

# DCI 시스템에서 코일 배치에 따른 성능 특성에 대한 수치해석 연구

최 광 돈<sup>1)</sup> · 우 수 형<sup>2)</sup> · 권 영 명<sup>3)</sup> · 최 민 기<sup>4)</sup>

이림전자 연구소<sup>1)</sup> · 현대자동차 전동화선행개발3팀<sup>2)</sup> · 보그워너충주 신사업팀<sup>3)</sup> · 한양사이버대학교 기계자동차공학부<sup>4)</sup>

## Numerical Study on the Performance Characteristics According to Coil Arrangement in DCI System

Kwangdon Choi<sup>1)</sup> · Soohyung Woo<sup>2)</sup> · Young Myoung Kweon<sup>3)</sup> · Mingi Choi<sup>\*4)</sup>

<sup>1)</sup>Research Center, Elim Electronics Corp., 30-20 Osong 1-gil, Seongseo-eup, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungnam 31045, Korea

<sup>2)</sup>eP Advanced Engineering Team3, Hyundai Motor Group, 150 Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi 18280, Korea

<sup>3)</sup>Business Development Team, BorgWarner Chungju LLC., 131 Gieopdosi 2-ro, Daesowon-myeon, Chungju-si, Chungbuk 27465, Korea

<sup>4)</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Hanyang Cyber University, Seoul 04763, Korea

(Received 7 April 2023 / Revised 3 May 2023 / Accepted 10 May 2023)

**Abstract** : In this study, numerical analysis was conducted to investigate the performance characteristics of a DCI system according to the coil arrangement. An analysis was carried out to develop the DCI system through numerical analysis research. Unlike the ignition system of a gasoline engine, which typically consists of a single coil, the DCI system used in this study consists of two coils. This system increases combustion stability in lean burn by using high ignition energy and various ignition control strategies. Since the DCI system uses two ignition coils, the magnetic fields formed around the coils can influence each other when they are used simultaneously, even if primary coil input conditions remain the same. Therefore, with the use of numerical analysis models, the differences in performance characteristics according to the placement of the two coils will be studied and utilized in the control strategy of the DCI system.

**Key words** : Dual coil ignition system(DCI 시스템), Numerical simulation(수치해석), Lean burn(희박연소), Induced current(유도전류), Magnetic field(자기장)

### 1. 서론

최근 전 세계 자동차 업계는 지구 온난화로 인한 기후 변화 억제에 공감대를 형성하고 있으며, 주요 선진국들은 자동차 연비 규제 및 이산화탄소 배출 기준을 강화하면서 친환경 자동차 생산을 장려하고 있다. 세계 각국 정부는 2025년부터 2040년까지 내연기관 자동차 판매를 금지하는 시한을 마련하고 전기차 보급과 인프라 구축을 위해 다양한 노력을 기울이고 있다.<sup>1)</sup> 미국은 2050년 탄소중립을 달성하기 위한 정책을 강화하여 친환경 모빌리티 시장 확대에 박차를 가하고 있으며, 친환경차 생산 비중도 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.<sup>2)</sup> EU는 2030년까지 탄소배출량을 1990년 수준 대비 40% 감축

할 계획이었으나, 1990년 수준 대비 최소 55% 감축하도록 상향 개정된 법안 ‘Fit for 55’가 발표되었다.<sup>3)</sup> ‘Fit for 55’에 따르면 교통 부문의 온실가스 감축이 주요 이슈로 강조됐다. 그리고 한국 정부는 2030년까지 모든 부문에서 친환경차 라인업을 구축하는 것을 목표로 하고 있다.<sup>4)</sup>

이러한 환경속에서 수많은 내연기관 자동차를 전기자동차로 단기간에 대체시키는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 중간단계로 하이브리드 자동차가 주목받고 있다. 하이브리드 자동차는 연비가 우수하고 배기가스 배출량이 상대적으로 적은 장점이 있어 친환경 자동차 보급의 전환단계에서 큰 역할을 할 것으로 기대하고 있다. 이를 위해서 하이브리드 자동차에 사용할 친환경 고

\*Corresponding author, E-mail: mgchoi@hycu.ac.kr

<sup>†</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

효율 엔진의 개발이 필수이고 그 중 희박연소 기술이 핵심이라고 할 수 있다. 희박연소는 하이브리드 자동차뿐만 아니라 순수 내연기관에도 많이 적용되고 있는데 이러한 희박연소기술을 가솔린엔진에 적용하게 되면 열효율을 상승뿐만 아니라 배기가스저감에도 효과가 있어 친환경 엔진 기술로 인식되고 있으며 많은 연구기관에서 희박연소 기술에 대한 연구를 진행해왔고 그 효과에 대해서 연구결과를 발표하였다.<sup>5-8)</sup>

그러나 희박연소를 이용하게 되면 현재기술로 상용화하기 어려운 여러가지 문제점이 있다. 이론공연비 연소를 하는 가솔린 엔진은 희박연소를 할 경우 질소산화물 배출이 증가<sup>9)</sup>하거나 배기정화 장치인 삼원촉매의 전환효율이 떨어지는<sup>10)</sup> 단점이 있으며 이러한 단점은 배기정화 장치 추가로 비교적 쉽게 극복할 수 있다. 그러나 가장 큰 문제는 연소안정성이 떨어진다는 것이다. 그래서 점화성을 향상시켜서 연소안정성을 확보하는 것이 가장 먼저 해결해야할 문제이다. 선행연구결과에 따르면 혼합기 성층화,<sup>11)</sup> 다단점화,<sup>12)</sup> 다점점화<sup>13)</sup> 등의 방법으로 점화성 개선의 효과를 확인하였고 최근 차량 전압 시스템이 48 V로 높아지는 추세에서 고전압을 이용한 다점점화가 가장 현실성 있는 방안이라고 판단된다. 류재하 등<sup>14)</sup>은 희박연소에서 점화성을 개선하기 위하여 DCI (Dual Coil Ignition) 시스템 개발을 위한 수치해석 연구를 진행하였다. 보통 하나의 코일로 구성되어 한 점에 고전압 스파크를 발생시켜 점화를 시키는 것과 달리 DCI 시스템은 두 개의 코일로 구성되어 두 점에서 고전압 스파크를 발생시킨다. 이 두 코일은 서로 독립적으로 제어되기 때문에 두 점의 방전 시작시간과 방전기간 등의 제어방식을 다양하게 이용할 수 있어 다양한 엔진 구동조건에서 최적의 점화전략을 수행할 수 있다.

본 연구에서는 DCI 시스템 개발을 위한 수치해석 후속연구로 DCI 시스템에서 코일 배치에 따른 성능 특성에 대한 수치해석 연구를 진행하였다. DCI 시스템은 점화코일을 2개 사용하기 때문에 제어전략에 따라 동시에 구동될 경우 코일 주변에 형성된 자기장이 서로 영향을 미치게 된다. 그래서 1차 코일 입력조건이 동일함에도 2차 코일 출력 전류값이 차이가 날 수 있다. 따라서 수치해석 모델을 활용하여 두 코일의 배치에 따른 성능 특성 차이 연구하여 DCI 시스템의 제어전략에 활용하고자 한다.

## 2. 수치해석

본 연구는 프로토타입으로 개발된 DCI 시스템을 바탕으로 최종 스파크 에너지를 예측할 수 있는 수치해석

모델을 이용하였다. 수치해석 수행을 위한 소프트웨어는 Ansys社의 Maxwell 프로그램을 이용하여 수행하였다. DCI 시스템에서 변압이 이루어지는 코일 부분을 중심으로 전자장 필드를 해석하였고 두 코일의 배치에 따라 2차 코일에서 유도되는 전류의 차이점을 분석하였다.

### 2.1 Ignition Coil Model

본 연구에 사용된 점화 코일은 폐자로형 점화 코일이다. 폐자로형 점화 코일은 자속의 통로를 철심에 의해 폐회로를 형성하여 2차 전압을 승압시키는 변압기로서 본 연구에 사용된 DCI 시스템의 점화코일은 Fig. 1과 같다. 그림에서 I-core와 C-core가 폐회로를 형성하여 자속의 통로를 형성하고 Primary coil에 1차 전류가 흐르면 자기유도 작용과 상호 유도 작용에 의하여 Secondary coil에 승압된 유도전류가 발생하는 원리이다. 폐자로형 점화 코일은 개자로형 점화 코일에 비해 효율이 높고 발생 전압이 높아서 가솔린 엔진의 점화 장치에 많이 이용되고 있다.

일반적으로 한 개의 코일로 구성된 가솔린 엔진의 점화 장치와 달리 본 연구에서 사용된 DCI 시스템은 Fig. 1과 같이 2개의 코일로 구성되어 있다. 1차 코일과 2차코일의 권선수는 각각 123, 9695이다. C-core와 I-core는 FeSi 소재로 만들어진 얇은 철판이 적층되어 구성되고 Stacking factor는 0.95이다. 따라서 점화 에너지가 높고 다양한 점화 제어전략을 사용할 수 있어 희박연소에서 연소 안정성을 높이는 기술이다.

### 2.2 수치해석 조건

본 연구는 Ansys社의 Maxwell 프로그램을 이용하여 수행하였다. Maxwell은 전자장 필드 시뮬레이션 해석이 가능하여 점화코일에 인가되는 전류에 의해 발생하는 코일주변 전자장 필드를 해석하고 2차 코일에 유도되는

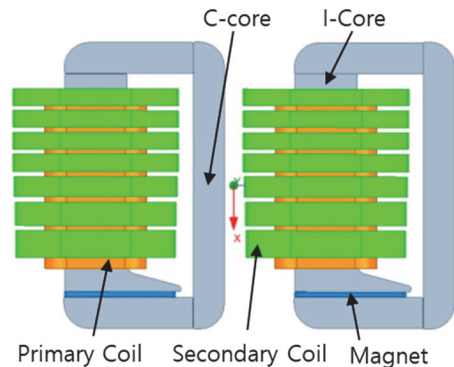


Fig. 1 Dual ignition coil 3D model for DCI system

전류를 계산할 수 있어 DCI 시스템 해석에 아주 유용하다. 사용된 Solver는 Magnetic; Transient이고 Eddy current 와 Hysteresis loss는 해석에서 고려하지 않았다. 구체적인 해석조건은 Table 1과 같다. Primary coil은 48 V를 인가하였고 총 4번의 다단점화를 하였다. 기존의 12 V 전압을 이용하면 DCI 시스템에서 충분한 방전 에너지를 만들고 다양한 제어전략을 가져가는 것에 제약이 있기 때문에 대부분 48 V 시스템을 기반으로 개발이 이루어지고 있다. 충전 시간은 첫 번째 점화 0.9 ms 충전 및 0.2 ms 방전, 나머지 세번의 점화는 0.2 ms 충전 및 0.2 ms 방전으로 두 코일의 점화 지연은 두지 않고 동시 방전을 기본으로 해석을 진행하였다. 실제 점화지연을 주어 두 개의 코일의 방전되는 시간의 차이를 주어 점화에너지 공급의 연속성을 확보할 수 있지만 본 연구에서는 동일 시간에 방전하여 두 코일간에 형성된 자속이 서로간에 어떠한 영향을 끼치는지 분석하기 위해 점화지연은 주지 않았다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 수치해석 모델의 격자를 나타낸 것이다. 해석격자의 개수는 약 25만개로 구성하였고 해석의 정확도에 영향을 미치지 않는 충분한 개수가

Table 1 Operating conditions for dual ignition coil

Dual ignition coil	Primary coil voltage				48 V			
	Secondary coil voltage				1,000 V			
	1st		2nd		3rd		4th	
	T <sub>on</sub>	T <sub>off</sub>	T <sub>on</sub>	T <sub>off</sub>	T <sub>on</sub>	T <sub>off</sub>	T <sub>on</sub>	T <sub>off</sub>
	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

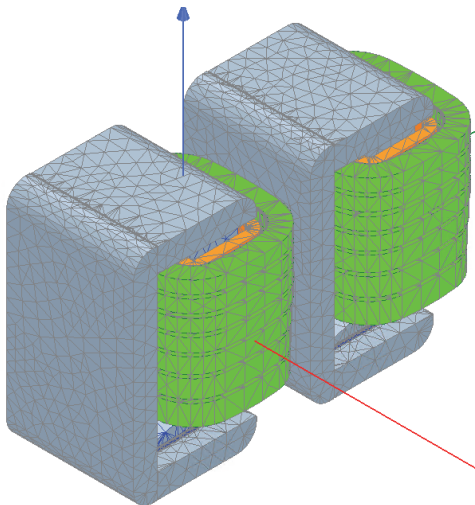
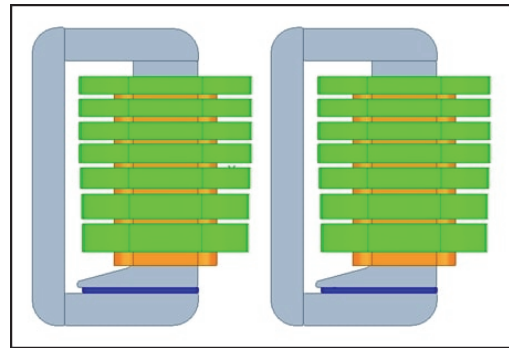


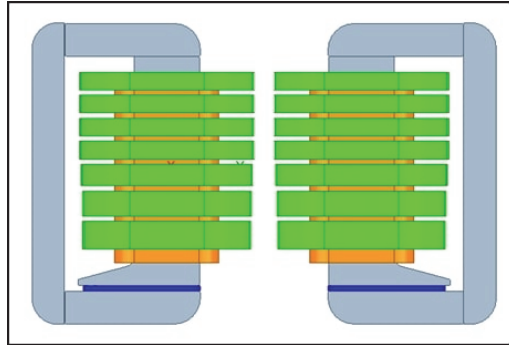
Fig. 2 Computational grid for dual ignition coil

다. 그리고 충전과 방전의 제어는 가변저항을 이용하여 점화 코일을 제어하였다. 실제 DCI 시스템은 트랜지스터, 다이오드 등의 제어장치를 활용하지만 수치해석 프로그램에서 직접적으로 그 장치의 기능을 구현하기 어렵기 때문에 실제저항과 무한대에 가까운 아주 높은 저항을 이용하여 트랜지스터 및 다이오드의 작동을 모사하였다.

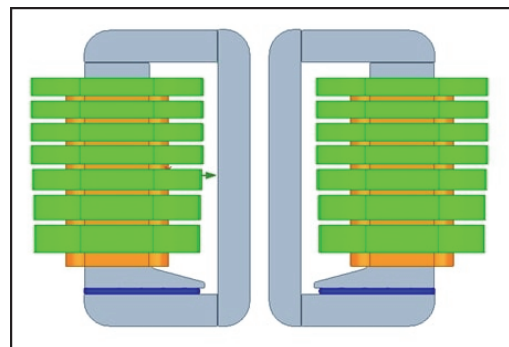
Fig. 3은 본 연구에서 사용된 세 가지 점화 코일의 배치를 나타낸 것이다. C-core의 방향을 기준으로 (a)는 두 코일이 모두 왼쪽으로 배치된 형태이고 (b)는 왼쪽 코일



(a) L-L



(b) L-R



(c) R-L

Fig. 3 Layouts of dual ignition coil

은 왼쪽으로 오른쪽 코일은 오른쪽으로 배치된 형태이며 (c)는 왼쪽 코일은 오른쪽으로 오른쪽 코일은 왼쪽으로 배치된 형태이다. C-core와 I-core가 형성하는 폐회로를 통하여 자속이 형성되고 주변 자기장이 형성되기 때문에 코어의 배치 방향에 따라 형성되는 주변 자기장의 형태가 달라지고 특히 동시점화의 경우 서로 유도 전류 형성에 영향을 미치기 때문에 위 세가지의 배치 형태에 따른 점화 장치의 성능 특성을 살펴보았다.

2차 코일에서 방전되는 에너지를 계산하기 위해서는 2차 코일의 전압과 전류의 곱을 적분한 값으로 계산할 수 있다. 그리고 2차 코일에서 승압되는 전압은 1, 2차 권선수비와 유도기전력에 비례하기 때문에 아래 식 (1)~(4)를 통하여 계산할 수 있다.

$$\epsilon = L \frac{di}{dt} \tag{1}$$

$$n = \frac{N_2}{N_1} \tag{2}$$

$$V_2 = \epsilon \cdot n \tag{3}$$

$$E = \int I_2 \cdot V_2 dt \tag{4}$$




where  $\epsilon$  : induced electromotive force  
 L : inductance, I : current, V : voltage  
 $N_1$  : primary coil turns  
 $N_2$  : secondary coil turns  
 E : output energy

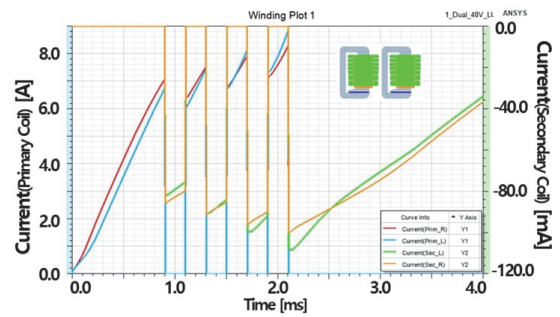
### 3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 세 가지 코어 배치별 1차 및 2차 코일의 전류 파형 결과를 코어별로 각각 나타낸 것이다. 처음 0.9 ms 동안에는 1차 코일에 입력 전류가 흐르면서 1차 코일의 전류가 서서히 상승하며 충전되는 결과를 볼 수 있다. 이후 0.2 ms 간격으로 충전과 방전이 반복되며 총 4번의 방전이 2차 코일을 통하여 이루어진다. 실제 트랜지스터 및 다이오드의 제어 역할을 가변저항으로 충분히 잘 모사하고 있음을 알 수 있었다. 해석모델로 얻은 이 전류파형은 오실로스코프로 실제 점화장치를 가지고 측정된 전류파형과도 동일한 파형의 형태를 나타내는 것으로 해석모델이 점화기의 작동을 적절히 모사하고 있다고 판단할 수 있다. 이에 해석모델이 적절히 구성되었다는 신뢰성을 확보하였다고 판단할 수 있었다. Fig. 4의 해석 결과를 보면, 붉은색 선이 왼쪽 1차 코일의 전류를 나타

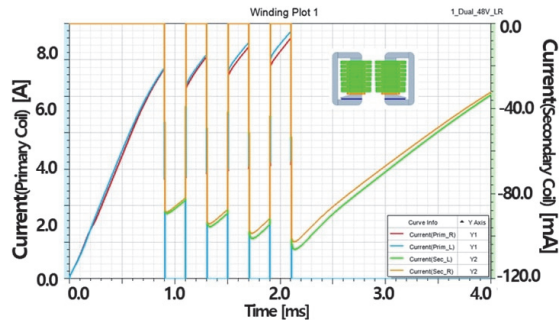
낸 것이고 하늘색 선이 오른쪽 1차 코일의 전류를 나타낸 것이다. 또한 초록색 선이 왼쪽 2차 코일의 전류를 나타

Table 2 Total output energy results for three layouts

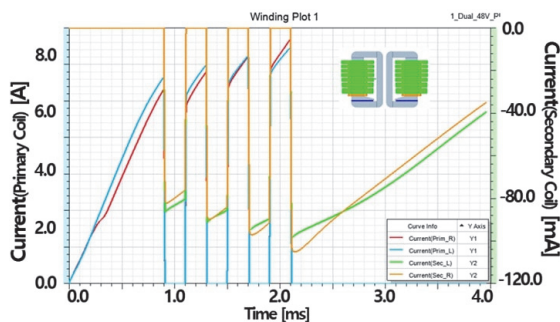
	Primary coil	Secondary coil
L-L 	718 mJ (Base)	371 mJ (Base)
L-R 	763 mJ (+6.2 %)	365 mJ (-1.6 %)
L-R 	729 mJ (+1.5 %)	367 mJ (-1.0 %)



(a) L-L



(b) L-R

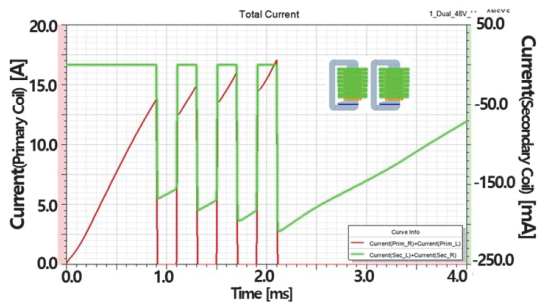


(c) R-L

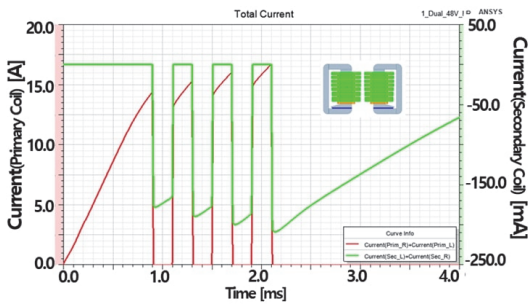
Fig. 4 Separated primary and secondary coils current results for three layouts

타낸 것이고 노란색 선이 오른쪽 2차 코일의 전류를 나타낸 것이다. C-core가 모두 왼쪽으로 배치된 (a) L-L와 가운데 마주보게 배치된 (c) R-L의 경우 두 코어간 전류 차이가 상대적으로 많이 발생되었다. 반면 C-core가 외측으로 서로 떨어진 (b) L-R의 경우 두 코어간 전류 차이가 거의 발생하지 않고 두 코어가 동일하게 전류가 충전되고 방전되는 결과를 나타내었다. 다만 충전 전류의 최고값은 상대적으로 (a) L-L 배치에서 가장 높은 값을 나타내었다.

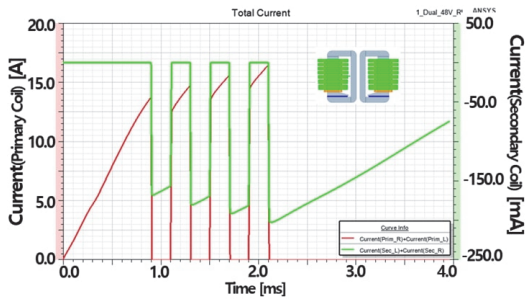
Fig. 5는 세 가지 코어 배치별 1차 및 2차 코일의 전류 파형 결과를 오른쪽과 왼쪽 두 코어의 결과값을 합쳐서 나타낸 결과이다. 붉은색 선이 1차 코일의 전류를 나타



(a) L-L



(b) L-R

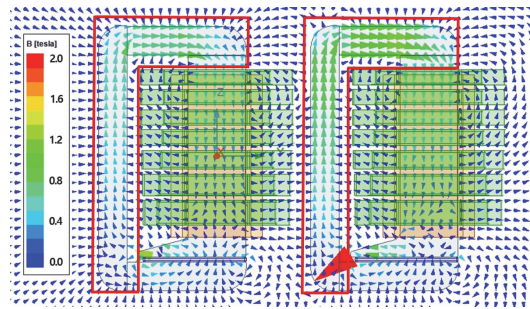


(c) R-L

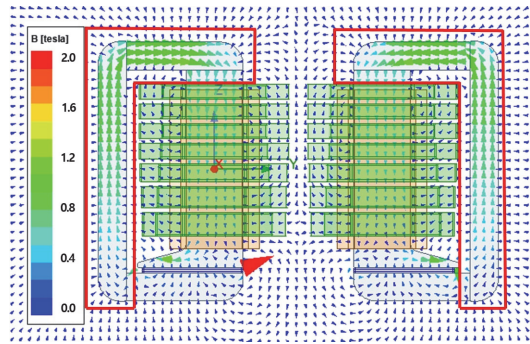
Fig. 5 Combined primary and secondary coils current results for three layouts

낸 것이고 초록색 선이 2차 코일의 전류를 나타낸 것이다. 두 코어의 전류값을 합친 결과를 통해 세 가지 배치에 따른 전체 전류값의 변화 특성을 분석할 수 있고 이 결과를 바탕으로 1차 및 2차 코일의 출력에너지도 계산할 수 있다. Fig. 4의 결과에서도 전류의 최고값은 상대적으로 (a) L-L 배치에서 가장 높았는데 Fig. 5의 결과를 통해서 이를 다시 확인할 수 있다.

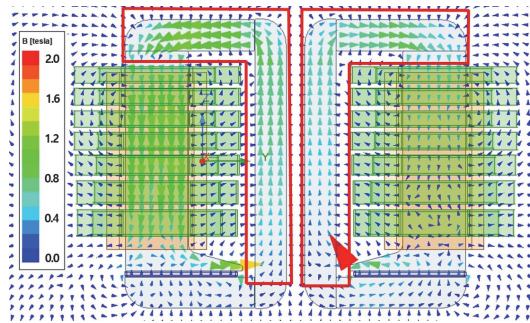
Table 2는 1차 및 2차 코일의 총 출력에너지를 절대값으로 정리한 표이다. (a) L-L 배치를 기준으로 상대적인 차이값도 나타내었다. 1차 코일의 경우 (b) L-R 배치가 763 mJ로 가장 큰 에너지를 충전하였으나 2차 코일에서는 (a) L-L 배치가 가장 큰 에너지를 방전하였다. 점화장



(a) L-L



(b) L-R



(c) R-L

Fig. 6 Magnetic field distribution at 2.1 ms

치의 특성상 출력에너지 특성이 중요하므로 상대적으로 가장 큰 에너지를 방출한 (a) L-L 배치가 출력에너지 측면에서 가장 우수한 성능을 보였다. 다만 본 연구에서는 동시충방전할 경우만 해석하였으므로 두 코어의 방전 시간차를 두는 제어전력을 사용할 경우 결과는 달라질 수도 있을 것이다.

세 가지 배치에 따라 두 코어간의 전류가 차이나는 것은 Fig. 6의 결과를 통하여 원인을 파악할 수 있었다. Fig. 6은 세 가지 배치에 따라 두 코어 주변으로 형성되는 자기장의 세기를 나타낸 것이다. (a) L-L 배치에서 오른쪽 C-core에 형성된 자기장이 왼쪽에 비해 강한 것을 알 수 있고 이 결과 오른쪽 코일의 전류값이 왼쪽보다 더 큰 결과로 나타나는 것이다. 이는 2개의 코일 모두 C코어가 왼쪽 방향으로 배치가 되어 있어 왼쪽 코일의 자기장이 오른쪽 코일에 영향을 미친 것으로 판단된다. 마찬가지로 (c) L-R 배치에서는 반대로 왼쪽 C-core에 형성된 자기장이 오른쪽에 비해 강한 것을 알 수 있고 이 결과 왼쪽 코일의 전류값이 오른쪽보다 더 큰 결과로 나타나는 것이다. 반면 두 개의 C-core가 외측으로 서로 떨어져있는 (b) L-R 배치의 경우 서로에 대한 영향도가 줄어들어 C-core에 형성된 자기장의 세기가 서로 비슷한 것을 관찰할 수 있다. 따라서 두 코어의 출력에너지 편차를 줄이기 위해서는 C-core의 배치가 서로 떨어져있는 (b) L-R 배치가 가장 유리한 것을 알 수 있었다. 다만 이 경우는 다른 두 경우에 비해 총 출력에너지 절대값은 약간 떨어지는 결과를 보인다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 DCI 시스템에서 코일 배치에 따른 성능 특성에 대한 수치해석 연구를 진행하였다. 두 개의 코어 배치방향에 따른 코일 성능을 분석하였고 그 결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 1) 가변저항으로 모사한 점화장치의 제어방식이실제 트랜지스터 및 다이오드의 역할을 충분히 잘 모사하고 있음을 알 수 있었다. 해석모델로 얻은 전류파형은 오실로스코프로 실제 점화장치를 가지고 측정한 전류파형과도 동일한 파형의 형태를 나타내는 것으로 해석모델이 점화기의 작동을 적절히 모사하고 있다고 판단할 수 있다. 이에 해석모델이 적절히 구성되었다는 신뢰성을 확보하였다고 판단할 수 있었다.
- 2) C-core가 모두 왼쪽으로 배치된 (a) L-L와 가운데 마주보게 배치된 (c) R-L의 경우 두 코어간 전류차이가 상대적으로 많이 발생되었다. 반면 C-core가 외측으로 서로 떨어진 (b) L-R의 경우 두 코어간 전류차이가 거의 발생하지 않고 두 코어가 동일하게 전류가 충전

되고 방전되는 결과를 나타내었다. 다만 충방전 전류의 최고값은 상대적으로 (a) L-L 배치에서 가장 높은 값을 나타내었다.

- 3) (a) L-L 배치에서 오른쪽 C-core에 형성된 자기장이 왼쪽에 비해 강한 것을 알 수 있고 이 결과 오른쪽 코일의 전류값이 왼쪽보다 더 큰 결과로 나타나는 것이다. 이는 2개의 코일 모두 C코어가 왼쪽 방향으로 배치가 되어 있어 왼쪽 코일의 자기장이 오른쪽 코일에 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 두 코어의 출력에너지 편차를 줄이기 위해서는 C-core의 배치가 서로 떨어져있는 (b) L-R 배치가 가장 유리한 것을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 논문은 자동차산업기술개발사업(산업통상자원부 공고 제2022-90호) “연소 효율 개선을 위한 고에너지 다점점화 및 배기가스재순환 시스템 기술 개발”(과제번호 20018492)사업의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

#### References

- 1) C. Bae, “Prospects for the Development of Automotive Power,” KSAE Conference: Automotive Technology and Policy Development Roadmap, 2019.
- 2) H. J. Jeon, To Seize Opportunities in the U.S. Eco-friendly Mobility Market, Korea Automotive Technology Institute, Industrial Trend, Vol.56, 2021.
- 3) Y. W. Jang and T. H. Oh, The Main Contents and Implications of the EU Carbon Reduction Legislation, Korea Institute for International Economic Policy, ISSN 1976-0507, 2021.
- 4) The Korea Ministry of Environment, 2030 Modification of Greenhouse Gas Reduction Roadmap, 2018.
- 5) S. Han, N. Lee and S. Lee, “Analysis of the Initial Combustion Period for the Ultra Lean Burn Engine,” Transactions of KSAE, Vol.3, No.1, pp.45-53, 1995.
- 6) S. Yoon, D. Kim and C. Lee, “Effect of Ethanol-gasoline Blending Ratio on Lean Combustion and Exhaust Emissions Characteristics in a SI Engine Fueled with Bioethanol,” Transactions of KSAE, Vol.19, No.1, pp.82-88, 2011.
- 7) C. Park, J. Oh and H. Kim, “A Study on the Lean Combustion Characteristics with Variation of

- Combustion Parameter in a Gasoline Direct Injection Engine,” Transactions of KSAE, Vol.20, No.4, pp.39-45, 2012.
- 8) T. Chung, J. Lee, Y. Lee, C. Kim and S. Oh, “Lean-burn and Emissions Characteristics in a Spark Ignition Engine with High Compression Ratio Using Syngas,” Transactions of KSAE, Vol.27, No.3, pp.163-170, 2019.
  - 9) C. Park, T. Kim, S. Cho and S. Oh, “Effects of Intake and Exhaust Valve Timing on Combustion and Emission Characteristics of Lean-Burn Direct-Injection LPG Engine,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol.39, No.1, pp.45-51, 2015.
  - 10) C. Park, S. Lee, U. Yi and J. Lee, “Emission Reduction Characteristics of Three-way Catalyst with Engine Operating Condition Change in an Ultra-lean Gasoline Direct Injection Engine,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol.39, No.9, pp.727-734, 2015.
  - 11) K. Jeong, “Fuel Stratification Process in a Lean Burn Internal Combustion Engine by Using Planar Laser Induced Fluorescence,” Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.7-12, 2003.
  - 12) C. Park, S. Kim, H. Kim, H. Oh and C. Bae, “The Effect of Multi-ignition Strategy on the Combustion and Emission Characteristics in a Ultra Lean Burn GDI Engine,” Transactions of KSAE, Vol.20, No.3, pp.106-112, 2012.
  - 13) S. Lee, S. Ra, S. Han, Y. Yi and J. Lee, “Ignitability and Combustion Characteristics of Lean Mixture by Multi-Point Ignition,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.19, No.10, pp.2607-2616, 1995.
  - 14) J. Ryu, S. Park and M. Choi, “A Study on DCI System for Lean Burn Using Numerical Simulation,” Transactions of KSAE, Vol.30, No.9, pp.731-736, 2022.