Journal of Radiation Industry 14(4) : 441~446(2020)

Technical Paper

원전 해체폐기물의 효과적인 부피 감용을 위한 이동형 압축 설비 개념설계 연구

정현준[1] · 이형규[1,*] · 이운장[1] · 변정휴[1] · 이경호[1] · 정세원[1]

[1]㈜오리온이엔씨

A Conceptual Design Study of Mobile Compaction Facility for Effective Volume Reduction of Nuclear Power Plant Decommissioning Waste

Hyeonjun Jeong[1], Hyung Gyu Lee[1,*], Unjang Lee[1], Junghue Byun[1], Kyungho Lee[1] and Sewon Chung[1]

[1]*Orion EnC, #1306, 37, Seongsui-ro 22-gil, Seongdong-gu, Seoul 04798, Republic of Korea*

Abstract - As the time for the dismantling of the nuclear power plant of Kori No. 1 in Korea approaches, preparations for the disposal of various types and large amounts of radioactive waste generated during the dismantling process are urgently needed. In this study, the conceptual design of a Mobile Compaction Facility for treatment and volume reduction of incombustible radioactive waste, which occupies about 90% of the volume of nuclear power plant decommissioning waste, was conducted. Differentiated design elements for improvement were derived by analyzing the problems of existing radioactive waste compaction facilities. In order to determine the compacting force suitable for the purpose of this study, a supercompaction experiment was performed by selecting simulated dismantled waste, and the International Standardization Organization (ISO) container and the outline shape and moving parts of trailer-based mobile compaction type volume reduction facility were implemented as a 3D model. Based on this, a design concept of a variable stroke method that can be used for both 200 L and 320 L drums and utilizes limited installation space was introduced. The mobile compaction facility developed through this study has improved economic efficiency and operational convenience compared to the supercompaction facility, and is expected to reduce the risk of radiation exposure of workers. Therefore, it is expected to be a facility for reducing the volume of nuclear power dismantling waste that can be useful when dismantling nuclear power plants.

Key words : Decommissioning waste, Waste volume reduction, Movable waste reduction system, Supercompaction, Waste compaction process

서 론

전 세계적으로 1990년 이후 신규 원전의 건설 감소 및 원전의 노후화가 심해짐에 따라, 원전 해체가 증가하고 있는 추세이다. 원전 1기를 해체하기 위해서는 약 15년 정도의 기간이 소요되며, 이 과정에서 대량으로 발생하는 원전 해체폐기물의 처리 및 처분비용은 해체비용의 큰 비중을 차지하고 있으므로 체계적이고 효율적인 관리가 필요하다. 고리 1호기 해체 시 약 14,500 드럼의 중·저준위 방사성폐기물 발생을 예측하고 있고(Korean radioactive agency 2018), 특히 2090년까지 발생할 국내 원전 해체폐기물 중·저준위 이하의 폐기물이 90% 이상을 차지할 것으로 예상되므로, 저준위 이하 원전 해체폐

* Corresponding author: Hyung Gyu Lee, Tel. +82-2-3414-2344, E-mail. hglee@orionenc.com

기물의 처리 및 처분을 위한 기술개발 및 국산화가 시급하다(Korean radioactive waste society 2013).

해체폐기물을 처리 및 처분하기 위해서는 방사성폐기물의 제염, 절단, 파쇄, 압축, 소각, 용융, 고화 등의 부피 감용 기술이 적용되고 있으며, 특히 구조물 해체폐기물의 약 90% 부피를 차지하는 비가연성 폐기물을 감용하기 위해서는 주로 압축기술이 사용된다. 유압식 압축기를 활용한 압축기술은 운영비용과 유지비용이 저렴하면서도 일반적으로 감용 전후의 부피 비율을 뜻하는 감용비가 3~10 정도인 효과적인 부피 감용 기술이다(Garamszeghy 2011). 저압 압축기술은 수십 톤 내외의 압축하중으로 대부분 드럼 내에서 폐기물을 직접 압축하는 방식으로 원전 운영 중에 발생하는 잡고체 폐기물을 부피 감용하기 위한 목적으로 사용된다. 현재 국내 원전에서는 발전소 역내에 설치된 30톤급 저압 압축기를 사용하여 압축성 잡고체 운영 폐기물을 200 L 드럼 내에서 직접 압축하여 처리하고 있다. 원전 해체의 경우에는 국내에서는 아직 해체 사례가 없으나, 해외의 경우에는 일반적으로 해체 현장이 아닌 초고압 압축 설비 설치가 용이한 곳에 설치하고, 콘크리트, 금속 및 소각재 등의 중·저준위 폐기물을 처분장소로 이송하여 작업을 진행한다(Walberg *et al*. 2008; Larsson *et al*. 2013).

이와 같이 원전 해체 현장에서 일반적으로 사용되는 고정식 초고압압축 설비는 해체폐기물을 압축 설비 설치 현장으로 이송하여 작업을 수행해야 하므로 이 과정에서 작업자들의 피폭이 증가하는 문제점이 있다. 또한 2000톤 규모의 초고압 압축 설비는 200 L 드럼을 재압축하여 320 L 드럼에 재포장 용도로만 사용되는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 초고압 압축 설비들의 문제점들을 개선하여 200 L 드럼 내 방사성 폐기물을 직접 압축하는 방식 대신에 압축 슬리브를 활용하여 원전 해체폐기물 압축 후 200 L 드럼 내 적재하여 처분하거나, 추가적으로 재압축이 필요한 경우에는 200 L 드럼을 재압축하여 320 L 드럼에 적재할 수 있는 2중 용도로 사용될 수 있도록 하였다.

또한 동 설비를 해체 현장에서 필요한 장소에 자유롭게 이동할 수 있도록 ISO 컨테이너 규격에 맞게 이동형 모듈화로 설계하고, 원격 및 자동화 기능을 통해 해체비용을 최대한 줄일 수 있도록 기존 압축 설비들의 단점과 문제점을 최대한 개선하였다. 본 연구의 사전단계로 해체폐기물의 압축하중의 설정을 위해 모의 해체폐기물의 압축 실험을 수행하였고, 최적화된 운영모델 설계를 위해 기존 압축 설비의 운영 사례, 공정, 주요 기능을 조사하고 분석하였다.

연구 방법

1. 설계 요건 및 기준 설정

본 설비의 설계 개념을 결정하기 위해 기존 압축 설비들의 특징과 문제점들을 사전 파악하기 위해 기존 압축 설비들에 대한 문헌 조사를 진행하였다. 조사 결과 기존 초고압 압축 설비들의 압축 방식은 해체폐기물의 이송 과정에서 발생하는 작업자들의 과도한 피폭 문제와 200 L 드럼의 재압축 목적으로만 사용되는 용도의 제한성 그리고 폐기물의 압축 후 부풀음 방지를 위한 별도의 페드럼(sacrificial drum)이나 금속 박스의 사용에 따라 압축감용 비용이 증가하는 문제점 등이 있음을 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서는 기존 압축 설비가 갖고 있는 이러한 문제점들을 해결할 수 있도록 설계 요건과 기준을 만족시킬 수 있는 설계개념을 설정하였다. 우선, 첫 번째 설계 요건인 압축하중은 압축식 감용 설비의 전체적인 규모, 폐기물의 감용률 및 처리속도와 밀접한 연관이 있다. 압축하중이 높을수록 감용 가능한 폐기물의 종류 혹은 양이 증가하는 대신 설비의 운영 및 유지비용이 증가하게 된다. 본 연구에서는 다량의 해체폐기물을 처리할 수 있게 하면서, 유지비용을 최소화하도록 압축하중을 정하는 것을 설계 목표로 선정하였다. 기존의 초고압 압축 설비는 페드럼 사용 시 발생하는 공정의 복잡성에 따른 공정 비용 및 페드럼 사용을 위한 추가 장치 설치 비용 등이 소모되는데, 이를 압축 후 밴딩 장치를 이용해 되부풀음 현상을 방지하도록 설계하여 페드럼을 사용하지 않도록 설계하고자 하였다. 또한, 기존 초고압 압축장치에서 문제가 되는 작업자의 피폭 위험을 원격 및 자동화가 가능하도록 설계하여 감소시키고, 이를 통해 공정의 효율성까지 향상시키는 것을 설계 요건으로 선정하였다. 이 밖에, 탈착식 컨테이너 피어싱 장비, 플라즈마 용융 모듈과 연결된 부피 감소 프로세스 등의 도입을 통하여 기존 압축 설비보다 개선된 압축 설비를 설계하고자 한다. 위 내용을 정리한 압축 모듈의 주요 설계 요구 사양은 Table 1과 같다.

2. 압축 실험

압축 설비의 성능은 해체폐기물을 얼마나 많이 감용할 수

Table 1. Design requirements of developing a movable supercompaction module

Design requirements
• Apply compacting force optimized for movability and treating decommissioning waste
• Directly compress decommissioning waste at high pressure without sacrificial drum
• Prevent spring-back effect on compacted puck with banding function.
• Effectively treat large amount of decommissioning waste
• Optimize automated process and remote control function for direct compaction
• (Optional) removable container piercing equipment to treat sacrificial drum by existing process
• (Challenge) connected volume reduction process with plasma melting module

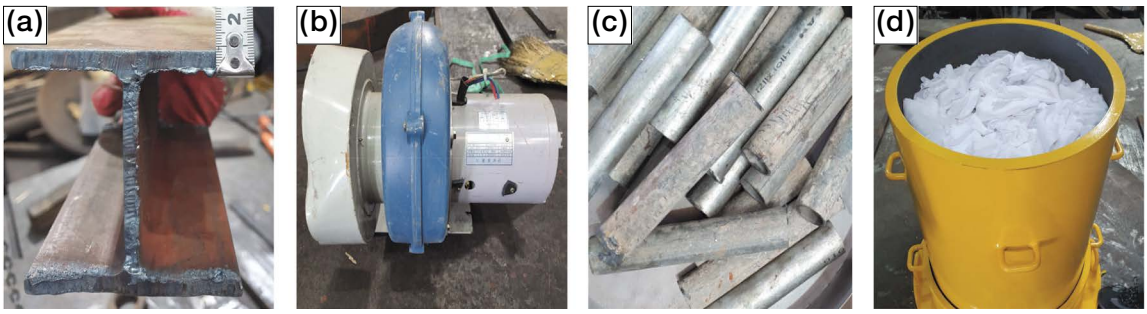

Fig. 1. Simulated decommissioning wastes prepared for experiments, (a) structural steel, (b) steel casting, (c) steel pipe, (d) rags.

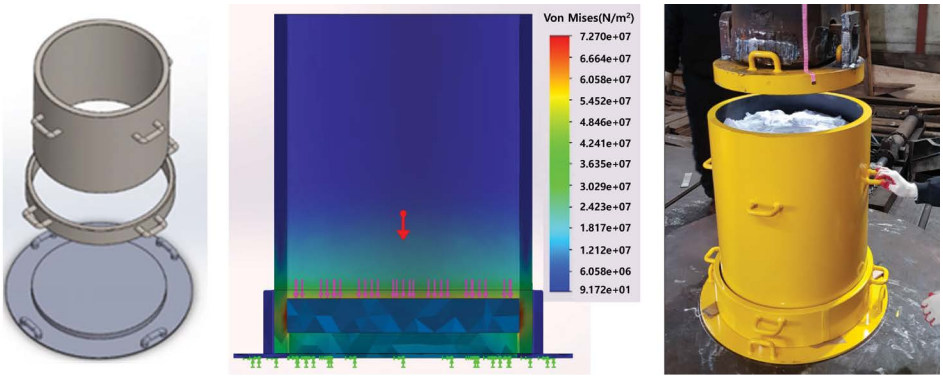

Fig. 2. Custom mold fabricated for supercompaction experiments, carbon steel, 32 mm (T), ø548 mm (ID) × 750 mm (H).

있는지에 의해 결정되는데, 이는 압축하중과 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서 설계하는 이동식 압축 설비는 컨테이너의 한정된 공간 내에서 설비의 설치가 가능하여야 하기 때문에 압축 용량이 적으면서도, 200 L 드럼 재압축 및 320 L 드럼용 해체폐기물 압축이 모두 가능한 적절한 압축 용량 설계가 필요하다. 이를 위해, 다양한 종류의 해체폐기물에 대해 압축 실험을 진행하고 결과를 토대로 압축 용량을 설정하고자 하였다. 해체폐기물은 고리 1호기 해체폐기물 종류별 예상 발생량 및 Nuclear Regulatory (NUREG)-1761에서 제시하고 있는 해체폐기물의 일반적인 형상을 참조하여 Fig. 1과 같이 준비하였으며(Abelquist *et al*. 2002; Korean radioactive agency 2018), 연질의 해체폐기물 감용 특성을 대표할 수 있는 의류를 추가로 선정하였다. 압축 실험에 활용된 특수 몰드는 Fig. 2와 같이 준비하였으며, 탄소강 재질의 대구경 파이프와 강판을 가공하여 제작하였다. 이를 최대 1000톤의 압축하중까지 산업용 초고압 프레스 설비를 이용하여 압축 실험을 진행하였다.

결과 및 고찰

1 .압축하중 용량 설정

모의 해체폐기물의 압축하중 변화에 대한 감용률은 Fig. 3과

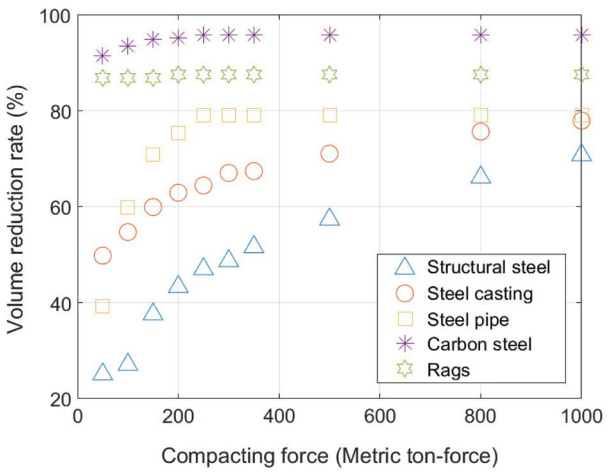

Fig. 3. Volume reduction behavior of decommissioning waste under supercompaction up to 1,000 ton-force.

같이 나타났다. 파이프, 철판 및 면류의 경우 250톤 이하의 압축하중에서는 압축하중이 증가함에 따라 감용률이 증가하였으나, 그보다 큰 압축하중에서는 감용률이 더 이상 증가하지 않았다. 형강류(Structural steel)와 계기류(Steel casting)의 경우 압축하중의 증가에 따라 감용률이 지속적으로 증가하는 추세를 보였고, 1000톤의 압축하중에서 각각 약 80, 70%의 감용률

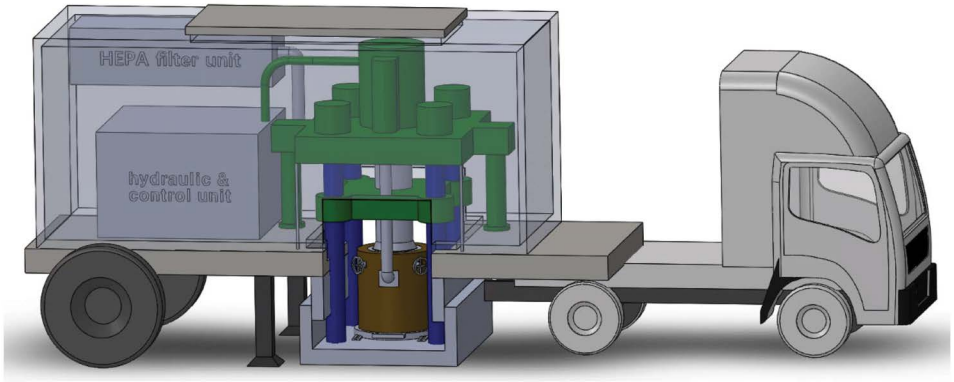

Fig. 4. 3D model of movable supercompaction module based on conceptual design.

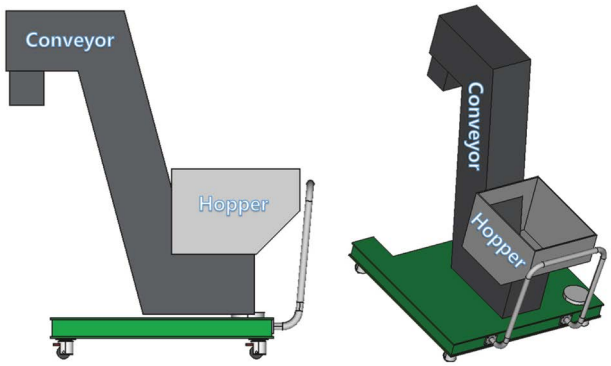

Fig. 5. 3D model of conveyor assembly.

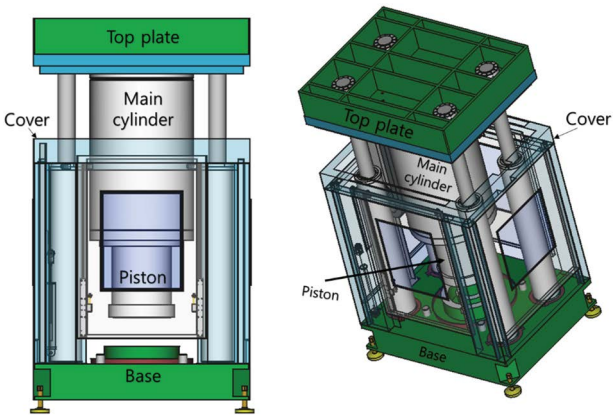

Fig. 6. 3D model of press assembly.

을 보였다. 그래프의 변화 추세를 토대로, 형강류 및 계기류에서 압축하중 1000톤에서의 감용률보다 10% 높은 감용률을 얻기 위해서는 최소 500톤 이상의 압축하중이 더 필요하여 압축하중의 증가 대비 감용 효율이 좋지 못함을 예상할 수 있었다. 또한, 1000톤의 압축하중에서 모든 해체폐기물의 감용비가 3 이상이기 때문에, 압축기를 200 L의 드럼 재압축 및 320 L 드럼 내 해체폐기물의 압축이 가능한 2중 용도로 사용함에 있어, 1000톤의 압축하중은 충분한 것으로 판단되어, 본 연구에서는 압축기의 압축하중 용량을 1000톤으로 설정하였다.

2. 설비 및 운영모델 설계

압축식 감용 모듈의 기본 설계 방향은 4열(4-column) 형태의 유압식 압축기와 이를 포함한 20 ft ISO 컨테이너를 주축으로 삼고 개념설계상 제시한 핵심 사양들을 반영하는 것이다. 압축기를 포함한 ISO 컨테이너는 압축기의 연장 설치가 가능하도록 개조된 트레일러에 탑재되며, 트레일러 하부 구조체와 4개의 지지 기둥의 하강 및 상승에 의해 모듈의 설치와 해제가 가능하다. Fig. 4는 압축식 감용 모듈의 개념설계 스케치 기반 모형이다.

본 개념설계에서는 압축식 감용 모듈을 크게 컨베이어 어셈

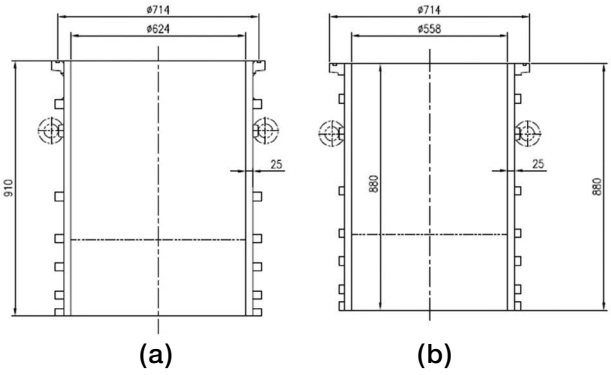

Fig. 7. 2D sketch of molds for (a) 320 L waste drum and (b) 200 L waste drum.

블리(conveyor assembly), 프레스 어셈블리(press assembly), 수평 컨베이어 어셈블리(horizontal conveyor assembly)로 나눠 설계를 진행하였다. 컨베이어 어셈블리는 Fig. 5와 같이 해체폐기물을 투입하는 호퍼(hopper)와 투입된 해체폐기물을 컨베이어 방식으로 운반하는 컨베이어(conveyor) 및 손잡이 등으로 구성되어 있다. 해체폐기물은 호퍼에 투입 후, 컨베이

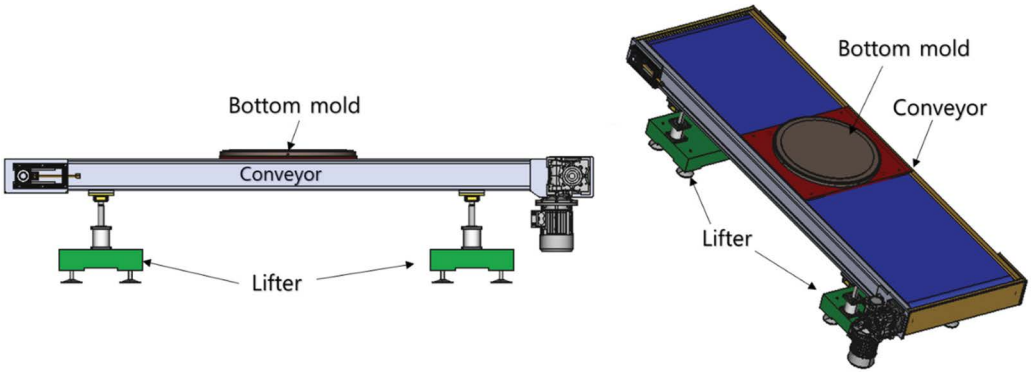

Fig. 8. 3D model of horizontal conveyor.

어의 상단부까지 운반되어 수평 컨베이어에 있는 폐기물 용기에 투입하는 방식으로 컨베이어 어셈블리를 설계하였다.

프레스 어셈블리는 Fig. 6과 같이 하단의 지지대(base), 압축기(piston, main cylinder), 상단부(top plate) 및 폐기물 압축 시 발생하는 분진을 막기 위한 커버(cover) 등으로 구성하였다. 메인 실린더 및 피스톤으로 구성된 압축기의 압축 용량은 실험을 통해 선정한 1000톤이며, 하단의 지지대는 1000톤의 압축하중에 견딜 수 있도록 설계하였다. 본 설계에서는 상단부를 컨테이너와 체결이 가능하도록 설계하여, 설비 이동 시에는 상단부의 높이를 컨테이너의 높이까지 낮춘 후 체결한 채로 이동하고, 설비 이동 후에는 체결을 해제 후 상단부를 높이도록 설계하였다. 이러한 설계는 컨테이너의 한정된 공간을 보다 효율적으로 활용할 수 있도록 개선하였다는 점에서 중요하다. 또한, 폐기물 압축용기의 몰드를 Fig. 7과 같이 320 L, 200 L 드럼용으로 각각 제작하고, 이에 맞춰 피스톤의 압축 헤드 및 하단 지지대의 몰드를 변경할 수 있도록 설계하였다. 이는 기존의 압축 설비들이 200 L 혹은 320 L 드럼 중 하나의 용도로만 사용되었던 점을 개선한 것으로, 압축 용기의 호환성을 높일 수 있도록 기존의 방식에 비해 두드러지는 점이다. 또한, 압축 용기를 기존 방식인 폐드럼을 이용한 압축 방법과 해체폐기물의 직접 압축 후 발생한 폐기물 케이크를 밴딩 장치 체결을 통해 되부풀음 현상을 방지하는 방법 모두 사용 가능하도록 설계하였다. 이를 통해 기존의 압축 설비들이 폐드럼 사용에 비용을 소모하였던 문제점을 개선하였다.

수평 컨베이어 어셈블리는 Fig. 8과 같이 해체폐기물 용기를 운반하는 컨베이어(conveyor), 컨베이어의 높이 조정을 위한 장치인 리프터(lifter), 압축용기 몰드 및 드럼 등을 놓는 몰드(mold) 등으로 구성되어 있다. 컨베이어의 이동은 롤러를 이용하는 방식을 채택하였으며, 리프터는 용기의 압축 시에는 컨베이어를 하강하여, 압축하중을 프레스 어셈블리의 하단 지지대가 받도록 하고, 압축 후에는 높이를 높여 해체폐기물 용기의 수평 방향 이동이 가능하도록 설계하였다. 컨베이어의 제어는 위치센서를 이용하여 반자동으로 제어 가능하도

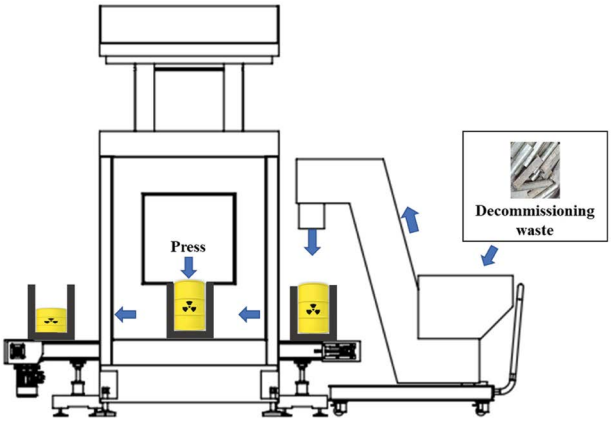

Fig. 9. 2D sketch and components of supercompaction module based on conceptual design.

록 설계하여, 기존의 압축 설비에 비해 작업자의 피폭 위험이 감소하도록 하였다.

Fig. 9는 본 연구에서 설계한 압축 설비의 압축 과정을 요약한 그림이다. 본 연구에서 고안한 압축 설비는 크게 컨베이어 어셈블리, 프레스 어셈블리, 수평 컨베이어 어셈블리로 구성되어 있다. 본 제품의 운영 흐름은 다음과 같다. 먼저, 컨베이어 어셈블리에 투입한 해체폐기물들이 컨베이어를 따라 이동하여, 미리 배치해 둔 해체폐기물 용기 내에 투입된다. 이후, 해체폐기물이 포함된 용기는 수평 컨베이어 어셈블리에 의해 프레스 어셈블리로 이동 후, 압축기를 이용해 해체폐기물의 압축을 진행한다. 프레스 어셈블리에서 압축이 완료되면, 압축이 완료된 해체폐기물 드럼은 수평 컨베이어 어셈블리를 이용하여 프레스 어셈블리 밖으로 옮김으로써 압축 설비를 이용한 해체폐기물의 압축 과정을 마치도록 설계하였다.

결 론

본 개념설계 연구에서는 기존의 압축 설비에 대한 분석을

통해 문제점을 파악하고, 이를 개선한 이동형 압축 설비의 설계를 진행하였다. 설계에 앞서, 기존 압축 설비 분석을 통해 파악한 문제점 중 압축하중, 원격 및 자동화 설계, 밴딩 장치 사용을 통한 페드럼 대체 등을 설계 요건으로 선정하였다. 이후, 압축기의 압축 용량 선정을 위해 5종류의 원전 해체폐기물에 대해 압축 실험을 진행하였으며, 압축 효율 및 압축기의 용도 등을 토대로 1000톤의 압축하중을 본 압축기에 사용할 압축 용량으로 선정하였다. 이를 기준으로 이동식 압축 설비를 크게, 컨베이어 어셈블리, 프레스 어셈블리, 수평 컨베이어 어셈블리로 나누어 개념설계를 진행하였다. 특히, 프레스 어셈블리 및 수평 컨베이어 어셈블리에서 기존 설비 대비 설비 사용 목적에 따른 효율적인 공간 활용, 200 L 및 320 L 드럼용 압축 용기를 2중으로 활용 가능, 밴딩 장치 사용을 통한 페드럼 사용 대체, 원격 및 자동화 설계를 통한 피폭 위험 감소 등을 개선한 설계를 진행하였다.

후속 연구에서는 본 연구에서 다룬 압축식 감용 모듈의 개념설계를 기초로 하여 설계 적절성 및 제작성을 검토할 예정이며, 용융식 감용 모듈과의 결합과 시너지를 분석하여 최종 개발 목표인 다중복합감용설비에서의 종합적 운영모델을 정립하고 상세 설계를 완료할 계획이다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NO 20191510301420).

참 고 문 헌

Abelquist EW, Bower TJ, Gogolak CV, Shebell P and Coleman R. 2002. Radiological Surveys for Controlling Release of Solid Materials, U.S. Nuclear Regulatory Commission Report, NUREG-1761.

Garamszeghy M. 2011. Compaction processes and technology for treatment and conditioning of radioactive waste. pp. 19-42. *In*: Handbook of Advanced Radioactive Waste Conditioning Technologies(Ojovan MI ed.), Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.

Korean radioactive agency (KORAD) 2018. 2018 low and intermediate level radioactive waste management implementation plan, Public disclosure, KORAD.

Korean Radioactive waste Society. 2016. Scenario analysis of decommissioning waste management, Korea Radioactive Waste Agency report, KORAD/TR/2013-24 (2013). quoted in C. Kim, Trend of nuclear power plant decommissioning waste management, KEITI, Konetic report 2016-138.

Larsson H, Anunti A and Edelborg M. 2013. Decommissioning Study of Oskarshamn NPP, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB R-13-04.

Walberg M, Viermann J, Beverungen M, Kemp L and Lindstrom A. 2008. Disposal of Steam Generators from Decommissioning of PWR Nuclear Poiwer Plants, Proc. of International Youth Nuclear Congress 2008, No. 158, Sep. 20-26, Interlaken.

Received: 19 November 2020
Revised: 1 December 2020
Revision accepted: 12 December 2020