

## 직교 배열표를 이용한 휠 기반 회전형 전자기 유도 방식 에너지 하베스터 개발<sup>§</sup>

박현철\* · 문용준\* · 권세진\*<sup>†</sup>

\* 한국과학기술원 기계항공시스템학부 항공우주공학전공

### Development of Rotational Type of Wheel-Based Electromagnetic Induction Energy Harvester by Using Orthogonal Array

Hyunchul Park\*, Yongjun Moon\* and Sejin Kwon\*<sup>†</sup>

\* Dept. of Aerospace Engineering, School of Mechanical, Aerospace and Systems Engineering, KAIST

(Received June 5, 2012; Revised October 19, 2012; Accepted October 22, 2012)

**Key Words:** TPMS(타이어 공기압 경보장치), Energy Harvester(에너지하베스터), Electromagnetic Induction(전자기 유도), Orthogonal Array(직교 배열표), Characteristic function(특성함수)

**초록:** TPMS(Tire pressure monitoring system)의 의무장착에 대한 법률개정에 따른 개발의 활성화를 토대로, WSN(Wireless Sensor Network)의 ‘설치하고 잊어버린다’는 기본 명제 하에, 차량수명과 동일한 성능의 배터리 대체용 에너지 하베스터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문은 자동차의 메커니즘적인 측면에서 가장 유용한 회전운동 성분을 이용하여 회전하는 휠과 고정된 브레이크 디스크 사이의 상대운동을 통한 전자기 유도방식 발전을 채택하였다. 휠 측에 구성된 코일과 브레이크 디스크에 매립된 자석의 다양한 배열과 코일 권선수 등을 설계변수로 잡고 직교배열표를 이용하여 최적의 조합을 찾아낸 후 실험을 통해 실제 축전되는 전기 에너지의 양을 측정하여 도출된 특성함수를 바탕으로 본 모듈의 타당성을 검증하였다.

**Abstract:** According to the law revision of TPMS mounting obligations in Korea, researches about energy harvester which is the alternative of the battery are actively performed by many groups. Because WSN (Wireless Sensor Network) has the proposition of “Install and forget” and the power supplier also has the same performance as the vehicle’s lifetime. In this paper, electromagnetic induction type of energy harvester through the relative motion between the rotating wheel and the fixed brake disc is introduced by using the most efficient source as the rotating motion in the view of vehicle’s mechanism. The coil on the wheel and the permanent magnet at the brake disc are arranged in several ways. These various arrangements are the number of coil turns are consisted of design variables. By using the orthogonal array to reduce the experimental cost, the optimal composition is verified through the experiment. Finally the validity of the module is considered by measuring the level of storable electrical energy.

- 기호설명 -

$D$  : 타이어 외경  
 $l$  : 타이어 내경  
 $w$  : 타이어 단면폭  
 $AR$  : 타이어 단면폭에 대한 단면높이의 비

$L$  : 직교배열표  
 $N$  : 직교배열표  $L$  의 행의 수  
 $n$  : 수준의 종류 숫자  
 $s_i$  : 수준수  
 $k$  : 해당되는  $s_i$  수준을 가진 인자의 수  
 $\eta_n$  : 특성함수 (충전완료시간)  
 $E$  : 전기 에너지  
 $Q$  : 전하량  
 $V$  : 기전력  
 $C$  : 캐패시턴스

<sup>§</sup> 이 논문은 2012년도 대한기계학회 에너지 및 동력공학부문 춘계학술대회(2012. 5. 17.-18., 재료연구소) 발표논문임

<sup>†</sup> Corresponding Author, [trumpet@kaist.ac.kr](mailto:trumpet@kaist.ac.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

## 1. 서론

### 1.1 선정 배경

TPMS(Tire pressure monitoring system, 타이어 공기압 경고장치)의 의무장착에 대한 법률개정<sup>(1)</sup>에 따라 이와 관련된 시장이 폭발적으로 성장함에 따라 관련 연구개발 사례가 급증하고 있다. TPMS와 같은 WSN(Wireless Sensor Network, 무선센서망)은 설치하고 잊어버린다는 기본 명제를 바탕으로 개발이 이루어지기 때문에 무엇보다도 무선송수신을 위한 저전력회로 개발과 전력공급장치 개발에 관심이 집중되고 있다.<sup>(2)</sup> 특히 전력공급장치에 있어, 시스템의 특성상 차량수명과 동일하게 유지될 수 있는 조건이 요구되면서 배터리를 대체할 수 있는 자가발전 모듈에 대한 연구가 많은 부분에서 진행이 되고 있다. 센서 노드 구동용 자가발전모듈은 에너지 하베스터라고 명명되고 있는 연구주제로 활발히 개발이 진행되고 있으며, 이는 시스템에서 버려지는 각종 에너지원을 재활용하여 소규모 발전을 수행함으로써 필요한 전력을 생산할 수 있다. 자동차 타이어 내부에서 얻어질 수 있는 에너지원은 열원과 진동원이 대표적이며, 양산을 목적으로 판단할 경우 진동에너지를 이용하는 것이 가장 효율적임이 각종 연구결과에서 말해주고 있다.<sup>(3)</sup> 그러나 자동차 타이어의 경우, 회전에 의한 원심력 성분이 절대적으로 큰 관계로 일정하게 발생하는 진동성분을 사용하는 것도 구현이 쉽지 않은 면이 있다. 따라서, 본 연구에서는 자동차의 메커니즘적인 측면을 우선적으로 고려하여 가장 유용하게 사용할 수 있는 회전운동 성분을 이용하는 방법을 고찰하였다.

### 1.2 발전 원리

타이어의 경우, 가장 효과적인 에너지 하베스팅 방식 선정을 검토한 결과, 독립된 운동을 하는 타이어와 브레이크 디스크의 조건에 발전기의 원리에 적용된 전자기 유도 기법을 이용하면, 회전자(rotator)와 고정자(stator) 개념을 도입하여 자석과 코일의 크기조절만으로 원하는 전력대를 손쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다는 것을 확인하였다. 차축과 연결된 타이어가 회전을 하는 반면, 휠과 인접한 브레이크 디스크가 정지해 있기 때문에 이 두 구조물 사이의 상대운동을 이용한 발전이 매우 효율적이라 할 수 있다. TPMS는 휠에 부착이 되면서 동시에 전력공급이 필요하므로, 유도기전력이 전송될 수 있는 코일이 휠 측에 구성되고, 코일로의 자속밀도 변화를 주기 위해 휠과 인접해

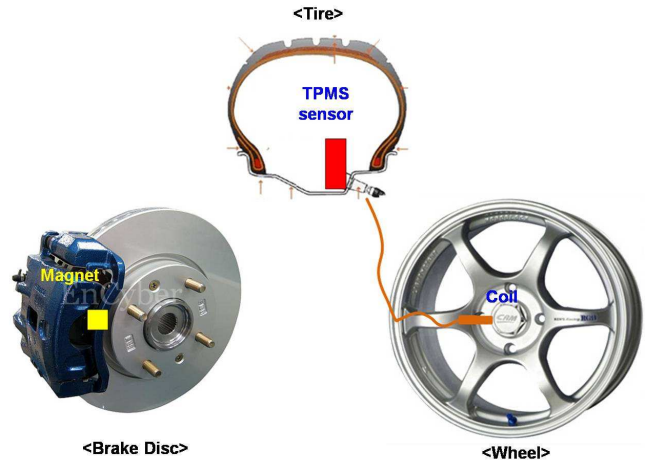


Fig. 1 Concept of rotational electromagnetic induction energy harvester



Fig. 2 Specifications display of tire

있는 브레이크 디스크 부위에 영구자석을 설치할 수 있다. 본 방식은 Fig. 1에서와 같이 휠에 코일을 설치하고 맞은 편 브레이크 디스크 표면에 영구자석을 매립하여 상대 회전운동을 통해 코일과 자석 사이에서 발생하는 자속밀도 변화를 이용한 전자기 유도 방식이다.

## 2. 회전형 전자기 유도방식 모듈 개발

### 2.1 환경 설정

회전형 전자기 유도 방식은 시스템이 단순하고 구조적인 내구성이 우수하며, 정속 주행에서 특정 회전수를 바탕으로 한 발전방식이므로 교류 전압의 특성도 손쉽게 예측할 수 있다. Fig. 2의 샘플을 바탕으로 타이어 외경  $D$ 를 정의하면,

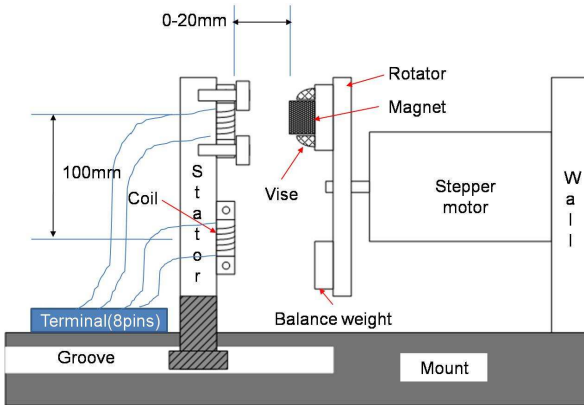
$$D = (l \times 25.4) + [(w \times AR / 100) \times 2]$$

가 되고, 계산 결과 샘플 P205/45R/16의 원주는 185.5 cm이므로  $D$ 는 약 59 cm가 된다. 이를 바

직교 배열표를 이용한 휠 기반 회전형 전자기 유도 방식 에너지 하베스터 개발

**Table 1** Tire revolution in accordance with vehicle's velocity

60 km/h	540 RPM	9 Hz
100 km/h	900 RPM	15 Hz



**Fig. 3** Concept of test apparatus

탕으로 자동차 속도에 따른 바퀴 회전수는 아래 Table 1 과 같다.

2.2 실험 조건 선정

Fig. 1 의 개념을 살펴보면, 고정자인 브레이크 디스크에 회�틀류 자석이 장착되고, 회전자인 타이어에 코일이 설치된다. 이 때 코일과 자석간의 상대적인 회전운동을 하면서 발생한 유도 기전력에 의한 전력을 이용하여 타이어에 설치되어 있는 TPMS 센서를 구동시키게 되어 있다. 그러나 실험에서는 코일을 통해 발생한 유도 기전력을 추출하여 에너지로 저장하는 장치를 꾸미기 위해서는 실험특성상 코일을 고정자로 하고 자석을 회전시키는 방식을 채택해야 한다. Fig. 3 은 이러한 개념을 바탕으로 구성되었으며, 자동차 주행속도에 따른 타이어 회전수를 컨트롤하기 위해 스텝핑 모터를 채택하였다.

자석의 표면 자속밀도는 Kanetec 社의 TM-701 Gaussmeter 로 측정하였으며, 단위는 Gauss 이다. 유도 코일의 경우 100  $\mu$ m 직경의 에나멜 코일을 이용하였으며, 자석과의 상대 운동에 대한 경우의 수를 고려하여 Table 2 에서와 같이 규격별로 각각 Vertical set 과 Lateral set 을 구비하였다.

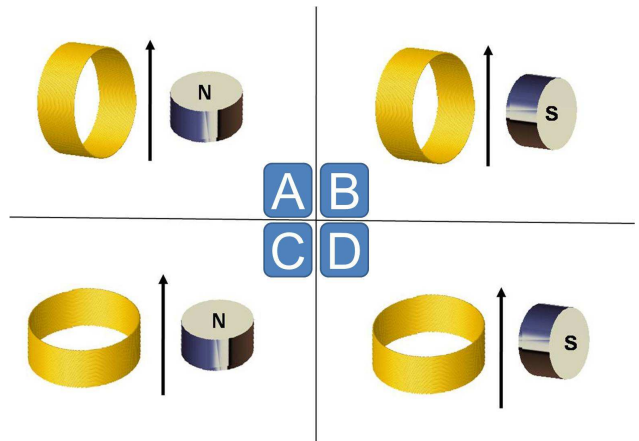
여기서 A 는 Lateral set, B 는 Vertical set 을 나타내며, 앞의 숫자 1 과 2 는 육면체 자석을, 3 과 4 는 원통형 자석을 나타낸다. 그리고 뒤의 숫자 1 은 한 개의 자석이 놓여 있는 시편이고, 2 는 두

**Table 2** Selection of magnets

형상	Cubic Magnet				Cylindrical Magnet				
	규격	샘플명	자속 밀도	자속 밀도	샘플명	자속 밀도	샘플명	자속 밀도	
Lateral-Single	10x10x5 (mm)	A1-1	3680	A2-1	4120	A3-1	3790	A4-1	4420
Lateral-Pair	5x5x5 (mm)	A1-2	4680	A2-2	4530	A3-2	3990	A4-2	4830
Vertical-Single	$\Phi$ 3x5 (mm)	B1-1	3650	B2-1	4000	B3-1	3780	B4-1	4460
Vertical-Pair	$\Phi$ 5x5 (mm)	B1-2	4600	B2-2	4480	B3-2	4000	B4-2	4870

**Table 3** Selection of induction coils

규격	$\Phi$ 5x10 (mm)	$\Phi$ 5x10 (mm)	$\Phi$ 5x20 (mm)	$\Phi$ 5x20 (mm)
권수	500	1,000	500	1,000
저항값	20.8	43.8	19.7	40.2



**Fig. 4** Selection of relative rotational motion

개의 자석을 나란히 붙여놓은 형태의 시편을 말한다. 한편, Fig. 4 의 A, C 와 같이 회전방향으로 자석의 양 극이 배열되어 있고 코일과는 수직으로 놓여있는 자석을 Vertical set 로 명명하였으며, B, D 와 같이 회전방향과 자석 양 극이 수직이고 코일과는 마주 놓여 있는 자석을 Lateral set 로 명명하였다. 이를 바탕으로 Core part 인 자석과 코일을 선정하였는데, 상대 운동의 경우의 수를 고려하여 나타낸 각 값들이 Table 2 와 Table 3 에 나타나 있다.

2.3 직교 배열표 선정

자석과 코일의 상대운동은 아래 Fig. 4 와 같이 구성을 하였는데, 자기장 방향에 따른 자속밀도 변화와 코일의 유도 기전력 발생과의 관계를 알아보기 위해 각각 4 가지 형태로 배열하였다.

구비된 자석과 코일 샘플을 이용하여 자석과

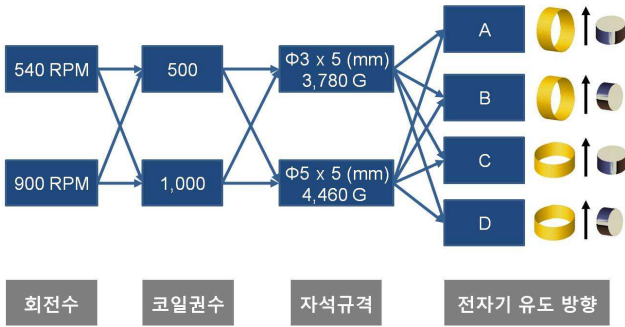


Fig. 5 Selection of relative rotational motion

코일의 상대 회전운동에 따른 실험군을 조사해본 결과, 총 512 회의 경우의 수가 발생하였고 이 중 유력한 실험 조건들을 재선정하여 Fig. 5 와 같이 32 회로 재분류 하였다. 실험조건으로는 회전수, 코일권수, 자석규격을 각각 2 종류로 분류하였으며, 자석과 코일의 상대 회전운동을 위한 배열은 4 종류로 선정하였다.

이상의 경우와 같이, 실험 결과를 통해 유의한 영향을 미치는 인자들이 최적의 결과를 얻기 위해 가져야 할 최적반응 조건을 결정하기 위해 실험계획법(Design of experiments, DOE)을 적용하기로 하였다. 이는 효율적인 실험을 위하여 실험조건을 조직적으로 배치하고 그 결과를 구한 뒤, 통계이론을 사용하여 논리적으로 결과를 분석하기 위함이다. 이러한 실험계획법 중 실험비용의 절감을 위해 요인들의 전조합 중 일부만 실시해서 실험 결과를 분석하는 방법을 일부실험법(Fractional factorial design)이라 하는데 그 중에서도 직교배열표에 의한 일부실험법을 적용하기로 하였다. 직교배열표는 행렬로 나타내는 표로서 여러 표기법 중 대표적으로 다구치(Taguchi)가 정의한 아래의 식으로 나타내어진다.

$$L_N \left( \prod_{i=1}^n s_i^{k_i} \right)$$

여기서  $N$ 은 직교배열표  $L$ 의 행의 수,  $n$ 은 수준의 종류 숫자,  $s_i$ 는 수준수,  $k$ 는 해당되는  $s_i$ 수준을 가진 인자의 수이다.<sup>(4)</sup> 본 실험에서는  $L_8 2^3 4^1$ 을 채택하였으며, 이를 통해 32 종의 실험군 중 8 개를 재추출하여 실험함으로써 실험비용을 절약할 수 있다.<sup>(5)</sup> 여기서 레벨 2는 RPM, 코일권수, 자석타입을 말하며, 레벨 4는 자석과 코일의 상대 운동에 따른 방식을 말한다. 실험수는 행의 수가 8로 이 값은 평균이 1, 레벨 2가 3, 레벨 4가 3인 값으로부터 도출된 자유도 7에서부터 이보다 높

Table 4 Selection of test group in accordance with orthogonal array

No. of test	RPM	Coil turns	Magnet	Motion
1	540	500	Φ3x5	A
2	900	1,000	Φ5x5	A
3	540	1,000	Φ3x5	B
4	900	500	Φ5x5	B
5	540	500	Φ5x5	C
6	900	1,000	Φ3x5	C
7	540	1,000	Φ5x5	D
8	900	500	Φ3x5	D

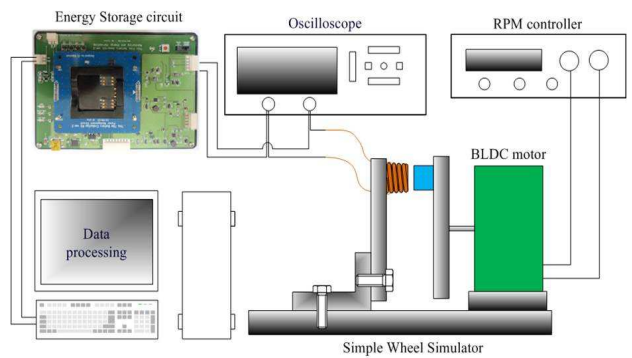
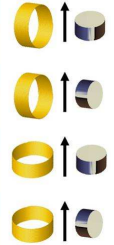
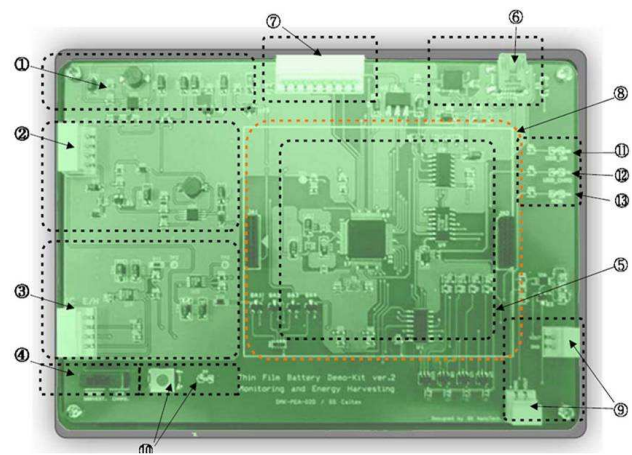


Fig. 6 Concept of rotational electromagnetic induction energy harvester



항 목	내 용
① USB 충전 회로부	USB 충전 및 모니터링용 전원 공급 회로
② 태양전지 연결단자 및 DC E/H 회로블럭	태양전지 연결단자 및 DC E/H 회로부
③ 압전소자 연결단자 및 AC E/H 회로블럭	압전소자(AC) 입력단자 및 AC E/H 회로부
④ 충전 모드 스위치	E/H 충전 모드와 USB 충전 모드 선택용 스위치
⑤ 모니터링 회로 블럭	전지 전압 및 에너지 하베스팅 전압, 신호 모니터링
⑥ mini_USB 컨트롤러	PC 모니터링용 PGM 연결단자
⑦ 프로그램 연결단자	모니터링 모드 프로그램용 연결단자
⑧ 전지 EV Kit Area	전지 충전전 Kit 재결 단자 및 체결 위치 지정
⑨ 출력용 연결단자	외부 회로 연결용 연결단자, (Pin NO.1:Vout, NO2: GND)
⑩ 방전용 S/W 및 LED	전지 전압 출력 확인용 스위치 및 LED(Red)
⑪ USB ON/ LED	USB 연결 유무 확인용 LED(Orange)
⑫ USB_CHRG/ LED	USB 충전 표시용 LED(Blue)
⑬ MCN/ LED	모니터 프로그램 확인용 LED(Green)

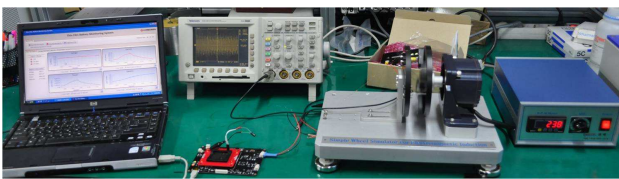
Fig. 7 Energy storage circuit (Corechips 社)

은 정확도를 위해 선정되었다. 여기서 교호작용(Interaction)은 없는 것으로 가정하였다. 여기서 특

직교 배열표를 이용한 휠 기반 회전형 전자기 유도 방식 에너지 하베스터 개발

**Table 5** Selection of test group in accordance with orthogonal array

Factor	Level				Optimized by	
	1	2	3	4		
RPM	540	157.900	159.675	-	-	540
	900					
Coil turns	500	211.325	106.250	-	-	1,000
	1,000					
Magnet size	Φ3x5	159.125	158.450	-	-	Φ5x5
	Φ5x5					
Motional direction	A	173.150	161.750	153.850	146.400	D
	B					
	C					
	D					



**Fig. 8** Test apparatus

성함수(Characteristic function),  $\eta_n$  은 충전완료 시간으로 설정하였다. 아래 Table 4 는 직교 배열표에 의해 최종적으로 선정된 실험군을 나타내고 있다.

2.4 모듈 실험

본 실험은 RPM controller 를 통해 요구 회전수를 조절하고 여기서 발생한 교류 전력을 에너지 저장장치를 통해 정류한 후, 캐패시터에 축전을 함으로써, 해당 조건에서 캐패시터에 완충하는데 걸리는 시간을 분석함으로써 최적의 조합을 찾아내는 것이 실험의 목적이다. 실험을 위한 장치 구성도는 아래 Fig. 6 에서와 같다.

본 실험에서 사용된 캐패시터는 330  $\mu F$  을 적용하였고, 에너지 저장장치는 코어칩스社에서 개발한 “Energy Harvesting & Monitoring System”을 이용하였다. Fig. 7 은 에너지 저장장치의 개략도로 저전력 소자들로 구성되어 있어, 낮은 전압레벨의 유도 기전력도 저장이 가능하였다.<sup>(6)</sup>

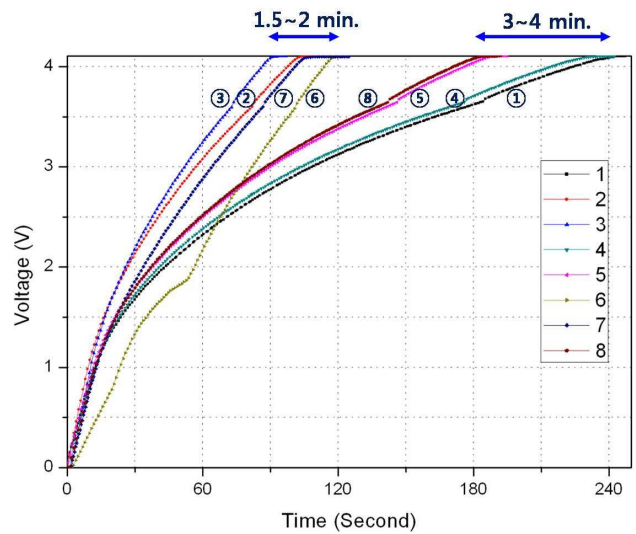
Fig. 8 은 직교 배열표에 의해 선별된 실험군들을 실험하기 위한 장치구성의 실례를 나타내었다.

2.4 실험 결과

직교 배열표를 이용하여 추출한 실험군을 바탕으로 검증한 최적화된 조합은 7 번 조합이었으며, 실험 결과는 Table 5 와 같다. 그러나 실제 에너지 저장성능을 실험한 결과 7 번 조합은, 아래 Table 6 에서와 같이 전체 8 가지 경우의 수에서 3 위를 기록하였다. 이는 직교 배열법으로 설계된 요소들

**Table 6** Analysis of characteristic function

실험번호	RPM	코일권수	자석규격	운동방향	AC전압 (mV)	코일저항 (Ω)	자속밀도 (G)	완충시간 (초)
1	540	500	Φ3x5	A	225	20.67	3,780	242.3
2	900	1,000	Φ5x5	A	294	43.51	4,460	104.0
3	540	1,000	Φ3x5	B	358	43.51	3,790	91.5
4	900	500	Φ5x5	B	250	20.67	4,420	232.0
5	540	500	Φ5x5	C	296	20.67	4,460	188.0
6	900	1,000	Φ3x5	C	246	43.51	3,780	119.7
7	540	1,000	Φ5x5	D	252	43.51	4,420	109.8
8	900	500	Φ3x5	D	209	20.67	3,790	183.0



**Fig. 9** Energy storage performance curve

$$Q = CV$$

———> Electrical charge  
 ———> Design spec. of Capacitor (330  $\mu F$ )  
 ———> Max. charging voltage from E/H (4.1 V)

**Fig. 10** Energy storage formula

사이에 실제 교호작용<sup>(7)</sup>이 존재하는 것으로 판단된다.

특성함수  $\eta_n$  은 유도 기전력에 의한 전류가 에너지 저장회를 통해 330  $\mu F$  의 캐패시터에 완충되는 시간을 나타내며, 특성함수를 분석한 결과를 도식한 결과가 Fig. 9 에 나타나 있다. 그래프를 분석한 결과, 예측하지 않았던 교호작용이 존재함으로써 최적의 조합을 얻지는 못했으나, 인자 중 가장 큰 영향을 미치는 것이 코일권수이며, 약 2 배의 충전속도 차이가 남을 알 수 있었다. 또한 자석과 코일간의 상호 운동방향에 의한 뚜렷한 특징은 알 수 없었으며, 이는 고속회전으로 인하여 자속밀도의 변화를 평균화시킨 것으로 판단된다.

이와 같은 결과를 바탕으로 본 연구에서 구현하였던 시스템의 에너지 저장성능을 예측할 수 있었다.

위 Fig. 10의 전기에너지 공식을 이용하여, 각 경우의 수에 따른 특정 캐패시터에 충전되는 전압을 통해, 본 시스템의 저장에너지를 산출한 결과,

$$E = tIV = QV = CV^2 = 5.55 (mJ)$$

임을 알 수 있었으며,<sup>(8)</sup> 이는 전환효율을 90%로 적용했을 시, 대략 1.5 V, 1 mA의 소비전력을 가지는 센서노드가 약 2.2 초간 소비할 수 있는 에너지를 알 수 있었다.

### 3. 결 론

이상의 연구 내용을 바탕으로, 회전형 전자기 유도방식 에너지 하베스터는 타이어 내부에 설치되는 기존의 연구모델인 진동형 에너지 하베스터들에 비해 시스템 체적의 설계 제약에서 자유로우며, 설계 인자들의 다양한 조합을 통해 TPMS의 센서 노드의 작동 간격에 따른 특정 에너지 완충 시간과 같은 요구사항들을 어렵지 않게 충족시킬 수 있음을 알 수 있었다. 그러나, 간단하고 내구성이 우수한 장점에도 불구하고 실제 시스템에 적용하게 될 시, 자동차 구성 요소가 분산되어 있음으로 인해 양산 업체간의 조율이 필요하다는 보완요소를 안고 있다.

### 후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재

원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2012R1A2A1A05026398)

### 참고문헌

- (1) Chung, J. H., 2010, "Automobile ESC/TPMS Becomes Mandatory," *Korea Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs Press Release*, 7 Pages.
- (2) Keiji, T., 2011, "Summary and Recent Trend of the Energy Harvesting Technologies," *Monthly Magazine of Automatic Control Instrumentation*, 24(9), pp. 46~51.
- (3) Shin, Y. and Lee, Y., 2009, "Measurement on Vibration Mode of Tire Wheel as a Energy Source of Micro Power," *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*(2009. 2), Vol. 20, No. 1, pp. 64~72.
- (4) Park, G. J., 2007, *Analytic Methods for Design Practice*, Springer, London, pp. 325~340.
- (5) Sloane, N. J. A., 29. Nov. 2011, "A Library of Orthogonal Arrays," *Neil J.A. Sloane: Home Page, AT&T People&Organizations Research*, 24. Dec. 2011, <http://www2.research.att.com/~njas/oaddir/>.
- (6) Kim, J. and Lee, J.-Y., 2011, "A Feasibility Study on the Energy Harvesting Technology for the Real-Time Monitoring System of Intelligent Railroad Vehicle," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, pp. 955~960.
- (7) Hwang, K. H., Kwon, W. S., Lee, K. H. and Park, G. J., 2000, "Design of Structure Using Orthogonal Array Considering Interactions in Discrete Design Spaces," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 24, pp. 2952~2962.
- (8) Rizzoni, G., 2004, *Electrical Engineering*, McGraw-Hill, New York, pp. 138~140.