

함정용 소화펌프 구동 모터의 소손현상 개선에 관한 연구

정 상 후†

(원고접수일 : 2007년 9월 10일, 심사완료일 : 2007년 11월 13일)

A Study on the Burning Damage of a Driving Motor for Warship Fire Pump

Sang-Hu Jeong†

Abstract : An improvement of driving motor burning damages on a couplingless type warship fire pump is studied. The pump consists of an induction motor, a pump-motor shaft and a volute type impeller. The burning damage had occurred by changing the material of the pump-motor shaft from carbon steel(SM 45C) to stainless steel(STS 316) for improving anti-corrosion property in sea water. It is shown that a material change on the pump-motor shaft can reduce the efficiency of driving motor and may cause motor burning in the process of pump development stage. This kind of motor burning problem can be solved by increasing the efficiency of the motor and changing the geometry of the inner parts.

Key words : Bearing temperature test(베어링 온도시험), Motor burning(모터 소손), Fire pump(소화 펌프), Motor efficiency(모터 효율), Motor shaft(모터 축)

1. 서 론

함정의 탑재장비는 함의 고속기동성 확보를 위한 중량제한으로 경량화가 요구되고, 탑재 공간 제한으로 인한 소형화가 필요하며, 전시 임무수행 목적을 달성하기 위하여 신뢰성과 장비 고장시 복구를 위한 신속한 정비성이 요구 된다. 소화펌프는 함정에서 화재발생시 화재진압을 위하여 설치되는 장비로써, 작동유체는 해상에서 풍부하게 사용할 수 있는 해수를 사용, 해수에 대한 내부식성이 요구되며, 화재 발생은 예측이 불가하므로 화재가 발생할

경우 언제든지 신속히 소화수를 공급하기 위해 24시간 상시 구동되어야하는 장비로 고도의 내구성과 신뢰성이 요구되는 장비이다.

소화펌프는 일반 상선용 펌프와는 달리 함정 설치공간 협소 및 중량제한을 고려, 펌프를 소형화, 경량화하기 위해 구동모터 축과 펌프 축간 커플링이 없는 특이한 형식으로 매우 Compact한 장비이다. 본 연구에서는 커플링 없이 모터축과 펌프축이 일체인 형식의 함정용 소화펌프에서 펌프-모터 일체형 축재질을 해수 내부식성 및 정비의 간편성을 위해 비자성체 재질(STS 316)로 변경에 따른 모

† 교신저자(국방기술품질원 품질경영단 함정센터), E-mail:jsanghu@hanmail.net, Tel: 051)410-8325

터베어링 발열 및 모터성능에 미치는 영향과 모터 소손현상 개선에 대해 연구하였다.

최근 미국에서는 소형, 경량화를 위하여 펌프 케이싱에 고정자를 설치하고 펌프 임펠러에 회전자를 설치, 펌프 케이싱 내부에 영구자석에 의한 직류 구동모터를 내장하고, 고정축에 플레인 베어링을 설치하여 작동유체에 의하여 냉각되는 무시일(sealless) 모터 내장펌프(integral motor pump)를 군사용 및 산업용으로 연구, 실험하고 있으며 미래의 펌프로써 주목 된다^[1].

어에 알루미늄을 다이캐스팅 주조하여 모터축을 조립하였고, 축조립후 회전자 가공 및 발란싱을 하였다. 고정자는 모터프레임 주조 및 기계 가공 후 철심을 가공, 적층하여 동권선(Copper wire)을 포설, 회전자와 베어링을 베어링카바에 조립하고 모터 전부에는 냉각용 팬(Fan)과 팬 카바를 조립, 모터를 완성하였다. 완성된 모터축에 축시일(Mechanical seal), 발란싱 시험 완료된 임펠러, 키를 설치하고 케이싱카바, 케이싱을 조립하여 펌프를 완성하였다.

2. 실험대상 및 실험장치

2.1 실험대상

실험용 구동모터는 40마력, 3상 농형 유도형, 공랭식이며, 모터 축과 펌프 축이 일체형인 모터이다. 펌프는 함정용, 수평식, 원심식이고 모터 및 펌프의 주요 특성 및 형상은 Table 1, Fig. 1과 같다.

Table 1 Characteristics of the motor and fire pump

Motor model	40Hp× 2P× 440V× TE-B3/B5(JP) STS 316 Shaft(60mm)
Motor type	Total enclosed, Self cooling, Class "F", 2 pole Stator : Silicon steel sheet + Copper wire, Rotor : Silicon steel sheet + AL die casting
Coupling	Nil, Motor-pump common shaft
Pump model	NHC-000X
Pump Capacity	60m ³ /h× 7kg/cm ² at 3600rpm
Pump type	Centrifugal, Horizontal, Volute
Quantity	12set

모터-펌프용 일체축 재질은 80mm직경의 스테인레스강(STS 316) 환봉을 구매하여 시판파킹 후 공인시험기관의 시험분석을 실시, 규격재질임을 확인한 후 완성치수인 60mm로 제작하였다.

회전자는 규소강판을 가공하여 적층하고 철심 코

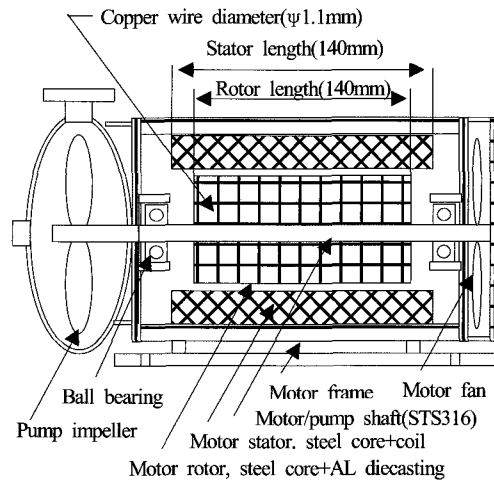


Fig. 1 Configuration of the driving motor

개선전 모터는 40마력 3상 유도전동기로 표준 모터축 재질은 일반구조용강(SM45C)이나 펌프축 해수부식성을 개선하기 위하여 내식성이 강한 스테인레스강으로 재질을 변경하고 축재질 외의 축 치수, 펌프 및 구동모터의 모든 구성품은 표준모터 재질과 동일하게 설계, 제작하였다.

모터 및 펌프는 12대를 제작하였으며, 펌프 성능 시험시 베어링 온도상승현상이 발생되었다.

베어링 온도상승으로 인한 모터소손 등 펌프 기능상실로 발열 원인분석 및 모터를 개선, 재제작하여 모터 실험설비에서의 정격부하 상태로 모터베어링 포화온도실험과 모터단독 성능시험을 실시후 펌프와 모터 조립후 펌프완성품 상태에서 펌프성능 실험설비를 이용하여 베어링 온도상승 실험 및 펌프 성능실험을 수행하였다.

2.2 실험방법

펌프는 완성품 상태에서 Fig. 2 에 나타난 성능 실험 설비로 펌프의 정격압력, 정격유량을 기준으로 측정하였으며, 작동유체는 해수 구입의 난이 등으로 40℃ 이하의 깨끗한 청수를 사용하였다. 펌프 최종 성능시험 및 베어링 포화온도시험은 모터가 포화온도에 도달시까지 3~6시간 연속시험을 하였다.

모터는 AC 440V, 3φ, 60Hz 전원을 사용하였고, 모터의 입력전류, 출력, 효율 등은 Fig. 3(b)의 시험설비를 사용하였다.

베어링 온도측정은 디지털식 온도측정기(Line seiki, 71 JE0622)를 베어링 표면에 설치하여 연속적으로 계측하였으며, 온도측정 센서 설치 위치 및 설치방법은 Fig. 4와 같다.

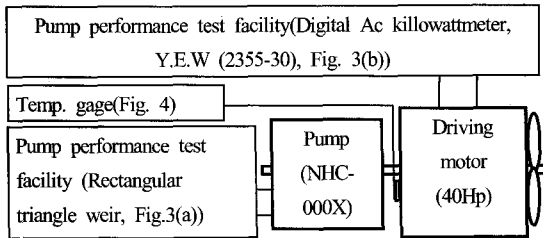
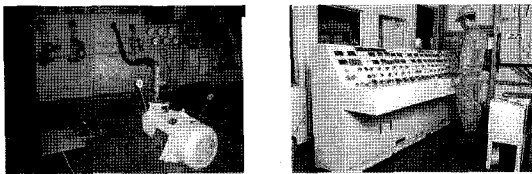


Fig. 2 Schematic diagram of pump performance test



(a) Rectangular triangle weir (b) killowattmeter

Fig. 3 Pump performance test

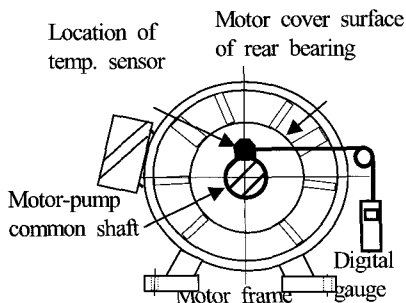


Fig. 4 Installation of temperature sensor

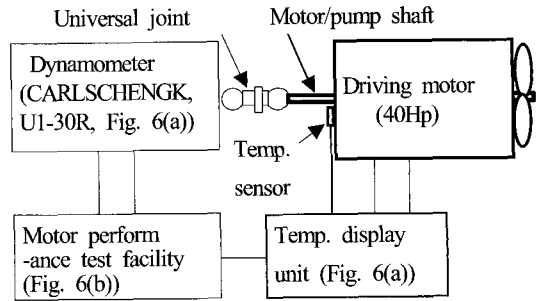
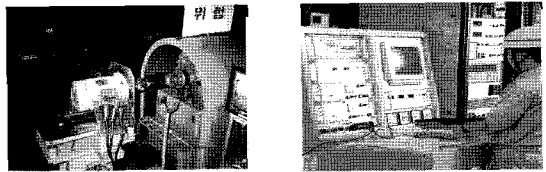


Fig. 5 Schematic diagram of motor performance test



(a) Dynamometer (b) Motor performance test facility

Fig. 6 Motor performance test

베어링 온도상승 원인분석 및 개선후 모터 단독 부하 성능시험은 Fig. 5, Fig. 6과 같이 수동력계로 모터에 정격 최대 토크를 부과하여 성능시험을 실시하였으며, 모터효율, 출력, 모터전원 등의 제성능은 Fig. 6(b)에 나타난 모터 성능실험 설비로써 실험하였다.

베어링 온도상승실험은 동력계에 모터를 설치 후 베어링 카바표면에 열전대 온도계를 Fig. 4에 나타난 위치에 부착후 Fig. 6(a) 우측에 나타난 디지털식 온도 전시장치를 사용하여 모터가 포화온도에 도달시까지 3~6시간 연속 운전하였다.

수동력계 및 모터 성능 실험설비를 사용, 모터단독 부하 성능실험 및 베어링 포화온도 시험 실시후 펌프와 모터를 조립하여 최종 펌프 완성품 상태에서 베어링 포화온도 시험을 하였다. 펌프완성품 시험후 합정에 탑재, 선체배관, 전기결선 및 제어계통과 연동성능 실험 및 8시간 연속운전 시험을 실시하였으나, 소손 현상이 없었고, 결과는 실험설비에서의 측정값과 유사하였다.

3. 실험 및 개선

3.1 최초실험 및 모터소손 현상

실험대상 장비를 최초 제작후 펌프 완성품 상태

에서 Fig. 3에 나타난 펌프성능 실험설비를 사용하여 제3 모터를 모터가 포화 온도에 도달시까지 3~6시간 연속운전 시험중, 모터 베어링 온도상승 실험 45분 경과후 베어링 표면 온도가 115℃까지 급격하게 상승하면서 모터 단자박스에서 연기가 발생되었고, 모터가 소손됨에 따라 펌프가 정지 되었으며, 그 결과는 Fig. 7과 Table 2에 나타내었다.

소손된 모터는 절연등급“F”급으로 155℃까지 절연이 가능^[2]하므로 모터 베어링 표면온도가 115℃까지 도달시 모터내부 권선온도는 약 155℃까지 도달되면서 절연이 파괴되어 모터가 소손되었으며, 베어링에서도 과도한 온도상승으로 베어링이 마모되었고 모터 토오크가 손실됨에 따라 펌프작동이 정지되었다.

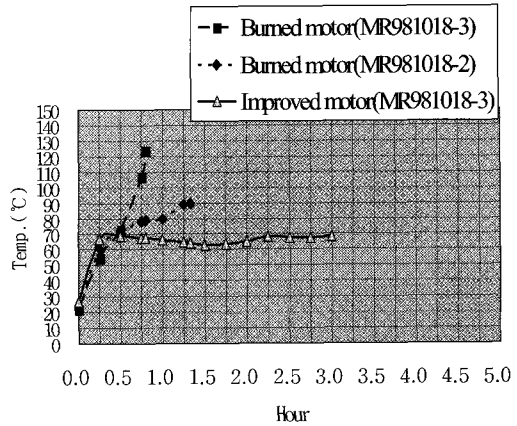


Fig. 7 Comparison curve of bearing temperature

Table 2 Bearing temperatures comparison table of the burned motors and the improved motors

Motor no.	Δt(Surface temperature of bearing housing - Ambient temperature at 1m Distance) Criteria of Δt : Below 55℃ ^[7]					
	Motor test with pump (Burned)		Motor test, dynamometer (Improved)		Motor test with pump (Improved)	
	Hour (Hr)	Temp. (Δt)	Sat. hour (Hr)	Temp. (Δt)	Sat. hour (Hr)	Temp. (Δt)
MR981018-1	-	-	3.50	45.0	-	-
MR981018-2	1.33	64.0	4.50	46.0	-	-
MR981018-3	0.75	91.5	2.50	46.0	3.00	41.0
MR981018-4	-	-	2.50	35.5	-	-
MR981018-5	-	-	3.00	48.0	5.00	45.6
MR981018-6	-	-	2.50	47.0	-	-
MP980597-1	-	-	2.72	45.0	4.50	36.0
MP980597-2	-	-	3.75	45.2	3.75	51.4
MP980597-3	-	-	2.34	46.2	3.50	48.0
MP980597-4	-	-	3.08	44.8	3.75	40.3
MP980597-5	-	-	2.96	45.4	4.16	50.9
MP980597-6	-	-	2.86	45.8	4.16	46.3

제 2모터를 추가로 실험을 실시 한 바, Fig. 7에 나타난 바와 같이 62분 연속운전후 규격치를 초과했으며 80분 연속운전 후에도 90℃ (Δt=63℃)로 계속적으로 온도가 상승하였으므로 제 3 모터와 동일한 모터 소손현상이 발생될 것이 예측되어 개선을 연구하였다.

3.2 모터소손 현상 원인분석

베어링 발열현상의 주요원인은 권선저항과 권선에 흐르는 전류에 의해 발생하는 1차동손과 회전자 저항에 의해 발생하는 2차동손 및 철심에서의 히스테리시스 손실, 와전류손실 등의 철손 그리고 누설 자속에 의해 발생하는 표류 부하손과 베어링 마찰력과 냉각팬에 의해 발생하는 기계손 등에 의해 발생된다.

이러한 전동기 손실이 전기적 입력에너지의 일부를 기계적 출력에너지로 변환시키지 못하고 열로써 모터 내부온도를 상승시키고 베어링 및 베어링 카바를 통하여 저온부위로 열전달이 진행 되어 베어링온도 상승을 일으킨다고 판단되었다.

또한, 베어링에 의한 마찰손실 및 베어링용 그리스(grease)의 부적절한 선정에 의해 손실이 증가하고 온도상승을 일으키는 원인이 될 수도 있다고 보고된 사례도 있다.

3.3 적용 및 개선방안

모터효율을 높이려면 크기를 크게하고 자기장하와 전기장하를 감소시켜 손실을 낮추거나, 크기는 같더라도 철손이 적은 재료를 사용하여 손실을 낮추거나, 자성웨이 채용, 냉각팬, 풍도 개선, 고정도 불베어링 사용 등 요소기술을 적용 하면 된다^{[3]-[5]}.

또한, 모터손실을 줄여 모터 내부온도 및 베어링

온도 상승을 감소시키고, 모터의 기계적 출력을 높여야 한다.

출력을 높혀 모터효율을 개선하기 위해서는 회전수가 일정할 경우 $D^2 \times L$, 즉 모터크기로 거의 좌우되고 다음으로 자기장하와 전기장하에 의하는데, 자기장하는 철심재질로 전기장하는 온도상승, 즉 냉각방식에 의해 제한을 받는다^[3].

효율을 높이려면 크기를 크게 하고 자기장하와 전기장하를 감소시켜 철손을 낮추거나, 크기는 같더라도 철손이 적은 좋은 철심을 사용하여 손실을 낮추거나를 선택하게 된다^{[3], [6], [7]}.

합정용 소화펌프 모터 베어링 온도상승시험 및 모터 소손(燒損)현상은 모터축 재질이 비자성체(非磁性體)일 경우 비자성 모터축 재질이 투자율(透磁率)이 낮은 관계로 모터 고정자와 회전자의 철심에 균일하게 유지되는 자속밀도가 변화하게 되며, 철심장에서 과도한 자속밀도가 과포화상태가 되어 철손이 증가하고 손실이 열로 변하여 모터 내부온도를 상승시킴으로써 베어링 카바 표면온도가 상승, 모터가 소손되었다.

3.4 개선 및 실험결과

개선품은 회전자 및 고정자 철심장 길이를 140mm에서 170mm로 각각 30mm 증가, 코일 권선을 1.1mm에서 1.5mm로 변경하여 코일용량을 증대, 채권선 하였고, 모터케이싱을 재주조하여 제작 하였다. 일반용 그리스(grease, 적용 온도범위 : -10~60℃)는 내열성 실리콘그리스 ISL NLGI 2등급(온도범위 : -10~100℃)으로 변경하였다.

원인분석 결과 및 개선방안에 의거 모터개선품은 개선후 수동력계(dynamometer)를 사용, 정격전원, 정격부하 토오크를 부과하여 모터 베어링 포화 온도 상승실험 및 성능실험을 수행하였다.

일정 회전수로 회전할 때 회전자 및 고정자 철심장 길이를 증가시킨 것은 회전자 길이를 증가시켜 모터의 기계적 출력을 높임으로써 효율을 높이고, 코일권선 직경을 증가시킨 것은 코일 저항을 줄여 1차손을 감소시킴으로써 모터손실을 줄여 모터 효율을 높이도록 하였다.

그리스는 베어링 포화온도 시험결과 모터에 부과 15분에서 1시간 경과후 베어링 카바 온도가 60℃에 도달함을 감안, 100℃에서도 운전이 가능한 내열성 그리스를 적용하였다.

성능시험 후 모터와 펌프를 조립, 펌프 완성품 상태에서 베어링 포화온도 시험 및 펌프성능시험을 실시하였으며, 개선전,후 모터 베어링 포화 온도 실험결과 비교는 Table 2에 나타내었다.

Table 3은 개선후 수동력계에 의한 모터단독 부하성능 실험시의 모터 성능실험 결과이다.

모터 베어링 포화온도는 Fig. 7에 나타난 개선후 제3 모터(MR98-1018-3)의 실험결과와 같이 운전 초기에는 급격한 온도상승률을 나타내다가, 일정 온도 도달후 상하로 변동하다가 포화온도에 도달한 후에는 온도상승 변동없이 일정한 값을 나타냄을 알 수 있다.

Table 3 Motor performance test(dynamometer)

Motor no.	Torque (Kgf · m)	Speed (rpm)	Current (A _{av})	Eff. (%)	Δ t
MR98-1018-1	8.24	3558	57.93	89.58	45.0
MR98-1018-2	8.24	3535	56.38	90.20	46.0
MR98-1018-3	8.27	3545	55.90	89.90	46.0
MR98-1018-4	8.25	3553	57.30	89.60	35.5
MR98-1018-5	8.24	3535	56.12	89.97	48.0
MR98-1018-6	8.26	3546	49.40	89.61	47.0
MP98-0597-1	8.25	3540	52.45	89.97	45.0
MP98-0597-2	8.25	3540	52.40	89.90	45.2
MP98-0597-3	8.25	3540	52.39	89.95	46.2
MP98-0597-4	8.25	3540	52.47	89.93	44.8
MP98-0597-5	8.25	3540	52.45	89.87	45.4
MP98-0597-6	8.25	3540	52.44	89.91	45.8

4. 실험결과 고찰

소손(燒損)된 제3 모터의 경우 모터는 Fig. 7과 같이 베어링 온도가 급격하게 상승하여 45분 연속 운전 후 115℃까지 상승, 소손되는데 비해 개선한 모터의 경우, 연속 운전시간 약 2시간 30분 연속 운전 후 72℃에 도달후 온도가 상승하지 않는 포화온도에 도달하여 베어링하우징 표면온도와 주위 온도

의 차가 46℃로 연속 운전시간이 계속 증가하여도 온도는 발열량과 냉각팬에 의한 냉각량이 평형에 도달하여 더 이상 온도가 상승하지 않음을 알 수 있다^[8].

나머지 11대의 모터 베어링도 온도차가 36 ~ 50.9℃로 규격 온도차 55℃를 만족하였으며 모터 산업규격 대비 성능실험 결과도 양호하였다^[9].

Fig. 7에 나타낸 바와 같이 전형적인 모터소손 현상을 나타낸 제3 모터(MR98-1018-3)에 대한 개선 후 시험결과를 고찰해 보면, 수동력계에 의한 모터단독 부하시험시의 온도차(Δt)는 46℃이나, 모터와 펌프 조립후 완제품 상태에서의 온도차(Δt)는 41℃로 수동력계에서 시험시 온도가 5℃ 정도 높았다.

이는 수동력계에서의 실험결과는 모터가 발생 할 수 있는 최대 출력 토크로 운전시의 온도 상승값이나, 펌프 완성품상태에서는 펌프의 정격 압력, 정격용량에서 펌프 임펠러에 의한 토크를 부담하게 되므로 모터에 걸리는 부하가 상대적으로 적었거나, 수동력계에 의한 모터 성능 시험 설비와 펌프 성능시험 설비에 각각 공급되는 전압 및 주파수의 변동에 의해 차이가 발생하였다고 사료된다.

Table 3에 나타낸 바와 같이 모터 12대중 대부분의 모터베어링 온도상승치는 45~46℃이나, 일부 차이가 발생한 원인으로는 각 모터 제작시 기계적 공차와 모터성능시험 설비에 공급되는 산업용 전력의 전압 및 주파수의 변동에 의한 영향으로 모터토크가 변동하여 발생하였다고 판단된다.

펌프 모터베어링 온도상승 실험결과 포화온도 도달시간은 2.5~5시간이 소요됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 커플링이 없는 모터축과 펌프 축이 일체인 형식의 함정용 소화펌프에서 펌프-모터 일체형 축재질을 해수내부식성 및 정비의 간편성을 위해 비자성체 재질(STS 316)로 변경에 따른 모터베어링 발열에 대한 영향과 모터 소손현상 개선에 대해 연구하였으며, 연구결과는 아래와 같다.

1) 소화펌프 구동 모터의 소손현상을 개선함으로

써, 함정용 탑재장비의 소형화, 경량화 요구 조건과 해수 내부식성, 정비의 간편성 및 신뢰성 등의 장비 군사요구도(ROC, Requirements of operational capability)를 만족하는 함정용 소화펌프의 개발을 완료할 수 있었다.

2) 펌프와 모터가 일체축인 펌프축을 해수 내부식성을 증대시키기 위해 해수부식에 강한 비자성강(STS 316)으로 변경할 경우, 비자성강은 투자율이 낮아 철심에서의 자속밀도 포화를 유발하여 철손을 증가, 손실된 전기에너지는 열로 변화하여 베어링 온도상승을 일으키고 권선온도를 절연온도 이상으로 상승시켜 절연을 파괴, 모터 소손현상을 일으킬 수 있다.

3) 모터축을 투자율이 높은 일반구조용강에 비해 투자율이 낮은 스테인레스강 재질을 사용시 회전자와 고정자의 철심장 길이를 증가시켜 자속 밀도를 낮추고, 코일 권선 직경을 증가시켜 저항을 감소시키는 등 효율을 높이도록 설계해야 하며, 40마력, 3상 농형 유도형, 공랭식, 스테인레스(STS 316) 축 재질의 전기구동 모터 베어링 포화온도 도달시간은 2.5~5시간이 소요됨을 알 수 있다.

4) 본 연구에서의 실험결과는 펌프 설계자, 모터 설계자, 함정설계자가 일체형 펌프-모터축 재질 선정시 투자율에 따른 모터손실을 사전 검토 후 펌프 축 재질을 선정하여야 함을 알 수 있다.

본 연구에서는 모터축 재질변경에 따른 투자율 변화에 의한 모터 소손현상을 실험을 통하여 연구하였으며, 추후 모터 축재질 변경에 따른 모터 내부 온도분포와 발생열량에 미치는 영향에 대해 심도 있는 연구가 필요하다고 사료된다.

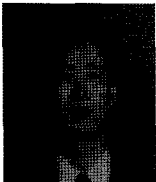
참고 문헌

- [1] Peter Mongeu, Mark Piercey, Don Sloteman, Naval Symposium on Electric Machines, "Inregrated motor pumps", The Office of Naval Reserach, pp. 147 - 152, 1998.
- [2] 姜衡富, "電氣·電子 材料", 清文閣, 1986.
- [3] 林永茂樹, 月刊 電氣機械, 日立製作所(株), "고

효율 모터에 있어서의 기술”, Vol.32, No.2, pp. 44 - 48, 1999.

- [4] 통산산업부, “고효율 유도전동기 생산기술”, pp. 18 - 95, 1996.
- [5] 開道 刀, 月刊 電氣機械, “고효율 모터용 코어제의 기술동향과 과제”, 新日本製鐵 (株), Vol.32, No.2, pp.49 - 52, 1999.
- [6] 편집자, 月刊 電氣機械, “미국에 있어서의 모터 효율 규제 의 현상”, Vol.32, No.2, pp. 40 - 43, 1999.
- [7] 통상산업부, 고효율 유도전동기 회전자 다이캐스팅 생산기술 연구개발에 관한 최종 보고서, “8장 전동기 손실의 종류와 회전자 손실”, pp.71 - 90, 1997.
- [8] M. Mecati OzisikK, “Heat Conduction”, John Willey & Sons. Inc., pp.44 - 52, 2002.
- [9] 표준화 협회, “한국산업규격(KSC 4202) 저압 3상 농형 유도 전동기”, pp. 1 - 38, 1986.

저 자 소 개



정상후(鄭相厚)

1963년 8월생, 1986년 금오공과대학교 기계공학과 졸업, 창원대학교 기계공학과졸업(석사), 조선기술사, 1986~1995 코리아 타코마 조선(주) 설계부 대리, 1995~2006 국방품질관리소, 2006~2007 현재 국방기술품질원 선임 기술원, 관심분야 : 손상 해석/고장진단, 진동/소음 저감