

유전 가열법에 의한 유리의 용융 이론 및 장치설계

변우룡*, 강 옥*, 김요희*, Zhilin, A.**
 * 한국전기연구소, ** 러시아(광학연구소)

Theory and design of glass melting by capacity-heating method

W.B.Byun*, U.Kang*, Y.H.Kim*, Zhilin.A.**
 * KERI, ** SOI(Russia)

Abstract 캐패시터(capacitor)의 고주파(수십MHz)전기장에서 유전손실(dielectric loss)에 의한 유리의 용융 및 합성에 관한 이론적 고찰이 수학적 모델에 의하여 이루어졌다. 유전 가열법에 있어서 캐패시터에 놓여진 유전체가 흡수하는 에너지는 용융인자(전압, 주파수)와 피시물(유리)의 전기, 물리적 성질(유전율(ϵ), power factor($\tan \delta$))에 의존한다. 본 연구에서는 이러한 물성들의 온도 의존성 뿐만 아니라 외부로의 열손실 등이 조사되었으며, 특성 분석을 통해 최적의 용융 모델을 설계하였다.

1. 서 론

현재 공업적으로 유리등의 유전체 물질을 용융시키는 방법은 전기로, 연소로에 의한 열을 피시물에 직접 전달함으로써 용융시키는 직접적인 방법과 백금 도가니 등과 같은 도체 도가니를 전기 유도 방식에 의하여 용융시키는 간접적인 방법들이 있다. 그러나, 전기로와 연소로 등과 같은 직접적인 방식은 비교적 큰 용량의 유리 피시물의 용융이 가능한 반면, 가열시간이 길고, 열효율이 높지 않으며 도가니와 피시물과의 반응에 의한 고순도의 피시물을 얻을 수 없다는 단점이 있다. 그리고 유도가열(induction heating)에 의한 간접적인 방식은 대용량이 아닌 경우 일부 사용되고 있으나 전기 전도성이 있는 금속의 경우에만 주로 한정되어 있으며, 고가의 도가니(Pt, Ir)를 사용하기 때문에 용량의 큰 제약성을 가진다. 본 연구에서의 유전가열(capacity heating) 방식은 위의 직, 간접 방식의 장점(비교적 큰 용량, 고순도 피시물 등)을 이용한 방법이다. 유전 가열의 원리는 피시물(유리 등의 부도체) 그 자체가 유전체 역할을 함으로서 열원과 어울려 하나의 캐패시터(capacitor)가 구성되어 짐으로써 피시물의 유전손실에 의해 가열되는 것이다. 즉, 전자기 에너지(electromagnetic energy)가 피시물과 열원의 직접적인 접촉 없이도 피시물에 전달됨으로써 가열되기 때문에 급속 가열이 가능하여 열효율이 높을 뿐만 아니라 도가니의 온도가 상대적으로 낮기(도가니와 피시물의 유전 손실의 차이) 때문에 고순도의 피시물을 얻을 수 있다.

2. 본 론

2.1 유전 가열법에 의한 유리 용융의 이론적 배경

고주파 전기장에서의 캐패시터 전극사이에 놓여진 시편의 가열은 유전 손실에 의해 일어나며, 이때 흡수되는 에너지는 다음과 같은 식으로 평가되어진다[1].

$$P = [1/(18 \cdot 10^{11})]E^2 \cdot \epsilon \cdot f \cdot \tan \delta, [Wt/cm^3] \quad (1)$$

여기서, E : 캐패시터 안의 전기장 밀도(V/m)

ϵ : 시편의 상대 투자율

f : 동작 주파수(Hz)

$\tan \delta$: 역률(손실인자, power factor)

유리 melting에 대한 유전 가열 방식에서의 특징은 유리 melting 동안 가열 기구(mechanism)의 변화이다. 즉, 유전 손실에 의한 유전 가열은 유리의 온도가 증가함에 따라 분극(polarization)에 의해 기인한 유전 손실의 기여가 감소되고 반면 직접적인 전도 전류(conductivity current)에 의한 손실이 증가되는데 이는 dielectric 상태에서 ionic conductor로의 전이에 기인한 것이다. 이 경우 손실 전력은 전도 계수 값에 의해 결정되며 위의 식(1)은 다음과 같이 바뀐다.

$$P = \gamma \cdot E^2 \quad (2)$$

여기서, γ 는 전기 전도도(Ω/m)이다.

일반적으로 유전 가열에 있어서 동작 주파수는 수십 MHz이며, 흡수되는 에너지는 melting 인자(E, f)와 유리의 전기적/물리적 성질(ϵ , $\tan \delta$)에 의존함인 식(1)에 의해 알 수 있다. 캐패시터의 field intensity는 고주파 장비의 형태와 melting unit의 전기적 구성요소에 의존하는 반면, 유리의 ϵ 와 $\tan \delta$ 는 온도에 의존하기 때문에 흡수되는 전력을 계산하기 위해서는 이들에 대한 온도 의존성을 알아야한다. 또한 주파수에 따른 이들의 전기적 성질까지 고려된다면 더욱 더 복잡한 문제가 된다. 이전의 문헌에 의하면[1-3], 유리에서 온도의 증가에 따라 이온들의 이완(relaxation)시간은 증가하며, 열적 움직임과 이온 진동의 주파수도 증가함을 나타낸 바 있다. 즉, 온도의 증가에 따라 분극과정은 계속 증가되고, ϵ 와 $\tan \delta$ 의 값은 증가한다. 그러나 온도가 계속적으로 증가함에 따라 이온 분극, 즉 유전 분극의 증가분($\Delta \epsilon$, $\Delta \tan \delta$)는 감소한다. 이러한 현상은 유전체를 완전히 분극화하는 것을 방해하는 이온들의 열적 운동의 충분한 증가에 의해 설명되어질 수 있다. 이온들의 열적 운동은 전기장에 따른 dipole moment의 선택적인 방위를 방해한다. 이러한 사실은 그림 1의 ϵ 와 $\tan \delta$ 의 온도 의존성 그림에서 최대치가 있다는 결과이다.

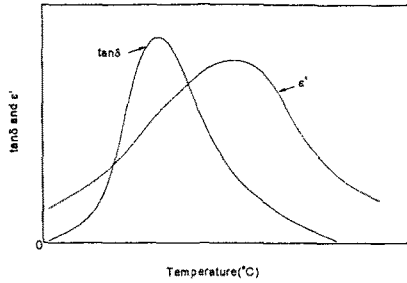


Fig.1 Variation of relative permittivity(ϵ') and power factor($\tan \delta$) with temperature[5]

2.2 고주파 캐패시터에서 유리의 흡수전력 평가

유리가 용융 시 흡수된 전력의 평가는 전도도에 의한 손실 기여를 고려해야 한다[4]. 그리고 캐패시터의 전기장에서 유리 용융의 simulation은 유전가열의 이론에 입각한다. 앞에서 언급한 것처럼 낮은 온도(연화점 이하)에서는 이온 분극에 의한 유전 손실이 고려되어야 하며, 연화점 이상에서는 전도도에 의한 손실이 고려하여야 한다. 즉, 고온에서 유전 손실은 전도도에 의해 일어나기 때문에 ϵ 과 $\tan \delta$ 의 값을 사용하지 않고 저항(R)을 사용했다. Melt의 복소수 값의 capacity(C_p)는 유리의 투자율이 복소수 값 즉, 실수와 허수를 가지고 있다고 할 때 얻어질 수 있다.

$$C_p = (\epsilon - j \epsilon \tan \delta) \epsilon_0 (S/d) \quad (3)$$

여기서, ϵ : 상대 투자율의 실수
 ϵ_0 : 진공에서의 투자율
 S : 콘덴서 plate의 면적
 d : melt의 표면사이의 거리

유리 용융용 도가니의 일반적인 형태는 실린더형(그림 2)이기 때문에 위의 식은 다음과 같이 쓸 수 있다[5].

$$C_p = (\epsilon - j \epsilon \tan \delta) \epsilon_0 h \quad (4)$$

h 는 melt의 높이이다. 또한 melt의 복소수 저항은 다음과 같은 방정식에 의해 계산되었다.

$$Z_r = 1/(j\omega C_r) \quad (5)$$

여기서, ω 는 각 주파수(angular frequency)이다. Generator의 load 등가회로는 실제의 유리를 가열하는 동안 나타나는 전도도의 전류에 melt의 active 저항을 보여준다. 이러한 저항은 전체의 저항이 계산될 때 고려되어야 한다.

$$Z_r = [1/(j\omega C_p)]R / (1/(j\omega C_p) + R) \quad (6)$$

여기서 R 은 melt의 active resistance이다. 여기서 콘덴서 사이의 air gap의 복소수 저항(Z_{vz}), 도가니 사이

의 열부도체 저항(Z_s)과 내부 도가니 재료의 저항(Z_{nn}) 등이 고려될 경우, 전체 저항 Z 는

$$Z = Z_r + Z_{vz} + Z_n + Z_s + Z_{nn} \quad (7)$$

여기서 melting unit를 통해 흐르는 전체 전류값은 다음과 같은 식에 의해 계산되어진다.

$$I = U_{cond}/Z \quad (8)$$

여기서 U_{cond} 는 캐패시터의 plate들의 전압이다. 따라서 melt의 전압은 다음 식에 의해 계산되어진다.

$$U = IZ_r \quad (9)$$

고온에서 가열은 전도도의 전류에 의해 일어나기 때문에 melt를 통해 흐르는 전류는 다음과 같이 결정되어진다.

$$I_r = |U|/R \quad (10)$$

마지막으로 melt에 의해 흡수되는 전력 P 는

$$P = I_r \cdot |U_r| \quad (11)$$

이러한 계산에서 edge 효과를 고려하지 않았기 때문에 오차를 가능한 줄이기 위해 복소수 값의 저항을 계산할 때 구성 단위의 높이에 있어서의 차이를 사용했다. 열 손실 계산에서는 재료들의 열 전도도에 관한 melting 도가니의 벽들과 밑바닥을 통한 손실들을 고려했다. 그리스 melt 표면으로부터 radiation의 power는 약 0.3의 radiation 계수를 고려했다[6].

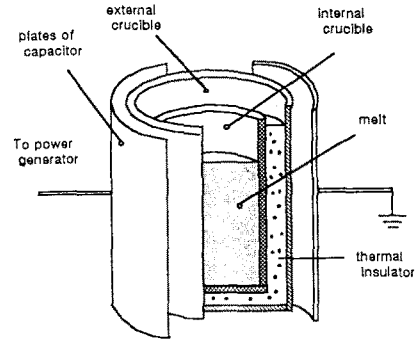


Fig.2 Schematic diagram of the melting unit for glass melting in a capacitor

2.3 용융 유리의 simulation의 응용

Melting unit의 모든 부분들의 에너지 인자들을 계산하기 위해 콘덴서의 plate들과 glass melt 위의 전류, 전압의 전체 값을 표1과 같이 선택했다. 그림 3은 sodalimesilicate와 alumosilicate 유리들에 의해 흡수된 상대적인 specific power의 온도 의존성을 나타낸 것이다. 그림 3에서 power는 유리 전이 온도보다 조금 높은 온도에서 최대치(T_1 , T_2)를 가진다. 이러한 온도 의존성은 batch의 온도가 증가함에 따라 active 저항(R_p)는 감소하고, raw material의 투자율(ϵ)은 유전 손실에 의해 증가시켜 load의 전체 저항의 감소를 가져오는 것으로 설명되어질 수 있다. 용융 초기 단계에는 air gap의 저항은 용융된 유리의 전체 저항보다 작다. 여기서 캐패시터 plate의 전압은 일정한 값을 가지고 있다는 조건으로 시스템의 전체 저항의 감소는 전류의 증가를 가져온다. 이 결과 melt에 의해 흡수된 power는 batch의 온도가 증가함에 따라 증가한다. 이러한 최

대치는 온도 T_1 과 일치한다(그림 3). 합성된 재료의 전체 저항은 온도가 증가함에 따라 감소한다. 그러나, 시스템의 전류는 증가하지 않는데 이러한 이유는 재료의 전체 저항이 직렬로 연결된 air gap의 저항치보다 바로 아래에 있기 때문이다. 따라서 온도가 증가함에 따른 전력의 감소는 캐패시터 시스템의 전류 값이 일정하다는 조건에서 전체 저항이 감소하기 때문이라고 설명되어질 수 있다. 그림 3에서, 도가니 벽을 통한 상대적인 열 손실의 계산된 온도 의존성(곡선 3)을 나타내었다. 흡수된 전력 곡선과 열 손실 곡선의 교차점에서 에너지 차원에서 안정하다. 이 점은 역시 최대의 용융 온도 값(T_{max})을 결정하여 준다. 그림 3에서 볼수 있는 것처럼 aluminosilicate 유리의 경우, melt에 의해 흡수된 specific power의 온도 의존성의 곡선에서 설계된 최대치는 sodalimesilicate와 비교해서 조금 높은 값으로 이동되어있다. 이것은 sodalimesilicate 유리의 specific 저항과 비교해서 aluminosilicate 유리의 specific 저항이 더 높은 것으로 설명되어진다. 즉, melt의 저항이 높으면 높을수록, 흡수된 specific power가 감소되는 온도는 더 높아진다. 이것 때문에 melt의 높은 저항을 가지는 유리(일반적으로 이 경우 melt의 점도는 높음)에 대하여, 시료에 의해 흡수되는 전력 곡선과 도가니의 벽을 통해 방출되는 열 손실 곡선의 교차점은 더 높은 온도로 이동한다. T_{max} 를 증가시키는 데는 2가지 방법이 있다.

첫째, melt에 의해 흡수되는 power를 증가시키는 법. 즉, air gap의 reactive 저항은 최대의 전류를 결정해 준다. 따라서 저항의 감소는 시스템의 전류를 증가시키고, melt에 의해 흡수되는 power를 증가시킨다. 그러나, 저항의 감소를 위해서는 몇가지 제한조건이 따른다. Electric strength의 관점에서, air-gap의 크기는 1.5~2cm보다 작을 수 없다. 유도 가열과 비슷하게, 유도 가열에서 generator의 동작 스케줄은 load와 일치되어야 하며, air gap의 capacitance는 매우 중요한 인자이다.

둘째는 도가니의 열차단 성질의 향상이다. 도가니의 벽을 통한 열 손실의 감소는 교차점을 더 높은 온도로 이동시킨다.

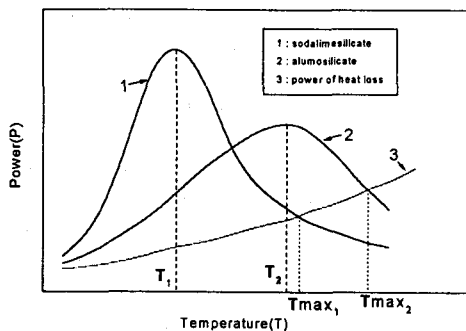


Fig.3 Variation of the relative specific power absorbed by the melt with temperature

그림 4는 앞에서 언급한 simulation을 사용하여 30Na₂O-70SiO₂(mol%)유리 조성에서 5 l 도가니에 대하여 melt에 의해 흡수된 열의 net power의 온도 의존성과 열 손실을 나타낸 것이다. 여기서 용융 온도는 10²-10³Pa·s의 점도와 일치하는 온도로 선택하였으며, 용융 온도는 1040-1300℃이다.

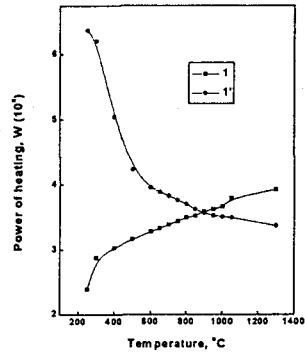


Fig.4 Variation of the power absorbed by the specimen(1) and the power of heat losses(1') with the temperature for a 30Na₂O-70SiO₂(mol%) glass for volumes of 5 l crucible

3. 결 론

1. 유전 가열에 의한 유리 용융의 가능성이 입증되었다.
2. 최대의 유리 용융 온도는 유리에 의해 흡수된 power 곡선과 열 손실 곡선의 교차점과 일치한다.

[참 고 문 헌]

- [1] G.I.Skanavy, Physics of dielectrics, Publishing house of the technical-theoretical literature, Moscow-Leningrad, 1949, 483p. (in Russian)
- [2] A.V.Netushil, B.Ya.Zhukhovitskii, V.I.Kydin, E.P.Parnii, High-frequency heating of dielectrics and semiconductors. Gosennergoizdat publishing house, Moscow-Leningrad, 1959, 271p. (in Russian)
- [3] A.E.Slukhotskii, Equipment for induction heating, Energoizdat publishing house, Leningrad, 1981, 230p. (in Russian)
- [4] J.Voger, J.M.Stevens, C.V.Amerongen, Philips Res. Rep. (1953) 8 452-455.
- [5] A.V.Netushil, Electricity, 1952, 2. (in Russian)
- [6] Owens-Illinois Comp. General Research Lab., J.Amer.Ceram.Soc. (1944) 29(8)221.