



고주파 유도가열에 의한 방사성폐기물의 유리화

김천우, 최관식, 박종길, 신상운, 송명재, 이병철*, 류봉기*
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원, 부산대학교 무기재료공학과

1. 개요

산업사회의 급속한 발달과정에서 가정은 물론 산업 현장, 병원, 발전소 등에서 발생하는 다량의 유해성 폐기물들이 자연환경과 인간에게 영향을 주지 않도록 하는 안전한 처리기술이 필요한 시점이다. 공장과 병원 폐기물, 석면, 소각장의 비산재/바닥재, 방사성폐기물 등에서의 발암물질, 독성 중금속, 방사능 물질들이 자연환경과 인간에게 노출되는 것을 차단하고 물리·화학적으로 견고한 물질 안에 영구적으로 가두는 안전한 처리 기술로서 유리화(vitrification)가 전세계에서 유망한 대안 기술로 응용되고 있다. 특별히, 국내에서는 원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성폐기물을 기존의 처리 방식이 아닌 물리·화학적으로 견고성이 뛰어나고, 감용 효과가 크며 또한 처리비용이 적게 드는 유리화 기술로 처리하기 위한 연구를 수행 중에 있다.¹⁾

기존의 방사성폐기물 처리기술인 시멘트고화나 폴리머고화 기술이 핵종들을 물리적으로 가두어 주는 Encapsulation 기술인데 반해 유리화는 분자들간의 상호 화학적 결합을 이루도록 하는 Incorporation 기술이라는 장점이 있다. 그러므로 유리화는 다른 기술에 비해 우수한 화학적 내구성을 가지고 있으며 폐기물의 높은 감용 효과를 얻을 수 있다. 특히 대부분 원소를 유리 속에 포함시킬 수 있기 때문에 방사성폐기물을 유리 속에 용융시킨 다음 철제용기에 부어 중간 저장소나 영구 처분장에 안전하게 처분할 수 있다. 유리화 기술을 이용하여 방사성폐기물을 처리하는 기술은 1950년대부터 고준위

방사성폐기물 처리에 적용되어왔고 1990년대부터 중·저준위 방사성폐기물을 유리화 하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그 동안, 유리화를 위해서 다양한 용융 기술들이 사용되었다. 금속전극에 교류전류를 흘려 주어 유리를 용융시키는 세라믹 용융로, 플라즈마 아크와 토치, 마이크로파에 의한 용융, 가스버너를 이용한 방법 등이 대표적인 기술이다. 그 중에서도 유도가열식 용융방법은 러시아, 프랑스, 영국, 이탈리아의 방사성폐기물 유리화에 응용되고 있으며 특별히, 이 기술은 우리나라의 원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성폐기물 유리화에 활발히 응용되고 있다.^{2,3)} 본고에서는 고주파 유도가열의 원리와 이 방식이 방사성폐기물 유리화 기술에 응용되고 있는 점들을 소개 하고자 한다.

2. 고주파 유도가열 이론

유도가열은 전자기 유도현상을 이용한 재료의 가열방법이다. 1831년 Michael Faraday는 "시간적으로 변하는 자장은 폐회로(가열물)에 전류를 흐르게 할 수 있는 전압을 유도한다"는 유명한 전자기유도 법칙을 발견하였다. Fig. 1(a)에서 나타난 것처럼 수차폐 감은 유도코일의 가운데에 가열물을 넣고 이 유도코일에 교류전류를 흘리게 되면 이로 인하여 가열물의 중심에서는 자속이 생기게 되고 히스테리시스(hysteresis) 손실, 유도전류(induced current) 손실, 자기유도가 자계에 대하여 시간적으로 지연되는 현상으로 인한 지연 손실, 그리고 절연물층의 유전체 손실이 발생하게 된다. 가열물이 유리일

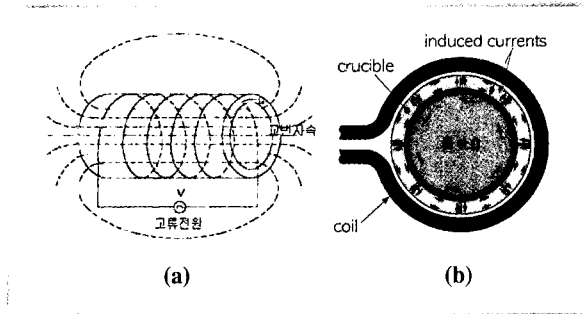


Fig. 1. 유도가열의 원리.

경우 네 가지 손실 중 유도전류 손실만 고려하면 된다. Fig. 1(b)는 저온 용융로를 이용하여 유리를 용융할 경우 발생하는 유도전류 현상을 나타내고 있다.

교류가 흐르는 유도코일의 가운데에 놓인 유리는 유리자신에 기전력이 일어나서, 이것에 의해, Fig. 1(b)와 같은 유도전류가 흐른다. 이 유도전류를 와전류(eddy current)라고도 하는데 유리의 단면 각 부분에서 일정한 형태로 흐르는 것이 아니라, 식(1)에서 나타내는 것처럼 표면에 집중하고, 내부에 접근함에 따라, 지수 함수적으로 감소하며, 게다가 그 위상도 지연되는 특징이 있다.⁴⁾ 즉,

$$I_x = I_0 e^{-\left(\frac{x}{p}\right)} e^{i\left(\frac{x}{p}\right)} \quad (1)$$

여기서, I_x : 표면에서 중심으로 향하는 x [m] 점의 전류값 [A]

I_0 : 원통형 가열물 표면의 전류값[A]

p : 전류값이 표면의 $1/e$ 로 감소하는 깊이[m]

이 관계를 그림으로 표시하면, Fig. 2와 같이 된다. 이와 같은 현상을 전류의 표피효과(skin effect)라고 하고, 고주파유도가열의 중요한 특징 중 하나가 된다. 식(1)에서 p 는 고주파 전류의 침투깊이(penetration depth)라고 불리우며, 재료의 비투자율 μ_r 과 비저항값 $\rho[\Omega \cdot m]$, 주파수 f [Hz]에 의해 다음과 같이 결정된다.⁵⁾

$$p = \frac{\sqrt{\rho}}{2\pi\sqrt{\mu_r}f} \quad (2)$$

일반적으로 용융상태일 때 유리의 비투자율 μ_r 는 진

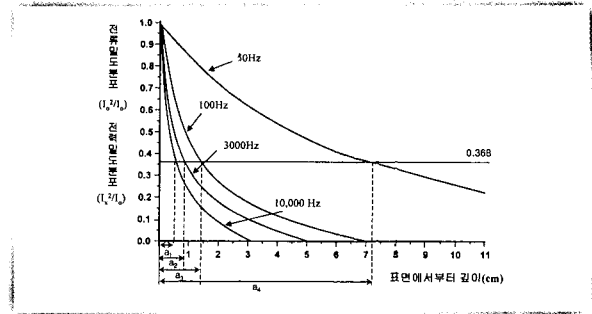


Fig. 2. 전류 및 전력의 표면분포(표피효과 a_1, a_2, a_3, a_4 와 여러 가지 주파수에서의 침투깊이).

공상태에서의 비투자율 μ_0 값을 적용하면 된다. 용융로 벽면과 접촉하는 유리의 표면에서부터 침투깊이 p 까지의 깊이에서 발열의 90%까지가 발생하므로, 실용상으로는 고주파 전류의 전부가 유리표면에서 침투깊이의 위치까지에 집중되고 있다고 생각해도 무방하다. Fig. 3은 식(2)를 이용하여 유도가열에서 사용되는 유리의 비저항값 마다 주파수 변화가 100kHz에서 10MHz까지 일 때 계산된 유도전류 침투깊이를 보여주고 있다.

전자기파가 용융유리내로 투과하는 직접용융 방식의 경우 유리에 침투하는 유도전류는 용융로 지름의 10분의 1이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다.⁶⁾ 그러므로, 용융온도에서 유리의 비저항값이 $5\Omega \cdot cm$ 라 가정하고 사용하는 용융로의 지름이 60cm 일 때 요구되는 적정 주파수는 300kHz 또는 그 이상이 되어야 한다. 유리 용융에 있어서 용융로의 지름이 작아질수록 발전기로부터 공급되는 주파수는 커져야 함을 알 수 있다. 용융로의 지름이 고정되어 있을 경우 유리의 비저항값과 발전기로부터 공급되는 주파수에 의해서 유도전류의 침투깊이는 결정되는데 발전기로부터 공급되는 주파수 용량은

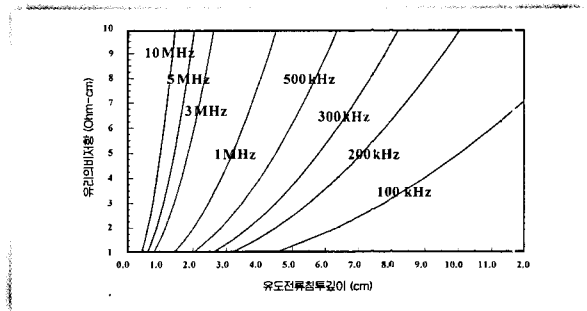


Fig. 3. 유리의 비저항값에 따른 주파수별 침투깊이 변화.

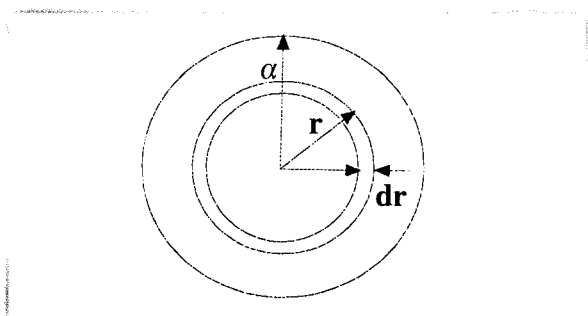


Fig. 4. 원통형 금속체의 발열을 고려한 그림.

발전기에 사용되는 전기적 소자가 어떤 것인가에 따라 크게 영향을 받는다. 일반적으로 10kHz 이하의 주파수 영역에서는 SCR(Silicon Controlled Rectifier)이 사용되며 100kHz 미만은 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), 300kHz 미만의 주파수는 MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), 그리고 MHz 대의 주파수는 진공관을 사용하고 있다.^{7,8)}

한편, 주파수가 낮고, 가열물의 내부가 모두 균일한 자장이라고 고려되는 경우 발생전력(P)을 계산하기 위해 Fig. 4에서와 같이 원통가열물의 가운데에 반경 r[m]의 위치에 dr의 구껍질의 체적부분을 생각할 수 있다.

원통가열물 내부에서의 자속밀도를 B라고 하면, 구껍질의 체적부분의 기전력 e는 식(3)과 같다.

$$e = \pi r^2 \times \frac{dB}{dt} \quad (V) \quad (3)$$

그리고, 이 구껍질의 축방향의 길이 1m에서의 저항 R은, 비저항값 ρ(Ω.m)라고 하면,

$$R = \frac{2\pi r \rho}{dr} \quad (\Omega) \quad (4)$$

Reactance(유도저항)를 무시할 경우 전류 i는,

$$i = \frac{e}{R} = \frac{r dr}{2\rho} \times \frac{dB}{dt} \quad (A) \quad (5)$$

따라서, 구껍질 부분의 전력은, 이 구껍질의 단위길이(1m)당 발생하는 전력을 구할 수 있다. 즉,

$$P = \frac{\pi a^4 \left(\frac{dB}{dt}\right)^2}{8\rho} \quad [W/m] \quad (6)$$

고주파 코일을 1m 당 n번 감았다고 하고, 여기에 흐르는 전류를 I[A]라고 하면, $B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r I = 4\pi \times 10^{-7} \times \mu_r n I$ 이고 $\frac{dB}{dt} = \omega B = 2\pi f B$ 이므로, 식(6)은 다음과 같이 된다.

$$dP = i^2 R \approx \frac{r^2 (dr)^2 \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 2\pi r \rho}{4\rho^2 dr} = \frac{\pi r^3 dr \left(\frac{dB}{dt}\right)^2}{2\rho} \quad (7)$$

이것을 r=0부터 r=a[m]까지 구껍질 전체를 적분하면, 다음과 같은 식이 된다.

$$P = \frac{8\pi^5 a^4 f^2 \mu_r^2 n^2 I^2}{\rho} \times 10^{-14} [W/m] \quad (8)$$

이 식(8)로 부터 알 수 있는 것처럼, 원통가열물에서 발생하는 전력은 코일에 흐르는 전류(I), 코일의 권수(n), 그리고 주파수(f)의 2승에 비례하며, 원통 반경(a)의 4승에 비례한다. 하지만, 주파수가 높게 되면, 앞에서 서술한 바 있는 표피효과 때문에 이른바 균일자계라고 고려할 수도 없게 되고 즉, 발생전력 p는 원통가열물의 지름이 유도전류의 침투깊이보다 10배 이상인 경우 식(8)은 근사적으로, 다음의 식이 성립한다.

$$P = 4\pi^2 a n^2 I^2 (\mu_r f \rho)^{1/2} \times 10^{-8} [W/m] \quad (9)$$

그러므로, 발생전력은 코일에 흐르는 전류(I)와 코일의 권수(n)의 2승에 비례하며, 원통가열물 반경(a)에 비례한다. 또한 발전기로부터 공급되는 주파수(f), 가열물의 비투자율(μr)과 비저항값(ρ)의 평방근에 비례한다.

식(8)과 식(9)로 부터 어떤 일정시료를 주파수를 넓은

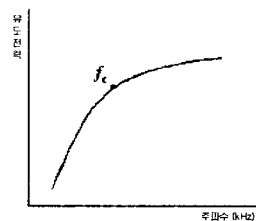


Fig. 5. 원통가열물의 유도전력과 주파수의 관계.

범위로 바뀌어가면서 가열할 때의 발생전력은 Fig. 5에 서와 같이 주파수가 낮은 때에는 주파수의 2승에 비례 하고, 주파수가 높을 때에는 주파수의 평방근에 비례하 게 된다. 즉, 어떤 경우라고 하더라도, 주파수가 높게될 수록 발열이 크게 되지만, 주파수가 침투깊이 보다 너무 낮으면 피가열물 내에서 자력선이 서로 상쇄되기 때문 에 유도가열은 급격히 감소하게 된다. 이 양특성의 분기 점을 유도가열의 임계주파수($f_c = \text{critical frequency}$)라 고 한다. 이 임계주파수는 계산에 따르면

$$\frac{\alpha}{p} = 2.25 \quad (10)$$

이 되고, 여기에 식(2)의 침투깊이(p)값을 도입하면, 다음과 같이 된다.

$$f_c = 1.285 \times 10^6 \times \frac{\rho}{\mu \alpha^2} \text{ [Hz]} \quad (11)$$

일반적으로 낮은 주파수는 무딘칼(鈍刀), 높은 주파수 는 면도칼과 같은 느낌이다. 임계주파수이하에서는 주 파수에 약간의 변동이 있더라도 곧 가열상태에 변동을 유발하게 되며 주파수가 너무 높게되면 이번에는 표피 효과가 심해져 이로 인한 표면으로부터의 열방출이 심 해져 오히려 가열효율이 떨어지게 된다. 가열효율은 주 파수가 임계 주파수 보다 높을수록 좋게 되어 보통 임계 주파수의 5배 이상의 주파수가 선택되지만 유도가열에 서 주파수 선택은 피가열물 종류와 크기에 부합되는 표 피효과와 임계 주파수를 함께 고려하여 선택하지 않으면 안 된다.⁹⁾

3. 고주파 유도가열에 의한 유리화

유도가열 방식으로 유리와 같은 재료를 녹이는 방식 을 고주파 용융이라 하며 그 방식으로는 간접 또는 직접 가열방식이 있다. 간접 가열방식은 도가니를 직접 가열 하여 그 안에 있는 재료를 용융하는 방식으로 도가니 재 질의 도전율과 두께 등을 고려하여 적정 주파수를 걸어 주게 된다. 직접 가열방식은 유도전류를 도가니안에 들어있는 재료에 직접 걸어주는 방식이다. 직접 가열방식

은 용융규모에 따라 도가니의 크기가 결정되고 이와 함 께 재료의 용융된 상태에서의 특성에 따라 적정 주파수 를 산정해 주어야 한다. 이 방식에 이용되는 재료는 금 속과 비금속이 있으며 특히 유리와 같은 비금속 재료의 용융에는 저온 용융로 벽면에 유리 스킨(skull)을 형성 하여 그 안에서 유리를 용융하며 일반적으로 금속 용융 에서는 스킨을 형성하기가 어렵다. 간접 가열방식에 의 해 유리를 용융한 대표적인 사례가 Fig. 6의 (a)와 (b)에 서 보여 주고 있는 프랑스의 고준위 유리화다. Fig. 6(a) 의 회전화로/금속용융로(Rotary Kiln/Metallic Melter) 개략도는 1978년 중반 이후 Marcoule 재처리 설비에서 산업용 크기의 공정으로 운전되었으며, 비슷한 설비가 La Hague와 영국의 Windscale에 설치되어 운전 중이다. Fig. 6(a)에 나타나 있듯이 이 공정은 유리 생산 속도를 증가시키기 위해 미리 하소하는 것으로 하소와 유리용 융은 연속적이지만 처분용기에 주입하는 공정은 금속용 융로 바닥 고정밸브를 통해 회분식으로 운전하였다. 건 조실은 30 rpm으로 회전하고 재료의 흐름을 쉽게 하기 위해 다소 기울어져있다. 고준위 폐기물은 화로의 위쪽 끝에서 중력에 의해 유입되며 하소물을 화로의 아래쪽 끝에서 금속용융로로 방출하였다. 금속용융로는 팽창 주름상자에 의해 회전화로의 아래쪽 부분에 바로 연결 되어 있다. 철, 니켈, 크롬 합금(Inconel-601)으로 제조 된 용기의 가열은 간접 유도가열식에 의해 이루어졌다. 금속 용융로는 시간당 20kg의 유리고화체를 생산할 수 있으며, 용융로의 운전 온도는 1,150°C이다.¹⁰⁾ Fig. 6(b) 의 경우 역시 간접 유도가열방식이며 오른쪽 바닥 배출 구에 장치되어 있는 빨대형태의 배출구는 주기적인 유 리의 배출시 사용하였으며 두 배출구 모두 유도전류자 가 장치되어 있어서 유도가열방식으로 가열하여 유리를 배출하였다.

고주파 유도가열 방식에 의해 방사성폐기물 유리화 연구를 수행하고 있는 러시아의 Radon 유리화 설비를 Fig. 7에서 보여주고 있다. 동(Cu)으로 되어 있는 유도 전류자의 내경은 19.5 cm로 용융로를 2회 둘러 있으며 저온 용융로의 내경은 13.5 cm이다. 이 설비는 60 kW 전력용량에 1.76 MHz 용량을 보유한 고주파 발전기에 의해 에너지를 공급받는다.¹¹⁾

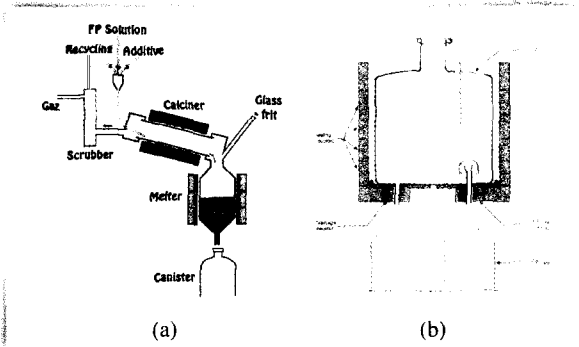


Fig. 6. 간접 유도가열방식에 의한 고준위 방사성폐기물의 유리화.

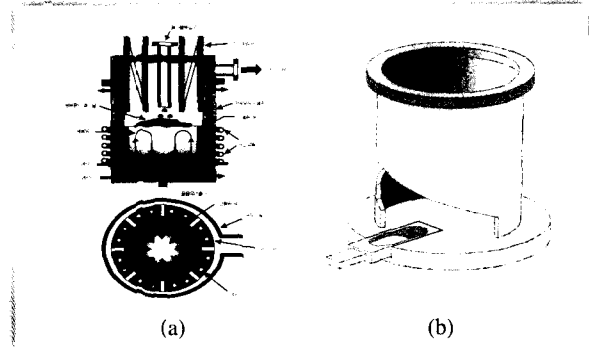


Fig. 8. 직접 유도가열방식 저온 용융로 구조.

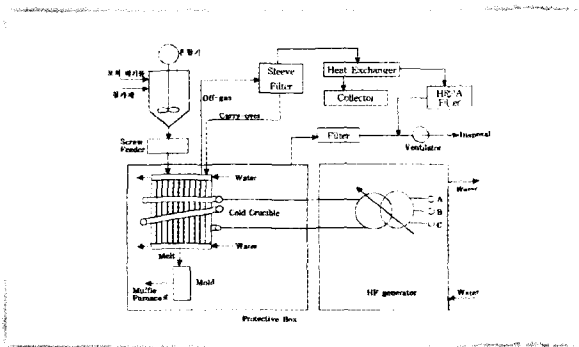


Fig. 7. 러시아 Radon의 고준위 방사성폐기물의 유리화 설비.

한국수력원자력주식회사의 원자력환경기술원은 1994년부터 1995년까지 원자력발전소에서 발생하는 방사성 폐기물의 유리화 타당성 연구를 수행하였다. 폐기물 처리용량, 시설 보수유지 용이성, 휘발성 핵종들의 배기체 유입량, 용융로 수명 및 처리할 수 있는 폐기물 종류를 종합적으로 고려한 기술 평가 결과 가연성폐기물 처리를 위해 프랑스 SGN사와 공동연구로 유도전류에 의한 저온 용융로 방식을 개발하기로 결정하였다. 직접 유도전류 가열식 저온용융로는 Fig. 8(a)와 같이 용융로 주위의 유도코일로부터 발생된 전자기파에 의한 유도전류가 용융물에 주열을 발생시켜 가열하는 방식이다. 폐기물 투입구를 통하여 주입된 방사성폐기물은 용융유리와 접촉되면서 연소와 열분해가 일어나고 유리 용융물에 무기물질은 포획되며 수분을 비롯한 배기가스들은 배기체 처리계통에 유입되어 무해한 가스로 전환된다. 저온 용융로는 Fig. 8(a)에서 보듯이 벽면이 수냉각되므로 일정한 두께의 유리 보호막이 형성되고 뜨거운 용탕으로

부터 발생하는 물리·화학적 부식(erosion and corrosion)을 방지하게 된다. 그러므로 용융로의 수명은 기존의 다른 용융로들 보다 긴 장점이 있다.¹²⁾

저온 용융로를 사용하는 유도가열 방식의 에너지 분배는 유도전류에서 10%, 저온 용융로에서 전기적 손실로 20% 또한 열손실로 40%가 손실되고 유리의 용융에 30%가 소모된다. 세라믹용융로를 이용할 경우 1kg의 유리를 용융하는데 1 kW·h의 에너지가 필요하지만 저온 용융로를 사용할 경우 동일한 량의 유리를 용융할 경우 1.5 kW·h가 필요하다.¹³⁾ 그러나, 세라믹 용융로의 경우 전극과 내화재가 고온에 노출되어 수명이 짧아 주기적으로 보수해주어야 되고 방사능에 오염되므로 이차폐기물 발생이 늘어나는 단점이 있다. 그러나 저온 용융로는 뜨거운 용융물이 직접접촉하지 않으므로 전극이나 용융로의 교체가 없는 반영구적 시스템으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 저온 용융로에서 스킨 용융방식으로 유리를 용융시킬 때 가열초기에는 유리의 비저항값이 높음으로 초기점화가 불가능하나 유리속에 카본이나 금속(Zr, Ti, etc.)을 넣어 초기에는 이것을 가열시켜 점화하고 이때 발생하는 에너지로 유리의 온도가 상승하면 비저항값이 낮아지게 되어 유리 자체 용융이 가능하다. 일반적으로 저온 용융로에서 유리의 초기점화는 적정량의 유리 frit을 용융로에 채우고 유리 사이에 티타늄 금속고리를 장전한 다음 고준위 발전기를 이용하여 티타늄 금속에 점화(ignition)를 발생시킨다. 점화의 원리는 다음과 같다.

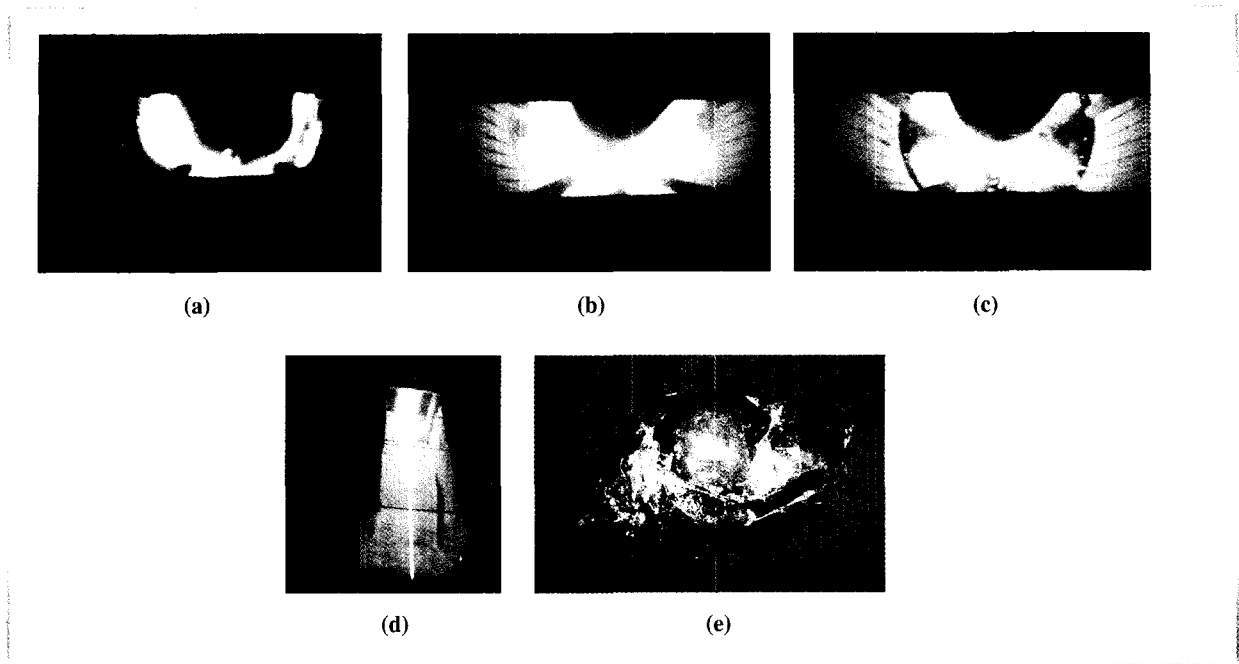


Fig. 9. 고주파를 이용한 저온 용융로에서의 유리화 과정 : 유리의 초기점화(a), 초기점화 후 유리 용융(b), 폐기물 용융(c), 유리 배출(d), 유리 고화체(e).

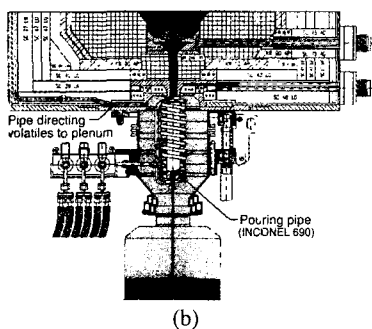
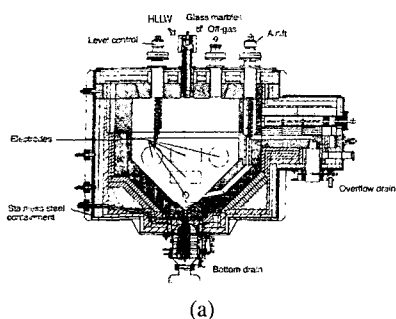
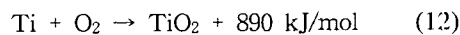


Fig. 10. 세라믹 용융로(a)와 유도가열 방식이 도입된 바닥배출 장치(b).



약 80 그램의 티타늄 금속을 사용해서 10초 정도 점화를 유지하면 약 150kW 정도 에너지가 유리에 전달되며 이로 인하여 수십분내에 유리를 용융할 수 있게 된다. Fig. 9는 고주파를 이용한 저온 용융로에서의 유리화 과정을 시간 흐름 순서대로 보여주고 있다. 유리 frit속에 장전된 티타늄 금속고리는 고주파로 유도된 전류에 의해 점화(a)되고 점화과정 중 발생한 에너지로 유리는 용융(b) 된다. 용융된 유리 위에 폐기물이 투입되고(c) 폐기물이 완전 용융된 후 유리는 배출(d) 된다. Fig. 9(e)는 원자력발전소에서 발생한 잡고체 폐기물을 유리화하기 위하여 비방사성 모의 잡고체폐기물을 용융한 후 냉각시킨 유리고화체를 보여주고 있다.

고주파 유도가열 방식은 세라믹 용융로를 비롯한 여러 용융로의 하부 유리 배출구에 장착되어 녹아있는 유리를 신속히 배출하기 위한 장치로 사용되고 있다. Fig. 10(a)은 미국, 독일, 일본에서 고준위 방사성폐기물 유리화에 사용하고 있는 세라믹 용융로이다.

세라믹 용융로로 부터 용융유리를 신속하고 원활하게

배출하기 위해서는 순간적으로 배출 부위를 가열해 주어야 하는데 가장 적절한 가열방식이 유도가열방식이다. Fig. 10(b)는 Fig. 10(a)의 바닥배출부위를 상세하게 보여 주는 그림이다. 용융유리가 통과하는 관은 용융유리와 접촉시 부식력이 강한 인코넬 690을 사용하고 있다.¹⁴⁾

4. 결론

고주파 유도가열은 전기나 타 연료 방식에 비하여 다음과 같은 장점이 있으므로 많은 분야로 응용이 확대되고 있다. 고주파 유도가열은 피가열체 자신에 의해 직접 가열됨으로 설비 제작비용이 비싸더라도 효율이 높아 총 생산비용은 오히려 타 연료장치 이하로 낮출 수 있으며 피가열체 재질과 크기에 따른 적합한 주파수를 선택한다면 균일한 온도와 속도 등을 임의로 제어할 수가 있어 대량생산에 따른 개별부품의 품질변화가 없는 균일한 제품생산이 가능하다. 그리고, 피가열체를 가열원으로 부터 완벽한 분리, 차단이 가능하며 각종 오염을 방지 할 수 있을 뿐 아니라 열처리, 금속접합, 건조 등 고주파 가열은 대부분 신속한 처리가 가능하여 재질변화를 방지할 수 있다. 또한, 출력에 비하면 설치 면적이 좁고 예열 및 서냉 등 예비시간이 필요 없어 설비의 가동이 자유롭다는 이점이 있다.

한국수력원자력주식회사의 원자력환경기술원은 중·저준위 방사성폐기물 유리화 기술개발을 위하여 대덕연구단지내에 파일럿 규모의 직접 유도전류 가열방식 저온용융로(CCM) 연구설비를 설치하여 운전 중에 있으며 이 연구를 바탕으로 2004년까지 원자력발전소 부지 내에 상용 유리화 설비를 건설하게 된다. 1련 후에 원전에서 발생하는 중·저준위 방사성폐기물을 유리화로 처리할 계획이다. 유리화 기술은 2008~2014년이면 포화상태에 이르게 될 원전내 방사성폐기물 임시 저장 능력 한계 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 인간과 환경에 친화적 처리방식이므로 우리나라 방사성폐기물 관리의 새로운 전환점을 마련할 것이다.

참고문헌

1. 김천우, 최관식, 박종길, 신상운, 송명재, "방사성폐기물 유리화~환경 친화적 처리기술," 세라미스트, 3(6), 55-66 (2000).
2. 최세영, "방사성폐기물의 유리 고화," 세라미스트, 2(1), 9-15 (1999).
3. 이정훈 譯, 유리공학, 298-299, 청문각 (1995).
4. K. Takahashi, Y. Kubota, H. Kaneda, *et al.*, 고주파기 초응용, 삼미인쇄, 2-10 (1990).
5. M. Orfeuil. Electric Process Heating : Technologies/ Equipment/Applications, 397, Battelle Press, Columbus (1987).
6. 최종건, private communication
7. 김영해 역, 공업용 마이크로파응용기술, 205-213, 전기연구소 (1989).
8. 이재건, 실무 고주파가열, 277-335, 진영사 (1997).
9. K. Takahashi, Y. Kubota, H. Kaneda, *et al.*, 고주파기 초응용, 삼미인쇄, 2-10 (1990).
10. 전력연구원, 저준위 방사성폐기물 유리화에 관한 타당성 연구, KEPRI-94Z-17, 83-94 (1995).
11. O. I. Kiryanova, T. N. Lashtchenova, F. A. Lifanov, S. V. Stefanovsky and O. V. Tolstova, "Joint Vitrification of Various Mixed Wastes," Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIII, 691-702 (2000).
12. NETEC - KEPCO, Vitrification Technology Development for Low- and Medium-Level Radio active Waste (I), TR.96NJ17.J2000.3, 15-67 (2000).
13. A. Jouan, R. Boen, J. Lacombe, R. D. Quang, T. Flament and G. Mehlman, "The Cold Crucible Melter High-performance Waste Vitrification," Presented at 103rd Annual Meeting and Exposition of the American Ceramic Society, April 22-25 (2001).
14. IAEA, Design and Operation of High Level Waste Vitrification and Storage Facilities, Technical Report Series 339, 38-39 (1992).