

레이저를 이용한 산화막 제거와 레이저 제염기술 고찰

Oxide Layer Removal with Excimer Laser and Characterization of Laser Decontamination Technology

김용기, 송규석, 김덕현, 차형기, 임권, 차병현, 양기호, 김철중
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원전 시설물과 폐기물의 증가에 따라 방사성에 오염된 시설과 재료의 안전한 처리와 보관이라는 시급한 문제가 점점 대두되어 안전한 제염기술의 개발 필요성과 중요성은 세계적으로 매우 강조되고 있다. 레이저 제염 기술의 가능성 확인을 위하여 화학약품을 전혀 사용하지 않고 248 nm의 KrF 엑시머 레이저를 이용하여 금속산화막 제거를 실증하였다. 출력빔의 공간적인 빔에너지의 차이를 균일하게 만들어 주기 위해 Homogenizer 광학계를 사용하여 만들어진 flat-top 라인빔(line beam)을 사용하였다. Sus 304를 300°C에서 24 시간 구운 샘플의 0.6 J/cm² 에너지 밀도에 대한 펄스 당 평균 용발율은 17 nm 이었다. 실질적으로 금속산화막을 효율적으로 제거하기 위해선 약 1 J/cm² 이상의 고에너지 밀도를 가진 빔이 필요로 하다. 레이저 제염기술에서 중요한 파라메타 및 특징 등에 관하여 소개하였다. 레이저 제염법은 빔의 크기를 수 mm에서 수십 μ m 이하까지 집속이 가능하므로 부분제염 및 국소 미세 오염된 분을 제염하기에 가장 적합한 기술이라 할 수 있다. 더불어 다른 제염기술과 함께 Hybrid 시스템을 구성하여 사용할 경우 더욱 장점을 가질 수 있다

Abstract

With the growing number of aged radioactively polluted facilities becoming inoperative, the challenge of finding suitable storage solutions for hazardous material to reduce the threat posed to human beings and the natural environment becoming even more pressing and getting urgent. Demonstration of metal oxide layer removal with a 248 nm KrF excimer laser have been performed without any use of toxic chemicals. Homogenizer optics has been adopted to obtain spatially uniform flat-top

line beam profile and it is used throughout the entire experiment. The average etch rate per pulse for the Sus 304 was 17 nm with an energy density 0.6 J/cm^2 . Practically, effective removal of the oxide layer requires energy density of greater than 1 J/cm^2 . Discussions were made about the critical parameters in laser decontamination and characteristics of the laser decontamination system. Laser beam allows small focusing capability of less than tens of μm size, which is suitable for spot or small area cleaning and partial cleaning. Laser decontamination technology also make it possible of hybrid cleaning system with other cleaning methods which provide more effective decontamination results.

1. 서 론

최근 들어 원자력 발전분야의 폐기물 관리와 안전 분야에 있어서 많은 발전이 있어왔으나 여전히 폐기물과 연관된 주요 안전문제는 존재하고 있다. 원전 운전시간의 경과에 따라 원전의 사용이 중지되는 시설물들이 점점 늘어나고 있으며, 이러한 시설들은 인간과 자연환경에 큰 위험이 되고 있다 [1,2]. 더불어 방사성에 오염된 시설의 안전한 처리와 보관이라는 시급한 문제가 점점 대두되고 있다. 이러한 이유들로 현재 방사성 오염된 원전 시설과 재료의 안전한 제염기술의 개발 필요성과 중요성은 세계적으로 매우 강조되고 있는 추세이다. 레이저 제염 및 절단기술은 레이저의 장거리 전송 특성 및 고출력 특성을 이용하여 원격으로 표면을 정화시키고, 일정한 부분을 절단하는 기술을 말하는 것으로서 원자력 산업에 기술을 적용하면 작업종사자의 안전 측면에서 타 표면정화 및 절단 방법보다 훨씬 안전한 방법이라고 할 수 있다. 이와 관련하여 레이저를 이용한 Tritium 제거 [3], 금속 절단 [4] 및 페인트 제거 [5] 등에 관한 발표가 있다.

원자력 시설에 사용되는 재료에 있어서 대부분의 방사성 오염은 재료의 표면에 산화막 형태로 존재하는 관계로 표면 산화막의 제거는 매우 효과적인 제염방법으로 알려져 있다. 가장 일반적으로 화학약품을 사용하는 습식화학처리법, 기계적 연마법, 또는 블라스팅(Blasting)법이 표면 산화막 제거에 사용되어 진다. 이러한 습식 제염법에 있어서 가장 큰 문제점은 인간과 자연환경에 유해한 많은 양의 화학약품을 사용함으로써 인해 환경을 오염시킬 뿐만 아니라, 더불어 이러한 과정에는 다양한 종류의 액체 사용을 동반함으로써 혼합된 폐기물을 유발하게 되며, 또한 화학약품 및 액체의 재처리에는 엄청난 양의 물을 사용함에 따르는 자연자원의 낭비와 제염 비용의 상승, 화학약품과 액체의 유출에 따른 이차적인 오염의 위험성을 많이 내포하고 있어 결코 바람직한 제염의 방법이 아니다. 샌드 블라스팅(Sand blasting) 기술은 1파운드의 코팅을 제거하기 위하여 수백 파운드의 모래를 사용하며, 결국 더 많은 양의 모래가 오염된 폐기물로 발생된다. 최근 들어 이러한 화학적 습식 제염기술의 단점들을 극복하기 위하여 여러 가지 다양한 건식 제염

기술들이 개발되고 있으며 그 중의 하나가 레이저를 이용한 제염기술이다. 레이저 제염은 기본적으로 화학약품과 솔벤트 등을 사용하지 않는 건식기술이며 이차 오염에 따른 폐기물 생산이 없다는 큰 장점을 가지고 있다.

레이저를 이용하여 고준위 폐기물의 표면 산화막 층을 제거하면 그 오염준위를 매우 낮출 수 있어 나머지 큰 부피의 폐기물은 일반폐기물처럼 처리가 가능하여 저비용으로 효과적인 폐기물 처리가 가능하며, 필터링 시스템에 의해 따로 포집된 고준위 폐기물인 표면 산화막 재료의 양은 부피가 매우 작아 처리가 간단하며 비용을 절약 할 수 있다. 방사성 폐기물의 보관에 사용되는 비용은 전체 D&D 비용의 약 33%를 차지한다. 미국의 DOE는 1 foot 입방체 크기의 방사성 폐기물의 저장, 배출, 및 모니터링에 \$300를 사용하고 있다 [6]. 따라서 폐기물 부피의 감소는 큰 비용의 절감으로 이어질 수 있다. 이러한 이유로 레이저 제염기술은 많은 연구가 진행되고 있고 실제 여러 시설에서 적용하고 있다. 표 1에는 여러 제염기술들의 특성을 비교하여 보았다.

표 1. 여러 제염기술들의 특성 비교.

제염기술	폐기물의 양			표면 구멍 처리 가능	열변형 없음	기계적 변형 없음	독성 화학물질 없음	화학약품 및 액체 사용 안 함
	증가	동일	감소					
레이저 제염			○	○	○	○	○	○
기계적 연마법		○			○		○	○
고체 연마법, 공기연마법	○				○		○	○
드라이 아이스 분쇄법		○				○	○	○
물 분쇄법	○				○			
액체질소법		○				○	○	○
습식 화학 처리법	○			○	○	○		
건식 오염 제거법	○				○	○		○

표 1에서 보면 레이저 제염기술은 유일하게 폐기물의 양이 감소되는 기술이며, 열 및 기계적 변형이 없으며, 아울러 화학물질 및 액체와 물 등도 사용하지 않는 기술로써 다른 제염 기술들과 비교하여 매우 환경 친화적인 제염기술이라 할 수 있다. 레이저 제염에 있어 펄스 레이저의 사용은 레이저 펄스의 폭이 수십 ns 또는 수십 ps로 이는 열흡수에 의한 분자진동에 의해 모재로 열이 전달되는 시간보다 짧으므로 온도 상승효과가 거의 없어 모재 자체의 열 손상이나 기계적 변형 등을 최소화 할 수 있다.

근래에 세계적으로 레이저 제염법에 대한 연구가 많이 진행되고 있으나 국내에서는 아직 초기 단계의 연구만 진행 중인 관계로 아직 레이저 제염기술에 대하여 많이 알려져 있지 않고, 제염 대상물에 따른 레이저의 선정 및 특성 등이 널리 알려져 있지 않은 실정이다. 따라서 이 논문에서는 여러 가지 제염기술들의 특징을 비교 고찰하고, 국내에서도 최근에 연구가 시작되고 있는 레이저 제염법의 특징과 실험실에서 만든 금속산화막 제거에 대한 레이저 실증 결과, 장비구성, 레이저 제염에 중요한 파라메타 등에 관해 소개하고자 한다.

2. 실험 장치

레이저를 이용한 제염에 사용되는 레이저는 여러 종류가 있으며 자세한 내용은 다음장에서 언급하도록 하겠다. 이 실험에서 금속산화막 제거를 위해서는 248 nm의 파장과 650 mJ의 최대 빔에너지를 가진 KrF 엑시머 레이저(Lambda Physik; COMPex 205)를 이용하였다. 레이저의 펄스폭은 약 25 ns이며 50 Hz의 최대 반복율과 14 mrad의 divergence를 가지고 있다. 레이저 빔의 출력은 시스템에 공급하는 전압을 바꿈으로 조절하며 출력빔은 분극화 되어 있지 않다. 레이저 제염 장치의 모습을 그림 1에 보였다. 레이저에서 출력되는 빔은 약 25 mm × 13 mm 크기의 직사각형 형태이며 이를 사각구경(aperture)을 사용하여 깨끗이 한 것이 20 mm × 8 mm의 출력빔이다. 이 빔은 가우시안(Gaussian) 프로파일 형태를 하고 있어 빔의 중심부분에서 에너지가 높고 가장자리 쪽

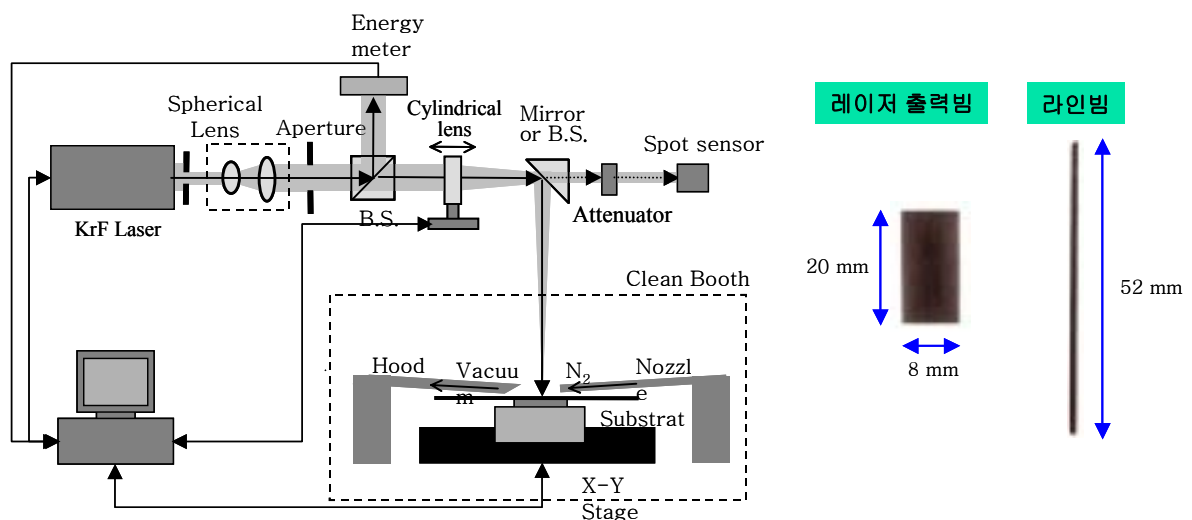


그림 1. 레이저 제염 장치의 모습도와 레이저 출력빔 및 사용한 라인빔의 모습.

으로 갈수록 빔의 에너지가 낮아지는데, 이는 그림 1의 레이저 출력빔 이미지에서 가운데 부분의 색깔이 더욱 검게 보이는 것으로도 확인할 수 있다. 이러한 공간적인 빔에너지의 차이를 모든 빔 영역에서 균일하게 만들어 주는 광학장치를 Homogenizer라고 하며, 이 실험에서는 모든 데이터를 Homogenizer를 사용하여 만들어진 라인 빔(line beam)을 사용하였다. 여기에서는 Homogenizer를 보이지 않았으나 그림 1에서 보인 라인빔의 형태와 거의 동일한 모습을 하고 있으며 단지 빔의 균일도에서 차이가 있으며, 그림 3에 보충 설명을 하였다. Homogenizer 광학계에 대한 자세한 여러 참고문헌에서 찾아볼 수 있다 [7-9]. 레이저 제염 시스템은 진동방지를 위해 광학테이블 위에 설치되었으며, 진공 또는 대기압에서의 운용이 가능한 진공챔버와 샘플의 스캐닝을 위하여 컴퓨터로 컨트롤하는 x- y-이송 스테이지 위에 진공챔버가 올려져서 레이저 빔은 90° 각도로 입사 되었다. 본 실험은 효과적인 입자들 컨트롤을 위하여 class 100 지역의 클린룸에서 실시하였고, 미세 입자들의 재부착 방지를 위하여 질소 가스를 계속 분사하면서 실험하였다.

원자력 시설들은 고온에서 운용되는 관계로 주로 사용되는 금속재료는 스테인리스 재질이며 대부분의 방사성 오염은 재료의 표면에 산화막 형태로 존재하게 되며, 이 산화막을 제거하게 되면 거의 모든 방사성을 제거할 수 있다. 원자력 시설에서 사용된 금속샘플은 직접 획득하기도 어려울 뿐만 아니라 인체에 매우 위험한 관계로 실험실에서 직접 실험을 진행하기가 어려운 형편이다. 따라서 레이저를 이용한 산화막 제거 실험을 위하여 스테인리스 스틸을 오븐 속에서 300°C, 500°C 등의 온도로 2시간부터 24시간 동안 가열하여 금속 위에 인위적으로 산화막을 형성하여 원자력 환경과 비슷한 종류의 금속산화물 샘플을 실험실에서 제작하였다. 이렇게 제작된 금속산화막을 248 nm의 KrF 엑시머 레이저를 가지고 1.1 mm 폭의 라인빔을 만들어 산화막 제거에 이용하였다.

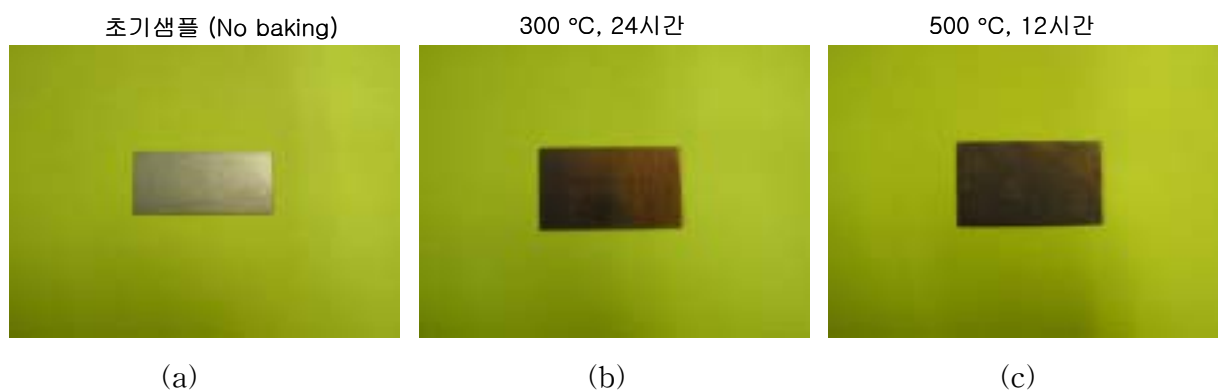


그림 2. 금속산화막 제거 실증에 사용된 스테인리스304 샘플. 오븐에 굽기 전의 모습 (a), 오븐 속에서 300°C, 24 시간 (b), 500°C 12 시간 (c)의 온도로 구운 모습.

3. 라인빔을 이용한 금속산화막 제거 및 제염 파라메타

원자력 시설에 적용할 제염방법의 선정에는 우수한 제염성능 뿐만 아니라 제염에 의해 부가적으로 발생되는 2차 폐기물 양의 최소화 여부도 중요하게 고려되어야 할 전제조건이다. 이와 같은 전제 조건을 만족시키기 위해서는 제염효과가 큰 제염기술을 확보함과 더불어 2차 폐기물 양을 최소로 하기 위하여 적용 가능한 제염기술의 특성과 적용 방안 등이 고려되어야 한다. 원자력 시설의 해체 시 적용하는 제염기술의 개발 및 선정 시 고려해야 할 중요한 요소들은 제염의 신속성, 용이성, 제염효과, 원격조작의 가능성, 제염비용, 그리고 무엇보다도 2차 폐기물 발생 여부 등을 들 수 있다. 또한 제염기술의 선정은 제염대상물의 재질과 종류 및 재질의 특성에 따라 다르게 선정되어야 한다.

위에서 언급한 제염기술들에 있어 2차 폐기물 발생여부와 금속산화막 제거 적용 실증을 위하여 레이저 제염기술을 이용하였다. 산화막 샘플은 가로 50 mm, 세로 30 mm, 두께 1 mm의 크기를 가진 Sus 304 표면 위에 형성하였다. 그림 2 (a)는 스테인리스 304를 오븐에 굽기 전의 모습이며, Fig. 2 (b), (c)는 오븐 속에서 300℃, 24 시간 (b) 500℃ 12 시간 (c)의 온도로 구운 모습으로 산화막이 형성 되어 있는 것을 그림들의 콘트라스트 차이로 볼 수 있다. 그림 2에 보인 금속산화막을 제거하기 위하여 1.1 mm 빔 폭을 가진 라인빔을 사용하여 에너지 밀도를 100 mJ/cm²에서부터 600 mJ/cm² 까지 조사하여보았다. 일반적으로 엑시머 레이저의 출력 빔 프로파일은 그림 3(a)에서 보인바와 같이 빔의

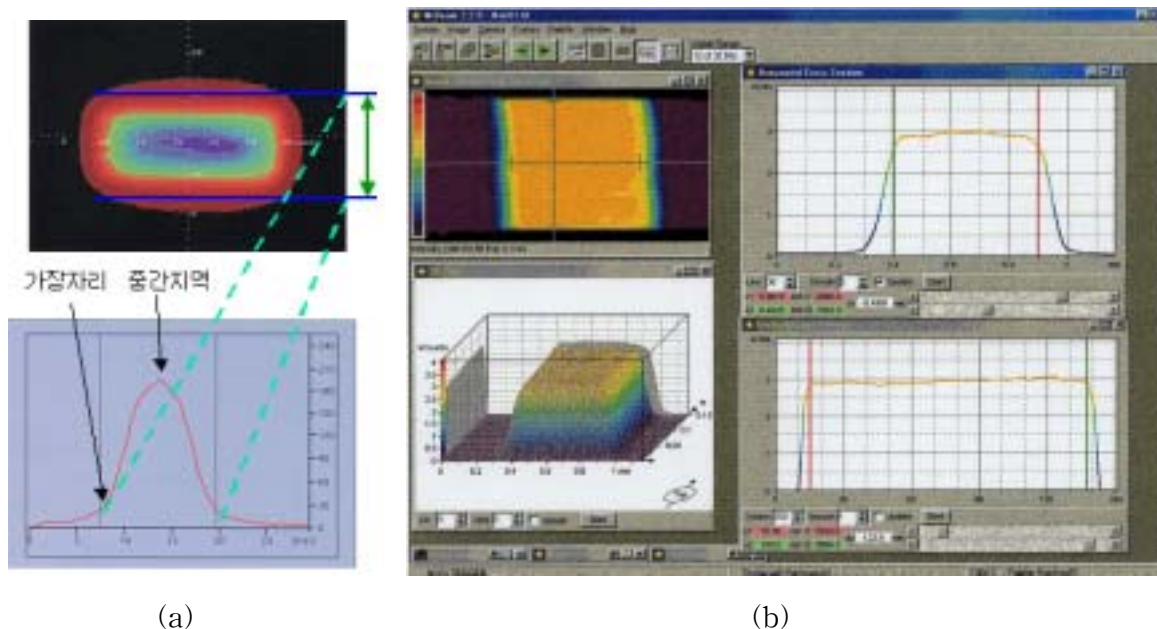


그림 3. Homogenizer 사용 전 KrF 엑시머 레이저의 Gaussian 출력빔 프로파일(a)과 사용 후 균일화 된 Flat-top 빔 프로파일 (b)의 모습.

가운데 중간지역에서 에너지가 높은 가우시안(Gaussian) 빔 형태를 하고 있다. 이러한 형태의 빔에서 레이저 용발은 빔이 대상물의 표면에 조사될 때 빔에너지가 높은 가운데 부분에서는 etch가 많이 일어나고 에너지가 낮은 가장자리 부분에서는 etch가 적게 일어나 표면을 균일하고 일정한 깊이로 etch하기 어려운 현상이 발생하게 된다. 따라서 이러한 현상을 제거하기 위하여 Homogenizer광학계를 사용하여 빔의 중간과 가장자리의 에너지 차이를 없애 라인 빔 전 영역에서 에너지를 균일하게 만든 Flat-top 모양의 라인빔을 사용하여 실험을 진행하였다. 그림 3에 Homogenizer 사용 전 엑시머 레이저의 Gaussian 출력빔 프로파일(a)과 사용 후 균일화 된 Flat-top 모양의 출력빔 프로파일(b)을 보였다. 그림 3 (b)의 오른쪽 그래프 그림에서 빔에너지가 y축의 0에서 시작하여 점점 증가하여 일정하게 되는 영역까지를 Steepness 영역이라고 한다.

그림 4는 500℃의 오븐에서 24 시간 동안 구운 스테인리스 304의 산화막을 1.1 mm 두께의 Flat-top 라인빔으로 펄스를 조사하여 마이크로스코프로 찍은 이미지이다. 이 때 레이저의 동작주파수는 10 Hz이었으며, 10 Torr의 질소분위기에서 에너지 밀도를 100 mJ/cm²에서부터 100 mJ/cm²씩 증가시키면서 600 mJ/cm² 까지 조사하여보았다. 에너지 밀도가 200 mJ/cm²일 이하일 때는 표면의 변화를 관측하기가 힘들었다. 그림 4는 Sus 304를 (a) 300℃, 24 시간, (b) 500℃, 12 시간 동안 구운 샘플이며 각각 라인빔의 에너지 밀도는 (a) 0.6 J/cm²로 (b) 0.5 J/cm²로 각각 1,000 펄스씩 조사하여 산화막을 제거한 모습이다.

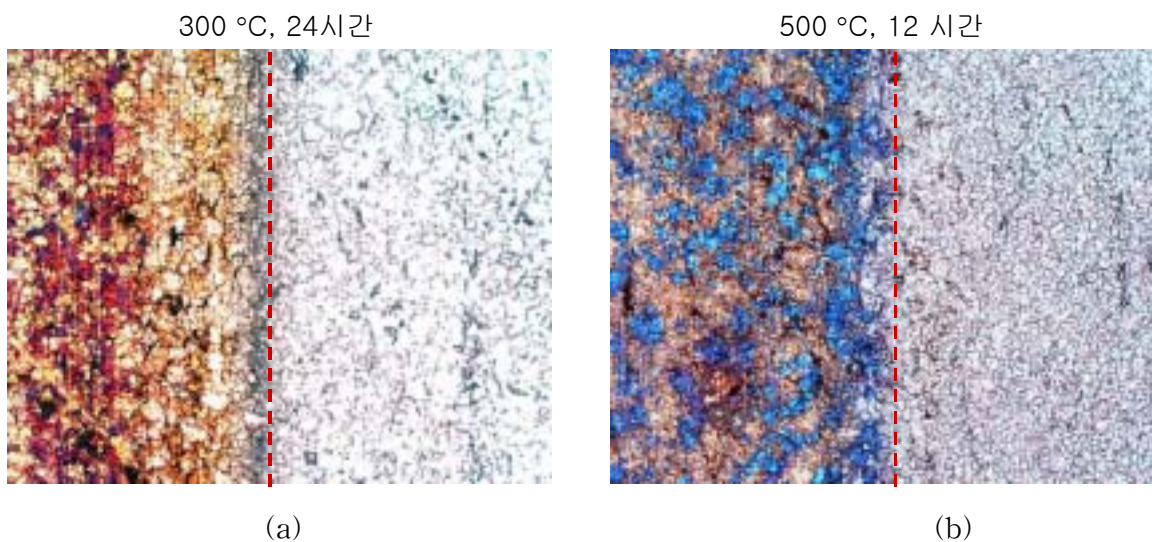


그림 4. 금속산화막(Sus 304)을 라인빔의 에너지 밀도 (a) 0.6 J/cm²로 (b) 0.5 J/cm²로 각각 1,000 펄스씩 조사하여 산화막을 제거한 모습. 각 그림에서 점선을 기준으로 좌측이 산화막이 덮혀있는 부분이고 우측이 산화막이 제거된 부분임.

각 그림의 점선을 따라 왼쪽의 어두운 부분들이 산화막이 덮여있는 모습이며, 오른쪽의 밝게 보이는 부분이 산화막이 제거된 모습이다. 그림에서 점선을 중심으로 좌우의 boundary 영역은 flat-top 라인빔의 steepness에 의해 만들어진 것이다.

좀 더 자세히 산화막 제거 여부를 알아보기 위하여 500℃, 12 시간 동안 구운 샘플을 SEM(Hitachi S4700)으로 촬영한 모습을 그림 5에 보였다. 그림 5에서 가운데 경계지역을 중심으로 왼쪽은 산화막이 그대로 덮혀있는 모습이고 오른쪽은 레이저에 의한 용발과 용융으로 인하여 표면의 상태가 둥글어 지면서 좀 거칠어진 듯한 모습을 보이고 있다.

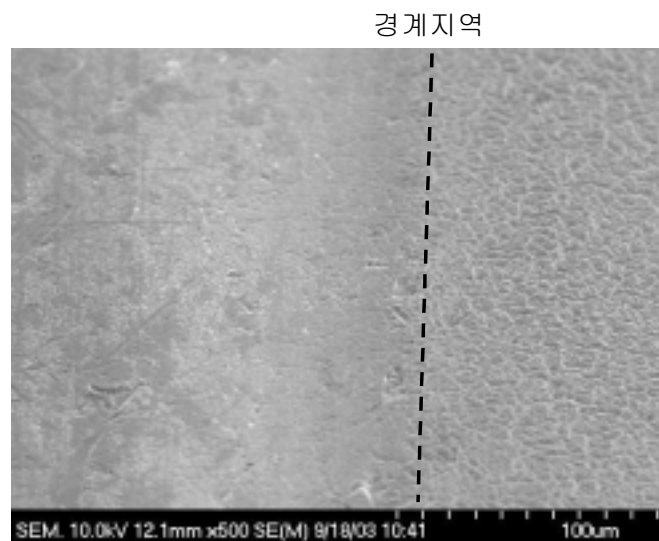


그림 5. 경계지역을 중심으로 레이저를 맞지 않은 부분(왼쪽)과 맞은 부분(오른 쪽)의 SEM 모습 비교. Sus 304를 500℃, 12 시간 구운 샘플 이며 라인 빔의 에너지 밀도는 0.6 J/cm²로 1,000 펄스 조사.

오븐 온도 300℃ 및 500℃에서 12 시간 구운 Sus 304 샘플의 산화막 두께 측정을 위하여 SEM으로 단면 촬영을 시도하였으나 샘플의 절단 시 절단면의 훼손으로 인하여 단면 촬영이 불가능 하여 정확한 금속산화막의 두께는 측정하지 못하였으나, Sus 304 산화막에 대한 레이저의 펄스 당 용발율을 알아보기 위하여 SEM의 스테이지가 가진 틸트(tilt) 기능을 이용하여 샘플을 45° 기울여서 SEM 촬영을 하였다.

그림 6은 Sus 304를 300℃에서 24 시간 구운 샘플을 10 Torr 질소분위기에서 1.1 mm Flat-top 라인빔으로 에너지 밀도 0.6 J/cm², 10 Hz로 1,000 펄스를 조사한 뒤 SEM으로 45° 기울여서 촬영한 것으로 그림의 위쪽을 축으로 아래쪽이 위로 45° 올라온 형태의 이미지이다. 그림 6에서 점선으로 표시된 부분이 레이저 빔의 steepness영역이며, 이미지가 45° 기울어진 것을 고려하여 계산한 steepness 영역은 약 17 μm이다.

300 °C, 24시간

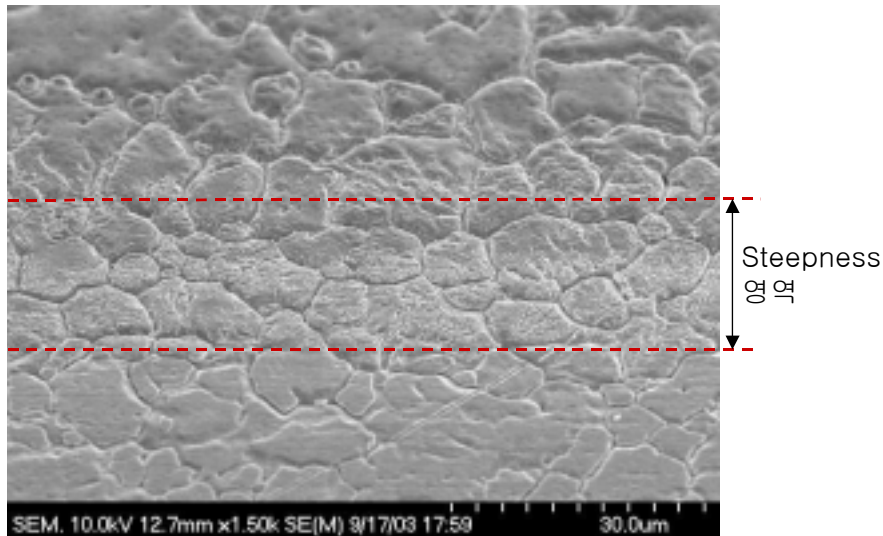


그림 6. Sus 304를 에너지 밀도 0.6 J/cm^2 , 10 Hz로 1,000 펄스를 조사한 뒤 SEM으로 45° 기울여서 촬영한 이미지. Steepness영역 약 $17 \mu\text{m}$. 300°C , 24 시간 샘플. 10 Torr 질소분위기에서 1.1 mm Flat-top 라인 빔 이용.

이 steepness 영역 $17 \mu\text{m}$ 는 펄스 조사 수 1,000에 의해 용발 된 깊이이다. 따라서 펄스 당 평균 용발율은 약 17 nm 임을 알 수 있다. 여기서 평균 용발율 17 nm는 Sus 재료의 용발이 일정하게 일어난다고 가정하고 계산한 값이다.

실제로 참고논문 [9]는 레이저 용발에 있어 초기에는 펄스 당 용발율이 높으나 어느 정도 용발이 진행된 후에는 펄스 당 용발율이 낮아지며, 500 펄스 후에는 용발이 매우 어렵다고 언급하고 있다. 앞에서 언급하였듯이 이 실험에서 사용된 라인빔의 최고 에너지 밀도는 0.6 J/cm^2 로 Homogenizer의 라인빔 폭이 1.1. mm로 고정되어 있는 관계로 더 높은 에너지 밀도에서의 실험을 진행할 수 없었다. 실질적으로 금속산화막을 효율적으로 제거하기 위해선 약 1 J/cm^2 이상의 고에너지 밀도를 가진 빔이 필요로 하다. 따라서 이 실험에서 좀 더 효과적인 산화막 제거를 위해선 라인빔의 폭을 줄여서 에너지 밀도를 높일 필요가 있다. 앞으로 원자력연구소에서는 1 J/cm^2 이상의 고에너지 밀도를 이용한 산화막 제거 실험을 위하여 1064 nm의 파장을 가진 Nd:YAG 레이저를 이용할 계획을 가지고 있다.

그림 7은 Delaporte et. al.의 논문으로서 프랑스의 CERN 에서 308 nm의 파장을 가진 XeCl 엑시머 레이저를 이용하여 제염한 것이다 [10]. 그들의 실험은 스테인리스 샘플 (316L)의 제염비율을 레이저 펄스 수 에 따른 함수로 표현한 것인데, 그들은 라인빔이 아닌 사각 빔을 포커싱 하여 사용한 관계로 2 J/cm^2 이상의 고에너지 밀도를 가진 빔 집중

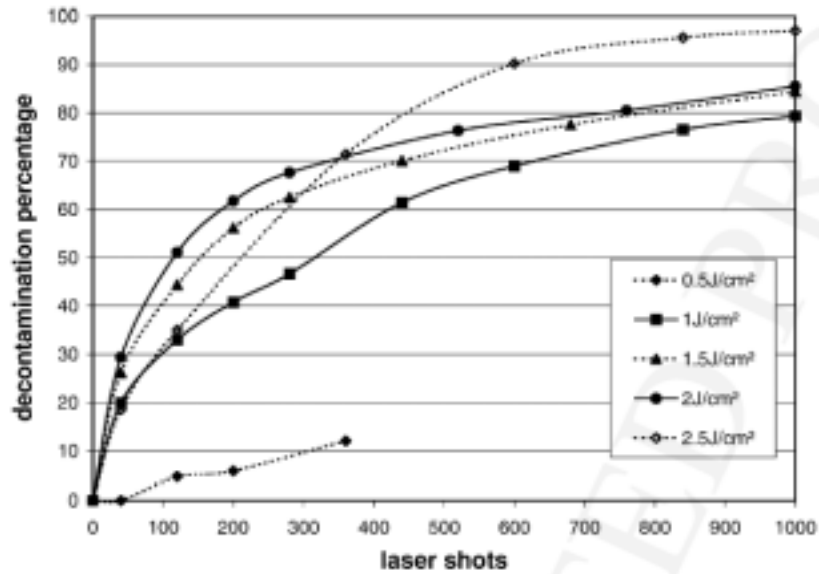


그림 7. 스테인리스 샘플(316L)의 레이저(파장 308 nm) 펄스 조사 수에 따른 제염도 [10].

이 가능하였으며 Homogenizer광학계도 사용하지 않았다. 그들의 실험에서 산화막은 170 bar의 고압력과 300°C의 물속에서 형성되었으며 그 두께는 약 10 μm 이었다. 이 결과에 따르면 2.5 J/cm²의 고에너지 밀도를 가진 레이저 빔을 사용하면 97% 이상의 제염이 가능함을 보여주고 있다.

레이저 제염에 있어 반드시 고려되어야 할 중요한 파라메타들을 언급하면 다음과 같다.

- ① 레이저 파장
- ② 레이저 파워
- ③ 에너지 밀도
- ④ 레이저 동작 주파수
- ⑤ 입력 펄스 수
- ⑥ 스캐닝 속도
- ⑦ 동작압력 (진공 정도, 압력, 반응성 가스사용 여부 등)
- ⑧ 기타 빔 사이즈, 빔 프로파일, 레이저 입사각 등등

위에서 언급한 파라메타들은 서로 유기적인 연관관계를 가지고 있어 대상물의 특성 및 재료에 따라 레이저의 파장 및 파워가 선정 되어야 하며, 레이저 용발 효과를 얻기 위하여 필요한 레이저의 에너지 밀도, 산화막 또는 절단을 위하여 필요로 하는 입력 펄스 수 등에 대한 정보와 기본적인 데이터가 필요하다. 레이저 동작주파수와 입력 펄스 수, 및 스캐닝 속도의 선정은 서로 맞물려서 선정 되어야 하는 파라메타들이다.

레이저 제염의 가장 큰 장점 중에 하나는 국소부분제염이 가능하다는 것이다. 방사성 폐기물에 있어 소위 국소오염 또는 hot-spot 이라고 불리는 미세한 부분은 때로 화학적 제염법 및 기타 여러 제염법에 의해서도 제염되지 않는 경우가 있다. 때때로 이 hot-spot 부분은 오염 준위가 매우 높아 꼭 제염되어야 하며, 또한 표면이 부분적으로 오염된 경우 제염대상물의 일부분만을 제염해야 하는 경우에도 매우 유용하다. 레이저 제염법은 빔의 크기를 수 mm에서 수십 μm 이하까지 집속이 가능하므로 이러한 부분제염 및 국소 미세 오염된 부분을 제염하기에 가장 적합한 기술이라 할 수 있다.

4. 결 론

248 nm의 KrF 엑시머 레이저를 이용한 스테인리스 금속산화막 제거 실증을 보였다. 이 실험에서 산화막 제거에는 화학약품과 솔벤트 등이 전혀 사용되지 않았다. 레이저 제염은 기본적으로 제염대상물의 재료와 재료의 광학적, 물리적, 화학적 특성에 따라 파장 및 레이저의 선택이 이루어 져야 한다. 금속산화막의 제거 또는 제염에는 기본적으로 1 J/cm^2 이상의 고에너지 밀도를 가진 레이저 빔을 사용하는 것이 효과적이다. 또한 실제 제염에 앞서 각각의 재료에 대한 레이저 빔의 에너지 밀도별 및 파워 밀도별 펄스 당 용발율, 문턱 에너지 밀도 등에 대한 기본적인 연구와 데이터가 확보되어야 한다. Sus 304 를 300°C 에서 24 시간 구운 샘플의 0.6 J/cm^2 에너지 밀도에 대한 펄스 당 평균 용발율은 17 nm 이었다. 실질적으로 금속산화막을 효율적으로 제거하기 위해선 약 1 J/cm^2 이상의 고에너지 밀도를 가진 빔이 필요로 하다. 금속산화막의 제거에는 에너지 밀도와 파워가 높은 Nd:YAG 레이저가 장점을 가지고 있으며, 페인트 제거 등의 대면적 적용에는 긴 라인빔 구성이 가능한 엑시머 레이저가 유리하다고 하겠다. 레이저 제염은 레이저의 특성 중의 하나인 단색성을 적용하면 표면정화 대상에 부착되어 있는 원소들을 선택적으로 제거할 수 있다. 레이저 제염법은 빔의 크기를 수 mm에서 수십 μm 이하까지 집속이 가능하므로 부분제염 및 국소 미세 오염된 분을 제염하기에 가장 적합한 기술이라 할 수 있다. 더불어 다른 제염기술과 함께 사용하여 Hybrid 시스템을 구성하여 사용할 경우 더욱 장점을 가질 수 있다고 판단된다.

5. 참고문헌

- [1] X. Zhou, K. Imasaki, H. Furukawa, C. Yamanaka, S. Nakai, J. Laser Appl. **14**, 13 (2002).
- [2] X. Zhou, K. Imasaki, H. Furukawa, H. Umino, K. Sakagishi, S. Nakai, C. Yamanaka, Surf. Eng. **17**(5), 384 (2002).
- [3] C. A. Gentile, C. H. Skinner, K. M. Young, L. Ciebiera, S. W. Langish, A. Von

- Halle, C. W. Kennedy, 18th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering, Oct.25-29. (1998).
- [4] S. Nakai, L. A. Hackel, W. C. Solomon, Proc. of SPIE, "High-Power lasers in Civil Engineering and Architecture", Vol. **3887**. 104 (1999).
 - [5] K. liu, E. Garmire, Appl. Opt. **34**(21) 4409 (1995)
 - [6] <http://www.netl.doe.gov/>
 - [7] B. Burghardt, H. Kahlert, U. Sarbach: U. S. Patent No. 5,414,559 (9 May 1995).
 - [8] H. Kahlert, B. Burghardt: U. S. Patent No. 5,796,521 (18 August 1998).
 - [9] B. Burghardt, H. Kahlert: U. S. Patent No. 5,721,416 (24 February 1998).
 - [10] Ph. Delaporte, M. Gastaud, W. Marine, M. Sentis, O. Uteza, P. Thouvenot, J.L. Alcaraz, J. M. Le Samedy, D. Blin, Appl. Surf. Sci. **8118**, 1 (2002)