技術資料

전자장을 이용한 용해 및 주조기술

하만진, 이진형

Electromagnetic Melting and Casting Technology

M. J. Ha and Z. H. Lee

1. 서 론

전자장 기술을 이용하여 생산공정을 향상시키려는 시도가 산업 전반에 걸쳐 이루어지고 있다. 특히 주조산업에 있어서도 가열, 교반, 주조 등의 공정에 전자장 기술을 이용하여 공정을 효율화하고 생산제품의 질을 향상시키려는 시도가 세계적으로 이루어지고 있다.

주조공정에 사용되는 전자장 기술의 기본은 플라즈마 물리학에서 사용된 전자기 유체역학(magnetohydrodynamics, MHD)이다. 전자기 유체역학은 전자기학과 유체역학에 서로 관련되어 전자장하의 전도성 유체의 운동을 예측하고 설명하는 학문분야이다. 이를 금속 가공공정에 이용하려는 시도는 1978년 프랑스에서 MADYLAM 연구소를 창설함으로써 시작되었으며, 그 이후 영국에서 Metallurgical Applications of MHD를 중심과제로 하는 IUTAM Symposium이 열렸다. 그리고 1988년 CIS의 Riga에서 'Symposium on Liquid Metal MHD'가 열렸고, 1990년 일본의 Nagoya에서 열린 'The 6th International Iron and Steel Congress'에서 하나의 분과로 다루어졌다. 그리고 1992년 미국의 San Diego에서 MHD in Process Metallurgy'가 TMS 주관으로 열렸다.

주조공정에 있어 전자장 기술의 사용은 20세기 초 금속을 용해시키기 위한 유도로의 사용으로 시작되었다. 유도로는 유도전류에 의한 가열과 전자기력에 의한 교반을 이용하여 금속을 용해시키면서 교반을 시켜주는 이중효과를 가져왔다[1]. 그후 회전 전자기력 뿐만 아니라 비회전 전자기력을 이용하여 1960년대 초 Getselev에 의해 전자기 연속주조(electromagnetic continuous casting)가 착상된 이래 1977년 Getselev는 알루미늄의 연속주조를 행하였고[2], 1980년대 알루미늄에 실용화되어 많은 양의 알루미늄이 생산되고 있다. 1980년대에는 강의 전자기 연속주조를 행하려는 시도가 시작되어 현재까지 계속 연구중에 있다[3,4]. 일본, 옛소련, 미국, 프랑스 등을 중심으로 연구가 진행되고 있는데 특히 일본의 경우 1985년에 ISIJ에서 전자장 기술을 4대 주요 혁신기술로 지정하였고, 1991년 '전자기 야금에 의한 난용성 재료의 용해 및 응고 프로세스 개발'을 통산성, 공업진흥원의 국가 대형 프로젝트로 선정하여 많은 연구가 진행되고 있다[5].

2. 유도 전자기력의 이론적 고찰

유도로를 사용하여 금속을 녹일 때 용탕의 교반과 함께 볼록한 면(meniscus)이 유지되는 것을 관찰할 수 있다. 코일에 교류전류가 흐르면 교류 자기장을 발생한다. 이에 의해 용탕에 유도전류가 발생하여 이 둘 사이의 반응에 의해 전자기력이 생성된다. 전자기력은 회전 전자기력과 비회전 전자기력이 있는데 회전 전자기력은 용탕을 교반시키는 역할을 하며 비회전 전자기력의 방향은 용탕 내부로 작용하는 용탕을 모아주는 압력과 같이 작용한다. 여기에서는 1차원 모델을 이용하여 용탕 내부의 전자기장 및 유도전류, 전자기력, 전자기압, 주울(Joule)열을 계산한다[6].

MHD 이론의 지배방정식은 전자장의 Maxwell 방정식과 유동장의 Navier-Stokes식으로

한국과학기술원 재료공학과

구성된다. Maxwell 방정식은 다음과 같은 4개의 방정식으로 구성되어 있다.

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (3a)$$

$$(\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}) \quad (3b)$$

(1)식은 패러데이식(Faraday's Law)이며 (2)식은 암페어식(Ampere's Law) 그리고 (3)식은 가우스식(Gauss's Law)이다(변수설명은 표 1 참조).

그리고 유동과 전기장에 의해 발생되는 전기밀도는 다음과 같은 오옴의 법칙(Ohm's Law)으로 설명되어진다.

$$J = \sigma(E + V \times B) \quad (4)$$

표 1. Symbols.

E	electric field strength[V/m]
H	magnetic field strength[A/m]
J	current density[A/m^2]
V	fluid velocity[m/s]
B	magnetic flux density[T]
μ	magnetic permeability[H/m]
ε	electic permitivity[F/m]
ρ	charge density[C/m^3]
p	pressure[N/m^2]
μ_f	viscosity[kg/m·s]
F	body force[N]
σ	electric conductivity[A/V]

그리고 유동장에 관한 지배방정식인 Navier-Stokes식은

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla P + \mu_f \nabla^2 V + F \quad (5)$$

과 비압축성 액체에 대한 연속방정식

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (6)$$

으로 이루어진다.

이때 체력 F는 중력 및 전자기력을 포함한다. 이때 전자기력은 Lorentz force인데 이는

$$F = J \times B = J \times \mu H \quad (7)$$

로 나타내어진다. (2)식의 우변에서 도체안에서는 J가 훨씬 크므로 $\varepsilon(\partial E/\partial t)$를 무시하고 (2)식을 (7)식에 대입하고 vector 공식

$$(\nabla \times A) \times B = A \times (\nabla \times B) + (B \cdot \nabla)A + (A \cdot \nabla)B - \nabla(A \cdot B)$$

을 이용하여 전개하면

$$F = (\nabla \times H) \times \mu H = \mu(H \cdot \nabla)H - \nabla(\mu H \cdot H/2)$$

가 된다. 여기서 $F_{rot} = \mu(H \cdot \nabla)H$는 유체운동의 구동력이 되는 회전력이고 $F_{irrot} = \nabla(\mu H \cdot H/2)$는 유체의 구동에는 기여하지 않는 비회전력이며 자기압을 유기한다.

(1)식에 (2), (4)식을 대입하면 다음과 같은 자기장의 지배방정식이 얻어진다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \eta \nabla^2 H + \nabla \times (V \times H) \quad (9)$$

여기서 $\eta = 1/\sigma\mu$는 자장의 확산계수이다.

여기에서 자장의 대류항(9식의 우변의 제2항)을 자장의 확산항(9식의 우변의 제1항)으로 나눈 비는 자기 Reynolds수 $R_m = \sigma\mu LV$가 되는데 (L과 V는 각각 계의 대표길이 및 대표속도), 용융금속에서 $\sigma\mu$는 약 $0.1 s/m^2$이 되기 때문에 LV가 $10 m^2/s$ 이하인 경우 대류항이 확산항보다 작아져서 무시되고 (10)식과 같은 자장의 확산식이 된다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = (\frac{1}{\mu\sigma}) \nabla^2 H \quad (10)$$

자장의 확산식을 이용하여 그림 1과 같이 반무한의 용융금속내를 전파하는 자장의 1차원 모델을 세워 계산하여 자기압 및 주울열의 발생량을 알아본다.

(10)식을 1차원에 대하여 간단히 정리하면

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \eta \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} \quad (11)$$

이때 $H_x = h_x(z)\exp(i\omega t)$로 표시하고 (11)식에 대입하면

$$i\omega H_x = \eta \frac{d^2 H_x}{dz^2} \quad (12)$$

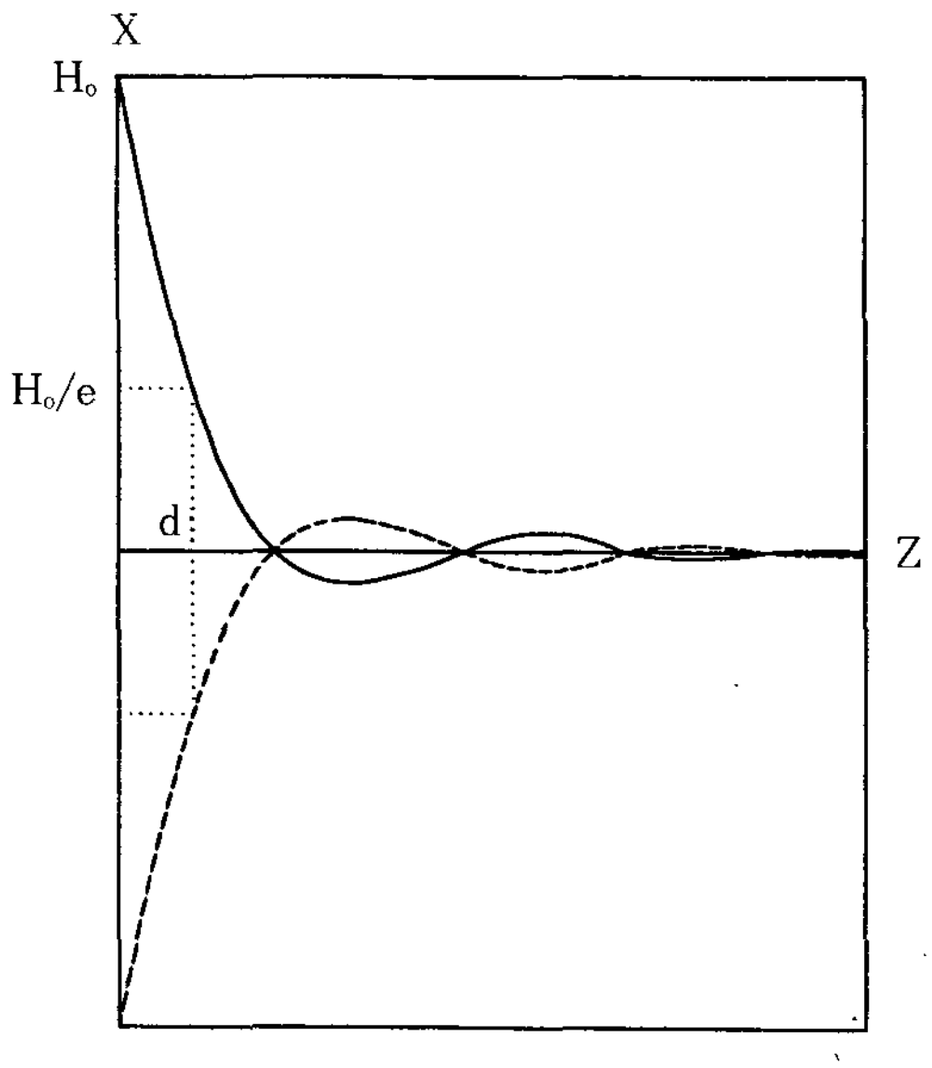

그림 1. One dimensional model of electromagnetic wave propagation in conducting melt.

가 얻어진다. 경제조건인 (13)식을 이용하여 풀면 (14)식과 같은 해를 얻는다.

$$z=0\text{에서 } h_x=H_0 \qquad (13)$$
$$z=\infty\text{에서 } h_x=0$$

$$H_x=H_0\exp(-z\sqrt{\omega/2\eta})\exp(-iz\sqrt{\omega/2\eta})\exp(i\omega t) \qquad (14)$$

이때 자기장 H_x의 진폭이 표면에서의 자기장 H_0의 1/e로 감쇠하는 거리 d를 표피두께(skin depth)라 하고 (15)식과 같이 구해진다.

$$d=\sqrt{2\eta\omega}=\sqrt{\sigma\mu\omega} \qquad (15)$$

용탕의 전기 전도도 σ, 투자율(permeability) μ, 교류전원의 주파수 $f=\omega/2\pi$가 작아지면 표피두께가 커져서 용탕 깊숙히 자기장이 침투한다.

전류밀도 J는 식 (2)의 $\nabla\times H=J$로 나타나는데 이를 계산하면 (16)식과 같이 나타난다.

$$J_y=-\sqrt{\omega/2\eta}\,(1+i)H_0\exp(-z\sqrt{\omega/2\eta})\exp(i(-z\sqrt{\omega/2\eta}+\omega t)) \qquad (16)$$

그리고 용탕내의 한 요소에 가해지는 전자기 체적력(electromagnetic body force) $F=J\times\mu H$를 구하면 z방향의 성분만 나타나서 $f_z=-\mu H_xJ_y$가 되며 f_z의 방향은 용탕 표면에 수직하게 작용한다. (14), (16)식과 같은 진동함수를 $A\exp(i\omega t)$의 형태로 표시한 경우 비선형적인 연산 즉 그 곱은 실수부분만을 취해서 행하여야 한다.

$$\mathrm{Re}(H_x)=H_0\exp(-z/d)\cos(\omega t-z/d)$$
$$\mathrm{Re}(H_y)=-\frac{\sqrt{2}\,H_0}{d}\exp(-z/d)\cos(\omega t-z/d+\pi/4)$$
$$f_z=-\mu\mathrm{Re}(H_x)\,\mathrm{Re}(J_y)$$
$$=\frac{\mu H_0^2}{d}\exp(-2z/d)[\cos^2(\omega t-z/d)-\frac{1}{2}\sin 2(\omega t-z/d)]$$
$$=A(z)P \qquad (17)$$

단 여기서 $A(z)=\mu H_0^2/d\ \exp(-2z/d)$는 z에 따른 진폭을 나타내고, P는 진동하는 부분을 나타낸다. 그림 2에 P의 분포를 $t=2\pi n/\omega$(n=0, 1, 2…)인 순간에 대해서 나타내었다. A(z)는 표면에서 최대값 $\mu H_0^2/d$를 갖고 내부로 들어갈수록 지수함수적으로 감소한다.

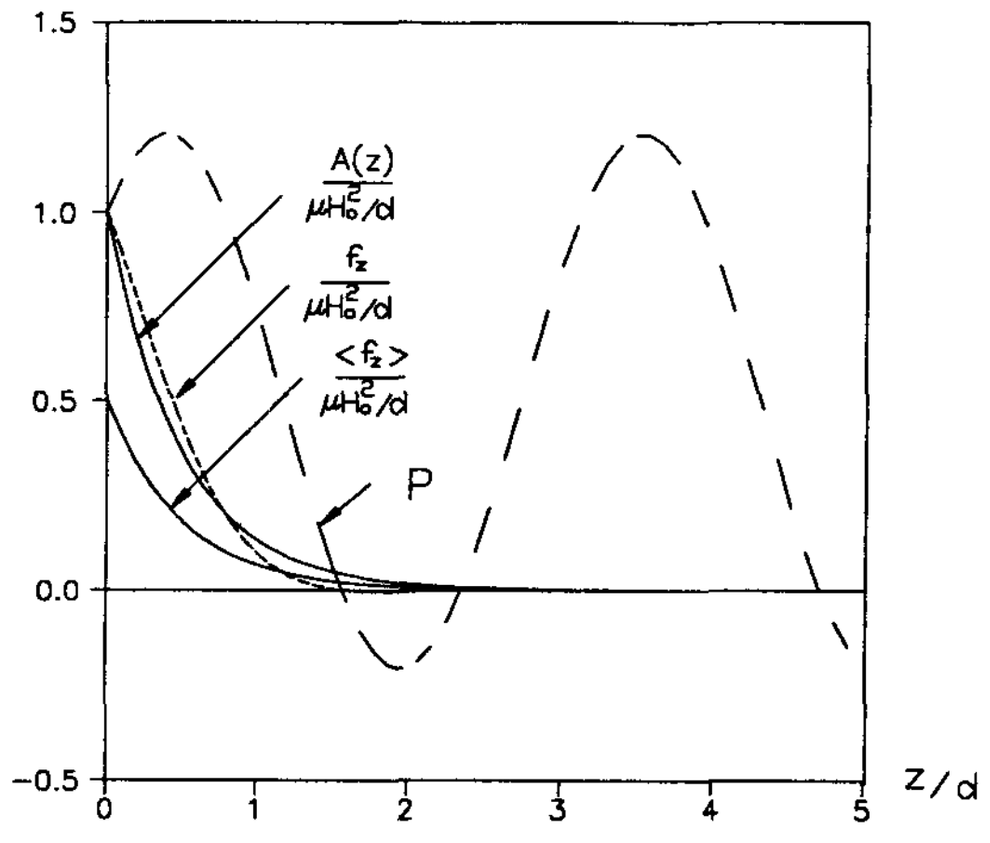

그림 2. Electromagnetic force distribution in melt at $t=2\pi n/\omega$, n=0, 1, 2….

$A(z)/(\mu H_0^2/d)$의 값과 $f_z/(\mu H_0^2/d)$의 값을 그림 2에 나타내었다. 이때 f_z는 시간과 공간에 따라 변하는데 f_z의 한 주기에 걸친 평균을 취하면

$$\langle f_z\rangle=\frac{1}{T}\int_0^T f_z dt=\frac{-\mu}{2}\mathrm{Re}(H_xJ_y^*)$$

의 관계로부터 다음식이 얻어진다(J_y^*는 J_y의 conjugate).

$$<f_z>=\frac{\mu H_0^2}{2d}\exp(-2z/d) \quad (18)$$

즉 f_z의 평균치는 어느 위치(z)에서든지 재료 내부(+z방향)로 향하고 그 크기는 A(z)의 반이며 표면에서 최대치인 $\mu H_0^2/2d$이고 내부로 들어갈수록 급속히 감소하여 z=d 또는 z=2d가 되면 각각 표면값의 13% 또는 2%로 된다.

또한 표면에서 용탕내부 깊숙히까지 $<f_z>$를 적분하여 자기압 P_m을 구하면

$$P_m=\int_0^\infty <f_z>dz = \frac{\mu H_0^2}{4}=\frac{\mu H_{oe}^2}{2} \quad (19)$$

여기서 H_{oe}는 금속 표면에서의 자장의 실효치 $H_o/\sqrt{(2)}$이다. P_m은 단위 표면적에 작용하는 자기압으로 용융금속의 내부로 작용한다. 용융금속의 두께 L에 대하여 표피두께 d가 충분히 작으면 L은 d에 비하여 무한히 길다고 볼 수 있으므로 경계조건($z=\infty$에서 $h_x=0$)이 만족된다. 자기압이 용융금속의 정압과 평형을 이루면 용기 벽과 무접촉으로 유지하는 것이 가능하다.

이제 유도전류에 의하여 발생하는 주울열을 계산하자. 단위 체적당의 발열속도(ohmic dissipation)의 시간평균은

$$q=I^2R=\frac{<Re(J_y)^2>}{\sigma}=\frac{1}{2\sigma}Re(J_y\cdot J_y^*) = \frac{H_0^2}{\sigma d^2}\exp(-2z/d) \quad (20)$$

단위표면적당 단위시간에 투입되는 전기에너지 Q는

$$Q=\int_0^\infty q\,dz=\sqrt{\frac{\omega\mu}{8\sigma}}H_0^2=P_m\sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \quad (21)$$

즉 가열속도는 표면에서의 자기장의 제곱과 주파수 및 투자율의 제곱근에 비례하고 또한 전기전도도의 제곱근에 반비례한다. 주파수가 큰 전자기파를 사용하면 가열속도를 높일 수 있고 전기전도도가 작은 재료가 가열이 잘된다. 그리고 자기압은 자기장의 세기에만 관련되어 있으므로 일정 자기압을 유지하면서 가열속도를 증가시키기 위해서는 주파수를 증가시켜야 한다. 이 결과를 유도로의 가열에 적용하기 위하여 유도로를 무한히 긴 코일의 일부분으로 간주하고 그 안에 위치한 반경 a의 금속에서 $d \ll a$가 만족하는 경우, (21)식에서 $H_0=\sqrt{2}\,nI$(n은 단위길이당 코일의 턴수, I는 코일내의 전류)이므로

$$Q=4\pi^2 a\sqrt{(\mu_r f/a)\times 10^{-7}}(nI)^2 \quad (22)$$

가 얻어진다. 즉 유도로의 발열속도는 코일의 단위길이당 턴수의 자승에, 시료의 반경에, 주파수와 시료의 비투자율의 평방근에 비례하고 시료의 전기전도도의 평방근에 반비례한다.

3. 응용분야

3.1 유도로

유도로는 패러데이의 전자기 유도법칙을 응용하여 외부 코일에서 가하는 AC전자기장이 금속 내부에 유도전류를 일으켜, 금속에서 I^2R의 주울열이 발생하게 하여 금속을 가열·용해하는 장치이다. 유도로는 일반 화석연료를 이용하여 가열하는 일반로와 달리 유해가스 등이 발생하지 않고, 빠른 가열이 가능하다. 또한 자동적으로 교반이 되어 균일한 조성의 인곳(ingot)을 만들 수 있고 운용비용 또한 그리 높지 않다. 유도로는 coreless induction furnace와 channel induction furnace로 나눌 수 있다. coreless induction furnace는 금속의 재용해에 주로 사용하며 channel induction furnace는 용탕을 보온·유지하는데 사용한다[1].

3.2 부유용해법 (levitation melting)

부유용해법은 중력이 작용하는 공간에서 전자기력을 이용하여 전도체를 몰드와 물리적으로 접촉하지 않게 부상시켜 용해하는 방법이다. 자기장과 전도체내에서 발생하는 유도전류가 반응하여 전자기력을 발생시켜 전도체를 부상시킨다. 동시에 전도체 내에서는 주울열이 발생하여 전도체를 녹인다. 부유용해법은 1923년 독일의 O. Muck[7]가 제안하여 1951년 미국의 D. M. Wroughton과 E. C. Okress[8]가 발전시켰다. 초기의 부유용해법은 한개의 주파수로 된 전류를 사용하여 전도체를 부상시켰다. 단주파수 부유용해

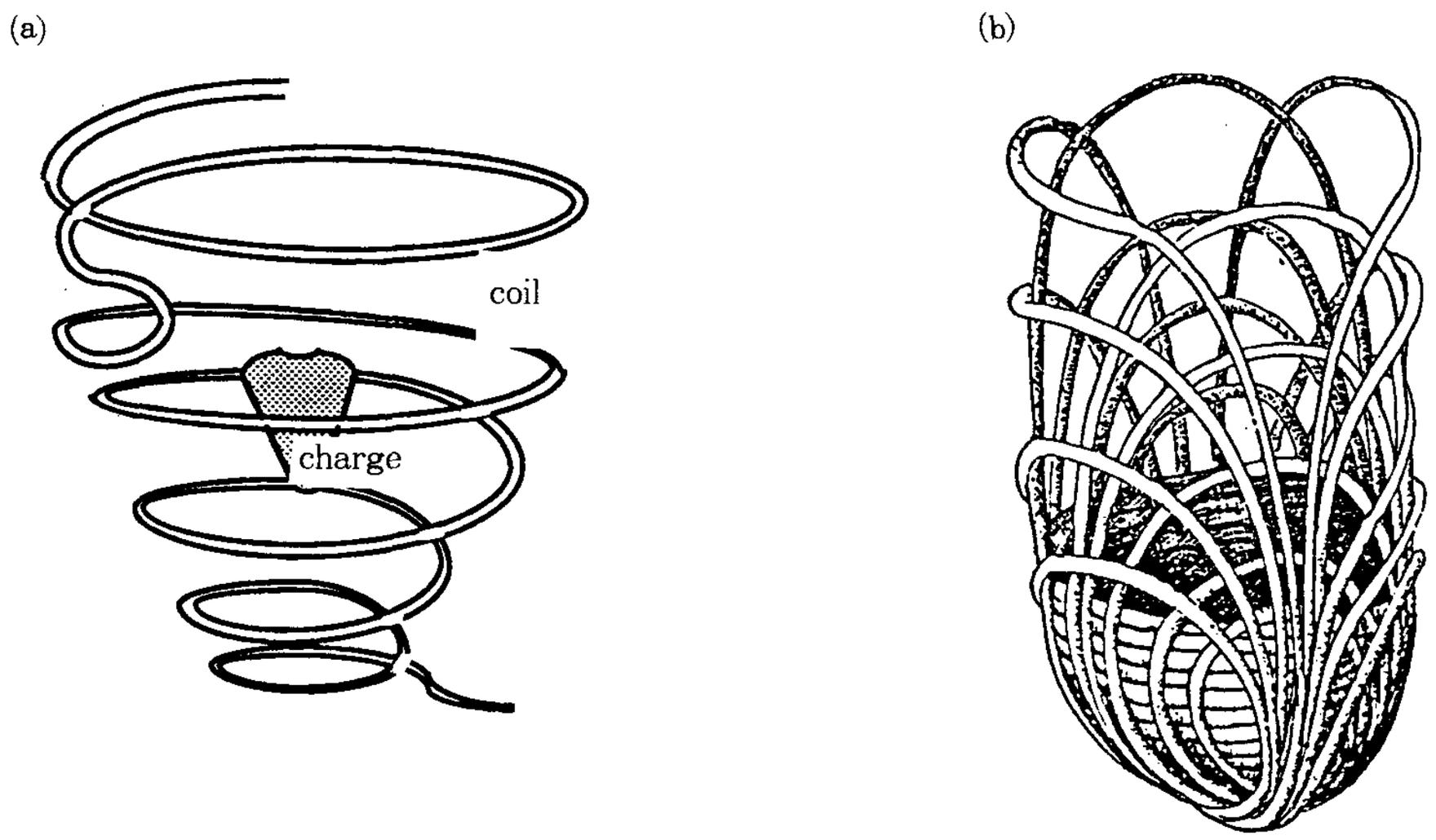

그림 3. Schematic drawing of (a) single - frequency levitation coil and (b) multiple - frequency levitation coil.

법은 그림 3과 같이 코일을 상부코일과 하부코일로 나누고 하부코일은 금속을 부유시키는 힘을 발생시키는 역할을 하고 상부코일은 부유된 금속을 일정 위치에 고정시키는 역할을 하게 하였다. 이때 하부코일의 설계를 달리하면 발생되는 전자기장이 변하여 부유된 금속 표면의 형상이 변하게 된다[9]. 그러나 코일의 중심선상에서는 유도전류가 생기지 않으므로 전자기력이 생기지 않는다. 이곳을 지탱하는 힘은 표면장력과 산화피막이 있을 뿐이다. 이 때문에 일정 질량 이상의 전도체를 부유시키기 어려우며 부유시켜도 용탕이 완전히 녹으면 이 전자기력이 없는 구멍을 통해 빠져버린다. 이러한 전자기력이 없는 공간을 제거하기 위하여 그림 3과 같이 Sagadia[10]는 2개의 주파수를 이용하여 전자기장이 서로 직각이 되게 배치함으로써 코일 중심에 생기는 전자기력이 없는 공간을 제거하여 780g의 알루미늄을 부유시켜 용해하였다.

실제 부유용해법은 도가니와 반응성이 강한 재료를 녹일 때 많이 사용하며, 액체금속의 자유표면 및 부유된 높이 등을 측정하여 컴퓨터 계산결과와 비교하여 전자기장안에서 액체금속내의 유동 또는 전자기력의 분포를 예측한다[11].

3.3 냉도가니(cold crucible) 용해법

냉도가니(cold crucible)는 그림 4에 보는 바와 같이 코일 내부에 슬릿(slit)이 있는 수냉 구리 도가니를 사용하여 코일에서 발생하는 전자기장이 도가니 내부에 집중되게 하고 또한 균일하게 분포하도록 한다. 이때 슬릿의 갯수가 많으면 용탕의 모양이 균일해지며 슬릿의 갯수가 적으면 용탕의 모양이 원이 되지 않고 각이 진다. 이러한 냉도가니를 이용하여 도가니와 완전히 접촉하지 않게 하여 녹일 수 있는 양은 현제 기술수준으로는 타이타늄 합금 2.3kg 정도이다. 이 방법을 이용하여 반응성이 강한 물질을 다루거나 방

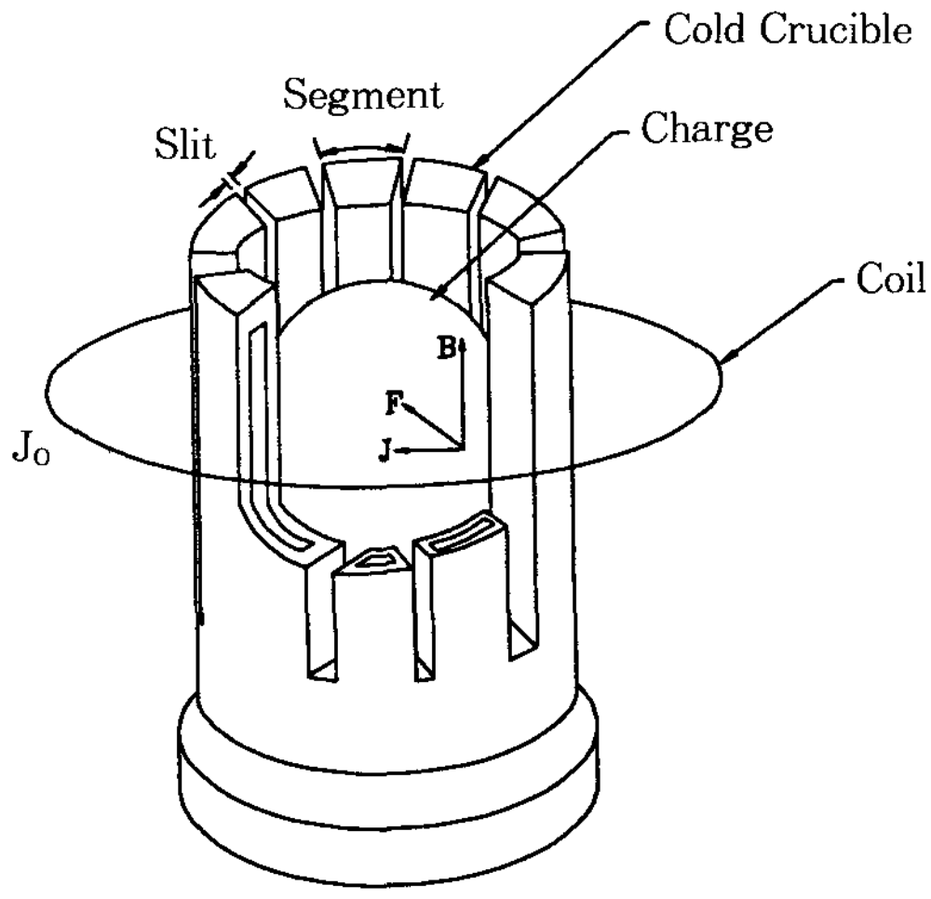

그림 4. Schematic view of a cold crucible.

사능 물질을 처리하는데도 사용하며 이를 연속주조에 응용하기도 한다.

냉도가니를 해석하기 위한 모델은 Delage 등[12]이 제안한 집중정수계 모델(Lumped parameter model)과 Gagnoud 등[13]이 제안한 분포정수계 모델(Filiform wire model)이 있다. 집중정수계 모델은 변압기 개념을 이용하였다. 코일에 흐르는 전류가 전자장을 발생시켜 도가니 조각(crucible segment)과 용탕에 유도전류가 흐르게 되어 도가니 조각과 용탕에 주울열이 발생하며 유도전류와 전자장이 반응하여 전자기력을 발생시켜 용탕을 띠운다. 이 모델을 이용하여 계산된 주울열 발생량과 측정값을 비교하였다. Asai 등[14]은 Delage 등의 집중정수계 모델을 변형하여 코일에 전류가 흐르면 도가니 바깥표면에 유도전류가 발생하여 이 유도전류가 도가니의 안쪽표면으로 돌아 들어가서 이 유도전류에 의하여 용탕에 다시 유도전류가 생긴다는 모델을 제안하였다. 분포정수계 모델은 여러개의 슬릿을 가진 도가니를 1개의 슬릿을 가진 도가니로 생각하여 냉도가니 내부의 자기 벡터포텐셜(magnetic vector potential)이 A_θ 성분만 있다고 가정하였다. 그리고 코일과 냉도가니, 용탕을 단위 두께를 가진 전류 루프(loop)라고 가정하여 이들에 의해 생기는 자기 벡터 포텐셜의 합을 계산하였다. 이를 이용하여 자기장과 전류밀도, 전자기력을 계산하여 실험값과 비교하였다. 계산된 자기장의 세기 분포를 그림 5에 도시하였다. 또한 FEM과 BEM, FDM을 이용하여 3차원적으로 자기장과 전류밀도, 전자기력을 정밀하게 계산할 수 있다. 특히 슬릿의 갯수와 위치의 변화에 따른 용탕의 모양변화 및 여러 전자기 변수의 영향을 알 수 있다[15]. 그러나 계산시간이 많이 소모되는 단점이 있다.

Herrik와 Behrens[16]는 1981년 스컬(skull)형 냉도가니에서 UO_2(T_m=2878℃)와 ThO_2(T_m=3400℃)의 단결정을 제조하였다. Cisek[17]는 1984년 470kHz 20kW 5turn 65ϕ코일을 사용하여 고순도 Si의 용해 및 주조를 행하였다. Paillere와 Cezus[18]는 1988년 scrap 타이타늄을 이용하여 100~150ϕ의 타이타늄 billet의 연속주조에 성공하였다.

3.4 전자기 연속주조(electromagnetic continuous casting)

전자기 연속주조는 몰드를 사용하여 주입 용탕의 정압을 지탱하며 응고시키던 종래의 연속주조 기법에서 탈피하여 외부에 장착된 유도코일에서

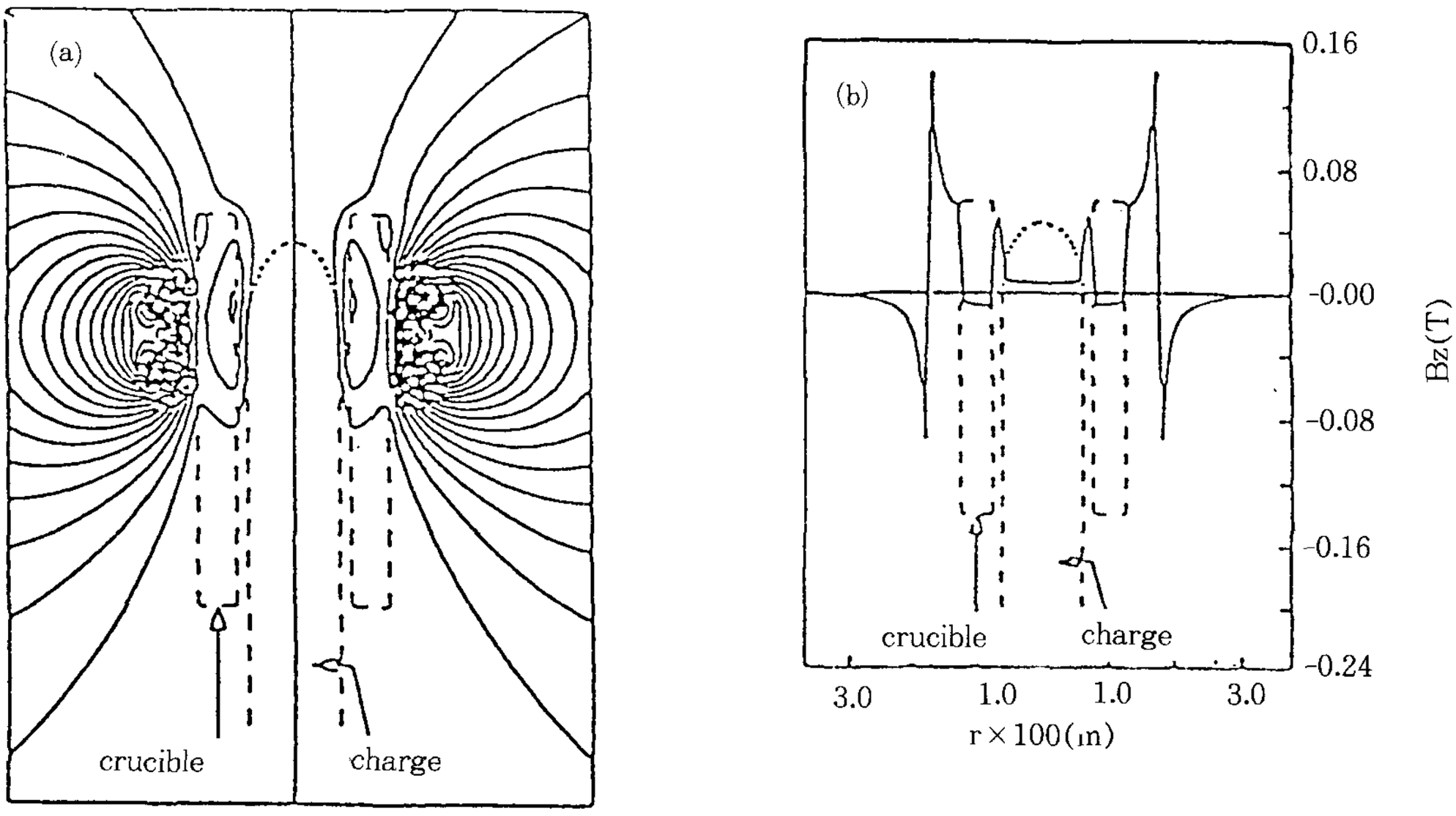

그림 5. (a) Magnetic flux density lines and (b) radial distributions of magnetic flux density around cold crucible.

발생되는 전자기력에 의해 용탕을 가두어 하강시키면서 분무냉각으로 응고시키는 신 주조기법이다. 이 방법은 direct chill 방법과 비교할 때 몰드와 직접 접촉하지 않기 때문에 진동 마크(oscillation mark)를 제거하여 표면의 질을 향상 시킬 수 있는 이점이 있다. 또한 주괴내의 불순물의 편석을 줄이고 내부 교반효과에 의해 grain size를 작게 할 수 있다[19].

알루미늄과 같이 전기 전도도가 크고 비중이 낮은 금속에 있어서는 그림 6과 같은 Alusuisse 방법을 사용하여 연속주조를 행한다[20,21]. 유도코일과 용탕 사이에는 스크린(screen)을 설치하여 코일 밑쪽에는 용탕의 정압이 크므로 전자기압도 크게 하고 코일 윗쪽은 전자기압을 작게 하여 정

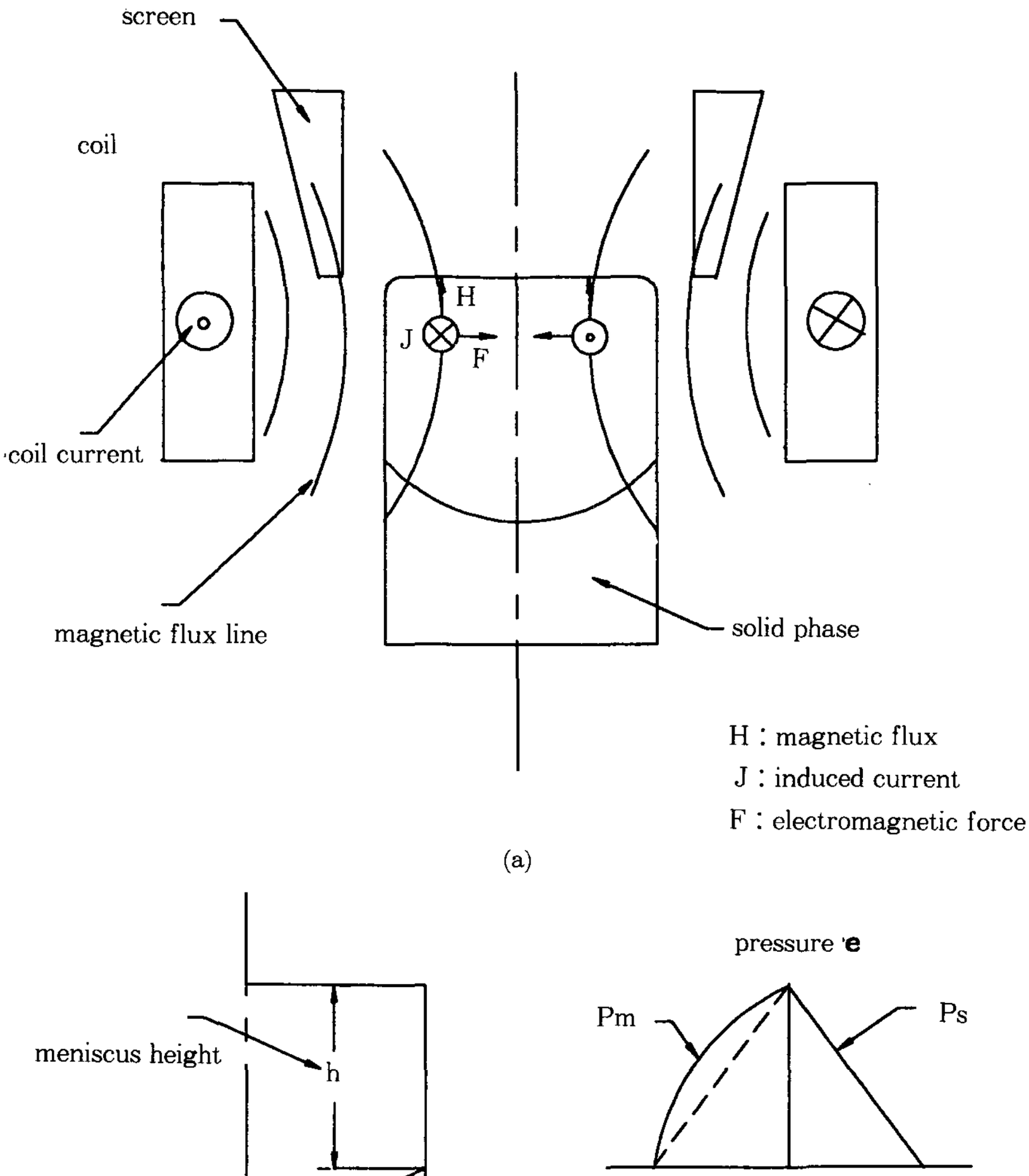

그림 6. (a) Schematic illustration of electromagnetic continuous casting and (b) it's principle.

압과 전자기압간의 균형을 유지시킨다. 그리고 코일 아랫부분에서 물을 뿌려 주어 용탕을 일정 모양으로 응고시킨다. Alusuisse에서는 이 방법을 이용하여 알루미늄을 연간 1백만톤을 생산하고 있다[19]. 그러나 전기 전도도가 작고 비중이 큰 철 또는 타이타늄과 같은 재료의 연속주조시에는 위와 같은 방법을 이용하여서는 용탕을 가둘 수가 없기 때문에 그림 7과 같이 냉도가니을 이용하거나, 완전히는 몰드와 용탕 사이를 떼지 않는 soft contact 방법을 이용한다. L. R. Turner 등[4]은 주파수가 다른 전류가 흐르는 코일들을 조합하여 3~8mm의 얇은 강판을 전자기 연속주조로 생산하였다. 그리고 Tsutomu Tanaka 등[22]은 냉도가니법을 이용하여 타이타늄 연속주조를 행하였다.

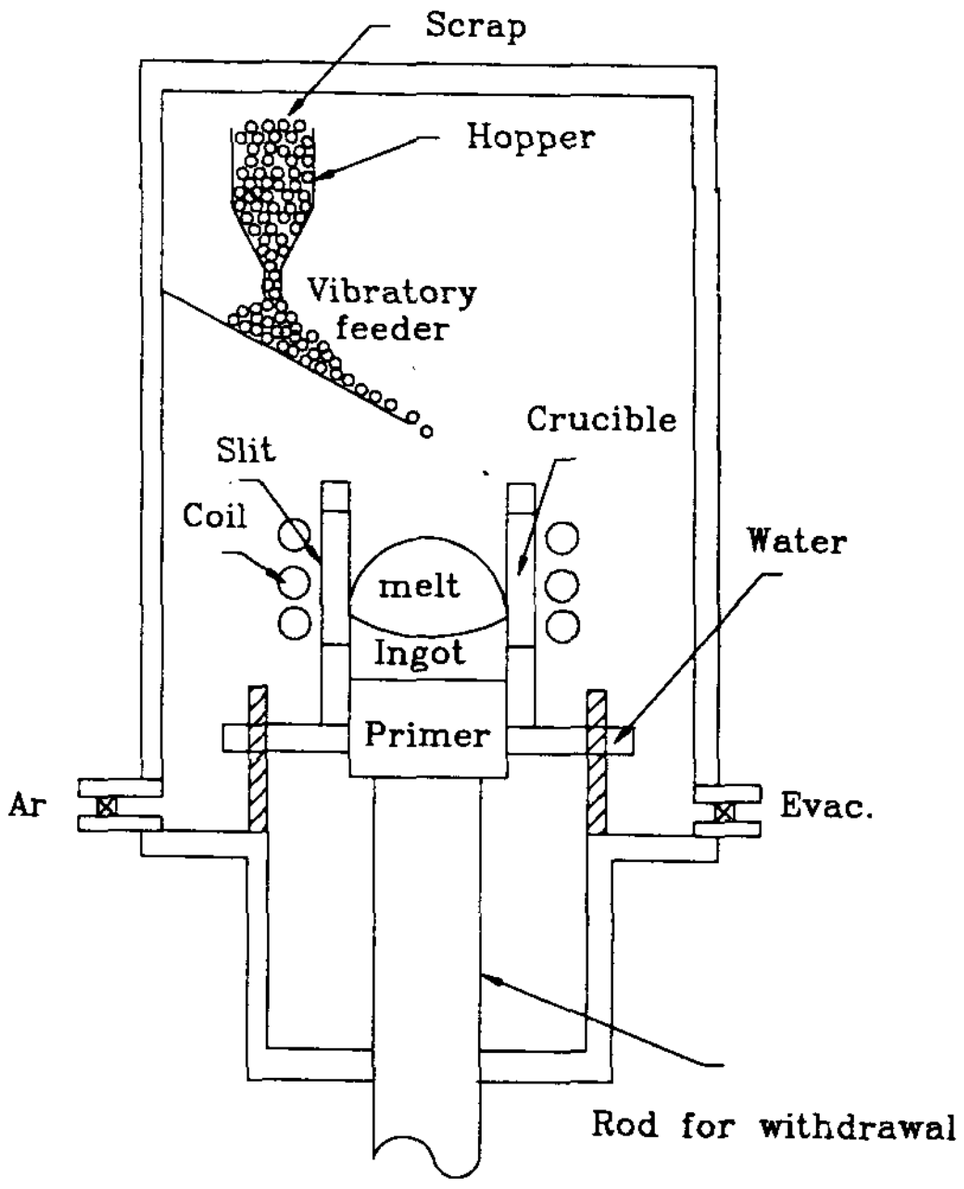

그림 7. Schematic illustration of the induction cold crucible process for the continuous casting of titanium alloy.

3.5 그외 응용분야

그외에도 용해 및 주조공정에 자장을 이용하는 것은 많다. 용탕을 낮은 곳에서 높은 곳으로 흐르게 한다던가, 또한 연속주조시 턴디쉬에서 내려가는 용탕의 유속을 감속시켜 개재물의 부상을 용이하게 한다. 용탕이 노즐을 통하여 흘러나가면서 상대전극과 접촉하는 순간 전류가 흐르고 동시에 자기장내에서 큰 힘을 받아 분산되어 분말을 제조하는 법도 있다[23].

또한 전자장을 이용하여 용탕과 전기전도도가 다른 혼입물을 분리하기도 한다[24]. 이와같이 전자장을 용융가공에 이용하는 방법은 매우 많으며 앞으로의 개발가능성도 매우 높다. 특히 초전도체의 발달과 더불어 이러한 응용은 더욱 가속될 것이다.

4. 요 약

지금까지 교류자장이 용탕에 걸릴 때 발생하는 힘과 열에 대해서 이론적으로 소개하였다. 주조공정에 전자기력을 응용하기 위해서는 용해, 응고지식과 더불어 전자기 유체역학에 대한 이해가 필요하다. 이둘을 서로 결합하여 전자장을 주조공정에 적용하려는 시도는 세계적으로 이루어지고 있으며 또한 주조공정에 실용화되고 있다. 국내에서도 전자기장을 용해 및 주조공정에 응용하는 기술에 대해서 많은 관심을 가져야 하겠다.

참 고 문 헌

1. J. Davies and P. Simpson : Induction Heating Handbook, McGraw-Hill Book Co., (1979) 135~162
2. Z. N. Getselev : US Patent 4 014 379, (1977)
3. H. Nakata and J. Etay : ISIJ Int., 32 (1992) 521~528
4. L. R. Turner, R. J. Lari and W. F. Praeg : Casting of Near Net Shape Products, (1988)
5. 정진호 : Report of RIST (1992)
6. K. Sassa and S. Asai : 熱處理, 30 (1990) 80~86
7. O. Muck : German Patent 422 004, (1923)
8. E. C. Okress and D. M. Wroughton : J. Appl. Phys., 23 (1952) 545~552
9. N. El-Kaddah and T. T. Natarajan : Proc. of the Sixth Int. Iron and Steel Congress, 4

(1990) 380~387
10. S. R. Sagardia and R. S. Segsworth : IEEE Trans. on Industry Appl., 1A-13 (1977) 49~52
11. E. Schwartz, J. Szekely, O. J. Ilegbusi, J. H. Zong and I. Egry : Magnetohydrodynamics in Process Metallurgy, (1992) 81~87
12. D. Delage, R. Ernst and J. Driole : IEEE Trans. on Industrials Appl., (1981) 957
13. A. Gagnoud, D. Delage and M. Garnier : AIAA (1985) 634
14. K. Iwai, M. Kuwabara, K. Sassa and S. Asai : Proc. of the Sixth Int. Iron and Steel Congress, 4 (1990) 380~387
15. T. Tanaka, K. Kurita and A. Kuroda : ISIJ Int., 31 (1991) 350~357
16. C. C. Herrick and B. G. Behrens : J. of Crystal Growth, 51 (1981) 183
17. T. F. Cizek : J. of Crystal Growth, 70 (1984) 324
18. P. Paillere, J. F. Wadier, Y. Boussant-Boux and M. Garnier : 6th World Conf. on Titanium, Carnnes, (1988)
19. R. Wrergler and D. Grimm : "Electromagnetic Casting by Alusuisse", Swiss Aluminum (1993) 433~465
20. M. Furui, Y Kojima and M. Matsuo : ISIJ Int., 33 (1993) 400~404
21. B. G. Lewis and J. C. Yarwood : Casting of Near Net Shape Products (1988) 515~519
22. T. Tanaka, A. Kuroda and K. Kurita : ISIJ Int., 32 (1992) 575~582
23. S. Ninagawa, K. Sassa, T. Kuzuka and Shigeo Asai : ISIJ Int., 31(1991) 968~972
24. P. Marty and A. Alemany : Proc. of IUTAM Sym on Magnetohydrodynamics, Cambridge(UK), (1982) 245~259

제 2 회 아시아주물대회 발표논문 모집안내

日本鑄物協會가 주최하는 제2회 아시아주물대회의 학술논문 발표자를 아래와 같이 모집하오니 회원여러분의 많은 신청을 바랍니다.

- 아　래 -

1. **일시** : 1994년 10월 24일(월)~10월 25일(화) 2일간
2. **장소** : 日本 北九州
3. **학술논문 신청요령**
   (1) 발표시간 : 30분(질문포함)
   (2) 초록제출 : 1994년 2월 10일(목)
   (3) 논문제출 : 1994년 7월 31일(일)
   (4) 사용언어 : 영어
4. 기타 자세한 내용은 학회사무국(02-796-1346)으로 문의 바랍니다.

사단법인 한국주조공학회 회장