

<論 文>

액체금속의 응고에서 핵생성에 관한 연구

—Bi 용탕의 핵생성에 미치는 초음파진동의 영향에 대하여—

배 순 훈* · 최 영 돈**

(1977년 7월 30일 접수)

Study on the Nucleation of Liquid Metal in Solidification

Soon hoon Bae, Young Don Choi

Abstract

By applying the ultrasonic wave to the solidifying liquid metal, grain sizes of the ingot are refined and the structures are homogenized. One of the reason is the enhancement of nucleation by ultrasonic vibration. According to the reports on this subject, the nucleating conditions are formed by the increase of melting point which is produced by the high pressure due to cavitation.

In this paper we study whether the cavitations are the origin of the nucleation and analyzed whether the nucleating conditions are formed by the increase of melting point or not and also compared the analytical result with the experiment. We analyzed the pressure change induced by collapsing of cavity and the motion of cavity in oscillating pressure field. And we further analyzed the variation of melting point with pressure change.

기호 설명

C_p : 등압비열 (cal/°C kg)

C_v : 등적비열 (cal/°C kg)

ΔH : 잠열 (cal/kg)

k : 체적압축율

N_v : 단위체적당 평균결정의 수 (#/cm³)

N_s : 단위면적당 평균결정의 수 (#/cm²)

P_a : 대기압 (kg/cm²)

P_g : 기포속의 기체의 압력 (kg/cm²)

P_1 : 기포벽의 액체의 압력 (kg/cm²)

P_0 : 초음파진동의 압력진폭 (kg/cm²)

P_t : Cavitation의 발생압력 (kg/cm²)

P_v : 액체의 증기압 (kg/cm²)

* 정회원 한국과학원

** 한국과학원

本論文에 대한 討論은 1977年 11月 15日까지 本學會 事務室로 送付하여 주십시오.

- P_{∞} : 기포에서 멀리 떨어진 부분의 압력 (kg/cm²)
- R^* : 기포의 critical radius (cm)
- R_0 : 기포의 초기반경 (cm)
- R : 기포의 반경 (cm)
- r : 구형 결정들의 평균반경 (cm)
- \bar{s} : 단면에서 구의 평균 절단 면적 (cm²)
- T : 액체의 온도 (°K)
- T_m : 융점온도 (°K)
- ΔT_m : 초음파에 의한 융점온도의 변화 (°K)
- ΔT_s : isentropic heating (or cooling) tempera-

- ture (°K)
- ΔT_i : irreversible heating (or cooling) tempera-
- ture (°K)
- ΔT_c : 초음파에 의한 supercooling 온도의 변화 (°K)
- U : 기포벽의 반경방향 속도 (cm/sec)
- ΔV : 응고시 체적의 변화 (cm³/cm³)
- W : 초음파의 각 속도 (rad/sec)
- ρ : 액체의 밀도 (kg/cm³)
- σ : 액체의 표면장력 (dyne/cm)

I. 서 론

초음파를 응고하는 액체금속에 가하면 결정이 미세화 하는 현상이 생긴다. 이 결정 미세화의 원인으로 초음파에 의해서 핵생성이 촉진되어 결정이 미세화된다는 이론과 응고한 수지상조직(dendrite)의 가치가 초음파 진동에 의해서 파괴되어 결정이 미세화된다는 이론이 있다. 뒤에서 논할 실험결과에 의하면 낮은강도(low intensity)의 초음파에서는 핵생성 효과만 있고 높은 강도(high intensity)의 초음파에서는 핵생성효과와 수지상조직 파괴효과가 동시에 일어나 결정미세화가 일어나는 것을 발견하였다. 그러나 초음파의 핵생성 촉진효과에 대해서는 그 원인이 잘 알려져 있지않다. 이 논문은 주로 초음파에 의한 핵생성의 원인을 구명하는데 대한 것이다.

초음파가 핵생성을 촉진한다는 것은 적은 supercooling된 어느 온도에서 핵생성이 생기는 것과 핵의 발생수가 많아지는 것을 의미한다. J. J. Frawley¹⁾는 초음파에 의해서 핵생성되는 supercooling 온도가 감소되는 것은 초음파에 의한 cavitation에 의해서 발생한 큰 압력의 shock wave가 발생할 때 Clapeyron equation에 의해서 극부적으로 융점온도가 상승하여 결과적으로 큰 supercooling이 되어 핵생성이 일어난다고 설명했다. 이 관계는 Fig. 1에 잘 나타나 있다. Bruce chalmers²⁾도 역시 cavitation에 의한 융점의 변화가 핵생성의 원인이라고 했다. Bruce chalmers는 Clapeyron equation

$$\frac{dT_m}{dp} = \frac{\Delta V}{\Delta H} T_m \quad (1)$$

에서 ΔV 와 ΔH 를 일정하다고 가정하고 압력의 변화에 따른 융점의 변화를 계산하였다. Jackson and Hunt³⁾도 역시 같은 이론을 제시했는데 그는 융점의 변화 이

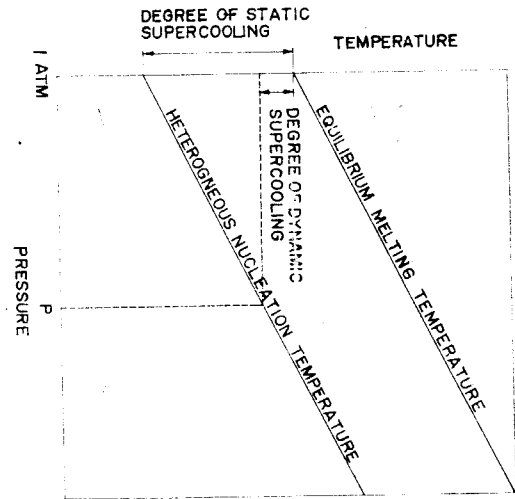


Fig.1 Melting temperature and heterogeneous nucleation temperature vs pressure(schematic)

의 압력의 변화에 따른 액체의 isentropic heating (or cooling)과 irreversible heating (or cooling) 현상을 고려하여 초음파에 의한 supercooling 온도의 변화 ΔT_c 가

$$\Delta T_c = \Delta T_m - \Delta T_s - \Delta T_i \quad (2)$$

여기서 ΔT_m : 융점의 온도변화

ΔT_s : isentropic heating (or cooling) temperature

ΔT_i : irreversible heating (or cooling) temperature

로 표시된다고 했다.

Cavitation에 의한 융점변화가 핵생성의 원리이라는

이론은 초음파에 의한 핵생성 현상을 잘 설명해주나 이론 적으로나 실험적으로 증명되어 있지 않으므로 이에 대한 해석실험을 했다. 먼저 (1)식에서 ΔV 와 ΔH 가 압력에 따라서 변하는 것을 고려하여 핵생성에 필요한 압력을 계산하였고 초음파에 의한 기포 운동을 해석하여 cavitation을 발생시키기 위한 초음파의 threshold pressure를 계산하고 cavity가 붕괴시 발생하는 압력을 계산하여 핵생성조건이 형성되는가를 알아보았다. 액체금속의 응고시 초음파를 가하는 실험을 하여 supercooling 온도와 결정의 크기와 분포를 조사하여 해석한 결과와 비교해 보았다.

II. Cavitation이론

(a) supecooling 온도의 변화

초음파에 의한 cavitation에 의해서 발생하는 압력의 변화 때문에 생기는 응점의 변화는 (1)식을 적분하여 구한다.

$$\Delta T_m = \int \frac{\Delta V}{\Delta H} T_m dp \quad (3)$$

(2)식에서 ΔT_s 와 ΔT_i 는 Jackson and Hunt³⁾와 같이 다음과 식으로 구하였다.

$$\Delta T_s = \frac{T}{C_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \Delta p \quad (4)$$

$$\Delta T_i = \frac{k^2 p^3}{\rho C_p} \quad (5)$$

여기서 $\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$: 체적 열팽창 계수

k : 체적 압축률

실험에 사용한 액체금속인 비스무스(bismuth)는 응고할 때 팽창하는 금속이므로 negative pressure에서 응점이 상승한다. 따라서 (3), (4), (5)식을 각각 negative pressure에서 계산했다. ΔV 와 ΔH 의 압력에 따른 변화에 대한 실험자료는 positive pressure에 대하여는 있으나⁴⁾, negative pressure에 대하여는 없으므로 positive pressure의 값을 extrapolate하여 사용하였다. Fig. 2는 계산 결과를 도시한 것이다. Curve II는 ΔV 와 ΔH 를 일정하다고 가정할 때의 응점의 변화이고 Curve I은 ΔV 와 ΔH 가 압력에 따라 변한다고 가정할 때의 응점의 변화를 나타낸다. Curve III은 ΔT_s 와 ΔT_i 를 고려할 때 supercooling온도의 변화를 나타내고 (ΔT_c)_{he}는 핵생성에 필요한 supercooling온도를 나타낸다. 본 실험결과에 따르면 99.9%의 비스무스의 경우 (ΔT_c)_{he}는 약 48°C~58°C정도이므로 핵이 생성되기

위해서는 ΔT_m 만 고려한다면 -20000~-30000 kg/cm²의 압력이 되어야하고 ΔT_s 와 ΔT_i 를 고려할 경우에는 -6500 kg/cm²이하의 압력이 필요하다. Cavitation이 발생할 때 negative는 pressure positive 다음에 오므로 압력의 상대적 크기에 따라서 ΔT_s 와 ΔT_i 를 고려해야하는지 여부가 결정된다.

(b) Critical radius와 cavitation threshold pressure.

Cavity가 붕괴시 발생하는 압력의 변화를 계산하면 ΔT_m 을 계산할 수 있다. Cavitation이 발생하는 것은 액체금속속에 용해되지 않는 기포가 있어서 주위의 압력이 강하여 어느값이하로 되면 급속히 팽창했다가 주위의 압력이 높아지면 붕괴하기 때문으로 알려져있다. 일정한 압력에서 기포의 반경이 어느값이하이면 안정하고 그 이상이면 불안정한 기포의 반경을 critical radius라고 한다.

기포주위의 액체의 압력이 최소일 때 기포의 반경이 critical radius 이상이면 cavitation이 발생한다는 것이 Blake's cavitation threshold theory⁵⁾로 cavitation threshold pressure P_t 는 (6)식으로 표시된다.

$$P_t = P_a - P_s + \frac{4}{3} \frac{\sigma}{\sqrt{3} R_0} \left(1 + (P_a - P_s) \frac{R_0}{2\sigma} \right)^{-1/2} \quad (6)$$

비스무스와 물에 대하여 R_0 의 변화에 대한 P_t 를 계산하여 도시하면 Fig. 3와 같다. 기포의 반경이 적어질수록 cavitation이 발생하는 압력은 상승하게 되는 것을

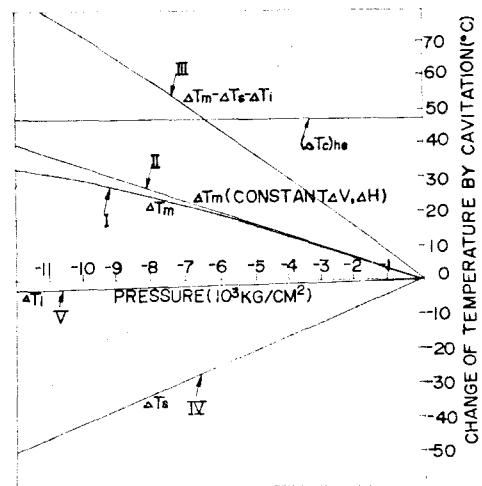


Fig. 2 Change of melting temperature and isentropic cooling and irreversible cooling vs pressure

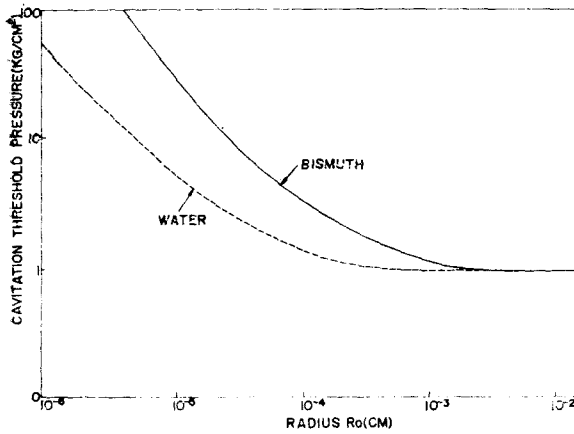


Fig.3 Cavitation threshold pressure vs gas bubble radius for water and bismuth

알 수 있다.

(c) 기포의 운동 해석

초음파에 의해서 액체의 압력이 $P_0 \sin \omega t$ 로 변할 때 기포의 운동방정식은 (7)식으로 표시된다⁵⁾.

$$\frac{dU}{dt} + \frac{3}{2R} U^2 = \frac{1}{\rho R} \left(P_v - P_a + P_0 \sin \omega t - \frac{2\sigma}{R} + (P_a - P_v + \frac{2\sigma}{R_0}) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \right) \quad (7)$$

이식은 기포속의 기체가 등은 팽창과 수축한다는 가정 하에 얻어진 식이다. 초음파의 주파수가 낮을 때에는 기포속의 기체는 등은 팽창과 수축에 가깝다고 알려져 있다⁵⁾. Cavitation이 발생할 때 최대압력과 최소 압력은 기포의 벽면에서 발생하므로⁶⁾, (7)식을 해석하면 최대압력과 최소압력을 구할 수 있다. 이식은 computer simulation method (MIMIC)로 풀었다. 재료는 비스무스에 20KHz의 초음파를 가하는 경우에 대하여 풀었다. Fig.4는 MIMIC 으로 풀은 시간에 따른 기포 반경의 변화를 나타내고 Fig.5는 기포벽의 압력을 나타낸다. 이 두 Fig.를 비교하여 보면 기포의 반경이 최소일때 최대압력이 걸리고 최대 반경에서 최소압력이 걸린다. 기포의 반경과 초음파 압력의 진폭 P_0 를 변화시키며 최대압력과 최소압력을 계산하여 도시한 것이 Fig.6과 Fig.7이다. Computer계산결과에 의하면 기포의 반경이 0.0004cm 이상과 0.00001cm 이하에서는 cavitation이 발생하지 않고 그 사이 반경에서만 발생하였다. 각각의 기포의 반경에 대하여 cavitation이 최대로 일어나는 초음파의 압력이 있고 이 압력은 기포반경이 적어질수록 커진다. 이 값은 앞에서 구한 Blake's

threshold pressure보다 약간 큰 값이다. 기포의 반경이 0.0001cm 이고 초음파 압력이 5kg/cm²이면 cavitation에 의한 압력이 최대로 되고 240,000 kg/cm²에 달한다. 그러나 Fig.7에서와 같이 최소압력은 -5kg/cm² 이하로 강하하지 않는다. 이와같이 negative로 큰 압력이 걸리지 않는 것은 negative로 압력이 걸리면 기포가 팽창하여 압력이 어느 이하로 내려가지 않기 때문이다.

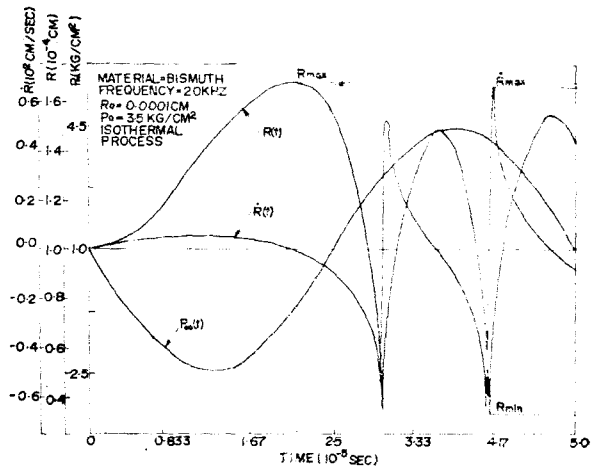


Fig.4 Change of radius of gas bubble in liquid bismuth as a function of time with 20 KHz ultrasonic vibration

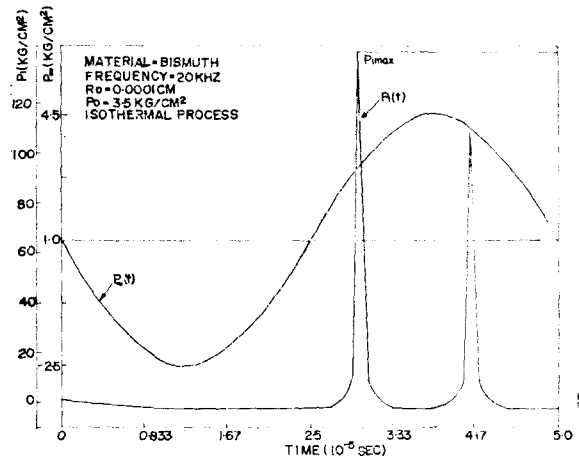


Fig.5 Change of bubble wall pressure as a function of time with 20 KHz ultrasonic vibration

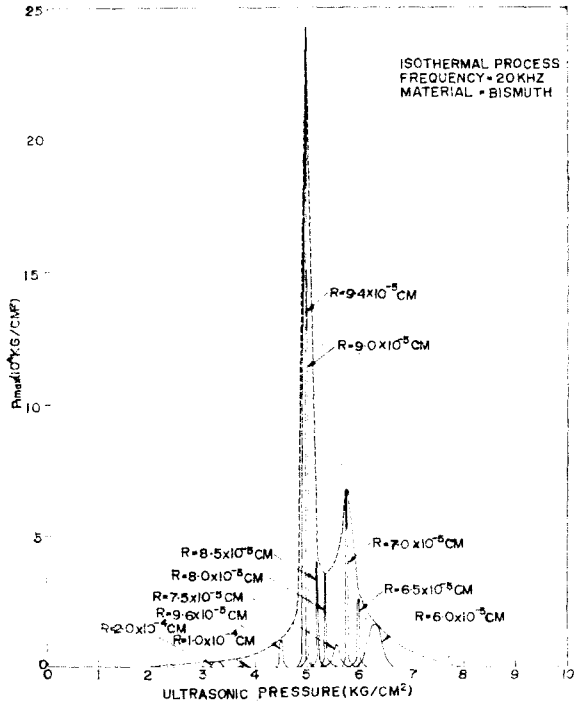


Fig. 6 Maximum bubble wall pressure of various radius vs ultrasonic pressure for bismuth with 20KHz vibration. Gas within bubble expands and contracts isothermally

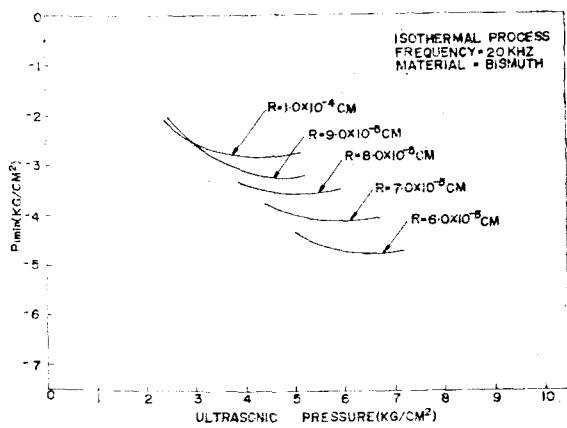


Fig. 7 Minimum bubble wall pressure of various radius vs ultrasonic pressure for bismuth with 20 KHz vibration. Gas within bubble expands and contracts isothermally.

앞에서 논란과 같이 cavitation에 의한 고압에 의하여 용점온도가 상승하여 핵생성 조건에 갖추어지기 위해서는 ΔT_m 만 고려하는 경우 $-20000 - -30000 \text{ kg/cm}^2$ 의 압력이 필요하고 ΔT_s 와 ΔT_c 를 고려하는 경우를 -6500 kg/cm^2 의 압력이 필요한데 계산한 결과에 의하면 -5 kg/cm^2 이하로는 내려가지 않으므로 이 이론은 응고시에 팽창하는 물질에 대해서는 정당치 않음을 알았다.

III. 응고 실험

(a) 실험의 개요

초음파를 응고하는 액체금속에 가하여 결정미세화의 원인과 핵생성의 원인을 구명하는 실험을 했다. Fig. 8은 비스무스의 냉각곡선인데 초음파를 A점에서 C점까지 가하고 시편을 응고시키면 이때 생긴 결정들은 핵생성 효과에 의해서 생긴 것이다. 그러나 B점까지 초음파를 가하면 수지상조직 파괴효과가 포함될 것이다. 따라서 각각의 경우 초음파 강도를 변화시키고 응고 실험을 했다.

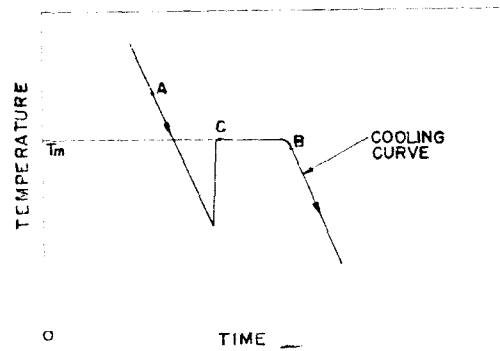


Fig. 8 Cooling curve of liquid bismuth

(b) 실험 장치

실험에서 사용된 초음파는 콜피츠(Colpitts) 발진하여 트랜지스터 증폭기로 증폭하여 사용하였다. 실험에 사용한 초음파의 주파수는 19.3 KHz 로 앞의 계산에 사용한 20 KHz 보다 약간 작은 값이나 원하는 해석 결과와 비교하는 데는 영향을 주지 않는다. Fig. 9는 초음파 진동장치이다. Ferrite 진동자를 듀랄루민으로 제작한 step-horn에 접착시켜서 초음파 진동을 증폭시켜서

horn을 통해서 시험관으로 전달시켰다. Fig. 10은 액체 비스무스를 담은 시험관으로 horn의 상단부의 홈에 넣고 실험한다. 시험관과 horn의 사이에는 용점이 95°C인 Bi-Sn-Pb fusible alloy를 넣고 시험관을 위에서 3.5kg으로 가압하여 초음파를 전달시켰다. 비스무스의 양은 초음파의 반마디가 되어 공진되도록 하고 약 3g의 SnCl₂를 넣어서 비스무스가 용해시 산화가 없도록 하였다. 비스무스는 상단면과 하단면에서 최대진동을 하게 된다. 비스무스의 용해는 Fig. 11에 있는 바와 같은 Pyrex glass tube로 제작한 로에서 용해했다.

(c) 실험 방법

실험에 사용할 비스무스는 품계 빨아서 SnCl₂와 고르게 섞어서 시험관에 넣어 4회용해와 응고를 반복하며 불순물을 제거한 후 실험에 사용하였다. 이와같이 처리한 비스무스 142g과 SnCl₂ 3g을 시험관에 넣고 400°C로 가열한후 약 25°C/min의 일정한 속도로 냉각시키며

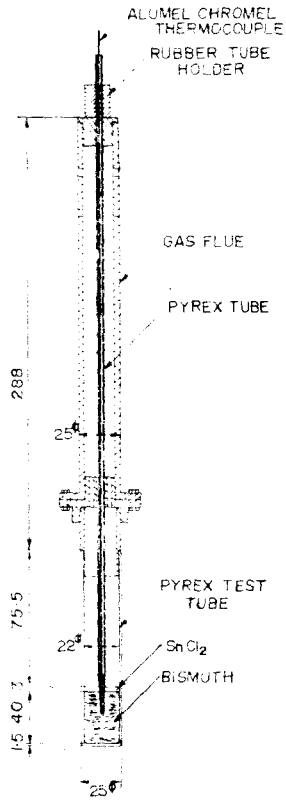


Fig. 9 19.3KHz ultrasonic resonator and acoustic amplifier.

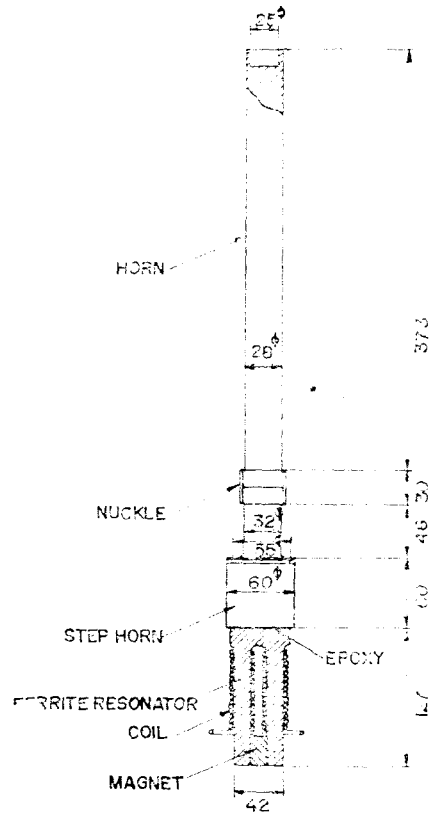


Fig. 10 Solidification test tube and gas flue.

일정한양의 초음파를 가하는 응고 실험을 하였다. 공급되는 초음파 진동의 강도는 진동자 coil에 공급되는 전력에 horn의 전달효율을 곱하여 산출했다. horn의 전달효율은 horn의 상부를 물속에 넣고 물의 온도의 상승하는 것을 측정하여 계산했는데 약 65%이었다. 응고한 시편은 절단하여 sand paper와 Alumina powder로 연마하고 Ferric chloride 용액으로 etching하고 확대 촬영하여 관찰하였다.

(d) 실험결과 분석

초음파의 강도를 변화시키며 핵이 생성되는 supercooling 온도의 변화를 측정하여 도기한 것이 Fig. 12이다. 초음파를 가하지 않을 경우 supercooling 온도는 64°C인데 약한초음파를 가하면 강하하여 초음파의 압력 진폭이 3kg/cm²이 되면 supercooling 온도가 6°C 정도에서 핵이 생성되고 이 이상 초음파 강도를 증가시켜도 supercooling 온도는 강하하지 않고 거의 일정하다. 기포의 운동해석에 의하면 cavitation이 발생시 압

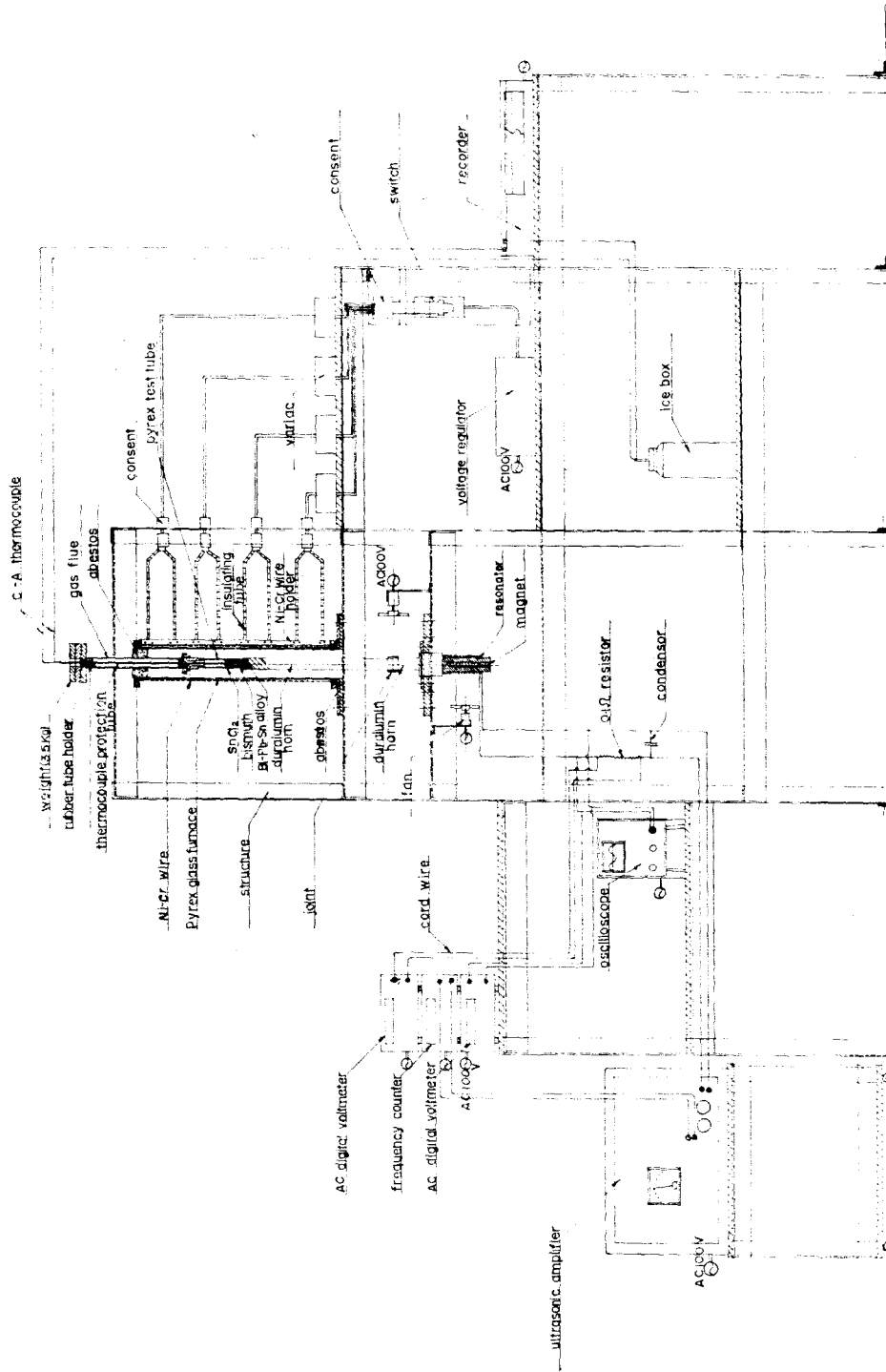


Fig. 11. Experimental set-up

력이 급상승하는 것은 초음파의 압력진폭이 약 5kg/cm^2 에서 일어나는데 이것은 supercooling 온도가 최하로 내려가는 점과 일치하지 않아 cavitation에 의한 용접변화가 핵생성을 유발한다는 이론이 맞지 않음을 보여 준다. 뿐만 아니라 기포의 운동해석에 의하면 cavitation은 초음파의 압력진폭이 2kg/cm^2 에서 시작되는데 Fig. 12에는 2kg/cm^2 이하의 초음파 압력 진폭에서 이미 supercooling 온도가 강하하는 것을 보여주므로 초음파 진동에 의한 핵생성이 되는 supercooling 온도의 강하는 cavitation에 의한 것이 아니고 미세한 초음파 진동이나 기포의 운동에 의한 액체의 운동이 그 원인으로 생각된다.

그러나 cavitation에 의한 액체의 운동은 초음파진동에 의한 액체의 운동보다 그 크기의 치수가 높으므로 cavitation이 발생하는 이상의 초음파 압력진폭이상에서의 핵생성은 cavitation에 의해서 일어날 것이다. Fig. 13은 Fig. 8에서 B점까지 초음파를 가한 실험의 응고 시편이고 Fig. 14는 C점까지 초음파를 가한 실험의 응고시편이다. Fig. 15는 단위체적당 평균 결정의 수 (N_v)를 나타낸다. 확대촬영한 사진으로부터 단위면적당 평균 결정의 수 (N_s)를 측정할 후 결정의 형태를 구형이라고 가정하고 R. L. Fullman²⁾의 논문의 (2)식

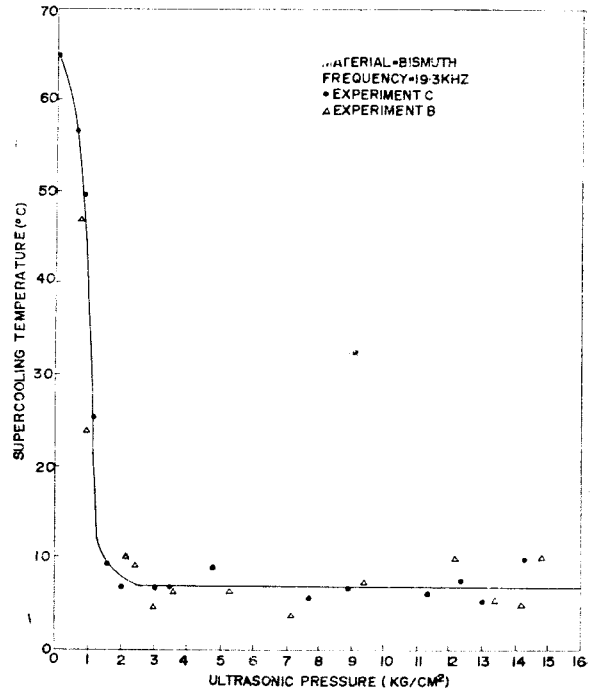


Fig. 12 Dynamic supercooling with 19.3KHz vibration vs ultrasonic pressure for bismuth.



(a)

(b)

(c)

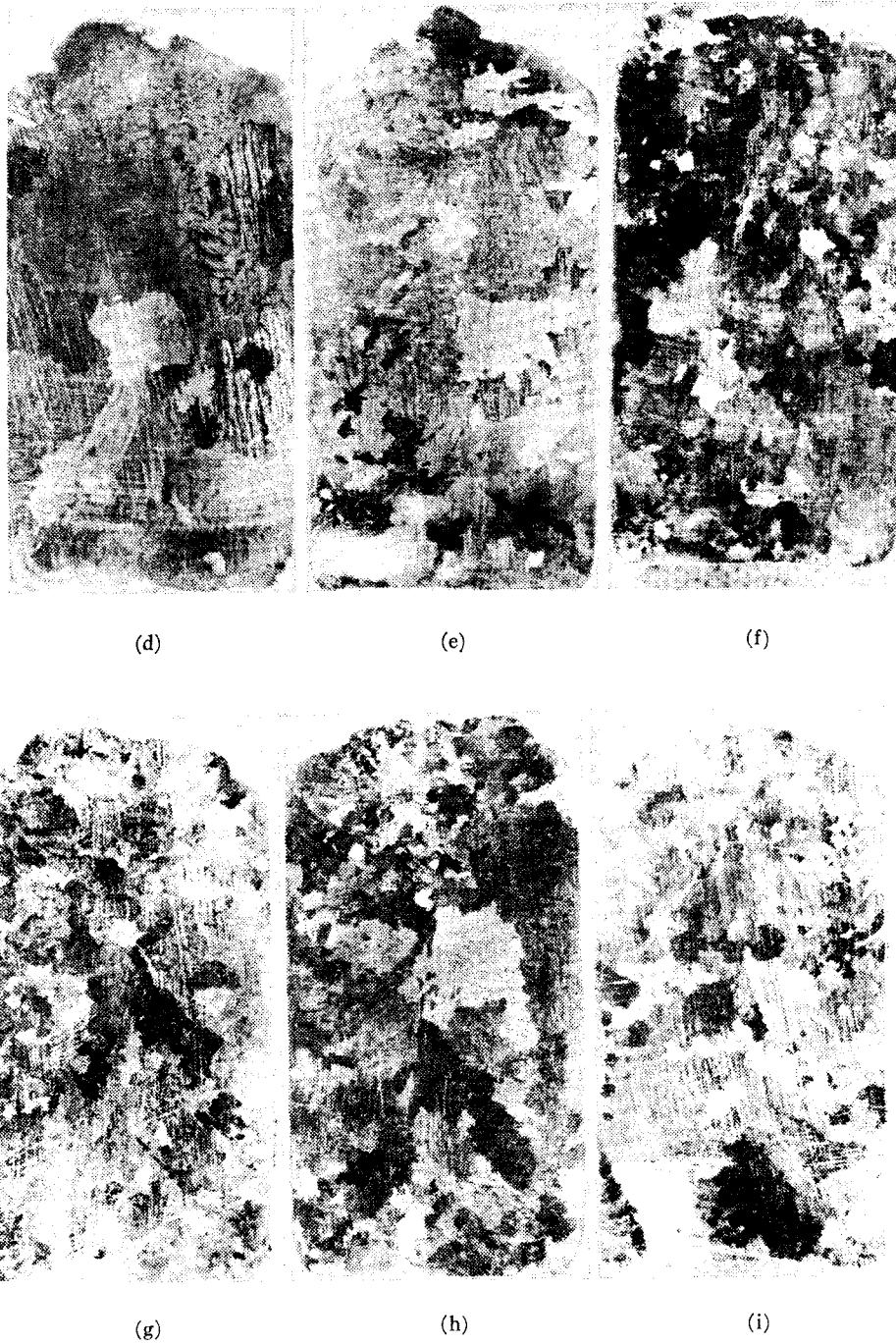


Fig. 13 Photographs of section of solidified ingot of experiment B
 (a) $P_0=0$ kg/cm² (b) $P_0=0.489$ kg/cm² (c) $P_0=1.017$ kg/cm²
 (d) $P_0=2.01$ kg/cm² (e) $P_0=3.42$ kg/cm² (f) $P_0=8.82$ kg/cm²
 (g) $P_0=11.38$ kg/cm² (h) $P_0=12.36$ kg/cm² (i) $P_0=14.27$ kg/cm²



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g) (h) (i)
Fig. 14 Photographs of section solidified ingot of experiment C
 (a) $P_0=0$ kg/cm² (b) $P_0=0.613$ kg/cm² (c) $P_0=0.942$ kg/cm²
 (d) $P_0=2.07$ kg/cm² (e) $P_0=3.52$ kg/cm² (f) $P_0=9.41$ kg/cm²
 (g) $P_0=12.1$ kg/cm² (h) $P_0=13.4$ kg/cm² (i) $P_0=14.75$ kg/cm²

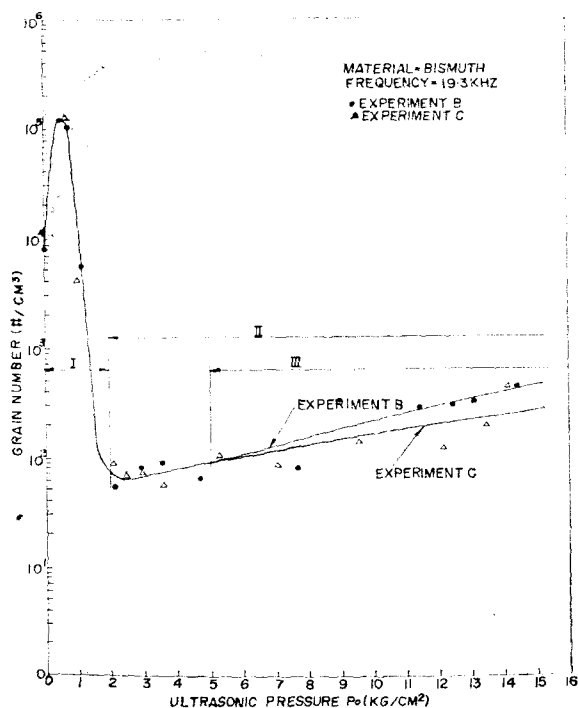


Fig. 15 Number of grains per volume vs ultrasonic pressure with 19.3KHz vibration for bismuth.

$$N_v \cdot 2r = N_s \quad (8)$$

$$\bar{s} = \frac{2}{3} \pi r^2 \quad (9)$$

으로부터 단위체적당 평균결정의 수(N_v)를 환산했는데 \bar{s} 의 값은 시편단면에서 평균결정의 면적과 같다고 계산했다. 결정의 모양을 구라고 가정 한 것과 \bar{s} 값에 대한 가정은 정확한 가정이 아니나 이 논문에서 요구하는 것은 상대적 결정은 수를 비교하는 것이므로 근사식을 사용하였다.

응고실험장치외로나 시험관은 Pyrex glass tube로 제작하였기 때문에 핵이 생성되고 결정이 자라나는 모양을 관찰할 수 있었다. 초음파 강도가 커지면 서서히 자라나는 수지상조직의 가지가 부서지는 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 실험 B의 시편에서 초음파 강도가 클 때 응고시편의 상부와 하부에는 작은 결정이 분포되어 있고 중간부에는 큰 결정이 분포되어 있는 것은 초음파 진동에 의한 액체의 운동이 큰 부분에서 수지상 조직의 파괴가 일어나기 때문이다.

실험 C의 경우에 초음파 강도가 크고 핵생성하는 과냉온도가 적은 시편인 Fig. 14-(f), (g), (h), (i)의 경우 columnar형의 결정을 많이 볼 수 있는데 실험 B의 경우는 columnar형은 드물고 equiaxed형이 많다. 이것은 초음파에 의한 수지상조직 파괴효과라고 생각된다.

실험 C의 경우 Fig 14-(f), (g), (h), (i),의 경우 상부와 하부에 적은 결정이 분포되어 있는 것은 cavitation이 많이 발생하는 위치와 일치한다. 따라서 Fig. 15에서 II구역은 cavitation이 핵생성을 촉진하는 구역이라 하겠고 III구역은 수지상조직 파괴효과가 복합된 곳이라 하겠고 I구역은 초음파의 단순진동이 핵생성을 촉진하는 구역이라 하겠다. 그러나 초음파의 단순진동이나 cavitation이 어떻게 핵생성에 영향을 주는가에 대해서는 미정이다.

초음파를 액체금속에 가하는 경우 핵생성은 homogeneous nucleation이 아니고 impurity에서의 heterogeneous nucleation 일 것이다. 따라서 초음파가 핵생성을 촉진한다는 것은 초음파가 impurity의 핵생성에 영향을 주는 것과 관련이 있다. I구역에서는 초음파의 단순진동이 II구역에서는 cavitation이 이 역할을 한다고 할 수 있다. 따라서 연구의 관점을 impurity가 초음파에 의해서 받은 영향에 두면 이 문제를 해결하는 새로운 방향이 될 것이다. 동일한 impurity의 함량에서 초음파의 강도를 크게 하는 것과 초음파를 가하지 않고 impurity의 함량을 변화시키는 것이 상호 관련성이 있는가 하는 것과 impurity의 양과 종류에 따라서 초음파의 핵생성에 미치는 영향이 어떻게 달라지는가 하는 문제에 대한 연구는 앞으로 행할 예정이다.

IV. 결 론

초음파에 의한 결정 미세화의 원인과 핵생성의 원인을 구명하기 위한 해석과 실험을 한 결과 다음과 같은 몇가지점이 판명되었다.

1. 기포의 운동을 해석해본 결과 cavitation에 의한 높은 압력에 의해서 액체의 작용점이 변화하여 핵이 생성된다는 이론이 정당치 않음을 발견했다. 따라서 핵생성은 초음파진동이나 cavitation에 의한 액체의 운동효과에 의한 것으로 생각된다.

2. 비스무스에 대하여 초음파를 응고시키는 실험을 해본 결과 초음파의 압력진폭이 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상에서는 ca-

vation에 의해서 핵생성이 촉진이 일어나고 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상에서는 수지상조직파괴효과가 있다. 그러나 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하에서는 초음파에 의한 액체의 단순운동이 핵생성을 촉진시킨 것으로 생각되는데 cavitation의 경우나 초음파의 단순진동의 경우 모두 impurity의 핵생성능률을 촉진시켜서 된것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 1976년 8월 1일—1977년 7월 31일까지 산학협동재단 수탁연구로 수행된 것이다. 본 연구를 하는데 초음파 증폭기의 제작과 실험에 수고한 김관진씨와 임종학군과 연구를 도와준 분들께 사의를 표한다.

References

1. J. J. Frawley and W. J. Childs: Dynamic Nucleation of Supercooled Metals, Trans. Met. Soc. AIME, 1968, Vol. 242, p. 256
2. Bruce Chalmers: Dynamic Nucleation, Liquids, Elsevier Publishing Co., Thomas J. Hughel Edited, 1965, p. 308
3. J. D. Hunt and K. A. Jackson: Nucleation of Solid in an Undercooled Liquid by Cavitation, J. Appl. Phys., 1965, Vol. 39, No. 1, p. 254
4. Bridgeman: Change of Phase under Pressure, Phys. Rev., N.S., 1914, Vol. 3, p. 152
5. H. G. Flynn: Physics of Acoustic Cavitation in Liquids, Physical Acoustics, 1964, Vol. 1, Part B, p. 98
6. R. Hickling and M. S. Plesset: Collapse and Rebound of a Spherical Bubble in Water, The Physics of Fluids, 1963, Vol. 7, No. 1, p. 7
7. R. L. Fullman: Measurement of Particle Sizes in Opaque Bodies, Journal of Metals, March 1953, p. 447