

Development of the Pushing Type Cutting Device to Dismantle Concrete Structure for Decommissioning of Nuclear Power Plant

원전해체 시 콘크리트 구조물 절단을 위한 밀기형 절단장치 개발

Bong-Jae Lee*, Yong-Kyu Kwon, Chang-Dong Hong, Dong-Won Lee, and Kyong-Nam Min

Sejong Engineering & Construction Co., Ltd, 4F Reagil Building, 23 Onchunbukro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

이봉재*, 권용규, 홍창동, 이동원, 민경남

(주)세종이엔씨, 대전광역시 온천북로 23 내길빌딩 4층

(Received December 24, 2019 / Revised February 28, 2020 / Approved March 11, 2020)

Pulling-type cutting devices, which use a diamond wire saw, have been used generally for cutting concrete structures. In this study, a pushing-type cutting device with a collection cover was developed by overcoming the disadvantages of pulling-type devices. In this device, dry or liquid methods can be selected to cool frictional heat. Operation and leakage tests of the dust generated during the dismantling of a concrete structure were carried out, confirming the suitable operation of the fabricated cutting device; the leakage rate was approximately 1.7%. For a conservative evaluation, the internal dose of workers was estimated in dismantling the core center part of biological shield concrete with a specific activity of 99.5 Bq·g⁻¹. The committed effective dose per worker was 0.25 mSv. The developed cutting device contributed to reducing radioactive concrete waste and minimizing worker exposure due to its easy installation. Therefore, it can be utilized as a cutting apparatus for dismantling not only reinforced concrete structures but also radioactive biological shield concrete in nuclear power plant decommissioning efforts.

Keywords: Pushing type, Cutting device, Operation, Leakage, Committed effective dose

* Corresponding Author.

Bong-Jae Lee, Sejong Engineering & Construction Co., Ltd, E-mail: bjlee550@naver.com, Tel: +82-42-719-8060

ORCID

Bong-Jae Lee

<http://orcid.org/0000-0002-6865-7629>

Yong-Kyu Kwon

<http://orcid.org/0000-0002-2812-3550>

Chang-Dong Hong

<http://orcid.org/0000-0002-9178-9080>

Dong-Won Lee

<http://orcid.org/0000-0003-2796-6895>

Kyong-Nam Min

<http://orcid.org/0000-0003-4481-5626>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

콘크리트 구조물 절단에 사용되고 있는 다이아몬드 와이어 쏘가 장착된 당김형 절단 장치의 단점을 개선하여 밀기형 절단장치를 개발하였다. 개발된 밀기형 절단장치에는 먼지 집진 커버가 부착되며 마찰열을 냉각하기 위한 건식이나 습식방법을 선택할 수 있다. 개발된 절단장치의 동작특성과 집진 먼지의 누설률 측정을 실험하였다. 시험결과 원활한 동작특성을 보였으며, 먼지의 누설률은 1.7%인 것으로 나타났다. 개발된 절단장비를 사용하여 생물학적 차폐 콘크리트 절단 시 작업자의 내부 피폭선량을 평가하였다. 보수적 평가를 위해 노심 중심부분을 절단하는 경우를 가정하였다. 비방사능이 99.5 Bq·g⁻¹인 누설 먼지로 인해 반면마스크를 착용한 작업자의 예탁유효선량은 0.25 mSv로 평가되었다. 개발된 밀기형 절단장비 사용 시 미량의 먼지 누설률로 인해 작업자의 방사선 피폭이 저감되며, 사용의 편리성으로 세부 절단 계획을 수립할 수 있어 방사성 콘크리트 폐기물 감량에도 기여할 수 있다. 따라서 원전의 방사화된 생물학적 차폐 콘크리트를 비롯하여 철근 콘크리트 구조물 해체 작업 시 절단 장비로서 사용될 수 있을 것이다.

중심단어: 밀기형, 절단장치, 동작특성, 누설률, 예탁유효선량

1. 서론

최근 국내의 미세먼지는 석탄발전소, 화학 플랜트, 도심의 자동차 배기가스 등 전반적인 산업분야에서 발생하고 있으며, 기상상태에 따라 특히 겨울철 중국에서의 유입이 큰 문제로 부각되고 있다. 이러한 미세먼지는 국민건강에 위협을 주고 있으며 큰 사회적 이슈가 되고 있다. 이에 다양한 기술분야에서 미세먼지를 감소시키기 위해 관련 기술개발에 많은 노력을 기울이고 있으며 국민적 관심도 매우 높다. 건설 및 토목분야에서는 도시개발로 인한 건축물, 교량, 교각 등의 콘크리트 구조물이 해체되고 있다. 대형 콘크리트 구조물 절단에 사용되는 절단방법은 다이아몬드 와이어 쏘(Diamond wire saw)를 장착한 당김형(Pulling type) 절단장치가 주로 사용되고 있다. 마찰열을 냉각하기 위해 건식방법을 사용하며 집진커버가 부착되어 있는 당김형 절단장비는 기술적 완성도가 미흡하여 다량의 먼지와 이차 오염 발생의 우려가 높다. 국내 원자력발전소의 해체가 예정되어 있는 원전 부지 내 콘크리트 구조물과 생물학적 차폐 콘크리트 해체 시에도 사용될 것으로 예상된다. 원전에서 사용되고 있는 콘크리트 구조물은 방사성물질의 사용으로 내부에는 방사성물질로 오염되어 있으며, 생물학적 차폐 콘크리트는 방사화되어 방사성물질을 함유하고 있다. 콘크리트 구조물의 절단 작업 시 기존의 당김형 절단장비를 사용할 경우 방사성물질을 함유하고 있는 많은 콘크리트 먼지가 발생되어 작업자의 방사선 피폭과 주변 환경이 오염될 것으로 예상되므로 먼지 발생률을

최소화하는 방안을 수립하여야 할 것이다. 본 연구에서는 원전 부지 내 콘크리트 구조물과 건축물, 교량 등의 일반 콘크리트 구조물의 해체 및 철거 작업 시 현재 사용되고 있는 당김형 절단장치의 단점을 개선하여 다이아몬드 와이어 쏘의 내구성을 향상시키며, 누설되는 먼지를 최소화하여 작업자와 주변 주민의 안전이 확보된 밀기형(Pushing type) 콘크리트 구조물 자동 절단 장치를 국내 최초로 설계·제작하고자 한다. 절단방법에 따라 마찰열을 냉각하기 위한 건식이나 습식방법을 선택할 수 있고, 먼지의 대부분은 집진커버에 집진되어 별도의 다른 용기로 수집되며, 유압공급장치를 사용하여 집진커버를 절단면에 밀착시켜 미량의 먼지만 작업장 내부로 누출되도록 제작한다. 제작된 절단장치의 동작특성과 발생 먼지의 누설률을 실험한다. 제작된 장비를 사용할 때 작업자가 누설되는 먼지를 흡입하였을 경우 예탁유효선량을 평가하여 개발된 절단장비의 안전성을 확인한다.

2. 다이아몬드 와이어 쏘를 이용한 절단공법

콘크리트 구조물을 철거하는 방법에는 Hammering, Spalling, Drilling, Explosive 및 HP Water jet가 있으나 진동, 분진 및 오염수가 다량 발생하는 단점이 있어 최근 거의 사용하지 않는다. Saw의 사용을 기반으로 다이아몬드 와이어 쏘(Diamond wire saw), Diamond wheel saw나 Chain saw를 이용한 절단장비가 사용되고 있다. Diamond wheel

Table 1. Characteristic comparison of pulling type and pushing type

Items	Cutting device	Pulling type	Pushing type
Cutting method		Pulling	Pushing
Concrete to be dismantle		Concrete structure on ground	Concrete structure on ground and under ground
Power supplier		Active type	Active type or Excavator
Cooling method		Dry or wet	Dry and wet
Adhesion of collection cover		Fixed type	Oil pressure or fixed type
Boring machine		Not used	Used
Leakage rate of dust		Relatively high	Relatively low
Exposure dose		Relatively high	Relatively low

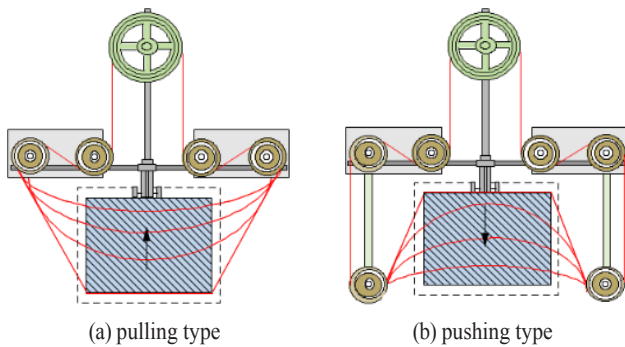


Fig. 1. Cutting methods using the diamond wire saw in removing the concrete structure.

saw와 Chain saw를 장착한 절단장비는 Saw의 회전력으로 포장도로, 교각 및 교량 등과 같은 콘크리트 구조물의 수평면에 설치하여 절단하는 방법이다. 반면 다이아몬드 와이어 쏘를 장착한 절단장비는 콘크리트 절단면에 수평, 수직 및 경사면 등 절단면에 설치하여 사용할 수 있는 장점을 갖고 있어 건축물, 교량과 교각 등의 대형 콘크리트 구조물 절단에 널리 사용되고 있는 절단방법이다. 다이아몬드 와이어 쏘를 이용한 절단방법에는 당김형과 밀기형이 있으며 구동장치로는 자주식 장치나 포크레인의 동력을 사용한다. 당김형은 절단면 후면에 다이아몬드 와이어 쏘를 걸고 전방으로 당기면서 절단하는 방법으로 현재 대형 콘크리트 구조물 절단 작업에 많이 사용하고 있는 방법이다. 밀기형은 절단면 전면에서 다이아몬드 와이어 쏘를 걸어 후방으로 밀면서 전진하는

절단방법이다. Fig. 1은 당김형과 밀기형의 구조를 보여주고 있다. 절단장비는 마찰열을 냉각하기 위하여 건식이나 습식으로 사용될 수 있다. 습식방법은 물, 오일이나 액체질소 등의 유체를 주입시키는 방법으로서 일반적으로 다량의 물을 사용하여 발생된 이차폐기물에 의해 주변 환경이 오염되므로 최근에는 사용이 제한되고 있어 공기나 냉각기체를 불어 넣어 주는 건식방법을 사용하고 있다.

국내외에서 사용하고 있는 절단방법에는 절단속도가 빠르다는 장점이 있는 당김형 절단장비가 주로 사용되고 있다. 당김형은 다이아몬드 와이어 쏘와 절단면에서 발생하는 먼지발생을 최소화하기 위하여 집진커버를 설치하여 사용한다. 그러나 집진커버를 절단면에 고정식으로 사용하므로 진동의 영향으로 밀착성이 저하되어 접촉면 틈새로 먼지의 누설률이 많아지며, 집진커버내에서 회전하고 있는 다이아몬드 와이어 쏘는 마찰열에 의해 내구성이 약화되어 자주 내부에서 험착(jamming)이나 파단(cutting)이 발생하고 작업이 중단되어 공사 지연 등의 문제점이 발생한다. 당김형은 다이아몬드 와이어 쏘를 절단면의 후면에 걸어야 하기 때문에 원전의 방사화 콘크리트의 절단면이나 방사성물질이 오염된 콘크리트의 절단면에 작업자가 접근하게 되므로 방사선피폭을 수반한다. 따라서 당김형은 위험물질을 함유하고 있는 콘크리트 구조물 절단에 사용될 수 없다. 밀기형은 터널 굴착하거나 지하에 매설된 콘크리트 구조물을 절단하기 위하여 주로 사용되는 절단방법이다. 밀기형은 전진형 방식이므로 작업자가 위험물질이 있는 절단면 후면에 접근할 필요가

Table 2. Comparison of mechanical performance for cutting device

Items	Cutting device	Pulling type	Pushing type
Water consumption		300 ~ 1,000 cm ³ /hr	30 ~ 50 cm ³ /hr
Cutting speed		14.8 min/m ²	13.5 min/ m ²
Dust leakage rate		Less than 10%	Less than 2%
Average usages of a diamond wire saw		4 cuttings	10 cuttings

Table 3. Activity of biological shield concrete of Kori unit 1

Structure	Weight (kg)	Activity (Bq)	Specific activity (Bq·g ⁻¹)	Classification
Core center part	63,920	6.36 × 10 ⁹	99.5	LLW
Other part	506,080	1.58 × 10 ⁹	3.12	VLLW
Total	570,000	7.94 × 10 ⁹	13.9	

없으므로 안전성이 확보되며, 절단면의 여러 방향으로 설치 가능하다. 그러나 밀기형은 절단속도가 느리며 원통형 구조물을 절단하는데 적용할 수 없으며, 밀기형은 천공장치를 부착할 수 있으나 당김형은 별도의 천공장치를 사용한다. Table 1은 밀기형과 당김형의 특성을 나타낸 것이다. Table 2의 기계적 성능을 살펴보면 물을 이용하는 습식방식인 경우 물의 사용량은 밀기형이 월등히 적은 반면에 절단속도는 당김형이 빠르다. 먼지의 누설률은 밀기형이 적으며, 내구성 약화로 인해 다이아몬드 와이어 쏘의 파단되는 횟수도 당김형은 다이아몬드 와이어 쏘를 4번 사용할 경우 1회 정도이나 밀기형은 10회 사용 후 1회 정도인 것으로 알려져 있다.

3. 생물학적 차폐 콘크리트의 방사화

3.1 주요 핵종

콘크리트는 건축 구조물의 재료로서 일반적 산업분야에서 뿐만 아니라 원자력분야의 콘크리트 구조물 설치에 널리 사용되고 있다. 원자력분야에서 일반적으로 콘크리트 구조물 내부에서 방사성물질 사용된 경우 내벽면에 방사성 오염이 발생하게 되며, 원자로 차폐체로 사용되었던 생물학적

차폐 콘크리트는 중성자에 의해 방사화되기 때문에 원자력 시설의 해체 시 주요한 방사성폐기물로 분류된다. IAEA 자료에 의하면 1,000 MW급 경수로 원전 1기를 해체할 경우 토양 폐기물을 제외한 방사성폐기물 총량은 6,200톤이 발생하는 것으로 보고하고 있다. 이중 방사화 콘크리트는 300톤, 방사성 오염 콘크리트는 600톤으로 방사성 콘크리트 폐기물이 총 900톤이 발생하는 것으로 예측하고 있다. 이는 200리터 드럼으로 환산하면 약 5,000드럼 이상일 것으로 추정된다. 고리 1호기의 해체 시 발생할 것으로 예측되는 방사성 콘크리트의 물량을 추산하기 위하여 국내 연구자들은 미국 로스알라모스 국립연구소(Los Alamos National Laboratory)에서 개발한 MCNP 전산코드로 중성자속을 계산하고, 영국 원자력공사(UKAEA, United Kingdom Atomic Energy Authority)에서 개발한 FISPACT 코드나 오크리지 국립연구소(Oak Ridge National Laboratory)에서 개발한 ORIGEN 코드를 이용하여 생물학적 콘크리트 차폐체에 불순물이 포함된 경우와 되지 않은 경우 생성되는 방사화 핵종과 방사능량을 평가하는 다양한 연구가 수행되고 있다[1-4]. 고리 1호기 해체 작업이 다가옴에 따라 전산코드에 의한 고리 1호기 생물학적 차폐 콘크리트의 방사화 핵종 평가에 대한 최근 연구 결과에 의하면 콘크리트에 존재하는 불순물이 방사화된 ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu, ¹⁵⁴Eu, ³H, ¹⁴C가 주요 핵종일 것으로 발표하였다. 더불어 실제 원전

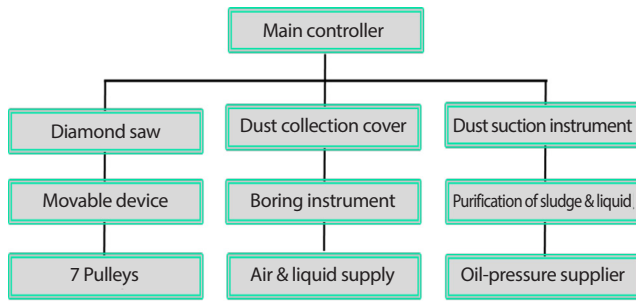


Fig. 2. Configuration of modules of pushing type cutting device.

해체 작업을 수행하기 전에 고리 1호기와 같은 원전에서는 핵연료 손상의 이력을 조사하여 누출될 수 있는 ¹³⁷Cs 핵종도 고려해야 할 것이다. 또한 생물학적 차폐 콘크리트에서 시료를 채취하여 방사능과 핵종을 분석하여 방사화된 부분과 되지 않은 부분을 명확히 구분할 필요가 있다.

3.2 비방사능

고리 1호기의 생물학적 차폐 콘크리트는 직사각형 모형을 갖는 상측 부분과 원통모형을 갖는 하측 부분으로 나눌 수 있다. 콘크리트의 밀도는 2.24 g·cm⁻³이며, 총 무게는 2,100 톤으로 알려져 있다. 최근 문헌에서 고리 1 발전소의 운전 정지 후 10년간의 냉각시간이 지난 후 생물학적 차폐 콘크리트의 방사능량을 계산하였다. 중성자에 의해 방사화된 영역은 노심 부분을 기준으로 노심 중심부분과 기타 다른 부분으로 나누고, 방사화 부분의 크기는 노심의 중앙을 기준으로 높이, 길이와 두께가 1 m인 것으로 가정하였다. 방사화 영역의 총 무게는 570톤으로 노심 중앙부분의 무게는 약 64톤, 기타 다른 부분의 무게는 약 506톤인 것으로 가정하였다. MCNP 6과 ORIGEN 코드를 이용하여 계산한 결과 각 부분의 방사능량은 6.36×10⁹ Bq과 1.58×10⁹ Bq로 계산된 것으로 발표하였다[5]. 각 부분의 방사화 부분을 비방사능으로 환산하면 99.5 Bq·g⁻¹과 3.12 Bq·g⁻¹이 된다. 국내 규정인 원자력안전위원회 고시 2017-65호에 의하면 ⁶⁰Co의 자체처분허용농도는 0.1 Bq·g⁻¹이하로 규정하고 있다[6]. 이 기준에 의하면 저준위 방사성폐기물은 자체처분허용농도의 100배인 10 Bq·g⁻¹이상이고, 자체처분허용농도의 100배미만이면 자체처분허용농도 이상인 방사성물질은 극저준위 방사성폐기물로 분류하고 있다. 따라서 노심 중심부분은 저준위

방사성폐기물로 분류되며, 기타 부분은 극저준위 방사성폐기물로 분류된다. Table 3은 평가된 비방사능과 방사성폐기물의 분류를 나타낸 것이다.

4. 절단장치의 구성

4.1 장치의 구성

절단장비의 작동방식에서 당김형 방식에 비해 안전성이 우수한 밀기형으로 설계하였다. Fig. 2는 설계된 밀기형 절단장치의 모듈 구성을 보여준다. 설계된 밀기형 절단장치는 제어부를 중심으로 폴리부, 집진장치와 외부장치로 구성하였다.

운전자는 제어부를 통해 건식이나 습식방법을 선택할 수 있다. 습식방법을 사용할 경우 공급되는 유체량 조절이 가능하며, 오일압력과 정화장치 조절 등 절단장비의 전반적인 동작특성을 제어할 수 있다. 폴리부에는 다이아몬드 와이어 쏘의 장력을 유지하고 회전모멘트를 제공하는 7개의 폴리가 장착되고, 절단 구조물에 따른 폴리 위치 조절용 이동장치가 설치되었다. 집진장치부에는 절단 시 발생한 먼지를 집진하는 집진커버와 집진된 먼지는 배출구를 통하여 외부의 흡입장치에 의해 자동으로 별도 수집 용기로 이동된다. 집진커버 상부에는 천공장치가 장착되었으며, 건식이나 습식 방법으로 사용하기 위하여 공기 또는 유체를 공급할 수 있는 인입장치도 설치되었다. 외부장치로는 집진커버 내부에 축적되는 먼지를 흡입하여 수집하는 흡입장치, 유체 공급과 슬러지 정화를 위한 냉각액체 탱크 및 정화장치와 집진커버를 절단면에 밀착상태를 유지시키는 유압공급장치로 구성되었다.

4.2 외부모형

절단장치의 다이아몬드 와이어 쏘는 콘크리트 구조물의 절단면을 앞면에서 뒷면 방향으로 감싸고 깊이 방향으로 전진하도록 밀기형 절단장치로 설계하였다. 운전자는 콘크리트의 구조와 절단 조건에 따라 절단 동작이 건식이나 습식방법을 결정하여 작업을 수행할 수 있다. 설계된 밀기형 절단장치의 구조를 Fig. 3에 나타내었다. 이동장치에 설치된 폴리부의 1차 폴리의 설치 위치는 절단면에 만들어진 두 개의 천공

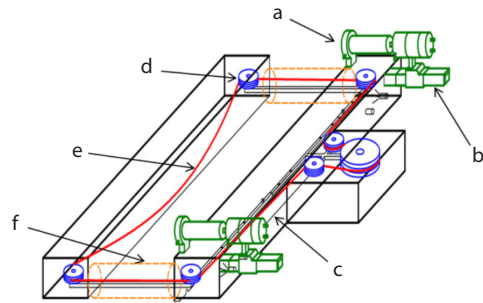


Fig. 3. External shape of the designed equipment (a: boring instrument, b: oil pressure hole, c: isolation cover, d: pulley, e: diamond wire saw, f: hole).

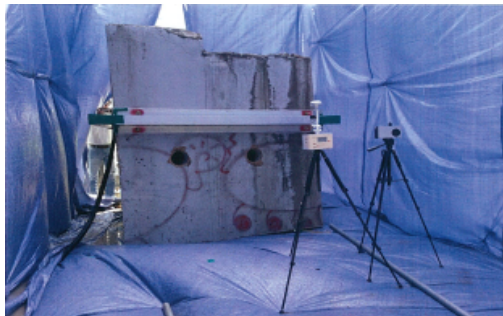


(a) whole cutting system excepting external part

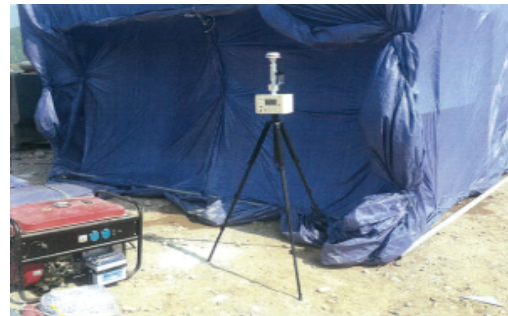


(b) 7 pulleys part

Fig. 4. The fabricated device installed on the concrete.



(a) internal position



(b) external position

Fig. 5. Inside and outside position of air samplers.

깊이에 따라 조절될 수 있다. 1차 풀리와 2차 풀리는 다이아몬드 와이어 쏜의 장력을 조절해 주며, 두 개의 생성된 천공의 폭에 따라 좌우로 이동될 수 있다. 3차 풀리는 자주식 전원공급 장치로부터 다이아몬드 와이어 쏜에 회전력을 전달하며, 절단조건에 따라 상하로 이동이 가능하다. 다이아몬드 와이어 쏜은 생물학적 차폐 콘크리트의 절단면의 앞면을 들

러싸고 후방으로 전진한다. 집진장치부는 발생된 먼지나 슬러지의 외부 방출을 최소화하는 기능을 갖고 있으며 배출장치가 설치되어 있다.

집진장치부의 공기 및 유체 인입장치를 통하여 절단작업 동안 발생한 마찰열을 냉각하기 위한 공기나 여러 종류의 냉각 유체가 주입될 수 있다. 집진커버 위에 설치된 천공장치는

절단될 콘크리트 내부에 1차 폴리과 다이아몬드 와이어 쏘를 삽입하기 위한 천공을 만든다. 제작된 장비의 동작특성과 먼지의 누설률을 확인하기 위한 실험을 수행하므로 외부장치 부분의 구체적인 내용을 표시하지 않았다. 집진커버 내에 집진된 먼지는 외부장치 부분의 흡입장치를 통해 외부 저장용기에 수집된다. 수집된 먼지는 자동적으로 방사성폐기물 드럼이나 다른 저장용기에 수집되며, 수집된 폐기물의 종류에 따라 방사성폐기물이나 일반 산업폐기물로 처리될 것이다. 사용된 액체내의 슬러지는 정수기를 통해 정화되며, 정화된 액체는 재사용을 위해 냉각액체탱크로 보내지고 재순환된다. 일반 콘크리트 구조물의 절단면이나 생물학적 차폐 콘크리트의 절단면에 구멍을 만드는 천공장치와 집진커버 밀착용 유압공급용 인입장치는 집진커버 부분에 설치하였다.

5. 동작 특성과 먼지 집진 시험

5.1 제작된 장치의 동작 특성

제작된 밀기형 절단장비의 집진커버와 폴리 부분을 Fig. 4와 같이 콘크리트 벽표면에 설치하였다. 두 개의 1차 폴리는 천공장치로 만들어진 구멍으로 삽입되었다. 자주식 회전 장치를 사용하여 다이아몬드 와이어 쏘에 회전력을 주고 장치의 동작상태를 확인하는 실험을 수행하였으나 장비의 절단속도는 측정하지 않았다. 실험 결과 절단장비의 다이아몬드 와이어 쏘가 협착되거나 파단되지 않고 콘크리트 구조물을 절단하는 동작이 원활하게 작동되고 있음을 확인하였다.

5.2 먼지 누설시험

집진커버 내부에 집진된 먼지의 누설률을 실험하기 위하여 텐트를 이용하여 가로, 세로, 높이가 각각 4m × 6m × 5m의 실험공간을 구성하였다. 공기 시료채취기의 설치와 먼지 시료의 채취는 관련 전문 업체에 의뢰하여 수행하였다. 누설되는 먼지의 시료를 채취하기 위하여 실험 공간의 내부 위치와 외부 위치에 시료채집 필터가 장착된 공기시료채취기를 1대씩 설치하였다. Fig. 5는 공기시료채취기의 설치 장소를 보여주고 있다.

Table 4. The analysis results of dust samples

Conditions	Results($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)		Measuring time (h:m)	Analysis method
	Inside	Outside		
With cover	75.4	28.1	13:30	Weighting
Without cover	4,422.1	114.8	~ 16:00	

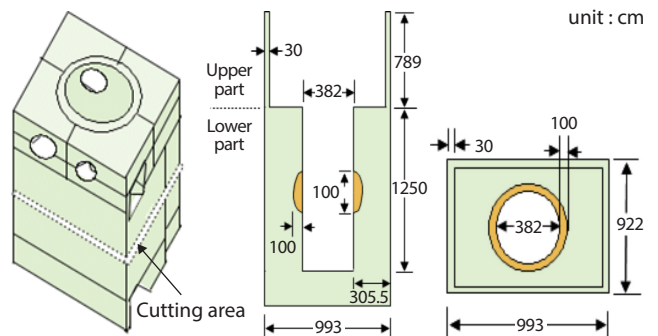


Fig. 6. Dimension and structure of the activation of Kori unit 1 bio-shield.

누설률 측정은 공기시료채집기 가동 전·후의 시료채집필터 무게를 측정하는 방법을 적용하였다. 측정 결과 Table 4에서 보여 주는 바와 같이 내부로 방출되는 먼지의 누설률은 약 1.7%정도이며, 집진커버에 수집된 98% 이상의 먼지는 외부장치부의 흡입장치에 의해 외부에 설치된 수집장치로 이동되었다.

6. 내부피폭선량 평가

6.1 평가 조건

개발된 밀기형 절단장비를 사용하여 작업자가 생물학적 차폐 콘크리트를 절단하는 작업을 수행할 때 집진커버에서 누설되는 먼지를 호흡기를 통해 흡입하였을 경우 작업자의 에탁유효선량을 평가하기 위하여 가장 보수적인 작업 조건인 코어의 중심부분을 절단하는 경우를 가정하였다. Fig. 6은 고리 1호기 생물학적 차폐 콘크리트의 모형을 보여주고 있다[7-9]. 콘크리트의 밀도는 $2.24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 이고, 다이아몬드 와이어 쏘의 직경은 1 cm이다. 콘크리트의 절단 면적이

611 cm × 540 cm라고 가정하면 노심의 중앙부분을 절단할 경우 콘크리트의 절단으로 생성되는 총 절단량은 739 kg이 된다. 제작된 절단장치의 누설률이 2%라고 가정하면 작업공간에 누설되는 먼지의 양은 14.78 kg이 된다.

6.2 예탁유효선량 평가

고리 1호기의 방사화된 생물학적 차폐 콘크리트 절단 작업 시 작업자가 제작된 밀기형 절단장치를 사용할 경우 간접 측정 방법인 공기중 방사성 핵종 농도에 의한 예탁유효선량 평가 방법을 적용하여 작업자의 내부피폭선량을 계산하였다 [10]. 해체 철거 작업 시 주요 핵종으로 평가되었던 ⁶⁰Co은 비교적 5년의 긴 반감기를 갖는 핵종으로서 작업자에게 가장 많은 방사선피폭을 줄 수 있을 것으로 예측되어 평가 핵종으로 선정하였다. 예탁유효선량을 평가하기 위하여 ICRP-68에서 제공하는 주요 방사성핵종(5 μm, AMAD)인 ⁶⁰Co 1 Bq 섭취 시 예탁유효선량 환산계수는 7.1×10^{-9} Sv/Bq이다[11]. 작업자는 반면마스크를 착용하고 작업공간 25 m³에서 근무 시간 8시간 중 5시간 절단작업에 종사하는 것으로 가정하였다. 또한 제작된 장비를 사용하여 생물학적 차폐 콘크리트 절단 작업 시 작업공간으로 누설되는 먼지는 작업공간에 균일하게 퍼지는 조건으로 가정하였다. 이러한 조건 하에서 노심 중심부분을 절단하는 작업 중에는 작업장의 공기중 방사능농도는 5.88×10^4 Bq·m⁻³이며, 다른 부분을 절단하는 경우에는 7.08×10^3 Bq·m⁻³으로 계산된다. 평가된 공기중 방사능농도에서 작업자가 호흡으로 흡입하는 방사능량은 식(1)로 계산된다.

$$I = C \times H \times R/P \quad (1)$$

여기서 C는 공기의 농도(Bq·m⁻³), H는 작업시간(h), R은 작업자의 시간당 호흡률(1.2 m³·h⁻¹), P는 반면마스크의 방호계수(10)이다[12].

노심 중심부분을 절단하는 경우 작업자가 호흡한 방사능량은 3.53×10^4 Bq이며, 다른 부분을 절단한 경우에는 4.68×10^3 Bq이 된다. 작업자가 호흡으로 흡입한 방사능에 의한 예탁유효선량은 식(2)에 의해서 계산된다.

$$E_{50} = I \times e_{50}^{inh} \quad (2)$$

여기서 E₅₀은 50년 동안의 예탁유효선량(Sv), I는 흡입량(Bq), e₅₀^{inh}는 예탁유효선량 환산계수이다. 예탁유효선량을 계산한 결과 노심 중심부분을 절단하는 경우 0.25 mSv이며, 다른 부분을 절단하는 경우에는 0.033 mSv로 평가되었다. 본 연구에서는 가장 보수적인 상황을 가정하여 평가한 결과이다. 실제로는 발생할 수 없는 사건으로 생각된다. 고리 1호기의 생물학적 차폐 콘크리트는 절단작업 이전에는 전산코드를 이용하여 방사화 핵종과 비방사능이 사전에 평가되고, 실제로 측정되기 때문에 방사화되지 않은 부분과 방사화된 부분을 정확히 구분하여 계획적으로 절단작업을 수행할 수 있다. 그러므로 작업자의 내부피폭을 보수적으로 계산 결과보다 훨씬 낮은 것으로 예측할 수 있다. 개발된 밀기형 절단장비의 사용의 편리성으로 인하여 절단면의 수평, 수직 경사면에 설치하기 용이하므로 고리 1호기의 즉시 해체를 가정하였을 때 평가된 방사성 콘크리트 폐기물량인 약 1,600톤 이하로 감소시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있다[13].

7. 결론

제작된 밀기형 절단장비의 동작 특성을 실험한 결과 양호한 성능을 보였으며, 집진커버에 집진된 먼지의 누설률도 1.7%로 매우 낮은 측정치를 보였다. 개발된 밀기형 절단장비를 사용함으로써 생물학적 차폐 콘크리트의 방사화 부분에 접근할 필요가 없어 작업자의 내부피폭이 최소화된다. 개발된 밀기형 절단장치는 사용이 편리하여 절단될 콘크리트의 수평면, 수직면과 경사면에 쉽게 설치할 수 있어 방사화된 부분을 선택적으로 절단할 수 있으므로 상세한 절단계획 수립이 가능하므로 방사성 콘크리트 폐기물 감량에 크게 기여할 수 있다. 따라서 고리 1 발전소의 생물학적 차폐 콘크리트의 절단 작업에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 세계 원전 해체 시장에서 콘크리트 구조물을 해체할 수 있는 절단장치로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] Los Alamos National Laboratory (LANL), "MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transport code,

- Version 5", LA-CP-03-0245, US (2003).
- [2] R.A. Forrest, "European Activation System:EASY-2007", European Atomic Energy Community (EURATOM) & United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA), UKAEA-FUS-533, UK (2007).
- [3] I.C. Gauld, O.W. Hermann, and R.W. Westfall, ORIGEN-S: SCALE System Module to Calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Buildup and Decay, and Associated Radiation Source Terms, ORNL/TM-2005/39, Ver.6 Vol. II Sect. F7, Oak Ridge National Laboratory (2013).
- [4] G.Y. Cha, S.Y. Kim, J.M. Lee, and Y.S. Kim, "The Effects of Impurity Composition and Concentration in Reactor Structure Material on Neutron Activation Inventory in Pressurized Water Reactor", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 14(2), 91-100 (2016).
- [5] J.Y. Yoon and Y.H. Hwang, "Study on Activation Evaluation of Kori unit 1 Bioshield Concrete", *Proc. of the KRS 2019 Spring Conference*, 17(1), 259-260, May 8-10, 2019, Pusan.
- [6] KOREA Nuclear Safety and Security Commission, "regulation Concerning the disposal of Radioactive Waste Classification and its own Criteria", Notification 2017-65 of KOREA Nuclear Safety and Security Commission (2017).
- [7] C.S. Cheon and C.L. Kim, "The Dismantling and Disposal Strategy of a Biological Shield for Minimization of Radioactive Concrete Waste During Decommissioning of a Nuclear Power Plant", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 15(4), 355-367 (2017).
- [8] K.S. Park, H.S. Im, H.D. Sohn, and J.Y. Yoon, "A Study for Dismantling Method of Bio-shield in Kori Unit 1 Nuclear Power Plant", *Proc. of the KRS 2019 Spring Conference*, 17(1), 261-262, May 8-10, 2019, Pusan.
- [9] G.H. Kim, T.H. Kim, B.S. Choi, K.S. Jeong, D.H. Hyun, and J.K. Moon, "Radiological Assessment of the Dose Distribution Around Reactor Pressure Vessel", *Asian J. Chem.*, 25(12), 7047-7050 (2013).
- [10] Korea Atomic Energy Research Institute, "Internal Dosimetry Procedures", RSC-Internal Exposure (2015).
- [11] International Commission on Radiological Protection, "Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers", ICRP Publication 68, *Ann. ICRP* 24(4) (1994).
- [12] Thomas E. Johnson, *Introduction to Health Physics*, 4th ed. 615, McGraw-Hill Medical Publishing Press, New York (2017).
- [13] B.S. Lee, "Management of Decommissioning Waste from Nuclear Power Plant", 2015 Autumn Workshop of Korean Radioactive Waste Society (Workshop for Current Status and Prospect of Technology Development of NPP Decommissioning), Pusan, Korea (2015).