

## 자율주행 환경의 전자기 해석을 위한 상용 및 자체 시뮬레이터 개발 동향\*

박 우 빈\*\*, 김 문 성\*\*\*, 이 우 찬\*\*\*\*

### *Commercial and In-house Simulator Development Trend for Electromagnetic Analysis of Autonomous Driving Environments*

Park Woobin·Kim Moonseong·Lee Woochan

#### 〈Abstract〉

In the modern era, radio wave analysis is necessary for various fields of engineering, and interpretation of this is also indispensable. Self-driving cars need multiple different electronic components, and thus accurate and fast electromagnetic simulator for this kind of complex radio environment is required for self-driving simulations. Accordingly, the demand for self-driving simulators as well as existing electromagnetic analysis software has increased. This paper briefly describes the characteristics of numerical analysis techniques for electromagnetic analysis, self-driving simulation software, and conventional electromagnetic simulation software and also summarizes the characteristics of each software. Finally, the verification of the result from in-house code compared to HFSS is demonstrated.

Key Words : Computational Electromagnetics, Numerical Analysis, Simulator, Simulation

## I. 서론

현대 사회에서 자동차는 없어서 안 될 중요한 운송 및 이동수단이다. 자동차는 1885년에 처음으로 발명되어 과학기술이 진보됨에 따라 꾸준히 발전되어왔고, 현재 4차 산업혁명이 도입되면서 기존 자동차에 자율주행 기능이 추가되었다. 대표적인 개발 동향 예시로 Continental社は 2014년 9월 지능형 교통시스템 연구소를 설립하고 지능형 교통시스템과 커넥티

드카 관련 연구개발을 본격적으로 추진할 계획을 밝혔다[1]. Google社は 2010년부터 차량용 OS를 개발하였고, 2013년 3월에 자율주행차 80만 마일 무사고운행을 기록하였으며, 기아자동차는 2014년 부산국제 모터쇼에서 자율제어로 주행 가능한 K9 차량을 선보였다[1]. 또한, 현대자동차도 2018년 수소전기자동차 넥쏘를 기반으로 자율주행 시범운행을 선보였다[2]. 그 밖에도 BMW, GM, 폭스바겐, 도요타, 닛산, 혼다, TESLA 등 자동차 관련 기업, 국가, 기관에서뿐만 아니라 IT 기업에서도 영상인식이나 빅데이터 처리 등 자율주행에 관심을 두고 개발을 하는 추세이다.

자율주행 자동차의 핵심 기술에는 영상 기반 주행 상황인지 모듈, 통합 운전자 상태 인지 기반 자율주

\* 이 연구는 2019년도 인천대학교 교내연구비 지원에 의한 연구임.(2019-0068)

\*\* 인천대학교 전기공학과 석사과정(제1저자)

\*\*\* 서울신학대학교 IT융합소프트웨어학과 조교수(교신저자)

\*\*\*\* 인천대학교 전기공학과 부교수(교신저자)

행 개인화 모듈, ADR 모듈, 확장성/범용성/보안성 기반 V2X 통신 모듈, 자율주행용 디지털 맵, 레이더(라이더) 기반 주행상황인지 모듈 등이 있으며, 각 모듈 간의 통신을 위해서는 레이더(라이더) 및 센서의 설계는 자율주행 자동차 개발에서 반드시 거쳐야 할 과제이다[3]. 하지만, 전파통신은 주변 사물로 인한 반사, 회절, 산란, 굴절, 안테나의 위치, 다른 전파와의 간섭, 전파 이동 경로 등 다양한 요소가 상호작용함에 따라 계산이 복잡해지고 예측하기 어려워지기 때문에 전자기 해석 시뮬레이션 소프트웨어는 이러한 복잡한 환경을 제한된 시간에 시뮬레이션할 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 현재 상용 전자기 해석 시뮬레이션 소프트웨어를 찾아보면 수많은 종류의 소프트웨어들을 찾아볼 수 있지만, 이에 대한 일목요연한 특성 정리는 관련 전문가가 아니고서는 하기 힘들다. 본 논문에서는 이러한 상용 전자기 소프트웨어의 특징과 사용기법 및 개발 동향을 소개하고 각종 표로그 특성을 정리하여 관련 분야 종사자들의 소프트웨어 선택 편의를 도모하였으며, 직접 작성한 유한요소법 이용 전자기 수치해석 In-house code와 상용소프트웨어 간의 비교를 함으로써 한국에서 드문 전파해석 연구 결과를 3장 말미에 선보인다. 참고로, 본 논문 이외의 전자기 및 다른 분야의 시뮬레이션 소프트웨어는 참고문헌[4]가 좋은 참고가 될 것으로 사료된다.

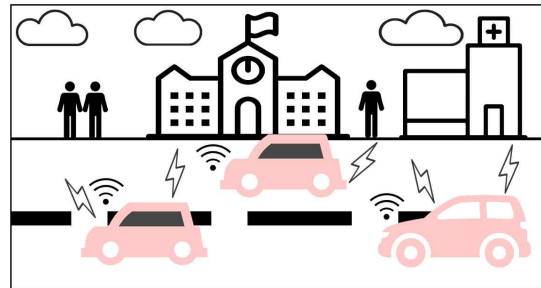
## II. 이론적 배경

### 2.1 자율주행 환경 시뮬레이션 고려사항

자율주행 레이더 시뮬레이션에서 실제 상황과 동일하게 계산하는 것은 계산량이 천문학적이고 현실적으로 불가능하므로, 대표적인 자율주행 시나리오(예를 들어, 그림 1과 같은 차량 2대, 건물 2개 배치

등)를 설정하여 다소 단순한 환경에서 해석되는 경우가 많다[5].

자율주행 전자기 시뮬레이터는 기본적으로 전자기 시뮬레이터 기능 기반 수치해석 기법을 사용하며, 수치해석 기법으로는 대표적으로 유한 차분 시간 영역 방법(FDTD: Finite Difference Time Domain), 유한요소법(FEM: Finite Element Method), 모멘트 방법(MoM: Method of Moment) 등이 있다. 그러나, 상기 각 기법의 장점들이 발휘되는 환경 및 구조가 다르므로 상황마다 장점이 극대화될 수 있는 기법을 사용해야 하며, 이러한 이유로 여러 해석 기법을 결합하는 하이브리드 기법 또한 연구가 진행 중이다. 본 논문에서는 위에서 언급한 대표적인 수치해석 기법인 FEM, FDTD, MoM에 대하여 살펴보도록 하겠다.



<그림 1> 많은 물체가 상호 연관된 복잡한 자율주행 환경[5]

### 2.2 전자기 수치해석 기법

#### 2.2.1 FDTD(Finite Difference Time Domain Method)

1960년대부터 연구된 유한 차분 시간 영역 방법은 시간 영역에서 직접 직사각형 메시(mesh)에 이산화된 맥스웰 방정식을 푼다. 이 방법은 재료의 이방성과 불균일성을 쉽게 처리할 수 있으며, 공식화 구현 및 메시 생성이 단순하다. 또한, 푸리에 변환을 통한 한 번의 시간 영역 계산으로 광대역 솔루션을 생성할 수 있고, 행렬 솔루션을 포함하지 않기 때문에 매우

효율적인 방법이다[6]. 하지만, 직사각형 메시를 사용하기 때문에 복잡한 곡면 구조 및 크기가 파장의 수백 또는 수천 분의 일 정도인 매우 미세한 구조를 정확하게 모델링 하는 것이 어렵다는 단점이 있다[6].

### 2.2.2 FEM(Finite Element Method)

유한요소법은 미분 방정식을 기반으로 한 주파수 도메인 해석 방법이며, 다른 방법들에 비해 다소 복잡하지만, 삼각형, 사면체 및 곡선과 같이 구조화되지 않은 메시를 사용해 곡선표면, 미세 구조 및 복잡하고 비균질한 물체를 정확하게 모델링할 수 있다[7]. 또한, 행렬이 대칭 성질을 갖게 되어 sparse 솔버를 사용해 효율적으로 해를 얻을 수 있고, 다양한 영역 분할 알고리즘을 통해 병렬 연산에도 적합하다. 하지만 복잡한 메시 생성을 해야 한다는 점이 단점으로 상당한 기술이 필요하다[7].

### 2.2.3 MoM(Method of Moment)

모멘트 방법은 전자기 수치해석에 가장 긴 역사가 있으며, 이 방법은 맥스웰 방정식에 대한 기본 솔루션으로 Green's function을 사용한 적분 방정식을 기반으로 한다. 모멘트 방법은 특별한 전처리가 필요하지 않고, 표면 적분 방정식을 사용해 계산 영역이 표면으로 제한되기 때문에 금속 안테나 또는 적층 기판으로 구성된 마이크로스트립 패치 안테나 종류의 모델링에 적합하다[6]. 하지만 이방성 및 비균질성 복합 재료로 설계된 복잡한 물체 모델링에는 적합하지 않다는 단점이 있으며, 완전히 채워진 행렬을 생성하기 때문에 높은 수준의 계산 복잡성을 요구한다[6]. 이러한 단점은 다양한 고속 솔버의 개발 및 하이브리드 기법들로 인해 완화되었으며, 위에서 소개한 전자기 수치해석 기법에 대한 특징을 표 1에 정리하였다.

<표 1> 전자기 수치해석 기법의 특징

	FEM	FDTD	MoM
해석 방법	미분 방정식 기반 주파수 도메인 해석	미분 방정식 기반 시간 도메인 해석	적분 방정식 기반 해석
메시 모양	삼각형, 사면체, 곡선	직사각형	삼각형, 직사각형
유리한 예제	구조의 복잡성 및 재료의 이방성이 높은 예제	광대역 응용	금속 안테나 또는 표면 해석

## III. 상용소프트웨어

### 3.1 자율주행 시뮬레이션 소프트웨어

#### 3.1.1 Siemens 社の Simcenter Prescan

상용 전자기 해석 소프트웨어에 대해 알아보기 전에 자율주행용 소프트웨어의 기능 및 특징에 대해 간단히 알아보도록 하겠다.

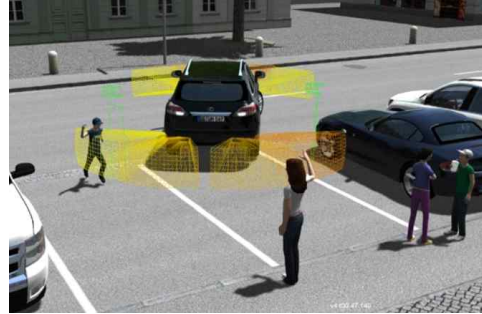
Simcenter Prescan은 다양한 주행 시나리오, 디지털 환경에서 분석을 위한 주변 환경 인지, 계획, 제어, 차량 동역학까지 자율주행 시스템 개발을 위한 기능을 가상 환경에서 검증 및 확인할 수 있는 물리 기반 시뮬레이션 소프트웨어이다[8]. Simcenter Prescan의 주요 기능으로는 가상 주행 시나리오, 가상 주행 환경 구축, 가상 주행 센서 모델링 및 제어 알고리즘, 시스템 시뮬레이션과의 연동이 있으며, 몇 가지 기능에 대해 알아보도록 하겠다.

가상 주행 시나리오 기능을 위해 초보자도 쉽게 빠르게 가상 환경을 세팅할 수 있는 GUI 기반 플랫폼을 지원하며, 실제 센서의 물리적 메커니즘 기반 센서 모델 설계를 지원한다[9]. 또한, Matlab/Simulink 또는 C++ code를 통한 알고리즘 테스트를 지원하며, 애니메이션 기능의 지원으로 시뮬레이션을 실시간으로 확인할 수 있다[9].

가상 주행 환경 구축 기능으로는 12개 이상의 Road Segment 및 실제 도로환경 인프라 요소(가드레일, 벽, 표지판, 가로수)를 구현할 수 있다[9]. 또한, OpenDrive format 도로를 가져와 도로 네트워크를 구현할 수 있으며, 40개 이상의 보행자, 25개 이상의 차량, 20개 이상의 가로수 데이터베이스 및 지면 타입, 기후 조건, 광원 등을 변경하여 사용자가 다양한 환경을 스스로 구축할 수 있으며 그림 2는 Simcenter Prescan을 사용해 환경을 구축한 예시이다[8-10].



〈그림 2〉 Simcenter Prescan를 사용한 인프라 요소 설정[10]



〈그림 3〉 Virtual Test Drive를 사용한 가상 환경 시뮬레이션[11]

## 3.2 상용 전자기 해석 소프트웨어

### 3.2.1 Altair 社の FEKO

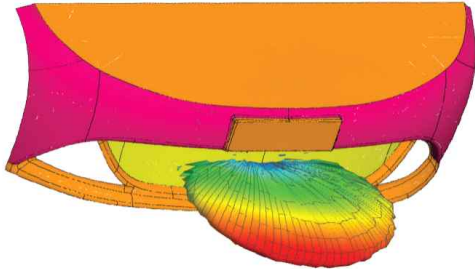
FEKO는 오늘날 가장 입증되고 신뢰할 수 있는 다중 주파수 및 시간 도메인 기술을 사용하는 전자기 시뮬레이션 소프트웨어이다. 주로 안테나 설계 및 배치, 산란, 레이더 단면(RCS: Radar Cross Section), 전자기 펄스(EMP: Electromagnetic Pulses), 낙뢰 효과, 고강도 방사장(HIRF: High Intensity Radiated Fields) 그리고 방사 위험에 대해 분석하며, 그림 4는 FEKO를 사용한 자율주행용 radar 해석이다[14, 15]. 아울러, 양방향 케이블 커플링, 윈드스크린 안테나 및 대형 유한 어레이를 위한 특수 솔루션이 포함되어 있다[14]. 주파수 및 시간 도메인 전파 솔버로는 MoM, FDTD, FEM 및 MLFMM(Multilevel Fast Multipole Method)이 사용되며, 접근법으로는 PO(Physical Optics), LE-PO(Large Element Physical Optics), RL-GO(Ray Launching Geometrical Optics), UTD(Uniform Theory of Diffraction)가 사용된다[14]. 복잡하고 큰 규모의 문제를 해결하기 위해 위 방법들의 하이브리드화를 적용해 더욱 효율적인 솔루션을 제공하며, 고유한 CMA 솔버는 모드 전류, 고유티, 모드 중요도 및 특성 각도를 계산할 수 있다[14]. 또한,

### 3.1.2 Vires 社の Virtual Test Drive

Virtual Test Drive는 ADAS 및 자율주행 개발, 검증에 위한 가상 환경 시뮬레이션 플랫폼으로 차량 동역학, 교통 및 음성 시뮬레이션, 센서 시뮬레이션, 도로 네트워크, 시나리오 등 실제 환경과 동일한 가상 환경 생성이 가능하다[11].

주요 기능으로는 센서 설계, 교통 및 보행자 설계, 시나리오 설계, 차량 모델링, 날씨 설정, Massive Scaling 기능이 있다[11, 12]. 위 기능들을 사용해 매우 복잡한 교통상황 시나리오 구성 및 손쉬운 데이터 모니터링, 실시간 SCP 명령을 통한 시뮬레이션 조절, 정확한 차량 동역학 기반의 센서 모델링 등이 가능하며, 그림 3은 Virtual Test Drive를 사용한 가상 환경 시뮬레이션이다[11-13].

다중 CPU 분산 메모리 리소스 활용, GPU 기반 솔버 병렬화 및 최적화가 되어있으며, RAM이 한계에 도달 시 솔루션을 제공하도록 최적화되어있다. 아울러, 사용자 인터페이스로는 CAD 및 메시 형식 가져오기/내보내기를 포함한 최첨단 3D Parasolid CAD 모델링 인터페이스, 삼각형 및 사면체 메시 생성을 위한 통합 메시 엔진, 하이퍼 메시 엔진, 후처리, 측정 결과 가져오기, 보고서 생성 등 사용자의 편의성에 특화되어 있으며, 도메인 분해를 통한 복잡한 전자기 문제를 보다 효율적으로 해석할 수 있다[14, 15].

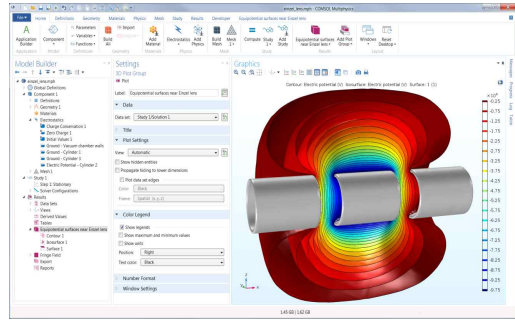


<그림 4> FEKO vehicle radar integration[14]

### 3.2.2 COMSOL 社の COMSOL Multiphysics

1998년 FEMLAB을 시작으로 COMSOL Multiphysics는 복합 다중 물리현상 해결을 위한 FEM 기반 수치해석 소프트웨어이다. GUI와 Parametric CAD 기반 모델링으로 인해 형상 그리기, 메시 생성, 물성 또는 경계 조건 부여, 결과 출력 등이 비교적 쉬워 초보자도 쉽게 접근 할 수 있고, 그림 5와 같은 전자기 해석 이외에도 열/유동, 음향, 구조, 전기화학, 화학반응 등 다양한 분야의 물리현상을 해석하기에 적합하다. 또한, 타 소프트웨어(SolidWorks, Inventor, Pro/Engineer, AutoCAD, Revit, MATLAB, Simulink 등)와의 연동이 쉽고, 자동 메시 기능 및 세부적인 메시 밀도 조절이 가능하며, 후처리 기능이

특화되어있어 동시에 여러 결과 출력, 계산 중간에 임의의 값을 보여주는 프로브(Probe) 및 다양한 데이터 설정이 가능하다[16].



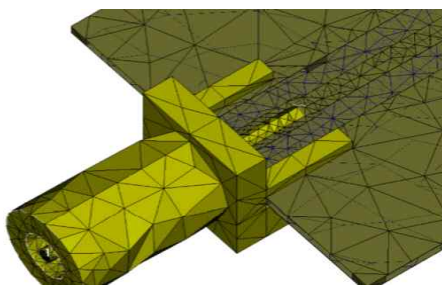
<그림 5> COMSOL을 사용한 전자기 해석[16]

### 3.2.3 Dassault Systemes 社の CST Studio Suite

CST Studio는 전자기(EM) 구성요소 및 시스템 설계, 해석, 최적화하기 위한 FEM과 MoM 기반 고성능 소프트웨어 패키지이다. Windows 운영 체제를 기반으로 하는 Parametric CAD 인터페이스를 제공하며 비선형 복합 재료 모델링에 최적화되어있다. 또한, 육면체, 사면체, 삼각형, 사각형, 곡선 메시를 다양한 상황에 알맞게 사용해 가능한 적은 수의 메시를 사용해 정확한 모델링을 할 수 있으며, 멀티스레딩, 하드웨어 가속, MPI 클러스터 컴퓨팅, 분산 컴퓨팅 등 GPU를 사용한 HPC(High Performance Computing) 기능을 사용할 수 있다[17]. 추가로 CST Studio Suite는 안테나 설계를 위한 SIMULIA 전자파 도구 Antenna Magus와 도파관 설계를 위한 FEST3D를 지원하며, 하이브리드 솔버의 사용으로 단일 시뮬레이션 작업에서 여러 개의 솔버를 결합하여 사용할 수 있다[18]. 이를 이용해 자율주행에 사용되는 차량 간 통신(V2V: Vehicle to Vehicle) 안테나 성능 분석 및 대형 플랫폼에 결합한 솔버를 효율적으로 적용할 수 있다[19].

### 3.2.4 AWR 社の Analyst

Analyst는 고주파 제품을 대상으로 3D FEM과 EM 기반 시뮬레이션, 분석, 초기 설계부터 검증까지 가능한 소프트웨어이다[19]. Analyst는 3D 구성요소, 분산 평면 구조와 같은 상호 연결 구조 및 복잡한 전자 패키징, 회로 네트워크 내의 도파관 구조를 쉽게 모델링 할 수 있으며, IGES, STEP, STL과 같은 CAD파일 형식을 지원하므로 설계자는 CAD 도구에서 EM 분석을 수행할 수 있다[22, 23]. 시뮬레이션 기술로는 사용자가 최소한의 설정으로 최대한의 효율을 내는 3D 적응형 메시 기능이 있고, Analyst 소프트웨어 내의 독점 기술인 최첨단 전파 FEM EM 분석 기술은 직접 및 반복 솔버는 물론 이산 및 고속 주파수 스위치를 지원한다[22]. 또한, 성공적인 수동 부품 설계, 비용 및 관련 손실을 줄이는 On-Chip Passive 기술, 복잡한 고주파 전자 장치 내의 3D 구조 및 상호 연결에 대해 빠르고 정확한 분석을 제공하는 IC, PCB 패키징, 그림 6과 같이 자율주행 자동차에 필요한 안테나와 같은 임의의 구조를 3D 모델링하여 VSWR(전압 정재파 비율), 반사 손실 및 방사 패턴에 대한 S-parameter 등을 해석하는 기술을 보유하고 있다[22, 23].



<그림 6> Analyst를 사용한 안테나 해석[22]

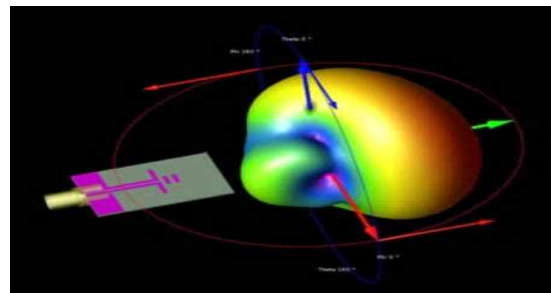
### 3.2.5 Metariver Technology 社の samadii/em

samadii/em은 무선통신, 레이더, 모터, 반도체, 디

스플레이 등 다양한 산업 분야에서 더욱 높은 수준의 제품 설계를 위한 FEM 기반 전자기 해석 소프트웨어이며, NVIDIA CUDA를 사용한 GPU 병렬 컴퓨팅 프로세스를 지원해 기존의 CPU 연산 처리 속도보다 수십에서 수천 배의 속도 향상 및 대규모 계산이 필요한 과학 또는 공학 시뮬레이션의 경우 HPC를 통한 가속화 또한 가능하다[24]. 또한, 독자적인 고속 알고리즘을 적용해 시뮬레이션의 효율적인 해석이 가능하다.

### 3.2.6 KEYSIGHT 社の EMPro3D

EMPro3D는 시간 및 주파수 영역에서 RF/마이크로웨이브 및 마이크로파 구성요소의 3D EM 효과를 해석하기 위한 3D 모델링 소프트웨어이다[25, 26]. FEM과 FDTD 기법을 기반으로 사용하며, FEM의 경우 주파수 영역에서의 RF 또는 마이크로파 해석에 사용되고, FDTD의 경우 그림 7과 같이 안테나 및 일부 신호 추출 또는 분석에 사용된다[25, 26]. 또한, 멀티코어 CPU와 GPU를 사용한 멀티스레딩 및 HPC를 지원하며, 임의의 3D 구조를 그리는 유연한 디자인 기능과 기존 CAD 파일을 가져올 수 있는 편의성을 제공한다[25, 26]. EMPro3D의 응용 분야로는 IC 패키지, 다층 RF 모듈, RF 부품, 항공우주/방위, PCB 설계, RF 및 고속 커넥터, 안테나, EMI/EMC 분석 등이 있다[25, 26].



<그림 7> EMPro3D의 FDTD 기법을 사용한 안테나 해석[26]

### 3.2.7 Siemens 社の Simcenter MagNet

Simcenter MagNet은 2D/3D 모터, 발전기, 변압기, 액추에이터, 영구자석, 센서, 솔레노이드 또는 코일 장착 부품의 성능 예측을 위한 시뮬레이션 소프트웨어이다[27]. 주요 기능으로는 AC 전자기 시뮬레이션, 첨단 전자파 재료 모델링, 회로 및 시스템 모델링, 전자기장 시뮬레이션과 같은 단순하거나 복잡한 전자기 및 전기기계 장치의 최적화 및 설계이며, Simcenter MagNet의 가상 프로토타이핑 기능은 비용 및 시간 대비 효율적인 솔루션 제공 및 최적화를 통해 성능을 향상할 수 있다[27].

### 3.2.8 Ansys 社の HFSS

마지막으로 HFSS는 안테나, 안테나 어레이, RF, 마이크로파 부품, 필터, 커넥터, IC 패키지 및 회로 기판과 같은 고주파 전자 제품 설계 및 통신 시스템, 첨단 운전자 지원 시스템(ADAS), 위성, IoT 제품에서 발견되는 고주파 전자 제품을 시뮬레이션하기 위한 전자기 해석 시뮬레이션 소프트웨어이다[28]. FEM과 MoM 기법 기반 솔버, 적응형 메싱 및 뛰어난 그래픽 지원, 모든 3D EM 문제에 대한 탁월한 성능을 지원하며, S-parameter, 공진 주파수 및 필드와 같은 후처리 계산을 지원한다[28-30].

주요 기능으로는 EMI/EMC 해석, 복잡한 환경에서의 무선 주파수 간섭 해석, RF 시스템 및 회로 분석, 신호 및 전력 무결성 분석, 안테나 설계 Toolkit, 레이더 전/후처리, SBR+ 가속도 도플러 처리, 초기 3D 메싱, 주파수/시간 도메인 FEM, 적분 방정식 (MoM), 하이브리드 FEM/IE/SBR+ 솔버, Phi Plus 메싱, 3D 유전체에 대한 SBR+ 해석, 5G mmWave 안테나 원거리 장 처리 등이 있고 위 기능 중 몇 가지에 대해 알아보도록 하겠다[28-31].

신호 및 전력 무결성 분석을 사용해 회로 및 시스템

시뮬레이션에 동적으로 연결된 HFSS EM 시뮬레이션 기능을 활용하여 사용자는 하드웨어에서 프로토타입을 제작하기 위한 설계를 할 수 있으며, 대표적인 제품으로는 IC 패키지, 커넥터 및 PCB 등이 있다[28].

<표 2> 전자기 해석 소프트웨어의 특징

소프트웨어명	주 사용기법	특징
FEKO	MoM, FDTD, FEM	복잡하고 규모가 큰 문제에 효율적
COMSOL Multiphysics	FEM	다중 물리현상 해석 가능 및 타 플랫폼과의 연동
CST Studio Suite	FEM, MoM	V2V 안테나 성능 분석 및 타 플랫폼과의 연동
Analyst	FEM	고주파 제품 대상 해석에 효율적
samadii/em	FEM	전자기장 내 플라즈마 입자 거동 해석 및 CUDA 기술을 활용한 고성능 솔버 사용
EMPro3D	FEM, FDTD, MoM	고속 및 RF/마이크로파 구성요소의 3D EM 효과 분석에 효율적
Simcenter MagNet	FEM	모터, 발전기, 변압기, 액추에이터, 영구자석, 센서, 솔레노이드 또는 코일 장착 부품의 성능 예측에 효율적
HFSS	FEM, MoM	고주파 전자 제품 설계 및 통신 시스템, ADAS 위성 IoT 제품 해석에 효율적

Phi Plus 메싱은 칩, 회로 기판 등 더욱 작은 크기를 요구하는 제품 설계를 위한 기능이다. 작은 크기의 제품을 자세히 분석하기 위해서는 그만큼 메시들이 더 가깝게 배치되고 전자기적 설계 복잡성도 비례하여 올라가게 된다[28]. 이러한 해석을 위해 Ansys 2021 R2 버전에 더 높은 속도와 용량을 제공하는 Phi Plus 메싱을 도입하였고, 복잡한 모델 해석을 위해 HPC 지원 및 CAD 인식 메싱 기술도 추가하였다[28]. 특히 곡면 구조에 대한 사전 정보를 바탕으로 기하학적 구조에 대한 메싱 최적화를 통해 전체 품질 개선에 도움을 준다[28].

3D 유전체에 대한 SBR+ 해석은 기존의 SBR 해석이 프레넬 반사 및 투과 계수로 특징지어지는 표면에 서 솔버를 도입했다면, HFSS 2021 R2 버전부터는 SBR+ 기능을 사용해 비전도성 유전체 재료를 체적 영역에 대해 해석할 수 있다[32]. 이 새로운 기능을 통해 자동차 범퍼, 레이돔 및 렌즈와 같은 다양한 두께의 유전체 영역과 관련된 문제를 정확하게 해석할 수 있으며, 특정한 구조 해석 시 기존의 HFSS FEM 기능만을 사용할 때 4시간 41분 걸리는 해석을 SBR+와 결합하여 사용함으로써 2분 50초까지 단축하는 결과를 얻게 된다[32].

지금까지 살펴본 상용 전자기 소프트웨어는 대부분 외산으로서 가격이 매우 고가이며, 시뮬레이션 속도에 대한 아쉬움도 있는 상태이다. 아울러, 현재까지 자율주행 시나리오에 대한 완벽한 확립이 되어 있지 않은 것으로 판단된다. 이에 따라 국내 자체 시뮬레이터 개발시 상기의 문제점을 필수적으로 고려하여야 한다. 마지막으로, 앞서의 상용 시뮬레이터의 주 사용기법 및 특징을 표 2에 정리하였다.

### 3.3 직접 작성 코드(In-house)와 Ansys社の HFSS를 사용한 시뮬레이션 결과의 비교

본 절에서는 앞서 소개한 HFSS를 사용한 시뮬레이션을 진행하였으며, 자체적으로 개발한 In-house code의 결과와 비교하였다.

#### 3.3.1 In-house Code 소개

본 논문에서는 FEM을 사용해 waveguide 구조에 대한 반사 계수 S11 parameter에 대해 해석하였으며, 이에 따른 waveguide의 경계값 문제는 식(1)과 같은 2차 미분 방정식으로부터 시작된다[7].

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\alpha_x \frac{\partial \vec{E}}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\alpha_y \frac{\partial \vec{E}}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_z \frac{\partial \vec{E}}{\partial z}) + \beta \vec{E} = f \quad (1)$$

Waveguide에 입사되는 전기장에 대해 variational principle을 적용하면 식(2)의 functional 형태가 도출된다[7].

$$F(\vec{E}) = \frac{1}{2} \iiint_V [\frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{E}) \cdot (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \epsilon_r \vec{E} \cdot \vec{E}] dV \quad (2) \\ + \iint_S [\frac{\gamma}{2} (\hat{n} \times \vec{E}) \cdot (\hat{n} \times \vec{E}) + \vec{E} \cdot \vec{U}^{inc}] dS \\ + \iint_S [\frac{\gamma}{2} (\hat{n} \times \vec{E}) \cdot (\hat{n} \times \vec{E})] dS$$

아울러, 식(2)는 식(3)과 같은 형태로 표현되며, 식(3)의 구성 성분인 elemental matrix는 식(4)의 형태로 표현된다[7]. 식(3)의 방정식을 FEM 기법을 사용해 공식화하면 전기장(E)을 구할 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} \sum_{e=1}^M \{E^e\}^T [K^e] \{E^e\} + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{M_s} \{E^s\}^T [B^s] \{E^s\} \quad (3) \\ - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{M_s} \{E^s\} \{b^s\}$$

$$[K^e] = \iiint_{V^e} [\frac{1}{\mu_r} \{ \nabla \times \vec{N}^e \} \cdot \{ \nabla \times \vec{N}^e \}^T \\ - k_0^2 \epsilon_r \{ \vec{N}^e \} \cdot \{ \vec{N}^e \}^T] dV \quad (4) \\ [B^s] = \iint_{S^s} \gamma \{ \vec{S}^s \} \cdot \{ \vec{S}^s \}^T dS \\ \{b^s\} = \iint_{S^s} \{ \hat{n} \times \vec{S}^s \} \cdot \vec{U}^{inc} dS$$

최종적으로 mode의 직교성을 이용하는 식(5)에 상기 도출된 전기장을 대입해 반사 계수 S11 parameter를 구할 수 있다[7].

$$R = \frac{2e^{-jk_z \Delta z_1}}{abE_0} \iint_S \vec{E}(x, y, z_1) \cdot \vec{e}_{10}(x, y) dS - e^{-2jk_z \Delta z_1} \quad (5)$$

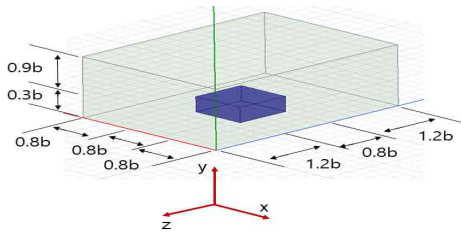
#### 3.3.2 시뮬레이션 결과 비교

그림 8은 해석에 사용된 inhomogeneous waveguide 구조이며, 구조의 크기는 2.4 x 1.2 x 3.2 mm, 내부 유전체의 크기는 0.8 x 0.3 x 0.8 mm이다. 유전체의 상대유전율  $\epsilon_r = 4$ 이며, waveguide의 정면 XY 평면에서 planewave가 입사되고, 반대쪽 XY 평면으로 전파하게 된다. 최종적으로 구조에 대한 전체

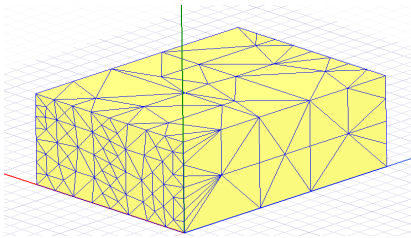


적인 E field를 구한 뒤 후처리 과정을 거쳐 S11 parameter에 대해 상호 비교를 하였으며, S11 parameter를 관찰하기 위한 시뮬레이션 환경 주파수는 8~13GHz로 설정하고, 이 구간 안에서 0.01GHz 간격으로 S11 parameter을 구하여 도시하였다. 여기서, S11 parameter는 planewave가 입사되는 평면에서 입사파에 대한 반사파의 비, 즉 Waveguide 구조의 반사 계수이다.

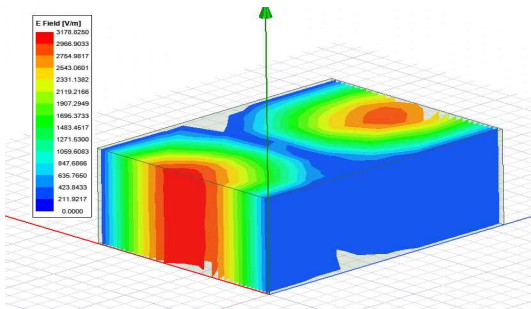
생성이며, 적응형 메시에 의해 세밀한 해석이 필요한 부분에 메시가 더욱 촘촘하게 생성된 것을 알 수 있다. 또한, 그림10은 HFSS를 사용해 inhomogeneous waveguide의 E field를 나타냈으며, 그림 11는 HFSS와 In-house의 비교를 위해 HFSS와 In-house의 S11 parameter를 Linear scale로 나타낸 것이고, 그림 12은 dB scale로 나타낸 것이다. 결과 그래프를 보면 HFSS의 결과와 직접 작성한 코드의 결과가 거의 일치한다고 볼 수 있다.



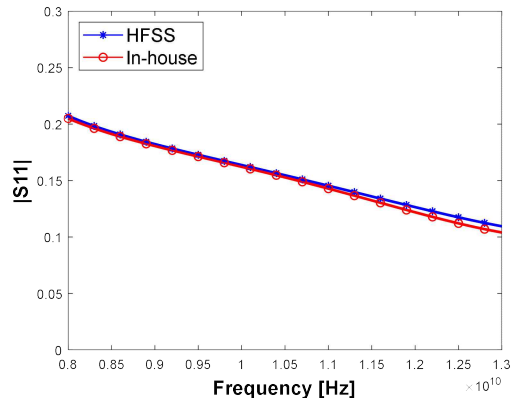
〈그림 8〉 Inhomogeneous Waveguide의 구조  
( $b = 0.01m$ )



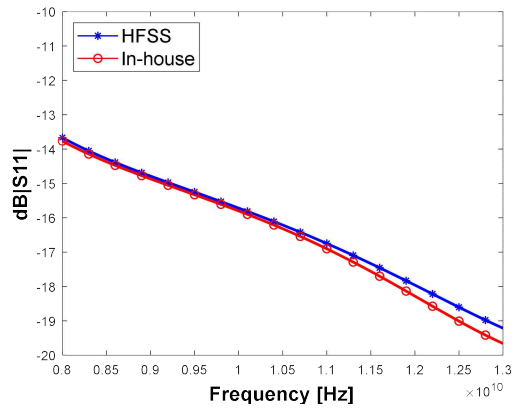
〈그림 9〉 HFSS를 사용한 adaptive 메시



〈그림 10〉 HFSS를 사용한 E Field plot



〈그림 11〉 HFSS와 In-house의 결과 비교 (Linear scale)



〈그림 12〉 HFSS와 In-house의 결과 비교 (dB scale)

그림 9는 상용 프로그램인 HFSS를 사용한 메시의

#### IV. 결론

엄청난 속도로 발전하는 현대 사회에서 전자파를 이용한 전자기기 및 전파 분석은 다양한 분야에서 필요하게 되었으며, 이에 대한 해석 또한 필수 불가결하다. 서로 다른 다수의 전자기기가 동시에 사용되는 자율주행 자동차 또한 예외는 아니며, 자율주행 시뮬레이션을 위해서는 복잡한 전파 환경에 대한 시뮬레이션이 필요하다. 하지만, 방대한 계산량 때문에 보다 빠른 해석이 요구되는 것도 사실이다.

본 논문에서는 자율주행 자동차의 동향, 자율주행 환경에서의 전자기 해석 필요성, 전자기 해석을 위한 수치해석 기법인 FEM, MoM, FDTD의 특징, 자율주행 시뮬레이션 소프트웨어, 전자기 해석 시뮬레이션 소프트웨어에 대하여 간략히 알아보았으며, 각 소프트웨어에 대한 사용기법 및 특징을 정리하였다. 아울러, 전자기 해석 시뮬레이션 소프트웨어 중 하나인 HFSS를 사용한 시뮬레이션 결과 및 직접 작성한 In-house code의 결과를 비교하여 FEM을 이용한 전자기 수치해석의 기반기술을 확보함을 보였다. 아직 미성숙한 시장인 자율주행용 전자기 해석 소프트웨어 개발을 위해서 국내 자체 개발 노력이 더욱 필요하다 하겠다.

#### 참고문헌

- [1] 이병윤, “국내의 자율주행자동차 기술개발 동향과 전망,” 한국통신학회지(정보와통신), 제33권, 제4호, 2016년, pp.10-16.
- [2] 황재호, “자율주행을 위한 센서기술동향,” 한국자동차공학회, 제42권, 제4호, 2020, pp.18-21.
- [3] 이재관, “자율주행 자동차 개발현황 및 시사점,” 전자공학회지, 제41권, 제1호, 2014, pp.22-29.
- [4] 캐드엔그래픽스, CAE 가이드 V1, 이엔지미디어, 2021.
- [5] 김문성 · 이장훈 · 이우찬, “자율주행 환경의 레이더 시뮬레이션을 위한 전자기 해석 시뮬레이터 개발 동향,” 2019 인터넷정보학회 춘계학술발표대회, 제20권, 제1호, 2019.
- [6] Jian-Ming Jin, Theory and Computation of Electromagnetic Fields, 2<sup>nd</sup> Ed, Wiley-IEEE Press, 2015.
- [7] Jian-Ming Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics, 3<sup>rd</sup> Ed, Wiley-IEEE Press, 2015.
- [8] Simcenter Prescan[Website], (2021, November 11), Retrieved from <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ko/products/simcenter/prescan.html>
- [9] Siemens(2019), Simcenter Prescan, Retrieved from <https://feacomp.com/wp-content/uploads/dae-uploads/PreScan-1.pdf>
- [10] ADAS & AV 시스템 시뮬레이션[웹사이트], (2021년 11월11일), Retrieved from <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ko/products/simulation-test/active-safety-system-simulation.html>
- [11] Vires(2020), VIRESE Virtual Test Drive(VTD), Retrieved from [https://media.mscsoftware.com/cdn/farfuture/-cvEJfmu1qc-Lzpt-F1gPoLbmrRjnh70prNZVYxXv2M/mtime:1603316972/sites/default/files/hexagon\\_mi\\_vires\\_datasheet-vtd\\_a4\\_web.pdf?\\_ga=2.140419440.2100795047.1636426369-1037215801.1636024917](https://media.mscsoftware.com/cdn/farfuture/-cvEJfmu1qc-Lzpt-F1gPoLbmrRjnh70prNZVYxXv2M/mtime:1603316972/sites/default/files/hexagon_mi_vires_datasheet-vtd_a4_web.pdf?_ga=2.140419440.2100795047.1636426369-1037215801.1636024917)
- [12] HEXAGON(2021), Design & engineering simulation solutions, Retrieved from [https://documents.mscsoftware.com/cdn/farfuture/IGpNUbD-tAVsKtV-iVLbDpuQzLaBe86fzGiXKzvhuAE/mtime:1622643864/sites/default/files/d-e\\_brochure-company-kr.pdf?\\_ga=2.1729](https://documents.mscsoftware.com/cdn/farfuture/IGpNUbD-tAVsKtV-iVLbDpuQzLaBe86fzGiXKzvhuAE/mtime:1622643864/sites/default/files/d-e_brochure-company-kr.pdf?_ga=2.1729)

- 27456.2100795047.1636426369-1037215801.1636024917
- [13] VTD(Virtual Test Drive)[Website], (2021, November 11), Retrieved from <https://www.vector.com/int/en/products/products-a-z/software/>
- [14] Altair Feko(2019), High Frequency Electromagnetics and Antenna Design, Retrieved from <https://www.altair.com/resource/altair-feko-datasheet>
- [15] Altair Feko[Website], (2021, November 11), Retrieved from <https://www.altair.co.kr/feko/>
- [16] Platform Product:COMSOL MULTIPHYSICS [Website], (2021, November 11), Retrieved from <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
- [17] Dassault(2016), CST STUDIO SUITE 2016, Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Mohamed\\_Mourad\\_Lafifi/post/Is\\_indirect\\_test\\_beam\\_method\\_is\\_only\\_preferable\\_method\\_over\\_direct\\_while\\_simulating\\_wakefields\\_using\\_CST\\_Particle\\_Studio/attachment/59d63b5279197b80779985fb/AS%3A410162914447371%401474801867862/download/CST-STUDIO-SUITE-2016.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mohamed_Mourad_Lafifi/post/Is_indirect_test_beam_method_is_only_preferable_method_over_direct_while_simulating_wakefields_using_CST_Particle_Studio/attachment/59d63b5279197b80779985fb/AS%3A410162914447371%401474801867862/download/CST-STUDIO-SUITE-2016.pdf)
- [18] Simulia(n.d.), CST STUDIO SUITE ELECTROMAGNETIC FIELD SIMULATION SOFTWARE, Retrieved from <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/SIMULIA/PRODUCTS/CST/SIMULIA-CST-Studio-Suite-Brochure.pdf>
- [19] Dassault(2020), CST Studio Suite Cable Simulation, Retrieved from <https://space.mit.edu/RADIO/Documentation/CST%20Studio%20Suite%20-%20Cable%20Simulation.pdf>
- [20] CST STUDIO SUITE[Website], (2021, November 11), Retrieved from <https://www.3ds.com/ko/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [21] Analyst[Website], (2021, November 11), Retrieved from <https://www.awr.com/awr-software/products/analyst>
- [22] AWR Analyst(2020), Full 3D finite element method EM analysis software, Retrieved from <https://www.awr.com/serve/ds-ana>
- [23] AWR Design Environment(2020), RF/microwave EDA software suite, Retrieved from <https://resources.system-analysis.cadence.com/awr-datasheets/awr-design-environment>
- [24] samadii/em[Website], (2021, November 11), Retrieved from <https://www.metariver.kr/smdem.html>
- [25] PathWave EM Design(EMPro)[Website], (2021, November 11), Retrieved from <https://www.keysight.com/kr/ko/products/software/pathwave-design-software/pathwave-em-design-software.html>
- [26] Keysight EEsof EDA(2017), EMPro 3D Electromagnetic Modeling and Simulation Environment Integrated with your ADS Design Flow, Retrieved from <https://www.keysight.com/kr/ko/assets/7018-02343/brochures/5990-4819.pdf>
- [27] Simcenter MagNet[Website], (2021, November 11), Retrieved from <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ko/products/simcenter/magnet.html>
- [28] Ansys HFSS[Website], (2021, November 11), Retrieved from <https://www.ansys.com/ko-kr/products/electronics/ansys-hfss>
- [29] ANSYS(2015), ANSYS HFSS, Retrieved from

- <https://moasoftware.co.kr/download/ansys/ansys-hfss-brochure-160.pdf>
- [30] ANSYS(2005), user's guide - High Frequency Structure Simulator, Retrieved from <http://anlage.umd.edu/HFSSv10UserGuide.pdf>
- [31] ANSYS(2014), ANSYS HFSS for Antenna Simulation, Retrieved from <https://www.pdsol.com/wp-content/uploads/2018/04/ab-ansys-hfss-for-antenna-simulation.pdf>
- [32] New HFSS SBR+[Website], (2021, November 11), Retrieved from <https://www.ansys.com/ko-kr/blog/new-hfss-sbr-technology-in-ansys-2021-r2>



이 우 찬  
Lee, Woochan

2017년 9월~현재  
인천대학교 전기공학과 부교수  
2004년 4월~2017년 8월  
특허청 사무관 / 서기관 대우  
2005년 7월~2008년 6월  
육군사관학교 전자공학 교수사관  
2016년 12월 미국 Purdue University  
전기컴퓨터공학부(공학박사)  
2005년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)  
2002년 2월 서울대학교 전기공학부 (공학사)

관심분야 : 전자기수치해석, 머신러닝,  
네트워킹  
E-mail : wlee@inu.ac.kr

논문접수일 : 2021년 12월 1일  
수정일 : 2021년 12월 10일  
게재확정일 : 2021년 12월 16일

### ■ 저자소개 ■



박 우 빈  
Park, Woobin

2021년 3월~현재  
인천대학교 전기공학과 석사과정  
2021년 2월 인천대학교 전기공학과(공학사)

관심분야 : 유효요소법, 전자기수치해석  
E-mail : wbpark@inu.ac.kr



김 문 성  
Kim, Moonseong

2018년 9월~현재  
서울신학대학교 IT융합소프트웨어학과  
학과장/조교수  
2009년 10월~2018년 8월  
특허청 사무관 / 서기관 대우  
2007년 12월~2009년 10월  
미국 미시간주립대학교 연구원  
2007년 2월 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부  
(공학박사)  
2002년 8월 성균관대학교 수학과(이학석사)

관심분야 : 네트워킹, 정보보호, 수치해석  
E-mail : moonseong@stuu.ac.kr