

## B.390 알루미늄 합금의 마모특성에 미치는 초정Si 입자크기와 잔류응력의 영향

김현주\* · 김성재

부경대학교 신소재공학부 금속시스템공학과  
부경대학교 대학원 금속공학과

### Effect of Primary Si Size and Residual Stress on the Wear Properties of B.390 Al Alloys

Heon-Joo Kim\* and Sung-Jae Kim

Dept. of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**Abstract** Wear behaviour of B.390 aluminum alloy with different particle sizes of primary Si against a SM45C counterface was studied as a function of wear load and sliding velocity, using pin-on-disk apparatus under dry condition. The wear rate of specimen with fine primary Si particles showed increased wear resistance at high wear load, on the other side wear resistance of coarse primary Si particle size was improved at low wear load. As the compressive residual stress in the matrix increased remarkably by liquid nitrogen(LN) treatment, wear resistance of the LN treated specimen was more excellent than that of T6 treated specimen.

(Received December 29, 2005; accepted January 20, 2006)

**Key words:** B.390 aluminum alloy, Primary Si particle size, Heat treatment conditions, Compressive residual stress, Wear behaviour

#### 1. 서 론

과공정 Al-Si 합금은 열팽창계수가 적고 높은 탄성계수와 우수한 구조성 그리고 높은 비강도를 가지고 있어 최근 자동차 실린더 라이너, 엔진블록, 피스톤, 펌프 등의 소재와 같이 연속적인 작동으로 인하여 강도특성과 함께 내마모특성이 기본적으로 요구되는 부품에 많이 이용되고 있다[1-4].

이러한 과공정 Al-Si 합금은 다각형의 초정Si 입자가 공정Si 기지에 분포되어 있어 내마모성과 고온강도가 우수한 특징을 가지는 것으로 알려져 있으며, 초정Si 입자의 체적율이 증가할수록, 또한 입자의 크기가 미세할수록 높은 인장 강도값을 나타내며, 특히 입자의 크기가 작을수록 우수한 인성을 지니는 것으로 보고되고 있다[5-7]. 초정Si 입자를 미세하고 균일하게 분포시켜 내마모 특성을 극대화시키기 위한 초정Si 미세화에 관한 연구가 진행되고 있으나, 마모 특성에 미치는 초정Si 입자의 크기와 양의 영향에

대해서는 최근까지도 서로 다른 결과를 보고하고 있다[8-10]. 이러한 이유는 한 재료의 마멸거동이 마모 환경이나 마모조건이 달라짐에 따라 매우 복잡한 형태로 변화하기 때문이다.

마모현상은 마모기구별로 표면피로마모, 연삭마모, 응착마모, 부식마모의 4가지로 크게 분류하는 것이 일반적이며[11-13], 알루미늄합금의 마모거동은 일반적인 환경에서 실험조건에 따라 MML(Mechanical Mixed Layer)형성에 의한 연삭마모와 마찰 전단력에 의한 표면층 박리, 응착마모 등으로 구분된다[14]. 또한 마모의 진행과정에 따라 마멸면의 형상 및 마멸량은 마모속도, 하중, 마모거리, 마모면 온도 등에 영향을 받게 된다.

본 연구에서는, 과공정 Al-Si합금의 경우, 비금속 Si과 기지금속의 큰 열팽창률 차이로 인해 제조과정과 열처리과정에서 2상간의 열응력 불일치에 의한 잔류응력이 발생하나, 이들 재료의 마모거동을 논함에 있어 근원적인 잔류응력의 영향이 고려되지 않은

\*E-mail : metjoo@pknu.ac.kr

Table 1. Chemical composition of B.390 Al alloys

| Alloys         | Si   | Cu  | Mg   | Zn   | Mn   | Fe   | Al   |
|----------------|------|-----|------|------|------|------|------|
| B.390 Standard | 17.0 | 4.5 | 0.55 | <1.5 | <0.5 | <1.3 | Rem. |
| B.390 Used     | 18.7 | 4.0 | 0.56 | 0.68 | 0.13 | 1.0  | Rem. |

점에 주목하였다.

따라서 본 연구에서는 B.390 알루미늄합금의 마모 특성에 미치는 초정Si 입자크기의 영향을 조사하기 위해, 용탕 내 Ca함량 제어를 통해 초정Si 입자크기를 변화시킨 시편들을 대상으로 마모특성에 대한 실험을 행하였다. 또한, 내마모특성에 미치는 잔류응력의 영향을 조사하기 위해 주조상태(As cast), T6처리, WQ처리, LN처리 상태로 열처리 과정을 변화시켜 기지금속의 잔류응력을 변화시킨 시편들을 대상으로 마모특성 실험을 행하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시료제조

본 연구에 사용된 재료는 Aluminum Association(AA) B.390합금으로 분류되며 발광분석기(Spark emission analyzer)로 측정된 화학조성은 Table 1과 같다.

용제작업은 4번 흑연도가니를 사용한 실리코니트 전기로에서 행하였으며, 잉고트 용타이 일어나는 온도에서 플럭스를 도포하고 800°C까지 승온한 후, Ca성분 첨가 또는 미세화 처리를 행하고 750°C에서 30분간 진정시킨 후 금형에 주입하였다. B.390합금의 용해온도가 750°C~800°C 정도로 상대적으로 높아 용해가스로 인한 기공이 많이 발생하는 경향을 나타내므로 용탕을 주입 후 700 mm Hg 감압 분위기 응고를 실시하여 탈가스를 촉진하였다.

#### 2.1.1 초정Si 입자크기 변화 유도

본 실험에서는 마모실험에 사용할 B.390합금의 초정Si 입자크기 변화를 유도하기 위해 용탕 내 Ca성분 함량을 조절하였다. 불순물 원소로 함유되는 Ca 성분이 초정Si 입자크기에 미치는 영향[15,16]에 주목하여 용탕 Ca함량을 변화시켜 B.390합금의 초정Si 입자크기에 변화를 유도하였다.

용탕 내 Ca함량 증가로 인한 초정Si 입자의 조대화를 유도하기 위해 Al-4.5 wt% Ca 모합금을 적정량 첨가하여 용탕의 Ca함량을 증가시켰으며, 또한 탈 Ca처리를 통한 초정Si 입자 미세화를 유도하기 위해 용탕의 탈 Ca처리를 행하였다. 용탕의 탈 Ca처리는 용융금속의 용해온도 구간에서 Ca와 친화력이 큰 염화물로 칼슘염화물(CaCl<sub>2</sub>)을 형성시켜 Ca성분을 감소시켰으며, 탈Ca용 첨가제로 사용된 Ti<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>와 CuCl<sub>2</sub>화합물의 1회 첨가량은 용탕량의 0.6 wt%였다.

### 2.2 잔류응력 유도열처리

기지금속과 강화재의 열팽창 차이에 의한 기지금속 내의 잔류응력을 증대시키는 열처리 방법을 적용하여 B.390 알루미늄합금의 내마모특성에 미치는 영향을 조사하였다.

용탕 내 Ca함량 제어를 통해 초정Si 입자크기를 변화시킨 잉고트를 마모시편으로 가공한 뒤 500°C에서 4시간동안 용체화 처리한 후 250°C에서 4시간동안 인공시효하는 T6처리(T6 treatment), 500°C에서 4시간동안 용체화 처리한 후 수냉한 WQ처리(Water quenching treatment: WQ) 및 500°C에서 4시간 유지시킨 시료를 액체질소에 퀘칭하는 LN처리(Liquid nitrogen treatment: LN)를 하여 기지내의 압축잔류응력을 변화시켜, 마모특성에 미치는 압축잔류응력의 영향을 살펴보고자 하였다.

### 2.3 잔류응력의 측정

재료 내에 응력이 존재하면 결정의 격자정수가 변화되어 X선의 회절각도가 변화하는 원리[17]를 이용하여 Table 2의 조건으로 Al 기지금속내의 잔류응력을 측정하였다. 시료면 법선 N와 격자면 법선 N' 사이의 각  $\psi$ 에 대한 회절각도(2 $\theta$ )의 변화를 측정하여, 2 $\theta$ 와  $\sin^2\psi$ 의 관계로부터 최소자승법에 의해 기울기를 구하고 다음과 같이 응력을 산출하였다[18].

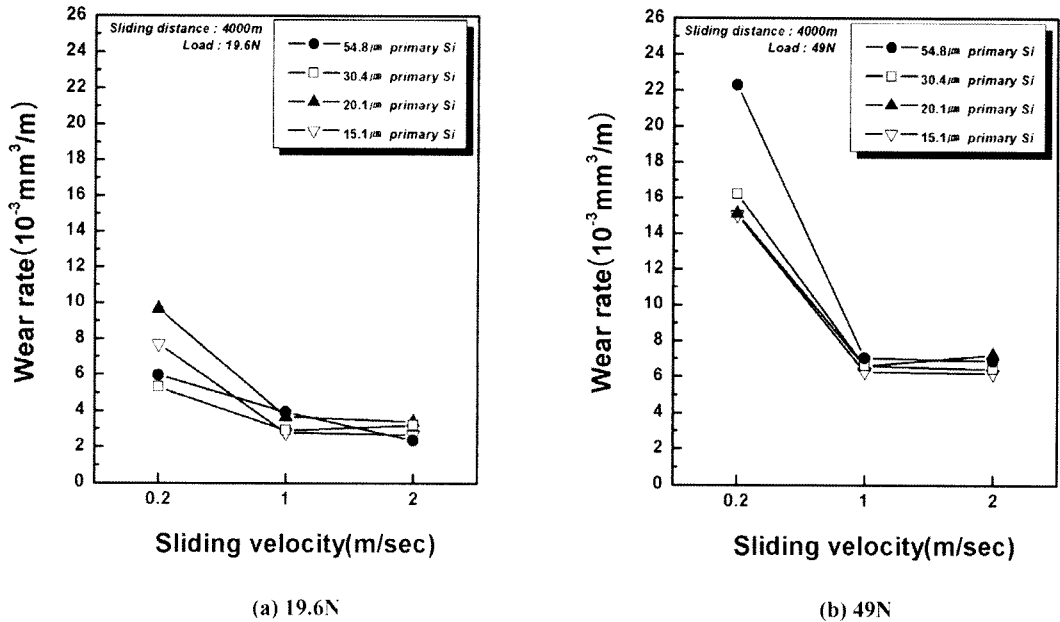


Fig. 1. Effect of primary Si size on wear rate of B.390-T6 alloy tested at 19.6 N and 49 N.

Table 2. Experimental condition for X-ray stress measurement

| Method                   | 2θ - sin <sup>2</sup> ψ method |
|--------------------------|--------------------------------|
| Characteristic X-ray     | Co-Kα                          |
| Diffraction plane        | Al(3 3 1)                      |
| 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                   | Fe                             |
| Tube voltage             | 40KV                           |
| Tube current             | 30mA                           |
| Divergent angle          | 1 deg                          |
| Scanning speed           | 1 deg/min                      |
| Time constant            | 20 sec                         |

θ : 표준 Bragg 각도(Al(331)면의 회절각도 148.7을 적용)

### 2.4 마모 시험장치 및 시험 조건

마멸특성의 비교를 위하여 pin-on-disk 마모 시험기를 사용하여 상온에서 건식 마모실험을 행하였다. 시편은 각각 10 mm×10 mm×10 mm로 가공한 다음 열처리를 하여 가공에 대한 잔류응력의 영향을 배제 시켰다. 마멸면으로 사용될 면의 표면조도는 평균 Ra 0.35로 일정하게 연마하여 본 연구에 사용하였다. 마모시험 상대재 디스크는 SM45C 강판을 열처리하였으며, 마모시험마다 상대재는 다시 연마하여 표면경도 HRc 45 ± 2, 평균 표면조도 Ra 0.5가 일정하게 유지되도록 하였다. 본 연구에서 채택한 마모시험의 활주거리는 4000 m로 고정하고, 하중과 활주속도를 변화시켜 마멸특성의 변화를 관찰하였다.

마찰계수는 마모시험기의 Load cell에서 측정된 마찰력을 수직 하중으로 나누어 계산하였다. 마모시험 전후의 시편과 디스크는 아세톤으로 15분간 초음파 세척하여 시편 표면에 묻어있는 먼지와 기름기 등을 제거하였고 마멸량 측정은 마모시험 전후의 무게변화를 0.001 mg까지 측정하여 계산하였다. 본 연구에

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

여기서, E : Young율(7.03×10<sup>3</sup>kg/mm<sup>2</sup>)  
 ν : Poisson비(0.345)

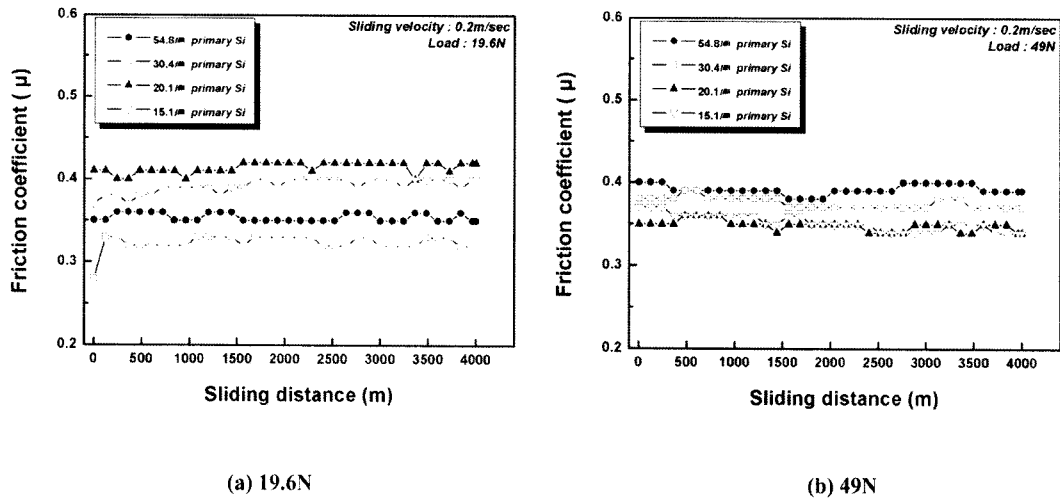


Fig. 2. Effect of primary Si size on friction coefficient of B.390-T6 alloy tested at 0.2 m/sec.

서 마멸량은 부피마멸율(Volumetric wear rate)로 나타내었다. 즉, 부피마멸율( $\text{mm}^3/\text{m}$ )은 정밀 전자저울로 측정된 마멸량을 시편의 밀도로 나눈 부피마멸량을 다시 마모시험 활주거리로 나누어서 계산하였다.

주사전자현미경(SEM)으로 마모시험 후 마멸면 형상, 마멸입자의 형상과 마멸입자의 성분분석을 행하였다. 초정Si 입자크기 변화 및 기지내 잔류응력 변화에 따른 마멸량의 변화를 고찰하기 위하여 마찰계수 측정, 상대마모재의 표면거칠기(Ra) 측정 및 마멸면 발생결과 기지금속의 경도를 측정하여 마모의 진행과정을 고찰해 보았다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직

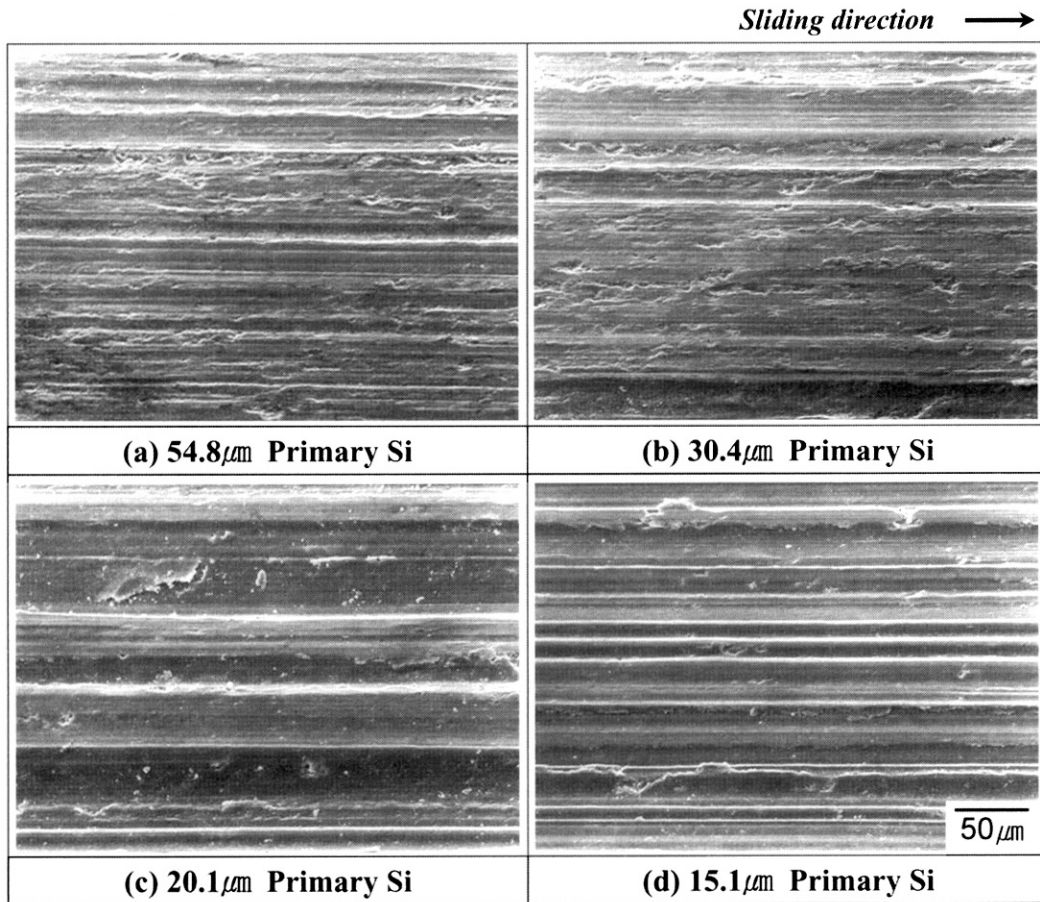
미세화처리에 따라 변화된 용탕 내 Ca함량에 대한 초정Si 입자크기를 조사하였다. 미세화처리 및 Ca 첨가에 따른 초정Si 입자크기의 변화를 확인하기 위해 사용된 시료들은 각 잉고트의 일정 위치에서 채취하여 냉각속도의 영향을 배제하였다. 용탕 내에 잔류한 Ca함량이 감소할수록 초정Si 입자크기가 감소하였으며, 측정된 초정Si 입자의 크기는 각각 54.8  $\mu\text{m}$ , 30.4  $\mu\text{m}$ , 20.1  $\mu\text{m}$ , 15.1  $\mu\text{m}$ 의 순서로 감소하였다.

#### 3.2 마멸특성

##### 3.2.1 초정Si 입자크기와 마모감량의 관계

Fig. 1은 T6열처리를 행한 B.390 합금의 초정Si 입자크기 변화에 따른 마모감량 변화를 나타낸 것이다. 마모하중 19.6 N의 저속마모(0.2 m/sec)에서 초정Si 입자크기가 상대적으로 조대한 54.8  $\mu\text{m}$ 시료와 30.4  $\mu\text{m}$ 시료의 마모감량이 20.1  $\mu\text{m}$ 시료와 15.1  $\mu\text{m}$ 시료에 비해 낮게 측정되었으며 30.4  $\mu\text{m}$ 시료가 가장 낮은 마모감량을 나타내고 있다. 그러나 마모하중이 49 N으로 증가할 경우, 54.8  $\mu\text{m}$ 시료와 30.4  $\mu\text{m}$ 시료의 마모감량이 20.1  $\mu\text{m}$ 시료와 15.1  $\mu\text{m}$ 시료에 비해 급격히 증가하며, 마멸기구가 서로 상이한 저속마모(0.2 m/sec)에서 마모감량의 차이가 현저함을 알 수 있다.

Fig. 2는 마모시험시 측정된 마찰계수값을 나타낸 것이다. 19.6 N의 마모하중에서는 마모감량이 낮게 나타난 54.8  $\mu\text{m}$ , 30.4  $\mu\text{m}$ 시료의 마찰계수값이 20.1  $\mu\text{m}$ 시료와 15.1  $\mu\text{m}$ 시료에 비해 낮게 측정되었다. 그러나 49 N으로 마모하중이 증가한 경우에는 20.1  $\mu\text{m}$ 과 15.1  $\mu\text{m}$ 시료의 마찰계수값은 큰 변화가 없는 반면, 54.8  $\mu\text{m}$ 과 30.4  $\mu\text{m}$ 시료의 마찰계수값은 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 미루어 볼 때, 마모하중이 낮은 경우에는 강화재의 입자크기가 조대할수록 마모하중 지탱이 유리하여 상대적으로 상대 마모재의 연삭이 심해지고



**Fig. 3.** Effect of primary Si size on the shape of worn surface of B.390-T6 alloy tested at 19.6 N and 0.2 m/sec.

시료의 마멸면에 물질전이층(transfer layer)이 두껍게 형성되어 고체 윤활작용[19-21]에 의한 기지금속의 보호성향이 더욱 효과적으로 작용하였기 때문으로 판단된다. 반면, 마모하중이 높은 경우에는 높은 마모하중과 전단력에 의해 파괴된 조대한 초정Si 입자들이 기지금속으로부터 분리되어 3물체 연삭거동[22, 23]에 의한 마멸홈을 깊게 형성하고, 또한 마찰하중과 전단력에 의한 subsurface의 피로균열이 마찰표면으로부터 깊게 형성되어 표면층박리(delamination) 현상이 증가하기 때문인 것으로 판단된다[14, 22, 23]. 즉, subsurface에 초정Si 입자들이 미세하고 균일하게 분포할 경우, 강화재 입자들의 단위면적당 하중지탱능력이 높아지게 되며, 또한 3물체 연삭에 의한 마멸홈이 상대적으로 낮게

형성되어 마모에 대한 저항을 높이는 것으로 생각된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 19.6 N, 49 N의 마모하중 조건에서 각 초정Si 입자크기에 따른 마멸면의 형태를 나타낸 것이다. 마모하중이 19.6 N인 경우, 상대적으로 마모감량이 높게 나타난 20.1  $\mu\text{m}$ , 15.1  $\mu\text{m}$ 시료의 마멸면에서 3물체 연삭에 의한 마멸홈 흔적이 54.8  $\mu\text{m}$ , 30.4  $\mu\text{m}$ 시료에 비해 비교적 깊게 형성된 것을 확인할 수 있다. 마모하중이 49 N으로 증가한 54.8  $\mu\text{m}$ , 30.4  $\mu\text{m}$ 시료의 경우에는 기지금속으로부터 초정Si 입자의 분리 및 표면층이 박리된 형태를 관찰할 수 있으며, 마모하중이 증가함에 따른 이러한 경향이 20.1  $\mu\text{m}$ , 15.1  $\mu\text{m}$ 시료에 비해 더욱 뚜렷한 것을 확인할 수 있었다.

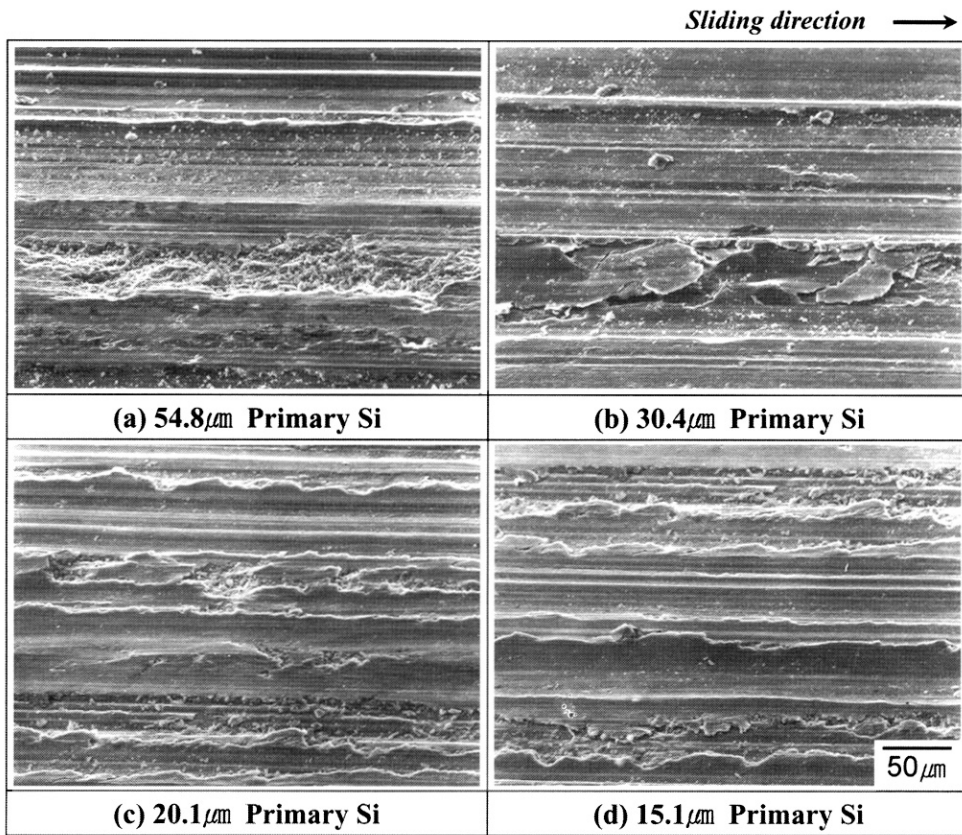


Fig. 4. Effect of primary Si size on the shape of worn surface of B.390-T6 alloy tested at 49 N and 0.2 m/sec.

3.2.2 기지금속 잔류응력과 마모감량의 관계

Fig. 5는 각각 20.1 μm, 15.1 μm 초정Si 입자크기의 시료의 열처리변화에 따른 기지금속의 잔류응력값을 나타낸 것이다. 열처리 방법에 따라 축적되는 잔류응력의 정도는 용체화처리 후 냉각되는 속도에 비례하여 압축 잔류응력이 증가되어, 주조상태(AC), T6열처리, 수냉처리(WQ), 액체질소 냉각처리(LN)의 순서로 증가하였다. 이것은 열처리에 의한 기지금속의 전위밀도 상승 및 Al 기지금속과 초정Si 입자간의 열팽창계수 차이로 인한 기지금속내의 응력상태 변화에 기인한 것으로 판단된다[23, 24]. 또한, 초정Si 입자크기가 가장 조대한 54.8 μm 시료의 압축 잔류응력값이 가장 높게 나타났으며, 초정Si 입자크기가 미세할수록 압축 잔류응력값은 감소하는 경향을 나타내어 20.1 μm 시료의 압축 잔류응력값이 가장 낮은 값을 나타내었다. 그러나, 초정Si 입자크기가

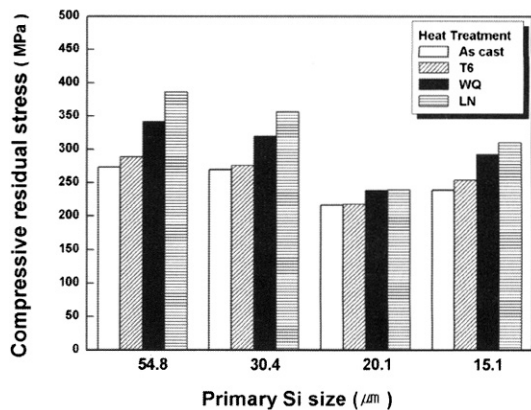


Fig. 5. Effect of heat treatment on compressive residual stress of B.390 alloys.

가장 미세한 15.1 μm 시료의 경우에는 20.1 μm 시료에 비해 기지 내 압축 잔류응력값이 다시 증가

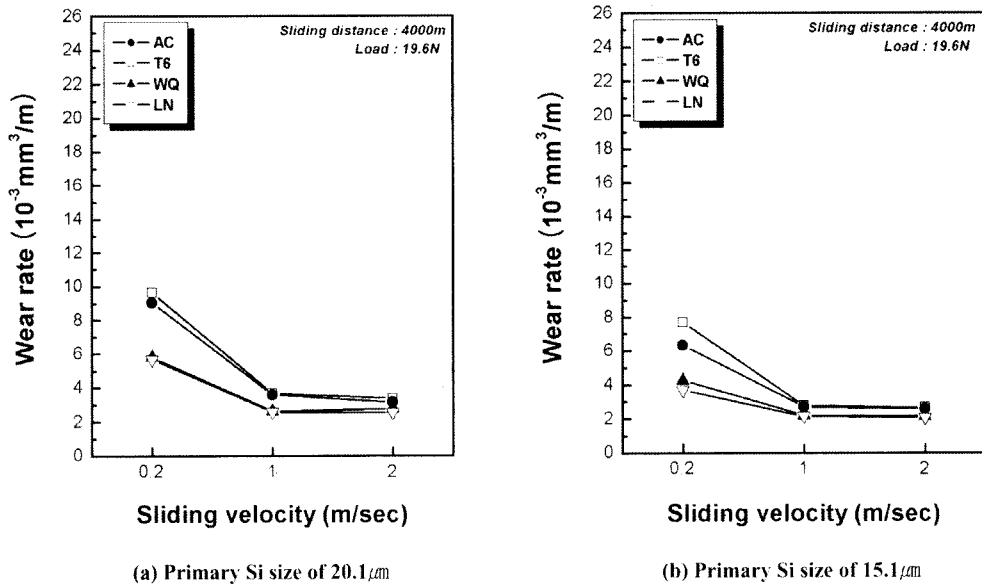


Fig. 6. Effect of residual stress on wear rate of B.390 alloy tested at 19.6 N.

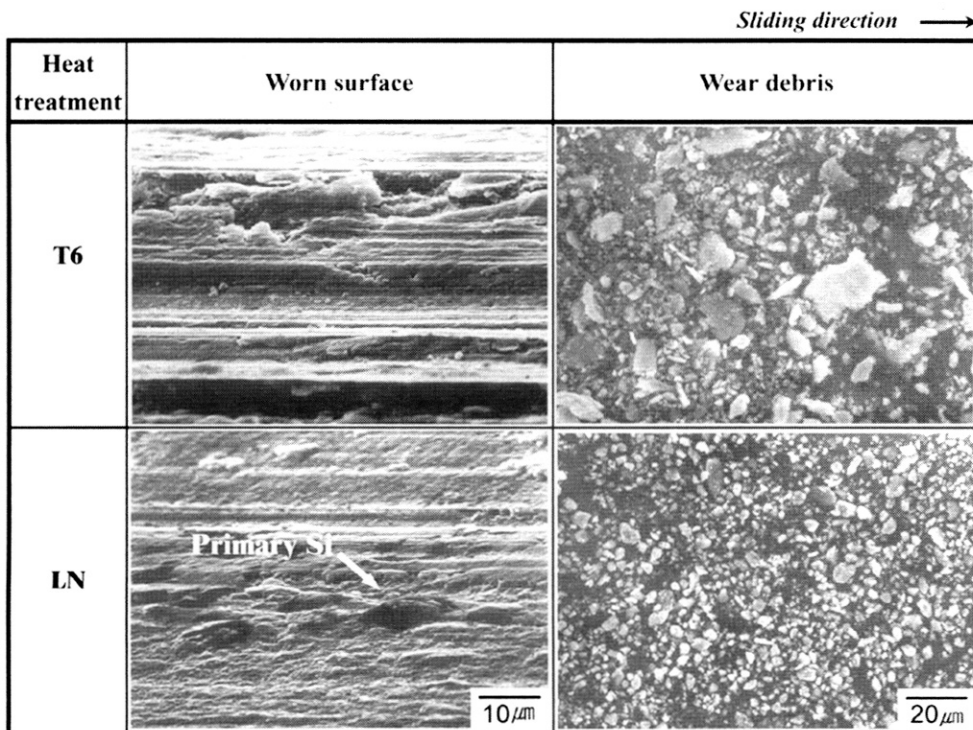


Fig. 7. Effect of residual stress on the shape of worn surface and wear debris of B.390 alloy with  $15.1 \mu\text{m}$  Si particle tested at 19.6 N and 0.2 m/sec.

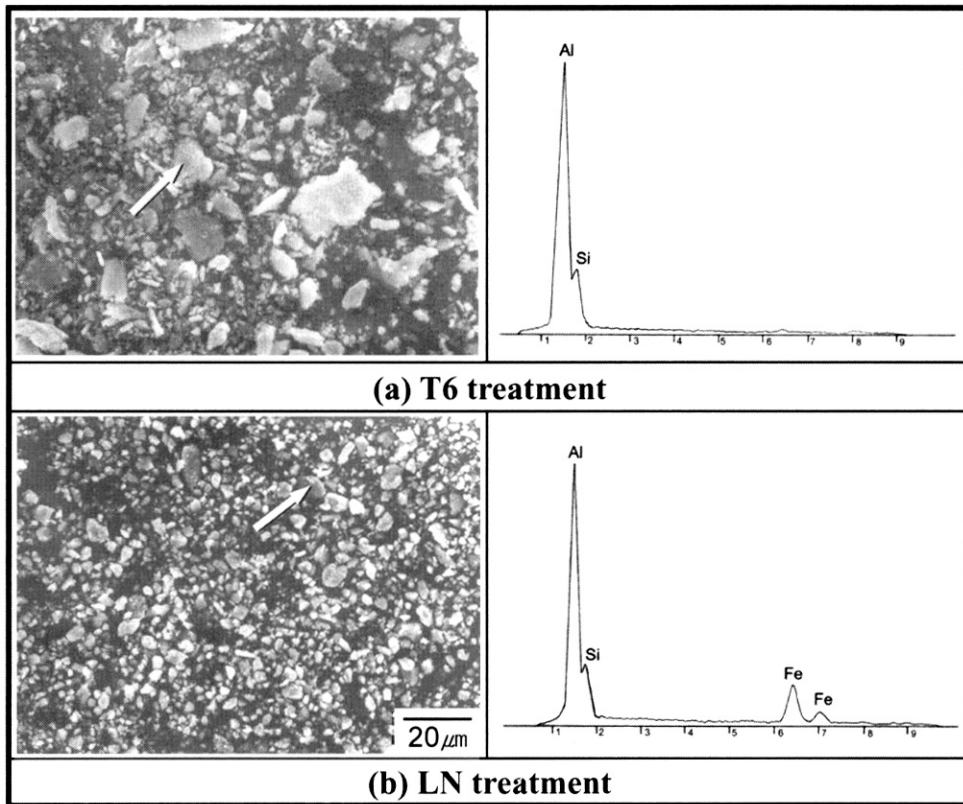


Fig. 8. SEM microstructure and EDS results of wear debris in B.390 alloy with 15.1  $\mu\text{m}$  Si particle tested at 19.6 N and 0.2 m/sec.

하는 경향을 나타내었다.

Fig. 6은 각각 20.1  $\mu\text{m}$ , 15.1  $\mu\text{m}$  초정Si 입자크기의 시료를 대상으로 열처리 방법에 따른 기지금속의 압축 잔류응력이 마모감량에 미치는 영향을 상대적으로 비교한 것이다. 마모감량은 T6열처리, 주조상태(AC), WQ, LN의 순서로 감소함을 알 수 있으며, 0.2m/sec의 저속 활주조건에서 마모감량의 차이가 보다 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 각각 T6처리, LN처리 초정Si 입자크기 15.1  $\mu\text{m}$ 인 시료들을 대상으로, 19.6 N의 하중조건과 저속 활주속도인 0.2 m/sec의 마모조건에서 열처리 방법에 따른 마멸면과 마멸입자의 변화를 관찰한 것이다. 압축 잔류응력이 낮게 나타난 T6처리 시료의 경우, 3물체 연삭에 의한 마멸흔 흔적이 뚜렷이 나타나 있으며 마멸입자 또한 조대한 것을 알 수

있다. Fig. 6의 마모감량 결과와 연관시켜 볼 때, T6처리 시료가 LN처리 시료에 비해 마모감량이 증가한 것은 시편과 상대 마모재에서 이탈된 연삭 입자들이 마모과정에 참여하는 3물체 연삭에 의한 기지금속의 마멸거동이 상대적으로 컸기 때문인 것으로 생각된다. 반면, 압축 잔류응력이 높게 나타난 LN처리 시료의 경우, 마멸면 표면에 경한 초정 Si 입자들이 노출되어 있는 것이 확인되었으며, T6처리 시료에 비해 마멸입자가 미세하게 나타났다. 이것은, LN처리에 의해 초정Si 입자 주위에 기지금속의 압축응력이 강화되어, 경한 초정 Si 입자가 마모과정 중에 표면에서 쉽게 이탈되지 않고 마찰면 표면에서 상대재로부터 기지금속의 마멸을 막아내는 역할을 하였기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 8은 앞서 실시한 마모시험에 의해 발생한 마



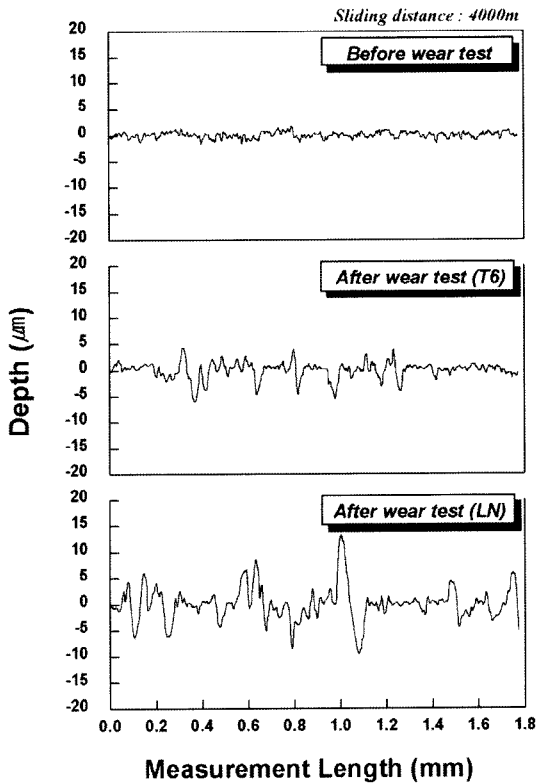


Fig. 9. Variation of counterface roughness values used in B.390 alloy with 15.1  $\mu\text{m}$  Si particle size tested at 19.6 N and 0.2 m/sec.

멸입자의 EDS 분석 결과를 나타낸 것이다. 압축 잔류응력이 낮게 나타난 T6처리 시료의 마멸입자(회살 표로 표시)에서는 기지금속의 마멸에 의한 Al과 Si 성분이 검출되었으며, 압축 잔류응력이 높은 LN처리 시료의 경우는 Al, Si 성분 이외에 Fe 성분도 나타남을 알 수 있다. 이는, LN처리에 의해 기지금속으로부터 강하게 구속된 경한 초정Si 입자들이 마모도중 마멸면 표면에 노출되어 기지금속을 보호하는 반면, 상대 마모재의 마멸을 일으킴으로 인해 Fe 성분이 나타난 것으로 생각된다.

Fig. 9는 앞서 실시한 마모시험 전·후 측정된 상대 마모재의 표면 거칠기(Ra)를 나타낸 것으로서, T6처리에 비해 LN처리 시료의 마모시험 후 상대 마모재의 Ra값이 더 큰 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 LN처리 시료의 경우, 기지금속의 압축 잔류응력에 의해 기지로부터 강하게 구속된 초정Si 입자들이 마모도중 쉽게 이탈되지 않고 마모하중을 지탱

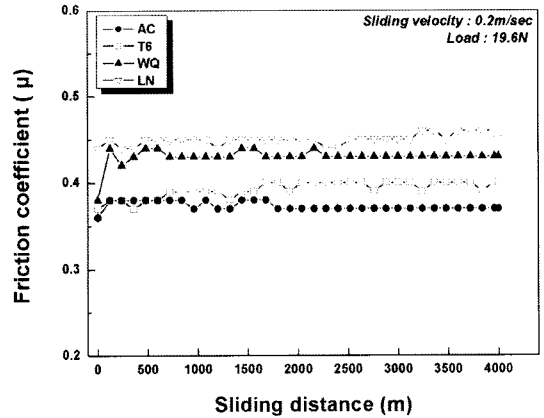


Fig. 10. Effect of residual stress on friction coefficient of B.390 alloy with 15.1  $\mu\text{m}$  Si particle tested at 19.6 N and 0.2 m/sec.

하며 기지금속을 보호하는 역할을 하는 반면, 상대 마모재에 마멸흔을 형성함으로 인해 T6처리 시료의 경우에 비해 상대 마모재의 Ra값이 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

마모시험과 동시에 측정된 활주거리에 따른 마찰계수 변화를 Fig. 10에 나타내었다. LN처리 시료의 경우, 마멸면에 노출된 초정Si 입자들이 상대 마모재와 접촉된 상태에서 상대 마모재에 대한 마찰저항을 높이기 때문에 T6처리 시료에 비해 다소 높은 마찰계수값을 나타내는 것으로 판단된다. 반면 T6처리 시료의 경우는, 마모도중 초정Si 입자들이 기지금속으로부터 쉽게 이탈함에 따라 연한 Al 기지금속이 상대 마모재와 접촉하기 때문에 LN처리 시료에 비해 낮은 마찰계수값을 나타내는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

B.390 알루미늄 합금을 대상으로, 초정Si 입자크기 변화 및 기지금속의 압축잔류응력 변화에 따른 내마모특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 낮은 마모하중인 19.6 N의 마모시험에서, 초정Si 입자크기가 상대적으로 조대한 54.8  $\mu\text{m}$  및 30.4  $\mu\text{m}$  시료의 마모감량이 20.1  $\mu\text{m}$  및 15.1  $\mu\text{m}$  시료에 비해 낮게 나타났으며, 30.4  $\mu\text{m}$  시료가 가장 낮은 마모감량을 나타내었다. 그러나 마모하중이 49 N으로 증가할 경우, 54.8  $\mu\text{m}$  및 30.4  $\mu\text{m}$  시료의

마모감량이 20.1  $\mu\text{m}$  및 15.1  $\mu\text{m}$  시료에 비해 급격히 증가하는 경향을 나타내었다.

2. 마모특성에 대한 입자크기의 영향은, 낮은 마모하중인 19.6 N인 경우에 입자크기가 조대할수록 마모하중 지탱에 유리하여 상대마모재의 연삭이 심해지고, 시료의 마멸면에 물질전이층(transfer layer)을 두껍게 형성함으로 인해 고체윤활작용을 하여 마모감량이 감소하였다. 반면, 높은 마모하중인 49N인 경우에는 subsurface에 미세하고 균일하게 분포된 초정Si 입자들이 높은 마찰하중을 지탱하고 3물체 연삭에 의한 마멸층이 상대적으로 낮게 형성되어 마모감량이 감소하였다.

3. 모든 초정Si 입자크기와 마모속도 및 마모하중 조건에서, 기지금속의 압축 잔류응력이 높은 LN처리 시료가 마멸면 표면에 노출된 초정Si 입자들이 상대마모재에 대한 마찰저항을 높여 WQ, T6 및 AC처리를 행한 시료들에 비해 마찰계수값이 높고 마모감량이 적게 나타났으며, 상대마모재의 표면 거칠기(Ra) 값 또한 높게 나타났다.

4. 기지금속의 압축 잔류응력이 높게 나타난 LN처리 시료에서 마멸표면에 경한 초정 Si 입자들이 노출되어 있는 것이 확인되었다. LN처리에 의해 초정 Si 입자 주위에 기지금속의 압축응력이 강화되어, 경한 초정 Si 입자가 마모과정 중에 표면에서 쉽게 이탈되지 않고 마찰면 표면에서 상대재로부터 기지금속의 마멸을 막아내는 역할을 하여 마모감량을 감소시킨 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. N. Tenekedijev and J. E. gruzelski : Cast Metal, **3** (1990) 96.
2. G. K. Sigworth : AFS Trans., **91** (1983) 7.
3. J. L. Jorstad : AFS Trans., **92** (1984) 573.
4. Metals Handbook, Properties and Selection : Nonferrous Alloy and Special Purpose Materials, ASM, Metals Park, OH., USA, **2** (1992) 171.
5. H. Torabian, J. P. Pathak and S. N. Tiwari : Wear, **172** (1994) 49.
6. F. A. Davis and T. S. Eyre : Tribol. Int., **27** (1994) 171.
7. J. Zhang and A. T. Alpas : Acta Metall. et Mater., **45** (1997) 513.
8. Than Trong Long, Takano Nishimura, Tatsuyoshi Aisaka and Mikio Morita : Mater. Trans. JIM., **32** (1991) 181.
9. Sunny Chung and Bing H. Hwang : Tribol. Int., **27** (1994) 307.
10. Z. F. Zhang, L. C. Zhang and Y. W. Mai : J. Mater. Sci., **30** (1995) 1961.
11. Burwell, J. T. : Survey of Possible Wear mechanisms, Wear, **1** (1958) 119.
12. Bharat Bhushan : Principles and Applications of Tribology, John Wiley & Sons, Inc. (1999) 480.
13. C. S. Yust : International Metals Reviews, **30** (1985) 141.
14. B. Venkataraman and G. Sundarajan : Acta Metall. et Mater., **44** (1996) 461.
15. H. J. Kim : J. Korean Foundrymen's Society, **22** (2002) 258.
16. H. J. Kim : Mater. Sci. Technol., **19** (2003) 915.
17. H. R. Shely and Twu-Wei Choo : Metall. Trans., **16A** (1985) 853.
18. S. I. Tanaka : J. Japan Inst. metals, Meteria, **29** (1990) 924.
19. A. T. Alpas and J. Zhang : Metall. Trans., **25A** (1994) 976.
20. R. A. Saravaran, Jung-Moo Lee and Suk-Bong Kang : Metall. Trans., **30A** (1990) 2523.
21. W. Ames and A. T. Alpas : Metall. Trans., **26A** (1995) 85.
22. A. T. Alpas and J. Zhang : Wear, **155** (1992) 83-104.
23. D. C. Dunand and A. Mortensen : Acta metall. Mater., **39** (1991) 127.
24. D. J. Lloyd : Acta metall. Mater., **39** (1991) 59.