

알루미늄 합금의 용접특성, Part II : 열영향부의 특성

李昌禧* · 張來雄*

Weldability of Al Alloys, Part II : HAZ Characteristics

C. H. Lee,* R. W. Chang*

Key words : heat affected zone, precipitation hardening, reversion thermal cycle, natural and artificial aging liquation.

Abstract

A literature review was conducted to gather informations available on the welding metallurgy of aluminum alloys, emphasized on characteristics in the heat affected zone(HAZ). Nominal metallurgical reactions that occur in aluminum alloys provide a basis for understanding aluminum welding metallurgy. However, welding reactions differ to some extent because of the relatively short times involved, and the non-isothermal heating excused.

For non-heat treatable alloys, welding primarily affects these alloys by annealing(recrystallization and growth) and to a less extent, changes in low temperature precipitates. In the case of heat treatable alloys, the resulting HAZ properties depend upon alloy composition, starting temper, heat input and post weld heat treatments.

1. 서 언

알루미늄 합금은 높은 강도/중량 비, 내식성, 인성 및 저온 특성을 보유하기 때문에 우주, 항공기 부품에서 선박, 자동차 같은 수송장비 등, 여러 분야에 사용되고 있으며 그 적용은 해가 갈수록 증가하는 추세이다.

일반적으로 이러한 용도에는 용접성이 우수한 고강도 합금이 사용되며, 종종 용접성과 더불어 내식성 혹은 내용력부식균열성을 함께 요구할때가 많다. 하지만 현재까지 상업화된 대부분의 합금은 요구되는 모든 특성을 완전히 만족하지는 못하고 있다. 예를들면, 강도를 만족하는 합금은 용접성이 좋지 못하고, 용접성이 우수한 합금은 강도가 미흡한 상태이다.

용접은 국부적이지만 새로운 구조조직을 형성하고

*정회원, 산업과학기술연구소 용접연구센터

비평형 상태의 빠른가열 및 냉각에 의해 열영향부에 원하지 않는 조직을 유발하기 때문에 계획에도 없는 열처리가 필요하는 경우가 많다. 그리고 용접에 의한 조직학적 변화는 알루미늄 용접구조물의 특성을 이해하는데 가장 중요한 factor로 작용한다. 그러므로 용접 metallurgy를 이해 하므로써 원하는 특성을 얻을수 있거나, 혹은 용접후의 특성을 예측할 수 있어 용접구조물을 효율적으로 사용하기 위하여 설계를 조절 및 변경할 수 있다.

그러므로, Part I⁽¹⁾에서는 용착금속의 응고기구 및 용접시 가장 큰 문제중의 하나인 균열과 기공의 형성 및 원소의 영향에 대하여 언급 하였으며, 본 part II에서는 용접열(thermal cycle)에 의한 열영향부에서의 조직 및 강도의 변화등을 발표된 논문을 기초로하여 요약정리 하므로써 용접성이 우수한 고강도 Al합금을 개발하고자 하는 연구자들에게 도움이 되고자 한다.

2. 열영향부의 특성

일반적으로 알려진 금속학적 반응, 조직 및 특성은 알루미늄 용접야금을 이해 하는데 상당한 도움이 된다. 하지만 용접에서의 가열은 비 등온 가열(non-isothermal)이고, 열영향부의 가열시간이 상대적으로 짧기 때문에 용접반응은 일반적인 예측보다 상당히 다를 수가 있다^{2,3,4,9,11,16,18)}.

Part I에서 언급했다시피 알루미늄 합금의 용접 열영향부는 재료의 성분(형태), temper종류, 최고 가열온도 및 시효(석출)정도에 따라 다르게 구분된다. Heat treatable 합금일 경우 온도가 용체화온도까지 상승되었으나 냉각속도가 빨라 냉각시 석출경화가 일어나지 않는 용체화지역(solution zone)과 상대적으로 낮은 온도로 가열되어 국부적으로 소둔(partially annealed zone) 및 석출물의 조대화가 일어나는 과시효 지역(overaged zone)으로 구분된다. Non-heat treatable 합금의 경우 용접열에 의해 냉간가공된 조직이 재결정 및 성장이 일어나기 때문에 열영향부 대신 소둔지역(annealed zone)이라 명칭하기도 한다. 그리고 연구자마다 서로 다르지만 재료의 액상선과 고상선사이로 가열이되어 결정립계 및 저용점상에서 국부적인 용융이 일어나는 부분용융부(partially melted zone)를 열영향부에 포함시키는 경우도 많다.

2.1 용접열 cycle

알루미늄합금은 일반 철강의 경우와는 다르게, 재료의 조건이 heat treatable 혹은 non-heat treatable 형태에 상관없이, Fig 1에 잘 나타나 있듯이, 용접부의 기계적 특성은 입열량이 증가할수록 감소한다. 비록 총입열량이 전체적인 용접의 영향을 예측하는데 도움을 주지만 열영향부에서 위치에 따른 조직 및 특성변화 등을 고려할때는 실제적인 열분포가 요구된다. Fig 2 및 3에는 용접 중심선에서의 거리에 따른 열 cycle 및 최고온도 분포도를 나타내고 있다. 이러한 열곡선으로 부터 용접선에서 멀어질수록 최고온도는 낮아지며 가열 및 냉각 속도도 작아짐을 알 수가 있고, 용접전의 모재온도(예열) 및 입열량이 높을수록 주어진 위치에서의 최고온도는 증가하는 반면 냉각속도는 작아진다^{15,16)}. 그리고 재료의 두께가 증가할 수록 최고온도 및 온도구배는 작아진다.

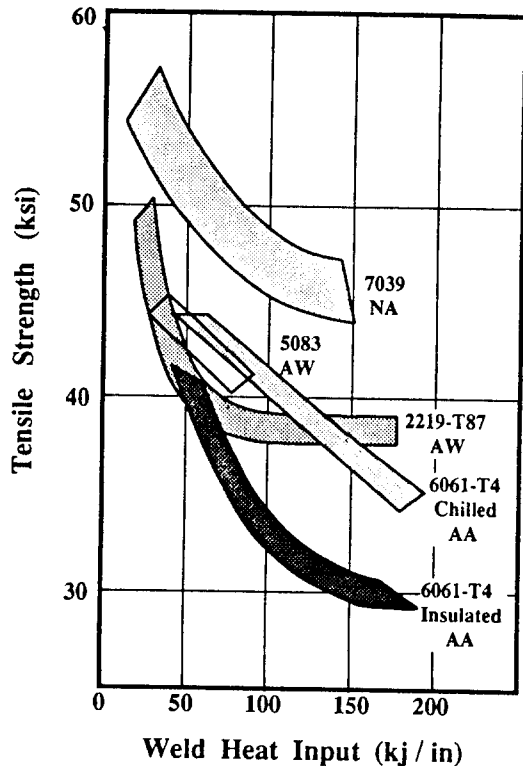


Fig. 1 Effect of Heat Input on Tensile Strength in Various Alloys

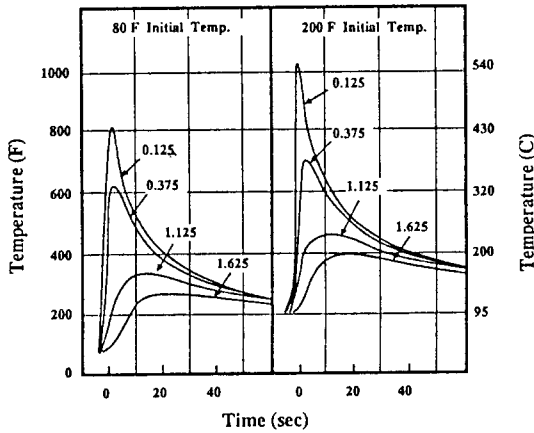


Fig. 2 Time-Temperature Curves at Various Distance from Weld Centerline

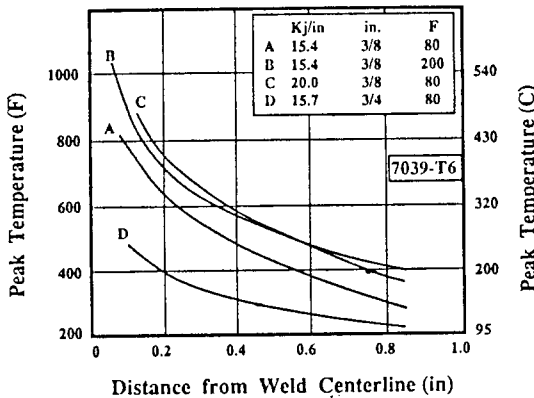


Fig. 3 Peak Temperature Distribution in 7039

2.2 Non-heat treatable 합금

비 열경화성 합금은 냉간가공 및 안정화처리(stabilization)를 통해 강화된 합금으로써 용접에 의해 재료의 재결정온도 이상까지 가열된 열영향부의 조직 및 특성은 달라질 것으로 예상된다. 비 열경화성 합금을 용접할때 입열량을 증가시키면 두가지 현상을 발견할 수 있다. 이는 Fig. 4¹⁹⁾에서 보여주다시피, 입열량이 증가할수록 열영향부의 크기가 증가하고 강도의 하락 정도가 커진다. 한편, 유사한 강도를 가지는 같은 합금을 동일한 조건으로 용접할때 용접후의 열영향부의 강도는, Fig. 5에 나타나 있듯이, 용접전의 temper에 상관없이 거의 동일한 것을 알수가 있고, 이는 소둔된

모재의 강도와 같다²⁰⁾.

이러한 강도의 하락은 냉간가공에 의해 연신 및 강화된 조직이 용접열에 의해 결정립이 재결정 하고 온도가 증가 할 수록(즉 용접선에 가까와 질 수록) 재결정된 결정립의 성장때문이다. 일반적으로, 저온에서의 안정화 열처리하는 연신된 결정립계에 석출물을

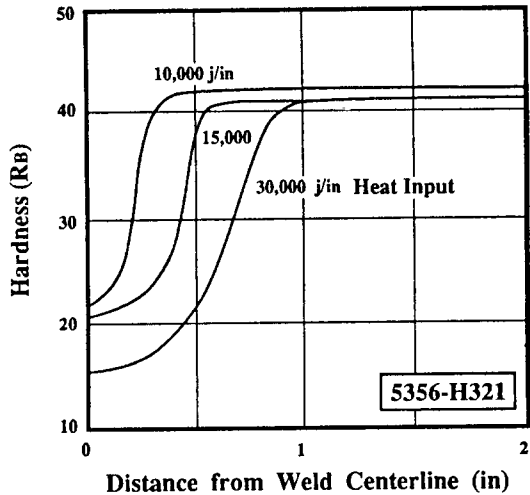


Fig. 4 Effect of Heat Input on hardness Distribution in HAZ

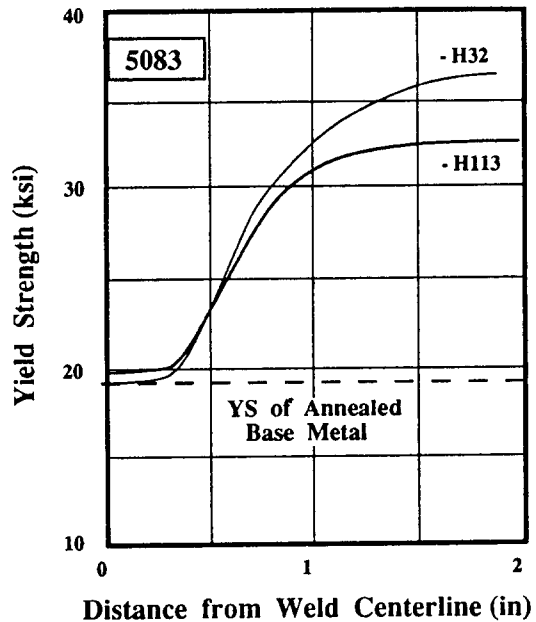


Fig. 5 Effect of Starting Temper on Yield Strength

형성하여 강도를 약간 상승 시킨다. 하지만 용접열에 의해 이러한 결정립계 석출물은 최고온도가 약 370°C 이상 온도에서는 용해되어 고용되기 시작 한다. 하지만 고온 석출물(high temperature constituents)은 이 온도에서 전혀 반응이 없다가 용접선에 가까와 질수록 서서히 용해되어 용접선 주위에서는 대부분 고용된다.

2.3 Heat treatable 합금

열경화성 합금의 열영향부에서의 반응은 비 열경화성의 경우보다 훨씬 복잡 다양하다. 열영향부는 아래의 조건에 따라 달라진다^{4, 6, 10, 11, 12, 15, 16, 18)}.

- * 화학성분
- * 용접 입열량
- * 용접전 temper
- * 후열처리

Fig. 6은 용체화처리 및 자연시효 (natural aging 이후로 NA) 처리된 6061-T4의 용접 및 후열처리후의 열영향부에서의 경도분포를 나타내고 있다¹⁶⁾. 용접직후의 경도분포는 최고온도가 약 230°C 및 370°C에서 두개의

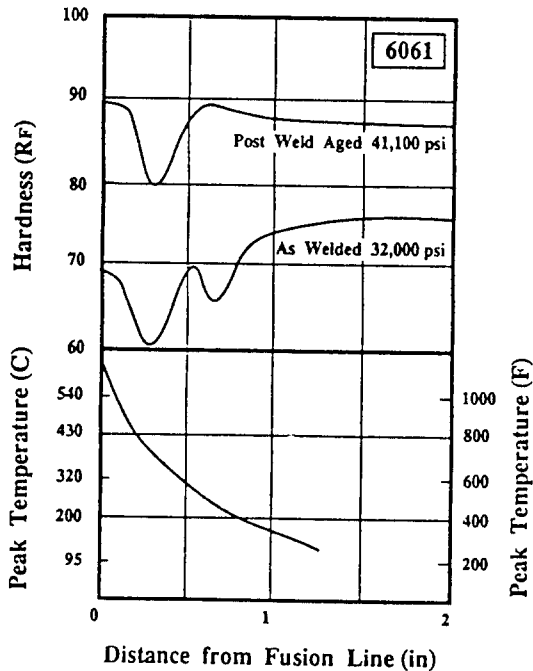


Fig. 6 Comparison of As Welded and Post Aged Properties in 6061-T4

불연속 부위를 보여주고 있다. 370°C 근방에서의 경도의 하락은 국부적인 소둔(partial annealing)과 관련이 있고 230°C에서의 하락은 NA의 환원(reversion)과 관련이 있다. 290°C 주위에서의 경도 상승은 국부소둔에 의한 석출 때문인 것으로 사료되며 430°C 이상의 온도에서는 원소들이 고용되어 있다. 용접부를 시효경화 열처리(artificial aging, 이후로 AA)한 경우 환원지역과 고용화처리된 지역에서 석출경화가 일어난다. 국부소둔 및 과시효된 지역에서는 완전한 T6경화가 일어나지 않아 경도의 최저치를 보여주고 있어 인장파단은 이 지역에서 형성된다. 그리고 같은 용접열(전류 및 전압)하에서 용접속도가 감소할수록 용접 입열량은 증가하여 더욱더 완벽한 소둔이 되어서 강도하강을 증가시킨다¹⁶⁾.

한편, 비 열경화성 합금과는 다르게, 열경화성 열영향부의 특성은 용접전 재료의 temper에 따라 상당히 다르게 나타난다. Fig. 7에는 6061합금의 T4 및 T6 열처리한 재료의 용접후의 경도분포를 나타내고 있는데, 과시효 혹은 소둔에 의한 경도하락 지역이 T6의 경우가 더욱 심한 것을 관찰 할 수 있다¹⁶⁾. 그리고 이들 지역은 시효 경화처리를 하여도 경도회복이 완벽하지 않다.

Al-Zn-Mg합금은 용체화처리후 NA를 통하여 상당한 강도 상승을 얻을 수 있다. 그러므로 용접후의 AA처리가 필요한 다른 열경화 합금과는 다르게 후열처리를 하지 않고 사용하는 경우가 많다. 최고온도가 약 260°C 근방에서 Al-Zn-Mg합금에 포함된 대부분의 합금원소는 석출을 하기 시작하여 이 지역은 용접후 어떠한 열

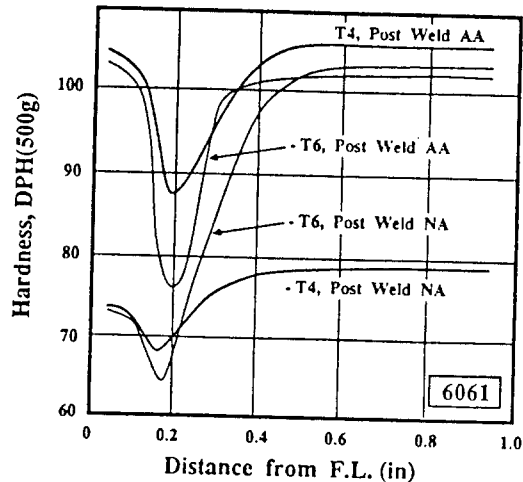


Fig. 7 Comparison of Effects of starting Temper(T4 Vs. T6) and Post Weld aging(AA VS. NA)

처리를 받아도 완전한 강도회복을 하지 않는다. 최고 온도가 약 370~540°C로 가열된 지역은 용체화처리가 일어나서 NA를 통하여 재석출 강화를 시킬 수 있다. (Fig 8) 한편, Fig 9에 의하면 모재가 T4일 경우 용접열에 의해 상온 석출물은 reversion이 되지만, 용접

전의 재료의 temper가 T6일 경우 열영향부의 크기는 고온석출물의 reversion 정도에 따라 결정된다. 소둔된 Al-Zn-Mg의 경우 용접열에 의해 열영향부는 용체화처리가 일어나서 NA를 통하여 강화 시킬수 있다. 하지만 소둔된 모재에는 더 이상의 석출이 일어나지 않아 강도/경도의 변화가 없다⁸⁾.

용접부의 조직은 상기에서 언급한 바와 같이 가열된 최고온도에 의해 결정되며 열영향부에서(특히 과시효지역)과다한 석출물을 관찰할 수 있고 이는 입열량이 커질수록 증가한다. 한편 최고 온도가 약 540°C 이상으로 가열된 용접선 주위에서는 결정립계에서의 용융을 관찰 할 수 있다(partially melted zone). 이는 입열량이 증가할수록 커지며 재료의 화학성분과 밀접한 관계를 가지고 있다. 일반적으로 용접이 가능하다고 알려진 합금에서는 용접조건이 적정할때 입계용융 정도는 상당히 작다. 하지만 7075와 같이 용접이 어려운 합금에서는 편석 및 저용점상의 형성에 의해 결정립계를 따라 용융이 형성되고, 용접열 및 구속응력이 충분히 존재하면 쉽게 균열을 유발시킨다^{6, 8, 11, 15)}.

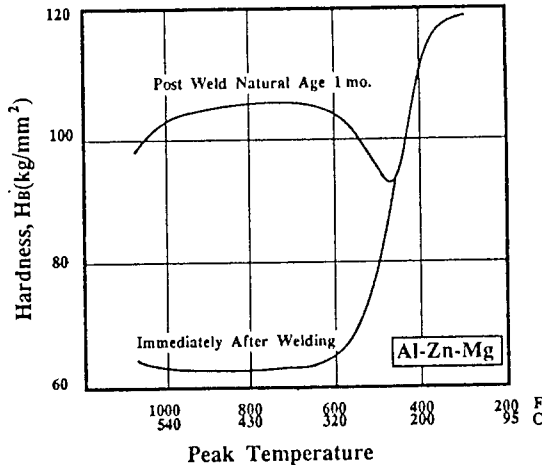


Fig. 8 Post Natural Aging effects in Al-Zn-Mg Weld HAZ

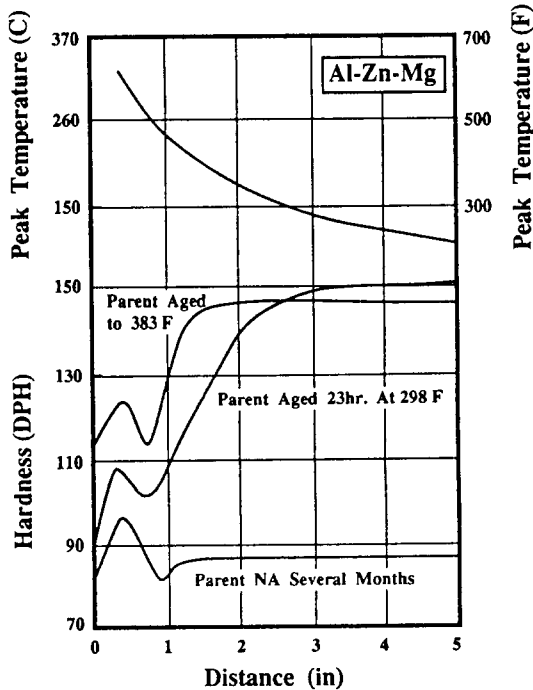


Fig. 9 Effect of Starting Temper on weld HAZ of an Al-Zn-Mg Alloy

2.4 내식성

상기에서는 열영향부의 가열온도 분포에 따른 조직 및 기계적 특성과의 상관관계에 대해서만 언급했다. 하지만 열영향부의 특성을 고려할때 빼놓을 수 없는 다른 중요한 사항은 내식성이다. 내식성 및 부식응력 균열에 관해서는 part III에서 집중적으로 review 하겠지만 본고에서 간단하게 언급 하였다.

기계적 특성의 관점에서 볼때 열영향부는 용접선에서 과시효 지역까지로 구분한다. 하지만 내식성 관점에서는 용체화처리된 지역까지로 구분하는 것이 통례이다. Fig. 10에는 7039-T6 용접부에서의 결정상수(lattice parameter)의 변화와 내식성과의 상관관계를 나타내고 있다. 용체화 처리된 부위는 합금원소가 고용되어 있기때문에 큰 결정상수를 보여주는 반면에 과시효등 석출이 존재하는 부위에서의 상수는 최저를 나타내고 있고 부식이 일어난 곳은 용체화처리된 부위에 국한되어 있음을 알수가 있다. 한편 부분 용체화처리된 부위는 시효경화 처리시 느린 반응을 보여주기 때문에 시효처리가 완벽하지 못할 경우 이 지역에서 선택적인 부식이 형성될 수 있다는 것을 예측할 수 있다. 예를들면, Al-Zn-Mg의 7xxx계열의 경우, Fig. 11에 나타낸 바와 같이, 용접직후에 열영향부의

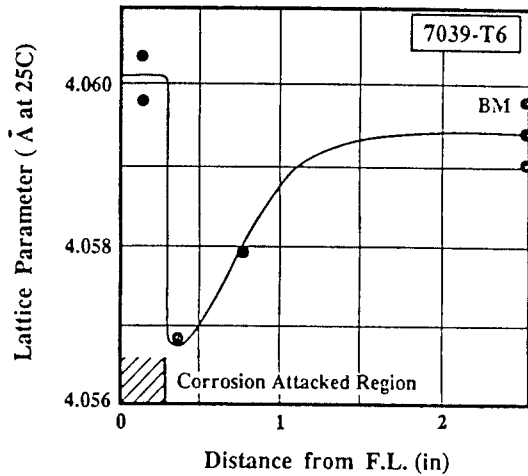


Fig. 10 Lattice Parameter Variation in 7039-T6 Weld HAZ

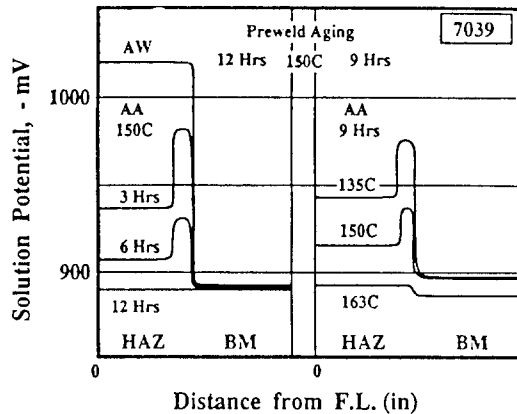


Fig. 11 Solution Potential Variation in 7039 Weld HAZ (High Negative Potential Corrodes Preferentially)

부식은 용접선주위의 용체화 처리된 부위에서 집중적으로 일어나지만 적당한 온도에서의 충분한 후열처리(AA)를 하면 선택적 부식은 사라진다. 하지만 열처리가 완전하지 않은 경우 용접부에서 어느정도 떨어진 부위에서의 용접선과 평행하게 일종의 knife-edge 선택적 부식이 형성된다.”

3. 결 언

알루미늄합금에서 일어나는 일반적인 야금학적 반응은 용접야금을 이해하는데 기본이 된다. 하지만 용접반응은 상대적으로 짧은 시간에 일어나고 비 등온

가열이므로 어느정도 일반적인 반응과 다르다는 것을 예상하여야 한다.

Non-heat treatable합금의 경우 강도가 화학성분 및 냉간가공에 의존하기 때문에 용접의 영향은 다소 단순하게 연신된 결정립의 재결정 및 성장에 의한 강도 저하이다. 안정화처리시 형성된 석출물의 환원도 어느정도 영향을 미친다.

Heat treatable합금의 경우 적절한 용체화, 급냉 및 석출을 통하여 재료의 요구하는 특성을 확보한 것으로서 용접 열영향부의 특성은 재료의 화학성분, 입열량, temper 및 후열처리에 따라 달라진다.

참 고 문 헌

1. 李昌禧, 張來雄, 알루미늄 합금의 熔接特性 : Part I, 龜裂 및 氣孔, 大韓熔接學會誌, 10권 3호, 1992, p.1
2. Hatch J. E., ALUMINUM, Properties and Physical Metallurgy, ASM, 1983
3. Vasudevan A.K. and Doherty R. D., ALLUMINUM-CONTEMPORARY RESEARCH AND APPLICATION, Academic Press Inc., 1989
4. Arthur J. B., "Fusion Welding of 24S-T3 Aluminum Alloy", Welding Journal, 34(11), 1955, P.558s
5. Pumphery W. I. and West E. G., "The Metallurgy of Welding Aluminum and Its Alloys" British Welding Journal, 7(7), 1957, P. 297
6. Brooks C. L., "The Effect of Weld Heat on Arc Welding of Aluminum" Aluminum Association-AWS Joint Seminar, Chicago, Ill. 1966
7. Robinson I. B. and Baysinger F. R., "Welding Aluminum Alloy 7039" Welding Journal, 45(10), 1966, P.433s
8. Dundas J. H. and Collins F. R., "Preventing Weld Cracks in High-Strength Aluminum Alloys" Welding Journal, 45(6), 1966, P. 241s
9. Young J. G., "BWRA Experience in the Welding of Aluminum-Zinc-Magnesium Alloys", Welding Journal, 47(10), 1966, P. 451s
10. D'Annessa A. T., "Effect of natural Aging on Fracture Characteristics of X-7000-Series Aluminum Weldments" Welding Journal, 47(10), 1968, P.462s
11. Schillinger D. E., Bets I. G., Hussey F. W. and Markus H., "Welding 2000-Series Aluminum Alloys at Cry-

- genic Temperatures" *Welding Journal*, 44(7), 1968, P.317s
12. D'Annessa A. T., "Fracture Toughness of X7000-Series Aluminum Alloy Plate Weldments" *Welding Journal*, 44(11), 1965, P. 509s
 13. Jordan M. F. and Coleman M. C., "Fused Zone Structure in Arc Welded Deposits of a Commercial Al-Mg-Mn Alloy" *British Welding Journal*, 15(11), 1968, P.553
 14. Metzger G. E., "Some Mechanical Properties of Welds in 6061 Aluminum Alloy Sheet", *Welding Journal*, 46(10), P. 457s
 15. Fish R. E. and Shira C. S., "Effects of High Frequency Current in Welding Aluminum Alloy 6061", *Welding Journal*, 45(11), 1966, P.490s
 16. Burch W. L., "The Effect of Welding Speed on Strength of 6061-T4 Aluminum Joints", *Welding Journal*, 37(8), P.361s
 17. Jackson F. J., "Analysis of Time-Temperature Effects in 2219 Aluminum Welding", *Welding Journal*, 45(4), 1966, P.188s
 18. Bartle P. M. and Young J. G., "Weldability of the New Aluminum-Zinc-Magnesium Alloys", *Proceedings, Second British Commonwealth Welding Conference, Paper No. M16, 1965*
 19. White S. S., Manchester R. E., Moffatt W. G. and Adams C. M., "Plastic Properties of Aluminum-Magnesium Weldments", *Welding Journal*, 39(1), 1960, P. 10s
 20. Cook L. A., Channon S. L. and Hard A. R., "Properties in Al-Mg-Mn Alloys 5083 and 5086", *Welding Journal*, 34(2), 1955, P.112