

고장력 알루미늄 합금의 잔류응력 제거

金興植 · 崔性洙 · 尹錫吉 · 趙和錫

材 料 工 學 科

〈요 약〉

고장력 알루미늄 합금의 잔류응력을 제거하기 위하여 종래의 고압 증기 대신 비등하는 trichloroethylene 을 사용한 새로운 uphill quench 법을 연구하였다.

잔류응력을 제거하기 위한 최적조건을 찾기 위해 2024와 7075 알루미늄 합금봉을 사용하여 시편의 굵기, 열처리 조건 및 냉각수 온도를 변화시켜 실험하였다.

잔류응력이 제거되는 정도는 용체화 처리한 재료 내부의 잔류응력 상태에 따라 달라지나 용체화 처리한 재료를 용체화 처리후 즉시 비등하는 trichloroethylene에 uphill quench하고 인공시효처리를 할 때 잔류응력이 가장 잘 제거되었다.

Relief of Residual Quenching Stresses in High-Strength Aluminum Alloys

Heungsik Kim, Sungsoo Choi, Sokeel Yoon, Hwasuck Cho.

Dept. of Metallurgy and Material Science

〈Abstract〉

A new method of uphill quench using trichloroethylene instead of conventional high pressure vapor to reduce residual quenching stresses in aluminum alloy rods has been studied. Investigations were made on 2024 and 7075 alloy rods of various sizes with various quench and heat treatment procedures, in order to find the optimum conditions for relieving the residual stresses. The reduction of residual stresses was found to be a function of variables such as temperature of cooling water, size and heat treatment history of specimen. The best result was obtained when an uphill quench in boiling trichloroethylene followed by T-6 aging was made immediately after the solid solution treatment.

I. 서 론

대부분의 상용 알루미늄 합금은 열처리를 하여 주어야만 강도가 증가한다. 열처리 방법은 합금의 종류에 따라 다르지만 일반적으로 재료를 400~500°C 근처에 가열한 후 수중에 급냉하여 합금재료 내부 조직을 균질하게 하고 합금 원소들을 알루미늄 결정안에 고용체화 처리한 후 다시 자연 또는 인공 시효처리를 하므로써 강도가 높은 재료를 얻는다.

냉각수에 급냉할 때 재료의 표면은 재료의 중심

부보다 더 빨리 냉각하여 재료 내부와 표면 사이에 온도 차이가 생긴다. 재료가 냉각수 온도와 같아지도록 완전히 냉각되면 재료 내부와 표면 사이에 온도 차이는 없어지나 재료 내부와 표면 사이에 잔류응력이 발생한다. 이 잔류응력은 재료 표면에는 압축응력이 형성되고 재료의 중심부에는 인장 잔류응력이 형성된다.

이 잔류응력은 합금의 종류와 냉각수 온도에 따라 그 크기가 달라진다. 용체화 처리후 120~200°C에서 시효 경화 처리하면 잔류응력이 20~30% 제거되나 이 정도로서는 잔류응력의 영향을 완전히

피할 수는 없다.

재료의 표면에 형성된 압축잔류응력은 재료의 피로 강도와 응력부식에 대한 저항을 증가시켜 주지만 재료를 질사 가공할 때에는 재료 내부 탄성응력의 평형이 깨어져 새로운 응력의 평형상태에 도달하면서 재료를 비틀리게 하여 알루미늄 합금 제품의 정밀도를 크게 손상시킨다. 따라서 알루미늄 합금제품의 정밀도를 향상 시키려면 기계가공 전에 잔류응력을 제거할 필요가 있다.

금속 재료의 잔류응력을 제거하는 일반적인 방법에는 소성가공법 고온가열법 및 uphill quench법⁽¹⁾이 있다. 압연 제품이나 압출제품의 잔류응력은 신장(stretching)에 의하여 어느 정도 감소시킬 수 있다. 단조 제품의 잔류응력은 압축 소성가공에 의하여 감소시킬 수 있다. 용체화 처리된 제품의 잔류응력은 uphill quench법과 인공 시효처리에 의하여 약 80%까지 제거할 수 있으며 신장(stretching)에 의하여 약 50%까지 세거할 수 있다.⁽²⁾ 용체화 처리한 제품을 신장하여 인공시효처리 하면 잔류응력이 80%까지는 제거되리라 생각된다.

잔류응력이 존재하는 재료를 고온으로 가열하면 시간의 경과와 함께 잔류응력이 감소하여 최후에는 잔류응력이 전부 제거된다. 고령 알루미늄 합금은 인공 시효처리 기준 온도와 인공 시효처리 기준시간 이상으로 가열하면 과시효(over aging)가 일어나 알루미늄 합금재료의 기계적 성능이 저하한다. 따라서 알루미늄 합금재료는 시효처리 온도(100~200°C) 이상으로 가열하여 잔류응력을 제거할 수는 없으므로 고온가열법은 잔류응력 제거의 효과적인 방법이 될 수가 없다. 그러나 uphill quench와 시효처리를 병행하면 잔류응력을 효과적으로 제거할 수가 있다.

본 실험에서는 종래에 사용되어 온 고온고압 수증기 대신 uphill quench의 새로운 방법인 끓는 trichloroethylene을 가열 매체로 하여 uphill quench 하므로써 잔류응력이 제거되는 가능성을 연구하기 위하여 냉각수 온도, 재료의 종류 및 재료의 크기에 따른 잔류응력의 크기 변화와 잔류응력 제거 능력을 실험하였다. 잔류응력 측정에는 X-선법⁽³⁾과 여러가지 기계적 방법⁽⁴⁾이 있는데 본 연구에 사용된 시편은 봉재이므로 이러한 재료의 3차원 응력을 해석하기 위해서는 Sachs의 중공법^(5,6)을 이용하여야 한다. 본 실험에서는 밀링기(milling

machinc)를 이용한 중공법⁽⁷⁾을 채택하였고 변형량은 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였다.

II. uphill quench의 원리

고온으로 가열한 재료를 수중에 급냉하면 시편 표면과 중심의 온도 구배에 의한 변형에 의하여 내부에 잔류응력이 생긴다.

이와 같은 잔류응력이 존재하는 시편을 지온으로 냉각하여 고온으로 급열(uphill quench)하면 시편이 급냉과는 반대 부호의 변형을 받아 잔류응력이 감소될 수 있으리라는 것이 uphill quench의 기본 개념이다. 고온으로 가열한 재료를 수중에 급냉하면 시편 표면과 중심 사이의 온도 구배에 의하여 재료 내부에 소성 변형이 일어나리라는 것은 일반적인 생각이나 변형량의 크기나 재료 내부의 전위 반응과 전위농도 변화에 대한 연구보고는 매우 적다.

J. Nutting⁽⁸⁾에 의하면 고장력 알루미늄 합금 재료를 용체화 처리하면 고온에서 형성된 공공(vacancy)이 전위 주위에 확산하여 들어와 나선형 전위(helical dislocation)를 형성하므로써 전위농도가 높아진다고 하였다. 이 외에도 변형에 의하여 전위가 이동하여 전위 길이가 증가할 수도 있고 전위 사이의 반응에 의하여 전위 농도가 증가할 수도 있다.

이와 같은 전위농도 증가는 재료 내부에 미세적 잔류응력을 생기게 하고 동시에 재료의 표면과 내부 사이의 비교적 먼 거리에 걸쳐 기시적 잔류응력을 발생하게 한다.

용체화 처리로 인하여 잔류응력이 생긴 재료를 uphill quench하면 재료는 용체화 처리 때와는 반대 부호의 변형을 받게 되어 전위 반응이 반대 방향으로 일어날 것이고 이러한 전위 반응이 쉽게 일어나게 하려면 용체화 처리후 재료가 시효경과 되기 전에 uphill quench하여 주어야 한다.

용체화 처리후 시편을 대기중에 방치한 시간이 길게 되면 재료내부 전위 주변에 불순물 원자나 합금원소가 확산하여 들어와 uphill quench의 변형에 의하여 전위를 움직이기 어렵게 되므로 uphill quench로 인한 잔류응력 제거 효율은 감소할 것이다. 또한 uphill quench 후 즉시 인공 시효처리를 하여 주면 전위의 재배열에 의하여 잔류응력이 더

속 감소될 것이다. H.N. Hill⁽¹⁾은 용체화 처리된 알루미늄 합금재료를 액체질소를 사용하여 -196°C 로 냉각한 후 192°C 의 수증기를 알루미늄 합금재료에 고압으로 분사시켜 용체화 처리로 인하여 발생한 잔류응력을 제거하였다. 그는 uphill quench 만 으로서는 잔류응력을 모두 제거할 수 없었고 uphill quench 후 즉시 인공시효처리를 하여 잔류응력을 80%까지 제거할 수 있었다. 이 방법은 잔류응력을 제거하기 위하여 uphill quench 법과 고온가열법(인공시효처리)을 함께 이용한 것이다. H.N. Hill이 보다 편리해 보이는 끓는 물 대신 고압수증기를 가열 매체로 이용한 것은 끓는 물을 이용하여 알루미늄 합금 재료의 표면을 효과적으로 가열할 수 없었기 때문이다.

끓는 물로 액체질소 온도의 알루미늄 합금재료를 가열하면 물은 재료의 표면에서 얼음층을 형성하여 열전달 성능을 감소시키기 때문에 재료의 표면을 가열하는 효과가 급격히 감소되고 알루미늄 합금재료의 표면과 중심사이의 온도구배는 작아져 uphill quench의 효과를 기대할 수 없게 된다.

따라서 고온고압 수증기로 액체 질소에 냉각된 알루미늄 합금재료의 표면을 가열하면 재료의 표면에 고체 얼음이 발생하는 것을 순간적으로 제거시키면서 재료의 표면을 효과적으로 가열할 수 있었다. 고온고압 수증기 대신 끓는 trichloroethylene 을 가열매체로 하는 uphill quench 법⁽²⁾이 있는데 trichloroethylene은 융점이 -88°C ⁽³⁾이므로 저온으로 냉각된 알루미늄 합금 표면에서 고체를 형성하지 않아 효과적인 uphill quench를 기대할 수 있다.

따라서 끓는 trichloroethylene(87°C) 용액 중에서 액체질소로 냉각된 알루미늄 합금봉은 가열하면 열전달 효과가 높아 잔류응력을 제거할 수 있었다. 잔류응력 제거효율은 용체화 처리에서 발생한 잔류응력의 크기와 uphill quench시 재료의 표면과 중심 사이의 온도차이에 따라 달라지는 것으로 잔류응력이 높은 재료 일수록 잔류응력 제거효율이 낮고 uphill quench시 발생하는 온도 차이가 클수록 잔류응력 제거효율이 높아진다.

trichloroethylene을 이용한 uphill quench에서는 용체화 처리시 냉각수 온도가 65°C 인 경우에 잔류응력 제거 효율이 80%이었고 냉각수 온도가 상온이 되면 잔류응력 제거 효율이 50% 이하이었다.

H.N. Hill은 uphill quench시 시편 표면과 중심부 사이의 온도차이가 커지면 잔류응력 제거효율이 증가한다는 것을 상온에 용체화 처리한 시편에 대하여 실험으로 증명하였다. 표1은 상온에 용체화 처리한 시편을 uphill quench하고 인공시효 처리하였을 때 시편 표면과 중심사이의 온도 차이가 커지면 잔류응력 제거효율이 커진다는 것을 보여주고 있다.

표 1. uphill quench에 의한 잔류응력 제거 효율⁽¹⁾

온도차이($^{\circ}\text{C}$)	60	120	150	200
잔류응력 제거 효율 (%)	18	47	57	82

액체 질소로 냉각된 알루미늄 합금을 끓는 trichloroethylene으로 가열하면 시편의 표면과 중심사이의 온도 차이가 상당히 크다. 고장력 알루미늄 합금 재료의 기계적 성질과 열전달 성능⁽¹⁰⁾ 및 봉재 표면을 가열하는 열전달식⁽¹¹⁾으로부터 알루미늄 합금재료를 trichloroethylene으로 가열하는 경우 재료 내부와 표면사이의 온도차이를 이론적으로 계산하여 보면 uphill quench 0.5초 후에는 온도 차이는 270°C 이고 1초 후에는 200°C 가 된다⁽²⁾.

실험상 여러가지 불리한 문제점을 감안하여 준다 하여도 trichloroethylene으로 uphill quench 하는 경우 재료 표면과 내부 사이의 온도 차이는 120°C 이상이 될 것이다.

표 1에는 20°C 물에 용체화 처리한 재료의 잔류응력 제거 효율을 보이는 것으로서 더운 물에 용체화 처리한 재료의 잔류응력 제거 효율은 표 1보다 더 높은 것이다.

따라서 상온에 용체화 처리한 시편을 trichloroethylene으로 uphill quench 하였을 때 잔류응력 제거효율이 50% 이하 이었지만 더운 물에 용체화 처리한 시편의 잔류응력 제거효율이 80% 이상이었던 것은 H.N. Hill의 실험결과와 일치하는 것이다.

III. 실험방법

본 실험에 사용한 알루미늄 합금시편 으로서는 직경 42mm, 51mm, 63mm 및 75mm인 봉재를 길이가 직경의 3배 이상이 되도록 절단하여 사용하였고 합금의 종류로는 2024 알루미늄 합금과 7075 일류

표 2. 고장력 알루미늄 합금의 화학성질⁽¹²⁾

종류 \ 성분	Cu	Mg	Zn	Mn	Cr	Ti	Fe	Si
2024	3.8—4.9	1.2—1.8	0.25	0.70	0.10	—	0.50	0.50
7075	1.2—2.0	2.1—2.9	5.1—6.1	0.30	0.18—0.40	0.20	0.70	0.50

비닐 합금 두가지 종류를 사용하였으며 표2에는 이들 합금재료의 화학성분을 도시하였다.

1. 열처리

직경 42mm 63mm 75mm인 7075 알루미늄 합금봉을 길이가 직경의 3배가 되도록 견단하여 표3과 같이 열처리 하였다

이 실험은 재료의 굵기에 따라 용체화 처리로 인한 잔류응력의 크기가 어떻게 변화하는가를 알아보고 재료의 굵기에 따라 잔류응력 제거효율이 얼마나 달라지는가를 알아보기 위함이다. 또한 재료의 굵기에 따라 역 잔류응력이 얼마나 형성되는가를 알아보기 위하여 합금봉 시편을 풀림 처리한 후 uphill quench 실험도 병행하였다.

표3의 하단에는 열처리한 시편의 기호를 표시한 것으로 재료의 종류, 직경의 크기 및 열처리 방법의 순서로 기호를 표시하였다.

열처리 기호는 U를 제외하고 모두 Alcoa 규격

을 따라 표기하였고 U는 87°C trichloroethylene에 uphill quench 하였음을 뜻하고 W는 용체화 처리, W10은 용체화 처리후 10일만에 응력을 분석한 것이며 WO-U는 용체화 처리후 즉시 uphill quench 하였음을 뜻한다.

직경 42mm, 51mm, 75mm인 2024 알루미늄 합금봉을 길이가 직경의 3배가 되도록 견단하여 표4와 같이 열처리하였다.

직경 42mm와 75mm 2024 알루미늄 합금봉을 열처리하여 재료의 굵기와 합금의 종류(7075 알루미늄 합금과 비교)에 따라 잔류응력의 크기와 잔류응력 제거효율이 어떻게 달라지는가를 실험하였다.

직경 51mm 2024 알루미늄 합금봉을 열처리하여 용체화처리 후 uphill quench 하기 전에 시편을 내기 중에 방치하여 둔 시간이 uphill quench에 의한 잔류응력 제거효율에 미치는 영향을 실험하였으며 아울러 인공 시효처리가 잔류응력 제거에 미치는 영향도 실험하였다.

표 3. 7075 알루미늄 합금봉의 열처리

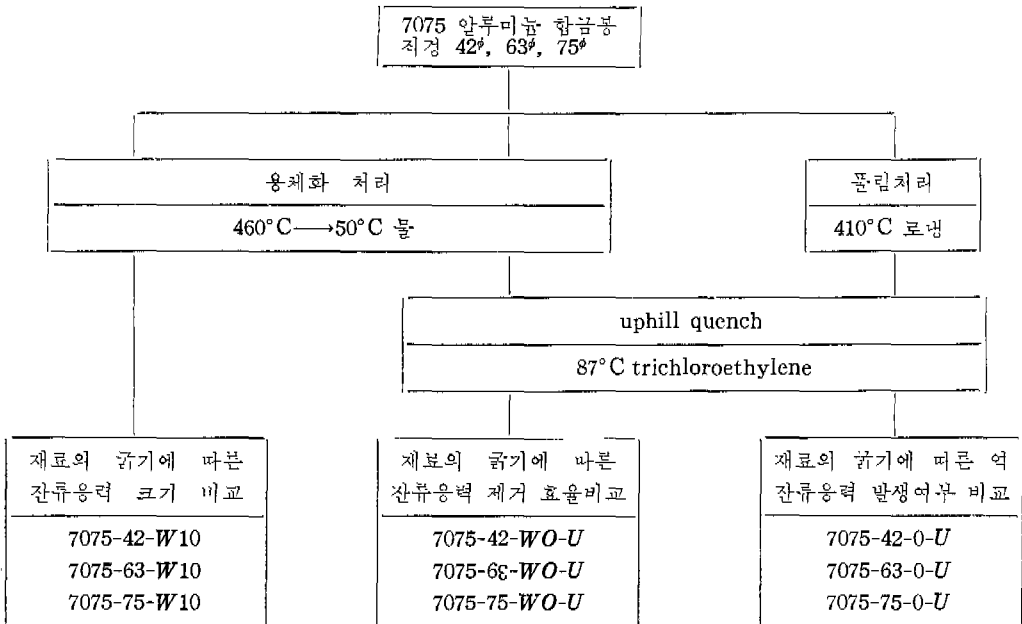
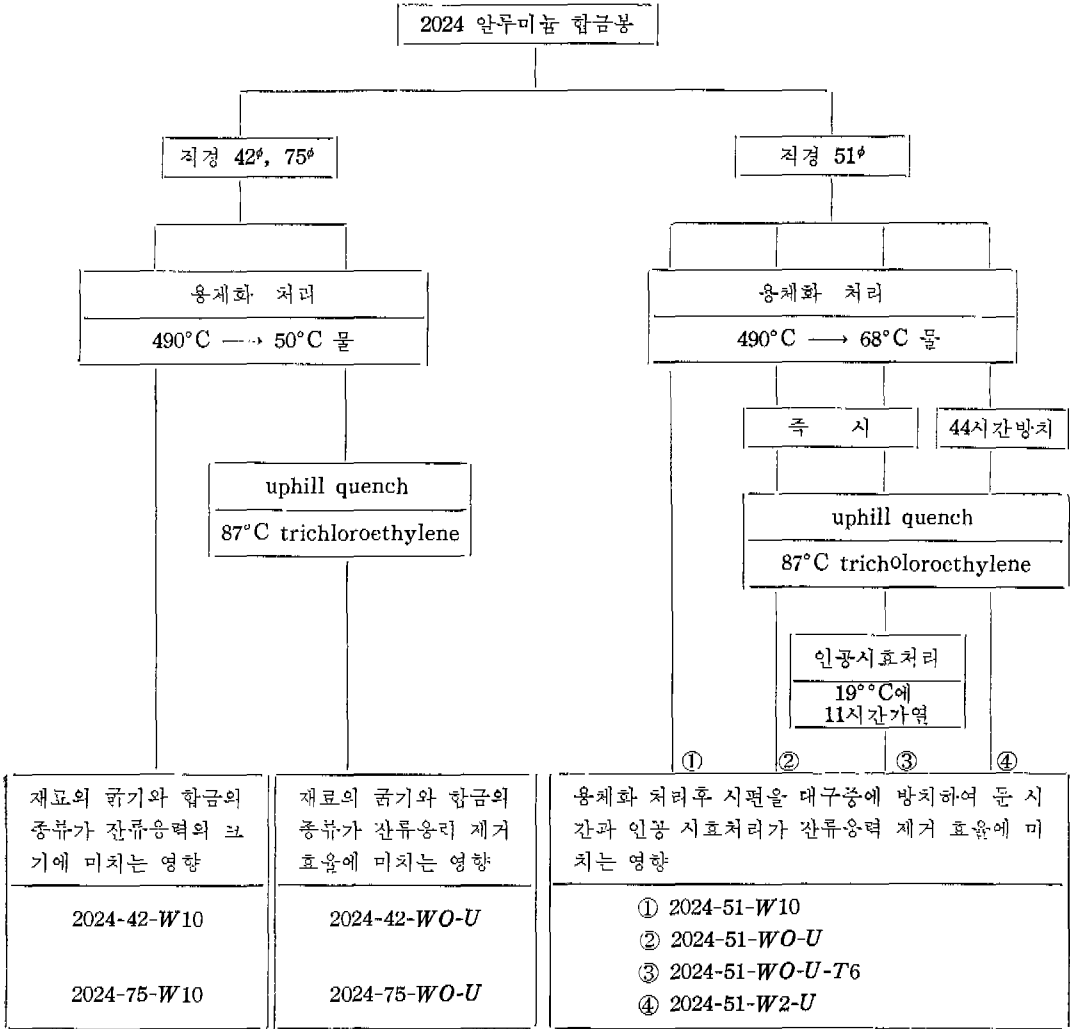


표 4. 2024 알루미늄 합금봉의 열처리



2. 잔류응력의 측정

잔류응력 측정은 Sachs 증공법을 채택하였다. 이것은 원주형 시편의 중심으로부터 종체적의 10% 정도씩 단계적으로 재료를 제거(boring out)하여 나갈 때 길이와 직경의 변화를 스트레인 게이지(strain gauge)로 측정하므로써 다음 식에 의하여 잔류응력을 계산하는 방법이다.

$$\sigma_L = \frac{E}{1-\nu^2} \left[(A_0 - A) \frac{d\lambda}{dA} - \lambda \right]$$

$$\sigma_T = \frac{E}{1-\nu^2} \left[(A_0 - A) \frac{d\theta}{dA} - \frac{A_0 + A}{2A} \theta \right]$$

$$\sigma_R = \frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{(A_0 - A)}{2A} \right] \theta$$

$$\lambda = e_L + \nu e_T$$

$$\theta = e_T + \nu e_L \tag{1}$$

여기서 $\sigma_L, \sigma_T, \sigma_R$ 는 각각 세로, 가로, 반지름 방향의 응력이고 A_0 는 시편의 보오링전 종단면적 이고 A 는 보오링 종단면적이다. e_L 는 가로 변형율이고 e_T 는 세로 변형율 이며 ν 와 E 는 포와슨비 및 탄성계수로서 ν 는 0.33, E 는 7300kg/mm²이다.

변형율은 길이 1cm 저항 120Ω 게이지정수(gauge factor) 2.02인 스트레인 게이지(strain gauge)를 봉재표면에 길이 방향으로 3개 둘레방향으로 3개씩 부착하여 재료를 서당량 만큼씩 증공(bering)할 때 마다 재료 표면에서 변화하는 변형량(strain)을 정

적인 변형을 지시계(strain indictor)를 사용하여 측정하였다.

봉재의 평면을 미세한 연마지(sand paper)로 깨끗하게 연마한 후 시편 표면에 붙어있는 오일물질을 아세톤(acetone)으로 씻어내고 여기에 스트레인 게이지를 접착 네이프로 단단히 시편 표면에 고정한 후 초강력 접착제인 α -acrylate(상표명 aron- α)계의 접착제를 삼두압에 의하여 시편표면과 스트레인 게이지 사이에 침투하도록 하여 스트레인 게이지를 부착하였다.

스트레인 게이지 부착후 24시간 후에 여러가지 색깔의 전선은 스트레인 게이지에 납땀하고 전기도선에 의하여 스트레인 게이지가 손상되지 않도록 에폭시 절착제로서 도선을 시편표면에 단단히 부착하였다. 스트레인 지시계에 전기도선 연결은 12개 채널이 부착된 저항상자를 사용 하였으며 터미 게이지(dummy gauge)로는 120 Ω 저항상자 대신에 불립치리한 시편에 6개의 스트레인 게이지를 부착하여 사용하였다. 이것은 동일 재료의 표면에 부착한 게이지를 비끼 게이지로 사용하므로써 실험실 기온의 변화에 대한 오차를 줄이기 위함이었다. 스트레인 지시계는 220V용을 사용하였고 스트레인 측정은 지시계에 전기를 공급한 후 한시간 뒤에 시행하였다. 전원의 진압변화와 전류변화가 심하여 지시계의 정점이 권기될 때에는 작업을 중단하고 전원이 안정된 때까지 기다린 후 측정하였으며 전압은 변압기를 사용하여 일정하도록 하였다.

시편의 중공작업은 주로 밀링기(milling machine)에서 시행하였고 밀링기에 중공 작업용 봉이 없거나 시 초기 구멍은 선반을 이용하여 작업하였고 나머지 중공작업은 스트레인 게이지에 무리가 가지 않도록 밀링기에서 파이롯트 봉(중공용 천장봉)을 이용하여 작업하였다.

파이롯트 봉은 구멍의 크기에 따라 여러가지를 만들었고 파이롯트 봉의 한쪽 끝에는 밀링기에 고정할 나사를 만들고 한쪽 끝에는 구멍크기와 거의 같은 헤드(head)를 만들어 고정하였다.

파이롯트 봉의 헤드 바로 밑에 중공용 절삭날을 볼트로 고정하였고 헤드에는 구멍을 뚫어 절삭작업시 절삭용 오일이 시편 구멍을 통과하여 계속 흘러나가게 하므로써 작업중 시편이 과열되는 것을 방지하였다. 스트레인 게이지가 부착된 시편을 밀링기 위에 설치된 V-block에 얹어 놓은 후 스트레인

게이지에 연결된 도선(lead wire)을 저항상자와 스트레인 지시계에 연결하고 스트레인 지시계의 정각(apex angle)을 보정하고 저항상자의 저항을 조절하여 active gauge와 dummy gauge 사이의 저항 평형을 조정한 후 시편을 V-block에 고정하여 중공작업을 시행하였다. 중공작업시 절삭날의 회전속도는 100~200r. p. m으로 하였고 중공작업시 냉각용 절삭 오일을 계속 흘려주어 시편의 과열을 방지하였으며 중공 작업이 끝난 후 계속 시편을 냉각하여 상온이 되도록 한 후 V-block에 고정된 나사를 풀어 변형량을 측정하였다.

Ⅶ. 실험결과 및 검토

직경 42mm, 63mm, 75mm 7075 알루미늄 합금 봉을 열처리한 시편의 중공면적(A)에 대한 변형을(λ 와 θ) 변화를 그림1, 그림2, 그림3에 표기하였으며 이 그림 으로부터 각 시편의 잔류응력을 계산하여 그림4 에서 그림9 까지 표기 하였다.

λ 와 θ 는 식 (1)에 주어진 바와 같이 길이 방향의 스트레인(strain)과 세로 방향의 스트레인에 포와손비(ν)만큼 보정한 스트레인을 뜻하는 것으로 길이 방향의 스트레인(e_L)과 세로 방향의 스트레인(e_T)은 봉재표면에 부착한 스트레인 게이지에 직접 측정되는 스트레인이다.

σ_L 은 길이 방향의 응력이고 σ_T 는 세로 방향의 응력이며 σ_R 는 반지름 방향의 응력이다. σ_0 는 이들 응력으로부터 계산된 원주응력 성분으로서 재료를 소성변형시키는데 참여하는 응력이다.⁽¹³⁾

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_L - \sigma_T)^2 + \sigma_T - \sigma_R)^2 + (\sigma_R - \sigma_L)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

본 실험에서는 σ_0 의 크기를 비교하여 가공경화가 일어난 정도를 나타냈다. 그림10 에는 잔류응력이 존재하는 시편을 uphill quench 하였을 때 잔류응력이 제거되는 요율을 비교하기 위하여 σ_R 값을 비교하여 표기하였다. 그림 11과 그림 12는 직경 42mm, 75mm 2024 알루미늄 합금봉을 열처리한 시편의 중공면적(A)에 대한 변형을(λ 와 θ) 변화를 표기하였고, 이 그림으로부터 잔류응력을 계산하여 그림13 에서 그림16 까지 표기하였다. 그림17 에서 그림20 까지는 직경 51mm 2024 알루미늄 합금봉을 열처리 한 시편의 잔류응력을 표기한 것이며 그림 21은 이들 잔류응력의 크기를 비교하기 위하여 잔류

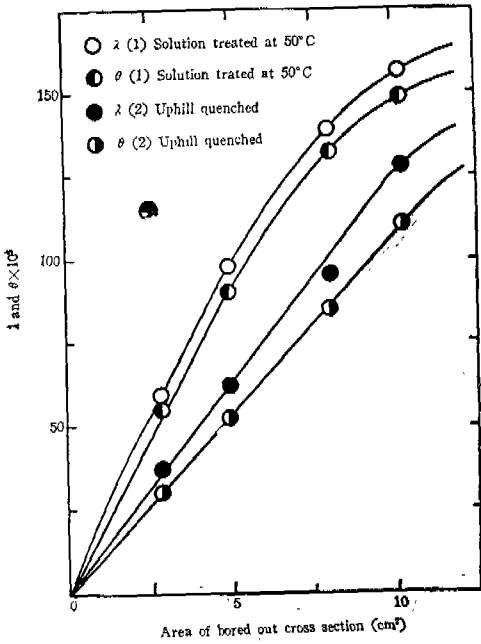


Fig. 1 Strain/cross section curves of the aluminum alloy rods, dia 42mm.

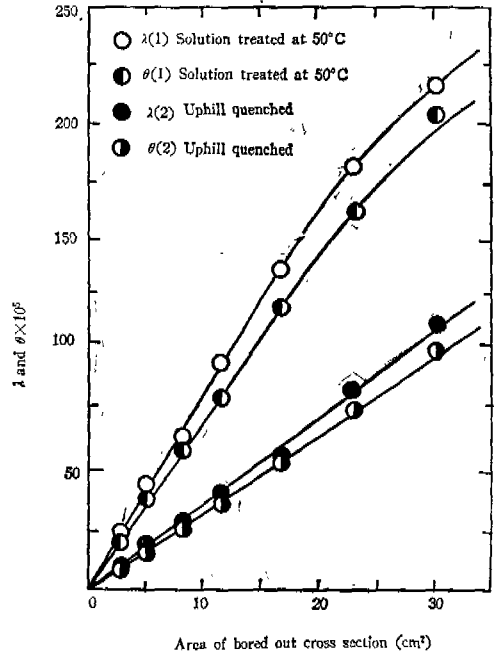


Fig. 3 Strain/cross section curves of the aluminum alloy rods, dia. 75mm.

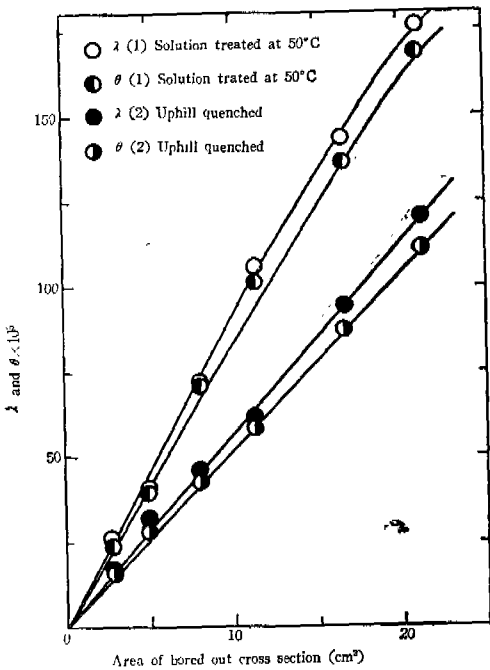


Fig. 2 Strain/cross section curves of the aluminum alloy rods, dia. 63mm.

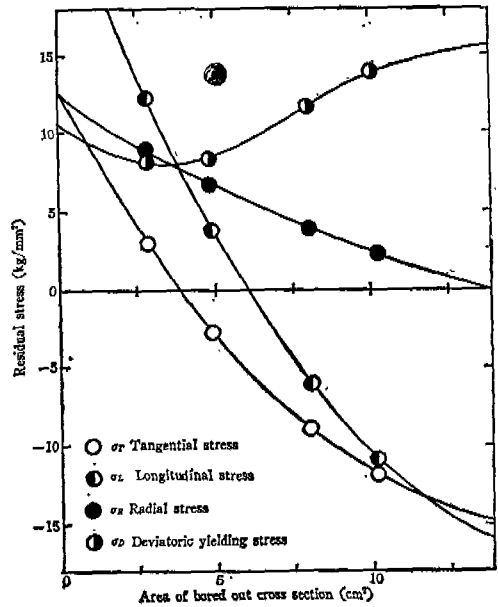


Fig. 4 Residual stress of solution treated 7075 aluminum alloy rod, dia. 42mm.

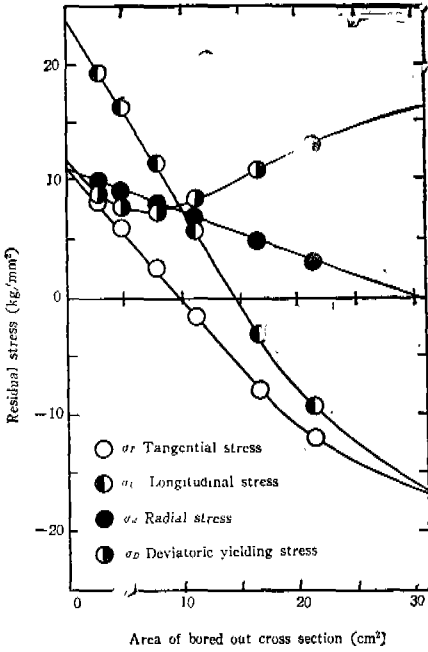


Fig.5 Residual stress of solution treated 7075 aluminum alloy rod, dia. 63mm.

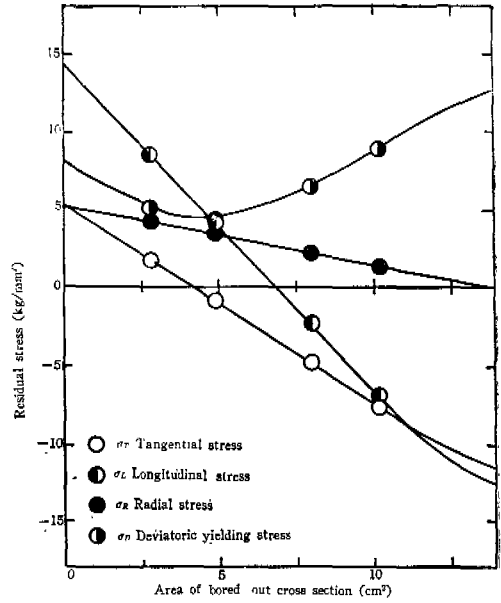


Fig.7 Residual stress of uphill quenched 7075 aluminum alloy rod, dia. 42mm.

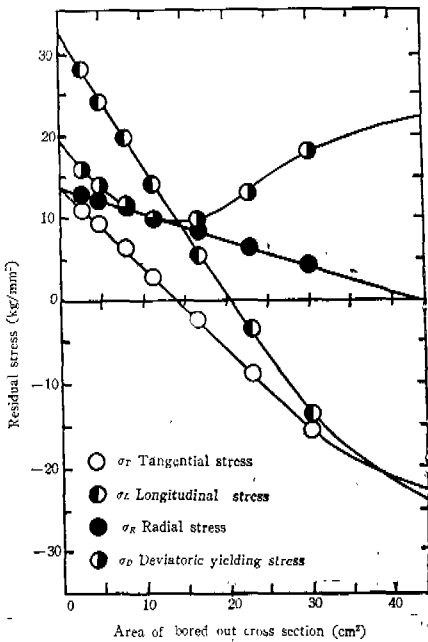


Fig.6 Residual stress of solution treated 7075 aluminum alloy rod, dia. 75mm.

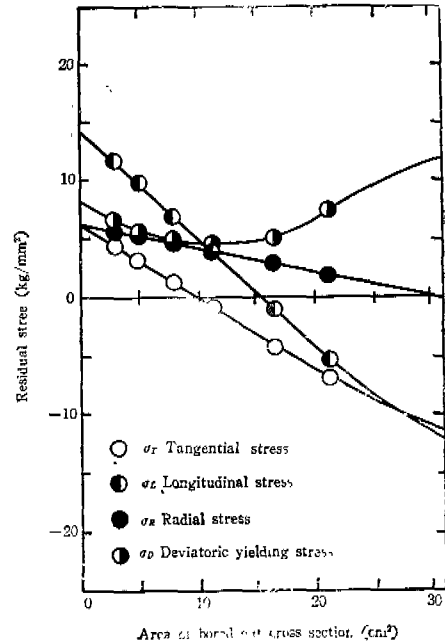


Fig.8 Residual stress of uphill quenched 7075 aluminum alloy rod, dia. 63mm.

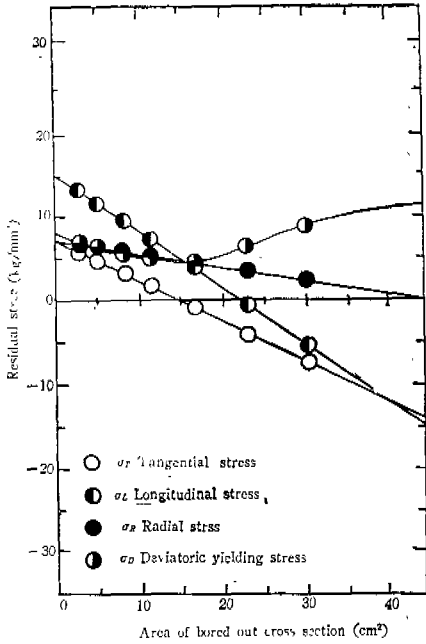


Fig. 9 Residual stress of uphill quenched 7075 aluminum alloy rod, dia. 75mm.

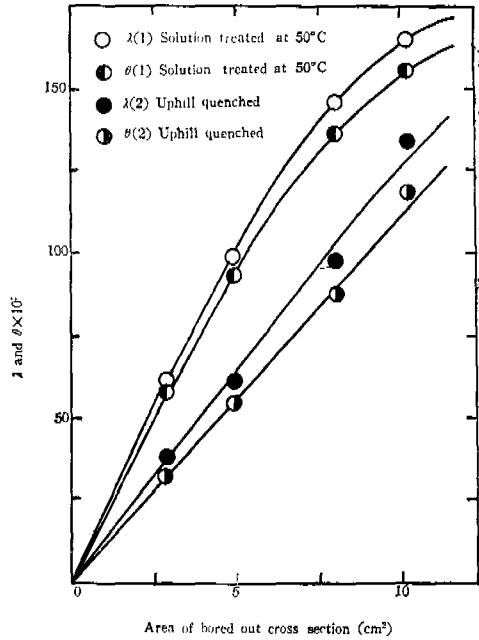


Fig. 11 Strain/cross section curves of the 2024 aluminum alloy rods, dia. 42mm.

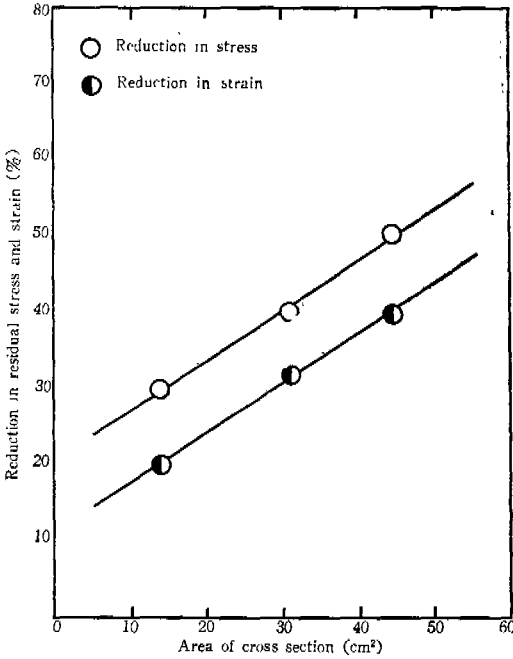


Fig. 10 Effect of aluminum alloy rod size on the reduction in residual stress and strain.

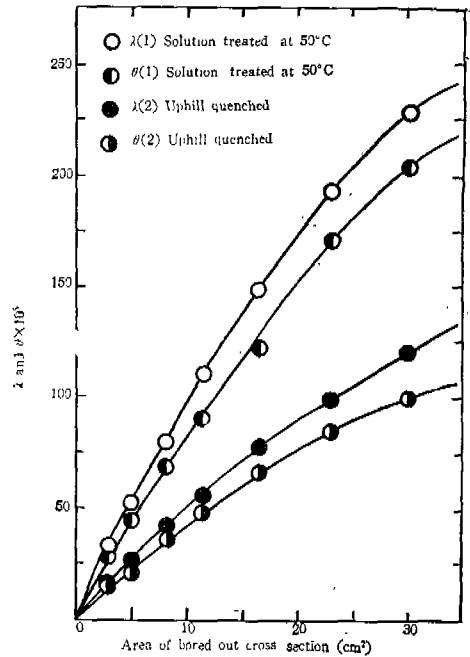


Fig. 12 Strain/cross section curves of the 2024 aluminum alloy rods, dia. 75mm.

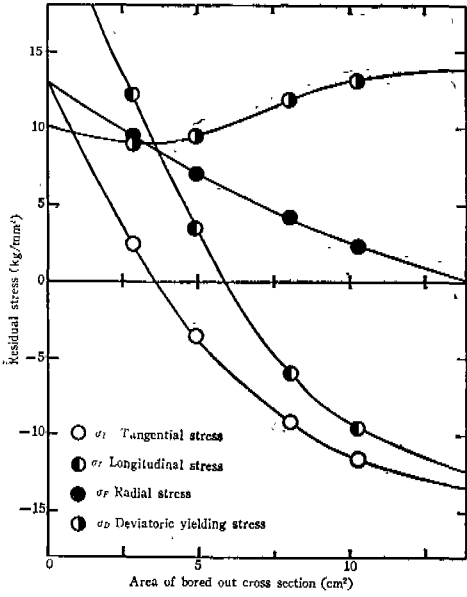


Fig. 13 Residual stress of solution treated 2024 aluminum alloy rod, dia. 42mm.

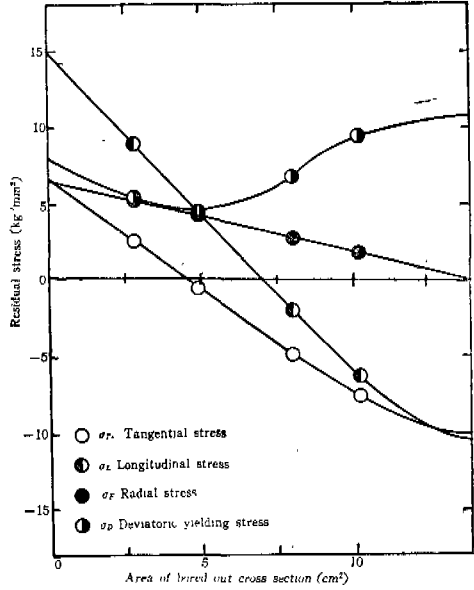


Fig. 15 Residual stress of uphill quenched 2024 aluminum alloy rod, dia. 42mm.

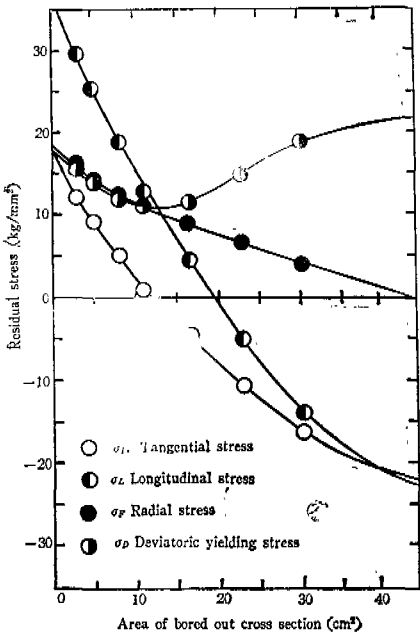


Fig. 14 Residual stress of solution treated 2024 aluminum alloy rod, dia. 75mm.

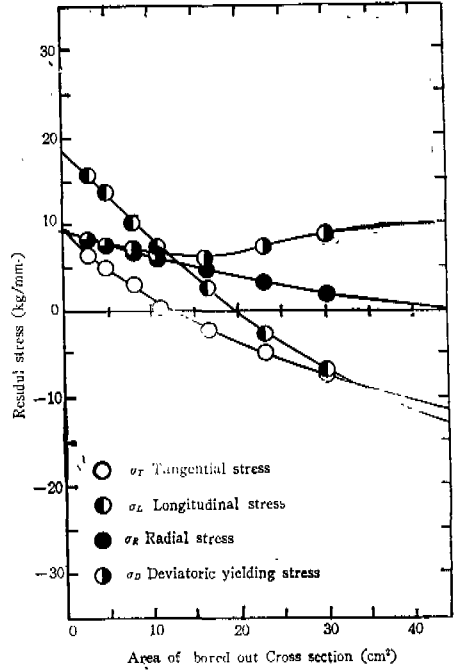


Fig. 16 Residual stress of uphill quenched 2024 aluminum alloy rod, dia. 75mm.

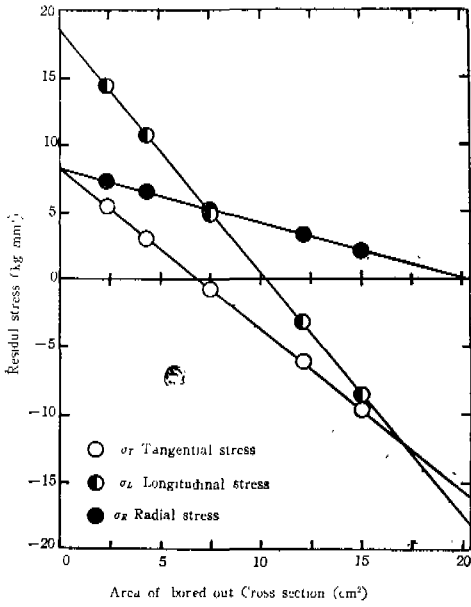


Fig. 17 Residual quenching stress of 2024 aluminum alloy rod, dia. 51mm.

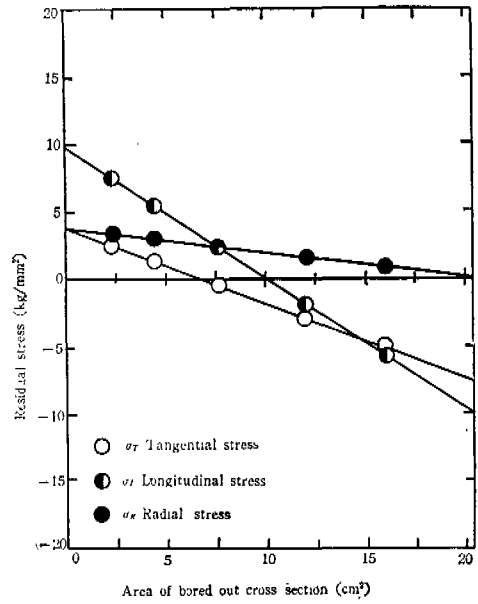


Fig. 19 Residual stress of 2024 aluminum alloy rod uphill quenched within 1 hour after quenching, dia. 51mm.

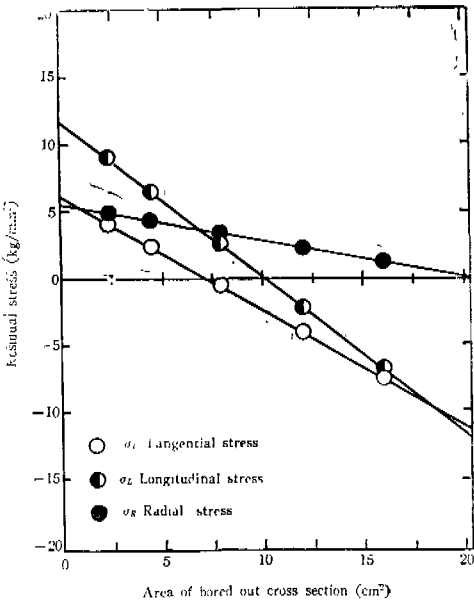


Fig. 18 Residual stress of 2024 aluminum alloy rod uphill quenched at 44 hours after quenching, dia. 51mm.

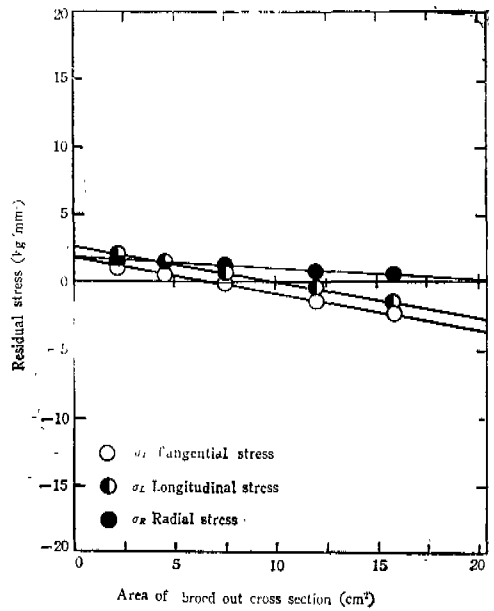


Fig. 20 Residual stress of 2024 aluminum alloy rod aged to T6 temper after uphill quench, dia. 51mm.

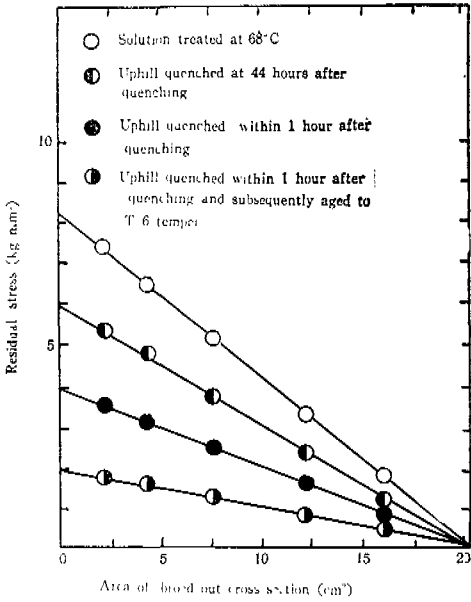


Fig.21 Radial residual stress of 2024 aluminum alloy rods, dia. 51mm.

응력 성분중 반지름 방향의 응력성분을 표기한 것이다.

반경향으로부터 잔류응력을 계산할 때 시편 표면과 중심의 잔류응력은 외삽법에 의하여 결정한 것으로 이것은 Boley와 Bruno⁽¹⁴⁾의 열응력 이론과 잘 일치하는 것이다.

1. 재료의 굽기가 잔류응력의 크기에 미치는 영향

용체화 처리한 직경 42mm, 63mm, 75mm 7075 알루미늄 합금봉을 70% boring 하였을 때 변형률 크기는 직경이 클수록 크다는 것을 그림 1, 그림 2 그림 3 으로부터 명백하게 알 수 있다. 그림 4는 7075-42-W10 시편의 잔류응력을 보인 것이고 그림 5는 7075-63-W10 시편의 잔류응력을 보인 것으로 이 두 시편의 잔류응력(σ_R)은 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

그러나 7075-63-W10 시편의 잔류응력이 7075-42-W10 시편의 잔류응력보다 약간 큰 편이며 그림 6은 7075-75-W10 시편의 잔류응력을 보인 것으로

7075-42-W10과 7075-63-W10의 잔류응력보다 훨씬 크게 나타났다.

전반적으로 직경이 커질수록 용체화 처리한 시편의 잔류응력이 증가하는 경향 이었다. 이들 시편은 모두 45~50°C 수중에 규냉한 것으로 잔류응력의 편차응력은 용체화 처리한 즉시 재료의 항복응력 (8kg/mm²) 값보다 상당히 큰 것으로 밝혀졌다.

이것은 용체화 처리시 재료가 소성변형되어 가공경화현상이 일어났음을 시사하는 것이다. 이와 같은 가공경화현상은 재료의 잔류응력 제거를 어렵게 하는 것으로 생각된다.

2. 재료의 굽기가 잔류응력 제거 효율에 미치는 영향

그림 7, 그림 8, 그림 9는 7075-42-WO-U, 7075-63-WO-U 및 7075-75-WO-U 시편의 잔류응력은 보인 것으로 이들 잔류응력의 편차응력(σ_0) 크기는 크게 차이가 없다. 이것은 일체비 조건이 일정할 때 재료의 굽기에 무관하게 uphill quench에 의한 잔류응력 제거의 한계점을 보인 것으로 생각된다.

그러나 잔류응력 제거효율은 σ_R 를 기준으로 하여 비교하여 보면 7075-42-WO-U는 7075-42-W10보다 잔류응력이 약 30% 저하된 것이고 7075-63-WO-U는 7075-63-W10보다 잔류응력이 약 40% 저하된 것 이면 7075-75-WO-U는 7075-75-W10보다 잔류응력이 약 50% 이상 저하된 것이었다.

그림 1, 그림 2, 그림 3 으로부터 중공번식(A) 70%를 기준으로 하여 uphill quench에 의한 변형을 감소를 계산하여 보면 재료의 직경이 커질수록 변형을 저하도 크게 된다는 것을 알 수 있다.

그림 10은 uphill quench에 의한 잔류응력 감소와 변형을 감소를 합금봉의 단면적(A_0) 크기에 따라 표기한 것이다.

따라서 재료의 굽기가 클수록 열처리시 재료의 중심과 표면의 온도차이가 효과적으로 크게 되어 용체화 처리로 인한 잔류응력도 커지며 uphill quench에 의한 잔류응력제거 효율도 크게 된다고 할 수 있다.

3. 합금의 종류가 잔류응력의 크기와 잔류응력 제거 효율에 미치는 영향

그림 13은 2024-42-W10 시편의 잔류응력을 보인

것이고 그림14는 2024-75-W10 시편의 잔류응력을 보인 것이다.

2024-42-W10 시편의 잔류응력은 7075-42-W10 시편의 잔류응력과 거의 같고 2024-75-W10 시편의 잔류응력은 7075-75-W10 시편의 잔류응력과 거의 같다.

따라서 용체화 처리로 인한 2024 알루미늄 합금과 7075 알루미늄 합금의 잔류응력은 같은 것으로서 고장력 알루미늄 합금의 잔류응력은 합금의 종류에는 크게 영향을 받지 않는다고 할 수 있다.

2024-75-W10 시편의 잔류응력은 2024-42-W10 시편의 잔류응력보다 훨씬 큰 것으로 재료의 굵기가 커져 용체화 처리로 인한 잔류응력이 커진 것이다.

그림15는 2024-42-WO-U 시편의 잔류응력이고 그림16은 2024-75-WO-U 시편의 잔류응력을 보인 것이다.

2024-42-WO-U 시편의 잔류응력은 7075-42-WO-U 시편의 잔류응력과 거의 같고 2024-75-WO-U 시편의 잔류응력은 7075-75-WO-U 시편의 잔류응력과 거의 같다.

따라서 잔류응력 제거 효율도 합금의 종류에 크게 영향을 받지 않았다.

4. 시편을 uphill quench 전에 용체화 처리하여 대기중에 방치한 시간의 영향

용체화 처리 후 시편을 대기중에 방치하는 시간이 길게 되면 재료내부의 전위 사이에 불순물 원자나 합금 원소가 확산하여 들이와 전위의 이동이 매우 어렵게 되어 uphill quench 하여도 전위가 잘 이동하지 않아 잔류응력이 잘 제거되지 않을 것이다.

잔류응력 제거 효율을 높이고 용체화처리 온도에 따른 잔류응력 제거 효율을 비교 검토하기 위하여 직경 51mm 2024 알루미늄 합금을 490°C에 가열하고 68°C 수중에 냉각하여 용체화처리 하였다.

그림17은 2024-51-W10 시편의 잔류응력이다. 그림18은 2024-51-W2-U 시편의 잔류응력이며, 그림19는 2024-51-WO-U 시편의 잔류응력이다.

2024-51-W2-U 시편의 잔류응력은 2024-51-W10 시편의 잔류응력보다 약 25% 작은 것이고 2024-51-WO-U 시편의 잔류응력은 2024-51-W10에 비교하면 약 50% 낮은 것이다.

따라서 용체화처리 후 시편을 대기중에 방치하여

문 시간이 길게 되면 uphill quench에 의한 잔류응력 제거 효율이 크게 감소하는 것이다. 그러므로 uphill quench에 의하여 잔류응력을 제거하려면 재료내부의 전위의 이동이 수월하여 전위반응에 의한 가공경화 성분이 해소되고 반대부호의 전위 생성으로 인한 전위 농도의 부분적인 감소가 잘 일어나야 거시적 잔류응력의 제거가 쉽게 된다고 할 수 있다

5. 인공시효처리가 잔류응력 제거에 미치는 영향

용체화 처리한 알루미늄 합금재료는 공공(vacancy)의 농도가 높기 때문에 100~200°C로 장시간 가열하면 재료 내부에 있는 원자가 확산하여 전위 농도가 일부 감소하고 전위 사이에 작용하는 미시적 잔류응력이 최저로 된다. 이와 같은 미시적 잔류응력의 감소는 거시적 잔류응력에 영향을 주는 미시적 잔류응력이 거의 없어지므로 거시적 잔류응력도 감소시킨다. 그림20은 2024-51-WO-U-T6 시편의 잔류응력을 보인 것으로 용체화 처리한 시편을 즉시 uphill quench하고 190°C에서 11시간 가열하여 잔류응력을 80%까지 제거한 것이다.

이것을 uphill quench에 의하여 용체화 처리시 발생한 전위반응(가공경화)을 해소하므로써 거시적 잔류응력을 감소시키고 인공시효처리를 하므로써 미시적 잔류응력을 제거하여 거시적 잔류응력은 더욱 감소시킨 것이다. 그림 21은 잔류응력 제거에 영향을 주는 사상과 같은 요소들을 비교하기 위하여 2024-51-W10, 2024-51-W2-U, 2024-51-WO-U, 및 2024-51-WO-U-T6 시편의 반지름 방향의 응력을 표시한 것이다.

6. 용체화 처리시 냉각수 온도

용체화 처리시 냉각수 온도가 낮아지면 용체화 처리로 인한 잔류응력이 커지며 잔류응력 제거효과는 낮아진다. 이미 발표되었던 실험치⁽¹²⁾와 본실험의 결과로부터 냉각수 온도에 따른 잔류응력의 크기와 잔류응력 제거 효율을 계산하여 보면 표 5에 표시한 바와 같다.

표5에 표시한 잔류응력 제거효율은 인공시효 처리를 하지 않고 uphill quench만 시행한 시편의 잔류응력 제거 효과이다.

표 5. 반지름 방향의 최대잔류응력과 잔류응력 제거효율

냉각수온도(°C)	20	50	68
잔류응력(kg/mm ²)	12.1	10.2	7.8
잔류응력제거효율(%)	20	40	50

7. trichloroethylene에 의한 시편 가열효과

7075-42-0-U, 7075-63-0-U 및 7075-75-0-U 시편의 잔류응력 분석결과 여잔류응력의 발생은 매우 미소한 것이었다. 따라서 trichloroethylene에 의한 시편 가열효과는 고온 고압 수증기의 시편 가열 효과에 미치지 못한 것이라 사료된다.

V. 결 론

시효경화성 알루미늄 합금재료를 용체화처리 하였을 때 발생한 잔류응력의 크기는 시편의 굵기, 냉각수 온도에 따라 달라졌고 uphill quench와 시효 처리에 의한 잔류응력 제거효율도 시편의 굵기, 냉각수온도 및 용체화처리후 대기중에 방치하여 놓는 시간에 따라 달라졌으며 이상과 같은 결과를 정리하면 아래와 같다.

1. 시편의 크기가 증가하면 용체화 처리로 인한 잔류응력의 크기가 증가한다.
2. 시편의 크기가 증가하면 uphill quench에 의한 잔류응력 제거효율이 증가한다.
3. 용체화 처리와 uphill quench 작업 사이의 시간 간격이 커지면 uphill quench에 의한 잔류응력 제거효율이 감소한다.
4. uphill quench와 인공시효 처리를 병행하여야 잔류응력을 가장 효과적으로 제거할 수 있다.
5. 용체화 처리시 냉각수 온도가 낮아지면 잔류응력의 크기가 증가한다.
6. 크기가 같은 시편에 있어서 잔류응력이 큰 시편은 잔류응력이 작은 시편보다 잔류응력의 제거효율이 낮다.

후 기

본 논문은 문교부 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 본논문이 출판될 수 있도록 지원하여 주신 울산공대 이관 학장님 이하 여러 교수께 감사하며 본 논문을 끝까지 잘 심사하여 주신 나상관박사님과 주영우 교수님께 특히 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. H.N. Hill, R.S. Barker and L.A. Willey: "The Thermomechanical Method for Relieving Residual Quenching Stresses in Aluminum Alloys", ASM. 52(1960) p. 657-674.
2. 이동녕, 김홍식: "2024 알루미늄 합금의 잔류응력 제거", 금속학회지, 16, 4 (1978) p. 233-242
3. G.A. Hawkes: "The Measurement of Surface Residual Stress by X-rays", British Journal of Applied Physics, 8 (1957) p. 229-232.
4. 이동녕, "금속가공학" 문운당(1977) p. 125-134
5. G. Sachs: "The Determination of Residual Quenching Stresses in Rods and Tubes", Zeits. Metallkunde. 19(1927) p. 352
6. G. Sachs and G. Espy: "The Measurement of Residual Stresses in Metals", Iron Age. 148(1941) p. 63-71
7. G. Sachs and G. Espy: "Residual Stress in Sunk Cartridge-brass Tubing", Trans AIME, 147 (1942) p. 74-88
8. J. Nutting, M.A.P. Dewey: "Heat Treat Treatment of Non-ferrous Alloys", The Iron and Institute, London (1966) p. 34
9. R.A. Dodd: "Some Observations on the Determination of Residual Stresses in Cylindrical Metal Bodes by Sachs' Boring Method", Metallurgia 45 (1952) p. 109-114.
10. Handbook of Physics and Chemistry(1968-1969)
11. H.S. Carslaw and J.C. Jaeger: "Conduction of Heat in Solids", Oxford University Press (1973) p. 88, p. 199-200
12. Alcoa Aluminum Handbook (1962). Alcoa Aluminum Company.
13. George E. Dieter: "Mechanical Metallurgy", Mc Graw-Hill Book Company(1976) p. 80
14. Boley, Bruno A: "Theory of Thermal stresses", John Wiley and Sons (1960)p. 566-569