

技術資料

원심주조법에서의 주형 회전속도

최상호

Mold Rotary Speed in Centrifugal Casting

S. H. Choi

1. 서론

원심주조법은 1809년 이태리의 Anthony Eckhardt에 의한 특허로 시작되어 그동안 많은 연구를 통하여 실용화 되었으며, 이 주조법은 진원심주조법, 반원심주조법, 원심가압주조법 등으로 나누고 진원심주조법(true centrifugal casting)은 금형의 회전축이 수평 또는 수직이나에 따라서 수평형 원심주조법(horizontal mold type)과 수직형 원심주조법(vertical mold type)으로 나눈다. 그림 1은 원심주조법의 종류이며 그림 2는 실용되고 있는 여러가지 원심주조기의 예이다.

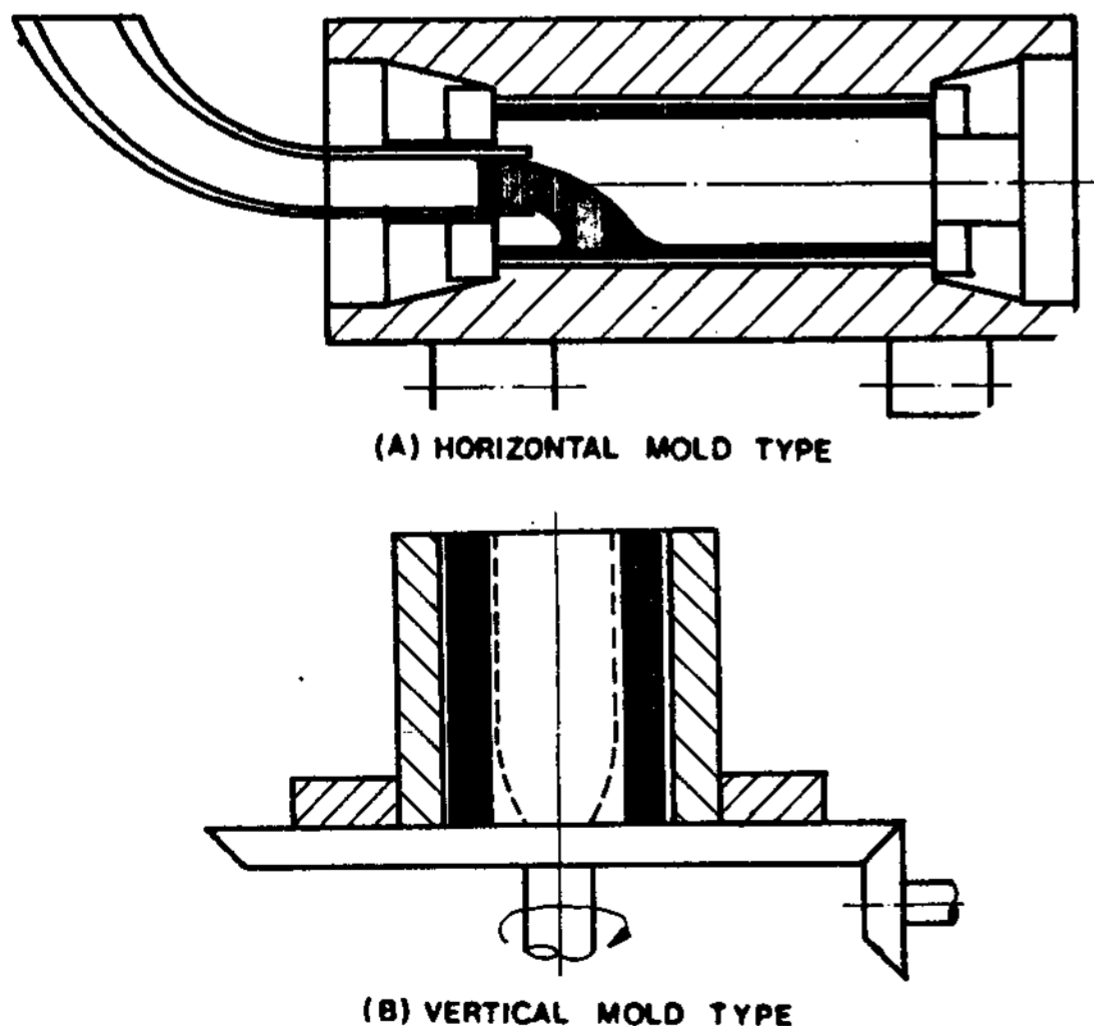


그림 1. 원심주조법의 종류

일반적으로 원심주조법은 원심력을 이용한 압력을 용융금속에 가하므로 금속산화물과 비금속 개재물 등을 비중차에 의하여 원심분리 시키며 방향성 응고를 시킬 수 있어 우수한 재질의 실린더 라이나(cylinder liner), 기어(gear), 포신(gun cylinder), 원통상의 제품(pipe and tube), 피스톤 링(piston ring), 플렌지(flange), 베어링(bearing), 롤 및 롤러(roll and roller), 추진축 슬리브(shaft axle sleeve) 등을 제조하는 데에 이용된다. 최근에는 솔바(sole bar), 복합롤(, composite roll), 구조용 강관지주(structural steel pillar), 복합재료(composite material) 등이 원심주조법으로 개발되고 있다.

원심주조법에서 주형의 회전속도가 주물의 재질에 결정적인 영향을 미치고 있다는 사실은 잘 알려져 있다.

따라서 적절한 주형의 회전속도를 결정하는 일은 매우 중요한 주조조건 중의 하나이므로 지금까지 발표된 주형회전속도를 정리하여 현장에서 원심주조의 조건을 결정하는 데에 도움을 주고자 하였다.

2. 주형의 회전속도 결정

2. 1. 수평형 원심주조의 주형 최저회전속도 (minimum mold rotary speed).

수평형 원심주조기에 의하여 관상의 주물을 제작하려면 주형속에 작용하는 원심력이 용탕에 작용하는 중력보다 크지 않으면 안된다. 원심력이 용탕중력보다도 작으면 용락현상이 일어나 원하는 주물을 얻을 수 없기 때문이다.

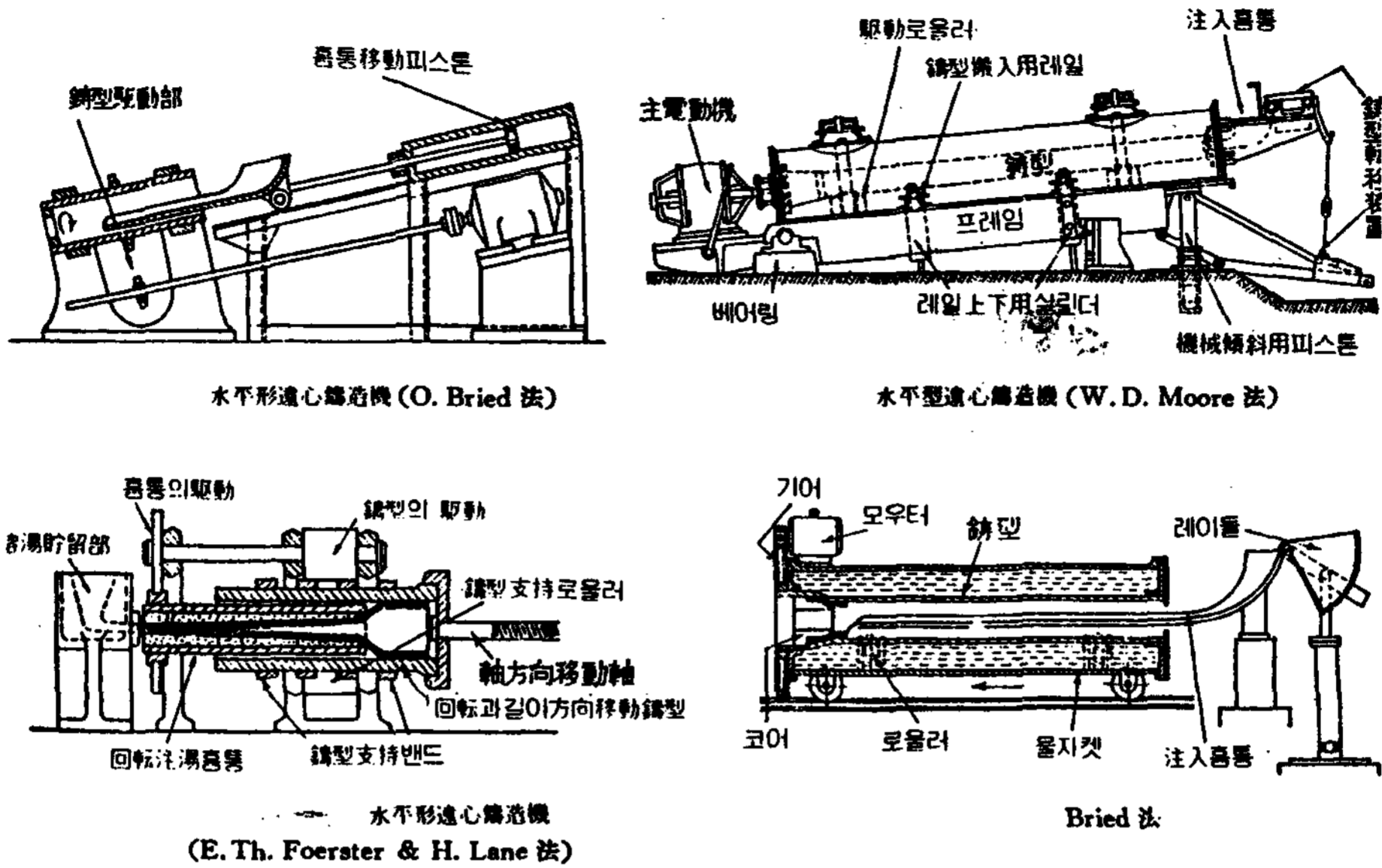


그림 2.(a) 각종 원심주조기

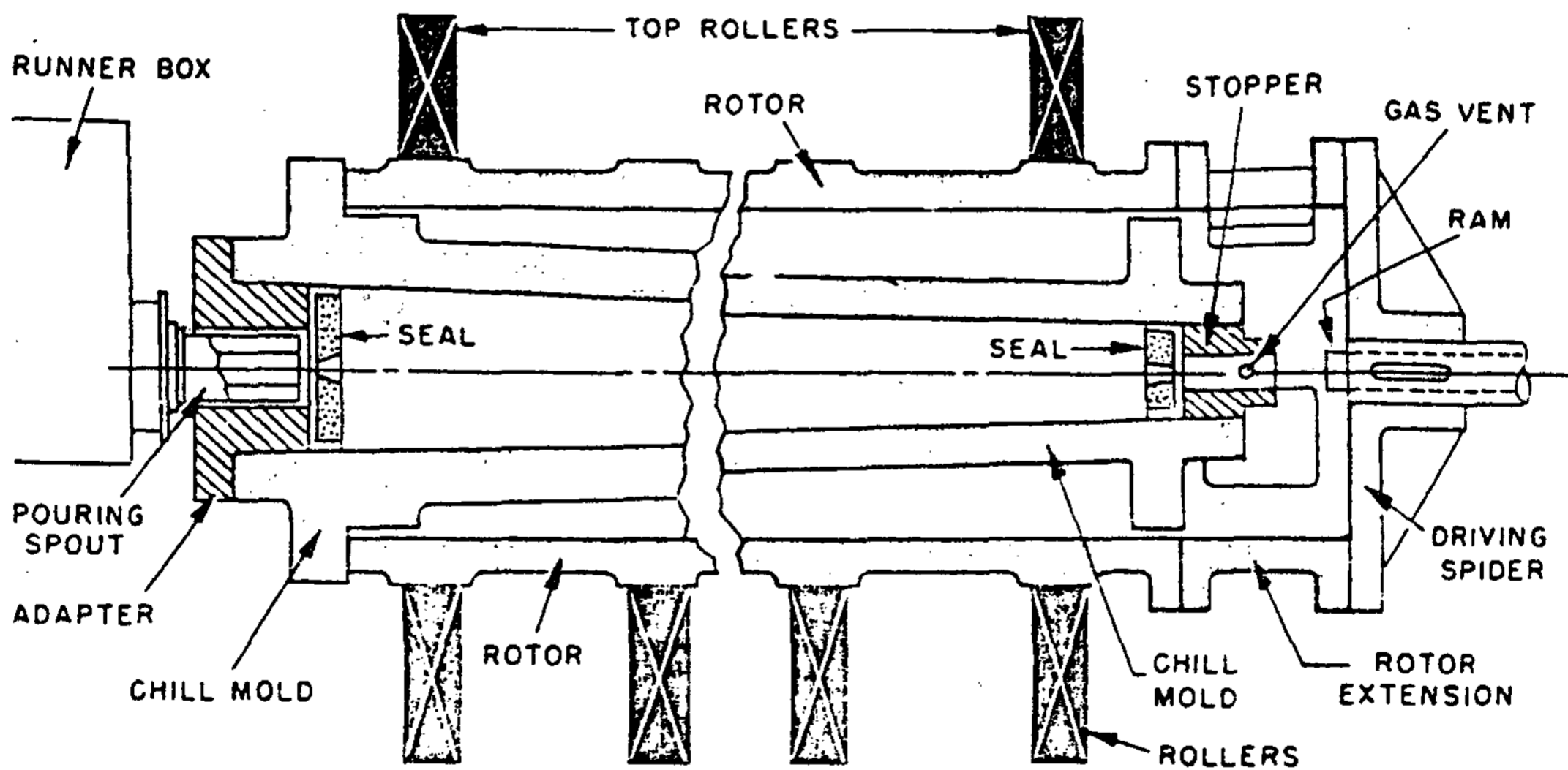


그림 2.(b) 포신 원심주조기

그림 3에서 용탕의 미소부분(사선부분)의 질량을 m 이라 하면 중력은

$$G = mg \tag{1}$$

이다.

G : 중력 ($kg \cdot m / sec^2$)
 g : 중력가속도 (cm / sec^2)

한편 주형의 회전으로 발생하는 원심력은 아래와 같다.

$$F = mrw^2 \tag{2}$$

F : 원심력 ($kg \cdot cm / sec^2$)
 w : 각 속도 ($radian / sec$)

따라서 용탕이 회전하고 있는 주형에서 중력에 의하여 떨어지지 않기 위해서는 (2)식의 값이 (1)식의 값보다 커야 한다. 즉 (1), (2)식이 같아지는 주형의 회전속도를 이론적 주형의 최저회전속도 N_{min} 이라 하고 rpm 단위로 환산하면 아래

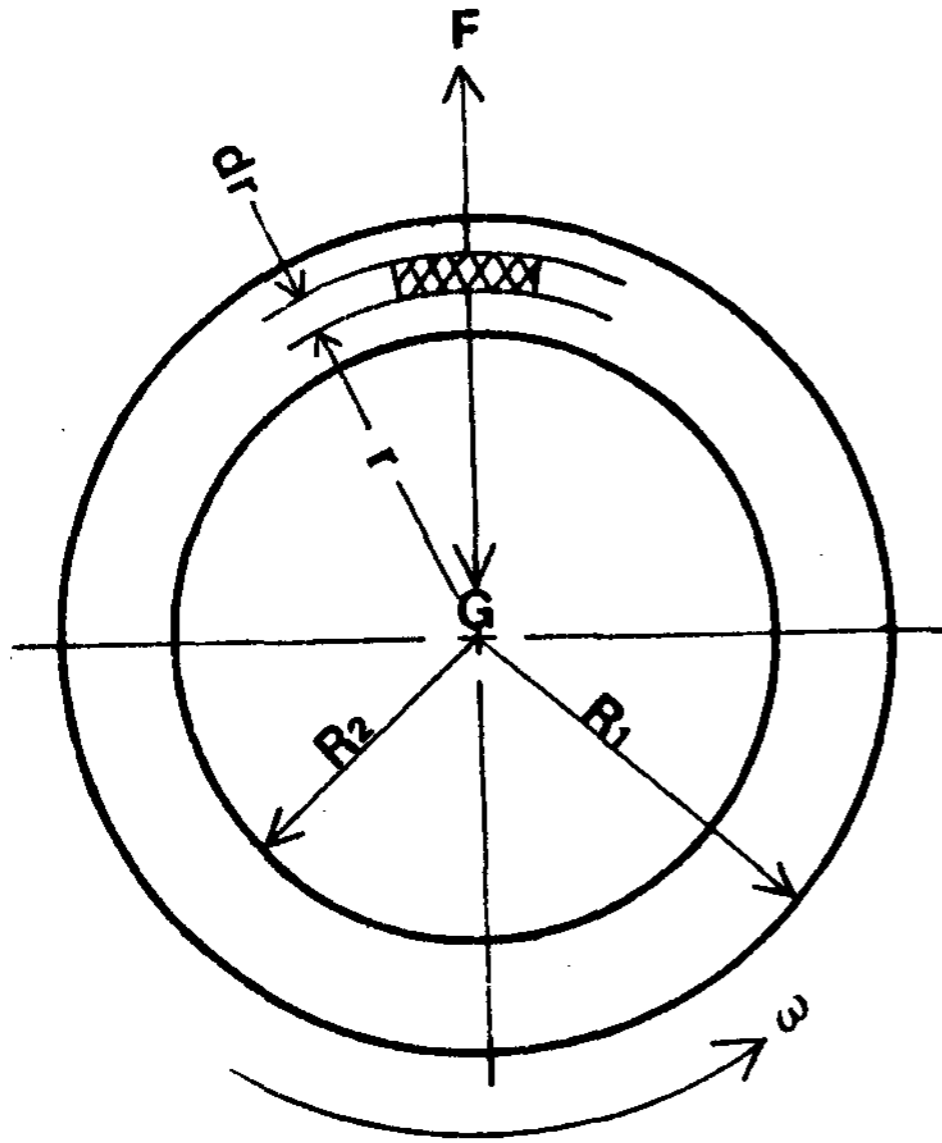


그림 3. 중력과 원심력의 작용

와 같이 된다.

$$mg = mrw^2 \quad (3)$$

$$w^2 = \left(\frac{g}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\therefore N_{min} = \frac{60}{2\pi} \left(\frac{g}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \doteq \frac{423}{\sqrt{D}} \text{ (rpm)} \quad (5)$$

D : 회전직경 (cm)

r : 회전반경 (cm)

2. 2. 실제 주형의 최저회전속도

회전하고 있는 실제 주형에 용탕을 주입하면 먼저 주형면의 마찰력에 의하여 주형표면이 가속되고 용탕의 점성에 따라서 내부쪽으로 향하여 점차로 가속된다고 생각된다. 회전이 전달되는 시작점에서 용탕과 주형이 슬립(slip)에 의하여 실제 회전속도를 완전히 전달받지 못하기 때문에 주형의 최저 회전속도는 (5)식의 N_{min} 보다 충분히 커야 한다. 그렇지 못할 경우 내부용탕의 회전속도가 상당히 늦어지므로 원심력은 중력보다 작아지고 용탕이 주형에서 떨어지는 용락현상이 일어난다.

용락현상을 방지하는 데 필요한 실제 최저회전속도가 (5)식의 N_{min} 보다 크게 되는 이유는 이와 같기 때문에 대개 실험적으로 정하고 있으며 연구자에 따라서 값이 다르게 나타나고 있다.

예를 들면 주철의 제조에서는

$$N_{min} = 850 / \sqrt{r} \quad (6)$$

또한 R. Moldenke, L. Cammen, A. Vāth는 적절한 주물을 제조하는 주형회전속도로써 $N = 1550 / \sqrt{r}$, $N = 1670 / \sqrt{r}$, $N = 1800 \sim 3000 / \sqrt{r}$ 을 각각 주장하였으며 수직형 원심주조에서 E. Lewicki, J. E. Hurst 등은 $N = 30 / \pi (g/r \cdot \tan x)^{\frac{1}{2}}$ 과 $N = 423 \sqrt{L} / (r_2^2 - r_1^2)$ 를 적정 회전속도로 제시하였다.

$$N = C / \sqrt{r} \text{ (단위 : inch)} \quad (7)$$

을 기본식으로 하여 각종 원심주조에서 C의 값을 구하면 표 1과 같다.

표 1의 값은 재질, 주형의 종류, 용탕온도에 따라서 변화하며 그림 4는 재질에 따른 C의 변화를 보여 준다.

한편 Wiesner(1961년)는 실험적으로 실제 최저 회전속도를 결정하고 있다.

$$N_{min} = 2370 / \sqrt{D} \text{ (in)} \text{ (rpm)} \quad (8)$$

또한 A. I. Veynik(1958)는 Reynold's number가 큰 용융금속에서 다음 식을 제시하고 있다.

$$N_{min} = 9.55 \sqrt{\frac{g}{2R^2} \left(7 - \frac{R_2^2}{R_1^2}\right)} \text{ (rpm)} \quad (9)$$

R_1 : 주형중심에서 내층까지의 거리

R_2 : 주형중심에서 외층까지의 거리

2. 3. 적정 주형회전속도

수평형 원심주조에서 용락현상이 일어나지 않는 최저 회전속도는 (5)식 등으로 주어지고 있으나 이들의 주형 회전속도는 슬래그(slag), 비금속 개재물(inclusion) 등을 충분한 속도로 주물 내부 표면에 원심분리시키지 못하기 때문에 건전한 실린더형의 주물을 만들기 위해서는 주형의 회전속도를 충분히 더 높여 주어야 한다. 이 주형의 회전속도를 적정주형회전속도라 한다.

적정 주형의 회전속도(N_{op})를 나타내는 방법은 G_{No} 표시법(원심력을 중력의 배수로 나타내는 방법)과 최저 회전속도에 계수 K를 곱한 값으로 표시하는 두가지 방법이 있으며 거의 실험값으로 주어지고 있다.

Moor는 주철관 제조에서 $G_{No} 100$ 전후가 좋다고 하였으며 Nathan 등은 Cu합금 원심주조일 경우 사형금형에서는 $G_{No} 60 \sim 75$, 금형 또는 흑연 주형에서는 $G_{No} 40 \sim 60$ 을 부여하였다.

그림 5는 G_{No} 의 계산도표이다.

표 1. 각종 재질의 정수 C값

材 質	密度(ρ / cm^3)	方 法	軸의 方向	定 數 C	用 途
鑄 鐵	7.2	De Lavaud	橫	1,800~2,500	鐵管, 링, 실린더 라이너 鐵 管
		Billand	縱	2,470 2,900~3,000	
鑄 鋼	7.85	L. Cammen	橫	2,150	
		L. Cammen	橫	2,730	
黃 銅	8.20	L. Cammen	橫	2,000~2,200 2,670	링
青 銅	8.4	David Brown	縱	約 3,400	
含 鉛 青 銅	8.8		橫	1,900	40~200mm 베어링
	9.5~10.5			1,700~1,900	
화이트메탈	7.3~7.5			1,400~1,800	
Al 合 金	2.65~3.10	L. Cammen		2,600~3,500	
				3,590	

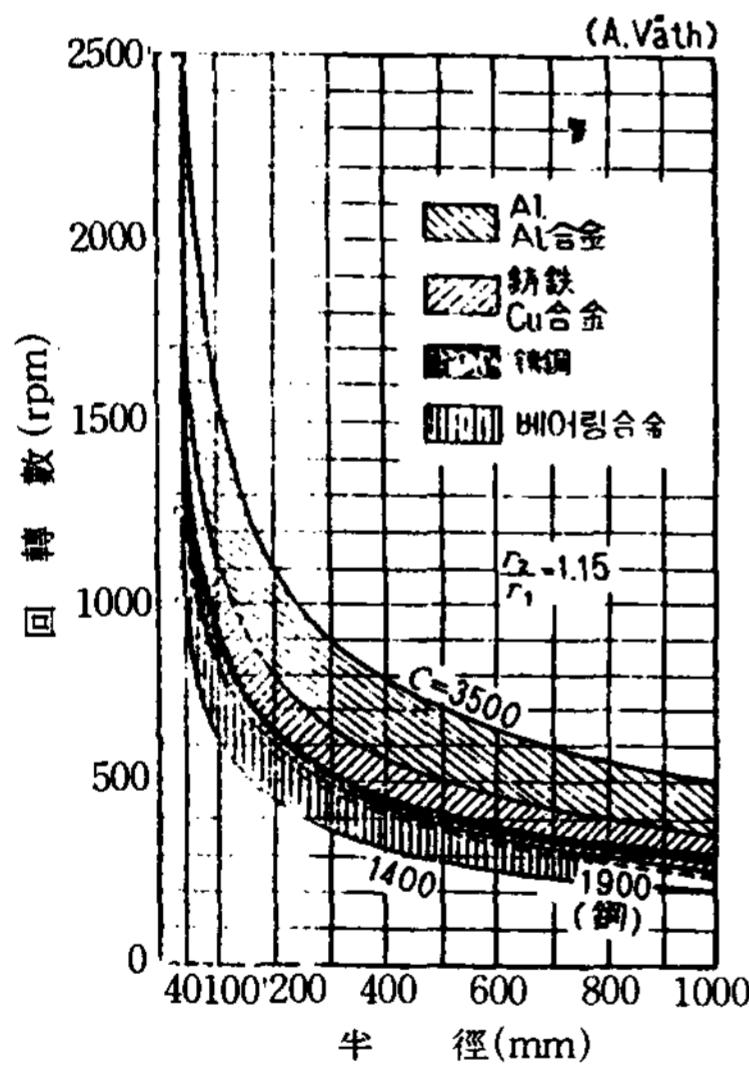


그림 4. 재질에 따른 주형속도

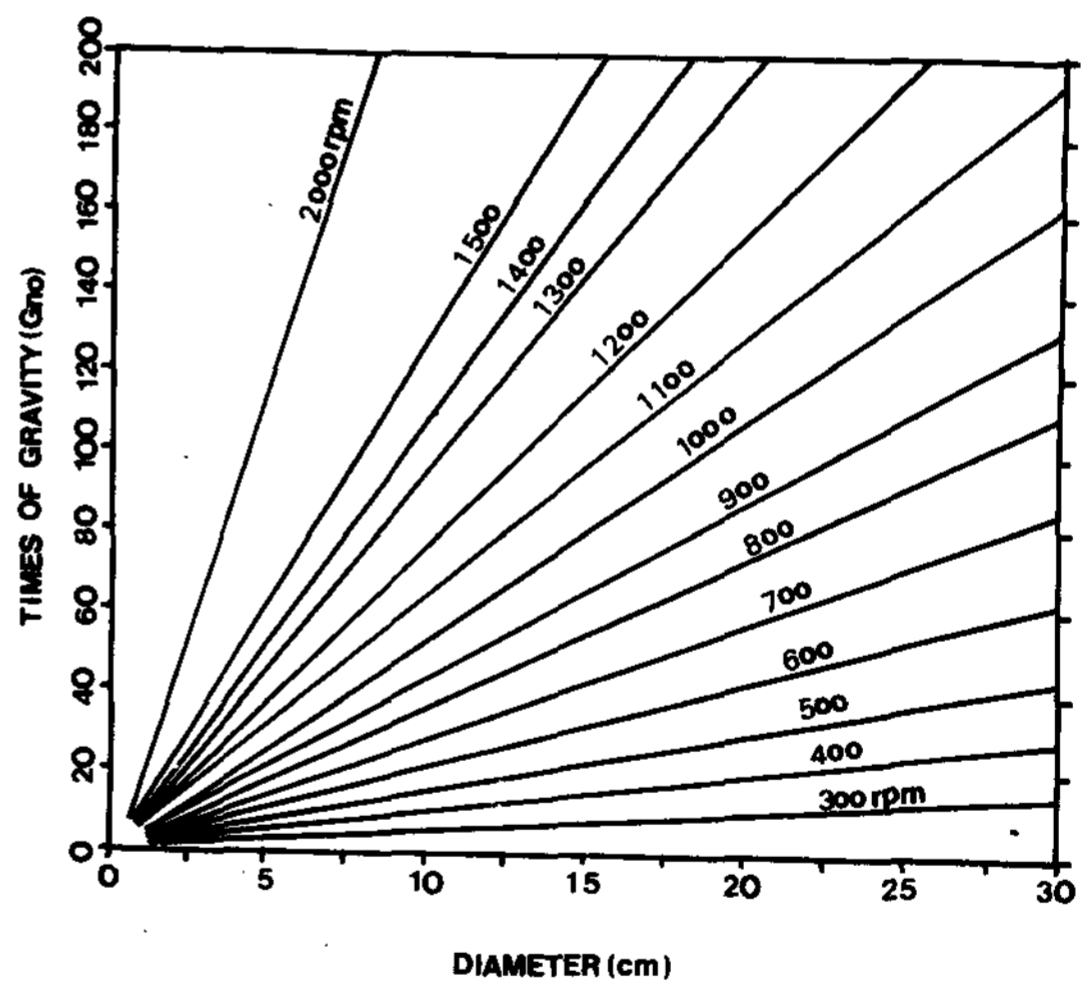


그림 5. Gno의 계산도표

실제 주형의 적정회전수는 재질과 주형, 용탕온도 등에 따라서 다르며 주철제 실린더 라이너는 Gno 110~120의 범위에서 택하는 것이 좋다.

그림 6은 사형 실린더 라이너의 적정 회전속도이며 그림 7은 A. Váth가 발표한 것으로 Al합금의 금형주조시 주형의 적정회전속도이며 표 2는 J. B. Mohler의 베어링합금에 대한 적정 주형속

도이다.

또한 N. N. Rubtsov는 300mm 직경의 주철관에 대하여 Nmin=240rpm을 보고하였으며 적정 주형속도(Nop)는 400rpm 이었다는 것이다. 이 결과를 Nop=KNmin에 대입하면 K값은 1.7이 된다.

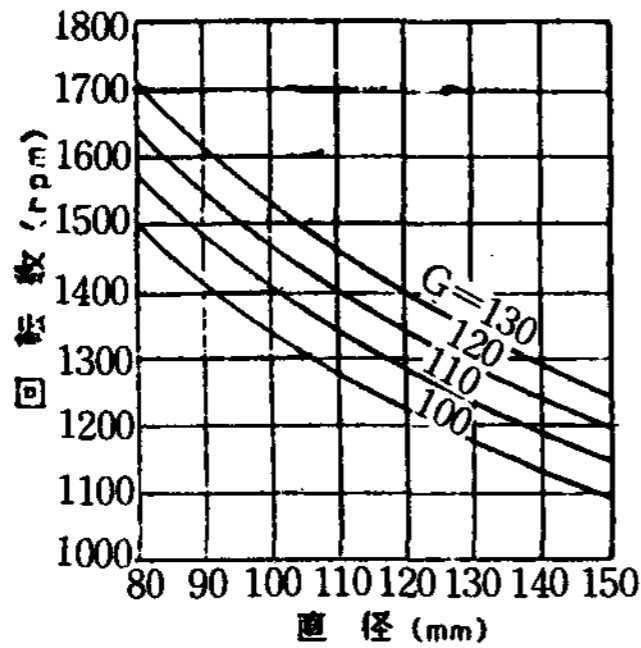


그림 6. 실린더 라이너의 주형 회전속도

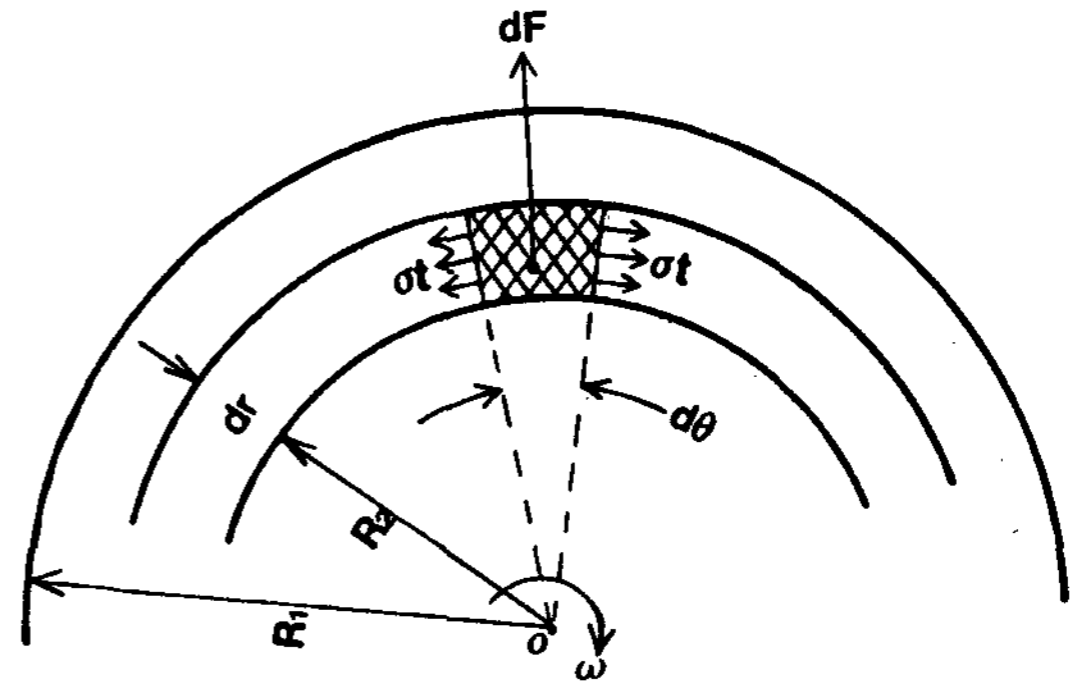


그림 8. 원심력에 의한 응력분포

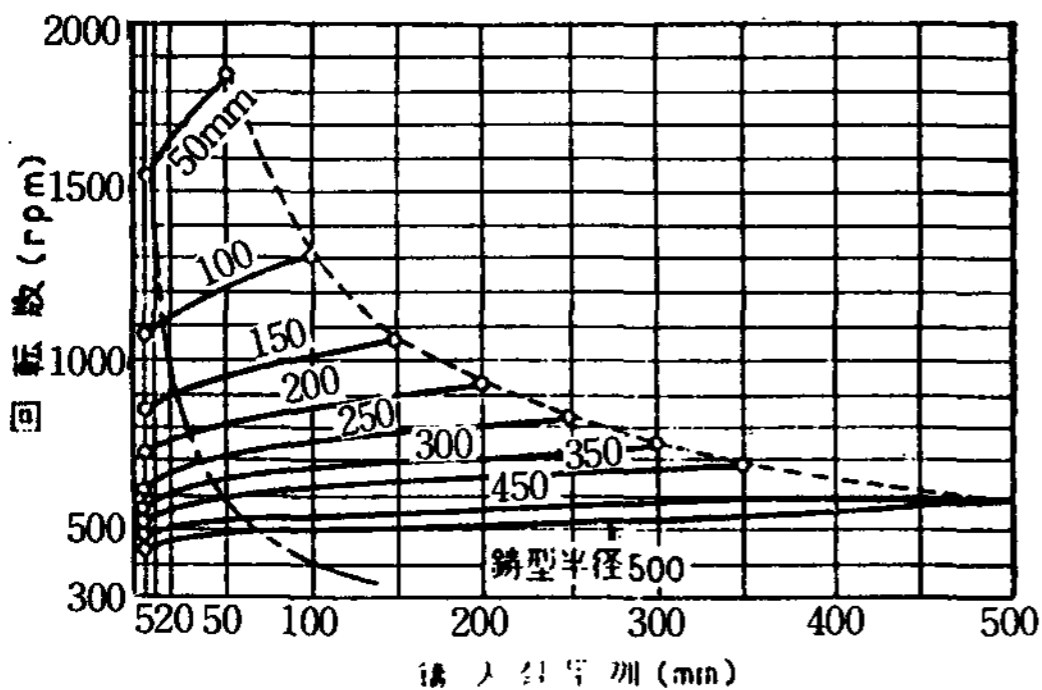


그림 7. Al 합금의 적정 주형속도

표 2. 베어링합금의 적정한 회전속도

내 (in)	徑 (mm)	Cu 합금 (rpm)	바비트 메탈 (rpm)
2	50.8	1,630	990
4	101.6	1,150	700
6	152.4	940	570
8	203.2	810	490
10	254.0	730	440
12	304.8	660	400

2.4 최대 주형회전속도

원심주조에서는 주형의 회전속도가 어느 한계 값을 넘으면 주물에 결함이 나타난다. 즉 응력과 도로 인한 길이 방향의 균열이 그것이다.

따라서 이러한 균열을 일으키는 주형의 회전속도를 최대 주형회전속도(Nmax)라 하며 이 값을 넘지 않도록 하여야 한다.

그림 8의 사선부분 즉 응고층의 강도를 A라 하고 원심력에 의하여 발생하는 응력을 t로 가정할 때 t가 A보다 크면 응고층의 균열이 발생한다. 원심력에 의하여 응고층이 받는 응력 t는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$P = \int_{R_2}^{R_1} \left(\frac{\rho}{g} dr\right) w^2 r = \int_{R_2}^{R_1} \frac{\rho}{g} w^2 r dr = \frac{\rho}{g} w^2 \left(\frac{r^2 - R_2^2}{2}\right) \tag{10}$$

P : 원심력에 의한 압력 (F/cm²)

r : 각 질점의 회전반경 (cm)

R₂ : 용탕내면의 회전반경 (cm)

ρ : 용탕의 밀도 (g/cm³)

따라서 응고층이 받는 압력 Pm은

$$P_m = \frac{\rho}{g} w^2 \frac{(R_1 - R_2)^2}{2} = \frac{\rho}{g} \left(\frac{2\pi N}{60}\right)^2 \frac{(R_1^2 - R_2^2)}{2} \doteq \frac{(R_1^2 - R_2^2) N^2 \rho}{178731} \tag{11}$$

Pm : 응고층이 받는 압력 (F/cm²)

R₁ : 응고층의 외면 반경 (cm)

이때 단위 길이당의 응고층이 받는 인장응력 δt는

$$\delta t = P_m R_1 \doteq \frac{R_1 (R_1^2 - R_2^2) N^2 \rho}{178731} \tag{12}$$

로 된다.

다시 N에 대하여 풀면

$$N = \sqrt{\frac{178731 \delta t}{R^2 (R_1^2 - R_2^2) \rho}} \tag{13}$$

재료의 파괴응력에 도달하는 주형의 회전속도 N을 주형의 허용 최대 회전속도 Nmax로 칭할 때 Nop는 Nmax 보다 작지 않으면 안된다.

$$N_{op} < N_{max} \tag{14}$$

Nmax의 값은 계산으로 구해지나 실제로는 실험에 의하여 구하는 것이 보통이며 이것은 원심주조기의 기타 조건들도 Nmax에 영향을 어느정도 미치기 때문이다.

3. 결 론

지금까지 검토한 주형의 회전속도는 원심주조에서 재질에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문에 적절한 값을 선정하는 것이 중요하다.

주형의 회전속도가 작으면 용락현상이 일어나 든가 또는 비금속 개재물이 원심 분리되지 못하는 결과가 되며 주형의 회전속도가 너무 크면 원심력에 의한 원주방향의 응력이 크게 발생하여 길이 방향의 균열이 발생한다.

이 밖에도 원심주조에서 제품에 영향을 미치는 요소는 주조기의 종류, 주형의 재질, 주형의 예열 온도, 도형재의 종류 및 두께, 진동의 유무, 주형 냉각 방법, 주입위치, 주입속도, 주입온도 등이 있으나 특히 주형의 회전속도를 조절할 수 있는 주조기의 적절한 선택이 중요하다. 또한 원심주조를 이용하여 복합재를 제조하는 경우 주형의 회전속도를 결정함이 제품의 성패를 좌우하므로 이것들에 관한 연구가 더 있어야 할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. T. Watmough and J. T. Berry : Foundry, 89 (1961) 96.
2. 日本鑄物協會 : 鑄物便覽, 大光書林, (1977)
3. Shoroku Takatori, and Tsutomu Toriyama : IMONO, 49 (1977) 659.
4. K. U. Tsvetnenko : Russian Casting Production, (1963) 406.
5. A. I. Veynic : Theory of Special Casting Methods, Mashgiz, (1958) ASME, Trans. 254.
6. Mitsuo Ochiai : IMONO, 35 (1963) 11.
7. Hiromasa Takeuchi : IMONO, 50 (1978) 543.
8. 令木鎮未 : 特殊鑄造法 日刊工業新聞社, (1968) 279.
9. F. Wiesner : Slevarenstiv, 3 (1955) 44.
10. 崔相鎬 : 서울대 박사학위 논문 (1988) 116
11. F. Hartman : Stahl und Eisen, 65 (1945) 29.
12. A. Väh : Der Schleuderguss, 74 (1934) 22.
13. J. B. Mohler : Foundry, 82 (1954) 102.
14. N. N. Rubt Sov : Special Casting Methods, Mashgiz, (1955).
15. G. H. Geiger : Transport Phenomena in Metallurgy, Addison-Wesley Co., (1973) 68.
16. U. Lindborg : Trans. of Metallurgical Society of AIME, 242 (1968) 94.
17. S. H. Cho : et al : A.F.S. Trans. 97 (1989). 971.

年會費 納入案内

當學會 모든 年會費는 당해년도 3月말일까지 納入토록 되어 있습니다. 아직 회비를 납부치 못한 회원은 조속한 시일내에 납부하여 주시고 2년이상 체납회원에게는 학회지 발송이 중단되오니 양지하시기 바랍니다.

正會員入會費 : 5,000 원

正會員年會費 : 12,000 원

準會員入會費 : 3,000 원

準會員年會費 : 8,000 원

團體會員會費

年會費 : 30,000 원 이상

終身會員會費는 150,000 원(10,000×15年分)을 일시불로(3회분할가함) 납부하시면 됩니다.