

## 우라늄 용해용 고주파가열장치에서 흑연으로 비수냉 코일 적용 연구

김창규, 양재호, 장세정, 이운상, 박종만  
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150  
 ckkim2@kaeri.re.kr

### 1. 서론

일반적으로 고주파가열코일은 냉각수를 관형태의 코일 내부를 흘러 냉각시키며 고주파 전류로 유도 가열하여 용해 및 주조 작업을 한다. 그러나 이러한 방법은 우라늄, 티타늄과 같이 반응성이 매우 큰 금속을 용해할 경우 관의 파열에 의해 물이 새어나와 폭발할 경우 대형 사고가 발생할 수도 있고 또한 물은 중성자 감속효과가 커서 핵임계 사고를 유발할 수 있는 가능성을 높여준다. 코일을 graphite 재질로 만들고, 진공 챔버 장착된 동 재질의 전력 공급 판 또는 봉(Bus bar)을 하여 고주파 전기를 공급하여, 진공챔버 내에는 냉각수를 사용하지 않는 고주파 가열 용해주조 장치이다. 흑연은 전기 저항이 커서 자체 발열이 일어나지만 불활성 분위기에서 3000°C 이상 고온까지 잘 견디고 용융이 되지 않기 때문에 바로 도가니 가열 원으로 사용할 수 있다. 일반적으로 단열재를 코일과 도가니 사이에 설치하지만 코일 외부에 설치하여 흑연 코일에서 저항으로 발생하는 열을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 흑연으로 제조된 코일을 진공유도가열로에 설치하여 발열 거동을 관찰하여 흑연재질로 비수냉 코일로 적용 가능성을 고찰하였다.

### 2. 고주파 전기 흐름의 특성

고주파 전류가 흐르게 되면 표피효과(Skin Effect)와 근접효과(Proximity Effect)에 의해 직류전류가 흐를 때보다 저항이 증가하게 된다. 표피효과란 고주파 전류가 도체의 표면부근으로 집중해서 흐르는 현상이다. 표면전류의  $1/e(36.8\%)$  이 흐르는 깊이를 표피두께(Skin Depth) 또는 침투깊이(Penetration Depth)라고 한다. 표피두께는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\delta = 2\rho/\mu\omega = 503.3 \rho/\mu f \text{ [m]} \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 저항률[ $\Omega\text{m}$ ],  $\mu$ 는 비투자율(Relative Permeability),  $f$ 는 주파수이다. 코일에 흐르는 전

류와 피가열물에 흐르는 전류는 반대방향이기 때문에, 양전류의 통로간을 관통하는 자속이 적은 쪽이 전류는 흐르기 쉽다. 따라서 전류는 서로 접근한 곳에서 많이 흐른다. 이 현상을 근접효과라고 부르고 있다.

흑연은 전기저항은 400~800  $\mu\Omega\text{m}$ 로 동은 전기저항 1.58  $\mu\Omega\text{m}$ 보다 약 300 배 크다. 그러나 식 (1)에 의하여 전류 침투깊이가 거꾸로 약 300 배 커서 전류가 동보다 넓게 퍼져 흐르게 될 것이다. 본 원리에 의하면 코일 전반에 걸쳐 전류 흐름에 대한 저항열 발생량 증가는 전기저항 값의 비율처럼 그렇게 매우 크지 않을 것으로 생각된다.

### 3. 단열재 층 제거에 효과 고찰

단열재를 일반적으로 코일과 피가열체 사이에 설치했으나 흑연 코일의 경우에는 코일 바깥에 설치하여 코일을 전기저항 가열로의 발열체 기능을 하도록 하는 것이다. 단열재를 제거하면 피가열체의 외면과 코일 내측과 더욱 가까워져서 유도 효율이 더욱 커져서 유도 가열 효율이 증대되는 장점이 있다.

코일과 피가열체의 형상에 따라 출력 효율이 다르다. 코일과 피가열체를 그림 1와 같이 가정하고 그림 2에서 코일의 내경 대한 길이의 비율과 피가열체의 직경과 코일의 내경 크기비율( $a_0/b_1$ )에서  $C_1$  값을 얻는다.  $C_1$  값에 피가열체의 저항값과 비투자율 값을 곱한 값의 평방근( $\sqrt{\rho_2\mu_2}$ )을 곱하여  $C_2$  값을 구한다. 피가열체 물질의 전기 및 자성 특성과 주파수에 따라 전류침투깊이  $d_2$ 를 계산해 낸다. 그림 3에서 피가열체의 직경에 대한 전류침투깊이 비율 값( $a_0/d_2$ )을 계산하여 근접하는 곡선을 선정하고  $C_2$ 값에 해당하는 지점에서 출력분율을 최종적으로 얻을 수 있다. 피가열체의 직경이 코일의 내경과 약간 작을 정도까지 커지면  $C_1$ 값이 커지고 따라서  $C_2$  값이 커져서 효율이 향상됨을 알 수 있다. 또한  $a_0/d_2$  값이 커져서 보다 높은 효율 영역에 있는 곡선에 해당되어 효율이 증대됨을 알 수 있다. 총체적으로 보면 공급된 고주파 전류가 유도되는 열과 또는 공급 중에 발생하는 저항

열을 모두 사용함으로써 기존방식보다 열효율 면에서 오히려 효과적인 것으로 생각된다. 또한 흑연 코일은 제작이 쉽고 가격이 다른 고온재료 Mo나 W과 비교하여 저렴한 장점이 있다.

#### 4. 흑연 코일 가열 시험

일반 형태의 고주파가열장치에 Cu 코일 대신에 흑연 코일을 대체하고 코일, 흑연 felt 단열재, 흑연도가니의 온도를 시간별로 측정하였다. 온도 700 ℃도 이하에서는 코일의 온 상승이 가장 빠르고 다음이 중간 흑연단열재 그리고 심부 흑연도가니에서 온도가 가장 늦게 상승되었다. 온도가 낮을 경우에는 대류 및 복사에 의한 열손실 효과가 적어 온도가 먼저 올라갔으나 약 900 ℃ 이상에서는 흑연 단열재가 보온 역할을 하여 심부의 도가니가 계속하여 온도 상승되는 현상을 보였다. 본 결과로부터 코일 내부 공간 보다 훨씬 작은 도가니에 전류가 유도되어 상당히 가열되어 금속

을 용융할 있는 온도까지 가열이 가능함을 보였다. 도가니를 중간 층 단열체 직경 정도의 도가니를 사용하면 보다 더 효율적으로 가열할 수 있을 것으로 판단된다. 여기에 코일 외부에 단열체를 설치하면 코일 내부 공간에 거의 균질하게 높은 온도까지 가열하여 효과적으로 금속을 용융하여 주조를 할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 5. 결론

비수냉 코일로 흑연 재료가 용점이 매우 높아 저항 발열을 도가니 가열에 동시 사용할 수 있어 우라늄 용융에 가능할 것으로 생각된다. 전기전도도가 낮은 단점은 고주파 전류 표피 가열효과에서 통전 효율이 지극히 나쁘지 않을 것으로 판단되며 피가열 도가니가 유도 가열 코일에 가깝게 설치되므로 유도가열 효과가 좋을 것으로 검토되었다. 또한 흑연은 비교적 저렴하고 가공도 잘되므로 경제적이다.

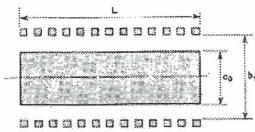


Fig. 1. 코일과 피가열체 형상.

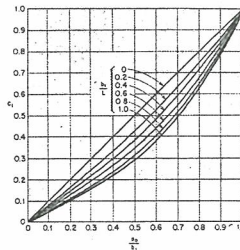


Fig. 2. C<sub>4</sub>을 값을 얻는 관계도.

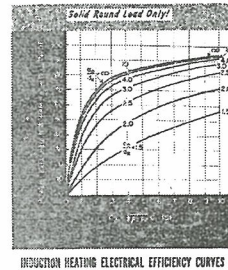


Fig. 3. 출력 효율을 유추하는 관계도.

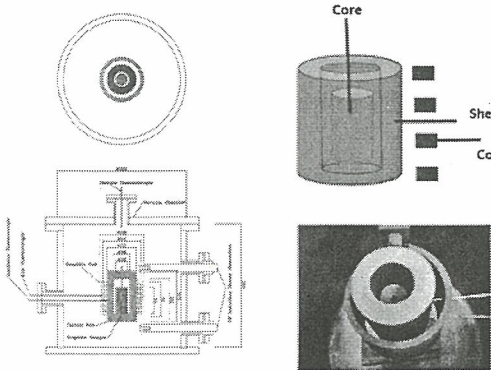


Fig. 4. 고주파 가열 장치 및 부품 배치 개념도.

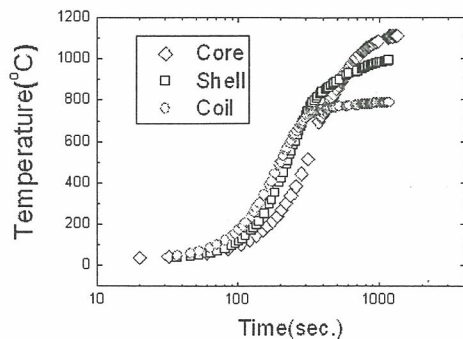


Fig. 5. 각 위치별 고주파가열에 의한 온도 변화.