

초심자라도 아는 주철주조방안의 기초 (제 4회)¹⁾

松田政夫*

松田技術士事務所

Basis of Gating System & Riser on Iron Castings for Primary Engineers - Part 3 -

Masao Matsuda*

Matsuda Consulting Engineer Office

번역 : 최정철²⁾

II. 압탕방안

1. 압탕의 기능

1.1 압탕의 생각방법의 다양성

최적 압탕을 생각하는 데는 수축공 발생의 메카니즘을 이해하는 것에서 부터 시작한다. 그런데 수축공 발생은 주조조건에 의해 달라진다. 예를 들면 주조하는 데는 탕구가 필요해서 탕구도 압탕의 기능을 갖고 있으므로 연구자는 어느 정도 압탕이 유효한 상태에서의 수축공을 조사하고 있는 것이 된다. 수축공 발생의 모습을 직접 관찰하는 일은 할 수 없다. 따라서 수축공 발생의 메카니즘에 대해서 여러가지 해석을 덧붙인다. 그 결과 수축공은 통일된 압탕이론이 되기 어렵다. 여기에 체계화의 어려움이 있다.

1.2 2개의 압탕기능

(1) 후육부가 박육부를 돕는다.

그림 2-1과 같이 박육부와 후육부로 구성된 주물에서는, 박육부가 우선 차가워 저서 응고한다. 박육부가 우선 응고하는 것은 박육부 쪽이 주형면에 접하는 표면적 해당 열용량이 후육부보다 적기 때문이다. 어느 쪽도 응고할 때에 수축하므로, 일반적으로 박육부에서는 수축공이 없고 후육부에만 수축공이 생긴다. 박육부의 수축을 보충하는 것은, 실은 나중에 응고하는 부근의 후육부이기 때문이다. 후육부는 박육부에 용탕을 주고 나서, 스스로 수축하고, 수축공을 만든다. 이 때 후육부는 박육부에의 압탕으로서 작용하는 것이다. 수축공이 생긴 후육부는 잘라 버리고, 건전한 박육부만을 이용한다. 압탕이 된 후육부는 리사이클된다. 이것이 압탕의 원리이다.

(2) 주철주물은 응고의 도중에 팽창이 있다.

응고시의 온도변화는 어떠한 금속도, 대개 그림 2-1의 위의 그림과 같이 된다. 주물의 크기, 형상, 금속이나 주형의 열물성 수치에 의해 시간축, 온도축은 당연 변한다. 그래서 많은 금속은 응고시에 수축한다. 그런데 회주철이나 구상흑연주철에서는 다른 금속과 달라, 그림 2-1의 밑의 그림에 나타난 바와 같이 응고의 도중에 팽창한다는 특징이 있다.

① 용액의 단계에서는 온도저하로 수축한다. 초정석출의 단계에서도 수축한다. 이하 이것을 [1차수축]이라고 부르도록한다.

② 다음의 공정응고(후술)를 시작하면, 전체가 팽창한다. 이것이 주철의 특징이다.

③ 응고완료직전에는 주철이라도 수축으로 전환한다. 이하 이 응고말기의 수축을 [2차수축]이라고 부르도록한다.

(3) 압탕의 기능은 2개 있어 역할이 달라진다.

1차 수축에 대한 용탕보급이 압탕의 제1기능이어서, 2차 수축에 대한 용탕보급(압력전파라고 간주해도 좋다.)이 압탕의 제2기능이다. 양 기능은 역할이 달라진다. 전자를 1차 수축압탕이라고 부르고, 후자를 2차 수축압탕이라고 부르도록한다.

(4) 주철의 응고팽창은 왜 일어나는가.

동이나 알루미늄등의 금속용탕만이 아니라, 대개의 액체는 응고하면 수축한다. 왜 주철 응고의 경우에만 팽창하는 것인가, 물론 물은 예외로, 응고에 의해 팽창한다. 이 경우는 분자가 서로 버티어 걸로 보기에 팽창한 형을 취한다. 라고 설명되고 있지만 잘 알 수 없다. 회주철은, 초정(수지상정)정출 후, 기지와 흑연을 함께 정출하면서 응고(이것을 공정응고라고 한다)한다. 이 때 팽창한다. 팽창이유는 단순해서, 용탕내에 원자상태에서 녹아져 있던 탄소가, 탄소분자가 되어 독립한 순간에 체적을 늘리기 때문이다. 바로 그때 고온용탕에 녹아 있던 수소원자가, 수소분자가 되는 그 때 기포로서의 체적을 갖는 것과 닮아 있다. 탄소의 밀도는 용탕의 약 1/3이므로, 흑연의

1) 일본주조공학회지 vol 77 No 4 (2005) pp. 279~285에 게재된 자료임
2) 아주대학교 신소재공학전공(Ajou University) 교수

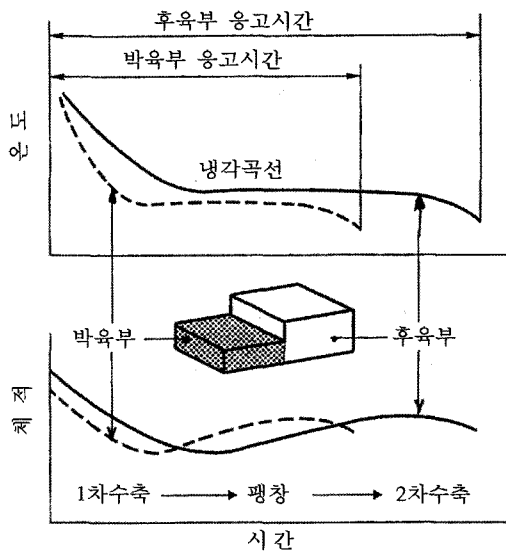


그림 2-1. 응고과정에 있어 체적의 변화

석출이 많은 만큼 전체가 팽창한다.

주철용탕을 급냉시키면, 탄소의 석출의 틈을 주지 않으므로 철조직이 된다. 이 경우는 팽창은 없다. 천천히 응고시키면, 탄소로서 석출하는 비율이 크게 되어, 팽창도 늘어난다.

(5) 응고말기에 팽창으로부터 수축으로 전환하는 이유

응고말기에서는, 미응고용액의 탄소나 실리콘농도가 희박하게 되고, 용체의 용해도가 낮아지므로, 석출하는 흑연량은 감소한다. 그래서 흑연석출에 의한 팽창분보다, 온도강하와 기지의 응고에 의한 수축 쪽이 이기게 되므로, 수축으로 전환하는 것이다. 이것이 응고말기의 2차수축이다.

1.3 형상에 의한 수축량의 차이

(1) 짙막한 부분의 수축은 슬림한 부분보다 크다

비교적 박육주물에서, 수축이 문제가 되는 것은 짙막한 괴상의 부분이다.

판상박육부와 괴상후육부가 혼재하는 일반의 주물에서의 경험에 있어서는 판상부에서 수축이 문제가 된 일은 없다. 그 이유를 나는 다음과 같이 추찰하고 있다.

후육부가 박육부의 압탕으로서 역할 하는 외에, 판상부는 표면부가 내측으로 흰 일률적 모양의 외부 수축이 생기고, 내부 수축으로서 명확히 나타나지 않지만, 괴상의 짙막한 부분에서는, 외측이 서로 돌출하기 때문에 외부 수축이 적고, 내부 수축을 만들기 쉽다. 즉 수축량에 차이가 있는 것이 아니라, 판상부의 많은 주물에서는 수축으로서 현재화하지 않는다는 견해이다. 단지 여기서는 주물결함이 되지 않는 외부 수축은 수축의 대상으로 하지 않는다.

(2) 괴상주물과 판상주물의 수축량 비교

1개의 주물내의 박육부와 후육부에 대해서 생각하는 것이 아니라, 괴상의 단체주물과 판상의 슬림한 단체주물의 수축량을 직방체형상 주물로 비교하면, 괴상의 주물 쪽이 판상의 주물보다 수축량이 적다고 하는 연구결과가 나타나고 있다. 그 이유는 명백하게 되어 있지 않다.

응고과정에 있어서 용체의 수축량이 그대로 수축량이 되는 것은 아니다. 수축이 수축공의 원인인 것에는 틀림이 없지만, 수축공량은, 수축량 외에, 탕흐름후의 탕구로 부터의 용탕보급, 주형의 확대(주형벽의 이동), 응고층의 굽어짐등의 여러 가지 현상이 얽혀있는 종합적 결과로서 나타나는 양이어서, 수축량만으로는 예측할 수 없다.

일반적인 주조에 있어서 수축량은, 슬림한 주물은 짙막한 주물보다 주형 충전후의 수축량이 적다. 슬림한 주물은 탕흐름에 있어서 용탕의 냉각이 크고, 용탕이 충전할 시점에서 벌써 어느 정도 수축하고 있다. 이 형상에 원인하는 충전후의 수축량의 다름 및 용탕 질의 다름으로부터 오는 수축량의 다름을 압탕의 결정법에 응용한 것인가, [칼럼3]에서 나타내는 Bishop등의 압탕 결정법이다. 단지 그들의 설에는, 1차수축, 2차수축의 구별이 없다. 고전에서는 있지만 저지들의 방법과 비교를 위해 따로 구별해 둔다.

[칼럼3] Bishop등의 압탕 결정법

과거에 있어 대표적 압탕의 생각 방법이다.

Bishop등에 의한 이 방법은, 1960년경, 미국의 GIRI(Gray Iron Research Ins.)의 압탕표준으로서 채용되었다. 주물의 체적 V_0 에 대해서, 어떠한 비율의 압탕의 체적 V_1 을 주면 좋은가를 구하는 방법이다. 다음의 사고에 기초로 한 것이라고 추찰된다.

- ① 주물의 수축량은 주물의 체적 V_0 에 비례해서, 압탕으로부터의 보급 가능량은 압탕의 체적 V_1 에 비례한다.
- ② 주물재료의 차이로 수축량이 달라진다.
- ③ 슬림한 주물은 괴상의 주물보다, 탕흐름 정지후의 수축량이 적다.

슬림의 정도를 정량적으로 나타내는 방법으로서, 그들은 다음과 같은 형상계수 S를 생각했다.

$$S = (L + W) / T$$

L, W, T : 주물의 길이, 폭, 두께이다. 정하기 어려운 경우도 있으므로, 사례로서 그림 2-2가 첨부되어 있다. 최소

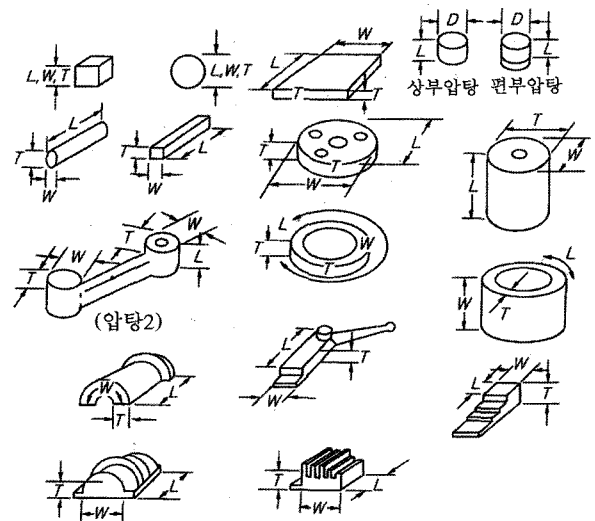


그림 2-2. 여러가지 형상에 대한 L, W, T의 결정법

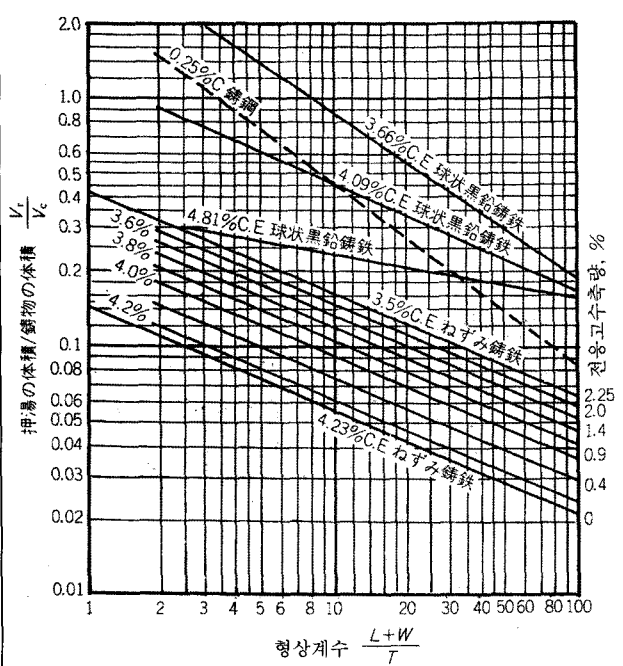


그림 2-3. 형상계수와 V_p/V_c 과의 관계

S의 값은 2이다.

이 형상계수 S와, 재료의 차이를 대입하여, V_p/V_c 의 비 (V_p : 압탕의 체적, V_c : 주물의 체적)을 그림 2-3의 직선 그림에서 구한다. 이 방법은 압탕 건적의 간편한 방법으로 오랫동안 널리 이용되어왔다.

2. 수축의 발생기구

2.1 수축의 관찰

회주철의 수축과, 구상흑연주철의 수축에는 약간의 차이가 있다.

그림 2-4는, 직경 60 mm, 길이 150 mm의 원주물, 좁은 주입구로부터, 생형에 주입한 주물의 절단면이다. 하나는 회주철

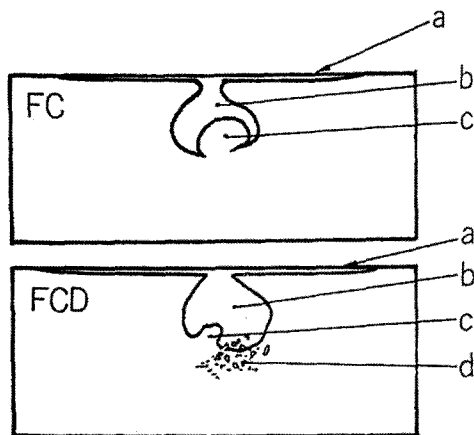


그림 2-4. $\phi 60$ mm 원주단면에서 보이는 수축

(FC)의 경우¹⁴⁾로, 또 하나는 구상흑연주철(FCD)의 경우¹⁴⁾이다. 수축의 상태는 양자에 약간 다르다.

이들의 수축은, 다음의 순서로 형성되었던 것이라고 추찰된다.

① 최초 1차 수축에 의해 a의 외부수축이 발생한다. 그 일부가 다시 수축하여, b의 공동부를 형성한다.

② 다음에 공정응고시의 흑연의 절출에 의해 용탕의 용출 c가 일어난다. 용출량은, 이 실험에서는 구상흑연주철 쪽이 회주철보다 적었지만, 응고팽창시의 주형벽 압입의 다름이 영향하고 있을지도 모른다. 그 차이 외에는, 양자 모두, 여기까지는 크게 변하지 않는다.

③ 그런데 구상흑연주철에서는, 2차 수축에 의하면 보이는 기포(점점으로 한 미세수축) d가 발생하고 있는 것에 대해서, 회주철에서는 이 종류의 미세수축이 나타나지 않는다. 이 실험에 한하지 않고, 회주철에서는 기포가 나타나지 않는 일이 많다.

2.2 종래설에 대한 의문

수축량과 팽창량의 차가 압탕의 공급량인가

압탕은, 1차수축 및 2차수축에 의한 수축발생을 방지하기 위한, 용탕보급목적으로 붙인 것이지만 필요로 하는 보급량에 대해서, 옛날에는 다음과 같은 설명이 되어져있었다.

[응고시의 수축량 ΔV 는, $\Delta V = \Delta V_1 - \Delta V_c + \Delta V_2$ (ΔV_1 : 1차 수축량, ΔV_c : 공정응고팽창량, ΔV_2 : 2차수축량)이 되므로, 압탕은 뺀 ΔV 분을 보충하면 좋다(주형의 팽창에 의한 영향에 대해서는 별도 취급한다)

ΔV_1 에 대해서 ΔV_2 는 극히 적다. 수축의 양을 문제로 한다면, 주로 1차 수축량이 대상일 것이다.

상술한 설명을, 그림 2-4의 관찰결과에 짜 맞추어 보면 다음의 의문이 남는다.

① 확실히 1차수축량의 대부분은, 압탕으로부터의 용탕으로 보충되어 완전히 보충되지않은 채 생긴 공동이 공정응고팽창에 의한 용탕의 용출로 파문어지게 되지만, 용출용탕으로 파문어진 경계의 건전성에는, 불안이 남는다. 어쨌든 수축에 의한 공동발생시기와, 팽창용출로 파문어진 시기와는 수분간의 어긋남이 있고, 용출용탕의 점성은 꽤 높아져있다. 이 공동이 완전하게 수복되었다고는 할 수 없다. 따라서, 공동이 생기는 기회를 주지 않도록, 1차 수축이 완료하기 까지, 압탕으로 부터의 용탕보급은 계속될 필요가 있다고 생각된다.

② 2차수축시기에 발생하는 기포를 그것 이전에 일어났던 공정응고팽창으로 보충한다고 하는 것은 더욱 곤란하다고 생각된다. 왜냐하면 보급량은 극히 적어도 공정응고팽창이 종료하고 나서 후에 일어나는 2차 수축시기까지, 팽창분이 탄성에너지로서 어딘가에 축적되어있지 않으면 안되기 때문이다. 그 시간은 때로는 수분간에 미친다. 탄성체가 아닌 사형으로 그 역할을 기대하는 것도 무리이다.

이상의 의문점을 확실하게 하는 데는, 시간의 경과에 따라서, 어떠한 형으로 응고가 진행되는가를, 정량적으로 확실하게 하는 이외에없다. 관찰은 할수 없으므로, 응고계산을 기초로 고찰한다.

3. 쉬운 응고해석

3.1 주물의 응고시간과 크보리노브(Chvorinov)의 식

(1) 응고시간의 계산식

우선 먼저, 주물이나 압탕의 응고시간을 구하는 Chvorinov의 식¹⁵⁾을 이용해보자.

압탕이 주물보다 우선 응고한 것으로는 압탕으로부터의 보급은 얻어지지않는다고 우선 생각된다. 이 일은 압탕의 제1조건이라고 말해져왔다. 그 조건을 만족하고 있는가 어떤가는 주물이나 압탕의 응고시간 t_f 를 계산해서 비교해보면 좋다. Chvorinov는 다음의 계산식 (11)을 나타냈다.

$$t_f = C_c(V/A)^2 \tag{11}$$

C_c : Chvorinov의 상수, V: 체적, A: 표면적
V/A를 modulus라고 부른다 (이하 m으로 표기한다)
modulus V/A의 V 및 A는, 각각 다음의 물성수치의 대응으로 간주된다.

① 주물이 최초로 유지하고 있는 열량은, 체적 V에 비례하므로 V는 열량의 대응으로 간주된다

② 주형에의 열이동은, 표면적 A에 비례하므로 A는 주형의 발열능력의 대응으로 간주된다.

여원 형의 동물이나 소형의 동물이 추위에 민감하다고 생각하면, 식이 갖는 의미를 상상할 수 있다.

응고시간 t_f 가 modulus의 2승에 비례한다는 이유는, 후에 서술하는 [칼럼4] 주형내 열이동의 해석으로부터 알 수 있다.

주물과 압탕 쌍방의 응고시간을, 하나하나 계산해서 비교하는 것은 귀찮다. 주물도 압탕도 같은 금속이므로 열물성수치도 같으므로, 함께 같은 주형내라는 환경이다. 따라서 Chvorinov의 상수 C_c 가, 주물과 압탕으로 변하지 않는다. 따라서 주물과 압탕의 modulus만을 비교하면 좋지 않을까, 제1조건으로부터는 $m_p > m_c$ (m_p : 압탕의 modulus, m_c : 주물의 modulus)가 아니면 안된다는 것을 알 수 있다. (1차수축에서는 이 관계는 되지않는다는 것을 후에 서술한다)

다음은, 압탕의 modulus를 주물의 그것보다, 얼마나 크게 하면 좋은가, 현재, 일반적으로는, $m_p = 1.2m_c$ 가 제일 적당하다고 하고 있다¹⁶⁾.

Chvorinov의 사고에는, 1차수축에 의한 수축과, 2차 수축에 의한 기포의 구별이 없다. 당시는 주강의 압탕의 응용으로 만족하고 있고, 1차, 2차에 대해서는 인식이 열은 것이 아닌가라고 생각된다.

(2) 주형에의 열이동 속도는 처음은 크고 차레로 저감한다. 차가운 물체에 손이 닿으면, 급격하게 열이 빼앗아지는 것을 느끼지만, 차레로 열어져간다. 그것과 같이 용탕이 주형에 닿았던 순간은 급격하게 열을 빼앗기지만, 시간의 경과와 함께 열을 빼앗기는 정도는 감소해간다. 이유는 [칼럼4]에서 설명하지만, 주형내에의 열의 이동은, 그림 2-5와 같이 된다. (이하 cgs단위를 이용한다)

용탕이 주형면에 접하고나서 t초간에 주형이 흡수한 열량은, \sqrt{t} 에 비례하는 형으로 증가한다. 1 cm²의 주물표면으로부터

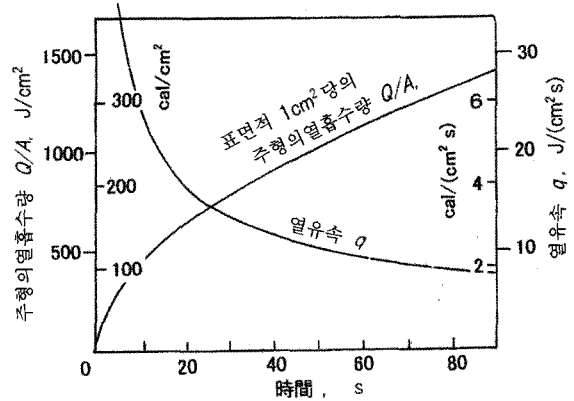


그림 2-5. 주형의 열흡수량 및 열유속의 계산결과(표 1의 열물성치로 계산)

단위시간(1초간)당에 이동하는 열량 q(이것을 열유속이라고 한다)으로 보면, q는 \sqrt{t} 에 반비례해서 차차 적어지게 된다는 관계에 있다.

(3) 응고시간이 modulus의 2승에 비례하는 이유

상기의 관계를 식으로 서술하면, 표면적 A의 주물로부터, 응고시간 t_f 의 사이에 이동하는 열량 Q는, $Q = Ak_1\sqrt{t_f}$ (k_1 은 비례정수)가 되는 것을 알 수 있다. 이 관계를 그림 2-5에 나타냈다. 열량 Q는, 원래 주물이 보유하고 있던 열량으로서, 주물의 체적에 비례하고 있으므로, $Q = k_2V$ (k_2 는 비례상수)이 된다. $Q = Ak_1\sqrt{t_f}$ 와 같은 값으로 하면 $V/A = (k_1/k_2)t_f$ 가 된다. 즉 $t_f = (k_2/k_1)^2(V/A)^2$ 이다. 여기서 $(k_2/k_1)^2$ 을 C_c 로 두면 Chvorinov의 식이 되는 것이므로, Chvorinov 상수의 의미는 단순하다. 응고시간 t_f 가 modulus의 2승에 비례하는 관계에 있는것은, 주형이 흡수한 열량이 시간 t의 평방근에 비례하는 것에 원인하고 있는 것이다.

[칼럼4] 주형내열전도의 해석

(1) 열이동 모델

두께 1 cm의, 비교적 넓은 평판상의 주철주물의 경우를 생각한다. 주형은, 두께 수 cm 이상의 사부가 있고, 주형의 초기온도를 실온의 20°C로 한다. 열이동은, 주물 두께 중심단면에서 대칭이므로 그림 2-6(a)와 같이 주물두께 중심단면의 한쪽 면만을 생각하면 좋다. 주물이 되는 두께 1 cm의 공동(캐비티)에, 주입온도 1250°C의 주철용탕이 순간적으로 가득 채웠다고 한다. 응고온도는 1150°C이므로, 이 때의 과열도는 100°C이다. (급냉을 생각하지 않는다. 과냉에 대해서는 후에 설명한다.) 이 주입온도에 있다면, 주형면의 온도는, 주탕의 순간, 이론적으로도 응고온도와 같이 거의 1150°C이 된다.

(2) 주형내 열이동의 도식해법

용탕이 주형면에 닿은 순간으로부터, 주형에의 열이동이 일어난다. 그 모양을 그림 2-6(b)에서 나타내는 棚架의 열전도 도식해법¹⁷⁾으로 해석한다. 주형을 경계면으로부터 1 mm 두께의 층으로 나누어, 주형면으로부터 층1, 층2...으로 한다. 어떤 짧은 시간 Δt 초 후에, 주형면온도(1150°C)

와, 층1, 층2의 경계온도(20°C)를 선으로 연결할 때의 층1의 두꺼운 중심온도(585°C)를, 층1의 온도로 간주한다. 층2의 온도는 원래 20°C이므로, Δt 초일 때의 온도분포는 절선ACD으로 표현할 수 있다. 다음의 $2\Delta t$ 초일 때의 온도 분포도, 같게 해서 각층의 경계의 온도점을 연결함으로써 AFHI로서 얻어진다. 실은 Δt 초의 시간이라는 것은 그림 2-6(a)의 그림중의 식으로 계산되는 시간이다. 정확하게 말하면, 이 식으로 산출되는 시간간격 Δt 를 선택할 때에, 상술한 도식해법이 성립하게 된다. 표 1의 열물성 값을 대입하면, 시간간격은 $\Delta t=0.46$ 초이다.

λ, c, ρ 는 이 경우, 주형의 열전도율, 비열, 밀도의 기호이다. 용탕의 열물성수치와 구별하기 위해 그림 2-6에서는 *인을 붙여두었다. $\lambda/(c \rho)$ 는 일반적으로 온도전도율[cm²/s]이라고 부르고 있다.

이상의 작도를 수차 수행해 두면, 주형내온도분포의 추이가, 직선 그림으로서 그려진다. 5회째의 선도는 2.3초 후, 10회째는 4.6초 후, 20회째는 9.2초 후의 온도분포를 나타내고 있게 된다. 수차해석도 이것에 비슷한 계산을 컴퓨터에 행하고 있는 것에 지나지 않는다. 도식해법이 수치해석의 기초의 모습이다.

표 1. 계산에 이용한 물성치

물성	기호	주철용체	사형	단체
열전도율	λ	0.37	0.0075	J/cm·s·k
비열	c	0.92	0.92	J/g·k
밀도	ρ	6.9	1.5	g/cm ³
응고잠열	L	210	-	J/g
주형정수	M	130		J/cm ² ·s ^{1/2}

차례로 둔해져 간다. 예를 들면 같은 100°C의 점을 시간을 따라서 보면, 15초일 때는 경계면으로부터 8 mm의 깊이이지만, 그 2배의 16 mm의 깊이에 도달하는데는, 무려 4배의 60초나 걸리고 있다. 이동한 열량은 온도분포곡선의 하측의 면적에 비례하므로, 2배의 열량이 이동하는데는 4배의 시간이 걸리는 것을 이 그림을 나타내고 있다. 반대로, [이동한 열량은, 필요한 시간의 평방근에 비례한다]라는 관계를 읽어낼 수도 있다.

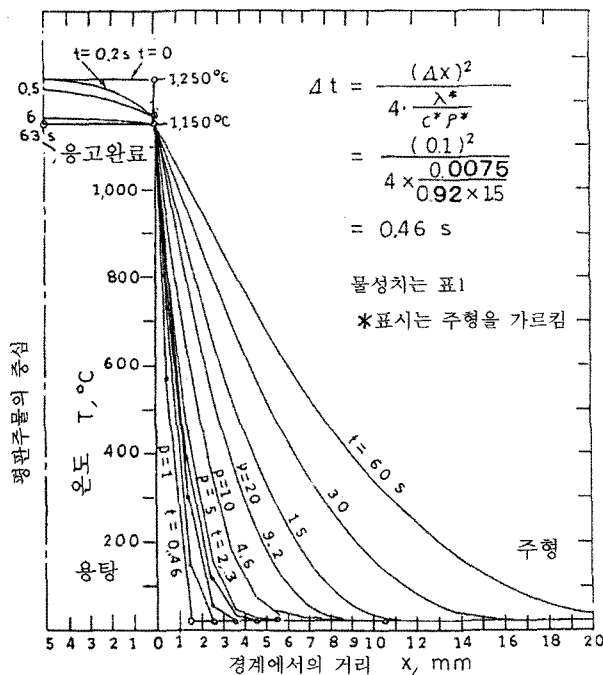
② 용탕은 현열과 잠열을 방출해서 응고한다 : 한편, 용탕에 대해서도, 거의 같은 도식해법으로 온도분포의 추이를 구한다. 6초에 거의 두께 전체가 응고온도까지 강하하고, 거기서 응고잠열의 방출이 시작해서 온도강하를 일시 멈추고, 63초에 거의 응고를 완료한다는 계산결과가 된다. 실제로는 응고완료시점에서는 과냉에 의해 1150°C보다 약간 낮게 되어 있다. 그 모양은 후에 열분석의 항에서 나타낸다.

③ 응고완료시의 주형내온도분포가 알수 있다: 초기과열도 100°C의 경우, 63초에 응고 완료했으므로, 응고완료시점의 주형내의 온도분포는, 거의 $t=60$ s의 곡선부근이라고 간주해도 좋다. 그 때의 주형내의 100°C의 위치는, 겨우 16 mm의 깊이까지 진행했을 뿐이다. 16 mm보다 깊은 위치의 모래는, 응고

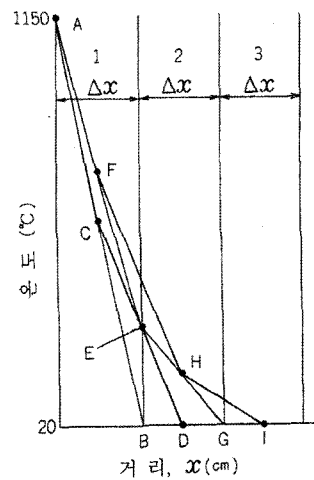
3.2 주형내온도분포의 추이

[칼럼]4의 그림 2-6(a)로부터 다음의 것을 읽어낼 수 있다.

① 열이동은 차례로 둔해진다: 열유속은 온도균배에 비례함에 따라, 처음은 주형내의 열이동이 심하지만, 시간이 지남에 따라 적어진다. 그렇기 때문에 같은 온도점의 진행속도로 보면,



(a) 주형내 및 용탕의 온도변화



(b) 열전도의 도식해법

그림 2-6. 주탕직후의 주형내와 용탕의 온도분포의 추이

에 이르는 열흡수에 약간밖에 기여하지 않는다. 박육주물의 주조에는, 사형이 열로 침범해지는 범위는 약간이다.

④ 주물의 두께가 2배라면 응고시간은 4배가 된다: 만약 주물의 두께가 2배의 20 mm라면, 주물표면적은 변하지 않고도 체적이 2배가 되므로, 응고완료까지의 주물이 방출하는 열량은 2배가 된다. 이 때 주형내 100°C의 위치는 2배의 32 mm 부근(그림을 넘음)에 달하고, 응고완료까지의 시간은 4배의 약 240초 걸리게 된다. 그리고 응고시간은 modulus의 2승에 비례하고 있다. Chvorinov의 식은 이러한 관계로부터 얻어지는 것이다.

3.3 주형상수와 응고시간

(1) 주형정수를 이용하면 응고시간의 계산이 간단

주형내열이동의 설명으로, 주물로부터 주형에의 열이동량은, 시간 t의 평방근에 비례하는 관계에 있는 것을 설명했다. 또한 정량적으로는 어느 만큼의 양이 이동하는가, 간단하게 계산되지 않는다면 관념론으로 끝나버리고 만다.

$$Q = A \cdot M \cdot \sqrt{t} \tag{12}$$

이 식의 M은 주형상수로 불리우고, 다음 식으로 나타낸다.

$$M = 1.128 \sqrt{\lambda c \rho} (T_s - T_0)$$

T_s : 주형표면의 온도, 응고온도와 같다고 간주하고, 주철에서는 1150°C로 잡는다. T_0 : 주형의 최초의 온도(20°C), λ , c , ρ 여기서는 주형의 열전도율, 밀도, 비열로, 상수로서 취급한다(주형을 나타내는 *마크는 생략). 또 $\sqrt{\pi}$ 을 일반적으로 열확산율이라고 부르고 b이라고 쓰고 있는 일이 많다. 1.128의 수치는, 바르게는 $2\sqrt{\lambda c \rho}$ 의 수치이다.

주형(사형)의 열물성치로서, 표 1의 수치를 대입하면, $M = 130[\text{J}/\text{cm}^2\text{s}^{1/2}][31[\text{cal}/\text{cm}^2\text{s}^{1/2}]$ 이 된다. 이 수치와 시간 t를 식(12)에 대입함으로써 주형의 흡수열량 Q는 간단하게 계산할 수 있다.

(2) modulus가 같아도, 원주상 주물 쪽이 평판상 주물보다 응고시간이 약간 짧다.

주물표면으로부터의 주형내 열확산은, 식(12)에 따른다고 하지만, 정확하게는 식(12)는 넓은 평판상 주물의 경우이다. 그림 2-7에 나타난 바와 같이, 평판에서는 주형내 열이동이 면과

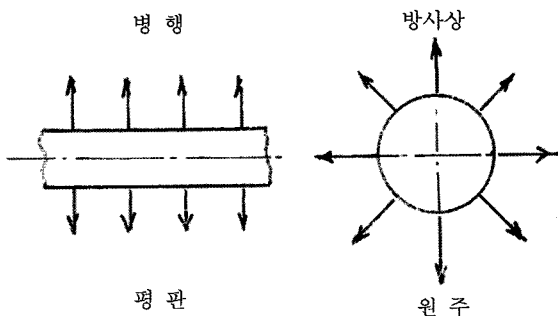


그림 2-7. 평판보다 원주의 냉각이 약간 빠른 이유의 설명도

표 2. 주형상수의 할증율 α (응고완료시점)

초기온도	무한평판	무한원주	구
1573 K (1300°C)	1	1.25	1.32
1623 K (1350°C)	1	1.28	1.36

직각 방향에 있는 것에 대해, 원주에서는 방사상으로 확산한다. 열이 주형내에 깊게 전해지는 만큼 열의 수입된 체적이 늘어나서 평판의 경우보다 열이동량이 늘어나고, 그 결과 응고시간이 평판의 경우보다 약간 짧게 된다. 식(12)을 보정하는 방법으로서, 주형상수를 늘어나게 하는 방법을 제안했다. 그 할증율 α 를 표 2에 나타낸다. 구의 경우는 원주보다도 더욱 큰 할증율이 된다. 당연 주입시의 용탕의 과열도가 높은 만큼, 할증율을 크게 봐야한다.

(3) 주물과 주형의 열수지

그림 2-8 탄소-철 평형상태도를 사용해서, 주입된 회주철 용탕이 냉각, 응고할 때 어떠한 경로를 더듬는가에 대해 생각한다.

주형내를 흐른 용탕은, 주형을 충만하는 사이에 주입온도보다 어느 정도 낮은 온도 T_0 가 된다. 이것을 초기온도로 한다. 액상선까지 강하하면, 수지상정(조정)의 정출이 시작한다. 고상선까지가 조정정출열이다. 고체로 변태한 역할을 고상율이라고 부르지만, 고상선까지 강하하면 조정의 고상율은 도시의 y/x의 비율이 되고, 대개 10수%에 달한다. 그 후는 고상선의 온도인 체로 후연을 정출하면서 응고하는 공정응고가 진행된다. 실제로는 고상선보다 낮은 온도(이것을 과냉이라고 부른다)에서 응고하지만, 이것은 후에 서술한다.

시간 t초후에 조정, 공정의 고상율이 있는 값 f_s 이 되었을 때 주물이 잃은 열량은, 주형이 흡수한 열량과 같으므로, 다음 식의 관계가 성립한다.

$$V\{c\rho(T_0 - T_s) + \rho L f_s\} = A \alpha M \sqrt{t} \tag{13}$$

$V/A = m$ 으로 나타내면

$$m\{c\rho(T_0 - T_s) + \rho L f_s\} = \alpha M \sqrt{t} \tag{14}$$

c, ρ, L : 용탕의 비열, 밀도, 응고잠열,

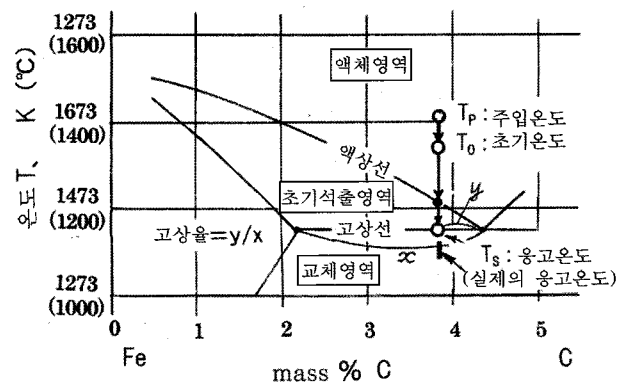


그림 2-8. Fe-C 평형상태도로 나타내는 용탕의 온도강하와 고상율

f_s : 고상율(응고완료시점에서는 $f_s=1$)

T_0, T_s : 초기온도, 응고온도, t : 주입으로부터의 경과시간(응고완료시점에서는 응고시간이다)

식 (13)의 { }내의 제1항이, 초기온도로부터 응고온도까지의 용탕 1 cm^3 당의 나타나는 열, 제2항이 고상선상에서 응고완료까지에 방출하는 응고잠열이다. 이 종류의 계산에 익숙하기 위해서, 약간 자세하게 설명한다.

식 (13)의 해설: 좌변 중의 $c \times (T_0 - T_s)$ 는, 용탕 1 g 당의 초기온도로부터 응고온도에 까지 강하할 때에 방출할 때 나타나는 열이다. 응고잠열 L 은, 완전 응고, 즉 $f_s=1$ 에 달하기 까지에 1 g 당에 방출되는 잠열이므로 고상율 f_s 에 까지 응고할 것이라면, 방출잠열은 1 g 당 $L f_s$ 이다. 그것에 먼저의 나타나는 열 $c \times (T_0 - T_s)$ 을 더하면, 용탕 1 g 당의 방출열량이 된다. 1 cm^3 당으로 하는 데는 밀도 ρ 를 곱해, $\{c\rho(T_0 - T_s) + \rho L f_s\}$ 로 한다. 단위가 $[\text{J}/\text{cm}^3]$ 로 된다. { }내의 수치에 V 를 곱하면, 주물체적 V 당의 방출열량이 된다.

우변의 $\alpha M \sqrt{t}$ 는, 주형의 표면 1 cm^2 당으로 시간 t 초간에 주형이 흡수한 열량이다. 그것에 주물표면적 A 을 곱하면, 주물에 접하고 있는 전범위로부터 주형이 흡수한 열량이 된다. 이것이 식 (13)이다.

이 양면에서 알 수 없는 것은 시간 t 뿐이다. 그래서 식 (13)에 표 1의 물성치를 대입해서 계산하면, 시간 t 가 구해지게 된다.

(4) Chvorinov상수의 값

식 (13)의 { }내의 수치, 그리고 1 cm^3 당의 나타나는 열 + 잠열을 Q_0 이라고 쓰면 $t_p = \{Q_0^2 / (\alpha M)^2\} \cdot (V/A)^2$ 이 된다. 즉 Chvorinov의 정수라는 것은 $C_c = \{Q_0^2 / (\alpha M)^2\}$ 로 나타내는 값이다. 이 수치도 표 1의 물성치를 대입하면 계산할 수 있다.

참 고 문 헌

- [11] 菅野利猛ほか : 日本鑄造工學會第143回全國講演大會概要集 (2003) 11.
- [12] 文獻 9) 69.
- [13] 小野, 長澤, 岐亦, 松田 : 鑄物, **60** (1988), 2, 85.
- [14] 岐亦, 長澤, 小野, 松田 : 鑄物, **60** (1988), 6, 395.
- [15] Chvorinov : Giesserei, **27** (1940), 10, 177.
- [16] 喜多新男 : 綜合鑄物, **24** (1983), 1, 61.
- [17] 棚澤 : 衛生工學協會誌, **7** (1933), 8, 542.
- [18] 松田, 長澤, 小野, 岐亦 : 鑄物, **61** (1989), 5, 314.