 리브를 포함한 초기설계를 진행하였으나 해석결과로부터 림 외부에 최대응력이 발생하여 리브설치가 불필요한 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구는 허브의 중량감소 및 주형제작의 편이성과 구조 성능의 신속성을 위해 리브를 제외한 형상으로 결정하였다.

##### 4.2 고온에서의 날개 구조강성

일반적으로 축류형 송풍기의 경우에는 원심력에 의한 최대응력이 블레이드와 고정부분이 만나는 블레이드 목부(Blade Root)에 집중되어 발생하게 된다. 이는 블레이드의 질량에 대한 회전 원심력에 의해 발생되기 때문에 축류 송풍기의 주요 파손부위도 블레이드 목부에 집중되게 된다. 따라서 제연용 송풍기는 상온에서의 원심력에 의한 응력 집중분포와 화재 발



생에 대비한 고온 상황에서의 알루미늄 재질의 인장강도 저하와 열에 의한 열응력을 고려한 안전성검토가 필요하게 된다.

아래의 Fig. 11은 알루미늄 AC4C-T6 합금의 온도에 따른 인장강도 변화를 나타낸 그림이다. 알루미늄 합금 시편을 3개씩 주조하여 공인시험기관에 의뢰한 시험결과를 평균화하여 나타낸 도표이다.

인장강도 측정조건은 각각 20°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C의 온도 조건을 유지한 상태에서 UTM에서 인장시험을 실시하였다.

일반적으로 알루미늄 AC4C-T6 합금은 상온에서 약 152 MPa의 인장강도를 보이는 반면 300°C에서는 약 92 MPa로 약 60%정도로 감소된다. 따라서 제연용 송풍기의 설계 제작 시에는 고온 운전 상태를 고려해야 하므로 상온에서 가동되는 송풍기보다 응력 및 안전계수를 보수적인 값으로 설정해야 한다. Fig. 12은 상온과 300°C에서의 블레이드 목 부분의 안전계수 변화를 보여주는 그림이며 20°C에서는 약 2.47 정도의 안전계수를 보이고 있으나 300°C에서는 1.51정도로 안전계수가 하락하는 결과를 도출하였다.

## 5. 시제품 제작 및 성능시험

### 5.1 날개의 제작

유동해석 과정 중 수정된 최종 익형모형을 적용하여 주형을 제작하였으며 주형 제작시 3차원 가공을 통하여 형상오차 발생을 최소화할 수 있도록 하였다. 경험상 사형주조는 쇠물

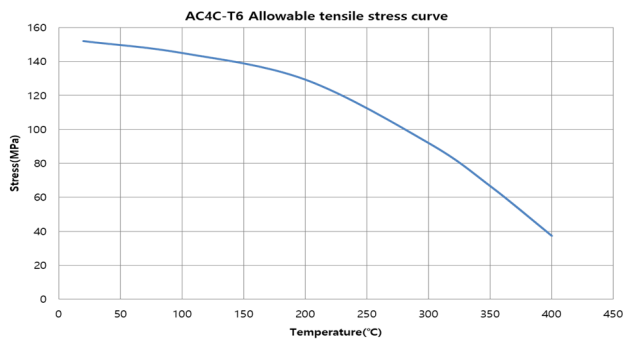
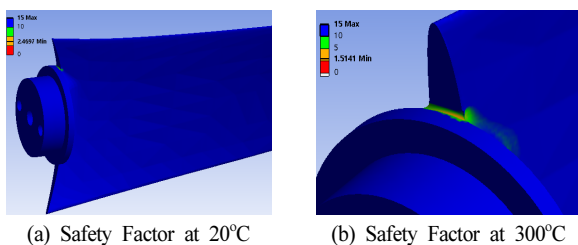


Fig. 11 Change in tensile strength according to temperature of AC4C-T6 aluminum alloy



(a) Safety Factor at 20°C (b) Safety Factor at 300°C

Fig. 12 Blade safety factor according to temperature

의 용입 이후 응고과정 중 약간의 익형의 변형과 블레이드의 두께분포 불균형에 따른 응고속도의 차이로 인하여 블레이드의 힘이 발생되기 때문에 이를 최소화하기 위하여 주형은 주철 재료를 적용하여 영구주형 방식으로 가공 제작하였다.

1,2차 시험주조결과 블레이드 트레일링 엣지부의 미성형 및 용입부족 현상을 보여 용탕의 입구부 변경 및 가스배출구 위치변경 등으로 통해 최종 설계된 블레이드 형상을 변경하지 않으면서 수정보완을 진행하였다. Fig. 13은 최종 수정 보완된 주형 및 3차 주조 블레이드의 사진이다.

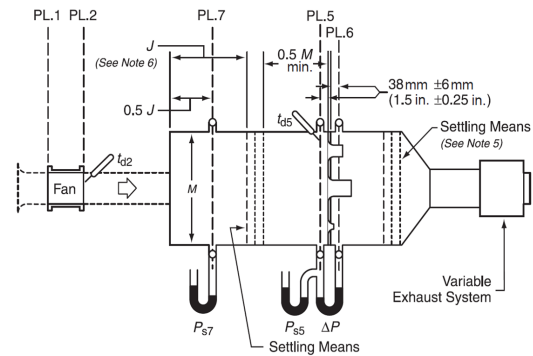
### 5.2 성능시험 설치조건

블레이드 및 허브 주조 후 시제품 제작을 진행하였으며 AMCA 210-16 규격에 따라 멀티노즐(Multi Nozzle Chamber) 챔버를 사용하여 성능시험을 진행하였다. 설치방법은 자유 흡입 자유송출방식(Installation A)을 적용하였으며 구동방식은 흡입구 측에 다이내모미터(Dynamometer)를 설치하여 회전수와 토크를 측정하는 방법을 사용하였다.

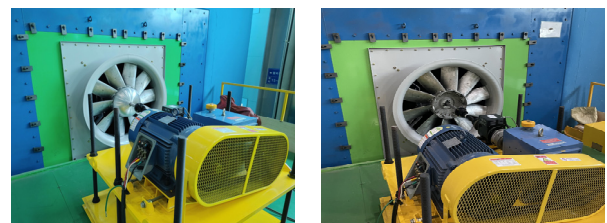


(a) Permanent casting mold (b) Casting blade

Fig. 13 Casting Mold & Casting Blade



(a) Outlet Multi Nozzle Chamber Schematic



(b) Nose Cap setting (c) Without Nose Cap

Fig. 14 Test facility and Setting method

Fig. 14 (a)는 일반적인 멀티노즐챔버의 토출풍량을 측정하기 위한 개략도이다. Fig. 14 (b)와 (c)는 송풍기 시험에 적용된 설치상태를 나타내는 사진으로 벽부형 축류 송풍기의 성능시험은 입구에 모터가 위치한 기존 형상(Fig. 6)과 달리 모터 설치 위치를 유동의 후단부로 변경하고 노즈 캡(Nose Cap)의 유무에 따라 시험을 수행하였다.

### 5.3 공력성능 시험결과

아래의 Fig. 15는 상온조건 대기압 하에서 날개의 설치각도별 노즈캡 유무에 따라 시험한 결과를 표준공기조건(20°C, 101.325 kPa)상태의 규정된 회전수로 환산된 유량과 정압을 나타낸 결과이다.

송풍기의 시험결과 노즈 캡이 부착된 상태에서 설계조건을 만족하였으며 노즈 캡이 부착되지 않은 상태보다 유량과 압력이 증가하고 효율이 좋아짐을 확인하였다. Fig. 16은 표준공기 상태로 환산된 상태에서의 노즈 캡 유무에 따른 전압 효율을 나타낸다. 최종 설계에서 선정된 각도(18deg)부근에

서 약 50 Pa가량 상승됨을 확인하였다. 이때 전압효율도 약 4.9%정도 상승하는 것을 확인하였다.

### 5.4 고온 운전 성능시험

송풍기의 성능시험이 완료된 후 고온용 모터를 부착하여 고온성능시험을 진행하였으며 공인시험기관인 한국기계전기전자시험연구원에서 시험을 진행하였다. 모터의 경우 2가지 조건으로 시험을 진행하였으며 각각 Ø710 축소 모델과 Ø1000 모델로 진행하였으며 국산 모터(H사 상용 H중 모터)와 외산 모터(M사 주문제작 H중 모터)를 적용하여 시행하였다. 시험방법은 ISO 21927-3 규격을 국내 환경에 맞게 적용한 시험설비에서 설비기술협회의 고온 시험 방법(SPS-KARSE B 0052 -1938:2015)에 따라 진행하였다.

Fig. 17과 18은 고온 가동 신뢰성 시험을 위한 시험설비의 개략도와 시험 진행 중의 사진이다. 시험의 진행과정은 송풍기 가동 후 온도를 상승시키며 300°C가 도달한 이후 운전시간을 측정하였다. 고온 운전 성능시험결과 주문 제작형 외산

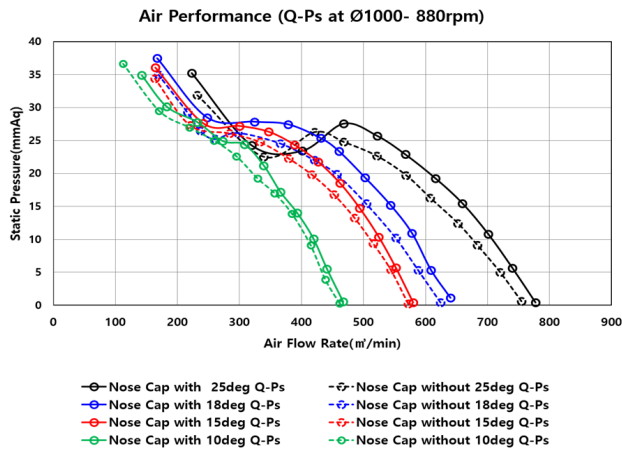


Fig. 15 Q-Ps curve according to setting angle of New model

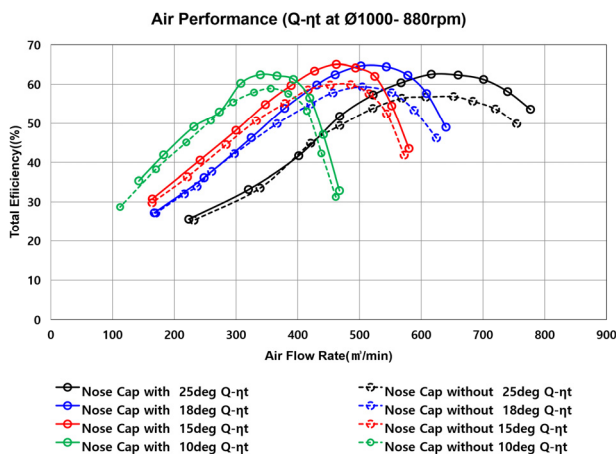


Fig. 16 Q-ηt curve according to setting angle of New model

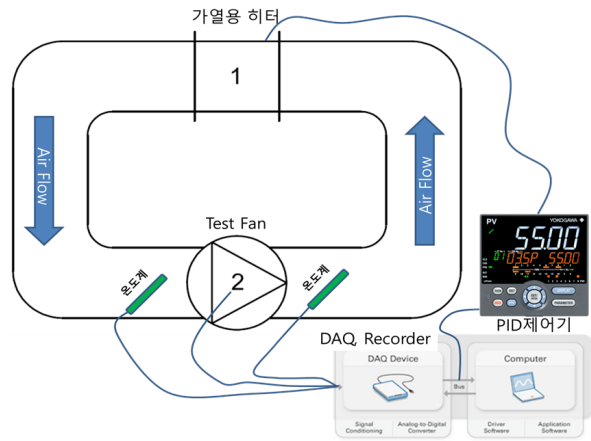


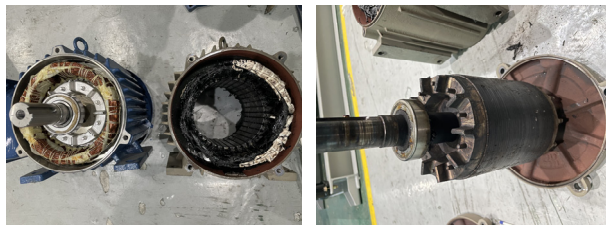
Fig. 17 Schematic diagram of high temperature tester



Fig. 18 Photo of high temperature operation reliability test

Table 2 High temperature operation test result

| Model        | Applied motor         | High temperature performance |
|--------------|-----------------------|------------------------------|
| Ø1000 Sample | Commercial motor - H  | 250℃ - 125 min               |
|              | Commercial motor - H  | 300℃ - 94 min                |
|              | Customized motors - H | 300℃ - 128 min               |
| Ø710 Sample  | Commercial motor - H  | 250℃ - 126 min               |
|              | Commercial motor - H  | 300℃ - 104 min               |
|              | Customized motors - H | 300℃ - 125 min               |



(a) Comparison before and after high temperature test (b) Rotor after high temperature test

Fig. 19 Motor disassembled picture after high temperature test

H중 모터를 적용한 시료는 300℃의 운전조건에서 2시간 이상 가동되었으며 국산 상용H중 모터의 경우 250℃에서 2시간 운전동안 문제가 없었지만 300℃에서는 각각 94분, 104분 이후 소손이 되어 운전이 불가능하였다. 모터 분해 후 확인결과 모터 권선의 절연이 파괴되어 단락된 것으로 추정되었다. 운전시간 측정결과는 위의 Table 2와 같다.

Fig. 19는 고온시험 전·후 모터 분해 후 각 부품의 사진이다. 모터 내부의 권선간 절연을 위한 절연물질이 고온의 온도에 의해 변색되고 절연이 파괴된 것으로 추정된다.

고온한계 운전진행 중 블레이드 및 허브의 변형이나 파손은 없었으며 구조해석 결과에서 안전할 것으로 판단된 결과와 일치하였다. 고온한계에 적용된 모터 모두 절연등급 H중이었으나 국산 모터 2대는 120분을 가동하지 못하고 권선이 소손된 원인은 추가적인 상세 원인분석이 필요한 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서 송풍기의 블레이드 형상설계 및 3D 유동해석을 통하여 설계 목표점에 만족하는 송풍기의 시제품 제작을 완료하였으며 성능 향상의 방안을 확인하였다.

- 1) 3D 유동해석의 결과와 공력성능 시험의 결과는 경향성이 일치함을 알 수 있으나 동력에 대한 결과와는 차이

- 가 발생되어 효율에서 차이가 커짐을 알 수 있었다.
- 2) 허브 캡은 장착유무에 따라 효율은 약 5% 정도, 압력은 약 50 Pa정도 향상됨을 확인하였다.
- 3) 블레이드 설치각이 커지면 유량의 증가가 나타나지만 최고 압력점 이후 서징(Surging)에 의한 불안전 영역이 증가됨을 확인할 수 있었다.
- 4) 구조해석 결과 분석에 따라 보강용 리브의 설치가 강성 및 안전계수를 증가시키지 않을 수 있으며, 본 연구에서는 리브를 제거함으로써 허브의 무게와 최대응력 감소, 안전계수의 증가 결과를 도출하였다.
- 5) 블레이드의 안전계수는 20℃에서 300℃로 온도가 변화되어 포화되는 경우 안전계수는 상온보다 약 61.3% 정도로 하락되었다. 다만 과속도 시험(Over Spin Test)을 통한 정밀검증은 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 중소벤처기업부 지역특화산업육성(R&D) 사업 『환기 및 제연기능을 갖는 벽부형 축류 송풍기 개발(S2906749)』 사업 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

- (1) International Standard ISO 21927-3:2016 Smoke and heat control systems —Part 3: Specification for powered smoke and heat exhaust ventilators.
- (2) ANSI/AMCA Standard 210-16, ASHRAE Standard 51-16 Laboratory Methods of Testing Fans for Certified Aerodynamic Performance Rating.
- (3) SPS-KARSE B 0052-1938:2015, 축류 송풍기 에너지효율등급, 한국설비기술협회.
- (4) 이슬기, 이경용, 양상호, 최영석, 2019, “입구부 허브 캡 형상 매개변수에 따른 축류팬 성능 특성 연구” 한국유체기계학회 논문집, 제22권 4호, 5-12page.
- (5) 김용인, 서원재, 최용욱, 정철영, 이경용, 최영석, 2020, “날개 설치각에 의한 벽부형 축류팬의 성능 특성에 관한 수치적 연구”, 한국유체기계학회 하계 연구개발 발표회 논문집, 249-250page.
- (6) 정철영, 최용욱, 이경용, 국정근, 2020, “제연용 벽부형 축류 송풍기 기초설계 및 개발진행”, 한국유체기계학회 하계 연구개발 발표회 논문집, 247-248page.
- (7) 국정근, 조병관, 이경용, 정철영, 2020, “유한요소해석을 이용한 벽부형 축류팬의 구조해석”, 한국유체기계학회 하계 연구개발 발표회 논문집, 251-252page.