

개량형 가돌리니아 가연성 독물질 재료 제조에 사용되는
금속증기 발생기 연구

Study on the Metal Vapor Generator for the
Production of Improved Gadolinia Burnable Poison Material

정의창, 노시표, 고광훈, 김택수, 임창환, 김철중

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력 발전소의 경제성을 증진시키기 위한 한가지 방법은 핵연료의 수명을 연장시키는 것이다. 이를 위해서는 높은 초기 농축도와 많은 양의 연료를 사용하는 고연소도 핵연료가 필수적이며 결과적으로 초기의 잉여 반응도를 제어하기 위해 적절한 가연성 독물질의 사용이 요구된다. 가돌리니아 가연성 독물질에 사용되고 있는 가돌리늄 원자의 핵종에서 중성자 흡수 단면적이 큰 핵종을 추출하는 장치를 개발하였다. 장치는 크게 원자증기 발생기 장치, 레이저 장치, 이온추출 장치로 구분되는데, 이 논문에서는 전자총을 사용한 원자증기 발생기 장치에 대한 내용을 주로 정리하였다.

Abstract

A longer cycle operation of a nuclear fuel is one of the ways to promote the economy of a nuclear power plant. For this purpose, high burn up fuel which has initial higher enrichment is required with higher loading of fuel. As a result, adequate burnable poison material must be used to control peak fuel pin power. Devices to manufacture the improved gadolinia burnable poison are developed. The improved gadolinia contains higher abundance of the preferred thermal neutron absorbers. Devices are composed of metal vapor generator, lasers and ion extractor. In this paper, a metal vapor generator by using electron beam gun is reported.

1. 서 론

이 연구는 고연소도 핵연료에 적용이 가능한 개량형 가돌리니아 (Gd_2O_3) 가연성 독물질 제조기술 개발을 목표로 한다. 가돌리늄 (Gd) 원소의 Gd-155, Gd-157 핵종은 표 1에서 보인 것과 같이 열중성자 흡수 단면적이 매우 크기 때문에 원자로의 가연성 흡수체로 사용되고 있다. 가돌리늄 금속은 산화물인 가돌리니아 형태로 이산화우라늄 (UO_2) 분말과 혼합되어 가연성 독물질로 핵연료에 사용되며, 연소 초기에는 중성자 흡수체 역할을 하다가 Gd-155, Gd-157 핵종이 중성자 흡수 반응을 거쳐 Gd-156, Gd-158로 변환된 후에는 함께 섞은 이산화우라늄이 핵연료의 역할을 한다.

개량형 가돌리니아에는 Gd-155, Gd-157 핵종이 표 1에 나타난 성분비 30.45% 보다 두 배 이상 함유되어 있다. 장주기 운전용 고연소도 핵연료에 개량형 가돌리니아를 혼합하여 사용할 경우에는 크게 두 가지 효과를 기대할 수 있다. 첫째, 주기 길이 동안 원자로의 잉여 반응도를 제어하기 위해 충분한 양의 가돌리니아가 핵연료에 혼합되어야 하는데, 가돌리니아를 섞은 핵연료는 열전도도가 떨어지는 단점이 있으므로 많은 양의 가돌리니아를 핵연료에 섞어 사용하는 데에 제약이 있다. 그러므로 잉여 반응도 제어에 필요한 Gd-155, Gd-157의 두 핵종 성분비 많이 함유된 가돌리니아를 사용할 경우, 열전도도를 유지하면서도 많은 양의 가돌리니아를 포함한 것과 동일한 효과를 얻는 것이 가능하다 [1]. 둘째, 연소 말기에 Gd-154, Gd-156의 핵종이 중성자를 흡수하여 Gd-155, Gd-157로 변환될 경우에 발생하는 기생 흡수 (parasitic absorption) 현상 때문에 반응도가 떨어지는 잔존 가연성 독 반응 (residual burnable poison reactivity)을 방지할 수가 있다 [2].

표 1. Gd 핵종의 성분비 및 열 중성자 흡수 단면적.

핵종	성분비 (%)	열중성자 흡수 단면적 (barn)
152	0.20	10.0
154	2.18	80.0
155	14.80	61,000.0
156	20.47	2.0
157	15.65	255,000.0
158	24.84	2.4
160	21.86	0.8

가돌리늄 원소의 핵종에서 중성자 흡수 단면적이 큰 핵종을 추출하는 장치는 크게 원자증기 발생기 장치, 레이저 장치, 이온추출 장치로 구분된다. 가돌리늄 금속을 전자빔으로 녹여 원자증기를 발생시키고, 원자의 에너지 준위에 적합한 파장을 가진 레이저빔을 입사시켜 원자를 이온으로 만든 후, 이온을 전극으로 추출하는 방법을 채택하였다.

이 논문에서는 가돌리늄 금속을 원자증기로 만드는 증기발생기의 제작과 특성에 대해 설명한다. 가돌리늄 금속을 원자증기로 만들 때 고려되어야 하는 열·물리적 특성을 표 2에 정리하였다. 가돌리늄 금속은 녹는 온도가 1586 K이므로 원자증기 발생에 흔히 사용되는 저항가열 (resistive heating) 방법을 사용할 수가 없다. 따라서 많은 양의 금속을 원자증기로 만들 수 있도록 전자빔 가열 (electron beam heating) 방식을 채택하였다. 제작된 전자총 및 전원 장치, 전자빔 궤적 제어 장치, 증발용 도가니 용량에 따른 가돌리늄 금속의 증발 특성 등에 관해 설명한다.

표 2. Gd 금속의 주요 성질.

성질	Gd
Melting Temperature	1586 K
Boiling Temperature	3539 K
Density	7900 kg/m ³
Thermal Conductivity	10.6 W m ⁻¹ K ⁻¹
Vapor Pressure (3000 K)	96.3 Torr
Thermal Expansion Coefficient	8.6 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹

2. 전자총 및 전원 장치

전자총은 내부 구조에 따라 축선 (axial) 방식과 횡단 (transverse) 방식의 두 종류로 구분된다. 횡단 방식 전자총은 일반적으로 증발용 도가니와 전자빔 궤적 유도용 영구 자석 등을 포함한 전체 증발 장치를 한 개의 몸체로 구성할 수 있기 때문에 비용이 싸고, 진공용기 내부의 공간을 활용하는데 유리한 점이 있다. 이러한 방식의 전자총은 상용으로

구입해 사용할 수도 있으나, 대량의 원자증기를 발생시킬 때에는 적합하지 않은 점이 있다. 전자빔의 출력이 15 kW 이하로 낮고, 전자총과 한 몸체로 구성되어 있는 도가니의 용량이 200 cc 이하로 작다는 점이 원자증기를 대량으로 발생시키는데 제한을 주기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 평균 출력이 50 kW인 축선 방식 전자총과 전자빔 궤적 제어 장치를 제작하였다. 축선 방식의 전자총을 사용해 원자증기를 발생시킬 경우에는 전자총과 증발용 도가니를 별개로 설치하여 운용할 수 있기 때문에 전자빔의 조건 (출력밀도, 전자빔 길이 등)과 도가니의 조건 (직경, 용량, 냉각 등)을 각각 최적화시킬 수 있다는 점이 장점으로 부각된다.

그림 1에 전자총의 구조와 전원 연결 구성을 간략하게 나타내었다. 필라멘트에서 발생된 전자들은 2 kV의 전압으로 가속되어 판 모양의 음극 (block cathode)을 가열시킨다. 음극에서 발생된 전자들은 20-35 kV 전압 범위에서 가속되어 금속 표면을 가열시켜 금속 원자증기를 발생시킨다. 전자빔의 출력밀도를 높이기 위해 사용되는 초점코일과 증발용 도가니 위치에 전자빔이 도달할 수 있도록 전자빔 궤적을 2차원 공간적으로 조종하는 편향코일이 한 몸체에 설치되어 있다.

전자총의 필라멘트는 직경이 0.3 mm이고, 텅스텐 (W)과 레늄 (Re)이 각각 80% : 20% 비율로 섞여 있는 전선으로 만들었다. 필라멘트의 외형은 직경이 11 mm인 원주 (circumference) 모양으로 성형되었다. 필라멘트와 음극 사이의 간격은 2.5 mm 이다. 정상적인 동작 조건에서 필라멘트에는 약 18 A의 전류가 흐른다.

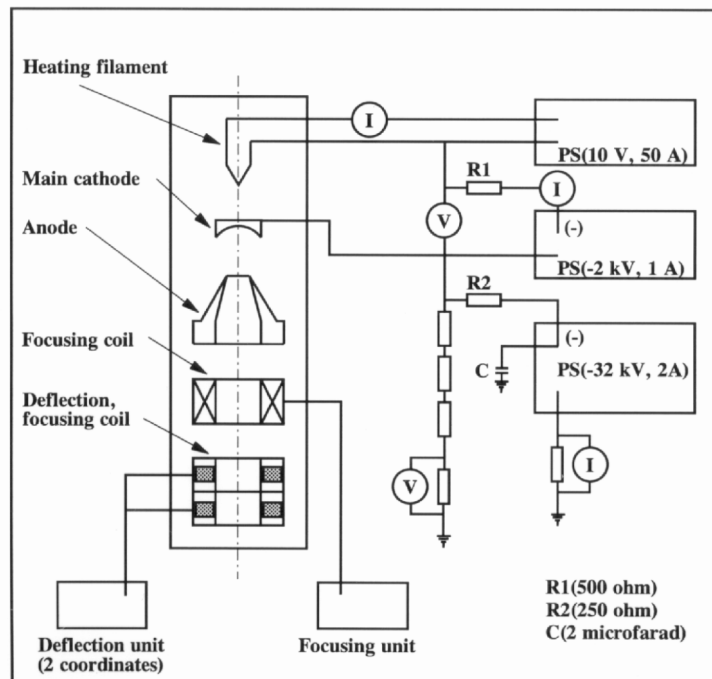


그림 1. 전자총의 간략한 내부 구조 및 전원 연결도.

원판 모양의 음극은 순수한 텅스텐으로 제작되었고, 직경이 12 mm, 길이가 4 mm이다. 필라멘트를 향한 면은 평평하고, 전자가 방출되는 면은 오목한 곡면 (concave surface)이다. 필라멘트에서 방출된 전자에 의해 음극이 가열되는 효율 (cathode heating efficiency)은 가열에 사용되는 전력과 음극에서 방출되는 전류의 비로 정의된다. 전자총이 정상적으로 동작될 때 필라멘트에 가해지는 전력은 약 90 W (18 A, 5 V)이고, 음극 전류는 약 0.5 A이므로 음극 가열 효율은 약 5.5 mA/W이다.

원통 모양의 양극은 순수한 몰리브덴 (molybdenum, Mo)으로 제작되었다. 전자빔의 전류밀도를 높이기 위해서는 음극 정면에서 전기장의 세기가 커야 하므로, 음극과 양극 사이의 간격을 짧게 만드는 것이 유리하다. 20-35 kV의 가속전압 조건에서 음극과 양극의 간격을 10 mm 정도로 유지할 때 고압 방전 현상이 발생하지 않았다. 표 3에 전자총 장치의 주요 제원을 정리하였다.

표 3. 전자총 내부 구성 요소의 주요 제원.

필라멘트	텅스텐 80%, 레늄 20%, 직경 0.3~0.35 mm
음극 (곡면 모양)	텅스텐 100%, 직경 12 mm, 두께 4 mm (전자 방출 곡면 각도 150°)
양극	몰리브덴 100%, 내경 10 mm, 외경 30 mm
필라멘트와 음극 간격	2.5 mm
음극과 양극 간격	10 mm
필라멘트 전류 (전압)	17-26 A (3-7 V)
음극 가열전압 (전류)	0.8-2 kV (1 A)
가속전압 (전류)	15-35 kV (2 A)
전자빔 평균 출력	50 kW
전자빔 초점 크기	직경 6 mm
가속전압 ripple	4% 이하
전자총 동작에 필요한 진공도	2×10^{-4} torr 이하
음극 평균 수명	100 시간

음극의 평균 수명은 주로 가열로 인한 음극 표면의 증발 (evaporation)과 전자빔의 진행 방향에 대해 반대 방향으로 가속되는 시료금속 이온들이 음극 표면을 때려 물리적인 손상을 주는 정도에 따라 좌우된다. 텅스텐 금속의 경우, 10 A/cm^2 의 전류밀도 조건에서 증발이 $\sim 10^{-3} \text{ mm/h}$ 이므로, 증발에 의한 음극 수명의 단축은 심각하지 않다. 이온에 의한 음극의 물리적인 손상은 전자빔의 궤적을 구부려 주는 방법과 음극의 중심 부분에 구멍을 뚫어주는 방법으로 피할 수 있으며, 제작된 음극의 평균 수명은 약 100 시간이다. 음극 표면의 손상은 전자빔 전류밀도의 감소 외에도 전자빔의 공간적인 모양 (beam shaping)에 영향을 준다. 따라서 평균 수명의 70 %에 해당되는 시간을 사용한 음극과 필라멘트는 쉽게 교환될 수 있도록 필라멘트와 음극 몸체가 설계되었다.

3. 전자빔 궤적 제어 장치

전자빔의 궤적 제어 장치는 음극에서 발생되어 가속되는 전자빔의 공간적인 모양을 최적 조건으로 만들고, 동시에 전자빔의 궤적을 진공용기 내부에 설치된 증발용 도가니 위로 유도하기 위해 사용된다. 전자빔의 직경이 작을수록 높은 출력밀도를 사용할 수 있으므로 원자증기의 증발률을 증가시킬 수 있다. 그러나 증발률은 증발시키고자 하는 시료의 물리적, 화학적 성질 및 증발용 도가니의 모양 및 냉각용량에 따라 크게 달라지는 양이므로 시료에 입사되는 전자빔의 출력밀도를 무한정 높인 조건에서 전자빔을 사용할 수는 없다. 예를 들어 조그만 도가니에 담긴 시료에 과도한 출력밀도의 전자빔을 사용할 경우, 시료가 증발되기 이전에 도가니 밖으로 흘러 넘치거나, 불꽃 형태의 덩어리로 튀어 오르는 현상이 발생하게 된다. 따라서 전자빔 궤적 제어 시스템을 사용하여 도가니에 담긴 시료의 표면까지 전자빔을 유도 (beam guidance)하고, 전자빔의 공간적인 모양을 제어할 수 있어야 최대한의 증발률을 달성할 수 있다.

3차원 공간에서 전자빔의 궤적을 제어하기 위한 장치는 초점코일, 편향코일, 주사코일, 헬름홀츠 (Helmholtz) 코일의 네 가지로 구성되어 있다. 헬름홀츠 코일을 제외한 나머지 코일들은 그림 1의 전자총 구조에서 나타낸 것과 같이 전자총과 한 몸체로 결합되어 있다. 초점코일은 내경이 80 mm, 외경이 160 mm이고, 두께 5 mm의 철로 만든 틀 (iron case)에 내장되어 있다. 철로 만든 틀은 자기장의 공간 분포를 보다 균일하게 만들고, 원하는 위치에 코일을 고정하는 역할을 한다. 초점코일용 전류 공급 장치는 0-1 A의 범위에서 전류를 변화시킬 수 있다. 우리 실험의 경우에는 가속전압을 28 kV로 고정시킬 때 약 700 mA, 가속전압이 20 kV일 때 약 500 mA의 전류 조건에서 시료 표면에 전자빔 초점이 맺히게 할 수 있었고, 전자빔의 직경은 약 5-8 mm이다.

정사각형 모양의 폭이 20 mm인 얇은 철판에 전선을 감아 편향코일을 만들었다. 상하, 좌우의 코일이 각각 한 쌍으로 동작하며 각 쌍의 코일에는 같은 방향으로 전류가 흐른다. 같은 방향으로 흐르는 전류가 만드는 자기장 속을 통과하는 전자빔은 자기장의 크기에 따라 진행 방향이 바뀌므로 각 쌍의 코일에 흐르는 전류의 방향과 크기를 변화시켜 전자

빔의 궤적을 2차원 평면에서 제어할 수 있다. 편향코일은 한 방향으로 약 100 mm의 길이로 감겨 있으며, 각 쌍의 코일 양단 저항은 45 오옴이다. 편향코일용 전류 공급 장치는 ± 350 mA의 전류를 흘릴 수 있도록 제작되었다. 전자총 중심 축을 기준으로 전자빔은 약 17° 각도까지 편향될 수 있다.

편향코일의 안쪽에는 두 쌍의 주사코일 (sweeping coil)이 있다. 주사코일의 모양은 타원형으로 장축의 길이가 편향 코일의 길이와 같은 100 mm이다. 편향코일과 마찬가지로 상하, 좌우의 각 쌍이 2차원 평면에서 원하는 방향으로 전자빔을 주사시킬 수 있게 해 준다. 주사코일용 전류 공급 장치는 0-6 A의 전류 범위에서 동작되고, 주사 주파수는 10 kHz이다. 표 4에 각 코일의 제원을 정리하였다.

표 4. 전자빔 궤적 제어 코일의 주요 제원.

초점코일 저항	20 ohm
편향코일 저항	45 ohm
주사코일 저항	0.6 ohm
초점코일에 흐르는 전류 범위	0-1.0 A
편향코일에 흐르는 전류 범위	± 350 mA
주사코일에 흐르는 전류 범위	0-6 A
초점코일 외형	내경 80 mm, 외경 160 mm
편향코일 외형	길이 100 mm, 넓이 30 mm
주사코일 외형	타원형 장축 외경 100 mm
주사 주파수	10 kHz
편향각	전자총 중심 축선에서 17°

편향코일은 전자빔이 진행하는 방향에 수직인 평면 위에서 전자빔의 위치를 원하는 지점에 유도해 주는 역할을 하지만 직선 방향의 위치 제어에 국한된다. 즉, 전자빔의 진행 방향을 그림 2에 나타낸 것과 같이 Z 방향이라고 했을 때, X-Y 평면 위의 원하는 지점에 전자빔이 위치하도록 할 수 있지만, 시료표면에 전자빔이 입사되는 각도를 고려한 3차원 곡선 운동을 제어할 수가 없다는 뜻이다. 시료의 증발 효율을 좋게 하기 위해서는 전자빔이 그림 2의 X-Z 평면과 평행하게 놓인 시료의 표면에 가능한 수직으로 입사해야 한다.

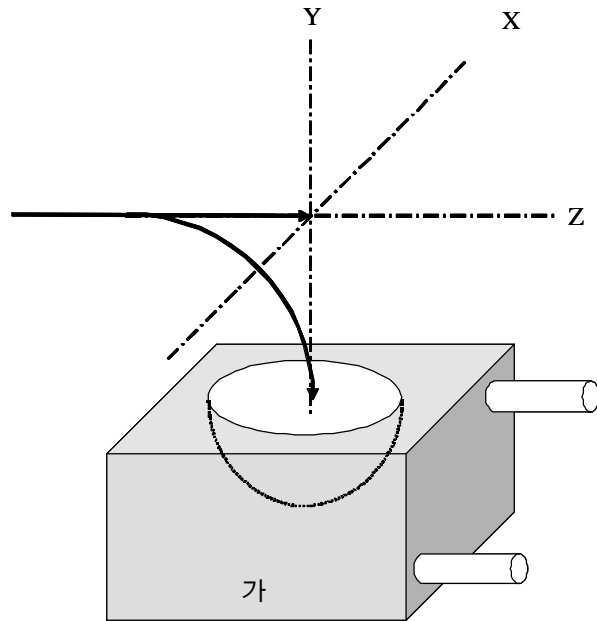


그림 2. 전자빔의 3차원 궤적. 편향코일만 사용하면 그림의 X-Y 평면에서 직선 방향으로만 전자빔의 위치를 제어할 수 있다. 따라서 곡선 운동을 포함한 전자빔의 3차원적 제어를 위해서는 별도의 헬름홀츠 코일을 사용해야 한다.

전자빔의 직선 운동을 곡선 운동으로 바꾸기 위해서 진공용기 내부에 헬름홀츠 코일을 설치하였다. 코일의 외경은 710 mm, 내경은 460 mm이고, 코일 간격은 500 mm이다. 전자빔의 곡선 운동에 필요한 자기장의 크기는 약 40-50 가우스 정도이고, 코일에는 약 250-400 A의 전류가 흘러야 한다. 전류에 의한 열을 식히기 위해서 코일 내부에는 냉각수가 순환될 수 있도록 하였다. 코일은 단면이 10 mm x 4 mm인 직사각형 형태로 16번 감겨 있으며, 총 2 줄이다. 코일 전류 공급 장치의 최대 용량은 1000 A (20 V)이다. 코일 전류 공급 장치에는 사용하는 전류의 최대, 최소 값을 설정할 수 있도록 하였고, 이 값을 계측할 수 있는 장치를 별도로 만들어 전자빔 전원장치의 음극 가열용 전원 공급기와 연결하였다. 이것은 안전 장치의 일종으로 헬름홀츠 코일을 사용해 전자빔의 궤적을 제어할 때 전자빔의 위치가 원하는 지점에서 벗어나면 전자빔 전원을 차단하는 역할을 한다.

헬름홀츠 코일에 300 A의 전류를 흘렸을 때 진공용기 내부의 자기장 분포 측정 결과를 그림 3에 보였다. 그림 3의 수평축에서 -15 cm인 지점, 수직축의 -2.5~-16.5 cm 위치에는 자기장 차폐관이 설치되어 있다. 그림 3의 수평축 원점은 전자빔 진행 방향에서 본 증발용 도가니의 중앙 지점, 수직축 원점은 원자증기 진행 방향에서 본 헬름홀츠 코일의 축 중심을 의미하고 있다. 자기장의 크기는 그림에서 숫자로 표시되어 있으며, 단위는 가우스 (Gauss)이다. 원점의 자기장 크기는 300 A 전류 조건에서 55 가우스이다. 수평축

방향으로 측정된 자기장 분포의 중앙은 코일의 중앙 위치와 일치하지 않고, 약 3~5 cm 오른쪽에 위치하고 있다. 이는 자기장 차폐관의 영향 때문이다. 수평축의 -15 cm에 위치한 자기장 차폐관의 영향은 그림의 왼쪽 부분에 보이는 조밀한 등고선에서도 볼 수 있다. 차폐관 근처에서는 자기장의 크기가 줄어들고, 따라서 자기장 기울기 (gradient)의 변화가 심하기 때문에 그림에서 보인 것과 같은 조밀한 등고선이 형성되고 있다. 그림 3에서 곡선 화살표는 전자빔의 궤적을 의미한다. 편향코일에 흐르는 전류 크기에 따라 자기장 차폐관 출구에서 나오는 전자빔의 초기 위치가 약 3~5 cm 범위에서 이동하는 것을 확인했으며, 결과적으로 그림 3에서 보인 화살표와 같은 궤적으로 진행되는 전자빔을 시료 표면에 입사시킬 수 있었다. 그림의 두 화살표는 자기장의 크기가 고정된 상태에서 전자빔의 초기 위치가 편향코일 전류의 크기에 따라 다른 지점에 위치했을 경우, 전자빔의 궤적이 달라지는 상황을 표현하고 있다.

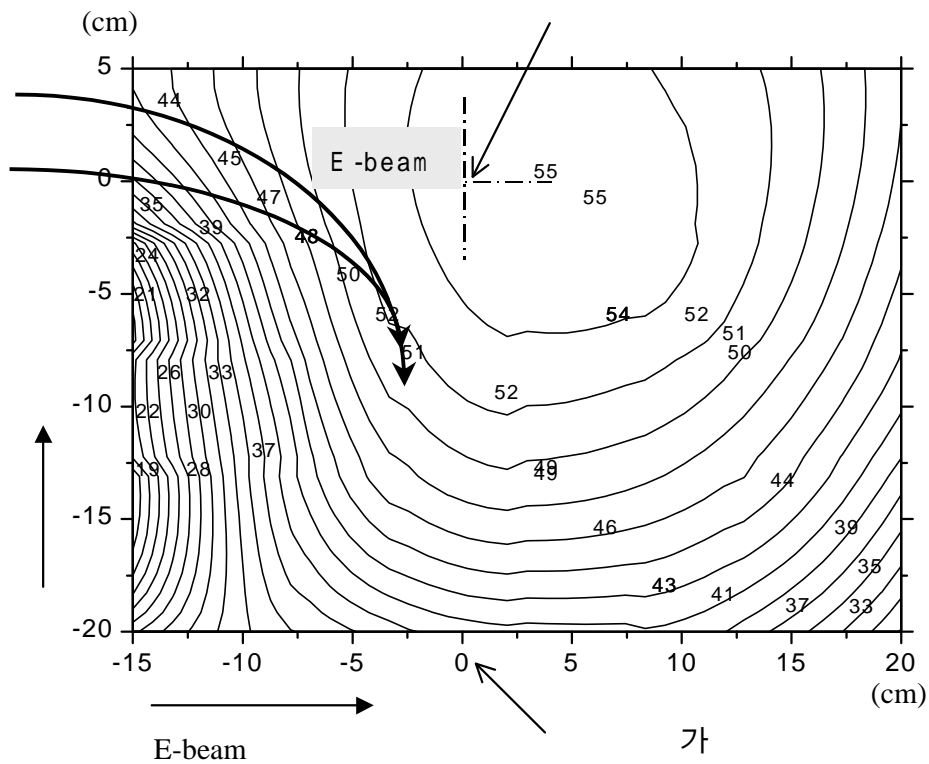


그림 3. 300 A의 전류를 헬륨홀츠 코일에 흘렸을 때 측정된 자기장의 분포. 그림의 평면은 그림 2에서 Y-Z 평면을 뜻한다. 그림 속의 숫자는 자기장의 크기로서 단위는 가우스이다. 수평축은 전자빔의 진행 방향이며, 수평축의 원점은 증발용 도가니의 중앙 (코일과 코일 사이의 중앙)을 뜻한다. 수직축의 원점은 시료의 표면에서 200 mm 위치점으로 코일의 축 중심 위치를 뜻한다. 전자빔 비행 유도관 (자기장 차폐관)의 영향으로 그림의 왼쪽 부근에서는 밀집한 등고선 분포가 보이고 있다.

4. 가돌리늄 원자증기의 증발률 측정

원자증기 발생 장치의 성능은 원자증기의 증발률 (evaporation rate)로 평가되며, 증발률은 시간당 증발된 금속시료의 무게로 정의된다. 증발률에 영향을 주는 여러 요인이 있으나, 그 중에서도 가장 중요한 것은 전자빔의 출력밀도이다. 금속시료의 포화 증기압 (saturated vapor pressure)은 전자빔이 집중되는 시료 표면의 온도를 결정하며 온도가 증가함에 따라 증발률은 지수함수 꼴로 증가하므로, 전자빔의 출력밀도를 적절히 제어함으로써 증발 장치의 효율을 증가시킬 수 있다. 실험에 사용된 전자총은 전자빔의 직경을 6 mm로 제어할 경우에 최대 250 kW/cm^2 에 해당되는 출력밀도를 시료 표면에 집중시킬 수 있다.

그림 4에 가돌리늄과 지르코늄 (Zr) 금속의 증발률을 측정한 결과를 보였다. 지르코늄 금속의 녹는 온도와 끓는 온도는 각각 2125 K, 4650 K이며, 표 2에 보인 가돌리늄 금속의 온도 1586 K, 3539 K에 비해 매우 높아 금속증기를 발생시키는데 더 큰 전자빔 출력이 요구된다. 가연성 독물질로 사용될 수 있는 대부분의 란탄족 원소들은 지르코늄 금속에 비해 용융 특성이 좋기 때문에 그림 4에서 보인 것과 같이 가돌리늄과 지르코늄 금속의 증발 특성을 비교한 결과는 본 연구에서 개발된 금속 증기발생기를 가연성 독물질 재료로 사용될 수 있는 란탄족 원소를 증발시키는 연구에 참고자료로 이용할 수 있다. 지르코늄 금속을 증발시킬 경우에는 전자빔의 가속전압을 -25 kV, Gd 금속의 증발에는 -20 kV의 가속전압을 사용하였다. 가속전압이 서로 다른 이유는 시료 표면이 패여 도랑 (trench)이 생기는 조건을 피하려고 했기 때문이다.

증발률은 한 시간 동안 시료 금속을 증발시킨 후, 증발 전과 증발 후의 시료 무게 차이를 비교하는 방법으로 측정하였다. 전자빔의 주사 길이를 40 mm 정도로 고정한 상태에서 증발률을 측정하였고, 이는 Gd-155, Gd-157 핵종 이온을 추출할 때와 동일한 조건에서 시료의 증발률을 결정하기 위한 것이다. 전자빔의 출력은 40 kW 까지 사용하였고, 출력의 안정도는 40 kW에서 10% 미만이다. 지르코늄 금속의 경우, 40 kW의 전자빔 출력을 사용했을 때 약 430 g/h의 증발률이 측정되었다. 가돌리늄 금속의 경우, 20 kW의 출력에서 약 1000 g/h의 증발률이 측정되었다. 상용의 20 kW급 횡단 방식 전자총을 사용한 경우에는 10 kW 출력에서 약 130 g/h의 증발률이 측정되었다.

그림 4의 결과는 동일한 금속시료를 증발시킨다고 하더라도 전자총의 종류, 증발용 도가니의 용량, 전자빔 궤적 제어 등의 조건에 따라 증발 효율이 얼마나 달라지는지를 보이고 있다. 상용의 20 kW급 전자총 증발 장치가 160 cc의 도가니 용량을 가지고 있음에 비해 제작된 증발 장치는 700 cc 용량의 도가니를 사용하였다. 가돌리늄 금속의 경우, 700 cc 용량의 도가니에 사용할 수 있는 전자총 출력은 20 kW 이하로 제한되어야 한다는 것이 밝혀졌다. 앞서 설명한 것과 같이 더 이상의 출력이 집중되면 액체상의 끓는 시료가 도가니 밖으로 넘쳐흐르는 현상 (splash)과 함께 시료 표면에 도랑이 형성되어 원자증기가 공간적으로 균일하게 퍼지는 것을 방해하기 때문이다. 따라서 가돌리늄 금속의 증발률을 증가시키기 위해서는 증발용 도가니의 용량이 두 배 이상 커야함을 알 수가 있다.

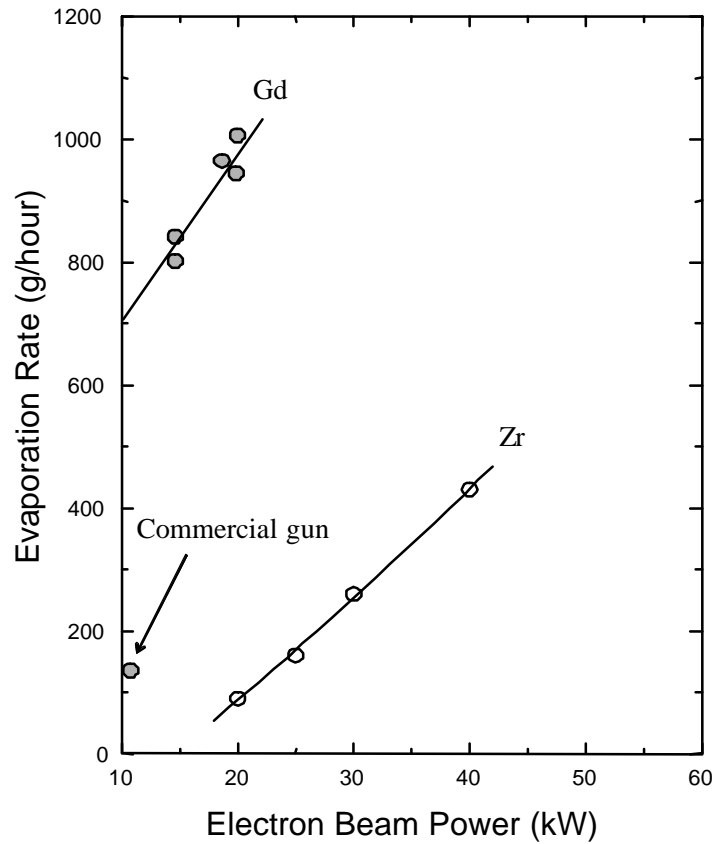


그림 4. 전자빔의 출력에 따른 가돌리늄 금속과 지르코늄 금속의 증발률. 증발용 도가니의 용량은 700 cc, 전자빔 주사길이는 40 mm인 조건이다.

5. 결 론

평균출력이 50 kW급인 전자총을 사용한 금속증기 발생 장치를 제작하였다. 가돌리늄 금속을 대상으로 20 kW의 전자빔 출력에서 1000 g/h의 증발률이 달성되었다. 개발된 금속증기 발생 장치는 레이저 분광 장치 및 이온 추출 장치와 함께 Gd-155, Gd-157 핵종의 성분비가 변화된 가연성 가돌리니아 독물질 제조에 사용될 수 있으며 궁극적으로 핵연료의 장주기 동작에 응용될 수 있다.

6. 참고문헌

- [1] 이정찬 외, KAERI/RR-2155/2000 (2001).
- [2] J.-P. A. Reiner and M. L. Grossbeck, ORNL/TM-2001/238 (2001).