

다수의 차량이 존재하는 도로상의 전자파 해석을 위한 중첩분석법

박찬선*, 정이루*, 정기범**, 신재곤***, 육종관°

Superposition Method for the Analysis of Electrically Large Problem Including Many Vehicles

Chan-Sun Park*, Yi-Ru Jeong*, Kibum Jung**, Jaekon Shin***, Jong-Gwan Yook°

요약

지능형 교통 시스템(Intelligent Transport System; ITS)의 상용화를 위한 작업이 국내외에서 활발하게 이루어지고 있는 시점인 지금 차량 간 통신 (Vehicle-to-Vehicle; V2V) 환경 해석은 관련 법규 제정에 있어서 필수적인 과정이다. 하지만 전기적으로 대형인 도로상 다수의 차량이라는 해석환경으로 인하여 계산 자원 부족으로 일반적인 수치해석 도구를 이용한 환경의 해석이 불가능한 상황에 대하여 본 논문에서는 해석 환경의 적절한 분리와 결과의 후처리로, 적은 계산 자원을 사용하여 환경 해석을 근사할 수 있는 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 전자기원(Electromagnetic field source)과 관측 지점 주변, 그리고 그 선상의 산란체들 중 일부만을 포함하는 해석을 수행한 뒤 결과들을 중첩의 원리를 적용한 벡터합을 통하여 결과를 근사하는 방식을 사용하였다. 본 논문에서는 제안한 기법의 적용범위 및 가이드라인, 일반적인 해석 기법과의 정확도 비교를 위한 예시를 제시하였다.

Key Words : Superposition, Large problem, Scatterer, Subgrouping, Memory usage

ABSTRACT

The commercialization of ITS(Intelligent Transport System) is in sight including V2V(Vehicle-to-Vehicle) communication and analysis of related electromagnetic circumstances is essential process in relevant legislation. However analysis including numbers of vehicles have electrically large environment which leads to a lack of computational resources. In this letter, we suggest superposition method which require much less computational resources by subgrouping environment and using post-processing of results. Suggested method approximate original result by superpositioning of analysis which include scatterers near source, observation point. This letter also presented guideline of method and example for comparison with full analysis result.

※ 본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 연구비지원(14PTSI-C054118-06)으로 연구되었습니다.

• First Author : Yonsei University, School of Electrical and Electronic Engineering, chanchan@yonsei.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Yonsei University, School of Electrical and Electronic Engineering, jgyook@yonsei.ac.kr, 중신회원

* Yonsei University, School of Electrical and Electronic Engineering, yiruta@naver.com

** E&R Tech, kbjung@enrc.co.kr

*** Korea Automobile Testing and Research Institute, Korea Transportation Safety Authority, katriemc@naver.com

논문번호 : KICS2014-07-279, Received July 24, 2014; Revised September 25, 2014; Accepted September 25, 2014

I. 서 론

지능형 교통 시스템(Intelligent Transport System; ITS)^[1] 사업은 기존 교통체계의 구성요소에 전자, 통신 기술을 접목시켜 교통의 효율적 이용과 안전성 증대를 추구하는, 대부분의 국가들이 핵심적으로 진행하고 있는 사업 중 하나이다. 우리나라 또한 예외가 아니어서 관련된 여러 사업이 진행되고 있는 가운데^[2,3] 해당 기술이 적용될 수 있는 법규 제정에 관련된 연구도 활발하게 진행되고 있다. 관련된 연구 중 자동차간(Vehicle-to-Vehicle; V2V)/자동차-노변 장치간(Vehicle-to-Infrastructure) 통신^[4] 상황에서의 최대 유기 전계강도에 관한 표준 제정을 위한 도로 전자파 환경 분석 연구 또한 진행되었다. 이에 관련된 연구는 전기적으로 대형인 환경을 해석하는 과정을 수반하게 된다. 하지만

- ① V2V 통신에서 사용되는 표준 주파수가 매우 고주파수라는 특징에 의한 분석 물체 mesh수의 기하급수적인 증가
- ② 전기적으로 대형인 자동차라는 피해석 물체의 특성
- ③ 도로상 환경 분석으로 인한 다수의 차량이 포함된 해석 환경

이라는 점들이 더해져 해석해야 하는 환경은 일반적인 수치해석 기법이나 상용 툴(FEKO, HFSS, CST 등)로는 계산 자원 부족으로 인한 계산이 불가능한 상황을 흔히 맞이하게 된다.

이러한 전기적으로 대형인 환경을 해석하는 수치해석 기법에는 여러 가지가 존재한다. MLFMM(Multi-Level Fast Multipole Method)는^[5] 해석하는 환경 중 근거리항(near-field term)은 그대로 계산하되 원거리항(far-field term)은 근사화 된 식을 사용하여 계산과정을 감소시키는 FMM(Fast Multipole Method)^[6]을 발전시킨 기법으로 다수의 계층으로 나누어 FMM을 적용하는 기법이며 수치해석계에 소개 된지 가장 오래된 대형 물체 해석기법 중 하나이다. 이미 상용 툴에도 적용이 되어있을 정도로 그 유용성이 널리 알려져 있는 기법이나 연산하는 컴퓨터 자재의 계산자원의 한계 이상의 물체들을 해석할 수 없어 사용범위가 제한된다. 해석 환경을 고려한 새로운 기저(Basis)를 생성하여 임피던스 행렬 크기를 감소시키는 CBFM(Characteristic Basis Function Method)^[7]이나 full-matrix를 sparse한 matrix로 변형하여 연산 시간을 줄이는 방법인 NFG(Null-Field Generation)^[8] 기법 등 다른 보다 발전되고 MLFMM과도 연동할 수 있는 수치해석기법이 최근에도 계속해서 제안되어

왔으나 아직 확실한 안정성과 정확성이 보장되어 있지 않고 실제로 적용하기 위해서는 당사자만의 코딩을 해야 하여 접근성이 매우 떨어진다는 단점이 있다. 본 연구에서 제안하는 기법과 가장 유사하다고 볼 수 있는 기법에는 DDM(Domain Decomposition Method)가 있는데^[9] DDM에서는 해석 환경을 세부 환경으로 나누고 이와 관련된 경계 값 문제를 풀이하는 과정을 거쳐 복잡도가 증가하는 반면 본 제안 기법에서는 추가적인 복잡한 연산 없이 단순한 벡터 합만으로 거의 정확한 결과를 이끌어 낸다는 이점이 존재한다. 본 논문에서는 현재 해석하고자 하는 도로상의 V2V 통신환경을 MLFMM보다 적은 계산 자원을 사용하면서도 DDM보다 일반 사용자들이 쉽게 접근할 수 있는 근사적인 수치해석 기법인 중첩분석법(Superposition Method)를 제안하고자 한다. 본 기법은 MLFMM으로도 한 번에 계산할 수 없는 해석환경을 분리하여 각각에 대하여 해석한 뒤 벡터 합 방식의 중첩을 통하여 최종 결과를 근사시키는 방식을 사용한다. 본 기법을 사용할 시 기존에 소유하고 있던 계산 자원으로는 해석할 수 없었던 환경을 단순히 해석하는 것을 넘어서, 정확하게 해석할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제시한 기법에 관한 개괄적인 설명과 적용 가이드라인 및 정확도에 관한 분석을 진행한다. 또한 실제 해석한 환경과 그에 따른 결과, 그리고 해석에 소모된 계산 자원/시간을 정리하고 3장에서 요약과 함께 결론을 맺는다.

II. 본 론

본격적인 서술에 앞서 본 연구에서 제안하는 기법은 ITS중 V2V 통신 상용화에 따른 실제적인 도로상의 전자파 해석, 그중에서도 차량 근처에서의 전계강도 유기량을 살펴보기 위한 목적에서 출발했음을 명시해 둔다. 이에 최대한 현실 상황과의 유사성을 위해 논문에서 사용되는 모델은 도체부분만을 사용한 실차 모델이며 V2V통신에서 표준 안테나로 사용될 것이라 예상되는, 차량 상단에 부착되는 Shark 안테나를 가정하여 전자기원(Electromagnetic field source)을 차량 상단에 배치한 해석환경을 사용한다.

2.1 중첩분석법의 개요 환경 설정

본 연구에서 제안하는 중첩분석법은 다음과 같다. 먼저 그림 1-1의 환경을 해석하려는 환경이라는 가정하에 시작한다. 총 16대의 차량이 배치되어 있고 꼭짓점에 배치되어 있는 차량 중 하단의 꼭짓점에 위치한

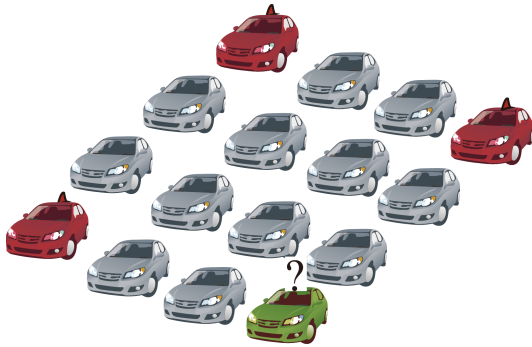


그림 1-1. 해석하려는 환경
Fig. 1-1. Analyzing environment

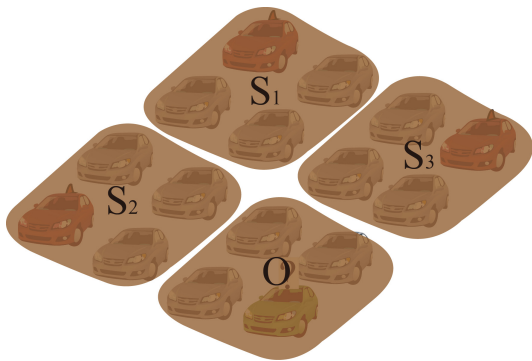


그림 1-2. 전자기원 및 관찰점 기준 유효 산란체를 포함하는 세부 그룹 S_1, S_2, S_3, O
Fig. 1-2. Subgroup S_1, S_2, S_3, O which include effective scatterers perspective of sources and observation point

차량을 제외한 3대만이 차량 상층부에 부착되어있는 안테나로부터 전자기 신호를 방출하고 있다. 전자기원으로 동작하는 것이다. 그리고 차량 중 상단에 “?” 표시가 있는 차량근처에 유기되는 전계강도를 계산하려 한다.

그림 1-2를 보면 원래의 해석 환경이 4개의 세부 그룹으로 나누어 진 것을 볼 수 있다. 이 세부 그룹은 각 전자기원 혹은 관찰점을 기준으로 거리를 기준으로 유효한 영향을 미칠 수 있는, 혹은 받을 수 있는 차량(산란체)들만을 포함하고 있는 그룹들로 뒤이어 나오는 또 다른 세부 그룹과 구분을 짓기 위해 각각 S_1, S_2, S_3, O 이라고 명명한다. 또한 각 그룹별로 포함하고 있는 Low-level basis(RWG, rooftop 등) 수를 $N_{S_1}, N_{S_2}, N_{S_3}, N_O$ 라 하겠다.

세부 그룹을 나누는 구체적인 기준은 세부 그룹에 속하지 않는 산란체들에서의 유기 전류가 거의 0에 수렴되도록 하는 것으로 한다. 이를 위한 방법론은 본론의 2번째 절에서 자세히 다룬다. 이제 각 세부그룹

들을 전자기원 그룹과 관찰점 그룹이 각각 하나씩 존재하도록 묶어 그림 2에서와 같이 새로운 그룹 D_1, D_2, D_3 를 형성한다. D_1 은 $S_1 - O$, D_2 는 $S_2 - O$, D_3 는 $S_3 - O$ 를 각각의 원소로 갖는다. 이제 우리는 세부 그룹 D_1, D_2, D_3 를 각각 하나의 해석 환경으로 생각하여 해석을 진행한다. 그림 1-1의 환경에는 있으나 D_1, D_2, D_3 에는 포함되지 않는 차량의 경우 앞서 설정한대로 유기되는 전류가 0이라 가정하고 계산을 수행한다.

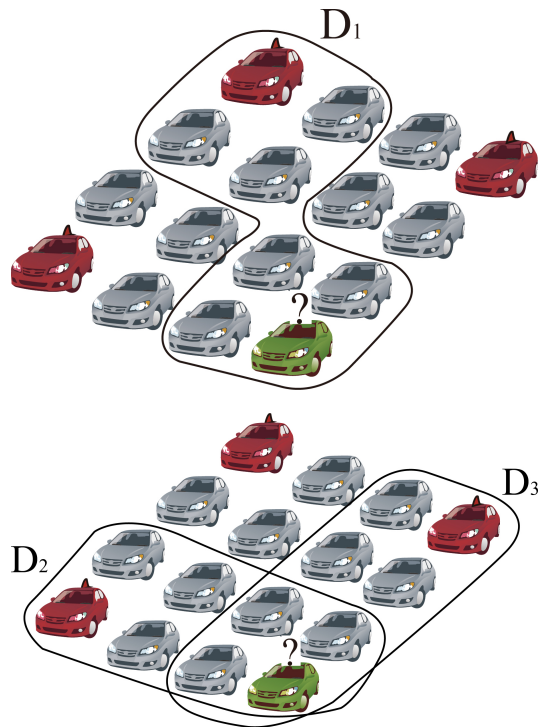


그림 2. 해석 환경 분리의 예
Fig. 2. Example of environment division

2.2 중첩분석법의 개요

본 연구의 주 목표가 더 적은 계산 자원을 이용하여 정확한 예측을 하는 것이므로 기법 전개 방식, 정확도에 못지않게 중요한 요소가 사용 계산 자원에 대한 분석이기 때문이다. 그림 1-1 해석의 경우를 우선 살펴보면 16대의 차량이 모두 같은 크기를 갖고 있다면 그에 해당하는 Low-level basis, 흔히 mesh 수로 표현되는 수도 같을 것이다. 차량 한 대의 mesh 수를 N 개라 하면 원래 해석하고자 했던 그림 1-1의 환경은 $16N$ 의 mesh를 갖는 환경이다. 반면 제안하는 세부 그룹의 해석에는 그 절반인 $8N$ 씩의 mesh만을 갖는

해석 환경이 된다. 이때 본 연구에서 사용한 FEKO에서 이용되는 해석 기법인 MLFMM에서는 mesh수가 M개일 때 $O(M \cdot \log M)$ 의 계산 자원을 사용하곤 하는데 이를 이용하면 원래의 환경은 $O(16N \cdot \log(16N))$, 세부 그룹의 환경은 $O(8N \cdot \log(8N))$ 의 계산 자원을 사용하는 것을 알 수 있고 결국 세부 그룹에서 사용하는 계산 자원은 원래 환경의 $\frac{8}{3}$ 수준이다. 일반적으로 세부 그룹의 환경이 원래의 환경의 $\frac{N}{M}$ 의 mesh를 갖는다면 ($M > N$) 해석에 필요한 계산 자원은 $\frac{N}{M} \frac{\log(N)}{\log(M)}$ 으로 주어진다. 이는 원래의 해석 환경을 계산 자원 부족으로 인해 해석하지 못했던 경우라도 세부 그룹은 해석할 수 있는 가능성을 제시할 수 있다는 결론으로 이어진다. 실제 예와 관련된 계산 자원 분석은 본문 3절의 시뮬레이션 결과 정리에서 다뤄진다.

해당 과정을 Method of moments(MoM)을 이용하여 계산을 한다고 하면, 수식적으로 다음과 같다. 그림 1-1 환경을 해석하기 위해 MoM을 적용한 최종적인 수식은 임피던스 행렬(Z), 미지의 표면 전류(I) 및 전자기원 벡터(V)을 이용하여 수식 1과 같다. 수식 1에서 Z 행렬의 원소들은 각 세부 그룹을 이루는 기저 간의 관계를 나타내고 I 는 세부 그룹의 기저에 유기되는 전류, 그리고 V 는 전자기원으로 입력되는 값을 의미한다.

$$ZI = \begin{pmatrix} Z_{S_1, S_1} & Z_{S_1, S_2} & Z_{S_1, S_3} & Z_{S_1, O} \\ Z_{S_2, S_1} & Z_{S_2, S_2} & Z_{S_2, S_3} & Z_{S_2, O} \\ Z_{S_3, S_1} & Z_{S_3, S_2} & Z_{S_3, S_3} & Z_{S_3, O} \\ Z_{O, S_1} & Z_{O, S_2} & Z_{O, S_3} & Z_{O, O} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{S_1} \\ I_{S_2} \\ I_{S_3} \\ I_O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{S_1} \\ V_{S_2} \\ V_{S_3} \\ 0 \end{pmatrix} = V \quad (1)$$

이때 수식 1에서의 미지 전류 I 를 구하는 과정은 Z 의 역행렬을 V 에 곱하는 방식이며 수식 2와 같이 정리된다. 이러한 방식으로 전자기원이 분리되어 해석이 진행된다.

$$I = Z^{-1} V = Z^{-1} \left(\begin{pmatrix} V_{S_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ V_{S_2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ V_{S_3} \\ 0 \end{pmatrix} \right) \quad (2)$$

세부 그룹 D_1 에 대한 해석을 진행한다고 했을 때 수식 1은 전자기원이 하나만 존재하므로 수식 3의 형태로 수정된다. 추가적으로 고려하지 않아도 되는 산

란체의 유기 표면 전류를 0이라 가정하였으므로 식 3은 4와 같이 바뀌게 된다. 이때 4의 식을 수식 5와 같이 간결한 형태로 변형시켜도 미지수 I_{S_1} 과 I_O 값을 얻을 수 있다.

$$ZI = \begin{pmatrix} Z_{S_1, S_1} & Z_{S_1, S_2} & Z_{S_1, S_3} & Z_{S_1, O} \\ Z_{S_2, S_1} & Z_{S_2, S_2} & Z_{S_2, S_3} & Z_{S_2, O} \\ Z_{S_3, S_1} & Z_{S_3, S_2} & Z_{S_3, S_3} & Z_{S_3, O} \\ Z_{O, S_1} & Z_{O, S_2} & Z_{O, S_3} & Z_{O, O} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{S_1} \\ I_{S_2} \\ I_{S_3} \\ I_O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{S_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = V \quad (3)$$

$$ZI = \begin{pmatrix} Z_{S_1, S_1} & Z_{S_1, S_2} & Z_{S_1, S_3} & Z_{S_1, O} \\ Z_{S_2, S_1} & Z_{S_2, S_2} & Z_{S_2, S_3} & Z_{S_2, O} \\ Z_{S_3, S_1} & Z_{S_3, S_2} & Z_{S_3, S_3} & Z_{S_3, O} \\ Z_{O, S_1} & Z_{O, S_2} & Z_{O, S_3} & Z_{O, O} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{S_1} \\ 0 \\ 0 \\ I_O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{S_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = V \quad (4)$$

$$ZI = \begin{pmatrix} Z_{S_1, S_1} & Z_{S_1, O} \\ Z_{O, S_1} & Z_{O, O} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{S_1} \\ I_O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{S_1} \\ V_O \end{pmatrix} = V \quad (5)$$

1의 식이 $(N_{S_1} + N_{S_2} + N_{S_3} + N_O)$ 크기의 행렬 연산을 해야 하는 반면 수식 5의 경우 $(N_{S_1} + N_O) \times (N_{S_1} + N_O)$ 크기의 행렬 연산을 하면 되므로 사용하는 계산 자원이 크게 감소하게 된다. 다시 실제 환경 관점으로 돌아가서 생각해보면 수식 5의 조건은 그림 3과 같은 세부 그룹 D_1 의 환경을 푸는 것과 같다. 이제 수식 5를 계산하여 얻은 표면 전류를 바탕으로 구

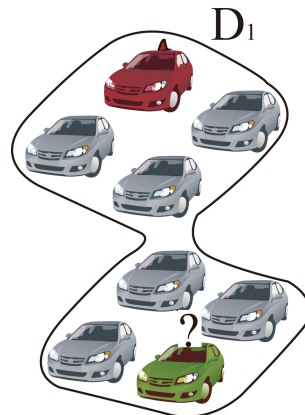


그림 3. 세부 그룹 D_1
Fig. 3. Subgroup D_1

하려고 했던 관찰 지점의 전계강도를 (D_1 이라는 세부 그룹을 이용하여 얻었으므로) 구하여 이를 E_1 이라고 한다. 마찬가지로 세부 그룹 D_2, D_3 의 환경을 해석하여 얻은 관찰점에서의 전계강도를 E_2, E_3 라고 하면 최종적인 전계강도, 즉 원래 구하려고 했던 전계강도는 전자기파의 중첩성에 의해 수식 6과 같이 계산할 수 있으며 계산 과정이 마무리 된다.

$$E = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^3 E_{i,real}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^3 E_{i,imag}\right)^2} \quad (6)$$

같은 방식으로 일반적인 환경의 경우를 고려해보면 다음과 같다. 해석하려는 환경에 전자기원이 M 개 존재한다고 하면 해석환경은 위와 같은 원리로 M 개의 세부 그룹으로 분리될 것이고 이로 인하여 M 개의 전계강도에 관한 결과가 도출될 것이다. D_1 부터 D_M 까지의 세부 그룹에서 도출된 전계강도들을 각각 E_1, E_2, \dots, E_M 이라 하면 최종적으로 도출하려 했던 전계강도 E 는 수식 7과 같이 근사된다.

$$E = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^M E_{i,real}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^M E_{i,imag}\right)^2} \quad (7)$$

2.3 중첩 분석법 적용 가이드라인

중첩 분석법의 적용 방식은 직관적이거나 앞서 소개한 계산자원의 감소 효과를 얻으면서도 정확성을 유지하는 데에는 세부 그룹을 어떠한 기준 하에 분리하여 고려하지 않는 산란체에 의한 영향을 최대한 감소시킬 것인지에 좌우된다. 이에 본 논문은 여러 예제들을 수행하여 구체적인 중첩분석법의 가이드라인을 제시할 것이다. 우선 전자기원과 관측지점을 중심으로 몇 파장까지의 산란체까지 고려를 해야 그 정확도가 보장이 되는지에 대해 살펴본다.

그림 4는 36대의 차량이 배치되어있고 3개의 꼭짓점에는 전자기 신호를 송출하는 차량이, 나머지 하나의 꼭짓점에는 전계강도 관측 지점이 위치해있는 환경을 나타내고 있다. 차량끼리는 5λ 등간격으로 배치되어있다. 이제 위의 환경을 하단에 제시된 분리된 환경들로 나눈다. 이때 포함하는 차량을 점차 늘려가며 원래의 결과인 그림 4에서의 관측 차량 주변의 전계강도와 비교할 것이다. 가장 적은 차량을 해석하는 경

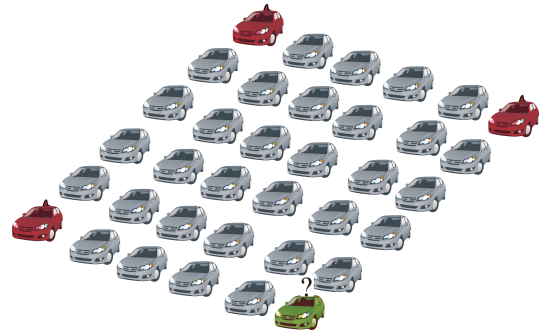


그림 4. 해석하려는 환경
Fig. 4. Analyzing environment

우를 보면 그림 5와 같다.

가장 적은 차량만을 포함하여 환경을 분리하는 경우는 전자기원이 연결되어 있는 차량과 관측하려는 전기장이 존재하는 차량 2대만을 고려하여 해석을 진행한다. 그림 5-1, 2, 3은 각각의 전자기원 부착 차량과 관측차량만을 포함하는 환경을 나타낸다. 원래의 환경(그림. 4)에는 있으나 분리된 환경(그림. 5-1, 2, 3)에서는 고려하지 않는 차량은 점선으로 표시를 하였다. 최종적인 전계강도의 예측은 앞선 절에서 밝힌바와 같이 벡터합에 의하여 근사적으로 결정된다.

위와 같은 방식으로 전자기원 및 관측 차량 주변의 5λ, 10λ, 15λ, 20λ내의 차량들을 포함하는 환경들을 나타내 보면 다음과 같다. 같은 방식으로 환경의 분리가 진행되므로 각각의 환경에 대해서 전자기원 3개에 의해 분리되는 환경을 모두 표현하지 않고 차량 배열의 상단에 있는 전자기원 차량을 포함하는 분리된 환경만을 여기서는 나타내었다.

다음은 각 환경으로부터 얻은 최종 결과 예측 전계강도와 실제 36대의 모든 차량을 포함하는 해석을 했을 시 얻게 되는 전계강도의 오차율을 정리한 것이다. 여기서 오차율은 수식 8과 같이 관측하는 영역에서의 실제 값에 대한 오차의 비로 정의 하였다.

그림 10을 살펴보면 어느 정도의 범위까지의 차량을 고려해야할지 판단할 수 있다. 오차율을 살펴보면 10 λ 범위까지 고려하는 경우까지 급감하고 그 이후는 거의 비슷한 값을 보인다. 이는 10 λ의 범위를 고려한 근사에서 2%의 오차율로 정확도가 포화된 것을 의미한다. 반면 본래 문제에서의 계산 자원 사용량 대비 계산 자원 사용량인 Normalized memory usage를

$$Error\ rate\ [\%] = \frac{|실제\ 전계강도 - 예측\ 전계강도|}{실제\ 전계강도} * 100 \quad (8)$$

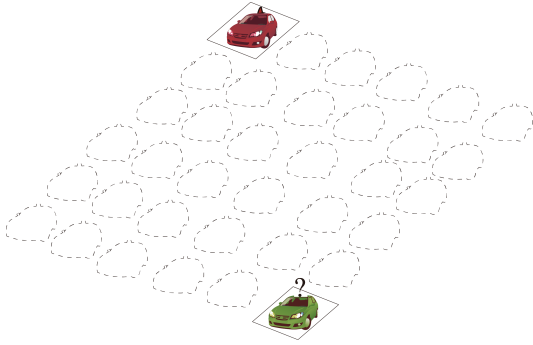


그림 5-1. 전자기원을 갖는 차량과 관측 차량만을 포함한 분리된 해석 환경 1
Fig. 5-1. Subgroup 1 which include only source vehicle and observation vehicle

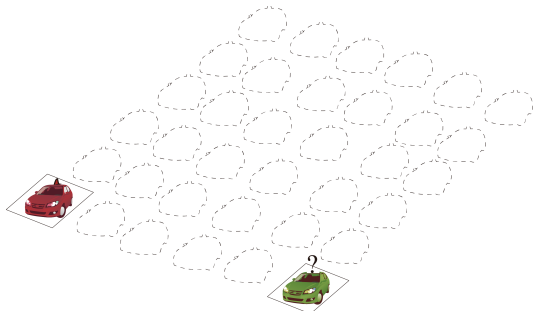


그림 5-2. 전자기원을 갖는 차량과 관측 차량만을 포함한 분리된 해석 환경 2
Fig. 5-2. Subgroup 2 which include only source vehicle and observation vehicle

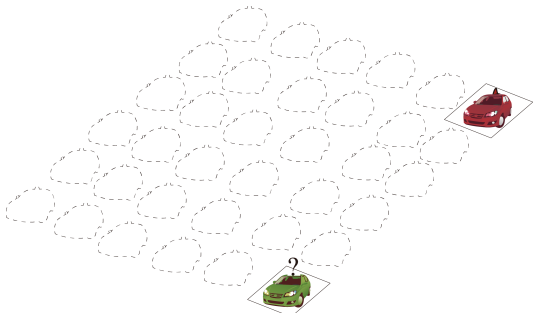


그림 5-3. 전자기원을 갖는 차량과 관측 차량만을 포함한 분리된 해석 환경 3
Fig. 5-3. Subgroup 3 which include only source vehicle and observation vehicle

보면 당연한 결과이지만 고려하는 차량의 범위가 커질수록 계산 자원 사용이 늘어난다.

따라서 본 논문에서는 정확도의 포화상태에 이르는 고려 파장 범위 중 가장 낮은 계산 자원을 사용하는 10 λ를 기법 적용의 고려 파장 범위의 기준으로 제안한다. 앞서 살펴본 예 이외에도 추가적으로 계산해본 여러 가지 경우에서도 10 λ 이내의 차량을 고려했을 시에는 모두 5 %이하의 error rate을 보인 것을 확인하였다. 고려 파장 범위가 10 λ정도 되는 이유를 정성적으로 고려해보면 다음과 같다. 자유 공간 상에서

전자기파의 크기는 일반적으로 $\frac{1}{k_0 R}$ 의 비율로 방사한다. 10 λ의 범위는 파장이 시작점보다 $\frac{1}{k_0 R} = \frac{1}{\frac{2\pi}{\lambda} * 10 \lambda} = \frac{1}{10}$ 만큼 크기가 감소하는

지점이다. 전기장과 자기장의 외적(cross product)으로 정의되는 power의 경우 10 λ에서 $\frac{1}{100}$ 의 크기를

지니게 된다. 일반적인 수식 전개에서 $\frac{1}{100}$ 의 크기를 가지는 항은 다른 항과 함께 있을 때 무시할 수 있을 만큼 작은 값이다. 이처럼 10 λ 밖의 산란체에 의한 영향은 그 크기가 매우 작게 되어 결과에 큰 영향을 주지 못하게 된다.

추가적으로 전자기원과 관측지점사이의 직선상에 있는 차량(on-line term)들의 경우 그 이외의 차량들보다 결과에 더 큰 영향을 미칠 것이라 생각하여 그와 관련된 연구를 진행하였다. 앞서 사용한 예에서 그림 7, 8, 9의 경우는 전자기원을 포함하는 차량과 관측 차량 사이의 차량들이 모두 분리된 해석 환경에도 포함되었으나 그림 5와 6의 경우 그렇지 않아, 5와 6의 환경에 추가적으로 전자기원 차량과 관측 차량 사이의 차량을 포함하는 해석의 경우 어느 정도의 정확성과 계산 자원 사용량의 증가를 보이는지 검증해 보았다. 해당하는 해석 환경은 그림 11, 12와 같다. 그림 11의 경우 그림 5, 그림 12는 그림 6에서의 직선상의 차량을 추가한 것이다. 이에 따른 오차율과 사용 계산 자원의 변화는 다음의 표 1에 도시되어있다. 표 1에서

표 1. 선상의 차량을 추가했을 때의 오차율과 사용 계산자원의 변화
Table 1. Changes of error rate and required computation resources when on-line vehicle is included

	Error rate	Change of error rate	Required computation resource	Change of required computation resource
Fig. 5 → Fig. 11	50 % → 21 %	- 29 %	0.6 Gbyte → 2.2 Gbyte	+ 260 %
Fig. 6 → Fig. 12	33 % → 21 %	- 12 %	2.6 Gbyte → 3.1 Gbyte	+ 20 %

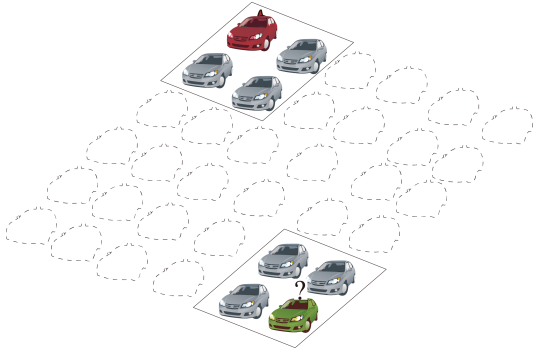


그림 6. 전자기원 차량과 관측 차량 주변 5 λ의 범위를 포함하는 분리된 환경
 Fig. 6. Subgroup which include 5 λ range around source vehicle and observation vehicle

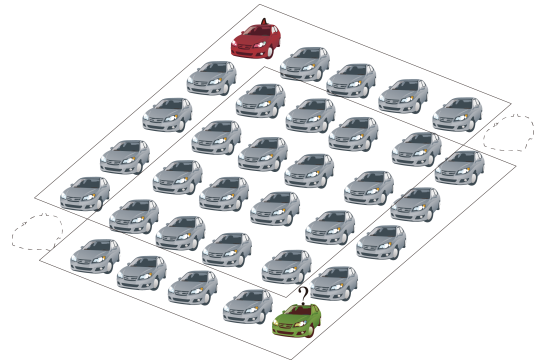


그림 9. 전자기원 차량과 관측 차량 주변 20 λ의 범위를 포함하는 분리된 환경
 Fig. 9. Subgroup which include 20 λ range around source vehicle and observation vehicle

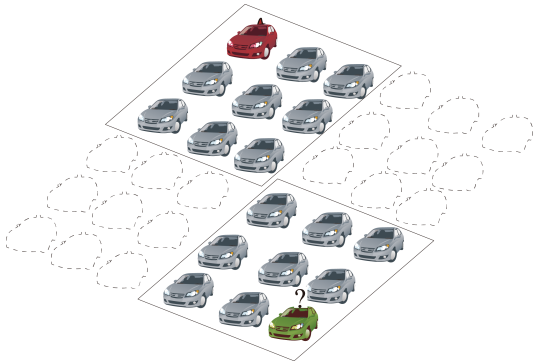


그림 7. 전자기원 차량과 관측 차량 주변 10 λ의 범위를 포함하는 분리된 환경
 Fig. 7. Subgroup which include 10 λ range around source vehicle and observation vehicle

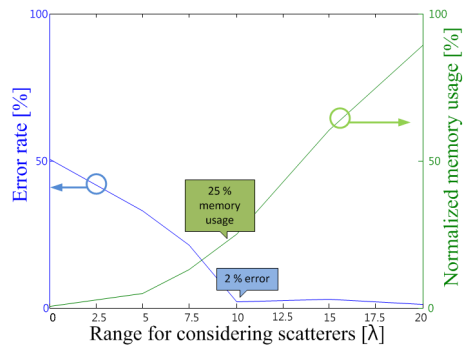


그림 10. 고려해야 하는 산란체들의 범위에 따른 오차율과 계산 자원 사용량
 Fig. 10. Error rate and memory usage as a function of the computational range including scatterers

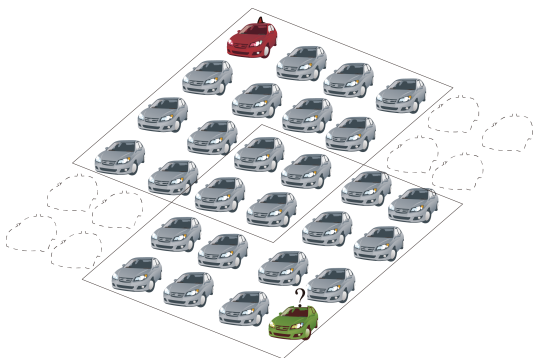


그림 8. 전자기원 차량과 관측 차량 주변 15 λ의 범위를 포함하는 분리된 환경
 Fig. 8. Subgroup which include 15 λ range around source vehicle and observation vehicle

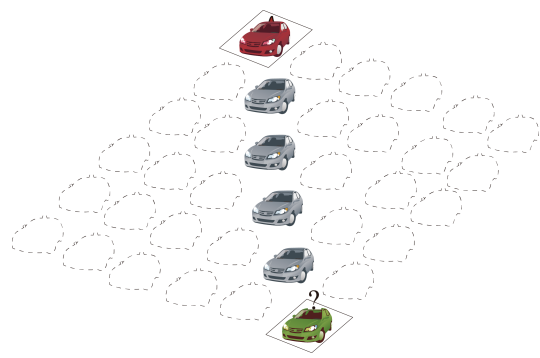


그림 11. 그림 5에서의 환경에 선상의 차량들을 포함한 분리된 환경
 Fig. 11. Subgroup including on-line term addition to Fig. 5 case

살펴보면 먼저 직선상 차량들을 포함하면 오차율을 추가적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 앞서 구

한 결과의 오차율에서 추가적으로 오차율을 감소시키고 싶으나 최소한의 계산 자원 증가가 필요할 시에 이

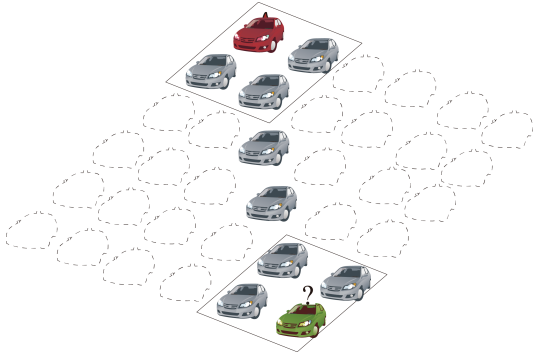


그림 12. 그림 6에서의 환경에 선상의 차량들을 포함한 분리된 환경
 Fig. 12. Subgroup including on-line term addition to Fig. 6 case

와 같이 선상의 차량들을 포함하여 계산하면 조금 더 효율적인 해석을 할 수 있다.

2.4 시뮬레이션 결과

본 절에서는 앞서 살펴본 시뮬레이션들의 실제 전계강도 예측 값들을 도시하고 이를 도식적으로 살펴 보도록 하겠다. 그림 13은 그림 4의 환경을 각기 다른 분리된 환경을 적용하여 관측 차량 상단에서 1 m의 축을 잡아 전계강도를 관측 및 예측한 그래프이다. 그래프 상에 Original Environment라고 되어 있는 검정색 실선은 그림 4의 36대의 전체 차량을 모두 포함한 시뮬레이션을 수행하였을 때의 전계강도이다. 정확한

해로 볼 수 있으며 다른 결과와 비교할 때 기준점을 제공한다. Considering Range(CR)는 앞서 살펴본 고려 파장 범위로 CR이 0 λ인 경우 전자기원 차량과 관측점 차량만을 포함하는 그림 5의 경우를 의미한다. 0 λ CR의 경우 그래프에서 보노비와 같이 전자기원-관측점 선상의 차량을 고려하지 않은 예측은 실제 값과 매우 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 같은 색상의 점선으로 표시된 선상 차량(on-line term)을 고려한 해석의 경우 그림 11의 환경을 해석한 결과이며 전자의 경우보다 약 30 % 감소된 오차율을 보인다. 그림 6, 12의 환경에 해당하는 5 λ CR의 경우도 마찬가지로 선상의 차량을 고려하였을 때 오차가 약 12 % 가량 줄어들음을 확인할 수 있다. 10, 15, 20 λ CR을 상정한 환경의 경우 본래 환경을 해석하여 도출해낸 전계강도 값과 예측 값이 3 % 미만의 작은 오차율을 가져 본래의 해석 값과 유사한 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 표 2에는 해석 환경에 따른 사용 계산 자원과 본 환경 해석에 필요한 자원 대비 필요 계산 자원, 그리고 오차율을 정리하였다. 사용 계산 자원(memory usage)는 실제 각 해당 환경을 해석하는 데에 필요했던 계산자원의 크기이고, 본 환경 해석에 필요한 자원 대비 필요 계산 자원(relative memory usage)는 원래의 해석 환경(original environment)를 해석하는 데에 필요했던 계산 자원에 비해 얼마나 적은 자원을 사용하여 각 환경을 해석하는지를 백분율로 나타낸 것이

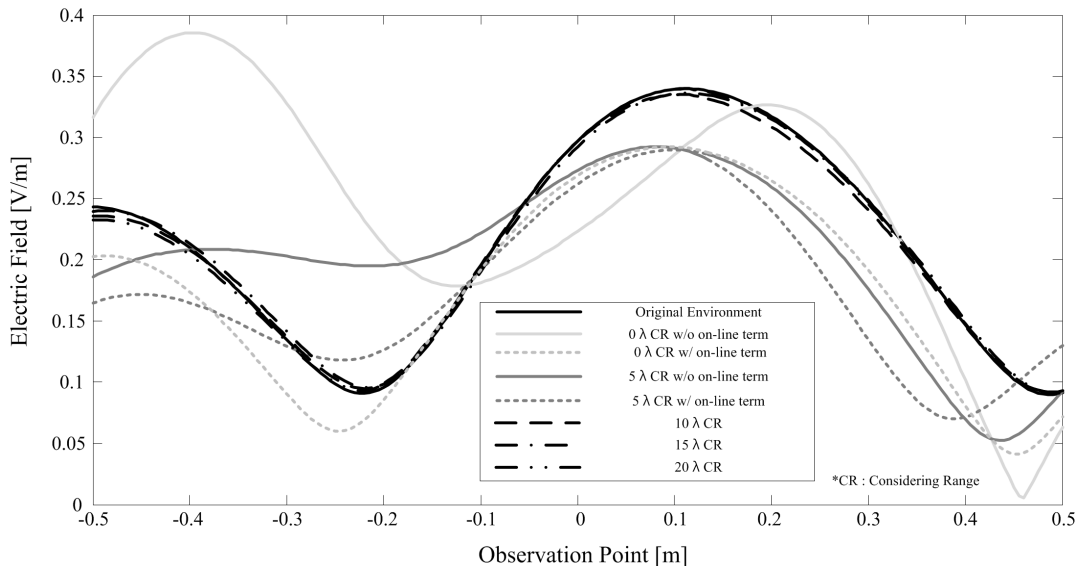


그림 13. 앞서 묘사된 여러 환경에서의 관찰/예측된 전계강도
 Fig. 13. Observed/predicted electric field in each environment described above

표 2. 해석 환경에 따른 사용 계산자원/상대적 계산자원/오차율

Table 2. Memory usage/relative memory usage/error rate based on different analyzing environment

	Memory usage [Gbyte]	Relative memory usage [%]	Error rate
Original environment	11.4	-	-
0 λ CR w/o on-line term	0.7	6	50.3
0 λ CR w/ on-line term	2.2	19	21
5 λ CR w/o on-line term	2.6	23	33
5 λ CR w/ on-line term	3.2	28	21.1
10 λ CR	5.8	51	2
15 λ CR	7.7	67	2.7
20 λ CR	9.5	83	1.1

다. $(\frac{\text{Memory usage of original environment}}{\text{Memory usage of each environment}} * 100 [\%])$

III. 결 론

본 논문에서는 전기적으로 대형인 해석 환경인 다수의 차량이 도로상에 존재하는 경우, 기존의 상용 툴로는 해석이 불가능한 상황을 해석 할 수 있는, 중첩 분석법을 제안하였다. 본 기법은 여러 전자기원별로 해석환경을 분리하여 각각의 결과를 도출해 낸 뒤 이들을 벡터 합을 이용하여 중첩시킴으로써 원래의 전계강도를 예측하는 방식을 사용한다. 본 기법에서 가장 중요한 점은 전체 환경을 분리된 환경으로 나눌 때 각각의 전자기원과 관측점 주변 10 λ 만큼의 공간 내부에 있는 산란체들을 포함하여야 정확성을 보장한다는 점이다. 또한 계산 자원이 여의치 않은 경우 전자기원과 관측지점을 일직선으로 연결한 선상의 산란체들을 포함하는 가능한 최대 계산 자원을 사용하는 환경을 만들시 단순 고려 파장 범위를 높이는 것보다 효율적인 해석이 가능하다. 나아가 본 논문에서는 단순히 도로 상의 차량들을 해석대상으로 삼았으나 제안한 기법은 클러스터 형태로 되어있는 산란체와 독립적인 전자기원이 포함되어 있는 전자기 환경 해석에 특화되어 있으므로 이를 응용하여 배열 안테나 해석 등 타 전자기 문제에도 적용하여 효율적인 전자기 해석을 할 수 있을 것이라 사료된다.

References

[1] L. Figueiredo, I. Jesus, J.A.T. Machado, J.R. Ferreira, and J. L. M. de Carvalho, "Towards the development of intelligent transportation systems," in *Proc. IEEE ITS*, vol. 88, pp.

1206-1211, Oakland, CA, Aug. 2001.
 [2] H. T. Ju, K. M. Ko, and D. W. Kwon, "Development of WAVE networking service protocol for RSU(Road-side Unit)," *J. Commun. Networks (JCN)*, vol. 37B, no. 05, pp. 395-399, May 2012.
 [3] J. B. Yoo and C. Y. Park, "The road reservation scheme in emergency situation for intelligent transport systems," *J. Commun. Networks (JCN)*, vol. 36, no. 11, pp. 1346-1350, Nov. 2011.
 [4] S. Y. Lee, H. G. Jeong, S. H. Yoon, D. K. Shin, and K. T. Lim, "WAVE specification and trend of next-generation ITS communication technology," in *Proc. KICS winter Conf. Commun.* 2013, pp. 756-757, Yongpyeong, Korea, Jan. 2013.
 [5] C. C. LU and W. C. Chew, "A multilevel algorithm for solving a boundary integral equation of wave scattering," *Microwave and opt. Lett.*, vol. 7, no. 10, pp. 466-470, Jul. 1994.
 [6] R. Coifman, V. Rokhlin, and S. Wandzura, "The fast multipole method for the wave equation: A pedestrian prescription," *IEEE Ant. Propaga. Mag.*, vol. 35, no. 3, pp. 7-12, Jun. 1993.
 [7] V. V. S. Prakash and R. Mittra, "Characteristic basis function method: A new technique for efficient solution of method of moments matrix equations," *Microwave and opt. Lett.*, vol. 36, no. 2 pp. 95-100, Jan. 2003.
 [8] T. N. Killian, S. M. Rao, and M. E. Baginski.

“Electromagnetic scattering from electrically large arbitrarily-shaped conductors using the method of moments and a new null-field generation technique,” *IEEE Trans. Ant. Propaga.*, vol. 59, no. 2, pp. 537-545. Jan. 2011.

- [9] K. Zhao, V. Rawat, and J. F. Lee. “A domain decomposition method for electromagnetic radiation and scattering analysis of multi-target problems,” *IEEE Trans. Ant. Propaga.*, vol. 56, no. 8, pp. 2211-2221, Aug. 2008.

신 재 곤 (Jaekon Shin)



1987년 2월 : 인하대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 2006년 2월 : 한양대학교 전자통신전파공학과 박사수료
 1986년~1993년 : 현대자동차 제품개발연구소 근무

1993년~현재 : 교통안전공단 자동차안전연구원 부연구위원
 <관심분야> EMC, 자동차 전기/전자 시스템 평가, 안테나

박 찬 선 (Chan-Sun Park)



2012년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2012년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정
 <관심분야> 수치해석, MoM

육 종 관 (Jong-Gwan Yook)



1987년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 12월 : University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)

1997년 1월~1998년 9월 : University of Michigan Research Fellow
 1998년 10월~1999년 2월 : Qualcomm Inc. Senior Engineer
 1999년 3월~2000년 2월 : 광주과학기술원 조교수
 2000년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수
 2012년~2013년 : IEEE Distinguished Lecturer (EMC society)
 <관심분야> 마이크로파 시스템 해석 및 설계, 안테나 시스템, RF MEMS, Bio-radar and Sensors, Computational Electromagnetics, EMI/EMC, HEMP

정 이 루 (Yi-Ru Jeong)



2010년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2010년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정
 <관심분야> 전자기 수치해석, MoM

정 기 범 (Kibum Jung)



1999년 2월 : 국민대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 2월 : 국민대학교 전자공학과 (공학석사)
 2013년 2월 : 한양대학교 전파공학과 (공학박사)
 2004년~2008년 : 한국전파진흥

협회 전자파기술원((구)EMC기술지원센터) EMC팀장
 2008년~현재 : (주)이엔알텍 대표이사
 <관심분야> EMC 회로 설계 및 대책기술, 전자파 수치해석, System-Level EMC, EFS(전자파안전성)