

技術資料

遠心鑄造에 의한 밑바닥이 있는 주물의 제조와 응고과정의 해석

梅田高照

Casting Related with Nuclear Power Generation Wastes

T. Umeda

1. 서 언

원심주조법은 파이프상주물의 제조법으로서 널리 채용되고있다. 본주조법은 기계화, 자동화가 용이하고 무인화도 가능하다[1]. 또 주조에 따른 처리공정, 폐기물이 적은 등의 특징을 갖고 있다.

한편, 폐각된 또는 폐기예정인 기계부품판 및 구조물을 줄이고, 재이용하고자 하는 요구가 커지고 있다. 방사성물질과 같은 유해물질등에 의해 오염된 폐기물이 다량발생하는 경우에는 그 요구는 더욱 커진다. 이와같은 요망에 대해서 용해함으로써 부피를 줄이고 균일화하고, 무인화 프로세스가 가능한 원심주조법을 적용하여, 제조된 주물자체를 폐기물의 수납용기로 하는 recycling이 제안되어 왔다[2]. 이 방법이 실현되면 각각의 폐기물 즉 수납용기의 원료인 폐기물과 수용된 폐기물을 일상적으로 감시 할 수 있는 이점도 있다.

본고에서는 원심력하에서의 응고진행중에 회전을 감속·정지시키므로써 유동한계고상율이하의 금속을 낙하시켜 중자(中子, core)없이 용기를 제조하는 프로세스개발을 실험·이론의 두가지 측면으로부터 검토한것으로, 특히 이론면으로부터의 검토를 중심으로 논하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 제조원리와 공식주물

원심주조에 의한 용기의 제조원리를 그림 1에

표시한다. 즉,

- 1) 정상회전하고 있는 종형주형에 용탕을 주조하여 파이프형상을 일단 형성시켜
- 2) 일정시간이 경과한 후 회전을 감속시켜 유동한계고상율 이하의 금속을 낙하시켜 저부를 형성시킨다. 이 방법에 의하면 중자없이 밑바닥이 있는 원통주물을 만들 수 있고, 주조공정을 고도로 기계화시킨다든지 주물사 처리등의 후처리를 최소화 시키는 특징을 갖고 있다.

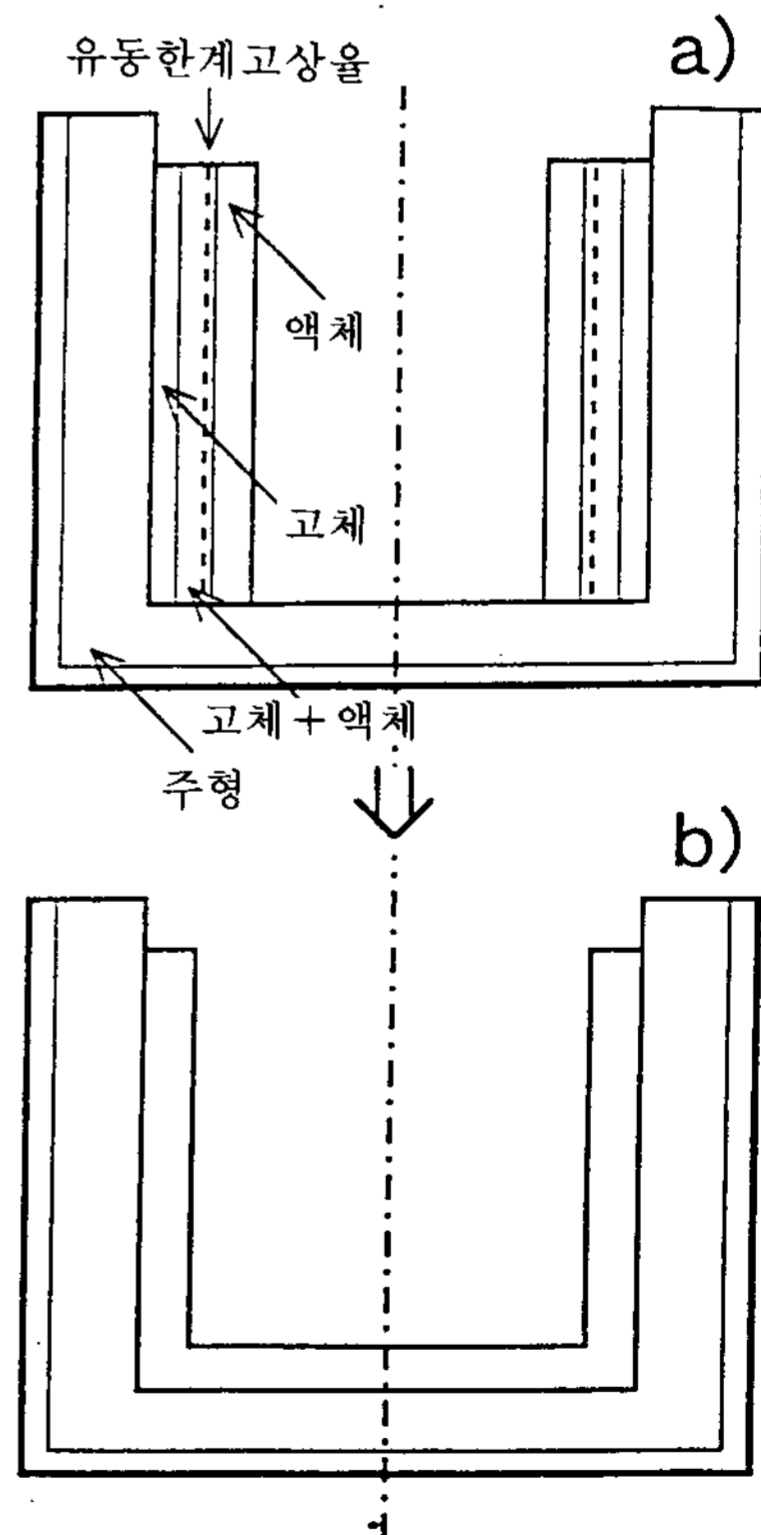


그림 1. Principle of manufacturing a container by centrifugal casting.

東京大學 工學部 (1993년도 추계학술발표 및 기술강연대회)

표 1. Chemical composition of castings(mass %)

Alloy	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Mg
SCS 5	0.04	0.48	0.46	0.010	0.006	3.98	12.45	0.45	-
FCD 370	3.58	1.85	0.17	0.015	0.005	0.74	-	-	0.048

이상과 같은 아이디어를 구체화시키기 위하여 스텐레스 주강(SCS5) 및 구상흑연주철(FCD 370)을 이용하여 실험을 하였다. 공식주물의 성분을 표 1에 표시한다.

탄소강금형(내경 196mm) 내면에 지르콘 도형을 3 및 10mm의 두께로하여 정상회전(중력배수 120)에 도달한후, 주탕하였다. 주탕후에도 정상회전을 계속하여, 소정의 시간이 경과한 후에 회전을 감속시키면서 정지시켰다. 감속후 정지할때까지의 시간은 수초이내였다.

주물치수는 높이 300mm, 외경은 도형두께에 대응하여 190 또는 176mm로 하였다. 측면벽두께 및 저부두께는 원심력감소 조건에 따라서 정하였다. 그림 2에 도형두께 3mm의 경우의 각부분의 크기를 나타낸다.

주탕으로부터 회전정지까지의 시간을 여기서는 낙하시간이라고 부른다. 주탕완료후 감속중

에 유동한계고상율이하의 금속이 낙하하는 시간이 참(true)낙하시간이다. 본실험에서는 주탕개시부터 종료까지는 수초이내이고, 또 회전정지이전에 유동한계고상율이하의 금속은 낙하완료하였다 생각되어지지만, 처음시도이기 때문에 낙하시간을 측정하기위한 센서를 조립하지 않고, 주탕개시로부터 회전정지까지의 시간을 낙하시간으로 하였다.

2.2 응고해석

원심력, 중력의 작용하에서, 용탕은 경우에 따라서는 고상도, 운동(유동)을 한다. 따라서 유동과 열을 기초방정식을 풀 필요가 있지만, 복잡하여 다음과 같이 단순화한다.

1) 정상원심력하에서 응고는 진행된다. 즉, 회전주형내에 주탕하고, 정상적인 회전하에서 응고가 진행된다.

2) 회전을 감속시켜도 중력과 원심력의 균형이 유지되어, 용탕은 파이프상태로 유지되며 그동안에 진행하고 있다. 어떤 시간이 경과되면 균형이 깨져 용탕은 순간적으로 밑으로 낙하한다.

3) 용탕이 낙하하는 것은 유동한계고상율에 도달한 직후이다.

5) 저부(低部)로 낙하하는 량은 유동한계고상율에 도달하지 않은 고액공존구역 및 완전액상이다.

5) 낙하한부분(저부) 및 측면부의 응고해석을 행한다.

이상의 단순화에 의해, 회전축을 z축, 반경방향을 r축으로 두고, 대칭원통주물의 응고해석을 하였다. 즉 다음의 원주좌표계에 있어서의 2차원 비정상열전도방정식을

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]$$

주물부, 도형부(塗型部) 및 주형부의 각부에 대하여 해석하였다. 여기서, T; 온도, t; 시간, ρ; 밀도, Cp; 비열, K; 열전도도이다.

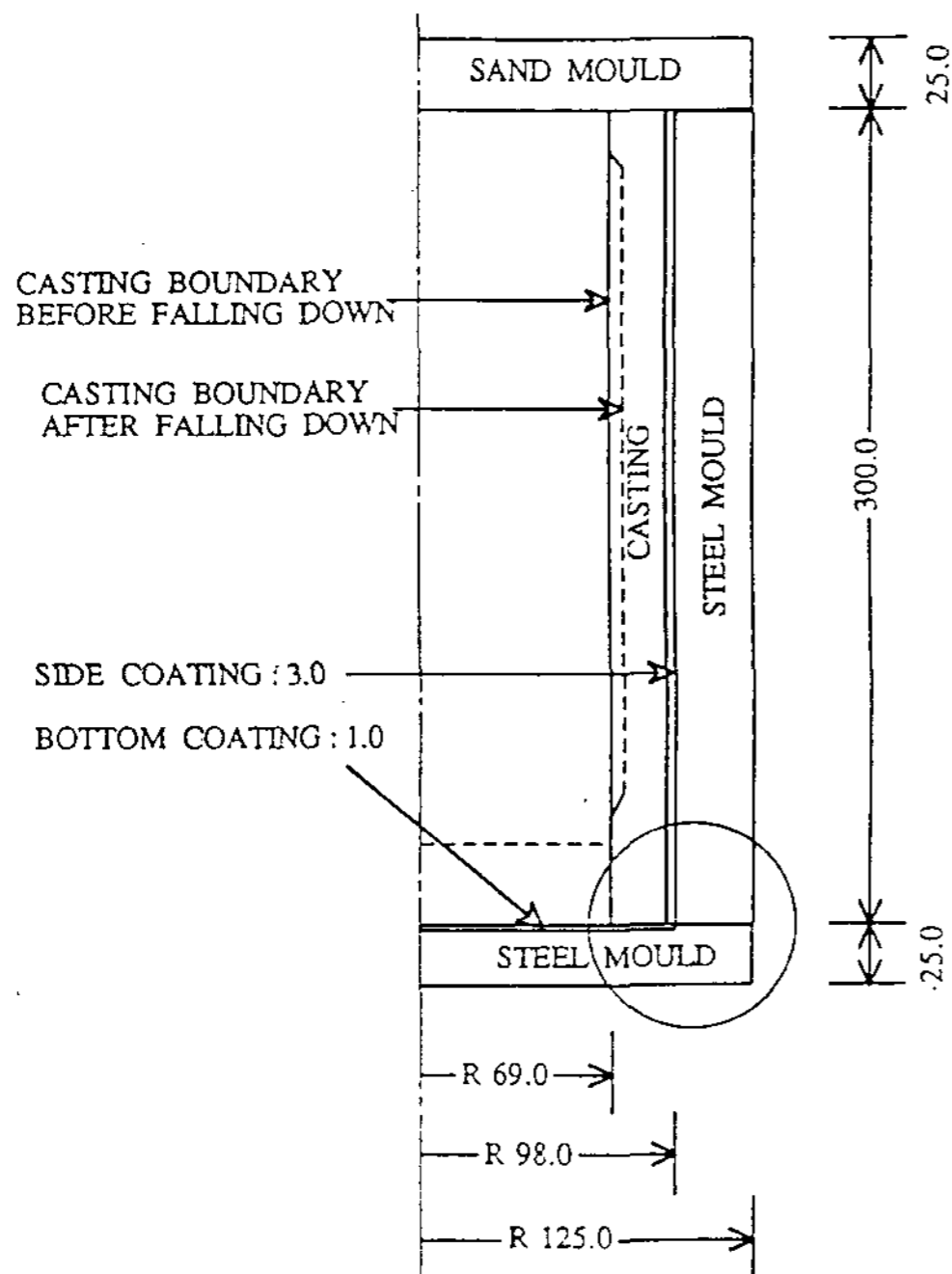


그림 2. Size of castings(unit in mm).

한편, 경계조건으로서, 주물-도형계면, 도형-주형계면은 완전접촉, 주물-대기 및 주형-대기계면은 Newton의 냉각의 법칙에 따르는 것으로 하였다. 표 2,3에 각종열물성치 및 경계조건을 각각 표시한다. 단, 잠열의 방출은 평형응고로 가정하여 취급하였다. 한편, 분할의 예를 그림 3에 표시한다. 이것은 그림 2의 (O)부근의 분할로서, 낙하하는 금속의 용착(溶着)을 고려할 때에 중요한 위치이다.

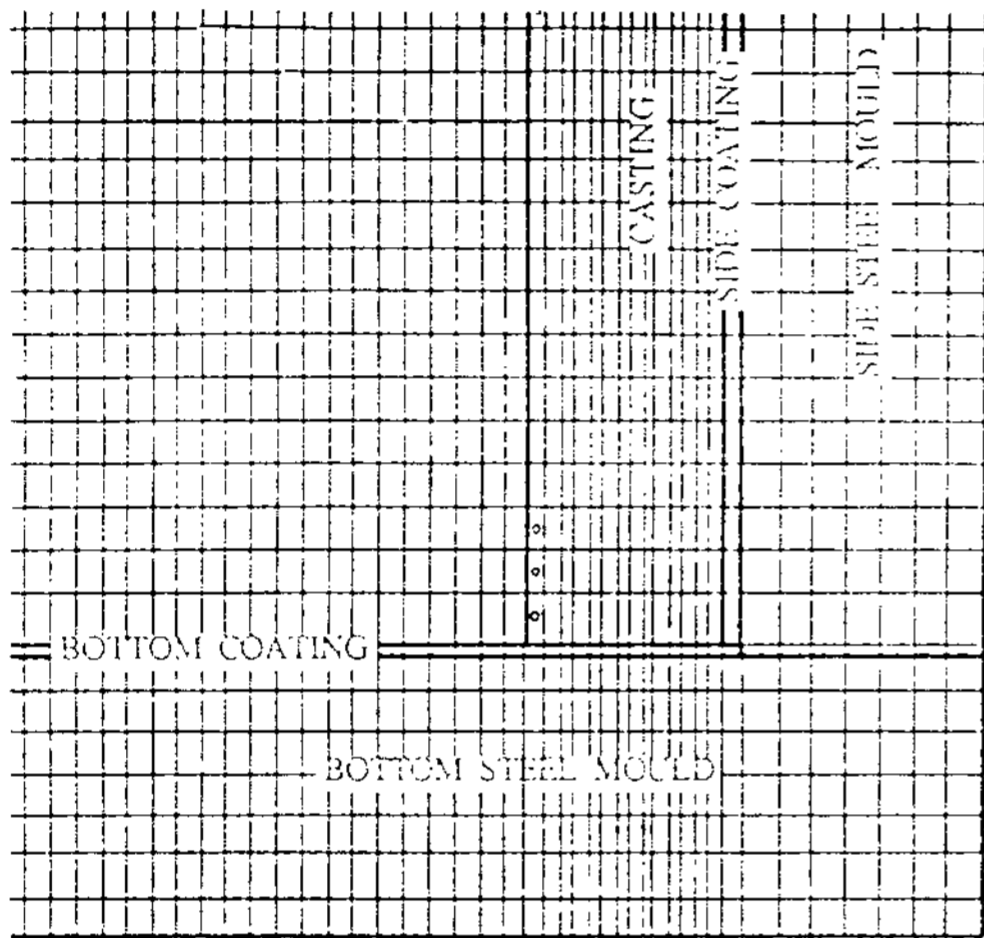


그림 3. Mesh division.

우선 그림 1(a)의 형상에서 각요소에 대해 각시간마다 온도, 고상율을 계산하였다. 다음으로 전술한 단순화[2-4]에 따라 낙하하는 금속의 양은 규정한 낙하시간에 대해 소정의 고상율에서 낙하하는, 즉 소정의 유동한계고상율이하의 요소는 낙하하는 것으로서 계산하였다. 낙하하는 금속의 양을 저부 두께로 환산하여, 그림 1(b)의 형상으로 응고계산을 계속하였다.

3. 주조실험결과

낙하시간을 여러가지고 변화시킨 경우의 원심주조된 SCS5의 주물의 외형, macro조직을 그림 4에 표시한다. 그림 4(a)는 낙하시간이 약 110초로 짧고 따라서 낙하량이 많아 저부가 두껍다. 또 저부중앙상부에는 수축공이 발생하고 있다. 또 측면부의 두께는 상단부가 약간 두꺼운 것을 제외하고는 대략 균일하다. 그림 4(b)는 낙하시간이 140초이고, 측면부는 상단부가 약간 두꺼운 것을 제외하고는 대략 균일한 두께를 가지며 저부에 수축공이 나타나지 않는다. 그림 4(c)는 낙하시간이 약 170초로서 길이, 측면 벽의 두께는 하부에 있어서는 저부(低部)로 갈수록 두꺼워지며, 포물형상을 하고 있다. 또 저부의 두께는 균

표 2. Thermal properties used for calculation (K : conductivity, ρ : density, C_p : specific heat, L : latent heat, T_i : pouring temperature, T_L : liquidus temperature, T_S : solidus temperature, T_e : eutectic temperature)

	K W/mK	ρ 10 ³ kg/m ³	C_p kJ/kgK	L kJ/kg	T_i K	T_L K	T_s, T_e K
SCS 5	21.0	7.7	0.71	251	1873	1721	1601
FCD 370	21.0	7.1	0.59	239	1573	1493	1403
steel mold	41.9	7.1	0.59				
sand mold	1.30	1.5	1.13				
coatings	0.8~3.4 (1.7,2.1)	1.5	1.13				

표 3. Heat transfer coefficients between various interfaces and calculation treatment of solidification

heat transfer coefficient(W/m ² K)				release of latent heat
castings	coatings	mold	castings	
-coatings	-mold	-air	-air	
perfect contact	perfect contact	84	84	
-----				equilibrium solidification

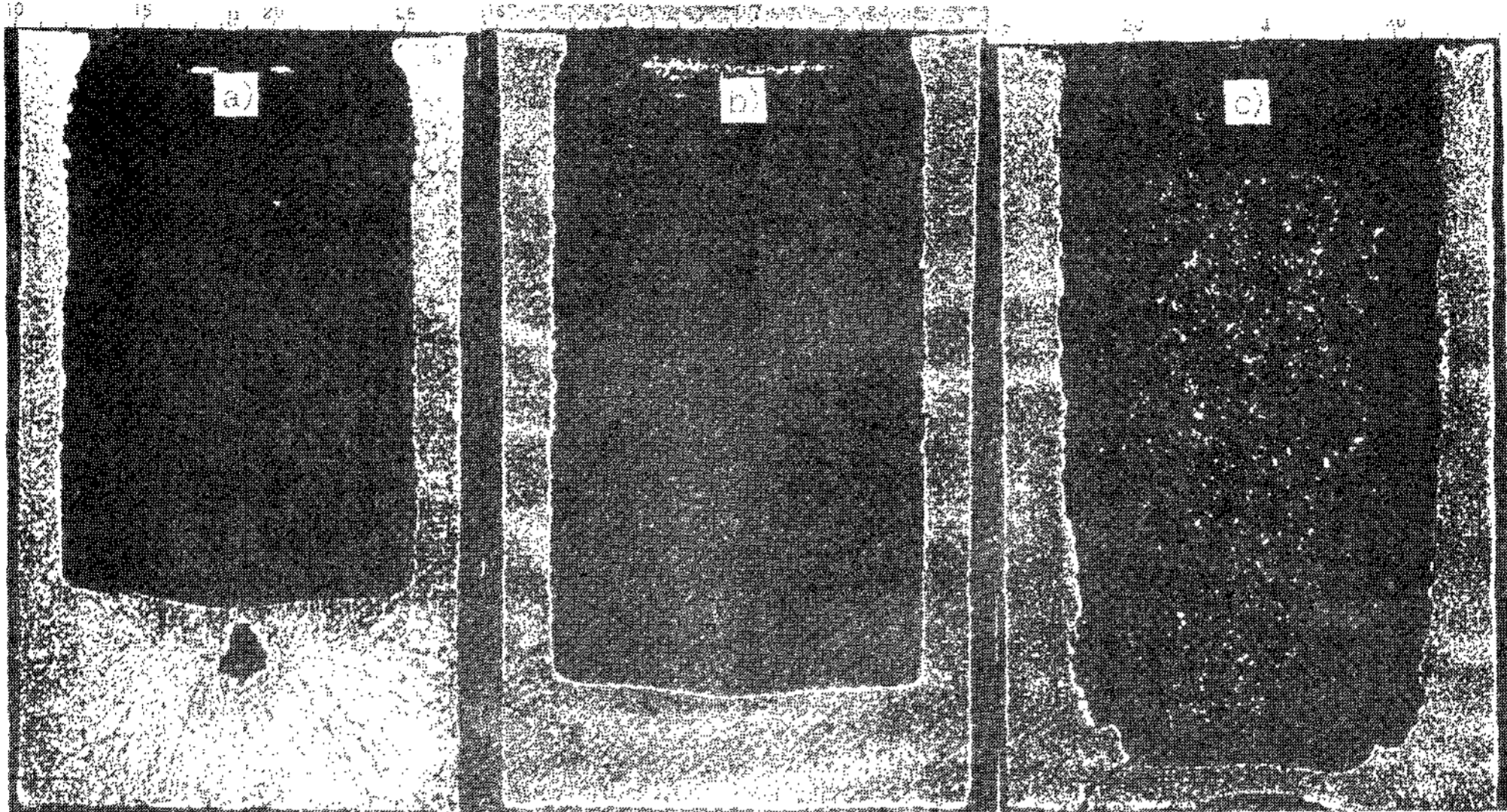


그림 4. Shapes and macro-structures of centrifugally cast SCS 5.
Falling time ; (a) 100sec, (b) 140sec and (c) 170sec.

일하지 않으며, 저부와 측면벽 하부가 완전히 용착되어 있지 않음을 알 수 있다.

낙하시간이 길수록 유동성이 저하한 하단부에 있어서 약간의 두께 불균일을 제외하고는 측면부의 형상은 균일하며 낙하는 급격히 발생하였다고 해석된다. 한편 상부 주형의 영향으로 상단부에 있어서는 냉각속도가 크고 응고두께도 약간 크지만 아래 위치와 같은 시각에 낙하였다고 생각되어진다.

이상과 같이 낙하시간을 조절하고 낙하량을 제어하므로써 중자를 이용하지 않고 건전한 밑바닥 있는 주물을 주조할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 응고해석

용기의 외경, 높이가 미리 규정된 금형이 주어 져 있는 경우 응고과정을 조절할 수 있는 인자는 도형재질의 선정 및 두께, 주조조건(주탕온도, 주형온도, 회전수)이다. 본연구에서는 도형에 관한 문제만을 검토하였다. 이것은

1) 도형재질을 일정하게 하여도 도형층의 열전도도의 평가가 어려워 시행착오로 결정해야 할 필요가 있으며,

2) 유동한계고상율의 결정이 본질적으로 중요

하며 주조조건 검토는 응고해석의 입장으로 부터는 2차적문제이기 때문이다.

또, 실험결과로서 직접 구한 데이터는 낙하시간과 저부 및 측면벽부의 두께이다. 여기서 해석 결과를 낙하시간과 저부 두께와의 관계로 우선 검토하기로 하자. 그림 5,6은 SCS5를 측면벽의 도형 두께 3,10mm로 각각 주조했을 때의 해석결과와 실험결과(●)를 표시하고 있다.

해석결과는 유동한계고상율(그림 중 FSOL로 표시)을 미리 0.2, 0.4, 0.6, 0.8로 정한 경우의 낙하시간과 저부두께와의 관계를 나타낸다. 예를 들면 그림 5(a)에서 FSOL 0.4의 곡선은 0.4이하의 고상율의 요소가 낙하하여 형성된 저부두께와 낙하시간의 관계를 나타내고 있다. 이때, 낙하시간이 짧으면 저부두께가 크게 나타나고 있다. 또 일정한 저부 두께를 얻기 위해서는 유동한계고상율이 작을수록 낙하시간을 짧게 할 필요가 있다는 것을 보여주고 있다.

그림 5(b),(c)는 도형재의 열전도도의 영향을 나타낸다. 예를 들면 2.5W/m·K로 그림 5(a)에 비해 50% 열전도도가 커지면 응고속도가 커지고, 동일 낙하시간에 대해 비교하면 저부두께가 작아짐을 보여주고 있다.

측면벽의 도형두께를 10mm로 두껍게 한 그림

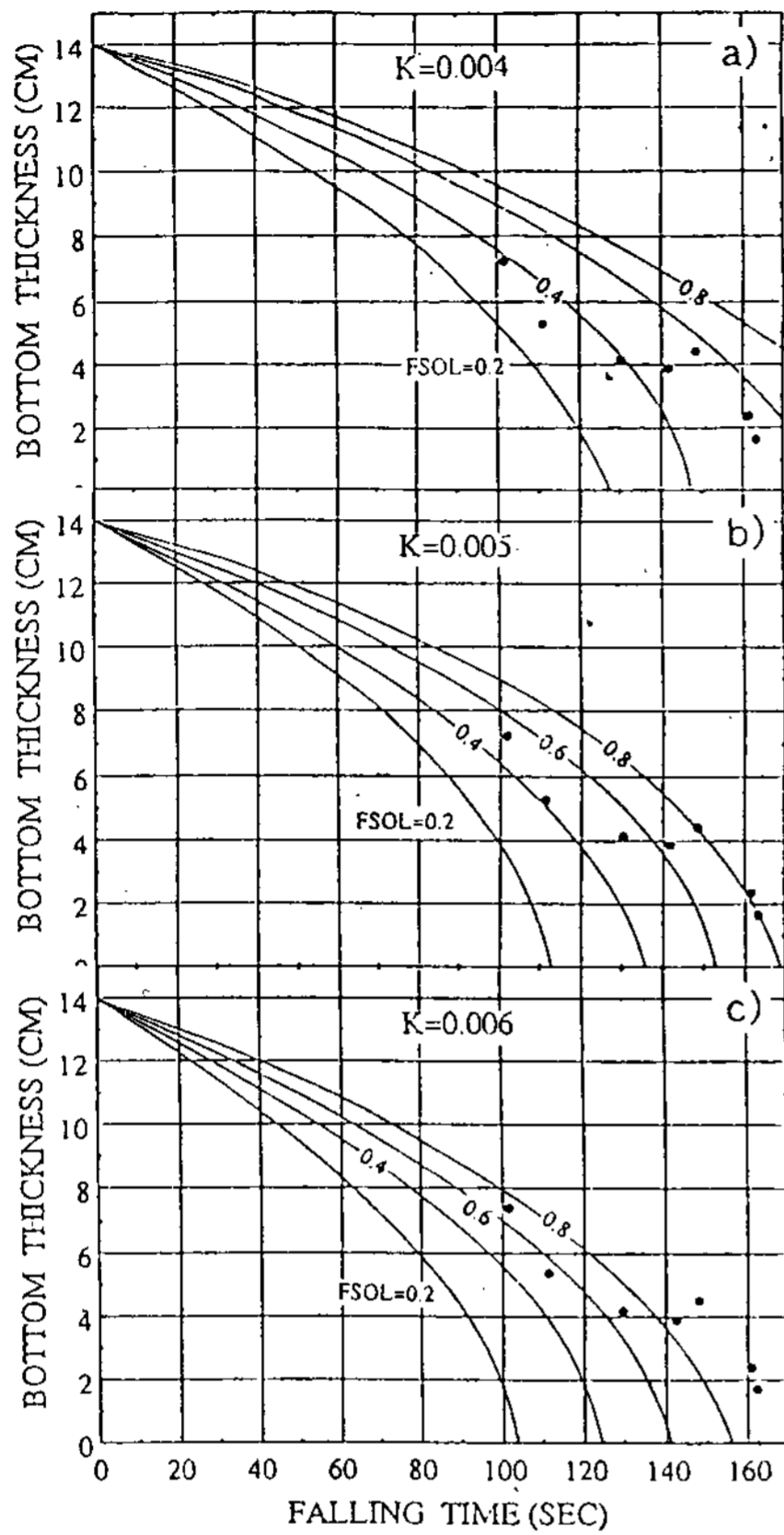


그림 5. Relationship between falling time and bottom thickness in case of SCS 5 with coating thickness 3mm.
Coating conductivity ; (a) 1.7W/m·K, (b) 2.1W/m and (c) 2.5W/m·K.

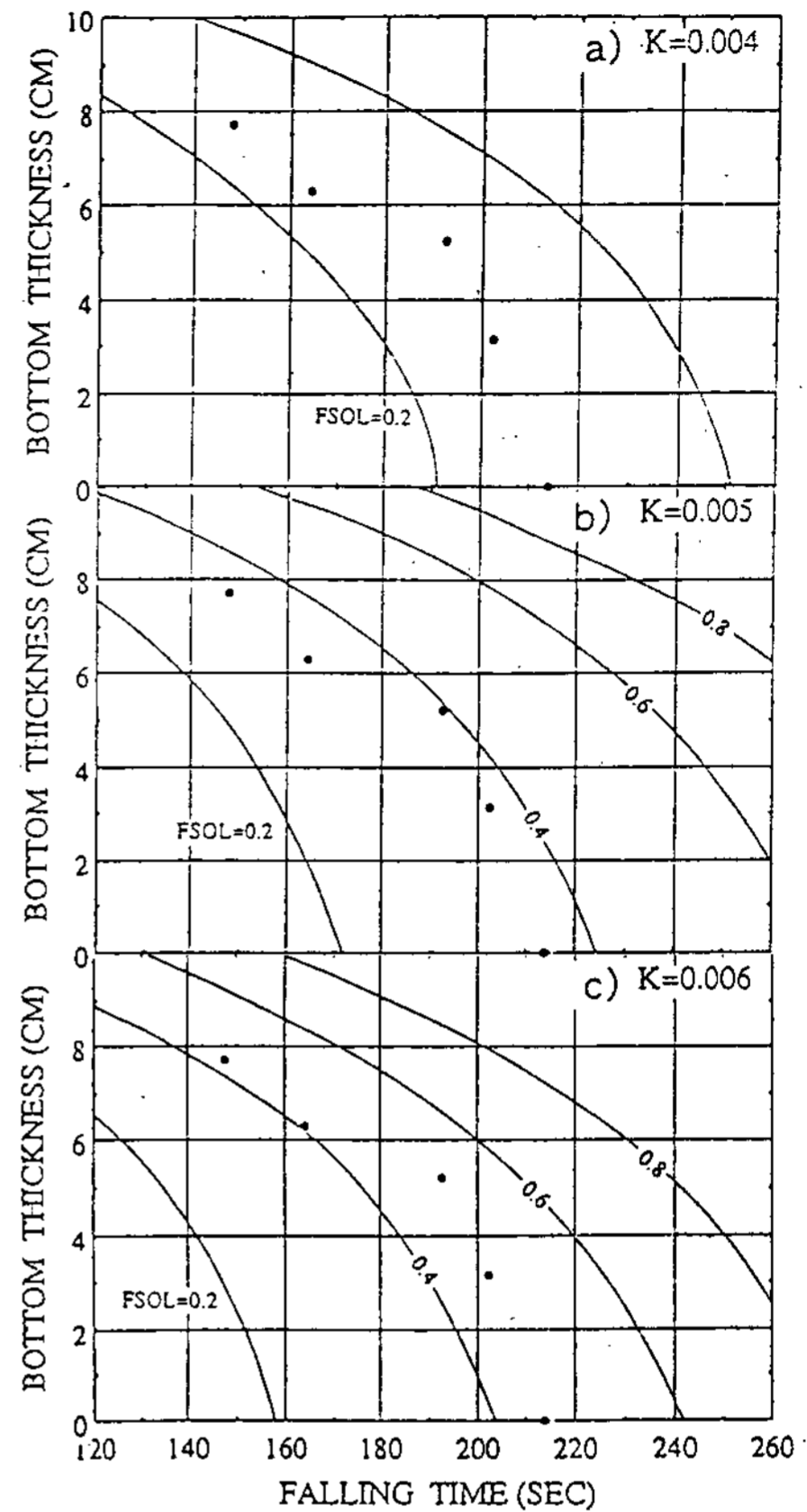


그림 6. Relationship between falling time and bottom thickness in case of SCS 5 with coating thickness 10mm.
Coating conductivity ; (a) 1.7W/m·K, (b) 2.1W/m·K and and (c) 2.5W/m·K.

6의 결과를 그림 5와 비교하면, 예를들면 열전도도 1.7W/m·K의 경우 저부두께를 6~8cm로 비교적 두껍게 얻기위한 낙하시간은 약 2배, 2~4cm의 저부두께를 얻기위한 낙하시간은 약 6할 정도 길어진다. 이와같이 소정의 저부두께를 얻기위한 낙하시간의 허용 차의 관리는 도형두께를 10mm로하여 응고를 지연시키는 편이 원만하다는 것을 알 수 있다.

실험결과와 비교하면 본실험에서 사용한 도형의 경우(열전도율 1.7W/m·K), 도형두께 3mm에 대해서는 낙하시간 120초이하에서는 고상율이 약 0.35, 그 이상의 낙하시간에서는 고상율이 약 0.5이하의 요소는 낙하하는 것으로 하여 구해진 계산결과, 즉 유동한계고상율을 0.35~0.5로

한것과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 도형두께 10mm의 경우와 같이 응고가 느리면 유동한계고상율은 0.3으로 약간 작아지는 경향이 보여진다.

그림 7은 FCD370을 도형두께 3,10mm로 각각 주조한 경우의 해석결과와 실험결과를 나타낸다. 그림 5,6과 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 본 주조조건에서는 FCD370의 경우가 SCS5에 비하여 응고의 진행이 약간 빠르고, 저부 두께는 동일한 낙하시간에 대해 비교해보면 작다는 것을 해석 및 실험으로부터 알 수 있다. 그리고 (●)로 표시한 실험데이터로부터 유동한계고상율은 도형두께 3mm에 대해서는 0.35, 도형두께 10mm에 대해서는 0.3정도로 판단된다. 도형두

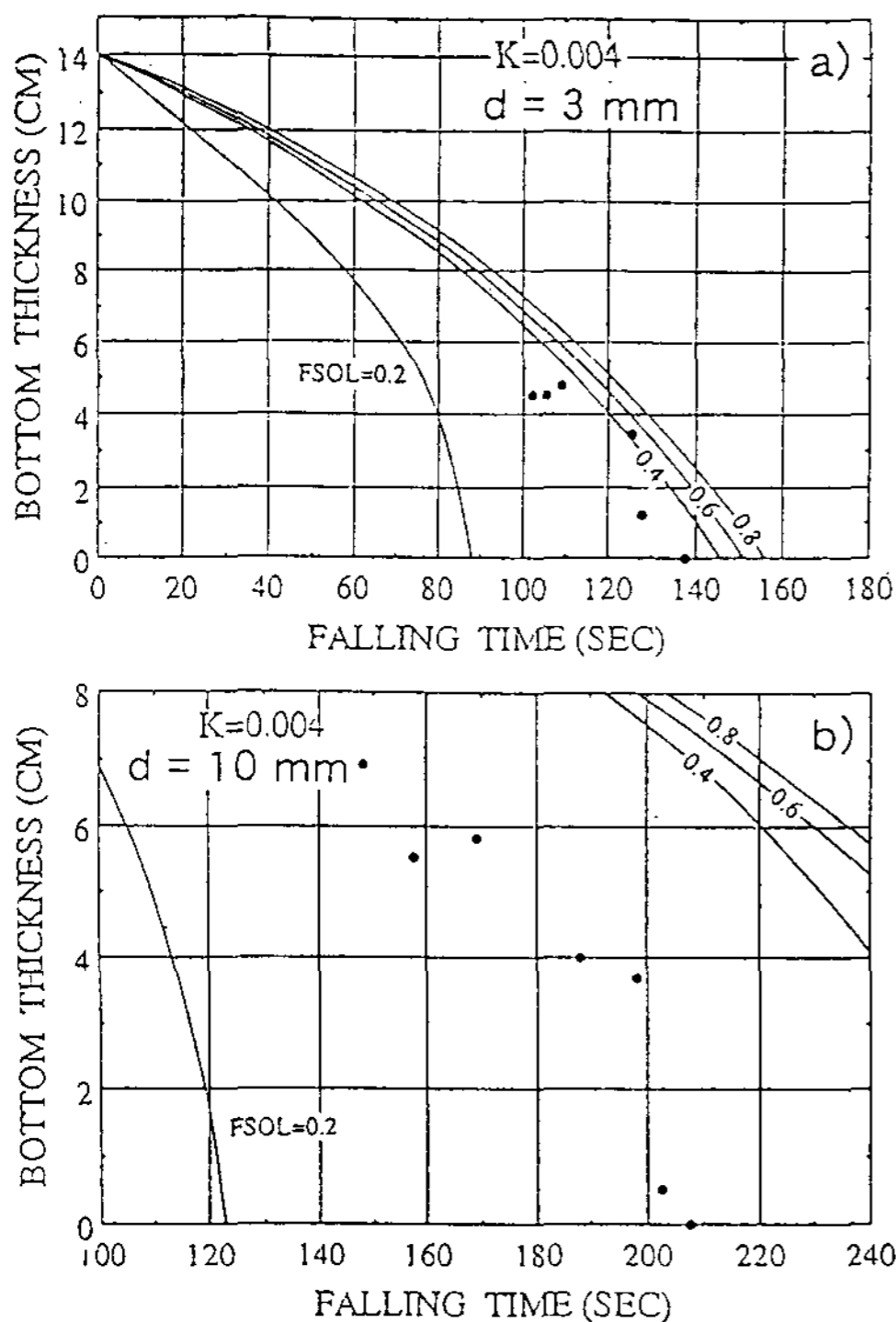


그림 7. Relationship between falling time and bottom thickness in case of FCD 370 with coating conductivity of 1.7W/m·K. Coating thickness ; (a) 3mm, and (b) 10mm.

께가 두껍고 응고가 느려지면 유동한계고상율은 SCS5의 경우와 같이 작아진다. 한편, 本供試구 상흑연주철의 공정개시고상율은 약 0.3이다.

이상과 같이 응고의 진행이 비교적 완만하고 실험조작의 관리도 용이한 도형두께 10mm에 있어서는 그림 5(a)·7(a)에 표시한 바와 같이 SCS5 및 FCD370 두 재질 모두 유동한계 고상율을 0.3으로 평가할 수 있었다. SCS5에서 도형두께 3mm의 경우 실험의 편차가 큰것을 감안하면 유동한계고상율은 응고조건에 대응하여 0.3~0.4로 볼 수 있다. 한편 高橋 등[3]은 동심이중원통의 안쪽 원통을 회전시키는 회전응고(일종의 종형 원심주조)의 실험결과로부터 고액공존영역을 p,q 층의 두층으로 분류하여 응고천이층이라고 부르고 있다. p층은 고체속에 액체가 분산한 상태에 있고, 액체는 층밖으로 이동할 수 없는 영역이다. q층은 다시 두 층으로 분류되어 q₁층은 dendrite가 서로 연결되어 액체는 그 간격을 이동할 수 있고, q₂층은 유리된 고체와 액체로 이루어져 두상 모두 이동할 수 있다. 회전응고의 결과로부터 “q₂층”의 값은 Al-4%Cu에서 0.275[3], Fe-0.85%C에서 0.29~0.30[4]라고 보고되어 있다. 또 중력하에 있어서 Fe-0.26%C강의 덤프 테스트 결과로부터는 고상율 0.30~0.35의 “응

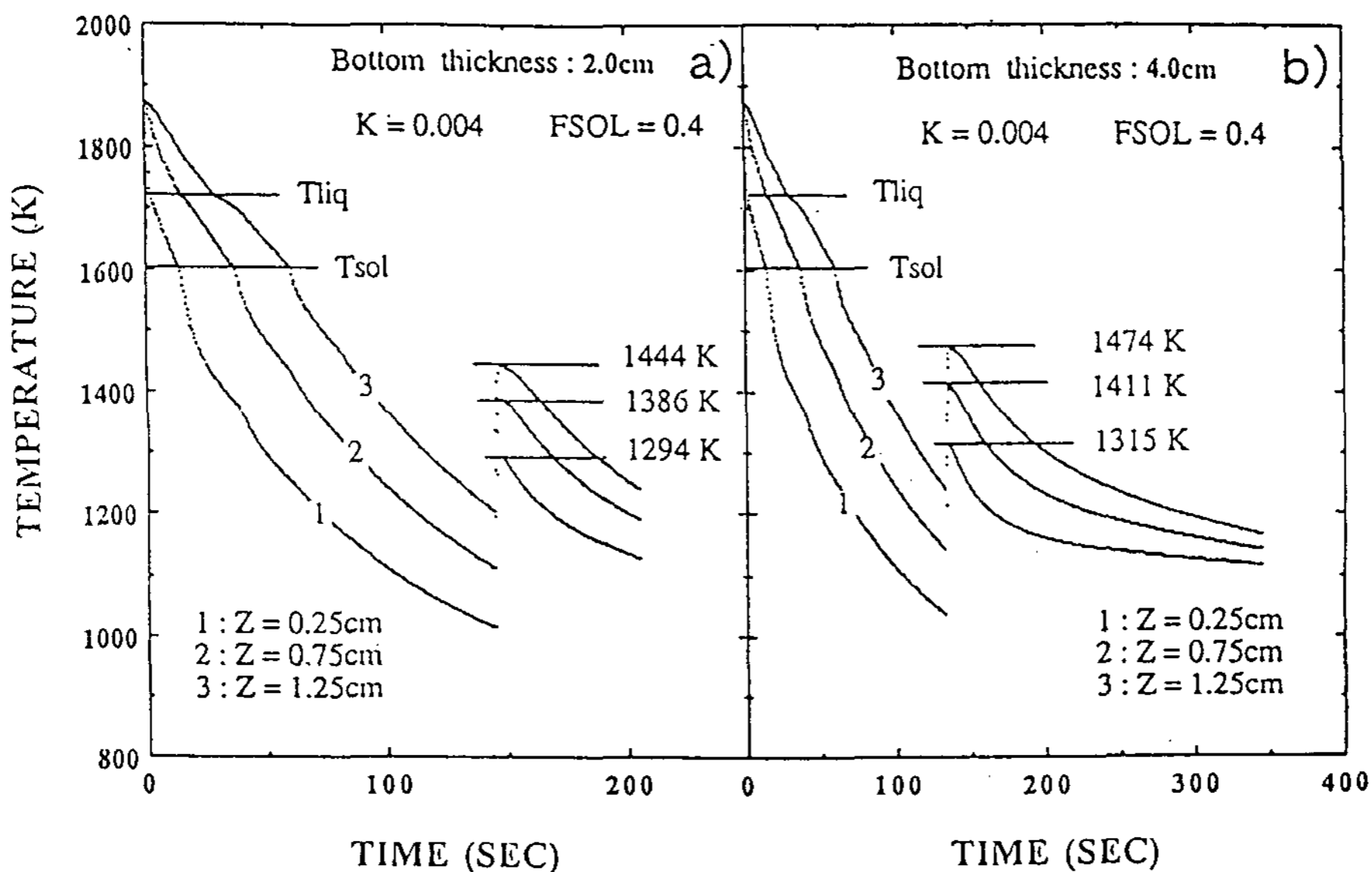


그림 8. Calculated cooling curve of SCS 5. Bottom thickness ; (a) 2cm and (b) 4cm.

고전면(凝固前面)”보다 낮은 고상율의 부분이 배출되고[5] 저탄소강의 slab연속 주조에 있어서 미(未)응고부분을 압하(壓下)하는 경우 고액 두상 모두 이동할 수 있는 “응고전면”의 값은 0.25로 보고되어 있다[6]. 한편 원심하에서의 응고과정을 측정하는 예비적인 실험결과에 의하면 낙하의 유동한계고상율은 약 0.3이다[7]. 따라서 중형원심 주조에 있어서의 감속시의 낙하를 지배하는 유동한계고상율은 중력하의 경우와 큰 차이가 없다고 생각되어지지만, 앞으로의 검토가 필요하다.

그림 8은 저부위치(그림3의 (○)의 위치, 즉 저부로 부터 0.25, 0.75, 1.25cm)에 있어서의 SCS5의 냉각곡선의 계산결과이다. 그림 8에서는 저부두께를 2.0, 4.0cm으로 변화시켜 용탕을 낙하시켰을 때의 소정위치에서의 냉각곡선을 나타낸다. 저부두께가 크도록 낙하시간을 작게하여 용탕을 낙하시키면, 측면벽저부의 온도 상승이 커진다. 이러한 계산결과는 문헌[2]에 표시한 저부 두께가 작고 낙하금속의 온도가 낮으면 이미 응고한 측면벽부와 낙하금속은 용착하지 않는다는 실험결과와 잘 일치하고 있다.

5. 결 언

원심주조법을 응용하여 중자없이 원통용기의 제조를 시도함과 동시에 그 제조조건을 응고해석의 관점에서 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었

다.

- 1) 원심주조법에서 파이프 형상을 형성시킨 후 회전을 감속·정지시키므로써 유동한계고상율 이하의 금속을 낙하시켜, 밑바닥이 있는 원통주물을 제조할 수 있다.
- 2) 주탕후 회전을 감속·정지하는 시간, 즉 낙하시간을 적절하게 조절하므로써 건전한 저부를 형성할 수 있다.
- 3) 도형 재료의 선정·두께의 관리가 낙하시간의 조절에 큰 영향을 미친다.
- 4) 응고해석에 의해 제조조건을 검토하면 고상율 0.3~0.4에 도달하지 않은 고액공존금속과 완전액상이 낙하한다.
- 5) 원격조작에 의해 밑바닥이 있는 원통주물을 중자없이 제조가능하다.

참 고 문 헌

[1] 日本鑄物協會編：改訂4版鑄物便覽，(1986) 1081
 [2] 南三 等：鑄物，64 (1993)，게재확정
 [3] 高橋 等：日本金屬學會誌，29 (1965) 1152
 [4] 高橋 等：鐵과 鋼，68 (1982) 623
 [5] 鈴木 等：鐵과 鋼，63 (1977) 45
 [6] S. Ogibayashi et. al：ISIJ International，31 (1991) 1400
 [7] 村田 等：鑄物 第122回 講演大會講演概要集，(1993) 9