전자파의 집중도를 이용한 바이모달 트램의 전자파 차폐 성능 분석

논 문
60-7-13

Analysis of Electromagnetic Shielding Performance for a BiMODAL Tram using an Electromagnetic Concentration Index

최 낙 선* · 정 기 우* · 김 남 경* · 송 명 곤** · 이 강 원*** · 목 재 균§ · 김 동 훈†
(Nak-Sun Choi · Gi-Woo Jeung · Nam-Kyung Kim · Myung Kon Song · Kang-Won Lee ·
Jai-Kyun Mok · Dong-Hun Kim)

Abstract - In this paper, the electromagnetic shielding performance of a BiMODAL Tram is investigated by means of an electromagnetic analysis tool, called HFSS. For the purposed of doing this, first, three-dimensional finite element modeling for the tram including electronic devices and engine room is carried out. Then, for quantitatively assessing the electromagnetic shielding performance of the tram's body, concentration indexes for electric field magnitude and time-average stored electric energy are introduced. From numerical results, it is inferred that the tram's body can protect the electronic devices and engine room against external electromagnetic waves from 30 MHz to 100 MHz.

Key Words : Electromagnetic shielding, Finite element method, Electromagnetic interference

1. 서 론

첨단 산업 전자기술의 발달로 전자파의 상호 간섭은 다른 전자 기기의 오작동을 초래하고 인체에 여러 가지 악영향을 미치는 등 많은 문제점을 초래하고 있다. 더욱이 제 4의 공해라고도 불리는 전자파는 사람이 인지하지 못하므로 그 위험의 심각성이 더하다. 전자파 위험에 대한 사회적 인식의 증대와 더불어 전자파의 흡수 및 반사 특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-4].

최근 세계적으로 중소 도시의 증가하는 교통 수요에 대응하기 위해 건설비용과 운영 측면에서 불리한 지하철보다 경제적이고 친환경적인 경량 전철이 새로운 대안으로 주목받고 있다. 경량 전철은 버스과 지하철의 중간정도 수송능력을 가지는 새로운 교통시스템으로 유인 또는 무인 운전이 가능한 분야별 기술이 축적된 첨단 철도 시스템이다. 이런 경량 전철의 경우, 전자 장비들의 집적화 경향이 뚜렷하고 빠른 속도로 움직이며 많은 인원을 수송하기 때문에 외부 전자파에 의한 차량 시스템의 고장은 필연적으로 수많은 인명 피해와 직결된다. 이런 내재된 위험요소로 인하여 외국에서는 많은 연구가 수행되고 있으며, 전자파 분야의 안전 관련 규격을 결정하여 경량 전철에 적용하고 있다[5].

국내의 경우 정부에서 민간사업자의 참여를 적극 유치한 결과 경량 전철은 정부의 친환경적이며 안전한 교통시스템

시범사업으로 성공리에 추진되고 있다[6]. 바이모달 트램(BiMODAL Tram)은 이런 시범사업 중에 하나로써 버스의 유연성, 철도의 정시성과 친환경성을 결합한 경량 전철이다. 본 논문은 바이모달 트램을 성공적으로 도입하기 위한 기초 연구의 일환으로 차체에 의한 외부 전자파의 차량 내부 분포를 상용 해석 도구인 Ansoft사의 HFSS를 이용하여 확인하였다. 이를 통하여 경량 전철의 전자장비 위치와 엔진실 위치에서 전자파에 대한 차폐 성능을 전계 크기 및 전계 에너지 집중도 지수를 정의하여 분석하였다[7].

2. 바이모달 트램 해석 환경

일반적인 차량의 경우 전자파 상호 간섭에 관련된 실험은 그림 1과 같이 차량을 회전시켜 전자파를 측정하게 된다[8,9]. 하지만 경량 전철의 경우 일반 차량에 비해 차체가 매우 크며, 이를 위한 장비를 구축하기 위해서는 고가의 설치비용이 소요된다. 이런 고가의 장비를 이용한 측정 실험을 대신하기 위해 바이모달 트램에 대한 전자파 유한 요소 해석을 수행하여 전자기적 교란 특성을 확인하였다.

그림 1 일반 차량 전파 특성 실험
Fig. 1 Whole vehicle radiated susceptibility test.

* 정 회 원 : 경북대학교 전기공학과 박사과정
** 정 회 원 : 벡터필드코리아(주) 연구소장
*** 정 회 원 : 한국철도기술연구원 선임연구원
§ 비 회 원 : 한국철도기술연구원 책임연구원
† 교신저자, 정회원 : 경북대학교 전기공학과 부교수 · 공박
E-mail : dh29kim@ee.knu.ac.kr

접수일자 : 2011년 1월 25일
최종완료 : 2011년 6월 7일

바이모달 트램의 전체적인 형상은 그림 2와 같다. 바이모달 트램의 유한 요소 해석은 외부 전자기파의 입사 조건에 따라 세 가지 경우를 고려하였다. 즉, 차체 정면, 차체 후면, 차체 측면에서 각각 전자기파가 입사하는 조건들이다. 입사파로는 1 V/m 전계 크기를 갖는 평면파를 사용하였으며, 분극 방향이 차체에 수직인 경우와 수평인 경우 두 가지 경우를 해석하였다. 본 논문에서는 30 MHz에서 100 MHz 사이의 전자파 교란 특성을 파악하기 위해 수치해석은 30 MHz, 50 MHz, 80 MHz, 100 MHz에서 수행 하였다. 또한 일반적인 공간에서 전자기파가 전달되는 현상을 모사하기 위하여 해석 공간의 경계면에서 완전방사를 일으키는 경계 조건을 적용하였다. 그림 3은 구축된 바이모달 트램의 유한 요소 모델과 전자장비 및 엔진실 위치를 나타낸다. 해석에 고려된 차체 이외의 두 부분은 전자기 부품들이 집적되어 있어 전자기적 간섭의 관점에서 매우 중요한 요소이다.

차량 내부의 중요 장비에 대한 전자기 간섭효과는 입사파에 따른 각 장비 위치에서의 전계 크기와 에너지를 계산하여 입사파를 기준으로 전계가 집중되는 비율로 판정하였다. 따라서 본 논문에서는 전계의 집중 정도를 이용하여 외부 입사파에 대한 바이모달 트램의 전자기 부품들의 안전성을 예측한다. 바이모달 트램의 유한 요소 모델 구축 시 전계에 영향을 미치지 않는 재질 부분은 모두 생략하여 모델링 작업의 간소화와 더불어 해석시간 단축을 도모하였다.

그림 2 바이모달 트램 형상
Fig. 2 Configuration of the BiMODAL Tram.

그림 3 바이모달 트램 유한 요소 모델과 전자장비 위치 및 엔진실 위치
Fig. 3 Finite element model of the BiMODAL Tram including electronic devices and engine room.

그림 4는 외부 전자기파가 입사하는 조건 중 하나인 차체 정면에서 전자기파가 입사하는 조건을 나타낸다. 입사 조건에 따른 해석 환경은 표 1에 자세히 나타내었다. 각 해석 조건에서 차체 유무에 따른 전자장비 위치와 엔진실 위치에서 전계분포 및 전계 에너지를 계산하여 차체가 이 두 위치의 전자기 장비들을 외부 입사파로부터 얼마나 보호할 수 있는지를 확인하였다.

그림 4 차체 정면에서 입사하는 전자파
Fig. 4 Incidence wave in front of the tram.

표 1 입사 조건에 따른 해석 환경

Table 1 Analysis depending on incidence conditions.

해석 환경		입사위치	입사크기	분극방향
해석환경1	분극1	정면	1 V/m	상하
	분극2	정면	1 V/m	좌우
해석환경2	분극1	후면	1 V/m	상하
	분극2	후면	1 V/m	좌우
해석환경3	분극1	측면	1 V/m	상하
	분극2	측면	1 V/m	좌우

3. 해석 결과

본 장에서는 입사 조건에 따른 전계 크기와 에너지를 비교하여 그림 3에 표현된 중요 위치에서의 입사파 집중 정도를 확인하였다.

3.1 전계 크기와 전계 에너지의 집중도

본 절에서는 전계와 전계 에너지의 집중 정도를 표현하기 위해 몇 개의 새로운 변수를 정의한다. 전계의 집중 정도는 입사되는 입사파의 크기와 해당 지점에 대한 전계의 크기의 비율로 식 (1)과 같다.

$$CR_E = \frac{|\tilde{E}_{total}|}{|\tilde{E}_{inci}|} \times 100 [\%] \quad (1)$$

여기서 CR_E 는 전계 집중도를 표현하며, E_{total} 과 E_{inci} 는 각각 해당 지점의 전계 크기와 입사파의 크기를 나타낸다. 만약 집중도가 100%보다 작다면 입사파는 감쇄된 것이므로 집중도를 이용하여 전계 감쇄율 SR_E 를 식 (2)와 같이 정의한다.

$$SR_E = 100 - CR_E \quad (2)$$

또한 전계 에너지를 이용한 집중도와 감쇄율을 정의하기 위해 식 (3)을 사용하여 해당 영역의 전계 에너지를 계산한다 [10]. 또한 전계 에너지 집중도와 감쇄율을 각각 식 (4)와 식 (5)와 같이 정의 하였다.

$$W = \frac{\epsilon}{4} \int_V \tilde{E} \cdot \tilde{E}^* dv \quad (3)$$

$$CR_{EE} = \frac{W_E}{W_{inci}} \times 100 [\%] \quad (4)$$

$$SR_{EE} = 100 - CR_{EE} \quad (5)$$

여기서 CR_{EE} 와 SR_{EE} 는 각각 전계 에너지 집중도와 감쇄율을 나타낸다. 또한 W_E 는 전체 전계에 대한 해당 영역의 전계 에너지를 나타내며 W_{inci} 는 입사파에 대한 해당 영역의 전계 에너지를 나타낸다.

위에서 정의된 집중도와 감쇄율은 식 (6)과 같은 의미를 가진다.

$$\begin{array}{ll} \text{Concentration} & CR_E \geq 100 \\ & CR_{EE} \geq 100 \\ & SR_E < 0 \\ & SR_{EE} < 0 \\ \\ \text{Shielding} & CR_E < 100 \\ & CR_{EE} < 100 \\ & SR_E > 0 \\ & SR_{EE} > 0 \end{array} \quad (6)$$

3.2 해석 환경별 전계 집중도 분석

해석 환경별 전계 크기 분석은 차체 바닥으로부터 1 m 높이에서의 크기를 분석하였다. 그림 5는 해석 환경 1에서 분극별, 위치별, 주파수별 전자장비 위치의 전계 집중도를 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 전자장비 위치는 분극 방향과 주파수에 상관없이 전계 집중도가 20% 이내로 식 (2)에 의해 입사파 크기의 80% 이상이 감쇄된다. 즉 차체 정면에서 전자파가 입사할 경우, 전자 장비 위치는 외부 전자파로부터 보호된다. 그림 6은 해석 환경 1에서 분극별, 위치별, 주파수별 엔진실 위치의 전계 집중도를 나타낸다. 엔진실 위치도 전계 집중도가 40% 이내로 전계 감쇄율이 60% 이상이다. 식 (6)에서 정의된 것처럼 차체 정면에서 입사되는 전자파는 바이모달 차체에 의해 그림 3에 표현된 두 중요 장비 위치에서 모두 감쇄됨을 확인하였다.

(a) 분극1

(b) 분극2

그림 5 해석 환경 1의 경우 전자장비 위치 전계 집중도
Fig. 5 Concentration ratio of electric field intensity in the electronic device in case of analysis 1.

(a) 분극1

(b) 분극2

그림 6 해석 환경 1의 경우 엔진실 위치 전계 집중도
Fig. 6 Concentration ratio of electric field intensity in the engine room in case of analysis 1.

그림 7과 그림 8은 각각 해석 환경 2와 해석 환경 3인 경우 전자장비 위치의 전계 집중도를 나타낸 그림으로서 전계 집중도가 해석 환경 1의 경우와 유사하게 분극 방향과 주파수에 상관없이 20% 이내를 유지하여 외부에서 입사되는 전자파가 차체에 의해 차폐된다. 그러므로 전자장비 위치의 전계 집중도는 표 1의 모든 해석 환경에서 입사파의 크기가 80% 이상 감쇄된다.

그림 9는 해석 환경 2인 경우 엔진실 위치의 전계 집중도를 보여준다. 그림에서 보듯이 분극 2의 경우 전계 집중도가 20% 이내이다. 하지만 분극 1의 경우 해석 주파수 대역에서 전계 집중도가 100% 미만으로 전자파가 집중 되진 않지만 해석 환경 1에 비해 전체적으로 큰 전계가 분포하며, 100 MHz의 입사파는 전계 집중도가 약 100%인 영역이 존재한다. 즉 해석 환경 2에서 입사파가 분극 1, 100 MHz인 경우 전계가 부분적으로 집중된다. 이 부분은 다음 절에서 전계 에너지 집중도의 관점으로 다시 검토한다.

그림 10은 해석 환경 3인 경우 엔진실 위치의 전계 집중도를 나타낸다. 그림 10(a)를 보면 분극 1, 100 MHz의 입사파 경우, 엔진실 위치는 부분적으로 전자파의 크기가 150% 정도로 집중됨을 확인하였다. 이 부분 역시 다음 절에서 전계 에너지 집중도의 관점으로 재해석 한다.

이와 같은 전계의 분포는 차체 바닥에서 1 m 높이의 한 면에서 고려한 것으로 주요 요소의 전체에 전자파가 집중된다고 말할 수 없다. 그러므로 전자장비 위치와 엔진실 위치의 전체 영역에 대한 전계 에너지 분석에 대한 에너지 집중도를 확인할 필요가 있다.

(a) 분극1

(b) 분극2

그림 7 해석 환경 2의 경우 전자장비 위치 전계 집중도
Fig. 7 Concentration ratio of electric field intensity in the electronic device in case of analysis 2.

(a) 분극1

(b) 분극2

그림 8 해석 환경 3의 경우 전자장비 위치 전계 집중도
Fig. 8 Concentration ratio of electric field intensity in the electronic device in case of analysis 3.

(a) 분극1

(b) 분극2

그림 9 해석 환경 2의 경우 엔진실 위치 전계 집중도
Fig. 9 Concentration ratio of electric field intensity in the engine room in case of analysis 2.

(a) 분극1

(b) 분극2

그림 10 해석 환경 3의 경우 엔진실 위치 전계 집중도

Fig. 10 Concentration ratio of electric field intensity in the engine room in case of analysis 3.

3.3 해석 환경별 전계 에너지 집중도 분석

본 절에서는 전계 크기 분석 이외에 전자장비 위치와 엔진실 위치의 공간에 대한 전계 에너지를 분석하여 전자파의 집중 정도를 파악하였다. 전계 에너지는 전자장비 위치와 엔진실 위치에 각 부분과 동일한 크기의 가상의 공기 박스를 추가하여 공기 박스 내의 전계를 이용하여 계산하였다. 식 (4)에 정의된 것과 같이 전계 에너지 집중도는 차체가 없을 때 입사파에 의한 동일 위치와 동일 크기의 공기 박스 내의 전계 에너지와 차체가 있을 때의 전계 에너지를 비교하여 계산하였다. 차체가 없을 때 전자장비 위치의 전계 에너지와 엔진실 위치의 전계 에너지는 각각 6.28×10^{-13} J과 1.05×10^{-11} J이다.

그림 11부터 그림 13까지는 각 해석 환경별 주파수에 따른 전자장비 위치와 엔진실 위치의 전계 에너지 집중도를 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 전계 에너지 집중도는 최대가 68.54%로 모든 조건에서 100% 미만으로 판명되었다. 또한 전계 크기 집중도에서 부분적으로 전계 집중 현상이 나타났던 해석 환경 2의 분극1, 100 MHz 경우와 해석 환경 3의 분극1, 100 MHz 경우 모두 전계 에너지 집중도가 100% 미만으로 식 (6)에서 정의한 전계 에너지 관점에서 외부 전자파가 차폐되는 것을 확인하였다.

전자기적 간섭 현상에 대한 전자소자 및 장비의 안전과 위협의 경계를 이런 집중도의 크기로 정하는 것은 현실적으

로 불가능하다. 그러나 전계 집중 정도를 파악함으로써 각 중요 요소들에 대한 상대적인 비교를 가능하게 한다는데 의미가 있으며 집중도가 100% 미만이란 것은 식 (2)와 식 (5)에 의해 차체에 의한 차폐가 이루어지는 것으로 차폐 정도를 정량적으로 파악할 수도 있다. 전체적으로 엔진실이 전자장비 위치보다 집중의 정도가 심함을 확인 하였으나 전계 에너지의 관점에서 그 집중도가 모든 경우 100% 미만으로 입사되는 전자파가 전반적으로 차폐가 됨을 확인하였다.

그림 11 해석 환경 1의 경우 전계 에너지 집중도

Fig. 11 Concentration ratio of electric energy in the engine room in case of analysis 1.

그림 12 해석 환경 2의 경우 전계 에너지 집중도

Fig. 12 Concentration ratio of electric energy in the engine room in case of analysis 2.

그림 13 해석 환경 3의 경우 전계 에너지 집중도

Fig. 13 Concentration ratio of electric energy in the engine room in case of analysis 3.

4. 결 론

본 논문에서는 바이모달 트램의 전자기 간섭 정도를 파악하기 위해 전계 및 전계 에너지의 집중도를 정의하였고 유한 요소 기법을 도입하여 바이모달 트램의 유한 요소 모델을 구축하였다. 구축된 유한 요소 모델을 이용하여 각 외부 입사 전자파로부터 전자기 간섭에 민감한 위치의 전계 및 전계 에너지의 집중도를 계산하였다. 전계 및 전계 에너지 집중도를 파악한 결과, 바이모달 트램의 전자장비 위치와 엔진실 위치에서 관심 주파수 대역에서 전반적으로 차폐에 의한 외부 전자파가 차폐됨을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행하는 2009년도 교통체계효율화사업의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] 김덕원, "전자파공해," 수문사, 1996.
- [2] M. K. Alsliety and D. N. Aloï, "A study of the radiation pattern of a GPS antenna on several vehicle platforms", IEEE EIT., vol. 20, pp. 1 - 5, May 2007.
- [3] Ruddle. A. R, Ferrieres. X, Parmantier. J. -P, Ward. D. D, "Experimental validation of time-domain electromagnetic models for field coupling into the interior of a vehicle from a nearby broadband antenna", IEE Proceedings Science, Measurement and Technology, vol. 151, No. 6, pp.430, Nov. 2004.
- [4] E.R. Adair and R.C. Petersen, "Biological effects of radiofrequency/microwave radiation", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 50, No. 3, 2002.
- [5] 남두희, "경량전철시스템의 적용기술 및 국내의 시장현황", 철도저널 제12권 제1호, pp.26-30, Feb. 2009.
- [6] 이안호, "국내 경량전철 추진 방향", 대한토목학회논문집 246, pp. 15-20, Oct. 2000.
- [7] HFSS user manual, Ansoft Korea, 2006.
- [8] Price. k, "Test methods for whole vehicle radiated susceptibility", IEE Colloquium on Vehicle Electromagnetic Compatibility, pp. 3/1-3/3, March 1988.
- [9] Wiles, M., "The automotive EMC test chambers at General Motors, Milford, Michigan, USA", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, vol. 1, pp. 51-54, May 2003.
- [10] Bhag Guru and Hüseyin Hiziroğlu, Electromagnetic Field Theory Fundamentals, CAMBRIDGE, 2004.

저 자 소 개

최 낙 선 (崔 洛 善)

1979년 2월 15일생
2006년 경북대 전자전기컴퓨터학부 졸업
2009년 동 대학원 전자전기컴퓨터학부 졸업(공학석사)
2010년~현재 동 대학원 경북대 전자전기컴퓨터학부 박사과정
E-mail : nschoi@knu.ac.kr

정 기 우 (鄭 起 宇)

1979년 7월 11일생
2005년 경북대 전자전기컴퓨터학부 졸업.
2009년 동 대학원 전자전기컴퓨터학부 졸업(공학석사)
2009년~현재 동 대학원 경북대 전자전기컴퓨터학부 박사과정
E-mail : jeunggw@ee.knu.ac.kr

김 남 경 (金 南 暻)

1983년 1월 8일생
2007년 경북대 전자전기컴퓨터학부 졸업.
2010년 동 대학원 전자전기컴퓨터학부 졸업(공학석사)
2010년~현재 동 대학원 경북대 전자전기컴퓨터학부 박사과정
E-mail : nkkim@ee.knu.ac.kr

송 명 곤 (宋 命 坤)

1970년 4월 9일생
1993년 연세대학교 전기공학과 졸업
1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
2002년~현재 벡터필드코리아(주) 연구소장
Tel : 054-223-2431
Fax : 054-223-2430
E-mail : koni@vfk.co.kr

이 강 원(李 剛 遠)

1970년 2월 21일 생
1995년 충북대학교 전기공학과 졸업
2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학 석사)
2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학 박사)
2003년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원
Tel : 031-460-5504
Fax : 031-460-5649
E-mail : wklee@krri.re.kr

목 재 군 (睦 載 均)

1962년 7월 12일 생
1986년 아주대학교 기계공학과 졸업
1988년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학 석사)
2000년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학 박사)
1997년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원
Tel : 031-460-5727
Fax : 031-460-5649
E-mail : jkmok@krri.re.kr

김 동 훈 (金 東 勳)

1968년 2월 26일 생.
1992년 서울대학교 전기공학과 졸업
1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학 석사)
1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학 박사)
1998.3~2001.2 LG전자 디지털어플라이언스 연구소 선임연구원
2001.3~2002.2 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부 연구교수
2002.3~2002.8 기초전력원 특별연구원
2002.9~2004.2 영국 Southampton대학 ECS Research Fellow
2004.3~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수
Tel : 053-950-5603
Fax : 053-940-8503
E-mail : dh29kim@ee.knu.ac.kr