

철도차량용 6005A 알루미늄 합금 압출재의 미세조직 및 용접부 피로 특성

이정국* · 서창우* · 오창록* · 신동혁* · 이동현** · 김용석***

(1999년 4월 9일 접수)

Microstructural and Fatigue Characteristics of AA6005A Weldments for Railroad Vehicles

J.G. Lee, C.W. Seo, C.R. Oh, D.H. Shin, D.H. Lee and Y.S. Kim

Abstract

This research investigates microstructures and fatigue properties of the weldments of 6005A aluminum alloy developed for railroad vehicles. The samples were extruded into a truss structure and welded together using the gas metal arc welding process. The extruded sample showed a wide variation in grain size, possibly due to the frictional heating as well as the inhomogeneous metal flow in the extrusion die. The mechanical properties of the samples were affected by the microstructures. The fatigue strength of the welded structure was found to decrease significantly from that of the base metal. It was found that the fatigue characteristics of the welded structure were determined by the microstructure of the parent metal as well as weld defects such as porosities and the liquation cracks.

Key Words : Microstructure, Extrusion, Weld, Fatigue, Welding Defect, Fatigue Strength

1. 서 론

최근 철도차량 등 수송 기기의 경량화, 대형화 및 고속화가 요구됨에 따라, 기존에 주로 사용되었던 철강재료를 경량 고강도의 알루미늄 합금으로 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 철도차량용 소재로서는 고강도 특성을 가진 7000계열의 재료와 압출성 및 용접성이 상대적으로 우수한 6000계의 알루미늄 합금이 일

본, 독일을 중심으로 이용되고 있다. 현재 국내에서는 압출성과 급냉 감수성이 우수한 것으로 알려진 6005A 알루미늄 합금을 철도차량용 재료로 개발하기 위한 연구가 알루미늄 소재 제조 업체와 철도 차량 제조 업체간의 공동 연구로 활발하게 진행중이다. 그러나 알루미늄 합금은 소재 가격이 높기 때문에, 알루미늄의 부품을 대형으로 압출하고 조립 공정 단계를 단축하여 철도 차량 제조 공정 원가를 감소시켜 궁극적으로는 제품 경쟁력을 제고

* 한양대학교 금속재료공학과

** 동양강철 기술연구소

*** 용인대학교 금속재료공학과

시키려는 노력이 함께 진행중이다.

압출된 알루미늄 합금이 철도차량용 구조재로 사용되기 위해서는 여러 가지 측면에서 기계적 특성 평가가 이루어져야 하는데, 대표적으로 강도, 인성 및 피로특성 등이 있다. 철도차량용 알루미늄 합금은 압출시 발생하는 마찰열에 의한 국부적 가열 효과와 복잡한 형상의 압출시 발생하는 압출 다이내 불균일 금속 유동이 발생하기 때문에, 균일한 미세 조직을 얻기 위해서는 엄격한 공정설계가 요구된다.⁽¹⁾ 특히 철도차량용 알루미늄 압출재의 경우 두께가 얇기(3~4mm) 때문에 불균일한 미세조직을 갖을 가능성이 높고, 이들이 압출재의 신뢰성에 영향을 미칠 가능성이 높다. 특히 압출 또는 압출 후 재가공을 위한 재가열시 압출제품의 일부 영역의 결정립이 조대해지는데,⁽²⁾ 이러한 결함은 압출된 제품에서 특히 많이 나타난다. 결정립이 조대한 영역이 포함된 재료는 국부적으로 기계적 성질이 불균일하게 되고, 이는 결국 재료의 신뢰성을 저하시키는 원인이 된다. 또한 용접시 열영향부에 발생하는 liquation crack은 기지 금속의 결정립 크기에 영향을 받는 것으로 알려져 있는데^(3,4), 압출재 결정립이 조대화되면 이들 균열의 발생 가능성을 증가시키게 된다. 따라서 이들 조직이 구조재의 신뢰성에 미치는 영향에 대한 평가가 철저하게 이루어져야 한다.

한편 철도차량의 구조물은 사용 중 반복 하중을 받게 되어 피로 균열의 전파가 일어날 수 있으며, 이는 차량의 구조적 안정성에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 특히 알루미늄 압출재를 이용하여 철도차량을 제작할 때 용접 공정이 포함되는데, 용접 결함 및 용접 열영향부 포함하고 있는 용접부에 가해지는 반복 하중은 피로 파괴를 유발시킬 가능성을 증가시키게 된다. 특히 6005A 합금은 시효 경화형 합금이기 때문에 용접시 열영향에 의하여 용접 열영향부의 강도가 모재에 비하여 50%정도까지 감소하는 현상이 발생한다.⁽⁵⁾ 따라서 알루미늄 압출재의 용접부 피로 파괴 특성 또한 철저하게 평가되어야 한다.

이로부터 본 연구에서는 철도차량의 바닥재(floor panel)로 사용되는 6005A 알루미늄 압출재를 이용하여, 압출재의 기계적 성질 및 미세조직의 변화를 조사하여 소재의 특성을 평가하고자 하였다. 또한 용접에 의한 용접부의 미세조직 및 기계적 성질의 변화를 조사하고 이를 바탕으로 용접부의 피로 특성을 평가하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 철도차량용 6005A 알루미늄(Si : 0.068, Mg : 0.548, Mn : 0.164 및 Fe : 0.1wt%) 압출재

의 형상이 Fig. 1에 나타나있다. 압출은 8000 ton 프레스를 사용하여 행해졌으며 압출조건을 Table 1에 나타내었다.

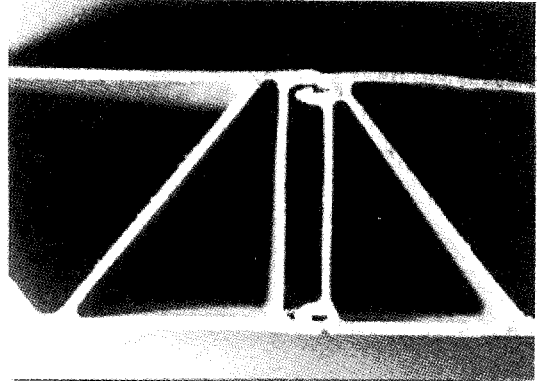


Fig. 1 Photograph of welded floor panel of 6005A alloy for railroad vehicles

Table 1 Process conditions of extrusion

		Conditions
Heating Temp.	Billet	470-524°C
	Die	450-460°C
	Container	460-470°C
Extrusion Pressure (kg/cm ²)	Initial pressure	: 304-339
	Working pressure	: 290-318
	Final pressure	: 252-281
Extrusion Speed (mm/min)	Ram speed	: 1-3.3m/sec
	Puller	: 5-6m/min

이러한 압출재를 5356 알루미늄 용접봉으로 사용하여 맞대기 용접을 실시하였다. 이때 용접 방법은 pulsed current gas metal arc welding(PC GMAW) 및 direct current reverse polarity GMAW법등 두가지 방법을 사용하여 용접하였다. 각 용접법의 용접 조건은 Table 2에 나타나있다. 인장시편과 피로시편은 용접방향에 수직인 방향으로 채취하여 용접부가 시험편 중간에 오도록 제작하였으며, 시편 가공시의 시편 표면의 scratch나 미세 결함을 제거하기 위해 시험 전 시편 표면을 #2000연

Table 2 Welding conditions

Pulsed arc Gas Metal Arc Welding
Electrode material : 5356
Wire feed speed : 289 inch/min
Pulse frequency : 158 Hz
Base current : 45 A
Peak current : 285 A
CTWD : 18 mm
Pulsed duration time : 2.0 msec
Welding speed : 0.45 m/min
Direct Current Reverse Polarity Gas Metal Arc Welding
Electrode material : 5356
Welding current : 265 A
Arc length : 0.127 inch
CTWD : 18 mm
Welding speed : 0.45 m/min

마지로 연마하였다. 상온인장은 초기변형속도 1mm/min로 실험하였다.

압출재의 미세조직을 관찰하기 위하여 Al₂O₃ 분말을 이용하여 미세 연마하였으며, 이때 사용된 부식액의 조성은 메탄올 50ml, HCl 30ml, HNO 20ml, HF 1 drop 이었다. 피로실험 후 파면 관찰은 주사전자현미경(SEM)을 사용하였으며 파면에 존재하는 제 2차 상 분석을 위해 EDS분석을 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 6005A 알루미늄 압출재의 미세조직과 인장 특성

Fig.2와 Fig.3에 동일 조건에서 압출된 재료의 미세 조직을 서로 다른 부분에서 관찰하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 동일한 압출 조건에서 제조된 시편임에도 불구하고 부위별로 상당히 다른 조직을 나타내는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 Fig.2와 같은 미세 조직을 가지는 것을 'A'로 Fig.3과 같은 것을 'B'로 구분하였다. Fig.2에서 살펴보면, 재료의 표면부에는 조대한 결정립이 존재하나 전반적으로 미세하고 균일한 결정립으로 이루어진 것을 알 수 있다. 표면의 조대한 결정립은 압출법으로 제조된 재료의 특징적인 조직으로서, 압출 다이와 소재와의 마찰열에 의한 가열 현상 때문에 발

생하는 현상으로 알려져 있다. 이에 비하여 Fig.3에서 보면, 재료의 대부분을 조대한 결정립을 가진 부분이 차지하고 있고, 미세한 결정립을 가진 부분이 재료 내부에 부분적으로 존재하는 것을 볼 수 있다. 이러한 조대 결정립이 과도하게 성장한 부분이 존재하는 것은 압출시에 과도한 소성 변형에 의한 온도 상승이 국부적으로 발생하였기 때문으로 추정된다.⁽⁶⁾



Fig. 2 Optical micrograph of a sample with relatively homogeneous microstructure. The sample with this type of microstructure was designated as type 'A'



Fig. 3 Optical micrograph of a sample with large grains. The sample with this type of microstructure was designated as type 'B'

이러한 미세조직을 갖는 압출재를 구분하여 인장 실험한 결과를 Table 3에 나타내었다. 표에서 보면 상대적으로 조대한 결정립을 갖는 B 압출재의 경우 균일한 결정립을 갖는 A 압출재에 비해 약 20~30 MPa정도 강도가 저하되었으며, 특히 파단 연신률이 크게 저하하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 결정립이 조대화되기 때문에 발생하는 현상으로, 압출재는 미세조직의 차이에 따라 최대 인장 응력과 파단 연신률에 상당한 차이를 나타냄을 알 수 있다. 이와같은 미세조직 차이는 철도차량용

구조재로 사용시 신뢰성에 영향을 미칠 가능성이 있으며, 현재 보다 균일한 조직을 얻기 위한 연구를 압출 조건 개선 및 성분 조절에 초점을 맞추어 진행 중에 있다.

Table 3 Tensile properties of 6005A alloys

	UTS(MPa)	YS(MPa)	EL.(%)
A(upper)	291	255	10.7
A(lower)	276	241	6.3
B(upper)	260	223	3.8
B(lower)	262	227	3.2

3.2 용접부의 인장 특성 및 용접 결함

용접된 압출재를 상온에서 인장 시험을 실시하여, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 표에서 보면 용접부의 인장 강도는 모재의 인장 강도에 비하여 50~70%정도로 감소한 것을 볼 수 있다. 그러나 용접 입열량이 상대적으로 적은 PC GMAW법으로 용접한 재료가 DCRP GMAW법으로 용접된 재료에 비하여 강도의 감소 정도가 적었다. PC GMAW법의 평균 용접 전류는 120A로서 DCRP GMAW법의 285A에 비하여 낮기 때문에, 용접 열영향이 줄어들었기 때문으로 생각된다.

Table 4 Tensile properties of welded 6005A alloys

	UTS(MPa)	YS(MPa)	EL.(%)
P C GMAW	185	113	7.3
D C R P GMAW	146	105	5.4

한편 각 시편의 인장 시험시 용접부 중앙에서 약 15~20mm 정도 떨어진 부분에서 파단이 발생한 것으로 관찰되었는데, 이는 용접시 열영향에 따른 강도 감소와 관련될 수 있다. Fig. 4는 용접된 시편의 미소 경도의 분포를 나타내는 것으로, 용접 열영향에 의하여 최소 경도를 나타내는 부분이 10~15mm의 범위에 존재하는 것을 볼 수 있다.⁽⁷⁾

알루미늄 용접 열영향부(heat affected zone, HAZ)의 미세 조직을 관찰하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보면 용접부에서 모재 방향으로 균열이 생성되어 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 알루미늄 용접시 발생하는

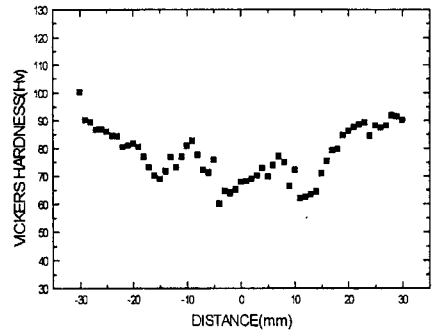


Fig. 4 Microhardness around a weldment of 6005A alloy

전형적인 liquation cracking의 현상이다. 이는 용접금속에 비하여 입계상의 solidus line이 상대적으로 낮기 때문에 나타나는 것으로, 용접 금속의 응고시 발생하는 잔류 응력에 의하여 응고되지 않은 입계가 균열로 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 균열의 발생 빈도는 입계상의 성분 뿐만 아니라, 입계에 편석된 입계상의 분율에 의하여 영향을 받는다. 따라서 모재의 결정립이 조대하면, 입계에 편석된 용질 원자의 분율을 증가시켜, 이 균열의 발생 가능성을 증가시킬 수 있다. 본 연구에서는 대부분의 시료에서 이 균열이 관찰되었는데, 이것은 앞에서 고찰된 바와같이 압출재의 결정립이 매우 조대하였기 때문으로 생각된다.

또한 용접부의 미세 조직을 나타낸 Fig. 5b에서 보면, 용접부에 상당한 분율의 기공이 함유되어 있는 것을 알 수 있는데, 이것은 용접시 대기중의 수분이 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다⁽⁸⁾. 즉 대기중의 수분이 수소와 산소 가스로 분해되고, 수소가 용탕중으로 용해된 후, 응고중에 빠져나가지 못하여 생기는 것이다. PC GMAW법으로 제조된 시편의 경우(Fig. 5a), 기공의 함유량이 상대적으로 적은데 비하여, DCRP GMAW법으로 제조된 시편의 경우(Fig. 5b)에는 상당한 함유량을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 PC GMAW용접시 용접봉으로부터 용융된 액적의 이행이 DCRP GMAW법에 비하여 상대적으로 균일하게 발생하기 때문으로 생각된다. 즉 액적의 이행이 규칙적으로 발생함에 따라서 아크가 안정화되고, 이에 따라 대기중 습기가 아크내로 혼입되는 정도가 감소하기 때문이다.

3.3 용접부의 피로 특성

PC GMAW법과 DCRP GMAW법으로 용접된 압출재

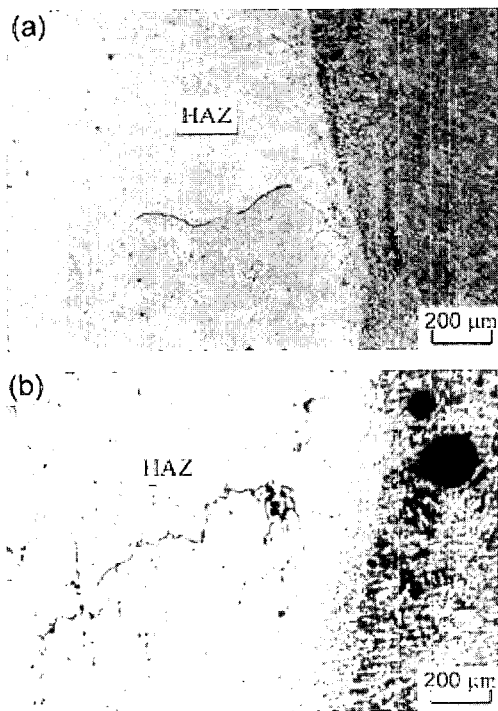


Fig. 5 Optical micrographs of the weldments. (a) a liquation crack was observed in the sample welded by the PC GMAW method and (b) liquation cracks as well as porosities were noted welded by the DCRP GMAW method

의 피로시험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. S-N곡선은 최대응력(σ_{max})대 cycle 수(N)로 나타내었다. 여기서 보면 10^6 cycles에서 6005A 압출재의 피로 강도는 약 220MPa로 측정된 반면, 용접된 시편의 피로 강도는 용접 방법에 관계 없이 100~120 MPa 범위로 측정되었다. 이때 모든 피로 파단은 용접부에서 발생하였는데, 주사 전자현미경을 이용하여 피로 파면을 관찰하였다. Figs. 7 및 8는 DCRP GMAW법으로 용접된 시편의 피로 파면을 보여주고 있다. 이 경우 피로 파괴는 HAZ에서 파단이 시작되어 용접부로 전개되었으며, 이러한 과정을 Fig. 7(a)에 나타내었다. 이는 용접으로 인해 응력집중된 weld toe 부분에서 피로 파괴가 시작된다는 일반적인 용접부의 피로특성과 일치한다. 이 시료의 피로 파면에 매우 많은 양의 기공이 나타나는 것을 볼 수 있는데 (Fig.7(b)), 이러한 기공은 파면 전반에 걸쳐서 분포하고 있으며 이로 인해 용접부의 피로 강도가 압출 소재의 피

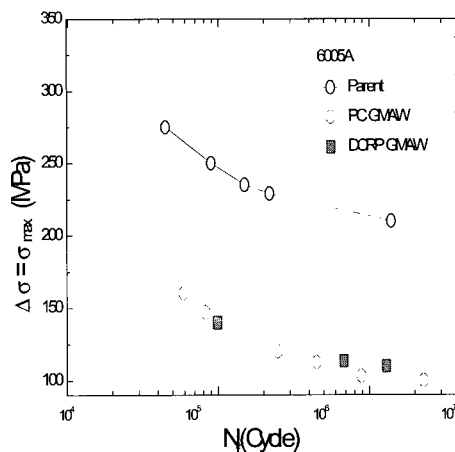


Fig. 6 S-N curves of parent and welded 6005A alloys. The welding method is denoted in the legend

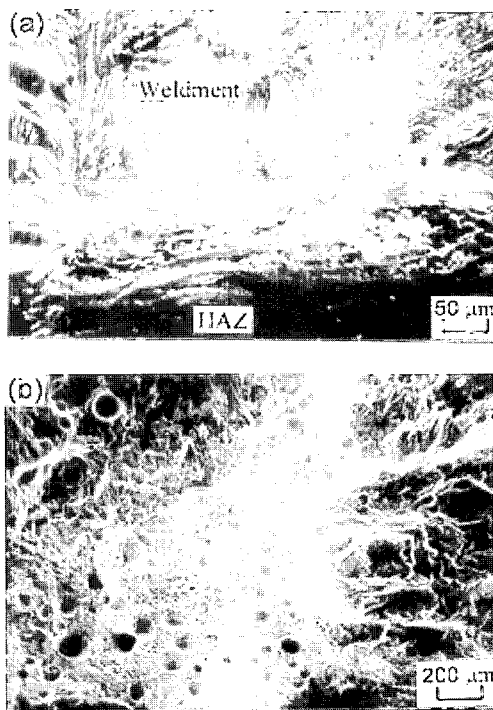


Fig. 7 SEM micrographs of the fatigue fractured surface of the sample welded by DCRP GMAW method. (a)area around where the fatigue crack was initiated and (b)porosities revealed on the surface

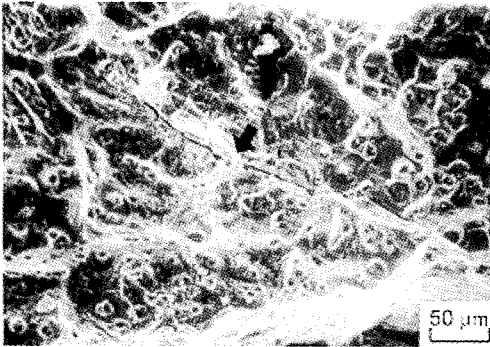


Fig. 8 SEM micrograph of the fractured sample as in Fig. 6. The liquation crack was observed on the fractured surface

로강도에 비해 크게 저하되었으리라 생각된다. 또한 Fig. 8에 나타나있듯이 용접부 파면에 매우 큰 균열이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이 균열은 Fig. 5의 liquation crack으로 이러한 균열 역시 기공과 마찬가지로 피로 강도를 저하시키는 영향을 미쳤을 것으로 보여진다.

PC GMAW법으로 용접된 시편의 피로 파단면의 전자현미경 사진이 Fig. 9에 나타나있다. 이 시편의 피로 파괴 거동은 DCRP GMAW법으로 용접된 시료의 피로 파괴 거동과 유사하게 관찰되었다. 즉 피로 파단은 Fig. 9a의 오른쪽 평활면에서 시작되어 방사선 형태를 나타내면서 용접부로 전개되었다. 오른쪽의 평활면을 확대하여 관찰한 결과를 Fig. 9b에 나타내었는데, 여기서 보면 Fig. 8b와 같이 결정립계가 용융된 liquation crack의 증거를 관찰할 수 있다. 또한 결정립 및 입계의 EDS 분석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 여기서 보면 결정립의 EDS 분석시(Fig. 10a)는 존재하지 않던 Fe 및 Mn 등과 같은 성분들이 입계에 편석되어있는 것이 관찰되었다(Fig. 10b) 한편 PC GMAW법으로 용접된 시편의 파단면에서는 기공이 관찰되지 않았는데, 이것은 용접부의 미세조직(Fig. 5)에서 예측되었던 결과이다.

PC GMAW법으로 제조된 시편의 피로 강도는 파단면에 기공이 관찰되지 않았음에도 불구하고, 기공의 함유량이 많은 DCRP GMAW 용접법의 경우와 거의 유사하게 나타났다. 이는 PC GMAW법으로 제조된 시편의 피로 강도가 기공 외에 또 다른 용접결합의 영향을 받은 것으로 생각된다.

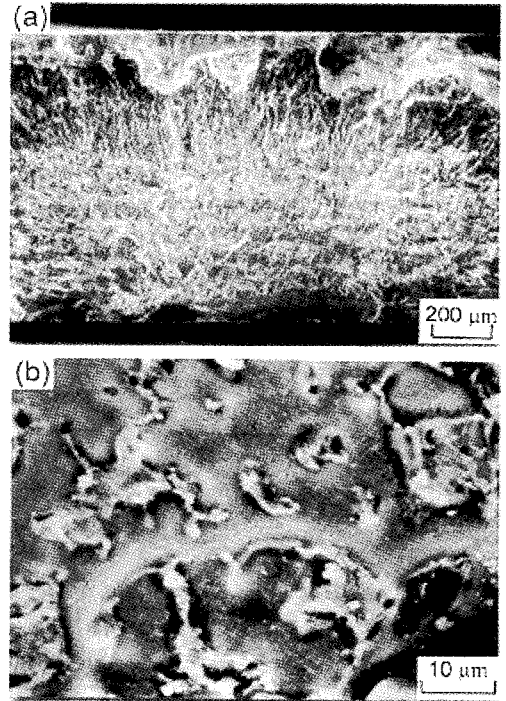


Fig. 9 SEM micrographs of the fatigue fractured surface(a) and a microstructure(b) at a higher magnification near the area where the fatigue crack was initiated

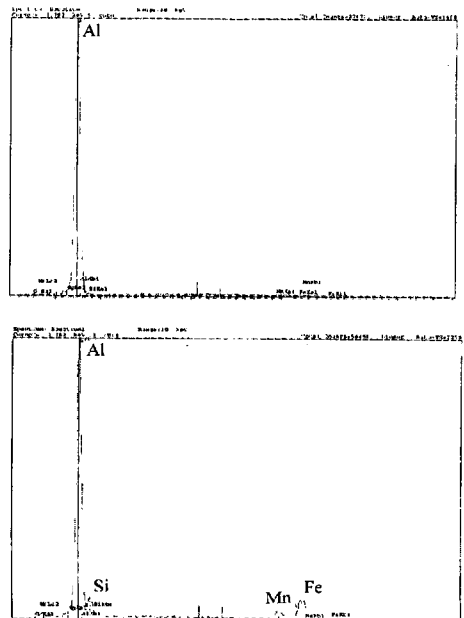


Fig. 10 EDS analysis of (a) in the matrix and (b) near grain boundary region



Fig. 11 SEM micrograph of the fractured surface after fatigue test. The liquation crack was observed

Fig. 11은 피로 파단이 개시된 지점의 아래 부분을 관찰하여 나타낸 것으로 피로 파면에 미세한 crack들이 파면 전체에 고루 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 균열 역시 liquation crack의 형상을 하고 있는데, 이들 균열의 존재로 인하여 PC GMAW 용접법으로 제조된 시편의 피로 수명이 감소된 것으로 생각된다.

4. 결론

(1) 철도차량용으로 제조된 대형 압출재의 경우, 미세 조적은 부분적으로 상당한 차이를 보였다. 이러한 현상은 압출재의 크기가 크고, 그의 두께가 얇아 압출 조건이 가혹하기 때문으로 생각된다.

(2) 용접된 재료의 인장 강도는 모재의 강도에 비하여 50~70%의 수준이었다. 이때 재료의 파단은 용접 열영향부에서 발생하였는데, 이 부분은 용접열영향에 의한 강도 감소와 결정립의 조대화에 의한 강도 감소의 영향이 동시에 발생한 지점이었다. PC GMAW 용접법으로 용접된 시편의 인장 강도는 DCRP GMAW법으로 용접된 시료에 비하여 높게 나타났는데, 이것은 단위 길이당

의 용접 입열량이 상대적으로 적었기 때문으로 판단된다.

(3) 용접부의 피로 강도는 모재의 피로 강도 대비 45~55% 수준이었다. 용접부의 파단면을 관찰한 결과 용접부의 피로 강도는 용접부에 존재하는 기공, liquation crack 및 용접 열영향에 의한 강도의 감소등에 의하여 저하하는 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) W.Z. Misiolek, 1996, J. Mater. Proc. Tech., 60, 117~124.
- (2) P.R. Sperry, 1984, proceedings Third Int'l Aluminum Extrusion Technology Seminar., 1, 21~29.
- (3) N.F. Gittos and M.H. Scott, 1981, J. of American Welding Society., 60(6), s95~s103.
- (4) M. Miyazaki, K. Nishio, M. Katoh, S. Mukae and H.W. Kerr, 1990, J. of American Welding Society., 69(9), s362~s371.
- (5) J.D. Harrison, 1972, Metal Construction., 4(3), 99~107.
- (6) F. Paray, B. Kulunk and J. Gruzleski, 1996, Materials Science and Technology., 12, 315~323.
- (7) L.A. Guierrez, G. Neye and E. Zschech, 1996, J. of American Welding Society., 75(4), s115~s121.
- (8) J.F. Lancaster, 1993, Metallurgy of Welding, 5th. ed., Chapman and Hill, p.125.