

34kW급 LNG펌프용 극저온 유도전동기 개발에 관한 연구

A Study on the Development of 34kW class Cryogenic Induction Motor using LNG Pump

이 기 욱* · 정 동 욱* · 박 관 수*
(Ki-Wook Lee · Dong-Wook Jeong · Gwan-Soo Park)

Abstract - In this paper, the study presents the development of 34kW class cryogenic induction motor using LNG Pump. Operating temperature of an induction motor using LNG Main Cargo Pump is at -163°C . Due to variation of the resistivity, these motor have different torque characteristics. So, it should design to considering the resistivity change. The most important consideration of induction machine operating is cryogenic temperature. If the temperature rise, LNG is vaporized. It is a major cause of pump failure. There are several causes of heat source like coreloss, hysteresisloss, copperloss. This paper analyzed the thermal distribution of the induction motor at rated speed operation.

Key Words : LNG, Induction motor, Spray pump, Cryogenic, Thermal distribution

1. 서 론

오늘날 선진국들로부터 해상 배출가스통제구역(ECA)에 대한 환경규제가 더욱 강화되며 지역도 확산되는 추세이다. 선박의 주 연료인 벙커오일은 황 함유량이 매우 높아 환경오염에 많은 영향을 미치고 있어 규제대상이 된다. 그 결과 선박의 연료로 LNG를 활용하는 수요가 중장기적으로 크게 늘어날 전망이며, 천연가스의 수요증가로 인한 LNG 생산설비와 수송, 공급이 앞으로 조선산업의 핵심적인 화두이다. LNG선을 제작하는 국내조선사들의 수주량은 꾸준히 증가하고 있으나, Spray Pump, Main Cargo Pump등 내부에 들어가는 기기들은 국내생산이 이루어지지 못하여 전량 수입에 의존하고 있어 국산화 기술이 시급히 필요한 실정이다. LNG선의 대형화 추세에 따라 극저온 펌프도 대응량화되고 있으며, 펌프의 효율과 진동, 소음 개선이 주요 연구분야이다. LNG용 펌프는 LNG의 선적과 하역을 담당하는 심장부에 해당하는 중요한 장비로서 고도의 신뢰성과 안정성을 바탕으로 극저온 환경에 적합하게 설계, 개발 되어야 한다.

LNG Spray Pump는 LNG연료를 수출국에서 영하 163°C 로 액화된 상태로 LNG Cargo Ship에 적재되어 수입국으로 운반할 때, LNG를 적재하기 이전에 Cargo Tank 내부의 온도를 적당 가능한 온도(평균 영하 130°C 이하)로 냉각시켜주는 역할을 한다. LNG Spray Pump는 소량의 LNG를 장시간 분사하여 액체가 기

화할 때 기화열을 흡수하는 원리를 이용한다. 그리고 Main Cargo Pump와 함께 LNG이송을 위한 압력펌프로도 사용된다. 이 펌프 내부에는 전동기가 설치되는데 영하 163°C 에서 기동되어야 하는 특성 때문에 영구자석 전동기 대신 온도변화에 덜 민감한 유도전동기가 사용된다. Spray Pump는 전동기와 임펠러가 동일한 축에 일체화 되어 구성되어 있으며, LNG가 전동기 내부를 통하여 흐르는 구조이다. 전동기의 회전축을 고정시키기 위해 극저온용 베어링이 설치되며 LNG에 침수되어 기동되기 때문에 LNG가 윤활유 역할을 하게 된다. 전동기 내부를 통하여 흐르는 액화된 LNG는 회전자와 고정자 사이의 공극을 통하여 흐르게 되고 전동기를 냉각하게 된다. 이러한 저온의 환경적 요인을 고려하여 재질에 대한 특성을 파악한 후 전동기의 설계 및 특성분석을 해야 한다.

본 논문에서는 설계사양에 부합하는 유도전동기를 설계하고 상온환경에서의 동작특성과 극저온환경에서의 동작특성을 비교한 뒤, 극저온환경에서 설계사양에 부합하도록 재설계를 통하여 특성비교를 하였다. 그리고 극저온 환경에서 발생하는 동손에 대한 손실값을 이용해 열 분포 해석을 진행하여 극저온 유도전동기의 성능을 검토하였다.

2. 상온용 유도전동기의 설계 및 동작특성

극저온 유도전동기를 설계하기 이전에 상온을 기준으로 34[kW]급의 3상 농형 유도전동기를 설계하였다. 상온설계 유도전동기설계 후 상온동작 특성과 극저온환경 동작특성을 비교한 후 극저온용 유도전동기를 재설계 하였다. LNG 선박에 탑재되는 Spray Pump용 유도전동기이며 세부 사양은 표 1과 같다. 유도전동기의 기초설계는 장하분배법을 통해 표 2와 같이 진행하였으며, 이는 하나의 극에 대해 감겨있는 턴 수와 코일에 흐르는 전

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University, Korea

E-mail : gspark@pusan.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University, Korea

Received : December 5, 2014; Accepted : June 4, 2015

표 1 유도전동기의 설계 사양

Table 1 Design specification of induction motor

Requirement	Value
Type	Vertical Submerged 3-Phase Induction
Rated Output	34[kW]
Synchronous Speed	3600[rpm]
Electric Power Source	AC 440[V]
Torque(running)	90.2[N.m]
Rated Current	64.4[A]
Efficiency	88[%]
Frequency	60[Hz]
Power factor	0.867
Cooling Liquid	LNG
Insulation class	"F"
Slip	0.017
Winding	"Y"(weye)

표 2 유도 전동기의 장하

Table 2 Loading-rate of induction motor

η [%]	$\cos\phi$	P_{out} [kW]	P_{IN} [kVA]
88	0.867	34	44.614
AC	ac	$\pi\ell_i$ [mm ²]	D_{IN} [mm]
7100	254	5018.7	180
τ [mm]	ℓ_i [mm]	q_b [mm ²]	d_1 [mm]
280	179	6.76	2.9
N_{slot}	D_e [mm]	$h_{c1}\ell_i$ [mm ²]	A_{1slot} [mm]
10	320	9410.9	147
δ [mm]	E_b [V]	q_b [mm ²]	q_r [mm ²]
1.24	3.405	82	221.3
I_b [A]	I_r [A]	h_{c2} [mm]	
247	885	54	

류의 관계를 전기장하(AC)와 발생되는 극자속인 자기장하(Φ), 그리고 한 극의 용량과의 관계를 이용하여 설계하는 방법이다.

여기서, η 는 효율, $\cos\phi$ 는 역률, AC는 전기장하, ac는 전기비장하, τ 는 극간격, D_{IN} 은 회전자 외경, ℓ_i 는 철심의 유효길이, q_b 는 도선의 단면적, d_1 는 도선의 직경, N_{slot} 은 슬롯당 턴수, D_e 는 회전자 외경, δ 는 공극, A_{1slot} 은 슬롯내 동선의 총 단면적을 각각 나타낸다.

설계된 파라미터값을 바탕으로 유한요소 해석을 수행 하였고, 설계의 적합성을 판단하기 위해 먼저 등가회로법으로 검토하였다. 식 1과 식 2는 등가회로 법을 통해 등가회로법을 통해 계산한 토크 및 전류의 식이다. 유도전동기의 특성을 파악하기 위해 등가회로의 각 파라미터를 계산하고 계산 값을 바탕으로 토크 곡

선을 도출하였다.

$$T = \frac{m}{\omega_s} \times V_1^2 \times \frac{(R_2/s)}{[R_1 + (R_2/s)^2] + (X_{l1} + X_{l2})^2} \tag{1}$$

$$I = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2/s)^2 + (X_{l1} + X_{l2})^2}} \tag{2}$$

여기서, m 은 상, s 는 슬립, R_1 은 고정자 저항, R_2 는 회전자 저항, X_{l1} 은 고정자 누설리액턴스, X_{l2} 는 회전자 누설리액턴스를 각각 나타낸다.

유한요소 해석을 위해 설계된 유도전동기의 도면을 그림 1에 나타내었다. 고정자 및 회전자 슬롯의 상세 치수는 그림 2, 그림 3에 나타내었다. 설계 조건은 토크 및 전류 특성 요구사항을 만족하며 최소의 체적을 가져 갈 수 있는 설계를 진행하였다.

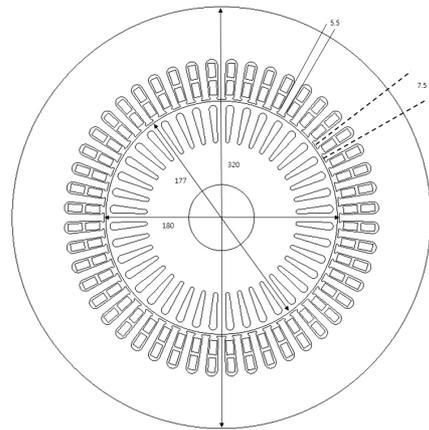


그림 1 상온환경으로 설계한 LNG Spay Pump용 유도전동기
Fig. 1 Design of induction motor for use at LNG Spay Pump system at room temperature base

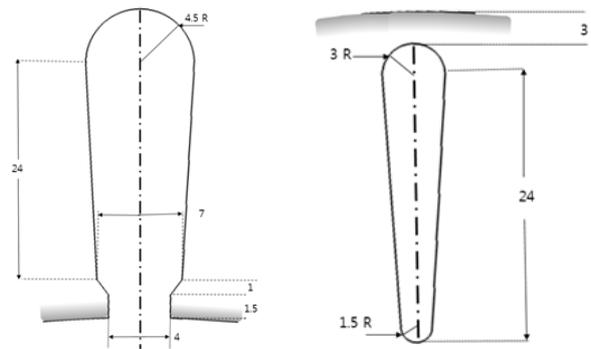


그림 2 고정자 슬롯 모양과 치수 **그림 3** 회전자 슬롯 모양과 치수
Fig. 2 Type and size of stator slot **Fig. 3** Type and size of rotor slot

그림 4와 그림 5는 설계된 모델을 정격속도에서의 유한요소 해석을 수행한 결과 이다. 공극에서의 자속밀도는 0.65T이고,

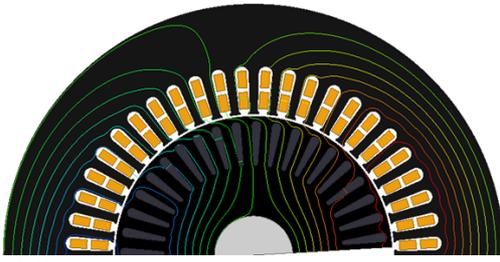


그림 4 상온에서 등가속도로 회전하는 유도전동기의 Flux-Line
 Fig. 4 Magnetic flux-line of LNG Spry Pump induction motor at room temperature by FEM analysis

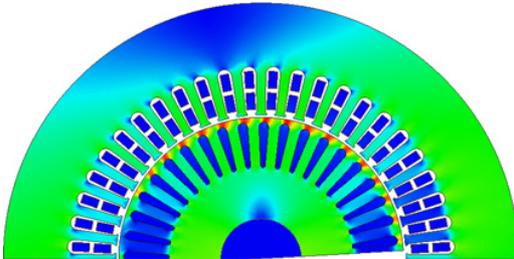


그림 5 상온에서 유도전동기의 자속밀도 분포
 Fig. 5 Flux density distribution of LNG Spry Pump induction motor at room temperature by FEM analysis

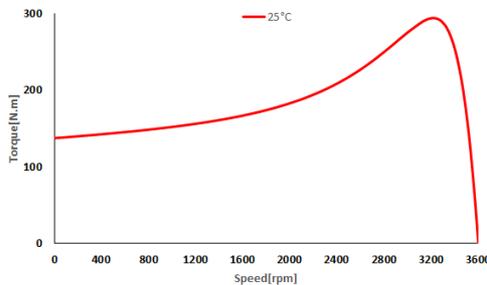


그림 6 FEM 해석을 통한 상온환경(25°C) 유도전동기의 토크 특성 곡선
 Fig. 6 Torque-speed characteristic curve of induction motor at 25°C

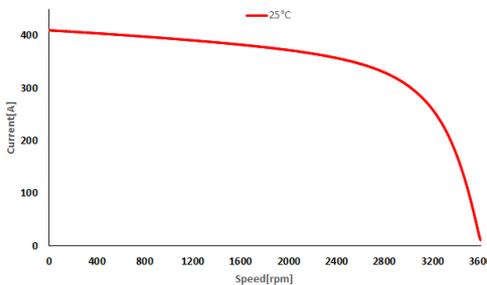


그림 7 FEM 해석을 통한 상온환경(25°C) 유도전동기의 전류 특성 곡선
 Fig. 7 Current-speed characteristic curve of induction motor at 25°C

stator back yoke, stator teeth, rotor back yoke, rotor teeth에서의 자속밀도는 각각 1.3T, 1.1T, 1.09T, 2.1T로 유도전동기 설계요건을 만족하였다. 그림 6와 그림 7은 회전속도에 따른 토크 특성 및 전류특성을 나타낸다.

3. 극저온용 유도전동기의 설계 및 동작특성

극저온 환경에서의 유도전동기 동작특성은 상온에서의 동작특성과 큰 차이점을 보인다. 유도전동기의 주재료인 구리, 알루미늄, 강판의 전자적 특성변화가 발생하기 때문이다. 금속의 온도에 따른 비저항은 식 3과 같다.

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_0 (t - t_0)] \quad (3)$$

상온 25°C에서 약 17.25[nΩ·m]이던 구리의 비저항은 극저온 -163°C에서 약 4.23[nΩ·m]으로 감소하였고, 상온 25°C에서 약 27.9[nΩ·m]이던 알루미늄의 비저항은 극저온 -163°C에서 약 7.51[nΩ·m]으로 감소하였다. 온도에 따른 구리 및 알루미늄의 비저항 변화는 그림 8에 나타내었다.

전자 및 고정자 코어 구조강판의 온도에 따른 B-H곡선을 살펴보면 온도가 낮은 -163°C에서 상온에 비해 상대적으로 좋은

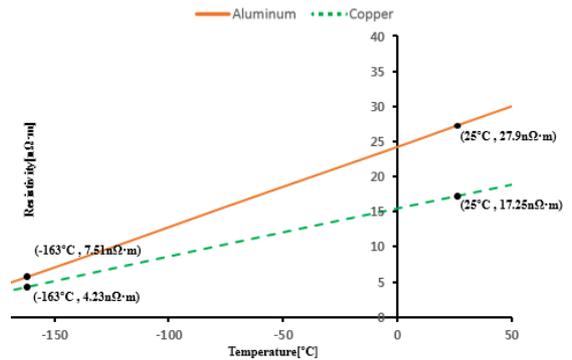


그림 8 온도에 따른 비저항 변화
 Fig. 8 Resistivity characteristic comparing at different temperature

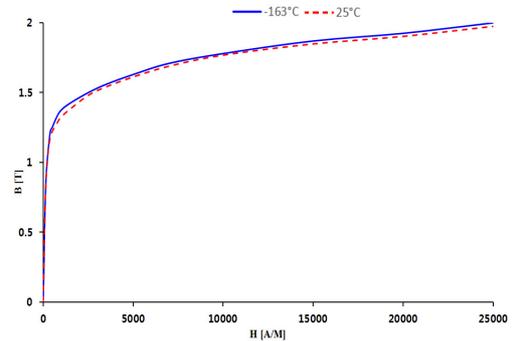


그림 9 온도에 따른 B-H Curve 특성
 Fig. 9 B-H curve characteristic comparing at different temperature

특성을 가지지만, 큰 차이가 없음을 확인 할 수 있다. 따라서 유도전동기를 설계할 때 온도에 따른 규소강판의 자기특성은 크게 고려하지 않고 설계를 하였다. 규소강판의 온도에 따른 B-H 곡선을 그림 9에 나타내었다.

기초설계를 통한 상온용 유도전동기를 -163°C에서 동작시킬 경우 비저항의 변화로 인한 저항의 값이 크게 변하게 된다. 그

표 3 설계 전동기의 등가회로 정수

Table 3 Equivalent parameter value of designed induction motor

Equivalent circuit parameter	Value	
	25°C	-163°C
R1	0.144781 [Ω]	0.039727 [Ω]
R'2	0.0629084 [Ω]	0.0172613 [Ω]
X1	0.247709 [Ω]	0.247583 [Ω]
X'2	1.14464 [Ω]	1.17163 [Ω]
XM	22.935 [Ω]	22.7552 [Ω]

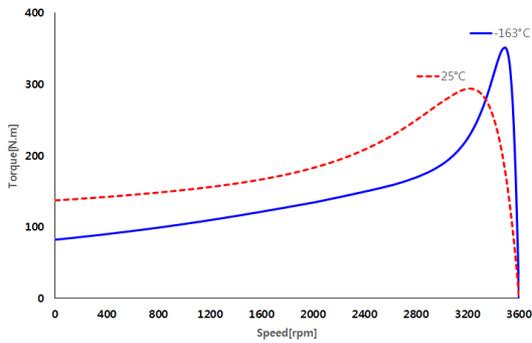


그림 10 FEM 해석을 통한 상온동작 유도전동기의 극저온환경 토크특성 곡선

Fig. 10 Comparing the Torque-Speed curve at each temperature

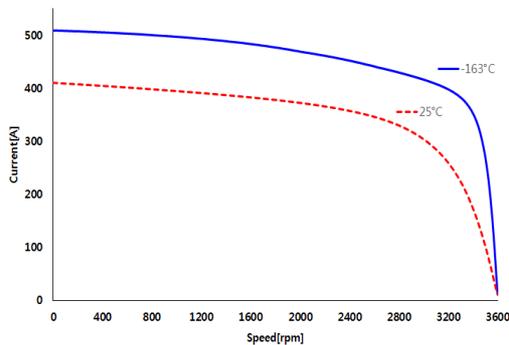


그림 11 FEM 해석을 통한 상온동작 유도전동기의 극저온환경 전류특성 곡선

Fig. 11 Comparing the Current-Speed curve at each temperature

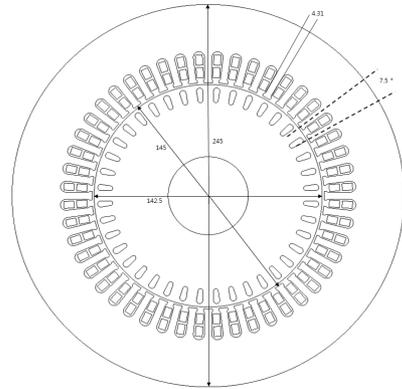


그림 12 극저온환경으로 설계한 LNG Spay Pump용 유도전동기
Fig. 12 Design of induction motor for use at LNG Spay Pump system at -163°C

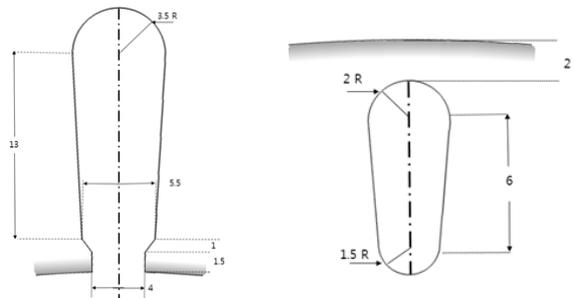


그림 13 고정자 슬롯 모양과 치수
그림 14 회전자 슬롯 모양과 치수
Fig. 13 Type and size of stator slot
Fig. 14 Type and size of rotor slot

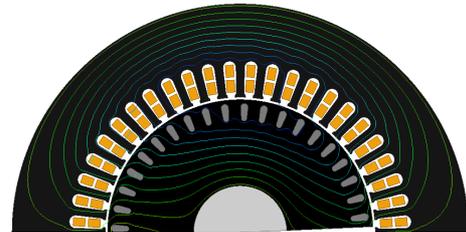


그림 15 극저온에서 동기속도로 회전하는 유도전동기의 Flux-line
Fig. 15 Magnetic flux-line of LNG Spay Pump induction motor at rated speed

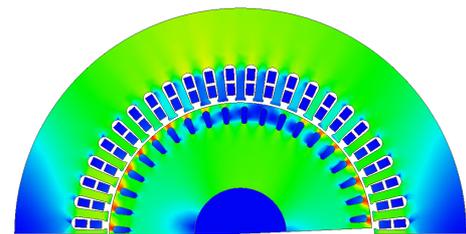


그림 16 극저온에서 유도전동기의 자속밀도 분포
Fig. 16 Flux density distribution of LNG Spay Pump induction motor at rated speed

결과 극저온에서 동작하게 될 경우 토크 및 전류특성이 설계요구 조건과 큰 차이를 보이게 된다. 표 3은 상온과 극저온에서의 등가회로 정수를 비교한 표이다. 그림 10과 그림 11은 설계된 전동기의 극저온에서 특성을 변화를 비교한 그림이다.

따라서 극저온에서 동작하는 Spray Pump를 설계하기 위해서는 극저온환경에서 비저항의 변화를 고려한 설계를 진행 하여야 한다. 극저온의 온도에 따른 비저항변화율을 고려하여 고정자와 회전자 슬롯의 면적을 설계한 극저온 유도전동기는 상온을 기준으로 설계된 유도전동기와 유사한 저항을 가져야 한다. 고정자 권선의 저항과 회전자 도봉의 저항을 고려하여 상온 설계 유도전동기와 극저온 설계 유도전동기는 유사한 토크 특성을 나타내게 된다. 이러한 토크 특성은 동일한 운전영역에서 기동이 가능하기 때문에 극저온의 온도변화를 반영한 유도전동기의 설계가 적절하지 알 수 있는 기준이 된다.

상온 설계된 유도전동기의 저항을 극저온에서의 재질 특성변화로 인한 비저항 변화율만큼 슬롯의 면적을 줄여 상온설계 유도전동기와 같은 저항을 갖도록 전동기의 부피를 줄인 극저온용 유도전동기를 설계하였다. 상온설계 유도전동기와 극저온 설계 유도전동기의 토크특성 및 전류특성 비교곡선을 그림 17과 그림 18에 나타내었다.

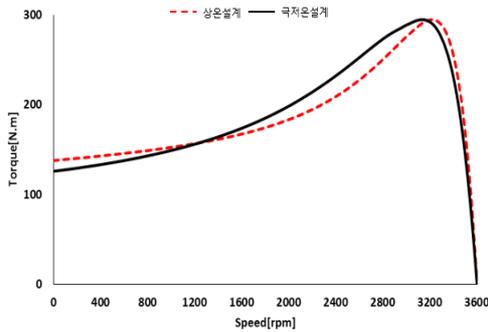


그림 17 상온설계 유도전동기와 극저온설계 유도전동기의 토크 곡선 비교

Fig. 17 Comparing the Torque-Speed curve at each temperature

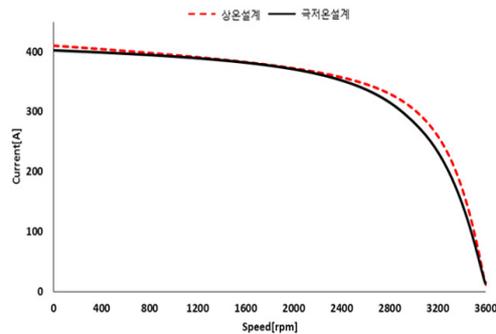


그림 18 상온설계 유도전동기와 극저온설계 유도전동기의 전류 곡선 비교

Fig. 18 Comparing the Current-Speed curve at each temperature

4. 극저온 유도전동기의 열 분포 해석

저온 유도전동기에서의 나타나는 와전류손과 히스테리시스손의 값은 작으므로 변화하는 온도 분포에 영향이 미미한 수준이기 때문에 본 논문에서는 동손만을 이용하여 열 분포 해석을 진행하였다. 식 4는 비저항과 전류밀도의 곱은 단위면적당 소비전력과 같음을 보여주며, 단위면적당 소비전력이 저온 유도전동기에서 열을 발생시키는 열원으로 사용된다. 그림 4.1는 정격속도에서의 고정자와 회전자의 열원을 이용한 온도 분포를 보여준다. 공극 사이로 LNG가 흐를 때 온도 범위를 $-163^{\circ}\text{C} \sim -155^{\circ}\text{C}$ 로 고정하였다. 이는 국부적 온도 상승 및 해석오차를 고려한 예상 허용 변화온도인 8°C 를 적용한 기준이다. 그림 19는 극저온 유도전동기의 부위별 최고 온도를 보여준다. LNG가 지나갈 때의 온도는 최고 -158.1°C 까지 올라가게 되며, 고정자의 코일부분에서 열이 많이 발생하게 됨을 보여준다. 공극에 LNG가 흐름으로 인하여 LNG의 기화온도인 -153°C 를 넘지 않는 결과를 나타내었다.

$$\frac{P}{v} = \rho \cdot J^2 \quad (4)$$

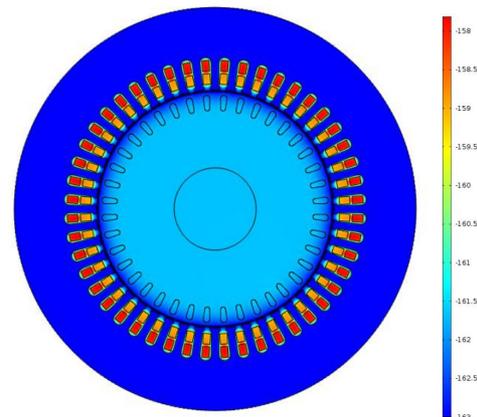


그림 19 공극에 LNG가 흐를때 정격속도운전에서의 열 분포 해석
Fig. 19 Heat distribution analysis at rated speed when LNG is flowing in air-gap

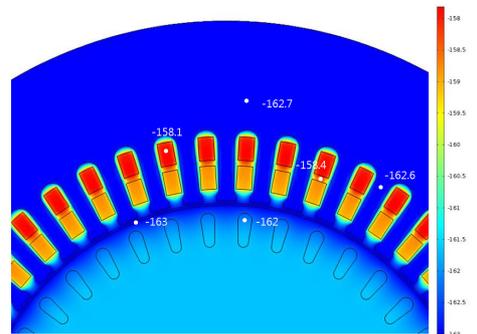


그림 20 극저온 유도전동기의 부위별 온도분포
Fig. 20 Point temperature of induction motor for using at -163°C

5. 결 론

LNG를 지상 저장탱크에서 LNG Ship으로 이송하기 이전 저장 탱크의 온도를 낮추기 위한 용도인 LNG Spray Pump용 유도전 동기를 설계하였다. 상온설계 유도전동기의 상온동작 특성과 극저 온도작 특성을 비교하여 극저온 유도전동기의 설계의 필요성을 나타내었다. 그리고 재설계한 극저온 유도전동기의 극저온동작 특 성을 상온설계 유도전동기의 특성과 비교하여 설계를 검증하였다.

상온설계 유도전동기는 극저온환경 동작 시 코어의 BH-curve 의 특성은 큰 차이가 없고, 코일 구리 및 rotor bar의 알루미늄 비저항이 1/4정도로 크게 감소한다. 비저항의 감소로 인한 전체 적인 저항의 감소는 전류를 증가시키게 되고 토크 및 유도전동기 의 특성은 큰 변화를 가져오게 된다. 따라서 극저온에서 동작하 는 유도전동기는 비저항 감소를 고려하여 재설계를 하여야 한다. 재설계된 유도전동기는 상온설계 유도전동기의 특성과 유사함을 확인하여 설계내용을 검증하였다. 표 4는 정격에서의 설계목표와 극저온설계의 토크와 전류를 비교하였다.

표 4 정격에서의 설계목표와 극저온설계의 비교

Table 4 Comparing the cryogenic design at rated speed

	Torque	Current
설계목표	90.2 [N]	64.4 [A]
극저온설계	90.2174 [N]	63.2923 [A]

극저온 유도전동기의 주요 고장원인은 온도상승에 의한 LNG 의 기화에서 발생한다. 기화된 LNG는 베어링을 통과하며 파손을 일으키게 된다. 따라서 극저온용 유도전동기의 설계 시 온도상승 을 유의해야 한다. 유도전동기의 주요 열원은 동손과 철손이 있 다. 철손의 경우 동손에 비해 그 값이 작으므로 동손만을 고려하 여 열 해석을 진행 하였다. 본 논문은 열전도만을 사용하여 열 해석을 진행하였다. 정격속도 운전 중 공극사이로 LNG가 흐르고 있을 때 고정자와 회전자에서 각 부위별 온도를 검토하여 LNG 기화온도를 넘어서지 않는 것을 확인 하였다.

본 논문에서는 극저온 유도전동기의 열전도에 대한 해석만을 진행 하였다. 실제 Spray펌프는 Inducer에 의해 유량이 결정된 다. Pump System이 모두 형성된 후 열 유동해석을 통해 재검증 이 필요하다. 또한 실제 시제품을 제작하여 극저온 실증단지 내 에서 실험을 통한 실험값과 비교 분석하여 설계된 극저온 유도전 동기의 신뢰성을 확보하여야 한다.

감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2014년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : R14XA02-20)

References

[1] Alberto Tassarolo, Gianfranco Zocco, and Carlo Tonello, "Design and Testing of a 45-MW 100-Hz Quadruple-

Star Synchronous Motor for a Liquefied Natural Gas Turbo-Compressor Drive", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 3, May/June 2011

[2] L. Dlugiewicz, J. Kolowrotkiewicz, W. Szelag, M. Baranski, R. Neumann, "Electrical motor for liquid gas pump", SPEEDAM 2006 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion

[3] Jean-François Trigeol, Yves Bertin, Patrick Lagonotte, "Coupling control volume modeling in fluid and lumped thermal model - Application to an induction machine",

[4] Branski,M, "Finite element analysis of transient electromagnetic-thermal phenomena in a squirrel cage motor working at cryogenic temperature", CEM 2011, Conference Publication pp.1-2, 2011

[5] Anbin Chen, Fengyu Xu, Xiaokun Liu, "Sub-Cooled Liquid Nitrogen Test System for Cooling HTS Synchronous Motor", IEEE Tran. on Applied Superconductivity Vol.22, No.3, pp.4701304, 2012

[6] P. Shcherbakov, I. Bogdanov, S. Kozub, L TKachenkoStephen, "Magnetic Properties of Silicon Electrical Steels and Its Application in Fast Cycling Superconducting magnets at low temperatures", RuPAC, pp. 298-300, 2004

저 자 소 개



이 기 욱(Ki-Wook Lee)

2013년 부산대학교 전자전기공학부 졸업.
2015년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 현재 LG전자 재직.
E-mail : kwlee@pusan.ac.kr



정 동 욱(Dong-Wook Jeong)

2014년 부산대학교 전자전기공학부 졸업.
2014년 ~ 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공 학과 석사과정.
E-mail : dwjeong@pusan.ac.kr



박 관 수(Gwan-Soo Park)

1985년 서울대학교 전기공학과 졸업.
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
현재 부산대학교 공과대학 전기컴퓨터공학부 교수.
E-mail : gspark@pusan.ac.kr