

IFX : 데스크탑 - 몰입 환경 간 협업을 위한 FEM/CFD 가시화 시스템

IFX : FEM/CFD visualization system for Desktop-Immersive environment collaborative work

윤현주, Hyunjoo Yun*, Stefan Wundrak**, 조현제, Hyunjei Jo*

*(재)그래픽스 연구원, **Fraunhofer-IGD

요약 최근들어 제품을 개발하는 과정 중, 디자이너와 개발자, 의사 결정권자들이 FEM, CFD 시뮬레이션 결과를 리뷰할 때에 가상현실기술을 도입하는 사례가 늘고 있다. 몰입감을 높여주는 가상현실환경은 모델에 대한 해석 결과물을 정확하고 효과적으로 분석할 수 있도록 돕는다. 데이터의 실제 크기와 같게 혹은 그보다 더 크고 자세한 이미지를 제공하는 가상현실 몰입환경은 사용자가 데스크탑 환경만을 사용할 때 경험할 수 없는 높은 사실감을 제공함으로써 사용자에게 시각적인 만족감을 줄 수 있다. 하지만 데스크탑 환경에 비해 해상도가 낮고, 어두운 곳에서 스테레오 안경이나 HMD(Head Mounted Display), Data glove 등을 착용해야 하는 불편함과 멀미, 시각적인 피로, 방향감각 상실로 대표되는 가상멀미 등으로 인해 장시간 사용에 어려움이 있다. 데스크탑 환경에서의 데이터 리뷰는 고해상도 이미지 분석은 가능하지만, 입체감이 떨어지기 때문에 리뷰 데이터의 실제감이 떨어진다.

이와 같은 문제점들을 보완하기 위해서 본 논문에서는 데스크탑 환경과 가상현실 환경 간의 협업이 가능한 FEM/CFD 가시화 시스템을 제시한다. 본 시스템은 가상현실 몰입환경에서 해석 데이터를 단순히 가시화하는 것뿐만 아니라, 데스크탑 시스템과 동일한 3D 인터페이스 구조를 제공한다. 따라서, 해석 결과 분석을 위한 동일한 post-processing 작업이 네트워크로 연결된 원격 공간의 사용자들이 사용하는 시스템들 사이에서 실시간으로 진행될 수 있다.

핵심어: VR, immersive environment, Collaborative system, FEM/CFD simulation review

1. 서론

소형 모델인 휴대폰에서 자동차, 항공기, 선박과 같은 대형 모델까지 다양한 제조업 분야에서 모델 설계 해석을 위해 유한 요소 해석 방법(Finite element method)이나 유체 역학 해석(Computational Fluid Dynamics)이 많이 사용된다. 최근 들어 이러한 방법으로 해석된 결과를 분석하기 위하여 가상 현실 몰입환경의 리뷰 시스템이 많이 도입되고 있다[1].

컴퓨터 상에서 모델링되거나 해석된 3D 데이터의 사이즈가 클 경우에는 제한된 데스크탑의 모니터에서 보는 것은 한계가 존재할 수 있다. Virtual workbench, tiled display 나 CAVE 등의 가상현실 몰입환경에 기반한 디지털 제조(Digital Manufacturing)는 데이터 모델 자체의 크기와 같게 혹은 그보다 더 크게 볼 수 있게 하기 때문에 모델에 대한 실제감을 높여준다. 이렇게 실제와 같은 디지털 시제품은 제품의 내외관 디자인 품평 및 가상의 운동성 실험의 효율성을 높여주고, 시간적/공간적 제약을 극복하며 개발비용을 감소할 수 있게 해준다. 또한, 이는 설계되는 데이터 모델에 대한 설계자와 개발자 그리고 관리자 간의 신속한 의사결정을 지원하며, 설계 리드 타임을 단축시키는 장점을 제공한다[2, 3].

그러나, 프로젝터 등을 주로 이용하여 가시화하는 가상현실 몰입환경은 해상도가 낮아서 사용자가 이미지를 선명하게

파악하기 어렵고, 얼굴이나 손에 스테레오 안경이나 HMD(Head Mounted Display), Data glove와 같은 장치들을 착용해야 하며 3D 공간에서 입력장치 등을 운영해야 하기 때문에 이에 따른 불편함이 있다. 또한, 장시간 시스템을 사용했을 경우 멀미나 시각적인 피로, 방향감각 상실, 육체적 피로감 등으로 대표되는 가상멀미(cybersickness)가 발생하여 가상현실 환경을 사용하는 데 방해가 되기도 한다[4,5]. 게다가 기존의 가상현실 몰입환경용 가시화 시스템은 단순히 데이터를 확대하여 사용자에게 보여주는 데에만 그쳤고, 해석된 데이터를 분석하기 위한 post-processing을 수행하기에는 다소 미흡한 점들이 있었다.

본 논문에서는 데이터 모델의 실제감을 높이도록 향상된 가상현실 몰입환경을 이용하면서도 위에서 기술한 몰입환경의 단점을 극복하기 위해 데스크탑 환경과 몰입환경에서 동시에 가시화 및 인터랙션이 수행되는, 다중 환경에서의 협업 지원 시뮬레이션 가시화 시스템을 소개하고자 한다. 몰입환경용 시스템에서도 Iso-surface 가시화, cross section을 이용한 단면 분석, color-mapping 조정, streamline 형성 등의 다양한 post-processing이 가능하도록 3D 위젯 기반 사용자 인터페이스를 개발하였으며, CSCW connection 으로 데스크탑과 다양한 몰입 환경을 위한 시스템들을 연결하여 동시 협업이 가능하도록 하였다. 발표되는 시스템은 본 연구소에서 개발된 AICI(Advanced Immersive Collaborative

Interaction Framework)을 기반으로 개발되었으며[6], 데스크탑 환경과 몰입현실 환경에서 실시간 동시 수행이 가능하다.

2. 관련 연구 현황

가상현실 기술은 자동차, 철도, 해양 선박, 전자제품 등 제조업에 있어서 다양한 분야의 제품 개발을 위해 연구되어 왔다. 가상현실기술은 CAD 모델 설계에서부터 FEM/CFD 시뮬레이션 등에까지 연결되고 있으며, 가상시제품(Virtual Mock-up) 구축기술, 3D 컴퓨터모델을 이용하여 공간/환경적 제약 및 위험도에 따라 현실에서는 수행하기 힘든 물리적 시험을 대체하는 가상시험(Virtual testing) 수행 기술, 가상시제품과 가상생산을 통한 제품평가 기술, 3D 모델을 이용하여 가공, 조립, 생산공정 등 전 제조과정을 시뮬레이션 할 수 있는 가상운영(Virtual Operation)기술 및 가상생산(Virtual Manufacturing), 가상시제품을 위한 협업 기술 등 다양한 기술들이 연구되고 있다[7].

자동차 업계에서는 VR 기술을 도입하여 디지털 목업(Digital Mock-Up: DMU)을 이용한 제품 내부와 외부 디자인, 기구동작을 검증하는 시스템을 개발하고 있고, 이 DMU를 이용하여 자동차 주행 중 공기의 흐름이나 열의 분포, 차체 각 부분의 역학 관계 등을 CAVE와 같은 VR 몰입환경에서 분석하여 문제를 개선하려는 연구를 수행하고 있다. 또한, 이러한 해석 및 생산 공정 시뮬레이션 등을 가상 프로토타입으로 확장하여, 각종 테스트를 컴퓨터로 수행하는 가상 설계(Virtual Design) 기술을 적용하고 있다[8]. 미국의 Chrysler나 독일의 Daimler Benz 사에서도 이러한 Virtual Reality 기술을 응용한 DMU 기술 도입에 적극적이며, 볼스로이스사는 가상 프로토타입 솔루션을 이용하여 새로운 엔진을 개발하고 있다. 현대 자동차도 1999년에 최초로 가상현실 시스템을 디자인 작업에 도입하여 설계 분야에서 최종 완성제품을 미리 체험할 수 있게 하였다.

국내외 철도 분야에서의 가상 현실 기술 도입 사례를 보면, 프랑스 Alstom사에서 개발된 Coradia Duplex 시스템이 있다. 이는 Optionic Design개념이 적용된 것으로, 모듈화된 운전석, 전방도어, 객차 및 후방부 등을 가상의 공간에서 조립하여 가상시제품을 즉시 생성한 후 검토할 수 있다. 일본의 중앙철도회사(Central Japan Railway Company)는 동적 시뮬레이터 시스템을 도입하여 실제 열차와 동일한 가상환경에서 열차를 주행하여 열차운행의 고속화 과정에서 필히 수반되는 승객의 승차감의 저하 및 진동에 대한 연구를 수행하고 있다. 국내에서는 CAD시스템과 연계하여 제품 데이터 관리 및 3D 디지털 목업(Digital Mock-up)을 생성하고 있으며, 철도차량 설계데이터의 관리를 위한 제품관리시스템과 가상시험실(Virtual Testing Lab)에 대한 연구가 진행 중 이다[9].

선박 분야에서도 CAD 데이터 모델, 물리-기반 모델, 생산 공정 모델 설계자들 사이에서 동시에 이용되는 가상 환경을 이용하고 있다. Karr D. G에 의해 제시된 가상현실기반 선박

설계 시스템은 유조선을 위한 화물창 디자인과 중앙단면도를 위한 종합공정/제품 모델인 ISSMID-T, 최적 선박 중앙 각재(플레이팅, 중부재 및 프레임)를 형성하는 LBR-5 컴퓨터 패키지, 화물선의 일부의 설계와 생산을 평가하기 위해 가상현실 몰입환경이 이용되는 컴퓨터기반 설계환경 등으로 구성된다[10].

최근 제조 산업 분야에서는 설계된 모델을 해석한 후 결과 데이터에 대한 효율적이고 정확한 분석을 위해 다양한 형태로 가상현실 기술을 적용하고 있으며, 이를 위해 다양한 형태로 연구가 진행 중 이다.

1992년, Bryson 외는 항공기 랜딩 기어 주변의 공기의 흐름을 해석하는 numerical wind tunnel을 개발하여 과학 실험 데이터의 가시화 도구로 가상현실 기술을 적용하였고, Shahnawaz 외는 VTK와 OpneSG 기반으로 3차원 유동해석 시뮬레이션 가시화 시스템을 몰입형 C2 VR 환경에 설치하였고, Wesche 외는 대용량 유체역학 시뮬레이션을 머리와 손을 트래킹할 수 있는 table-top형태의 VR Responsive Workbench 에 구축하였다[11-13]. Jonas Engström은 Navier-Stokes solver의 해석 데이터를 지원하고 몰입형 CAVE-like 시스템에서 이를 가시화하는 EnVis 솔루션을 개발하였다[14]. Siegfried Kühner 외는 스테레오 기반 workbench에 실내 공기 유동 해석에 관한 Lattice-Boltzmann 기반 CFD post-processing을 조정하는 시스템을 구축하고, wand 기기를 이용하여 인터랙션이 가능하게 한 시스템 프로토타입을 발표하였다[15]. 또한, Ali 외는 음성 및 제스처 인식 기술을 이용한 실시간 인터랙션, Human Building Interaction (HBI)과 HMD를 이용한 몰입형 증강기술을 기반으로 하여 실생활공간에 CFD 시뮬레이션을 가시화하는 시스템을 개발하였다[16]. Schirski는 다양한 렌더링 기술과 멀티모달 사용자 인터페이스를 지원하고 병렬 처리 방식을 강화하여 유동 해석 시뮬레이션을 VR 환경에서 가시화할 수 있도록 하는 ViSTA FlowLib이라는 프레임워크를 개발하였다[17].

3. 시스템 구성

본 논문에서 제시하는 데스크탑 - 몰입 환경 간 협업을 위한 FEM/CFD 가시화 시스템은 CFD나 FEM 시뮬레이션이 수행된 데이터 모델에 대한 post-processing 및 가시화를 수행하는 시스템이다. 우리는 이를 IFX 라 명명하였는데, 이는 데스크탑 환경에서뿐 아니라 가상현실 몰입환경에서도 동일하게 사용자의 인터랙션에 의한 post-processing 및 가시화가 수행될 수 있다.

IFX 시스템은 다음의 그림 1과 같이 데스크탑 에디션과 가상현실 에디션으로 구성되어 있다.

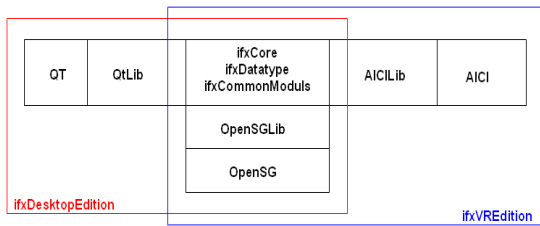


그림 1. IFX의 데스크탑 에디션과 가상현실 에디션의 기본구성

데스크탑 에디션은 qt 라이브러리 기반의 사용자 인터페이스로 개발되어 일반 데스크탑 및 UMPC(Ultra mobile PC) 시스템에서 사용된다. 또한, 가상현실 에디션은 몰입환경용 사용자 인터페이스와 Scenegrph를 지원하도록 본 연구원에서 기개발한 AICI, 가상 몰입 협업 인터랙션 프레임워크를 기반으로 개발되었다. 이는 다양한 가상현실 몰입 환경에서 사용될 수 있으며, 본 논문에서는 virtual workbench, Tiled display, Curved display 등 다중 환경에서의 협업을 제시하였다.

IFX는 TCP/IP 기반의 CSCW commandline server를 통하여 다수의 데스크탑 에디션과 가상현실 에디션을 연결할 수 있다. 각 CSCW connection client가 설치된 클라이언트들은 서버에 연결되고, 서버와 각 클라이언트들 간에는 사용자의 인터랙션에 따른 파라미터와 map 파일(.ifx)에 저장된 파라미터 정보들이 전송된다. 이를 통하여 시스템들 간의 실시간 협업이 가능케 된다.

3.1 IFX 시스템의 기본 구성

IFX 시스템은 기본적으로 FEM/CFD 해석 데이터에 대한 다양한 post-processing을 지원한다. 유동 해석 모델 데이터 내의 유체 입자가 움직이는 경로를 가시화하는 Streamline, clip plane을 이용하여 해석된 데이터의 단면을 분석하는 Cross Section, 해석결과를 효과적으로 분석할 수 있도록 color space를 조절하고 mesh나 surface, line 등의 컬러를 조정하는 color mapping, 볼륨 데이터에 대한 유체 해석 후 데이터 값이 같은 등위면을 추출하여 그 분포를 조사할 수 있도록 하는 iso-surface 등의 기능들을 제공한다.

IFX 시스템의 특징 중 하나는 Ensignt Gold, Fraunhofer SimReal, Ideas UNV, Patran Neutral, CGNS, Ansys, Diffpack, netCDF 등과 같은 다양한 상용제품의 데이터 파일을 직접 로딩할 수 있다는 것이다. 데이터의 용량이 커서 저사양 시스템에서의 가시화 속도가 문제될 경우를 대비하여 IGD에서 자체 개발한 파일 포맷, Fraunhofer SimReal 파일로 변환한 후의 가시화도 지원한다.

또한, IFX 시스템은 다른 어플리케이션의 개발에 응용될 수 있도록 module-based 로 개발되었으며, MS windows 시스템 뿐만 아니라 Linux 시스템에서도 동일하게 수행될 수 있다.

3.2 IFX Desktop Edition

IFX Desktop edition은 Qt 라이브러리 4.2를 기반으로 사용자 인터페이스를 개발하였다. Qt 라이브러리는 사용하기 쉽고, 플랫폼에 구애받지 않는 강력한 툴킷이다. Qt를 이용하여 IFX 사용자 인터페이스를 구성하기 위한 QtLib(ifxQtLib)를 먼저 개발하였고, 로딩되는 시뮬레이션 데이터(Pipeline)의 파라미터들과 모듈들에 따라 다이나믹하게 메뉴가 생성되도록 하였다.

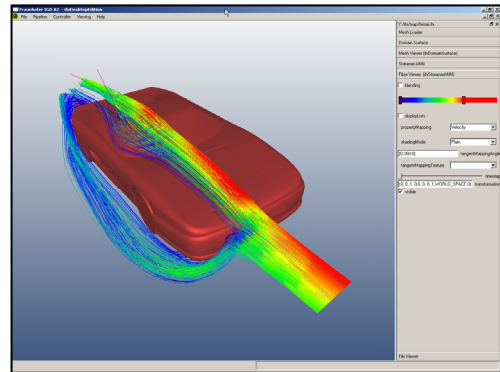


그림 2. IFX Desktop Edition

ifxQtLib는 다음의 그림 3과 같이 Controller manager, Module controller, Parameter controller 등의 클래스들을 근간으로 구성되어 있다. Controller manager는 로딩된 데이터의 post-processing을 위한 모듈들을 구성하는 역할을 하고, Module controller는 각 모듈에 필요한 파라미터들을 제어한다. Parameter controller는 인터페이스에 구성되는 가장 기본단위인 parameter들을 위한 클래스이며, Boolean, Text, Edit box, Transformation vector, Color map strip, Selection list, Minmax value 등의 위젯을 생성한다. 각 위젯을 생성하는 파라미터들은 parameter controller 클래스를 상속받는다.

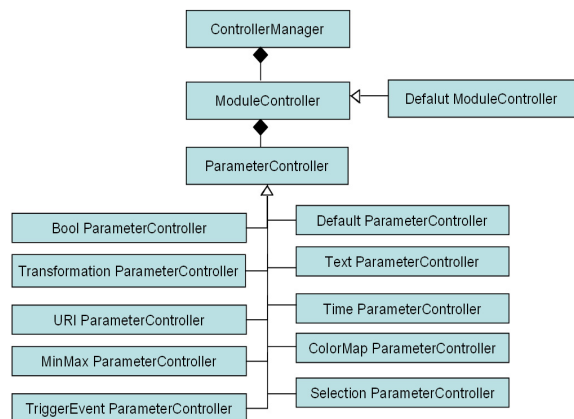


그림 3. ifxQtLib 라이브러리 구조

3.2 IFX VR Edition

몰입 환경을 위한 IFX VR Edition의 사용자 인터페이스와 가시화를 위한 뷰어는 본 연구원에서 개발된 AICI, 진보된 가상 몰입 협업 인터랙션 프레임워크와 OpenSG를 기반으로 구현되었다. 가상현실 에디션에서 사용자 인터페이스를 구성하기 위하여 AICI와 IFX를 연결하는 ifxAICILib 라이브러리를 개발하였다. 이는 데스크탑 에디션의 ifxQtLib과 같은 기능과 구조를 갖는다.

가상현실 에디션의 인터페이스는 그림 4와 같이 AICI의 3D 위젯을 이용하여 개발되었다. 사용자의 인터랙션을 위하여 그림 5와 같이 가상현실 에디션에 정보를 입력하는 입력 장치로 3D 펜과 데이터 모델에 대응되는 navigator, 사용자의 위치와 방향을 추적할 수 있게 하는 head tracking 장비 등이 사용된다. 또한, 사용자에게 사용법 상의 혼란을 주지 않기 위하여 가상현실 에디션의 인터페이스는 그림 6과 같이 데스크탑 에디션의 인터페이스와 동일한 특성, 동일한 기능, 동일한 형태로 구성되었다.

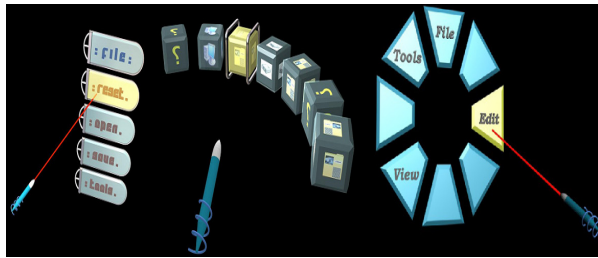


그림 4. AICI의 3D 메뉴 위젯

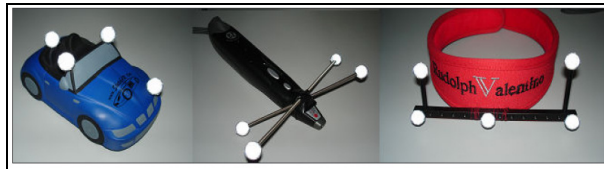


그림 5. 입력장치

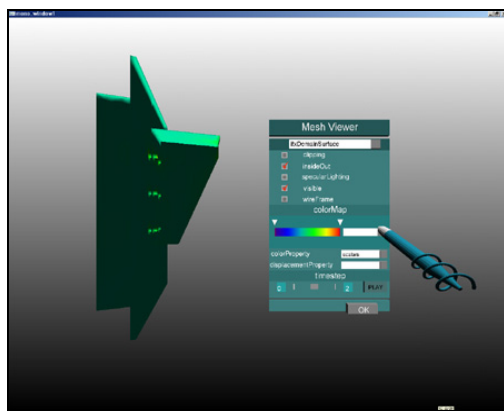


그림 6. VR Edition의 사용자 인터페이스

L-shape Virtual Workbench에서는 Stereo 방식의 프로젝션을 지원한다. 따라서 사용자는 Stereoscopic Glasses를 사용하여 입체적인 3D 모델의 형태로 가시화된 해석 데이터를 볼 수 있다.

3.3 다중 환경을 위한 협업 지원

본 논문에서는 다음의 그림 7과 같은 형태의 협업 시스템을 제시한다. IFX 데스크탑 에디션은 데스크탑 환경과 이동성이 강화된 Ultra Mobile PC에서 운영되고, 가상현실 에디션은 L-shape 형태의 Stereo Virtual Workbench와 7×4의 프로젝터로 만들어진 Tiled Display, 반구형 Curved Display 등에서 운영된다. 이러한 다중 환경의 시스템들을 연결하기 위하여 CSCW connection 프로그램이 사용된다.

CSCW connection은 TCP/IP 기반으로 개발되었고, 데스크탑, 가상현실, 두가지 형태의 에디션 모두 OpenSG 기반으로 개발되었으며 OpenSG scenegraph기반의 가시화를 수행한다. 사용자의 인터랙션에 따라 Post-processing이 진행되는 시스템에서 Scenegraph 구성을 위한 파라미터들이 입력됨과 동시에 이들을 다른 시스템에 전송, 공유한다. 이로써 다른 시스템들은 원래의 Scenegraph와 같은 Scene을 구성하게 되고 협업이 가능해진다[18].

이와 같은 Scenegraph 공유를 위한 파라미터 전송 방식의 협업은 Low-bandwidth의 네트워크를 가능케 하므로 다중 환경을 지원하는 IFX 시스템들이 실시간으로 연결될 수 있다.

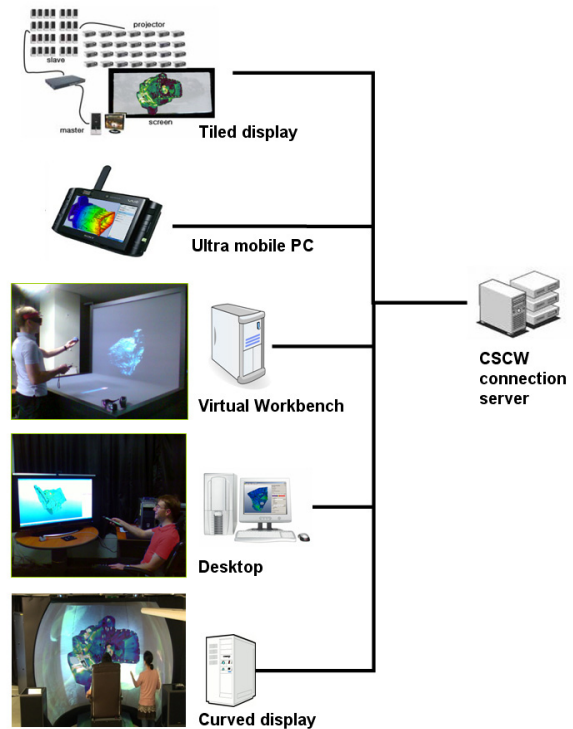


그림 7. IFX 시스템의 협업 구조

다음의 그림 8, 9, 10은 CSCW connection을 위한 Server와 Client 그리고 파라미터 데이터를 입력받는 함수의 프로그램 코드이다. IFX 시스템은 Visual Studio .net으로 개발되었으며, 아래의 네트워크를 위한 프로그램들은 소켓기반으로 개발되었다.

```
void ifxCSCWController::runServer()
{
    :
    while (true)
    {
        :
        //-- Action on one of the client sockets?
        for (unsigned int i = 1; i < socketList.size(); i++)
        {
            //-- Readable? Then receive!
            if (select.readable(socketList[i]))
            {
                bool b = receivedData(i, true);
                if (!b)
                {
                    ifxLog("Removing client socket %d\n", i);
                    //-- Disconnected, remove from list
                    ifxSocket *socket = socketList[i];
                    delete socket;
                    socketList.erase(socketList.begin() + i);
                    onCSCWStateChanged(CLIENT_DISCONNECTED);
                }
            }
        }
    }
}
}
```

그림 8. CSCW connection server용 프로그램 코드

```
void ifxCSCWController::runClient()
{
    :
    :
    //-- Now listen for parameter changes
    try
    {
        while(true)
        {
            //-- Select to wait for data
            ifxSocketSelect select(socketList, NonBlockingSocket);
            //-- Wake up for terminate?
            if (isTerminate()) break;
            //-- Process data, need ifxThreadMutexHolder
            //-- for unlocking when we throw
            ifxThreadMutexHolder mh(&mutex);
            if (select.readable(socketList[0]))
            {
                //-- Read Data
                bool b = receivedData(0);
                if (!b) setTerminate();
            }
        }
        //-- Disconnected
        if (!socketList.empty()) // need to check that, don't know why, though
        {
            ifxLog("Disconnected from CSCW server\n");
            onCSCWStateChanged(DISCONNECTED);
            delete socketList[0];
            socketList.clear();
        }
    }
}
```

그림 9. CSCW connection client 용 프로그램 코드

```
bool ifxCSCWController::receivedData(int snum, bool pDoNetPropagate)
{
    ifxSocket *activeSocket = socketList[snum];
    std::deque<std::string> splitStrings;
    std::string receivedLine = activeSocket->receiveLine();

    //-- split
    int numparts = split(receivedLine, IFX_CSCW_DELIMITER,
        std::back_inserter(splitStrings));

    //-- fetch substrings
    const std::string& modulename = splitStrings[0];
    const std::string& paname = splitStrings[1];
    const std::string& parvalue = splitStrings[2];
    const std::string& username = splitStrings[3];

    //-- find parameter controller in list
    ifxParameterController *pc = this->getParameterController(modulename, paname);
    //-- Do a net propagate to our clients, only if we are a server!
    if (pDoNetPropagate)
    {
        for (unsigned int i = 1; i < socketList.size(); i++)
            if (i != snum) // ... except the sending client
                socketList[i]->sendLine(receivedLine);
    }
    //-- Propagate to local system
    if (!ignoreLocalPipeline)
        pc->propagateNewParameterValue(parvalue,
            ifxParameter::DISTRIBUTED, username.c_str());

    return true;
}
```

그림 10. connection을 위한 received data용 프로그램 코드

4. 구현결과

본 논문에서 제시된 IFX 가상현실 에디션과 데스크탑 에디션은 네트워크로 연결되어 다중 환경에서의 실시간 협업을 진행하였다. 또한, 데스크탑 에디션의 사용자 인터페이스에서 이루어지는 인터랙션이 가상현실 에디션의 인터페이스에서도 동일하게 가능하며, 그 인터랙션에 따라 해석 데이터에 대한 Post-processing이 실시간으로 동시에 수행되었다. 이러한 협업은 영상처리 속도 30fps 이상, 동기화 Latency 1sec 미만의 결과를 보여주었다.

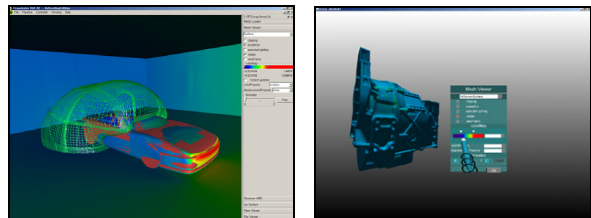


그림 11. 구현 결과 화면(좌: iso-surface, 우: color mapping)

5. 결론 및 향후과제

논문에서 제시된 IFX 시뮬레이션 가시화 시스템은 데스크탑 환경과 가상현실 몰입환경을 기반으로 개발되었다. 이는 고해상도 데스크탑 화면에서의 해석 데이터 분석 뿐만 아니라, 동시에 가상 현실 몰입환경 시스템에서의 실제감있는 데이터 모델 및 디자인 리뷰 또한 가능하게 한다. 두 시스템은 TCP/IP기반의 CSCW Commandline server로 연결되어 원격공간에서 서로 다른 사용자가 같은 환경 혹은 각각 다른 환경에서 실시간으로 동일한 분석작업에 대한 협업을 수행할 수 있다.

위와 같이 다수의 환경을 지원하는 협업 시스템은 제품 설계 후 생산을 위한 디자인 결정시 다수의 의사결정권자와 설계자, 제품 생산자들간의 회의를 도와 의사 결정 시간 및 설계 리드 타임을 단축할 수 있어, 제품의 생산 비용을 감소시키고, 생산성을 향상시킬 수 있다.

향후 본 시스템은 100MB 데이터에 대해서 15fps의 병렬 처리 속도를 낼 수 있도록 개선할 예정이다. 또한, CAVE나 Virtual Screen 등 보다 다양한 가상현실 환경과 HMD 등을 이용한 혼합현실 환경 등과도 연계하여 다중 환경 지원 시뮬레이션 가시화 협업 시스템으로 구축할 예정이다. 이는 시간으로 다수의 사용자들이 다양한 환경에서 시뮬레이션 결과를 리뷰하고 협업하게 되는 시스템으로 발전될 것이다.

* 본 논문은 정보통신 선도기반기술개발사업(정보통신연구진흥원 4120-1000-2255), [실감형 가상공학 기술개발]과제의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 이종환, 한순홍, “생산 공정 시뮬레이션을 위한 혼합현실의 적용” HCI 학술발표회논문집, 제 1 권, pp.501~506, 2005.
- [2] L. Miguel Encarnacao, Andre Stork, Dieter Schmalst, “The Virtual Table – a future CAD workspace”, Proceedings of Computer Technology Solutions conference, 1999.
- [3] 박문호, 이래경, 한훈, 양경모, 최태호, 공대영, “디자인 폼평과 UI 검증을 위한 VR 시스템”, HCI 학술발표회 논문집, 제 1 권, pp.90~95, 2005.
- [4] 박재희, 김영운, 김은남, 김현택, 고희동, “힘판을 이용한 가상현실 체험 전후 신체동요의 측정”, 한국감성과학회지, 제 5 권, 제 4 호, pp.45-49, 2002.
- [5] 김종운, 송철규, 김동욱, 김남균, “가상환경에서 Shutter glass 방식의 입체영상이 인체에 미치는 영향에 관한 연구”, 대한의용생체공학회, 제 21 권, 제 6 호, pp.607-614, 2000.
- [6] 허혜정, Timo Fleisch, 김택봉, 온기원, “진보된 가상물입 협업 인터랙션 프레임워크”, CAD/CAM 학술발표회논문집, pp.20~25, 2006.
- [7] 최병욱, 김보현, “가상기업(VE)의 연구동향과 전망”, CAD/CAM 학회지, 제 9 권, 제 2 호, pp.38~44, 2003.
- [8] 문두환, “VR for Automobile Design”, 한국과학기술원 전산학과 Topics in HCI 프로젝트 보고서, 2002.
- [9] 전현규, 옥민환, 양도철, 정홍채, “철도차량에서의 Virtual Engineering 기술 적용”, 한국철도학회, 제 1 권, pp.1~6, 2004.
- [10] Karr D. G., Beier K. P., Na S.S., Rigo P., “A Framework for Simulation-Based Design of Ship Structures”, Journal of Ship Production, pp.33-46, 2002.
- [11] BRYSON, S., LEVIT, C., “The Virtual Wind tunnel: An environment for the exploration of three-dimensional unsteady fluid flow”, IEEE Computer graphics and Applications, Vol. 12(4), pp.25-34, 1992.
- [12] SHAHNAWAZ, V., VANCE, J., KUTTI, S., “Visualization of Post-processed CFD Data in a Virtual Environment”, ASME Design Engineering Technical Conferences, Las Vegas, USA, 1999.
- [13] WESCHE, G., “Three-dimensional visualization of fluid dynamics on the Responsive Workbench”, Future generation computer systems, Vol. 15, pp.469-475, 1999.
- [14] Jonas Engström, “Visualization of CFD computations”, Proceedings of the 4th International Workshop on Applied Parallel Computing, Large Scale Scientific and Industrial Problems, LNCS Vol. 1541, pp.129 - 133, 1998.
- [15] Siegfried Kühner, Petra Hardt, Manfred Krafczyk, Ernst Rank, “Computational steering of a lattice-boltzmann based CFD solver in virtual reality”, CONVR, 2003.
- [16] Ali M. Malkawi, Ravi S. Srinivasan, “A new paradigm for human-building interaction: the use of CFD and augmented reality”, Automation in construction, Volume 14, Issue 1, pp.71-84, 2005.
- [17] M. Schirski, A. Gerndt, T. van Reimersdahl, T. Kuhlen, P. Adomeit, O. Lang, S. Pischinger, and C. Bischof, “ViSTA FlowLib: A Framework for interactive visualization and exploration of unsteady flows in virtual environments”, ACM International Conference Proceeding Series, Vol.39, pp.77-85, 2003.
- [18] OpenSG – The Open Source Scenegraph, 1.4.0 <http://www.opensg.org/doc-1,4,0/index.html>