

## 수소 연료전지 차량용 고전압 케이블의 전자파 특성 수치해석에 관한 연구

이순용\*, 최재훈\*<sup>†</sup>

\*한양대학교 대학원

### Numerical Analysis of Electromagnetic Characteristic of High Voltage/Current Cable for Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)

SOONYONG LEE\*, JAEHOON CHOI\*<sup>†</sup>

*\*Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul, 133-791, Korea*

#### ABSTRACT

The electromagnetic characteristics of FCEVs (fuel cell electric vehicles) are much different from the existing combustion engine cars as well as hybrid, plug-in-hybrid, and pure electric vehicles due to the high voltage/current generated by a fuel cell stack which uses a compressed hydrogen gas reacted with oxygen. To operate fuel cell stack efficiently, BOP (Balance of Plant) is essential. BOP systems are used many not only for motors in water pump, air blower, and hydrogen recycling pump but also inverters for these motors. Since these systems or components are connected by high voltage cables, EMC (Electromagnetic compatibility) analysis for high voltage/current cable is the most important element to prevent the possible electric functional safety errors. In this paper, electromagnetic fields of high current/voltage cable for FCEVs is studied. From numerical analysis results, time harmonic magnetic field strength of high current/voltage cable have difference of 20~28 dB according to phase. EMI result considered ground effect of FECV at 10 m shows difference of 14.5 dB at 30 MHz and 2.8 dB at 230 MHz compared with general cable.

**KEY WORDS** : FCEV(수소연료전지 차량), Stack(스택), High current/voltage(대전류/고전압), Cable(케이블), EMI(전자기 간섭), EMC(전자파 적합성)

#### Nomenclature

EMI : electromagnetic interference  
EMC : electromagnetic compatibility

BOP : balance of plant  
FECV : fuel cell electric vehicles  
HDPE : high density poly ethylene  
PVDF : polyvinyliden fluoride

<sup>†</sup>Corresponding author : choijh@hanyang.ac.kr

[ 접수일 : 2010.5.20 수정일 : 2010.6.9 게재확정일 : 2010.6.25 ]

## 1. 서 론

화석연료를 사용하면서 발생된 환경오염, 기후변화 지구 온난화 등의 환경 문제와 화석연료의 고갈에 따른 에너지 위기는 인류에게 신에너지 사회를 요구하고 있다. 이 변화의 중심에 서있는 자동차 산업은 미래 사회에 해법을 제시해야 할 위기에 놓여 있다<sup>1)</sup>. 이러한 입장에서 전문가 들은 자동차의 패러다임 변화가 가솔린/디젤 내연기관차로부터 내연기관-전지 하이브리드 차를 지나 연료 효율과 친환경성을 모두 만족 시킬 수 있는 수소를 연료로 사용하는 연료전지차로 흘러갈 것이라고 예측하고 있다. 이와 같은 예측에 따라 수소 연료전지 차량이 주목받고 있다<sup>2,3)</sup>.

수소 연료전지 차량은 수소와 산소의 전기화학 반응으로 만들어진 전기를 이용하여 모터를 구동시키는 자동차를 의미한다. 단위 연료전지(unit cell 또는 signal cell)가 일반적인 조건에서 0.6~0.7V의 출력전압을 갖는다. 자동차용 모터를 구동시키기 위해 필요한 수백 볼트의 고전압을 얻기 위해 수백 개의 단위전지를 직렬 연결된 것을 스택(stack)이라고 한다. 이와 같은 연료전지 스택의 효율적인 구동을 위해 BOP 시스템은 필수적이다. 그러나 이러한 BOP 시스템과 대전류/고전압의 사용으로 수소 연료전지 차량의 전자파적 특성은 일반적인 내연기관 자동차들과는 매우 다르다.

특히, BOP 시스템들은 여러 하위 시스템을 포함하고 있으며, BOP 시스템의 모든 하위 시스템들은 대전류/고전압 케이블로 서로 연결된다. 그러므로 스택 구동에 필수적인 BOP시스템의 하나인 하위 시스템은 케이블을 통해 BOP 시스템 내의 다른 하위 시스템 또는 구동 시스템에 치명적인 영향을 미칠 수가 있다. 또한 대전류를 사용하는 케이블의 경우에는 맥스웰 방정식의 암페어 법칙에 따라서 자기장의 방사가 매우 심하다. 그러므로 수소 연료전지 차량용 대전류/고전압 케이블에 대한 EMI분석을 통하여 수소 연료전지 차량의 필수 시스템인 BOP 시스템의 전자파적 안전성을 확보하는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 수소 연료전지 차량에 적용 중인

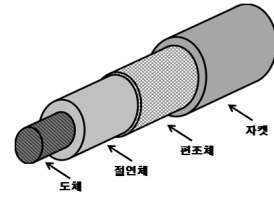


Fig. 1 Structure of high current/voltage cable for FCEV.

대전류/고전압 케이블의 사양들을 조사하여 정자기장과 시변자기장에 대하여 상용 전자기장 시뮬레이션 툴을 사용하여 수치해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

## 2. 시뮬레이션을 위한 고전압 자동차의 케이블 구조 및 입력 조건

수소 연료전지 차량에서 사용되는 대전류/고전압 케이블의 정자기장의 형성 및 세기를 구하기 위해 다음과 같은 방법으로 시뮬레이션 조건을 설정하였다.

현재의 수소 연료전지 차량의 전압은 항상 일정한 값을 갖지 않고 정확한 스펙이 결정이 되지 않았기 때문에 모든 대전류/고전압 케이블 구조에 사용 가능한 허용전류를 입력 값으로 주게 된다. 또한 이는 전압의 변화나 인버터 출력단 모터 구동시에 전류나 전압 값의 변화 까지 포함할 수 있다. 정확한 입력 값은 실측을 통해 도출해야 하지만 수소 연료전지 스택에서 나오는 전류를 측정하는 것은 전류의 변동과 측정의 표준화의 문제 등이 발생한다. 따라서 수소 연료전지 차량에서 사용되는 대전류/고전압 케이블 스펙에 나와 있는 허용전류 값으로 모사한다.

Fig. 1은 수소 연료전지 차량의 대전류/고전압 케이블의 구조를 나타낸다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 대전류/고전압 케이블은 일반 케이블과 달리 편조체를 사용한다. 이 편조체는 전기장 차폐를 위해 사용되며, 편조율에 따라 전기장 차폐 효과가 달라진다. 일반 자동차의 케이블에 비해 높은 입력(대전류/고전압) 값을 갖기

Table 1 Variable of structure and maximum current according to models in Fig. 1

모델	도체 단면적 (mm <sup>2</sup> )	절연체 두께 (mm)	편조체 두께 (mm <sup>2</sup> )	자켓 두께 (mm <sup>2</sup> )	허용 전류 (A)
A	3	0.25	0.1	1.15	130
B	5	0.3	0.1	1.15	250
C	50	0.25	0.1	1.15	420

때문에 대전류/고전압 케이블에서 편조체는 꼭 필요한 구조이다. 또한 대전류/고전압 케이블은 도체의 단면적이 일반 케이블에 비해 크다. 이는 고전압의 관점에서 보면 도체 단면적이 크면 저항 값을 낮출 수 있어 효과적인 에너지의 전달이 가능하기 때문이다. 또 하나 특이한 점은 대전류/고전압 케이블의 자켓은 오렌지색 계열이다. 이것은 고전압 케이블임을 나타내는 표식이며, 사용자, 혹은 정비공 등 감전에 대한 인체의 안전성을 위해 사용된다.

Table 1은 수소 연료전지 차량의 대전류/고전압 케이블의 모델별 구조 변수와 허용전류를 나타낸다.

고전압 케이블의 재질 조건은 Table 2와 같다.

Table 1과 Table 2를 시뮬레이션 반영하여 Fig. 2와 같이 설정된 0~160mm의 모니터링 라인을 설정하여 모니터링 거리에 따른 자기장의 세기를 보고자 한다.

### 3. 수소 연료 전지 차량의 고전압 케이블의 정자기장 해석 및 분석

#### 3.1 이론적 계산식에 의한 해석법

일반적으로 수소 연료전지 차량 시스템은 DC 전압을 사용하므로, 케이블의 고유한 특성을 확인하기 위해서 정자기장을 분석하였다. 일반적으로 도

Table 2 Material condition of high current/voltage cable

도체	copper
절연체	HDPE
편조체	tin
자켓	PVDF

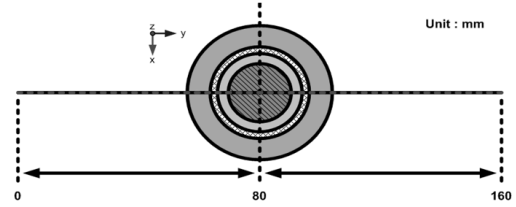


Fig. 2 Monitoring line for magnetostatic and time varying magnetic field of high current/voltage cable.

선에 전류가 흐를 때 정자기장의 계산은 식 (1)에 나타낸 것과 같이 맥스웰 방정식의 암페어 법칙을 이용한다. 즉, 전류분포가 대칭이고 전류를 둘러싼 주회적분로 상에서 선적분이 가능하도록 암페어 주회적분로(contours)를 선택할 수 있는 경우에 한하여 암페어 주회적분 법칙을 이용하여 자계 H를 구하는 것이 편리하다.

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (1)$$

$C_1$ 에 의한 면적을 통하여 흐르는 전류  $I_1$ 은 도선 전체 단면적에 대한  $C_1$ 으로 둘러싸인 면적의 비에 총 전류  $I$ 를 곱한 것으로 암페어 법칙의 양변을 같게 하여  $H_1$ 에 대하여 풀면 식 (2)와 같다.

$$H_1 = \hat{\phi} H_1 = \hat{\phi} \frac{r_1}{2\pi a^2} I \quad (r_1 \leq a \text{인 경우}) \quad (2)$$

또한,  $r_2 \geq a$ 에 대하여 총  $I$ 전류를 둘러싸는 주회적분 경로  $C_2$ 를 선정하여  $H_2$ 에 대하여 풀면 식 (3)과 같다.

$$H_2 = \hat{\phi} H_2 = \hat{\phi} \frac{I}{2\pi r_2} \quad (r_2 \geq a \text{인 경우}) \quad (3)$$

함수로서의 크기 변화는 Fig. 3(c)에 나타나 있다. 즉 정자기장 H는  $r=0$ 에서  $r=a$  까지 도체 내부에서는 선형으로 증가하고 도체 외부에서는  $1/r$ 로 감소한다.

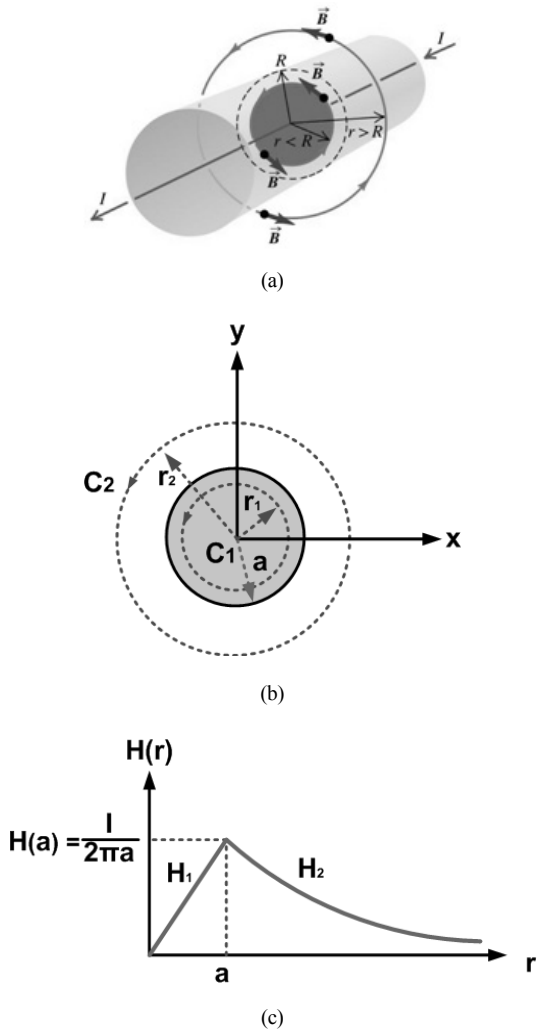


Fig. 3 Infinitely long wire of radius  $a$  carrying a uniform current  $I$  along the  $+z$ -direction: (a) general configuration, (b) cross-sectional showing contours  $C_1$  and  $C_2$ , and (c) a plot of  $H$  versus  $r$ .

### 3.2 수치해석에 의한 해석 결과 및 이론적 해석 결과와의 비교

수치해석 방법을 통하여 대전류/고전압 케이블의 정자기장 예측을 하기 위해서 상용 전자기 시뮬레이션 툴인 ANSYS사의 Maxwell(Ver. 12)를 이용하여 해석하였다<sup>4)</sup>. 모의실험을 통해 케이블로부터의 거리에 따른 정자기장의 특성을 예측하였으며, 이론적 해석방법을 이용한 결과와 비교하여 Fig.

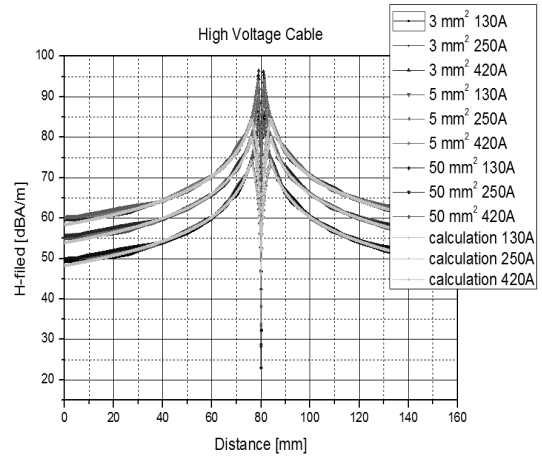
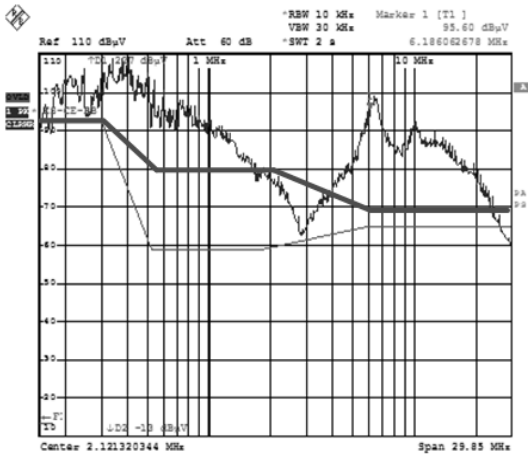


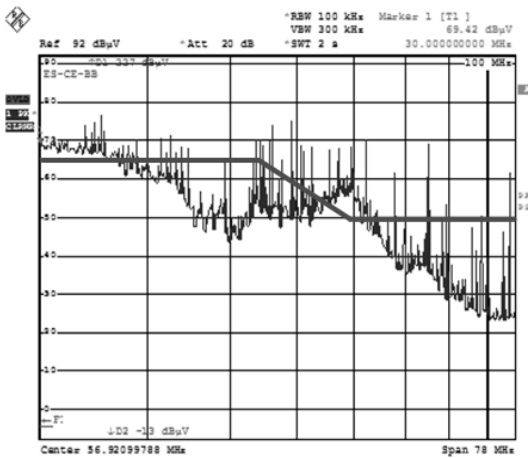
Fig. 4 The numerical analysis result of magnetostatic field according to currents and model of high current/voltage.

4에 나타내었다.

수치해석과 이론적 해석 결과로부터 최대 점에서 8dB, 거리  $r = 40\text{mm}$  이후에서 대전류/고전압 케이블의 단면적에 따라 2~3dB 정도의 차이가 나타난다. 또한 수치해석결과에서 입력전류 조건이 동일 할 경우 최대 점에서 단면적이 3mm<sup>2</sup>인 경우가 50mm<sup>2</sup>인 경우 보다 3dB가 크지만 거리  $r = 40\text{mm}$  이후에는 50mm<sup>2</sup>인 경우가 1~2dB가 더 크게 나타난다. 즉,  $r = 40\text{mm}$  이상인 경우에 단면적이 큰 경우가 상대적으로 자기장의 세기가 커지는 경향을 나타냈으며, 같은 크기의 단면적 조건에서는 입력전류용량이 따라서 4~7dB의 정자기장의 세기의 차이가 나타난다. 정자기장 세기의 변화 폭은 입력전류의 크기가 크면 클수록 커진다는 것을 확인할 수 있다. 수치해석 결과로부터 대전류/고전압 케이블의 거리에 따른 자기장의 세기는 일반케이블과는 달리 단순한 1D 또는 2D해석으로 예측하기 힘들다는 결론을 내릴 수 있다. 즉, 대전류/고전압 케이블 설치 시에 이격 거리를 고려 할 때 단순히 일반 케이블의 이격거리 가이드라인이나 대전류/고전압의 입력전류의 크기만을 고려해서는 안 된다는 것이다. 즉 대전류/고전압 케이블의 경우에는 입력전류에 따른 3D구조 해석(단면적, 편조체 등 전체적인 케이블의 구조를 고려)을 통해 정확한 자기장의 세



(a)



(b)

Fig. 5 The measured CE of driving inverter: (a) 150 kHz~30 MHz, (b) 30 MHz~108 MHz.

기를 도출하여 결정해야 한다.

#### 4. 수소 연료전지 차량의 고전압 케이블의 시변자기장 해석 및 분석

일반적으로 수소 연료전지 차량의 전압과 전류는 드라이빙 모터를 위한 3상의 전원 라인을 빼고는 모두 이상적으로 DC이다. 하지만, Fig. 5에 나타낸 것과 같이 수소 연료전지 차량에 사용 되는 구동용 인버터의 전도성 노이즈(conducted emission)의 측정

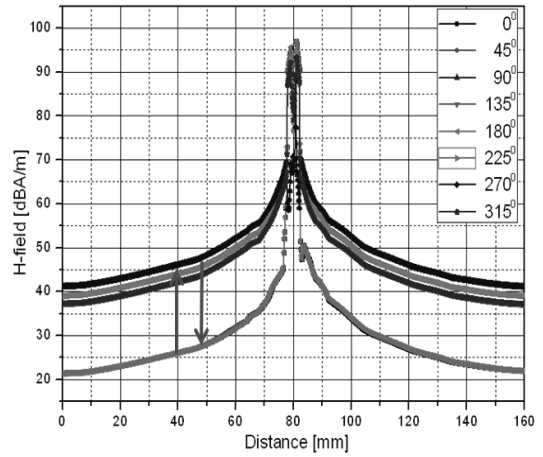


Fig. 6 Time varying magnetic field of model-A as following phase at 150 kHz and 420 A.

결과, 150kHz~108MHz중 1.8~5MHz, 45~53MHz의 경우만 전도성 노이즈를 제한을 만족하였으나, 다른 주파수 영역에서는 최소 2dB에서 최대 30dB 이상 전도성 노이즈 제한을 초과하였다. 또한 측정 주파수 영역에서 노이즈 초과뿐만 아니라 측정 전압의 주파수 성분들이 전 대역에 걸쳐 나타났다. 즉, 수소 연료전지 차량에서 사용되는 인버터에서 IGBT 스위칭시 발생하는 기본주파수와 그 고조파 성분들이 대전류/고전압 케이블에 유기 된다<sup>5)</sup>. 그러므로 그 고조파 성분들에 의한 자기장을 예측하기 위해서는 시변 자기장을 해석해야 한다.

Fig. 6은 Table 1에 있는 모델-A에 150KHz 주파수, 420A 전류를 인가했을때, 케이블의 각 위상별 자기장 세기를 수치 해석한 결과이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 위상이 0°인 경우에는 DC와 같지만 다른 위상에서는 자기장의 세기가 변화하는 것을 알 수 있다. 위상이란 결국 시간에 의해서 변화하게 되는데 그 시간에 따른 자기장 세기의 변화 폭이 크면 클수록 암페어 법칙에 의해서 전자기장에 대한 간섭이 커진다. 모델-A 케이블의 경우에는 위상이 0°인 경우와 최대의 변화 위상인 180°인 경우에 20dB 차가 나타난다. 모델-A 경우에는 도체의 단면적이 작기 때문에 비교적 큰 폭의 변화는 나타나지는 않았다.

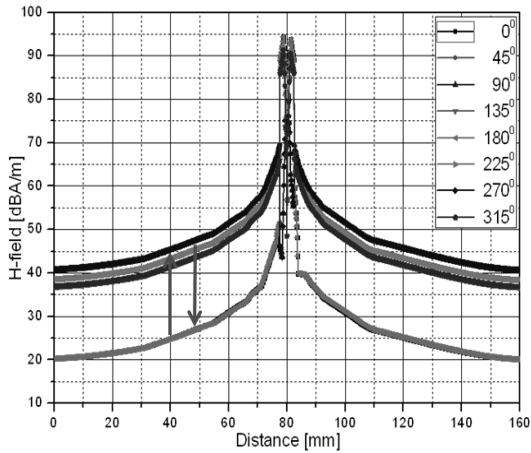


Fig. 7 Time varying magnetic field of model-B as following phase at 150 kHz and 420 A.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건으로 케이블 모델-B에 대한 각 위상별 자기장 세기를 수치 해석한 결과이다. 모델-A와 케이블 단면적의 크기가 거의 차이가 나지 않기 때문에 최대 차이가 나타나는 0°와 180°에서 21dB의 차의 변화 폭이 나타났으며 Fig. 6과 큰 차이를 보이지 않는다.

하지만 모델-A와 B의 경우에는 수소 연료전지 차량의 대전류/고전압 케이블 라우팅 중에서도 비교적 용량이 작은 시스템의 전원을 위해서만 사용

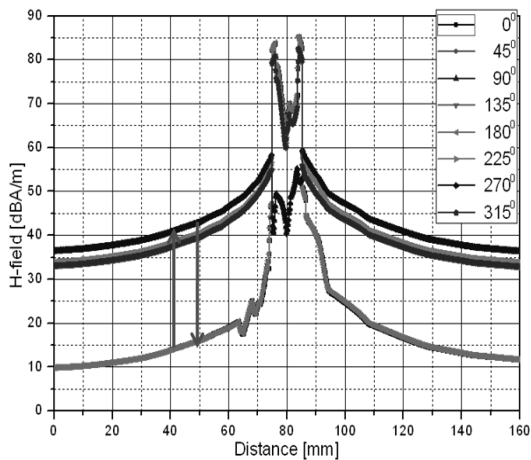


Fig. 8 Time varying magnetic field of model-C as following phase at 150 kHz and 420 A.

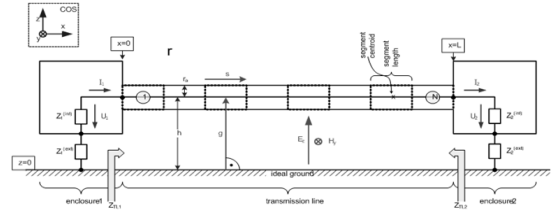


Fig. 9 Analysis variable factors between cable and ground plane.

이 되고 있다. 대부분의 대전류/고전압 케이블 라우팅에는 모델-C가 사용된다.

Fig. 8은 모델-A, B와 동일 조건을 인가한 케이블 모델-C의 각 위상별 자기장 세기를 수치 해석한 결과이다. Fig. 8에서의 결과는 모델-A와 B의 경우와는 매우 다른 결과를 나타내는데, 이는 단면적의 크기가 자기장의 세기에 절대적인 영향을 미치지 않기 때문이다. 여기서 세기의 불연속점이 나타난 이유는 자기장 세기의 변화가 위상에 따라 급변하기 때문이다. 또한 다른 모델과 비교했을 때 위상에 따른 자기장의 변화가 상당히 크다. 특히 위상이 90°와 180°의 경우에 시변 자기장 세기의 변화가 크다. 위상이 0°일 때와 약 28dB의 큰 변화가 나타나며, 모델-A, B와는 7~8dB 정도의 변화 폭의 차이가 나타난다. 이러한 현상은 결국 압폐어 범칙에서 전기장을 유도하며, 이 유도된 전기장은 수소 연료전지 차량의 BOP 시스템뿐만 아니라 수소 연료전지 차량 전체 시스템의 전자기장에 큰 영향을 준다. 안테나 이론에 의해서 모델-C 케이블은 안테나 구조로 설명할 수 있는데 전자기파를 잘 방사하는 구조는 역으로 전자기파를 잘 받아들이는 구조로도 해석할 수 있다. 즉 이러한 큰 폭으로 변화하는 자기장의 방사는 같은 크기의 자기장에 영향을 받아 에너지의 간섭이 생길 수 있다. 이 간섭으로 fail-safety 문제인 BOP 시스템 또는 전체 시스템의 오동작을 유발할 수 있다.

모든 종류의 케이블들은 접지 조건 혹은 접지면 효과에 의해서 전자기장 특성이 달라진다. Fig. 9에서와 같이 케이블과 접지 면사이의 간격에 따라 전기장과 자기장이 영향이 변화하게 된다. 또한 케이

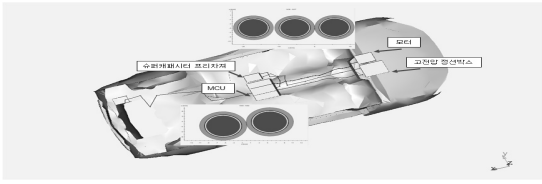


Fig. 10 Applied high current/voltage cable routing for fuel cell electric vehicle.

불의 종류와 차폐조건에 따라서도 전자기장이 변화한다. 이러한 변화는 임피던스의 관점으로 해석될 수 있다. 즉, 접지면 효과에 따른 임피던스 값에 영향을 미치는 성분은 기생 커패시턴스 값과 인덕턴스 값이다. 이 인자들은 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 계산할 수 있다.

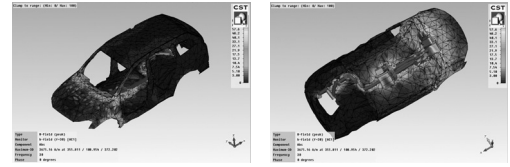
$$C' = \frac{C}{\ell} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{2h_{eff}}{r_a}\right)} \quad (4)$$

$$L' = \frac{L}{\ell} = \frac{\epsilon\mu_0\ell}{C} = \frac{1}{2\pi} \cdot \mu_0 \cdot \ln\left(\frac{2h_{eff}}{r_a}\right) \quad (5)$$

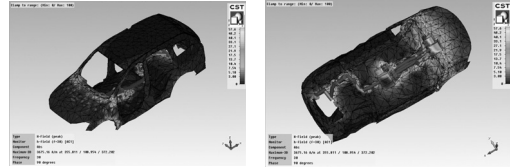
대전류/고전압 케이블 또한 이와 같은 케이블의 한 종류로써 접지면에 의해서 영향을 받고 혹은 영향을 줄 것이다. 더욱이 수소연료전지 차량과 같이 대전류/고전압을 사용하는 경우 그 영향이 더 크다.

대전류/고전압 케이블의 전류 용량 변화에 따른 차체의 유도 전자계 시뮬레이션은 CST사의 Microwave studio Ver. 2010을 사용하여 분석하였다<sup>6)</sup>. 접지면에 의한 전자기장 해석을 하기 위해서 현재 적용되는 수소 연료전지 차량의 케이블 라우팅을 수치해석에 사용하였으며, 그 구조를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 MCU와 모터 사이에 대전류/고전압 케이블은 3상의 입력으로 모델링하였으며, 3상 라인에는 서로 다른 위상을 입력하였다. MCU와 모터사이의 대전류/고전압 케이블을 제외하고는 설치된 대전류/고전압 케이블은 +, -로서 두 개의 케이블 번들로 설치하였다.

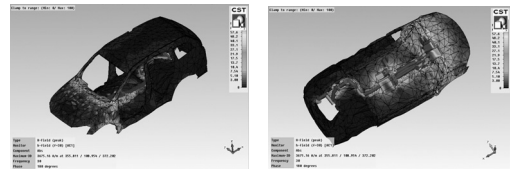
Fig. 11과 12는 대전류/고전압 케이블에 의해 수



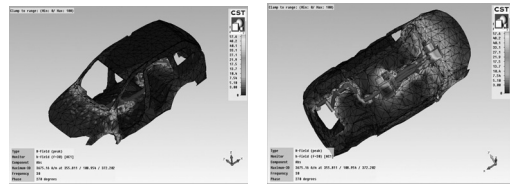
(a) phase 0°



(b) phase 90°



(c) phase 180°



(d) phase 270°

Fig. 11 Time varying magnetic field distribution coupled to chassis of FCEV at 30 MHz.

소 연료전지 차량 차체에 유기되는 시변 자기장과 시변 전기장을 위상에 따라 각각 나타내었다.

Fig. 11의 결과에서 편조체를 사용했음에도 불구하고 차량 차체에 많은 핫 스팟들이 존재함을 확인할 수 있다. 이 핫스팟들은 차량 차체 접지의 무결성에 나쁜 영향을 줄 수 있으며, Fig. 12에 보인 것과 같이 전기장을 유도하게 된다. 이와 같이 유기된 전자기장이 EMI에 얼마나 영향을 미치는지를 분석하기 위해서 표준문서에 명시되어 있는 차량 EMI를 측정하는 시험 방법과 동일한 방법으로 수치해석 하였다. 이때 기준 안테나의 거리는 10m로 설정하였다.

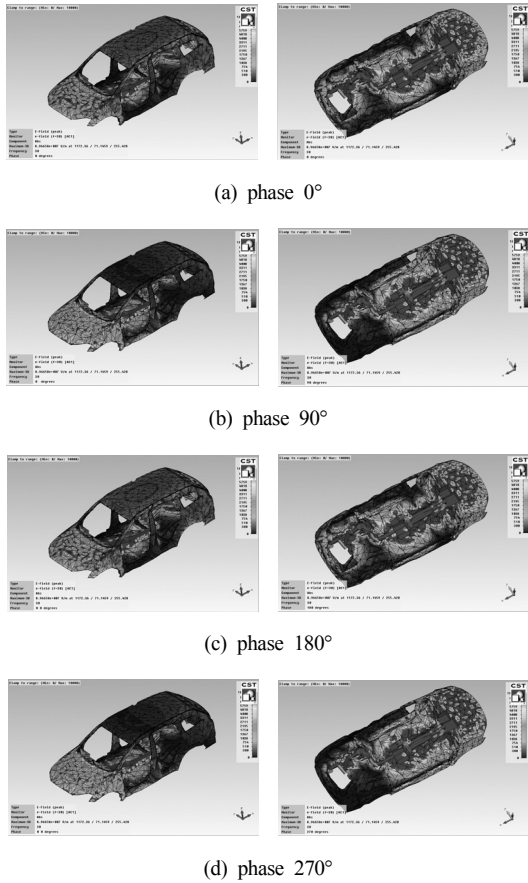


Fig. 12 Time varying electric field distribution coupled to chassis of FCEV at 30 MHz

Fig. 13은 일반 자동차에 적용되고 있는 일반 케이블과 수소 연료전지 차량에 사용되는 대전류/고전압 케이블이 라우팅된 차량 샤시에서 방사되는 EMI의 레벨을 나타내고 있다. Fig. 13에서 주파수에 따라 최대 14.5dB(30MHz에서), 최소 2.8dB(230 MHz에서)의 차이가 나타난다. 일반 케이블의 경우, 대전류/고전압 케이블에 비해 상대적으로 단면적이 작고 적은 크기의 전류원을 사용하므로 상대적으로 낮은 EMI 레벨을 나타낸다. 즉, 시간에 따른 위상의 변화가 큰 경우는 전자기장의 방사 레벨이 크며, 차량에 유기되는 전자기장 또한 시간에 따른 위상의 변화가 크다. 결국 이러한 영향은 최종적으로 EMI 레벨을 높게 된다.

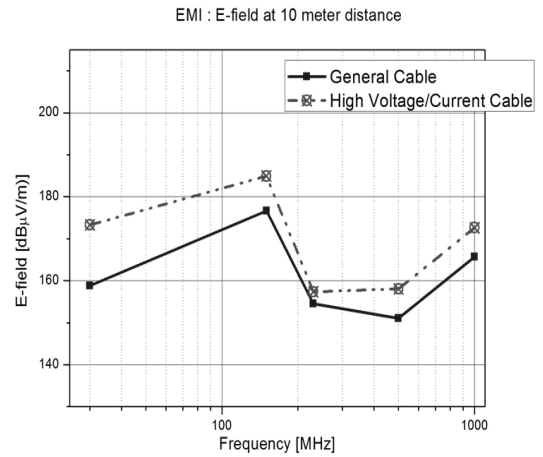


Fig. 13 The numerical analysis result of EMI for high current/voltage cable and general cable.

이러한 수치해석 결과들을 통해 충분히 수소 연료전지 차량의 EMI 레벨을 예측 할 수 있었다. 또한 대전류/고전압 케이블의 전자기장 차폐제 사용의 중요성과 접지면 효과를 고려한 대전류/고전압 케이블 라우팅의 중요성을 확인 할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 수소 연료전지 차량에 사용되는 대전류/고전압 케이블의 정자기장과 시변전자기장의 세기를 수치해석을 통해 분석하였다.

- 1) 대전류/고전압 케이블의 정자기장 해석; 수치해석 결과와 이론적 해석에서 최대 점에서 8dB, 입력전류 조건이 동일 할 경우 최대 점에서 단면적에 따라 1~3dB 차가 나타났다. 또한 같은 크기의 단면적 조건에서는 입력 전류용량이 따라서 4~7dB의 정자기장의 세기의 차이가 나타난다.
- 2) 대전류/고전압 케이블의 시변전자기장 해석; 모델-A 케이블의 경우에는 위상이 0°인 경우와 최대의 변화 위상인 180°인 경우에 20dB 차가 나타난다. 모델-B의 경우는 모델-A와 케이블 단면적의 크기가 거의 차이가 나지 않기 때문에 최대 차이가 나타나는 0°와 180°에서 21dB의 차



의 변화 폭이 나타났다. 모델-C는 위상이 90°와 180°의 경우 다른 모델의 경우보다 시변 자기장 세기의 변화가 크며, 위상이 0°일 때와 약 28dB의 큰 변화가 있었다. 이 유도된 전기장은 수소 연료전지 차량의 BOP 시스템뿐만 아니라 수소 연료전지 차량 전체 시스템의 전자기장에 큰 영향을 준다.

- 3) 접지면을 고려한 케이블에 의한 시변전자기장 해석; 일반 케이블과 비교할 때 주파수에 따라 최대 14.5dB(30MHz에서), 최소 2.8dB(230MHz에서)의 차이가 나타났으며, 이러한 원인은 시간에 따른 위상의 변화가 큰 경우는 전자기장의 방사 레벨이 크며, 차량에 유기되는 전자기장 또한 시간에 따른 위상의 변화가 크기 때문이다.

수치해석 결과로 부터 수소 연료전지 차량에서 대전류/고전압 케이블 주변은 자기장에 쉽게 노출됨을 알 수 있으며, 케이블 라우팅과 부품들의 배치를 위해서는 대전류/고전압 케이블의 전기장 차폐뿐만 아니라 매우 취약한 자기장의 차폐도 중요함을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구

비지원(07교통체계-미래02)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 1) 박노언, 김형욱, “수소·연료전지 연구개발 투자현황 분석”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 21, No. 2, 2010, pp. 143-148.
- 2) 장규진, 최영민, 김상현, 안병기, 임태원 “연료전지자동차의 고압수소저장 시스템 신뢰성 평가”, 2008 한국자동차공학회 창립 30주년 기념 학술대회 논문집 서울, 2008, pp. 1982-1987.
- 3) Karl-Heinz Hauer, “Analysis Tool for Fuel Cell Vehicle Hardware and Software(Controls) with an Application to Fuel Economy Comparisons of Alternative System Designs”, University of California Davis, Transportation Technology and Policy, 2001.
- 4) Maxwell Ver. 12 ANSYS Inc.
- 5) Bo Zhang, Shaofeng Yu Wei Li, Yong Huang, and Jinliang He, “Investigation of Conducted Disturbance from Driving system in Fuel Cell Bus”, Zurich Symposium on EMC, Munich, 2007.
- 6) CST-Microwave Studio and cable mode, Ver. 2010, Computer Simulation Technology.