

Sachs' Boring Method에 의한 2024알루미늄 합금봉의 잔류응력 측정

김 홍 식
材 料 工 學 科

〈요 약〉

Sachs' Boring Method에 의하여 2024 알루미늄 합금봉의 잔류응력을 측정 한 결과 Boring 면적 (A)에 대한 변형률(θ 또는 λ) 곡선의 기울기($\frac{d\theta}{dA}$ 또는 $\frac{d\lambda}{dA}$)에는 감소, 일정 그리고 증가하는 것등 3가지가 관찰되었다. 이 기울기는 열처리 조건에 의하여 결정되는 것으로 잔류응력이 낮은 경우 이 기울기는 일정하였다.

변형률 측정 오차는 잔류응력이 낮은 2024 합금봉의 3차원 응력해석이 불가능 할 만큼 크지는 않았다.

Determination of Residual Stresses in 2024 Aluminum Alloys by Sachs' Boring Method

Heung-Shik Kim
Dept of Materials Engineering

〈Abstract〉

Three patterns of strain (θ or λ) versus boring cross section (A) curves are observed on the determination of residual quenching stresses in 2024 Aluminum alloy bars by Sachs' boring Method.

The differentials $\frac{d\theta}{dA}$ and $\frac{d\lambda}{dA}$ of strain versus cross section curves are gradually decreasing, constant or gradually increasing.

The differentials $\frac{d\theta}{dA}$ and $\frac{d\lambda}{dA}$ of partly relieved residual quenching stresses in 2024 Aluminum alloy bars are constant.

The errors in measured strain are not so great that three dimensional analysis of partly relieved quenching stresses in 2024 Aluminum alloy bars are possible.

I. 서 론

금속 재료 내부의 잔류응력을 측정하는 방법에는 X-ray method⁽¹⁾, Sachs' boring method⁽²⁾ 및 기타 기계적인 방법⁽³⁾들이 있으나 봉재시편의 3차원 응력을 해석하는 방법으로서의 Sachs' boring method가 가장 적절하다. 잔류응력 측정시에 측정오

차가 크면 잔류응력이 적은 재료의 잔류응력의 크기를 비교하기가 어렵게 된다. 따라서 Sachs' boring method에 의하여 잔류응력을 정밀하게 측정하기 위하여 strain gauge와 밀링기계 및 boring bar를 이용한 실험방법⁽⁴⁾이 있다.

본 실험에서는 Sachs' boring method를 이용하여 측정오차를 최대로 적게 한 상태에서 크기가 다른 많은 잔류 응력을 측정함으로써 잔류응력 제거에 대

한 기반을 마련코자 한다.

알루미늄 합금층을 높은 온도에서 급냉하던 재료 내부와 표면 사이의 온도 차이에 의하여 재료는 열 팽창을 받아 내부와 표면 사이에서 상대적인 스정 변형이 이루어 지게 된다. 이와 같이 스정변형된 재료는 냉각이 끝나면 내부에는 인장응력이 발생하고 표면에는 압축응력이 발생한다.

용기화 시기로 인하여 발생된 잔류응력은 재료를 가열하거나 스정변형 또는 up-hill quenching을 하여주면 일부 또는 전부가 제거된다.

이상과 같이 재료 내부에 저장된 잔류응력을 Sachs' boring method로 측정하려면 길이가 직경의 3배 이상이 되는 시편을 단계적으로 구멍을 뚫어 가면서 strain 변화를 측정하고 boring 면적에 대하여 plot한 후 다음 식으로부터 구하여야 한다.

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

$$\sigma_T = \frac{E}{1-\nu_2} \left[(A_0 - A) \frac{d\theta}{dA} - \left(\frac{A_0 + A}{2A} \right) \theta \right]$$

$$\sigma_R = \frac{E}{1-\nu_2} \left[\frac{A_0 - A}{2A} \right], \theta$$

ν : 포와손비 (0.33)⁽⁶⁾

$$\theta = e_t + \nu \cdot e_l$$

$$\lambda = e_l + \nu \cdot e_t$$

e_t : boring으로 인한 접선 변형을

e_l : boring으로 인한 세로 변형을

E : 탄성계수(7312kg/mm²)⁽⁶⁾

A_0 : 재료의 총단면적(cm²)

A : 재료의 boring 면적(cm²)

II. 실험 방법

1. 시편 준비

직경 51mm, 길이 160mm 되는 2024 알루미늄 합금봉을 준비하여 다음과 같이 열처리 하였다.

- (1) 525°C에 2시간 가열한후 56°C 물에 급냉하고 190°C에서 11시간 가열한 시편
- (2) 용체화 및 T4 처리—제조회사 제품
- (3) 490°C에 2시간 가열한후 65°C물에 급냉한 시편
- (4) 490°C에 2시간 가열한후 65°C 물에 급냉한 시편을 44시간 방치하고 uphill quench하여 190°C에 11시간 가열한 시편
- (5) 490°C에 2시간 가열한 후 65°C물에 급냉한 시편을 즉시 uphill quench한 시편

(6) 490°C에 2시간 가열한후 65°C 물에 급냉한 시편을 즉시 3회 uphill quench한 시편

(7) Full Annealing한 시편

2. Strain gauge 부착

시편은 연다전에 선반에 의하여 중심점을 정확하게 잡아 boring 작업중에 중심으로부터 편심되어 비평형 변형율이 측정되는 것을 방지하였다.

시편 표면은 600번 연마지로 연마한후 아세톤으로 오염 물질을 제거하였다.

시편 표면의 중앙에 길이 1cm되는 strain gauge를 접착 테이프로 고정시키고 α -Acrylate(Aron- α) 접착제를 스며들게 한후 압력을 가하여 접착시켰다.

strain gauge는 10~20°C에 보관시켰고 접착제는 냉장고에 보관한 것을 사용 하였으며 시편 중앙에 세로로 3개 접선 방향으로 3개의 strain gauge를 부착하였다.

strain gauge를 부착한후 curing이 완전히 끝날 때까지 상온에 방치하였다.(72시간 이상) 여기에 도선(lead wire)을 납땀하고 이 도선을 Deucon Epoxy 5분 접착제로 시편 표면에 단단하게 고정 시켰다.

3. Boring 작업

boring 하는 hole의 크기는 17mm, 23.5mm, 31.0mm, 39.0mm 및 45.0mm로 하고 Pilot bar를 이용하여 단계적으로 구멍을 크게 boring 하였다.

boring하는 구멍의 크기는 더 작게하여 실험하여 보았으나 측정오차로 인한 영향도 커지고 작업시간이 많이 소요되어 quenching으로 인한 잔류응력을 측정하기에는 비효과적 이었다.

구멍 1개에 대한 boring 시간은 40분 정도로 하였고 회전속도는 100~200 rpm으로 하였으며 boring 작업이 끝나고 1시간 후에 strain을 측정하였다.

boring 작업중에 얼음으로 냉각된 절삭유를 boring 작업 반대편에서 구멍에 주입 하였고 pilot bar에는 절삭유가 흘러 나오도록 head에 구멍을 1개 만들었다.

4. Strain (e_t , e_l) 측정

시편 표면에서 변화하는 strain을 측정하기 위하여 응력이 완전히 제거된 길이 160mm, 직경 51mm 알루미늄 합금봉 표면에 strain gauge 6개를 부착하여 dummy gauge로 사용 하였다.

boring 작업전에 dummy gauge와 active gauge(측정하려는 시편)를 strain 지시계에 연결하여 st-

rain 지시계의 눈금을 영(zero)에 맞추고 balancing unit와 strain 지시계의 저항을 조건하여 galvanometer가 영(zero)을 지시하도록 하였다.

전원의 스위치를 끄고 시편을 밀링기에 고정 한후 boring을 하였다. boring 작업이 끝나고 1시간 후에 시편 고정나사를 풀어준 상태에서 strain을 측정 하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

1. 잔류 응력이 큰 시편

(1) 525°C에서 56°C 물에 급냉한 시편

boring면적에 대한 변형을 곡선의 기울기가 boring 면적이 증가 할수록 감소하는 현상을 보였고 이 시편을 190°C에 11시간 가열하여 잔류응력은 약간 변화시켜 보아도 동일한 결과(그림 1)를 얻었다.

그림 2는 그림 1에 대한 잔류응력을 계산하여 그린 것으로 재료중심의 인장응력이나 재료표면의 압축응력이 모두 2024-O의 항복응력(7.8kg/mm²) 보다는 크고 인장강도(19kg/mm²) 보다는 적다는 것을 알수있다.

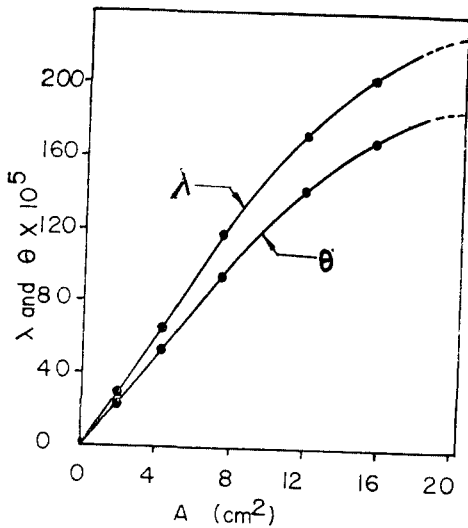


Fig.1 Strain/cross section curves of the specimen, quenched from 525°C in water at 56°C and aged to T-6 temper.

특히 표면의 압축응력은 인장강도에 가까운 값을 가지므로 quenching 조건이 조금 더 급격 해지면 quenching 초기에 표면에 작용하는 인장력은 재료를 파괴 시키기에 충분한 값에 도달할 것이다.

525°C에서 상온에 quenching한 재료 표면에 surface fracture가 형성됨을 실험으로 확인 하였다.

만약 변형을 곡선이 boring 초기와 같은 기울기로 직선적으로 표현 된다면 표면의 압축응력은 재료의 파괴응력 이상이 된 것이다.

따라서 표면의 압축응력이 인장강도 이하가 되면 변형을 곡선의 기울기는 boring 면적에 대하여 감소함수로 표현 되어야할 것은 명백한 일이다.

(2) 제조회사의 시편

대량생산 과정에서 얻은 재료물 시편으로 하여 잔류응력을 측정 한 결과 그림 3 및 그림 4와 같았다.

이 시편은 상온에서 충분히 자연 시효된 재료이고 이 시편의 boring 면적에 대한 변형율의 기울기가 점차 증가함을 보여준다. 현재까지의 응력 분석(4)은 대개 그림 3의 인장응력과 그림 2의 압축응력을 조합한 모양의 곡선을 재료의 잔류응력 상태로 생각

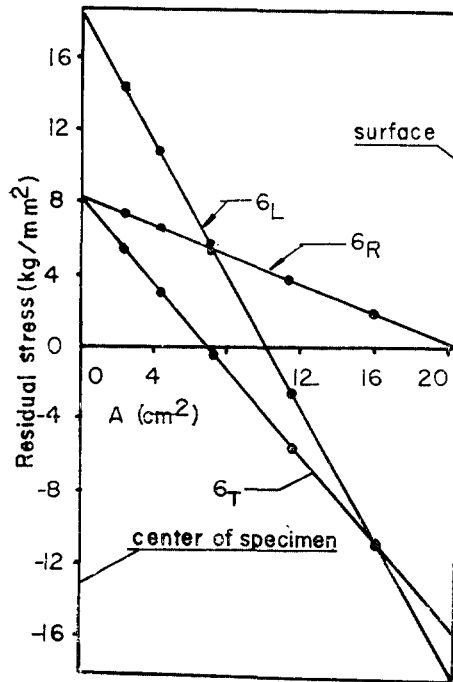


Fig.2 Residual stress of the specimen, quenched from 525°C in water at 56°C and aged to T-6 temper

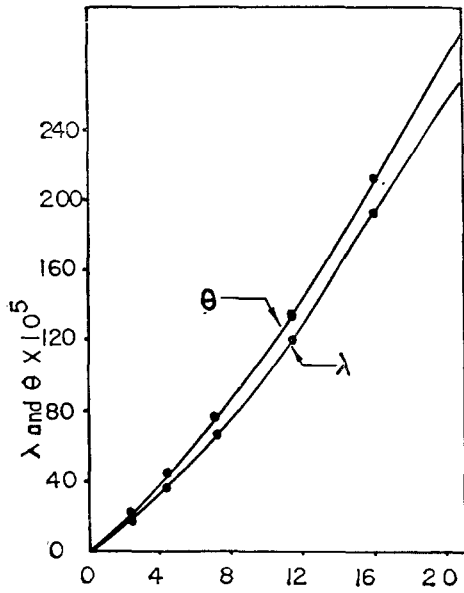


Fig. 3 Strain/cross section curves of the specimen, solution and T-4 treated by maker.

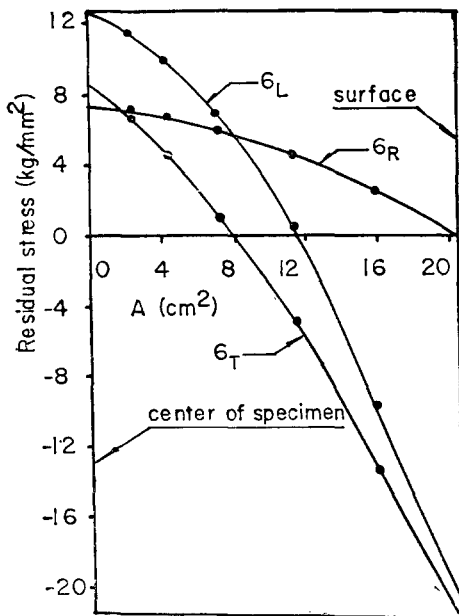


Fig. 4 Residual stress of the specimen, solution and T-4 treated by maker.

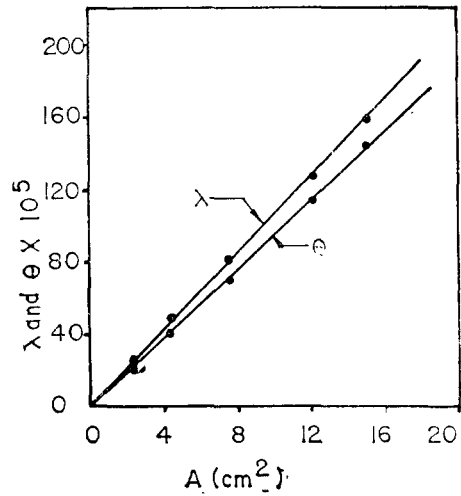


Fig. 5 Strain/cross section curves of the specimen, quenched from 490°C in water at 65°C

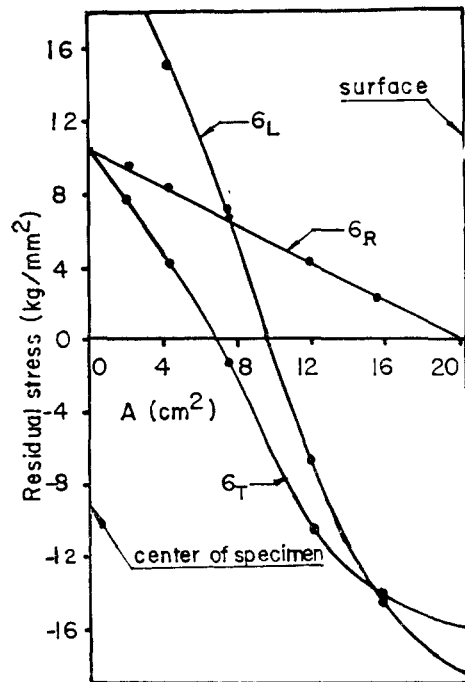


Fig. 6 Residual stress of the specimen, quenched from 490°C in water at 65°C

하여 왔다.

boring 면적에 대한 그러한 잔류응력 곡선을 얻으려면 boring 초기에는 변형을 곡선의 기울기가증

가하고 boring 중간에서 변형점이 있고 boring 말기에는 변형률 곡선의 기울기가 감소하여야 한다.

시편 20개에 대하여 잔류응력을 측정한 결과 그러한 변형률 곡선은 인치 못했다.

그림 4에서 재료중심의 인장응력은 2024-0의 항복강도 보다 낮고 재료 표면의 압축응력은 2024-0의 항복강도 보다는 훨씬 크다는 것을 알수있다.

(3) 490°C에서 65°C물에 용체화 처리한 시편

자연 시효가 충분히 진행되지 못한 상태에서 잔류응력을 측정한 결과를 그림 5와 그림 6에 그렸다. Boring 면적에 대한 변형율은 직선으로 표현되었고 boring 면적에 대한 잔류 응력도 직선으로 표현 되었다.

재료 중심의 인장응력이 항복강도 보다 약간 높고 표면의 압축응력은 항복강도보다 상당히 크다는 것을 알수있다.

측정 오차를 이용하여 그림 3을 보정하면 boring 초기에는 변형율은 직선적으로 변화하고 boring 말기에는 boring 면적에 대한 변형률 곡선의 기울기가

boring 면적에 대하여 감소 할수로서 나타난다. 이것은 그림 1과 유사한 모양의 곡선이 될 것이다.

측정오차를 보정하는 효과는 결과적으로 시편 표면의 압축응력이 그림 6보다는 상당히 작은 값으로 될 것임을 알시하여 준다.

2. 잔류응력이 낮은 시편

그림 7, 그림 8 및 그림 9는 잔류응력이 낮은 경우의 boring 면적에 대한 변형율을 plot한 것이다.

측정오차를 고려하지 않는다면 boring 면적에 대한 변형률 곡선의 기울기는 boring 면적에 대하여 증가할수로 될 것이나 그림 10의 측정오차를 보정하여 주변 boring 면적에 대한 변형율은 모두 직선으로 표현할 수 있을 것이다.

따라서 Sachs' boring method로서 잔류 응력이 높은 재료와 잔류응력이 낮은재료 모두 응력 분석이 가능하였고 이들 잔류응력의 크기에 대하여 서로 비교 검토할 수 있었다.

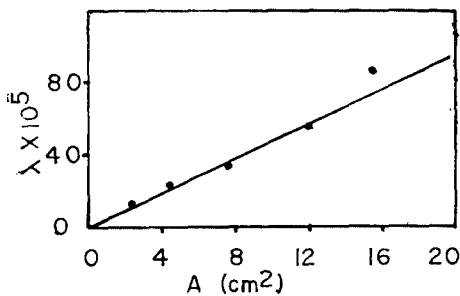


Fig.7 Strain/cross section curves for the specimen, uphill quenched at 44 hours from quenching and aged.

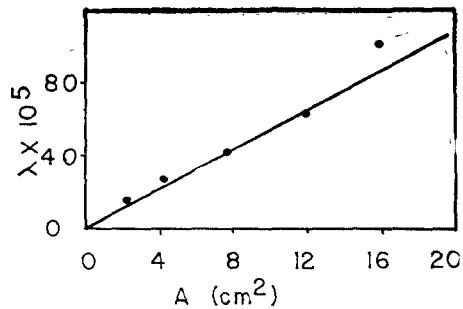
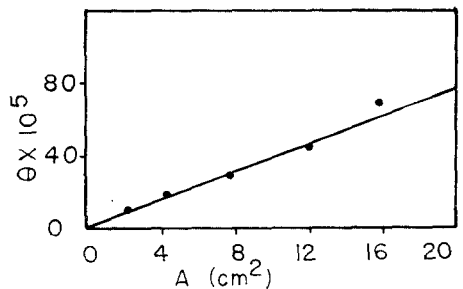
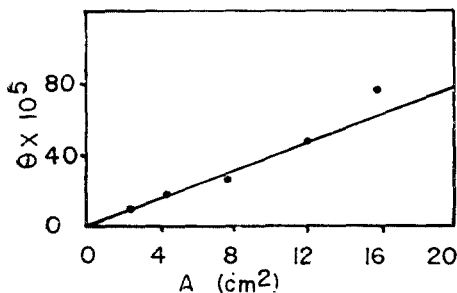


Fig.8 Strain/cross section curves for uphill quenched specimen.



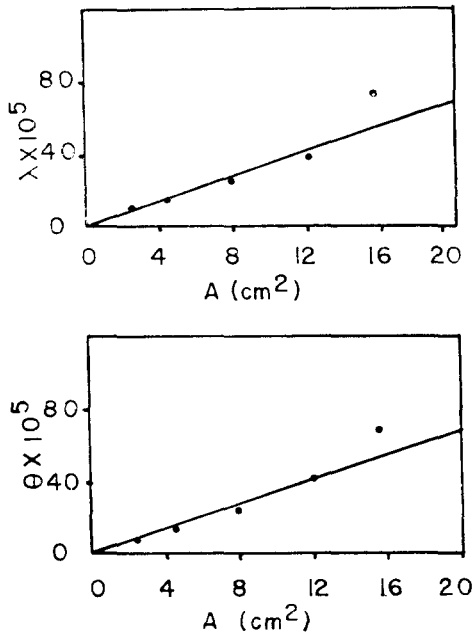


Fig.9 Strain/cross section curves for 3-cycle uphill quenched specimen.

3. 측정오차

그림 10은 잔류응력이 없는 재료에 대한 boring 면적(A)과 변형률 사이의 관계를 보인 것으로 이것은 모든 측정오차를 종합한 것과 같으며 측정오차가 비교적 적다는 것을 알 수 있다.

(1) Galvanometer의 영점강하(zero-drift)

strain gauge중의 수분에 기인하는 것으로 strain gauge 부착 상태가 양호하면 이로 인한 오차는 1% 이하로 줄일 수 있다.

(2) Strain gauge creep

접착제 중의 휘발되지 못한 용매에 기인하는 것으로 시편에 부착된 gauge를 약간 가열하여주면 이 gauge도 인한 오차는 완전히 없앨 수 있다.

알루미늄 합금재료에서는 시편을 가열하여 줄 수 없으므로 gauge를 부착하여 72시간 이상이 경과한 후에 boring 작업을 하므로써 이로 인한 오차를 거의 없도록 하였다.

(3) 납땜 작업의 반복

boring을 밀링기에서 함으로써 납땜 작업의 반복을 없앨 수 있었다.

1차 납땜작업으로 인한 오차는 10%정도이다.

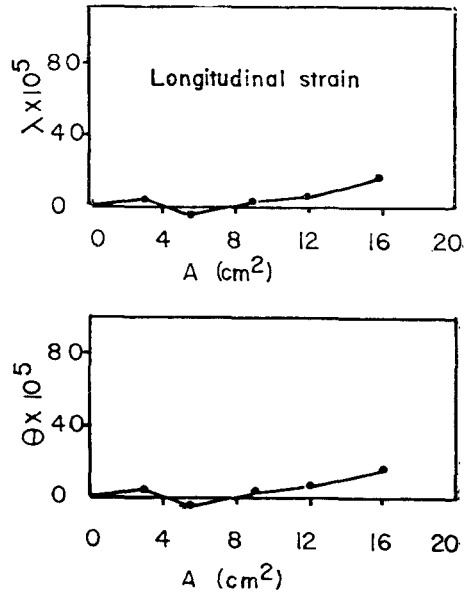


Fig.10 Strain/cross section curves for full annealed specimen

(4) 측정온도

active gauge와 dummy gauge는 온도 차이가 없도록 알루미늄 합금봉 표면에 strain gauge를 부착한 것을 dummy gauge로 사용하였고 boring이 끝난 1시간 후에 strain을 측정하였다.

active gauge와 dummy gauge의 온도차이가 없어도 측정할때의 대기온도가 다른 측정오차가 1% 정도 발생함을 확인하였다.

(5) 절삭 작업으로 인하여 발생하는 열

절삭 작업으로 인하여 발생하는 열은 변형률 곡선의 기울기를 변화시킨다.

열 영향을 없애기 위하여 얼음을 사용하였고 작업 속도와 회전속도를 가능한 한 최소로 하였다.

(6) 진 동

절삭 작업시 발열과 진동은 잔류응력 측정을 불가능하게 만든다.

진동을 없애기 위하여 pilot bar를 사용하였다.

(7) 절삭표면에 저장되는 소성응력

소성변형 에너지는 측정할수 있을 것이나 이 응력이 잔류응력 측정에 미치는 영향을 측정할 수 없었다.

(8) 시편의 Clamping

clamping으로 인한 영향을 없애기 위하여 가능한 한 시편의 좌우양단을 고정시켰다.

strain 측정을 고정시킨 상태와 고정시키지 않은 상태 모두 행하였다. boring 초기에는 시편 고정으로 인한 영향은 거의 없었으나 boring 말기에는 시편 고정으로 인한 strain 측정오차가 거의 20%에 달함을 확인하였다.

(9) Hole의 편심

hole이 편심되면 boring 말기에 측정 위치에 따라 strain 측정오차가 20% 정도 이었다.

(10) 재료의 불균일성과 기타

상기한 측정 오차를 거의 배제하여도 재료의 불균일성으로 인한 오차가 발생하였다.

boring이 끝난후 4시간이 지나면 strain은 완전하게 안정되고 boring후 1시간이 지나면 strain은 95%정도 안정된다.

그러나 boring 말기에는 strain이 10시간이 지나야 완전하게 안정됨을 확인하였다.

이것도 boring이 끝난후 1시간 정도에서 80% 정

도 안정되었다.

참 고 문 헌

1. G. A. Hawkes, "The Measurement of Surface Residual Stresses by X-ray", *British Journal of Applied Physics*, Vol. 8, (June 1957) p. 229.
2. G. Sachs', "The Determination of Residual Stresses in Rods and Tubes", *Trans ASME* (1939) p. 821.
3. 이동영, "금속가공학", 문문당, (1977)
4. R. A. Dodd, "Some Observations on the Determination of Residual Stresses in Cylindrical Metal Bodies by Sachs' Boring Method", *Metallurgia*, Vol. 45, (1952) pp. 109-114.
5. Alcoa Aluminum Handbook, "Table 10", (1962) p. 51-52
6. MacPherson, A. E., *Exp. Stress Analysis*, (1944) 2(1), 200