技術報告

7000계열을 중심으로 한 알루미늄 합금의 용접특성(III)

박성탁* · 정재필** · 서창제***

Weldabilities of 7000 Aluminium Alloys(III)

S. T. Park*, J. P. Jung** and C. J. Suhr***

5. 용접부의 조직과 기계적 성질

Fig.1[1]은 7000계 합금의 용접부 주위의 미세조직을 개념적으로 나타낸 것이다. 열영향부(HAZ)는 일반적으로 용접금속에 인접한 융합역(국부 용해역), 고용역, 과시효역(연화역)을 형성하며 과시효역은 모재와 연결된다. Al합금은 열전도율이 크므로 용접시 비교적 넓은 열영향부를 형성한다. 따라서 용접부는 야금학적으로 불연속부가 되므로 용접부의 강도가 저하되고, 경우에 따라서는 내식성도 저하된다.

Al-Zn-Mg 합금의 용접부에 가까운 부분은 잘 발달된 주상정으로 되어 있고, 용접부에서는 소위 epitaxial growth를 이루고 있으며, 각 결정립은 横枝가 없는 cell 또는 cellular dendrite 조직으로 되어 있다[2].

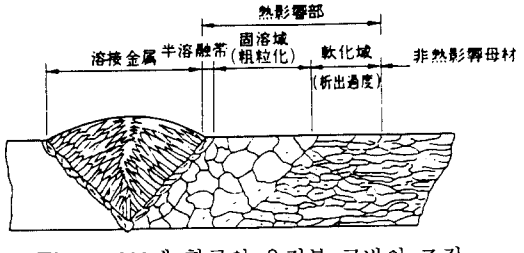

Fig.1 7000계 합금의 용접부 근방의 조직

후판에서 다층용접을 행한 경우는 용접bead가 겹친 쪽에서 모양이 변하고, 하층의 주상정이 상층으로 연속하여 성장한다.

열처리에 의해 강화된 7000계 합금은 기계적 성질은 우수하지만, 용접된 경우

1) 용접금속이 모재와 다른 주조조직을 나타내고
2) 열영향부는 arc 열에 의해 연화역이 생긴다.

그 결과, 용접부의 기계적 성질은 저하된다. Fig.2[3]에 대표적인 열처리 합금(T6)의 용접부 주위의 경도분포를 나타내었다.

Al-Zn-Mg 합금은 용접 입열이 과다해지면 모재 열영향부의 시효성이 나빠지고 dendrite-cell-size가 커져서, 일반적으로 용접금속의 결정입도나 DAS (Dendrite Arm Spacing)가 작을수록 용접금속의 기

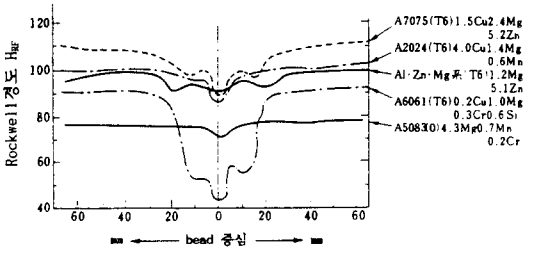

Fig.2 Al합금의 TIG(共金)용접후의 경도분포

* 학생회원, 성균관대학원 금속공학과
** 정회원, 한국기계연구원 용접기술연구부
*** 정회원, 성균관대학교 금속공학과

계적 성질이 좋으므로, 용착금속의 강도는 저하한다. Fig.3[4]은 7039합금에 있어서의 용접입열 제한을 나타낸 것이다.

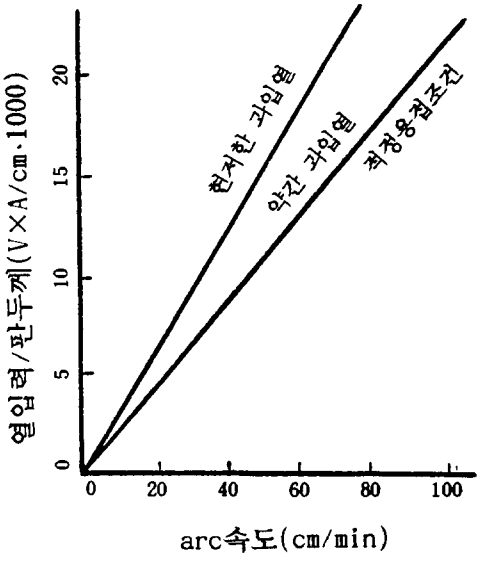

Fig.3 7039합금의 용접입열제한

7000계 합금의 다층용접에서는 후층 용접의 열영향에 의해 전층 bead에 입계 용융으로 인한 미세균열이 발생되기도 한다. 이것을 방지하기 위해서는 층간온도를 될 수 있는 한 낮게하고, 후층 입열이 과대하지 않도록 할 필요가 있다. Table 1[5]은 Al-Zn-Mg계 합금 용접부의 인장성질에 미치는 층간온도의 영향을 나타낸 것이다.

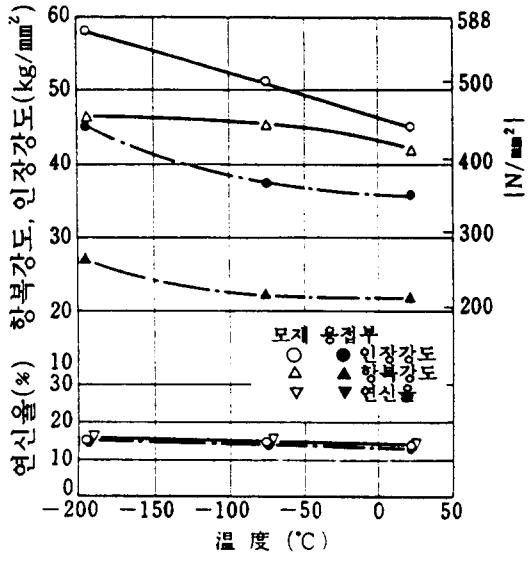

Fig.4 7039-T6합금의 저온에 있어서의 인장성질

Table 1. Al-Zn-Mg계 합금 용접부의 인장성질에 미치는 층간온도의 영향

모재	전극 wire	용접후의 처리	층간온도 (℃)	인장성질			미소균열의 정도
				인장강도 (kg/mm²)	항복강도 (kg/mm²)	연신율 (%)	
Al-Zn-Mg	A 5356	용접후 1개월간 상온시효	15	32.3	22.3	9	경미
			150	25.2	20.6	3	약간현저
			200	24.8	20.4	2	현저
			300	20.1	19.0	1	현저
		용접후 465℃× 1hrA.C→ 120℃× 24hr시효	15	36.9	32.5	4	경미
			150	34.0	30.6	2	약간현저
			200	−	−	−	−
			300	31.7	29.8	1	현저

Table 2. 7000계 Al합금의 TIG 및 MIG 용접부의 기계적 성질

합 금	용접봉 전극wire	모재			용접재		
		인장강도 (kg/mm²)	항복강도 (kg/mm²)	연신율 (%)	인장강도 (kg/mm²)	항복강도 (kg/mm²)	연신율 (%)
7NO1-T6	5356	39.7	33.3	11	34.6	26.2	7
7EO1-T6	5183	58.0	52.0	15	33.5	23.0	6
7039-T61	5039	40.8	33.7	13	33.7	21.1	10
7O39-T64	5039	45.7	38.7	13	35.2	21.1	12
7O39-T64	5356	45.7	38.7	13	30.9	17.6	13
7O75-T6	5356	58.3	51.3	11	26.0	21.1	2

Fig.4 [6]는 7039합금의 모재 및 용접부의 기계적 성질을 표시한 것이다. 그림에서 보듯이 7039합금은 저온에서 뛰어난 성질을 가지고 있음을 알 수 있다.

Table 2는 7000계 Al합금의 TIG 및 MIG 용접부의 기계적 성질을 나타낸 것이다.

6. Al-Zn-Mg계 합금의 시효경화

7000계 Al-Zn-Mg 합금은 열처리 합금이므로 용접부 및 열영향부에서는 용접시의 열 cycle이나 용접 후의 시효처리에 의해 석출물의 용해, 조대화, 새로운 석출물의 형성, 성장등의 현상이 일어나고, 석출 상황에 여러가지 변화가 생긴다. 이러한 변화는 용접물의 기계적, 물리적, 화학적 성질에 영향을 미친다.

6.1 Al-Zn-Mg계 합금의 석출과정 및 시효거동

Al-Zn-Mg계 합금의 시효과정은 X선, 경도측정, 전자현미경등에 의해 많은 연구[7~10]가 되었으며, 일반적으로 190℃이하에서는 그 과정을 다음과 같이 설명할 수 있다.

α(과포화고용체) → G.P. Zone → 중간상 η' → 평형상 η($MgZn_2$)

190℃이상에서는 평형상인 입방구조의 T상 즉, $(AlZn)_{49}Mg_{32}$ 상이 생성될 수 있다[11].

이러한 석출물의 형상, 결정구조, 방위관계를 Table 3에 나타내었다.

Fig.5는 Al-Zn-Mg계 합금 용접부 및 열영향부의 경도회복상황을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 용

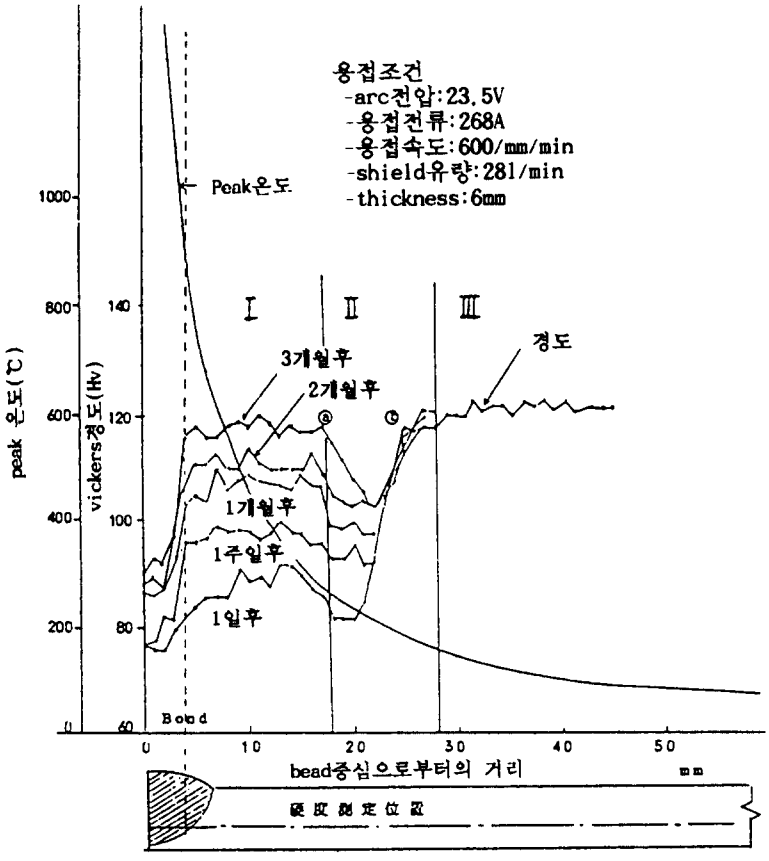

Fig.5 Al-Zn-Mg계 합금 용접부 및 열영향부의 경도분포

Table 3. Al-Zn-Mg계 합금의 석출과정[8)12-14)]

석출상	형상, 결정구조	방위관계, 정합유무
G.P Zone	구형의 solute rich cluster	기지와 정합
$\eta'(MgZn_2)$ 중간상	강도향상에 크게 기여 판 상 조밀육방정 a=4.96Å c=8.68Å	2aη'=9.92Å 7a220Al=9.91Å 기지와 정합
$\eta'(MgZn_2)$ 평형상	과시효시 생성되는 안정상 판 상 조밀육방정 a=5.21Å c=8.60Å	기지와 부정합
$T(AlZn)_{49}Mg_{32}$ 평형상	괴 상 unit cell에 162개 원자 포함	기지와 부정합

접부와 열영향부는 미리 모재에 부여된 열처리 효과가 용접에 의해 없어지고 연질재(O재)에 가깝게 되어 경도값이 저하된다. 그러나 Al-Zn-Mg계 합금의 뛰어난 소입성과 시효성 때문에 용접부 및 열영향부는 용접후의 시효에 의해서 점차 회복한다.

열영향부는 경도회복상황으로부터 3부분으로 나눌 수 있다. 제 1영역은 3개월 후에 모재 경도까지 회복하는 부분이다. 제 2영역은 어느 정도까지는 회복하지만, 모재 경도까지는 회복하지 않는 부분으로 기구적으로 가장 복잡한 부분이다. 제 3영역은 모재 경도에 거의 가까운 비열영향부이다. 제 2영역과 같이 열영향부에서 연화역이 생성되는 원인으로서 주로 4가지 사항을 고려할 수 있다.

① 원자공공 농도의 차[15)]
② 용질의 과포화도가 작다[15)].
③ 석출 입자의 크기의 불균일 [16)]
④ 석출 입자의 조대화[15~19)]

T4재에서는 원자공공 농도의 차, T6재에서는 공공 농도의 차 및 석출입자의 크기의 불균일 때문이라고 사료되며, 용접조건등에 따라서 석출입자의 조대화에 의한 연화역의 생성도 고려할 수있다.

한편, 용접응고조직을 micro적으로 보면 용접부의 각 내부에는 subgrain(cell, cellular dendrite 혹은 등축 dendrite)이 형성되어 있는데, 이러한 미세조직 특징인 subgrain의 존재는 시효성에 영향을 미친다[20)].

6.2 Al-Zn-Mg계 합금 용접부의 시효성에 미치는 각종인자의 영향

6.2.1 냉각속도의 영향[21)]

용접부의 시효성은 용접 입열(즉, 냉각속도)의 영향을 받고, 초기의 시효속도는 입열이 중정도의 경우에 가장 작게 된다. 최종적인 시효 경화능(최고도달온도)은 입열이 크면 저하하고, 입자가 조대화 된다.

6.2.2 합금 조성의 영향[22)]

용접부에 있어서 용접 직후의 경도치는 Mg양이 많은 합금일수록 높고, 용접 후 실온 및 40℃에서 시효시키면 Zn양이 많은 합금일수록 경도치는 높게 된다.

용접직후에는 미세 입자의 석출량은 적기때문에 용접부의 경화에 기여하고 있는 것은 대부분 matrix중에 고용된 용질원자라고 생각된다. 또 Al-Zn-Mg계 합금에 있어서는 Zn원자보다도 Mg원자쪽이 고용강화의 기여가 압도적으로 크다[23)]. 따라서 용접직후의 경도치는 Mg양이 많은 합금일수록 높게 된다. 또 Zn양이 많은 합금일수록 G.P.Zone등의 미세입자의 석출량은 많기때문에 높은 경도치를 나타낸다.

열영향부의 시효거동에 미치는 합금조성의 영향[24)]을 보면, 용접후의 경도회복율은 Zn양이 많고 Mg양이 적은 합금일수록 높게 된다. Zn양이 적고 Mg

양이 많은 합금에 있어서도 Mn, Zr, Cr, Fe등의 미량원소를 함유한 경우에는 경도의 회복이 현저히 빠르다. 이것은 Mn, Cr, Fe등이 불용성 화합물 형태로 존재하고[25] 이들이 matrix의 경도를 높이며, 미량의 Cu가 시효를 촉진시킨다[26]고 사료된다. 용접열에 의해 거의 재용체화 혹은 복원이 일어난 영역은 Zn양이 많고 Mg양이 적은 합금일수록 넓게 되며, 용접후 과시효역에 연화역이 생기는데 이 연화역은 Zn양이 적고 Mg양이 많은 합금일수록 그 폭이 넓고, 용접후 장시간이 지나도 잔존한다.

6.2.3 결정입도 및 dendrite cell size의 영향

결정입경의 대소는 용접부의 시효성에 거의 영향을 미치지 않는데, Al-Zn-Mg 주조 합금의 시효성에 대하여 dendrite cell size의 대소는 큰 영향을 미치며, cell size가 클수록 저하한다. 이것은 cell size의 변화와 함께 matrix의 용질 농도의 변화에 기인하기 때문인 것으로 사료된다[27].

6.2.4 모재의 열처리 조건의 영향

용접전의 모재의 석출상황이 과시효 상태에 가깝고 석출입자의 size가 클수록 열영향부에는 연화역이 현저히 나타나고 경도의 회복이 조금밖에 일어나지 않는다. 이것은 모재의 석출상황의 차이에 따라 열영향부에 있어서 석출입자의 조대화의 경향이 변화하기 때문이다. 모재의 열처리 조건이 다르더라도 이 석출상황이 유사하다면 열영향부에는 거의 차이가 생기지 않는다. 열영향부의 폭은 모재의 최종시효온도(고온시효온도)가 높을수록, 또 그 시효시간이 길수록 석출입자가 보다 안정하게 되고 열영향부가 좁게된다.

7. 용접부의 내식성

Al합금은 표면에 존재하는 산화피막 때문에 우수한 내식 저항성을 가지고 있는데, 이 막은 약 50Å 정도이며 마모등에 의해 제거되더라도 쉽게 재생하여 수일 후에는 거의 같은 두께로 회복한다. 그러나 열처리성의 高力 합금인 7000계 Al-Zn-Mg 합금은 응력부식균열을 일으키기 쉽고, 용접열에 의해 조직변화가 일어나 내식성을 해치는 경우도 있으므로 용접입열에 주의해야 한다. 단 Cu를 함유한 7000계 합금은 내식성이 나쁘지만, Cu를 거의 함유하지 않은 Al-Zn-Mg계 합금의 내식성은 비교적 양호하다.

응력부식균열은 인장응력(이것은 잔류응력 또는 외부에서 가해진 응력이라 생각해도 좋다)이 작용하고 또한 부식환경, 예를들면 공기중의 부식성의 습기나 해변 근처에서 염분을 함유한 바람등이 작용할 때 일어나는 현상이다. 응력부식균열의 기구[28]에 관해서는 많은 설이 제안되었는데, 양극적 용해[28,29]와 수소취화[30~36]의 2개의 기구로 대별할 수 있다. 그러나 열영향부는 각각 다른 열이력을 받고 복잡한 금속조직으로 되어있기 때문에 이들의 조직, 예를들면 입계 석출물,[37,38] 무석출대[39,40] 및 불용성 화합물[41~44]등의 인자와 응력부식균열의 관계를 고려해야만 한다.

Al-Zn-Mg계 합금의 응력부식균열은 결정입계, 특히 입계에 석출물이 없는 소위 무석출대(Precipitate Free Zone, PFZ)와 관계가 있고, 더우기 입계에 존재하는 조대입자나 blow hole등도 문제가 된다. 또한 응력부식균열의 발생 및 전파는 높은 조직 의존성을 가지고 있다.

응력부식균열에 의해 파단된 시험편의 파단부 근방과 인장 시험편의 응력부식 균열부의 조직을 보면 모두 입계 또는 아경계를 따라 석출물이 보이고, 부하응력하에서 입계 또는 아경계에 있는 석출물의 우선적 용해가 크게 기여한다고 사료된다.

응력부식균열의 대책으로서는 결정립 미세화를 위해 Cr, Mn, Zr의 첨가, PFZ의 개선을 위해 Ag의 첨가가 효과적이다. 또 열처리 합금의 시효처리에는 보통 T4, T6 처리가 이용되는데, T6보다 약간 과시효인 T7 처리를 하므로써 내응력 부식성을 증가시킬 수있다.

8. 맺음말

본 고에서는 3회에 걸쳐 7000계열을 중심으로하여 알루미늄 합금의 용접특성을 용접방법, 각종 결함과 대책, 시효경화와 응력부식균열등으로 나누어 기술하였다.

7000계열의 고강도 알루미늄 합금은 수송기기 분야의 최대 기술적 과제인 연비개선과 고속화 실현을 해결할 수 있는 차량차체의 경량소재로 수요가 증가하고 있다. 또한 거의 완벽한 재활용이 가능하여

환경문제로 인한 물자 재활용의 계속적인 요구를 해결할 수 있어 그 잠재성은 매우 크다.

그러나 현재 국내에서는 7000계열등 고강도 알루미늄 용접의 기술수준이 선진국에 비해 떨어지기 때문에, 이에 대한 기술개발에 보다 많은 관심을 기울어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 輕金屬溶接構造協會編：JIS Z 3811 によるアルミニウム溶接技術檢定受驗の手引き, 昭 51年(第8回改正版), 84
2. 中根：溶接金屬の凝固組織, 溶接學會誌 Vol.36, (1967) No.9, 962-973
3. 輕金屬溶接構造協會編：アルミニウム合金構造物の溶接施工管理技術者資格認定試驗テキスト, I (材料), (1965), 60
4. I.B.Robinson, F.R.Baysinger：Welding aluminium alloy 7039, Welding J. Vol.45(1966) No.10 433s-444s
5. 博板加工法委員會：アルミニウム合金ミグ溶接部の溶接割れコニュアル, 輕金屬溶接構造協會, 昭 58年 12月
6. 竹內勝治, 田中喬, 福井利安, 平田勝彦：輕金屬通信(1968) No.12, 65-80
7. M.R.Graf：Etnde axu rayons X des phenomenes de precipitation dans l, alliage aluminium-zinc-magnesium a 7% de zinc et 3% de magnesium. Comptesrendus, 242(1956), 1311-1313
8. L.F.Mondolfo, N.A.Gjostein and D.W.Levinson：Structural Changes During the Aging in an Al-Zn-Mg alloy, J.Metals, 8(1956), 1378-1385
9. I.J.Polmear：The Aging Characteristics of Tarnary Aluminium-Zinc-Magnesium Alloys, J.Inst. Metals, 86(1957-58), 113-121
10. G.Thomas and J.Nutting：The Aging Characteristics of Aluminium alloy J.Inst.Metals, 88(1959-60), 81-90
11. J.D.Embury & R.B.Nicholson, Acta Met., vol.13 (1965) p.403
12. H.Schmalzried & V.Gerold, Z.Metallkd, vol.86 (1957-58) p.535
13. J.Gjonnes & C.J.Simmensen, Acta Met., vol.18 (1970) p.881
14. J.K.Park & A.J.Ardell, Met.Trans., vol.14A(1983) p.1957
15. 水野, 高田, 加藤：溶接學會誌, 36(1967), 854
16. 水野, 松村：溶接學會誌, 39(1970), 73
17. I.H.R.Rogerson：Brit.W.J., 11(1964), 12
18. J.Schubert：Schweisstechnik, 16(1966), 529
19. 杉山, 福井：溶接學會誌, 35(1966), 790
20. 菊池政夫, 森田殼, 堀井康司, 水野政夫：Al-Zn-Mg合金溶接金屬部の時效性と溶接凝固組織關係, 輕金屬 vol.29(1979) No.2 58-63
21. 菊池政夫, 北口善久, 水野政夫：Al-Zn-Mg合金溶接金屬部の時效性に及ぼす冷却速度の影響, 輕金屬 Vol.27 (1977) No.2, 57-62
22. 菊池政夫, 堀井康司, 水野政夫：Al-Zn-Mg合金溶接金屬部の時效性に及ぼす合金組成の影響, 輕金屬 Vol.27 (1977) No.9, 417-422
23. 大塚, 堀內：日本金屬學會誌, 36(1972), 504
24. 菊池政夫, 水野政夫：Al-Zn-Mg合金溶接熱影響部の時效擧動に及ぼす合金組成の影響, 輕金屬 Vol.28 (1978) No.12, 595-600
25. Y.Baba：Trans.JIM, 7(1966), 224
26. 馬場：日本金屬學會誌, 31(1967), 507
27. 菊池政夫, 堀井康司, 水野政夫：急冷凝固されたAl-Zn-Mg系合金の時效性に及ぼす結晶粒度およびデンドライトセルサイズの影響, 輕金屬 Vol.29 (1979) No.3, 89-94
28. 齊藤壽雄：Al-Zn-Mg系合金の應力腐食割れに關する研究, 學位論文(京大, 昭49年 5月)
29. たとえば村上：金屬學會會報, 18(1979), 774
30. たとえば R.Haag, J.E.Morral and A.J.McEvily：International Conference on Environment Degradation of Eng.Material, (1977)
31. J.Gest and A.R.Troiano：Corrosion, 30(1974), 274
32. G.M.Scamans, R.Alani and P.R.Swann：Corr. Science, 16(1976), 443
33. J.Albrecht, B.J.McTiernan, I.M.Bernstein and A. W.Thomson：Scripta Met. 11(1977), 893
34. G.M.Scamans：Scripta Met.12(1978), 227
35. G.M.Scamans：Scripta Met.13(1979), 245
36. D.Hardie, N.J.Holroyd and R.N.Parkins：Met. Science, 13(1979), 603
37. L.Christoaloulou and H.M.Flower：Acta Met.28

(1980), 481
38. P.K.Poulose, J.E.Morral and A.J.Mcevily : Met. trans., 5(1974), 1393
39. 官本, 村上 : 金屬學會誌, 37(1973), 394
40. K.G.Kent : J.Inst.Metals, 97(1969), 127
41. A.J.Sedriks, P.W.Slattery and E.N.Pugh : Trans. ASM, 62(1969), 238
42. 官本, 平野 : 輕金屬, 26(1976), 501
43. 圓城, 黑田, 石本 : 溶接學會東京大會, (1979), 141
44. 圓城, 黑田 : 材料, 29(1980), 617