

|||||||
論 文
 |||||

과공정 Al-Si 합금의 마모 특성에 미치는 잔류응력의 영향에 관한 연구

김현주 · 김창규

A Study on the Relationship between Residual Stress and Wear Property in Hypereutectic Al-Si Alloys

Heon-Joo Kim and Chang-Gyu Kim

Abstract

The effects of modification processing on the refinement of primary Si and the wear behavior of hyper-eutectic Al-Si alloys have been mainly investigated. Refining effects of primary Si in Al-17%Si alloy was more efficient than that of B.390 alloy. Optimum condition of getting the finest primary Si microstructure was when AlCuP modifier is added into the melt at 750°C and held it at 700°C for 30 minutes. Wear loss in the specimens of as-cast condition decreases as the size of primary Si decreases, in the order of B.390 alloy, B.390 alloy with AlCuP addition, Al-17%Si alloy and Al-17%Si alloy with AlCuP addition. Wear loss in the aged condition of Al-17%Si alloy, B.390 alloy and B.390 alloy with AlCuP addition decreased due to the increase of compressive residual stress in the matrix by the aging treatment. While, wear loss increased in the aged specimens of Al-17%Si alloy with AlCuP addition and Hepworth addition in which compressive residual stress decreases by the aging treatment. Therefore, it is assumed that higher compressive residual stress in the matrix can reduce the wear loss in composite materials such as hyper-eutectic Al-Si alloys. (Received February 21, 2000)

1. 서 론

과공정 Al-Si합금은 Si함량이 14~25%로 공정기지에 경한 비금속 Si 초정입자가 분포되어 있는 복합조직의 합금으로 엔진블록, 피스톤, 실린더 및 풀리 등과 같이 연속적인 작동으로 인하여 강도특성과 함께 내마모 특성이 기본적으로 요구되는 부품에 많이 사용된다[1-3].

복합재료의 내마모성에 관한 기존의 연구는 주로 강화입자의 크기, 체적율과 강화재/기지계면의 조직적인 영향 및 마모과정 변수에 따른 마모거동 등을 주로 다루고 있다. 과공정 Al-Si합금의 내마모성은 초정Si 입자의 크기와 분포 등이 큰 영향을 미치는 것으로 보고되어[4-6], Si입자를 미세하고 균일하게 분포시켜 내마모 특성을 극대화 시키기 위한 초정Si 미세화에 관한 연구가 활발하였다[7-9].

과공정 Al-Si합금의 비금속 Si과 기지금속의 큰 열팽창률 차이로 인해 제조과정과 열처리과정에서 2상 간의

열응력 불일치에 의한 잔류응력이 발생하나, 이들 재료의 마모거동을 논함에 있어 근원적인 잔류응력의 영향이 고려되지 않은 점에 주목하였다.

따라서 본 연구에서는 Al-17%Si 2원계 합금의 현장 적용을 위하여 Al-Si합금과 B.390합금의 초정Si 입자 미세화 영향을 먼저 비교 연구하였다[8, 10]. 이 실험결과를 바탕으로 최적 미세화 조건으로 제조한 시편의 내마모 특성과 잔류응력의 상관성을 규명하여 과공정 Al-Si합금의 마모기구 이해를 도모하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 미세화처리

본 연구에 사용된 재료는 Al-17%Si 2원계 합금과 B.390합금으로 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 이들 합금에 첨가할 미세화제는 각종 문헌과 실제 산업체에 적용되고 있는 상품을 참고하여[11, 12], Cu-7.4%P

Table 1. Chemical composition of alloys used (Wt%)

	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Fe	Al
Al- Si alloy	17.0				-	0.5	Rem
B.390 alloy	16.8	4.3	0.6	0.5	0.1	0.7	Rem

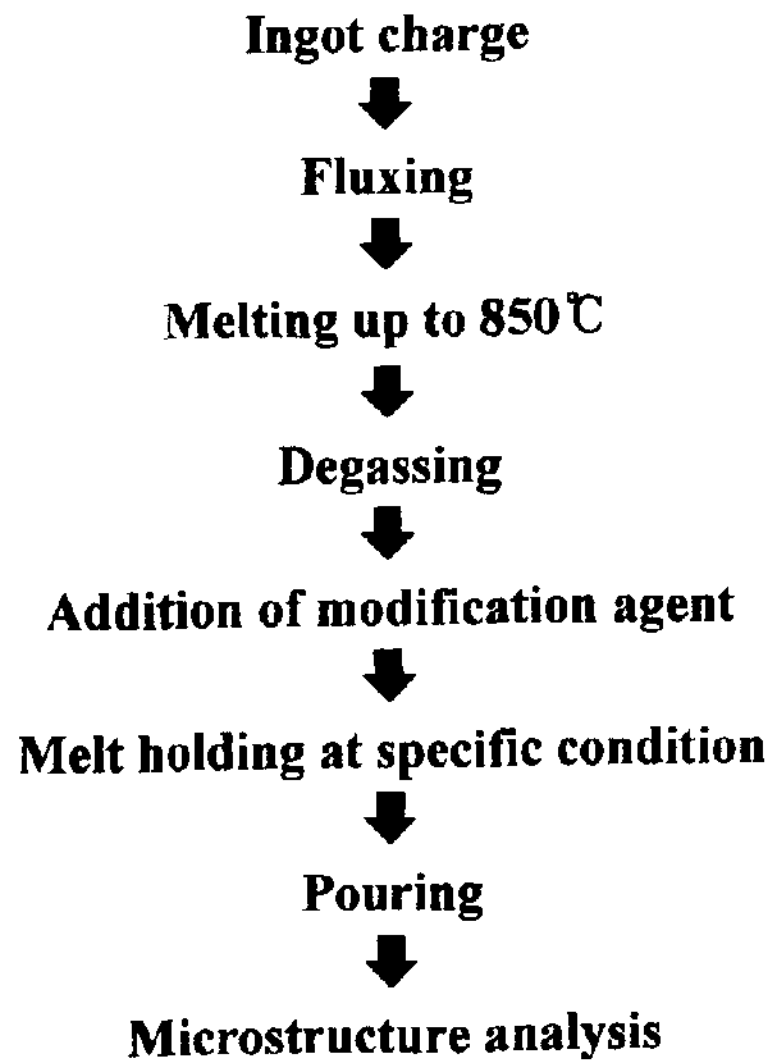


Fig 1. Flow chart of melting and modification procedure.

합금, AlCuP(상품명), P와 Cl등을 함유한 Hepworth(상품명), ARF-1(상품명), NaF와 S 연속첨가를 하였다. 처리조건을 결정하기 위해 Al-17%Si 2원계 합금(불순물로서 Fe가 0.5% 함유)을 대상으로 첨가온도 750, 800, 850°C와 유지온도 700, 750°C에서 1~60분간 유지하는 방법으로 Fig. 1과 같이 미세화 처리를 하였다.

실험 결과로부터 미세화제와 최적 처리조건을 결정하였으며, B.390합금은 Al-17%Si 2원계 합금에서 미세화 효과가 우수한 미세화제를 적용하였다. 결정된 미세화제 및 처리조건을 Table 2에 나타내었다.

미세화 처리된 각 시료를 절단, 연마 후 광학현미경으로 시료에서 대표적인 입자분포를 나타내는 부위의 조직사진으로 초정Si 입자크기를 측정하였으며, 추가적으로 B.390합금은 초정Si과 공정Si을 미세화시키는 복

Table 2. Experimental condition of primary Si modification in Al-17%Si alloy and B.390 alloy

Modification agent	Additon amount (Wt%)	Addition Temp (°C)	Holding Temp (°C)	Holding Time (min)	Applied alloy
AlCuP	0.3	750	700	60	Al-17%Si, B.390
Hepworth	0.2	750	700	60	Al-17%Si, B.390
AlCuP + Sr	0.3 + 0.04	750	700	60	B.390

합미세화제의 영향도 조사하였다.

2.2 마모실험

마모특성 비교를 위하여 Fig. 2의 서가식 마모시험기를 사용하여 주방상태(As-cast)와 시효열처리(520°C에서 2시간 용체화 처리 후 수냉, 170°C에서 6시간 시효 처리)한 시료로 건식 마모실험을 행하였다. 판상시료(L80 mm × W20 mm × T2 mm)에 800번 사포가 접착된 휠의 상대 마모재가 0.7 kgf의 마모하중으로 왕복운동을 하며, 1회 왕복 후 새로운 사포면이 시료에 접촉되도록 설계하였다. 마모실험조건은 0.036, 0.051, 0.060 (m/s) 마모속도와 마모거리 100, 200(m)로 하였다.

마멸량은 시험 전후의 시료의 무게차이로 계산하였고, 이때 무게는 0.001g까지 측정하였다. 무게측정 시, 오차를 줄이기 위해 초음파 세척을 하여 표면에 묻은 불순물을 제거하였다. 마모시험 후 시료의 마멸면은 주

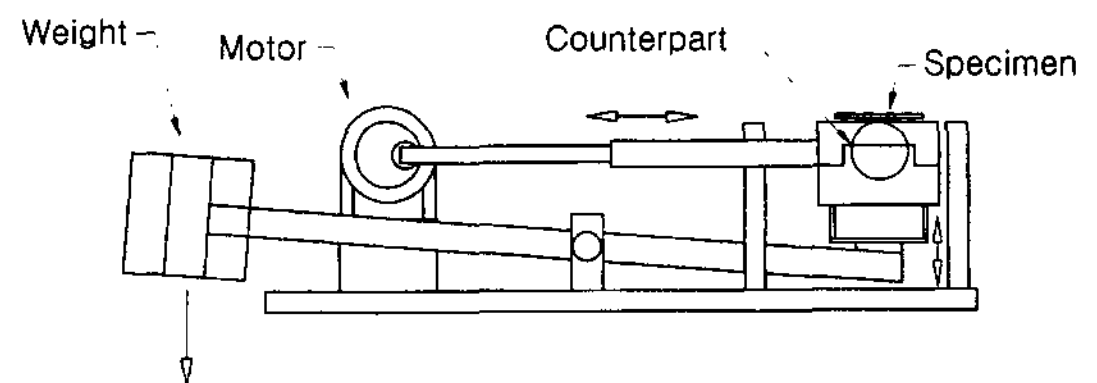


Fig 2. Schematic drawing of wear tester used.

Table 3. Experimental condition of X-ray stress measurement

Method	2θ-sin ² ψ method
Characteristic X-ray	Cr-Kα
Diffraction plane	Al(2 2 2)
Size of irradiation mask	5 mm × 3 mm
Determination mask	Half-value width method
X-ray incident beam(ψ)	0, 15, 30, 45 deg
Filter	V
Tube voltage	40 kV
Tube current	20 Ma
Divergent angle	1 deg
Scanning speed	1 deg/min
Time constant	20 sec

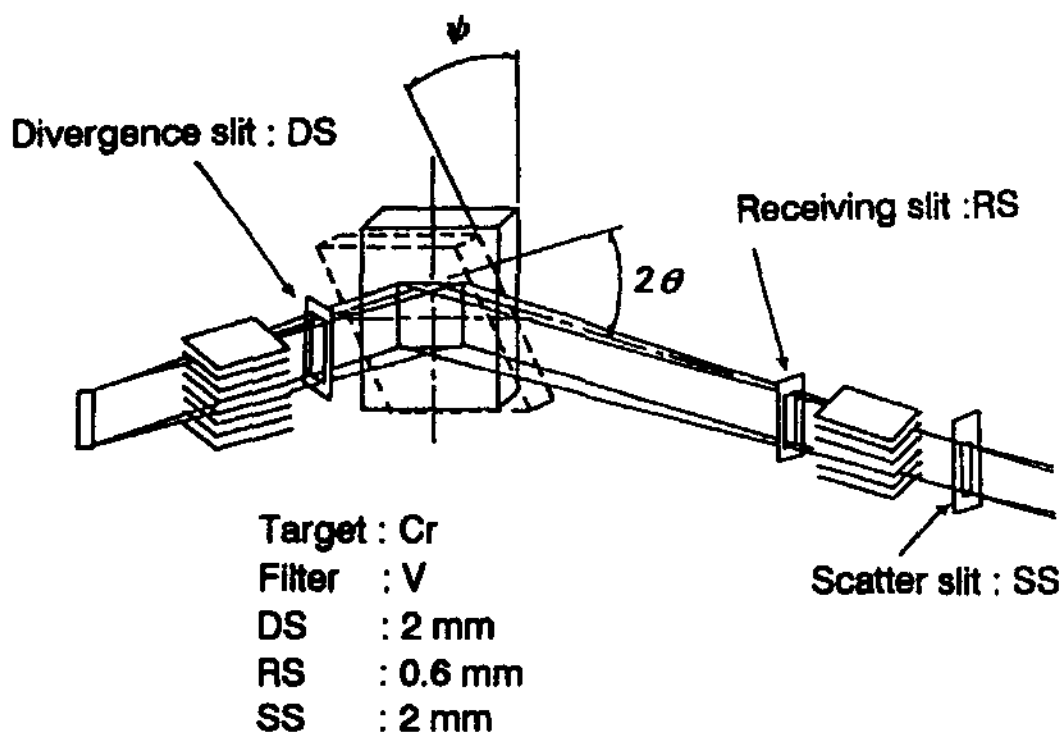


Fig 3. Principle of residual stress measurement.

사전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였다.

2.3 잔류응력 측정

재료 내에 응력이 존재하면 결정의 격자정수가 변화되어 X-선의 회절각도가 변화하는 원리[13]를 이용하여 Table 3의 조건으로 Al기지금속의 잔류응력을 측정하였다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 시편면 법선과 격자면 법선 사이의 각 ψ 에 대한 회절각도(2θ)의 변화를 측정한다. 2θ 와 $\sin^2\psi$ 의 관계로부터 최소자승법에 의해 기울기를 구한 다음 잔류응력을 산출하였다[14].

$$\sigma = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cos\theta \frac{\pi}{180} \frac{d(2\theta)}{d(\sin^2\psi)} \quad (1)$$

여기서 E : Young율 ($7.03 \times 10^3 \text{ kgf/mm}^2$)

ν : Poisson비(0.345)

θ : 표준 Bragg 각도 (Al(222)면의 회절각도 156.7을 적용)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 과공정 Al-Si합금의 개량

3.1.1 Al-17%Si합금의 초정Si 미세화

Photo 1은 Al-17%Si 합금을 대상으로 행한 Table 2의 결과로부터 최적 미세화 조건(750°C첨가, 700°C에서 60분 유지)의 초정Si 미세화 효과를 미세화제를 첨가하지 않은 경우와 비교한 것이다. 미세화제를 첨가하지 않은 무처리 Al-17%Si 2원계 합금의 초정Si 입자크기는 평균 70 μm 정도였다. 반면, AlCuP 미세화제와

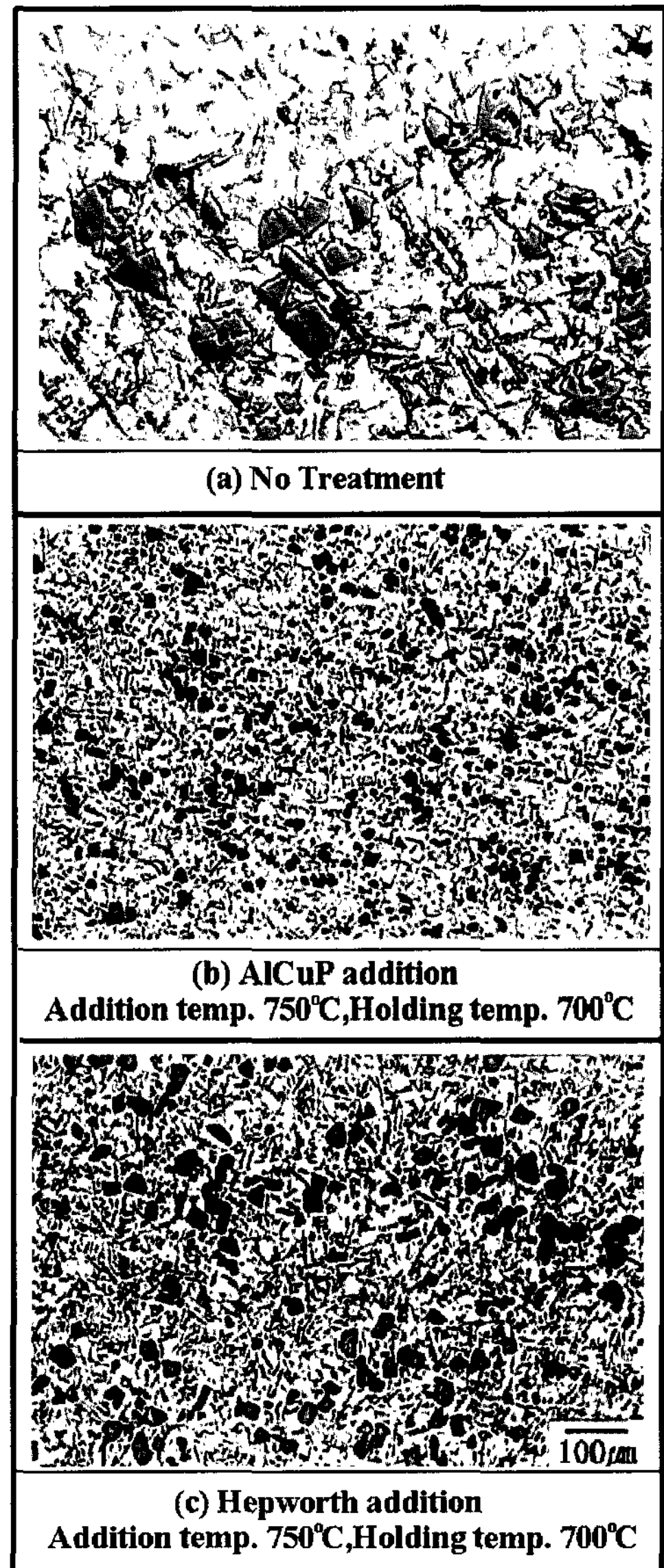


Photo 1. Comparison of primary Si modification in Al-17%Si alloys.

Hepworth 미세화제를 첨가하였을 때, 각각의 최적 미세화 조건에서 초정Si 입자크기는 35 μm 이하였다.

AlCuP 미세화제는 불균질 핵생성 위치로 작용하는 AIP를 합금 중에 형성시켜 초정Si 미세화 작용을 한다. 이것은 Cu 20%, P 1.4% 이며 나머지 Al로 구성되고, 제조공정 중에 AIP를 형성시키기 위한 열처리과정이 포함되어 있다[15]. 직접 P를 용탕에 투입시켜 AIP를 형성시키는 것보다 이미 형성된 AIP를 공급시키는 것이

므로 다른 첨가제와 비교하여 미세화 효과가 우수하고 미세화에 필요한 시간을 단축시키는 것으로 평가되고 있다[15]. AlCuP 미세화제의 경우, 유지시간에 따른 초정Si 입자크기의 변화가 완만하고 미세화 효과가 단시간에 나타나며 지속적인 효과를 나타내고 있다.

분말 Hepworth 미세화제는 용탕이 700°C로 유지될 때 비교적 우수한 초정Si 미세화 효과를 나타내었으며, 유지시간이 다소 긴 경우에 효과가 있었다.

Table 2에서 각 미세화제의 경우 최적의 조건이 다소 상이하게 나타났지만 초정Si 미세화 효과가 우수한 경우(초정Si 입자크기가 40 μm 미만)를 나타내는 유지온도는 700°C였다. 대부분의 미세화제는 750°C에서 용탕을 유지시킬 때 초정Si 미세화 효과는 감소하였으나, AlCuP 미세화제는 유지온도 750°C에서도 비교적 우수한 미세화 효과를 나타내어 용탕의 온도편차가 심한 실제 현장에 적합한 미세화제로 판단된다.

3.1.2 B.390합금의 초정Si 미세화와 복합 미세화

B.390합금의 초정Si 미세화에 사용된 미세화제는 Al-17%Si 2원계 합금의 초정Si 미세화에 적용하여 효과를

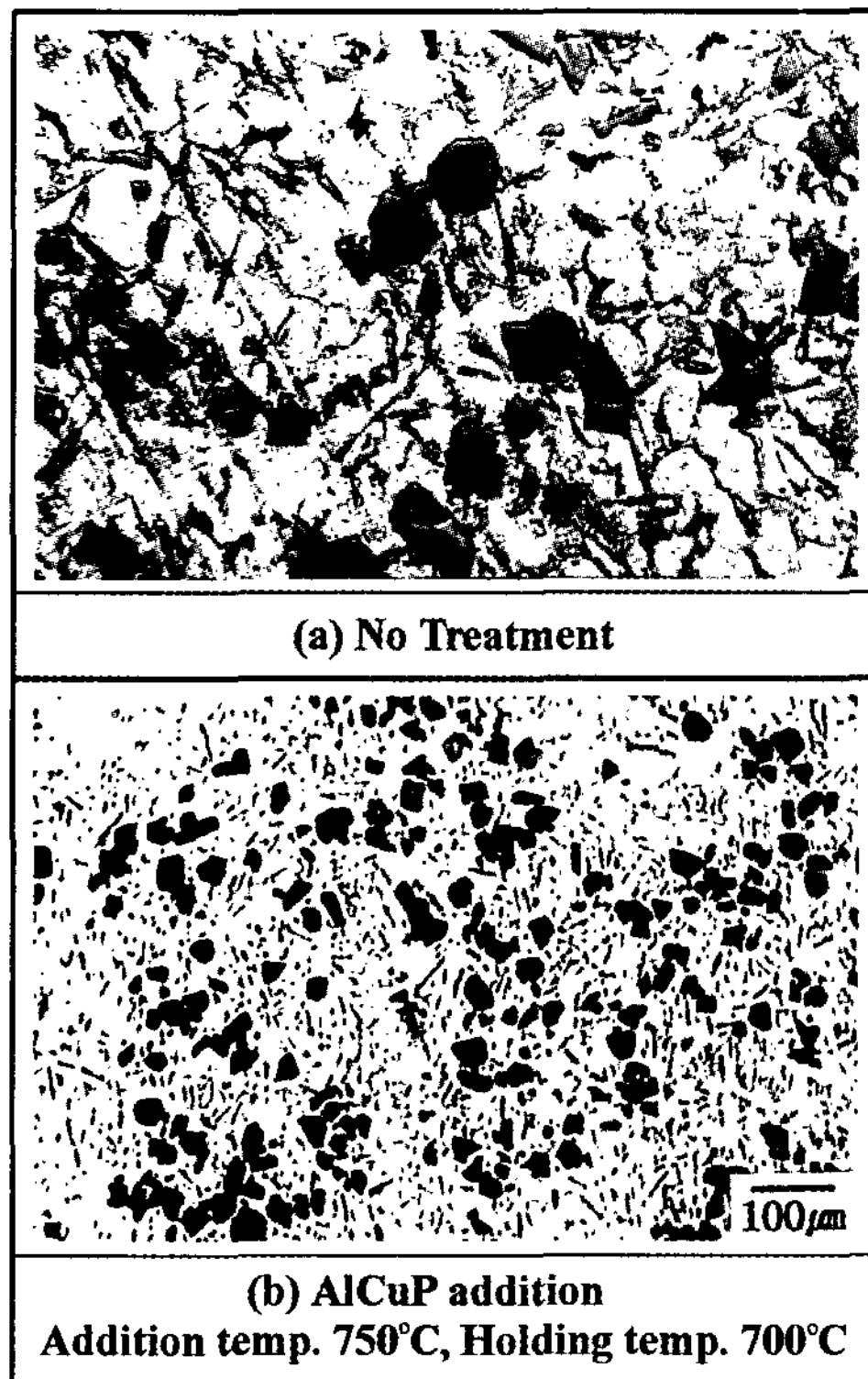


Photo 2. Comparison of primary Si modification in B.390 alloys.

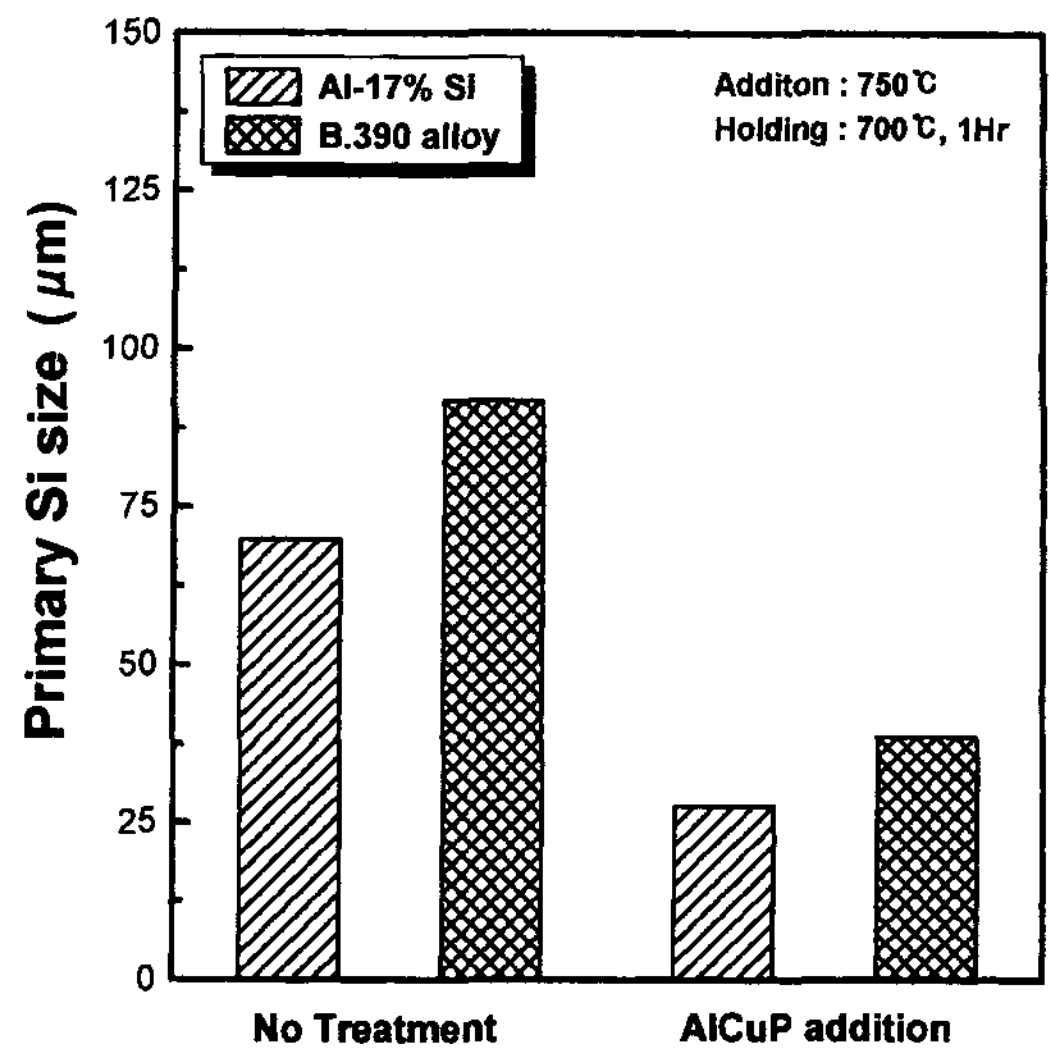


Fig. 4. Comparison of primary Si size between Al-17%Si alloy and B.390 alloy.

나타낸 AlCuP 미세화제를 사용하였다.

또한 초정Si 미세화와 더불어 공정Si 개량효과를 동시에 얻기 위한 복합미세화제로써 AlCuP 미세화제와 Sr 모합금을 연속 첨가하였다.

Photo 2는 Table 2에 나타난 최적 미세화 조건으로 AlCuP 미세화제를 B.390합금에 첨가 시켰을 때 초정Si 미세화에 대한 효과를 나타낸다.

Fig. 4와 같이 Al-17%Si 2원계 합금과 비교해 볼 때 B.390합금에서 전체적으로 초정Si의 입자크기는 조대하였다. 이것은 초정Si 핵생성시 B.390합금에 함유된 Si 이외의 합금원소에 기인된 용탕의 과냉도와 고액계면 에너지값 등이 영향을 받아 Al-17%Si 2원계 합금에 비하여 초정Si 미세화 효과가 저하된 것으로 사료된다.

Photo 3은 B.390합금에 AlCuP와 Sr을 연속 첨가한 복합 미세화 처리에 의한 공정Si 형상변화를 나타내었다. 무첨가와 비교하여 AlCuP를 첨가한 경우 침상의 공정Si 길이가 감소하였다. AlCuP와 Sr을 연속첨가한 경우, 공정Si 형상은 침상에서 막대상으로 변화됨을 알 수 있다. 초정Si 미세화와 공정Si 개량화를 목적으로 하는 복합미세화의 경우, 유지시간 30분이 경과하면 초정Si 미세화 효과는 점차 저하되고 있는 것으로 측정되었으나 공정Si의 형상변화는 일어나지 않았다. 일반적으로 침상공정Si의 형상개량은 과공정 Al-Si합금에서도 효과적으로 인장특성을 향상시키는 것으로 알려져 있다 [16]. 이와 같은 관점에서 볼 때, 초정Si 입자 미세화와

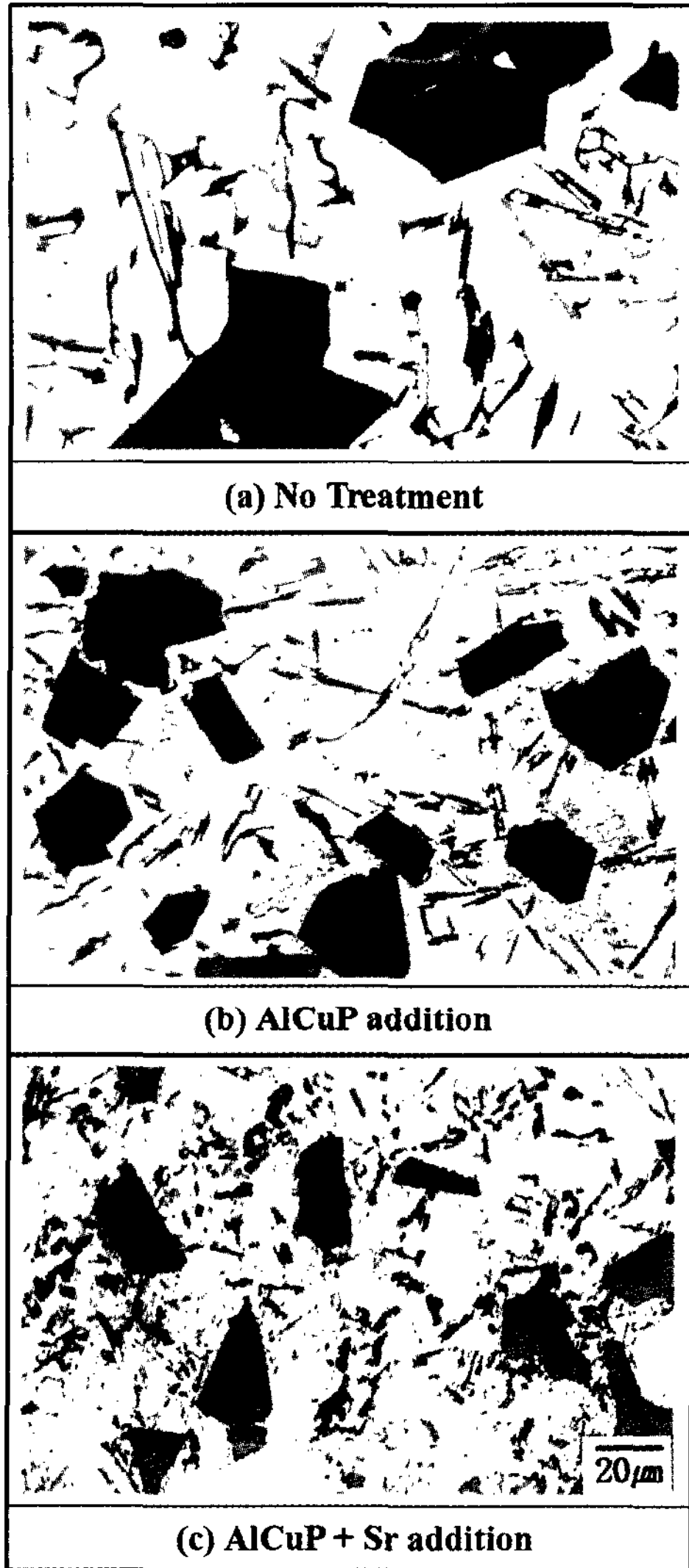


Photo 3. Morphological change of eutectic Si in B.390 alloys.

공정Si 형상개량을 도모하는 과공정 Al-Si합금의 복합 미세화는 유용한 방안으로 생각된다.

3.2 마모특성

3.2.1 초정Si 미세화와 마모량의 관계

Fig. 5는 마모거리 200m일 때, 마모속도에 따른 주방 상태 각 시료의 마모량 변화를 나타낸 것이다. 마모속도가 저속일 때 마모량이 크게 나타나며, 이것은 시편과 상대 마모재에서 이탈된 연삭 입자들이 마모과정에 참여하는 3물체연삭이 이루어진 것에 기인하는 것으로

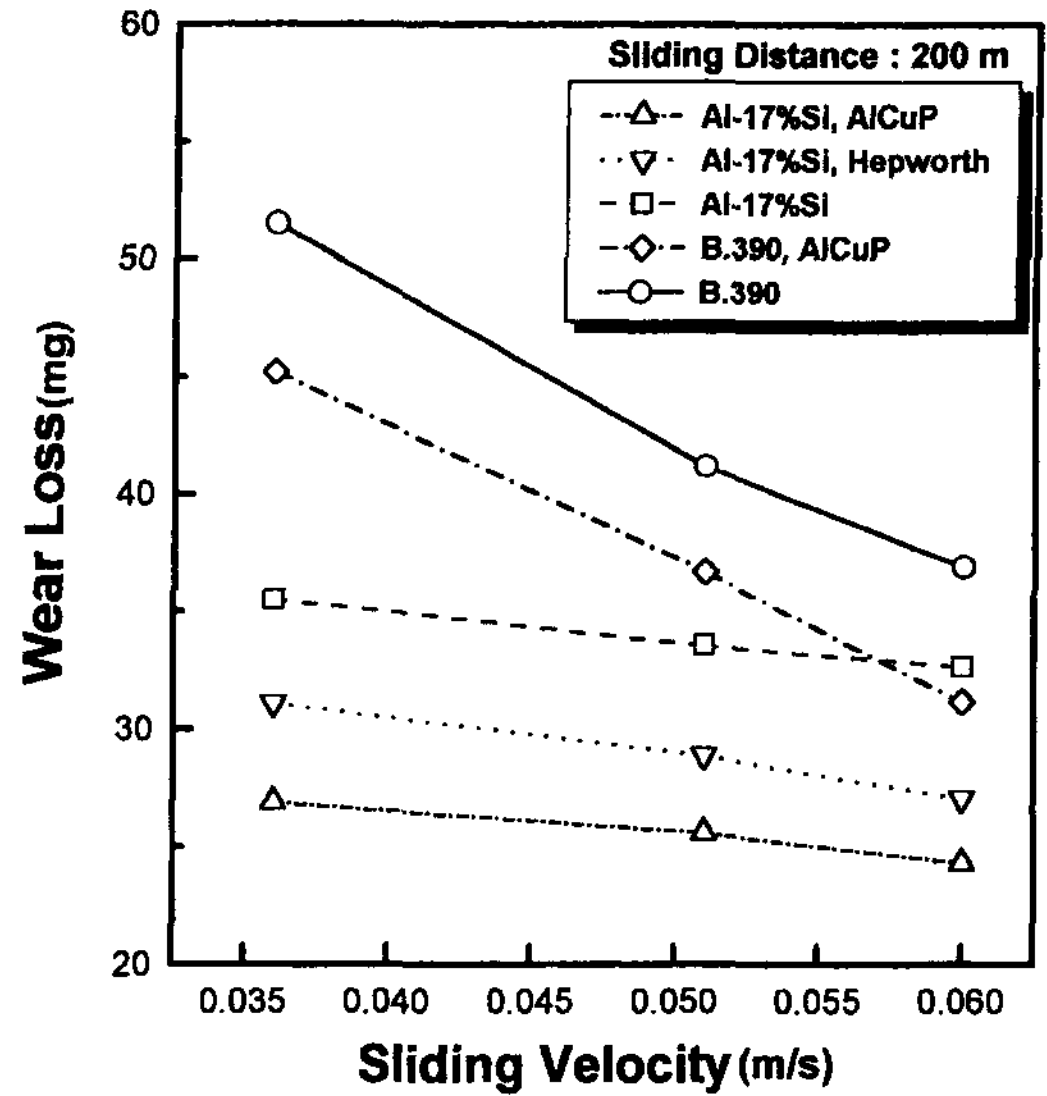


Fig. 5. Variation of wear loss with sliding velocity in as-cast alloys.

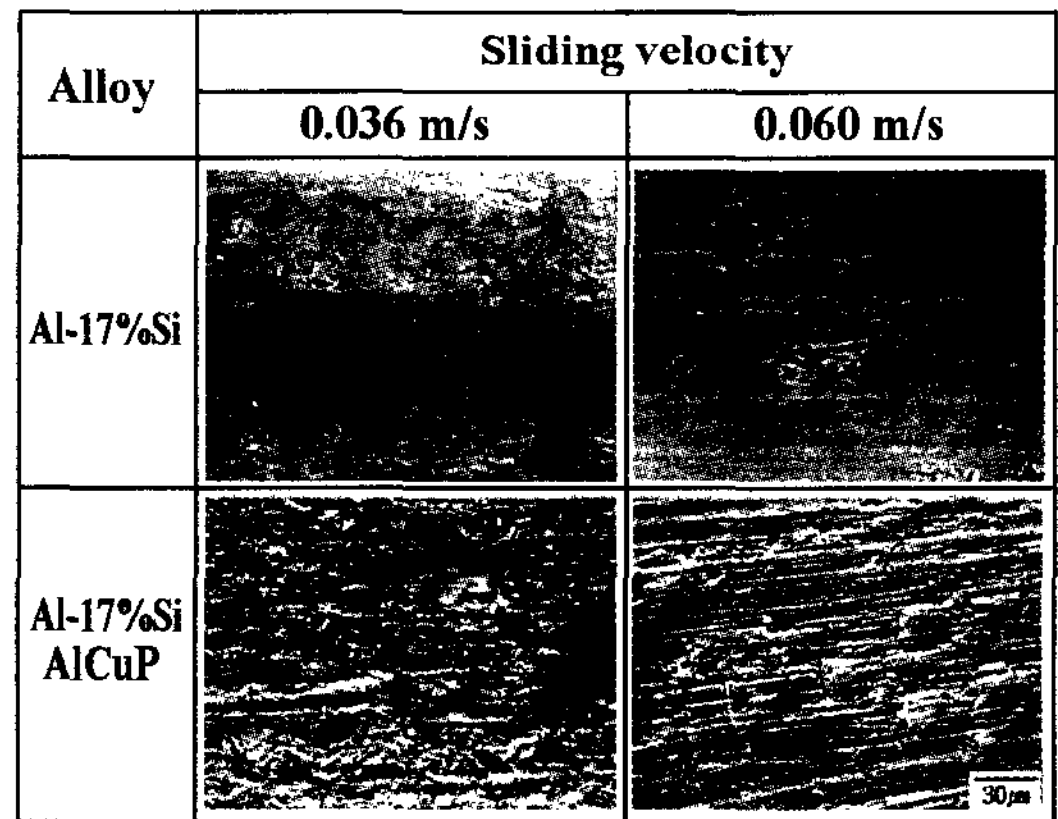


Photo 4. Variation of wear surface with sliding velocity in as-cast condition(sliding distance: 200m).

판단된다[17]. 또한, 초정Si 미세화에 의해 초정Si이 보다 미세하고 고르게 분포된 시료에서 경한 초정Si이 상대 마모재와 접촉된 상태로 마모가 진행되어 연삭 마멸량을 감소시켜[18] 마모량이 적은 것으로 추정된다.

Photo 4는 각 시료에서 마모속도변화에 따른 마멸면의 변화를 나타내었다. 마모속도가 낮은 저속마모에서 마멸면은 상대 마모재와 전면적인 접촉으로 기지금속의 마멸이 심하고, 일부 초정Si 및 공정Si이 떨어져 나간 것으로 추정되는 함몰된 부분이 고속마모의 마멸면과

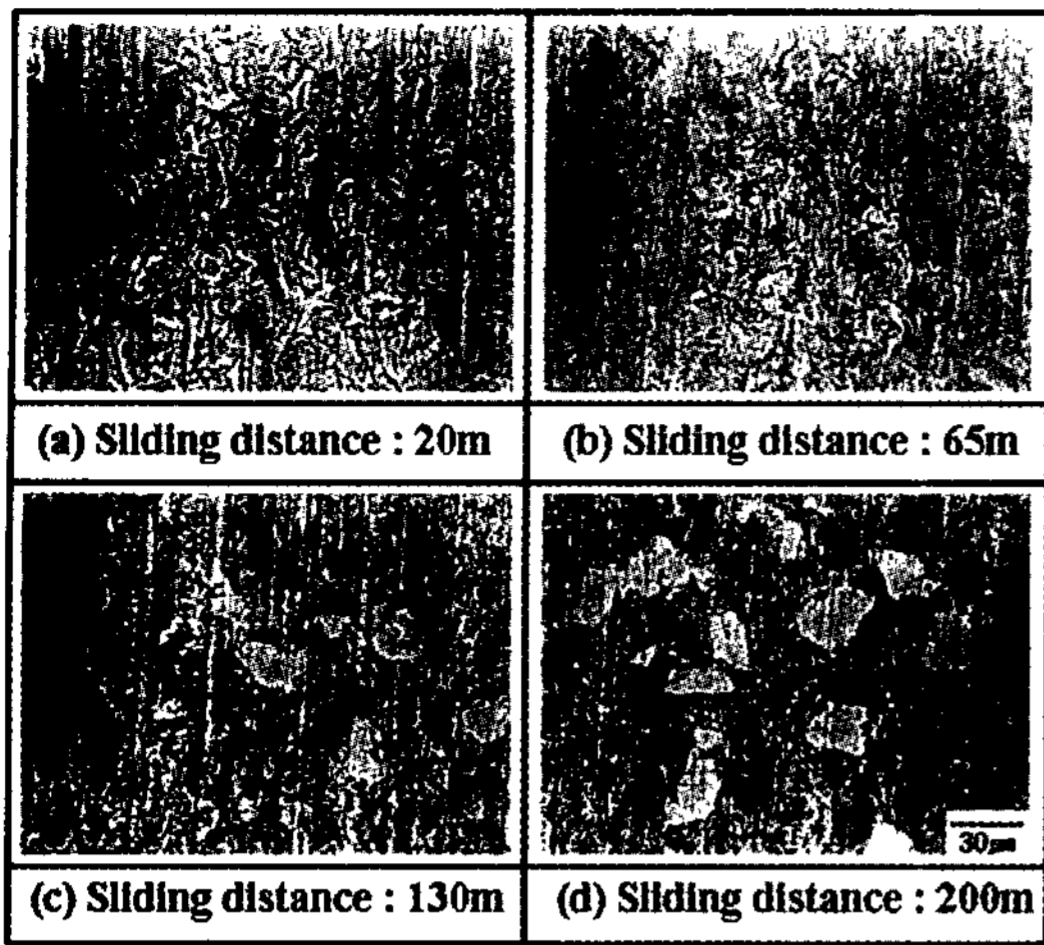


Photo 5. Variation of wear surface with sliding distance at 0.036 m/s sliding velocity in as-cast Al-17%Si (AlCuP).

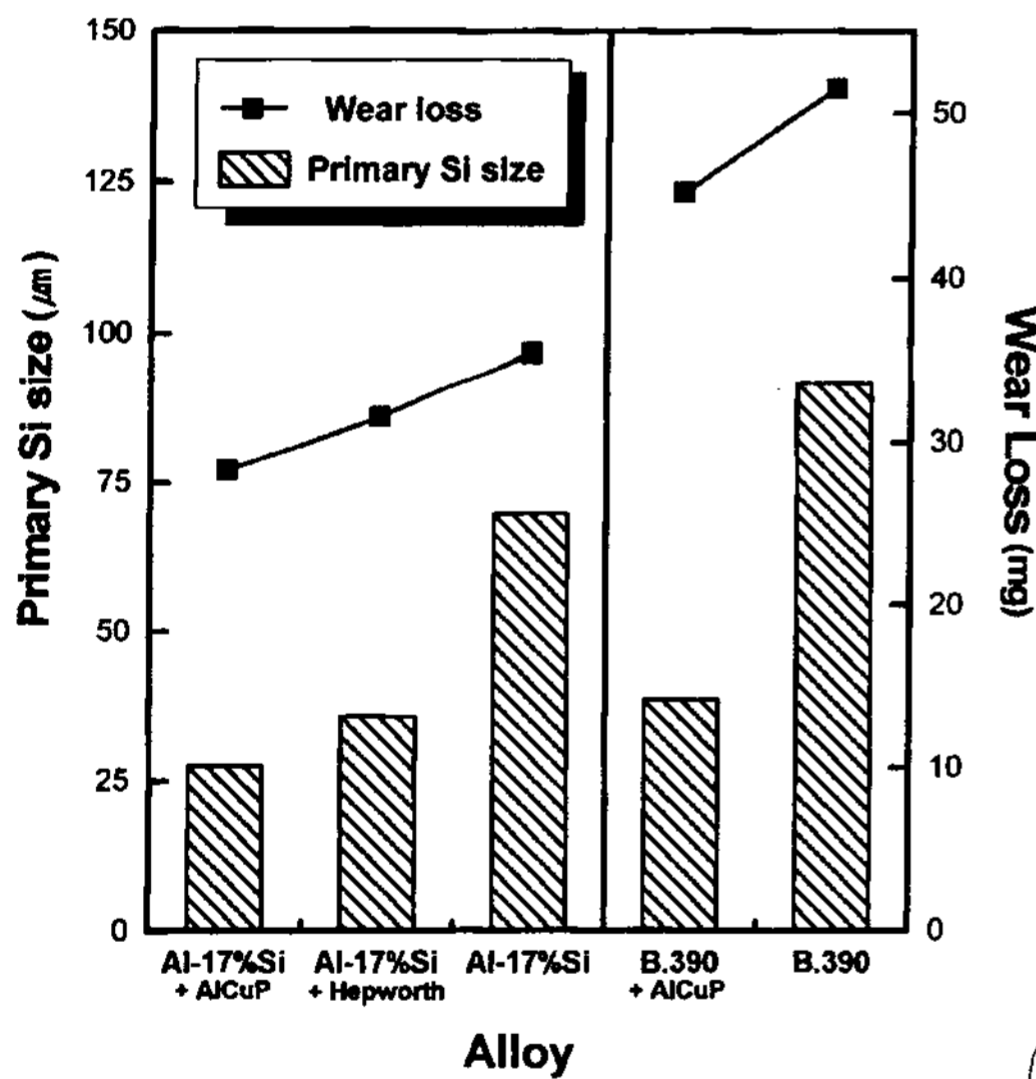


Fig. 6. Variation of wear loss with primary Si size at a condition of 0.036 m/s sliding velocity and 200m sliding distance in as-cast alloys.

비교하여 많이 나타났다.

Photo 5는 시효열처리를 하지 않은 시료에서 마모진행에 따른 마멸면의 변화를 나타낸 것으로 초기에는 기지금속이 상대 마모재와 접촉하여 일어나는 연삭마멸 현상이 발생하고, 마모가 진행됨에 따라 초정Si이 표면에 나타나고 더 이상의 마모손실은 초정Si에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

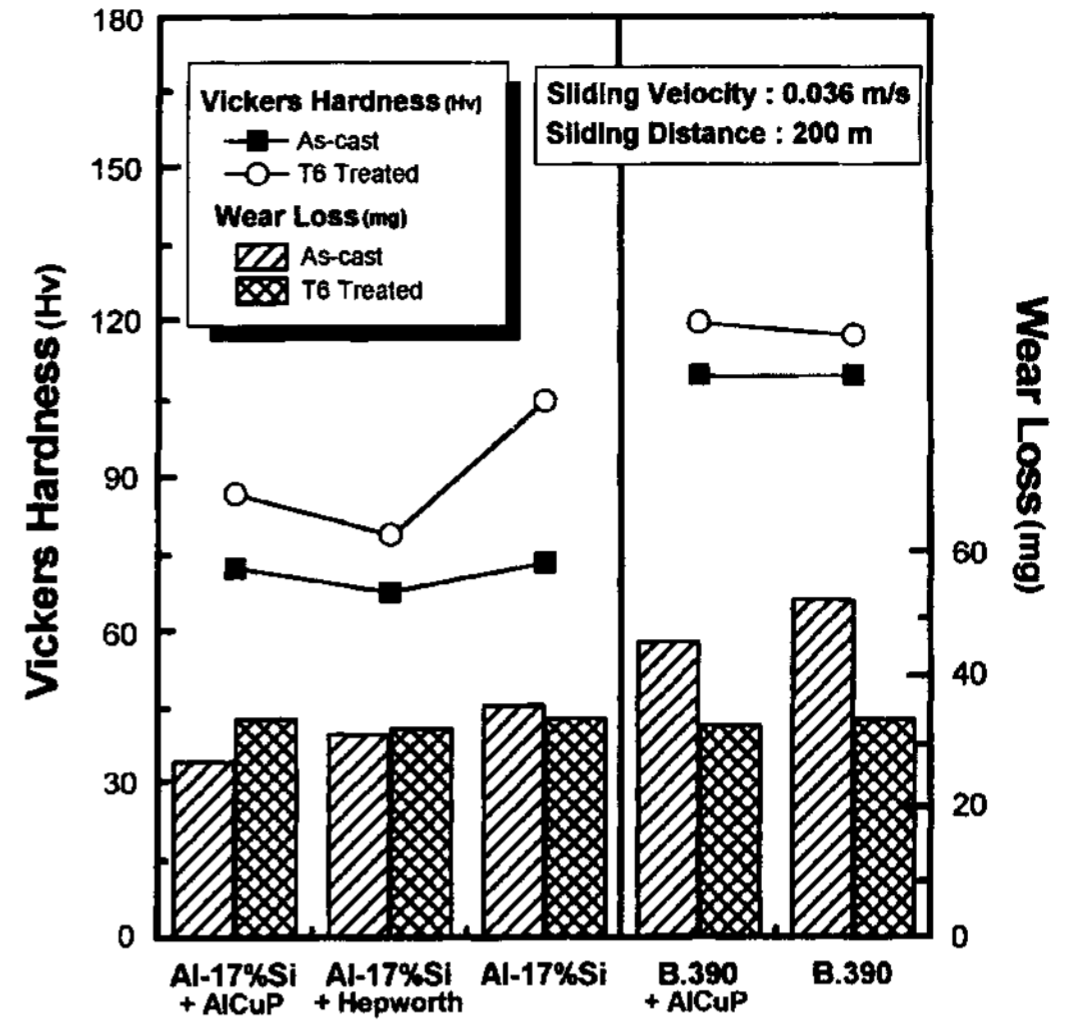


Fig. 7. Variation of wear loss with hardness for given alloys.

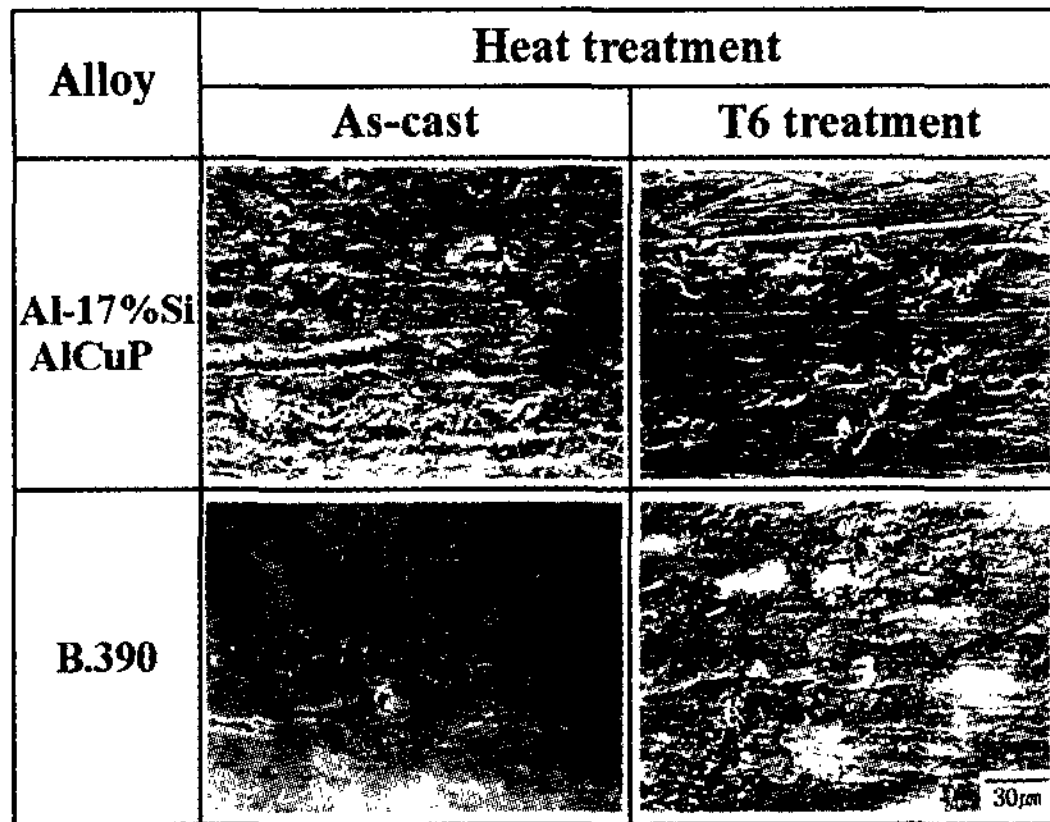
본 실험에서 적용된 모든 마모조건에서 마모량의 변화는 Fig. 6과 같이 초정Si입자가 미세할수록 마모량이 감소하였다. 이것은 과공정 Al-Si합금에서 초정Si 입자가 미세하고 고르게 분포하는 조직에서 우수한 내마모 특성을 얻을 수 있다는 기존의 보고와 일치한다[7-9, 18-19].

3.2.2 시효열처리와 마모특성의 관계

Fig. 7은 시효열처리에 의한 경도 및 마모량의 변화를 조사한 것으로 Vickers 미소 경도기를 사용하여 초정Si 입자를 배제한 기지금속부분의 경도를 측정하였다. B.390합금은 일반적으로 시효열처리에 의한 석출물의 생성때문에 경도가 증가한다. 그러나, Al-17%Si 합금은 시효열처리에 의해 석출물이 생성되지 않는 조성임에도 불구하고 시효열처리에 의해 경도가 증가하였다. 이것은 수냉에 의한 기지금속의 전위밀도 상승 및 기지금속 Al과 Si의 열팽창계수차이로 인한 기지금속내의 응력상태 변화에 기인되는 것으로 판단된다[20, 21].

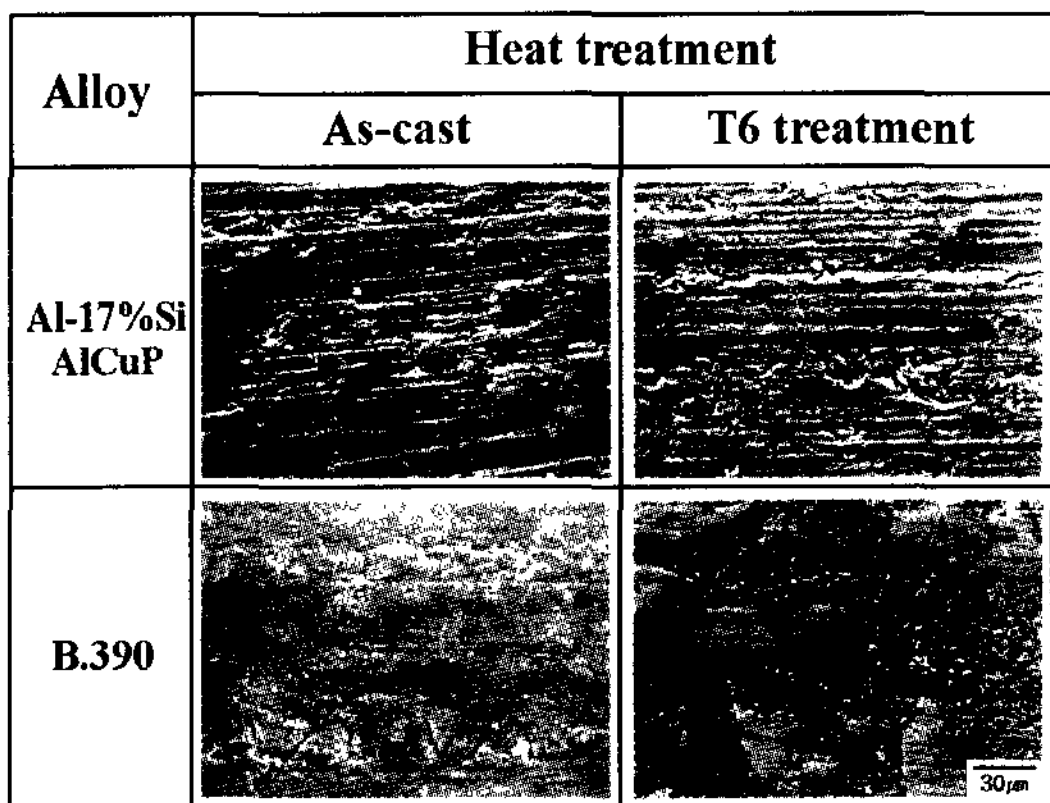
시효열처리에 의해 기지금속의 경도가 증가하였으므로 마모량이 줄어들 것으로 예측하였으나, AlCuP와 분말 Hepworth 미세화를 첨가한 Al-17%Si합금에서 시효열처리에 의해 오히려 마모량이 증가하는 것을 Fig. 7로부터 알 수 있다.

Photo 6은 열처리 전·후 마모시료의 마멸면을 비교 관찰한 것이다. B.390합금 마멸면 사진에서 나타난 것처럼 열처리로 인해 마모량이 감소한 시료의 경우, 열처리 전 마모시료는 기지금속이 연삭 마멸면을 나타내



Wear velocity : 0.036 m/s
Wear distance : 200m

(a)



Wear velocity : 0.060 m/s
Wear distance : 200m

(b)

Photo 6. Variation of wear surface with heat treatment.

는 반면 열처리후의 마멸면에는 초정Si이 많이 노출되어 있는 것으로 보아 경한 초정Si이 상대 마모재와 접촉하여 기지금속의 연삭마멸을 감소시킨 것으로 판단된다.

열처리후 마모량이 증가한 AlCuP 및 분말

Hepworth 미세화제를 첨가한 Al-17%Si 합금의 경우, 사진에 나타낸 AlCuP첨가 Al-17%Si 합금과 같이 열처리후의 마멸면에서 초정Si이 기지금속으로부터 이탈되고 남은 함몰부분의 흔적이 관측된다.

3.3.2 마모감량에 대한 기지금속의 잔류응력의 영향
시효열처리에 의해 경도가 증가하여 마멸량이 줄어들 것으로 예측되었으나, AlCuP와 Hepworth를 첨가한 Al-17%Si합금의 경우에는 시효열처리 후에 경도가 증가하였음에도 오히려 마멸량이 증가하는 현상이 나타났다.

이를 해석하기 위해 마모특성에 미치는 여러 인자들을 검토하던 중 기지금속의 응력상태에 착안하여 X선 회절에 의한 시편의 잔류 응력을 측정하였다.

Table 4는 $2\theta\text{-sin}^2\psi$ 법에 의해 측정된 Al기지금속내의 잔류응력과 $2\theta\text{-sin}^2\psi$ 의 기울기 값이다. 기울기 값이 양(+)의 값이므로 잔류응력은 음(-)의 값이 되어 Al기지금속에는 압축 잔류응력이 작용하고 있다.

Fig. 8은 시효열처리 전·후의 마모량과 Al기지금속의 잔류응력과의 관계를 나타내고 있다. 압축 잔류응력이 클수록 마모량은 감소되고 있다. AlCuP과 분말 Hepworth를 첨가한 Al-17%Si 합금에서 시효열처리 후의 마모량 증가는 시효열처리 후의 압축 잔류응력의 감소와 일치하고 있다.

이것은 열처리 후 초정Si을 둘러싼 기지금속의 압축 응력 약화로 초정Si이 마모과정 중에 표면에서 이탈되어 마모량이 증가한 것으로 판단된다. 따라서, 금속과 비금속으로 구성된 2상 복합조직을 갖는 과공정 Al-Si 합금에서 마모량은 기지금속의 잔류응력과 밀접한 관련성이 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

- 1) Al-17%Si 합금의 초정Si 미세화 효과는 B.390 합금보다 우수하였다.

Table 4. Experimental result of residual stress measurements

Alloy	Slope of $2\theta\text{-sin}^2\psi$		Residual compressive stress (kgf/mm ²)	
	As-cast	T6 treatment	As-cast	T6 treatment
Al-17%Si	1.08	1.82	9.9	16.6
Al-17%Si, AlCuP	0.68	0.52	6.2	4.7
Al-17%Si, Hepworth	0.51	0.44	4.65	4.0
B.390	0.80	2.91	7.2	26.5
B.390, AlCuP	0.98	1.33	8.8	11.8

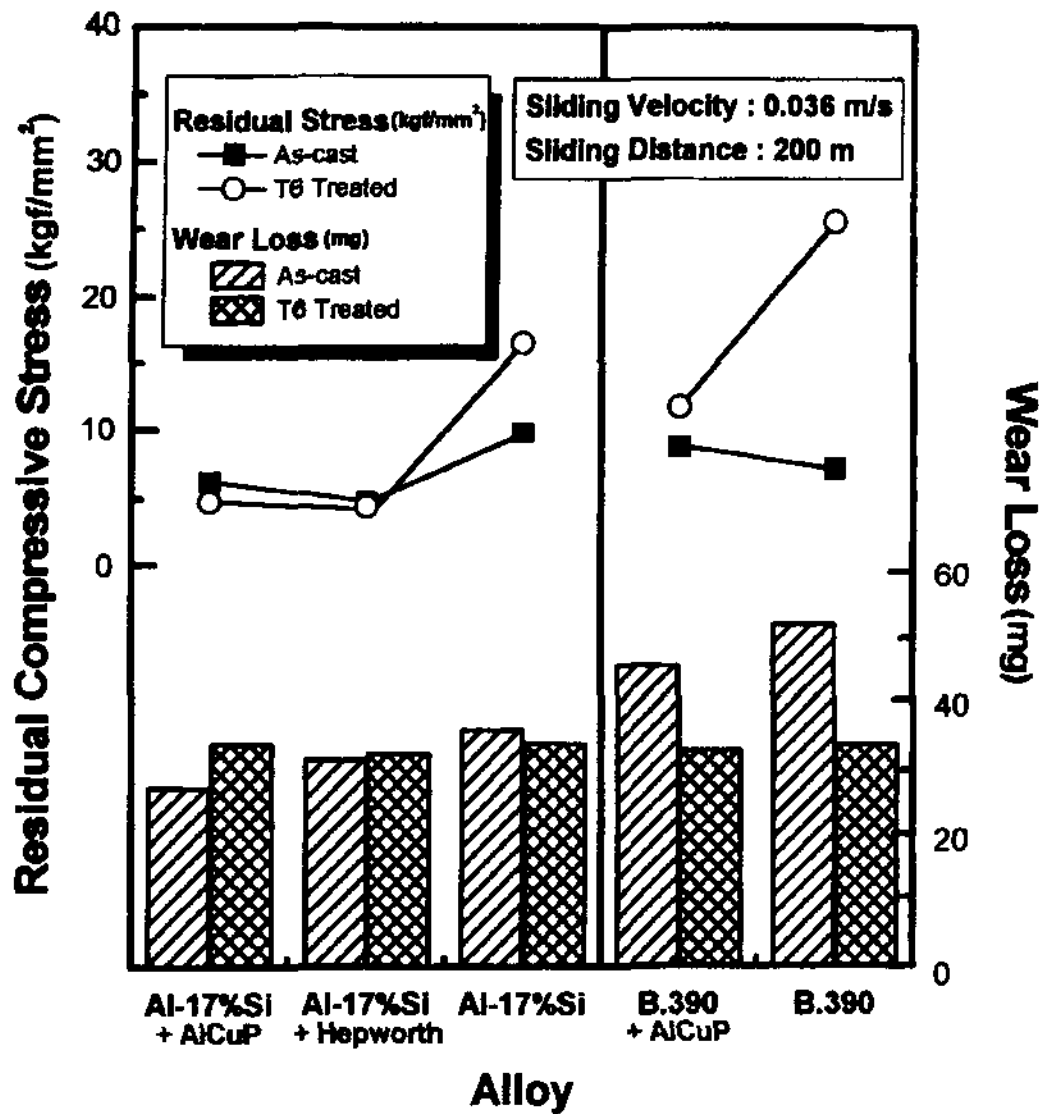


Fig. 8. Variation of wear loss with residual stress for given alloys.

Al-17%Si 합금의 초정Si 최적 미세화 조건은 AlCuP 미세화제를 750°C에 첨가하고, 700°C에 용탕을 유지시킬 때였다.

2) 주방상태에서 시편종류에 따른 마멸량은 B.390합금, B.390합금에 AlCuP 첨가, Al-17%Si합금, Al-17%Si합금에 AlCuP첨가한 합금의 순서로 감소하였으며, 초정Si이 미세할수록 마모량이 감소하였다.

3) 시효열처리에 의해 마모량이 증가한 AlCuP첨가 Al-17%Si합금과 Hepworth 첨가 Al-17%Si합금은 시효열처리로 인해 기지 금속의 압축 잔류응력이 감소하였다.

4) AlCuP 및 Hepworth를 첨가한 Al-17%Si합금에서 시효열처리 후의 마모량이 상대적으로 시효열처리 전의 마모량보다 증가한 것은 시효열처리에 의해 초정Si을 둘러싼 기지금속의 압축 잔류응력이 약화되면서 초정Si이 마모과정 중 표면에서 많이 이탈된 것이 원인으로 사료된다.

후 기

본 연구는 1999년도 부경대학교 기성회연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] N. Tenekedijiev, J. E. Gruzleski : Cast Metal., 3(1990) 96
- [2] J. L. Jorstad : AFS Trans., 92(1984) 573
- [3] Metals Handbook, Properties and Selection : Nonferrous Alloy and Special Purpose Materials, ASM, Metals Park, OH., USA, Vol.2, 1992, P.171
- [4] H. Y. Seo, Y. S. Choi, W. T. Kim and H. Y. Ra : J. Kor. Inst. Met. & Mater., 37(1999)1310
- [5] S. C. Lim, M. Gupta, Y. F. Leng and E. J. Lavenia ; J. Mater. Proc. Tech., 63(1997)865
- [6] J. M. Lee, S. B. Kang and S. C. Yoon : Metals and Materials, 5(1999)357
- [7] P. Mandal, A. Saha and M. Chaakraborty : AFS Trans., 99(1991)643
- [8] M. Gupta and E. J. Lavernia : J. Mater. Proc. Tech., 54(1995) 261
- [9] A. D. Sakar and J. Clarke : Wear, 75(1982) 71
- [10] J. Zhou, J. Duszczek and B. M. Korevaar : J. Mater. Sci., 26(1991) 3041
- [11] A. J. Clegg : International Molten Aluminum Processing (1986)269
- [12] Y. Shimizu et al : J. Japan Inst. Light Metals, 37(1987)517
- [13] H. R. Shetty and Twu-Wei Choo : Metall. Trans., 16A (1985) 853
- [14] S. I. Tanaka : J. Japan Inst. metals, 29(1990) 924
- [15] Wolfgang Schneider : Light Metals, (1993)815
- [16] T. Kobayashi, H. J. Kim and M. Niinomi : Mater. Sci. & Tech., 13(1997) 497
- [17] Karl-Heinz Zum Gahr : Microstructure and Wear of Materials Technology Series, 10(1987)12
- [18] C. Y. Lim and S. B. Kang : J. Korean Inst. Met. & Mater., 32(1994) 336
- [19] F. Yilmaz and R. Elliott : J. Mat. Sci., 24(1989)2065
- [20] D. C. Dunand and A. Mortensen : Acta metall. Mater., 39 (1991)127
- [21] D. J. Lloyd : Acta metall. Mater., 39(1991)59