

가상환경에서 원자로 내부구조물의 해체 공정 시나리오를 도출하기 위한 절단 경로 생성 방법론 개발

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

A Development of Cutting Path Creation Methodology for Deriving a Scenario of Decommissioning Process of the Reactor Vessel Internals(RVI) in a Virtual Environment

Jae-Seok Ki*, Kyo-Chan Hwang**, Ju-Ho Choi***, Jeong Suh****¹, and Dae-Won Cho****²

요 약

원자로 내부 시설물과 같은 고위험 시설을 해체하기 위해서는 사전에 시뮬레이션을 통한 작업의 안정성과 생산성을 최대화할 수 있도록 가상환경에서 다양한 절단 경로에 대한 시뮬레이션이 필요하다. 해체 시나리오를 시뮬레이션하기 위해서는 절단 경로를 사용자 임의대로 설정할 수 있어야 한다. 하지만 가상환경 안에서 원통형 객체의 절단 위치를 입력장치로 지정하는 과정은 복잡하고 반복적인 작업을 필요로 한다. 그리고 절단 시뮬레이션의 신뢰도를 높이기 위해서는 정밀한 절단 위치 및 경로 지정이 동반되어야 한다.

본 논문에서는 가상환경에서 절단 대상을 사용자가 임의로 제한 없이 절단 경로를 생성할 수 있는 방법론을 제시한다. 이를 통해 원자로 절단을 위한 다양한 경로에 대해 시뮬레이션을 할 수 있으며, 시뮬레이션 결과를 통해 최적의 해체 대안을 찾을 수 있다.

Abstract

In order to maximize the stability and productivity of the operation through simulation prior to high-risk facilities or high-cost operations such as dismantling of reactor, simulations are required for various cutting paths in a virtual environment. In order to simulate the dismantling scenario, the cutting path should be set arbitrarily by the user. However, the process of marking the cutting position of the cylindrical object as the input device in the virtual environment requires complex and repetitive work. Furthermore in order to increase the reliability of the cutting simulation, precise cutting location and path designation must be accompanied.

In this paper, we present a methodology that allows the user to create a cutting path arbitrarily in a virtual environment. Through this, simulations can be performed on various routes for cutting the reactor, and the optimal decommissioning alternative can be found through the simulation results.

Keywords

simulation, dismantling of reactor, digital twin, cutting path, virtual environment

* 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/0000-0001-8668-1385>

· Received: Dec. 20, 2021, Revised: Apr. 20, 2022, Accepted: Apr. 23, 2022

· Corresponding Author: Jae-Seok Ki

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

Tel.: [REDACTED] Email: skyblueki@smu.ac.kr

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

지난 2011년 일본 후쿠시마에서 발생한 원전 사고로 인해 전 세계적으로 원전 시설의 안전한 해체에 많은 관심을 가지게 되었으며, 이에 따라 해체시장의 기술 선점을 위한 경쟁도 거세질 것으로 예상된다[1]. 이미 해외 선진국들은 원전 등의 다양한 시설의 해체 경험과 기술의 안전성 및 경제성을 확보한 상태이며 이로 인해 국가적인 기술 종속이 발생할 것이다. 이러한 관점에서 원전 해체는 단순한 경제적 차원이 아닌 국가의 중장기 과제로 많은 지원이 필요하다.

국산 기술의 고도화를 위해 고위험 시설인 원전 시설을 원격으로 해체하고 가상환경에서 시뮬레이터를 통해 해체 장비를 제어하기 위해서는 다양한 해체 시나리오에 대한 시뮬레이션이 필요하다. 이러한 시뮬레이션을 통해 여러 해체공정에 대한 평가를 통해 최적의 해체공정을 선택할 수 있어야 한다. 다양한 해체공정에 대한 시뮬레이션을 위해서는 해체 시나리오의 생성이 필요하며, 사용자의 의도대로 해체경로를 설정하는 것이 필요하다[2][3].

1.2 원전해체 시뮬레이션을 위한 기존 연구

기존의 원전해체 시뮬레이션은 해체공정을 시뮬레이션하기 위한 소프트웨어 프레임워크에 대한 연구도 있지만 주로 폐기물 절단을 가상환경에서 구현하는 방안과 절단 현상을 표현하는 방법에 관한 연구가 많았다. 원전 폐기물 3D 모델을 실시간으로 절단하기 위해 이완복 등은 기존의 BSP-Tree를 이용한 절단 기법에서는 무한 평면을 기준으로 3D 모델을 두 부분으로 절단시키기 때문에 일반적인 절단 작업에 유용하게 사용하기 어려워 유한한 영역 내에서 3D 모델을 절단하는 기법을 제안하였다[4].

절단 대상 모델을 절단하는 시뮬레이션을 위해 절삭 형상 생성 과정과 생성된 절삭 형상으로 대상 모델을 절단하는 과정으로 구성하여 시뮬레이션 프로그램을 개발한 연구가 있었고, 절단 시뮬레이션 알고리즘을 반영하여 절단 공정에서 발생하는 절삭

현상을 표현하고, 2차 폐기물의 양을 예측하는 프로그램을 개발하였다.

이상의 기존 연구내용을 통해 3D 모델을 절단하고, 절단 과정을 가상화하는 연구는 진행되고 있으나 절단 경로를 실시간으로 설정하여 절단 시나리오를 생성할 수 있는 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 원자로 내부 구조물(RVI)를 대상으로 높은 자유도를 제공하는 절단 시뮬레이션을 만들기 위한 방법론을 제안하고자 한다. 이를 위해 가상 객체에 격자 모양의 그리드를 생성하고, 생성된 각각의 격자를 자유롭게 변경하여 사용자가 원하는 형태의 절단 경로를 생성할 수 있게 하고자 한다. 이와 같은 절단 경로 생성 방법론을 통해 원격 해체에 필요한 해체 시뮬레이션을 개발할 수 있으며, 시뮬레이션 결과를 분석하여 최소의 시간과 비용으로 원전 시설을 안전하고 효율적으로 해체할 수 있는 해체 시나리오를 도출할 수 있다[5][6].

II. 본 론

2.1 격자 방식의 절단시스템

본 연구를 통해 이루고자 하는 기술적 과제는 원자로에 포함되는 절단 대상 구조물의 절단 범위에 복수의 절단 포인트들을 설정하고, 절단 포인트들을 조절하여 생성하고 절단 경로를 도출하는 것이다. 하지만, 2차원의 모니터 화면을 통해 3차원의 가상 공간상에 위치한 구조물에 마우스나 탭틱 등의 입력장치를 작업자가 조작하여 3차원의 공간상에 절단 위치나 경로를 지정하는 것은 거의 불가능하며 많은 시간과 검증의 절차가 요구된다.

그리하여 본 연구에서 제시하는 격자 방식의 절단 시스템은 원자로 내부 구조물이 원통형의 구조적 특징을 가지고 있다는 것을 착안하여 가상의 3차원 공간 상에서의 정확한 위치를 인지하고 그 위치 좌표를 수치화하는 일련의 복잡한 과정을 간소화하기 위한 최적의 방법이다. 격자 방식의 절단 시스템은 그림 1과 같이 영역 구분부(Section of division range), 그리드 생성부(Section of create grid), 해체 시뮬레이션(Decommissioning simulation) 및 절단부

(Section of cutting analysis)를 포함한 구조로 구성되어 있다.

본 연구는 3차원 공간 상에서의 절단 영역과 경로를 지정하고 생성하는 방법론에 관한 것으로 해체 시뮬레이션과 절단부에 대한 개발과 시뮬레이션(모의실험)에 대한 결과 분석에 관한 내용은 추가적인 연구에서 기술한다.

절단 시스템 구성도에 대해 간단하게 설명을 하면 영역 구분부는 원자로에 내부에 포함되는 원통형 구조의 절단대상 구조물(OS, Object Structure)을 선택하고, 절단 대상 구조물의 절단 범위(CR, Cutting Range)를 결정하고, 절단 가능 여부에 따라 대상 구조물의 절단 범위를 복수의 구분영역(DR, Division Range)들로 구분된다. 그리드 생성부는 상기 절단 범위에 복수의 절단 포인트들을 설정하고, 절단 포인트들을 조절하여 절단 대상 구조물을 절

단하기 위한 절단 경로에 해당하는 절단 그리드(CGR, Cutting GRid)를 제공한다. 해체 시뮬레이션은 절단 그리드를 기반으로 한 절단 지점과 경로를 따라 절단대상 구조물을 절단 장비의 제원과 공정 변수를 설정하고 연산하여 가상의 환경 속에 가공된 절단 장비와 동역학이 적용된 로봇암(Robot arm)을 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.

2.2 영역 구분부

영역 구분부는 그림 2와 같이 판단부(Discriminator)와 영역 구분기(Range divider)를 포함한다.

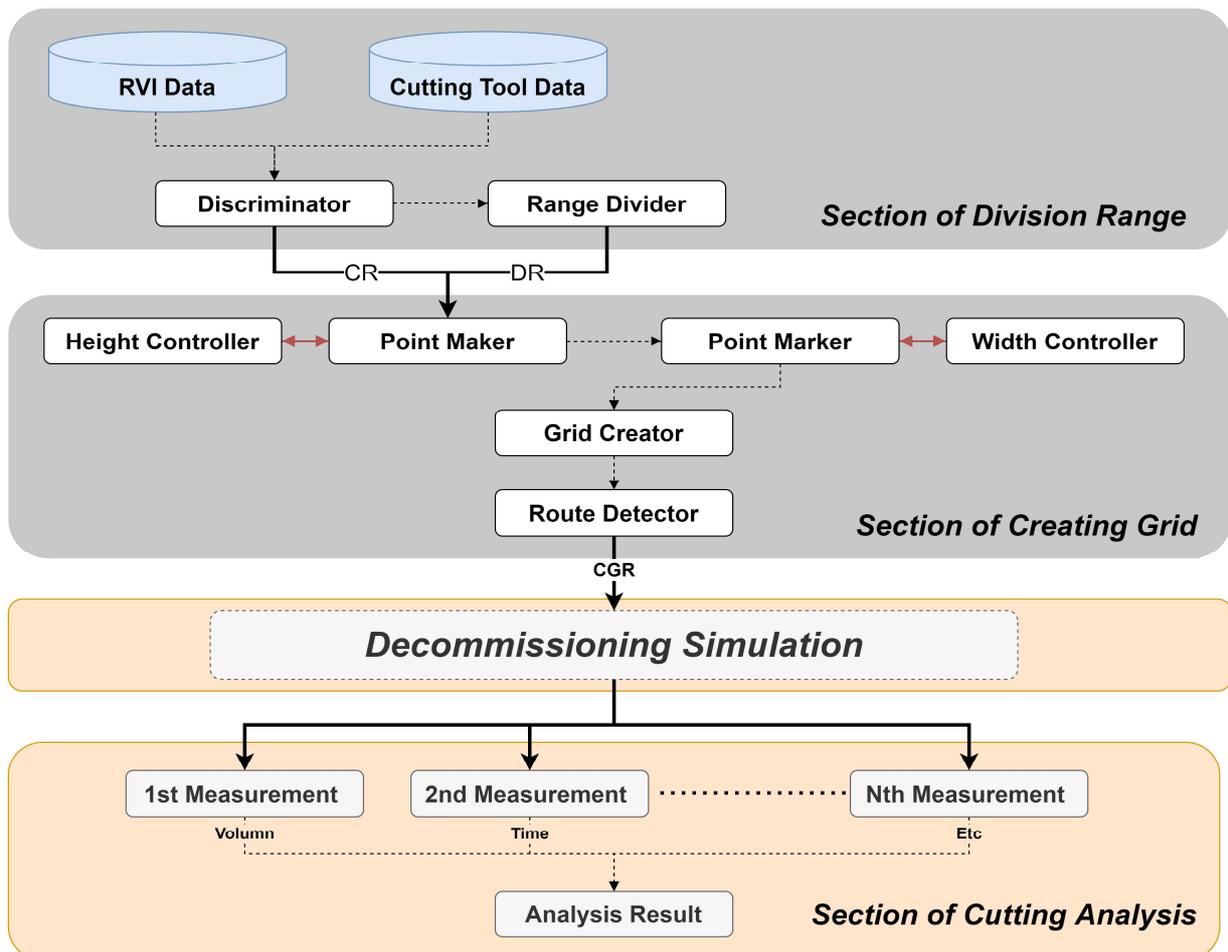


그림 1. 격자 방식의 절단 시스템 구성도
Fig. 1. Grid cutting system configuration diagram

판단부는 절단 대상 구조물(Save object structure)의 구성 부품군에 대한 제원과 형태의 모델링 데이터를 기반으로 절단 대상을 선택하고 선택된 대상의 절단 범위(Measurement object)를 측정한다. 상기 절단 범위에 상응하는 절단 대상 구조물의 두께와 재질, 형태를 고려하여 장착된 절단 장비의 제원(Save cutting tool)과 공정 변수(Setting cutting tool)를 통해 산출된 장비의 성능(Performance tool)을 통해 절단 가능 여부를 판단한다.

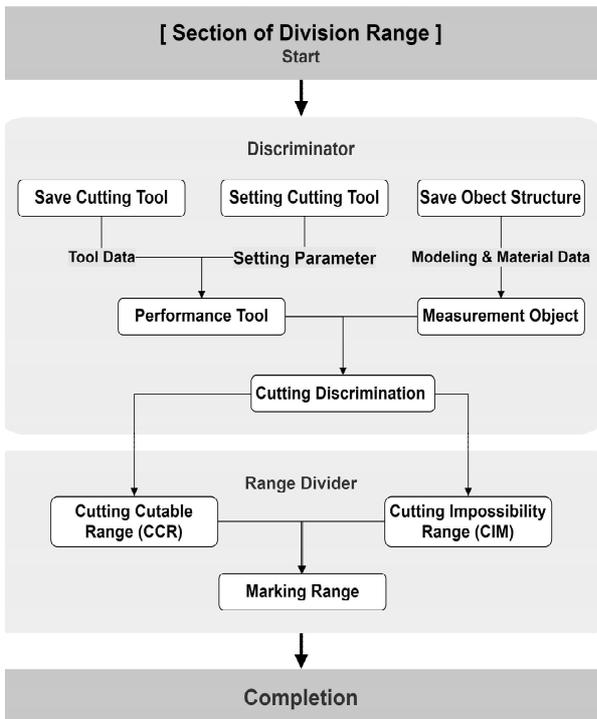


그림 2. 영역 구분부 상세 알고리즘
Fig. 2. Area division detailed algorithm

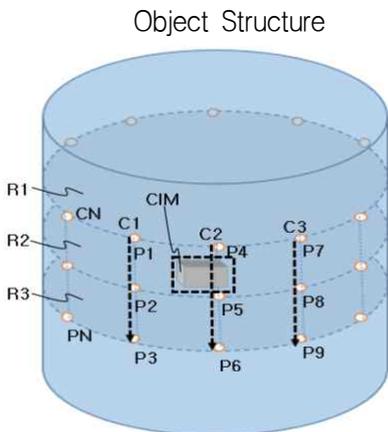


그림 3. 절단대상 구조물에 표시된 CIM
Fig. 3. CIM marked on the structure for cutting

그림 2에서처럼 영역 구분기는 절단 가능 여부에 따라 절단 범위를 절단 가능 영역(CCR, Cutting Cutable Range) 및 절단 불가능 영역(CIM, Cutting Impossibility range)으로 구분할 수 있다. 절단 불가능 영역은 판단부에서 산출된 절단 장비의 절단 성능과 절단 구조물의 모델링 정보를 통해 측정된 두께 정보를 통해 결정된다.

영역 구분부를 통해 그림 3과 같이 원통형 모양에 절단 대상 구조물의 절단 영역이 3차원 공간상에 행(RN, Row Number)과 열(CN, Column Number)으로 분할하고 분할된 공간의 교차점(PN, Point Number)을 가시적으로 표시(Marking range)함에 따라 여러 방향에서 절단 가능 영역과 절단 대상의 두께나 재질 등의 정보(Save object structure & measurement object)를 점검하여 설정된 절단 장비의 절단 능력(Performance tool)을 초과하는 절단 불가능 영역을 자세히 관찰하고 절단 경로를 설정하기 위한 절단 그리드 회피 영역도 절단 대상 구조물 전체의 영역에서 확인하는 것이 아니라 절단 가능 영역에서만 확인이 이루어짐에 불필요한 확인 작업이 제거되고 작업시간도 축소되는 효과를 유도할 수 있다.

2.3 그리드 생성부

그리드 생성부는 포인트 결정부(Point maker), 포인트 배치부(Point marker), 그리드 생성기(Grid creator) 및 검출부(Route detector)를 포함하며 그림 4는 그리드 생성부의 기능과 사용자의 조작을 정보 바탕으로 그리드의 생성 흐름을 나타낸다.

포인트 결정부는 절단범위에 배치되는 복수의 절단 포인트들을 결정한다. 예를 들어, 포인트 결정부는 그리드의 기본 설정 정보(Initialize setting data)와 사용자의 조작 정보를 기반으로 그리드의 기본 포인트 생성(Create grid base-point) 정보와 절단 대상 구조물, 절단 가능 영역을 통해 배치 포인트 좌표(Locate point coordinate)를 결정한다.

포인트 배치부는 절단 범위 내에 결정된 배치 포인트 좌표를 절단 대상 구조물의 표면에 포인트를 표시하고 사용자는 3차원 공간상에 표시된 포인트를 선택하여 열이나 행의 포인트 정보를 조절하게

나 추가와 삭제 등의 조작이 가능하다.

그리드 생성기는 포인트 결정부를 통해 결정된 포인트 좌표를 기반으로 절단 그리드를 생성한다. 그리드 생성기는 그림 5와 같이 행열 조절부 및 폭 조절부를 추가하거나 삭제를 할 수 있다. 행열 조절부는 복수의 행열의 개수를 조절할 수 있다. 폭 조절부는 복수의 행 사이의 폭에 해당하는 행폭 및 복수의 열 사이의 폭에 해당하는 열폭을 조절할 수 있다.

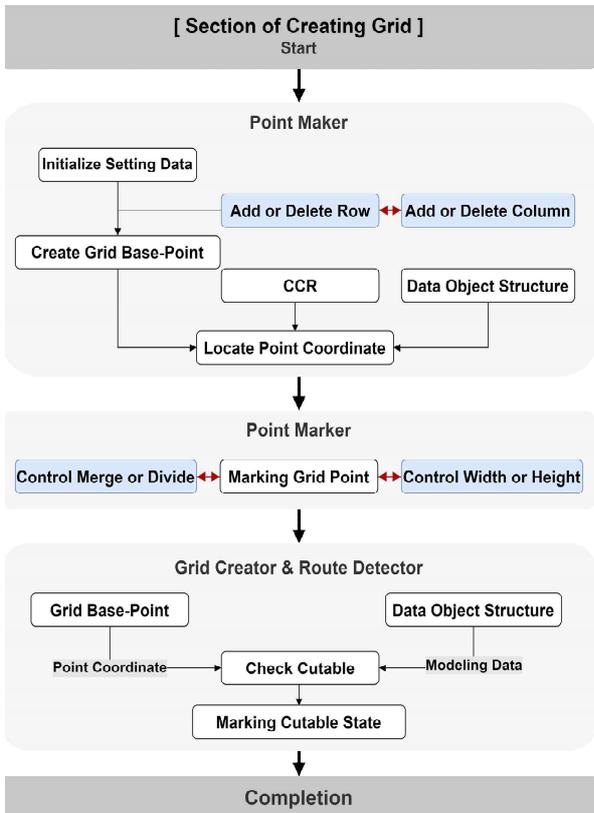


그림 4. 그리드 생성부 상세 알고리즘
Fig. 4. Detailed algorithm for grid creation part

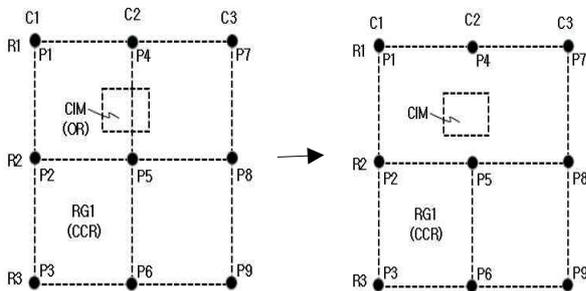


그림 5. 그리드 생성기의 폭 조절부 예시
Fig. 5. Example of the width controller

검출부는 절단 그리드 포인트(Grid base-point)와 절단 대상 구조물(Data object structure)의 정보를 기반으로 절단 가능 여부를 확인(Check cuttable)한다. 절단 그리드가 상기 절단 불가능 영역과 겹치는 상기 중첩영역이 발생하는 경우, 절단 가능 여부의 상태 표시(Marking cuttable state)하고 포인트 결정부를 통해 절단 불가능 상태를 회피하거나 우회할 수 있도록 절단 경로의 수정이 가능하다.

2.4 절단부

절단부는 절단 장비의 제원과 공정 변수를 통해 모사된 절단 장비를 통해 확정된 절단 경로의 포인트를 따라 이동하며 절단 그리드에 따라 절단 대상 구조물을 상하좌우 설정된 방향으로 절단이 가능하다.

격자 방식의 절단 시스템은 그림 1과 같이 제1 측정부(Measurement)와 제2 측정부를 포함한 절단부가 있다. 제1 측정부는 일정한 부피의 빈 공간에 해당하는 공간부피에 절단 대상 구조물을 절단한 절단 단편들을 적재한 후, 절단 절편들이 공간부피에서 차지하는 부피비율을 측정할 수 있다[7]. 부피비율이 미리 정해진 일정 비율보다 작은 경우, 그리드 생성부는 절단 포인트들을 다시 조절하여 절단 그리드를 제공할 수 있다. 제2 측정부는 절단부가 절단 그리드에 따라 절단 대상 구조물을 절단하는 총 시간을 측정할 수 있다. 격자 방식의 절단 시스템은 결과부(Analysis result)를 더 포함할 수 있는데, 결과부는 부피비율에 상응하는 부피점수 및 총 시간에 상응하는 시간 점수를 합산하여 결과점수를 제공한다. 부피 비율이 증가함에 따라 부피 점수는 증가하고, 총 시간이 증가함에 따라 시간 점수는 감소한다 [8][9].

2.5 개발 효과

본 연구는 방사능 피폭이 발생하는 고위험 환경에서 진행되어야 하는 원전 해체공정 시간을 단축시키고 폐기물의 최소화 방법을 모색하기 위한 과정 중 절단체 절단 방식을 제시하는 것이다.

또한, 연구를 통해 착안된 격자 방식의 절단 시

시스템을 활용하면 작업자는 원자로에 포함되는 다수의 절단 대상 구조물을 확인하고 선택된 절단 대상 구조물의 범위에 복수의 절단 포인트를 수동으로 지정하고 그로 인해 발생할 수 있는 작업자의 오차와 오류를 최소화할 수 있을 것으로 예상된다. 이런 과정을 통해 설정된 절단 포인트는 절단 시스템을 통해 절단 지점과 경로를 빠르고 쉽게 추가하거나 삭제하고 길이와 위치를 수정하여 원자로를 해체하는 절단 공정 시간 및 해체된 구조물 단편과 2차 폐기물의 적재 부피를 구할 수 있는 절단 시뮬레이션(모의시험)의 반복적 수행을 통해 최적의 해체 절단 공정 도출이 수월해질 것이다.

III. 결 론

본 연구의 실시 예에 따른 격자 방식의 절단 시스템은 영역 구분부, 그리드 생성부, 해체 시뮬레이션 및 절단부를 포함하며 영역 구분부는 원자로에 포함되는 절단 대상 구조물을 선택하고, 절단 대상 구조물의 절단 범위를 결정하고, 절단 가능 여부에 따라 절단 범위를 복수의 구분영역들로 구분할 수 있다. 그리드 생성부는 절단 범위에 복수의 절단 포인트들을 설정하고, 절단 포인트들을 조절하여 절단 대상 구조물을 절단하기 위한 가이드 라인에 해당하는 절단 그리드를 제공하는 방법이 연구의 핵심이라고 할 수 있다.

추가로 연구 개발될 절단 시뮬레이션을 통해 가상 3차원 공간상에서 해체 과정의 가시화와 해체공정에 대한 정보 수집을 하고 이른 분석하고 검증하는 절단부 통해 해체공정의 평가가 가능할 것이다.

격자 방식의 절단 시스템은 원통형의 다양한 원자로 구성품의 해체공정에 활용되어 각각의 원자로에 최적화된 해체공정을 생성하는 것에 유용할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

2021년도 한국정보기술학회 추계종합학술대회에서 발표한 논문(가상환경에서 원자로 해체 시뮬레이션을 위한 절단 경로 생성 방법론 개발)을 확장한 것입니다.

References

- [1] European Commission and Dismantling Techniques, "Decontamination Techniques, Dissemination of Best Practice", Experience and Know-how, Final Report, 2009.
- [2] W. Pfeifer, B. Eisenmann, Fr.-W. Bach, R. Versemann, H. Bienia, V. Krink, and F. Laurisch, "Plasma cutting in the Multipurpose Research Reactor (MZFR) -Underwater use at steel thickness of up to 130 mm", *Welding in the world - Journal of the international Institute of Welding*. Vol. 51, No. 11, pp. 3-10, Nov. 2007. <https://doi.org/10.1007/BF03266603>.
- [3] Jang Hwa Lee, Do Gyeum Kim, and Kihyon Kwon, "Recent Activities in Decommissioning Technology of Nuclear Power Plants", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 65, No. 11, pp. 20-26, Nov. 2017.
- [4] Wan-Bok Lee, Wen-Yuan Hao, Byung-Pyo Kyung, and Seuc-Ho Ryu, "Dismantling Simulation of Nuclear Reactor Using Partial Mesh Cutting Method for 3D Model", *Journal of Digital Convergence*, Vol. 13, No. 4, pp. 303-310, Apr. 2015. <https://doi.org/10.14400/JDC.2015.13.4.303>.
- [5] J. Nam, T. Kim, and S. Wook Cho, "A numerical cutting model for brittle materials using smooth particle hydrodynamics", *International Journal Manufacturing Technology*, Vol. 82, No. 1, pp. 133-141, Jun. 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7223-y>.
- [6] A. Malakizadi, K. Hosseinkhani, E. Marino, A. Del Prete, and L. Nyborg, "Influence of friction models on FE simulation results of orthogonal cutting process", *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88, pp. 3217-3232, Jun. 2016.
- [7] M. Kim, S. Byun, and J. Kim, "A Monocular Vision Based Technique for Estimating Direction of 3D Parallel Lines and Its Application to

Measurement of Pallets", Journal of Korea Multimedia Society, Vol. 21, No. 11, pp. 1254-1262, Nov. 2018. <http://doi.org/10.9717/kmms.2018.21.11.1254>.

- [8] M. R. Walter, S. Karaman, E. Frazzoli, and S. Teller, "Closed-Loop Pallet Engagement in an Unstructured Environment", Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Taipei, Taiwan, pp 5119-5126, Oct. 2010. <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2010.5652377>.
- [9] D. Haanpaa, G. Beach, and C. J. Cohen, "Machine Vision Algorithms for Robust Pallet Engagement and Stacking", Proceedings of IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR), Washington, DC, USA, pp. 1-8, Oct. 2016. <https://doi.org/10.1109/AIPR.2016.8010590>.

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

서 정 (Jeong Suh)



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

조 대 원 (Dae-Won Cho)



2014년 02월 : 한국과학기술원 기계공학과(박사)
2015년 11월 ~ 현재 : 한국기계연구원 선임연구원
관심분야 : 원전해체