

원자로 내부 구조물(RVI)의 최적 해체 시나리오를 도출하기 위한 RVI 절단 공정 시뮬레이션 프로그램 개발

기재석*, 황교찬**, 최주호***, 서정****¹, 김륜한****²

Development of RVI Cutting Path Simulation Program to Derive Optimal Decommissioning Scenario of Reactor Vessel Internals(RVI)

Jae-Seok Ki*, Kyo-Chan Hwang**, Ju-Ho Choi***, Jeong Suh****¹, and Ryoon-han Kim****²

요약

2017년도에 영구 정지된 고리 원전 1호기의 해체 공정은 안전적 측면과 경제적 측면을 모두 고려해야 하는 중요한 국가적 과제이다. 원전해체의 안전과 경제성을 모두 충족시키기 위해서는 다양한 해체 공정의 연구와 공정의 타당성 검증이 필요하다. RVI(Reactor Vessel Internals) 절단 공정 시뮬레이션 프로그램은 원전 구조물의 도면과 모델링 데이터를 기반으로 원전 시설물에 대한 가상의 환경을 구축하였고, 그 시설과 내부구조물을 해체하기 위한 절단 경로를 자동으로 생성하고 사용자가 수정할 수 있는 편집 기능을 포함하고 있다. 프로그램을 통해 설정된 절단 경로는 실험 데이터를 기반으로 한 절단 장비의 제원과 동역학이 적용된 Robot Arm 을 이용해 실제와 유사한 절단 공정 시뮬레이션도 가능하다. 그리고 시뮬레이션의 통해 수집된 작업 소요 시간과 절단 거리 등의 공정 결과를 가공하여 절단 공정 시나리오를 도출하고 분석이 가능한 프로그램이다.

Abstract

The dismantling process of Kori Nuclear Power Plant No.1, which was permanently suspended in 2017, is an important national task that must consider both safety and economic aspects. In order to satisfy both the safety and economic feasibility of dismantling nuclear power plants, it is necessary to research various dismantling processes and verify the feasibility of the processes. The RVI(Reactor Vessel Internals) cutting process simulation program builds a virtual environment for nuclear facilities based on drawings and modeling data of nuclear power plants and includes editing functions that can automatically create cutting paths for dismantling facilities and internal structures and modify them by users. The cutting path set through the program can also simulate a cutting process similar to the actual one using Robot Arm with dynamic and specifications of cutting equipment based on experimental data. And it is a program that can derive and analyze cutting process scenarios by making process results such as the working time and cutting distance collected through simulation.

Keywords

virtual environment, simulation program, dismantling of reactor, digital twin, cutting process

* 상명대학교 산학협력단 특임교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2204-8585>

** 상명대학교 스포츠ICT융합학과 석박사과정

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6953-3169>

*** 상명대학교 산학협력단 미래혁신융합연구소 선임연구원

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6610-7853>

**** 한국기계연구원, 부산기계기술연구센터 연구원

- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-1236-7710>

- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0002-0600-0904>

• Received: May 27, 2022, Revised: Jul. 22, 2022, Accepted: Jul. 25, 2022

• Corresponding Author: Jae-Seok Ki

Sangmyung UNIV. 20 Hongjimun 2-gil, Jongno-gu, Seoul, Korea

Tel.: +82-2-2616-0922, Email: skyblueki@smu.ac.kr

1. 서 론

1.1 개발 배경

2017년 6월 19일 영구 정지된 고리 원전 1호기는 1978년 상업 운전을 시작한 국내 최초의 상업용 원전이다. 국내의 경우, 고리 원전 1호기를 시작으로 영구정지가 본격화됨에 따라서 2020년대에는 해체 기술 수요가 더욱 증가할 것으로 전망되고 있다.

세계적으로 30개국 이상에서 총 450기 이상의 원전이 가동 중이며, 영구정지 원전은 150기 이상이 미국, 영국, 프랑스, 독일 등에서 원자로의 폐지가 진행 중이다. 이 외에 가동 원전 중 65% 이상이 30년 이상 운영된 원전이며 가동 연한 이외에도 안전성이나 경제성 등의 이유로 폐지조치를 수행하고 있다[1].

1.2 개발 목적

전 세계에 분포된 많은 원전은 각기 다른 환경과 형태를 가지고 있다. 이로 인해 해체 공정의 다양성과 각각 공정에 대한 해체 시뮬레이션은 반드시 거쳐야 할 과정이다.

그림 1은 2017년 영구정지 된 고리 원전 1호기의 RV(Reactor Vessel)와 원전 내부구조물(RVI, Reactor Vessel Internal)이다. RV와 RVI는 원자력 발전소(NPPs, Nuclear Power Plants)의 구조물 중 중성자의 조사와 냉각수의 표면 접촉으로 인해 가장 높은 수준의 방사능을 갖고 있으며 대표적인 중량물로, 해체 과정에서의 방사선화적인 측면과 산업 안전 측면에서 관리에 상당한 주의를 요한다[2][3].

따라서, 상대적으로 방사화되고 복잡한 형상의 내부구조물은 작업자의 피폭을 줄이기 위해 수중에서 원격으로 절단하는 방안이 제안되고 있으며, 절단 폐기물은 극저준위/저준위/중준위 포장 용기에 적재될 것이다[4].

해체를 위한 RVI의 절단은 다양한 방법으로 반복이 불가하여 실제 해체에 앞서 해체 공정을 모사하고 검증하여 해체 공정의 오류를 피하기 위한 시뮬레이션이 필요하다[5][6].



그림 1. 고리 원전 1호기의 RV와 RVI
Fig. 1. RV and RVI of Kori nuclear power plant No.1

II. 본 론

2.1 디지털 트윈(Digital Twin)과 Unity 3D 엔진으로 가상의 원전 내부 환경 구현

3차원 가상환경(VE, Virtual Environment)에 실제와 동일 환경을 구현한 후 다양한 조건의 모의시험(시뮬레이션)을 통해 가상환경에서 장비, 시스템 등의 상태를 다양한 디스플레이어 장치를 활용하여 모니터링하고 유지 및 보수 시점을 파악하여 예기치 못한 상황을 예측하고 사고의 위험을 해소할 수도 있다. 디지털 트윈으로 가상환경과 실제 환경의 일치도가 정밀 제어 신뢰도의 요구하는 오차범위 이내라면 원전해체 현장에서 인간을 대체한 로봇이나 해체 장비의 활용으로 방사능 피폭의 위험은 최소화될 것이다[7][8].

가상환경은 게임 엔진 기술이자 통합개발환경(IDE, Integrated Development Environment)인 유니티(Unity) 3D Engine을 이용해 구현한다. 유니티는 다양한 플랫폼과 기술을 지원하고 Compute Shader를 통한 병렬 연산을 이용하면 3차원 지형정보 등의 대용량 정보를 효율적으로 처리해야 하는 콘텐츠를 제작할 수 있는 도구이다[9][10].

가상의 환경에 고리 원전 1호기의 내부 환경을 그림 2와 같이 구축되어 있다. RVI와 동일 크기로 제작된 Mock-up의 도면을 기반으로 3D Modeling 파일은 제작되었다.

그림 3과 같이 Manipulator와 Robot Arm도 실측

을 통해 제작된 3D Modeling 파일도 동일 비율로 가상환경에 배치하여 실제 환경과 동기화가 가능한 상태를 구현하였다.

시뮬레이션을 통해 해체 절단되어질 RVI는 그림 4의 Core Flange와 그림 5의 Core Barrel, 그림 6의 Thermal Shield로 구성되어 있으며 도면을 통해 부품의 위치와 크기를 확인하여 RVI 해체 절단 공정 시뮬레이션에 신뢰도와 해체 시나리오에 타당성이 확보하였다.

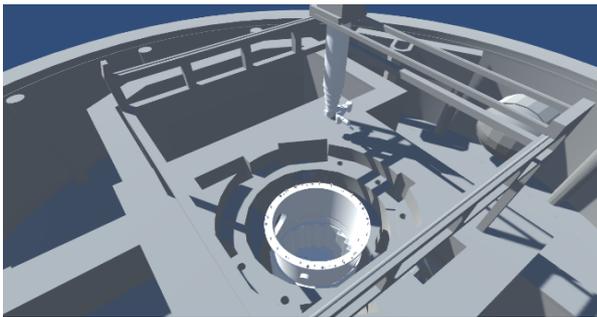


그림 2. 고리 원전 1호기의 내부 모델링
Fig. 2. Modeling of Kori nuclear power plant No.1



그림 3. Manipulator와 Robot Arm 모델링
Fig. 3. Modeling of manipulator & robot arm

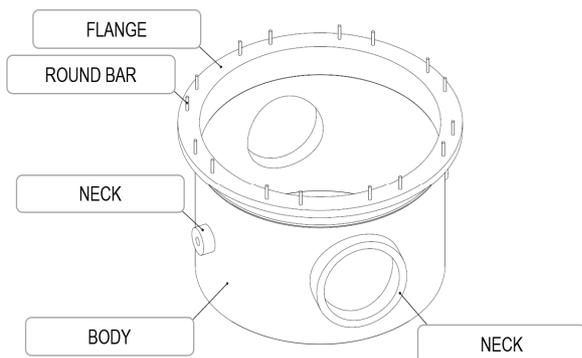


그림 4. CORE FLANGE의 CAD 도면
Fig. 4. CAD floor plan of CORE FLANGE

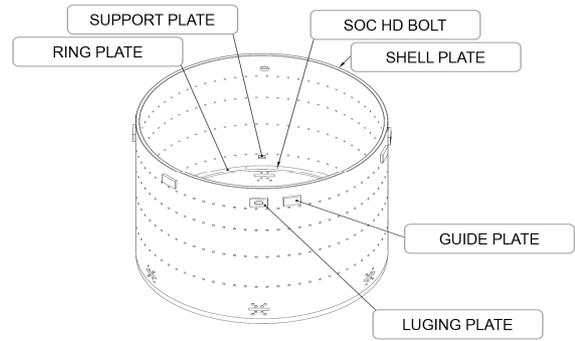


그림 5. CORE BARREL의 CAD 도면과 모델링
Fig. 5. CAD floor plan & modeling of CORE BARREL

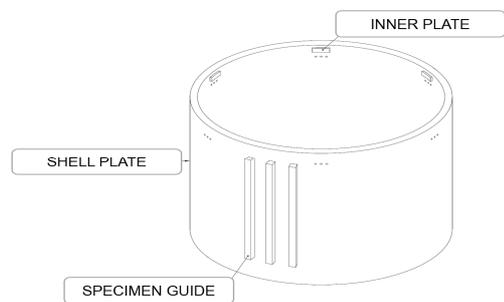


그림 6. THERMAL SHIELD의 CAD 도면
Fig. 6. CAD floor plan of THERMAL SHIELD

2.2 원통형의 3차원 격자방식의 절단 시스템

2차원의 평면적인 모니터 등의 디스플레이어 장비를 사용하여 가상환경에 위치한 RVI 구조물에 마우스 등의 입력장치를 사용자가 조작하여 3차원의 공간상에 절단 위치와 경로를 지정하는 것은 거의 불가능하면 많은 시간과 검증의 절차가 요구된다.

3차원 격자 방식의 절단 시스템은 원통형에 RVI의 구조적 특징을 이용하여 가상의 3차원 공간에서의 정확한 위치를 인지하고 그 위치 좌표를 수치화하는 일련의 복잡한 과정을 간소화하기 위한 최적의 방안일 것이다[11].

해체 시뮬레이션은 절단 그리드를 기반으로 한 절단 지점과 경로를 그림 7과 같이 표시하고 절단 대상체에 절단 경로의 순서나 경로 정보 등을 가시화하고 절단 장비의 제원과 설정된 공정변수를 통해 가공된 절단 장비와 동역학이 적용된 Robot Arm을 통해 모의 절단이 이루어지고 가상의 절단 공정을 기록하고 측정한다. 절단부는 시뮬레이션을 통해 수집된 절단 공정의 소요된 자산과 시간, 절단 단편의 수량과 2차 폐기물의 부피를 도출한다.

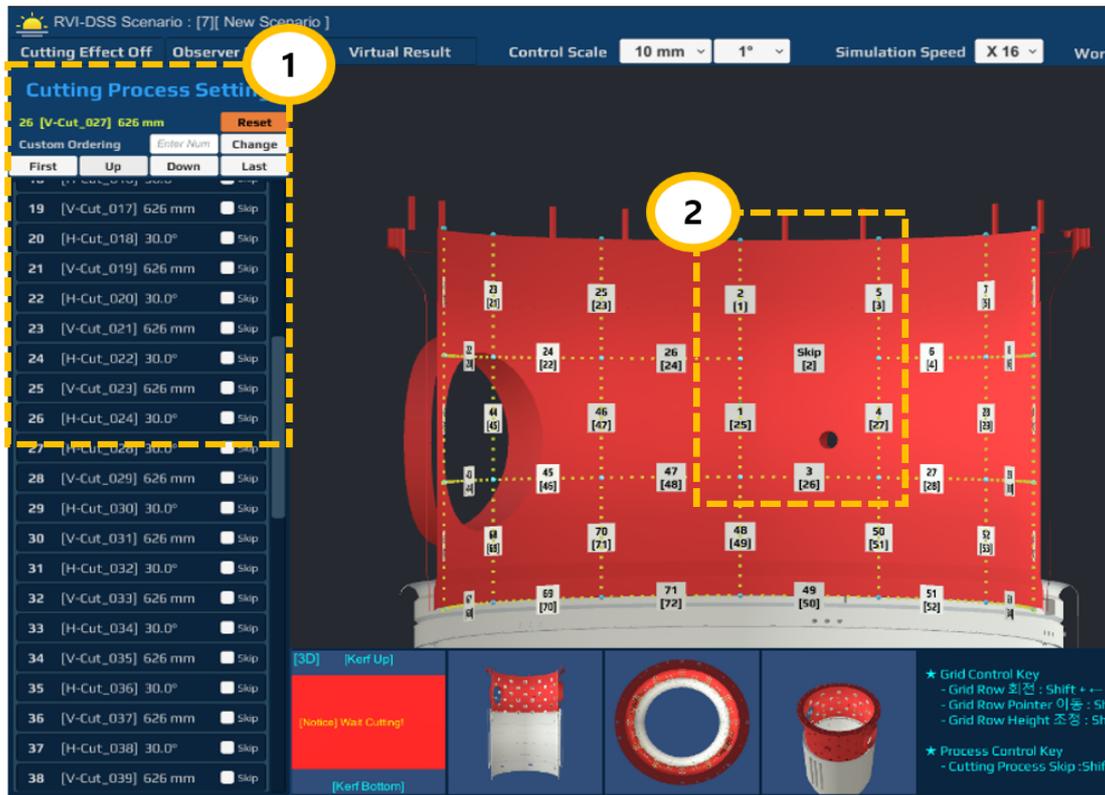


그림 7. 절단 공정 순서 변경 및 제거
Fig. 7. Change and removal of cutting process order

2.3 실험 기반의 절단장비 성능과 동역학이 적용된 로봇암을 이용한 시뮬레이션 수행

한국기계연구원의 실험 데이터를 따르면 커프(Kerf)는 공정변수와 절단 속도에 의하여 상·하단 커프의 폭이 결정된다. 상·하단 커프와 절단 대상체의 두께로 커프 단면의 면적이 결정되고 면적과 절단 거리를 통해 2차 폐기물의 양을 추정할 수 있다. 2차 폐기물의 양이나 작업시간을 최소화하기 위해서는 단순히 공정변수나 절단 속도에 비례하지 않기 때문에 최소의 값을 도출하기 위해서는 다양한 조건에서 모의실험을 하고, 그 결과를 통해 최적의 조건을 유추할 수도 있다[12][13].

가상환경에서 지정된 위치로 Manipulator와 Robot Arm의 장착된 절단 장비의 토치 부분을 가상의 장애물을 피해 충돌 없이 자동으로 경로를 확인하고 이동하게 하는 제어 알고리즘은 사전에 검증이 필요하다[14].

실제 원전 내부에서의 작업 환경은 매우 위험하

고 불안정한 상태이며 해체 공정 중에 Manipulator와 Robot Arm이 시설물과 충돌은 작업장 및 장비의 파손 등의 예상치 못한 문제들을 발생시킬 수 있다. 본 시뮬레이션 프로그램은 부산대학교 계측 제어연구실에서 다양한 시뮬레이션을 통해 검증된 연구자료와 다자유도 동역학이 적용된 Manipulator와 Robot Arm을 모듈을 적용하였다. 가상의 환경에서 로봇에 이동과 절단 등의 행동에 대한 소요 시간을 측정하여 디지털 트윈 및 현실 작업에 대한 평가가 가능하다[15][16].

2.4 RVI 절단 공정 시뮬레이션 프로그램

RVI 절단 공정 시뮬레이션 프로그램은 그림 8과 같이 Intro, Scenario List, Select Target, Scenario Edit, Process Evaluation System Scene과 Haptic Manual Mode Scene으로 구성되어 있다.

Intro Scene은 시뮬레이션 프로그램의 첫 화면으로 Start 버튼을 누르면 RVI 절단 경로 편집을 통해 절단 시뮬레이션을 하고 절단 공정에 대한 평가가

이루어지며 Haptic Manual Mode 버튼을 누르면 3D Touch가 가능한 Haptic Device를 이용한 가상의 원전 내부 환경에서 Robot Arm을 제어할 수 있는 훈련 환경으로 전환된다. 그리고 Institute 버튼을 누르면 프로그램에 기반 데이터를 연구한 기관 조직도와 연구 분야를 확인할 수 있다.

시뮬레이션 프로그램은 가상의 환경에 실측을 기반으로 한 RVI 해체 작업 환경을 Unity 3D 엔진을 이용하여 구축하였고 실제 절단에 사용될 장비의 제원과 동역학이 적용된 Manipulator와 Robot Arm을 이용하여 개발하였다.

또한, 시뮬레이션 프로그램은 절단 그리드를 기반으로 한 절단 지점과 경로를 따라 절단 대상체를 절단 장비의 제원과 공정변수의 설정값을 연산하여 가상의 환경 속에 가공된 절단 장비, 동역학이 적용된 Robot Arm을 통해 절단 시뮬레이션이 이루어지고 가상의 절단 공정을 기록하고 측정한다. 시뮬레이션 프로그램을 통해 수집된 절단 공정의 소요된 자산과 시간, 절단 단편의 수량과 2차 폐기물의 부피를 산출하여 공정의 평가자료로 활용하였다.

2.5 개발 효과

본 논문은 원전 내부의 고위험 환경에서 진행되어야 하는 원전 내부구조물(RVI)의 해체 공정에 대한 해체 절단 시뮬레이션으로 실제 원전해체 전에 다양한 방법으로 절단 대상체를 절단 해체하며 장비의 이동과 절단 위치를 추적하고 해체 공정 시간을 측정하고 공정의 효율성과 과정의 타당성을 검증하기 위한 프로그램의 개발에 관한 것이다.

또한, 시뮬레이션 상에서 Robot Arm이 이동하는 절단 경로와 이동 위치는 3차원 격자 방식의 절단 시스템을 통해 선택된 절단 대상 구조물의 범위에 복수의 절단 포인트를 자동으로 지정되며, 시스템을 통해 지정된 절단 포인트는 프로그램을 통해 수동으로 수정하거나 공정에서 제외도 가능하다. 격자 방식의 절단 시스템 없이 수동으로 절단 포인트를 지정했을 경우 발생할 수 있는 작업자의 오차와 오류는 시스템의 사용을 통해 제거되었을 것으로 판단된다. 다양하게 절단 경로를 설정하고 설정된 절단 경로를 따라 원자료를 해체하는 절단 시뮬레이션(모의시험)을 수차례 수행 함으로써 시뮬레이션별 절단 공정 시간 및 해체된 구조물 단편과 2차 폐기물의 적재 부피를 구하여 분석하고 비교하여 최적 해체 절단 공정을 도출할 수 있을 것이다.

III. 결 론

본 논문은 가상의 환경에서 실제와 같은 RVI 모델을 구현하여 다양한 형태와 크기의 방사성 폐기물 저장 용기에 절단된 폐기물을 적재하기 위한 절단 경로를 설정하고 시뮬레이션하는 프로그램 개발에 관한 내용을 기술하였다.

개발 과정 중에서 절단 시뮬레이션의 고도화되어야 할 부분들도 발견하였다. 고도화 방안으로는 다양한 절단 대상체와 절단 장비, Manipulator & Robot Arm 모듈이 추가하고 관리할 수 있는 서버와 DB를 구축하여 다른 환경과 조건에서 해체 절단 공정 시뮬레이션이 가능하도록 절단 시뮬레이션 시스템의 플랫폼화를 제안하였다.

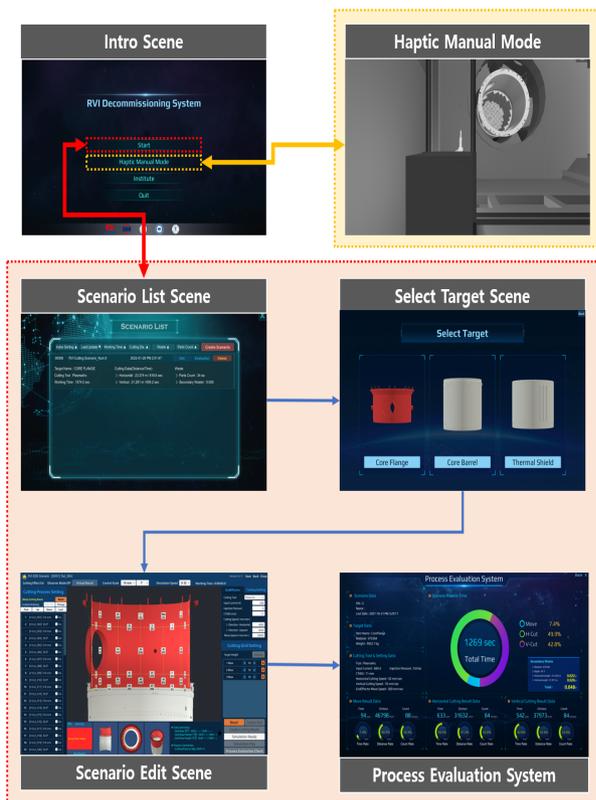


그림 8. 시뮬레이션 프로그램 흐름도
Fig. 8. Flowchart of simulation program

Acknowledgement

2022년도 한국정보기술학회논문지(20권4호)에 게재된 논문 “가상환경에서 원자로 내부구조물의 해체 공정 시나리오를 도출하기 위한 절단 경로 생성 방법론 개발”에 제시한 절단 경로 생성 방법론을 적용하여 개발한 시뮬레이션 프로그램입니다.

References

- [1] Jang Hwa Lee, Do Gyeum Kim, and Kihyon Kwon, "Recent Activities in Decommissioning Technology of Nuclear Power Plants", The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 65, No. 11, pp. 20-26, Nov. 2017.
- [2] D. H. Lee, H. C. Kwon, and D. K. Kim, "Full System Chemical Decontamination Concept for Kori Unit 1 Decommissioning", J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol, Vol. 14, No. 3, pp. 289-295, Mar. 2016. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.7733/jnfcwt.2016.14.3.289>.
- [3] C. Andrieu, T. Boisserie, Y. Desnoyers, C. O. Dehaye, and F. Tardy et al., "Radiological Characterization for Decommissioning of Nuclear Installations", OECD NEA, Sep. 2013.
- [4] Y. H. Hwang et al., "A Study on Segmentation Process of the K1 Reactor Vessel and Internals", Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology(JNFCWT), Vol. 17, No. 4. pp. 437-445, Dec. 2019. <https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2019.17.4.437>.
- [5] Jae-Hun Ko, Duk-Woon Jung, Dong-Kyu Lee, and Young-Hwan Hwang, "Radiation Shielding Evaluation for IP-2 Transport Container including Activated Cutting Waste of KORJ unit 1 RV/RVI", Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society Conference, pp. 179-180, May 2018.
- [6] Duk-Woon Jung, Hyosub Kim, Dong-gyu Lee, Kyu-Sub Choi, and Young-Hwan Hwang, "A Study on the Conceptual Design for the RV/RVI Cutting Wastes during Decommissioning of Kori Unit 1 NPP", Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society Conference, pp. 289-290, May 2018.
- [7] En-a Lim, Na-young Kim, Jong-lark Lee, and Ill-yong Weon, "Applying Model to Real World through Robot Reinforcement Learning in Unity3D". Korea Information Processing Society, Vol. 27, pp. 800-803, 2020.
- [8] Jae-Sug Ki, Kyo-Chan Hwang, and Ju-Ho Choi, "A Study on the Development of High Sensitivity Collision Simulation with Digital Twin", Journal of the Society of Disaster Information 2020, Vol. 16, No. 4, pp. 813-823, Dec. 2020. <https://doi.org/10.15683/kosdi.2020.12.31.813>.
- [9] M. S. Kim, N. J. Sung, Y. J. Choi, and M. Hong, "Performance comparison of particle simulation using GPU between OpenGL and unity", KIPS transactions. Software and data engineering, Vol. 6, No. 10, pp. 479-486, Oct. 2017. <http://dx.doi.org/10.3745/KTSDE.2017.6.10.479>.
- [10] H. W. Choi, S. M. Kang, K. J. Kim, D. Y. Kim, and Y. J. Choung, "Development of the visualization prototype of radar rainfall data using the unity 3D engine", Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, Vol. 18, No. 4, pp. 131-144, Dec. 2015. <http://dx.doi.org/10.11108/kagis.2015.18.4.131>.
- [11] Jae-Seok Ki, Kyo-Chan Hwang, Ju-Ho Choi, Jeong Suh, and Dae-Won Cho, "A Development of Cutting Path Creation Methodology for Deriving a Scenario of Decommissioning Process of the Reactor Vessel Internals(RVI) in a Virtual Environment", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 20, No. 4, pp. 99-105, Apr. 2022. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.4.99>.
- [12] Dong-Hyun Kim, Dae-Won Cho, Yeong-Kwan Jo, Jeong Suh, Kwang-Deok Choi, Ryoohan Kim, and Seokyoung Ahn, "Characteristic Analysis of Double Arcing on the Top Surface of STS304 in

Plasma Arc Piercing", Journal of Welding and Joining, Vol. 39, No. 4, pp. 427-434, Aug. 2021. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.4.11>.

[13] K. Kim, M. K. Song, S. J. Lee, D. Shin, J. Suh, and J. D. Kim, "Fundamental Study on Underwater Cutting of 50 mm-Thick tainless Steel Plates Using a Fiber Laser for Nuclear Decommissioning", Appl. Sci., Vol. 12, No. 1, pp. 495, Jan. 2022. <https://doi.org/10.3390/app12010495>.

[14] Kwang-Jin Kim, Nak-Yong Ko, and Se-Seung Park, "Comparison of Collision Avoidance Algorithm for a Mobile Robot Using a Simulation", The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 7, No. 1, pp. 187-194, Jan. 2012. <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2012.7.1.187>.

[15] Saad Jamshed Abbasi, Hamza Khan, Jin Won Lee, M. Salman and Min Cheol Lee, "Robust Control Design for Accurate Trajectory Tracking of Multi-Degree-of-Freedom Robot Manipulator in Virtual Simulator", IEEE Access, Vol. 10, pp. 17155-17168, Feb. 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3149298>.

[16] Jaehyung Kim, Wang Jie, Hyunhee Kim, and Min Cheol Lee, "Modified Configuration Control With Potential Field for Inverse Kinematic Solution of Redundant Manipulator", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 26, No. 4 pp. 1782-1790, May 2021. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3077914>.

저자소개

기 재 석 (Jae-Seok Ki)



1993년 2월 : 한양대학교 산업공학 박사
2021년 01월 ~ 현재 : (주)트라이텍 CTO
2021년 08월 ~ 현재 : 상명대학교 산학협력단 특임교수
관심분야 : 메타버스

황 교 찬 (Kyo-Chan Hwang)



2019년 02월 ~ 현재 : 상명대학교 스포츠 ICT 석박사 통합과정
관심분야 : 시뮬레이션, 비대면

최 주 호 (Ju-Ho Choi)



2004년 02월 : 국민대학교 물리학과(학사)
2020년 05월 ~ 현재 : 상명대학교 미래혁신융합연구소 선임연구원
관심분야 : 시뮬레이션, 메타버스

서 정 (Jeong Suh)



1992년 02월 : 포스텍 기계공학과(박사)
1993년 03월 ~ 현재 : 한국기계연구원 연구위원
관심분야 : 레이저/전자빔 공정 및 시스템, 원전해체기술, SMR제작기술

김 룬 한 (Ryoon-han Kim)



2010년 1월 : KAIST 기계공학과(석사)
2019년 ~ 현재 : 한국기계연구원 선임연구원
관심분야 : 레이저 응용 공정, 플라스마 아크 용접, 원전해체기술