

KTX용 터보팬 블레이드 개발

The Development of Turbo-Fan Blade for KTX

장 영 민* 권 오 윤* 김 성 준**
Jang, Young-Min Kwon, O-Woon Kim, Sung-Joon

Abstract

The new cooling fan for various parts & equipments of KTX is developed and evaluated to improve fan performance and durability. The characteristic curve of the developed fan is obtained according to KSB 6311 of performance test regulation. 70 degree of the installation angle of blade makes the fan to produce a maximum flow rate. This angle is found out through trial-error and is confirmed through the verification test. In order to improve the blade strength, the blade is produced by a draw forming. The adoption of AL50 reduces a fan weight by 6 kg. The new blade makes a static pressure 170 (mmAq), a discharge rate 140 (m³/min), a rotational speed 2886 (rpm) at the power 10 kw. which results 54% of the static pressure improvement relative to the original blade.

키워드 : 공기기계, 터보팬, 한국형 고속열차, 블레이드
Keywords : Air Machinery, Turbo-fan, KTX, Blade

1. 서론

KTX는 운행 후 10년 이상 경과됨에 따라 송풍기 제품 노후화 및 품질 저하로 인하여 열차운행의 문제점이 발생하고 있다. 예비품 및 부품 등을 프랑스 원 제작사로부터 전량수입에 의존하고 있는 현실 속에서, 지속적이고 안정적인 차량의 유지보수를 위하여 기술이전 품목이었던 TGV핵심품목들의 국산화 및 제작 기술 확보를 위한 노력이 요구되고 있다. KTX에 장착되어진 송풍 팬은 전력변환장치/보조전원장치/견인자동차/주변압기와 같은 전철의 핵심 부품들의 냉각 기능을 담당하는 핵심 보조 장비 중의 하나이다. 이러한 송풍 팬 또한 전

량 수입에 의존하고 있으며 노후 및 파손에 대한 대처 방안이 필요한 실정이며 현재 성능 문제 및 중량 문제, 강도 문제 등의 각종 기능적인 문제가 드러나고 있다. 견인전동기의 경우 팬 blade는 에어포일 형으로 OUT/IN 평판을 절곡 후 서로 용접한 구조로써, 제작 시 용접 및 절곡한 부위에서의 파손이 진행되었다. 재질은 냉각 압연강판(SPC계열)으로 팬의 중량 13 kg이라는 중량 문제를 안고 있어 경량화가 요구되어진다. 또한 송풍 팬의 비틀림 관성 부하로 인하여 회전자속이 파손되는 문제가 발생되었다.

그림 1은 KTX의 송풍기 탑재 현황이며 그림의 원호는 탑재된 송풍기의 위치를 나타낸다. 그림1의 왼쪽 상단부터 모터 블록용 2기, 주변압기용 1기, 보조블록용 1기, 모터 블록용 1기와 하단에 견인전동기용 3기에 송풍 팬이 장착되어 있다. 각종 기계분야에서 사용되어지고 있는 송풍 팬의 개발과 관련하여서는 김홍원[1] 등이 전산유체역학(CFD:

* 강원대학교 대학원 박사과정

** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수

Computational Fluid Dynamics) 적인 방법을 이용하여 수치 해석 등 선행 연구를 실시하였고, 팬 설계용 상용 프로그램 개발은 노준구[2]등에 의해 소개 되어진바 있다.

이번 연구에서는 기존의 KTX 차량용 프랑스 제작 송풍기를 3차원 측정을 통하여 블레이드의 원주각도, 곡률반경 값을 구하여 설계 한 다음 SPC 계열 재료를 AL50계열로 변경하여 경량화하고, 기존 블레이드의 용접 제작으로 인한 터짐, 찢어짐의 문제를 인발성형의 제작방법을 통하여 해결하였다. 또한, 모터의 뒤틀림 응력에 취약한 축의 구조적 문제해결을 위하여 회전자축을 설계 변경하여 보완하였고, KSB 6311(송풍기의 시험 및 검사방법)에 의한 풍도관 시험 설비로 풍량, 정압, 소비전력, 소비전류, 회전속도를 확인하여 송풍기의 성능곡선을 구하고, 기존제품과의 성능 비교 및 개선 정도를 확인하였으며, 진동 실험 및 내구 실험을 실시하여 안전검사를 하였다.

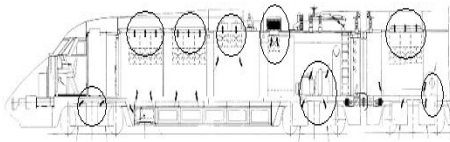


그림 1 KTX 송풍기 구조별 탑재 현황

2. 이론적 배경

송풍기는 유체기계 중 공기기계로써 저압 식 송풍기로 저압 식 풍차와는 달리 동력을 풍력으로 변환시키는 기계이다. 송풍 기능을 담당하는 냉각 팬은 강제 대류를 발생시켜 공기와 기계 사이의 열 교환 작용을 통하여 기계의 온도를 낮추는 유체기계로써 원심 형 팬이라고 하며 회전 차의 회전으로 생기는 원심력으로 인한 압력 상승이 1mmAq 이하인 공기기계이다. 작동원리는 케이싱 내의 회전 차의 회전에 의해 에너지를 받은 기체가 와류 실을 거쳐 송출 구에 이르고 이 송출된 기체의 열 교환 작용으로 부품을 냉각시키는 원리이다. 재질은 보통 강판 및 특수강 또는 특수 재료를 사용한다. 팬은 회전 차의 모양에 따라 레이디얼형, 전향곡형, 후향곡형 및 익형으로 구분되어지며, 또한 기체의 송풍 방향에 따라 축류 식, 원심 식, 사류 식, 횡류 식으로 구분되어진다. 원심 식은 임펠러 출구각도가 90° 보다 큰 경우 90° 보다 작은 경우에 따라 다익, 레이디얼, 터보의 세 가지로 구분된다. 터보 송풍기의 임펠러 깃이 익형 단면으로 된 것을 익형송풍기라하며 이번 연구에서도 익형을 이용하였다. 이 송풍기 중에서 터보 송풍기는 효율이 좋고 소음이 적으며 높은 압력을 낼 수 있

어 여러 분야에서 많이 사용되고 있다. 송풍기의 송출 구에 관을 부착시켜 배출 측이 일을 하도록 하는 것을 송풍기라고도 하는데, 같은 구조의 것으로 흡입구에 관을 부착하여 흡입 측이 일을 하도록 하는 경우도 있다. 진공청소기는 흡입 측이 일을 하는 예이다. 전자의 것을 송풍기라 하고 후자의 것을 흡입송풍기라고 한다[3]. 송풍기의 압력은 정압(P_s)과 기체의 속도에 의한 동압(P_d)으로 구분한다. 정압과 동압의 합을 총 압력이라 하며 다음과 같다.

$$P_t = P_s + P_d \quad (1)$$

여기서 P_d 는 다음 식으로 구한다.

$$P_d = \frac{V^2}{2g} r(\text{mmHg}) \quad (2)$$

일반적으로 터보 형 송풍기의 효율 $\eta(\%)$ 은 70-80을 갖으며 다음 식으로 구한다.

$$\eta = \frac{L \text{ 또는 } L_{ad}}{L_s} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서 η : 송풍기의 효율(단열효율) (%)

L 또는 L_{ad} : 이론동력(kW)

L_s : 축 동력(kW)

이론 동력 L (kW)은 입구압력(P_1)과 출구압력(P_2)의 압력비(P_2/P_1)가 1.03미만의 경우에는 다음과 같은 식으로 구한다.

$$L = \frac{QP_t}{6120}(\text{kW}) \quad (4)$$

압력비가 1.03이상인 경우에는 다음과 같은 식으로 구한다.

$$L_{ad} = \frac{k}{k-1} \frac{QP_1}{6120} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] (\text{kW}) \quad (5)$$

여기서 Q : 풍량 (m^3/min)

P_t : 총 압력(mmAq)

송풍기의 크기는 No 또는 번호로 표시하며 임펠러 외경 150mm를 기본 단위로 하여 No.1 로 표기한다. 외경 750mm인 경우는 $\frac{750}{150}=5$ 로 No.5 라 부르며, No.6이상에서는 1간격으로 하여 No.1, No.1 $\frac{1}{2}$, No.2, No.2 $\frac{1}{2}$, ………, No.5, No.5 $\frac{1}{2}$, No.6, No.7, No.8 ……… 으로 표시한다.

3. 연구 방법

3.1 송풍기 설계

이전에 설치되었던 프랑스 ALSTOM TRO의 송풍 팬의 블레이드는 평판을 절곡 후 서로 용접한 구조였으나 용접, 절곡 부위에서 파손이 진행 되어

설계 변경이 필요하였다.

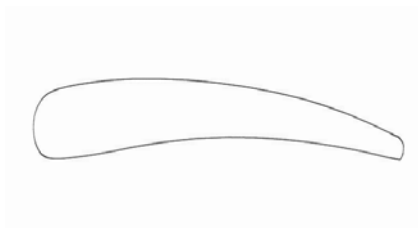


그림 2 기존 블레이드의 3차원 측정 형상

송풍 팬의 블레이드 설계는 우선 그림2와 같이 레이저를 이용한 블레이드의 3차원 형상을 측정하여 원주의 각도, 곡률 반경 등을 구하고 구조 해석하여 신제품 개발에 적용하여 설계 변경에 따른 제작비용 및 시간을 절약하였다.

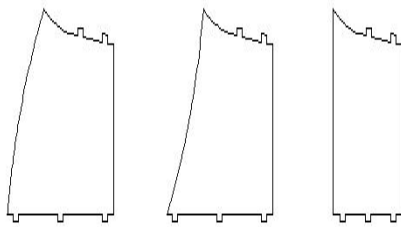


그림 3 샘플 블레이드

또한 팬 블레이드 형상을 선택하기 위하여 그림 3의 상용 블레이드를 동일 조건상에서 실험하여 최적 형상을 선정하였다. 그림4와 그림5는 블레이드의 고정 각도에 따라 풍량 및 정압의 변화를 확인하기 위하여 블레이드를 설치한 모습이다. 기준 각도에서 +각도와 -각도의 차이에 따라 발생하는 변화를 확인한 결과 70°에서 정압대비 최대 풍량을 확인 할 수 있었다.

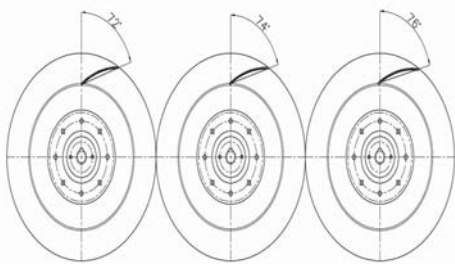


그림 4 기준 각도의 +방향

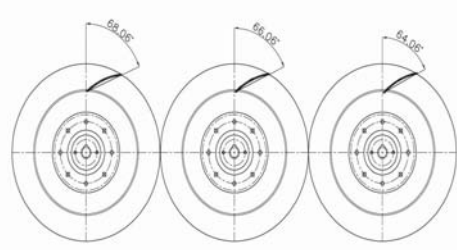


그림 5 기준 각도의 -방향

판재를 절곡 후 서로 용접한 구조인 기존 블레이드의 용접, 절곡 부위에서 발생하는 파손을 예방하기 위하여 인발 성형의 제작 방법을 통하여 Out/In 평판 일체형 구조로 변경하고 재질은 SCP 계열 냉각 압연 강판에서 AL50 재질로 변경하여 경량화 시켰다. 그림 6은 인발 성형하여 제작한 블레이드로써 기존 용접구조의 블레이드에서 가지고 있던 용접부분에서의 강도 및 열에 의한 취약부분에 대해서 보완한 내용이다. 원호의 내부는 기존 제품에서 강도 취약 지점으로 파손이 일어났던 부분이다.

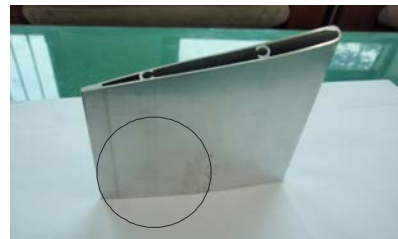


그림 6 개발 블레이드

3.2 축 설계

회전 모터의 축 설계를 위하여 모터 블록 회전자 축 비틀림 모멘트 T[N]를 다음과 같이 계산하였다.

$$T = 974 \times 9.8 \times \left(\frac{H(\text{kW})}{N} \right) \quad (6)$$

$$T = \tau \times Z_p \quad (7)$$

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (8)$$

여기서 H: 정격 전력 [kW]

N: 회전수 [rpm]

τ : 축 단면에 걸리는 전단응력[kPa]

Z_p : 극 단면계수 - 원형 일 때 $\frac{\pi d^3}{10}$

A: 단면적 = $\frac{\pi d^2}{4}$

P: 축 단면에 걸리는 비틀림 전단력 [N]

표 1 축 전단력 비교

전압	380 V		355 V	
	Φ 27	Φ 38	Φ 27	Φ 38
H	5		7.7	
N	3545		3265	
T	13.4		22.5	
τ	3468.0	1244.4	5824.8	2089.4
P	1986	1410.53	3334.7	2368.42

표1은 축에 걸리는 전단력 계산 자료이며, 자료를 근거로 축에 최대 2500 N의 전단력이 작용한다고 할 때, 최대 토크(비틀림 모멘트)22.5J 을 기준으로 식(6)~(8)을 통하여 회전자 축 직경을 계산하면 36mm를 얻고, 설계 직경은 안전율을 고려하여 38mm(Φ38)로 결정하였다. 그림 7은 직경 38mm(Φ38)인 새로 개발된 축 부품의 모습이다.



그림 7 개발 축(Φ38)

3.3 성능 평가

송풍기의 성능 평가는 KSB 6311의 송풍기의 시험 및 검사방법에 따르며, 그림8의 풍도관 실험 모델을 이용하여 온도, 송풍기 전압, 정압, 공기량, 동력, 전압효율, 소음, 운전 상태를 확인하였다.[4] 정확한 실험을 위한 공기는 밀도 120 kg/m³, 비열비 1400, 점도계수 1.8×10⁻⁵인 공기를 표준공기로 정하며, 기압 101.3kPa (20℃), 상대습도 50 %인 공기가 근사적으로 이러한 특성을 갖는다[5].

실험을 위한 장치 모델은 흡입정체실과 송출 정체 실이 있고 송풍기 출구에서 선회가 없을 때 짧은 덕트를 사용 할 수도 있는 그림 8의 덕트 흡입과 덕트 송출형식으로 KTX 송풍 팬의 설치 환경에 적합한 실험 모델을 택하였다. 시험을 통하여 얻은 자료는 식 (1)~(5) 식을 이용하여 계산 후 성능 평가 자료로 활용 하였다.

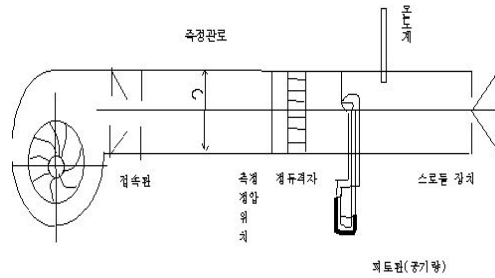


그림 8 풍도관 실험 모델

3.4 실험 결과

제작한 송풍기의 성능 검사를 위하여 전동기는 출력 13(kW), 전류 23.2(A), 토크 3.7(kgf·m), 효율 90.3(%)인 장치를 사용하였다.

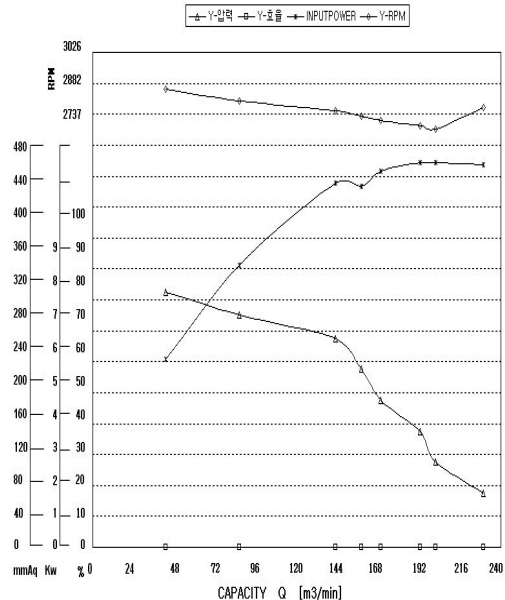


그림 9 송풍기 성능 테스트 곡선(프랑스)

그림 9와 그림 10은 개발품과 기존 제품의 성능 특성 곡선이다. 비교 결과 소비 전력 10kW (2886rpm), 풍량 140(m³/min) 일 때 정압(mmAq)은 프랑스 제품에서 110, 개발품에서는 170으로 54% 개선 효과를 얻었다. 팬이 일으키는 소음은 공진으로 인해 발생되어지기도 하는데 이는 주변 부품의 파손을 야기 시키기도 한다[6]. 이를 위하여 KSB 9144에 따른 진동시험을 실시

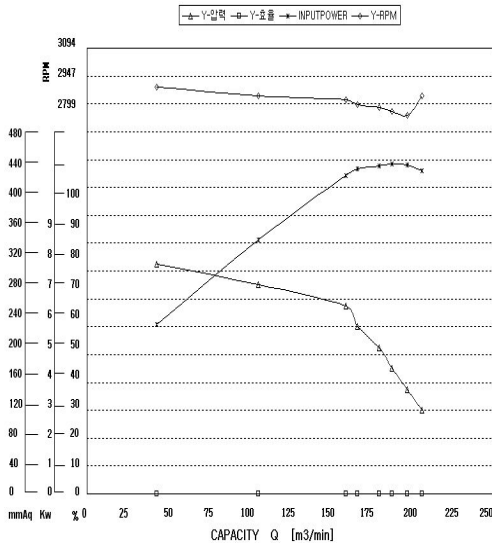


그림 10 송풍기 성능 테스트 곡선(개발품)

하였는데 주파수: (1~5) Hz, (5~30) Hz에서 총 15분(각축5분씩) 상하(Z축), 좌우(X축), 전후(Y축)를 대상으로 공진 시험기 G-0310L(SHINKEN) / G-5250NS(SHINKEN)을 통하여 시험한 결과 제품의 스크류 풀림 및 크랙 유무, 동작 상태에 이상이 없었으며, 공진 없음이 확인되었다. 또한 가속도 6.68 m/s^2 (0.7G), 주파수 10Hz, 상하(Z축), 좌우(X축), 전후(Y축) 축을 대상으로 Z축 (4시간), X축 (2시간), Y축 (2시간) 동안 내구성을 시험한 결과 스크류 풀림이나 크랙 및 동작 상태에 이상이 없었음이 확인되었다.

4. 결론

현재 운행 중인 KTX에는 모터 블록, 주변압기, 보조 블록, 견인 전동기 등 중요 부품들이 설치되어 있는데 이 부품들의 냉각 작용을 위하여 송풍기가 사용되어지고 있다. 본 연구에서는 기존 설치된 프랑스 ALSTOM TRO 송풍기 제품 노후화로 인한 블레이드 파손 및 기능저하 문제를 해결하고 경량화를 위하여 새로운 송풍기를 설계, 제작하였다. KSB 6311의 송풍기 시험 및 검사방법에 따른 제품에 대한 성능 평가와 내구시험을 실시하고 KSB 9144에 따른 진동 실험을 실시하여 기존 제품과 성능을 비교하고 안전성을 확인하였다.

최대 풍량을 발생시키는 블레이드 축 설치각이 70°임을 실험을 통하여 확인하였고, 레이저 3차원 측정법을 이용하여 원주의 길이, 블레이드 곡률반경을 찾았으며, 블레이드의 강도 향상을 위하여 인발성형을 실시하여 블레이드 파손 문제를 해결하였고, AL50 재질을 이용하여 무게를 6kg 감소 시

켰다. 또한 축에 걸리는 최대 전단력(2500 N)과 최대 비틀림 모멘트 22.5J를 계산하고 그에 따른 회전자축 직경 36 mm를 산출하였으며, 안전율을 고려하여 축 직경을 38 mm($\phi 38$)로 하여 송풍 팬을 제작하였다. 제작된 제품은 10kW일 때 정압 170 (mmAq), 풍량 140 (m³/min), 회전수 2886 (rpm)의 성능을 갖추었으며, 기존 프랑스 제품과 비교하였을 때 정압대비 54% 개선 효과를 얻게 되었다. 더불어 내구시험 및 공진 시험 결과 스크류 풀림이나, 크랙이 발생하지 않았으며, 동작 상태에 이상 없음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김홍원, 설신수, 하지수, 김진오, “박용 발전기 냉각 팬 설계 변경에 따른 유동해석”, *대한기계학회, 추계학술대회논문집*, 2003.
- [2] 노준구, 정동규, 이찬, 소현영, “냉각탑용 저소음 축류 팬 개발”, *대한설비공학회, 하계학술 발표대회논문집*, pp. 712-716, 2002.
- [3] 김영득, 김성구, 최상호, *최신 유체기계*, pp.211, 2004.
- [4] Wallis, R.A., “Axial Flow Fans and Ducts”, John Wiley & Sons, Inc, 1983.
- [5] 김영득, 김성구, 최상호, *최신 유체기계*, pp.359-365, 2004.
- [6] 장서일, “구조물의 내부 공진에 대하여” *한국소음진동공학회, 소음진동*, pp. 20-29, 1997.