

<논문>

최적 피닝조건을 적용한 A6061-T6합금의 피로특성 및 Fractography에 관한 연구

이동선*·정성균†

A study on the fatigue characteristics and Fractography of AL6061-T6 alloy by optimal peening condition

Dong-Sun Lee* , Seong-Kyun Cheong†

Key Words: Shot peening(쇼트피닝), Optimal peening(최적피닝), Fatigue characteristics(피로특성), Fractography(파단면분석), Weld(용접), SEM(전자주사현미경)

Abstract

As the industrial society develops rapidly, the weight reduction and high strength are gradually demanded . In case of the welded joint for the rolling stock which receives the repeated load, the fracture can be easily occurred. However, the durability and fatigue characteristics can be improved if the shot peening technique is applied. The optimal peening process should be applied to the metal surface because the over peening can lower the durability of parts. Thus, the fatigue characteristics and Fractography of welded A6061-T6 alloy for a rolling stock were studied in the paper. The optimal peening condition and Fractography were examined. The experimental result show that over peening can lower fatigue life caused by micro crack, fold and incrustation. The fatigue life of welded A6061-T6 was tremendously improved.

1. 서 론

현재 인류가 사용하고 있는 에너지에는 한계가 있으며 이와 같은 문제로 인하여 세계적으로 대체에너지 개발 및 구조물의 경량화를 통한 에너지 절감에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 특히 우리나라와 같이 산업 구조상 타 국가에 비해 에너지의 의존도가 높은 경우 고유가 정세에 맞추어 이러한 연구 및 개발이 시급하다 할 수 있다.

알루미늄 합금은 다른 금속에 비해 경량이며 고

강도이다. 또한 내식성이 강하다는 장점을 가지고 있어 세계적으로 항공기나 선박 철도 등의 수송수단의 구조물로 많이 사용되어지고 있다. 특히 알루미늄은 재질의 특성상 성형이 쉽고 압출이 가능하여 철도 차량과 같이 단면이 균일한 구조체의 경우 유용한 구조재질이 된다⁽¹⁾. 이에 따라 독일, 이탈리아, 스위스 등의 선진국에서는 이미 30년 전부터 차체를 제작해 사용해오고 있으며 중단거리의 교통 및 수송방법으로 철도차량의 중요성과 그 경량화 수단으로서의 알루미늄 차체 개발이 매우 활발히 이루어지고 있다. 한편 우리나라의 경우는 전동차가 처음으로 도입되어 운행될 때부터 일반 강재가 적용되어 약 20 여년 이상 사용되어 왔으나, 높은 소재비중으로 인해 경량화가 어렵고 부식에 아주 약한 단점 등으로 인해 점차 사용이 줄어들고 있는 추세이다. 이에 따라 국내에서도 알루미늄 압출재를 적용한 표준

†책임저자, 회원, 국립서울산업대학교 기계공학과

E-mail : skjung@snu.ac.kr

TEL : (02)970-6330 FAX : (02)974-5008

* 국립서울산업대학교 산업대학원

전동차가 개발 완료되었고^(2,3), 한국형 고속전철 또한 알루미늄이 실용화 되어 현재 상당량의 철제 차량이 알루미늄 철도차량으로 대체중이다.

일반적으로 구조물이 반복 하중을 받으면 피로 파괴를 일으킨다. 더욱이 용접부와 같이 열 변형을 받아 취약한 경우에는 피로에 의한 파괴가 더욱 빨리 일어난다. 용접에 의해 차체를 제작하는 알루미늄 철도 차량의 경우 용접에 대한 소재 자체의 결함 뿐 아니라 차체가 운행 시 받게 되는 반복 하중에 대한 피로균열이 큰 문제가 되고 있다. 하지만 아직까지는 철도차량의 경량화 기술이 선진 외국에 비해서 떨어지는 것이 현실이며 이에 대한 지속적인 기술 개발이 필요하다.

이에 본 연구에서는 국내 철도 차량용 알루미늄인 A6005A와 동일 계열 소재인 A6061-T6 합금을 가공하여 용접한 후 부품의 피로강도 및 피로수명을 증가 시키는 기술로써 잘 알려진 쇼트 피닝을 적용하여 이에 따른 피로 특성 및 파단 형상을 평가하고자 한다.

2. 실험 및 시험편 특성

알루미늄 합금은 고온 용융 상태와 상온에서의 수소용해도 차이에 의해 냉각상태에서 용해되지 못한 수소 가스가 기공을 형성하게 되어, 기공과 고온균열은 알루미늄 합금의 대표적인 결함이라 할 수 있으며 이를 방지하기 위한 용접봉의 선정이 중요하다⁽¹⁾. 이에 따라 본 연구에서는 문헌을 참고⁽⁴⁾로 하여 AA5356 용접봉을 결정하였으며 Table 1은 용접봉의 화학적 성분을 나타낸다.

실험에 사용한 시험편 재료는 고강도 알루미늄 합금인 A6061-T6이며, Fig. 1과 같이 중앙부의 최소 직경이 24mm가 되게 가공하여 Table 2와 같은 조건으로 정밀하게 용접하였다. 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of AA5356 welding rod (wt%)

Mn	Si	Fe	Cu	Mg	Ti	Cr	Zn	Al
0.17	0.04	0.15	0.00	5.02	0.07	0.11	0.02	REST
25	17	92	05	74	14	3	74	

한편 가장 높은 피로수명을 갖는 피닝 강도 조건을 찾기 위해 적용응력을 200MPa로 고정된 후 투사 속도와 시간의 변화에 따른 피로수명의 변화를 실험적으로 알아보았다. 이때 피로 실험 후 오버 피닝으로 인한 수명저하의 원인을 평가하기 위하여 언더, 최적, 오버피닝 가공한 시험편의 표면 및 파단면을 정밀히 절단 하였으며 진공 코팅을 한 후 전자 주사현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

본 연구에서 가공된 용접 시험편은 최소단면적이 되는 중앙부에서 파단이 되어 지도록 설계되었다. 하지만 선행 연구를 통하여 시험편의 파단이 피닝 가공한 시험편의 경우 최소단면적이 아닌 중앙에서 약 6mm떨어진 열영향부에서 이루어짐을 알 수 있었으며⁽⁵⁾ 이에 따른 원인 분석을 위하여 중앙의 용접부를 SEM을 통하여 또한 관찰하였다.

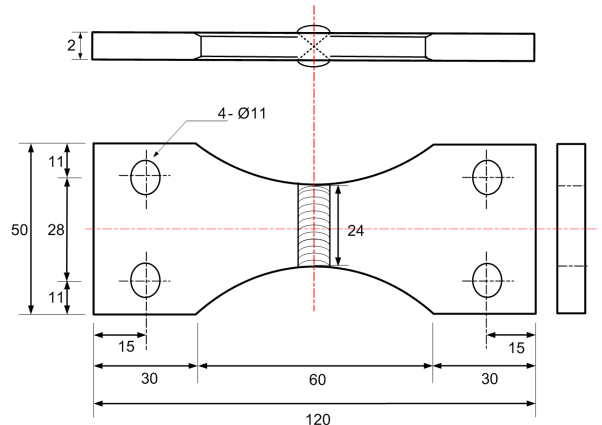


Fig. 1 Welded bending fatigue test specimen

Table 2 The condition of weldment

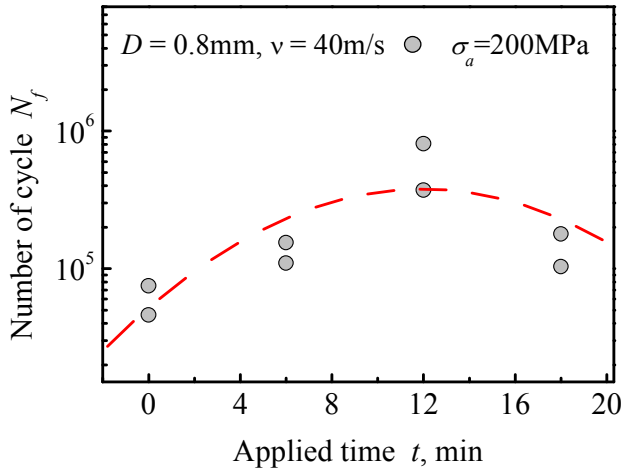
Welding rod dia (mm)	Ø 2.4
Shielding gas	100% Ar
Welding amp. (A)	200~250A
Welding vol. (V)	220V
Remark	2 pass 1layer

Table 3 Chemical composition of A6061-T6 (wt%)

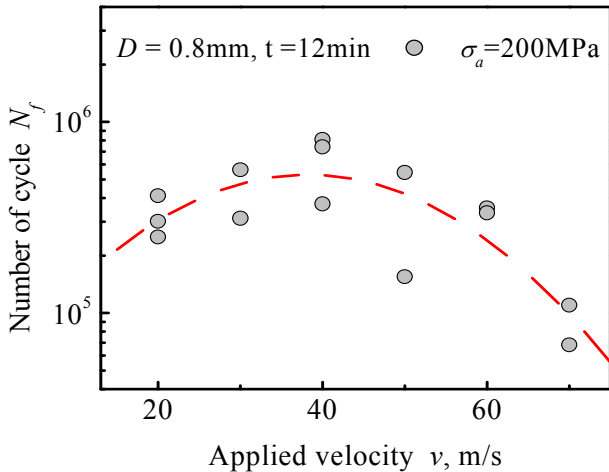
Mn	Si	Fe	Cu	Mg	Ti	Cr	Zn	Al
0.12	0.05	0.47	0.24	0.96	0.05	0.17	0.05	REST

시험장비는 50Kgf.m급 굽힘 시험기(J.T TOHSI, FTS-10)를 사용하였으며 변위에 따른 토크의 변화로서 응력의 증감을 조절하였다.

4. 실험 결과 및 고찰



(a) Optimal time



(b) Optimal velocity

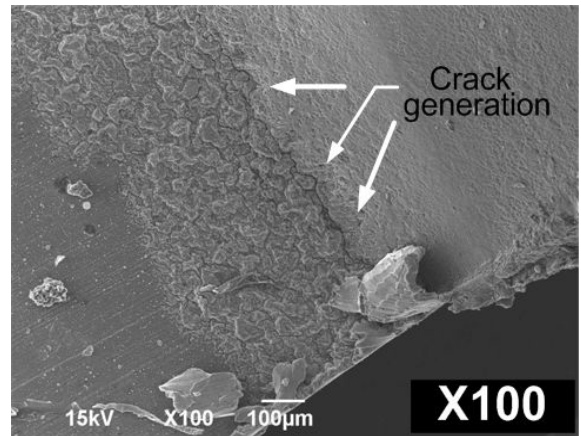
Fig. 2 Optimal peening condition of A6061-T6

Table 4 Mechanical properties of A6061-T6

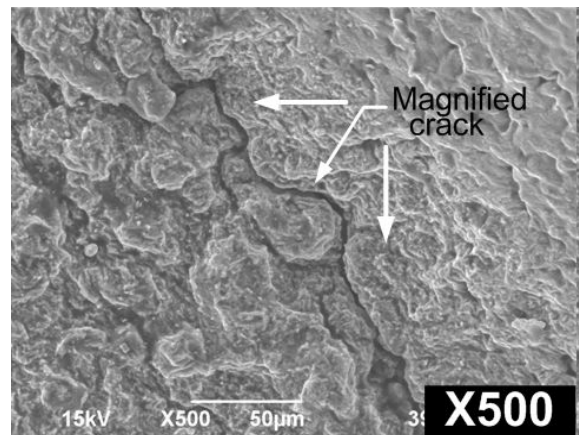
Element	Ultimate strength (MPa)		Yield strength (MPa)		Elongation (%)	
	Base metal	Weld joint	Base metal	Weld joint	Base metal	Weld joint
A6005-T6	315.5	193.4	265	143	16.5	4.34

피로수명의 극대 값을 갖는 피닝강도의 최적조건을 실험적으로 탐색하기 위해 알멘강도(Aleme intensity)에 따른 피로수명의 변화를 확인하였다. Fig. 2(a)는 시간에 따른 알멘 강도별 피로수명의 변화를 나타낸 것이다. 결과로부터 시간이 늘어날 수 록 초기에는 피로수명이 증가하다가 12분일 때 최대 피로수명 사이클을 얻었으며 12분을 벗어나기 시작 하면서 수명이 점차 감소하는 경향이 타나났다. 마찬가지로 Fig. 2(b)에서는 투사 속도에 따라 피로 수명이 증가하다가 40m/s를 기점으로 수명이 점차 감소하여 투사속도 70m/s가 되었을 때는 40m/s와 비교하여 수명이 현저히 감소됨을 알 수 있다. 따라서 최적의 피닝강도는 40m/s 12분이다.

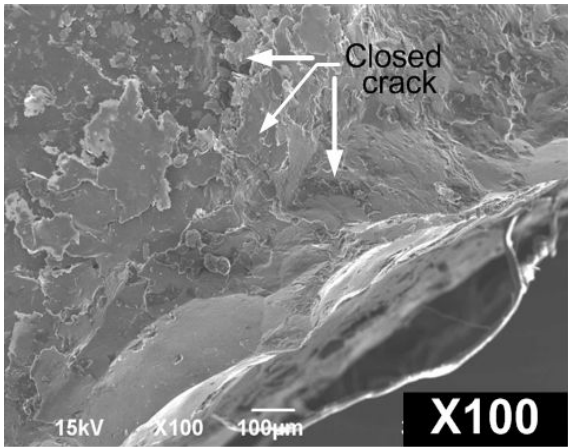
본 논문의 선행 연구에서는⁽⁵⁾ 피로시험 후 시험편의 파단 위치에 있어서, 피닝 가공하지 않은 시험편의 경우 응력이 가장 크게 작용하나 최소 단면적이 되는 중앙부에서 일어났으며 반면 피닝



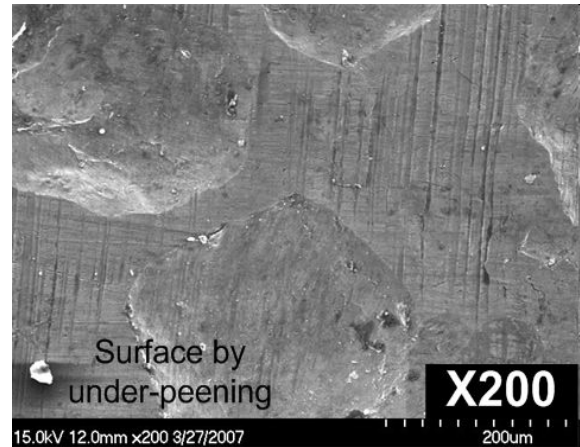
(a) Crack generation of welded zone



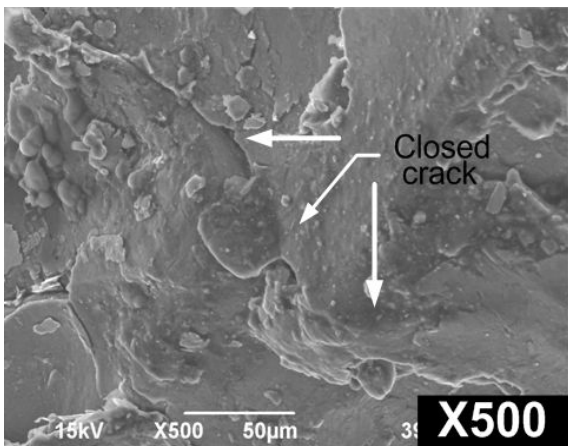
(b) Magnified crack of welded zone



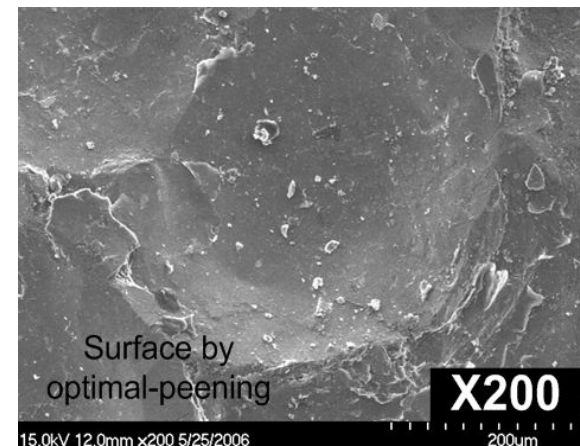
(c) Closed crack of welded zone by shot peening



(a) Surface of under peened specimen(40m/s, 1min)



(d) Magnified closed crack of welded zone by shot peening



(b) Surface of optimal peened specimen(40m/s, 12min)

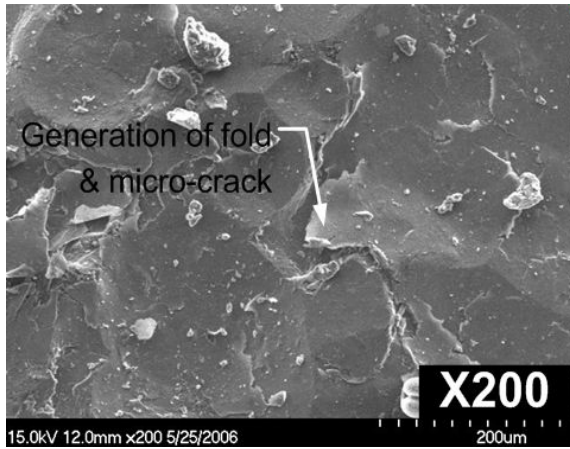
Fig. 3 Variation of crack generation by shot peening

가공한 시험편의 경우 시험편의 중앙부가 아닌 열영향부(HAZ)의 끝단에서 크랙이 생성되어 피로 파괴가 진행되었다. 이에 따라 본 연구에서는 선행연구 결과의 원인을 파악하고 오버피닝(over peening)으로 인한 수명 저하의 원인을 파악하기 위해 가공된 시험편의 표면 및 파단면을 전자 주사 현미경인 Scanning Electron Microscope(SEM)을 통하여 분석하였다.

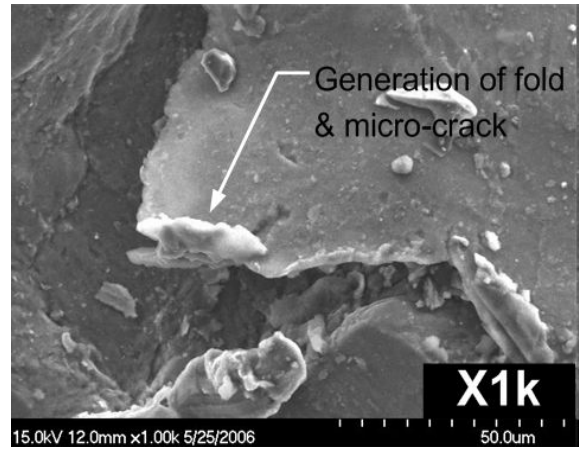
Fig. 3의 (a), (b)와 (c), (d)는 각각 쇼트피닝 가공한 시험편과 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편의 용접금속 부분과 열영향부 사이의 반응용역 부분을 확대한 microscope의 이미지이다. 그림에서와 같이 피닝가공하지 않은 시험편의 경우 반

Fig. 4 Variation of plastic deformation and coverage by shot peening

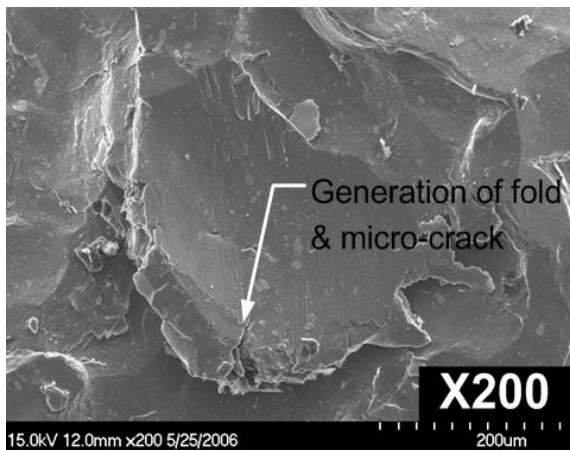
용용역과 용접금속 사이의 경계부분에 응력집중을 유발할 수 있는 노치 및 크랙이 생성되어 있으나 쇼트피닝 가공한 경우의 같은 부분에는, 피닝 적용 시 발생하는 소성 변형으로 인하여 노치 부분이 구형화(rounding)처리 되었으며 이로 인해 용접 시 생성된 크랙이 제거 되었다. 이와 동시에 재료의 소성 변형으로 인해 반응용역 부분의 경도가 눈에 띄게 향상 되었으며⁽⁵⁾ 상대적으로 경도의 향상이 다소 떨어지고 결정립의 크기가 조대화되어 재료의 강도가 상당히 저하되어 있는 열영향부(HAZ)에는 최소단면적인 중심부분에 비하여 재료의 성질 및 기계적 특성이 상당히 저하되어 이로 인한 재료 파단의 초기 시작점(crack initiation)이 피닝가공한 경우 모두 열영향부에서



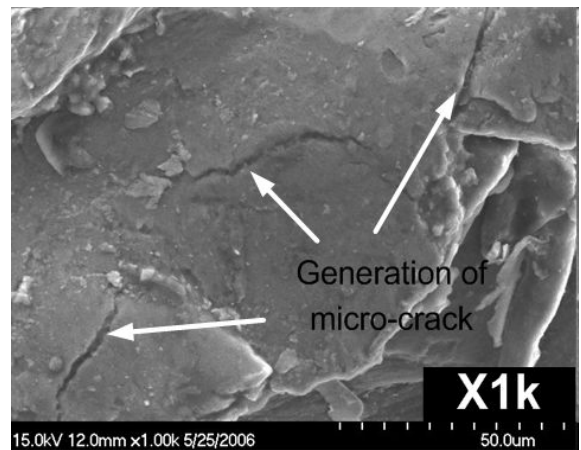
(a) Over peened surface cause by time
(40m/s, 18min)



(a) Fold & micro-crack cause by over peening(40m/s, 18min)



(b) Over peened surface cause by velocity
(70m/s, 12min)



(b) Generation of micro-cracks cause by over peening(70m/s, 12min)

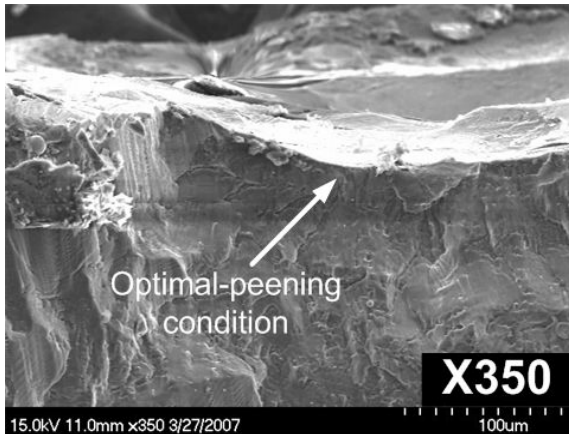
Fig. 5 Surface of over peened specimen

Fig. 6 Magnified over peened specimen

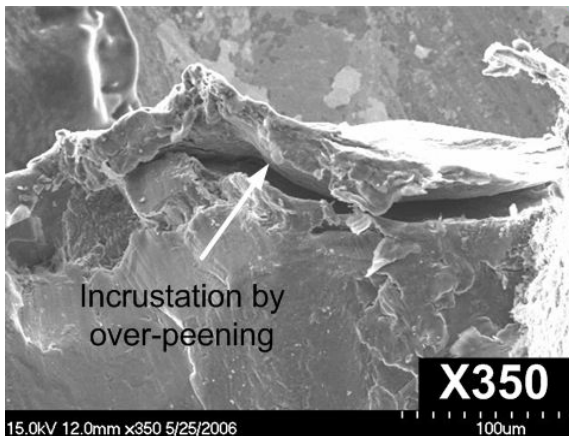
시작되는 것으로 사료된다. Fig. 4 의(a)는 언더 피닝 조건, (b)는 최적피닝 조건이며 Fig. 5 (a), (b)는 각각 시간 및 속도에 따른 오버피닝의 표면을 분석한 것이다. Fig. 8, 9에서는 쇼트 피닝의 적용 강도(Almen intensity)가 세어짐에 따라 압흔의 크기와 깊이가 커지며 커버리지 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 정상적인 표면을 가진 (a), (b)와는 달리 속도와 시간에 따른 오버피닝 Fig. 5 (a), (b)의 경우 과도한 에너지로 인하여 표면이 떨어지는 금속박리(fold)가 형성된 것을 볼 수 있다.

한편 Fig. 6의 (a), (b)의 경우는 Fig. 5의(a), (b)를 확대한 결과이며 Fig. 7 (a)와 (b)는 피로 실험

후 최적 피닝과 오버 피닝의 파단면을 관찰한 Fractography 이다. Fig. 6의 (a), (b)에서는, 표면에 형성된 금속 박리와 함께 수명의 저하를 유발시키는 미소크랙(micro-crack)을 확연히 관찰할 수 있었으며 이는 곧 재료 표면에 응력집중을 유발시켜 압축 잔류응력을 감소시키고 피로 수명을 저하시키는 주요 인자로 사료된다. 또한 Fig. 7의 (a)와 (b)의 경우에는 소성변형에 의한 압흔만이 관찰되는 최적 피닝과 달리 오버피닝의 경우 크랙 초기점의 시발점이 되는 것으로 알려진⁽⁶⁾ 재료의 박리현상(fold) 및 금속각질형성(incrustation)을 좀더 확연히 관찰할 수 있다. 이로서 오버피닝의 경우 과도한 에너지에 의한 소



(a) Optimal peened specimen(40m/s, 12min)



(b) Over peened specimen(70m/s, 12min)

Fig. 7 Incrustation of over peened specimen

성변형으로 인하여 표면부의 심한 요철과 함께 미세한 균열(micro crack)을 생성시키며 이는 하중에 의한 균열의 성장속도 증가로 이어져 재료의 피로수명을 저하시킨다는 결과를 얻었다.

4. 결론

본 논문에서는 운행 중 반복적인 피로하중을 받는 철도 차량용 알루미늄의 동일계열 소재인 A6061-T6 소재를 이용한 용접부 피로 특성평가에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로수명의 극대를 갖는 최적 피닝강도 탐색에서 최적조건은 투사속도 40m/s, 투사시간 12분에서 탐색되었다.

(2) 쇼트피닝 가공한 시험편의 경우 가공하지 않은 시험편에서 볼 수 있는 반응용화 부분의 크

랙이 생성되지 않았으며 노치부분이 구형화 되었다.

(3) 시험편의 표면을 관찰한 SEM 이미지에서 오버피닝의 경우 금속박리(fold) 및 미세크랙(micro-crack)을 관찰할 수 있었다.

(4) 피로시험 후 과단면관찰에서 오버 피닝의 경우 과도한 투사 에너지로 발생되어진 소성변형으로 인하여 재료의 기계적 강도를 저하시키는 금속각질(Incrustation)이 형성되었다.

참고문헌

- (1) Seo, S. I., 2002, "Studies on the prevention of damages on the carbody of Aluminum rolling stock", *Trans. of the KSR*, Vol. 3, No. 5, pp. 181~186.
- (2) Seo, S. I., C, S. H., Im, Y. H., Lee, J. S., 1999, "Development of the Standardized Aluminum Electric Motor Car", *Trans. of the KSR*, Vol. 2, No.3, pp. 54~60.
- (3) Seo, S. I., Park, I. C., Kim, J. T., Lee, D. H., S, D. S., 1999, "Design of carbody and development of production techniques of large aluminium extrusion profiles for rolling stock", *Trans. of the KSR*, Vol. 2, No. 1, pp. 1~13.
- (4) Choi, J. H., Kang, D. I., Jang, Y. S., Kim, Y. S., 1997, "A study on the development of welding technique of aluminium alloy for rolling stock", *Trans. of the KWS*, pp. 220~223.
- (5) Kim, J. H., Lee, D. S., Jin, C. S., Lee, T. K., Cheong, S. K., 2005, "A study on the fatigue characteristics of shot peened welded joints for the rolling stock ", *Trans. of the KSR*, pp. 1083~1088.
- (6) Higounenc, O., 2005, "Correlation of shot peening parameters to surface characteristic", *Proc. of 9th International Conference on Shot Peening*, pp.28~35.