

원자로 해체를 위한 수중 아크 금속 절단기술에 대한 연구

김찬규*, 문도영**, 문일우**, 조영태***, #

*한국재료연구원 재료안전평가본부 접합기술연구실, **한토크팅시스템(주),

***창원대학교 메카트로닉스대학 기계공학부

A Study on Contact Arc Metal Cutting for Dismantling of Reactor Pressure Vessel

Chan Kyu Kim*, Do Yeong Moon**, Il Woo Moon**, Young Tae Cho***, #

*Department of Joining Technology, Materials testing&Reliability Division, Korea Institute of Materials Science, **HANTO CUTTING SYSTEM.,

***Department of Mechanical Engineering, Changwon National Univ.

(Received 28 July 2021; received in revised form 5 August 2021; accepted 12 September 2021)

ABSTRACT

In accordance with the growing trend of decommissioning nuclear facilities, research on the cutting process is actively proceeding worldwide. In general, a thermal cutting process, such as plasma cutting is applied to decommissioning a nuclear reactor pressure vessel (RPV). Plasma cutting has the advantage of removing the radioactive materials and being able to cut thick materials. However, when operating under water, the molten metal remains in the cut plane and re-solidifies. Hence, cutting is not entirely accomplished. For these environmental reasons, it is difficult to cut thick metal. The contact arc metal cutting (CAMC) process can be used to cut thick metal under water. CAMC is a process that cuts metal using a plate-shaped electrode based on a high-current arc plasma heat source. During the cutting process, high-pressure water is sprayed from the electrode to remove the molten metal, known as rinsing. As the CAMC is conducted without using a shielding gas, such as Argon, the electrode is consumed during the process. In this study, CAMC is introduced as a method for dismantling nuclear vessels and the relationship between the metal removal and electrode consumption is investigated according to the cutting conditions.

Keywords : Nuclear Reactor Dismantlement(원자로 압력용기 해체), Contact Arc Metal Cutting(수중 아크 금속 절단), Under Water Cutting(수중 절단), Electrode Consumption(전극 소모), Materials Removal(모재 제거)

1. 서 론

전 세계 가동중인 438개의 원자력 발전소 중 사

용 연수가 30년 이상인 원전의 수가 22개로 전체의 약 51%에 육박하고 있으며, 노후 원전에 대한 원전 해체 시장의 규모는 2110년까지 약 368조원의 규모로 성장할 것으로 예측된다. 원전 해체의 주요 공정은 부지 복원, 폐기물 처리 및 관리, 절단 및 해체, 제염, 밀폐관리, 해체 준비 등으로 단계가 분류

Corresponding Author : ytcho@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3608, Fax: +8255-213-3600

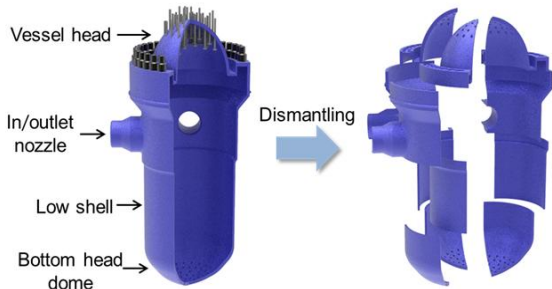


Fig. 1 Schematic diagram for Reactor Pressure Vessel (RPV) dismantling

되어있으며 특히, 원전 해체의 핵심 공정인 절단 및 해체 분야는 글로벌 시장에서 세 번째의 규모를 가지며 큰 주목을 받고 있다^[1].

Fig. 1은 원자로 압력 용기인 RPV(Reactor Pressure Vessel)를 나타낸것으로써 두께 200~300mm의 금속을 수중에서 원격으로 절단해야한다. 금속 절단에 대한 다양한 기술이 연구되고 있으나 원전 해체 분야와 같이 수중에서 방사화된 금속을 절단 해야하는 환경, 작업자의 피폭을 최소화할 수 있는 조건 등을 고려하여 지속적인 연구 개발이 요구되고 있다^[2-5].

절단 기술은 크게 밀링(Milling)과 쏘우(Saw)와 같은 기계적 절단, 레이저(Laser)를 이용한 고 에너지 절단 그리고 플라즈마(Plasma)와 플레임(Flame)을 이용한 열적 절단으로 구분할 수 있다. 원전 해체는 절단된 금속을 폐기하는 것이 목적이므로, 절단된 금속의 품질보다 절단 속도가 우수하며 수중에서 공정을 수행할 수 있는 열적 절단 기술이 주목받고 있다^[6-9].

원자로 해체에서 사용되는 대표적인 공정으로 Contact Arc Metal-X(CAM-X)이 있다. 심볼 X는 사용하는 해체 기술에 따라 기계적 절단 공정인 그라인딩(Grinding), 드릴링(Drilling)과 열적 절단 공정인 커팅(Cutting)으로 구분되며 Fig. 2는 그라인딩과 드릴링에 대한 개념도를 나타낸 것이다. 장치의 구성이 간단하며 절단 효율이 우수한 장점이 있으나 두께가 200~300mm인 모재를 절단을 하기 위해서는 장치의 크기가 커져야하며 이로 인해 구조물과의 간섭 또는 진동으로 인한 결함 등이 우려된다. 반면 아크 플라즈마를 발생시켜 절단을 수행하는 CAMC 공정은 단순한 설계와 우수한 절삭 속도, 재료의

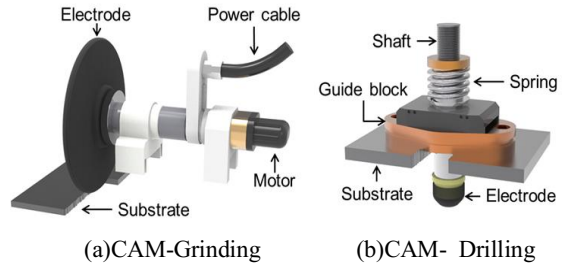


Fig. 2 Schematic diagram for (a) Contact Arc Metal Grinding(CAMG) and (b) Contact Arc Metal Drilling(CAMD)

크기에 제한이 없고 두께가 다양한 복잡한 형상을 한 번에 통으로 절단 가능하며 반력이 작용하지 않는다. 또한 수중 절단의 어려움인 물의 난기류, 점성 저항, 빛의 산란, 기포 등에 영향을 받지 않으며 수심에 제한이 없다^[10-12].

CAMC 은 금속, 흑연 등을 전극으로 사용하여 모재와의 아크 플라즈마를 발생시켜 금속 모재를 절단하게 된다. 전극의 양쪽으로는 린싱(Rinsing)을 사용하여 고압의 물을 분사하여 전극을 냉각함과 동시에 절단면에 용융된 금속을 외부로 배출하게 한다. 하지만 수중에서 보호 가스를 사용할 수 없는 공정으로 아크 플라즈마 발생과 함께 전극이 지속적으로 소모되는 단점이 있다^[13-14].

본 논문에서는 원전 해체 기술로 주목받고 있는 기술인 CAMC 공정에 대해 시스템을 구축하고 절단 조건에 따른 전극 소모량과 모재 제거량을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장비

원자로 용기 해체를 위한 CAMC 시스템을 Fig. 3 과 같이 나타내었다. Fig. 3(a)는 큰 수조로 구성된 CAMC의 전체적인 모습이다. Fig. 3(b)는 CAMC 시스템의 개념도를 나타낸 것으로써 이송장치, 수조, 파워 소스, 펌프, 모재 그리고 전극으로 구성되어있다. 이송장치는 부착된 전극이 상, 하, 좌, 우로 움직일 수 있도록 설계되었다. CAMC 절단에 사용되는 파워 소스는 월드웰社の 1000TC2이며 최대 전압 50V, 출력 전류는 1,000A이다. 펌프는 일로펌프社의 MVI-205 모델을 사용하여 최대 1.2m/s의 유속

으로 워터젯(Water jet)을 분사한다. 모재는 원자로 압력용기의 재질과 동일한 SUS304 120x250x60mm이다. 사용된 전극의 재질은 탄소섬유 강화 흑연 (Carbon Fiber Reinforced Graphite)이며 사이즈는 400x100x5mm이다. Fig. 3(c)는 모재를 절단하기 전 CAMC 공정의 모습을 나타낸 것이다. 아크 플라즈마가 발생되면 전극은 모재와 수직인 방향으로 움직이며 절단이 이루어진다. Fig. 3(d)는 CAMC 공정 시 전극과 모재간의 절단이 진행되는 개념도를 나타낸 것이다. CAMC 절단 헤드는 모재를 절단하기 위한 전극, 절단면의 용융된 금속과 폐기물을 제거하는 린싱 노즐 그리고 파워 소스 케이블로 구성되어 있다. 전극이 수직으로 하강하여 모재와 일정한 간격이 되면, 모재와 전극간에 아크 플라즈마가 발생하여 절단이 이루어진다. 절단 시 발생하는 모재의 용융 금속은 전극의 양면의 린싱 노즐에서 분사되는 워터젯으로 인해 절단 틈에 쌓이지 않고 외부로 배출됨으로써 지속적인 작업을 가능하게 한다.

2.2 실험 방법

CAMC 공정에서 절단에 영향을 미치는 인자는 전압, 절단속도, 린싱의 유속, 수조 크기, 물의 탁도, 전극과 모재간의 거리, 전극의 형상, 절단 각도 등 다양한 인자가 있으나, 본 논문에서는 Table 1과

같이 절단에 가장 큰 영향을 미치는 전압, 절단 속도, 린싱의 유속을 선정하였다. 안정적인 아크 플라즈마가 발생하는 최소 전압 45V를 기준으로 최대 전압인 50V까지 2 수준으로 선정하였으며, 절단 속도는 15, 20, 25mm/min의 3 수준으로 진행하였다. 린싱의 유속은 사용하는 펌프의 최대 유속인 1.2m/s로 선정하였다. Fig. 4는 CAMC 공정 후 전극 소모량 및 모재 제거량을 측정하는 방법을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 CAMC의 전극을 나타낸 사진이다.

Fig. 4(b)의 전자 저울을 통해 절단 전과 절단 후의 무게를 측정하여 소모량을 확인하였다. Fig. 4(c)는 절단된 모재를 나타낸 것이며, Fig. 4(d)의 매스 실린더(Mass cylinder)를 이용하여 모재 제거량을 부피단위로 측정하였다. 이를 바탕으로 CAMC 공정의 전압과 절단 속도에 따른 전극 소모량과 모재 제거량에 대한 분석을 수행하였다.

Table 1 Experimental conditions of CAMC process

| No. | Voltage (V) | Cutting speed (mm/min) | Rising flow rate (m/s) |
|-----|-------------|------------------------|------------------------|
| #1 | 50 | 15 | 12 |
| #2 | | 20 | |
| #3 | | 25 | |
| #4 | 45 | 15 | |
| #5 | | 20 | |
| #6 | | 25 | |

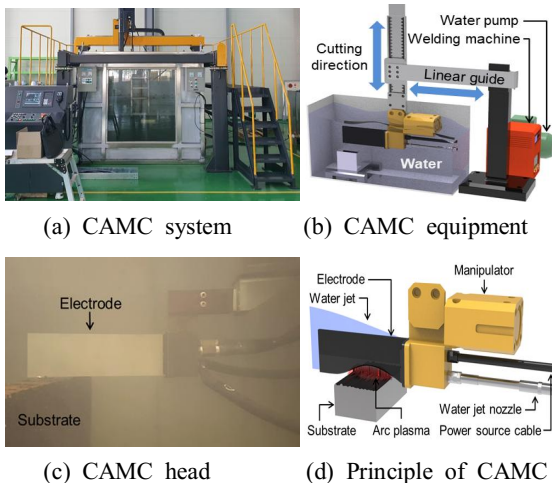


Fig. 3 Contact Arc Metal Cutting system for nuclear facilities dismantling under water

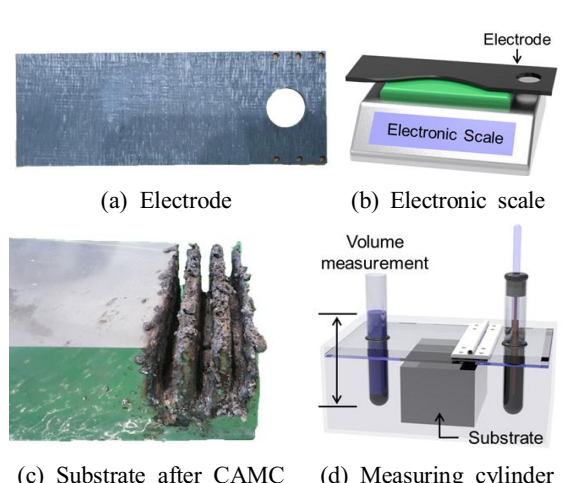


Fig. 4 Method of measurement for electrode consumption and material removal amount

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 Table 1의 조건으로 절단 후 소모된 전극과 절단된 모재의 사진을 나타낸 것이다. CAMC는 수중에서 아크 플라즈마를 발생시켜 절단하는 공정으로 보호가스를 사용하지 않기 때문에 Fig. 5(a)와 같이 전극이 소모된다. 원전 해체의 작업 환경상 소모된 전극을 수시로 교체하기에 어려움이 있으므로 하나의 전극을 최대한 활용해야 한다.

Fig. 5(b)는 전압 및 절단 속도에 따른 절단된 모재의 형상을 나타낸 것이다. 동일한 절단 시간에서 전압이 50V인 경우 절단 속도가 15mm/min에서 절단 깊이가 깊었으며, 속도가 증가할수록 절단 깊이가 줄어든다. 반면, 전압이 45V인 경우 절단 속도와 관계없이 절단 깊이가 얇게 유지되었다. 전극이 수직방향으로 움직이고 있을 때 모재의 깊이가 얇게 유지되면 단락으로 인한 아크 종료 또는 전극이 지속적으로 소모되고 있음을 의미한다.

Fig. 6는 전압과 절단 속도에 따른 모재 제거량 및 전극 소모량을 그래프로 나타낸 것이다. 전극 소모량(E.C.)은 전압이 낮고 절단 속도가 높아질수록 증가하였으며, 모재 제거량(M.R.)은 전극 소모량의 조건과 반대로 전압이 높고 절단 속도가 낮을 때 증가함을 할 수 있다. 수중에서 수행되는 CAMC 공정은 전극과 모재간의 아크 방전을 통해 절단을 수행하는 공정으로써 Fig. 7을 통해 절단 원리, 전극 소모량 및 모재 제거량의 메커니즘을 확인할 수 있다. 그림에서 A_L 은 아크 길이, A_R 은 아크 반경을 의미한다. 전압이 클 경우 아크 길이가

증가하며 그에 따라 아크 반경 또한 넓어진다. 아크 반경이 넓어질수록 절단되는 모재의 너비가 또한 증가하게 된다. 따라서, 전압이 50V일 때 45V보다 절단이 시작되는 전극과 모재간의 거리가 길고 넓은 절단 너비를 가진다. 전압이 50V일 때 A_{L1} 과 A_{R1} 은 증가하여 아크 플라즈마로 절단되는 반면, 전압이 낮은 45V일 때는 A_{L2} 와 A_{R2} 는 감소하여 전극과 모재간의 거리가 좁아지게 되며 결과적으로 전극과 모재가 단락이 되어 아크가 종료되거나 모재가 아닌 전극의 소모량이 증가하게 된다.



(a) Electrode consumption (b) Material removal
Fig. 5 Electrode consumption and material removal after CAMC process

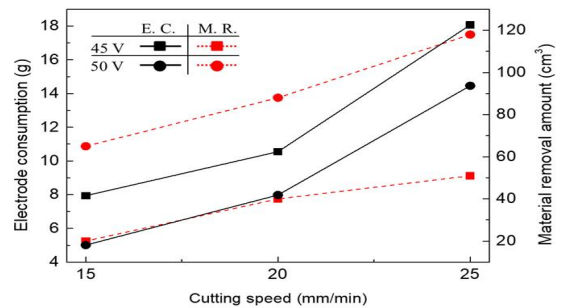


Fig. 6 Electrode consumption(E.C.) and Material removal amount(M. R.) according to CAMC cutting speed

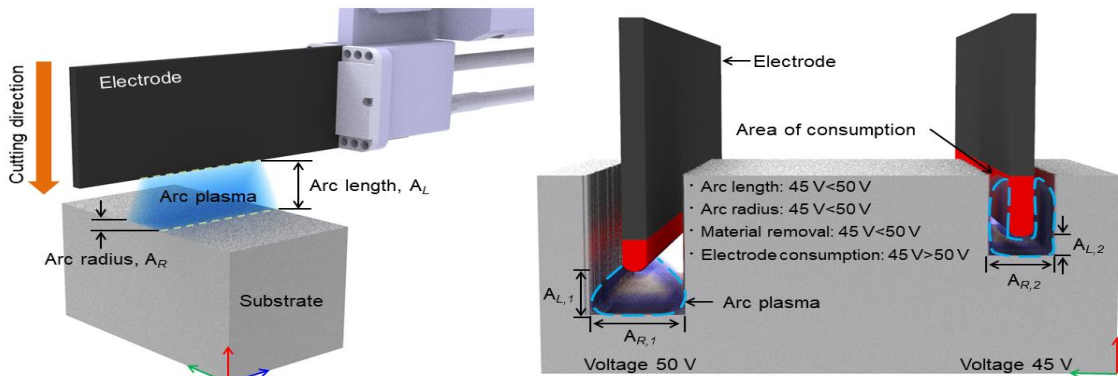


Fig. 7 Principle of CAMC process according to voltage parameter

따라서, 수중에서 원활한 CAMC 공정을 수행하기 위해서는 아크 길이와 반경이 큰 고전압 조건을 기준으로 전극과 모재의 단락이 발생하지않는 절단 속도를 선정해야 전극 소모량을 최소화하여 모재를 절단할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원전 해체 시장 개화기를 맞이하여 수중에서 두꺼운 금속을 절단할 수 있는 기술인 Contact Arc Metal Cutting 공정에 대해 절단 조건에 따른 전극 소모량 및 모재 제거량의 관계를 분석하였다. CAMC는 보호가스를 사용하지 않는 기술로써 모재 절단 시 전극의 소모가 지속적으로 발생하게 된다. 원전 해체 작업의 환경상 전극 교체 주기를 짧게 할 수 없으므로 최적을 절단 조건을 확보하여 장시간 사용하는 것이 바람직하다.

자체적으로 구축한 CAMC 시스템을 바탕으로 절단의 핵심 인자인 전압과 절단 속도에 대해 전극 소모량 및 모재 제거량을 분석하였다. 절단을 위해 전극이 모재 표면으로 수직으로 움직일 때 높은 전압 조건에서 아크 길이과 반경이 증가하게 되고 모재의 절단 폭이 넓게 유지하면서 절단을 수행하게 된다. 반면 전압이 낮을 경우 모재의 절단폭은 좁아지게 되어 단락 또는 전극의 넓은 면적에서 아크 플라즈마 발생하여 전극 소모량이 증가하게 된다. 위와 마찬가지로 절단 속도 또한 증가할수록 전극과 모재가 단락되어 아크 플라즈마가 종료되므로 절단 깊이에 따라 속도를 선정해야 한다.

본 연구에서는 원전 해체에 적용될 수중 절단 공정인 CAMC 공정의 기초 자료를 제공하였으며 원전 해체를 진행할 때 공정 최적화로 인한 소모성 전극의 효율 증가와 전극 교체주기 예측으로 인한 경제적, 환경적 손실을 최소화할 수 있다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A5A8083201)

REFERENCES

1. "2015 global report"(2015) <https://www2.deloitte.com/nz/en/pages/about-deloitte/articles/global-report-2015.html>
2. Liu, D., Li, H., Yan, Y., Guo, N., Song, X., and Feng, J., "Effects of processing parameters on arc stability and cutting quality in underwater wet flux-cored arc cutting at shallow water," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 33, pp. 24-34, 2018.
3. Hyun, D., Kim, I., Lee, J., Kim, G. H., Jeong, K. S., Choi, B. S., and Moon, J., "A methodology to simulate the cutting process for a nuclear dismantling simulation based on a digital manufacturing platform," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 103, pp. 369-383, 2017.
4. HOU, Xiaolin., "Radiochemical analysis of radionuclides difficult to measure for waste characterization in decommissioning of nuclear facilities," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 273, pp. 43-48, 2007.
5. Hyun, D. J., Choi, B. S., Jeong, K. S., Lee, J. H., Kim, G. H., and Moon, J. K., "Evaluation Methodology of Remote Dismantling Equipment for Reactor Pressure Vessel in Decommissioning Project," *Korean Radioactive Waste Society*, Vol. 1, pp. 83-92, 2013.
6. LARAIA, Michele., "Introduction to nuclear decommissioning: definitions and history," In: *Nuclear Decommissioning*, pp. 1-10, 2012.
7. Gurau, D., & Deju, R., "The use of chemical gel for decontamination during decommissioning of nuclear facilities," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 106, pp. 371-375, 2015.
8. Quintero, F., Pou, J., Lusquiños, F., Boutinguiza, M., Soto, R., & Pérez-Amor, M., "Comparative study of the influence of the gas injection system on Nd:yttrium-aluminium-garnet laser cutting of advanced oxide ceramics," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 74, pp. 4199-4205, 2003.

9. Jain, R. K., Agrawal, D. K., Vishwakarma, S. C., Choubey, A. K., Upadhyaya, B. N., and Oak, S. M., "Development of underwater laser cutting technique for steel and zircaloy for nuclear applications," *Pramana*, Vol. 75, pp. 1253-1258, 2010.
10. Bach, F. W., Haferkamp, H., Lindemaier, J., and Rachkov, M., "Underwater climbing robot for contact arc metal drilling and cutting," *Proceedings of the 1996 IEEE IECON. 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*. Vol. 3, 1996.
11. Deju, R., Gurau, D., Zorliu, A., and Mincu, M., "Dismantling of the VVR-S Nuclear Research Reactor Vessels," *Acta Physica Polonica, A*, Vol. 134, pp. 300-306, 2018.
12. BIENIA, Harald., "Thermal Cutting Technologies for Decommissioning of Nuclear Facilities," *International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation*, pp. 353-360, 2009.
13. Peillon, S., Fauvel, S., Chagnot, C., and Gensdarnes, F., "Aerosol characterization and particle scrubbing efficiency of underwater operations during laser cutting of steel components for dismantling of nuclear facilities," *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 17, pp. 1463-1473, 2017.
14. Bach, F. W., Haferkamp, H., Lindemaier, J., and Rachkov, M., "Underwater climbing robot for contact arc metal drilling and cutting," In: *Proceedings of the 1996 IEEE IECON. 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*. IEEE, pp. 1560-1565, 1996.