

SMART 냉각재순환펌프에 장착되는 회전속도측정기의 전자기장해석
Electromagnetic Analysis of Advanced Rotational Speed Sensor
for SMART Main Coolant Pump

허 형, 박진석, 김종인

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART 냉각재순환펌프의 회전속도측정기는 MMIS의 보호계통에 4개의 전기적/물리적으로 독립적인 신호를 제공해야 한다. 특히 상용 원자로와는 달리 냉각재순환펌프는 캔드모터형이기 때문에 회전축이 외부로 노출되지 않고 고온 고압의 일차냉각수 속에서 회전하기 때문에 근접센서는 사용할 수 없다. 또한, 일체형원자로의 공간적 제약 때문에 소형화가 필수적이다. 본 연구에서는 이러한 제약조건내에서 저속에서도 성능이 우수한 회전속도측정기의 전자기 설계기술을 개발하였다.

Abstract

An advanced rotational speed sensor(RSS) for the SMART MCP was designed. The RSS is required to be small size with high resolution and to provide MMIS with physically /electrically independent 4 protection signals of the impeller shaft rotation. In commercial power reactors, the rotational speed of the RCP shaft can be easily measured by using proximity sensors installed near the RCP shaft in the air. On the contrary, the proximity sensors can not be adopted to SMART MCP because the MCP for the SMART is a canned motor type and the shaft is located in the closed motor can filled with the primary coolant under high temperature and pressure. This paper describes the electromagnetic finite element analysis and results for the developement of advanced rotational speed sensor for the SMART MCP.

1. 서론

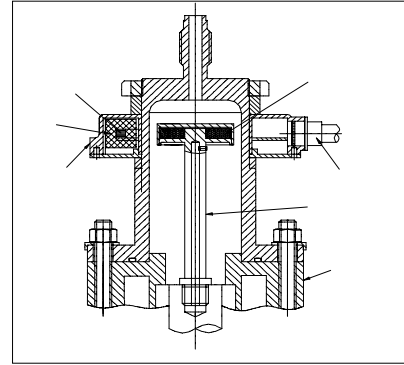
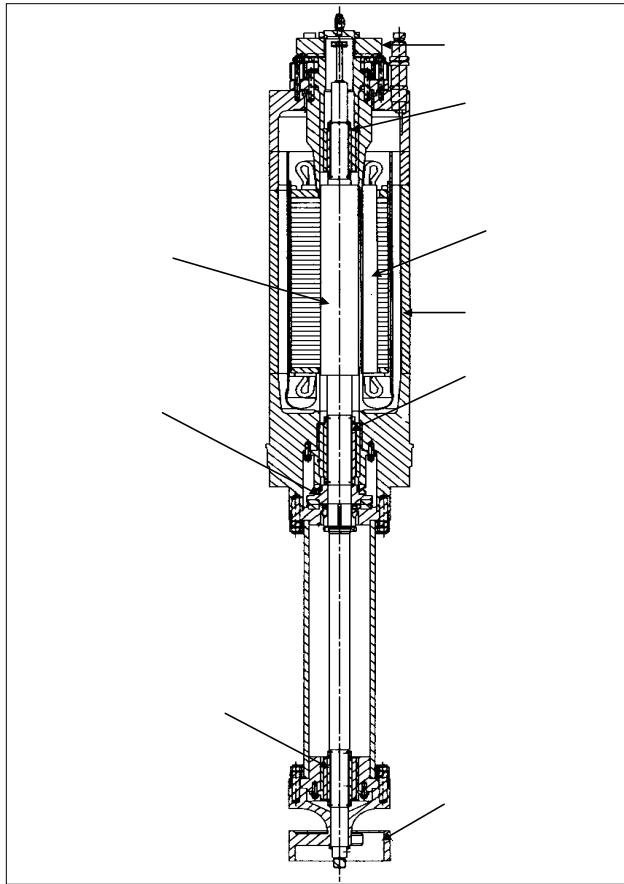
SMART 냉각재순환펌프(MCP)의 동력원은 캔드모터로 원자로의 환형덮개에 수직으로 설치되어 있으며, 기동시나 장시간 운전 되는 동안에 냉각재순환펌프의 작동여부에 대한 회전정보는 회전속도 측정기로부터 MMIS의 보호계통에 제공된다. 상용원자로에 사용되는 원자로 냉각재펌프(RCP)는 원

자로의 일차 냉각수에 잠겨서 회전하는 임펠러의 회전축과 기계적 밀봉장치로 밀봉되어 일차 냉각수와 격리된 전동기의 회전축으로 구분되는 데, 전동기 회전축에는 고압이 작용하지 않으며 일차 냉각수와와의 접촉도 없으므로 근접센서를 부착하여 회전속도를 측정할 수 있다. 그러나, SMART 냉각재순환펌프의 회전축은 원자로의 일차 냉각수 속에 잠겨서 회전하기 때문에 고온과 고압의 경계에 둘러 쌓여있다. 그러므로 근접센서를 회전축에 설치하려면 고압과 고온의 경계면을 뚫고 설치하여야 하기 때문에 센서를 설치 후에 패킹 혹은 가스킷 등으로 누수방지를 하여야 한다. 이와 같이 근접센서로 SMART 냉각재순환펌프의 회전속도를 측정하기에는 여러 가지 어려운 문제가 있다. 고온 및 고압에 사용할 수 있는 센서 선정이 어려울 뿐 아니라 센서의 부착 방법과 부착 후에 누수방지 장치가 별도로 필요하다. 또한, 회전속도측정기는 MMIS의 제어계통 및 안전계통에 각각 2개, 4개의 물리적/전기적으로 독립적인 신호를 제공해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 발전기의 원리를 이용한 코일형 회전속도측정기를 설계하였다. 이 코일형 회전속도측정기는 압력경계면을 뚫지 않고 설치할 수 있기 때문에 일차 냉각수의 누수문제를 걱정하지 않아도 된다. 그리고, 좁은 장소에 설치되어 여러 채널에서 동시에 회전속도를 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히, 내구성이 뛰어나기 때문에 내압 및 진동이 있는 곳에서도 장기간 사용할 수 있으며 측정되는 회전속도의 정확성이 뛰어나다.

본 연구에서는 위와 같은 여러 조건들을 만족시키는 진보한 코일형 회전속도측정기를 설계하였으며, 회전속도측정기의 출력에 영향을 미치는 구조 변수중 설계과정에서 제어할 수 있는 코어의 크기, 공극간격, 권선수, 영구자석의 세기 등을 변수로 하여 회전속도측정기 직경과 길이를 가능한 작게 설계할 수 있는 정량적인 평가절차를 확립함으로써 추후 상세설계 및 제작과정에서 사용할 수 있는 방안을 개발하는 것이다.

2. 회전속도측정기 설계

SMART 냉각재순환펌프(그림 1)의 회전속도측정기는 영구자석(회전자), 철심 코어(고정자), 그리고 권선으로 나누어 진다. 회전속도 측정원리는 영구자석이 회전할 때 철심 코어 권선에서 발생하는 유도기전력의 변화를 디지털 카운트로 회전속도를 측정하는 방식이다. 회전속도 측정기를 설계할 때 고려해야 하는 중요한 변수는 영구자석과 철심 코어 사이의 거리, 영구자석의 자기세기, 회전수, 그리고 철심 코어의 B-H 특성곡선이다. 영구자석은 SMART 냉각재순환펌프의 회전축 상단에 장착되어 있기 때문에 펌프 내부에서 일차 냉각수와 직접 접촉하지만 철심 코어는 펌프의 압력경계 바깥에 설치되어 있다[1]. 이 때 영구자석과 철심 코어 사이에는 펌프의 압력경계를 이루는 스테인레스강 두께와 공극으로 인한 간격이 존재하며 이 간격은 회전속도측정기 설계에 중요한 변수이다. 이 간격의 크기에 따라서 영구자석의 자기세기 및 철심 코어의 자기특성 등은 회전수를 고려하여 그 값을 결정한다.



〈회전속도측정기〉

그림 1 SMART 냉각재순환펌프 및 회전속도측정기

3. 회전속도 측정기 전자장 수치해석

회전속도측정기는 발전기의 원리를 이용한 타코제너레이터(tachogenerator), 와전류를 이용한 전자식검출기, 빛의 단속이나 반사를 이용한 광전식검출기, 회전하는 원판상의 요철이나 슬릿을 정전용량의 변화로 검출하는 정전용량식 검출기, 회전체의 회전속도에 비례한 원심력을 이용한 회전거버너(governor)와 같이 원리 및 구조로 크게 5가지 형태로 나눌 수 있다[2]. 이 중 SMART 냉각재순환펌프용 회전속도측정기의 조건 즉, 검출대상인 회전체가 밀폐된 압력용기내에 있는 검출환경을 만족하면서 좋은 성능을 낼 수 있는 것으로는 교류발전기식 타코제너레이터가 적합하다[2].

발전기식 속도측정기는 직류발전기식, 교류발전기식 및 교류유도식의 3종류가 있다. 교류식은 고정시킨 코일에 대하여 영구자석이 회전하는 것으로서 구조적으로 간단하나 고정자 권선에서 발생하는 교류전압이 영구자석의 회전수에 비례하는 데 주파수도 회전수에 비례하기 때문에 저속회전으로는 신호를 처리하기 어렵다. MCP는 주파수 변환방식에 의한 저속(1300 rpm)과 고속(3600 rpm)의 2단 변속 운전모드로 운전되며 전기적/물리적으로 독립된 4개 채널로 구성된 회전속도측정기에서 이 둘 운전모드에 대한 회전 정보가 제공된다. 특히, 회전속도측정기는 2단변속 운전모드 뿐만 아니라 저속회전 측정한계도 중요하다. 즉 냉각재순환펌프가 실제 명령대로 초기 기동이 시작되는 지에 대한 정보도 감시하여야 한다.

본 연구에서는 압력용기내 회전축에 영구자석을 장착시키고 압력용기 외벽에 SE12C로 만든 요크형 pole에 코일을 감고 영구자석 회전에 따라 발생하는 코일의 기전력을 해석하기 위하여 유한요소법으로 시뮬레이션을 하였다.

3.1 전자기 이론

계의 개념에서 볼 때, 자계를 시간적으로 변화시키면 폐회로에 전류를 흐르게 하는 기전력을 일으킨다. 이 유도기전력(induced electromotive force)은 자계를 변화시키거나, 자계내에서 도체가 움직일 때 일어나는 전압을 말하며, Faraday의 법칙이 적용된다[3].

$$emf = -\frac{d\Phi}{dt} [V] \quad (1)$$

식(1)은 폐회로에 한해서 성립하지만, 이 폐회로가 반드시 도체회로야만 되는 것은 아니다. 예를 들면 이 회로는 콘덴서를 포함하거나, 가상적으로 생각한 공간내의 폐곡선이라도 무방하다. 이 식에서 $d\Phi/dt$ 는 자속의 시간적 변화율이다. 이 $d\Phi/dt$ 가 영이 되지 않는 경우는 정지폐곡선과 쇠교하는 자속이 시간적 변화를 하는 경우, 자속은 일정하지만 폐곡선이 상대적으로 움직이는 경우와 앞의 두가지가 동시에 발생하는 경우이다. 식에서 음(-)의 부호는 이 기전력에 의해서 흐르는 전류가 일으키는 자속이 원자속에 합쳐질 때 기전력의 크기를 감소시키도록 기전력의 방향이 정해진다는 것을 표시한다. 다시말하면 유도기전력은 원자속과 반대방향의 자속을 일으키게 되며, 이것을 Lenz의 법칙이라 한다. 선도체를 N 회 감아서 만든 폐회로의 경우 각 권선이 일치한다고 생각해도 충분히 정확한 결과를 얻는 경우가 많다. 이 때 기전력은 다음 식으로 표시된다.

$$emf = -N \frac{d\Phi}{dt} [V] \quad (2)$$

Φ 는 N 개의 권선중에서 하나의 권선을 통과하는 자속이다. 식(1)과 (2)에서의 기전력 emf 는 스칼라이며, 단위는 볼트이다. 이 기전력을 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$emf = \oint \vec{E} \cdot d\vec{L} \quad (3)$$

즉 기전력은 어떤 특정폐곡선 전체에 대해서 취한 전위차와 같으며 폐곡선의 일부가 달라지면 일반적으로 기전력도 달라진다. 식(1)의 Φ 를 B 의 면적분으로 바꾸면 식 (4)로 표시된다.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

면적분과 폐곡선에 대한 선적분사이의 관계는 반드시 오른손법칙에 따른다. 기전력을 구하는 과정을 우선 폐곡선이 정지하고 있는 경우 자속을 변화시킬 때 일어나는 기전력을 구하고 다음에 일정한 자계내에서 폐곡선이 운동하는 경우로 두 단계로 나누어서 생각해 보면, 첫째로 폐곡선회로가 정지하고 있는 경우 식(4)의 우변에서 시간적으로 변화하는 것은 자속뿐이므로 식(5)와 같이 된다. 이 결과의 좌변에 Stokes의 정리를 적용하면 식(6)이 된다. 그리고 식 (6)은 다시 식 (7)로

표시된다.

$$emf = \oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (5)$$

$$\int_s (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (6)$$

$$(\nabla \times \vec{E}) = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (7)$$

둘째로 자속은 시간에 대해서 변화하지 않고 폐곡선이 이동하는 경우를 운동유도기전력(motional emf)의 개념을 적용하면 자계 B 내에서 U 인 속도로 운동하는 전하 Q 에 작용하는 힘을 F 라 하면 식 (8) 혹은 식 (9)로 표시된다.

$$\vec{F} = Q\vec{U} \times \vec{B} \quad (8)$$

$$\frac{\vec{F}}{Q} = \vec{U} \times \vec{B} \quad (9)$$

지금 이동도체내에는 정부의 전하가 존재하며 이 때 단위전하에 작용하는 힘을 운동전계밀도 (motional electric field intensity)라 하며 이것을 E_m 라고 하면 다음 식과 같이 표시된다.

$$\vec{E}_m = \vec{U} \times \vec{B} \quad (10)$$

만일 이 이동도체를 평행도체에서 떼면 이 전계 때문에 전자들은 도체의 단부로 이동하게 된다. 이 이동은 이 이동한 전하에 의한 정전계가 이동도체에 유도된 전계와 평형될 때까지 계속되므로 결국 이동도체상의 모든 점에서 전계의 접선성분은 영이 된다. 이 도체의 이동에 의해서 일어나는 운동유도기전력은 식 (11)과 같다.

$$emf = \oint \vec{E}_m \cdot d\vec{L} = \oint (\vec{U} \times \vec{B}) \cdot d\vec{L} \quad (11)$$

이 때 마지막 선적분은 운동하는 도체부분 즉 U 가 영이 아닌 부분에서만 영이 되지 않으며, 따라서 식 (11)의 우변은 다음 식으로 표시된다.

$$\oint (\vec{U} \times \vec{B}) \cdot d\vec{L} = \int_L UBdx = -BLU \quad (12)$$

이상과 같이 일정치를 갖는 균일자계내에서 도체를 이동시키는 경우, 유도기전력은 운동도체의 모든 장소에 유도되는 전계의 세기에 의해서 생기며, 그 크기는 식(13)으로 표시된다.

$$emf = \oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = \oint \vec{E}_m \cdot d\vec{L} = \oint (\vec{U} \times \vec{B}) \cdot d\vec{L} \quad (13)$$

폐회로 뿐만아니라 자속밀도가 시간적 변화를 하는 경우에는 유도기전력은 식 (5)의 자속변화에 의한 유도기전력과 식 (11)의 운동유도기전력의 합이 된다.

$$emf = \oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\oint_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} + \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{L} \quad (14)$$

이것은 간단한 표시 식인 다음 식과 동가이며 모두 유도기전력을 구하는 데 사용된다.

$$emf = -\frac{d\Phi}{dt}$$

식(14) 우변의 두 부분중 하나는 B 의 시간적 변화율에 의해서 정해지며, 다른 부분은 회로이동에 의한 것으로 관측자와 회로와의 상대속도에 의해서 정해진다. 자계가 시간과 위치에 따라서 변화할 때 자계와 함께 관측자가 이동하면 자계는 일정하게 관측된다.

3.2 해석모델

그림 2는 영구자석의 회전에 따라 발생하는 코일의 기전력을 해석하기 위하여 사용한 실제 설계 치수이며, 이 때 설계사양은 표 1과 같다.

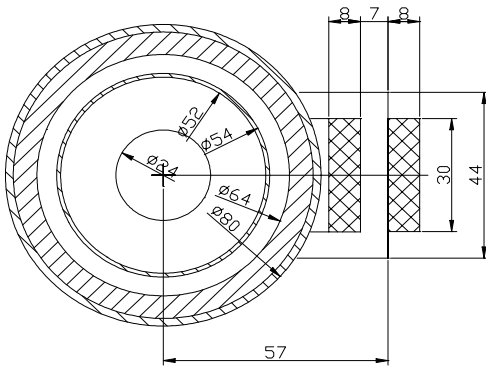


그림 2 회전속도측정기 설계치수

표 1 회전속도측정기 설계사양

회전수	0 ~ 3,600 [rpm]	
권선	종류	폴리이미드 동선
	직경	φ0.5 [mm]
	권선수	900 [turn]
	접적율	0.78
	권선창	8 x 30 [mm] = 240[mm ²]
영구자석	종류	Alnico 5
	극수	2 극
	μ_{rec}	3
	$B_{r,op}$	≈ 0.9 [Tesla]
	Tc	≈ 800 °C
코어	재료	SE15C
	두께	0.5[mm]
	높이	10[mm]
MCP Neck	SUS316, $\mu=1.003$	
Can	SUS316	

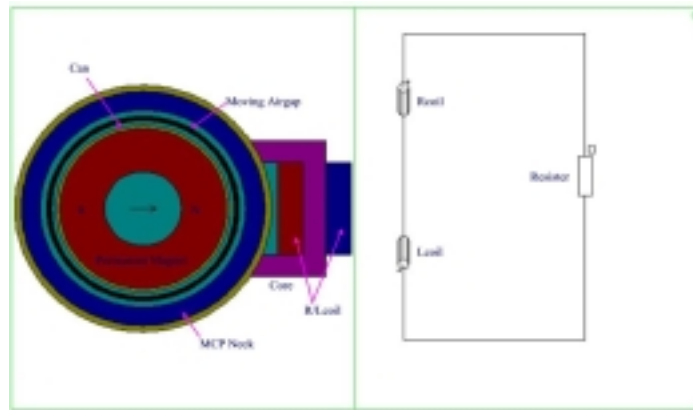


그림 3 해석모델 및 전기회로

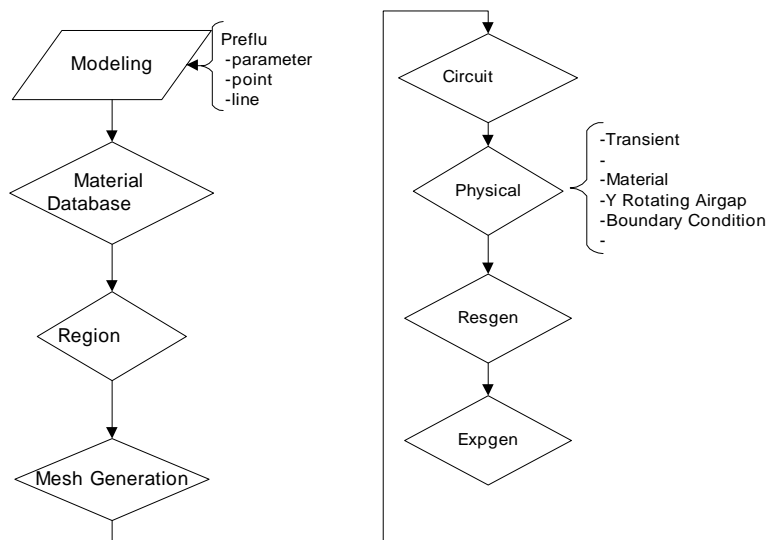


그림 4 Flux-2D 해석 절차

전자장 해석을 위하여 그림 3과 같이 2차원 해석모델을 결정하고 이로부터 유도되는 기전력을 측정하기 위하여 외부회로망을 설정하였다. 전자장해석은 Flux-2D를 이용하여 그림 4와 같은 절차로 계산하였다[4]. 이 때 계산에 입력된 parameter들은 표 2와 같다. 그림 5는 권선용 코어인 SE15C의 BH 곡선이며, 그림 6은 Alnico 5의 감자곡선이다. 특히 권선의 유도기전력을 구하기 위하여 그림 3과 같은 1000 $\mu\Omega$ 의 소모성 저항과 코일을 이용하여 외부회로를 구성하여 저항에 흐르는 전압을 구하였다

표 2 기본적인 해석 조건

해석 solver	Transient Magnetic
2극 자석의 각도	0 [Deg.]
해석좌표계	XY-Plane, 10 [mm]
경계조건	Dirichlet
Airgap	Y Rotating Airgap
Coil	External Circuit
Resister	1,000 $k\Omega$
Coil Resistivity	0.175e-07 [$\Omega \cdot m$]

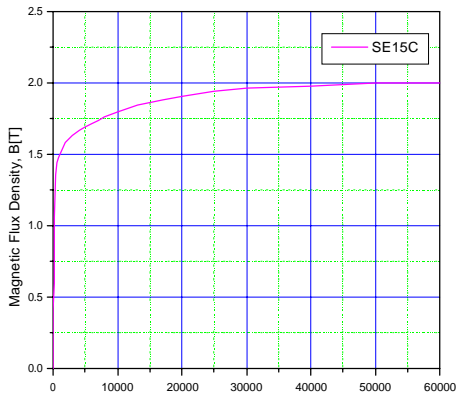


그림 5 SE15C의 BH곡선

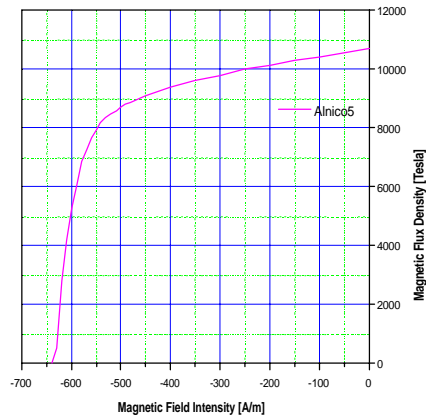


그림 6 Alnico 5의 감자곡선

3.3 2차원 해석결과

영구자석이 회전시 코일에 유기되는 기전력을 알기 위하여 과도해석을 수행하였다.

표 3은 해석결과 얻어진 회전속도별 유도기전력값이다.

표 3 회전속도별 유도기전력 변화

RPM	50	300	600	900	1300	3600
입, 출력						
time step[sec]	0.012	0.002	0.001	0.00067	0.00046	0.00017
time limit [sec]	2	2	2	2	2	2
time step No.	100	100	100	100	100	100
No. of iteration	100	100	100	100	100	100
precision	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
peak voltage [V]	0.2	1.21	2.5	3.6	5.3	14.6

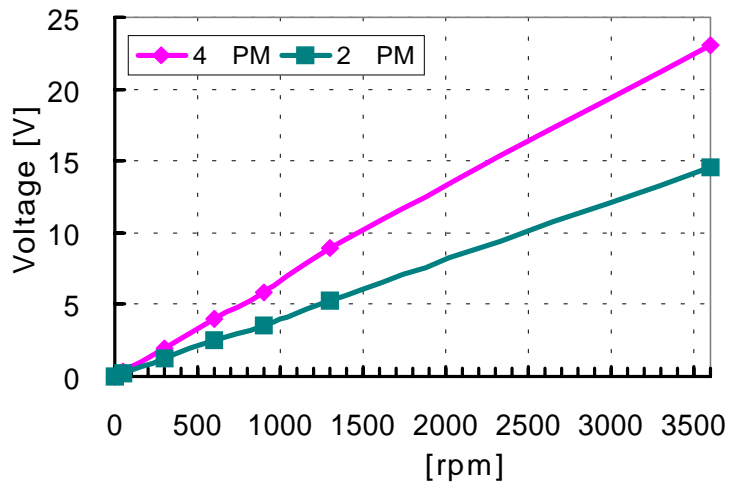


그림 7 회전수에 따른 기전력의 변화(2극/4극)

그림 7은 알니코5 영구자석을 2극과 4극으로 설계하였을 때 유도기전력의 크기를 계산한 것으로 극수가 높을수록 유도기전력이 커짐을 알 수 있고, 특히 저속에서 유리함을 알 수 있다.

그림 8은 3,600 [rpm]의 속도로 300.294 [deg] 회전시 등자속선 분포도이고, 그림 9는 3,600 [rpm]의 속도로 3.618 [deg] 회전시 자속밀도 분포를 나타낸 것이다.

그림 10, 11, 12는 회전속도측정기의 회전속도에 따라 발전된 유도기전력의 변화를 나타낸 것으로 고정자 권선에 발생하는 교류전압이 회전자의 회전수에 비례함을 알 수 있다.

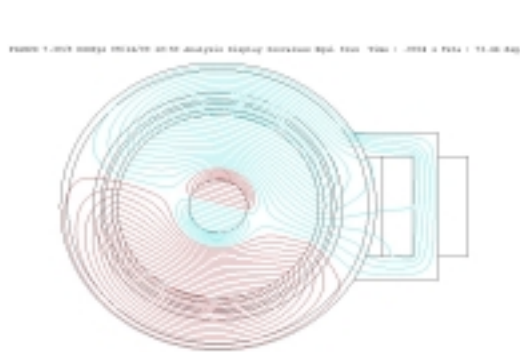


그림 8 회전속도측정기의 등자속선 분포도 : 3,600 [rpm], 73.44[deg]회전

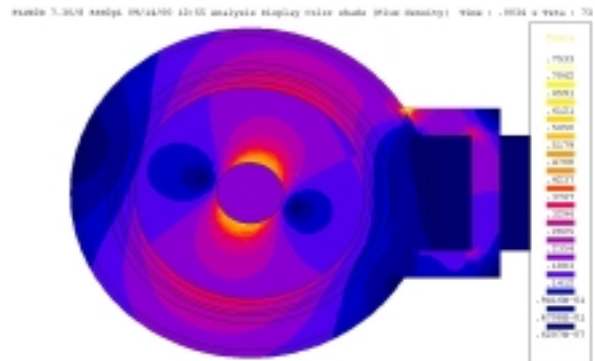


그림 9 3600[rpm], 73.44[deg] 회전시 자속 밀도 분포도



그림 10 50[rpm] 회전시 코일측 유도기전력

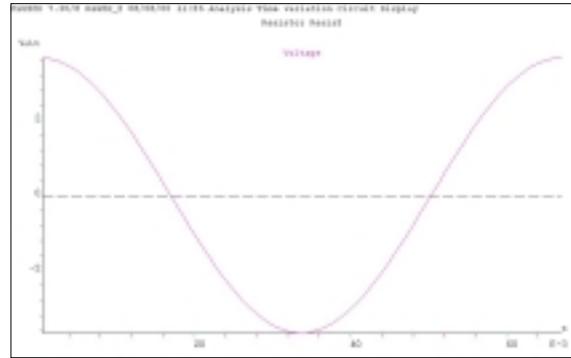


그림 11 900[rpm] 회전시 코일측 유도기전력

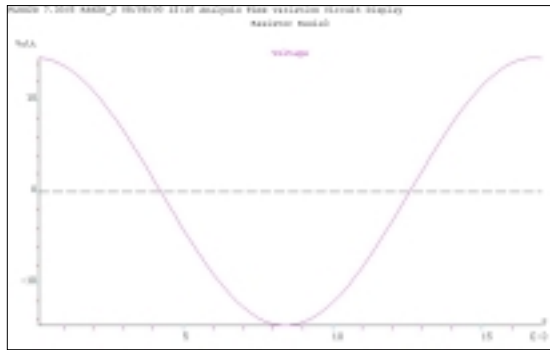


그림 12 3,600[rpm] 회전시 코일측 유도기전력

4. 결론

주냉각재펌프에 장착될 회전속도측정기의 크기결정 및 저속측정능 향상과 관련하여 설계된 사양에 대하여 전자기 수치해석을 수행하였다. 해석결과 영구자석은 2극, 4극을 모두 설계요건을 만족하며, 특히 저속시 4극 영구자석이 2극보다 유도기전력이 약 40% 증가됨을 알 수 있었다.

권선창의 넓이는 ϕ 0.5[mm] 폴리이미드동선을 900[턴]감아 240[mm²]로 하고, 영구자석은 비교적 T_w 가 높은 알니코 5($B_{opp} : 0.9 [T], \mu_{rec} : 3$)로 결정하고. 코어는 두께 0.5[mm] 규소강판, SE15C를 적층하여 높이 10[mm]로 결정하였다.

이와같이 결정된 사양으로 계산된 2극 영구자석 속도측정기의 50[rpm]에서의 유도기전력은 0.2[V]이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 김종인 외, “일체형원자로 기기개발 및 검증시험과제 1단계 최종보고서”, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1889/98, 1999. 3.
- [2] R.Boll 외, A Comprehensive Survey-Magnetic Sensors, Vol. 5, VCH, 1989
- [3] Williams H. Hayt, Jr., Engineering Electromagnetics, McGRAW-HILL Book, 1981
- [4] Magsoft, Flux2D Ver. 7.x-User's Guide, 1999