

냉각 통풍홀 설계로 인한 견인 전동기 특성 및 제어 성능 영향 연구

김 기찬, 이 정일, 권 중록
현대중공업(주)

Effect on the Characteristics and Control Performance due to the Ventilation Hole Design of the Traction Motor

Ki-chan Kim, Jeong-il Lee, Jung-Loock Kwon
HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO., LTD.

Abstract - On this study the motor design method with fairly good characteristics and control capability as well as cooling capability is presented with considering the magnetic effect due to ventilation hole, which is installed to prevent the temperature rise. When the input voltage rises due to critical variation in traction power supply system, the final ventilation hole is presented by checking the inductance parameter with clarifying the relation between saturation of the motor core and the ventilation hole.

전 곡선은 차량 시스템 구성 사양 및 전인력 사양 등을 토대로 가감속 성능을 만족시키도록 결정되는데 본 논문 에 적용되는 견인 전동기는 그림 2의 운전 특성을 가진 다. 정토크 영역, 정출력 영역의 비는 1:1.67로서 이는 전동기 소형 경량화 개념이 포함되어 있다. 일반적인 전 동기 사양을 표 1에 정리하였다.

1. 서 론

유도전동기는 인버터 제어 기술과 전력용 스위칭 소자의 발달로 현재 견인전동기를 비롯한 대용량 전동기에 널리 채택되고 있고, 전동기 측면에서는 점차 고효율, 고효율, 소형 경량화가 요구되고 있는 추세이다. 이러한 결과로 모터의 냉각 표면적이 줄어들게 되고, 전동기의 온도 상승 범위가 넓어지게 된다. 따라서 전동기 도체의 저항 값이 커지게 되어 결국 동손으로 인한 전동기 손실이 증가하며, 특히 권선부의 절연 성능의 수명을 단축시키는 문제가 발생한다.

이러한 온도상승을 억제하기 위한 여러 가지 냉각방식이 전동기 적용 분야에 따라 적용되고 있는데, 견인전동기는 주로 냉각팬을 채용한 공랭식 방식이 채택되고 있으며, 냉각효율을 극대화시키기 위하여 코어 내부에 통풍홀을 설치하고 있다[1][2]. 그러나, 통풍홀의 자기회로를 악화시킴으로 자기저항, 자속밀도, 철손의 증가 현상이 발생한다. 따라서, 적절한 통풍홀 설계는 온도상승에 직접 관련이 되는 동손을 줄이면서 철손을 적절히 배분시키는 방법으로 양호한 효율을 발휘할 수 있게 된다.

견인전동기가 적용되는 전동기 시스템 특성상 전동기의 선간전압은 큰 전압 변동분을 포함하고 있으므로, 전동기는 기준 전압보다 높은 전압의 영향을 받게 된다[3]. 이러한 경우에는 통풍홀로 인한 코어의 포화 현상이 두드러져 전동기의 인덕턴스 파라미터 값이 변경되어 제어기 성능을 악화시킨다.

본 논문에서는 전동기 냉각성능, 효율 측면과 제어성능을 함께 만족시키는 통풍홀 설계 개념을 제시하고자 한다. 모델로서는 당사에서 국산화 개발된 견인전동기의 3가지 통풍홀 모델을 제시하였다. 해석방법으로는 각 모델별로 통풍홀로 유입되는 풍량과 권선온도를 시험 측정하고, 이러한 파라미터를 유한요소법에 적용하여 전동기 효율 특성과 자기적 특성을 분석하였다[4].

2. 적용 모델

2.1 견인전동기 운전 곡선 및 사양

그림 1은 당사에서 국산화 개발이 완료된 견인전동기 외관 사진이다. 반폐자냉식 냉각구조로서 본 논문에서 제시하는 통풍홀 구조로 이루어져 있다. 견인전동기 운

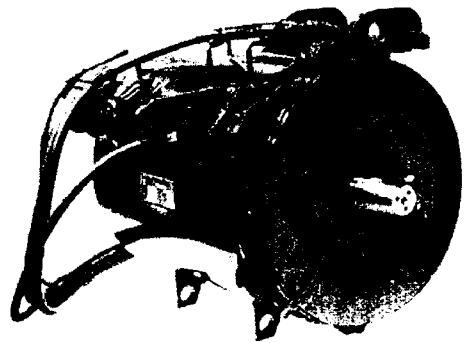


그림 1. 견인전동기 외관사진

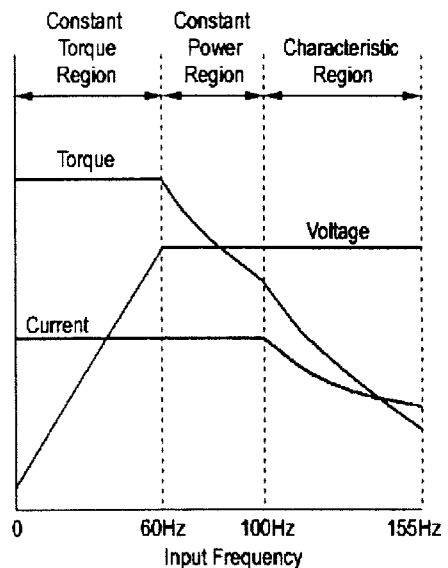


그림 2. 견인전동기 운전 특성 곡선

표 1. 견인전동기 사양
(연속 정격 운전 기준)

Item	Unit	Specification
Rated Power	kW	210
Rated Velocity	rpm	1800
Rated Torque	Nm	1140
Rated Frequency	Hz	60
Terminal Voltage	V	1100
Core Dimension	mm	$\phi 500 \times L220$
Air Gap	mm	1.4
Number of Pole		4
Terminal Resistance	Ω	0.2767
Leakage Reactance	Ω	0.5023
Winding		2Y
Insulation Class		H
Area of Fan Blade	mm ²	1964

2.2 통풍홀 모델

통풍홀로 인한 특성을 분석하기 위하여 그림 3과 같이 3가지 모델을 제시하였다. 고정자 및 회전자 직경의 통풍홀 크기 및 개수는 팬에 의한 냉각 풍량 및 연속정격에서의 전기적 특성을 고려하여 결정하였고, 통풍홀 편치 위치는 요크 내에서 반경방향으로 이동시켜 유한 요소 해석 수행한 결과 전동기 전기적 특성은 변동되지 않음을 확인하였다.

그림에서 모델 A는 냉각팬이 없는 모델이고, 모델 B는 회전자에 통풍홀 6개를 편치한 모델이며, 모델 C는 고정자에 48개 및 회전자에 6개를 편치하였으며 고정자와 회전자에 풍량이 비슷하게 유입되도록 단면적을 동일하게 두었다.

전동기가 정격운전 상태에서 전동기에 유입되는 풍량과 이 때의 온도상승 시험 값을 표 2에 모델별로 나타내었다.

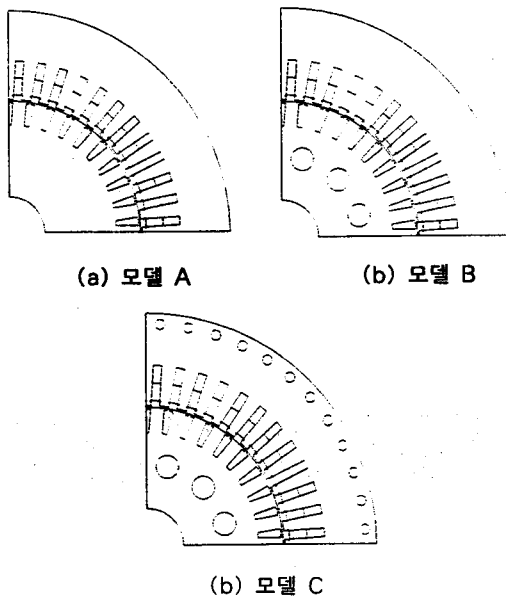


그림 3. 통풍홀 설계 적용 모델

표 2. 모델별 풍량과 권선부의 온도상승 결과

Item	Model A	Model B	Model C
Airflow(m ³ /min)	5.9	8.8	11.5
Temperature Rising(°C)	112	97	90

3. 해석 결과

3.1 정격 운전점에서의 특성 비교

그림 2에서 전동기 코어의 자속밀도가 가장 높고 온도상승도 최대로 되는 정토크 중단점(정격점)에서 표 2의 권선의 온도상승값을 고려하여 유한요소 해석을 수행하였다. 이러한 해석결과를 표 3에 전동기 손실량을 중심으로 정리하였다.

여기에서, 모델 A가 모델 C에 비해 전류가 1.2 [A] 정도 작고, 철손도 0.24 [kW] 가량 줄어들지만 온도상승으로 인한 저항값 증가로 인하여 고정자 동손값은 다른 두 모델에 비해 0.74 [kW] 가량 증가하므로 전체 손실은 모델 C에 비해 낮아짐을 알 수 있다. 특히, 견인전동기와 같은 VVVF 제어를 하는 인버터 구동 전동기는 상용 전압 전동기와는 달리 기동시부터 정격운전까지의 회전자 자속의 주파수가 상대적으로 높지 않으므로 회전자 자속밀도의 크기에 따른 철손량은 크게 차이가 나지 않는다. 따라서 고정자측 자로와 냉각 풍량 등을 적절히 이용하여 효율을 극대화시킨 모델이 B 모델임을 확인할 수 있다. 그림 4는 정격점에서의 자속 분포도를 나타내었다. 통풍홀로 인하여 자기저항이 증가되는 자속 분포를 확인할 수 있다.

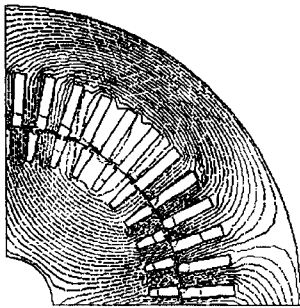
3.2 전압 변동으로 인한 모터 특성 비교

철도차량에서 구동시스템의 전압은 일정하게 인가되지 않고 어느 정도의 범위 내에서 변동된다. 국내 지하철의 전압은 DC 1500 [V]로 변동 범위를 AC로 변환시키면 940 [V] ~ 1400 [V] 정도이다. 이러한 전압 범위는 모터와 제어기의 특성 변화를 야기시킨다. 특히 전동기에서 냉각을 위한 통풍홀의 설치로 인하여 규소강판의 포화 정도에 의한 전동기 인덕턴스 변화가 제어 성능에 영향을 주므로 전동기 통풍홀 설계시 다음과 같은 해석을 수행하여 영향을 진단하고자 한다.

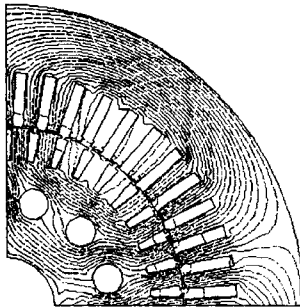
그림 5에 각 통풍홀 모델에 대하여 전압 변동으로 인한 전동기 특성을 분석하기 위하여 유한요소 해석 결과를 나타내었다. 저압에서의 전동기 특성은 각 모델별로 비슷한 특성을 나타내나, 1200 [V] 이상에서는 모델에

표 3. 통풍홀 모델에 따른 해석 결과

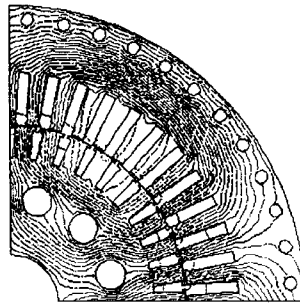
Item	Model A	Model B	Model C
Voltage(V)	1100	1100	1100
Slip(%)	1.34	1.26	1.25
Line Current(A)	138.5	139	139.7
Torque(Nm)	1142	1141	1141
Efficiency(%)	92.45	92.7	92.63
Power Factor(%)	86.2	85.5	85.2
Total Loss(kW)	13.61	13.11	13.31
Stator Copper Loss(kW)	8.45	7.95	7.91
Stator Core Loss(kW)	3.58	3.59	3.82
Rotor Copper Loss(kW)	2.62	2.44	2.42
Rotor Core Loss(kW)	0.008	0.009	0.009
Friction & Windage(kW)	1.2	1.2	1.2
Stray Load Loss(kW)	1.35	1.35	1.35
Flux Density of S Yoke(T)	1.5	1.55	1.84
Flux Density of R Yoke(T)	1.1	1.7	1.75
Flux Density of Teeth(T)	1.7	1.81	1.9



(a) 모델 A



(b) 모델 B



(c) 모델 C

그림 4. 통풍홀 모델에 대한 자속분포도

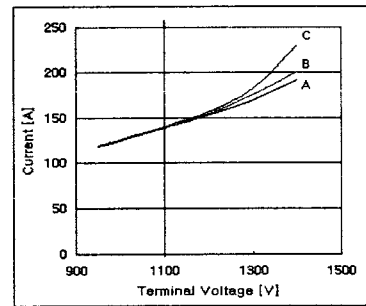
따라 특성 변화 차이가 커진다. 특히 모델 C에서는 유소강판에서의 자속 포화가 심해져 여자 전류는 급격하게 증가하지만 자속량 증가는 점점 줄어든다. 결국 인덕턴스 파라미터가 감소하여 전동기 제어가 어려워진다. 모델 A는 제어 파라미터는 전압에 따라 선형적으로 증가하지만 결국, 냉각 풍량의 한계로 인하여 온도 측면과 권선의 절연 파괴를 고려하여야 한다. 반면 모델 B는 전압에 따른 전동기 특성이 이러한 두가지 측면을 모두 만족시킨다.

즉, 냉각 성능과 전동기 특성 및 제어특성 등을 모두 고려하였을 경우에 겸인전동기에서 모델 B 편칭 코어가 가장 적절한 통풍홀 설계임을 진단할 수 있었다.

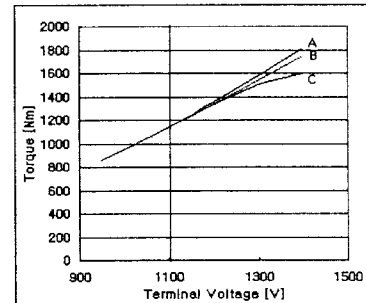
3. 결 론

겸인전동기 코어 설계에서 통풍홀은 냉각 측면에서는 중요하지만, 전동기 제어와 관련된 파라미터에는 민감하므로 적절한 설계와 진단을 수행하여야 한다.

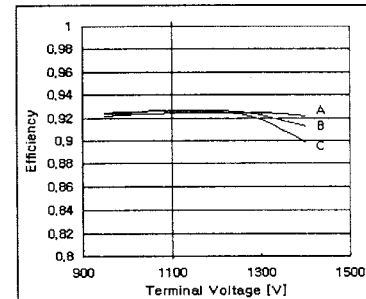
본 논문에서는 이러한 통풍홀로 인한 전동기 특성을 3가지 모델로 분류하고, 풍량에 따른 전동기 권선온도를 측정하고 유한요소법으로 해석을 수행하였다. 특히 전압



(a) 전류 변화 특성



(b) 토크 변화 특성



(c) 효율 변화 특성

그림 5. 전압변동에 따른 전동기 특성 변화

변동에 의한 전동기 제어 특성 영향을 진단하여 가장 적절한 통풍홀 설계 모델을 제시하였다. 이러한 설계와 진단이 소형 경량, 고출력화에 있어 필요하리라 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Williamson and T.J. Flack, "Effect of Radial Rotor Ventilation Ducts on Cage Motor Equivalent-Circuit Parameter", IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 141, No.3, pp.155-162, 1994
- [2] D. Sarker, P.K. Mukherje and S.K. Sen, "Approximate Analysis of Steady State Heat Conduction in an Induction Motor", IEEE Trans. on EC, Vol.8, No.1, pp.78-84, March, 1992
- [3] H.Y. Kuo and T.H. Chen, "Rigorous Evaluation of the Voltage Unbalance due to High-speed Railway", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.47, No.4, pp.1385-1389, 1998
- [4] S. Williamson and M.J. Robison, "Calculation of Cage Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Using Finite Elements", IEE Proceedings-B, Vol. 138, No.5, pp.264-276, 1991