Journal of the KSTLE Vol. 15, No. 2, June 1999, pp. 141~149
The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers

컴프레서용 Al-Si 합금의 파괴 및 마모 특성

김재훈 · 김덕회*

충남대학교 기계설계공학과
*충남대학교 대학원

Fracture and Wear Characteristics of Al-Si alloy used for Compressor

J. H. Kim and D. H. Kim*

Mechanical Design Engineering, Chungnam National University
**Graduate School, Chungnam National University*

Abstract–Fracture, fatigue and wear characteristics of Al-Si alloy used for compressor are experimentally studied. Plane strain fracture toughness test is carried out using three point bending specimen. Fatigue test is performed under constant loading condition and wear test is carried out as a function of sliding velocity and applied load. To obtain the crack propagation characteristics and wear mechanism of Al-Si alloy, fracture and worn surfaces are investigated using SEM. It is verified that fracture and fatigue strength of Al-Si alloy are improved by the fine microstructure of alloy. The wear behavior and specific wear amount of Al-Si alloy are not dependent on the microstructure but on a function of the silicon content. Anodizing on the surface of Al-Si alloy, surface hardness and wear characteristics are improved.

Key words–compressor, fracture toughness, fatigue strength, specific wear amount, sliding speed, applied load, anodizing, critical velocity, critical depth.

1. 서 론

산업과 문명이 고도로 발전함에 따라 우수한 성능과 경량화된 제품 생산에 심혈을 기울이고 있다. 특히 최근 자동차 및 에어콘등의 수요가 급증함에 따라 내마모성 알루미늄 합금은 피스톤, 에어컨의 콤프레서등 회전 및 왕복 운동용 부품에 많이 적용되고 있다[1,2].

내마모성 알루미늄 합금으로 주로 알루미늄에 Si 및 Cu, Mg, Fe, Ti 등의 원소를 첨가한 다원계 Al-Si 합금이 널리 이용되는데, 다원계 Al-Si 합금은 우수한 주조성 및 기계적 특성을 지니고 있어 그 적용이 확대되고 있는 경량 합금이다[3]. 특히 다원계 Al-Si 합금은 Si의 함량, 미세 조직 및 가공공정에 따라 기계적 성질과 피로 특성은 차이를 나타나게 된다[4,5]. 또한 다원계 Al-Si 합금은 상대 운동을 하는 회전 및 왕복 운동 부품에 널리 사용되므로 내마모 특성에 대하여 정량적·정성적 평가를 필요로 한다. 이전의 내마모성 Al-Si 합금에 대한 마모 특성 연구들은 주로 이원계 합금에 대하여 평가되어 왔다. Jasim 등[6]은 이원계 Al-Si 합금의 경우 공정 조성 근방에서 우수한 마모 특성이 있음을 실험을 통하여 입증하였고, Reddy 등[7]은 순수한 알루미늄에 Si를 첨가할 경우 마모 특성 및 붙음 저항(seizure resistance)이 증가하여 마모 특성이 향상된다고 보고하였다. 그러나 실제 내마모성 부품에 사용되는 다원계 Al-Si 합금들에 대하여는 아직 그 연구들이 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 에어컨용 스크롤 컴프레서 및 스와시 컴프레서용 재료로 실제 개발중인 다원계 Al-Si 합금을 이용하여 Si 함량 및 미세 조직에 따른 파괴, 피로 및 마모 특성에 관하여 실험적 방법으로 연구하였다.

2. 재료 및 시험 방법

2-1. 재료

시험에 사용된 재료는 Si의 함량이 공정계인 JIS 규격의 AHS-2와 과공정계 합금인 A390을 사용하였다. 각 합금에 대한 화학적 조성은 Table 1과 같다. 재료의 성형은 AHS-2의 경우 주조 후 압출 가공으로, A390은 주조하여 환봉을 만들었다.

열처리는 AHS-2의 경우 475℃에서 1시간 50분 동안 용체화 처리를 하였고 상온까지 수냉 한 후에 190 ℃에서 9시간 동안 인공시효처리를 하였다. A390의 경우 478℃에서 용체화 처리 후 상온까지 수냉 한 후에 인공 시효 처리를 행하였다. 열처리한 두 재료의 기계적 특성은 Table 2와 같다.

Fig. 1은 열처리한 재료를 광학 현미경을 이용하여 관찰한 조직 사진이다. AHS-2의 미세 조직은 Al-Si 공정 조직 및 초정 Si으로 이루어져 있다. 초정 Si의 크기는 약 3.5~7.2 μm 정도이다. A390의 미세 조직의 경우에는 초청 Si 결정이 20 μm 이상의 판상형의 조대한 초정 Si 결정을 볼 수 있다.

특히 실제 스크롤 컴프레서 및 스와시 컴프레서의 경우 표면에 산화 피막을 형성시킨 후 제품으로 사용하고, 이런 표면 산화 피막은 표면 경도 및 내마모성 향상을 가져올 것으로 사료되어 아노다이징 처리한 후 마모 특성을 평가하였다. Fig. 2는 본 마모 시편에 사용한 경질 아노다이징 처리 공정을 나타낸 것이다.

Table 1. Chemical compositions of materials (wt %)

	Si	Fe	Cu	Mg	Ti	Al
AHS-2	11.6	0.4	4.0	0.64	0.05	Bal.
A390	16.3	0.26	4.2	0.49	0.01	Bal.

2-2. 파괴 인성 및 피로 시험

평면 변형률 파괴 인성 시험은 ASTM E399-90[8]에 준하여 시험하였다. 시험기는 10톤 유압식 피로 시험기(Shimadzu Co. Model EHF-ED10)를 사용하였다. 시험편은 3점 굽힘 시험편을 이용하였으며, Fig. 3과 같은 크기 및 형상으로 기계 가공하여 제작하였다. 특히 노치부는 균일한 노치와 균열 생성이 용이하도록 와이어 방전 가공(wire electric discharge machining)으로 제작하였다. 시험편에 초기 피로 균열은 ASTM 조건을 만족하는 범위에서 A390의 경우에는 98 N~784 N, AHS-2의 경우에는 98 N~981 N 범위 내에서 반복 하중을 가하여 삽입하였다.

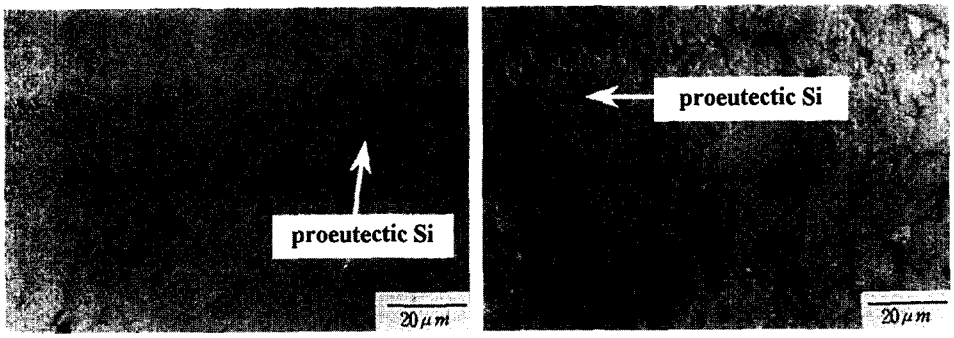
피로 시험은 회전 굽힘 피로 시험기로 FTO-10-H type을 이용하여 수행하였다. 파면 관찰은 주사식 전자 현미경(SEM: Scanning electron microscopy)을 이용하였다.

2-3. 마모 시험

마모 시험에 사용된 시험기는 Ogoshi high speed

Table 2. Mechanical properties of AHS-2 and A390

Properties	Unit	AHS-2	A390
Yield strength (0.2% offset)	MPa	369	263
Ultimate strength	MPa	409	299
Young's modulus	MPa	75000	73550
Elongation	%	3.36	1.40
Hardness	Hv	149	136



(a) AHS-2 (b) A390

Fig. 1. Optical micrographs of test materials.

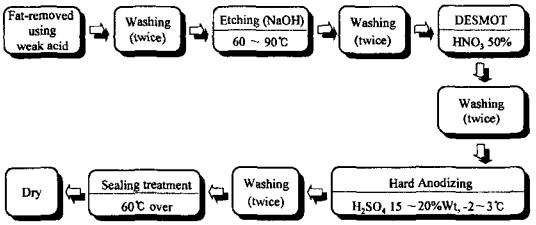


Fig. 2. Flow chart of anodizing process.

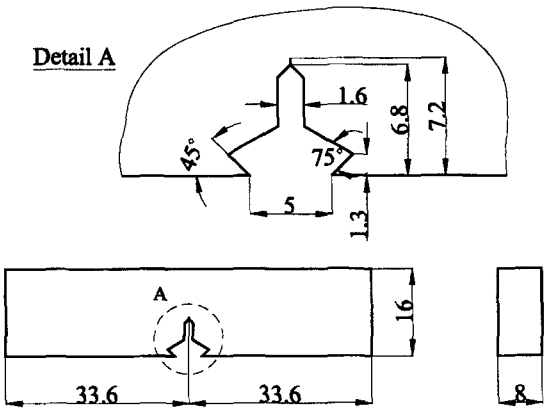


Fig. 3. Shape and dimension of three-point bending specimen.

universal wear testing machine으로 OAT-U type이다. 상대재는 현재 콤프레서의 재료로 사용되며 Al-Si 합금에 비하여 경도가 큰 회주철 및 아노다이징 처리한 동일 재료를 사용하였다. 마모 시험시 회전하는 상대재는 시편에 Fig. 4와 같이 장착하였으며, 대기중에서 건식 마모 시험을 수행하였다. 활주거리를 400 m로 일정하게 유지하고, 하중 및 활주 속도를 변화시키며 시험하였다. 시험이 끝날 때마다 상대재는 숫돌을 이용하여 연마하였으며, 이 물질을 제거하기 위하여 신나로 세척하였다. 또한 각 시험 후 상대재가 시험편에 고속으로 회전하여 상대재에 열이 발생하므로, 알코올을 이용하여 상대재에 발생한 열을 줄여 주었고 충분한 냉각시간을 갖고 시험하였다. 시험편에 발생한 마모 길이 측정은 10배 배율의 미소 확대경을 사용하였으며, 마모 기구를 규명하기 위한 마모면 관찰은 주사식 전자 현미경을 이용하였다. 시편의 마모량은 마모된 현의 길이, 회전하는 상대재의 폭 및 상대재의 반지름을 고려한 체적으로 계산되는데, 이때 하중과 활주거리는 고려되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 하중과 활주거리를 고려한 단위 접촉 면적, 단위 접촉 하중, 단위 활주 길이당 마모량을 비마모량(specific wear amount)이라고 하며, 다음과 같은 식으로 계산하였다[9].

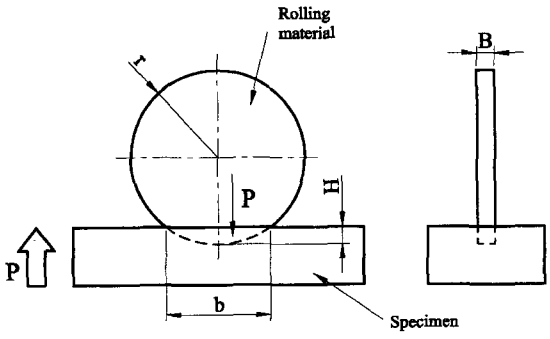


Fig. 4. Schematic diagram of wear specimen and revolving disc.

$$W_s = \frac{Bb^3}{8rPl} \quad (1)$$

여기서, B는 상대재의 두께, b는 마모흔 길이, r은 상대재 반지름, P는 작용하중, l은 활주거리이다.

3. 시험 결과 및 고찰

3-1. 파괴 인성 및 피로 강도 특성

Table 3은 평면 변형률 파괴 인성 시험 결과와 Al 합금에 대한 파괴 인성치[10]를 나타낸 것이다. 시험에서 구한 평면 변형률 파괴 인성은 ASTM의 조건을 만족하지 못하여 K_Q로 나타냈다. 따라서 AHS-2 및 A390 시험편 두께를 증가시켜 구한 평면 변형률 파괴 인성치 K_{IC}는 현재의 시험에 의하여 구한 결과인 K_Q보다 작을 것으로 예측된다[8]. 또한 AHS-2의 파괴인성이 A390에 비하여 큰 것을 알 수 있다. 이는 인장 시험 결과의 연신율과 연관지어 생각해 볼 수 있듯이 A390이 AHS-2에 비하여 취성이 큰 것으

Table 3. Plane strain fracture toughness of test materials and Al alloys [9]

Materials	Heat treatment condition	Fracture toughness ($MPa \cdot m^{1/2}$)	
AHS-2	T4, T6	K_Q	20
A390	T4, T6		16
Al 2014	T4	K_{IC}	28
Al 2024	T3		34
Al 7075	T651		29
Al 7079	T651		33

로부터 파괴 인성이 작게 나타남을 알 수 있다. 그러나 AHS-2의 파괴 인성은 다른 Al 합금의 파괴 인성[9]과 비교해 볼 때 상대적으로 작은 값임을 알 수 있다. 따라서 재료 내 균열이 존재하는 경우 균열에 대하여 취약할 것으로 예측되나 Al-Si 합금의 경우 내마모 합금으로 사용이 연구되는 재료이므로 실제 제품 설계시 이런 취성 재료 특성을 고려하는 것이 필요하다고 사료된다.

Fig. 5는 AHS-2와 A390에 대한 피로 시험 결과를 보여주고 있다. 이 결과에 의하면 AHS-2의 피로 한도가 A390에 비하여 크다. 이는 Fig. 1과 같이 AHS-2의 미세 조직이 A390에 비하여 작고, A390의 조대한 판상의 초정 Si가 피로 특성을 악화시키는 것으로 판단된다. Fig. 6~7은 AHS-2와 A390의 피로 파괴 기저부 및 파면을 나타낸 것으로, 두 재료에서 공히 균열이 Si의 입계를 따라서 진전하는 취성 파면을 나타내며, A390재의 초정 Si은 AHS-2 보다 큰 입자로 이루어졌으며, 균열은 경계를 따라서 진전하

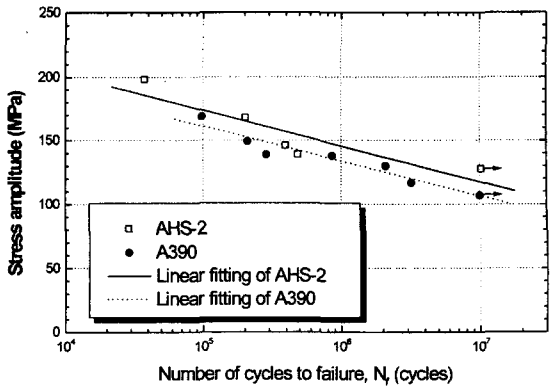
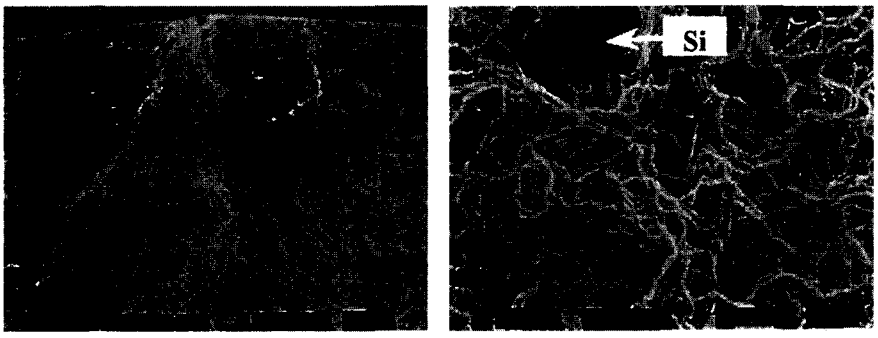


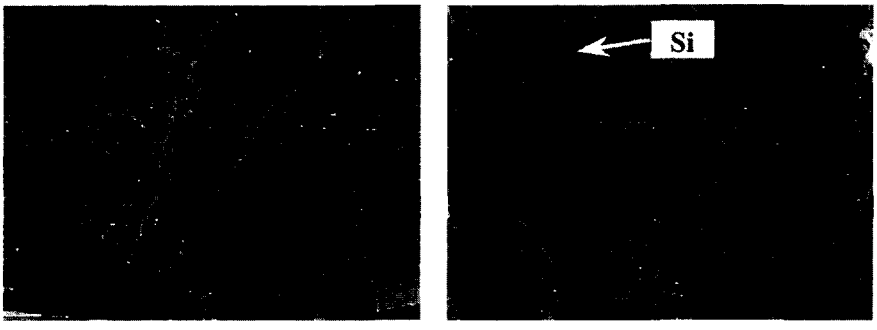
Fig. 5. S-N curve of AHS-2 and A390.

는 특징이 있다. 특히 Couper 등[11]은 아공정계 Al-Si 주조 합금의 피로 시험 결과로부터 주조 합금에서 균열의 발생은 수축공과 같은 주조 시 결함에서 개시되며, Si 입자 주위를 따라 균열이 진전하는 특징이 있는 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에서



(a) $\sigma_b = 149\,MPa$ (b) $\sigma_b = 169\,MPa$

Fig. 6. Scanning electron micrographs of fatigue surface of AHS-2.



(a) $\sigma_b = 146\,MPa$ (b) $\sigma_b = 168\,MPa$

Fig. 7. Scanning electron micrographs of fatigue surface of A390.

균열의 발생 시점은 규명하지 못하였으나 Al-Si 합금에서 균열은 Si 입자를 관통하지 않고 Si의 입계를 따라서 진전하는 동일한 특성이 있음을 관찰할 수 있었다.

3-2. 마모 특성

3-2-1. AHS-2 및 A390의 마모특성

Fig. 8은 AHS-2 및 A390의 활주속도에 대한 비마모량의 변화를 나타낸 선도이다. 비마모 특성은 A390이 AHS-2보다 우수함을 볼 수 있다. 두 재료 모두 활주속도가 증가함에 따라 비마모량은 증가하다 감소하는 2~3 m/s의 임계 속도 영역이 존재한다. 임계속도 이상에서 비마모량이 감소하는 현상은 표면 온도가 상승함으로 인해 시편 표면의 산화를 가속시켜 산화 피막이 형성됨으로 인하여 표면 보호 역할을 하거나 마모분이 윤활제 역할을 하기 때문에 비마모량이 감소하며 또는 속도가 빠르면 두 재료의 접촉

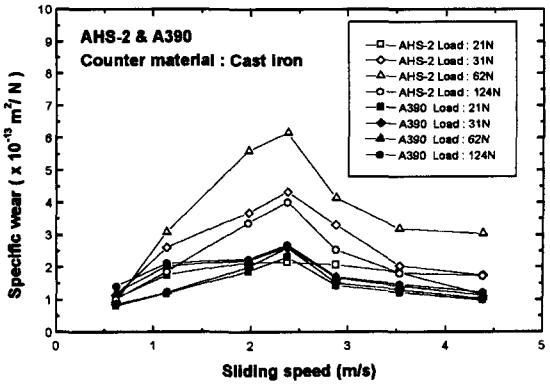


Fig. 8. Relations between sliding speed and specific wear amount of AHS-2 and A390 using counter material of cast iron.

이 확실히 이루어지지 않을 수도 있기 때문에 비마모량이 감소하는 것으로 사료된다. 하중이 증가함에 따라서 AHS-2는 비마모량은 증가하다 감소하며,

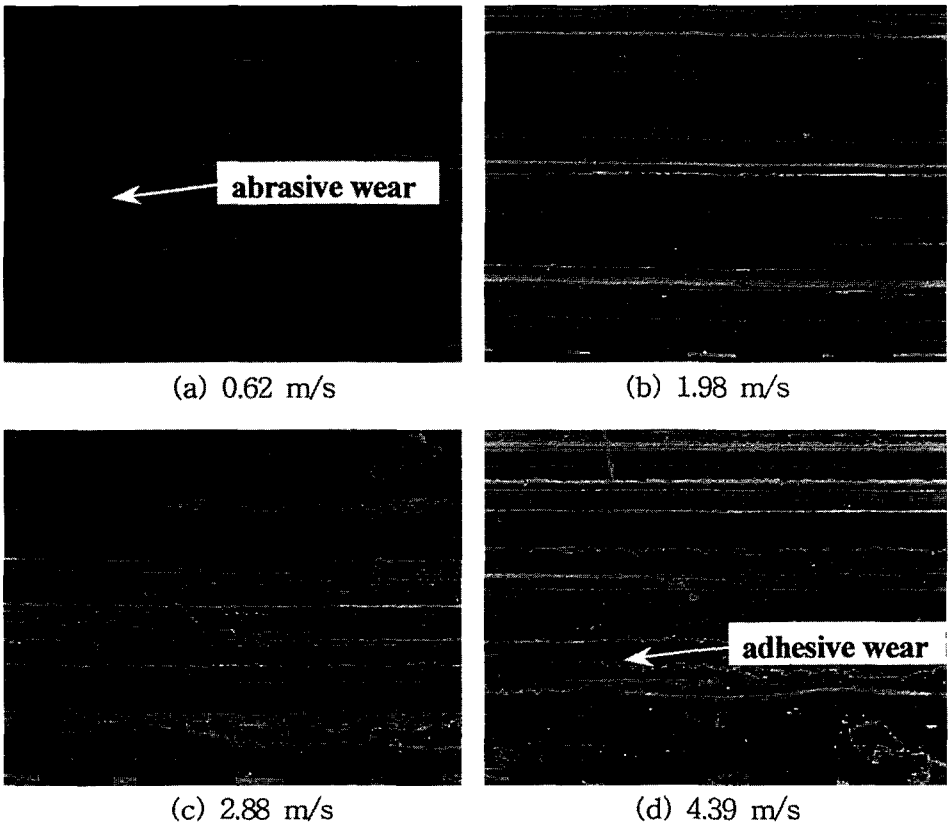
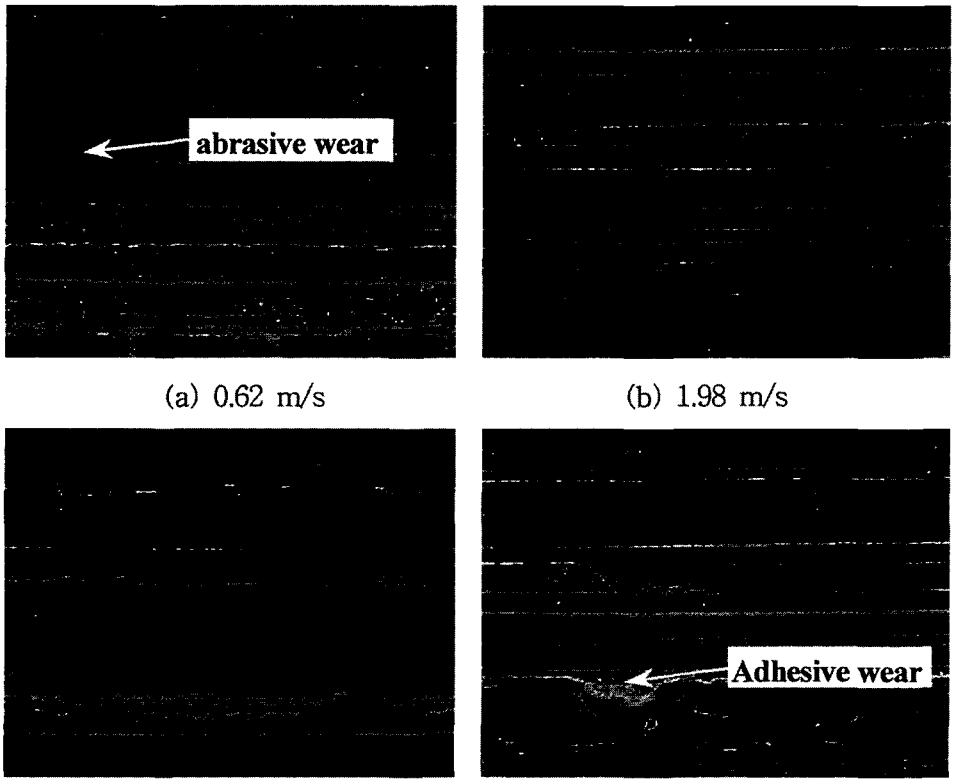


Fig. 9. Scanning electron micrographs of worn surface as a function of a abrasion speed in AHS-2 using counter of cast iron (P = 62 N, *l* = 400 m).

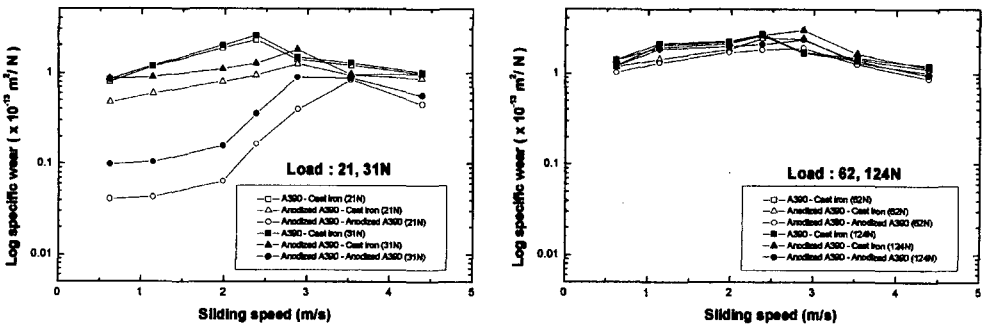
A390은 약간 증가하거나 일정하였다. Fig. 9~10은 시험 후 6.3 kgf에 대한 마모면을 주사식 전자 현미경을 이용하여 관찰한 마모면 사진이다. 두 재료 모두 초기 저속 구간인 0.62 m/s, 1.98 m/s에서는 긁힌 자국, 줄무늬 모양의 패인 자국으로 이루어진 연삭 마모가 주로 발생하였다. 그러나 활주 속도가 2.88 m/s, 4.39 m/s로 증가함에 따라 전단에 의하여 발생한 마모분이 표면에 엉겨 붙은 형태의 응착 마모와 연삭 입자의 모양 및 입자의 경도에 따라 마모 양상이 다양한 연삭 마모가 함께 발생함을 볼 수 있다. 다시 말하면 마모 특성은 A390이 우수하나 마모 원인 및 메커니즘은 두 재료 모두 비슷한 경향을 보이고 있다.



(a) 0.62 m/s (b) 1.98 m/s

(c) 2.88 m/s (d) 3.53 m/s

Fig. 10. Scanning electron microgrphs of worn surface as a function of a abrasion speed in A390 using counter material of cast iron (P = 62 N, l = 400 m).



(a) P=21, 31N (b) P=62, 124N

Fig. 11. Relationsh between sliding speed and specific wear amount of A390 and anodized A390.

이상의 실험 결과에서 다원계 Al-Si 합금의 마모 특성은 조직의 미세화에 의한 영향보다는 Si의 함량에 의한 영향에 좌우되는 것을 알 수 있으며, 이는 Reddy 등[7]에 의하여 연구된 것처럼 알루미늄에 Si가 첨가될수록 Al의 붙음 저항을 향상시켜 기지 강화 효과를 가져오기 때문으로 사료된다.

3-2-2. 아노다이징 처리에 따른 마모 특성의 영향

Fig. 11은 하중이 21, 31, 62, 124 N에서 활주속도 증가에 대한 상대재가 주철인 경우 A390 및 아노다이징한 A390의 비마모량과 시편 및 상대재를 아노다이징한 A390을 사용하였을 때 비마모량의 변화를 나타낸 그래프이다. 전체적으로 아노다이징에 의해 표면 처리한 시편의 비마모량이 적은 것을 볼 수 있다. 특히 아노다이징한 A390 시편에 상대재로 동일 재료를 사용한 경우 31 N 이내의 작은 하중 범위와 2 m/s 이내의 활주 속도 범위에서는 우수한 마모 특성을 가진다. 이는 아노다이징에 의하여 표면에 산화 알루미늄 피막이 형성되어 표면이 경하여 지므로 마모 특성이 향상되는 것으로 판단된다. 아노다이징 처리한 시험편의 표면을 표면 처리를 하지 않은 동일한 재료에 대한 경도 측정 방법과 동일하게 마이

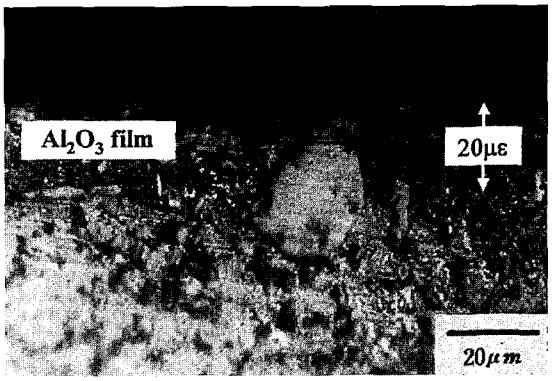


Fig. 12. Thickness of oxide film in anodized A390.

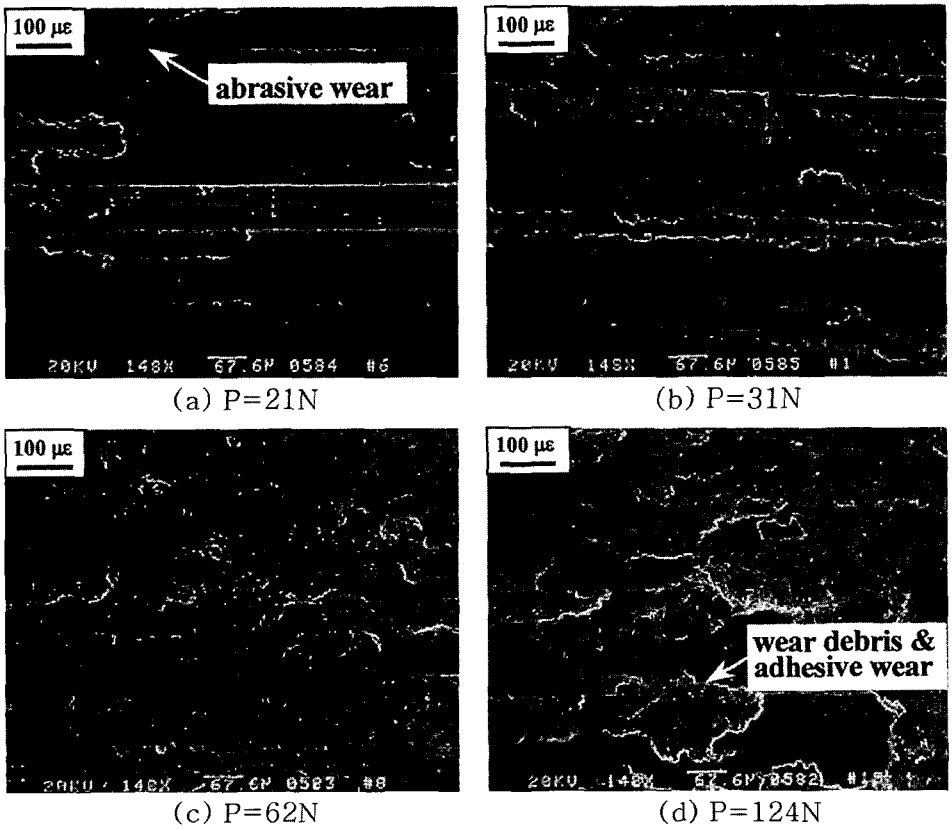


Fig. 13. Scanning electron micrographs of worn surface as a function of applied load in anodized A390 using counter material of anodized A390 (v = 0.62 m/s, l = 100 m).

크로 비커스 경도 시험기를 이용하여 경도를 측정한 결과 평균 182.8 Hv로 아노다이징 처리에 의하여 표면 경도가 40 Hv 이상 향상된 것을 볼 수 있다. Fig. 12는 이와 같은 표면처리층의 두께를 확인하기 위하여 표면에 수직하게 시편을 절단후 광학 현미경을 이용하여 표면 처리층의 두께를 측정한 결과이다. 약 20 μm 정도의 경한 산화 피막이 형성되어 작은 하중 구간에서 마모 특성을 향상시키는 것을 볼 수 있다. 그러나 하중이 62 N 이상 증가함에 따라 표면처리에 의해 생성된 활성층 및 다공층 아래로 마모가 진행되어 표면 처리를 하지 않은 시편과 동일한 마모 특성을 갖는 것으로 판단된다. 임계 속도 구간은 아노다이징한 시편의 경우 3 m/s 근방으로 표면처리하지 않은 시편보다 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13은 아노다이징한 A390을 상대 운동 하였을 때 0.62 m/s 활주 속도에서 하중 증가에 따른 마모면의 변화를 관찰한 것이다. 하중이 21 N으로 작은 경우에 연삭 마모와 작은 영역의 응착 마모가 발생함을 볼 수 있으나 재료의 손상 영역은 크지 않았다. 하중이 증가함에 따라 응착부는 확대되고 하중이 124 N인 경우인 (d)에는 균열(cracking)과 같은 현상이 발생하여 재료의 손상 영역이 커지고 있다. 따라서 마모를 발생시키는 최대 응력이 존재하는 위치를 표면으로부터의 임계 깊이라고 할 때 하중이 작은 범위에서는 임계 깊이가 표면 처리층 이내에 존재함으로 경도가 중요한 인자인 연삭 마모가 주로 발생하고 마모량도 적으나, 하중이 큰 경우 임계 깊이가 표면 처리층 이하에 존재하여 마모량이 증가하는 것으로 사료된다.

이상의 결과에서 상대 마찰 운동하는 부품의 재료로 Al-Si 합금을 이용하는 경우 동일한 합금을 사용하여 부품을 제작하는 경우 내마모성이 향상될 것으로 판단되며, 특히 합금의 표면에 아노다이징 처리를 하고 각 부품의 표면 접촉압을 최소로 유지하면 마모 특성은 크게 향상될 것으로 사료된다.

4. 결 론

컴프레서용 재료로 사용되는 다원계 Al-Si 합금의 파괴 인성, 피로 강도 및 마모 특성을 시험 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. AHS-2와 A390의 파괴 인성은 고강도 Al 합금에 비하여 낮아 균열에 대하여 취약하다.

2. 피로 강도는 AHS-2가 A390보다 크다. 다원계 Al-Si 합금의 피로 파면은 Si 입자를 관통하지 않고 Si 입계를 따라 진전하는 취성 특징을 지니고 있다.

3. 마모 특성은 A390이 AHS-2에 비하여 우수하다. 마모 원인 및 메커니즘은 두 재료가 서로 유사하며, 두 재료가 2~3 m/s에서 임계 속도 구간이 존재한다. 다원계 Al-Si 합금의 마모 특성은 Si의 함량에 의하여 좌우된다.

4. 아노다이징에 의하여 다원계 Al-Si 합금에 산화 피막을 생성하면 경도 및 마모 특성은 향상된다. 특히 저속, 저하중 범위에서 경한 표면 피막 생성으로 인해 마모 특성이 크게 향상된다. 하중이 큰 범위에서 마모량은 표면처리를 하지 않은 재료와 유사하다.

후 기

본 연구는 충남대학교 급속응고신소재연구소(ERC-RASOM)의 연구비 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 장준연, 문인기, "에너지 절약형 저소음 고효율 에어컨 부품 소재 개발," 대한금속학회지, 제10권, 제6호, pp.773-779, 1997.
2. 김영호, 배원병, 김재철, 김형식, "알루미늄 단조 피스톤의 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제14권, 제9호, pp.30-36, 1997.
3. ASM, Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM Handbook Vol.18, pp.785-794, 1995.
4. 片平和俊, 鈴木秀人, 市川忠明, "Al-Si(P/M)合金の高溫疲勞特性に及ぼす製造プロセスの影響," 日本機械學會論文集(A編), 第63卷, 第615號, pp.2269-2275, 1997.
5. Shiozawa, K., Tohda, Y. and Sun, S. M., "Crack Initiation and Small Fatigue Crack Growth Behaviour of Squeeze-Cast Al-Si Aluminium Alloy," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 20, No.2, pp.237-247, 1996.
6. Jasim, K. M. and Dwarakadasa, E. S., "Wear in Al-Si Alloys under Dry Sliding Conditions," Wear, Vol. 119, No.1, pp.119-130, 1987.
7. Reddy, A. S., Bai, B. N. P., Murthy, K. S. S. and Biswas, S. K., "Wear and Seizure of Binary Al-Si Alloys," Wear, Vol.171, Nos.1-2, pp.115-127. 1994.
8. ASTM, "E399-90 Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials," pp. 407-437, 1996.
9. 하홍수, 김명균, 안선규, 임병수, 김영직, "반용융 성

형 가공한 SiCp/AZ91HP Mg복합재료의 피로 및 내마모특성," 한국주조공학회지, 제17권, 제5호, pp. 472-479, 1997.
10. Broek, D., Elementary Engineering Fracture Mechanics, Chap.7, pp.177-180, Sijthoff & Noordhoff, 1978.
11. Couper, M. J., Neeson, A. E. and Griffith, J. R., "Casting Defects and the Fatigue Behavior of an Aluminium Casting Alloy," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol.13, No.3, pp. 213-227, 1990.