

고속 유도전동기 내부 팬에 따른 냉각 성능 검증

박은진*† · 정승욱* · 전진태* · 조혜영** · 최요셉**

Verification of Cooling Performance of Internal Fan in High-Speed Induction Motor

Eun-Jin Bak*†, Seung-Wook Jung*, Jin-Tae Jun*, Hye-Young Jo**, Yo-Seb Choi**

Key Words : Airflow measurement test(풍량측정시험), CFD(전산유체해석), Induction motor(유도전동기), Internal axial fan(내부 축류 팬), Wind tunnel test(풍동시험)

ABSTRACT

The cooling performance of high-speed induction motors plays a crucial role in their stability and durability. Enhancing the cooling efficiency of the motor, including internal cooling ducts and fans, is essential for design and operation. In this study, experiments were conducted to improve the cooling performance of the motor by introducing a high-volume fan. The performance of the internal fan was evaluated through airflow tests, while the impact of increased fan volume on cooling efficiency was quantitatively analyzed using internal flow measurements, temperature rise tests, and computational fluid dynamics. The results indicate that installing the upgraded fan increases the inflow into the motor by approximately 4.7% and reduces the average temperature rise of the winding by about 2.6K.

1. 서 론

산업용 전동기의 냉각 성능 향상은 전동기의 수명과 안정성을 증진시키는 핵심 요소이다. 충분한 냉각이 이뤄지지 않을 경우 전동기 내부 부품들의 온도가 급격히 상승하여 전기적, 기계적 손상을 초래하며, 이는 전동기의 수명을 단축시키고 운전 안정성을 저해할 수 있다. 따라서 전동기의 냉각 성능 검증은 전동기 설계와 운영에 있어 매우 중요하다.

본 연구에서는 고속 유도전동기의 고품량 팬 적용에 따른 전동기 냉각 성능을 검증하는 실험을 수행하였다. 내부 팬 성능은 풍동시험을 통해 평가되었으며, 팬 풍량 개선에 따른 전동기 냉각 성능 검증은 전동기 내부 풍량측정시험, 온도 상승시험 및 전산유체해석(CFD)을 통해 정량적으로 평가하였다.

2. 전동기 냉각 구조 분석

2.1 전동기 내부 통풍 구조

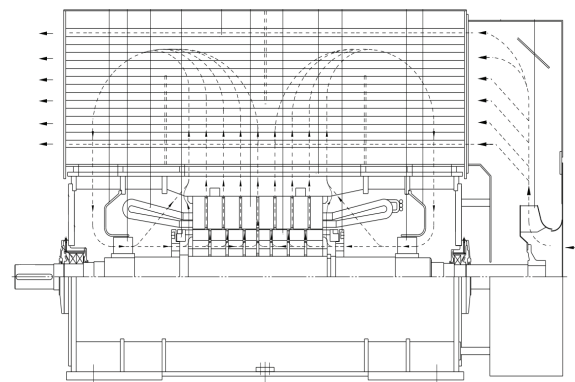


Fig. 1 Concept of totally enclosed air to air Cooled

* HD현대일렉트릭 회전기연구실(Department of Rotating Machinery Research, HD Hyundai Electric Co., Ltd.)

** HD한국조선해양 미래기술연구원(Advanced Research Center, HD Korea Shipbuilding & Offshore Engineering Co., Ltd.)

† 교신저자, E-mail : bak.eunjin@hd.com

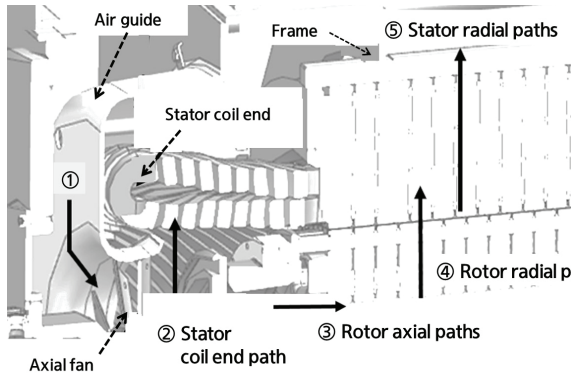


Fig. 2 Internal cooling airflow passages

실험에 사용될 전동기의 냉각 방식은 IC611(공냉자유통풍) 방식의 TEAAC(Totally enclosed air-to-air cooled, 전폐 공랭식)이다. 이 방식은 Fig. 1과 같이 완전히 밀폐된 프레임 내부에 장착된 팬이 내부 공기를 강제 순환시키고, 프레임 외부에 장착된 팬은 외부 공기를 상단 열교환기로 전달하여 프레임 내부를 냉각한다.

Fig. 2는 전동기 내부 팬에 의해 프레임 내부로 흐르는 공기 흐름을 나타낸 것이다. 전동기 회전 시 프레임 상단 열교환기를 통해 냉각된 유동은 내부 팬과 에어가이드를 통해 프레임 내부로 유입(①)된다. 팬을 지난 유동은 크게 두 가지로 나뉜다. 하나는 고정자 권선 엔드부로 향하는 유동(②), 다른 하나는 회전자의 에어 홀(Air hole)로 향하는 유동(③)이다. 회전자 에어홀을 향한 유동은 샤프트가 회전하면서 회전자와 고정자 덕트(④, ⑤)로 흐르고 이후 고정자 권선 엔드부로 향하는 유동과 만나 상부 열교환기로 빠져나간다.

2.2 전동기 내부 팬 성능 평가

고속 유도전동기는 고정자 권선의 온도를 낮추기 위해 내부에 팬이 장착되며, 전동기 내부 팬 풍량을 증대시킴으로써 전동기 냉각 성능을 향상시킬 수 있다. 전동기 내부 팬 풍량 증대에 따른 냉각 성능을 검증하기 위해 팬 단독 성능 시험을 수행하였다. 연구에 사용된 전동기는 양방통풍 구조로, 전동기 양측에 축류 팬과 에어가이드가 장착되어 있으며, 시험에 사용된 축류 팬 형상은 Table 1과 같다.

Type 1은 기존 전동기에 장착된 풍량 개선 전의 축류 팬이다. 블레이드 단면 형상은 커브(Curved) 형상을 가지며, Tip과 Hub의 코드 길이(Chord length)와 부착각(Stagger angle)은 동일하다. Type 2는 풍량 개선 후 에어포일(Airfoil) 형상의 축류 팬이다. 블레이드 형상은 NACA Airfoil 단면을 참조하여 설계되었다. 두 모델 모두 팬 외/내경 및 팬과 에어가이드 사이의 간극(Tip clearance)은 동일하게 설계되었다.

팬 성능 평가를 위해 AMCA Standard 210에 규정된

Table 1 Comparison between the curved and airfoil type axial fans

Fan model	Type 1	Type 2
Blade type	Curved	Airfoil
Outer/Inner diameter	Identical	
Tip clearance	Identical	
Number of blades	11	10
Twist angle	No	Yes
Stagger angle [deg]	Tip	65
	Hub	65
Chord length/Outer diameter	Tip	0.26
	Hub	0.26

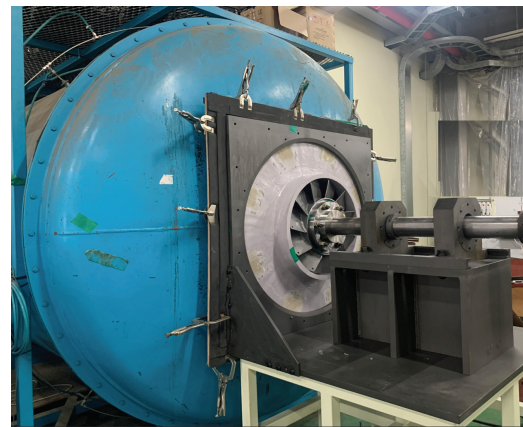


Fig. 3 Wind tunnel test result of axial fan

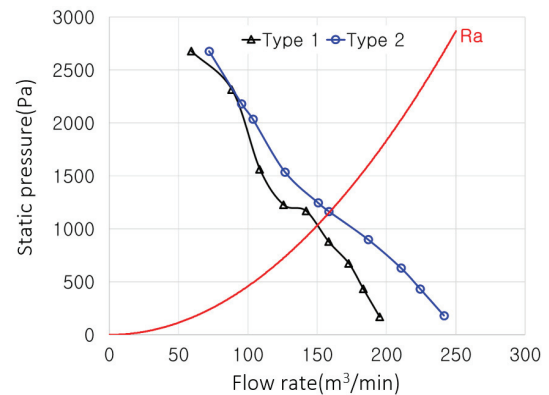


Fig. 4 Characteristic of axial fan

Inlet chamber setup 방식의 멀티 노즐챔버(Multi nozzle chamber)를 사용하였다. Fig. 3과 같이 팬은 자율흡입, 자율송출 상태로 설치되었고, 회전수는 3600 rpm 조건에서 팬 성능을 평가하였다. Fig. 4는 풍동 시험을 통해 측정된 두 축류 팬의 성능 곡선을 보여주며, 전동기 내부 구조에 따른 시스템 저항 곡선은 Ra로 표시하였다. 실험 결과 Type 2 팬이 Type 1 팬 대비 작동 풍량은 약 6% 증가하고, 풍압은 약 15% 더 높은 것으로 확인되었다.

3. 전동기 냉각 성능 검증

3.1 전동기 내부 풍량 측정

앞서 풍량 개선된 팬이 전동기 운전 중에도 얼마나 더 많은 풍량을 낼 수 있는지 확인하기 위한 시험을 진행하였다. 시험은 전동기 부하 운전 중 프레임 내부로 유입되는 공기의 유량을 측정하였다. 측정 방법은 Fig. 5와 같이 전동기 내부에 피토크관(Pitot tube)과 온도센서를 삽입한 후 차압계를 통해 압력, 온도 데이터를 획득하였다.

고속 유도전동기 내부 풍량 측정을 위해 사용된 피토크관은 Fig. 6과 같으며, 프레임 사이즈 및 측정 위치에 맞게 제작하였다. 측정 위치는 전동기 부하(DE) 및 반부하(NDE) 측 입구 단으로 한정하였다. 전동기 내부는 회전하는 유체로 인해 대부분 난류 영역으로 정확한 유량 측정에 한계가 있다. 따라서, 상대적으로 난류가 적고 유체 흐름이 안정적으로 유입되는 프레임 입구 단에서 유속을 측정하였다.

전동기 내부 풍량 측정 결과는 Table 2에 나타내었다. 부하 및 반부하 프레임 입구 부를 세 구간으로 나누었고, 각 구간 당 최소 10회 이상 측정한 값의 평균을 계산하였다. 그 결과 풍량 개선된 팬(Type 2) 장착 시 풍량 개선 전 팬(Type 1) 대비 프레임 입구 부 유입 유량이 약 4.7% 증가된 것을 확인하였다.

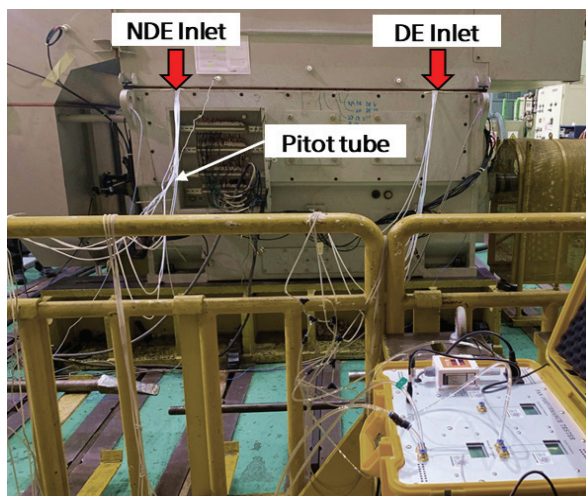


Fig. 5 Airflow measurement for motor



Fig. 6 Pitot tube for motor

Table 2 Airflow measurement data: Type 1 and Type 2 fans for the motor

		Dynamic pressure (Pa)	Velocity (m/s)	*M/F (m³/s)	Sum (m³/s)
Type 1	DE Inlet-1	39.40	8.44	54.32	164.55
	DE Inlet-2	18.60	5.80	54.15	
	DE Inlet-3	42.00	8.71	56.08	
	NDE Inlet-1	36.70	8.14	52.42	168.15
	NDE Inlet-2	26.00	6.85	64.03	
	NDE Inlet-3	35.70	8.03	51.70	
Type 2	DE Inlet-1	36.40	8.87	57.12	172.41
	DE Inlet-2	14.80	5.66	52.85	
	DE Inlet-3	43.50	9.70	62.44	
	NDE Inlet-1	30.70	8.00	51.49	168.71
	NDE Inlet-2	18.00	6.12	57.21	
	NDE Inlet-3	41.70	9.32	60.01	

(*M/F : Mass flow rate)

3.2 전동기 열유동해석

전동기 내부 팬 풍량 증가에 따른 프레임 내부 유동 분포 및 고정자 권선 온도 분포를 확인하고자 열유동해석을 수행하였다.

Table 3와 같이 팬 풍량이 증가함에 따라 프레임 유입되는 절대 유량은 약 13%, 회전자 로터 에어홀 유입 유량은 약 3.4% 증가하였으며, 고정자 권선 평균 온도는 약 2.1K 감소하였다.

Table 3 CFD result: Mass flow rate and temperature rise

	Type 1	Type 2
*RTD(K)	63.1	61.0
Frame inlet M/F(kg/s)	3.99	4.53
Rotor air hole M/F(kg/s)	1.75	1.8

(*RTD: Resistance temperature detector)

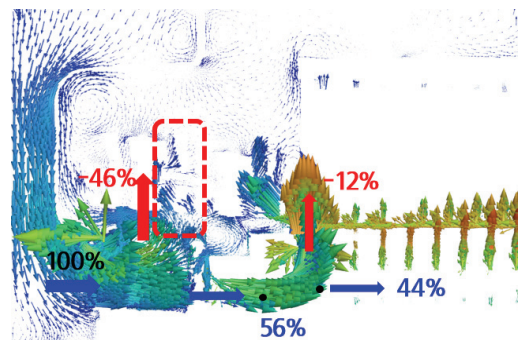


Fig. 7 Internal airflow vectors and cooling flow rate ratio (Type 1)

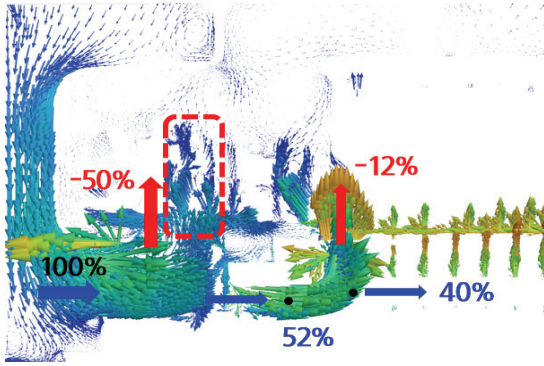


Fig. 8 Internal airflow vectors and cooling flow rate ratio (Type 2)

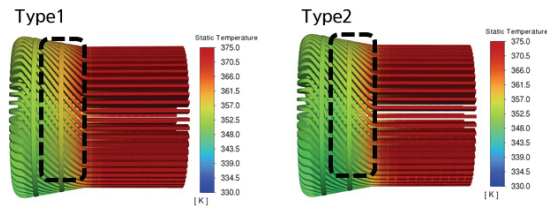


Fig. 9 Temperature distribution at the stator coil:
Type 1 & Type 2

Fig. 7과 8은 전동기 내부 팬 유입 유량을 기준으로 각 위치별 냉각 홀로 유입되는 유량의 비 및 유동 벡터를 보여준다. Fig. 7의 풍량 개선 전 팬 장착 시, 전동기 유입 유량 대비 고정자 코일 엔드부로 향하는 유량은 약 46% 수준이며, 로터 엔드링(Rotor end ring)을 지나가는 유량은 약 56%이다. 로터 엔드링을 지나가는 유량 중 로터 바(Rotor bar)와 프레스 링(Press ring) 사이로 빠져나가는 유량은 약 12%, 로터 에어홀(Rotor air hole)로 향하는 유량은 약 44%이다.

Fig. 8의 풍량 개선된 팬을 장착한 경우, 전동기 유입 유량 대비 로터 에어홀의 유입 유량은 약 4% 감소하였으며, 이에 따라 코일 엔드부로 향하는 유량 비는 약 50%로 증가되었다. 유량 분포 비교 결과 팬에 의해 증가된 풍량 대부분이 로터 에어홀 대비 코일 엔드부로 더 많이 흐르는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 9의 권선 온도 분포 결과와 같이 코일 슬롯부 대비 코일 엔드부에서의 온도 감소가 더 이뤄진 것을 확인할 수 있다.

3.3 전동기 온도상승시험

전동기 내부 팬 풍량 증대에 따른 전동기 냉각 성능 검증을 위해 온도상승시험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 전동기 사양은 Fig. 10과 같이 4.5 MW, 6000 V, 60 Hz이다.

고정자 권선의 온도상승값은 각 부분의 측정 온도와 주위 온도와의 차이이며, 주위 온도 18.9℃에서 정격 전압, 정격 전류를 인가하여 시험을 실시하였다. 고정자 권선 온도 측정



Fig. 10 4.5 MW, 6000 V, 60 Hz

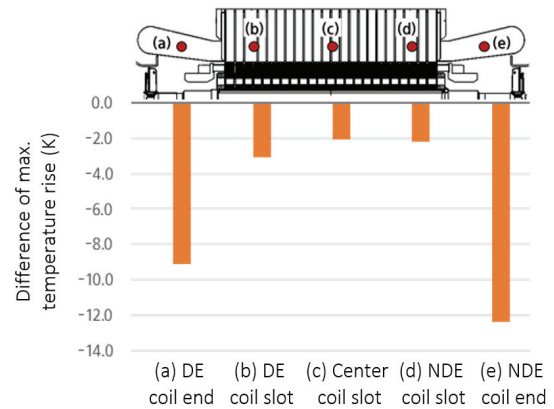


Fig. 11 Reduction of max. temperature rise based on stator coil location: (Type 1-Type 2)

Table 4 Temperature rise measurement data

	Type 1	Type 2
RTD(K)	77.8	75.2

방법은 저항법(Resistance temperature detector)과 매입법(Embedded temperature detector)이 있다.

저항법은 권선 도체의 온도와 저항간의 관계식 (1)을 통해 계산하였고, 매입법은 열전대(Thermocouple)를 통해 각 권선 위치 별 최대 온도상승값을 확인하였다.

$$\Delta T = \frac{R_1}{R_2} \times (235 + T_1) - (235 + T_2) \quad (1)$$

T_1 : Ambient Temperature

T_2 : Temperature of coolant at the end of test

R_1 : Initial Resistance (cold) at T_1

R_2 : Resistance (hot) at T_2

Fig. 11은 팬 변경에 따른 권선 위치별 최대 온도상승 차이를 보여준다. 팬의 풍량이 증가함에 따라 권선 온도는 전

체적으로 감소하였고, 특히 코일 엔드부로 갈수록 온도 저감량이 크게 나타났다. 코일 엔드부의 온도 감소량은 부하 측 대비 반부하 측에서 더 크게 나타났다. 이는 전동기 외부 팬을 통한 냉각 공기가 상부 열교환기로 이동 시 반부하 측에서 부하 측으로의 열전달 경로에 따라 냉각 효과가 반부하 측에서 더 크게 나타났기 때문이다. 전동기 온도상승시험 결과는 Table 4에 나타내었으며, 내부 팬의 풍량이 증가함에 따라 권선 평균 온도상승값은 약 2.6K 감소하였다.

4. 결 론

본 연구는 고속 유도전동기에 고풍량 팬이 전동기 냉각 성능에 미치는 영향을 시험 및 수치해석을 통해 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 팬 단독 성능은 풍동 시험을 통해 평가하였으며, 고풍량 팬이 기존 팬 대비 풍량은 약 6% 증가, 풍압은 약 15% 증가함을 확인하였다.
- 2) 전동기에 피토관을 장착하여 팬에 따른 전동기 유입 유량을 측정한 결과, 고풍량 팬 탑재 시 기존 팬 대비 전동기 유입 유량은 약 4.7% 증가하였다.
- 3) 수치해석을 통해 전동기 내부 냉각 유로의 각 위치 별 유량비 및 권선 온도를 확인하였다. 그 결과, 팬에 의해 증가된 풍량의 대부분이 로터 에어홀보다 권선 엔

드부로 더 많이 유입되어, 권선 슬롯 부 대비 권선 엔드부의 온도가 크게 감소하였다.

- 4) 전동기 온도상승시험을 통해 내부 팬 풍량 증대에 따른 전동기 냉각 성능을 평가하였고, 그 결과 고정자 권선 평균 온도상승값은 약 2.6K 감소하였다.

References

- (1) Takafumi Nakahama, 2006, "Improved Cooling Performance of Large Motors Using Fans," IEEE Trans. Energy Convers, pp. 324~331.
- (2) Moon, S. H., Kim, W. G., 2012, "Thermal-flow analysis and cooling performance enhancement for totally enclosed fan cooled motor," Trans. Korean Soc. Mech. Vol. 2012, pp. 66~69.
- (3) Sung, M. K., Lee, J. I., 2019, "Numerical and Experimental Study of Cooling System According to Fan Shape in a Low-Voltage Electric Motor," Trans. Korean Soc. Mech. Vol. 2019, pp. 483~486.
- (4) Jo, H. Y., Cho, C. H., 2023, "Design and Experimentation for increasing Airflow in the Internal Axial Fan of a High-Voltage Induction Motor," Trans. Korean Soc. Mech. Vol. 2023, pp. 526~527.