

## 퇴화처리(RRA)한 Al 8090 합금의 응력부식에 관한 연구

이 종 권 · 김 선 화

부경대학교 공과대학 생산가공공학과, 울산대학교 공과대학 금속공학과

### Stress Corrosion Cracking of Retrogression and Reaged Al 8090 Alloy

Jongkwon Lee and Seonhwa Kim

Department of materials engineering, Soonchunhyang university, P.O. Box 97, Asan, Chungnam 337-740

Stress corrosion cracking susceptibility of Al 8090 alloy was studied by slow strain rate technique in 3.5% NaCl solutions. Peak aged specimen was extremely susceptible, but overaging could improve the SCC resistance. The RRA(retrogression and re-aging) treatment could improve the SCC characteristics without sacrificing the strength. The optimum retrogression treatment condition was 220°C, 4 min followed by 190°C, 16hrs. The relationship between SCC resistance and heat treatment was discussed.

## 1. 서 론

Al-Li 합금은 기존의 항공기용 재료로 사용되는 알루미늄 합금에 비하여 비탄성 강도가 높고 비중이 낮기 때문에 새로운 항공기용 소재로써 많이 연구가 되어왔다. 알루미늄에 2~3%의 Li를 첨가하면 10~15%의 무게 감소가 가능하여 2024 T3, 7075 T6 등을 대체할 수 있는 차세대 항공기 소재로 개발되었으나 Li의 높은 반응성 때문에 부식과 파괴인성이 저하되는 단점이 있어 실제 사용이 제한되고 있는 실정이다.<sup>1-4)</sup>

응력부식 저항성은 과시효에 의하여 개선될 수 있으나 강도가 감소하는 결점이 있다. 이에 따라 최근 단순시효경화 대신 퇴화와 재시효과정을 복합시킨 RRA(retrogression and reaging) 열처리를 이용하면 기계적 강도의 손실없이 응력부식균열 저항을 향상시킬 수 있다

고 보고되고 있으나<sup>4-6)</sup> 최적 열처리 조건에 대하여는 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 최적 열처리 조건을 구하기 위하여 열처리 조건에 따른 응력부식균열 감수성에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시료준비

본 실험에 사용된 합금은 Alcan사에서 구입한 Al-Li 8090 합금이다. 1200×65mm로 압연 후 T 3771로 열처리하여 공급된 것으로 이 합금의 화학 조성은 Table 1과 같다.

### 2.2 응력부식시험

응력부식 감수성을 측정하기 위하여 slow strain rate technique(SSRT)을 이용하였고

Table 1. Chemical Compositions of Al-Li 8090 Alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
0.028	0.057	1.06	0.005 ↓	0.65	0.005 ↓	0.016
Ti	Zr	Li	Be	Ni	Sn	Al
0.026	0.10	2.50	0.005 ↓	0.005 ↓	0.005 ↓	Balance

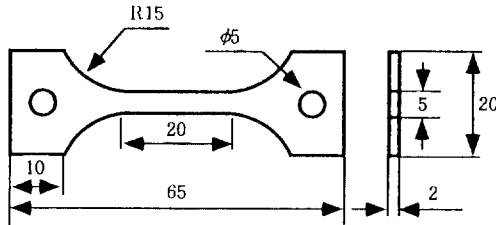


Fig. 1. Dimension of SSRT Specimen.

strain rate은  $2.0 \times 10^{-6}$ /sec로 유지하였다. 시편은 Fig. 1과 같이 인장시험편 형태로 가공하였으며 시편 가공시 응력부식 민감도가 가장 잘 나타나도록 두께 방향(short transverse)으로 인장응력이 걸리도록 가공하였다. 시효 조건에 따른 내응력 부식성을 측정하기 위하여 최대 시효, 과시효 그리고 여러 조건의 퇴화 조건에서 RRA 처리한 시편을 시험하였다. 최대 시효 조건은 여러 연구에 의하여 밝혀진 조건인 190°C 16hr을 사용하였다. RRA 처리조건은 1차로 190°C, 16시간 시효 후 210~230°C, 0.5~6분간 퇴화 처리하고 다시 재시효(190°C, 16시간)하였으며 시효는 중성 염욕에서 수행하였다. 그리고, Hu<sup>4)</sup> 등에 의하여 최적조건을 얻을 수 있는 것으로 보고된 높은 온도(325°C), 혹은 낮은 온도에서 긴 시간(220°C, 45분)의 퇴화열처리 조건에서도 내응력부식성을 실험하여 비교하였다.

### 3.3 미세조직관찰

실험후 파단면을 주사전자현미경으로 관찰하여 균열의 전파양상과 석출물을 관찰하였다. 또 입계와 입내의 석출물을 EDS(Energy Dispersive Spectrometer)로 분석확인하였다.

Table 2. Results of SCC Test of Age Hardened 8090 Alloy

Aging Condition	Environment	Fracture Stress	Fracture Time	tf/tf air
190°C, 16hr	3.5% NaCl	139	4.3	0.29
"	air	429	14.9	
190°C, 72hr	3.5% NaCl	304	9.1	0.62
"	air	401	14.6	

## 3. 결과 및 고찰

Table 2에 단순 시효 경화시킨 8090 합금을 SSRT 법에 의하여 응력부식 저항성을 측정된 결과를 나타내었다. 표에는 파단시까지 걸리는 시간( $t_f$ ), 최대강도(UTS) 등을 나타내었고, 부식성이 없는 분위기인 공기중에서 얻은 결과를 함께 나타내어 비교가 가능하도록 하였으며 본 연구에서는 파단시까지 걸리는 시간으로 응력부식 감수성을 나타내었다. 응력 부식의 감수성을 결정하는 방법으로 파단시까지의 최대 강도를 비교하는 방법도 사용되나<sup>7,8)</sup> Table 3의 연구 결과에서 보면 210°C, 4분 처리시  $t_f/t_{f,air}$ 는 0.91인데 비하여  $UTS/UTS_{air}$ 는 1보다 크게 나타났다. 응력부식이 일어날 경우 일반적으로 재료가 원래의 강도보다 낮은 응력에서 파괴가 일어나게 되는데  $UTS/UTS_{air}$ 가 1보다 큰 값을 갖는 것은 응력부식이 일어나면 더 높은 응력에서 파괴가 일어난다는 것을 의미하므로 모순이 된다. 이것은 SSRT 방법이 응력부식감수성의 유무와 대소를 결정하는데 유용한 방법임에 비하여 임계 응력과 관련된 자료를 제시하는 데는 미흡하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 응력부식 감수성을 나타내는 지수로 파단시의 최대 응력보다는 파단시까지의 시간을 사용하였다. 그리고 알루미늄 합금과 같이 시효경화가 일어나는 합금에서는 열처리에 따라 재료의 강도와 연성이 달라지기 때문에 서로 다른 기계적 성질을 갖는 재료들 사이의 응력 부식 감수성을 비교할 경우에는 단순 파단 시간만으로 비교할 수는 없다. 이

Table 3. Results of SCC Test of RRA Treated 8090 Alloy

RRA condition	Environment	Fracture		tf/tf <sub>air</sub>
		Stress (Mpa)	Time (hr)	
T6+210°C, 0.5min+T6	3.5% NaCl	372	11.0	
T6+210°C, 1min+T6	3.5% NaCl	389	12.6	
" +210°C, 2min "	3.5% NaCl	412	13.3	
" +210°C, 3min "	3.5% NaCl	330	10.4	
" +210°C, 4min "	air	409	14.9	0.91
" +210°C, 4min "	3.5% NaCl	404	16.3	
" +210°C, 6min "	air	354	11.8	0.99
" +210°C, 6min "	3.5% NaCl	343	11.9	
" +220°C, 0.5min "	3.5% NaCl	318	10.2	
" +220°C, 1min "	3.5% NaCl	350	10.7	
" +220°C, 2min "	3.5% NaCl	362	11.2	
" +220°C, 3min "	3.5% NaCl	373	11.4	
" +220°C, 4min "	air	408	15.7	0.90
" +220°C, 4min "		432	17.4	
" +220°C, 6min "	3.5% NaCl	390	13.8	0.81
" +220°C, 6min "	air	433	17.1	
" +220°C, 45min "	3.5% NaCl	354	11.8	0.66
" +220°C, 45min "	air	398	17.8	
" +230°C, 0.5min "	3.5% NaCl	375	11.2	
" +230°C, 1min "	3.5% NaCl	345	9.8	
" +230°C, 2min "	3.5% NaCl	394	11.8	
" +230°C, 3min "	3.5% NaCl	383	11.9	
" +230°C, 4min "	3.5% NaCl	259	7.8	0.49
" +230°C, 4min "	air	405	15.8	
" +230°C, 6min "	3.5% NaCl	319	9.8	0.84
" +230°C, 6min "	air	319	11.6	
" +230°C, 4min "	3.5% NaCl	246	11.7	0.50
" +230°C, 4min "	air	307	23.6	

를 위하여 같은 조건에서 열처리를 한 재료를 응력부식이 일어나지 않는 분위기인 공기중에서 실험하여 그때의 파단시간( $t_{f, air}$ )을 구하고 그 값으로 응력부식 분위기에서 얻은 파단시간을 정상화한 값을 사용하면 비교가 용이하다.

Table 2에 나타난 바와 같이 최대 시효시켰을 경우 (190°C, 16hr) 염수 중에서 파단에 걸리는 시간이 4.3hr 으로 공기중의 14.9시간과 비교하여 29%에 불과하였다. 그러나 190°C, 72hr 처리하여 과시효된 시편에서는 파단에 9.1시간이 소요되었고 이것은 최대 시효 시편과 단순 비교하여도 파단 시간이 상당히 길어진 것이고 같은

조건으로 열처리된 시편을 공기중에서 실험한 시편과 비교하여 볼 때에는 62%에 해당하여 최대 시효시의 29%보다 커진 것을 알 수 있다. 이것은 과시효에 의하여 응력부식저항성이 개선된다는 것을 의미하며 8090 합금으로 연구한 다른 연구 결과<sup>9,10)</sup> 와도 잘 일치하고 있다. 그러나 과시효를 시킬 경우 응력부식에 대한 저항성은 향상되나 재료 자체의 강도는 감소되는 단점이 있다.

Al 7000 계열 합금에서 강도를 잃지 않으면서 높은 응력부식 저항성을 가질 수 있는 방법으로 미세조직을 조절하는 RRA법이 개발되어 왔으나 Al-Li 합금에는 많이 연구되어 있지 않다.<sup>11)</sup> Table 3에 RRA 처리한 8090 합금에 대하여 응력부식 시험한 결과를 나타내었다. 퇴화처리는 210~230°C, 0.5~6min 동안 하여 최적 조건을 찾고자 하였다. 210°C 에서 퇴화처리할 경우 퇴화 처리 시간이 길수록 파단시간(응력부식저항성)이 길어지는 것으로 나타나 4분간 처리시 파단시간은 14.9시간으로 최대 시효 시편의 파단시간 4.3시간에 비하여 3.5배의 긴 파단시간을 나타내었다. 또 공기중에서 시험한 값(16.3 시간)에 비하여는 91%에 해당하는 값이다. 이보다 긴 시간 동안 퇴화처리한 시편에서는 응력부식이 일어나는데 소요된 시간은 단축되고 파단시의 강도는 낮아지는 것으로 나타났다.

220°C에서 퇴화 처리할 경우에도 210°C에서와 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 0.5분에서부터 4분까지는 퇴화시간이 길어질수록 응력부식 파괴가 일어날 때 까지의 시간이 길어졌으며 4분간 처리할 경우 가장 긴 15.7 시간이 소요되었다. 이 값은 공기중에서 시험한 값(17.4시간)과 비교하여 90%에 해당하는 값으로 210°C에서 얻은 91% 와 거의 비슷함을 알 수 있다. 파단시간이 길어진 것과 함께  $t_f/t_{f, air}$ 가 최대 시효시의 29%, 과시효시의 62% 비하여 210~230°C, 4분간 퇴화처리후 재시효할 경우 90%에 달하는 것은 내응력 부식성이 현저히 개선된 것을

의미한다. 그러나 이것보다 긴 시간 동안 퇴화처리할 경우에는 파단시간이 오히려 짧아졌다. 6분과 45분간 처리시 파단시간은 각각 13.8, 11.8시간으로 퇴화기간이 길어질수록 파단시간이 짧아지므로, 이것은 내용력부식성이 저하되는것을 의미한다. 사진 1과 2에는 최대시효시킨 시편과 220℃, 4분 퇴화처리한 시편의 파단면을 나타내었는데 거의 유사한 파면양상을 보여주고 있다. 즉 cleavage와 입계부식이 혼합된 형태로 균열이 전파된 것을 알 수 있으며 다만 최대시효시킨 시편에서 입계부식의 정도가 조금 더 심하였다. 이것은 최대시효된 시편에서 부식에 의한 영향을 더욱 많이 받은 것을 의미하며 파단시간에서 얻은 결과와 일치하고 있다. 이보다 긴 6분간 실험할 경우 파단시간은 13.8시간(공기중 파단시간 비교 81%)으로 줄어들어 용력부식저항성이 감소한 것을 알 수 있다. RRA처리에 의하여 230℃로 퇴화처리할 경우 퇴화처리시간이 0.5~3분까지는 용력부식 파단에 소요되는 시간이 11~12시간 정도로 거의 비슷한 것으로 나타났으나 이보다 긴 시간인 4분 동안 퇴화처리할 경우 파단시간이 급격히 감소하였으며(7.8시간) 용력부식 저항성이 크게 저하된 것을 알 수 있다. 이것은 같은 조건으로 열처리하여 공기 중에서 시험한 시편의 파단시간(15.8시간)에 비하여 절반에도 미치지 못하는 값으로 이것으로 보아 230℃에서 4분간 퇴화처리하면 용력부식저항성이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 용력부식 저항성이 열처리 조건에 따라 크게 달라지는 것은 열처리에 의하여 미세조직이 달라지기 때문이다. 8090 합금은 열처리시 7000계열 합금에 비하여  $\delta$ ,  $T_1$ ,  $S'$  상등 훨씬 많은 종류와 수의 석출물을 형성하므로 용력부식과 미세조직과의 상관관계는 매우 복잡하며 미세조직 관찰결과에 따른 입계와 입내에 생성되는 석출물의 자세한 거동은 이미 발표된 바 있다.<sup>12)</sup> 용력부식과 미세 조직의 상관관계는 기지내부와 입계 혹은 아입계에서 생성되는 석출물과

깊은 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 고온에서 퇴화처리시에는 평형상 석출물이 보다 균일하게 석출되는 효과와  $S'$ 과  $\delta$  상이 용해되고 대신에 입내에  $T_1$  상의 석출이 촉진되기 때문으로 알려져있다. 또 210℃~230℃의 온도범위에서 45분간 퇴화처리하여 용력부식감수성에 대한 실험을 하였으나 Table 3에 나타난 바와 같이 실험된 모든 온도에서 6분간 퇴화처리한 것에 비하여 파단시의 강도, 파단시간등의 성질이 저하된 것으로 나타났다. Hu<sup>4)</sup> 등은 8090 합금의 최적 퇴화 처리 조건으로 230℃, 45분 혹은 325℃, 1.5분을 제안하였다. 이 등이<sup>13)</sup> 200~240℃의 퇴화온도 범위에서 수행한 연구 결과에서는 220℃에서 가장 좋은 결과를 나타내고 있어 두 연구결과에서 최적 온도의 차이가 있었다. 이와 같은 차이는 두 시편의 조직차이와 용력방향의 차이에 의한 것으로 생각된다. 본 연구에 사용된 시편은 두께 60mm로 압연후 T3771 상태(용체화 처리후 6% stretch)로 공급된 것인데 비하여 Hu 등의 연구에 사용된 시편은 용체화 처리후 2mm로 압연한 것이기 때문에 그에 따른 조직의 차이와 용력방향의 차이 때문으로 생각된다. 이상의 결과로 보아 Al-Li합금은 열처리 전의 조직과 용력의 방향에 따라 용력부식거동이 크게 변하는 것을 알 수 있으며 실제 사용을 위하여 열처리할 때에도 이것을 고려하여야 할 것으로 생각된다. 이와 같이 조건에 따라 최적내식성을 가지는 열처리 조건은 다르나 RRA 처리된 시편은 과시효시와 같은 내용력부식성을 가지면서 인장강도와 항복강도는 최대시효보다는 약간 낮은 강도를 가지나 과시효된 시편보다는 20%의 강도가 향상되었다. 본 연구에서도 210~230℃의 온도 범위에서 연구하였을 때 220℃에서 4분간 퇴화처리한 시편은 15.7시간의 파단시간이 소요되어 용력부식이 일어나지 않는 조건인 공기 중에서의 파단시간인 17.4시간의 90%에 해당하는 높은 내식성을 얻을 수 있었다. 이것으로 보아 220℃가 최적 퇴화온도임을

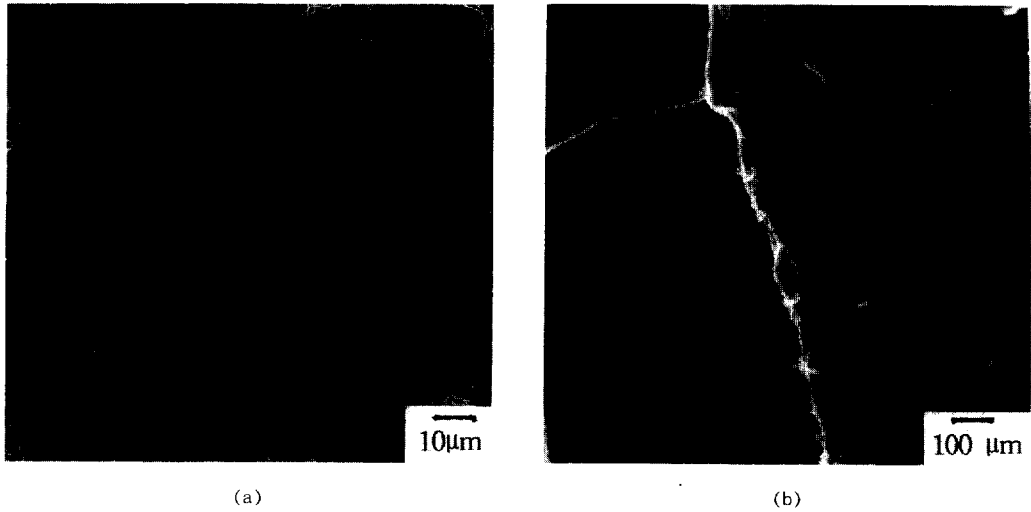


Photo. 1. SEM Micrographs of Fractured Surface of Peak Aged 8090 Alloy

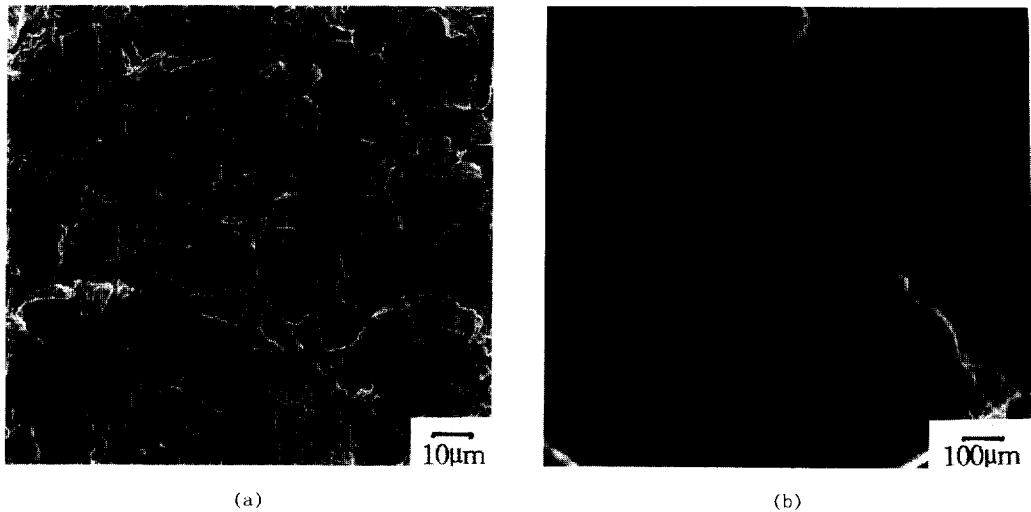


Photo. 2. SEM Micrographs of RRA Treated 8090 Alloy (220°C, 4min).

확인할 수 있었다. 또 퇴화 시간에서도 Hu 등의 45분에 비하여 본 연구에서는 4분이 최적이었으며 그보다 긴 시간인 6분, 45분에서는  $t_f$  및  $t_f/t_{f,air}$ 가 모두 감소하여 내응력부식성이 감소하여 매우 큰 차이가 나타났다.

특기할 만한 것은 210°C에서 45분간 퇴화처리한 시편에서 파단시간비( $t_f/t_{f,air}$ )가 0.99로 나타난 것이다. 이것은 거의 응력부식이 일어나지 않는 것으로 간주될 수 있을 정도의 매우 높은

값이다. 그러나, 파단시간비 값이 높은 것에 비하여 파단시간 자체는 11.8시간으로 다른 조건들에 비하여 낮은 값을 나타내고 있을 뿐만 아니라 파단강도에 있어서도 354Mpa로 220°C, 4분 처리한시편의 408Mpa보다 10% 이상 낮은 값이므로 강도를 잃지 않고 내식성을 향상시킬 수 있는 220°C, 4분이 최적퇴화처리조건으로 생각된다.

#### 4. 결 론

Al 8090합금을 여러 방법으로 시효 처리하여 응력부식균열 감수성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Al-8090 합금은 응력부식균열이 발생하기 쉬우며 응력부식 저항성은 열처리에 의하여 크게 영향을 받는다.
2. 최대 시효시 응력부식이 가장 일어나기 쉬우며 과시효를 하면 내응력 부식성은 커진다.
3. RRA 처리에 의하여 내응력부식성이 향상되며 220℃, 4분간 퇴화 처리후 190℃, 16시간 재시효할 경우 강도의 감소없이 최대 내응력부식성을 갖는다.

#### 후 기

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모 과제연구보조로 이루어진 것이며 한국학술진흥재단의 도움에 감사드립니다.

#### 5. 참 고 문 헌

1. P. Niskanen and T. H. Sanders, Jr., Aluminium Lithium Alloys, TMS-AIME, 347 (1981).
2. 根本實, 美浦康宏, 古川稔, 輕金屬, 36, 685 (1986).
3. T. H. Sanders, Jr., Aluminum Lithium Alloys, Eds. T. H. Sanders, Jr. and E. A. Starke, Jr., TMS-AIME, 63 (1981).
4. Z. Q. Hu, Y. Zhang, Y. L. Liu and Z. Y. Zhu, Corrosion, 49, 491 (1993).
5. B. Cina, U.S. Patent 3856584 (1974).
6. T. Ohnishi, Mater.Trans., JIM **30**, p601 (1989).
7. A. Kawashima, A. K. Agrawal and R. W. Staehle, "The Slow Strain Rate Technique", ASTM STP 665, G. M. Ugiansky and J. H. Payer Eds., ASTM, p. 266, 1979.
8. A. I. Asphahani, "The Slow Strain Rate Technique", ASTM STP 665, G. M. Ugiansky and J. H. Payer Eds., ASTM, p279, 1979.
9. L. Christodoulou, L. Struble and J. R. Pickens, Aluminum Lithium Alloys II, TMS-AIME, 561 (1981).
10. A. Gray, N. J. H. Holoyd and J. White, Al-Li Alloys V, TMS-AIME, 1175 (1990).
11. J. K. Park and A. J. Ardell, Met. Trans. A, **15A**, 1531 (1984).
12. 김선화, 이종권, 한국재료학회지, **5**, 575 (1995).
13. 이종권, 이정환, 김낙준, 과학기술처 보고서 UCN 367-1545.C, 1991.