

## 갈륨의 고정점을 이용한 정밀 온도제어

김태호\*(한국과학기술원 기계공학과), 김승우(한국과학기술원 기계공학과)

### Precise Temperature Control by Locking on the Fixed point of Gallium

T. Keem(Mechanical Eng. Dept. KAIST), S.-W. Kim(Mechanical Eng. Dept., KAIST)

#### ABSTRACT

The new enhanced method of temperature control need not any reference temperature, the system itself can find the melting temperature of gallium as a reference point by dithering input heat flux. If gallium is in melting state, the latent heat of fusion works, so gallium temperature does not change on dithering input heat flux. Also, the control method can determine the state of gallium; solid, liquid, or melting state by investigating the temperature in gallium. We apply this new temperature stabilization method to stabilize a Fabry-Perot cavity, which serves as a ultimate length measurement technique. We achieved 1 mK-temperature stability and 1.5426 nm/ 95 mm-length stability over 10 hours.

**Key Words :** Gallium (갈륨), Temperature control (온도 제어), Fabry-Perot Etalon (파브리-페로 공진기),

#### 1. 서론

기계의 정밀도가 높아질수록 기계 성능의 온도 에 대한 의존도가 높아지면서 온도 안정화에 대한 연구와 그에 따른 매우 섬세한 환경 제어는 정밀 측정기뿐 아니라, 정밀 가공기에서도 매우 중요한 문제이다.

지금까지의 온도제어는 상온에서 약 1 mK 정도의 안정도를 얻고 있지만, 온도제어 대상의 환경 온도를 제어함으로써 국부적인 측정기의 측정기준 (Coordinate Reference Frame)의 왜곡과 이로 인한 측정기 자체의 불확도를 높이는 결과를 가져왔다.

갈륨은 1960 년대 이후의 반도체 산업의 성장에 힘입어 반도체 산업계에서는 매우 일반적인 금속재료로서 그 녹는점이 29.77406 °C 이다. 이 녹는점은 갈륨의 순도가 높을수록 매우 재현성이 뛰어나며 상온에서 녹는점을 가지고 있는 여타 다른 재료들에 비해 그 유독성이 낮아 현재 ITS-90(International Temperature Scale-1990)에서 상온에서의 표준 온도로 채택되어 있으며 이 표준 온도를 고정점(fixed point) 이라고 한다. 이에 각 국의 표준 기관에서는 7N(99.99999 %)이상의 고순도 갈륨의 녹는점을 정밀하게 측정하고 상호 비교하여 상온의 온도 표준을 설정하고 각종 센서들의 온도 특성 평가에 사용

하고 있다. 현재 갈륨의 녹는점은 10<sup>-6</sup> K 의 안정도로 보고되고 있다.

본 연구에서는 갈륨의 녹는점 안정도를 이용하여 상온에서 공학 재료의 길이를 안정화시키는 시도를 수행하여 왔고, 그에 대한 적용분야로 현재 가장 정밀한 길이 분해능을 구현할 수 있는 파브리-페로 간섭계의 공진기 길이를 안정화시킴으로써 상온에서 매우 정밀한 길이 측정기의 구성과 길이 표준급으로 사용할 수 있는 안정된 주파수를 획득하는 연구를 수행하였다.

환경 온도 변화에 따른 파브리-페로 간섭계의 공진기 길이 안정화는 고정도 측정을 위해서는 필수 불가결한 선행과제로써 현재 표준급의 공진기 안정화에서는 헬륨의 기화열을 이용한 4.2 K 정도의 극저온에서 시도되고 있으나 상온에서는 낮은 열팽창 계수를 가지는 인바, Zerodur 와 같은 재료의 선택과 환경 온도 제어에 머물러 있어 매우 높은 비용과 부대 장치가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 갈륨의 녹는점을 이용하여 상온에서 국부적인 온도 안정도를 비교적 간편한 방법으로 향상시키는 방법과 이를 이용한 파브리-페로 공진기 길이를 안정화한 결과에 대해 서술하겠다.

#### 2. 갈륨의 고정점을 이용한 온도제어

## 2.1 갈륨의 열물리적 특성

갈륨은 상온 29.77406 °C 에서 녹는점을 가지며 그 밀도는 액체 상태일 때 6.095 g/cm<sup>3</sup>, 고체 상태일 때 5.904 g/cm<sup>3</sup> 으로 액화될 때 약 3.2 %의 부피가 수축된다. 또 대기압 변화에 대한 녹는점 변화는 약 -0.02 °C/MPa 로 매우 낮다. 잠열은 80.3 J/g 으로 들의 그것보다 약 1/4 정도이다. 갈륨은 어는점보다 녹는점이 매우 안정적인 것으로 보고되어 있다. Fig. 1 은 이상적인 순수 갈륨의 녹는점과 어는점 곡선을 나타낸다. 녹는 구간에서 나타나는 평탄한 구간에서 갈륨의 잠열 효과가 나타나면서 온도가 일정하게 유지되는 것을 알 수 있으나, 어는점에서는 과냉각점(supercooling) 현상이 나타나 그 온도가 명확하게 정의되기 어렵다.

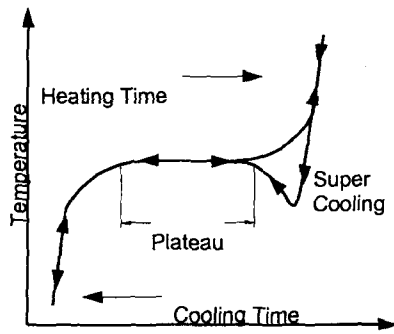


Fig. 1 Characteristic curve of Gallium melting and freezing point.

## 2.2 갈륨의 녹는점 검출 및 제어

갈륨의 녹는점을 검출하고 제어하기 위해서는 재료가 녹을 때의 상태를 이해하는 것이 필요하다. Fig. 2 는 재료가 외부에서 일정한 열량을 받아 녹아 들어갈 때의 모습을 대략적으로 나타낸 그림으로 왼쪽에서 일정 열량이 주입되고 오른쪽은 단열되어 있는 상태이다.

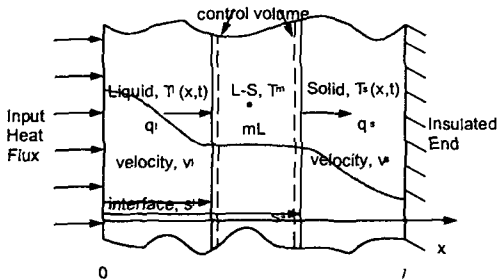


Fig. 2 Melting situation of a material with constant heat flux

Fig. 2 의 왼쪽은 재료가 녹아 액체 상태로 되어 있는 상태이며, 오른쪽은 아직 완전히 녹지 않아 고체 상태가 남아 있는 상태이고, 가운데는 액체와 고체가 공존하면서 녹는 상태를 유지하고 있는 그림이다. 여기서 굵은 선으로 표시된 재료 내부의 온도를 관찰하면 녹는 상태의 온도는 잠열의 효과로 녹는점  $T_m$  으로 일정하며, 액체와 고체 상태의 온도는 각각  $T_l(x,t)$ ,  $T_s(x,t)$ 로 표시되고 있다. 오른쪽 끝이 단열되어 있으므로, 일정 시간이 경과한 후에는  $T_s(x,t)$ 도  $T_m$  으로 수렴할 것을 예상할 수 있으며, 이 때 녹는 구간과 액체 상태의 경계  $s(t)$ 를 제어할 수 있다면 이 경계 안쪽은 항상 녹는점  $T_m$  을 유지할 수 있다. 녹는 구간과 액체 상태의 경계면에서 일어나는 열출입 관계를 수식으로 나타내면 식(1)과 같다.

$$q_l - q_s = \dot{m}L = L\rho_l \frac{ds_l(t)}{dt} \quad (1)$$

여기서,  $q_l$ 과  $q_s$ 는 녹는 구간과 액체상태의 경계면을 사이로 출입되는 열량이고,  $\dot{m}$ 은 녹는 재료의 시간변화율(kg/s),  $L$ 은 재료의 잠열(kJ/kg)이다.

이때, 경계면  $s_l$ 에서 주입하는 열량의 변화에 따른 온도 변화를 측정하면서 주입하는 열량  $q_l$ 을 조절하면  $ds_l/dt$ 를 조절할 수 있고, 결과적으로  $s_l$ 의 위치를 일정한 곳에 고정시킨다면  $s_l$  이후의 온도를 모두  $T_m$ 으로 고정시킬 수 있다. 여기서,  $\rho_l$ 은 재료의 밀도이다.

주입하는 열량  $q_l$ 을 식(2)와 같이 시간에 따라 변화하게 하면, 경계면  $s_l$ 에서 측정되는 온도가 재료의 상태에 따라 다르게 측정될 것을 예측할 수 있고 이에 따른 재료의 상태 판단이 가능하며 경계면  $s_l$ 의 위치 결정이 가능하다.

$$q_l = q(t) = Q_o(t) + Q_a f_d(t) \quad (2)$$

여기서,  $f_d(t)$ 는 시간에 따라 변화하는 함수이고,  $Q_o(t)$ 와  $Q_a$ 는 각각 음색 열량과 진폭 열량이다. 이와 같은 열량이 주입되었을 때 온도를 측정하는 곳의 상(phase)가 단일 상태일 때 식(3)과 같은 예측가능한 온도가 측정된다.

$$\begin{aligned} T(t) &= \frac{1}{C_{th}} \int q(t) dt = \frac{1}{C_{th}} \int [Q_o(t) + Q_a f_d(t)] dt \\ &= \frac{1}{C_{th}} \left[ \int Q_o(t) dt + Q_a \int f_d(t) dt \right] \\ &= T_o(t) + T_a f_T(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $C_{th}$ 는 재료의 열용량(thermal capacitance,

$1^{\circ}\text{C}$ )이고,  $T_{df}(t)$ 는 열량  $Q_{df}(t)$ 에 의해 나타나는 온도이며,  $T_o(t)$ 는 열량  $Q_o(t)$ 에 의해 나타나는 온도이다. 열량이 계속 주입되어 온도를 측정하는 곳의 상태가 녹는 구간에 들어가게 되면, 재료의 잠열 효과에 의해 더 이상 식(3)과 같이 측정되는 온도를 예측할 수 없으며 잠열에 의해 입력된 열량이 온도 상승에 기여하지 않고 갈륨을 녹이는데 사용되면서 온도 변화 진폭이 줄어들어 결국 0에 수렴하며 옅 열량에 의한 온도 변화 역시 0으로 수렴하게 된다. 따라서, 식(4)와 같이 전체 온도 변화량을 살펴보면 그 평균값의 변화와 진폭의 변화를 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta(T(t)) &= \Delta(T_o(t)) + \Delta(T_a(t)f_T(t)) \\ \Delta(T_o(t)) &\rightarrow 0, \Delta(T_a(t)) \rightarrow 0, T_a(t) \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)와 같이 잠열의 효과에 의해 온도 변화가 일어나지 않을 때의 온도를 재료의 녹는점으로 설정하여 온도 제어를 하게 되면, 외부에서 다른 제어 기준점을 입력하지 않아도 제어 시스템 자체적으로 제어 기준점을 설정하게 되는 시스템을 설계할 수 있다. 재료의 새로운 녹는점을 식(5)와 같이 정의할 수 있다.

$$T_m = \{T(t) | \min(\Delta(T(t)))\} \quad (5)$$

### 3. 실험장치 구성

#### 3.1 파브리-페로 간섭계 실험장치 구성

파브리-페로 간섭계는 현재 거리 측정용 간섭계로 가장 높은 분해능을 제공할 수 있는 간섭계로서 레이저의 주파수 표준 설정 및 정밀 거리 측정용 센서의 보정 방법으로 널리 사용되고 있다. 파브리-페로 간섭계는 그 공진기 길이 변화에 따른 공진 주파수의 변화를 입사되는 레이저의 주파수로 추적하고 이 추적 주파수의 변화량을 기준 주파수와 비교를 통해 측정하여 역으로 이에 해당하는 공진기의 길이 변화를 계산할 수 있다. 파브리-페로 간섭계는 분해능을 높일수록 그 측정 범위가 줄어드는 단점을 가지고 있지만, 온도 안정도에 따른 매우 작은 변위를 매우 정밀하게 측정하는데 적합하다.

본 연구에서 제작한 공진기는  $20^{\circ}\text{C}$ 에서의 열팽창 계수  $8.4 \text{ p.p.m.}$ 을 가진 알루미늄 세라믹( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )를 사용하였으며, 반사율 98.7%, 반경 200 mm의 구면 거울 두개를 사용하여 총 길이 95 mm의 공진기를 제작하였다. 제작한 공진기의 자유주파수영역(Free Spectral Range)는 약 1.5 GHz이며, 공진기 길이를 고려한 길이 변화에 대한 공진 주파수 변화율은 약

$-4.9 \text{ MHz/nm}$ 이다. 공진기 길이 변화에 따른 공진 주파수 변화를 추적하기 위한 레이저로는 MellesGriot사의 05-LHR-690 HeNe Plasma Laser Tube에 환형 PZT로 주파수 변조를 위한 구동기와 주파수 추적을 위한 필름형 히터를 감아 사용하였다. 기준 주파수용 레이저로는 Zygo사의 ZMI2000 레이저 광원을 사용하였는데, 이 기준 주파수의 안정도는  $10^{-9}$ 이다.

제작된 파브리-페로 공진기를 갈륨 챔버안에 고정하고 갈륨 온도에 따른 공진기 길이 변화를 관찰하므로써 온도 안정화에 따른 공진기 길이 안정도를 측정할 수 있다. 구성된 실험 장치는 다음과 같다.

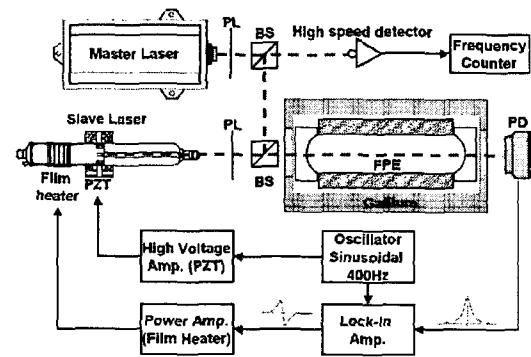


Fig. 3 Experimental setup

#### 3.2 갈륨 챔버

제작된 파브리-페로 공진기를 포함하고 그 주위를 갈륨으로 채우면서 가열과 냉각을 용이하게 하기 위한 갈륨 챔버를 제작하였다. 재료는 열전도도가 뛰어난 구리로 하였고, 외부에 가열과 냉각의 효과를 극대화 시키기 위한 열파이프(heat-pipe)를 12개 장착하고 가열을 위해 열 파이프 주위에  $10 \Omega/\text{m}$ 의 피복되어 있는 니크롬 열선을 약 2.5 m 감았다. 냉각을 위해서는 열 파이프 끝단에 열 용량 증가를 위해 구리 덩어리를 부착하고 그 구리 면에 펠티어 냉각기, 핀, 팬을 장착하여 냉각기를 구성하였다. 내부에 온도 측정을 위해 YSI사의 써미스터를 이용하여 온도 변화에 대한 선형적인 전압 출력을 얻을 수 있는 온도 센서를 제작하여 공진기에 6개, 챔버 외부에 4개, 그리고, 펠티어 냉각기의 고온부와 저온부에 각각 한 개씩 총 12개의 온도센서를 부착하였다. 제작된 갈륨 챔버의 개략적인 그림을 Fig. 4에 나타내었다.

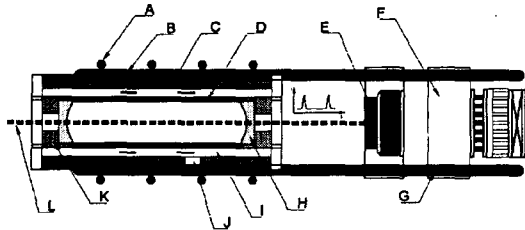


Fig. 4 Schematic diagram of gallium chamber; A: heating wire, B: thermistor temperature sensors, C: copper chamber, D: alumina cylinder, E: photo detector, F: cooling part, G: heat pipes, H: Fabry-Perot mirrors, I: gallium, J: gallium inserting hole, K: etalon supporting unit, L: incident laser beam

#### 4. 실험 및 고찰

열선에 전압을 시간에 따라 1:7 로 변화하는 비율과 습식 열량 6 W, 진폭 열량  $\pm 1$  W로 가함에 따라 변화하는 갈륨의 온도로부터 현재 갈륨의 상태를 판단하면서 갈륨의 상태가 녹는 상태에 있다고 판단되어지는 온도를 갈륨의 녹는점으로 설정하여 PID 제어를 하였다. 상태 판단 신호와 그에 따른 갈륨의 온도는 다음과 같다.

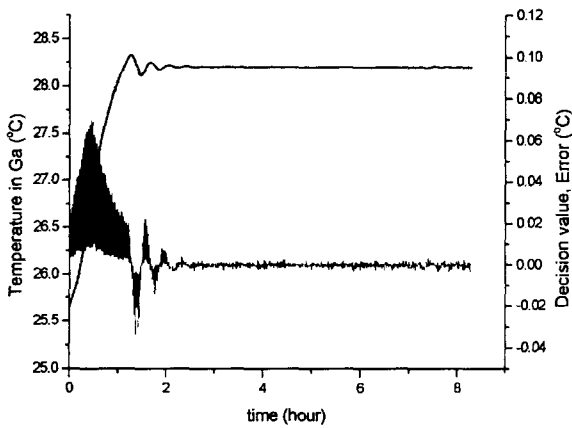


Fig 5. Gallium temperature result

그림에서 보면 마치 2 차 시스템의 단일 스텝 입력에 대한 출력의 형태로 온도가 제어되어가고 있음을 보여주고 있다. 이렇게 제어 하였을 때 표준 편차 약 1 mK 의 온도 안정도를 얻었으며 이와 같이 온도가 제어되는 시점부터 약 10 시간동안 내부 파브리-페로 공진기의 길이를 함께 측정 한 결과는 Fig. 6 과 같다. 공진기의 길이 변화는 표준편차 1.57 nm/ 95 mm 를 얻었다.

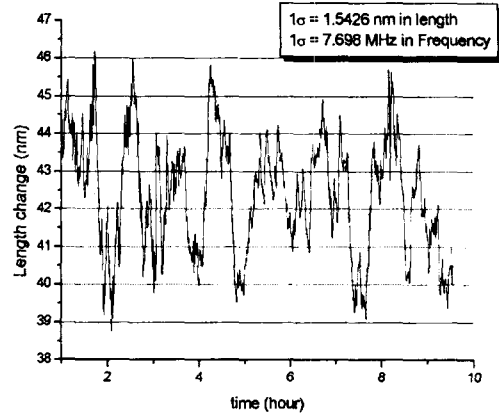


Fig. 6 Fabry-Perot cavity length stabilization;  $1\sigma = 1.5426$  nm, 7.968 MHz

파브리-페로 간섭계의 공진기 길이 변화에 따른 공진 주파수 변화 민감도에 따라 입력 되는 레이저의 주파수 안정도를 역으로 계산할 수 있는데 그 값이 표준편차로 약 7.968 MHz 를 얻었으며 이 값은 상대 안정도  $10^{-8}$  의 결과이다.

#### 4. 결론

본 연구에서 갈륨의 고정점인 녹는점 29.77406 °C 에 알루미늄 세라믹( $Al_2O_3$ )로 제작된 95 mm 의 파브리-페로 공진기의 온도를 안정화 시켜 약 10 시간 동안 표준편차 1.57 nm 의 길이 안정화 결과를 얻었다. 추후 공진기를 Zerodur™ 와 같은 ULE(Ultimate Low Expansion) 재료로 제작하고, 7N 이상의 고순도 갈륨을 사용할 경우  $10^{-10}$  급 이하의 고정도 온도 안정화를 통한 길이 및 그에 따른 주파수 안정화를 기대할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업의 후원을 받아 수행하였음을 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 김태호, "갈륨의 고정점을 이용한 파브리-페로 공진기의 열적 안정화," 한국과학기술원 박사학위 논문, 2002.