

SMART 냉각재순환펌프에 장착되는 회전속도측정기의 특성해석 및 시험
Test and Characteristic Analysis of Rotational Speed Sensor
for SMART Main Coolant Pump

허 형, 박진석, 김지호, 김종인, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART 냉각재순환펌프는 상용원자로와는 달리 캔드모터형으로 회전축이 외부로 노출되지 않고 고온, 고압의 일차 냉각재속에서 회전하기 때문에 기존의 근접센서는 사용할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 제약조건내에서 사용가능한 코어공통형 및 코어분리형 회전속도측정기를 설계하여 저속 및 고속 특성을 해석하였으며 실제 시제품을 제작하여 타당성을 검증하였다.

Abstract

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(FEA) for the design of common core-type and separated core-type rotational speed sensor(RSS) for SMART MCP and compared with the low/high speed characteristics of prototype RSS. As a result, it is shown that the characteristics of prototype RSS have a good agreement with the results of FEA.

1. 서론

SMART 냉각재순환펌프(MCP)는 기동시나 장시간 운전 되는 동안에 냉각재순환펌프의 작동여부에 대한 회전정보의 측정은 필수적이며 MMIS의 제어계통 및 안전계통에 각각 2개, 4개의 물리적/전기적으로 독립적인 신호를 제공해야 한다.

SMART MCP는 상용원자로와 달리 캔드모터로 회전축은 원자로의 일차 냉각수 속에 잠겨서 회전하기 때문에 고온과 고압의 경계에 둘러 쌓여있어 기존의 근접센서로 회전속도를 측정하기에는 여러 가지 어려운 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 발전기의 원리를 이용한 코일형 회전속도측정기(RSS)를 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 조건들을 만족시키는 코어공통형과 코어분리형 회전속도측정기를 설계하여 각각의 저속, 고속특성을 해석하였으며, 실제 제작된 시제품과도 비교, 분석하였다.

2. 회전속도측정기 구조

SMART 냉각재순환펌프의 구조는 그림 1과 같으며 그 중 회전속도측정기는 캔드모터 회전축에 장착된 영구자석, 규소강판 코어, 그리고 권선부로 구성된다. 회전속도 측정원리는 영구자석이 회전할 때 코어 권선에서 유도된 전압을 회전수와 연관시켜 회전속도를 측정하는 방식이다. 회전속도 측정기를 설계할 때 고려해야 하는 중요한 변수는 영구자석과 코어 사이의 거리, 영구자석의 자기 세기, 회전수, 코어의 형태 등이며 특히 영구자석과 코어 사이에는 펌프의 압력경계를 이루는 SUS321 스테인레스강 두께와 공극으로 인한 간격이 존재하며 이 간격은 회전속도측정기 설계에 중요한 변수이다. 코어의 형태는 코어공통형과 코어분리형으로 나뉘서 설계하였다[1].

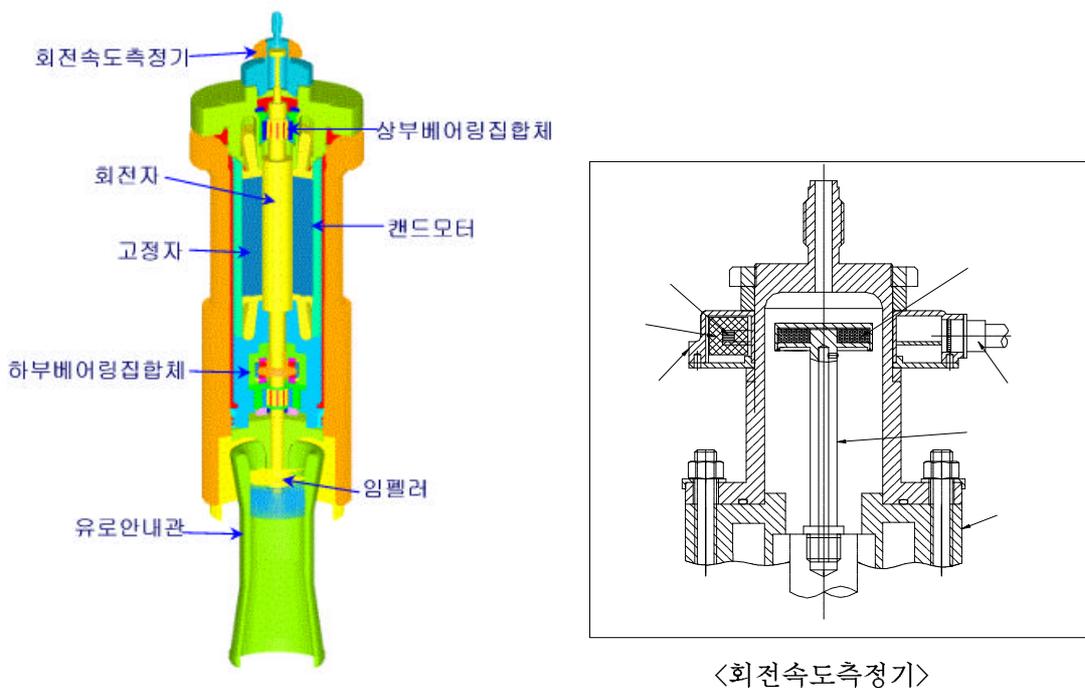


그림 1 SMART MCP 및 회전속도측정기

3. 회전속도측정기 전자장 수치해석

회전속도측정기의 측정 원리는 교류식 타코제너레이터(tachogenerator) 형태로 아래 식과 같이 고정권선사이에서 영구자석을 회전시키면 코일을 채교하는 자속 Φ 의 시간적 변화에 비례한 유도 기전력, 전압 E가 유기된다[2][3].

$$emf = -N \frac{d\Phi}{dt} [V]$$

그러나 이 방식은 고정권선에 대하여 영구자석이 회전하는 것으로서 구조적으로 간단하나 고정권선에서 유도되는 교류전압과 주파수가 영구자석의 회전수에 비례하기 때문에 저속 회전시 신호처리가 어렵다. MCP는 주파수 변환방식에 의한 저속(900 rpm)과 고속(3600 rpm)의 2단 변속 운전모드로 운전되나 MCP가 실제 명령대로 초기 기동이 시작되는 지도 감시하여야 하기 때문에 저속에서의 측정한계도 중요하다.

3.1 해석모델

그림 2는 회전속도측정기의 코어공통형과 코어분리형에 대한 전자기장 2차원 해석모델로 이 때 설계사양은 표 1, 2와 같다[4].

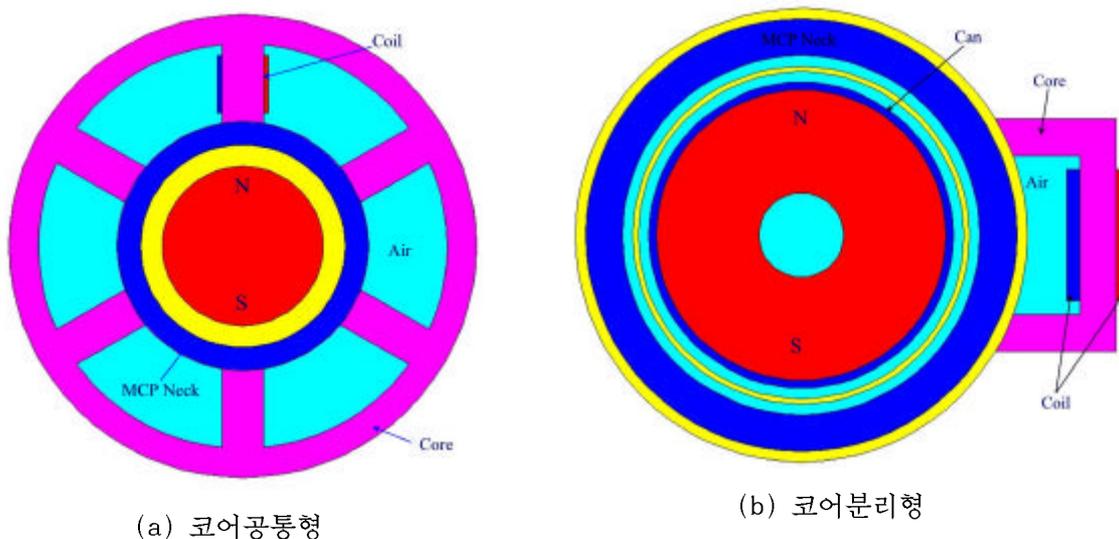


그림 2 회전속도측정기의 형태

표 1 코어공통형 RSS 설계사양

회 전 수		0 ~ 3,600 [rpm]
권 선	종 류	폴리이미드 동선
	직 경	$\phi 0.25$ [mm]
	권선수	600 [turn]
	점적율	0.78
	권선창	2×18.75 [mm] = 37.5 [mm ²]
영구자 석	종 류	Neodymium
	극 수	2 극
	μ_{rec}	3
	$B_{r_{op}}$	≈ 0.4 [Tesla]
	Tc	≈ 340 °C
코 어	재 료	S-12
	두께	0.5 [mm]
	높 이	12 [mm]
MCP Neck	SUS321, $\mu=1.003$	
Can	SUS321	

표 2 코어분리형 RSS 설계사양

회 전 수		0 ~ 3,600 [rpm]
권 선	종 류	폴리이미드 동선
	직 경	$\phi 0.25$ [mm]
	권선수	1,000 [turn]
	점적율	0.78
	권선창	2.5×25 [mm] = 62.5 [mm ²]
영구자 석	종 류	Neodymium
	극 수	2 극
	μ_{rec}	3
	$B_{r_{op}}$	≈ 0.4 [Tesla]
	Tc	≈ 340 °C
코 어	재 료	S-12
	두께	0.5 [mm]
	높 이	11 [mm]
MCP Neck	SUS321, $\mu=1.003$	
Can	SUS321	

그림 2와 같이 해석모델을 결정하고 이로부터 유기되는 기전력을 측정하기 위하여 그림 3과 같은 외부회로망을 결합시켰다. 권선의 유도기전력 측정은 1000 k Ω 의 소모성 저항을 회전속도측정기 권선에 연결시켜 저항에 양단에 걸리는 전압을 구하는 방법을 이용하였다.

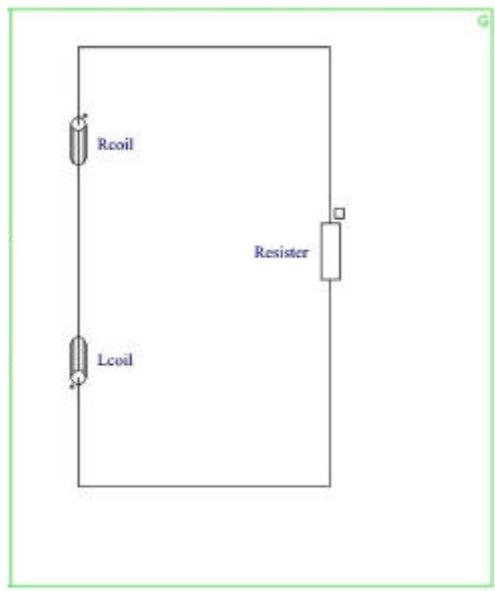


그림 3 해석모델 및 전기회로

전자장해석은 Flux-2D를 이용하여 그림 4와 같은 절차로 계산하였으며 계산에 입력된 parameter 값은 표 3과 같다.

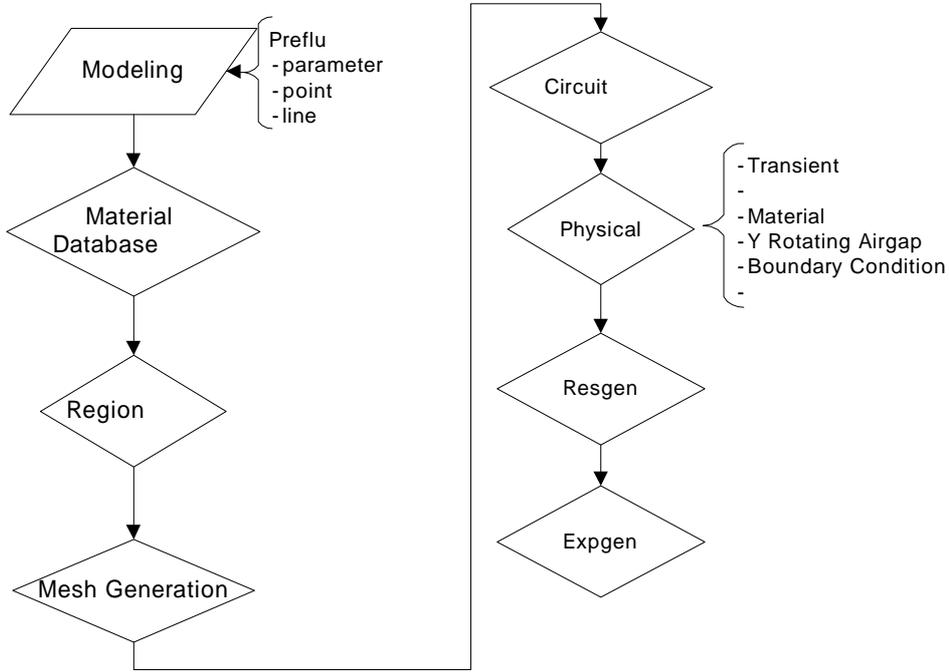


그림 4 Flux-2D 해석 절차

표 3 기본적인 해석 조건

해석 solver	Transient Magnetic
2극 자석의 각도	90 [Deg.]
4극 자석의 각도	45(N1), -135(N2), -45(S1), 135(S2) [Deg.]
해석좌표계	XY-Plane, 11/12 [mm]
경계조건	Dirichlet
Airgap	Y Rotating Airgap
Coil	External Circuit
Resister	1,000 k Ω
Coil Resistivity	0.175e-07 [$\Omega \cdot m$]

3.2 2차원 해석결과

(1) 회전속도별 유도기전력

영구자석이 회전시 코일에 유기되는 기전력을 알기 위하여 과도해석을 수행하였다. 표 4와 5는 해석결과 얻어진 회전속도별 유도기전력값으로 코어공통형이 코어분리형보다 약 15%정도 유기전압이 높게 계산되었지만 형태, 입력값등의 차이로 정량적으로 비교하기는 어렵다. 저속특성은 50 rpm에서 약 0.2V로 다소 낮은 값을 갖지만 신호처리하면 별 문제가 없을 것으로 사려된다.

표 4 코어공통형 RSS의 회전속도별 유도기전력 변화

RPM	50	400	900	1300	3600
입, 출력					
time step, sec	0.01	0.001	0.0006	0.0004	0.0001
time limit, sec	2	2	2	2	2
time step No.	100	100	100	100	100
No. of iteration	100	100	100	100	100
precision	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
peak voltage, V	0.19	1.6	3.7	5.3	14.7

표 5 코어분리형 RSS의 회전속도별 유도기전력 변화

RPM	50	400	900	1300	3600
입, 출력					
time step, sec	0.01	0.001	0.0006	0.0004	0.0001
time limit, sec	2	2	2	2	2
time step No.	100	100	100	100	100
No. of iteration	100	100	100	100	100
precision	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
peak voltage, V	0.17	1.38	3.1	4.48	12.4

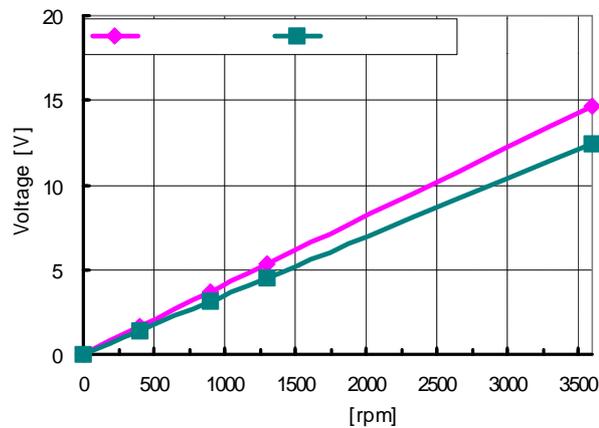


그림 5 회전속도측정기 회전속도에 따른 출력변화

(나) 영구자석 극수별 유도기전력

그림 6은 NbFeB(Neodymium) 영구자석을 2극과 4극으로 설계하였을 때 코어공통형과 코어분리형 회전속도측정기의 유도기전력 크기를 계산한 것으로 극수가 높을수록 유도기전력이 커짐을 알 수 있고, 특히 저속에서 유리함을 알 수 있다.

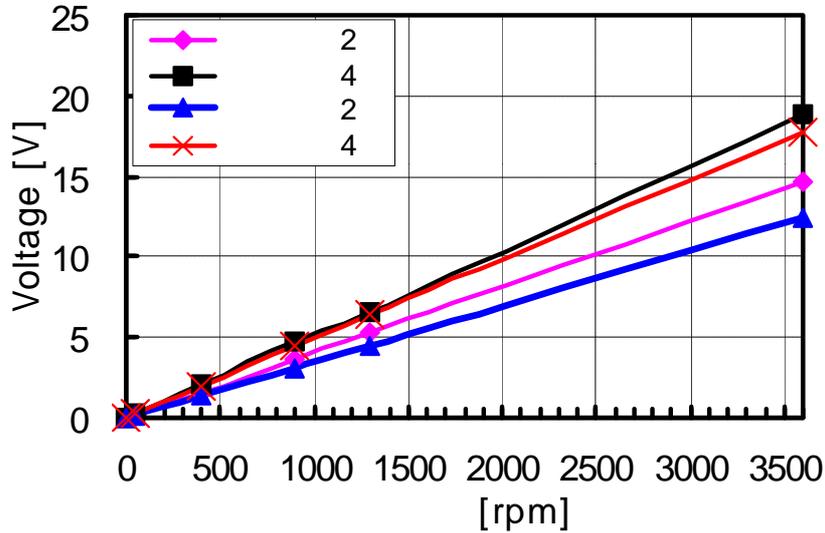


그림 6 코어공통형/분리형 RSS의 2/4극 영구자석별 유도기전력

그림 7은 50rpm의 속도로 3deg. 회전시(코어공통형), 그림 8은 3,600rpm의 속도로 73.44deg. 회전시(코어분리형) 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.

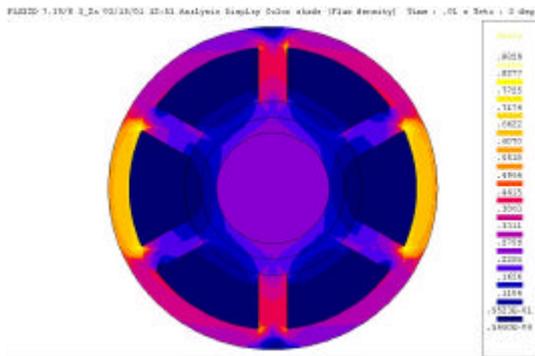


그림 7 50[rpm], 3[deg] 회전시 자속 밀도 분포도(코어공통형)

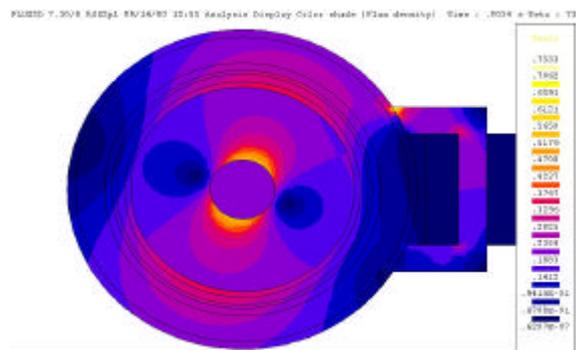


그림 8 3,600[rpm], 73.44[deg] 회전시 자속밀도 분포도(코어분리형)

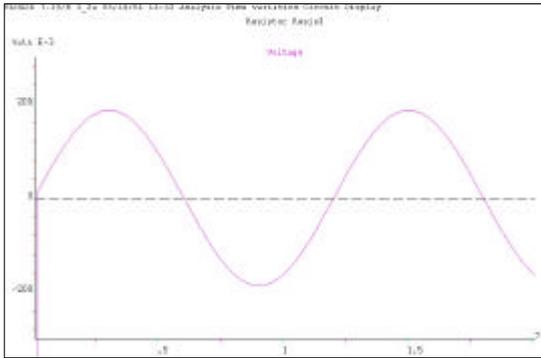


그림 9 코어공통형 RSS의 50rpm시 유기전압 파형(2극)

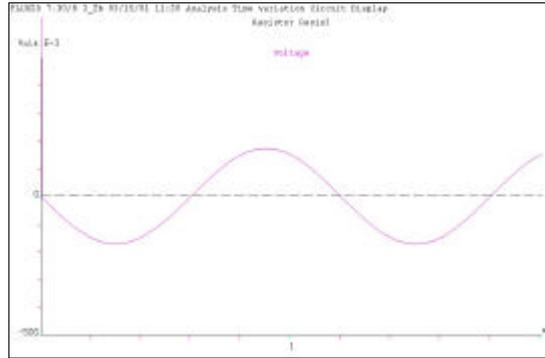


그림 10 코어분리형 RSS의 50rpm시 유기전압 파형(2극)

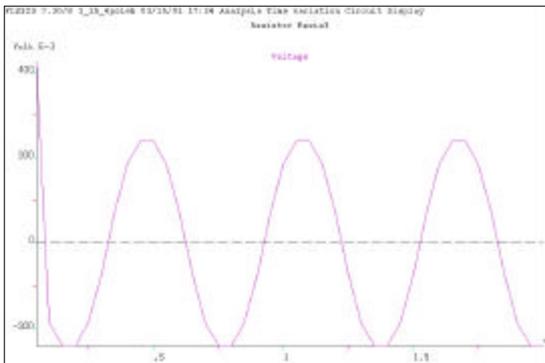


그림 11 코어공통형 RSS의 50rpm시 유기전압 파형(4극)

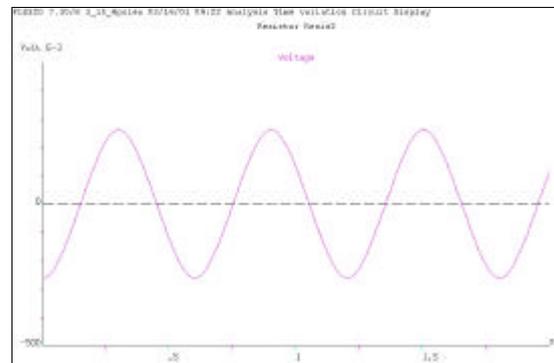


그림 12 코어분리형 RSS의 50rpm시 유기전압 파형(4극)

4. 회전속도측정기 시제품의 특성시험

전자기 해석결과를 토대로 하여 가장 저속 특성이 우수하게 평가된 해석모델들에 대하여 시제품을 제작하였다. 그림 13은 코어공통형 회전속도측정기 시제품이고, 그림 14는 코어분리형 회전속도측정기 시제품이다.



그림 13 코어공통형RSS 시제품

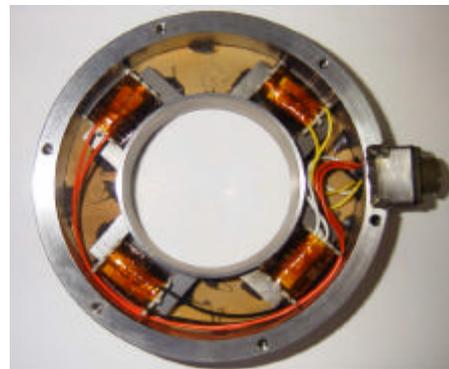


그림 14 코어분리형 RSS 시제품



그림 15 회전속도측정기 시스템

4.1 해석결과와 시험결과와의 비교

그림 16과 17은 시제품 속도측정기에서 수집한 전압파형이며, 그림 18은 코어공통형의 경우 와 코어분리형의 경우 해석값과 시험값을 비교한 것이다.

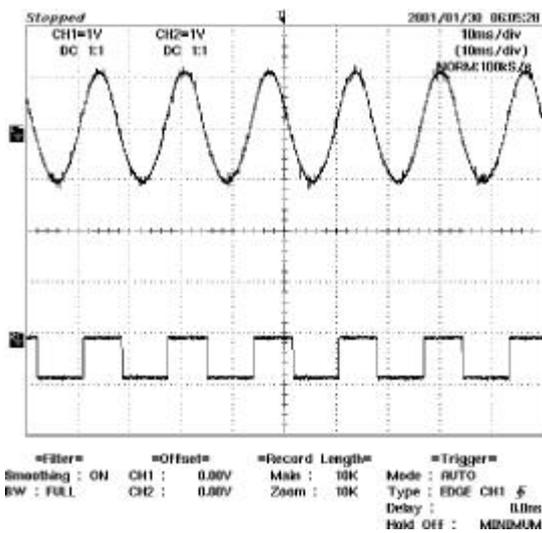


그림 16 코어공통형 RSS의 3,600rpm시 수집파형

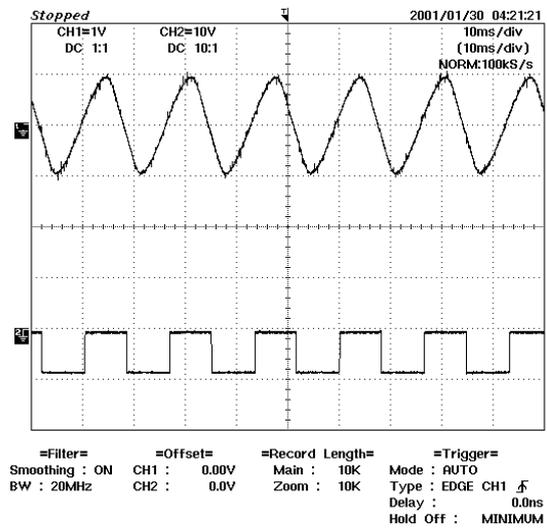


그림 17 코어분리형 RSS의 3,600rpm시 수집파형

회전속도측정기의 해석값과 시험값이 약 20% 정도 차이가 나는 이유는 수치해석상의 오차, 제작상의 가공오차, 사용된 재료의 정확한 B-H특성과 투자율 등에 의해 기인된 것으로 사료된다.

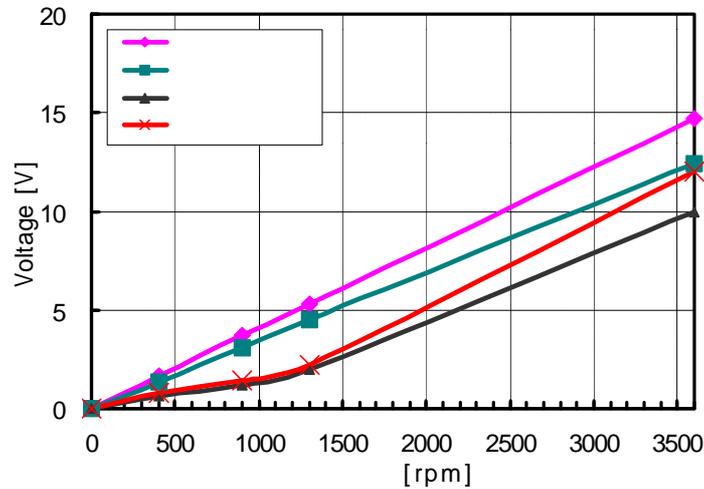


그림 18 해석값과 시험값과의 비교

5. 결론

냉각재순환펌프의 회전속도측정을 위하여 코어 공통형과 분리형 회전속도측정기를 설계하였으며 전자장 과도해석을 통하여 유도기전력을 평가하였다. 해석결과 코어 공통형과 분리형 회전속도측정기는 모두 설계요건을 만족하며, 특히 저속시 4극 영구자석이 2극보다 유도기전력이 약 40% 정도 높게 계산되었다.

이에 대한 검증을 위하여 영구자석이 2극인 코어 공통형과 분리형의 시제품을 제작하여 저, 고속특성을 서로 비교, 검토한 결과 출력전압은 전자장 해석값보다 약 20%정도 낮게 예측되었으나 모두 설계요건을 만족하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 허 형외, SMART 냉각재순환펌프에 장착되는 회전속도측정기의 전자기장해석”, 2000년 추계 한 국원자력학회학술대회
- [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