

세탁기용 유도모터의 냉각에 관한 수치적 연구

홍상욱[†] · 전시문

Numerical Study on the Cooling of Induction Motor In a Washing Machine

Hong Sang Wook, Jeon Si Moon

Key Words : Cooling hole(냉각구멍), Cooling blade(냉각날개), Induction motor(유도전동기), DOE(실험계획법)

Abstract

The numerical study was carried out to effectively cool Induction motor applied to a washing machine. The outer rotor made of steel periodically spins up and down. The stator consists of the thin layered iron plates and copper coil. The effective cooling system is necessary to solve the reliability problem caused by the electric losses at the coil and the iron plate. Because the heat transfer rate of the natural convection in partially open space is generally low, thus it is necessary to enhance the heat transfer using rotating perforated plate. The flow phenomena around the motor are very complex due to the motor geometry and the outer rotor motion. The mixed convection takes place due to the slow rotation speed. The three dimensional flow simulation was performed using rotating reference frame technique and Boussinesq approximation but the radiation effect was neglected. It was found that the angle and direction of the cooling blades play an important role in the stator temperature.

1. 서 론

최근 전동기의 냉각설계에 관하여 많은 관심이 고조되고 있으며, 이는 산업의 요구에 따른 전동기의 소형경량화, 대용량화, 고속화의 경향과 관련이 있다. 전동기 회사에서는 제품의 원가를 낮추기 위하여 재료비를 줄이려고 노력하고 있다. 그러나 전동기가 작아지면 같은 손실(열원)에 대하여 방열면적이 줄어들게 되어 전동기 내부의 온도가 높아지고, 전동기의 용량이 커지거나 고속으로 운전이 되면 그만큼 발생하는 손실이 커지므로 마찬가지로 내부의 온도가 상승하게 된다^[1]. 또한 절연물의 수명도 동작온도와 반비례하므로, 각국의 공업

규격에는 전동기 코일의 온도상승 허용한계가 명시되어 있고, 한국에서는 한국공업규격의 일반용 저압 3상 유도전동기(KS C 4202)에 명시되어 있다. Andreas^[2]는 코일의 온도가 약 10°C 증가된 상태에서 동작하면 수명은 1/2로 감소한다고 하였다. 이상의 장점 외에도 냉각설계가 잘 된 전동기는 적은 유량의 냉각공기로 같은 효과를 얻을 수 있으므로 냉각 팬에서 소음이 적게 발생하고, 코일 및 회전자의 온도감소에 의한 동손(저항손실) 감소로 인하여 효율도 높아진다. 그러므로, 동작의 안정성과 신뢰성을 갖춘 고품질의 전동기를 만들기 위하여 냉각 설계가 매우 중요하다^{[3],[4]}. 본 연구는 프레스 가공이 가능한 세탁기용 유도전동기의 냉각을 위해 회전자에 형성된 냉각날개와 냉각구멍에 관계된 여러 인자에 대한 DOE(실험계획법)를 통하여 최적의 냉각 유로 설계를 수행하였다.

[†] LG 전자

E-mail : swh@lge.com

TEL : (02)818-3566 FAX : (02)837-0298

*

LG 전자

2. 본 론

효과적인 냉각설계를 위하여 유도전동기와 각 부의 열전달 특성을 정확하게 파악하여야 한다. 이를 위하여 온도분포를 정확하게 예측할 수 있는 해석기법이 필요하다. 열원(손실)의 종류는 1 차동손, 2 차동손, 1 차철손, 2 차철손, 표유부하손 및 기계손 등이 있다. 각각의 값을 구하는 실험적 방법에 대해서는 IEC 34-2_[1] 및 IEEE Std 112_[3]에 잘 나타나 있다. 본 연구에서는 정확한 열전달특성 파악을 위해 전동기의 해석 시 손실함수를 온도의 함수로 부가하였으며 코어와 권선의 비등방성 열전달을 고려하기 위해 비등방 전도계수를 사용하였다. Fig.1 은 기존 전동기의 전체적인 모습이며 본 연구에서는 전술한 손실 중에서 유도전동기의 주요손실인 1 차동손, 2 차동손, 1 차철손을 고려한 해석을 수행하였다.

기존 세탁기용 전동기의 열유동 해석을 통하여 현상파악을 수행하였다. 이를 통하여 현 냉각유로의 문제점을 노출시키고 효과적인 냉각설계에 필요한 주요인자들을 도출하였다. 또한 2 차원 해석을 통하여 효과적인 냉각날개를 위한 backward type, radial type, forward type 에 대해 냉각 성능을 검토하였다. 이러한 연구로부터 도출된 8 가지 주요인자에 대해 다구찌(L18) 해석을 수행하여 현 유도전동기에 대해 최적의 냉각유로를 도출하였다.

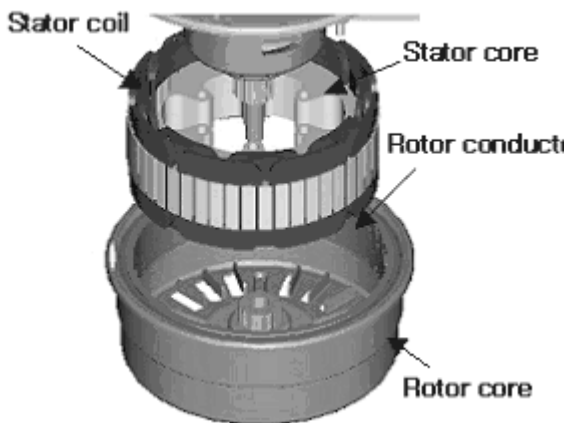


Fig. 1 Schematic diagram of Induction motor

2.1 지배방정식

본 연구에서는 상용코드인 FLUENT 을 사용하여 해석을 수행하였으며 solver 로써 FLUENT6.1 을 사용하였다. 또한 2 차원 해석의 경우 삼각형 격자를 사용하였고 3 차원 해석의 경우 육면체 격자와 사면체 격자를 사용하여 계산을 수행하였다. 해석에 사용된 연속방정식, 운동방정식,

에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - g_i \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (T U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\nu}{Pr} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \tag{3}$$

2.2 기본가정 및 경계조건

2.2.1 유도전동기의 모델링

전술한 바와 같이 유도전동기의 모델링 시 고려해야 할 주요 사항은 고정자 코어의 비등방성 열전달율, 고정자 권선의 비등방성 열전달율, 온도의 함수로 발생하는 동손의 손실량이다. Fig.2 는 고정자 코어와 고정자 권선의 개략도이다. 고정자 코어는 얇은 판이 적층된 구조를 가지며 적층판과 적층판 사이는 전기적인 절연을 위해 절연물로 코팅이 되어 있다. 이러한 전기적 절연물은 열적인 절연물의 역할도 수행하게 되어 적층방향의 열전달율은 다른 방향의 열전달율과 크게 다른 물성치를 갖게 된다. 이와 마찬가지로 고정자 권선의 경우도 얇은 여러 가닥의 권선이 접촉되어 있는 구조이며 권선과 권선 사이는 전기적으로 열적으로 절연물로 절연되어 있다. 또한 유도전동기 손실의 대부분을 차지하는 동손은 온도의 함수로 발생하여 방열이 부족한 부분은 온도가 상승하고 이는 다시 손실의 증가로 연결되어 그 부분이 더욱 온도가 상승하는 악순환의 고리를 형성한다. 이러한 온도의 함수로 발생하는 손실은 코어와 권선의 비등방성 열전도율과 결합되어 전동기의 부위별로 큰 온도차를 형성하여 해석결과에 약 10~15%의 영향을 미친다.

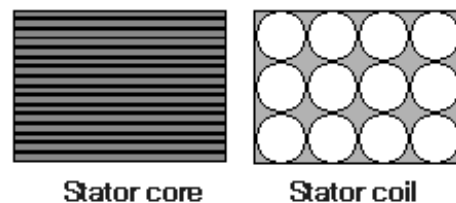


Fig. 2 Schematic diagram of stator core and coil

2.2.2 날개형상을 위한 2 차원 모델링

회전자의 하부와 상부에 구성될 날개의 형상을

검토하기 위해 Fig. 3 과 같이 2 차원으로 모델링 하였다. 기울어진 냉각날개(forward type, backward type)에 의해 생성되는 유량을 회전 방향을 바꾸어가며 해석하였고 기울어지지 않은 냉각날개(radial type)에 의해 생성되는 유량을 비교하였다. 모든 경우, 날개가 일정한 속도로 회전하는 정상상태로 가정하였으며 날개의 회전영역을 해석하기 위해 MRF(Multiple Rotating Frame)기법을 사용하였다. 계산격자로는 삼각형 격자와 사각형 격자를 혼합하여 약 10 만개의 격자를 사용하였다.

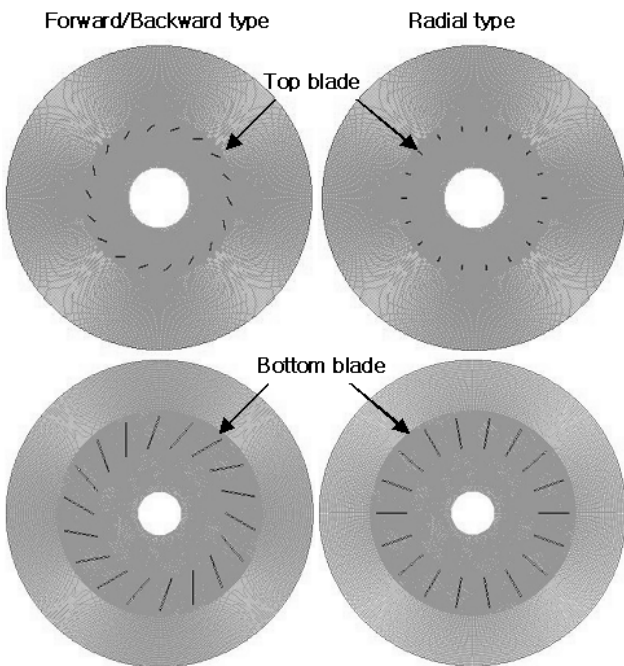


Fig. 3 Grid for 2-dimensional flow analysis for the direction of cooling blade

2.2.3 DOE 해석을 위한 3 차원 모델링

본 논문에서 해석하고자 하는 영역은 부력에 의한 자연대류와 냉각날개에 의해 생성된 유동으로 인한 강제대류가 혼합된 유동이나 온도차가 적은 저유속 유동이므로 비압축성 유동에 해당하며 회전자의 냉각구멍을 특성길이로 하는 $Re = 3543$ 이므로 난류로 가정하였다. 유도전동기의 손실은 1 차 동손, 2 차 동손, 1 차 철손, 기타 손실을 온도의 함수로 격자에 부가하였으며 난류모델은 RNG k-epsilon 모델을 사용하였다. 2 차원 해석과 마찬가지로 회전자의 회전영역을 위해 MRF(Multiple Rotating Frame) 기법을 사용하였으며 온도차에 의한 부력을 고려하기 위해 Boussinesq assumption 을 사용하였다. 또한 실제 모델의 1/6 만을 모델링하여 periodic 경계조건으

로 해석하였으며 육면체와 사면체 격자를 혼합하여 약 700,000~900,000 개의 격자에 대해 계산을 수행하였다. 계산 시 사용된 격자의 모습은 Fig.4 에 나타내었다.

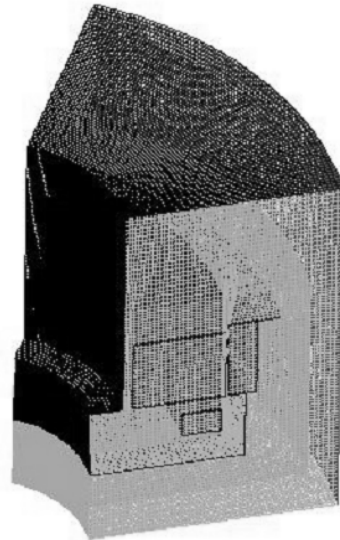


Fig. 4 Grid for 3-dimensional analysis

2.3 해석결과 및 고찰

2.3.1 기존의 방열 구조 해석

기존의 세탁기용 유도전동기의 열유동해석을 통해 현상태의 방열구조를 파악하였다. Fig. 5 에는 해석영역의 측면단면도와 해석결과로서 추출해낸 가상의 단면도의 위치를 표시하였다. 예로써, $R = 0.065$ 는 회전축에서 65mm 떨어진 원주면의 단면도를 의미한다. Fig.6 에는 가상의 원주면에서의 속도벡터를 도시하였다. 냉각을 위해 형성된 냉각구멍의 안쪽($R=0.065$)에서 유입된 공기는 다른 토출구가 형성되어 있지 않아 냉각구멍의 바깥쪽($R=0.075$)으로 토출되는 유로를 형성함을 보여주고 있다. 또한 고정자와 회전자의 간극면($R=0.089$)은 간격이 매우 좁아 상부로의 유로역할을 수행하지 못하며 냉각구멍에서 유입된 공기가 상부로 토출되는 속도성분은 존재하지 않고 회전속도 성분만이 존재함을 알 수 있다. Fig.7 에는 동일한 가상의 원주면에서의 온도분포를 나타내었다. 전술한 바와 같이 냉각구멍의 안쪽에서 유입된 차가운 공기가 냉각구멍의 바깥쪽으로 그대로 유출되기 때문에 냉각구멍 근처면만이 냉각되어지고 실제로 가장 많은 발열을 하는 고정자의 권선은 제대로 냉각이 되지 않음을 알 수 있다. 따라서 보다 원활한 고정자의 냉각을 위해서는 회전자 하부의 냉각구멍 외에 토출구의 역할을 수행할 수 있는 회전자 측

면의 냉각구멍 같은 유로가 필요하다. 또한 회전자 하부의 냉각구멍은 고정자 하부권선만을 냉각할 수 있으므로 고정자 상부권선의 냉각을 위해서는 별도의 냉각수단이 필요함을 알 수 있다.

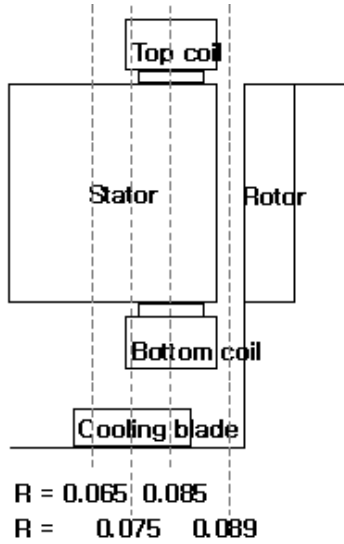


Fig. 5 Cross section for results analysis

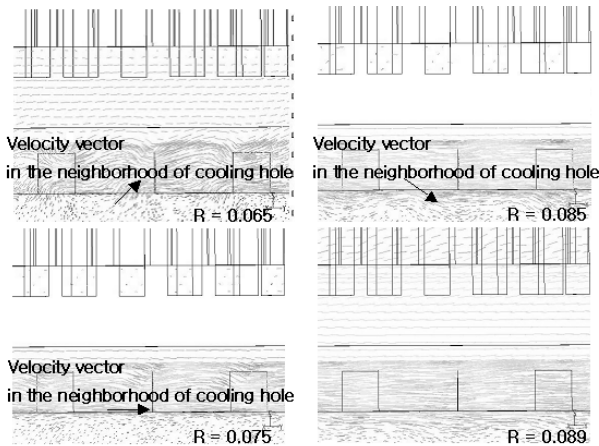


Fig. 6 Velocity vectors in the imaginary cross section

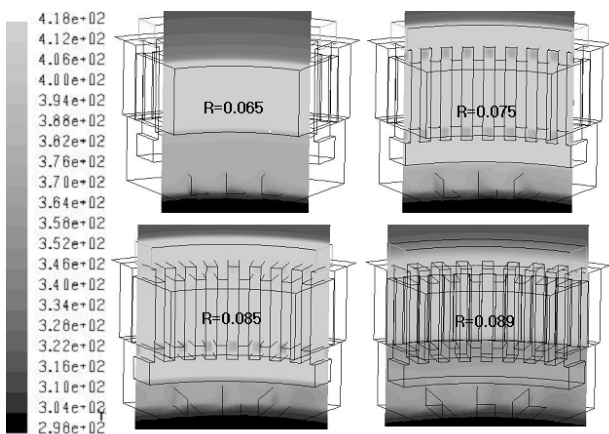


Fig. 7 Temperature distribution in the imaginary cross section

2.3.2 날개형상을 위한 2 차원 해석결과
 프레스 가공이 가능한 유도전동기 회전자의 냉각유량을 형성하기 위해 설계 가능한 냉각날개의 간단한 형상으로 한정된다. 이러한 형상에서 보다 효과적인 풍량을 형성을 위해 회전방향에 대한 날개의 각도효과를 2 차원 해석을 통하여 검토하였다. Fig.8 과 Fig.9 에는 상부 냉각날개와 하부 냉각날개의 날개각도에 따른 속도벡터 차이를 비교하였다. Fig.10 과 같이 전체속도벡터는 forward type 이 크게 나타나나 풍량과 관계된 회전속도 성분은 backward type 이 크음을 알 수 있다. 이러한 결과는 냉각날개에 의해 형성되는 유량으로 나타나며 table 1 에 그 결과를 나타내었다. 따라서 현 유도전동기의 효과적인 냉각을 위해서는 상부/하부 냉각날개가 회전방향에 대해 둔각을 갖는(backward type) 형상이 유리함을 알 수 있다.

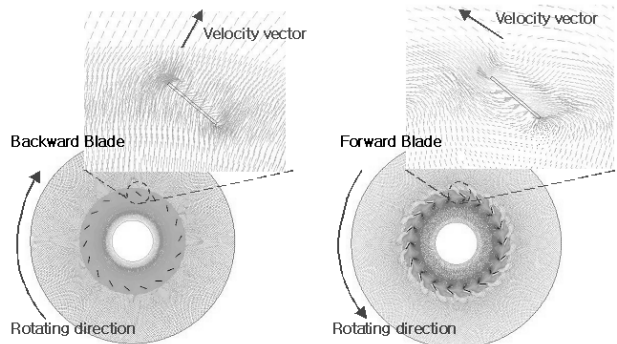


Fig. 8 Velocity vectors for the top blade of rotor

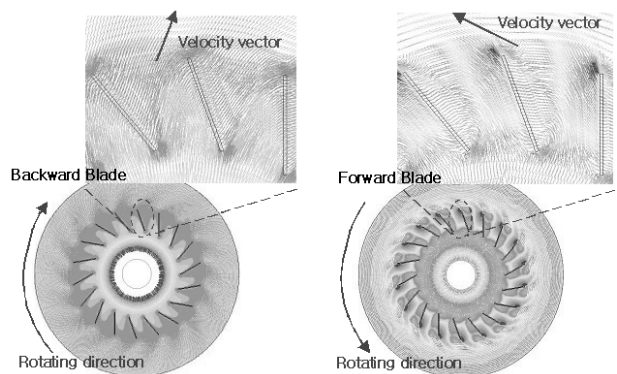
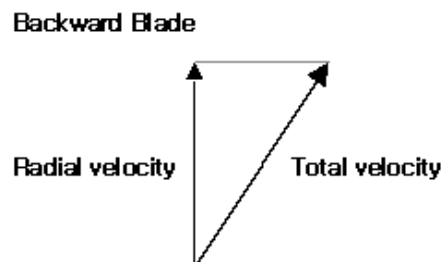


Fig. 9 Velocity vectors for the bottom blade of rotor



Forward Blade

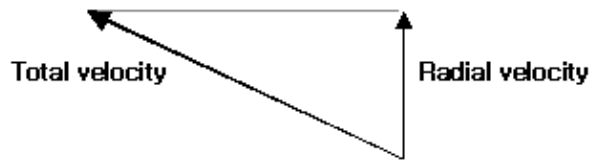


Fig. 10 Velocity triangle for backward type and forward type

Table 1 The effect of blade direction

Location	Type	Mass flow rate (kg/s)	Radial velocity (m/s)	Total velocity (m/s)
Top	Backward	2.006	2.553	2.772
	Radial	1.591	2.021	3.156
	Forward	0.7755	0.98	4.157
Bottom	Backward	2.613	3.608	4.614
	Radial	1.961	2.703	4.565
	Forward	1.621	2.242	6.124

2.3.3 최적 냉각을 위한 3 차원 DOE 해석결과 현상파악을 위한 3 차원 해석결과로부터 고정자 하부권선의 냉각을 위해서는 기존의 냉각구멍 외에 토출구가 필요함을 알 수 있었다. 또한 하부의 냉각날개는 고정자 상부권선의 냉각에 아무런 역할을 할 수 없으므로 회전자 상부에 추가의 냉각날개가 필요함을 알 수 있었다. 냉각날개 방향에 대한 2 차원 해석결과로부터 회전 방향에 대한 냉각날개의 각도는 둔각이 보다 많은 풍량을 형성함을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 최적의 유도전동기의 냉각을 위한 주요인자들을 도출하여 다구찌(L18) 해석을 수행하였다. 이 때 사용된 주요인자는 회전자 하부면 냉각구멍의 각도, 회전자 하부면 냉각구멍의 개수, 회전자 하부면 냉각구멍의 면적, 회전자 하부면 냉각구멍의 냉각날개의 방향, 회전자 측면 냉각구멍의 개수, 회전자 측면 냉각 구멍의 면적, 회전자 상부 냉각날개의 각도, 회전자 상부 냉각날개의 높이이다. Fig.11 과 Fig.12 에는 다구찌 해석결과로서 도출된 S/N 비의 주효과와 기여율을 나타내었고 Fig.13 과 Fig.14 에는 다구찌 해석결과의 평균값에 대한 주효과와 기여율을 나타내었다. S/N 비와 평균값이 모두 유사한 결과를 보이며 기여율이 가장 큰 인자로는 타공에 의해 형성된 냉각날개가 전동기의 내부면/외부

면 형성여부, 회전자 하부 냉각구멍의 면적, 회전자 상부 냉각날개의 높이임을 알 수 있다.

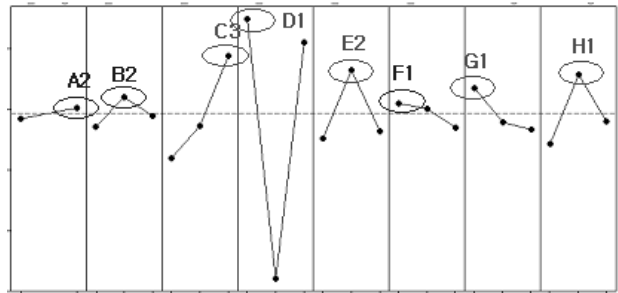


Fig. 11 Main effects plot for S/N ratio

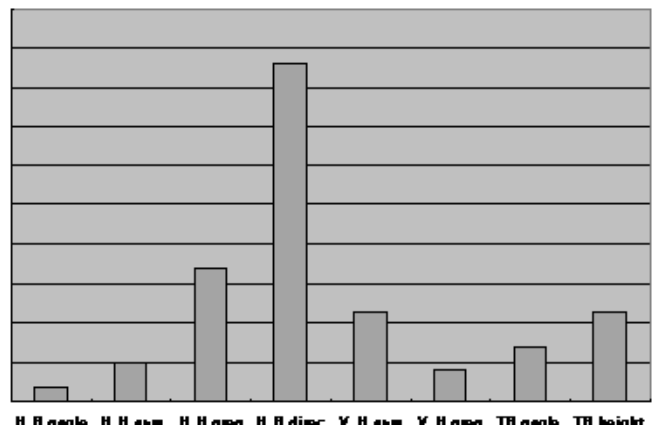


Fig. 12 Contribution for S/N ratio(%)

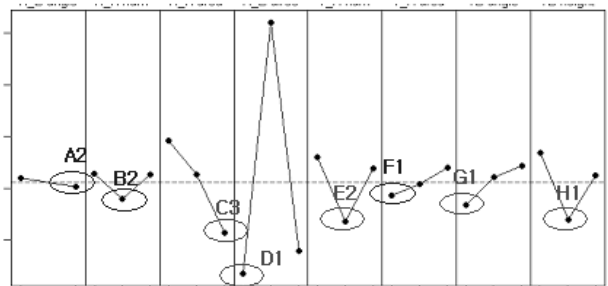


Fig. 13 Main effects plot for means

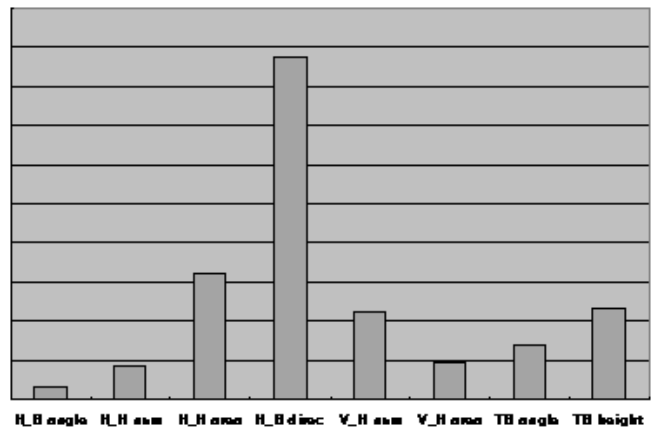


Fig. 14 Contribution for means(%)

3. 결 론

본 연구에서는 프레스 가공이 가능한 유도전동기의 최적 냉각 구조에 관한 다구찌 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고정자의 상부와 하부는 유동에 대해 거의 격리된 구조를 가지므로 상부권선과 하부권선의 각각을 독립적으로 냉각할 수 있는 2 개의 유로가 필요하다.
- (2) 유로저항이 적은 전동기의 유로 설계 시 냉각날개의 방향은 회전방향에 대해 둔각(backward type)을 갖는 형상이 보다 유리하다.
- (3) 유도전동기의 냉각을 위한 주요인자는 회전자 하부 냉각구멍의 날개위치(유도기 내부면/외부면), 회전자 하부 냉각구멍의 면적, 회전자 상부 냉각날개의 높이이다.

참고문헌

- (1) IEC, 1972, Rotating electric machines-Part2 : Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests," IEC Publication 34-2
- (2) John C. Andreas, 1992, Energy Efficient Electric Motors, Marcel Dekker, Inc., pp. 243-245.
- (3) IEEE, 1002, "Test procedure for poly phase induction motors and generators," IEEE Std 112-1991.
- (4) 윤명근, 1997, 소형 진폐형 유도전동기의 열전달 특성에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교 대학원