

전자총 시스템 제작과 이를 이용한 고융점 금속 증발에 관한 연구

정의창* · 노시표 · 김철중

한국원자력연구소 양자광학부
(논문접수일 : 2002년 9월 11일)

Study on the evaporation of high melting temperature metal by using the manufactured electron beam gun system

E. C. Jung†, S. P. Rho, and Cheol-Jung Kim

Laboratory for Quantum Optics, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received September 11, 2002)

요 약

50 kW급 출력의 전자빔을 발생시킬 수 있는 축선 방식 전자총(axial electron beam gun)과 전원장치를 제작하였다. 전자총은 전자빔 발생장치와 전자빔 궤적제어장치로 이루어졌다. 전자빔 발생장치는 필라멘트와 음극(cathode), 양극(anode)으로 구성되었고 전자빔의 최대전류는 2 A, 가속전압은 평균 25 kV이다. 전자빔 궤적제어장치는 전자빔의 크기를 조절하는 초점(focusing)코일과 전자빔의 방향을 조절하는 편향(deflection)코일 및 주사(scanning)코일로 구성되었다. 전자총과 별개로 진공용기 내부에 Helmholtz 코일을 설치하여 시료의 표면에 입사되는 전자빔의 입사각도를 최적화시켰다. 각 부분의 동작 특성을 측정된 결과와 제작된 전자총으로 고융점 원소인 지르코늄(zirconium, Zr)과 가돌리늄(gadolinium, Gd) 금속을 증발시킨 결과를 정리하였다.

주제어 : 전자총, 증발, 지르코늄

Abstract

An axial electron beam gun system, which emits the electron beam power of 50 kW, has been manufactured. The electron beam gun consists of two parts. One is the electron beam generation part, including the filament, cathode, and anode. The maximum beam current is 2 A and the acceleration voltage is 25 kV. The other part includes the focusing-, deflection-, and scanning coils. The beam diameter and beam trajectory can be controlled by these coils. The characteristic of each part is measured for the optimum condition of evaporation process. Moreover, Helmholtz coil is installed inside the vacuum chamber to adjust the incident angle of the beam to the melting surface for the maximum evaporation. We report on the evaporation rates for zirconium(Zr) and gadolinium(Gd) metals which have the high melting temperatures.

Key Words : Electron beam gun, Evaporation, Zr

1. 서 론

전자빔을 이용하여 금속을 증발(evaporation), 용접(welding), 가공(machining)하는 기술은 여러 산업분

야에서 널리 활용되고 있는 기술이다 [1,2]. 원자력 산업 분야에서는 원자로용 핵연료봉 제조에 전자빔 용접기술이 사용되고 있다 [3,4]. 전자빔 증발기술은 현재는 활용되고 있지 않지만 그 활용 가능성은

† E-mail : ecjung@kaeri.re.kr

매우 높다고 판단된다. 핵연료의 피복관 재료로 사용되는 Zr, 핵연료 가연성 독물질 (burnable poison) 재료로 사용되고 있는 Gd 등의 고융점 금속을 전자빔 용융 또는 증발을 통해 정제할 경우 재질의 순도를 높일 수 있기 때문이다.

이 논문에서는 고융점 금속 증발용 전자총 시스템을 제작하고, 그 동작 특성을 조사한 결과를 보고한다. 상용으로 구입할 수 있는 전자총 [5]은 전자빔 가속전압 (acceleration voltage)이 대개 10 kV 또는 15 kV로 고정되어 있는데 비해 우리가 제작한 전자총 시스템은 가속전압을 15-35 kV 범위에서 변화시킬 수 있고, 최대전류도 2 A까지 흘릴 수 있기 때문에 Zr, Gd 등의 고융점 금속을 증발시키는데 적합하다. 표 1에 Zr, Gd 금속의 열물리적 특성을 정리하였다 [6]. 표에서 보인 것과 같이 녹는 온도가 1500 K 이상인 금속을 증발시킬 경우에는 저항가열 (resistive heating) 방법보다는 전자빔을 사용한 직접적인 가열 방법을 사용하는 것이 효율적이다.

제작된 전자총 시스템의 구조, 재질 및 전자빔 제적제어, 전자빔의 동작 특성에 관해 설명하고, 제작된 전자총을 사용하여 Zr, Gd 두 금속을 증발시킨 결과에 대해 논의한다.

표 1. Zr, Gd 금속의 열물리적 특성.

성질	Zr	Gd
Melting Temperature	2125 K	1586 K
Boiling Temperature	4650 K	3539 K
Density	6506 kg/m ³	7900 kg/m ³
Thermal Conductivity	22.7 W m ⁻¹ K ⁻¹	10.6 W m ⁻¹ K ⁻¹
Vapor Pressure (3000 K)	0.2 Torr	96.3 Torr
Thermal Expansion Coefficient	5.78 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹	8.6 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹

2. 전자총 및 전원장치

전자총은 내부 구조에 따라 축선 (axial) 방식과 횡단 (transverse) 방식의 두 종류로 구분된다 [7]. 횡단

방식은 일반적으로 증발 도가니 (crucible)와 전자빔 제적유도용 영구자석을 포함한 전체 증발장치를 한 몸체로 구성할 수 있기 때문에 비용이 싸고, 진공용기 내부의 공간을 활용하는데 유리한 점이 있다. 이 방식의 전자총은 상용으로 구입해 사용할 수 있으나 전자빔의 출력이 작고, 도가니에 시료를 적재할 수 있는 용량이 작기 때문에 대량의 금속을 증발하는 용도로 사용하는 데에는 한계가 있다. 반면에 축선 방식의 전자총은 전자총과 증발 도가니를 별개로 설치하여 운용할 수 있기 때문에 전자빔의 조건 (출력밀도, 전자빔 주사길이 등)을 각각 최적화시킬 수 있다는 장점이 있다.

그림 1에 전자총의 구조 및 전원장치에 필요한 제원을 간단하게 나타내었다. 필라멘트에서 발생된 전자들은 2 kV의 전압으로 가속되어 판 모양의 음극 (block cathode)을 가열시킨다. 음극에서 발생된 전자들은 15-35 kV 전압 범위에서 양극방향으로 가속되어 금속표면을 가열시키고, 그 결과로 금속증기를 발생시킨다. 전자빔의 직경을 조절하기 위한 초점코일과 전자빔 진행방향에 수직인 평면상에서 전자빔 위치를 조종하는 편향코일이 한 몸체에 설치되어 있다.

전자총의 필라멘트는 직경이 0.3 mm이고, 텅스텐 (W)과 레늄 (Re)이 각각 80%, 20%의 비율로 섞인 전선으로 만들었다. 필라멘트는 두 가닥으로 꼬인 상태로 직경이 11 mm인 원주 (circumference) 모양으로 성형되었다. 필라멘트와 음극 사이의 간격은 2.5 mm

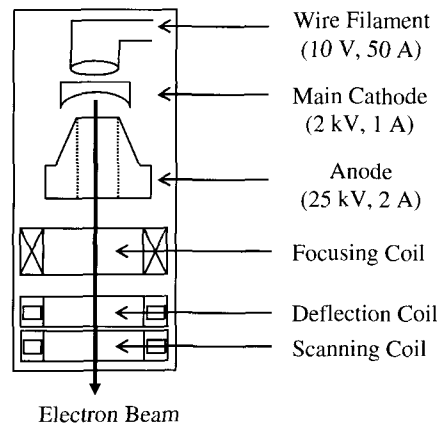


그림 1. 전자총의 내부 구조.

이다. 정상적인 동작조건에서 필라멘트에는 약 18 A의 전류가 흐른다.

원판 모양의 음극은 순수한 텅스텐으로 제작되었고, 직경이 12 mm, 길이가 4 mm이다. 필라멘트를 향한 면은 평평하고, 전자가 방출되는 면은 오목한 곡면 (concave surface)이다. 원통 모양의 양극은 순수한 몰리브덴 (Mo) 금속으로 제작되었다. 전자빔의 전류밀도를 높이기 위해서는 음극 정면에서 전기장의 세기가 커야 하므로, 음극과 양극 사이의 간격을 짧게 만드는 것이 유리하다. 20-35 kV의 가속전압을 사용할 때 음극과 양극의 간격을 10 mm 정도로 유지하여 고전압에 의한 방전을 피할 수 있었다. 표 2에 전자총 장치의 주요 제원을 정리하였다.

음극의 평균수명은 주로 가열로 인한 음극 표면의 증발 (evaporation)과 전자빔의 진행방향에 대해 반대방향으로 가속되는 금속이온이 음극표면을 때려 물리적인 손상을 주는 정도에 따라 좌우된다. 텅스텐 금속의 경우, 10 A/cm²의 전류밀도 조건에서 표면증발이 시간당 10⁻³ mm [8]이므로 증발에 의한 음극수명의 단축은 심각하지 않다. 이온에 의한 음극의 물리적인 손상은 전자빔의 궤적을 곡선으로 구부러 주는 방법과 음극의 중심 부분에 구멍을 뚫어주는 방법으로 피할 수 있다. 음극표면의 손상은 전자빔 전류밀도의 감소 외에도 전자빔의 공간적인 모양에 영향을 준다. 따라서 평균수명의 70%에 해

당되는 시간을 사용한 후, 음극과 필라멘트를 쉽게 교환할 수 있도록 필라멘트와 음극을 한 몸체로 제작하였다. 제작된 음극의 평균수명은 100 시간이다.

3. 전자빔 궤적제어장치

전자빔의 궤적제어장치는 음극에서 발생되어 양극으로 가속되는 전자빔의 초점을 조절함과 동시에 전자빔의 궤적을 진공용기 내부의 시료표면으로 유도하기 위해 사용된다. 전자빔의 직경이 작을수록 높은 출력밀도를 사용할 수 있으므로 증발률 (evaporation rate)을 증가시킬 수 있다. 그러나 증발률은 증발시 키고자 하는 시료의 물리적, 화학적 성질 및 증발용도가니의 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 (splashing), 불꽃 형태의 덩어리로 튀어 오르는 현상 (spattering)이 발생한다 [7]. 따라서 도가니에 담긴 시료의 표면까지 전자빔의 궤적을 유도하는 과정에서 전자빔의 공간적인 모양(전자빔 직경 및 주사길이)을 제어하여 출력밀도를 최적조건으로 유지하는 것이 필수적이다.

전자빔의 궤적을 제어하기 위한 장치는 초점코일, 편향코일, 주사코일, Helmholtz 코일의 네 가지로 구성되어 있다. Helmholtz 코일을 제외한 나머지 코일들은 그림 1의 전자총 구조에서 나타낸 것과 같이 한 몸체에 설치되어 있다.

표 3에 각 코일의 주요 제원을 정리하였다. 초점코일은 내경이 80 mm, 외경이 160 mm이고, 두께 5 mm의 철로 만든 틀 (iron case)에 내장되어 있다. 이 틀은 자기장의 공간분포를 보다 균일하게 만들고, 원하는 위치에 코일을 고정시키는 역할을 한다. 초점코일용 전원은 0-1.0 A의 범위에서 전류를 변화시킬 수 있다. 전자빔의 초점이 잘 맞았을 경우에 직경은 약 6 mm이다.

폭이 30 mm, 길이 100 mm인 얇은 철판에 전선을 감아 정사각형 구조의 편향코일을 만들었다. 상하, 좌우의 코일이 각각 한 쌍으로 동작하며 각 쌍의 코일에는 같은 방향으로 전류가 흐른다. 같은 방

표 2. 전자총 부품의 재질 및 제원.

구성부품	재질 및 제원
필라멘트	W(80%), Re(20%)
음극	W(100%), 직경 12 mm, 두께 4 mm, 전자방출 곡면각도 150°
양극	Mo(100%), 내경 10 mm, 외경 30 mm
필라멘트전류(전압)	17-26 A(3-7 V)
음극전압(전류)	0.8-2 kV(최대 1 A)
가속전압(전류)	15-35 kV(최대 2 A)
전자빔 평균출력	50 kW
전자빔 직경	6 mm
가속전압 ripple	2% 이하
진공도	2 × 10 ⁻⁴ Torr 이하
음극 평균수명	100 시간

표 3. 전자빔 궤적제어장치 주요 제원.

분류	주요 제원
초점코일 저항	20 Ω
초점코일 외형	내경 80 mm, 외경 160 mm
초점코일 전류	0-1.0 A
편향코일 저항	45 Ω
편향코일 외형	길이 100 mm, 넓이 30 mm
편향코일 전류	± 0.35 A
주사코일 저항	0.6 Ω
주사코일 외형	타원장축 외경 100 mm
주사코일 전류	0-6.0 A
주사 주파수	10 kHz
편향각도	전자빔 축선에서 17°

향으로 흐르는 전류가 만드는 자기장 속을 통과하는 전자빔은 자기장의 크기에 따라 진행방향이 바뀌므로 각 쌍의 코일에 흐르는 전류의 방향과 크기를 변화시킴으로써 전자빔의 진행방향에 수직인 평면상에서 전자빔의 위치를 제어할 수 있다. 편향코일용 전원은 ±0.35 A의 전류를 공급할 수 있으며 전자빔이 진행되는 축을 기준으로 편향이 가능한 각도는 최대 17°이다.

편향코일의 안쪽에는 두 쌍의 주사코일을 설치하였다. 주사코일의 모양은 타원형으로 장축의 길이가 편향코일의 길이와 같은 100 mm이다. 편향코일과 마찬가지로 상하, 좌우의 각 쌍이 2차원 평면에서 원하는 방향으로 전자빔을 주사시킬 수 있게 해 준다. 주사코일용 전원은 0-6.0 A의 전류를 공급할 수 있고 주사 주파수는 10 kHz이다.

편향코일은 전자빔이 진행되는 방향에 수직인 평면상에서 전자빔의 위치를 원하는 지점에 유도해주는 역할을 하지만 평면상에서의 위치 제어에 국한된다. 즉, 전자빔의 진행방향을 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. 따라서 곡선궤적을 포함한 전자빔의 3차원 궤적 제어를 위해서는 별도로 설치한 Helmholtz 코일을 사용해야 한다.

전자빔의 2차원 직선궤적을 3차원 곡선궤적으로 바꾸기 위해서 진공용기 내부에 설치된 Helmholtz

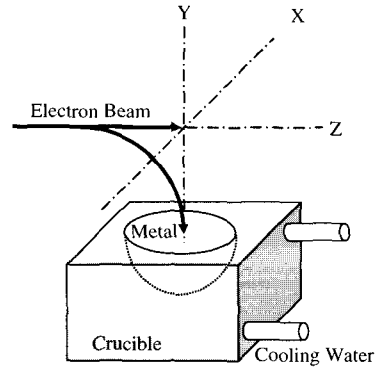


그림 2. 전자빔의 3차원 궤적. 편향코일은 그림의 X-Y 평면에서 전자빔의 직선 방향을 조정한다.

코일은 외경이 710 mm, 내경이 460 mm이고, 코일 간격은 500 mm이다. 코일은 단면이 10 mm × 4 mm 인 직사각형 형태로 16번 감겨 있으며, 총 2 줄이다. 전자빔의 곡선궤적을 유도하기 위해 필요한 자기장의 크기는 약 40-50 가우스 정도이고, 코일에는 약 250-400 A의 전류가 흘러야 한다. 코일전류용 전원의 최대용량은 1000 A (20 V)이다. 전류에 의한 열을 식히기 위해서 코일 내부에는 냉각수가 순환될 수 있도록 하였다. 코일전류 전원장치에는 사용이 가능한 전류의 최대, 최소 값을 설정할 수 있도록 하였고, 이 값을 측정할 수 있는 장치를 별도로 만들어 전자총의 음극 전원장치와 연결하였다. 이것은 안전장치의 일종으로 Helmholtz 코일의 전류가 설정된 초기 값을 벗어나는 경우에 전자빔의 위치가 증발용 도가니가 아닌 다른 지점으로 빔나가면 전자총 음극 전원을 차단하여 진공용기 시스템이 파괴되는 것을 방지하는 역할을 한다.

Helmholtz 코일에 300 A의 전류를 흘렸을 때 진공용기 내부의 자기장 분포를 측정한 결과를 그림 3에 보였다. 그림 3의 수평축(전자빔 진행방향)에서 -15 cm인 지점, 수직축(급속증기 진행방향)의 -2.5~-16.5 cm 위치에는 자기장 차폐관이 설치되어 있다. 자기장 차폐관은 전자빔의 직선궤적을 증발도가니 근처까지 유도함으로써 곡선궤적의 회전 반경을 최소화하기 위한 용도로 설치된 것이다. 순수한 철(Fe)로 제작되었고 직경이 130 mm, 두께 2 mm인 원통 모양이다. 차폐관 속에서 전자빔은 Helmholtz 코일의 영향을 받지 않는다. 그림 3의 수평축 원점은

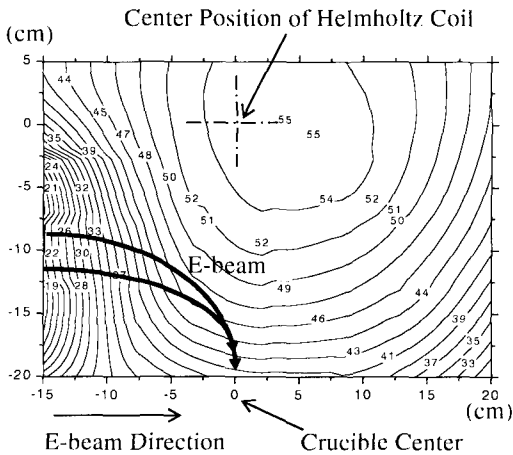


그림 3. 300 A의 전류를 Helmholtz 코일에 흘렸을 때 측정된 자기장의 분포 및 전자빔 궤적 계산. 그림의 평면은 그림 2의 Y-Z 평면을 뜻한다. 그림의 숫자는 자기장의 크기로서 단위는 가우스이다. 수평축 원점은 도가니의 중앙, 수직축 원점은 시료의 표면에서 20 cm 위 지점이다. 자기장 차폐관의 영향으로 그림의 왼쪽 부근에서는 등고선 분포가 조밀하다.

증발용 도가니의 중앙 지점, 수직축 원점은 Helmholtz 코일의 축 중심을 의미하고 있다. 자기장의 크기는 그림에서 숫자로 표시되어 있으며, 단위는 가우스(G)이다. 원점에서의 자기장 크기는 55 가우스이다. 수평축 방향으로 자기장 분포의 중심은 원점과 일치하지 않으며 약 3.5 cm 오른쪽에 위치하고 있다. 이는 자기장 차폐관의 영향 때문이다. 수평축의 -15 cm 지점에 위치한 자기장 차폐관의 영향은 그림의 왼쪽 부분에 보이는 조밀한 등고선에서도 볼 수 있다. 차폐관 근처에서는 자기장의 크기가 줄어들고, 따라서 자기장 기울기의 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 위치를 약 3-5 cm 범위에서 이동시킬 수 있으며, 결과적으로 그림 3에서 보인 화살표와 같은 궤적으로 진행하는 전자빔을 시료표면에 입사시킬 수 있다. 그림의 두 화살표는 자기장의 크기가 고정된 조건에서 전자빔의 초기 위치가 편향코일 전류의 크기에 따라 다른

지점에 위치했을 경우, 전자빔의 궤적이 달라지는 상황을 표현하고 있다.

4. 금속증기 증발률 측정

전자빔 증발장치 성능은 금속증기의 증발률로 평가되며 증발률은 시간당 증발된 금속시료의 무게로 정의된다. 증발률에 영향을 주는 여러 요인이 있으나 가장 중요한 것은 전자빔의 출력밀도이다. 금속시료의 포화 증기압 (saturated vapor pressure)은 전자빔이 집중되는 시료표면의 온도를 결정하며 온도가 증가함에 따라 증발률은 지수함수 꼴로 증가하므로, 전자빔의 출력밀도를 적절히 제어함으로써 증발장치의 효율을 증가시킬 수 있다. 실험에 사용된 전자총은 전자빔의 직경을 6 mm로 제어할 경우에 최대 250 kW/cm²에 해당되는 출력밀도를 시료표면에 집중시킬 수 있다.

그림 4에 Gd 금속과 Zr 금속의 증발률을 측정된 결과를 보였다. Zr 금속의 녹는 온도와 끓는 온도는 표 1에 보인 바와 같이 Gd 금속에 비해 매우 높아 금속증기를 발생시키는데 더 큰 전자빔 출력이 요구된다. Zr 금속을 증발시킬 경우에는 전자빔의 가속전압 (V_{acc})을 -25 kV, Gd 금속의 증발에는 -20 kV의

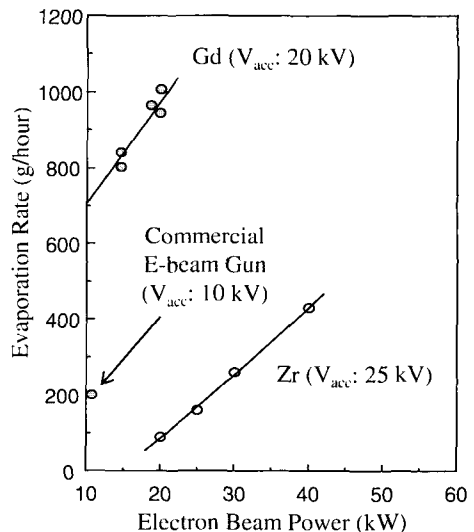


그림 4. 전자빔의 출력에 따른 Gd 금속과 Zr 금속의 증발률(도가니 용량 : 700 cc, 전자빔 주사길이 : 40 mm).

가속전압을 사용하였다. 가속전압을 달리 사용한 이유는 시료표면에 깊은 도랑 (trench)이 생기는 조건을 피하려고 했기 때문이다. Gd 금속의 경우에는 20 kV 이상의 가속전압을 사용했을 때 시료표면에 금방 도랑이 형성되므로 장시간 증발시킬 수가 없었다.

증발물은 한 시간 동안 시료를 증발시킨 후, 증발 전과 증발 후의 시료 무게 차이를 비교하는 방법으로 측정하였다. 전자빔의 주사길이는 40 mm로 고정시켰다. 전자빔의 출력은 40 kW 까지 사용하였고, 출력의 안정도는 40 kW에서 10% 미만이다. Zr 금속의 경우, 40 kW의 전자빔 출력을 사용했을 때 약 430 g/h의 증발률이 측정되었다. Gd 금속의 경우, 20 kW의 출력에서 약 1000 g/h의 증발률이 측정되었다. 상용의 20 kW급 횡단 방식 전자총 (Airco Temescal Co., Model SFIH-270-3)이 설치된 별개의 증발 시스템에서 Gd 금속을 증발시킨 결과를 함께 나타내었다. 10 kW의 전자빔 출력에서 약 200 g/h의 증발률이 측정되었다.

그림 4의 결과는 동일한 Gd 금속시료를 증발시킨다고 하더라도 전자빔의 가속전압, 증발 도가니의 용량, 전자빔 궤적제어 등의 조건에 따라 증발효율이 얼마나 달라지는지를 보이고 있다. 상용의 20 kW급 전자총 증발장치가 160 cc의 도가니 용량을 가지고 있음에 비해 제작된 증발장치에는 700 cc 용량의 도가니가 설치되었다. Gd 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 액체상 (liquid phase)의 끓는 시료가 도가니 밖으로 넘쳐흐르는 현상과 함께 시료표면에 도랑이 형성되어 금속증기가 공간적으로 균일하게 퍼지는 것을 방해하기 때문이다. 따라서 Gd 금속의 증발률을 증가시키기 위해 더 높은 전자빔 출력을 사용하려면 증발 도가니의 용량을 두 배 이상 증가시켜야 한다는 것을 알았다.

5. 결 론

평균출력이 50 kW급인 축선 방식 전자총 시스템을 사용한 금속증기 발생장치를 제작하였다. 전자빔의

3차원 곡선궤적을 제어하기 위해 초점코일, 편향코일, 주사코일, Helmholtz 코일이 사용되었고, 각 코일의 특성이 조사되었다.

녹는 온도가 1500 K 이상인 Gd, Zr 금속을 대상으로 증발 특성을 조사하였다. 제작된 증발장치에서 Gd 금속의 증발률은 20 kW의 전자빔 출력에서 1000 g/h이고, Zr 금속의 증발률은 40 kW의 출력에서 430 g/h이다.

개발된 전자총 시스템은 원자력산업 분야에서 핵연료 피복관 재질인 Zr 금속의 고순도 정제 및 Gd 금속 핵종의 성분비가 변화된 가연성 독물질 재료 제조에 사용될 수 있다. 원자력산업에 널리 사용되는 대부분의 란타늄 원소들은 Zr 금속에 비해 용융 특성이 좋기 때문에 그림 4에서 보인 것과 같이 Gd 금속과 Zr 금속의 증발 특성을 비교한 결과는 고용점 란타늄 금속을 증발시키는 연구에 참고자료로서 활용될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Siegfried Schiller, Ullrich Heisig, and Siegfried Panzer, *Electron Beam Technology*, (Wiley, New York. 1982), Chapt. 4-6.
- [2] Robert Bakish, *introduction to Electron Beam Technology*, (Wiley, New York. 1962), Chapt. 7-9.
- [3] 김창규 등, 한국원자력연구소 보고서, KAERI/RR-1756/96 (1996).
- [4] 권영각 등, 한국원자력연구소 보고서, KAERI/CM-089/94 (1995).
- [5] Temescal, Part of Airco Coating Technology, A division of the BOC Group, Inc., Systems and Components Catalog, 2700 Maxwell Way, P.O. Box 2529, Fairfield, CA 94533-0252.
- [6] The Nilaco Corporation, Materials Catalog No 26 (1996-1997).
- [7] Siegfried Schiller, Ullrich Heisig, and Siegfried Panzer, *Electron Beam Technology*, (Wiley, New York. 1982), Chapt. 3.
- [8] Siegfried Schiller, Ullrich Heisig, and Siegfried Panzer, *Electron Beam Technology*, (Wiley, New York. 1982), p. 54.