

## 3527/4343 알루미늄 클래드재의 인장 및 침식특성에 미치는 미세조직 제어의 영향

어광준<sup>#</sup> · 김수현<sup>1</sup> · 김형욱<sup>1</sup> · 김동배<sup>1</sup> · 오영미<sup>1</sup>

### Effect of Microstructure Control on the Tensile and Erosion Properties of 3527/4343 Aluminum Clad

K. Euh, S. H. Kim, H. W. Kim, D. B. Kim, Y. M. Oh

(Received June 19, 2013 / Revised July 10, 2013 / Accepted July 15, 2013)

#### Abstract

Aluminum clad sheets for brazing materials in the automotive heat exchangers are required to exhibit both high strength and excellent erosion resistance. In this study, the effects of microstructural changes on the property of clad sheets due to thermomechanical treatment were investigated. The clad sheets were fabricated by roll bonding of twin-roll-cast AA3527 and AA4343 alloys followed by cold rolling down to a thickness of 0.22mm. Partial or full annealing was conducted at the final thickness in order to improved the erosion resistance while keeping the proper strength. Since full annealing was achieved for a temperature of 400°C, annealing treatments were performed at 360, 380, and 400°C, respectively. The tensile strength of 3527/4343 clad material was found to be inversely proportional to the annealing temperature before the brazing heat treatment. After this latter treatment, however, the tensile strength of the clad material was about 195~200MPa regardless of the annealing temperature. The erosion depth ratio of the clad annealed at 400°C was 8.8% (the lowest), while that of the clad annealed at 380°C was 17% (the highest). The effect of annealing temperature on the tensile and erosion properties of 3527/4343 aluminum clad sheets was elucidated by means of microstructural analyses.

**Key Words** : Aluminum Clad, Microstructure, Tensile Property, Erosion Resistance

#### 1. 서론

우수한 열전도성과 비강도를 갖는 알루미늄 클래드재는 자동차용 열교환기의 핀, 튜브, 헤더 등의 소재로 다양하게 이용되고 있다[1]. 자동차용 열교환기 중 히터 튜브 등에 사용되고 있는 브레이징용 알루미늄 클래드 판재는 주로 4000 계 브레이징재, 3000 계 심재, 7000 계 희생양극재의 조합으로 이루어져 있으며 박육화, 소형화를 위한 고강도 특성뿐만 아니라 브레이징 후 양호한 성능 구현을 위한 우수한 침식 저항성이 요구된다. 이러한 브레이징용 알루미늄 클래드 판

재의 특성은 합금 조성뿐만 아니라 가공열처리 조건에 따라 변화하며 주로 심재의 특성에 좌우된다[2, 3]. 대부분의 열교환기는 클래드 판재의 성형 후 분위기 제어 브레이징(Controlled Atmosphere Brazing, CAB) 공정을 사용하여 제작되는데 이때 열교환기 부품은 브레이징재의 용융이 발생하는 580~610°C까지 가열된다[4, 5]. 따라서 브레이징재의 용융으로 인한 Si 원소의 확산 등으로 접합계면층 영역에서 제 2 상의 화합물이 생성되거나 심재 영역이 침식되는 현상이 발생하므로 단일 소재의 특성과는 상이한 특성을 나타낼 수 있어 클래드재 상태의 특성 평가가 필요하다.

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

# Corresponding Author : Korea Institute of Materials Science, Email : keuh@kims.re.kr

한편, 기존의 상용 알루미늄 클래드의 경우 대부분 DC(direct-chill) 주조를 통하여 제조된 슬라브를 이용하여 슬라브 접합법으로 클래드를 제조하므로 접합 전후로 많은 열간/냉간 압연 공정이 필요하게 된다. 최근 이러한 공정단가를 절감할 수 있도록 박판구조법으로 제조된 알루미늄 합금 판재를 이용하여 브레이징용 알루미늄 클래드재를 압연접합법으로 제조하는 공정이 개발 중이다[6~8].

본 연구에서는 상용 히터 튜브용 알루미늄 클래드 판재의 심재로 사용 중인 AA3527 합금 및 브레이징용 AA4343 합금을 박판구조법으로 제조하여 클래드재의 원소재로 사용하였으며 압연접합법으로 3527/4343 형태의 2 층의 브레이징용 알루미늄 클래드 판재를 제조하였다. 클래드 판재는 최종 두께 0.22mm 까지 냉간 압연하였으며 최종 열처리 온도를 달리하여 미세조직, 인장특성 및 침식성 변화를 관찰하였다.

## 2. 실험 방법

심재 및 브레이징재의 원소재인 AA3527 합금(조성: Al-0.54Si-0.55Fe-1.18Mn-0.76Cu-0.12Cr-0.08Ti, wt.%) 과 AA4343 합금(Al-7.38Si-0.13Fe, wt.%)은 쌍롤박판구조법을 이용하여 판폭 200mm, 두께 4.5mm 로 제조하였다. AA3527 합금은 “Eco alloy”라고 알려져 있는 Cu, Cr, Ti 등을 함유하는 Al-Mn 계 합금이며 AA4343 합금은 Si 를 6.8~8.2wt.% 포함하는 Al-Si 합금으로 CAB 공정에서 브레이징재로 주로 사용된다. 박판구조된 AA3527 및 AA4343 합금 판재는 480°C에서 14 시간동안 균질화처리를 실시하였으며 AA4343 합금의 경우에는 균질화처리 후 두께 0.5mm 까지 냉간압연을 실시하고 450°C에서 1 시간 동안 풀림처리하였다. 심재 및 피재의 접합면을 와이어 브러싱한 후 상온에서 두께 압하율 60%로 압연접합하여 3527/4343의 2 층 클래드 판재를 제조하였다. 이때 심재와 브레이징재의 비율은 9:1로 하였으며 압연접합 후 최종 판재 두께인 0.22mm 까지 중간열처리 없이 냉간압연을 실시하였다.

최종 두께에서 열처리를 실시하여 연성이 확보되는 H2x 조건을 만족시키고자 하였으며 먼저 열처리 온도를 340~400°C에서 14 시간씩 열처리하여 재결정 온도를 결정하고 압연 상태, 부분재결정 상태, 완전재결정 상태를 나타내는 최종열처리 온도를 선택하

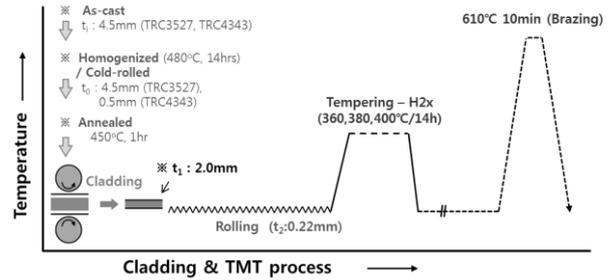


Fig. 1 Flowchart of cladding and thermomechanical process

였다. 최종열처리 온도의 변화에 따른 미세조직, 인장 및 침식 특성의 변화를 고찰하였다. Fig. 1 은 본 연구에서 사용한 3527/4343 클래드 판재재의 제조 공정을 나타내는 개략도이다. 브레이징 열처리 는 610°C에서 10 분 동안 실시하였으며 브레이징 전후 인장 특성을 평가하기 위하여 ASTM E8M 규격[9]에 따라 게이지 길이 25mm 의 판상 시편을 이용하여 4x10<sup>-4</sup>/sec 의 변형율로 인장시험을 실시하였다. 인장시험 결과는 총 5 회 이상 시험한 결과를 이용하여 평균값을 구하여 나타내었다. 클래드재의 침식 특성은 클래드 판재를 상기 브레이징 열처리 조건에서 열처리 한 후 클래드재의 두께 단면을 광학현미경으로 관찰하여 침식층의 깊이를 측정하고 이를 전체 클래드 판재 두께로 나눈 침식율(Erosion Depth Ratio, %)로 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 최종열처리 온도 결정

Fig. 2 는 최종 두께에서 온도를 달리하여 열처리한 3527/4343 클래드재의 심재부분의 경도를 특정한 결과이다. 열처리에 의하여 압연 상태에 비하여 경도가 감소하며 열처리 온도가 증가할수록 경도는 비례적으로 감소한다. 한편, 380°C에서 열처리한 경우 급격한 경도 감소가 발생하며 400°C에서 열처리한 경우 380°C에 비하여 추가적으로 경도가 감소하여 O 처리된 3527 합금의 경도(~60Hv)와 유사한 63Hv 정도의 경도를 나타낸다.

Fig. 3 은 최종 두께에서 열처리 온도를 달리한 3527/4343 클래드재의 압연상태, 열처리 후의 미세조직을 나타내는 광학현미경 사진이다. 압연된 3527/4343 클래드 판재는 전형적인 압연 가공조직으로 이루어져 있으며 압연 방향으로의 결정립 성장이 발견

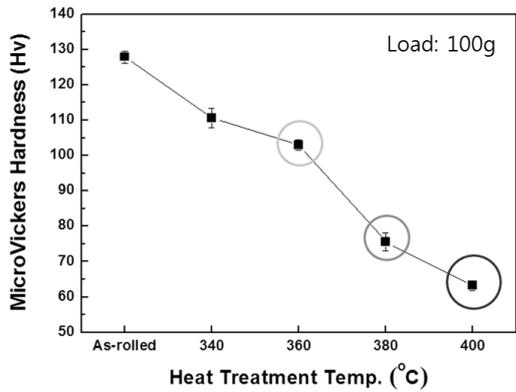


Fig. 2 Vickers hardness of 3527/4343 clad (3527-side) with respect to heat-treating temperature

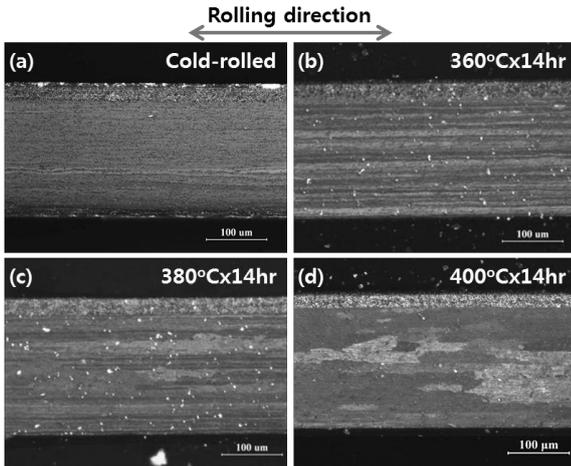


Fig. 3 Optical micrographs of (a) cold-rolled and (b)-(d) heat-treated 3527/4343 clad sheets. Annealed at (b) 360°C, (c) 380°C, and (d) 400°C (thickness: 0.22mm)

되는 400°C에서 열처리된 경우를 제외한 나머지 시편에서도 압연 조직이 관찰된다. 한편, 360°C에서 열처리된 경우에는 재결정화된 미세조직은 관찰되지 않고 압연 조직만 관찰되나 380°C에서 열처리된 경우에는 부분적으로 일부 재결정이 형성된 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 최종열처리 온도에 따른 특성 변화

본 연구에서는 열처리 온도에 따른 압연조직, 압연조직+재결정조직, 재결정조직을 갖는 클래드재의 특성을 평가하기 위하여 360, 380, 400°C에서 각각 열처리된 시편을 이용하여 브레이징 열처리 전후의 인장 특성 및 브레이징 시 침식 특성을 평가하였다.

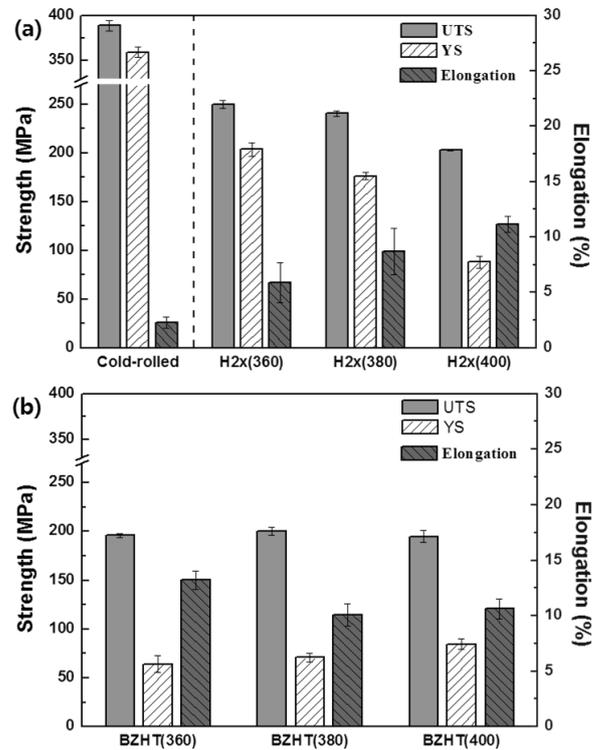


Fig. 4 Tensile properties of 3527/4343 clad sheets with different final annealing temperature, (a) Before and (b) after brazing heat-treatment (BZHT). (thickness: 0.22mm)

Fig. 4(a)와 (b)는 최종 두께에서의 열처리 온도를 다르게 한 경우 브레이징 열처리 전후의 인장 특성 변화를 나타내는 그래프이다. 최종 두께로 압연만 된 상태에서는 인장강도 389MPa, 연신율 2.3%로 냉간 가공된 상태이므로 후속 튜브 성형 등의 성형 공정에 난점이 발생할 수 있어 적절한 열처리(H2x 열처리)를 통하여 연신율을 부여할 필요가 있다. 360, 380, 400°C에서 최종 열처리된 클래드재의 연신율은 각각 5.9, 8.7, 11.2%로 열처리 온도에 비례하여 증가하며 성형성에 측면에 있어서 완전 재결정 조직을 갖는 400°C 열처리 시편이 가장 유리할 것으로 판단되었다. 인장강도 및 항복강도는 열처리 온도가 증가함에 따라 비례적으로 감소하는 경향을 나타내었으며 완전 재결정 조직을 갖는 400°C 열처리 시편에서는 88MPa의 낮은 항복강도를 갖는다.

브레이징 열처리에 따라 H2x 상태에 비하여 인장강도는 감소하며 최종 열처리 온도에 상관없이 195~200MPa 정도를 유지하였다. 항복강도는 브레이징 열처리에 의하여 압연에 의한 가공경화가 완전

히 풀리며 크게 감소하여 65~85MPa 수준으로 측정되었으며 400°C에서 최종 열처리된 시편의 브레이징 열처리 후 항복강도가 가장 높은 값을 나타내었다. 브레이징 열처리 후 연신율은 10~13%로 400°C에서 최종 열처리된 시편의 브레이징 열처리 전 연신율과 유사한 값을 나타내었다. H2x 열처리 온도 증가에 따라 가공조직에서 재결정조직으로 변화하기 때문에 강도 감소 및 연신율 증가가 나타나는 것으로 설명할 수 있으나 브레이징 열처리에 의한 항복강도 변화 등은 TEM 을 통한 석출상 분석 등의 추가적인 미세조직 분석이 필요하다.

AA3527 합금과 같은 Al-Mn 계 합금의 경우 주된 첨가원소인 Mn 과 불순물 수준으로 첨가되어 있는 Fe, Si 등 원소에 의하여 주로 조대한 알파상 (AlMnFeSi 계 화합물)과 미세한 Al<sub>6</sub>Mn 상이 생성되는 것으로 알려져 있다[5, 6]. Fig. 5 는 브레이징 열처리 전 400°C에서 최종 열처리된 클래드재의 심재인 AA3527 합금 부위를 관찰한 TEM 사진으로 1 μm 이상의 크기를 갖는 조대한 석출상과 200nm 이하의 매우 미세한 석출상이 혼재하고 있다. EDS 성분 분석 결과 조대한 석출상의 경우 AlMnFeSi 알파상에 Cu 성분이 고용된 것으로 여겨지며 미세한 입자는 AlMnSi 상으로 판단된다. 이러한 석출상은 브레이징 열처리 온도보다 높은 온도에서도 안정하여[10] 브레이징 후 인장강도 유지에 주된 역할을 할 것으로 사료되며 석출상에 의한 강화기구에 대한 추가적인 고찰이 필요하다.

일반적으로 플릭스 도포와 가스 분위기 제어를 동시에 실시하는 실제 브레이징 공정에서는 브레이징재인 4343 합금의 용융이 발생하나 본 연구에서는 가스 분위기 제어만 실시하여 브레이징재의 용융이 완전하게 발생하지 않았다. 하지만 본 연구에서는 브레이징재를 포함한 침식 깊이를 측정함으로써 브레이징 열처리에 의한 침식 현상을 고찰하고자 하였다. Fig. 6 은 최종 두께에서의 열처리 온도를 다르게 한 경우 브레이징 열처리 후의 침식 정도를 나타내는 그래프이다. 360 및 400°C에서 최종 열처리된 시편에서 침식 깊이 비는 약 9% 수준으로 측정되었으나 380°C에서 최종 열처리된 시편의 경우는 침식 깊이 비가 17% 정도로 침식이 가장 크게 발생하였다. 브레이징 열처리 전 부분 재결정이 발생한 시편(H2x 380°C)에서 압연 조직이나 완전 재결정 조직을 갖는 시편보다 더 활발한 침식 현상이

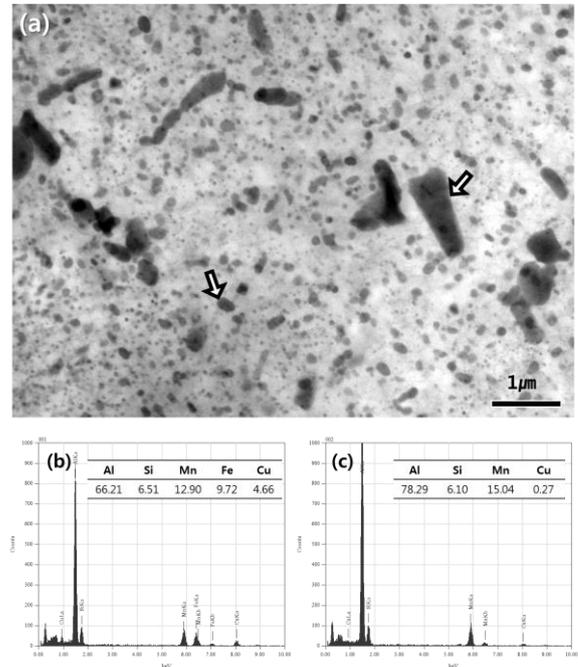


Fig. 5 (a) TEM micrograph of 3527/4343 clad sheets (3527 part) after heat treatment at 400°C. EDS spectra of precipitates ((b) coarse ppt, (c) fine ppt)

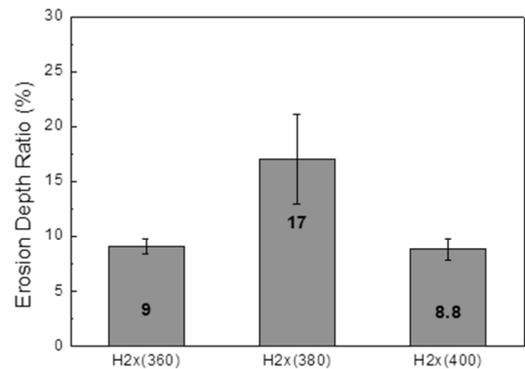


Fig. 6 Erosion depth ratio of 3527/4343 clad sheets with different final annealing temperature

발생하는 것을 알 수 있다.

Si 성분의 침투는 주로 입계를 따라 진행되기 쉬운데 400°C에서 열처리된 시편의 경우 입계 밀도가 낮아 침식 현상이 상대적으로 적게 발생한 것으로 여겨진다. 반면에 압연조직으로 이루어진 360°C 열처리 시편의 경우는 입계 밀도는 높으나 입도가 치밀하여 두께 방향으로의 침투가 용이하지 않은 것으로 여겨진다. 한편 부분 재결정 조직을 갖는 380°C 열처리 시편의 경우에는 압연조직 및 재결정

조직 혼재로 인하여 Si 원소의 침투가 발생한 경우 쉽게 두께 방향으로 진행이 이루어져서 침식 깊이가 상대적으로 깊게 나타난 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 박판구조된 AA3527 및 AA4343 판재를 이용하여 3527/4343 알루미늄 클래드 판재를 제조하였으며 0.22mm 두께로 냉간압연된 클래드 판재를 최종 열처리 온도를 달리하여 미세조직을 제어하였다. 압연조직-재결정조직 제어를 통하여 인장 및 침식 특성을 제어할 수 있었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) H2x 상태의 인장 및 항복 강도는 최종 열처리 온도가 증가할수록 감소하였으나 브레이징 열처리 후 인장 강도는 195~200MPa 로 큰 차이가 발생하지 않았다. 하지만 브레이징 열처리 후 항복 강도의 경우 열처리 온도에 비례하여 증가하였다.

(2) 380℃에서 최종 열처리한 경우 다른 온도에서 열처리한 경우에 비하여 침식 현상이 상대적으로 크게 발생하였는데 이는 압연조직과 재결정 조직이 혼재하여 입계를 따라 Si 원소의 침투가 활발할 것으로 예상되기 때문이다.

#### 후 기

본 연구는 산업기술연구회 융합연구사업(B551179-11-02-00)의 지원으로 수행된 결과이며 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

- [1] W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, 2000, Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry, Mater. Sci. Eng., A, Vol. 280, No. 1, pp. 37~49.
- [2] K. Euh, J.-H. Kang, S.-H. Kim, H.-W. Kim, D. B. Kim, 2010, Proc. 12th Inter. Conf. Aluminium Alloys(editors: S. Kumai, O. Umezawa, Y. Takayama, T. Tsuchida, T. Sato), The Japan Institute of Light Metals, Tokyo, Japan, pp. 1668~1672.
- [3] S. H. Lee, J. S. Yoon, M. S. Kim, D. Jung, 2002, Effects of Cold Rolling Parameters on Sagging Behavior for Three Layer Al-Si/Al-Mn(Zn)/Al-Si Brazing Sheets, Met. Mater. Int., Vol. 8, No. 3, pp. 227~232.
- [4] Aluminum Brazing Handbook, 1979, 3rd ed., Aluminum Association, Washington DC.
- [5] G. J. Marshall, R. K. Bolingbroke, A. Gray, 1993, Microstructural Control in an Aluminum Core Alloy for Brazing Sheet Applications, Metall. Trans. A, Vol. 24, No. 9, pp. 1935~1942.
- [6] K. Euh, S.-H. Kim, H.-W. Kim, 2011, Proc. Euro. Conf. Aluminium Alloys(editor: J. Hirsh), Deutsch Gesellschaft fur Materialkunde e.V., Frankfurt, Germany, pp. 61~63.
- [7] K. Euh, H.-W. Kim, S.-H. Kim, D. B. Kim, E. Baek, Y.-M. Oh, 2013, Proc. TMS2013(editor: W. Schneider), TMS, San Antonio, USA., p. 232.
- [8] S. S. Park, D. S. Bae, J. H. Lee, D. H. Bae, 2007, Development of New Bimetal Materials, for, Home Appliances by Using the Rolling Process, Trans. Mater. Process., Vol. 16, No. 5, pp. 375~380.
- [9] ASTM Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM E8/E8M, PA, ASTM International.
- [10] K. Euh, S.-H. Kim, H.-W. Kim, 2013, Proc. Aluminium 2000(editor: W. D. Barba), Interall srl, Modena, Italy, pp. 1~5.