

論 文

분사주조공정에 의하여 제조된 Al-Pb
과편정합금의 조직특성

배 차 헌, 정 해 용, 박 홍 일*, 김 창 업**이 성 렬***

Microstructural Characteristics of Al-Pb Hyper-Monotectic Alloys
Produced by Spray Cast Deposition Process

Cha-Hurn Bae, Hae-Young Jeong, Heung-Il Park*,
Chang-Up Kim** Sung-Ryeol Lee***

Abstract

In Al-Pb monotectic alloys Pb particles are difficult to uniformly distribute over the Al matrix because of the gravity segregation of pb element. Therefore the effects of centrifugally spray casting process on microstructures and distributions of Pb particle were investigated.

As the preform thickened the size of Pb particle became larger, the amount of porosity became lower and microstructures showed the change from spray-deposition microstructures in the lower part of the preform to spray-casting microstructures in the upper part of it. The size of Pb particles, amount of porosity and splat layer boundaries in hot forged preform showed still less than of as-deposited preform

1. 서 론

금속계 베어링에 있어 Al계 베어링 재료 중에는 Al-Sn계 합금이 현재 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 Al-Sn계 베어링은 구동장치의 오일 윤활 상태에서 윤활류와의 친화성이 떨어지고 또한 가격이 고가인 단점이 있다. 이에 비하여 Pb는 Sn보다 가격이 저렴하고 친유성과 내소착성이 우수하기 때문에 Al중에 Pb를 이용한 Al-Pb계 베어링 재료가 성능적인 면에서나 경제적인 면에서 개발이 기대되고 있다.

편정계 합금은 응고조건^{1~10)}을 변화시켜 주름으로서 제2상의 크기와 분포양상을 조절할 수 있으며, 제2상의 입자자체는 강도나 탄성율이 크지 않기 때문에 축수재료의 기능을 충분히 발휘할 수 있다. 그러나 Al-Pb 편정계합금에서 Al기지중에 제2상인 Pb가 거의 고용되지 않고¹¹⁾, 특히 비중차이에 의한 중력편석이 크기 때문에 Al-Pb 편정계 합금이 축수재료로 사용되기 위해서는 Pb의 중력편석을 억제하고 Pb를 Al기지 전면에 균일하게 분산시킬 필요가 있다. 이러한 Pb의 중력편석을 억제하고 Pb를 균일하게 분산시키기 위한

부산공업대학 재료공학과 (Dept. of Materials Eng., Pusan National Univ. of Technology)

*부산공업대학 생산가공공학과(Dept of Production & Joining Eng.)

**창원기능대학 금속과(Changwon Industrial Masters' College)

***한국해양대학 해양재료공학과(Dept. of Ocean Materials Eng., Korea Maritime Univ.)

방법으로 합금원소의 첨가¹²⁾, 분말소결법¹³⁾, 미소중력하에서의 응고¹⁴⁾ 및 급속응고법¹⁵⁾ 등에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 Al-Pb 과편정 합금에서 중력편석의 주원인이 되는 두 액상 분리와 L₂액상이 성장할 수 있는 시간적 여유를 주지 않기 위하여 원심분사주조법을 이용하였으며, Al기지 중에 Pb가 균일하게 분포한 Al-Pb합금 소재를 제조하고자 하였다. 따라서 원심분사주조법에 의한 성형체의 제조시 제조조건에 따른 적층현상을 규명하고, 축수합금의 축수성능을 지배하는 Pb의 형상, 크기, 분포 및 기계적 특성을 조사, 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 원심분사주조장치

본 실험에 사용한 원심분사주조 장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 분사실, 턴디쉬(tundish), 분사원반(atomizing disc), 수냉기판 및 합금용해를 위한 별도의 고주파 유도로(3kHz, 50kw)로 구성되어 있다.

합금을 용해하기 위한 유도용해로용 도가니는 마그네시아 도가니를 사용하였고, 턴디쉬는 흑연 도가니를 사용하였다. 이때 턴디쉬 바닥중앙에 설치된 노즐의 직경은 3mm 이었다. 그리고 직경이 100mm인 분사원반은 표면을 알루미늄으로 피복하였고, 분사원반의 중심으로부터 수냉기판까지의 거리는 200mm로 하였다.

2.2 시편제작

공업용 Al(99.5%)과 시약용 Pb(99.9%)를 이

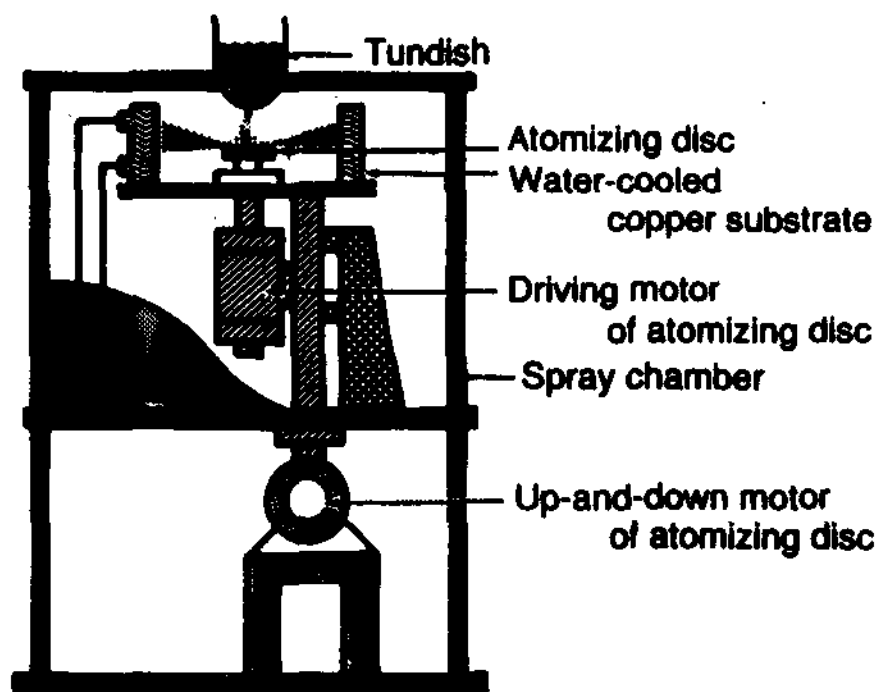


Fig.1. Schematic illustration of centrifugal spray cast apparatus.

Table 1. Conditions of centrifugal spray casting process.

Dia. of atomizing disc	100 mmΦ
Rotating speed of atomizing disc	2700 rpm
Dia. of Cu substrate	400 mm
Dia. of nozzle orifice	3 mmΦ
Atomosphere	Argon Gas
Up-down range of atomizing disc	0~50 mm
Up-down speed of atomizing disc	1m/min 20 times/min

용하여 Al-5w/o Pb 및 Al-10w/o Pb 합금을 용해하고, 이 합금을 원심분사하여 원형상의 적층성형체를 제조하였다. 이때 분사온도는 편정합금계 특유의 두 액상 분리온도보다 약 100℃ 높은 온도로 유지하였고, 용탕의 분사는 용탕 자체의 자중에 의하여 2700rpm으로 회전하고 있는 분사원반의 중심에 자유낙하시켜 분사하였으며, 분사실내의 분위기 및 압력은 약 0.2atm의 Ar가스 분위기를 유지시켰다(Table.1 참조). 이같은 원심분사주조 조건에 의하여 제작된 적층성형체는 직경 400mm, 폭 50mm이며 두께가 약 30mm 이었다(Photo.1 참조).

2.3 조직관찰

원심분사주조에 의하여 성형된 적층성형체(preform)의 두께 방향을 따라 시편을 채취한 후 전해연마 및 에칭하여 광학 및 전자현미경을 이용하여 조직관찰을 하였다. 이때 Pb입자 크기, 형상 및 분포 그리고 기공의 크기 및 분포는 선분석법¹⁶⁾으로 정량화하였다.

2.4 기계적 성질 시험

경도시험은 미소경도계를 이용하여 25g의 하중하에서 15초간 유지하여 경도값을 측정하였으며, 분사주조된 상태의 성형체와 열간단조된 성형체를 연마하여 표면 거칠기를 약 0.15μm로 하여 마모시험을 하였다. 상대재는 800℃에서 용체화 처리한 S45C(H_RB 90)를 연마하여 표면 거칠기, R_{max}=5.6μm로 하여 사용하였다. 이때 하중은

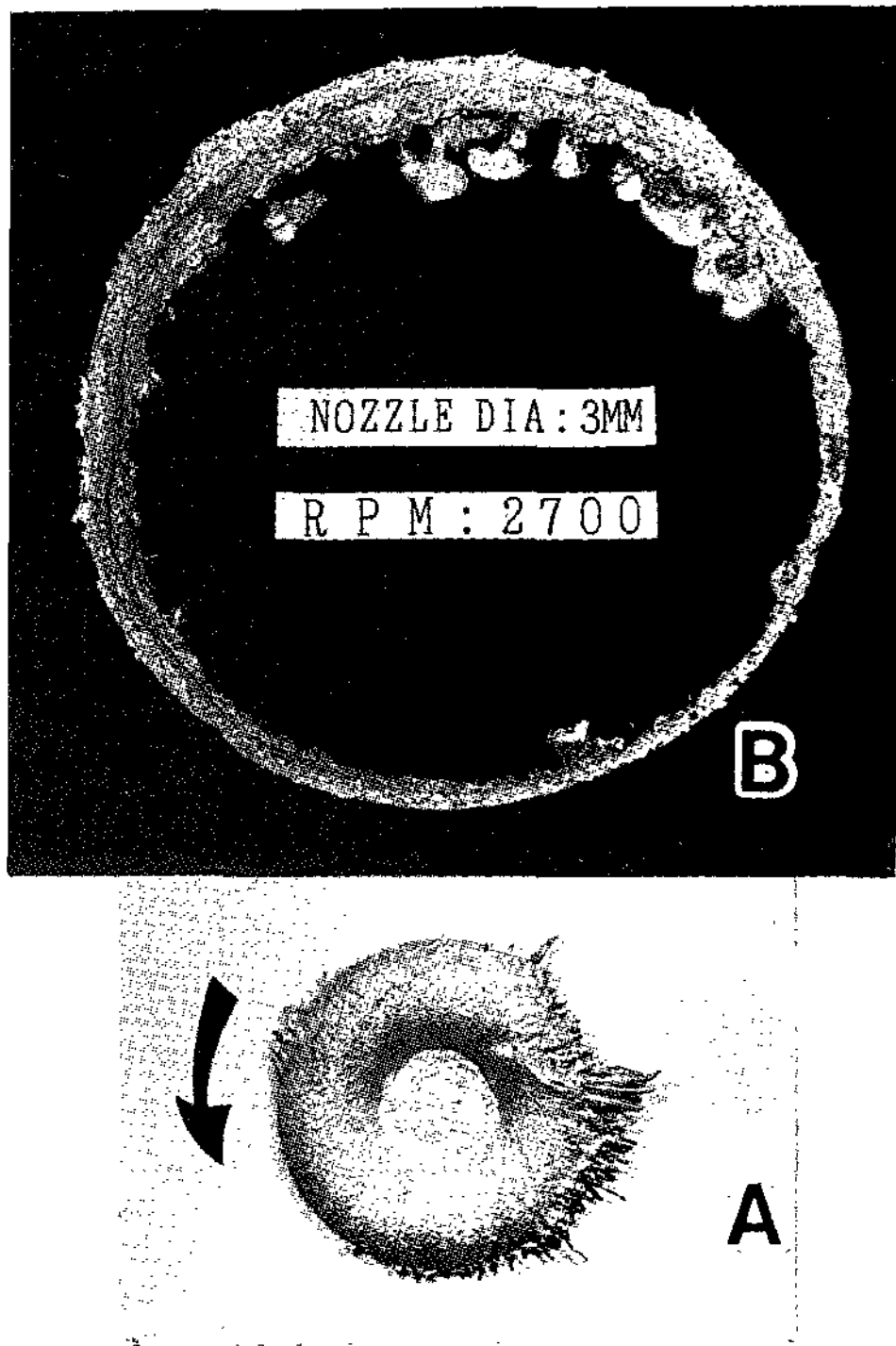


Photo 1. Macrographs of centrifugally spray-casted Al-Pb preform(B) and as-solidified atomizing trace(A) on the atomizing disc.

2. 1kg, 마모거리는 400m 로 고정하였으며, 상대재의 속도를 고속(3.53m/s)과 저속(0.373m/s)으로 구분하여 마모시험을 하였다. 마모량은 상대재에 의하여 성형체의 표면에 생긴 마모흔의 면적으로 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3. 1 액적의 크기분포

Fig. 2는 분사실내에서 채취된 입자를 표준체로 분류한 결과를 나타낸 것이다. 이들 분말의 분포를 보면 크기가 200 μ m에서 500 μ m의 분말입자가 약 60%를 차지하고 있다.

원심분사주조시 분사원반의 회전속도에 따른 액적 크기의 예측은 직경 d의 액적이 분사원반상을 이탈하는 데 필요한 힘과 액적의 단면적에 작용하는 표면장력과의 평형관계로부터 나타낼 수 있다¹⁷⁾. 이때 액적이 분사원반상을 이동할 때 마

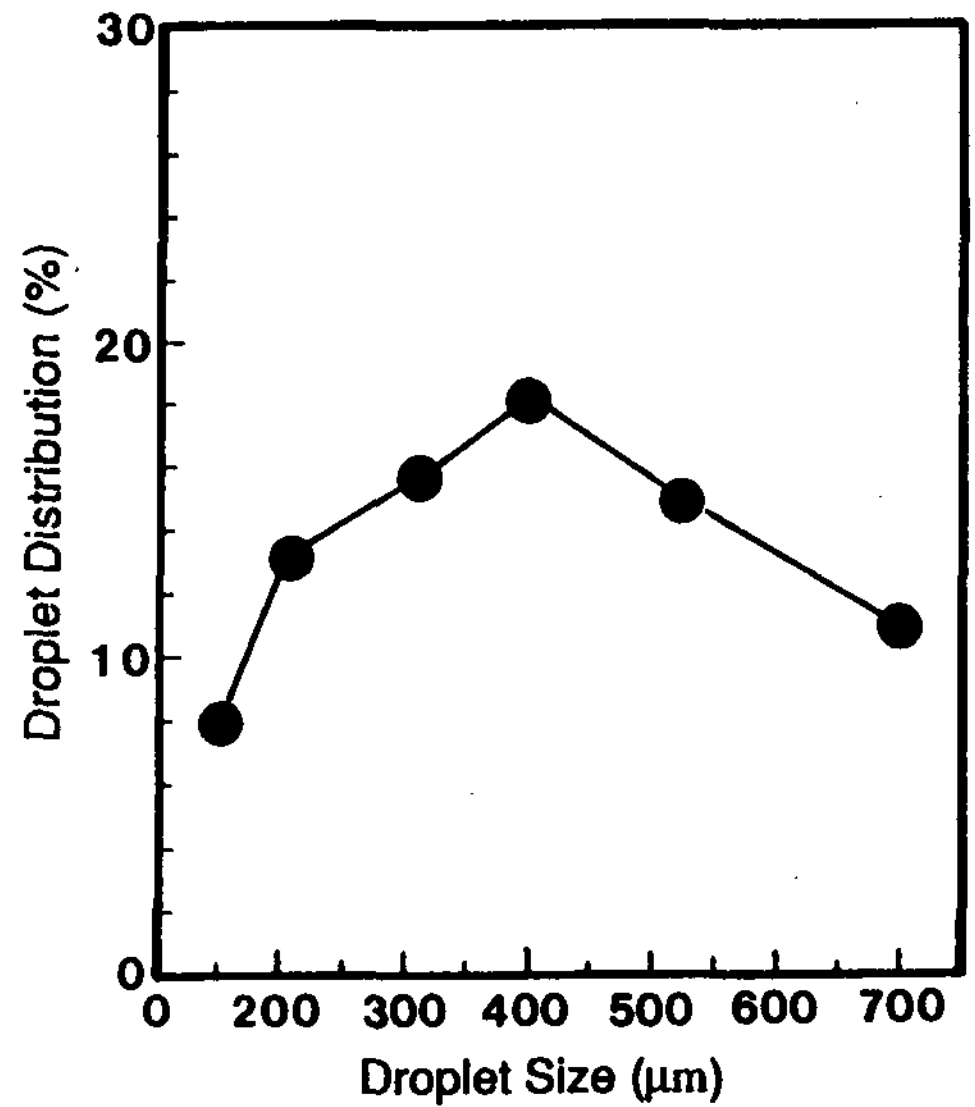


Fig. 2. Size distribution of undersprayed powder produced by centrifugal spray casting.

찰력의 작용이 없다고 가정하였다. 따라서 임의의 rpm에서 분사원반을 이탈하는 액적의 크기는 다음과 같다.

$$d^2 = 1350\gamma_{lv} / \pi^2 \rho_d RN^2 \dots \dots \dots (1)$$

- 여기서 A : 액적의 단면적
- m : 액적의 질량
- V_0 : 액적의 초기속도
- R : 분사원반의 반경(0.05m)
- N : 분사원반의 회전속도(rpm)
- γ_{lv} : 액적의 표면장력(0.865 N/m at 800 °C)
- d : 액적의 직경
- ρ_d : 액적의 밀도(2375kg /m³)

Fig. 3은 (1)식을 이용하여 분사원반의 회전속도에 따라 형성될 수 있는 액적의 크기를 나타낸 것으로 2700 rpm의 회전속도에서 형성될 수 있는 Al액적의 크기는 약 370 μ m임을 알 수 있다. Fig. 2의 실험결과에서 액적의 크기가 300~500 μ m범위에 있는 액적이 약 60%를 차지하고 있음을 볼 때, 실험결과와 (1)식의 결과는 잘 일치한다고 볼 수 있다. 그리고 분사원반의 회전속도나 또는 합금의 밀도가 클수록 제조되는 액적의 크기는 지수함수적으로 작아짐을 알 수 있다.

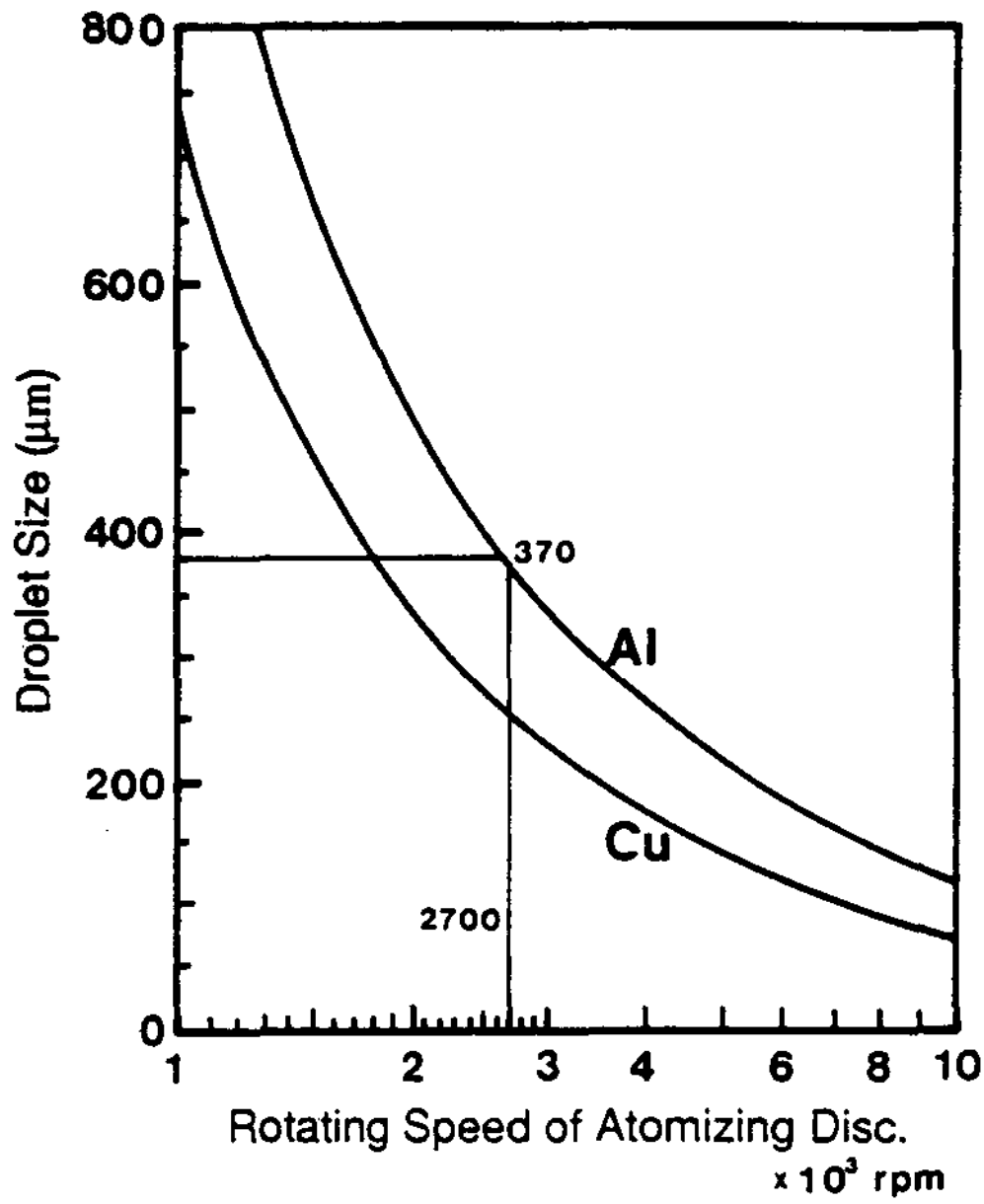


Fig. 3. Calculated variation of droplet size as a function of rotating speed of atomizer

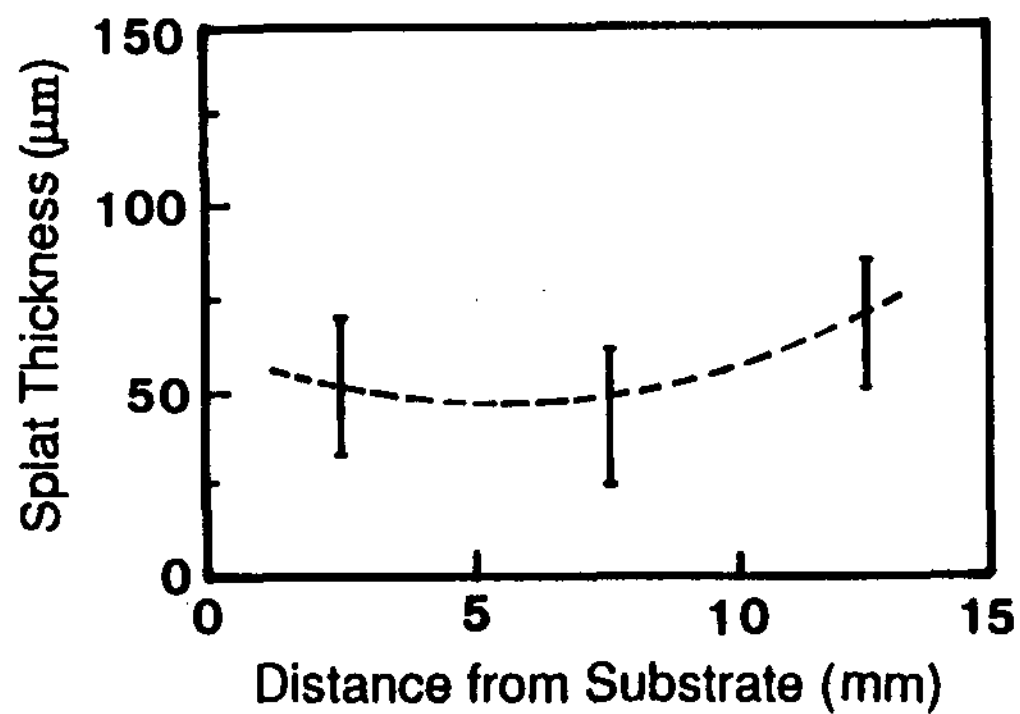


Fig. 4. Splat layer thickness as a function of distance from chill substrate for Al-4.5w/oPb.

3. 2 적층성형체의 특성

3.2.1 미세조직

Photo 2는 원심분사주조에 의하여 적층된 성형체의 두께 방향의 미세조직을 나타낸다. 기관과 접촉하는 성형체 하부조직(Photo 2.A,B)은 splat층의 경계가 뚜렷한 전형적인 분사적층(spray deposition) 조직을 나타내며, 성형체 중심부(Photo 2.c)는 splat경계가 없는 전형적인 분사

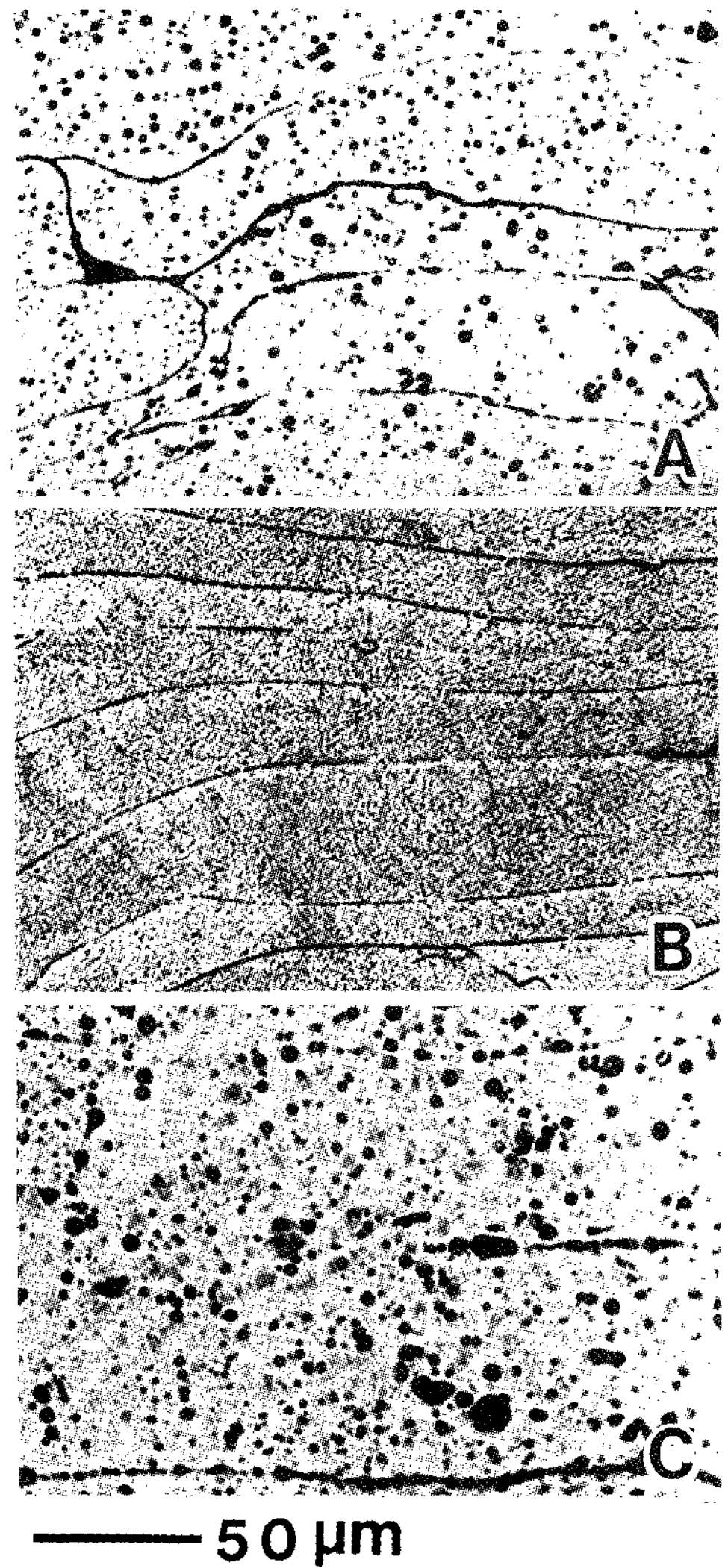


Photo 2. Optical micrographs along the thickness direction of Al-4.5 w/o Pb preform

주조(spray casting)조직을 나타낸다. Photo.2 (A) 및 (B)는 수냉기관의 흡열효과로 응고속도가 증가되고 이로 인한 개개 액적의 퍼짐성이 나빠져 초기 적층부(Photo 2.A)는 splat의 두께가 불규칙하면서 미소 기공이 혼재하게 되며, 성형체의 두께가 증가할수록 액적의 퍼짐성이 좋아져 splat층의 두께가 균일화 되면서 splat 형상의 안정에 의하여 기공이 소멸되고 있음을 볼 수 있다. 특히 Photo 2(C)는 액적이 응고할 때 발생하는 응고잠열이 기관쪽으로 충분히 방출되지 못하여

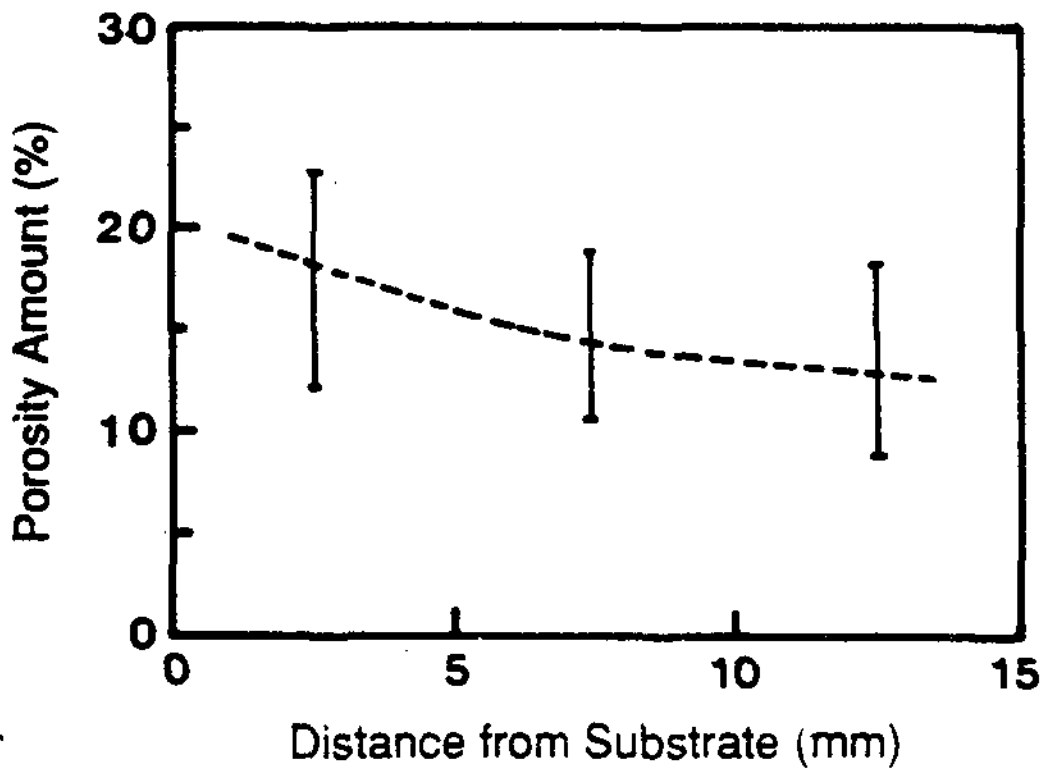


Fig. 5. Variation of porosity amount with a distance from chill substrate

응고속도가 느려지는, 즉 성형체 표면에 액상막이 존재하는 분사주조 조건이 이루어져 앞서 적층된 액적이 응고하기 전에 후속 액적이 연속적으로 적층되었기 때문에 적층경계가 없는 분사구조 조직을 나타낸 것으로 여겨진다.

3.2.2 기공의 함량

Fig. 5는 기판으로부터 성형체 두께의 증가에 따른 성형체내 기공량을 나타낸 것이다. 기공량은 성형체의 하부로 갈수록 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 수냉기판에서 흡열이 크기 때문에 응고속도가 증가하여 성형체 표면의 액상층이 일부 고상화되면서 돌출부로 작용하여 후속 액적의 적층시에 액상의 유동을 방해하고, 또한 돌출부간에 있던 가스가 포획되기 때문이라고 여겨진다. 그리고 성형체의 상부 중심부측으로 갈수록 기공량이 감소하는 경향을 나타내는 것은 성형체의 중심부로 갈수록 splat층이 얇아지면서 일부는 서로 융착되고, 또한 성형체의 두께 증가에 따라 splat 경계의 수가 줄어들면서 적층되고 국부적으로 응고하는 것이 감소하기 때문이라고 사료된다.

Fig. 5에서 성형체의 두께에 따라 기공량이 10~20% 정도로 분포하고 있음을 볼 수 있다. 이는 Rickinson¹⁸⁾의 연구결과인 2~4%보다는 다소 많은 양이다. 따라서 splat 경계의 수와 기공량을 감소시키기 위해서는 분사원반의 회전수와 용탕의 공급량을 증가시킬 필요가 있다.

3.2.3 Pb입자의 분포

Photo 3은 적층성형체의 바닥부(A)와 중심부

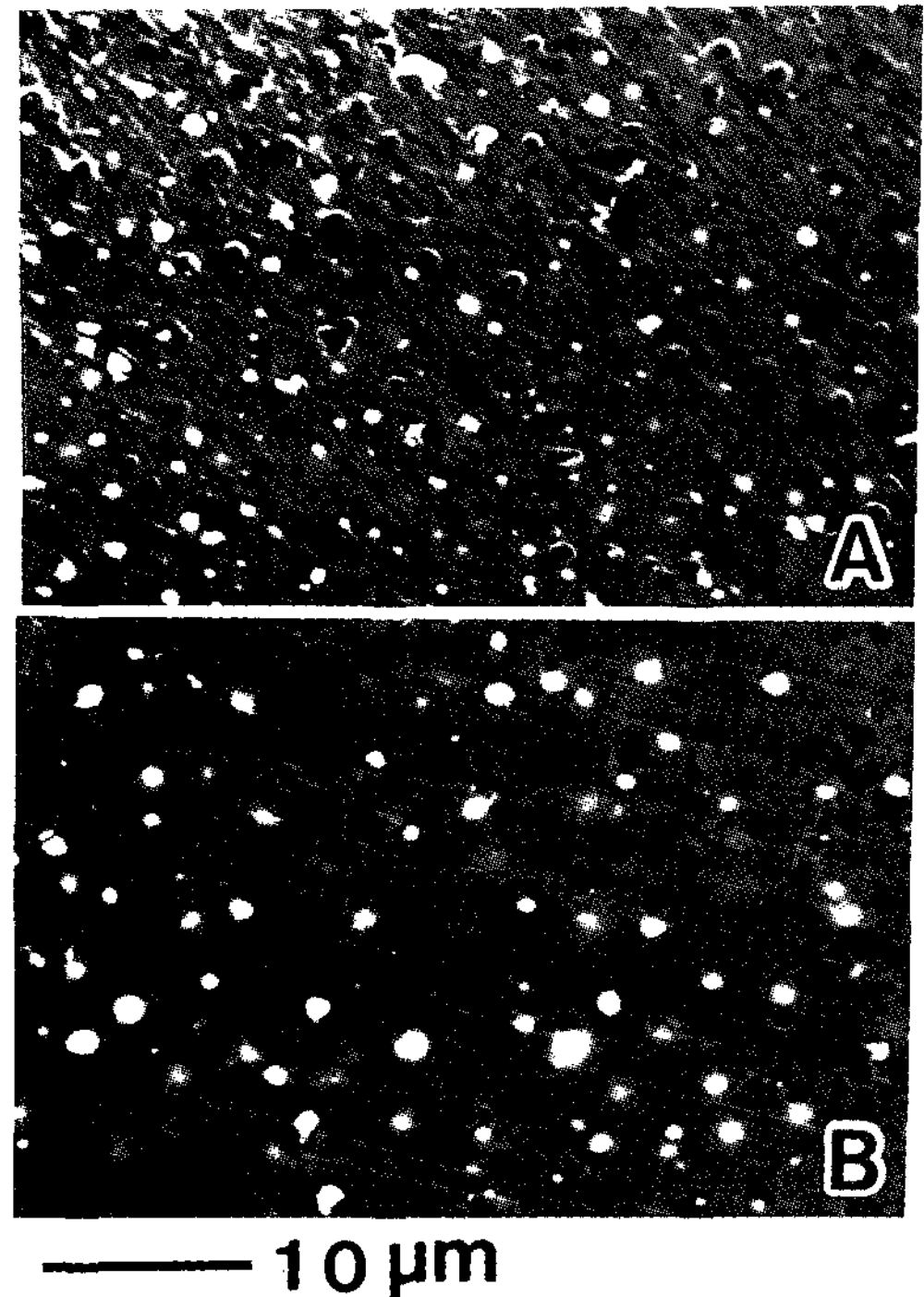


Photo 3. SEM micrographs of distribution of Pb particles (white) along the thickness direction of Al-4.5 w/o Pb preform. (A) at the bottom (B) at the middle

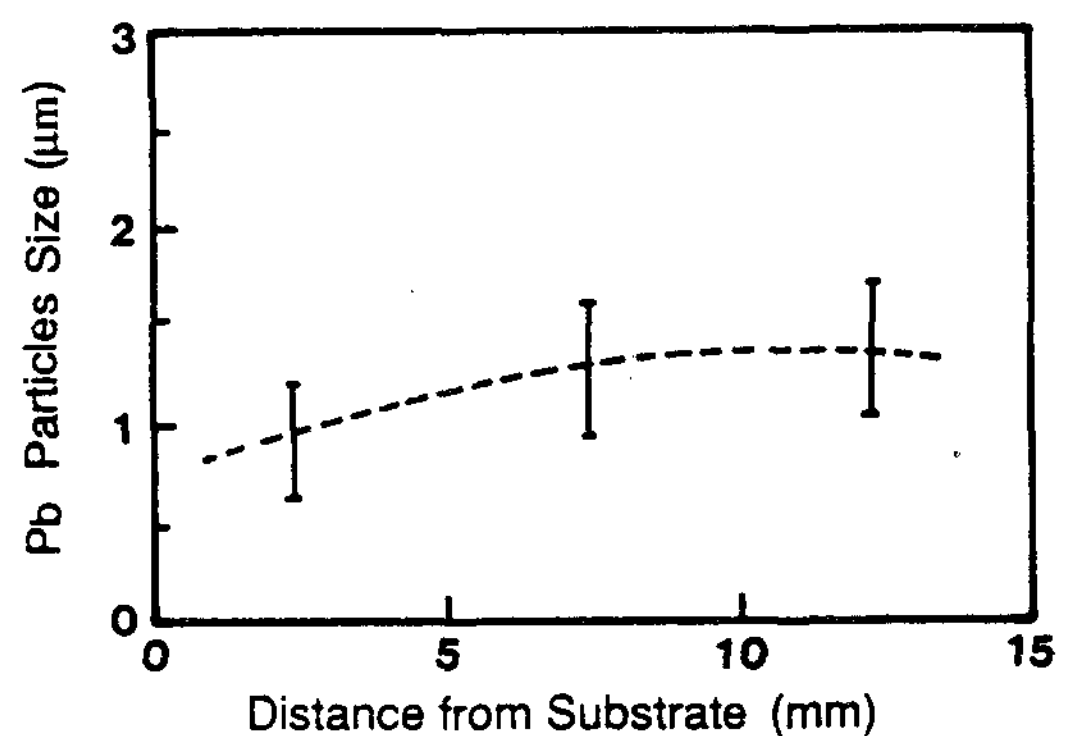


Fig. 6. Distribution of Pb particles size of spray cast deposit with distance from the substrate.

(B)을 주사전자현미경으로 관찰한 1500배 사진이다. 미세조직은 Al기지중에 연질의 Pb상이 미세

하게 균일 분포한 편정복합조직임을 알 수 있다. Photo 3에서 성형체의 두께방향에 따른 Pb입자의 크기와 분포밀도를 살펴보면, 성형체의 두께증가에 따라 Pb입자의 크기는 조대화될 뿐 아니라 분포밀도가 감소함을 알 수 있다(Fig.6). 이와 같이 성형체의 중심부로 갈수록 Pb입자의 크기가 조대화하는 현상은 용고잠열의 방출속도의 감소 및 기관의 열소멸원 역할의 감소에 의하여 냉각속도가 느려짐에 따라, Al-Pb 과편정합금계에 있어 2액상의 분리반응이 일어나는 시간적 여유가 길어져 L₂상이 조대하게 성장할 수 있는 시간적 여유가 증대하였기 때문으로 여겨진다.

3.2.4 성형체의 가공특성

Photo 4(A,B,C) Al-10 w/oPb 적층성형체를 상온, 250℃ 및 450℃로 가열하였을 때의 미세조직이다. 여기서 가열온도의 증가에 따라 Pb입자는 조대화되고, Al결정립은 재결정되어 있음을 알 수 있다.

성형체의 열간단조는 250℃ 및 450℃의 단조온도에서 가공율을 각각 30%에서 70%까지 행하였으며, Photo 5는 상온, 250℃ 및 450℃에서 50% 이상 자유단조한 성형체의 미세조직을 나타낸 것이다. 성형체의 가공도가 증가할수록, 상온에서 단조한 것은 splat층이 좁혀졌으나 splat경계가 많이 남아 있으며, 단조온도가 250℃인 경우는 splat층 경계가 거의 없어지기는 했으나 일부 잔존하고 있다. 450℃에서 가열 단조한 것은 적층성형시 편정반응에 의하여 정출한 구상의 Pb입자들이 320℃ 이상의 온도에서 Pb가 용융하여 연신되면서 미세화 되어 있고 또한 splat층의 경계도 사라지고 있음을 볼 수 있다. 그리고 50% 이상의 가공율에서 성형체의 충전밀도를 약 95% 이상을 얻을 수 있었다. 이로 미루어 볼 때 완전밀도를 가진 소재를 제조하기 위하여는 급속용고의 효과를 다소 희생하더라도 분사적층조직이 아닌 분사주조조직을 얻을 수 있는 원심분사주조 조건을 찾는 것이 중요하다.

3.2.5 성형체의 경도특성

Fig. 7은 적층성형체 및 단조된 성형체의 경도값을 나타낸 것이다. 이에 의하면 적층성형체의 경도값 (Hv 33)에 비하여 자유단조한 경우에는 단조 온도에 관계없이 경도값 Hv 39~49 범위에 있고, 가공율의 증가에 따라 다소 증가하는 경향

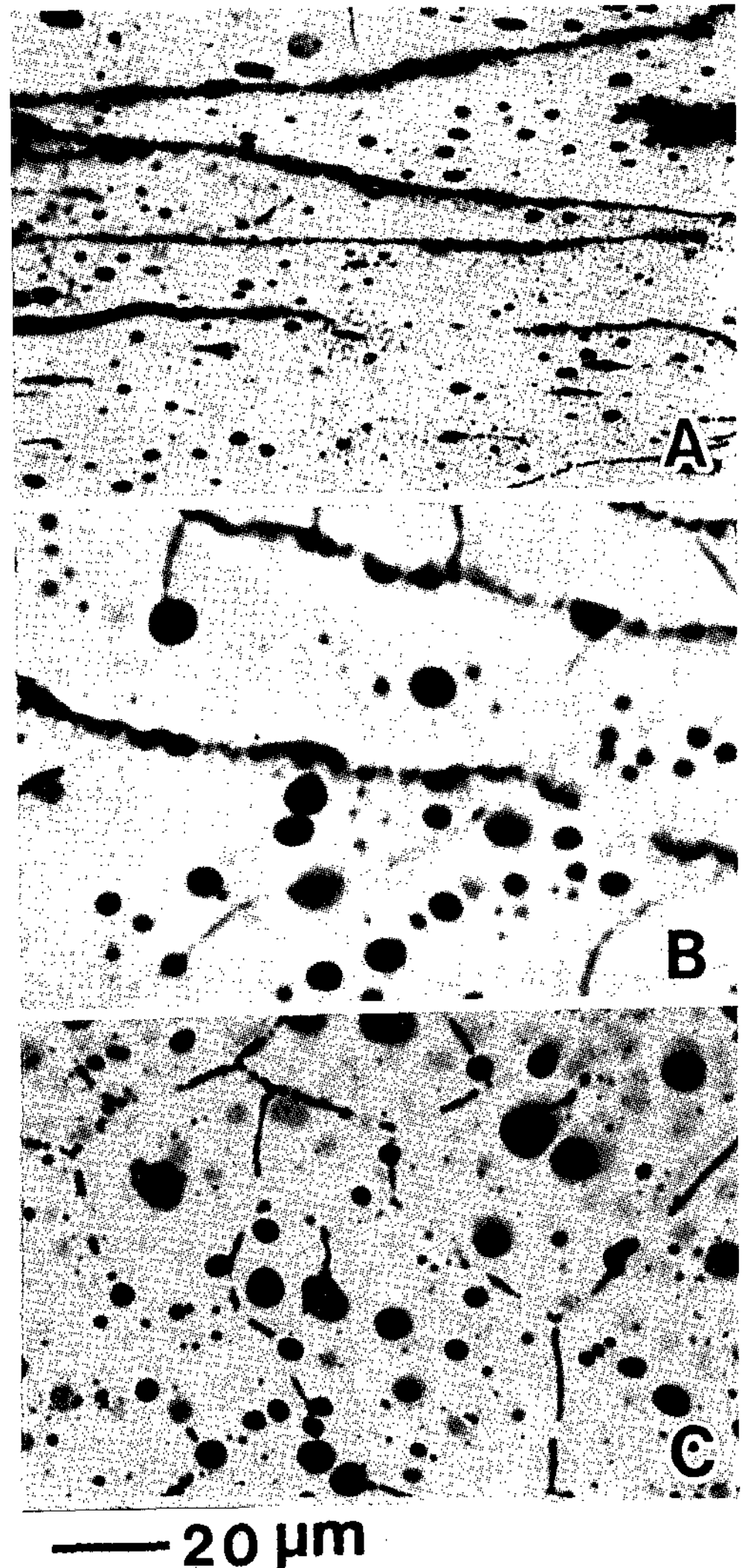


Photo 4. Optical micrographs of distribution of Pb particles with the heat treatment temperature of Al-10 w/o Pb preform.

(A)R.T (B)250℃ (C)450℃

을 나타내었다. Al-Pb합금의 경도특성을 살펴보면, 순수 Al의 경우가 Hv20(≅H_B20), 순수 Pb는 Hv 2(≅H_B2)임으로 Al-Pb합금의 경도값이 높음을 알 수 있다. 이것은 분사주조에 의한 급냉효과 및 단조에 의한 조직의 강화와 균일화가 증대되었기 때문이라고 생각된다.

3.2.6 성형체의 마모특성

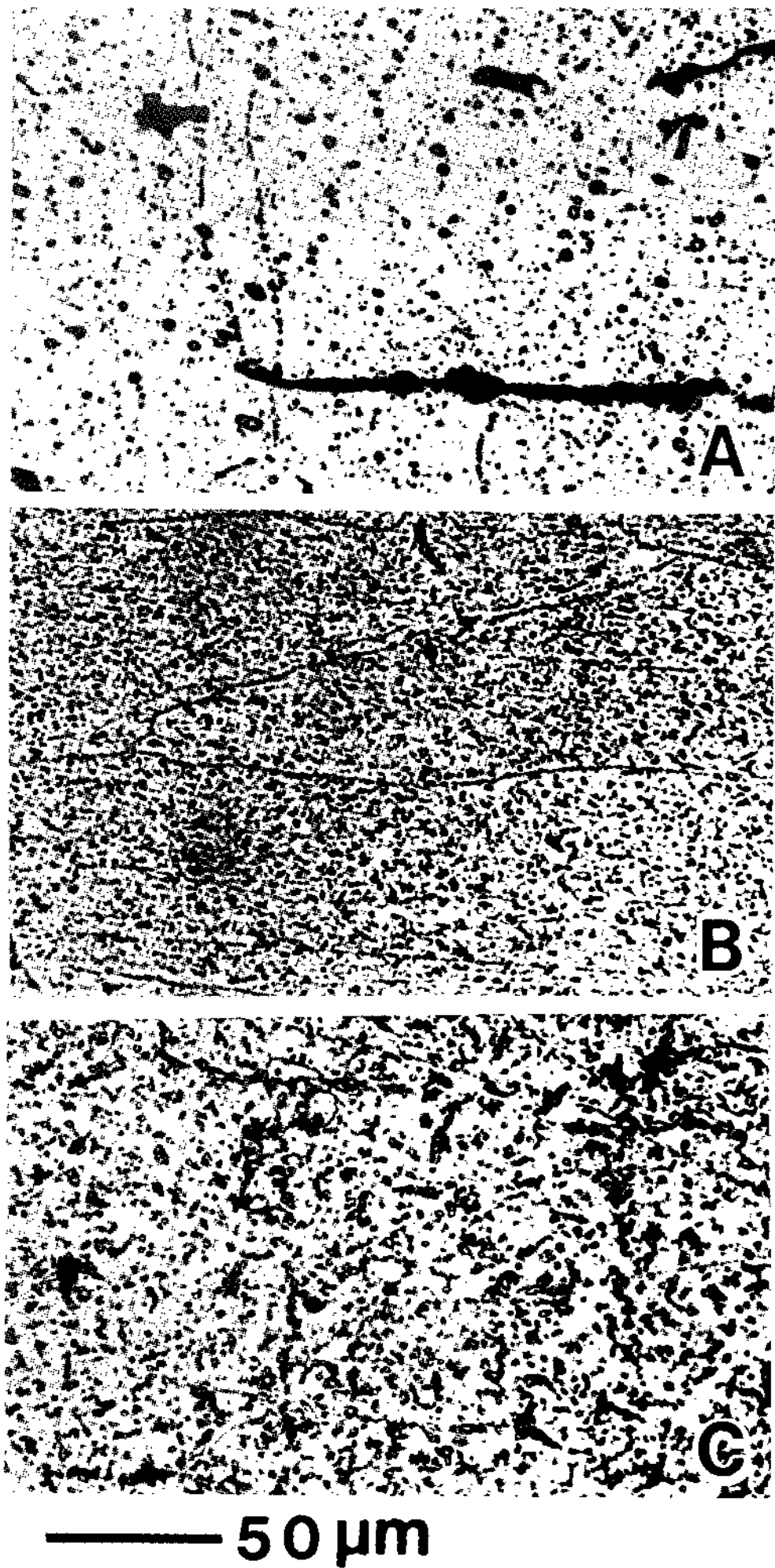


Photo 5. Variation of splat layer boundaries and distribution of Pb particles with forging temperature in a 50% thickness contracted Al-4.5 w/o Pb preform. (A)R.T (B)25°C (C)450°C

Fig. 8은 250°C 및 450°C의 단조온도에서 가공율을 각각 30% 및 70%로 각각 열간단조된 성형체를 저속(0.373m/s)과 고속(3.53m/s)으로 구분하여 마모시험한 경우, 마모면의 면적을 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 동일 단조비에서 상대재의 속도가 고속일수록 마모면적을 증가하고 있고, 또한 단조온도가 높을수록 마모면적이 증가하고 있다. 이는 온도증가에 따른 Pb입자의 분포밀도가 작기 때문에 Pb입자의 유회 역

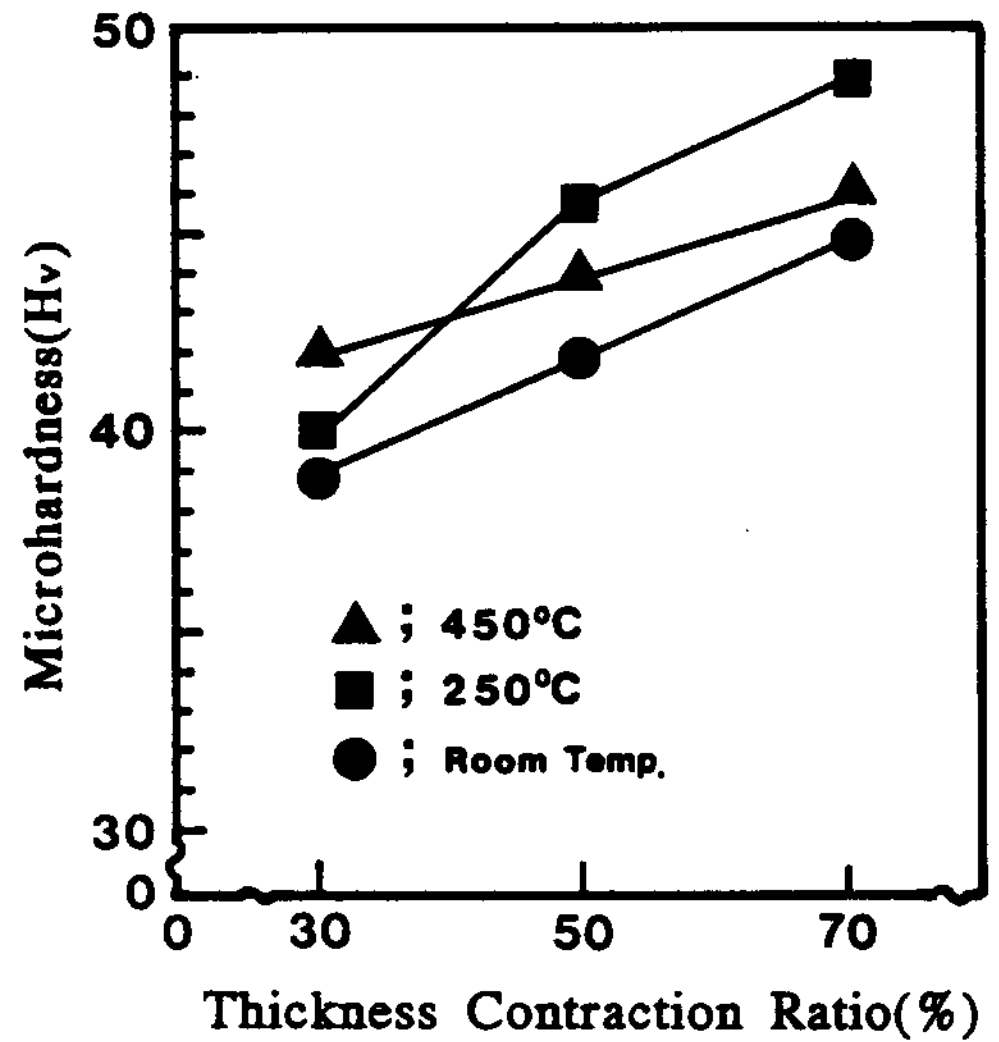


Fig. 7. Variation of hardness value with change in forging temperature and thickness contraction ratio by forging in Al-4.5 w/o Pb preform

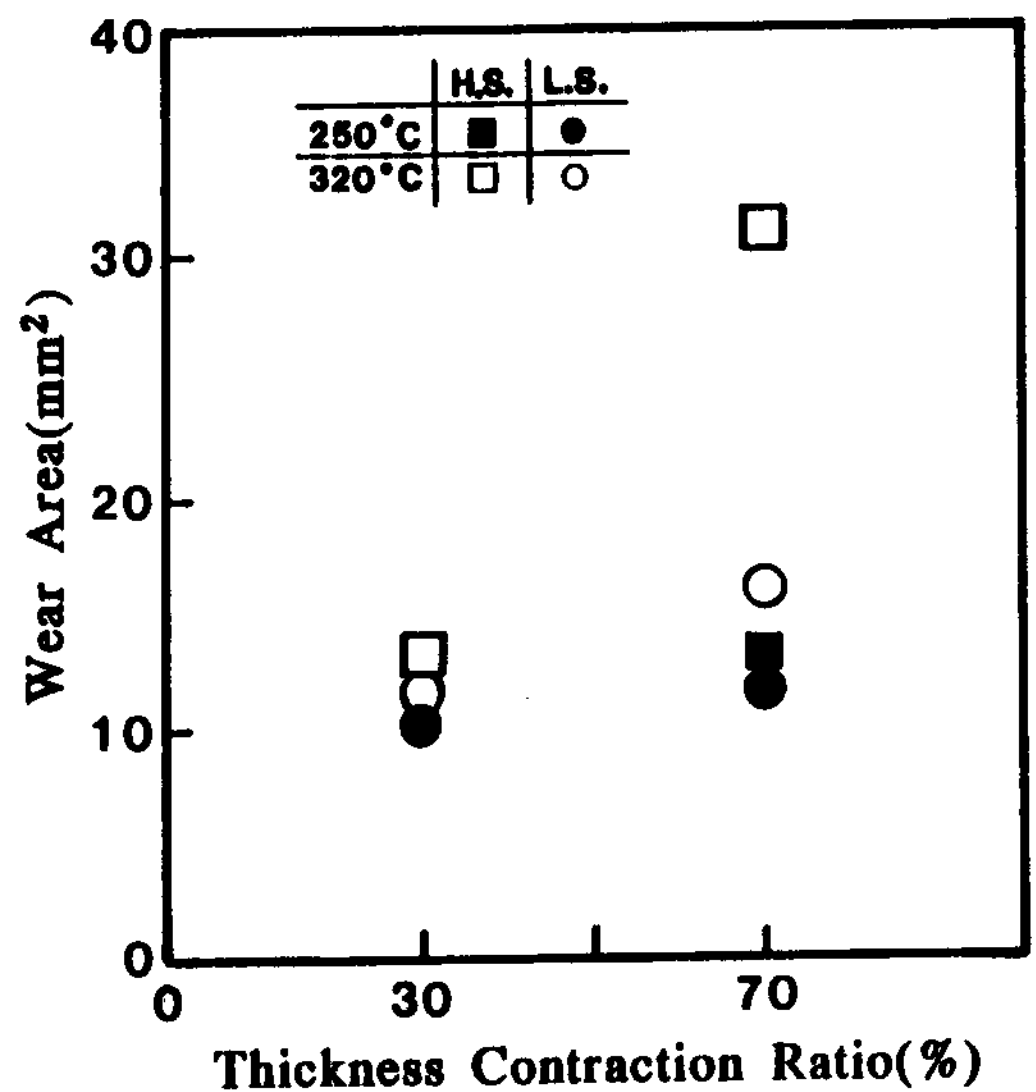


Fig. 8. Effects of speed of reference material, forging temperature and thickness contractions ratio on worn area of Al-4.5 w/o Pb preform

할이 저하되었기 때문이며, 또한 상대재의 속도가 저속(Photo 6.A)일 때에 비교하여 상대재의 고



Photo 6. Surface morphologies of Al-4.5 w/o Pb preform worn out with rotation speed of reference material.
(A)low speed (B)high speed

속(Photo 6.B)회전에 의한 온도상승으로 소착현상이 보다 많았기 때문이라고 여겨진다. 따라서 Pb입자가 미세하고 분포밀도가 클수록 소착 방지에 유리하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

원심분사주조법을 이용하여 Al-Pb 과편정합금의 적층성형체를 제조함에 있어 액적의 분사에 따른 미세조직을 관찰하고 즉 splat 층의 두께, Pb입자의 크기 및 분포, 그리고 기공의 함량등을 조사하였다. 아울러 열간단조의 가공율에 따른 경도 및 내마모성 등을 시험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원심분사주조법에 의하여 제조된 Al-Pb 액적은 300~500 μ m 크기가 약 60%를 나타내고 있고, 분사원반의 회전속도를 2700rpm으로 하였을 때 예측된 액적의 크기는 약 370 μ m로 실측치의 범

위에 잘 일치하고 있다.

2. 원심분사주조된 성형체의 미세조직은 성형체의 바닥면에서 splat층의 경계가 뚜렷하게 나타내는 분사적층조직으로부터 중심부로 갈수록 응고속도가 느려짐에 따라 splat층의 경계가 소멸된 분사주조조직이 나타났다.

3. Pb입자의 분포형상은 성형체의 바닥면에서 미세하고 구형에 가까우며, 중심부로 갈수록 조대하고 분포밀도는 감소하고 있으며 입계의 형상에 따라 다소 타원상의 형태를 나타내고 있다. 그리고 성형체의 두께방향에 따라 Pb입자의 크기는 대략 0.7 μ m~1.5 μ m 범위를 나타내었다.

4. 성형체의 열간단조에 의하여 splat층의 경계는 소멸하고, Pb입자는 미세화 되고 있으며 320 $^{\circ}$ C 이상에서 Pb는 급격히 성장하고, 성형체내에 함유되고 있는 기공량은 성형체의 중심부로 갈수록 감소하여, 단조후 그 분포량은 평균 5% 이하를 나타내었다.

5. 성형체의 마모는 상대재의 회전속도가 느릴수록, 또한 Pb입자가 미세하고 그 분포밀도가 클수록 마모된 면적과 소착현상이 적게 나타났다.

후기 : 본 연구는 한국학술진흥재단의 1990년도 학술연구 조성비(지방대 육성 연구비)에 의하여 수행되었으며, 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. B.Derby & J.J.Favir : Acta Met.,31-7 (1983)1123
2. K.A.Jackson & J.D.Hunt : Trans. AIME., 236(1966)1129
3. A.Kamio, et al. : J.Jap.Inst.Met.,49(1985) 677
4. T.Takshashi, et al : Light Metals,21(1971) 463
5. D.R.Uhiman & B.Challmer : J.App.Phys., 35(1964)2986
6. C.Schafer,et al : Acta Met.,31-8(1983) 1221
7. N.B.Singh,et al. : J.of Crystal Growth, 71 (1985)353
8. M,J.Aziz : J.App.Phys.,53(1982)1158
9. 김동훈, 김명호 : 한국과학재단 연구 보고서,

- 36(1986)
10. A.Kamio, et al. : J.J.ap.Inst., 46(1982)1200
 11. A. Hansen : Constitution of Binary Alloys, McGraw-Hill Book Co., NY USA(1985) 122
 12. 言取訪正輝, 小室勝傳 : 特許公報 22733 (1977)
 13. M.L.Mackay : Automotive Engineering, (1976)113
 14. S.Gelles and A.Markworth : NASA Technical Memorandum 78125(1977)
 15. H.Jones : Rapid Solidification of Metals and Alloys, (1982)
 16. E.E.Unserwood : Quantitative Stereology (1970)41
 17. W.H.Walton and W.C.Prewett : Proc. Phys.Soc., 62(354B)(1949)241
 18. B.A.Rickinson, F.A.Kirk and D.R.G.Davies : Powder Metall., (1981)1