

# He-Ne 레이저의 干涉을 利用한 高精度 리니어 스케일의 製作에 關한 研究

한 응교\* 전 병욱,\*\* 이 명호\*\* 박 두원\*\* 노 병욱\*\* 櫻井 好正\*\*\*\*

## A Study on the Manufacturing of High Precision Linear Scale Using He-Ne Laser Interference

Eung Kyo Han,\* Byeong Wook Jeon,\*\* Myung Ho Lee,\*\*  
Du Won Park,\*\* Byung ok Rho,\*\* Yoshimasa Sakurai\*\*\*\*

### Abstract

A Study on the Manufacturing of High Precision Linear Scale using He-Ne Laser Interference

Of late, along with the advancement of precision machining technology, the requirement of super precision measurement increases as time goes on, and the accuracy of standard scale which is a basis of precision measurement has been cognized as a criterion of industrial development in a nation.

In this paper, we described on technology by which we could carve scale lines thru optical method under the condition of laboratory by using the coherence of He-Ne two-mode stabilized laser and in turn, put it to practical use as linear scale for the measurement of length. Hence in this research in the case of setting scale interval to 20 $\mu$ m, we employed super precision scale-carving device associated with Ar laser and acousto optic modulator in lieu of flashing lamp scale-carving device, and we obtained as experimental result superior linear scales carved within the accuracy of  $\pm 0.3\mu$ m.

### 1. 序 論

現在 길이에 對한 標準은 빛의 波長에 의해 定義되고<sup>1)</sup>, 寸數 測定의 分野에 있어서 서브미크론(sub-micron) 級의 精密 正確度를 갖는 길이의 測定에는 主로 레이저 干涉計가 利用되어 왔다.<sup>2)</sup> 그러나 레이저 干涉計를 利用한 測定法은 測定時 빛의 波長을

基準으로 하기 때문에 溫度, 氣壓, 濕度等 環境條件의 影響을 받아서 측정值에 誤差를 誘發시키게 되고, 그 誤差를 補正하기 위해서는 氣溫, 氣壓 및 濕度等을 補正<sup>3)</sup> 하지 않으면 안되기 때문에 測定節次의 複雜性 및 測定 裝置의 大規模化가 不可避하게 된다. 한편, 리니어 스케일(linear scale)을 基準으로 하는 測定 裝置는 干涉計를 利用한 測定 裝置

\* 한양대학교 정밀기계공학과

\*\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\*\* 현대전자(주) 산업전자연구소

\*\*\*\* 日本 千葉工業大學 정밀기계공학과

에 비해 規模가 작고, 測定時 波長 補正을 할 必要가 없으며, 치수 測定에 使用하는 리니어 스케일을 被測定物과 同一한 熱膨脹 係數를 지닌 材料로 製作하는 境遇, 測定物의 溫度 補正도 不必要하게 될 뿐만 아니라 스케일間隔을 週期로 하는 週期的 信號를 얻기가 容易하기 때문에, 換算없이도 미터系 (metric system) 尺度의 自動 測定에도 利用할 수 있다는 커다란 長點을 지니고 있다. 이와 같은 特徵은 測定을 위한 標準尺으로서 利用할 수 있는 리니어 스케일을 理想的인 實驗室 環境 條件下에서 高精密 正確度로 製作하고, 그 條件下에서 製作된 리니어 스케일을 非 實驗室 條件인 一般 環境下에서 使用하여 高精密 正確度의 치수 測定을 이룰 수 있다는 結論으로 歸納된다.

本 研究에서는 刻線하는 境遇와 刻線된 리니어 스케일을 測定하는 境遇에 같은 裝置를 使用하여 刻線 및 測定中의 溫度 變化가 刻線 및 測定 誤差에 커다란 影響을 미친다는 것을 보였다. 그리고 既存의 刻線에 관한 論文<sup>4)</sup>에서 눈금 間隔 1mm의 리니어 스케일을 寫眞 攝影에 의해 刻線하는 境遇, 寫眞 感光 用的 光原으로서 一般 寫眞機用 플래시 램프를 使用 눈금線을 刻線하였지만, 本 研究에서는 눈금 間隔 20 $\mu$ m 또는 그 以下の 보다 微細한 間隔의 눈금線을 刻線하는 境遇 0.1秒 보다 짧은 間隔으로 눈금線 投影 램프를 點燈할 必要가 있기 때문에, 플래시 램프를 전혀 採用하지 않고 Ar 레이저 光原에 音響光學 變調器<sup>5)</sup>를 組合한 새로운 高精密 刻線 裝置를 使用하여, 既存의 플래시 램프를 利用한 눈금線 投影 裝置와 같은 方式으로 照明할 수 있도록 함으로써 높은 周波數 應答性을 얻을 수 있었으며, 그 結果 서브미 크론級의 高精密 正確度를 갖는 스케일 間隔 20 $\mu$ m 을 갖는 리니어 스케일의 製作 및 刻線의 自動化가 實現될 수 있음을 實驗을 通하여 糾明하였다.

## 2. 刻線의 原理

實驗에서 利用하고 있는 He-Ne 波長 安定化 레이저의 標準 波長이 0.63281972 $\mu$ m이므로 干涉光의

變化 週期는 1/2波長, 즉 0.31640986 $\mu$ m가 된다. 刻線의 位置를 決定하는데 있어서, 우선 干涉計로부터 90° 位相이 떨어진 2個의 正弦波 信號를 光電 檢出器로 받아들이고 또한 各各의 逆相을 抵抗을 利用한 휘잇스톤 브릿지(wheatstone bridge) 回路에서 干涉光 1週期의 變化에 대해 等間隔으로 5個의 펄스를 發生시키면 펄스의 間隔은 1/5, 즉 0.063281972 $\mu$ m가 된다. 따라서 5 $\mu$ m의 間隔에 대해 發生되는 펄스 數는 79.011444가 된다. 결국 펄스 數 79가 大略 5 $\mu$ m에 相當하고, 이 펄스마다 눈금線을 새기면 눈금 間隔 5 $\mu$ m의 리니어 스케일이 可能해진다. 그러나 긴 길이에 對해서는 0.011444만큼이 累積되고, 그것이 結局 큰 誤差가 되기 때문에 이 小數點 以下 나머지 數에 對해 補正을 해야만 한다. 여기서 小數點 以下の 數值가 1이 되는 펄스 數를 計算하면 6903個가 되며, 이 펄스마다 펄스列로부터 펄스를 1個씩 消去하여 주면 累積 誤差를 補正할 수 있다.

이 境遇, 補正 比率은 1/6903이 되고 補正 間隔이 1만큼 變化하는 比率, 예를 들어 1/6904과의 差, 즉 2.1 $\times 10^{-8}$ 이 이 方法의 補正 最小單位가 된다. 一般的으로 刻線時의 環境 狀態는 標準 狀態와 다르기 때문에 實驗하기 前에 氣溫, 氣壓을 測定하여 屈折率의 差를 구하고 He-Ne 레이저의 波長을 補正할 必要가 있다.<sup>6)</sup>

氣溫을 t(°C), 氣壓을 p(kPa), 水蒸氣壓을 f(kpa), CO<sub>2</sub>含有率을 k(%) 또한 스케일 블랭크의 熱膨脹 係數를  $\alpha(k^{-1})$ , 溫度를 T(°C)라고 하면, 屈折率의 變化  $\Delta n_1$  및  $\Delta n_2$ 는

$$\Delta n_1 = \{0.929(t-20) - 2.68(p-101.325) - 0.42(f-1.333) + 1.5(k-0.03)\} \times 10^{-6} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta n_2 = \alpha(T-20) \dots\dots\dots (2)$$

으로 주어진다. 여기서 水蒸氣壓과 CO<sub>2</sub>含有率의 影響은 작기 때문에 實際로는 考慮하지 않는 것으로 한다. 따라서 式 (1)과 式 (2)로부터 實際로 刻線에

사용하는 波長  $\lambda_{0.1}$ 는 式 (3)과 같이 구해진다.<sup>7)</sup>

$$\lambda_{0.1} = 0.63281972(1 + \Delta n_1 - \Delta n_2) \dots \dots (3)$$

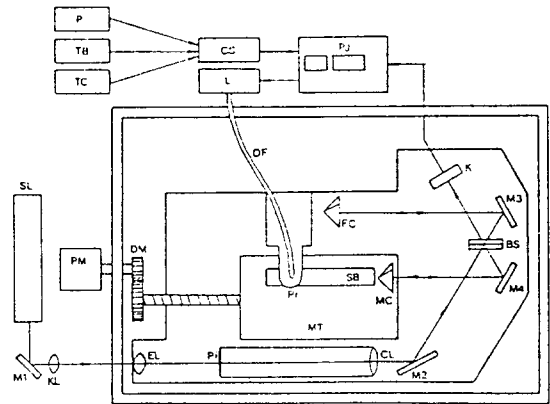
이와 같은 시스템으로 特定 펄스數마다 發光 裝置를 點燈하고, 이 빛으로 感光材를 塗布한 스케일 블랭크 위에 눈금線을 投影하도록 構成되어 있다.

### 3. 刻線 및 測定 裝置의 構成

#### 3-1 刻線 裝置의 構成

Fig. 1에서 He-Ne 波長 安定化 레이저<sup>8,9)</sup> SL로부터 나온 레이저光은 反射鏡 M1을 經由하여 擴散 렌즈 KL을 通하고, 集光렌즈 EL에서부터 핀 홀(pin hole) Pi에 모인다. 핀 홀은 컬리메이터(Collimator) 렌즈 CL의 集點에 있기 때문에 레이저光은 直徑 數 10mm의 平行 光束이 되고 反射鏡 M2를 經由하여 비임 스플리터(Beam splitter) BS에 入射된다. 비임 스플리터에서 둘로 나뉘어진 레이저光의 한쪽은 反射鏡 M3를 통해 固定 코너큐브 프리즘(Corner-cube prism) FC로 向하고, 다른 한쪽의 光束은 反射鏡 M4를 통해 移動台 MT上에 固定된 코너큐브 프리즘 MC로 向한다. 이 두 個의 코너큐브 프리즘으로부터 나온 反射光은 비임 스플리터에서 다시 結合하여 干涉무늬 檢出裝置 K의 面上에서 서로 干涉을 일으킨다. 移動台 MT는 파워 모터 PM 및 齒車系 DM에 의해 驅動되어 0.2mm/sec의 一定 速度로 移送된다. 感光膜이 附着된 스케일 블랭크 SB는 移動台 上에서 코너큐브 프리즘 MC와 아베(Abbe)의 條件을 滿足하는 位置에 놓여 있으며<sup>10)</sup>, 플래시 램프에 의해 助明된 빛은 光 화이버를 통해 傳達되고, Slit을 通過한 빛의 縮小像이 스케일 블랭크 面上에 投影되어 눈금線을 寫眞 乾板에 感光시키는 原理이다.

Fig. 2에 刻線 裝置의 블록 다이어그램을 나타내었다.



SL	He-Ne laser tube	SB	Scale blank
KL	Diffusing lens	K	Coherence detector
EL	Condensing lens	PJ	Pulse generator
Pi	Pin hole	OF	Optical fiber
CL	Collimator lens	L	Flashing lamp
BS	Beam splitter	CS	Computer system
FC	Fixed corner-cube prism	Pr	Scale projector
MC	Moving corner-cube prism	M1-M4	Mirror
PM	Power motor	P	Manometer
DM	Gear system	TB	Blank thermometer
MT	Locomotor	TC	Adiabatic thermometer

Fig. 1 The Contour of Scale-Carving Apparatus

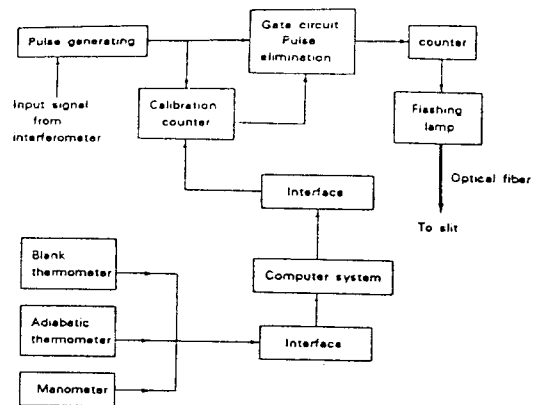


Fig. 2 The Block Diagram of Scale-Carving Procedure

#### 3-2 測定 裝置의 構成

測定에서도 刻線 裝置의 光學 系統을 그대로 使

用하였으며, 스케일의 刻線에 利用하였던 눈금線 投影 裝置의 光 화이버 部分을 光 檢出器로 交替하여 光電 顯微鏡으로서 活用하였다.<sup>11)</sup> 干涉計로부터는 2個의 포토 다이오드를 平行하게 付着시킨 干涉 무늬 檢出 裝置 K에 의해 位相이 90° 떨어진 두 個의 信號를 檢出하여 이 두 個의 信號로부터 1週期에 16個의 펄스를 發生시킨다. 干涉計로부터의 펄스는 카운터 C에서 計數하는데, 計數의 始作은 처음의 눈금線 펄스에 따르게 된다. 干涉計 펄스는 게이트 (gate) 1로, 그리고 눈금線 펄스는 게이트 2로 傳達된다. 게이트 2는 最初의 펄스, 즉 測定의 基點이 되는 눈금線의 位置에서 열리며 그 以後의 펄스를 通過시킨다. 最初의 눈금線 펄스는 同時에 게이트 1을 열고 干涉計 펄스는 게이트 1을 통해 카운터에 入力된다. 連續的으로 들어오는 눈금線 펄스는 게이트 2를 통해 래치(latch)로 傳達되며 그 카운터의 計數値를 읽어 인터페이스(interface)를 통해 컴퓨터에 記憶된다.<sup>12)</sup> 이 測定 裝置의 分散能으로 0.02  $\mu\text{m}$ 까지의 測定이 可能하다고 推定된다. 測定値에 대한 空氣의 屈折率, 스케일 블랭크 및 斷熱槽 內의 溫度 補正도 刻線 裝置를 그대로 使用하여 實驗한다. 이 測定 過程의 블록 다이어그램을 Fig. 3에 보 였다.

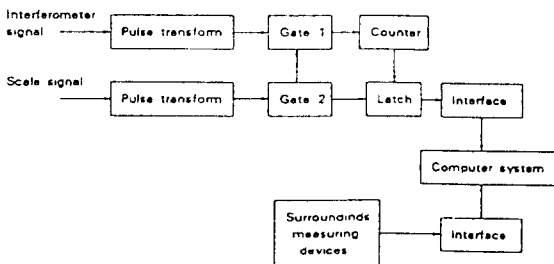


Fig. 3 The Block Diagram of Scale Measurement

3-3 플래시 램프의 周波數 應答

本 實驗의 刻線 裝置는 펄스 發生器로부터 發生한 信號에 의해 發光 裝置를 瞬間的으로 作動시키고, 光 펄스에 의해 寫眞 刻線을 하도록 되어 有

며, 發光 裝置로는 1mm의 刻線인 境遇 普通의 카메라 用 스트로보 램프를 使用하였다. 그러나 이 境遇 問題가 되는 것은 스트로보 램프의 周波數 應答性으로 어느 程度의 精密 正確度를 갖는 刻線이 可能한 가 하는 것이다.

스트로보 램프는 콘덴서에 充電된 電荷를 플래시 램프를 通하여 瞬間的으로 放電하는 것이고, 콘덴서의 容量이 커지게 되면 發光 時間도 따라서 길어지기 때문에 普通의 스트로보 램프를 使用하는 境遇에는 周波數 應答, 즉 刻線 能力에 制限을 받게 된다. 本 實驗에서 使用한 實驗 裝置의 移動台는 0.2mm/sec의 一定 速度로 移送되도록 製作되어 있으므로 本 實驗에서의 刻線 能力은 當然히 플래시 램프의 周波數 應答性에 從屬된다. 스케일 間隔에 따라 要求되는 發光 週期를 Table 1에 나타내었다.

스케일 間隔을 1mm로 刻線할 境遇 普通의 스트로보 램프로도 充分한 精密 正確度를 保障하는 刻線이 可能하다는 것은 이미 確認되어 있지만, 보다 高精 密 正確度를 지닌 刻線의 實驗에서는 光量 不足 및 應答 遲延으로 인해 實用 可能한 리니어 스케일 製作은 不可能하였다. 따라서 間隔을 1mm보다 더 微細하게 刻線할 境遇, 예를 들어 눈금 間隔 20 $\mu\text{m}$ 의 刻線을 할 境遇에는 10Hz의 周波數 特性을 지니고 있는 플래시 램프를 使用하지 않으면 안된다. 따라서 本 研究에서는 Ar 레이저와 音響 光學 變調器를 組合한, 높은 周波數 特性의 光源을 製作하여 實驗에 適用하여봄으로써 高精 密 正確度를 갖는 리니어 스케일을 製作하였다.

Table 1 The radiating period of flashing lamp(Hz)

Velocity	Interval of Scale		
	1mm	50 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
0.2mm/sec	0.2	4	10

3-4 Ar 레이저와 音響 光學 變調器를 利用한 刻線의 原理

플래시 램프는 그 發光 週期에 限界가 있기 때문에, 本 實驗에서는 새로운 發光 裝置로서 Ar 레이저와 音響光學 變調器를 利用하여 스케일의 刻線을 하였다. 本 實驗에서 使用한 音響光學 變調器의 原理는 다음과 같은 것이다. 즉 透明한 媒質에 超音波를 가해주면 그 媒質의 光彈性 效果에 의해 超音波의 粗密波에 對應하여 媒質의 屈折率이 週期的으로 變化하게 된다.

이와 같은 狀態에서 透明 媒質은 透過型 位相 格子로서 作用하여 入射光을 回折시키게 된다. 超音波 프로우브(probe)로 結晶體에 超音波를 가하며, 가해진 超音波는 結晶體를 通過한뒤 反對偏에 있는 吸音材에서 吸收되도록 되어 있다. Fig. 4는 이 原理를 刻線에 利用한 概要圖이다. 그림의 音響光學 變調器 驅動 回路에서 超音波를 發生하여 音響光學 變調器를 作動시키지만, 이 作動은 펄스 發生器를 통해 刻線 펄스가 音響光學 變調器로 入力되는 사이만으로 限定된다. 따라서 레이저光은 刻線 펄스가 入力되는 사이에 回折하여 方向이 바뀌고 對物 렌즈를 利用하여 레이저光이 光화이버 全體에 效果的으로 入射되도록 調整할 수 있도록 하였다.

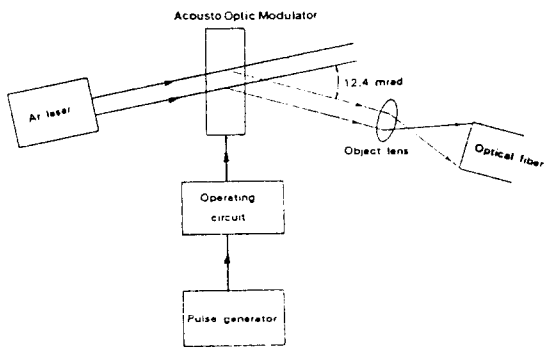


Fig. 4 Light Source Using Ar Laser and Acousto Optic Modulator

### 3-5 플래시 램프와의 光量 比較

前述한 Ar 레이저 刻線裝置에서 어느 程度의 光

量이 얻어지는가를 알기 위하여 플래시 램프와의 光量과 比較하여 보았다. 實際로 刻線하는 境遇와 같도록 各 裝置를 構成하고 光화이버의 終端部에 光電檢出器를 配置하여 싱크로스코우프로 그 波形을 調査하였다. 그리고 兩 光源 裝置의 發光 週期는 0.2Hz로 하고 Ar레이저는 最低 出力인 3.4mW로 使用하였으며, 音響光學 變調器에 入力하는 펄스幅, 요컨대 回折되는 時間은 0.5ms로 하였다. 슬릿幅을 100 $\mu$ m, 對物 렌즈는 10倍의 것을 使用하여 刻線한 境遇, 刻線된 눈금線幅은 理論적으로 10 $\mu$ m이 되겠지만, 實際로는 移動台가 移送 速度 0.2mm/sec 移動하고 있기 때문에 눈금線幅 10 $\mu$ m에 對해 0.1 $\mu$ m程度 더 크게 測定된다. 이 값은 눈금線 幅에 對하여 1% 程度의 誤差이기 때문에 刻線시 눈금線이 받는 影響은 거의 없다고 보는 편이 좋다. 여기서 回折되는 時間은, 寫眞 乾板위에 빛이 照明되는 時間과 같은 意味를 갖는 것이기 때문에 앞으로는 回折 時間을 發光 時間이라고 稱하기로 한다.

光量의 測定 結果를 Fig. 5에 그래프로 나타내었다. 이 實驗 結果, 싱크로스코우프에서 出力된 波形을 積分하여 比較하면 그 積分値는 거의 같다는 것을 알 수 있었다. 그러나 Ar 레이저는 寫眞 乾板에 대해

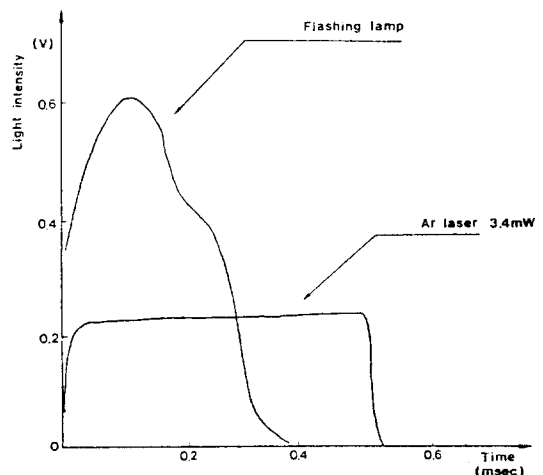


Fig. 5 The Comparison of the Intensity of Radiation in Flashing Lamp and Ar Laser

感도가 낮은 綠色光(波長  $\Delta=0.5145\mu m$ )의 單一 스펙트럼(spectrum)인데 反해, 플래시 램프는 光範圍 波長幅을 지닌 光源이기 때문에 單純한 積分值만을 가지고 實質的인 光量의 大小 與否를 評價할 수는 없다. 實際로는 寫眞 刻線을 한 뒤 그 結果를 參照하여 펄스幅, 혹은 Ar 레이저의 出力을 調整할 必要가 있다. 繼續해서 刻線 間隔  $50\mu m$  및  $20\mu m$ 에 대해 發光 週調 4Hz, 10Hz로 Ar 레이저를 刻線用 光源으로 하여 實驗한 結果, 마찬가지로 싱크로 스코우프의 波形은 發光 週期에 대해 充分히 對應하고 있는 것으로 確認되었다.

3-6 Ar 레이저에 의한 刻線

適切한 露光을 이루기 위해서는 優先 Ar 레이저의 出力을 3.4mW로 固定하고 發光 時間을 0.5ms, 1.1ms, 2.2ms, 4.4ms로 變化시켜 가면서 刻線을 하였다. 그러나 이들 중 어느 境遇에 對해서도 刻線이 되지 않았기 때문에, 원하는 刻線 結果를 얻기 위해서는 發光時間의 延長으로 露光量을 增加시키는 方法보다는 刻線用 Ar 레이저의 出力을 높이는 것이 妥當하다는 것을 알았다. 따라서 Ar 레이저의 出力을 5mW, 10mW, 15mW, 20mW로 變化시켜 가면서 發光 時間을 4.4ms, 10ms, 20ms로 하여 各各의 모든 境遇에 對한 刻線 結果를 檢討하였다.

그러나 露光 時間이 지나치게 길어지는 境遇, 刻線된 刻線이 隣接한 刻線에 接近함에 따라 刻線과 刻線 사이의 區分이 模糊해지는 問題가 생겼다. 따라서 20ms 以上 發光 時間을 延長시키게 되면, 最惡의 境遇 隣接 刻線끼리 重疊되어 버릴 危險이 隨伴되며, 이 實驗 結果를 통해서 制限 最大 露光 時間은 20ms 程度임을 알 수 있었다.

또한 出力 10mW, 發光 時間 20ms일 때, 처음으로 刻線이 이루어졌지만 刻線된 刻線의 濃度는 대단히 낮았고, 結局 出力을 더 높여줄 必要가 있었다. 따라서 發光 時間을 非 重疊 上限時間인 20ms로 固定시키고 Ar 레이저의 出力을 15mW, 20mW, 25mW로 높여 實驗한 結果, 出力 25mW의 境遇 가장 濃度 깊은 良好한 刻線을 얻을 수 있었으며 各各의 境遇에 對한 結果를 Table 2에 比較하였다.

3-7 Ar 레이저의 適用 結果 및 考察

플래시 램프에 의한 리니어 스케일의 製作은 移動 台의 移送 速度가  $0.2mm/s$ 인 境遇, 刻線  $20\mu m$ 의 리니어 스케일은 發光 回數의 增加에 따라서 光量 不足의 結果가 얻어지고, 要求되는 發光 周波數에도 이르지 못함을 알았다. 이같은 移動 速度에서는 刻線 間隔  $20\mu m$  以下의 리니어 스케일을 製作한다는 것은 不可能하였다. 또한  $20\mu m$ 의 리니어 스케

Table 2 Scale-Carving Condition Using Ar laser

Out put ( mW )	Radiating time ( ms )						
	0.5	1.1	2.2	4.4	10	20	
3.4	×	×	×	×			× : Impossible △ : Possible
5				×	×	×	
10				×	×	△ Vague	
15						△	
20						△	
25						△ Deep	

Scale-carving condition : Velocity 0.2mm/sec  
Interval of scale  $20\mu m$

일을 제작할 때 플래시 램프에는 10Hz라는 제법 큰 負擔이 걸리기 때문에 結局 過熱로 인한 破損의 危險마저 뒤따르게 된다. 여기서 생각할 수 있는 또 하나의 方法은 移動台의 移送 速度를 既存 實驗의 移送 速度인 0.2mm/s보다 낮추는 것이다. 그러나 이 境遇 플래시 램프의 發光 週期の 限界에 대한 問題點은 어느 程度 補完될 수 있겠지만, 結局 作業 時間이 길어지게 되고 周圍 溫度 變化에 의한 影響을 지나치게 많이 받기 때문에 刻線된 눈금 間隔에 큰 誤差를 發生시킨다. 따라서 周波數 應答 速度가 빠른 Ar 레이저 音響光學 變調器를 利用함으로써 이와 같은 發光 週期에 대한 問題點을 解決할 수 있었다. 앞서 記述한 條件으로 刻線한 눈금 間隔 20 $\mu$ m을 갖는 리니어 스케일의 例를 Photo 1에 보았다.

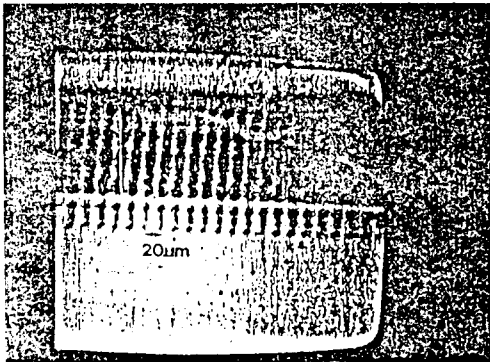


Photo 1. Example of linear scale with scale interval of 20 $\mu$ m

#### 4. 리니어 스케일 刻線 및 測定時 環境條件 變化에 의한 誤差測定

##### 4-1 레이저 干涉 刻線 및 測定에 있어서 環境 測定の 必要性

本 研究에 使用한 레이저 干涉 刻線 및 測定 裝置는 恒溫 恒濕 精密實驗室에 設置하였으며, 그 實驗 裝置의 本體인 斷熱槽는 두께 50mm의 斷熱材로 構成되어 있고, 그 內側을 알루미늄 薄板으로 시일드

(shield)하여 電界의 影響으로부터 保護하고 있다. 그리고 熱源이 되는 He-Ne 波長 安定化 레이저 發生器 및 移動台 移送用的 과워 모터는 斷熱槽의 外部에 設置되어 있다. 또한 裝置의 全體는 防振臺위에 設置되어 있기 때문에 外部로부터의 振動에 의한 干涉무늬의 振動은 遮斷된다. 뿐만 아니라 移動台의 驅動 裝置도 防振臺의 위에 設置하여 이것을 振原으로 하는 振動의 影響은 거의 나타나지 않도록 하였다. 이 防振臺의 固有 振動數는 測定 結果 4.4Hz였다.

全長 L, 熱膨脹 係數  $\alpha$ 의 스케일 블랭크가  $\Delta T$ 만큼 溫度 變化했을 때의 熱膨脹  $\Delta L$ 은 式 5-1과 같이 計算된다. 즉,

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \dots \dots \dots (4)$$

이 式에서  $L = 200\text{mm}$ , 許容 刻線誤差  $\Delta L = 0.1\mu\text{m}$ ,  $\alpha = 6 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  (測定值)를 代入하면  $\Delta T = 0.08\text{K}$ 가 된다. 즉  $\pm 0.1\mu\text{m}$ 의 精密 正確度を 얻기 위해서는 스케일 블랭크의 溫度差  $\pm 0.08\text{K}$ 가 保障되는 精密 正確도를 지닌 環境下에서 測定하여야 한다. 本 實驗에서 使用한 斷熱槽 및 스케일 블랭크의 溫度 測定裝置는 總合 正確度  $\pm (0.03 \sim 0.04) \text{K}$ 를 지닌 優秀한 實驗 裝置이기 때문에 溫度測定에서는 充分하다고 말할 수 있다.

스케일 블랭크의 溫度가 安定되어 있으면 誤差는 극히 減少하게 되며, 誘發되는 誤差 要因으로는 刻線中 혹은 測定中에 熱的, 機械的 (例를 들어 振動) 등의 原因에 의해 干涉 裝置 自體가 變形되고, 또한 移動台와 그 위에 設置된 스케일 블랭크가 相對 變位를 일으킨다고 하는 것이다. 그러므로 裝置 全體가 어떠한 熱的 狀態, 즉 溫度 分布를 지니고 있는가를 알고 있다면 좋겠지만<sup>13)</sup>, 여기에서는 그 溫度 分布를 直接 測定하는 것은 아니고 이 裝置에 附屬된 斷熱槽 內의 氣溫 測定用 溫度計와 스케일 블랭크用 溫度計를 利用하여, 測定된 溫度 및 溫度 變化로부터 必要한 安定 狀態가 얻어지고 있는가를 推定하여 實驗하였다. 以上の 諸問題에 對해 다음과 같

은 2가지의 實驗을 하였다.

- (1) 斷熱槽 内の 溫度 및 스케일 블랭크 溫度의 時間 經過에 따른 變化를 外氣 溫度와 함께 測定하고, 斷熱槽 内の 溫度가 어느 程度 安定되어 있는가를 調査하였다.
- (2) 200mm의 스케일의 길이를 測定하여 斷熱槽 内の 溫度와 스케일 溫度 및 測定 前後의 溫度差와 測定된 誤差 曲線과의 關係를 檢討 하였다.

#### 4-2 斷熱槽 内の 溫度 測定 結果 및 考察

實驗 結果의 그래프를 Fig. 6에 나타내었는데, 이 그래프를 보면 實驗室의 溫度는 21.4°C를 中心으로 振幅 0.6K, 週期 15分으로 變動하고 있지만 斷熱槽 内에서는 影響이 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있

다. 또한 送風機를 45分間 可動시킨 境遇, 可動 開始後 1時間 30分이 經過하고 스케일 블랭크의 溫度는 安定되지만 斷熱槽 内の 空氣 溫度는 安定되기까지 約 2時間 程度 걸렸다. 다음에 60分間 送風機를 可動시킨 境遇, 溫度가 安定되기까지의 時間은 역시 變化하지 않았으며, 이번에는 전혀 可動하지 않은 境遇, 스케일 블랭크의 溫度는 1時間 經過後 安定되었고 斷熱槽 内の 溫度가 安定되기까지 約 2時間 程度 걸린다는 것을 알았다. 이것으로부터 斷熱槽 内の 溫度分布를 均質化 하기 위해서 送風機를 可動시킨 境遇와 可動치 않은 境遇의 스케일 블랭크 및 斷熱槽 内の 溫度가 安定되기까지의 時間은 거의 같으며 可動하지 않은 境遇 溫度 安定化 時間이 오히려 짧아진다는 것을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 送風機를 可動한 境遇, 送風機 本體가 斷熱槽 内에 있기 때문에 發熱에 의해 環境 溫度에 影響을

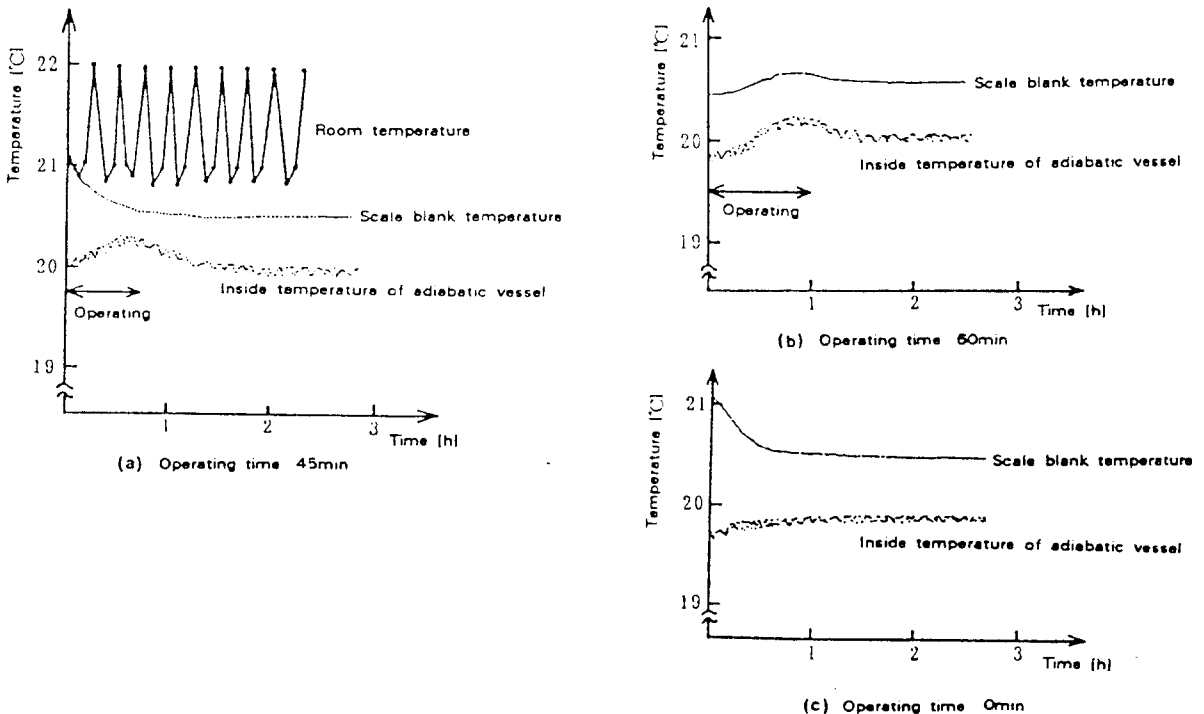


Fig. 6 Stable Time of Temperature according to Ventilating Time



미칠 憂慮마저 있기 때문에 送風機의 可動은 別로 意味가 없다는 結論을 내렸다. 따라서 既存의 刻線에 관한 研究<sup>4)</sup>에서는 送風機에 依存하여 斷熱槽內 溫度分布의 均質化를 圖謀하는 것이 節次上의 原則이었으나, 各 境遇에 對한 實驗 結果, 送風機는 오히려 測定에 對해 逆效果를 가져오기 때문에 그 使用은 止揚되어야 한다고 思慮된다.

다음과 같은 式으로 計算된다.

$$P_n = G_n - \frac{n \cdot G_{200}}{L} \dots\dots\dots (5)$$

다음에  $P_n$ 의 平均値를 구하여 이 平均値를 A라고 하면 累積 誤差  $G_n/m$ 은 다음과 같이 補正된다.

$$P_m = P_n - A \dots\dots\dots (6)$$

5. 製作된 리니어 스케일에 對한 刻線 誤差의 測定

5-1 測定 方法

Ar 레이저와 音響光學 變調器를 組合한 刻線 裝置를 利用하여 刻線된 리니어 스케일에 對한 誤差의 測定 原理 및 節次는 다음과 같다.

우선 刻線된 寫眞 스케일의 뒷면에 Cr蒸着을 한다. 여기서 Cr蒸着을 하는 理由는 光電 顯微鏡에서 照明된 빛이 리니어 스케일의 눈금과 눈금 사이에서 全反射 되도록 하기 위해서이다. 이와 같은 方法으로 製作한 測定用 試驗片을 移動台 위에 固定시킨後, 移動台를 刻線時와 同一한 速度로 移送시키면서 앞서 既述한 測定 裝置로 스케일을 測定하도록 構成되어 있다.<sup>14)</sup> 물론, 斷熱槽內의 溫度, 스케일 블랭크의 溫度 및 實驗室內의 氣壓 測定은 앞서 提示한 環境 測定 裝置를 利用하며 測定 實驗에는 測定用 試驗片을 利用한다.

5-2 測定 結果 및 考察

刻線된 測定用 試驗片의 스케일을 測定해 본 結果 Fig. 7과 같이 200mm의 位置에서 -3 $\mu$ m 程度의 거의 直線의인 累積 誤差를 보임을 알았다. 여기서 累積 誤差 曲線의 기울기가 거의 直線의이기 때문에 이 誤差 曲線에 對해 길이에 比例한 補正을 함으로써 그 累積 誤差를 調整할 수 있었다. 이 補正의 方法은 다음과 같다. 呼稱치수 nmm에서의 誤差  $P_n$ 은

Table 3은 各 測定値의 測定 前後 溫度差와 氣壓을 나타낸 것이다. 이 Table의 各 數値로부터, 測定에는 17分 程度 걸리지만 그 동안의 壓力 變化가  $1 \times 10^{-4}$ kgf/cm<sup>2</sup> 以下일 境遇에는 測定値에 전혀 影響을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 測定値에서는 空氣 屈折率과 스케일 溫度를 補正하였다. Fig. 8~ Fig. 10은 各各의 實驗에 對한 補正 誤差 曲線이다. Fig. 8의 誤差 補正 曲線을 보면 스케일 全長에 對해  $\pm 0.3\mu$ m 程度의 誤差幅이 나타나 있음을 알 수 있는데, 이는 대단히 良好한 刻線이 이루어졌음을 立證해 주는 結果이다. 같은 方法으로 測定한 다른 스케일의 境遇도 마찬가지로의 樣相을 보여주고 있으며, 이것들을

Table 3 Surroundings Condition of Three Typical Measurements

Measurement Number		Before measurement	After measurement	Difference of two measurements
1st	TA	20.50	20.60	+0.1000
	TS	20.60	20.73	+0.1300
	AP	1.0272	1.0276	+0.0004
2nd	TA	20.22	20.36	+0.1400
	TS	20.35	20.52	+0.1700
	AP	1.0275	1.0274	-0.0001
3rd	TA	20.57	20.70	+0.1300
	TS	20.75	20.85	+0.1000
	AP	1.0251	1.0251	0.0000

(TA : Temperature of Adiabatic Vessel) : °C  
 (TS : Temperature of Scale Blank) : °C  
 (AP : Atmospheric Pressure) : kpa/cm<sup>2</sup>

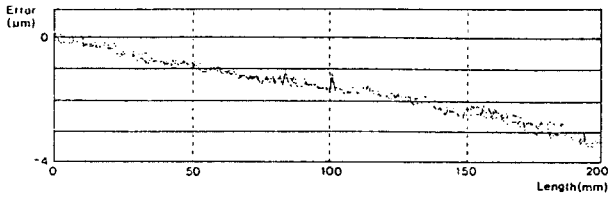


Fig. 7 The Accumulated Error Curves of Original Scale

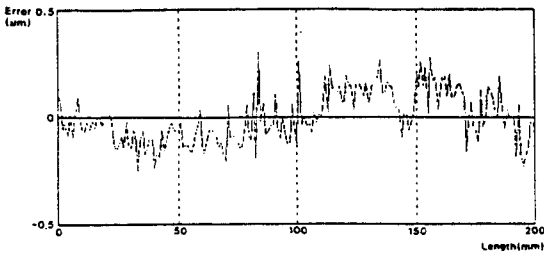


Fig. 8 Calibrated Error Curves in 1st Experiment

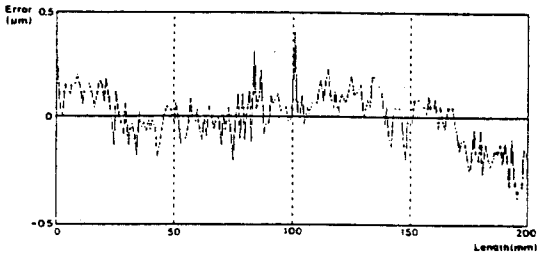


Fig. 9 Calibrated Error Curves in 2nd Experiment

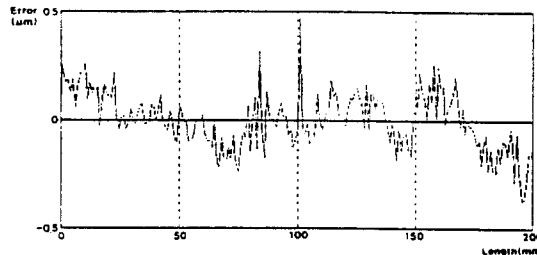


Fig. 10 Calibrated Error Curves in 3rd Experiment

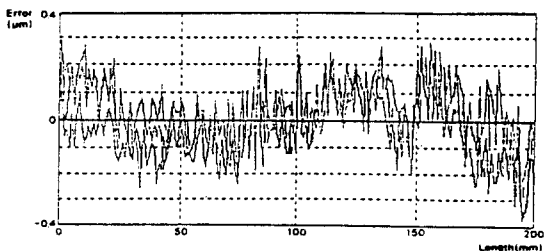


Fig. 11 Mean error curves in experiments 1, 2, 3

平均한 그래프를 Fig. 11에 나타내었다. 이와 같은 결과를 통하여 눈금 간격  $20\mu m$ 으로 刻線된 리니어 스케일은  $\pm 0.3\mu m$ 의精密 正確度を 지니고 있음이 確認되었으며, 作業中(17分間)의 스케일 블랭크 自體의 溫度 變化를  $0.05k$  以下로 하는 것은 쉽지 않지만 作業 前後 斷熱槽 内の 溫度 變化와 스케일 블랭크의 溫度 變化에 대한 差가 絶對值로  $0.05\sim 0.06k$  程度만 되면 誤差의 幅을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있었다.

## 6. 結 論

Ar 레이저와 音響光學 變調器를 組合한 눈금線 投影裝置를 製作하여 눈금 間隔  $20\mu m$ 의 리니어 스케일을 製作한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

- (1) 눈금線 投影裝置에 適用된 Ar 레이저는 出力  $25mW$ , 發光 時間  $20ms$ 일 때 가장 良好한 刻線 效率를 보였다.
- (2) 既存 리니어 스케일의 製作 過程에서 必須的인 것이라고 여겨지던 送風機의 可動을 排除 하였을 때, 스케일 블랭크 溫度의 安定 所要 時間을 送風機 可動時 보다 30分 以上 短縮 시킬 수 있음을 立證하였다.
- (3) 刻線된 測定用 試驗片의 스케일을 測定하여 얻어진 誤差 曲線에 기울기 補正을 適用하여 累積 誤差를 調整한 結果, 本 實驗에서 눈금 間隔  $20\mu m$ 으로 刻線된 리니어 스케일은  $\pm 0.3\mu m$ 의精密 正確度を 지니고 있음이 確認 되었다.
- (4) 作業 前後를 통해 斷熱槽 内の 溫度 變化와 스케일 블랭크의 溫度 變化의 差가 絶對值로  $0.05\sim 0.06K$  程度만 되면 스케일 블랭크 自體의 溫度를  $0.05K$  以下로 하지 않아도 誤差의 幅을 줄일 수 있음을 糾明하였다.

## 參 考 文 獻

- (1) 清野 昭一, “メートルの新定義”, 精密機械, Vol. 57, No. 7(1984)
- (2) 濱島 宗樹, “寸法測定-光學的方法”, 精密機械, Vol. 51, No. 12(1985), pp. 2219-2222.
- (3) 谷村 吉久, 櫻井 好正, “レーザ干渉計で測長する場合の誤差要因”, 精密機械, Vol. 43, No. 9(1977), pp. 1106-1112
- (4) 櫻井 好正, 常包 辛五, “リニアスケール用レーザ干渉刻線機”, 精密機械, Vol. 55, No. 12(1988), pp. 2192.
- (5) 松本 弘一, “光學要素と技術(その2)”, O plus E, No. 87(1987), pp. 111-119.
- (6) 谷田貝 豊彦, “超精密加工と高精度光干渉計測法”, 精密機械, Vol. 51, No. 2(1985).
- (7) Yoshihiro Ohtsuka and Kazuyoshi Itoh, “Two-frequency Laser Interferometer for Small Displacement Measurements in a Low Frequency Range”, Applied Optics, Vol. 18, No. 2(1979), pp. 219-224.
- (8) R. Balhorn, H. Kunzmann and F. Lebowsky, “Frequency Stabilization of Internal-Mirror Helium-Neon Lasers”, Appl. Opt., Vol. 11, No. 4(1972), pp. 742.
- (9) S. K. Gordon and S. F. Jacob, “Modification of Inexpensive Multimode Lasers to Produce a Stabilized Single Frequency Beam”, Appl. Opt., Vol. 13, No. 2(1974), pp. 231.
- (10) 清野 昭一, “標準尺測定の際の傾斜照明の影響”, 精密機械, vol. 35, No. 5(1969), pp. 48.
- (11) Y. Sakurai, “An Automatic Recording Interferometer for the Calibration of Standard Scales”, annals of the C. I. R. P., Vol. 16(1968), pp. 145-150.
- (12) 清野 昭一, 櫻井 好正, 阿部 佳夫, “標準尺自動測定装置の試作”, 精密機械”, Vol. 41, No. 4(1975).
- (13) J. Slavik und H. Hofler, Freiburg, “Optische Rauheitsmessung”, Feinwerktechnik und Messtechnik, Vol. 96, No. 6(1988), pp. 258.
- (14) 櫻井 好正, “光波干渉を用いた標準尺刻線法”, 計測と制御, Vol. 3, No. 11(1964), No. 884.

용어해설

## ● 등가최대응력(Equivalent Maximum Stress)

구조물이 반복응력을 받는 경우 일반적으로 3 축성분의 응력을 받으며 이 응력들의 합(중첩)을 등가응력(equivalent stress)이라 하고 반복등가응력의 최대치와 최소치 범위의 반(半)을 교번응력폭(the alternation stress amplitude)이라 하여 피로수명의 반복응력으로 고려하며, 이때 1사이클 최대변형의 등가응력을 최대등가응력(equivalent maximum stress)이라 한다.