

논문

초심자라도 아는 주철주조방안의 기초 (제 5회)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 V -

Masao Matsuda*

Matsuda Consulting Engineer Office

번역 : 최정철²⁾

4. 고상율의 추이해석

4.1 고상의 증가

(1) 고상성장의 3개의 타입

지금까지의 응고시간의 의론은, 주물전체의 응고시간에 대해 서였다. 주물내부에서는 장소에 따라 응고의 진행 상태가 다르 다. 수축결함은 응고의 도중에 발생하기 때문에 이 과정을 애 매하게 해 둘 수는 없다.

응고의 진행 형태에는, 진행속도의 차이로 크게 구분되는 3 개의 타입이 있다.

1. 용액과 완전 응고층의 경계가 확실한 응고: 스킨형 응고 라고도 불리운다. 고상의 성장속도가 매분 수 mm이하라는 극 히 원만한 응고에서는, 연못에 물이 퍼지는 것과 같이 완전 응고층과 용액의 경계가 확실한 상태로, 극히 긴 시간에 걸쳐 서 응고가 진행된다. 이러한 완만한 응고는, 우리들이 취급하는 주물에서는 일어날 수 없다.

2. 공정셀이 성장하는 형의 응고: 용액이 과냉상태가 되면, 용액내에 많은 응고핵이 생성하고, 그 핵이 각각 응고립(공정셀 이라고 부른다)가 되고, 셀이 각각 성장해간다. 물론 과냉도가 큰 주물 표면일수록 빨리 핵생성하고, 공정셀의 성장속도도 빠 르다. mussy형 응고 또는 죽상응고라고 불리우는 일도 있다.

3. 급냉응고: 흑연을 정출할 틈이 없고, 소위 칠조직이 되는 응고

이상 3개의 타입 중, 보통의 주철주물은, 2의 타입이다. 과 거에는, 회주철은 거의 스킨형으로, 구상흑연주철은 죽형이라고 믿어왔던 일이 있다. 회주철에 대해서는 그것이 틀렸다는 것을 후에 설명한다.

(2) 응고진행의 해석방법

응고의 진행상태를 아는데는, 주물중심과 표면의 2개소에서

열분석하고, 그 결과를 해석하면 알 수 있다. 주물은 좁고 긴 원주주물, 혹은 비교적 넓은 평판주물을 채용한다. 열전대는 주 물의 중앙부근에서 두꺼운 중심과 표면에 붙인다. 컵상 주형등 에서는 열이동을 단순한 형으로 해석할 수 없다.

(3) 응고를 일으키는 이유의 바른 사고

단순하게 생각하면, 응고온도까지 온도강하하면 응고가 시작 하고, 응고온도보다 상승하면 용해한다. 라는 인식이라도 통한 다. 그림 2-8 회주철의 평형상태도를 사용해서 서술한 바와 같 이 액상선과 고상선이 있어서 주입온도로부터 액상선까지는 완 전 액체, 액상선보다 강하하는데 따라서 수지상정이 늘어나서, 고상선인 곳에서 수지상정의 고상율이 10%에 달한다. 그 후 는 고상선의 온도인 채 고상 100%가 되기까지 응고가 진행된다. 그러한 이해로 충족되었다. 후속주물의 응고는 이것에 가깝 지만, 우리들이 취급하는 중,소물에는 들어맞지 않는다. 다음의 과냉현상을 생각하지 않으면 안된다.

주된 응고가 시작하는 것은 고상선에 달했기 때문이 아니라, 고상선보다 약간이라도 강하했기 때문이다. 고상선으로부터의 강하온도를 과냉도라고 부른다. 같은 용탕내에서 응고진행속도 가 달라지고 있는 것은 과냉도가 달라지고 있기 때문이다.

과냉현상은 일반의 컴퓨터응고해석에서는 나타나지 않는다. 열분석결과를 해석하는 것으로 실태가 이해될 수 있다. 거기서 [칼럼5]의 열분석결과로부터 응고의 진행을 고려해보자.

[칼럼5] 원주주물의 열분석과 고상율 해석

그림 2-9의 온도변화는, 직경 50 mm의 좁고 긴 회주철주 물의 열분석 예이다.

온도 T의 기호: T_c : 중심온도, T_b : 표면온도, T_m : 단면평균 온도, T_e 는 평형공정온도여서, 극단으로 천천히 응고시킨 경우의 과냉도 제로의 응고온도라고 생각해도 좋다. 응고

1) 일본주조공학회지 vol 77 No 5 (2005) pp. 364~371에 게재된 자료임
2) 아주대학교 신소재공학전공(Ajou University) 교수

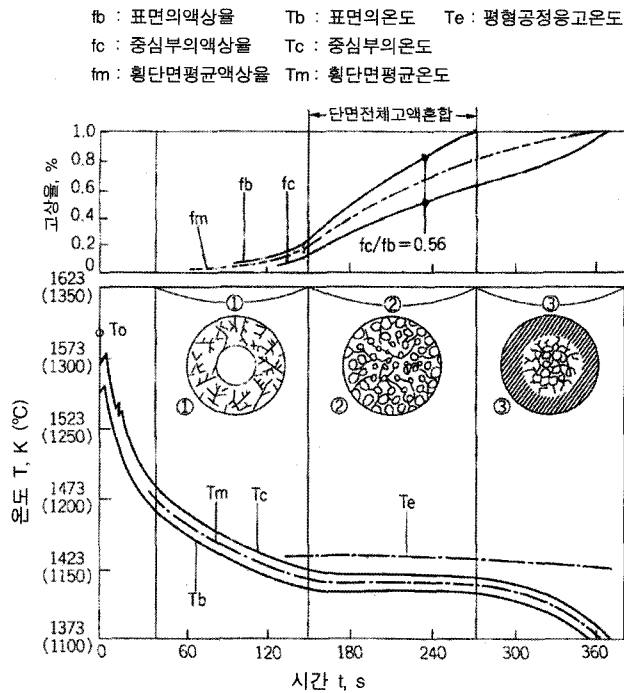


그림 2-9. 열분석으로 알수 있는 고상율 변화 및 응고형태 ($\phi 50$ mm 회주철원주주물)

가 진행함에 따라, T_c 가 약간 낮게 되는 것은, C, Si가 고체로 변태되기 쉽고, 미응고 용탕의 C, Si 농도가 열계 되기 때문이다²⁰⁾.

과냉도: T_c 와 온도차가 과냉도이다. 용체는 과냉상태이 되므로 응고가 진행되는 것으로 과냉도가 큰 만큼 셀의 체적성장속도가 크게 된다¹⁹⁾.

그림 2-9의 온도곡선에서 읽어낼 수 있는 정보 주형을 충만한 용탕은 주형에 열을 빼앗겨서, 1200°C 부근(30초 부근)까지는 방출열만으로 온도를 내린다. 그후에 대해서는 그림 2-9의 영역 1,2,3의 순으로 일러스트를 이용하여 설명한다.

영역①: 40초 전후에 온도강하가 약간 완만하게 되는 것은, 약 1200°C 이하가 되어 초정덴드라이트(수지상정)을 정출하고, 약간의 응고잠열 방출분이 더해지기 때문이다. 단면의 일러스트 1의 중심부에 있는 완전한 액체의 존재는, 40초 부근까지의 약간의 시간대만이어서 곧바로 소멸하고, 덴드라이트가 전면에 뻗어나가는 상태가 된다.

120-150초 부근에서는 용탕온도가 평형공정응고온도 T_c 이하로 강하하고 있다. 그러면 용탕내에 고상의 종이 되는 핵이 생긴다. 이것을 핵생성이라고 한다. 핵생성은 과냉도가 큰 외측으로부터 시작하고, 곧 중심부에 미친다.

영역 ②: 150초 부근에서는, 용액전체가 완전하게 과냉역에 들어가고 있다. 생성한 핵은, 공정셀이라고부르는 입자가 되고, 그 셀이 두껍게 되는 형으로 응고가 진행된다. 거시적으로는 고액혼합용체가 되어 있다. 과냉도가 큰 만큼 각각의 셀의 체적성장이 빠르다. 그 때의 응고잠열의 방출과, 주형의 열흡수가 어울려서 거의 일정온도로 유지

된다. 그 시간대를 온도 정체대라고 부르고 있다. 일종의 자기온도제어상태이다.

영역 ③: 270초 부근으로부터 온도강하가 시작하고 있다. 이 온도강하의 개시는, 표면의 고상율이 100%에 달한 것을 의미한다. 왜냐하면, 표면으로부터의 잠열의 방출이 없어도 주형과의 열수지가 유지되기 위해서는 온도강하에 따른 주물전체의 현열방출과, 과냉도증가에 따른 잔존용체로부터의 응고잠열증가의 양방에서 노리는 이외에 없기 때문이다. 또한 완전응고층의 두께가 늘어남에 따라 온도강하 속도는 빨라진다.

응고완료점: 중심까지 응고가 완료한 시점, 그리고 주물전체의 응고완료점은 어딘가. 그것은 온도강하속도가 최고에 달하는 점, 그림의 360초 부근이다. 그 점은 확실히 나타나지 않는다. 곡선으로부터 거의 직선으로 변하는 부근의 약간 높은 점을 맞추면 무난할 것이다.

응고시간의 정의: 응고시간은, 주입종류시점으로부터 응고완료까지의, 현열과 잠열의 방출시간이라고 정의해서 좋다. 주입온도가 높으면, 당연 응고시간은 길게 된다.

고상율의 해석: 열분석결과로부터, 고상율의 추이가 알 수 있다. 고상율 f 를 첨자로 구별한다. f_c : 중심부의 고상율, f_b : 표면의 고상율, f_m : 단면평균의 고상율이라고 한다. 초정덴드라이트의 고상율은, 상태도로부터 읽어낼 수 있다. 표면에서 완전 응고층이 형성되는 것은 270초 부근이라고 설명했다. 그것까지의 응고의 진행을, 어떻게 판단하면 좋은가.

다른 실험에서, 고상율의 증가속도가 과냉도에 비례하는 결과를 얻고있다. 거기서, 우선 f_b 의 곡선을 고상율 100% (270초)의 시점까지 늘려서, 다음에 f_c 의 곡선을 f_b 와의 과냉도에서 270초의 시점까지 그린다. 또한 응고완료의 고상율 100%(360초)의 시점에 늘린다. 이것으로 고상율의 진행상황이 대체로 표시되었다. 단면평균고상율 f_m 을 그리는데는, 원주에서는 f_c 와 f_b 의 중심부근으로 좋지만, 평판에서는 f_c 선 부근에 그린다¹⁹⁾.

용탕에 따라서는, 고상율의 증가가 과냉도에 비례하는 것이 아니라, 과냉도의 2승정도에 비례하는 것도 있다. 그 경우의 그림 2-9의 고상율의 추이는 표면과 중심에서 약간 고상율의 차이가 크게 된다고 예상되지만, 응고의 경향을 크게 좌우할 만큼은 아닐 것이다.

이상이 열분석의 일반칙이라고 간주해도 좋다.

4.2 용탕의 성질과 과냉도

(1) 솔직한 용탕과 완고한 용탕

같은 두께의 주물에 있어서도, 용탕이 변하면 과냉도가 약간 달라지게 된다. 비교적 과냉도가 적어도 잘 핵생성해서 셀성장이 잘 진행되는 있는 그대로의 용탕과, 반대로 핵생성하기 어렵고 셀성장이 좋지 않은 완고한 용탕이 있다. 그림 2-9의 용탕은, 비교적 핵생성, 셀성장이 있는 그대로로, 그림 2-10의 용탕은 비교적 핵생성, 셀성장 공히 완고하다.

(2) 온도회복

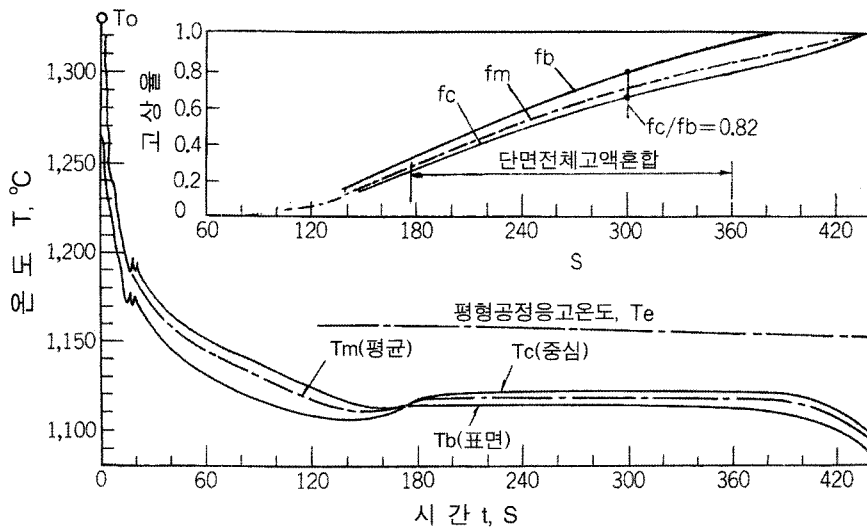


그림 2-10. 평판상회주철주물의 열분석과 고상율의 추이 (두께 20 mm 평판)

그림 2-10에서는, 핵생성직후에 온도상승(회복)현상이 보인다. 이 현상은, 비교적 핵생성하기 어려운 용탕이 큰 과냉도에서 핵생성하고, 큰 과냉도에서 한꺼번에 성장을 시작하기 위한 현상으로, 이 회복현상은 recalescence라고 불리우고 있다.

4.3 오해되고 있는 회주철의 응고형태

(1) 응고진행중의 상태

[칼럼5] 원주주물의 열분석결과로부터 주의해야만할 점이 3개 있다.

① 완전용체, 완전고체가, 동일단면에서 동시에 존재하는 일은 없다. 그림 2-11의 중앙 그림의 2와 같이 중심에 완전용체, 중간에 고액혼합층, 표면에 완전응고층, 그 3자가 동시에 존재하는 것 같이 믿어져왔던 일도 있다. 보통의 주철주물에서 이러한 상태에는 얻을 수 없는 일은 다음의 일로부터 명백하다.

그림 2-9의 열분석에서 보면, 완전용체가 존재하는 시간대는, 늦게 봐도 60초시점이전이어서, 완전응고층이 형성되는 것은 270초 이후이다. 따라서 완전용체와 완전응고층이 동시에 존재하는 시간대는 얻을 수 없는 일이 된다.

1200°C 이하의 저온주입의 경우에는, 최초표면에 완전응고층이 형성될지도 모르지만, 이 경우는 완전액체가 존재하지 않거

나, 순간적 존재로 곧바로 소멸될 것이다.

② 중심에 과냉조직이 생기는 것은 당연하다. 열분석 결과로부터 생각한다면 표면의 완전응고층이 두께를 늘리고, 그 내측의 고액혼합층에서 고상이 증가하고, 최후에 완전응고하는 것은 중심부근이다. 그림 2-9나 그림 2-10을 보면, 응고말기에서 중심부근이 극히 큰 과냉도에서 응고하는 것을 알 수 있다. 급냉응고이다. 저자들의 실험에서도 중심부에 과냉조직이 관찰되었다¹⁹⁾. 중심부에는, 역 칠이 발생하는 일이 있다. 역 칠의 발생을 성분이나 재질의 다른 등의 이유를 들어서 의문되는 일이 있다. 그렇지만 역 칠발생의 첫째 이유는, 열전도론적으로, 중심이 큰 과냉도에서 급속하게 응고하는 필연성에 따른 것으로, 어느 의미에서는 일반적인 급냉 칠 발생현상과 전혀 다르지 않다. 일어나야만해서 일어나는 현상이다.

③ 회주철도 피막형성형 응고라고는 할 수 없다. [회주철의 응고는, 피막형성형응고(약해서 스킨형)에서, 구상흑연주철은, 맞시(mushy)형응고라고 잘 말해져왔다. 후자에서는 [단면 일률적 모양의 죽상응고]라고도 말해져왔다. 그림 2-9는 회주철의 예이지만 표면의 고상율 f_b 가 0.8일 때에 중심의 고상율 f_c 는 0.5에 가깝게 되어있어, 고상율비 $f_c/f_b=0.56$ 이다. 그림 2-10도 같게 회주철의 예이지만, 평판주물이기도 해서, $f_c/f_b=0.82$ 이다. 이것으로는 스킨형이라고 표현할 수는 없다.

단지 같이 육후의 회주철과 구상흑연주철에서는 후자 쪽이 약간 큰 과냉도에서 응고가 진행한다고 하는 설도 있다. 그러면 열전도론적으로, 구상흑연주철 쪽이 맞시형의 경향이 크게 되는 것은 부정할 수 없다. 그러나 그 다름이 있다고 해도, 회주철주물이 스킨형 응고라고는 말할 수 없다.

(2) 맞시도

스킨형 응고와, 맞시형 응고의 어느 쪽이 가까운가를 정량적으로 표현하는 방법으로서, 맞시도를 정의하려고 하는 시도가 있다. 그 이용목적은 구조결합에 대한 현장적 고찰을 위해서이다. 거기서 저자는 맞시도를 스킨형의 역으로 [단면 일률적 모양의 죽상응고의 정도]를 잡아서, 수치로서는 [중심과 표면의

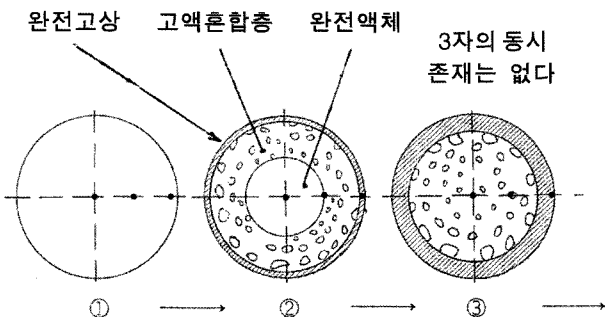


그림 2-11. 얻을수 없는 원주회주철주물의 단면 일러스트

고상율비 f_c/f_b 의 수치가 1에 가까운 만큼 고 맞시도라고 평가해 왔다. 그 f_c/f_b 의 수치는, 정체 온도대의 중심과 표면의 과냉도비 $\Delta T_s/\Delta T_b$ 에 거의 비례하므로 (과냉도의 2승에 비례한다고 하는 쪽이 근사도가 좋은 용탕도 있다¹⁹⁾) f_c/f_b 의 대신에 $\Delta T_s/\Delta T_b$ 을 대용해도 좋다. 그러면 열분석에서 기록되는 온도로 부터 과냉도를 읽어내는 것만으로 곧바로 맞시도 평가를 할 수 있다.

그림 2-10의 회주철의 예는, $f_c/f_b=0.82(\Delta T_s/\Delta T_b)$ 라고 거의 같은 수치)여서, 꽤 높은 맞시도라고 평가된다.

Q. 후육주물은 고맞시도가 되는가: 고상율비 f_c/f_b (혹은 과냉도비 $\Delta T_s/\Delta T_b$)로 정의하는 맞시도는, 용탕만의 특성으로서 결정하는 것인가, 후육주물은 고맞시도라고 인식하고 있지만, 이 방법으로도 같게 되는가.

A. f_c/f_b 로 평가하는 맞시도는, 확실히 용탕만의 속성이라고는 하지 못하지만, 주물의 형상이나 육후, 특히 육후로 크게 달라지게 된다. 단지 f_c/f_b 가 1에 가까운 만큼 고맞시도라고 하는 정의로서는 문제와 같이 후육주물은 박육주물보다 고맞시도는 되지 않고 역이 된다

형상의 영향: 같은 용탕에서 같은 modulus의 평판주물과 원주주물을 비교하면, 평판주물 쪽이 f_c/f_b 의 수치가 1에 가깝고, 고맞시형이라고 평가된다. 그것은 다음의 이유에 의한다. 단면 평균 과냉도 ΔT_m 은, modulus가 같다면 평판도 원주도 거의 같게 되지만, 평판주물의 중심과 표면의 온도차는, 원주주물의 그것보다 1/2이하이다¹⁹⁾. 이것은 그림 2-9과 그림 2-10의 실험 결과에도 나타나고 있다. 그렇기 때문에 과냉도비 $\Delta T_s/\Delta T_b$ 는 평판주물 쪽이 원주주물보다도 항상 크고 f_c/f_b 도 평판주물 쪽이 높은 수치가 된다. 그렇기 때문에 평판주물과 원주주물에서는, 평판주물 쪽이 고 맞시형 응고라고 평가되게 된다.

육후의 영향: 두께가 2:1(40 mm와 20 mm 정도)의 2개의 평판주물에서 비교하면, 후육주물 쪽이 f_c/f_b 수치가 적게 되고, 저 맞시형이 된다. 그것은 다음의 이유에 따른다.

응고완료까지에 방출된 후육의 공정응고잠열층은 박육의 2배이다. 공정응고시간은 modulus의 2승에 비례해서 4배이어서, 후육의 공정응고 잠열 방출속도는 박육의 1/2이 된다. 체적이 2배이므로 단위체적당의 공정응고 잠열 방출속도(고상율 증가속도에 상당)는 1/4이 된다. 즉 후육은 박육보다도 꽤 적은 단면 평균 과냉도(ΔT_m)에서 응고하고 있는 것이 된다. 한편 주물의 중심과 표면의 온도차(T_c-T_b)는, 두께에 상관하지 않고 거의 같게 된다¹⁹⁾. 그렇기 때문에 후육주물 쪽이 중심온도 T_c 는, 평형 공정 응고온도 T_f 에 꽤 가깝다. 거기서 과냉도비 ($\Delta T_s/\Delta T_b$)도, 고상율비(f_c/f_b)도 후육주물 쪽이 꽤 적게 되어 후육주물 쪽이 저맞시도 응고라고 평가되게 된다.

이상의 것으로부터 f_c/f_b 에 따른 맞시도 평가는 용탕의 차이 외에 주물의 형상, 크기와의 종합결과로서의 평가가 된다.

또 질문과 같이 후육주물일수록 고맞시도형이라는 인식은, 예를 들면 [고상율 구배가 적은 것을 고맞시도형이라고 한다]라고 정의한 것과 같은 경우의 일로서, 정의가 다르면 표현은 변해서 이용목적도 달라지게 된다.

Q. 사건비에 따른 맞시도 평가법과의 정합성: 원주주물의 열분석에서, 정체온도대 시간 t_2 와, 정체온도대에 들어가는 시점

의 표면과 중심의 시간차 t_1 의 시간비 t_2/t_1 에서 맞시도를 평가하는 방법이 있다. 상술한 표면과 중심의 고상율을 비교하는 방법은, 이것과 정합성이 있는가.

A. 질문은, 그림 2-12와 같이 시간비 t_2/t_1 가 클수록 맞시형으로 간주하는 평가방법일 것으로 생각하지만, 정합성은 전혀 없다. 그림 2-12의 실선은, 그림 2-9의 회주철의 열분석의 부분 복사이지만, 이 예에서는 t_2/t_1 의 수치가 크므로 시간비 평가라도 맞시형이라고 간주되는 것이 된다. 그러면 스킨형이라고 평가되는 경우가 있는 것인가. 스킨형이라고 평가되는 경우는 파선과 같이 표면이 중심보다 더욱 빠르게 정체온도역으로 들어가서, t_2/t_1 로 평가하는 것이 된다. 그러면, t_1 의 기점부근에 있어서, 중심과 표면의 온도차 ΔT 가 크게 되어, 용탕의 열전도율이 일시 급감한다고 하는 열전도론적 불합리가 생기게 된다. 따라서, 시간차에 따른 방법으로는 원래 스킨형이라고 평가되는 경우는 있을 수 없다가 된다.

5. 1차수축압탕

5.1 탕구계의 압탕효과

(1) 탕구계도 훌륭한 압탕

압탕효과의 정의는, [주물이 응고수축하는 과정에서 생기는 용탕의 부족을, 압탕이 보충하는 작용] 이라고 되어있지만, 요는 수축에 동반하는 결함발생방지가 목적이므로, 압탕으로부터가 아니라도 보충작용이 생긴다면 압탕효과라고 간주한다. 그 의미로 1차 수축에 대해서는 탕구계도 압탕의 역할을 담당하고 있다. 오히려 탕구계로부터의 보충이 불합리한 경우에 압탕을 별도로 붙이는 것이 순서라고 생각한다.

용탕의 수축은, 주입중에도 일어나고, 주입후에 계속한다. 이것을 1차 수축이라고 부르고 있는 것이다. 주입직후에 탕고임 레벨이 얼마인가 낮아지는 것은 수축에 대한 공급이 탕구계로부터 행해지고 있다는 것이 나타나는 것이다. 이 때 탕구는, 압탕의 역할을 다하고 있다.

(2) 탕구계가 갖는 압탕기능

탕구는 쌍1차 수축압탕으로서 다음의 이상적 조건을 구비하고 있다.

- ① 탕구계의 관로벽은, 주탕중 고온의 용탕에서 가열되어있고, 거기서 정지한 용탕은 식기 어렵다.

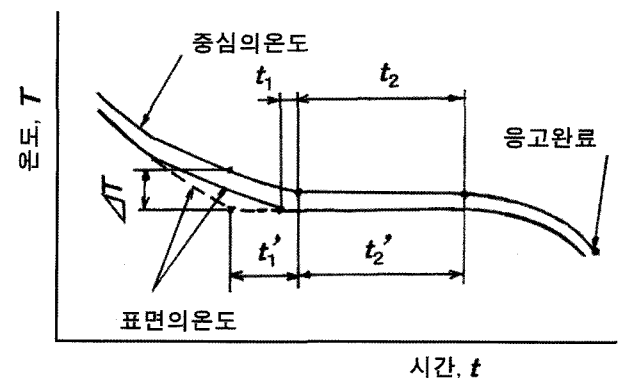


그림 2-12. 의문이 남는 맞시도 평가방법. 맞시도 = t_2/t_1

② 탕고임에는, 다량의 용탕이 존재하고, 또한 무엇보다도 고온이다.

③ 탕고임은 무엇보다도 높은 위치에 있고, 기압력에 뛰어나다.

단지 도중의 조임이나 주입구가 우선 응고하면 상기 이점은 당연 발휘할 수 없다.

GIRI탕구방안의 주입구가 두꺼운 이유는 쌍1차 수축압탕 기능이 목표이다.

우선 그림 1-10에 나타낸 GIRI의 탕구방안에서는 주입구 단면적이 탕구조임의 단면적의 약 2배를 주고있다. 주입구의 유속을 억제해서 주형의 손상을 방지하는 목적만이라면, 주형강도가 늘어난 현재에서는 주입구를 조여서 좋을 것이다. 실은 주입구의 탕구방안에는 또 하나의 이유가 있다. 1차 수축에 대한 탕구계로부터의 충분한 용탕보충을 노리고 있는 것이다. 회주철에서도 압탕을 붙이지 않아도 좋은 경우가 많은 것은 2차 수축이 무시될 수 있기 때문이다. 그 대신 1차 수축에 대한 주입구로부터의 용탕보충은 소홀히 할 수 없다.

탕구방안의 계산연습에도, 주입구 단면을 두껍게 하는 고안등에 대해서 서술해 왔다.

(3) 유동가능한 고상율은 회주철에서 0.4, 구상흑연주철에서 0.3

실험의 결과, 탕구내에서 용탕이 유동해서 얻는 것은, 단면평균 고상율이 회주철에서는 0.4 이하, 구상흑연주철에서는, 0.3 이하라고 계산되었다. 그리고 단면평균에서 이 고상율이하라면, 탕구계로부터의 보급이 가능하다고 생각된다. 실제로 유동을 하는 것은 중심부이고, 중심은 이 수치보다도 약간 낮은 고상율 일 것이다.

상기의 이유로부터 우선 2.3에 서술한 $m_r > m_c$ 의 제1조건은, 1차 수축압탕에 대해서는 의미를 내리지 않는다. 회주철의 경우에 말하면, 탕구의 고상율이 0.4일 때 주물의 고상율이 0.15 정도라는 것은 압탕(이 경우는 탕구)의 modulus는, 주물의 modulus보다 적어서 좋다.

Q. 유동가능단면평균고상율은 어떠한 실험에서 발견했는가

A. 주입구를 두껍고 짧게 하고, 탕구가 우선 응고하는 조건의 탕구방안에서 그림 2-13(a)에 나타내는 원주주물을, 탕구의 직경을 바꿔서 주입하고, 주물에 발생한 1차 수축공과, 그 때의 탕구단면 평균고상율 f_m 을, 열이동론을 기초로 계산했다. 그 결과, 그림 2-13(b)에 나타낸 f_m 의 계산수치가 얻어졌다. 수축공이 나타나지 않은 때의 f_m 의 최대치를, 유동가능 단면 평균고상율이라고 했다^{13,14}.

5.2 탕구계의 탕구봉 두께

탕구봉의 modulus는, 주물의 modulus의 80%로 충분하다.

회주철주물이 1차 수축을 끝내는 것은, 공정을 시작하는 직전이어서, 그 때의 초정의 고상율은 0.15 이하, 그 시점에서 탕구계의 유동가능 고상율이, 회주철에서 약 0.4이었다는 것은 탕구의 modulus는 주물의 modulus보다 열만가 적어도 좋다는 바람직한 관계이다. 그 모양은, 열분석도와 고상율추이도에서 모식적으로 나타내면, 그림 2-14와 같이 된다.

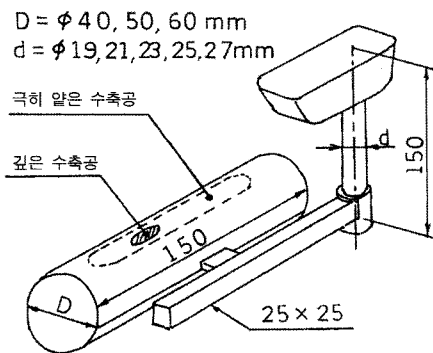
상세하게 계산하면, 주입온도가 낮은 만큼, 또 주입시간이 긴 만큼, 탕구가 가늘게 해서 좋다는 것을 알 수 있다. 계산결과와 1예를 그림 2-15에서 나타냈다. 반경 r_0 의 원주의 modulus는 $r_0/2$ 이므로, 대개 다음과 같이 결론을 붙여서 좋을 것이다.

결론: 탕구계는 유효한 압탕으로서의 기능을 구비하고 있어, 탕구의 modulus는, 회주철에서는 주물의 modulus의 75%, 구상흑연주철에서도 80%로 충분 기능을 할 수 있다.

75%와 80%의 차이는, 구상흑연주철의 유동가능고상율이, 회주철의 0.4보다 약간 적은 0.3이라고 간주하기 때문이다.

일반적으로 구상흑연주철은 2차수축이 중요해서, 압탕을 별도로 붙이는 경우가 많다. 탕구계압탕만으로 끝나는 경우는 드물다. 회주철에서는 별도로 압탕을 붙이지 않아도 좋은 경우가 많으므로, 탕구계 압탕효과를 중시하고, 주입구를 거의 가늘게 하지 않는다.

(2) 압탕기능을 갖는 탕구봉두께의 열수지에 따른 계산



(a) 실험에 이용한 주조방안

탕구직경, mm	φ19	φ21	φ23	φ25	φ27
φ40mm 원주주물 modulus 0.88 cm	FC 18 1.5 수축공없음				
	$f_m=0.61$	$f_m=0.40$	$f_m=0.22$		
φ50mm 원주주물 modulus 1.07 cm	FCD 수축공없음				
	$f_m=0.27$	$f_m=0.14$			
φ50mm 원주주물 modulus 1.07 cm	FC 12 17 수축공없음	10 7	40 1	15 0.5 수축공없음	
				$f_m=0.52$	$f_m=0.36$
	FCD 수축공 큼	작음		수축공없음	
	$f_m=0.71$	0.52	0.37	0.25	

(b) 단면평균 고상율, f_m

그림 2-13. 단면평균고상율의 계산

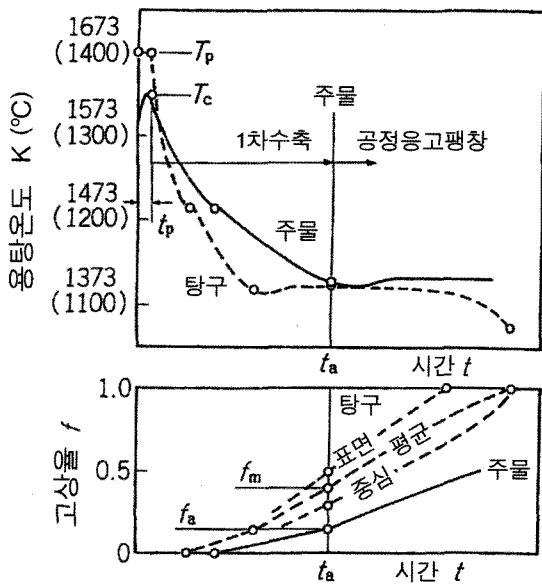


그림 2-14. 주물과 압탕의 냉각곡선과 고상율의 변화

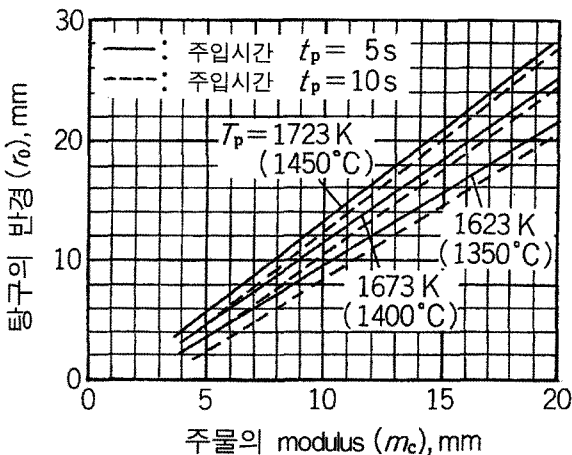


그림 2-15. 압탕을 필요로 하지 않기 위한 최소탕구반경
 $f_a = 0.25$ $f_m = 0.4$ $T_p - T_c = 50$ K $T_f = 1423$ K (1150°C)

[문제] modulus 0.8 cm의 아공정 회주철주물을, 주입온도 1673F(1400C), 주입시간 10초에 주조하는 경우, 1차 수축압탕을 생략하는데는, 탕구의 반경 r_0 는 얼마면 좋을 것인가. 열수지에 따라서 계산해보자. 단지 초정 오스테나이트의 고상율은 $f_a = 0.15$ 로 하고, 주입구의 구속은 없는 것으로 한다.

[해답]

① 주물이 1차수축으로부터 공정응고팽창으로 전환하기까지의 시간 t 를, 주물이 방출한 열량과, 주형이 흡수한 열량의 관계로부터 다음식 (14)에서 구한다.

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

$$0.80\{0.92 \times 6.9(1400 - 1150) + 6.9 \times 210 \times 0.15\} = 1.0 \times 130 \sqrt{t} \quad t = 124 \text{ 초가 된다.}$$

계산에는 표 1의 열물성치를 이용했다. 주형정수의 보정치 α 는, 간단하기 때문에 평균정도의 $\alpha = 1.0$ 으로 했다.

② $t = 124$ 초의 시점에서, 탕구의 고상율이 0.4 이하라면 탕구로부터의 압탕효과가 있다는 것이지만, 탕구의 modulus $r_0/2$ 는 얼마이면 좋은가를 다음식으로 계산한다.

$$(r_0/2) \{c\rho(T_0 - T_s) + \rho L \times 0.4\} = 1.14 M \sqrt{124 + 10} - M \sqrt{10}$$

좌변은 탕구의 고상율이 0.4에 달하기 까지에 단위길이당의 탕구가 잃은 열량이다. 우변은 단위길이당의 탕구주위의 주형이 흡수한 열량이다. 주입시간의 10초와 그 후의 124초간에 열흡수가 행해졌지만, 최초의 주입시간 10초의 열량분은, 최후로 탕구에서 정지한 용탕으로부터 뺀 열량이 아니다. 따라서 그 만큼은 뺀다. 보정치 $\alpha = 1.14$ 는, 원주의 경우 $\alpha = 1.28$ (표 2)인 것으로부터 탕구의 고상율이 0.4에서는 $\alpha = 1 + 0.28/2$ 라고 생각했던 개략치이다.

계산결과는, 탕구의 modulus $r_0/2 = 0.6$ cm(탕구의 직경은 2.4 cm)로 좋다는 것이 된다. 우선 나타낸 그림 2-15는, 이렇게 해서 구했다.

Q. 귀찮은 표면적의 계산: 탕구와 같은 단순한 형이라면 문제는 없지만, 복잡한 주물에서는 표면적의 계산은 귀찮다. 간편한 방법은 없는가.

A. 1차 수축의 경우에서 생각한다.(2차수축의 경우는 부분 modulus로서 후술하지만, 거의 같다)

주물의 구석구석의 박육부를, 수축을 파내듯 제거해서, 간단한 형으로 고쳤을 때의 표면적과 체적으로부터 modulus를 구해서, 그 수치를 대용하면 간단하게 된다. 그 쪽이 합리적이다. 이라는 것은 박육부의 용탕은, 주입시간내에서 거의 수축을 끝내고 있다. 또 박육부 주면의 주형면은, 면적에 비해서는 그 후 열이동에 각별하게 기여한다고 생각하지 않기 때문이다.

5.3 1차 수축 압탕 표준

(1) 1차 수축 압탕의 크기를 결정하는 3조건

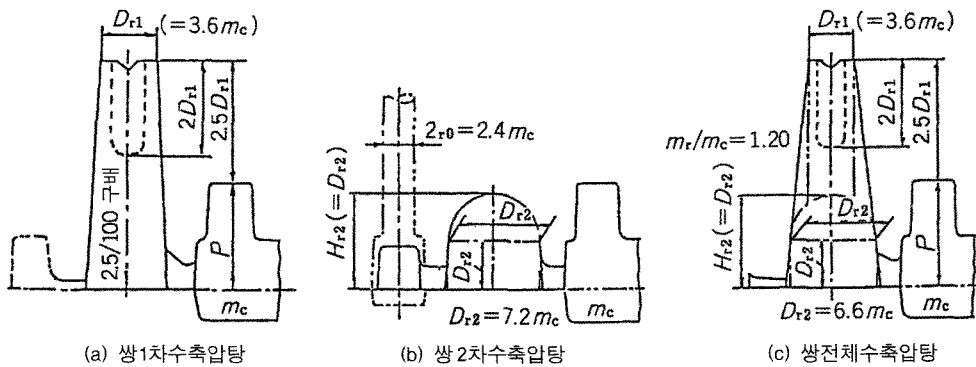
탕구로부터의 용탕보충을 기대한다면, 주입구 단면을 그다지 작게 할 수가 없다. 주입구 단면을 작게한 경우는, 1차 수축 압탕을 별도로 붙인다. 그 압탕에는, 1차 수축 압탕의 원칙으로서 다음의 3개의 조건을 만족시켜야만 한다.

① 보충량 조건: 주물 본체의 1차 수축분을 보충하는 만큼의 공급량이 있을 것. 이상적으로는 압탕 자신의 1차 수축분도 보충하고 싶다.

② 고위치 조건: 압탕내가 수축했을 때, 수축한 공동의 바닥 높이는, 주물의 후육부 상단보다도 얼마인가 고위치가 될 것.

③ 유동가능 조건: 압탕 정점 부근의 modulus(후술하는 부분 modulus)는, 주물 그것의 75% (회주철)-80%(구상흑연주철) 정도일 것.

개략의 계산이기때문에, 1의 압탕 자신의 수축량에 대해서는, 여기서는 무시한다. 2의 주물 상부에 있는 박육부는 제외해도 좋다. 왜냐면 박육부는 탕흐름중에 거의 1차 수축을 끝내고 있다고 생각되기 때문이다. 3의 조건은 자주 서술하지만, 1차 수축 압탕만의 경우이어서, 종래의 압탕의 개념과는 다르다.



(a) 쌍1차수축입탕

(b) 쌍2차수축입탕

(c) 쌍전체수축입탕

그림 2-16. 주철의 압탕표준 (연습용)

이상을 만족시키는 압탕의 표준을 그림 2-16(a)에 나타냈다. 이 형은, Heine의 압탕에 제일 가까운 형이다.

(2) 주물의 1차 수축량의 견적

탕구계 압탕의 경우에는, 주탕구에 충분한 용탕이 있기 때문에 주물의 수축량을 고려할 필요가 없었다. 수축량을 압탕으로부터 공급할 때에는, 될 수 있는한 적은 체적의 압탕에서 끝내기 위해서는, 주물의 수축량을 예측해 두지 않으면 안된다.

주물편람(개정4판)에 의하면, 초기온도 1673 K(1400°C)의 회주철의 1차수축량은, 용탕에서는 4%에도 달한다고 하고 있다. 그러나 보충량은 박육주물일수록, 4%보다 적어도 좋은 것이 아닌가라고 추찰된다. 그 이유는 주입된 용탕이 차가운 주형벽에 접해서 흐르는 중에 온도가 낮아지고, 그 만큼의 수축을 이미 끝내고 있기 때문이다. 박육주물일수록 그 경향이 현저할 것이다. 한편, 찝막한 후육주물에서는, 주탕중의 온도저하가 적고 탕흐름중의 수축은 적다. 주입조건의 차이를 상정하여, 2-4%의 범위내의 수축량을 가정해 둔다.

앞서 나타낸 그림 2-2에 있어서도, 형상계수가 큰 슬림한 주물은, 형상계수가 작은 찝막한 주물보다, 용탕이 정지한 후의 수축량이 작다고 하고 있다. 여기서는 다음의 범위라고 가정해서 의론을 진행한다.

찝막한 주물은 4%, 슬림한 주물은 2%

양이 문제가 되는 것은 슬림하고 체적이 있는 주물이다.

주의하고 싶은 것은, 수축량이 문제가 되는 것은, 실은 탕흐름후의 수축량이 많은 찝막한 주물 쪽이 아니라, 슬림하고 체적이 있는 주물 쪽이다. 왜냐하면, 찝막한 주물에 대해서는, 압탕경을 크게 잡지 않을 수 없게 된다. 양은 필연적으로 충분하다. 이것은 연습 2.9을 행하면 잘 알 수 있다.

(3) 용탕공급 가능량의 가늠

1차 수축일 때, 압탕으로부터 얼마인가 공급이 될 것인가는 확실하지 않다. 이것도 추정하는 것이지만, 적어도 압탕내 원통상 수축공의 직경이, 압탕 직경의 8할정도는 기대할 수 있다고 생각해서, 수축공의 깊이는 압탕 상부 직경 D_{r1} 의 2배까지는 수축할 것이라고 가정했다. 그러면 보충가능량 ΔV_r 은

$$\Delta V_r = (0.8D_{r1})^2(\pi/4)(2D_{r1}) \approx D_{r1}^3 \quad (15)$$

이 되어 취급하기 쉽다. 편차는 크다고 생각되지만, 별도로

적절한 견적방법이 발견되지 않으므로, 하나의 가늠으로서 이용하는 것으로 한다.

1차 수축 압탕에서는, 대기압을 부르기 위해서, 압탕정상중심에 보조개를 붙인다.

(4) 압탕 상부의 용탕이 유동해서 얻는 조건

2.5(2)항에서, 회주철에서는, 탕구의 modulus는, 주물의 modulus의 0.75배, 구상흑연주철에서는 0.8배 정도로 좋다는 것을 나타냈다. 응고 시간비로 말하면 회주철에서 $0.75^2=0.56$ 배, 구상흑연주철에서 $0.8^2=0.64$ 배로 좋다는 것이 된다. 1차 수축 압탕의 modulus m_r 의 조건은, 구상흑연주철에서도 적용할 수 있는 수치로서 다음식을 채용한다.

$$m_r > 0.8m_c \quad (16)$$

이것이 주물의 1차 수축 종료시까지, 압탕으로부터의 유동을 유지시키기 위한 조건이다.

(5) 압탕 정상직경 D_{r1} 의 선택법에는 2개 있다.

이상 서술한 바와 같이, 압탕경의 결정하는 법에는 다음의 2개가 있다.

제1은, 필요한 보충량을 얻기 위한 식 (15)의 조건

제2는, 용탕의 유동성을 유지하기 위한 식 (16)의 조건 이것들 쌍방을 만족시키지 않으면 안된다. 그것에는 쌍방을 계산하고, 큰 수치를 채용하면 좋다.

(6) 슬림하고 큰 주물의 압탕 직경

주물의 modulus는 적어도, 체적이 크다면 수축량도 크다. 식 (15)의 조건으로부터, 압탕 정상직경 D_{r1} 을 구한다.

$$D_{r1} = 3\sqrt{\Delta V_r} \quad (= \Delta V_r^{1/3}) \quad (15a)$$

압탕의 평균직경은, 경사분만큼 D_{r1} 보다 두꺼워지지만 안전한 쪽이다.

보충 필요량 ΔV_c 는, 슬림한 주물이므로 주물의 체적 V_0 의 2%에 가까운 수치를 고른다. 이하 $\Delta V_c = V_0 \times 0.02$ 로 한 경우로 생각한다. W_0 [kg]의 주물이라면, $V_0 = W_0 / \rho$ ($\rho = 6.8 \text{ g/cm}^3$)

(7) 괴상이며 작은 것의 압탕 직경

주물체적이 작다면 수축량이 적다. 식 (15a)에서 압탕 직경

을 결정하면, 공급량은 만족시켜도, 주물의 1차 수축이 끝나지 않기 전에, 압탕 상부의 유동성을 잃어버리는 것으로 공급불능에 빠지는 경우도 있을 수 있다.

거기서 압탕 상부의 길이 $2D_{r1}$ 만 잘라 낸 부분 modulus m_r 을 생각해서, 절단면은 단열로 간주해서 계산한 modulus가 $m_r > 0.8m_c$ 식 (16)을 만족시킬 수 있는 수치를 고른다. 그 부분 modulus를 계산하면, $m_r = 0.22D_{r1}$ 가 된다. 한편 식 (16)의 조건 $m_r > 0.8m_c$ 를 $m_r = 0.8m_c$ 의 등식으로 고쳐서, 상기의 관계를 대입하면 $0.22D_{r1} = 0.8m_c$. 따라서 압탕 정상 직경으로서 다음식을 얻는다.

$$D_{r1} = 3.6m_c \tag{17}$$

그림 2-16의 압탕 표준도에 기입한 수치가 식 (17)의 수치로, 유동성의 관점으로부터 구하는 압탕 정상 직경이다.

(8) 압탕 높이 H의 가늠

주물의 박육부는 주탕중에 1차 수축량을 끝내고 있으므로 대상으로부터 빼도 좋다. 압탕 정상 부근의 중심부가 수축했을 때 그 수축공의 최하부에서도 주물의 박육부보다 열만인가 높게 되도록 압탕 높이를 선별하지 않으면 안된다. 압탕내 수축공의 깊이를 압탕 정상의 직경 D_{r1} 의 2배라고 가정해 두었으므로, 압탕의 높이 H는 다음식 (18)을 가늠하면 좋을 것이다.

$$H = P + 2.5D_{r1} \tag{18}$$

(P: 압탕도로부터 주물 후육부 정상까지의 길이)

이러면 식 (15)의 보충 가능량도 확보되게 된다. 유동성의 조건에 있는 식 (17)으로부터 압탕경을 구하면, 과상이며 작은 경우에는, 공급량이 과대하게 된다. 그러나 보충 가능량이 관대하게 된다고 해도, 높이를 낮게 잡는 것은 피하는 것이 좋다. 낮게 하면 modulus유지를 위해 직경을 얼마인가 늘리지 않으면 안되므로, 압탕 체적절감 효과는 아주 근소하게 된다. 가압효과를 생각하면 높이를 우선해야만 한다.

(9) 압탕 세부의 유의점

압탕의 형은 2.5/100 정도 벗어난 구배를 갖는 원추대 형상으로 한다. 탕도로부터의 주입구는 가늘고 압탕 목은 두껍게 한다.

Q. 직방체 형상 주물의 수축 발생상황을 조사한 연구에 의하면 형상계수가 작은 주물에서는 수축공이 거의 발생하지 않는다. 이것들의 실험결과를 생각하면, 찝막한 주물의 압탕 체적은, 꽤 작아도 되는 것은 아닌가.

A. 찝막한 주물에서 수축공이 전혀 없다면 압탕은 필요하지 않지만, 약간이라도 수축공이 남아 있다면, 수축공이 적다고 해도, 압탕은 작게 할 수 없다. 왜냐하면, 형상계수가 작은 찝막한 주물용 압탕 지름은 수축량으로 결정되는 것은 아니고 식 (16)의 modulus비, 즉 압탕내의 유동성 확보의 관점으로부터 압탕경이 결정되기 때문이다.

수축량은, 예를 들어 수축량과 같아도, 탕구로부터의 용탕보급, 주물표면의 파입정도, 주형벽의 이동등의 통합된 결과로서 달라지게 된다. 수축량과 수축공 양은 구별해서 생각할 필요가 있다.

Q. 직방체 형상에서 형상계수가 작은 주물(찝막한 주물)은 수축이 거의 없으므로¹⁹⁾, 마찬가지로 형상계수의 작은 압탕내에서 자주 수축공이 생기는 것은 왜 그런가. 이것은 형상계수만으로는 수축공의 예측을 할 수가 없는 것인가.

A. 상상에 지나지 않지만, 형상계수가 거의 같아도, 외면이 평면으로 구성된 주물과, 원통형이나 구형의 주물에서는, 후자 쪽이 수축공이 크게 되는 것이 아닌가라고 생각하고 있다.

괴상주물은 원래 중심과 표면 고상율의 차이가 크게 되는 경향이 있어 내부가 꽤 늦게 수축한다. 입방체 형상에서는, 평면부가 휘어 외부 수축공이 되어, 내부 수축공의 발생을 억제한다. 구상이나 원통상 주물은, 표면이 지탱해서 외부 수축공을 만들지 않고, 내부 수축공의 발생을 허락한다는 견해이다.

판상주물은 반대로, 중심과 표면의 온도차가 작고, 따라서 고상율의 차이가 작으므로, 휘어지는 것을 지탱하는 개소가 각각에 만들어져서, 수축공이 분산해서 남을지도 모른다. 어느 것이나 단지 억측에 지나지 않지만, 압탕의 이론에 맞추는 것만의 체계화는 만들어져있지않다.

参考文献

[19] 松田, 西岡 片山: 鑄物, 58(1986)7, 466.
[20] A. Kagawa and T. Okamoto : Metal Science, Nov. (1980) 519.
[21] R. W. Heine : Trans. AFS 90 (1982) 83, 147.