

## 가스분무 공정에 의한 과공정 Al-Si 합금 분말 압출재의 마모 거동

진형호 · 남기영 · 김용진<sup>a</sup> · 박용호\* · 윤석영  
부산대학교 재료공학부, <sup>a</sup>한국기계연구원 분말재료연구센터

### Wear Behaviors of Gas Atomized and Extruded Hypereutectic Al-Si Alloys

Hyeong-Ho Jin, Ki-Young Nam, Yong-Jin Kim<sup>a</sup>, Yong-Ho Park\* and Seog-Young Yoon

School of Material Science and Engineering, Pusan National University,

30 Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan, 609-735, Korea

<sup>a</sup>Korea Institute of Machinery and Materials, Powder Materials Research Center,

66 Sangnam-dong, Changwon, 641-831, Korea

(Received June 27, 2006; Accepted August 8, 2006)

**Abstract** Wear behaviors of gas atomized and extruded Al-Si alloys were investigated using the dry sliding wear apparatus. The wear tests were conducted on Al-Si alloy discs against cast iron pins and vice versa at constant load of 10N with different sliding speed of 0.1, 0.3, 0.5 m/s. In the case of Al-Si alloy discs slid against the cast iron pins, the wear rate slightly increased with increasing the sliding speed due to the abrasive wear occurred between Al-Si alloy discs and cast iron pins. Conversely, in the case of cast iron discs against Al-Si alloy pins, the wear rate decreased with increasing the sliding speed up to 0.3 m/s. However, the wear rate increased with increasing the sliding speed from 0.3 m/s to 0.5 m/s. It could be due to adhesive wear behavior and abrasive wear behavior between cast iron discs and Al-Si alloy pins.

**Keywords :** Wear, Tribology, Hypereutectic Al-Si alloy, Gas atomization

## 1. 서 론

알루미늄은 구리(Cu), 마그네슘(Mg), 아연(Zn), 실리콘(Si) 등의 첨가원소에 의해 미세구조 및 기계적 특성을 향상시킬 수 있다<sup>1)</sup>. 특히 Si를 첨가한 Al-Si 계 합금은 기계적 특성 향상뿐만 아니라, 내마모 특성을 크게 향상시킬 수 있는 장점으로 인하여 최근에는 자동차 및 운송장비의 경량화 소재로 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>2-5)</sup>.

Al-Si 합금에서 기계적 특성은 Si 함량에 따라 증가하며, 과공정(hypereutectic, Si > 12.6 wt.%) 조성이 일반적인 아공정(hypoeutectic) 합금에 비하여 고강도 소재로서의 가능성이 높다. 그러나 과공정 Al-Si 합금은 경질의 Si 함량 증가에 따른 취성 증가로 가공성이 크게 떨어지며, 특히 응고 시 Si 입자의 성장이

급격히 일어나 기계적 특성을 크게 저하시킨다.<sup>6,7)</sup> 이에 따라 전통적인 주조공정으로는 과공정 Al-Si 합금에서 Si 입자의 성장 억제와 미세화에 한계가 있다고 알려져 있다<sup>8)</sup>.

따라서 본 연구에서는 우수한 기계적 특성을 보이는 과공정 Al-Si 합금에서 Si 입자의 미세화를 위한 가스분무(gas atomization) 공정기술을 이용하여 경량, 고강도, 내마모 Al-Si 합금분말 소재를 개발하고자 하며, 본 논문에서는 가스분무 공정으로 제조된 Al-Si 합금분말 압출재를 제조하여 마모거동을 관찰하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 용해용 원료로 Al(순도: 99.5%, 평균입경: 5 mm)과 Si(순도: 99.7%, 평균입경: 2-3 mm)

\*Corresponding Author : [Tel : +82-51-510-2339; E-mail : yhpark@pusan.ac.kr]

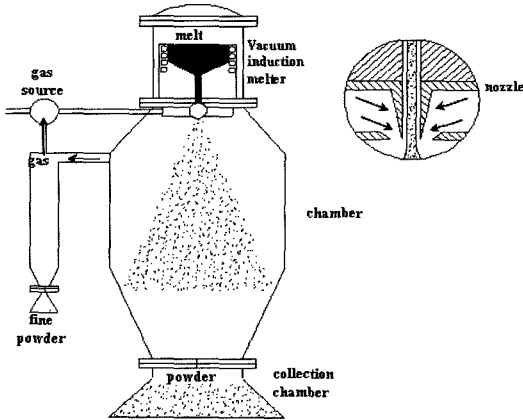


Fig. 1. Schematic illustration of Gas atomizer.

분말을 사용하였으며, 이 외에 첨가원소로는 99.9% 이상의 고순도를 가지는 Cu, Fe, Mg Mn을 사용하였다. 합금조성은 Al-20Si-3.5Cu-5.5Fe-1.2Mg-0.5Mn으로 현재 자동차용 베인(vane) 소재로 상용중인 과공정 조성을 선택하였다. 본 연구에서 가스분무 공정으로 제조되는 분말들은 각각의 분말 모두가 균일한 조성을 갖게 하는 것이 중요하므로 분무 공정 전에 원료분말들을 혼합한 후 유도진공 용해로에서 용융시켜 약 2 kg 내외의 모재를 만든 후 가스분무 장치의 용해부에 장입하였다.

고강도 Al-Si 합금 분말의 제조에 사용된 가스 분무 장치의 개략도는 그림 1에 나타내었다. 충분한 용탕 유동도를 가지도록 하기위하여 용해온도는 950°C, 분무노즐의 크기는 약 2.5 mm로 하였으며, 가스분무 공정 시 99.9%의 N<sub>2</sub> 가스와 N<sub>2</sub>+20 wt.% O<sub>2</sub> 혼합 가스를 가스매체로 하여 압력을 3MPa로 고정하였다. 본 연구에서 사용한 가스 분말의 공정 조건을 표 1에 나타내었다. 제조한 합금분말을 400°C, 압출비 21:1의 조건으로 열간 압출한 후, 열처리를 실시하였다. 열처리 조건은 510°C까지 가열하여 30분 유지한 후, 급냉하였고, 172°C에서 20시간 유지 후 서냉하였다.

제조된 Al-Si 합금의 마찰(friction)과 마모(wear)특성을 마모시험기(Triboss PD-102, R&B, Korea)를 사용하여 평가하였다. 마모시험 시 실험조건으로는 온도 25°C, 습도 25-30%의 조건에서 시행되었으며, 상대재(counterpart material)로는 Al-Si 합금을 자동차 베인소재로 사용할 경우를 고려하여 평균경도가

Table 1. Processing parameters of gas atomization

Atomization gas	N <sub>2</sub> (high purity), N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>
Atomization pressure	3 MPa
Inner diameter of nozzle	2.5 mm
Pouring temperature	950°C

Hv 325인 주철을 pin 형태로 가공하여 사용하였다. 또한 제조된 Al-Si 합금에 대한 주철의 마모특성을 평가하기 위해 Al-Si 합금을 pin 형태로 가공하여 상대재로 사용하고 주철을 시편으로 하여 동일조건으로 마모시험을 실시하였다. Sliding speed에 따른 마모거동을 보기 위하여 sliding speed를 0.1 m/s, 0.3 m/s, 0.5 m/s로 변화하였으며, 이동거리 500 m, 수직하중을 10N으로 고정하였다. 시험 후 마모트랙의 조직사진은 광학현미경(PMG3-613U W/Acc, OLYMPUS, Japan)과 주사전자현미경(S-4300, Hitachi, Japan)을 통하여 관측하였다. 미모트랙의 넓이와 깊이는 주사전자현미경과 stylus 장치를 사용하여 측정하였다. 마모시험 중에 발생된 wear debris의 조성분석은 에너지 분산 분광기를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 2는 상대재로 사용된 주철에 대한 Al-Si 합금의 마찰계수를 sliding speed의 변화에 따라 나타내고 있다. Sliding speed가 증가함에 따라 마찰계수가 증가하는데 이는 steel pin의 경도가 Al-Si 합금의 경도(Hv 260)보다 높은 경도를 가지므로 연삭마모(abrasive wear)거동이 작용하였기 때문으로 보여진다. 한편, 그림 3은 상대재로 사용된 Al-Si 합금에 대한 주철의 마찰계수를 sliding speed의 변화에 따라 나타내고 있는데, 상대재로 사용된 주철에 대한 Al-Si 합금의 경우와는 반대로 sliding speed가 증가함에 따라 마찰계수가 감소한다. 이는 상대적으로 경도가 낮은 Al-Si 합금이 주철에 들어붙는 현상 때문으로 여겨지며, 이러한 현상을 응착마모현상(adhesive wear)이라 알려져 있다<sup>9)</sup>.

상대재가 주철일 때 sliding speed에 대한 Al-Si 합금의 마모트랙 형상과 wear debris의 EDS 분석 결과를 그림 4에, Al-Si 합금의 마모트랙의 깊이와 넓이를 그림 5에 나타내었다. Sliding speed에 관계없이 마모트랙의 형상이 비교적 매끄럽고 균일한 형

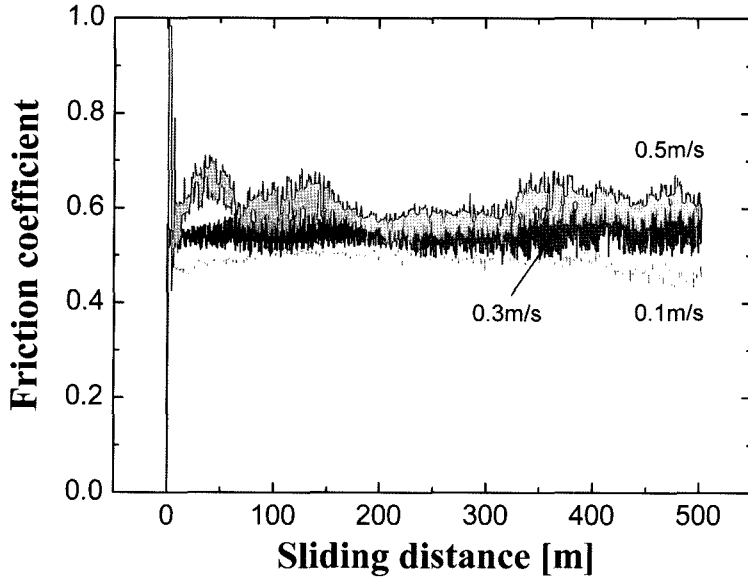


Fig. 2. The variation of friction coefficient for Al-Si alloy against a cast iron pin with different sliding speeds.

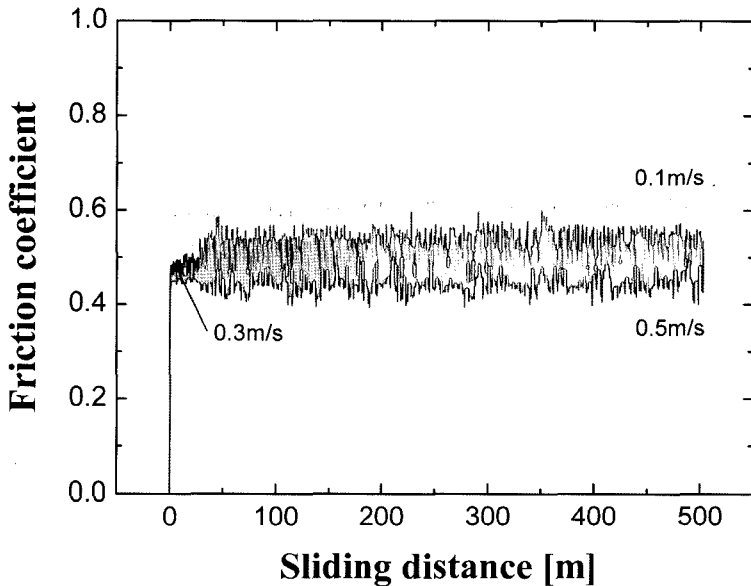


Fig. 3. The variation of friction coefficient for cast iron against a Al-Si alloy pin with different sliding speeds.

상을 나타내며 debris의 응착도 발생하지 않았다. 이는 주철에 대한 Al-Si 합금의 마모거동에서는 연삭마모가 지배적이기 때문으로 생각된다. EDS 분석결과 wear debris의 주성분은 Al-Si 합금의 주성분인 Al, Si, Fe, Cu이며 Al-Si 합금의 조성비와 거의 일치한다. 이는 상대재인 주철의 경도가 높아 손실이 거의 없음을 보여준다. 한편, sliding speed가 증가함에 따

라 마모트랙의 깊이와 넓이가 거의 일정하게 증가함을 보이는데 이 또한 연삭마모거동이 작용하였기 때문으로 판단된다.

그림 6은 상대재로 Al-Si 합금을 사용하여 시험한 sliding speed에 따른 주철의 마모트랙 형상과 wear debris의 EDS 성분분석 결과이며, 그림 7에 마모트랙의 깊이와 넓이를 나타내었다. 주철에 대한 Al-Si

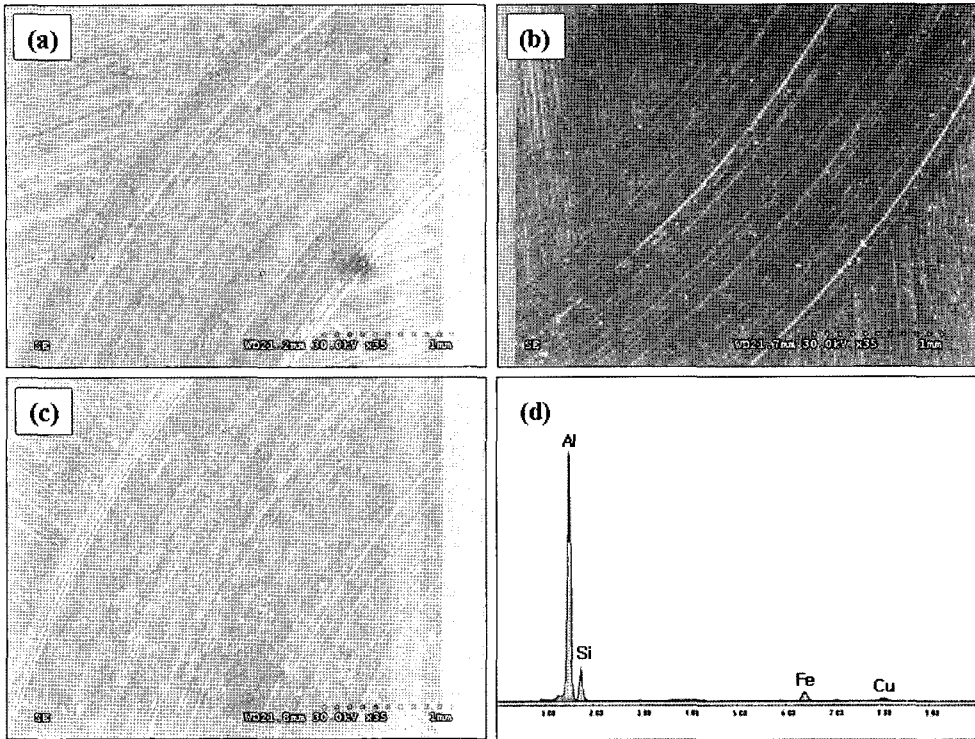


Fig. 4. Morphologies and EDS analysis after wear test for Al-Si alloy against a cast iron pin: surface morphology at (a) sliding speed 0.1 m/s, (b) 0.3 m/s, (c) 0.5 m/s; EDS analysis of wear debris at (d) sliding speed 0.3 m/s.

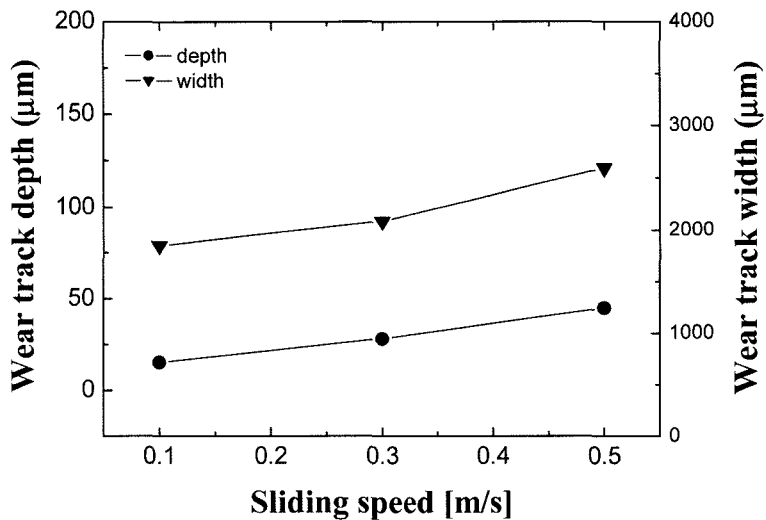


Fig. 5. Wear track depth and width after wear test for Al-Si alloy against a cast iron pin.

합금의 경우보다 마모트레이 매끄럽지 않고 debris가 있음을 볼 수 있는데, 이는 주철의 경도가 상대재인 Al-Si 합금보다 높기 때문에 상대재인 Al-Si 합금이

주철을 깎지 못하고 들어붙는 응착마모현상 때문으로 생각된다. EDS 분석결과 wear debris의 주성분은 Al, Si, Fe, Cu로 Al-Si 핀의 성분과 일치하나 Fe가

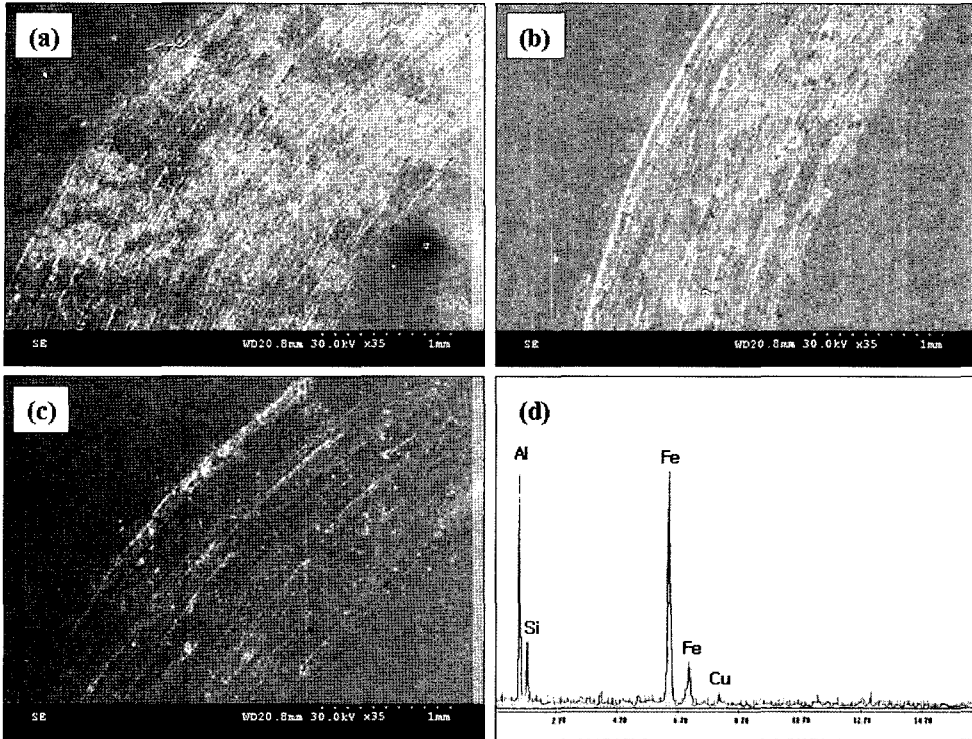


Fig. 6. Morphologies and EDS analysis after wear test for cast iron against a Al-Si alloy pin: surface morphology at (a) sliding speed 0.1 m/s, (b) 0.3 m/s, (c) 0.5 m/s; EDS analysis of wear debris at (d) sliding speed 0.3 m/s.

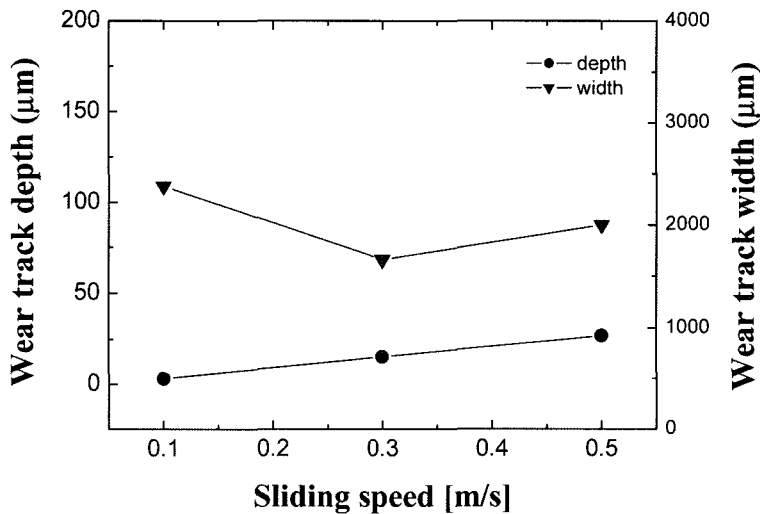


Fig. 7. Wear track depth and width after wear test for cast iron against a Al-Si alloy pin.

많이 나타나는데, 마모 시 주철의 마모와 상대재인 Al-Si 핀의 마모가 함께 일어났음을 알 수 있다. Sliding speed가 0.1 m/s에서 0.3 m/s로 증가함에 따라 마모트랙의 깊이는 증가하고 넓이는 감소하는데,

이는 상대재인 Al-Si 합금에서 발생한 wear debris가 표면에 응착하여 윤활제 역할을 하였기 때문으로 판단된다<sup>10)</sup>. 그러나 sliding speed가 0.5 m/s로 증가하면 마모트랙의 깊이와 넓이가 증가함을 볼 수 있는

데, 응착마모 보다 연삭마모가 더 지배적인 것으로 생각되며, 이는 sliding speed 증가와 경도의 차이가 크지 않은데 기인하는 것으로 판단된다. Al-Si 합금에 대한 주철의 마모거동에서는 응착마모와 연삭마모가 함께 일어나는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

가스분무공정으로 Al-Si 합금분말을 제조하고, 제조된 합금분말을 열간 압출하여 압출재를 제조하여 마모거동을 관찰하였다. 상대재가 주철일 때 Al-Si 합금의 마찰계수는 sliding speed가 증가함에 따라 증가하였고 마모부피 또한 증가하였으며, 이는 연삭마모거동 때문으로 판단된다. 상대재가 Al-Si 합금일 때 주철의 마모거동은 마찰계수는 sliding speed가 증가함에 따라 감소하였으며, 이는 응착마모거동 때문으로 생각된다. 마모량은 sliding speed가 0.1 m/s에서 0.3 m/s로 증가함에 따라 마모트랙의 깊이는 증가하고 넓이는 감소하는데, 이는 상대재인 Al-Si 합금에서 발생한 wear debris가 표면에 응착하여 윤활제 역할을 하였기 때문으로 판단된다. 그러나 sliding speed가 0.5 m/s로 증가하면 마모트랙의 깊이와 넓이가 증가함을 볼 수 있는데, 이는 sliding speed 증가와 경도의 차이가 크지 않은데 기인하는 것으로 판단된다. Al-Si 합금에 대한 주철의 마모거동에서는 응착마모와 연삭마모가 함께 일어나는 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환인 “차세대소재성형기술 개발사업단”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. P. Delarbre and M. Krehl: Sinterstahl GmbH Report (2001).
2. Aluminum Industry Technology Roadmap, the Aluminum Association, Washington (2003).
3. J. M. Torralba, C. E. da Costa and F. Velasco: J. Materials Processing Technology, **133** (2003) 203.
4. Automotive Lightweighting Materials, FY 2002 Process Report (2002).
5. H. Yamagata: Materials Science Forum, **797** (1999) 304.
6. S. Anand, T. S. Srivatsan, Y. Wu and E. J. Lavernia: J. Mater. Sci., **32** (1997) 2835.
7. J. Zhou, J. Duszczuk and B. M. Korevaar: J. Mater. Sci., **26** (1991) 5257.
8. T. Ohmi, M. Judo, K. Ohsasa, Y. Itoh, K. Matsuura and K. Ishii: J. Japaneses Light Metals, **44** (1994) 91.
9. R. L. Deuis, C. Subramanian and J. M. Yellup: Composites Science and Technology, **57** (1997) 415.
10. J. H. Kim and D. H. Kim: J. of the KSTLE, **15** (1999) 141 (Korean).