

'99 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

SMART 냉각재순환펌프의 회전속도 측정기 개발
Development of Rotational Speed Sensor of SMART MCP

박진석, 허 형, 김지호, 김종인
한국원자력연구소

정근석

한라산업(주)

부산시 사하구 다대동 1502-9

요 약

SMART 냉각재순환펌프의 회전속도 측정기는 MMIS의 제어계통 및 안전계통에 각각 2개, 4개의 독립적인 신호를 제공해야 한다. 상용 원자로에서는 냉각재순환펌프의 회전속이 공기중에 노출되어 있기 때문에 근접센서를 이용하여 쉽게 회전속도를 측정할 수 있다. 그러나, SMART 냉각재순환펌프는 캔드모터형이기 때문에 회전속이 외부로 노출되지 않고 고온 고압의 일차냉각수 속에서 회전하기 때문에 근접센서는 사용할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 기술적 어려움을 해결하기 위하여 자석 코일형 회전속도 측정기의 설계기술을 개발하고, 시제품을 제작하여 성능을 검증하였다. 개발된 회전속도 측정기의 회전수는 타코미터로 측정한 회전수와 매우 잘 일치하였다.

Abstract

It is required for the SMART MCP to provide MMIS with 6 independent signals (2 for control channel and 4 for safety channels) of the rotational speed of the impeller shaft. In commercial power reactors, the rotational speed of the RCP shaft can be easily measured by using proximity sensors installed near the RCP shaft which are exposed to air. Since the MCP for the SMART is a canned motor type and the shaft is located inside the motor can filled with the primary coolant under high temperature and pressure, the proximity sensors can not be used. Design technology for the rotational speed sensor of the SMART MCP has been developed, and a prototype has been manufactured and tested to verify the performance. The rotational speeds measured by the prototype sensor have shown an excellent agreement with the readings from tachometer.

1. 서론

SMART 냉각재순환펌프는 캔드모터로 작동되는 펌프로써 원자로의 플랜지에 수직으로 설치되어 장시간 운전 되는 동안에 냉각재순환펌프가 중단없이 운전하고 있다는 것을 회전속도 측정기로 감시한다[1,2]. 상용원자로에 사용되는 원자로 냉각재펌프는 원자로의 일차 냉각수에 잠겨서 회전하는 임펠러의 회전속과 기계적 밀봉장치로 밀봉되어 일차 냉각수와 격리된 전동기의 회전속으로 구분되는 데, 전동기 회전속에는 고압이 작용하지 않으며 일차 냉각수와와의 접촉도 없으므로 근접센서를 부착하여 회전속도를 측정할 수 있다. 그러나 SMART 냉각재순환펌프의 회전속은 원자로의 일차 냉각수 속에 잠겨서 회전하기 때문에 고압과 고온의 경계에 둘러 쌓여있다. 그러므로 근접센서를 회전속에 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. 이러한 문제를 해결하기 위하여 코일형 회전속도 측정기를 설계하였다. 코일형 회전속도 측정기는 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 코일형 회전속도 측정기는 내구성이 뛰어나기 때문에 내압 및 진동이 있는 곳에서도 장기간 사용할 수 있으며 측정되는 회전속도의 정확성이 뛰어나다.

2. 회전속도 측정기 설계

SMART 냉각재순환펌프(그림 1)의 회전속도 측정기는 영구자석, 철심 코어(고정자), 그리고 회전속도 표시기로 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 회전속도상단에 장착되어 있기 때문에 펌프 내부에서 일차 냉각수와 직접 접촉하지만 철심 코어는 펌프의 압력경계 바깥에 설치되어 있다. 이 때 영구자석과 철심 코어 사이에는 펌프의 압력경계를 이루는 스테인레스강 두께와 공극으로 인한 간격이 존재하며 이 간격은 회전속도 측정기 설계에 중요한 변수이다. 이 간격의 크기에 따라서 영구자석의 자기세기 및 철심 코어의 자기특성 등은 회전수를 고려하여 그 값을 결정한다.

3. 회전속도 측정기 전자장 수치해석

회전속도 측정기는 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[3]. 이 중 SMART 냉각재순환펌프용 회전속도 측정기의 조건 즉, 검출대상인 회전체가 밀폐된 압력용기내에 있는 검출환경을 만족하면서 좋은 성능을 낼 수 있는 것으로는 교류발전기식 타코제너레이터가 적합하다.

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[4~8]. 본 연구에서는 압력용기내 회전축에 영구자석을 장착시키고 압력용기 외벽에 SE12C로 만든 6개 pole에 각각 코일을 감고 영구자석 회전에 따라 유기되는 코일의 기전력을 해석하기 위하여 유한요소법으로 시뮬레이션을 하였으며, 설계 및 제작된 회전속도 측정기의 회전속도 시험을 통하여 얻은 특성과 해석에서 얻은 특성을 서로 비교하였다.

가. 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[9~11].

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

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 경우

와 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.

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

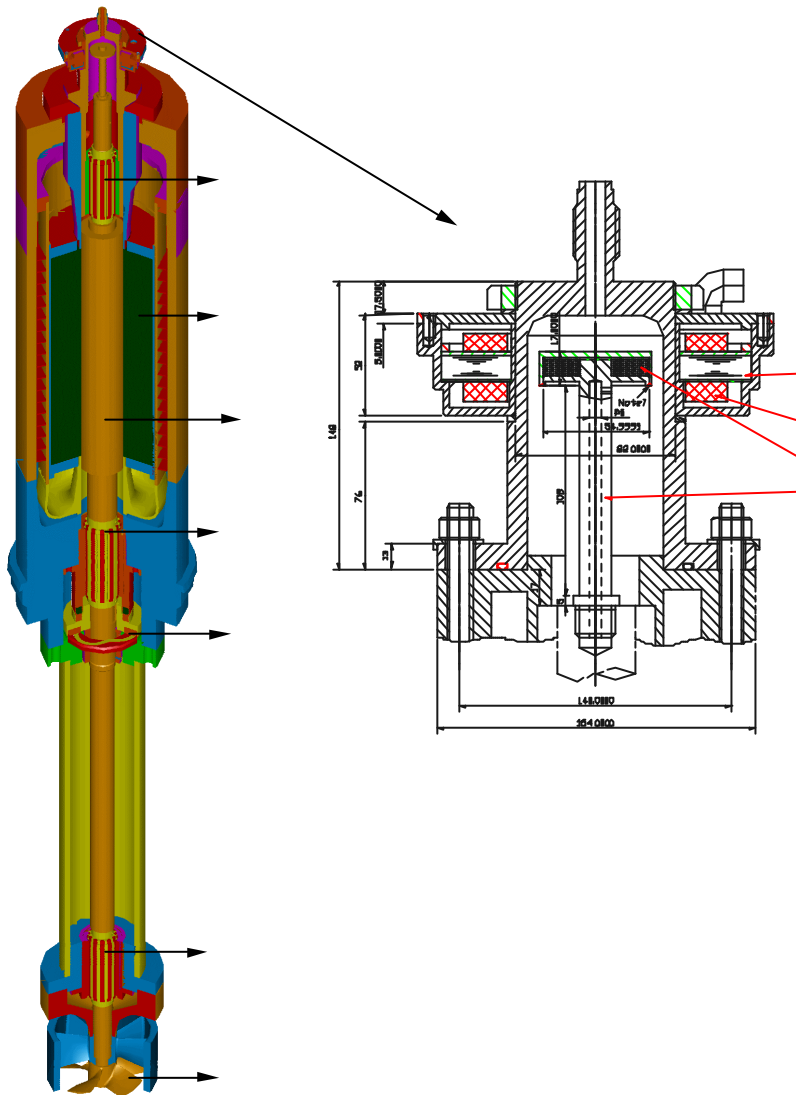


그림 1 SMART 냉각재순환펌프 및 회전속도 측정기

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 \mathcal{O} 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.

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

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

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

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.

$$\oint (\vec{U} \times \vec{B}) \cdot d\vec{L} = \int_L^0 UBdx = -BLU \quad (12)$$

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.

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

이다. 이것은 간단한 표시 식인 다음 식과 등가이며 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.

나. 해석모델

영구자석의 회전에 따라 유기되는 코일의 기전력을 해석하기 위한 모델의 설치수를 사용하였으며 영구자석의 잔류자속밀도는 1.0 [Tesla]로 보았고 압력용기의 재질은 SUS 312, 철심코어의 재질은 SE12C로 하였다. 철심코어의 pole에 감긴 코일의 턴수는 1턴으로 보았고 영구자석의 회전속도가 각각 0.1, 900, 3600 [rpm]일 경우 과도해석을 수행하였다. 기본적인 해석조건들은 표 1과 같다. 회전속도 측정기의 전자기 해석을 위한 모델(그림 3)을 사용하여 유한요소법으로 vector potential의 등자속선(equipotential line)을 구하였다(그림 4). 경계조건으로 외곽영역을 Dirichlet 경계조건을 주었다. 그림 2는 철심코어 재질인 SE15C의 B-H 곡선이다.

표 1 기본적인 해석조건들

영구자석의 잔류자속밀도	1.0 [T]
SUS 316의 도전율	1.0×10^6 [$\Omega \cdot m$]
pole당 코일의 턴수	1 턴
영구자석의 회전속도	0.1, 900, 3600 [rpm]

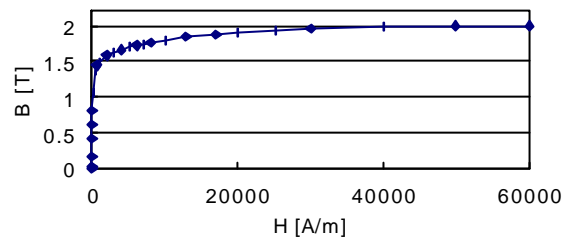


그림 2 SE15C B-H 곡선

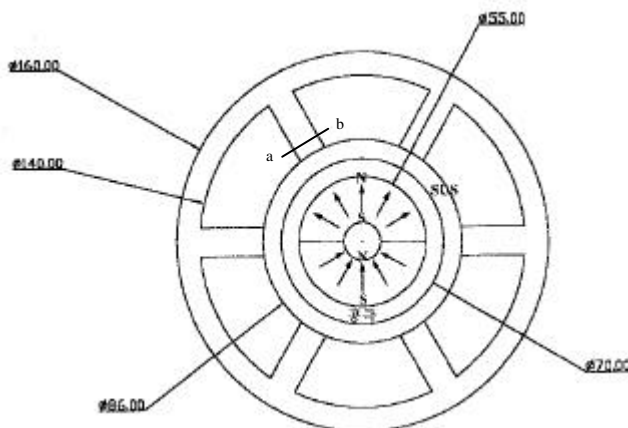


그림 3 전자기 해석모델

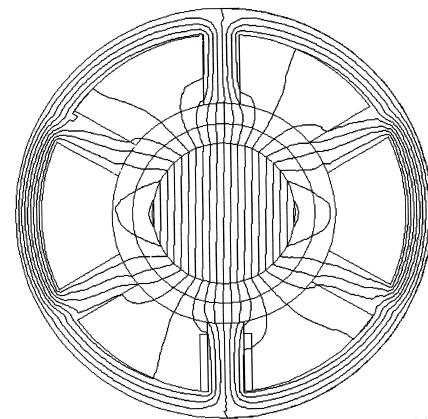


그림 4 해석모델의 등자속분포

철심코어에서 정의된 호 a-b(그림 3)를 통과하는 자속밀도의 분포를 그림 4에 나타내었으며 그래프의 x축은 호 a-b의 시작점을 의미한다. 전자기 수치해석용 프로그램인 Flux-2D를 이용하여 계

산할 때 입력 파라미터들은 다음과 같다.

- (1) 해석 solver : Transient Magnetic
- (2) 해석좌표계 : Plane - 두께 : 10 [mm]
- (3) x축에서 측정된 자석 각도 : 90도
- (4) 권선(Lcoil & Rcoil) : External Circuit
- (5) air gap : Y rotating moving air gap
- (6) angular velocity : 900 ~ 3600 [rpm]
- (7) boundary condition : 외곽 -> Dirichlet 경계조건
- (8) number of couples of poles : 1
- (9) number of represented poles : 2
- (10) staking factor : 0,8

특히 권선의 유도기전력을 구하기 위하여 그림 6과 같은 1000 Ω 의 소모성 저항과 코일을 이용하여 외부회로를 구성하여 소자에 흐르는 전압들을 구하였다

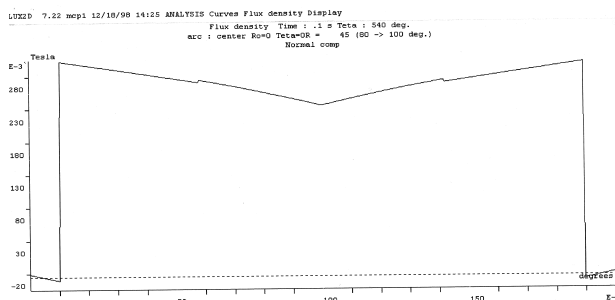


그림 5 a-b를 채교하는 자속밀도의 분포

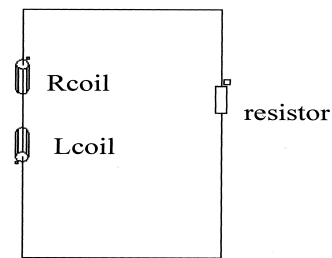


그림 6 FEM 계산을 위한 전기회로도

영구자석이 회전할 경우 코일에 유기되는 기전력을 알기 위하여 과도해석을 수행하였으며 영구자석이 900 [rpm]으로 회전할 때 time step을 0,00067초로 잡아 360도 회전시 발생된 유기기전력(그림 7)을 구하였고, 100 time step중의 한 스텝의 자속밀도 분포(그림 8)를 살펴보았다. 그리고 3600 [rpm]으로 회전할 경우 time step을 0,00017초로 잡아 360도 회전시 발생된 유기기전력(그림 9)을 구하였고 120 time step중 한 스텝의 자속밀도 분포(그림 10)를 살펴보았다. 그림 11은 발전기식 회전속도 측정기의 회전속도에 따른 유도기전력의 변화를 나타낸 것으로 고정자 권선에 발생하는 교류전압이 회전자의 회전수에 비례함을 알 수 있고 500 [rpm]이하의 저속회전시에는 유도기전력이 5 [mV]이하로 신호처리하기가 어렵다.

4. 회전속도 측정기 제작 및 시험

냉각재순환펌프에 사용되는 회전속도 측정기의 성능에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 변수인 운전 속도, 운전온도, 운전압력, 회전속도 센서의 재질, 펌프 내부의 냉각수 유동, 그리고 펌프의 흔들림 등을 실제 조건과 유사하게 모사할 수 있는 성능시험장치를 통하여 시험하여야 한다. 성능시험장치는 냉각재순환펌프의 상부와 똑 같은 형상과 크기로 제작되고, 내부에 냉각수가 순환되는 구조로 설계되었기 때문에 실제로 사용되는 환경과 같다. 또한 펌프의 압력경계를 이루는 구조물의 재질과 같은 것을 사용하였고 영구자석의 회전속도를 900 rpm, 3600 rpm으로 회전할 수 있도록 제

작하였다(그림 12).

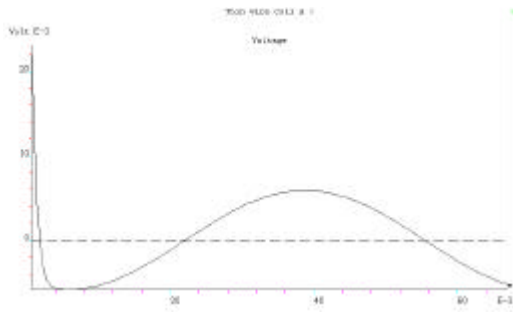


그림 7 900[rpm]시 코일속 유도기전력

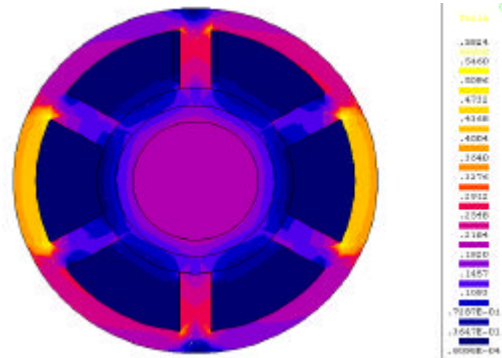


그림 8 900 [rpm]으로 회전시 자속밀도 분포

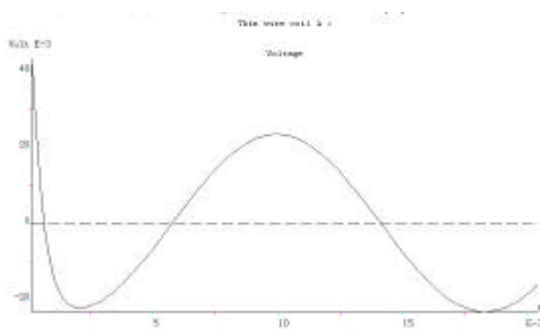


그림 9 3600[rpm] 회전시 코일속 유도기전력

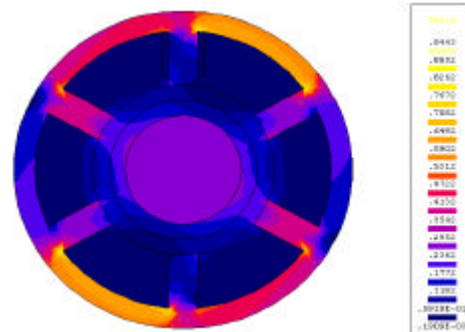


그림 10 3600[rpm]으로 회전시 자속밀도 분포

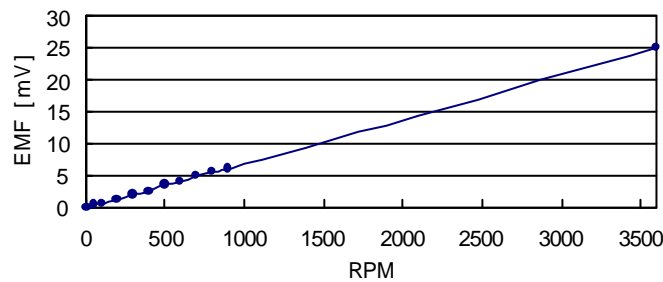
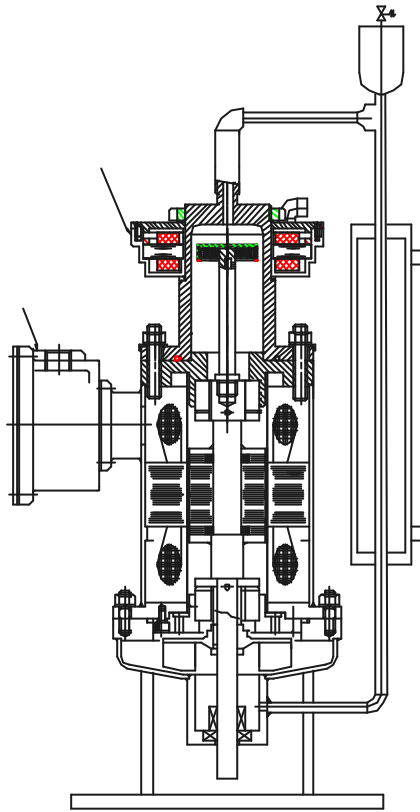


그림 11 회전속도별 유도기전력의 변화

회전속도 측정기 내부에 물을 가득 채운 후 전동기를 가동시켜 영구자석을 회전시키면 철심코어에 유도기전력이 유도된다. 유도기전력의 변화를 감지하는 디지털 카운터로 회전속도의 회전수는 회전속도 계기판에 표시된다. 이 때 회전속도의 정확도를 비교하기 위하여 타코미터로 회전속도의 회전속도를 읽은 후 회전속도 계기판에 표시된 회전속도와 비교하였다. 시험결과에서 회전속도 측정기에서 측정되는 회전속도의 신뢰성은 160 rpm ~ 4000 rpm 범위 내에서는 거의 오차가 없이 우수한 것을 알 수 있다. 영구자석은 온도 상승에 따른 자기특성이 변할 수 있다. 따라서 회전속도 측정기의 냉각수 온도를 상승시키면서 회전속도 측정 오차에 대한 검증이 필요하다. 본 시험에서는 온도효과에 대한 변수에 대하여 수행하지 못했으나 앞으로 온도효과에 대한 해석과 시험

을 통하여 검증할 예정이다.



(a) 설계도



(b) 시제품

그림 12 회전속도 측정기 및 시험장치



그림 13 회전속도 측정기의 회전수 표시 계기판

표 2 회전속도 측정기 시험결과

	(rpm)	(rpm)	(%)
1	153	153	0.000
2	200	200	0.000
3	504	502	0.397
4	904	904	0.000
5	1500	1501	0.067
6	1998	1998	0.000
7	2503	2503	0.000
8	3002	3002	0.000
9	3596	3600	0.111
10	3953	3953	0.000

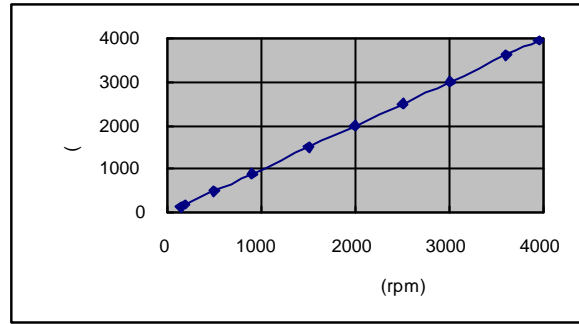


그림 14 회전속도 측정기의 회전수와 타코미터의 회전수 비교

5. 결론

SMART 냉각재순환펌프의 회전속도 측정기에 사용될 코일형 센서는 펌프 내부에 냉각수의 순환이 이루어지는 환경에서 회전속도가 160 rpm ~ 4000 rpm 범위에서 운전될 때 타코미터로 측정된 회전속도의 회전수와 최대 0.4% 오차 이내로 회전속도를 측정할 수 있다. 또한 코일형 센서의 성능시험을 통하여 6채널에서 동시에 회전속도를 독립적으로 측정할 수 있었다. 그러므로 코일형 센서는 SMART 냉각재순환펌프의 회전속도 측정기로 사용할 수 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 김종인 외, 일체형원자로 기기개발 및 검증시험 과제 1 단계 최종보고서, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1889/98, 1999.
- [2] 박진석 외, SMART 냉각재순환펌프 개념설계, '98 춘계 학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1998.
- [3] Kataokashiei 외 3인, Sensor Handbook, 세화도서출판, 1990.
- [4] R. Boll, K.J. Overshott, Sensors - A Comprehensive Survey: Magnetic Sensors, VCH, 1989.
- [5] Milton Kaufman, Arthur H. Seidman, Handbook for Electronics Engineering, 2nd edition, 1984.
- [6] 성낙진, 액튜에이터-메커트로닉스 시리즈(2), 대림출판사, 1988.
- [7] William H. Hayt, Engineering Electromagnetics, 4th edition, McGraw-Hill, 1981.
- [8] Colomel Wm.T. McLyman, Transformer and Inductor Design Handbook, 2nd edition, 1988.
- [9] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1987.
- [10] James T. Humphries, Leslie P. Sheets, Industrial Electronics, 4th edition, Delmar, 1993.
- [11] William H. Hayt, Engineering Electromagnetics, 4th edition, McGraw-Hill, 1990.