

전산수치해석 기반 화재훈련 VR 시뮬레이터의 개발

차무현*, 이재경*, 박성환*, 최병일**

A Development of Fire Training Simulator Based on Computational Fluid Dynamics Simulation

Moohyun Cha*, Jaikyung Lee*, Seongwhan Park* and Byungil Choi**

ABSTRACT

An experience based training system concerning various fire situations which may result many casualties has been required to make rapid decision and improve the responsiveness. Recently, the necessity of virtual reality (VR) based training system which can replace a dangerous full-scale fire training and be easily adopted to the training or evaluation process is increasing. This study constructed the virtual environment according to pre-defined scenarios, utilized the FDS(Fire Dynamics Simulator), three dimensional computational fire analysis program, to derive numerically simulated data on the propagation of fire. Finally, by visualizing the realistic fire and smoke behavior through virtual reality technique and implementing real-time interaction, we developed a VR-based fire training simulator. Also, in order to ensure the sense for the real of a virtual world and real-time performance at the same time, we proposed appropriate data processing and space search algorithms, demonstrated the value of proposed method through experiments.

Key words : Virtual Reality, Fire Training, Training Simulator, Scientific Visualization

1. 서 론

화재상황, 특히 다수의 사람들이 이용하고 외부와 차단된 공간에서의 사고상황은 급속한 화재성장과 매연 및 피난로 확보의 어려움 등으로 인해 소화 및 구조 활동에 많은 제약이 따른다. 이와 같은 위험상황에서 인명 및 재산 피해를 최소화하기 위해서는 다양한 화재현상에 대한 체현 및 소방 대응력 향상을 위한 훈련과정이 필수적이라 할 수 있다. 하지만 실물화재 훈련의 경우 고가의 사회적/경제적 비용이 소모되며, 인명사고 및 구조불 성공 등의 위험성을 가진다.

한편, 최근에는 가상현실(Virtual Reality, VR) 기술의 비약적인 발전으로 컴퓨터를 통해 재현된 가상 세계와 실제 훈련 참가자가 서로 상호작용할 수 있는 기술이 가능해 졌으며, 이를 통해 안전하고 편리한 훈련

을 반복적으로 수행할 수 있는 VR기반 훈련 시뮬레이터의 필요성이 점차 강조되고 있다. 이러한 훈련용 시뮬레이터는 시나리오의 생성과 제어, 훈련 참가자들의 임무수행, 훈련결과에 대한 평가 등의 기본적 기능을 가져야 하며, 특히 가상체험이라는 훈련 목적을 성공적으로 달성하기 위해서는, 실제 사고상황과 흡사한 화재 유동현상의 시뮬레이션과 이에 대한 실감형 그래픽스 표현이 매우 중요하다.

화재현상, 특히 유체의 유동에 대한 실감형 렌더링 기술은 그래픽스 하드웨어/소프트웨어의 발전으로 많은 연구성과가 이루어져 왔다. 일반적인 게임에서 널리 사용되는 파티클 시스템의 경우 방출속도와 중력장, 생존주기 등이 고려되지만 다양한 압력차가 발생하는 실제 물리기반 시뮬레이션을 기반하지 않고 있으며^[1], Navier-Stokes 수식 등의 물리기반 유체 시뮬레이션을 적용한 연구결과에서는 계산속도의 문제로 인해 실시간이 아닌 영화와 같은 애니메이션 제작용으로 응용되고 있다^[2]. 또한 최근에는 급속히 성능이 높아지고 있는 GPU를 직접 사용하여 간단한 유동현상의 실시간 계산 및 렌더링을 수행한 결과도 소개되

*정회원, 한국기계연구원 시스템엔지니어링 연구본부

**비회원, 한국기계연구원 에너지플랜트 연구본부

- 논문투고일: 2009. 03. 05

- 논문수정일: 2009. 06. 11

- 심사완료일: 2009. 06. 16

고 있지만, 아직까지는 작은 계산공간에 대한 국소적인 유체효과만을 다루고 있어⁶⁾, 화재훈련과 같이 상대적으로 매우 큰 공간에서 열에 의한 유속과 제연 시설물 등에 의해 영향을 받는 대규모 화재유동 현상의 표현에는 적합하지 않다.

본 연구에서는 화재 유동현상의 사실성을 확보하기 위해, 화재공학 연구자들에 의해 오랜 기간 동안 개발되고 그 오차범위가 검증된 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 솔버를 사용하고자 하였다. 가장 대표적인 화재시뮬레이션 솔버에는 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 2차원 준모델 CFAST⁶⁾와 화재로 인한 연기와 열전달을 3차원으로 해석할 수 있는 FDS(Fire Dynamics Simulator)^{7,8)} 등이 있다. 특히 FDS는 시간진행에 따른 화재성장 및 연기전파상황뿐 아니라 3차원 공간의 거의 모든 물리량을 정량적으로 파악할 수 있고, 실제 실험치와 5~20%의 오차범위 내에서 예측이 가능하기 때문에 화재사고 분석, 건축물 설계, 방재계획 수립 등 다양한 연구분야에서 폭넓게 활용되고 있다^{9,10)}.

하지만 이러한 CFD기반의 해석과정은 많은 계산 시간이 필요하며 그 결과도 수십 GB에 이르는 대용량 데이터이기 때문에, 이를 실시간 시뮬레이터 시스템에 적용하기 위해서는 적절한 데이터처리 및 실시간 성능확보가 반드시 필요하다. 본 연구에서는 단계적 정밀도를 가지는 공간분할과 탐색, 효율적 메모리 관리 기술 등을 제시하여 대용량 데이터에 기반한 화재현상을 실시간으로 표현하였으며, 훈련용 시뮬레이터 시스템의 구현 및 실험을 통해 그 유용성을 검증하였다.

2. 관련연구 및 시스템 개요

미국 ETC(Environmental Tectonics Corporation)에서는 소방 장비, 인력 등 자원의 효율적인 배치와 팀 단위의 의사소통 훈련 환경을 제공하는 ADMS

(Advanced Disaster Management Simulator)를 개발한 바 있다¹¹⁾.

이 상용 소프트웨어는 소방관의 화재체험이 아닌 소방지휘관의 소방계획 수립과 지휘체계 습득을 목적으로 하기 때문에, 화재현상은 사고상황의 시각적인 식만을 위해 물리법칙에 기반하지 않은 단순한 그래픽으로 구현되었다.

Tazama, U. St. Julien 등은 주택화재 시나리오에 기반하여, 훈련자가 미리 지정된 소방활동 명령들을 가상의 3차원 아바타를 통해 수행할 수 있는 Firefighter Command Training Virtual Environment 시스템을 개발하였다¹²⁾. 이 연구에서는 경험이 풍부한 소방관을 대상으로 의사결정 훈련을 수행하기 때문에 화재와 연기의 사실적 표현이 매우 중요하였으며, 이를 위해 FDS를 통한 수치 시뮬레이션을 수행하고 화재역학 데이터에 대한 불륨 렌더링 과정을 거쳐 가상의 화재상황을 구현하였다. 또한 대용량 데이터에 대해 Run Length Encoding(RLE) 방식의 압축을 적용하여 파일 용량 자체를 줄이는 방법으로 실시간 성능을 확보하고자 하였으며 다중해상도 공간분할 기술은 적용되지 않았다.

Aizhu Ren 등은 지하역사 화재 시나리오에 기반하여, 화재상황 체험 및 피난훈련을 수행할 수 있는 가상현실 시스템을 개발하였다¹³⁾. 앞선 연구와 마찬가지로 FDS를 이용하여 화재 시뮬레이션을 수행하였지만, 그 결과를 시스템에 직접 적용하지는 않았으며 상용 그래픽 라이브러리의 파티클 시스템에 입력되는 초기 속성값(화원위치, 입자갯수, 방출속도 등)을 제공하기 위해 참고 정보로만 활용되었다.

또한, FDS의 전용 후처리기로 개발된 Smokeview의 경우, 사실적인 Smoke 표현뿐 아니라 FDS에서 해석된 모든 종류의 물리량을 슬라이스, Isosurface, 입자 형식으로 시각화가 가능하며, 간단한 네비게이션 기능도 제공하고 있다¹⁴⁾. 하지만 해석데이터의 후처리 기능이 주 목적이기 때문에 3차원 모델에 대한 실감형 렌더링 효과 및 아바타 제어 등의 VR시뮬레

Table 1. 화재훈련 시뮬레이터 시스템의 기능 비교

관련연구	시뮬레이터 목적		화재 물리량 표현		핵심 기능		
	체험훈련	상황관제	3D Smoke	기타 물리량	FDS적용	대용량 자료처리	실감형 렌더링
ADMS ^[11]	-	○	○	-	-	-	○
Tazama ^[12]	○	○	○	-	○	파일압축	다소 미흡
Aizhu ^[13]	○	-	○	-	참고활용	-	○
Smokeview ^[14]	-	제어난이	○	2차원 표현	○	-	다소 미흡
본 연구	○	○	○	○	○	공간분할 / LOD	○

이터에서 필요로 하는 기본 기능들이 미약하여 실제 시뮬레이터 개발에는 사용하기 어려운 단점을 가지고 있다.

본 시뮬레이터 시스템의 사용자는 화재상황을 직접 체험하고자 하는 일반인, 간단한 소방훈련을 수행하고자 하는 소방관, 화재 전개상황을 파악하고 소방계획을 수립하고자 하는 소방시뮬관 등을 대상으로 선정하였다. 이러한 훈련 참가자들에게 정확하고 사실적인 가상의 훈련환경을 제공하기 위해 실감형 렌더링 효과 생성에 적합한 오픈소스 기반의 VR 그래픽 라이브러리에 FDS 해석결과를 연동하여 화재현상을 실시간으로 표현하고자 하였다. 또한, Smoke 이외에 온도, 일산화탄소, 열방출률 등 비시각적인 물리량에 대한 유동현상을 3차원상에서 직접 체험할 수 있도록 물리량 가시화 기능도 제공하여, 효과적인 소방계획 수립을 지원할 수 있도록 하였으며, Table 1에서는 기존의 화재훈련 시뮬레이터와 본 연구에서 목표로 하는 시스템의 기능을 서로 비교하여 정리하였다.

한편, 대용량 데이터 처리 및 가시화의 경우, 주요 의학 측정데이터 또는 CFD 해석결과와 같이 대량의 3차원 이산격자공간에 분포하는 물리량에 대해 효율적인 볼륨 렌더링 기술을 연구하는 Scientific Visualization 분야에서 많은 연구가 수행되어 왔다. 이 중 다중해상도 기반 LOD(Level of Detail) 선택 기술은 먼저 주어진 데이터 공간을 다양한 정밀도(해상도)를 가지도록 단계적으로 분할하고, 실시간 렌더링 시에는 이들을 적절한 기준에 의해 선택 및 조합될 수 있도록 하여 사용자에게 제공되는 정밀도는 항상 일정하게 유지할 수 있는 기술이다^[15,16]. 본 연구에서는 Octree^[17]를 이용한 3차원 공간분할과 시점 및 데이터 분포에 따른 LOD선택을 볼륨 렌더링에 적용하여 각 렌더링 단위의 처리성능을 확보하였고, 메모리 캐핑 파일과 독립 프로세스 적용을 통해 효율적인 메모리 관리가 가능하도록 설계하였다.

3. 시스템의 설계

본 연구에서 개발된 화재훈련 시뮬레이터 시스템은 Fig. 1과 같이, FDS를 이용하여 수치시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 데이터베이스에 저장하는 전처리 과정과, 이를 실시간으로 처리하여 그래픽 영상을 생성하고 훈련 시나리오에 기반한 상호작용을 구동하는 실시간 과정으로 나뉜다.

전처리 과정에서는 화재의 형태와 훈련과정에 대한 시나리오를 정립하고 이에 대한 요구사항을 반영한

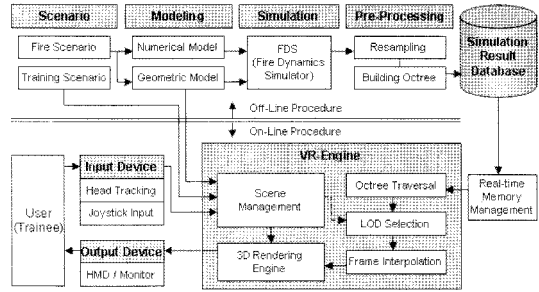


Fig. 1. 화재훈련 시뮬레이터 시스템의 설계.

수치적 화재해석모델을 생성하며 해석용 격자 생성 및 추후의 렌더링 과정에 직접 적용할 시설물 형상 모델링을 수행하게 된다. 화재모델이 완성되면 정밀한 역학데이터 확보를 위해 FDS를 이용한 수치 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 데이터베이스에 저장하게 된다. 이때, 해석된 수치데이터는 보통 수십만 이상의 격자로 이루어진 대용량 데이터이며, 실시간 단계에서 LOD선택을 수행할 수 있도록 공간분할 및 데이터 구조 변환과정을 거치게 된다.

실시간 과정에서는 기본적인 가상현실 시스템의 구동을 위해 유저로부터 입력을 전달받고 시나리오 제어에 의해 렌더링된 그래픽 영상을 디스플레이 장비를 거쳐 유저에게 전달한다. 한편 화재역학 데이터의 실시간 처리과정에서는, 현재 필요한 블록데이터 집합을 시스템 메모리에 버퍼링한 후, Octree 데이터 구조를 순회하며 최적의 LOD선택을 수행하게 된다. 이렇게 선택된 블록 데이터는 매 프레임마다 보간되어 연속적인 공간 물리량 분포를 생성해 내게 되고, 렌더링 엔진의 실시간 볼륨렌더링 과정을 거쳐 화재 유동 또는 기타 화재 물리량의 시각화된 영상을 유저에게 제공한다.

4장에서는 화재시뮬레이션 및 결과물 분석을 통한 효율적인 자료구조 변환법을 제시하였으며, 5장에서는 LOD선택 및 메모리 관리 기술 등을 소개하고자 한다.

4. 화재 시뮬레이션 및 데이터 전처리

4.1 시나리오 정의

본 시뮬레이터는 연장 4.6km의 국내 최장 도로터널인 죽령터널 내부에서 일어난 차량사고 상황을 시뮬레이션 대상으로 선정하였으며, 종류식 제트팬에 의한 배연상황과 피난 연락갱 탈출을 시나리오에 반영하여 가능한한 사실적 훈련을 수행할 수 있도록 하였

다. 또한 체험훈련의 효율성 및 시스템 성능확보를 위해 일반인 또는 소방관이 보행으로 피난, 구조활동을 할 수 있는 범위를 고려하여, Fig. 2와 같은 부분적이고 간략화된 터널 형상모델을 적용하였다. 전체적인 시나리오는 Table 2와 같이 화재의 크기, 제트팬에 의한 유속, 훈련의 종류, 컨트롤 방식, 훈련시작지점 등 총 5가지 종류의 항목을 정의하고 이를 서로 조합하여 다양한 훈련을 선택 수행할 수 있도록 설계하였다.

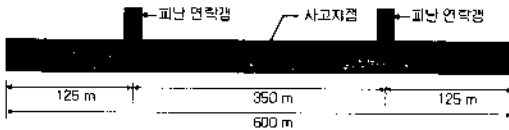


Fig. 2. 시뮬레이션 대상터널의 간략화 모델.

Table 2. 화재훈련 시나리오의 구성

Category	Scenario
Fire Size	6 MW
	18 MW
Air Flow	No air flow
	Air flow (25 m/s)
Navigation	Overview
	Fire Experience (People)
	Fire Training (Fireman)
Control	Automatic Control
	Manual Control
Starting Position	Tunnel Entrance
	Tunnel Exit
	First Shelter
	Second Shelter

4.2 화재 시뮬레이션

FDS를 이용한 화재 수치시뮬레이션을 수행하기 위해서는, 해석용 격자의 생성, 화원의 배치, 연소특성 정의, 재질 및 경계조건 설정 등 화재 시나리오에 대한 상세 모델링을 수행해야 한다. 먼저, (-500~500, 0~7.5, -3~3) 범위에 대해 화원과의 거리에 따라 0.5~2 간격의 비균등 격자를 생성하고, 차량 사고지점으로 가정된 (0, 0, 1) 위치에 화원을 배치하였다(단위 :m). 실제 사용될 터널모델은 (-300~300, 0~7.5, -3~3) 범위이지만, 추후 도로 주행방향으로 화원의 위치를 용이하게 변경하기 위해, 실제보다 넓은 범위를 설정하였다. 격자 파일의 생성은 VR용 3차원 형상모델링 결과를 FDS의 전처리기인 PyroSim¹⁸⁾에서 입력 가능한 DXF포맷으로 변환하고 이에 대한 단순화 작

업을 거쳐 이루어 졌다. 화재의 크기는 승용차화재를 표현하는 6 MW 및 버스 또는 트럭의 전소에 해당하는 18 MW로 설정하고, 제트팬 가동을 통한 종류식 환기상황을 묘사하기 위해 초속 2.5 m의 유속설정이 가능하게 하여, 총 4가지 사고 상황에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

FDS의 출력파일은 Thermocouple, Sprinkler, Heat Release Rate, Gas Mass, Particle, Plot3D, Slice, Boundary 등으로 구성된다¹⁹⁾. 이중 Plot3D, Slice, Boundary 출력은 이진(Binary)형태이며, FDS2ASCII 유틸리티를 사용하여 텍스트(Ascii) 형태의 변환이 가능하고, FDS 코드의 수정없이 자유롭게 활용될 수 있다. Plot3D는 다양한 CFD 시뮬레이션 결과를 표현하기 위해, NASA에서 개발한 엔지니어링 포맷으로서, AVS, IRIS, Tecplot 등의 일반적인 공학데이터 플로팅에 주로 활용되는 ASCII 형식의 데이터 표준이다¹⁹⁾. FDS에서 출력된 Plot3D데이터는 각각의 격자 Cell에 해당하는 3차원 위치정보 및 물리량을 담고 있으며, 매 Time-Step별 파일로 저장된다. 본 연구에서는 Time-Step을 1초로 설정하고, Table 3과 같은 물리량을 포함하는, 각 화재종류별 Plot3D 데이터 1800개(30분 분량)를 확보하였다. 이중, Soot Density는 연기의 분포를 가시화하기 위해 사용되며, 나머지 물리량은 화상 또는 일산화탄소 중독과 같이 훈련자에게 치명적일 수 있는 혼합기체 전과상황을 가시화하거나 평가하기 위해 사용되었다.

Table 3. Plot3D 출력파일의 구조와 단위

Type	Quantity	Description	Units
Grid Info	X	x-position	m
	Y	y-position	m
	Z	z-position	m
Gas Phase	Soot Density	매연 입자 농도	mg/m ³
	Oxygen	산소 체적분율	mol/mol
	HRRPUV	단위체적당 열방출율	kW/m ³
	CO	일산화탄소 체적분율	ppm
	Temperature	기체 온도	°C

4.3 자료구조 변환

FDS 해석결과로부터 얻은 Plot3D q파일은 비균등 격자 데이터이며, 먼저 텍스트형식의 cvs파일로 일괄 변환된 후, 불륨 렌더링에 적합하도록 균등한 격자 간격(본 연구의 경우 0.75 m)으로 재샘플링된다. 또한 FDS 시뮬레이션 코드의 좌표축과 렌더링 엔진의 좌표축이 서로 다르기 때문에 이를 보정하는 과정을 거

Table 4. Raw 데이터 및 전처리 데이터의 상세 규격

Data Type		Cell Offset (m)	Cell Count	Block Size (KB)	Block Count	File Size (MB)
Raw Data		Non-Uniform	288,000	41057.0	1,800	72,170.5
Octree Database	Level 4	12.0	50	2.0	1,800	112.5
	Level 3	6.0	400	15.6	1,800	112.5
	Level 2	3.0	3,200	125.0	1,800	225.0
	Level 1	1.5	25,600	1,000.0	1,800	1,800.0
	Level 0	0.75	204,800	8,000.0	1,800	14,175.0
Sum		-	234,050	9,142.6	9,000	16,425.0

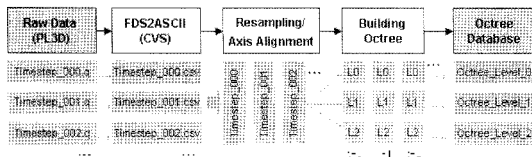


Fig. 3. FDS 해석결과에 대한 자료구조 변환 과정.

친 후, 각 Time-Step별 격자공간에 대해 Octree 공간 분할을 적용하여 총 5개의 레벨을 가지는 계층구조를 생성하였다. 마지막으로 레벨별 Octree 데이터블록들은 Time-Step별로 서로 연결되어, 일련의 이진스트림 형태의 파일시스템에 저장되며, 이를 Octree Database라 정의하였다. Fig. 3에서는 자료구조 변환과정을 다이어그램으로 나타내었으며, Table 4에서는 Raw 데이터 및 전처리된 Octree Database에 대한 상세규격을 보여준다.

5. 실시간 화재현상 렌더링

5.1 대용량 메모리 관리

전처리 과정을 통해 생성된 30분 분량의 Octree-Database는 각 화재시나리오마다 14GByte이상의 파일들로 구성되며, 이는 일반적인 32비트 운영체제 상에서 응용 프로그램이 제어할 수 있는 메모리 범위(보통 2GByte)를 벗어나기 때문에, 하드디스크의 출력 부하를 최소화하며 주기적으로 메모리 입출력이 가능한 버퍼링 관리 기술이 필요하다. 본 연구에서는 디스크파일 자체를 메모리주소 공간으로 매핑할 수 있는 Memory Mapping File을 이용하여 물리적 복사작업을 1회로 고정하고, 메모리 복사작업은 멀티코어 CPU 상에서 독립 프로세스에 의해 수행되도록 하여 전체적인 시스템 부하를 최소화 하였다. 즉, Fig. 4와 같이 Application Heap Memory상에 Ring Buffer를 준비하고 Octree Database의 n초 단위의 데이터 블록집합을 매 n초마다 버퍼에 복사하는 프로세스를 생성하

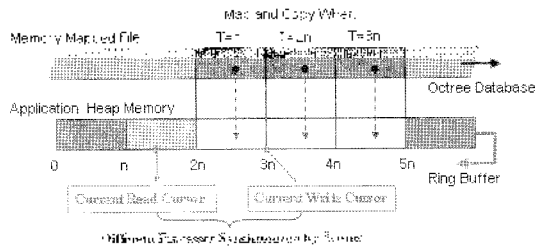


Fig. 4. Memory Mapped File을 이용한 메모리 관리.

며, 메인 프로세스와는 이벤트를 통해 서로 동기화 하였다.

5.2 LOD 선택과 프레임 보간

단계적 정밀도(해상도) 표현 및 LOD(Level of Detail) 선택 기술은 시스템에서 처리가 불가능한 대용량 데이터라 할지라도, 사용자가 받아들이는 정밀도를 최대한 유지한 채 데이터의 간략화가 가능하기 때문에, 공학 데이터 기반의 가상현실 시스템에서는 반드시 필요한 기술이라 할 수 있으며, Fig. 5에서는 분할 공간의 LOD선택과 조합과정에 대한 개념을 2차원 다이어그램으로 나타내었다.

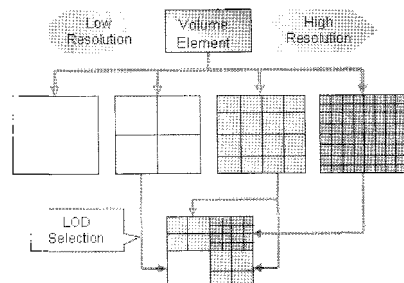


Fig. 5. 다중해상도 공간분할 및 조합과정.

실시간 렌더링 과정에서는 메모리에 로드된 Octree 데이터에 대해 순차적인 노드 순환 과정을 거치며 LOD선택을 수행하게 된다. 본 연구에서는 Table 5와

Table 5. LOD 방식별 선택기준 및 파라미터

LOD Type	Selection Criterion	Parameter
None	-	고정된 Octree 레벨
View Dependent	사용자 시점과 각 Cell간의 거리	Octree 레벨별 거리맵(1)
Data Dependent	각 Cell에 포함된 물리량 (분포)	표현될 최소 물리량(2)
Hybrid Method	Data 방식과 View 방식의 혼용	(1) + (2)

같이 총 4가지 기준에 의한 LOD 방식을 정의하고 각각의 선택기준 마다 변경이 가능한 성능 파라미터를 제공하여 하드웨어에 대한 적응성을 더욱 증가시키고자 하였다. 또한, 이렇게 선택된 현재 Time-Step 및 다음 Time-Step에 해당하는 데이터블록은 불연속 데이터이기 때문에 볼륨 렌더링 과정에서 필요한 연속적인 데이터로 보간되어야 하며, Fig. 6에서는 이때 적용된 선형보간 수식과 실시간 데이터 처리과정을 나타내었다.

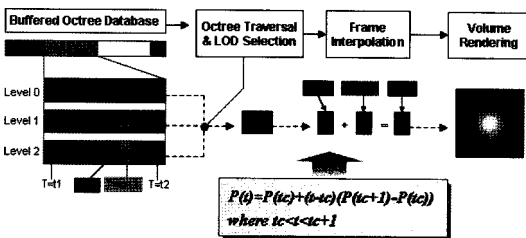


Fig. 6. 데이터블록의 처리과정 및 선형보간 수식.

5.3 실시간 볼륨 렌더링

볼륨 렌더링 기술은 특정 부피에 저장된 데이터로부터 가시적 속성을 가지는 정보를 추출하고, Transfer Function에 의해 이들을 색상, 투명도 등의 광학적 속성으로 변환한 후 컴퓨터 화면의 이미지로 표현하는 기술로서, Ray-Casting, Texture- Slicing, Splatting, Shear-warping 등의 세부 기술로서 구현된다^[20,21]. 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 격자기반의 Plot3D 구조를 3차원 상의 작은 복셀(Voxel)기반 텍스처로 표현하고 이를 2차원 평면에 투영 및 합성하여 화재현상을 가시화 할 수 있는 Splatting 기술을 사용하였으며, 각 복셀에 적용될 이미지는 해당 영역에 대한 정규분포를 가지는 가우시안(Gaussian) 텍스처를 사용하였다. Transfer Function의 경우, Smoke 렌더링은 실제 연기와 가장 흡사한 색상을 부여하고, 해석된 농도값에 의해 투명도를 매핑하는 방식으로 구현하였으며, 그 외의 물리량에 대해서는 인체에 유해한 데이터를 기준으로 최대값과 최소값을 설정하고 이들에 대해 색상과 투명도를 함께 매핑하는 방식으로 구현하였다.

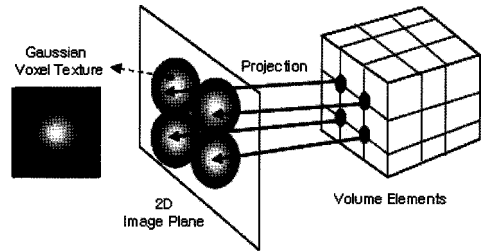


Fig. 7. Splatting 방식의 볼륨 렌더링.

6. 시뮬레이터 구현 및 결과

6.1 구현 환경

본 연구에서 제시한 가시화 모듈과 시뮬레이터 시스템의 개발을 위해 활용된 H/W 및 S/W 구현환경을 Table 6에 정리하였다. 그래픽 라이브러리의 경우, 실시간 데이터 처리와 연계될 수 있도록 세부적인 볼륨 렌더링 제어가 가능한 오픈소스 기반 3차원 그래픽스 엔진인 OGRE(Object-Oriented Graphics Rendering Engine)^[22]를 선택하였다. 이는 DirectX/OpenGL 등을 직접 사용하지 않고도 그래픽 하드웨어 시스템에 접근이 가능하기 때문이며, 그림자, 환경매핑 등 최신 실시간 렌더링 기술 및 캐릭터 애니메이션 기능 등을 지원하기 때문에 다양한 목적의 고품질 VR응용 프로그

Table 6. 시스템 구현 환경

	Category	Specification
H/W	CPU	Xeon 2.66GHz
	RAM	4GB 667MHz
	VGA	Quadro FX5600
	HDD	750G SATA2
S/W	OS	WindowsXP 32bit
	Fire Simulation	FDS 4.0
	FDS Preprocessor	PyroSim 2006
	Graphics API	DirectX 9.0c
	Graphics Lib	OGRE 1.49
	3D Modeling	3DS MAX 2008
	Compiler	VisualStudio 2005

램 개발이 가능하다.

6.2 주요 기능 소개

Fig. 8은 구현된 시뮬레이터 시스템의 유저 인터페이스를 나타내는 화면이며, 각 기능에 대한 설명을 Table 7에 정리하였다. 본 시스템은 일반인 또는 소방관이 2인 1조의 훈련과정을 수행하고, 훈련 지휘관이 전체적인 상황 통제가 가능하도록 Fig. 9와 같이 네트워크 기반의 멀티 시뮬레이터 시스템으로 구성하였다. 시뮬레이터 서버는 지휘관의 입력에 따라 전체 시나리오를 정의하여 클라이언트에 전송 하고, 각 클라

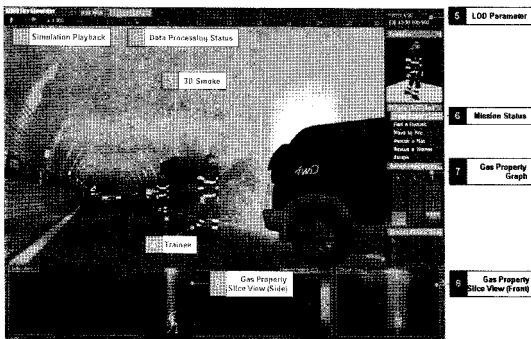


Fig. 8. 훈련 시뮬레이터 시스템의 사용자 인터페이스.

Table 7. 사용자 인터페이스 상세 기능

ID	Interface Name	Function
1	Simulation Playback	화재 시뮬레이션 제어
2	Data Processing Status	데이터처리 진행상황 표시
3	3D Smoke	블룸렌더링에 의한 화재현상
4	Trainee	훈련자에 의해 제어되는아바타
5	LOD Parameter	LOD형식 및 파라메터 설정
6	Mission Status	임무목록 및 현재 임무 표시
7	Gas Property Graph	주변 물리량 표시(그래프)
8	Gas Property Slice View	주변 물리량 표시(슬라이스뷰)

이언트들은 훈련자와의 상호작용에 의해 주어진 임무를 수행하며, 그 정보를 서버로 전송하게 된다. 훈련자에게는 화원에 접근하여 화재상황을 파악하고 소화전을 찾은 뒤, 다시 화원에 접근하여 소화활동을 하거나 주위에 쓰러진 인명을 발견하여 구조 및 탈출하는 형식의 임무가 부여되며, 훈련자는 조이스틱 버튼을 통해 각 임무완료 상황을 클라이언트 시스템에 입력하도록 하였다. 훈련과정이 완료되면 임무별 수행시간, 위험지역 노출정도 등 정량적인 훈련 결과가 시뮬레이터 서버에 출력되어 간단한 훈련평가를 수행할 수 있다. 또한, 시뮬레이터 서버는 화재의 발생과 진행과정, 훈련자의 임무수행 현황, 위험지역 활동 상황에 대한 의사결정 정보를 훈련 지휘관에게 제공하여, 차후 훈련 시나리오를 수정하거나 효율적인 소방계획 수립을 지원할 수 있도록 하였다. Fig. 10에서는 한 시나리오에 대한 훈련과정의 일부를 캡처하여 수록하였다.

6.3 실험 및 검증

본 시스템은 실시간으로 화재상황을 체험하고 훈련하는 것이 주 목적이기 때문에, 실감있는 화재현상의 표현과 이에 대한 실시간 성능을 시스템 검증요소로 설정하여 실험을 수행하였다. 화재가 5분정도 진행된 후 연기가 터널 상층을 거의 채운 상황을 재현하고, 터널 내부 및 외부 시점에서 각 LOD 방식별로 렌더링이 수행되는 Cell의 개수, 초당 프레임수(FPS), 현실감의 정도를 측정하고, 그 평균값을 계산하여 Table 8에 정리하였다. None LOD방식은 Octree 데이터구조의 최하위 레벨 전체에 대한 렌더링을 수행하며, View방식은 시점에서의 거리맵(7m-14m-28m-56m-112m)을 기준으로 Octree 레벨을 선택하였다. Data방식의 경우 1.0 기준으로 정규화 된 물리량에 대해 0.001이하의 데이터는 렌더링에서 제외하였으며, Hybrid 방식의 경우 Data 방식 및 좀더 완화된 조건의 거리맵(150m-300m-450m-600m-750m)을 적용하였다. 결과적으로 본 연구의 멀티 시뮬레이터 시스템에서는, 실제 훈련을 담당하는 클라이언트 시스템의 경우 View Dependent 방식, 화재상황 관제역할을 수행하는 서버 시스템에서는 Hybrid 방식을 적용하여, 대용량 공학 데이터에 대한 적응력, 실시간 시스템 성능 및 유체 현상에 대한 사실감을 동시에 확보할 수 있었다.

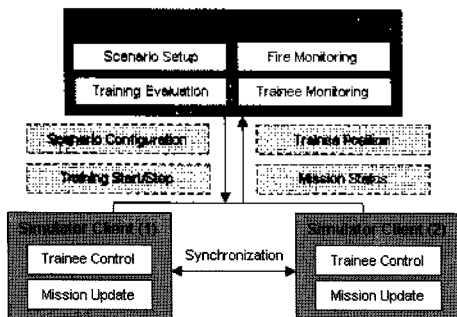
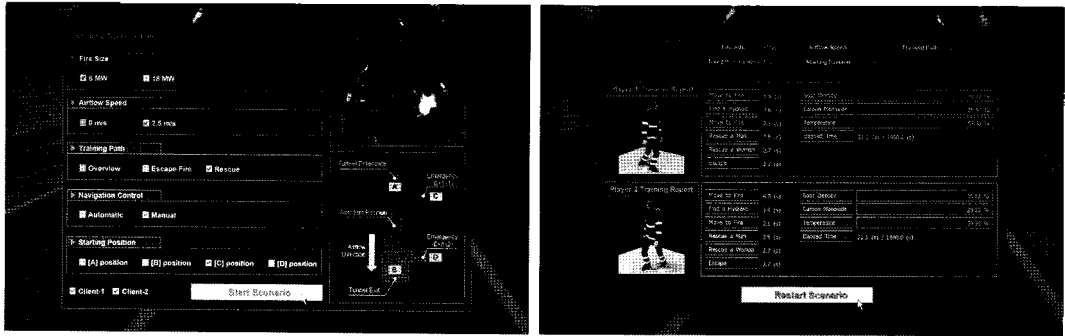


Fig. 9. 네트워크 기반 멀티시뮬레이터 시스템의 구성.

6.4 몰입성 증대

화재훈련의 목적을 효율적으로 달성하기 위해서는



(a) 시나리오 설정 및 훈련 시작

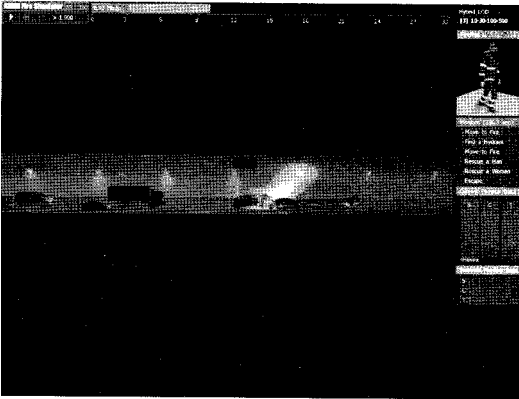
(b) 훈련 종료 및 결과 평가



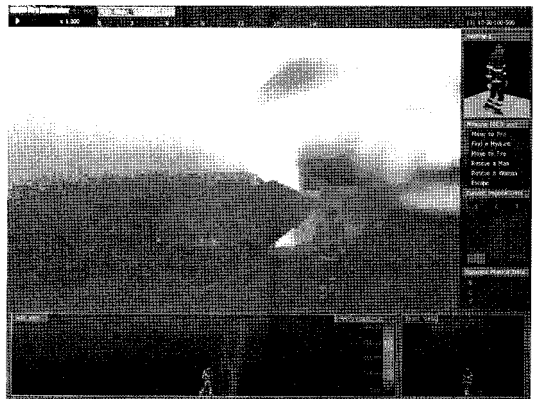
(c) 조명 설정 시나리오 적용



(d) 내부 조명 적용 (소화전방간)



(e) 화재연에 의한 해당부분 조명



(f) 3D 소원 물리량 (일명소음) 분포 관계

Fig. 10. 화재 시뮬레이션의 이종인 훈련 과정.

Table 8. LOD 방식별 시스템 성능 및 품질을 비교

LOD type	Inside View			Outside View		
	No. Cells	FPS	Reality	No. Cells	FPS	Reality
None	18,680	13.9	High	52,789	22.5	High
View Dependent	705	26.4	High	30	66.0	Low
Data Dependent	11,418	18.2	High	37,905	38.3	High
Hybrid Method	11,418	18.1	High	897	64.7	Medium
Selected Type	View Dependent			Hybrid Method		

실감형 화재현상의 표현뿐 아니라 훈련자가 이를 사실적으로 인지하여 훈련환경에 몰입할 수 있는 디스플레이 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 훈련자의 몰입성을 증대하기 위해 양안차 기반의 3차원 입체영상 구현이 가능한 HMD(Head Mounted Display) 및 시점제어가 가능한 포션 트래킹 장비를 적용하였다. 또한 훈련지휘관의 훈련모니터링 및 통제를 위해 커브형 10채널 DLP-Cube 시스템을 적용하였다. Fig. 11에서 보듯이 10채널 DLP-Cube 중 좌측 부분은 훈련상황 관제장면, 우측 부분은 실제훈련자가 HMD를 통해 보고 있는 장면을 가시화 하였다. 이를 통해 훈련자, 지휘관 및 준비자 등의 훈련 관련자가 훈련상황을 동시에 체험할 수 있는 가상현실 환경의 구축이 가능하였다.



Fig. 11. 훈련자, 훈련지휘관의 몰입성 증대를 위한 HMD 및 커브형 10채널 DLP-Cube 시스템.

7. 결 론

가상현실을 적용한 화재 훈련 시뮬레이터는 경험이 부족한 소방관이나 지휘관에게 다양한 간접경험을 제공하여 실제 상황에서의 보다 신속한 의사결정과 안전하고 계획적인 구조활동을 지원 할 수 있으며, 소방인력의 안전도 향상에도 기여할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 컴퓨터상의 화재 훈련을 효과적으로 수행할 수 있도록 정밀한 공학해석을 기반으로 하는 화재훈련 시뮬레이터와 그의 개발에 필요한 여러 가지 기술을 제안하고 검증하였다. 실시간 VR 시스템의 설계, 시나리오에 따른 정밀 화재 시뮬레이션, 도출된 대용량 공학 데이터에 대한 자료처리 기술, 물리량에 대한 3차원 볼륨 렌더링 기술 등을 제안하였다. 또한, 이에 대한 구현 가능성 검증을 위해 실제 화재현상 가시화 프로그램 및 시뮬레이터 시스템을

을 자체 개발하였으며, 실험을 통해 실시간 성능을 평가하였다. 3D그래픽스 엔진부분은 오픈소스 기반의 OGRE3D를 사용하였기 때문에, 본 연구에서 C++코드로 개발된 핵심 데이터 처리 모듈, 대용량 데이터 가시화 모듈은 재사용과 확장이 용이하다.

대용량 데이터의 처리와 볼륨 렌더링 기술의 경우 많은 연구자들에 의해 효율적인 알고리즘들이 꾸준히 소개되고 있다. 향후에는 이를 활용하여 본 시스템에서 적용했던 세부적인 알고리즘에 관한 개선이 필요할 것이며, 효율적인 사용자 인터페이스 도구 및 다감각 상호작용을 포함하는 VR 시뮬레이터의 통합에 관한 연구도 함께 필요하다 할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 소방방재청 「차세대 핵심 소방안전기술 개발 사업」의 일환으로 수행한 연구의 결과입니다.

참고문헌

1. William T. Reeves, "Particle Systems-a Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects", Transactions on Graphics, Vol. 2, No. 2, pp. 91-108, ACM, 1983.
2. Shumin Zhou, Yamin Sun, Ling Lu, and Zhifeng Chen, "Fire Simulation Model Based on Particle System and Its Application in Virtual Reality", Proceedings of the ICAT2006, 642-645, IEEE, 2006.
3. Robert Bridson and Matthias Muller-Fischer, "Fluid Simulation", Proceedings of the SIGGRAPH 2007 Course Notes, ACM, 2007.
4. Ronald Fedkiw, Jos Stam, and Henrik Wann Jensen, "Visual Simulation of Smoke", Proceedings of the SIGGRAPH 2001, 15-22, ACM, 2001.
5. Keenan Crane, Ignacio Llamas, and Sarah Tariq, "Real-Time Simulation and Rendering of 3D Fluids", GPU Gems 3, 633-675, Addison Wesley, 2007.
6. Peacock, R. D., Jones, W. W., Reneke, P. A. and Fomey, G. P., "CFAST-Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) User's Guide", NIST Special Publication 1041, NIST, 2005.
7. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H. and Rehm, R., "Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018-5, NIST, 2008.
8. McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S. and Floyd, J., "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide", NIST Special Publication 1019-5, NIST, 2008.
9. Glenn P. Fomey, Daniel Madrzykowski, Kevin B. McGrattan, and Laurel Sheppard, "Understanding Fire and Smoke Flow Through Modeling and Visu-

- alization", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 23, No. 4, pp. 6-13, IEEE Computer Society Press, 2003.
10. George Hadjisophocleous, Yoon J. Ko, "Using a CFD Simulation in Designing a Smoke Management System in a Building", Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, 2071-2076, Winter Simulation Conference, 2006.
 11. ADMS - the Advanced Disaster Management Simulator, ETC USA, <http://www.admstraining.com/index.php>
 12. Tazama. U. St. Julien, Chris D. Shaw, "Firefighter Command Training Virtual Environment", Proceedings of the 2003 Conference on Diversity in Computing, 30-33, 2003.
 13. Aizhu Ren, Chi Chen, Jianyong Shi, and Liang Zou, "Application of Virtual Reality Technology to Evacuation Simulation in Fire Disaster", Proceedings of the 2006 International Conference on Computer Graphics & Virtual Reality, 15-21, 2006.
 14. Forney, G. P., "User's Guide for Smokeview Version 5 - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data", NIST Special Publication 1017-1, NIST, 2008.
 15. Jeremy Meredith and Kwan-Liu Ma, "Multiresolution View-Dependent Splat Based Volume Rendering of Large Irregular Data", 2001 IEEE Symposium on Parallel and Large-Data Visualization and Graphics (PVG'01), pp. 93-100, 2001.
 16. Jang, J., Shaw, C. and Ribarsky, W. N. F., "View-Dependent Multiresolution Splatting of Non-Uniform Data", Eurographics-IEEE Visualization Symposium 2002, 125-132, 2002.
 17. Aaron Knoll, "A Survey of Octree Volume Rendering Methods", Proceedings of 1st IRTG Workshop, 2006.
 18. PyroSim - A Graphical User Interface for the Fire Dynamics Simulator (FDS), <http://www.thunderhead-eng.com/pyrosim/>
 19. Pamela P. Walatka and Pieter G. Buning, "PLOT3D User's Manual, version 3.5", NASA Technical Memorandum 101067, NASA, 1989.
 20. Markus Hadwiger, Joe M. Kniss, Christof Rezk-salama, and Daniel Weiskopf, "Real-time Volume Graphics", A K Peters, 2006.
 21. Arie Kaufman and Klaus Mueller, "Overview of Volume Rendering", Chapter for the Visualization Handbook, Academic Press, 2005.
 22. OGRE - Object-Oriented Graphics Rendering Engine, <http://www.ogre3d.org>



차 무 현

2000년 포항공과대학교 기계공학과 학사
 2006년 한국과학기술원 기계공학과 석사
 2006년~현재 한국기계연구원 선임연구원
 관심분야: 모델링&시뮬레이션, 엔지니어링 기반 VR 시스템



이 재 경

1995년 아주대학교 컴퓨터공학과 학사
 1997년 아주대학교 컴퓨터공학과 석사
 2008년 충남대학교 컴퓨터공학전공 박사
 1997년~현재 한국기계연구원 선임연구원
 관심분야: 서비스 과학, 가상현실, 소프트웨어 공학, 엔지니어링 협업 프레임워크 및 통합 기술



박 성 환

1983년 서울대학교 조선공학과 학사
 1985년 서울대학교 조선공학과 석사
 1996년 일본 히로시마대학 구조공학전공 박사
 1985년~현재 한국기계연구원 책임연구원
 관심분야: 구조공학, 협업-동시공학 시스템설계, 모델링&시뮬레이션, 가상현실



최 병 일

1990년 한국과학기술원 기계공학과 학사
 1992년 한국과학기술원 기계공학과 석사
 2000년 한국과학기술원 기계공학과 공학박사
 2001년~현재 한국기계연구원 책임연구원
 관심분야: 화재폭발해석, 소방방재 체계기술, 화재안전 설계기술