공 학 석 사 학 위 논 문

푸리에 변환 방법을 이용한 게이지 블록 길이의 절대 측정

2002 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

사진정보공학과

김 은 화

공 학 석 사 학 위 논 문

푸리에 변환 방법을 이용한 게이지 블록 길이의 절대 측정

지도교수 김 종 태

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2002 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

사진정보공학과

김 은 화

김은화의 공학석사 학위논문을 인준함

2001 년 12 월 26 일

주 심 이학박사 허 훈 인

위 원 이학박사 김 종 태 인

위 원 이학박사 김 지 홍 인

목 차

List of Figures

List of Tables

Interferometric calibration of gauge blocks by using Fourier transform method

Kim, Eun Hwa

Department of Photographic Science & Information Technology
Graduate School of Pukyong National University

Abstract

We combined the Fast Fourier transform(FFT) with fractional fringe order method for measuring the absolute thickness of a gauge block. An approximate integer part of the fringe order is estimated by mechanical measurements, and fractional fringe order part is determined by Fourier transform method of the interferometric fringe patterns. The fringe pattern are obtained with Twyman-Green interferometer by illumination of several selected wavelengths, respectively. We modified the process of using Fourier transform method with fractional fringe order. Conventional method is reading out the spatial intensity of profile on fixed interferogram to perform the Fourier transform method, while we use it to measure three points(center of gauge block, upper point on base plate and lower point on base plate) intensities data on interferogram with vary the phase. It is improved to calibrate gauge blocks that have very bad flatness and to find length of gauge blocks on center. Therefore, we report to find effect of center of gauge block is minimize and then verify it. When we compared repeatability of manual method with of Fourier transform method in a 5 mm gauge block, Fourier transform method is by far the best it. The final result was similar to that obtained with a conventional method.

I. 서 론

게이지 블록(gauge block)은 정확하고 편리한 길이의 단면 기준물이다. 게이지 블록의 길이를 광학 간섭계를 사용하여 절대 측정할 때에는 게이지 블록 면과 게이지 블록이 밀착된 베이스 플레이트(base plate)면 사이의 거리 차에 의해, 간섭무늬의 주기에 대해 간섭무늬가 어긋난 양의 비율 (a/b 혹은 a'/b')인 간섭무늬의 소수 차수(fractional fringe order)를 여러 개의 파장에 대해 측정하고, 합치법(exact fraction method)에 의해 게이지 블록의 길이를 구한다. 게이지 블록 간섭 무늬의 소수 차수를 측정하는 방법은, 기록된 간섭무늬(interferogram)로부터 간섭무늬의 위상 분포(interference phase distribution)를 분석하는 방법으로 측정한다. 종류로는 Phase shifting 방법[5], Fitting 방법[2], 4점 방법[3], wavelength scanning heterohyne 간섭계[4], 그리고 FFT 방법[5,6] 등이 있다.

기존에 사용하던 방법은 광학 쐐기(optical wedge)를 움직이는 노브(knob)를 회전시키면서 광로정을 변화시켜, 게이지 블록면의 간섭무늬와 베이스 플레이트 면의 간섭무늬가 각각 기준 십자선의 중앙에 위치할 때의 노브의 눈금을 읽음으로써 소수 차수를 계산하는 방법이었다. 그러나 이 방법은 사람의 눈으로 간섭무늬의 중심을 결정해야 하고 측정하는데 시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

Tsai[5]와 Bitou[6]는 간섭무늬의 CCD image로부터 공간적인 강도 곡선의 값을 구한 후 Fast Fourier Transform (FFT)[7]를 사용하여 소수 차수를 구하는 방법을 게이지 블록의 측정에 도입하였다. 이 방법은 평면도가 좋지 않은 게이지 블록의 간섭무늬에 적용하기에는 그다지 적당하지 않다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 있던 방법을 보완하여 FFT 방법을 적용하면서, 게이지 블록의 중앙 점 이외의 영향을 최소화 할 수 있는 방법을 개발하였으며, 이에 대한 검증을 실시하였다.

2. 이 론

2-1. 게이지 블록

2-1-1. 게이지 블록의 정의

게이지 블록은 내구성이 있는 재료로 양단면이 평평하고 서로 평행이 되도록 가공된 길이 단면 표준물로서, 길이와 등급에 따라 0.06 ㎛에서 8.00 ㎛에 이르는 길이의 정확도를 가진다[8]. 게이지 블록은 이와 같이 높은 길이의 정확도 때문에 산업현장에서 많은 종류의 길이 게이지 혹은 길이 측정기들을 교정(calibrate)할 때, 기준물로 사용되는 매우 중요한 단면 표준물(end standard)이다.
게이지 블록의 길이는 온도 20 ℃ (68 ℉), 압력 101,325 Pa (1 atmosphere)인 기준조건 하에서 정의된다. 대기압에서 측정하는 경우 압력 차이에 의한 길이 변화는 무시할 만한 양이므로 실제 측정에서는 온도차에 대한 길이 영향만 기준 조건에 맞게 보정하여 길이를 구한다.

2-1-2. 게이지 블록의 길이

게이지 블록의 길이는, 게이지 블록을 그와 같은 재질, 그리고 같은 표면상태를 가지는 베이스 플레이트에 밀착시켰을 때, 게이지 블록의 중앙 점으로부터 베이스 플레이트까지의 수직거리로 정의된다(Figure 1.). 여기서, l 은 측정면에 밀착되어 있는 면과 측정면의 어떤 특정한 점 사이의 수직한 거리를 나타내고, l_c 는 측정면의 중심 위치에서의 게이지 블록의 길이를 나타낸다. 일반적으로 게이지 블록은 여러가지 치수의 게이지 블록을 조합하여 밀착시킨 후 사용하는 경우가 많은데, 이 정의에 의해 밀착층의 두께를 따로 고려할 필요가 없으므로 여러 개의 게이지 블록을 조합하여 하나의 큰 게이지 블록 길이로 사용하는 것이 가능하다(Figure 2).

2-1-3. 게이지 블록의 편차(deviation)

수치적인 차이 $l - l_n$ 는 ρ로 나타낸다. 여기서 l_n 은 호칭 치수(nominal length)를 말한다.

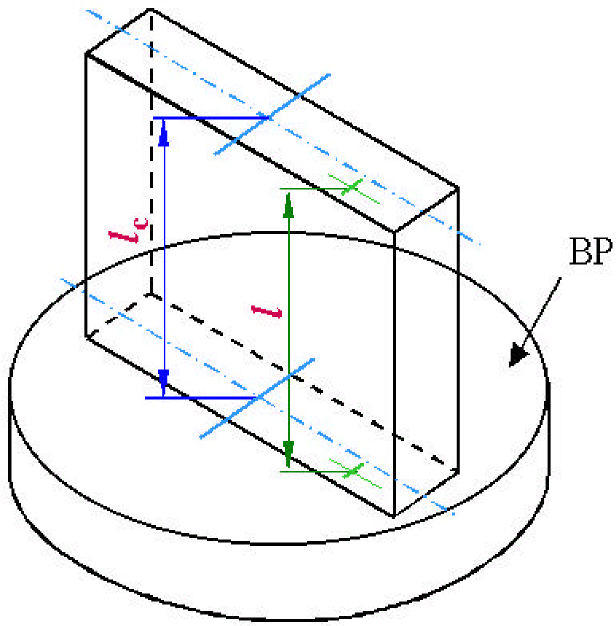

Figure 1. Center length l_c and another example of length l at any point of gauge block wrung to the plane surface of an auxiliary plate.

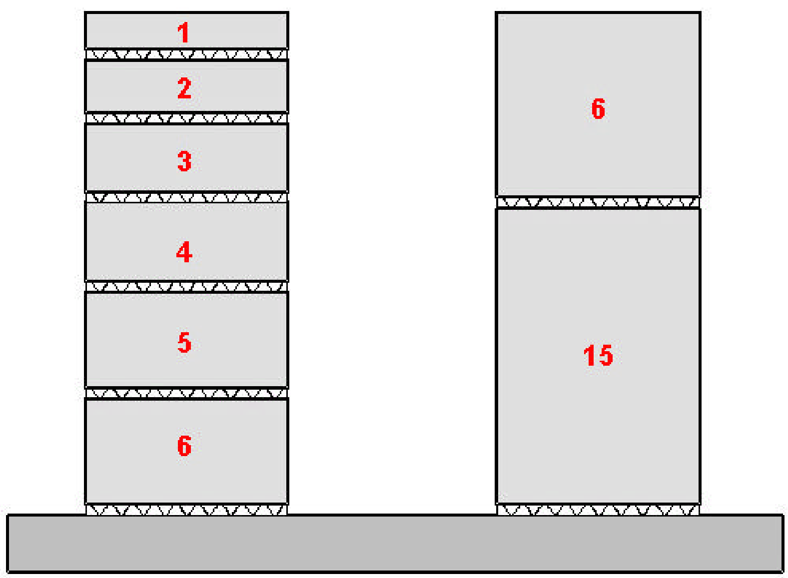

Figure 2. Combination of gauge block, Two cases of Overall length is 21 mm.

2-1-4. **평면도의 편차**(deviation from flatness)

측정면의 모든 점들 사이에서 평행한 면들 사이 최소 거리를 말한다. Figure 3. **을 보면** f_d**가 평면도의 편차를 나타낸다**.

2-1-5. **길이의 변이** (variation)

최대 길이 l_{max} **와 최소 길이 대해** l_{min} **사이의 차이를 말하는 것으로** v **로 나타낸다**(Figure 4.).

2-1-6. **게이지 블록의 재질과 공차에 따른 등급**

재질로는 가장 널리 쓰이는 스틸 (steel)**을 비롯하여 텅스텐 카바이드** (tungsten carbide), **크롬 카바이드** (chrome carbide), **세라믹** (ceramic) **등이 있으며 드물게는 제로두**(Zerodur)**나 하드글라스** (hard glass) **등을 사용하기도 한다**. **한 세트를 이루는 개개의 게이지 블록은 각기 다른 공칭 치수를 가지는데**, **이 길이는 표준 환경하에서의 값을 나타내며**, Table 1. **과 같이 허용공차에 따라 여러 등급**(K**급**, 0**급**, 1**급**, **그리고** 2**급**)**으로 나뉜다**[8].

2-1-7. **게이지 블록의 절대 측정**

현재 길이의 단위인 m(**미터**)**는** "**빛이 진공에서** 1 / 299 792 458 **초 동안 진행한 경로의 길이**"**로 정의되어 있다**[5][10]. **이 정의를 직접 길이 측정에 활용하기는 어려우므로**, **실제로 높은 정확도로 길이를 측정함에 있어서는 주파수가 매우 안정된 레이저를 사용하며**, **피측정물의 길이를 이 레이저의 파장과 비교함으로써 측정이 이루어지는데**, **이 비교 작업은 광학 간섭계를 통하여 이루어진다**.
게이지 블록의 길이 측정 역시 Figure 5. **와 같은 게이지 블록 간섭계를 이용하여 측정하며**, **측정에 사용하는 빛의 파장을 통하여 표준이 소급된다**(traceable to standard). **현재 사용하고 있는 광원은 카드뮴등** (^{114}Cd spectral lamp)**과 수은등** (^{198}Hg isotope lamp)**그리고 주파수안정화레이저 등이 있다**.

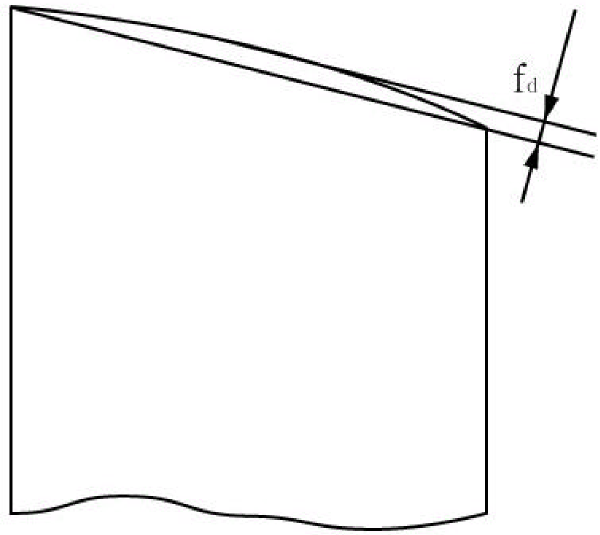

Figure 3. Deviation from flatness, f_d.

Figure 4. Nominal length l_n ; Center length l_c ; variation v with f_o and f_u ; limit deviations t_e for the length at any point , proceeding from the nominal length.

Table 1. limit deviation, t_e, of the length at any point of the measuring face from nominal length and tolerance, t_v, for the variation in length.

Unit : ㎛

Nominal Length l_n mm	K Grade		0 Grade		1 Grade		2 Grade	
	Limit deviation of length at any point from nominal length $\pm t_e$	tolence for the variation in length t_v	Limit deviation of length at any point from nominal length $\pm t_e$	tolence for the variation in length t_v	Limit deviation of length at any point from nominal length $\pm t_e$	tolence for the variation in length t_v	Limit deviation of length at any point from nominal length $\pm t_e$	tolence for the variation in length t_v
$0.5 \leq l_n \leq 10$	0.2	0.05	0.12	0.1	0.2	0.16	0.45	0.3
$10 < l_n \leq 25$	0.3	0.05	0.14	0.1	0.3	0.16	0.6	0.3
$25 < l_n \leq 50$	0.4	0.06	0.2	0.1	0.4	0.18	0.8	0.3
$50 < l_n \leq 75$	0.5	0.06	0.25	0.12	0.5	0.18	1	0.35
$75 < l_n \leq 100$	0.6	0.07	0.3	0.12	0.6	0.2	1.2	0.35
$100 < l_n \leq 150$	0.8	0.08	0.4	0.14	0.8	0.2	1.6	0.4
$150 < l_n \leq 200$	1	0.08	0.5	0.16	1	0.25	2	0.4
$200 < l_n \leq 250$	1.2	0.1	0.6	0.16	1.2	0.25	2.4	0.45
$250 < l_n \leq 300$	1.4	0.1	0.7	0.18	1.4	0.25	2.8	0.5
$300 < l_n \leq 400$	1.8	0.12	0.9	0.2	1.8	0.3	3.6	0.5
$400 < l_n \leq 500$	2.2	0.14	1.1	0.25	2.2	0.35	4.4	0.6
$500 < l_n \leq 600$	2.6	0.16	1.3	0.25	2.6	0.4	5	0.7
$600 < l_n \leq 700$	3	0.18	1.5	0.3	3	0.45	6	0.7
$700 < l_n \leq 800$	3.4	0.2	1.7	0.3	3.4	0.5	6.5	0.8
$800 < l_n \leq 900$	3.8	0.2	1.9	0.35	3.8	0.5	7.5	0.9
$900 < l_n \leq 1000$	4.2	0.25	2	0.4	4.2	0.6	8	1

2-1-8. 게이지 블록 간섭계

(1) 게이지 블록 간섭계의 구조

본 연구에서 사용한 게이지 블록 간섭계의 구조[11]는 Figure 5. 와 같다. 이 간섭계는 1984년 일본 Tsugami사가 만든 것으로 Tsugami사와 일본의 계량연구소 NRLM이 공동 개발한 모델이다. 광원으로는 ^{114}Cd 등과 ^{198}Hg isotope 등을 사용할 수 있으며 각각 4개의 파장을 이용한 측정이 가능하다. Cd 등은 적색(643.9 nm), 녹색(508.6 nm), 파랑(480.0 nm), 보라(467.8 nm)의 파장 성분을 가지며, 가간섭거리가 짧아서 주로 길이가 10 mm 이하인 게이지 블록의 측정에 사용되고, ^{198}Hg등은 노랑1(579.1 nm), 노랑2(577.0 nm), 녹색(546.1 nm), 보라(435.8 nm)의 파장성분을 가지는데, 가간섭 거리가 길어서 길이 10 mm 250 mm 까지의 게이지 블록 측정에 사용 가능하다. 카드뮴등과 수은등의 파장의 상대 안정도는 각각 7×10^{-8} 와 5×10^{-8} 이다(신뢰수준 99%). 광원의 선택은 Figure 5. 의 프리즘 3을 통해서 이루어진다. 카드뮴등을 선택할 경우에는 현재 Figure 5. 에 나타나있는 바와 같이 프리즘을 위치시켜, 램프에서 나온 빛이 프리즘을 통하여 반사되어 간섭계로 입사하게 되어있으며, 수은등을 사용할 경우에는 프리즘이 놓여있는 판을 회전시켜, Figure 5. 에 점선으로 나타난 위치로 프리즘을 이동시켜, 수은등이 프리즘을 통하지 않고 직접 간섭계로 입사하게 되어있다. 광원에서 나온 빛은 Figure 5. 의 렌즈(lens) 4에 의해 직경이 1 mm인 개구 (circular aperture) 5로 집속되며 이어 렌즈 6에 의해 평행광으로 바뀐다. 회절격자(grating) 7의 각도를 조절하여 4개의 파장 성분중 한 파장을 선택할 수 있으며, 선택된 빛은 거울 8에서 반사한 후 광분할기(beam splitter) 9로 진행한다. 여기서 투과한 성분의 빛은 게이지 블록(gauge block) 11과 베이스 플레이트(base plate) 12에서 반사하여 다시 광분할기로 돌아오고, 반사한 성분의 빛은 기준거울 10에서 반사한 후 광분할기 9로 와서 합쳐진다. 합쳐진 빛은 렌즈 13에 의해 원형 슬릿 14로 모인 후 렌즈 15에 의해 눈금판(reference line) 16에 투영된다. 이제 대안렌즈 17을 통해 Figure 6. 와 같은 간섭무늬를 눈으로 관찰할 수 있게 되는 것이다. Figure 5. 에서 광학적 쐐기(optical wedge) 19는 간섭무늬의 위치를 눈금판의 눈금위치로 정렬하는데 사용하는 것이며, 광학적 쐐기 18은 게이지 블록과 베이스 플레이트면 사이의 간섭무늬의 어긋난 양. 그리고 간섭무늬의 간격을 측정하기 위해 전체적으로 간섭무늬를 이동시키기 위한 쐐기이다. 광축을 점검하고 정렬하기 위해서는 광원으로서 전구 20을 사용하고, 광축조정용 렌즈계 24를

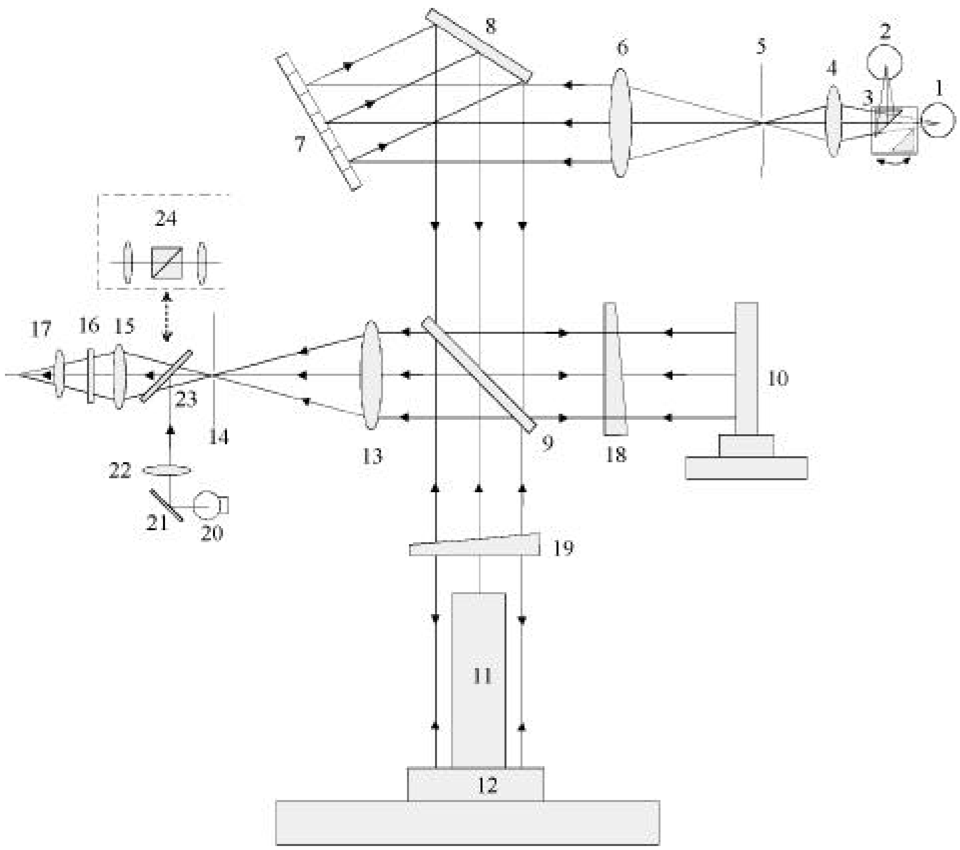

Figure 5. The Schematic of gauge block interferometer

1: Hg lamp, 2: Cd lamp, 3: Prism, 4: Condensing lens, 5: Aperture, 6: Collimating lens, 7: Grating, 8: Mirror, 9: Beam splitter, 10: Reference mirror, 11: Gauge block, 12: Base plate, 13: Telephoto(graphic) lens, 14: Aperture, 15: Lens, 16: Reference line, 17: Objective lens., 18: Wedge of measurement, 19: Wedge of arrangement, 20: Source for arranged axis , 21: Reflect mirror, 22: Lens , 23: Beam splitter , 24: Lens system for arranged axis

사용한다. 전구 20에서 나온 빛은 렌즈 22와 23에 의해 개구 14로 입사한 후, 기준거울 10에서 반사한 뒤에 되돌아오는데, 되돌아온 빛의 상이 정확히 개구 14에 위치하도록 기준거울을 조절하면 광축이 정렬되는 것이다.

(2) 게이지 블록 간섭계의 원리

게이지 블록 간섭계는 Twyman-Green 형태의 간섭계로 마이켈슨 간섭계와 구조는 같고 다만 사용 광원이 점광원 이라는 차이가 있다.
간섭무늬가 얻어지는 원리를 수식으로 전개해 보면 다음과 같다. 관찰하는 스크린(즉, 대안렌즈 17로 보면, 혹은 CCD 카메라를 이용해서 보면) 상의 한 점(x, y)에서의 강도는 기준거울(10)을 반사한 빛의 전기장의 진폭과 피검면(11, 12)을 반사한 빛의 전기장의 진폭 합에 의해 결정되므로 각 거울에 반사한 빛의 전기장을 각각 E_1, E_2라 하면,

$$E_1(x,y) = E_{01}(x,y)\exp[i(\omega t + \varepsilon_1)] \quad (2\text{-}1)$$

$$E_2(x,y) = E_{02}(x,y)\exp[i(\omega t + \varepsilon_2)] \quad (2\text{-}2)$$

이고 강도는 전기장의 제곱에 비례함으로 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I(x,y) &= |E_1(x,y) + E_2(x,y)|^2 \\ &= I_1(x,y) + I_2(x,y) + 2\sqrt{I_1(x,y)\cdot I_2(x,y)} \\ &\quad \times \cos[\phi(x,y)] \end{aligned} \quad (2\text{-}3)$$

단,

$$I_1(x,y) = |E_1(x,y)|^2$$

$$I_2(x,y) = |E_2(x,y)|^2$$

$\phi(x,y) = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ 이다.

여기서 우리가 관찰하는 간섭무늬의 강도는 식 (2-3)과 같이 나타나고 $\phi(x,y)$는 기준거울과 피검면을 반사한 파면간의 위상차를 나타낸다.

(3) **합치법**

광분할기에서 투과한 빛 중에서 게이지 블록 면에서 반사한 부분과 베이스 플레이트에서 반사한 부분의 빛은 진행한 거리가 다르므로 위상이 다르며, 기준거울에서 반사한 빛과 간섭을 일으킬 때 Figure 6. **와 같이** a**만큼 치우친 간섭무늬를 형성한다. 간섭무늬의 간격을** b**라고 하면, 측정 환경 하에서의 게이지 블록의 길이** L_T **는 측정에 사용한 빛의 진공파장을** λ_{0i}, **공기 굴절률을** n_i**이라고 할 때,**

$(i = 1,2,3,4)$

$$L_T = (M_i + F_i)\frac{\lambda_{0i}}{2n_i} \tag{2-4}$$

이 된다. 여기서 M_i**과** F_i**는 각각 간섭무늬 차수의 정수부와 소수부로서,**

$$F_i = \frac{a_i}{b_i} \tag{2-5}$$

이다. 그런데 M_i **은 직접 측정할 수 없으므로, 회절 격자의 각도를 바꾸어가며 여러 파장을 사용하여** a_i/b_i **값들을 구한 후, 이들로부터 합치법**(exact fraction method)[12]**을 이용하여** M_i **값을 구하여야한다. 이를 간략히 살펴보면,**

$$\left(M_1 + \frac{a_1}{b_1}\right)\frac{\lambda_{01}}{2n_1} = \left(M_2 + \frac{a_2}{b_2}\right)\frac{\lambda_{02}}{2n_2} = \left(M_3 + \frac{a_3}{b_3}\right)\frac{\lambda_{03}}{2n_3} \tag{2-6}$$

에서 먼저 M_1**의 초기 시험값으로** $L_0/\left(\frac{\lambda_{01}}{2n_1}\right)$**를 사용하여 시험값** L_{trial} **을 구한다. 이 값을** $\frac{\lambda_{0i}}{(2n_i)}$**으로 나눈 나머지 값과** $\frac{a_i}{b_i}$**를 비교하여 차이가 측정오차 이내의 값으로 같아지는** L_{trial}**을 구한다. 이와 같이 하면** M_i **값은 다음과 같이 구해진다.**

$$M_i = L_{trial}/\frac{\lambda_{0i}}{(2n_i)} \tag{2-7}$$

이제 M_i **를 식** (2-6)**에 대입하여 각 파장을 이용하여 측정한 길이값** L_i **를 구하고, 이들을 평균하여 측정 환경하에서의 게이지 블록의 길이** L_T **를 구한다.**

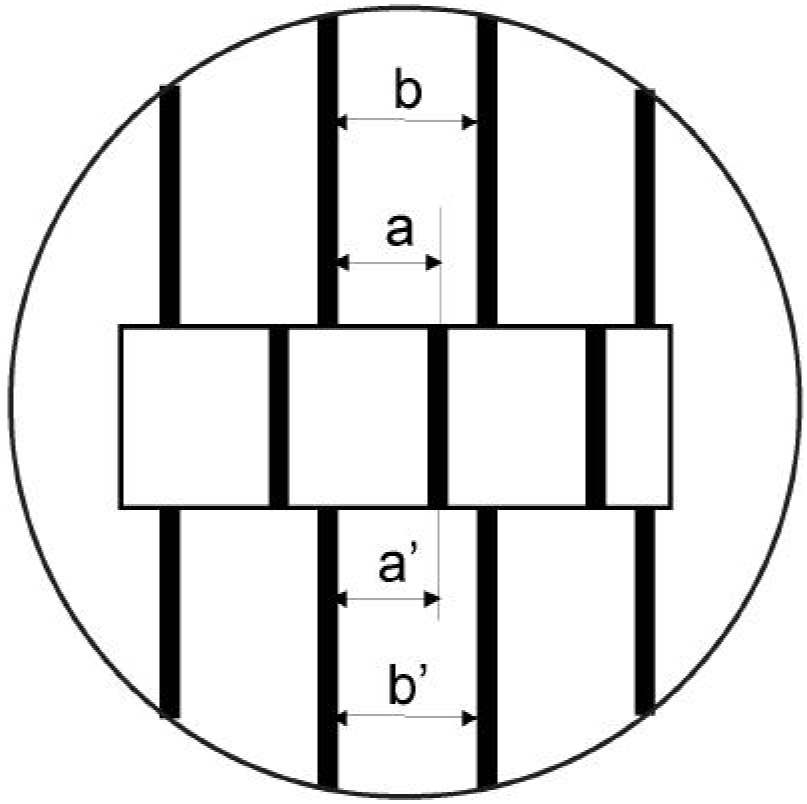

Figure 6. Fractional fringe order.

$F = (a/b + a'/b')/2$

(4) 게이지 블록 길이의 보정

위의 식 (2-4)은 엄밀한 의미로는 아직 정확한 표현이 아니다. 그 이유는 간섭무늬로부터 읽은 무늬의 어긋난 양 b는 게이지 블록의 길이뿐 아니라 여러 요인에 의한 위상변화효과가 합쳐진 결과이기 때문이다. 따라서 아래에 나열된 요인들에 의한 위상변화량들을 정확히 알아내어 보정해주어야 정확한 측정이 이루어질 수 있다.

① 빛의 사각 입사에 의한 위상변화량에 대한 보정 (l_{ob})

빛이 간섭계의 광축과 나란하게 입사하지 않으면, 입사각과 게이지 블록의 길이에 비례하는 위상변화가 유발되며, 이에 의한 길이 오차에 대한 보정량은 아래의 표현식과 같다.

$$l_{ob} = L\frac{\theta^2}{2} \qquad (2\text{-}8)$$

L은 게이지 블록 길이 이고 θ는 위상 변화량이다.

Twyman-Green형 간섭계에서는 광축조정을 정확히 실시함으로써 입사광의 사각입사량을 0으로 만들 수 있다.

② 유한한 개구 크기에 의한 오차 보정 (l_A)

광원에서 나온 빛을 광학계를 이용하여 평행광으로 만들어서 측정에 사용하지만, 실제적으로는 입사동(entrance pupil)이 유한한 크기를 가지기 때문에 이상적인 평행광으로는 만들 수 없다. 따라서 빛의 사각입사 효과가 생기게 되며, 이 효과는 입사동의 크기와 피측정 게이지 블록의 길이에 비례하며, 측정값을 실제 길이보다 짧도록 한다. 유한 개구 크기에 의한 길이 오차 보정량 l_A는 원형개구(circular aperture)를 사용하면, 근사적으로

$$l_A = \frac{L \times D^2}{16 f^2} \qquad (2\text{-}9)$$

가 된다. L은 게이지 블록 길이, D는 개구의 지름 그리고 f는 collimating lens의 초점 거리이다.

③ 광학계의 불완전함에서 기인하는 오차 보정 (l_E)

광학계의 면이 이상적인 평면에서 벗어난다면, 게이지 블록 간섭계의 간섭무늬는 게이지 블록의 길이에 대한 정보뿐 아니라, 간섭계의 광학계가 가지는 자체 오차도 포함하게 된다. 따라서 가능하면 미리 광학계 자체의 오차의 크기를 측정하여 이 값을 간섭무늬의 분석으로부터 구한 길이에서 빼주도록 한다.

④ 게이지 블록과 베이스 플레이트의 표면거칠기 차이에 의한 위상 변화에 대한 보정 (l_R)

앞서 언급한 바와 같이 게이지 블록의 길이 정의는 게이지 블록을 그와 같은 재질 그리고 같은 표면상태를 가지는 베이스 플레이트에 밀착시켰을 때, 게이지 블록의 중앙 점으로부터 베이스 플레이트 면까지의 수직거리로 정의되어있다. 따라서 만일 게이지 블록과 베이스 플레이트의 표면거칠기가 다르다면 양면에서의 빛의 유효반사면 사이의 거리는 게이지 블록의 정의와는 다른 양이 되며, 이에 의해 간섭무늬의 위상이 변하는 것이다. 이를 보정하기 위해서는 표면거칠기의 크기에 따른 반사시 위상변화량을 측정하여, 표면거칠기의 차이에 의한 위상변화량을 알아내야 한다. 이를 위한 방법으로는 stacking 방법, 적분구를 사용하는 TIS방법, coupled 간섭계 방법, 그리고 Newton's rings 방법 등이 알려져 있다. 본 연구에서는 간섭계를 이용한 방법을 사용하고 있다.

⑤ 재질에 따른 위상 변화에 대한 보정 ($l_{o.c}$)

만일 게이지 블록과 베이스 플레이트의 재질이 다르다면 재질의 광학상수의 차이에 의해 반사할 때 위상 변화량의 차이가 발생하게 된다. 공기의 굴절률을 n_1, 반사면의 복소 굴절률을 $n_2 + i \cdot \chi_2$ 라고 하면 반사할 때 생기는 위상변화량 ϕ는

$$\phi = \tan^{-1}\left\{\frac{2n_1\chi_2}{n_1^2 - n_2^2 - \chi_2^2}\right\} \tag{2-10}$$

로 표현된다. 그러므로 게이지 블록과 다른 재질의 베이스 플레이트를 사용한 경우, 두 재질에 대한 이 위상변화량의 차이 값을 보정해주어야 한다. 공기의 굴절률을

1로 놓고, 두 재질을 a와 b 라고 하면,

$$
\begin{aligned}
l_{o.c} &= (\phi_a - \phi_b)\frac{\lambda_0}{4\pi n} \\
&= \frac{\lambda_0}{4\pi n}\left\{\tan^{-1}\left(\frac{2\chi_a}{1^2 - n_a^{\,2} - \chi_a^{\,2}}\right)\right. \\
&\qquad \left. - \tan^{-1}\left(\frac{2\chi_b}{1^2 - n_b^{\,2} - \chi_b^{\,2}}\right)\right\}
\end{aligned}
\tag{2-11}
$$

가 된다. 본 연구에서는 게이지 블록과 같은 재질의 베이스 플레이트를 사용하므로 보정량은 0 이 된다.

⑥ 밀착효과에 의한 위상변화량에 대한 보정 (l_w)

게이지 블록을 다른 재질의 베이스 플레이트에 밀착하여 사용하는 경우에는, 위의 2가지 위상 보정을 하여주더라도, 같은 재질의 베이스 플레이트에 밀착하여 사용한 경우와 측정값에 차이가 나타나게 되는 것이 일반적이며, 이것을 재질에 따른 밀착 효과에 의한 위상변화라고 한다. 이 양은 많은 실험 측정을 통하여 경험적으로 구해내는 수밖에 없다. 본 연구에서는 게이지 블록과 같은 재질의 베이스 플레이트를 사용하므로 이 보정량은 0이다.

⑦ 게이지 블록의 기하학적 불완전성에 의한 보정 (l_G)

게이지 블록의 측정 면의 평면도 혹은 평행도가 이상적이지 않으면 이로 인한 위상변화가 생기게 된다. 특히 평행도가 이상적이지 않은 경우, 정확히 중심에서 측정이 이루어지지 않으면 기울기에 의한 오차가 생길 수 있다.

⑧ 온도에 의한 열팽창 효과의 보정

온도 t_g 에서 측정된 호칭치수가 L_0 인 게이지 블록의 길이 L_{tg}는 20℃에서 정의되는 게이지 블록의 길이 L 과 다를 수 있다. 즉,

$$
L_{tg} = L(1 + \alpha(t_g - 20)) \tag{2-12}
$$

이다. 여기서 α 는 게이지 블록의 열팽창 계수를 나타낸다.

따라서 20 ℃ 에서의 게이지 블록의 길이 L은

$$L = L_{tg} / \{1 + \alpha(t_g - 20)\}$$

$$= L_{tg} - \alpha(t_g - 20)L_t \qquad (2\text{-}13)$$

$$= L_{tg} - \alpha(t_g - 20)L_0$$

가 된다.

따라서 열팽창 효과에 대한 보정항은 $-\alpha(t_g - 20)L_0$ 가 되는 것이다. 게이지 블록의 길이는 전체 간섭무늬 수(M), 관찰된 소수 차수의 수(F), 공기에서 파장, 게이지 블록 온도, 간섭계 정정 factor 와 각종 위상 변화량의 보정을 고려하여 계산한다.

(5) 공기굴절률의 측정과 파장 계산

① 측정환경

게이지 블록 길이의 절대 측정을 위한 실험실 온도는 약 20±0.5℃ 그리고 상대적인 습도는 50 %이하가 되도록 한다[(8)]. 간섭계를 둘러싼 housing내에서 온도 변화는 온도 안정화 장치에 의해 (20 ± 0.05) ℃로 유지되므로 간섭계와 게이지 블록 둘 다 충분히 안정화(stability)된 상태를 유지한다. 간섭계는 게이지 블록과 빛의 파장을 비교하기 때문에 파장의 정확도는 기본적으로 매우 중요하므로, 간섭계 내부속에 온도, 대기압, 대기중의 수증기, 그리고 CO_2 농도는 게이지 블록 길이를 측정하는 동시에 함께 측정 하여 공기 굴절률을 계산함으로써 측정 환경하에서의 정확한 파장 값을 구하였다.

② 공기 굴절률의 측정

Edlen의 1966년 공기 굴절률 식은 파장을 계산하는데 사용된다. 빛의 파장 λ는, 진공상태에서의 파장을 λ_0라하고 빛의 속도를 c, 빛의 주파수를 f, 공기의 굴절률을 n 이라고 할 때,

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{c}{nf} \qquad (2\text{-}14)$$

와 같이 표현된다. 광원의 주파수가 매우 높은 정확도로 알려졌다고 하여도 측정환경에 따라 공기의 굴절률이 바뀌므로, 파장은 결국 공기 굴절률에 의해 변화하며, 공기 굴절률의 측정정확도에 의해 그 정확도가 제한됨을 알 수 있다. 따라서 정확한 공기 굴절률의 측정은 게이지 블록 측정에 있어서 매우 중요한 부분을 차지한다.

광원의 각 파장성분 λ_i $(i = 1, 2, 3...)$으로 측정할 당시의 온도 t_i, 압력 p_i, 수증기 분압 f_i, 그리고 CO_2의 농도 x_i에 대한 측정값이 필요하다. 이 값들을 사용하여 공기 굴절률을 표현하면 아래의 식과 같다[13].

$$n_i = 1 + A_i \cdot B_i - C_i \tag{2-15}$$

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{10^{-8}}{93214.60}\{8091.37 + 2333983/(130 - \sigma_i^2) \\ &\quad + 15518/(38.9 - \sigma_i^2)\} \times \{1 + 0.5327(x_i - 0.00040)\}p_i \\ &\equiv A_{ai}\{A_{bi} + A_{ci}/(A_{di} - \sigma_i^2) + A_{ei}/(A_{fi} - \sigma_i^2)\} \\ &\quad \times (1 + A_{gi}(x_i - A_{hi}))\}p_i \end{aligned} \tag{2-16}$$

$$\begin{aligned} B_i &= \frac{1 + 10^{-8}(0.5953 - 0.009876\,t)p_i}{1 + 0.0036610\,t_i} \\ &\equiv \frac{1 + B_{ai}(B_{bi} - B_{ci}t_i)p_i}{1 + B_{di}t_i} \end{aligned} \tag{2-17}$$

$$\begin{aligned} C_i &= f_i\,(3.8020 - 0.0384\,\sigma_i^2) \times 10^{-10} \\ &\equiv C_{ai}(C_{bi} - C_{ci}\,\sigma_i^2)f_i \end{aligned} \tag{2-18}$$

$$\sigma_i = 1/\lambda_i \tag{2-19}$$

여기서 각 입력량의 단위는 $\sigma/\mu\mathrm{m}^{-1}$, $p_i\,/Pa$, $f_i\,/Pa$, $t_i\,/℃$ 이다.

절대온도 T에서 공기중 포화수증기압 p_{sv}은

$$\begin{aligned} p_{sv} &= \exp(1.2378847 \times 10^{-7}T^2 \\ &\quad - 0.019121316\,T + 33.93711047 - 6343.1645\,T^{-1}) \end{aligned} \tag{2-20}$$

와 같으므로, 파장 λ_i로 측정하는 경우의 수증기 분압 f_i는 상대습도를 측정한 후, 포화수증기압에 대한 위의 실험식을 통하여 계산할 수 있다. 즉,

$$
\begin{aligned}
f_i &= p_{sv} \times 0.01 \times RH_i \\
&= 0.01RH_i \cdot \exp(1.2378847 \times 10^{-5}\ T_i^2 \\
&\quad - 0.019121316\ T_i + 33.93711047 - 6343.1645\ T_i^{-1}) \\
&\equiv 0.01 \cdot RH_i \cdot \exp(f_{ai}\ T_i^2 + f_{bi}\ T_i + f_{ci} + f_{di}\ T_i^{-1})
\end{aligned} \tag{2-21}
$$

2-2. 푸리에 변환(Fourier transform)의 기본 원리

2-2-1. 푸리에 변환(Fourier transform)

(1) **푸리에 해석**(Fourier analysis) **또는 푸리에 급수**(Fourier series)

비정현 함수 (anharmonic wave)**는 서로 다른 진폭과 파장을 가진 조화 함수들의 합으로 나타낼 수 있다**[14]. **이 이론은 푸리에 정리**(Fourier theorem)**로 알려진 이론에 근거하고 있는데**, **이것은 공간 주기가 λ인 함수** *f(x)***가 그 파장의 정수분의 일** (**즉**, λ, λ/2 ,λ/3 , ...)**인 조화 함수들의 합으로써 합성될 수 있다는 정리이다**. **이 정리를 수식으로 나타내보면**,

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos mkx + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin mkx \tag{2-22}$$

이고, **여기서**, $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$, $A_m = C_m \cos \varepsilon_m$, $B_m = -C_m \sin \varepsilon_m$

이다. **특정한 주기 함수** *f(x)***에 대한 계수** A_0, A_m, **그리고** B_m**을 구하는 과정을 푸리에 해석**(Fourier analysis)**이라고 하고**.
식(2-22)**을 풀이해 보면**,

$$A_0 = \frac{2}{\lambda}\int_0^{\lambda} f(x)\,dx \tag{2-23}$$

$$A_m = \frac{2}{\lambda}\int_0^{\lambda} f(x)\cos mkx\ dx \tag{2-24}$$

$$B_m = \frac{2}{\lambda}\int_0^{\lambda} f(x)\sin mkx\ dx \tag{2-25}$$

가 되어, **주기 함수** *f(x)***는 푸리에 급수**(Fourier series)**가 된다**.

(2) 푸리에 적분(Fourier integrals)

푸리에 급수에서 λ가 증가해서 함수가 단일의 사각 펄스(single square pulse) 형태가 되면, 즉 다른 말로, λ가 ∞ 에 다다르면 spectral lines은 서로 무한대로 가까워지게 될 것이다.
이와 같이 푸리에 급수에서 λ가 무한대로 갈 때, 푸리에 적분(Fourier integral) 이라고 부른다.

$$f(x) = \frac{1}{\pi}\left[\int_0^{\infty} A(k)\cos kx \; dk + \int_0^{\infty} B(k)\sin kx \; dk\right] \tag{2-26}$$

$$A(k) = \int_{\infty}^{\infty} f(x)\cos kx \; dx \tag{2-27a}$$

식 (2-27a)는 푸리에 코사인 변환(Fourier cosine transforms) 이고,

$$B(k) = \int_{\infty}^{\infty} f(x)\sin kx \; dx \tag{2-27b}$$

식 (2-27b)는 푸리에 사인 변환(Fourier sine transforms) 이다.
푸리에 급수는 주기적인 함수의 주파수 정보를 얻을 수 있지만 푸리에 적분은 비주기적인 함수의 주기를 무한대로 보낸 것이다. 주기가 무한대가 되면 그 함수는 반복적인 형태가 나올 수 없다. 사인 변환과 코사인 변환은 다음처럼, 단일의 복소함수(single complex exponential)로 통합하여 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} f(x) = & \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} \cos kx \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\cos kx\,dx\,dk \\ & + \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} \sin kx \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\sin kx\,dx\,dk \end{aligned} \tag{2-28}$$

위 식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$f(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F(k)e^{-ikx}dk. \tag{2-29}$$

$$F(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{ikx}dx. \tag{2-30}$$

여기서, 함수 $F(x)$는 $f(x)$의 Fourier transform이라고 말하고 이것은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(k) = \mathcal{F}\{f(x)\}. \tag{2-31}$$

$$F(k) = A(k) + iB(k) \tag{2-32}$$

$A(k)$는 $F(k)$의 실수 부분이고 반면에 $B(k)$는 허수 부분이다.

이것은 실수 값 진폭(amplitude)항 $|F(k)|$인 진폭 스펙트럼(amplitude spectrum), 그리고 실수 값 위상 φ(k)인 위상 스펙트럼(phase spectrum)으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(k) = |F(k)|\, e^{i\phi(k)}, \qquad (2\text{-}33)$$

*F(k)*는 *f(x)*의 변환, *f(x)* 자체는 *F(k)*의 역 푸리에 변환(inverse Fourier transform)이라고 하고 다음과 같이 쓴다.

$$f(k) = \mathcal{F}^{-1}\{F(x)\} = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{f(x)\}\}. \qquad (2\text{-}34)$$

*f(x)*와 *F(k)*는 푸리에 변환 쌍(Fourier-transform pair) 이다. 변환을 하는 것이 가능하고 그것의 역은 공간 주파수(spatial frequency) $\kappa = 1/\lambda = k/2\pi$의 항으로 나타낼 수 있다. 그것을 표현하는 방법은 지수함수에서의 음수 부호 때문에 변환이 역 변환과 정확하게 같지 않다. 따라서 다음과 같이 식을 나타낸다.

$$\mathcal{F}\{F(x)\} = 2\pi f(-\pi) \qquad (2\text{-}35a)$$

$$\mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}(k)\} = f(k) \qquad (2\text{-}35b)$$

$f(x) = f(-x)$ 같은 우함수의 경우 대부분 별문제가 되지 않는다. 그래서 함수와 그것의 변환 사이를 한 쌍으로 다룰 수 있다. f 가 공간이 아니라 시간의 함수이면, 시간 공간으로 적당한 변환을 하기 위해 t를 x자리를 대치하고 k는 ω로 대치한다.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)\, e^{-i\omega t} d\omega \qquad (2\text{-}36)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\, e^{i\omega t} dt. \qquad (2\text{-}37)$$

*f(x)*가 함수들의 합이면, 이것의 변환은 각각 함수의 변환의 합과 같다.

2-2-2. DFT (Discrete Fourier Transform)

연속함수에서는 푸리에 변환을 하면 되지만 비 연속 함수에서는 DFT를 행한다[15].
파동 함수의 주기(interval)가 τ로 샘플링 되었다고 하면, sampled sequence $f(n\tau)$는 $f(0), f(1\tau), f(2\tau), f(3\tau), f(4\tau), f(5\tau), f(6\tau).....f[(N-1)\tau]$라 할 수 있다. (n = 0. . . . . N-1)
그래서 $f(n\tau)$의 DFT는 주파수 영역(frequency domain)에서 *F(k)*는 *F(0), F(1), F(2), F(3), ...F[(N-1)]* 같은 값을 갖는다.
DFT는 다음 식과 같다.

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\tau)\, e^{-ik\omega n\tau} = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\tau)\, e^{-i2\pi kn/N} \quad (\omega = 2\pi/NT) \tag{2-38}$$

그리고 중요한 DFT **의 성질이 있는데** k **번째의 요소와** $k+N$ **번째 요소를 비교하면**

$$\begin{aligned} F(k+N) &= \sum_{n=0}^{N-1} f(n\tau) e^{-ik2\pi n/N} e^{-iN2\pi n/N} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} f(n\tau) e^{-ik2\pi n/N} e^{-iN2\pi n} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} f(n\tau) e^{-ik2\pi n/N} = F(k) \end{aligned} \tag{2-39}$$

따라서 위 식에서 DFT**는 주기** N**에 대하여 주기적으로 나타난다**.

만약 8**개의 점에서** DFT**를 실행한다고 하면 총** 8×8 **번의** complex **곱을 실시해야 하고** 8×7 **번의 덧셈을 해야 한다**. **그래서** N **개점에서** DFT**는** N^2**번의 곱과** $N(N-1)$ **합을 계산해야 한다**. **만약** N=1024 **개라면 엄청난 계산 시간이 필요하다**. **따라서 이 작업을 개선하기 위해서 나온 알고리즘이** FFT(Fast Fourier Transform)**이다**.

2-2-3. FFT(Fast Fourier Transform)

FFT**는** DFT**에 비해** N^2**의** complex **곱 계산량을** $\frac{N}{2}\log_2 N$ **번으로 낮출 수가 있고 따라서 계산 속도도 훨씬 빠르다**[15].

(1) FFT **의 알고리즘**

DFT **식**

$$F_1(k) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n e^{-i2\pi kn/N} \tag{2-40}$$

여기서 $W_n = e^{-i2\pi/N}$ **이라고 하면**,

$$F_1(k) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n W_n^{kn}, \qquad k = 0, \ldots\ldots, N-1 \tag{2-41}$$

$$W_N^2 = (e^{-i2\pi/N})^2 = e^{-i2\pi 2/N} = e^{-i2\pi/\frac{N}{2}} = W_{\frac{N}{2}} \tag{2-42}$$

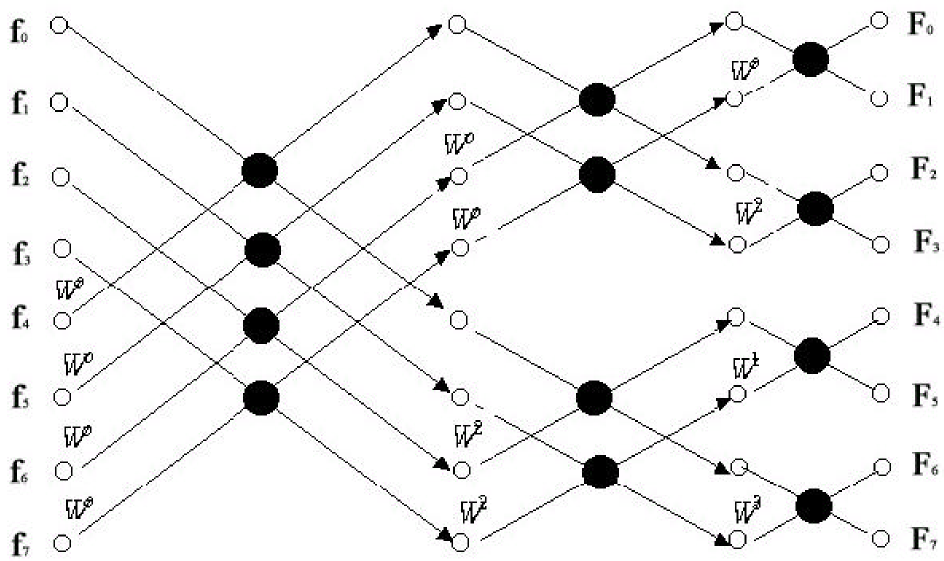

Figure 7. Butterfly computation.

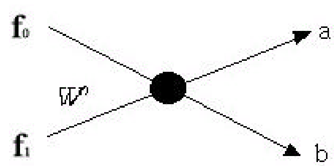

Figure 8. The computation method of just one Butterfly.

$$W_N^{(k+\frac{N}{2})} = W_N^k W_N^{\frac{N}{2}} = W_N^k e^{-i\left(\frac{2\pi}{N}\right)\left(\frac{N}{2}\right)} = W_N^k e^{i\pi} = -W_N^k \tag{2-43}$$

위의 관계식을 DFT**에 적용하여 짝수** sequence **와 홀수** sequence **로 나눌 수 있다**.

$$\begin{aligned} F_1(k) &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f_{2n} W_N^{k2n} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f_{2n+1} W_N^{k(2n+1)} \\ &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f_{2n} W_N^{k2n} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f_{2n+1} W_N^{k2n}, \end{aligned} \qquad k=0, \quad ..... \quad N-1 \tag{2-44}$$

또 위의 관계에 의해 $W_N^{2nk} = W_{\frac{N}{2}}^{nk}$ **임으로 다음 식과 같아진다**.

$$F_1(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f_{2n} W_{\frac{N}{2}}^{kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f_{2n+1} W_{\frac{N}{2}}^{kn}, \qquad k=0, \quad ..... \quad N-1 \tag{2-45}$$

이 식을 살펴보면 우측항은 $N/2$**개의** DFT**로 이루어져 있는걸 볼 수 있다**. **이 식을 간단하게 표현하면**

$$F_1(k) = F_{11}(k) + W_N^k F_{12}(k), \qquad k=0, \quad ..... \quad N-1 \tag{2-46}$$

로 나타낼 수 있다. **따라서** $F_{11}(k)$, $F_{12}(k)$**를 위와 같은 방법으로 다시 나누면**,

$$\begin{aligned} F_{11}(k) &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} f_{4n} W_{N/2}^{k2n} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f_{4n+2} W_{N/2}^{k(2n+1)} \\ &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} f_{4n} W_{N/4}^{kn} + W_{N/2}^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} f_{4n+2} W_{N/4}^{kn}, \end{aligned} \qquad k=0, \quad ..... \quad N-1 \tag{2-47}$$

$F_{12}(k)$ **마찬가지 방법으로 하면**, **위와 같이 모두** $N/4$**개의** DFT**로 나눌 수가 있다**. **이와 같이** N **개의** data**를** FFT **하려면** $N=2^r$ **로 정하고**, **각 계산 단계를** $r = \log_2 N$ **개로 나눌 수 있다**. **따라서 한 가지 주의 할 것이 있다면** FFT**를 사용하기 위해선** 2^N **개의** data**를 사용해야 한다는 것이다 위와 같은 계산을** Butterfly computation **이라고 하고 이를 도식화하면 다음** Figure 7. **과 같다**..

하나의 Butterfly **계산 방법을 살펴보면**, Figure 8**와 같은 경우**

$a = f_0 + W^0 f_4$, $\quad b = f_0 - W^0 f_4$ **가 된다**.

따라서 총 계산량은 $r = \log_2 N$ **그리고 각 단계마다의** butterfly **개수를 곱한 것이 된다**. **예를 들어** 8**개의 겨우**, r=3, butterfly **개수** = 4**개 그래서** 12**번이 된다**. **컴퓨터로 많은** data**의** FFT**를 계산하기 위해서는 위와 같은 알고리즘을 적절한 언어로** coding**하여 사용하면 된다**.

2-3. 푸리에 변환 방법을 이용한 간섭 무늬 분석

2-3-1. 원리

기본적으로 게이지 블록의 길이 L을 광학 간섭계를 사용하여 측정할 때 공기중의 빛의 파장을 λ라고 하면 L은 다음과 같이 표현할 수 있다[5],[6].

$$L = (M + F)\frac{\lambda}{2}, \tag{2-48}$$

여기서 $(M+F)$는 간섭무늬의 차수로서, M은 정수부, F는 소수부를 나타낸다. 여러 개의 파장에 대해 간섭무늬를 형성시켜 소수차수 F를 구하고, 합치법에 의해 M을 찾으면 게이지 블록의 길이를 구할 수 있게 된다. 이 소수차수 F를 구하는데 있어서 FFT를 적용한다. Figure 6. 과 같은 주기적인 직선 간섭무늬의 강도분포를 $i(x, y)$라고 하면 $i(x, y)$는

$$i(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[2\pi f_0 x + \phi(x,y)] \tag{2-49}$$

로 표시될 수 있다.

여기서 f_0 는 기준면과 측정면 사이의 경사각에 의해 형성된 직선 간섭무늬의 공간 반송 주파수 (spatial carrier frequency)이며, $\phi(x,y)$는 간섭무늬의 위상을 나타낸다. 간섭무늬로부터, 베이스 플레이트 상에서의 ϕ값과 게이지 블록면에서의 ϕ값의 차이를 구하여 2π로 나눠주면 소수차수 F를 얻을 수 있다. 간섭무늬로부터 FFT 방법으로 위상 ϕ를 구하는 방법은 다음과 같다.

위의 식 (2-49)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} i(x,y) = {} & a(x,y) + c(x,y)\exp(2\pi i f_0 x) \\ & + c^*(x,y)\exp(-2\pi i f_0 x) \end{aligned} \tag{2-50}$$

여기서, $c(x,y)$는

$$c(x,y) = b(x,y)\exp[i\phi(x,y)]/2 \tag{2-51}$$

이다.

식 (3-1-3)을 FFT 알고리즘을 사용하여 푸리에 변환시키면,

$$I(f_x,f_y) = A(f_x,f_y) + C(f_x - f_0,f_y) + C^*(f_x + f_0,f_y). \tag{2-52}$$

가 얻어진다.

이 결과로부터 filtering을 통해 $C(f_x - f_0,f_y)$를 제외한 성분은 모두 제거한 후, 주파

수 공간에서 원점으로 f_0 만큼 이동시키면, $C(f_x, f_y)$를 얻을 수 있으며, 이를 역 푸리에 변환(inverse FFT)시키면 $c(x,y)$ 가 얻어진다. 따라서 식(2-51)으로부터,

$$\phi(x,y) = \arctan\left[\frac{\mathrm{Im}\{c(x,y)\}}{\mathrm{Re}\{c(x,y)\}}\right] \qquad (2\text{-}53)$$

와 같이 위상을 구할 수 있는 것이다.

arctangent 함수는 $-\pi/2$에서 $\pi/2$ 사이의 값으로 계산해 주지만 $\mathrm{Im}\{c(x,y)\}$ 와 $\mathrm{Re}\{c(x,y)\}$의 부호를 고려하면 $-\pi$ π 영역의 값으로 확장시킬 수 있게 된다.

이제 베이스 플레이트면 위의 간섭무늬로부터 $\phi_{bp}(x, y_{bp})$를 구하고 게이지 블록 위의 간섭무늬로부터 $\phi_{gb}(x, y_{gb})$를 구하면

$$F = (\phi_{gb} - \phi_{bp})/2\pi \qquad (2\text{-}54)$$

로서 소수차수가 구해지는 것이다. 실제 측정에서는 정확도를 높이기 위해 베이스 플레이트의 ϕ는 위와 아래 두 곳에서 측정하여 평균값을 사용하였다. 즉,

$$F = \frac{1}{2}(F_{위} + F_{아래}) = \frac{1}{2\pi}\left\{\phi_{gb} - \frac{(\phi_{bp위} + \phi_{bp아래})}{2}\right\} \qquad (2\text{-}55)$$

와 같이 구하였다.

3. 실험 및 결과

3-1. 실험 방법

3-1-1. 실험장치

게이지 블록 간섭계에 의한 게이지 블록 길이 측정의 실험 장치도 사진과 그림을 Figure 9., Figure 10., 그리고 Figure 11.에 나타냈다. 게이지 블록 간섭계는 Tsugami 사의 NRLM-Tsugami gauge block interferometer를 수정하여 사용하였다. 간섭 무늬를 기록하는데 사용한 CCD 카메라는 Watec 사의 LCL-903HS 모델이며, frame grabber로는 National Instrument(NI) 사의 NI PCI-1408을 사용하였다. 광학 쐐기의 움직인 양을 측정하기 위해 Heidenhain 사의 길이 게이지(length gauge) CT60M 과 디스플레이 ND221B를 사용하였다. 측정하고자 하는 게이지 블록의 온도를 측정하기 위해서는 백금 저항 온도계와 T형 차등 열전대(differential thermocouple)를 사용하였다. 사용한 장치들로는 T형 열전대, Keithley 사의 나노볼트미터(nanovoltmeter) model 182, 그리고 열전대 선택을 위해 Keithley 사의 스캐너 카드 7168이 내장된 다채널 스캐너 705를 사용하였고, 기준 접점의 온도를 측정하기 위해 빙점(ice point)저항이 25.5 Ω인 표준 백금 저항 온도계(Standard Platinum Resistance Thermometer : SPRT)를 사용하였다. 사용한 model은 Rosemount 162 CE 이며, 명목값(niminal value)이 25 Ω인 표준저항 (Tinsley사의 5685A 모델) SPRT의 저항비를 ASL사의 AC 브릿지(bridge)인 F17A를 사용하여 측정한 후, 국제온도눈금(ITS 90)에 의거하여 온도로 환산하였다.
파장에 따른 공기 굴절률을 측정하기 위해서 간섭계 내부의 공기 온도, 습도, 압력, 그리고 CO_2 농도를 측정하였다. 습도는 Vaisala 사의 model HM 138, 압력은 DRUCK 사의 압력계로 digital pressure indicator DPI 140, 그리고 CO_2 농도는 Fuji electronic 사의 CO_2 gas 측정기를 사용하였다. FFT 방법을 사용하기 위해서 사용한 실험 장치로는 광학 쐐기를 움직이는 노브(knob) 대신 DC 모터(motor)를 사용하였고, DC 모터와 컴퓨터의 인터페이스를 위해 Data acquisition board을 사용하였다. DC 모터는 정속 구동 회로로 제어되며, 이동 속도는 컴퓨터로 제어하도록 하였고 minimotor 사의 model 225 1RO 12S 이다. data acquisition board는 NI 사의 PCI-6035E이다.

Figure 9. The picture of Gauge block interferometer.

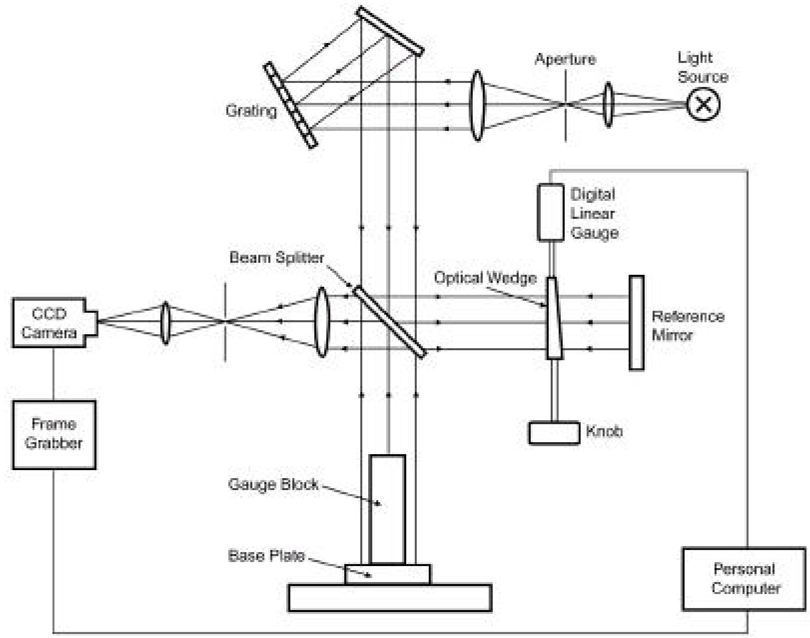

Figure 10. The conventional Gauge block interferometer (using a knob)

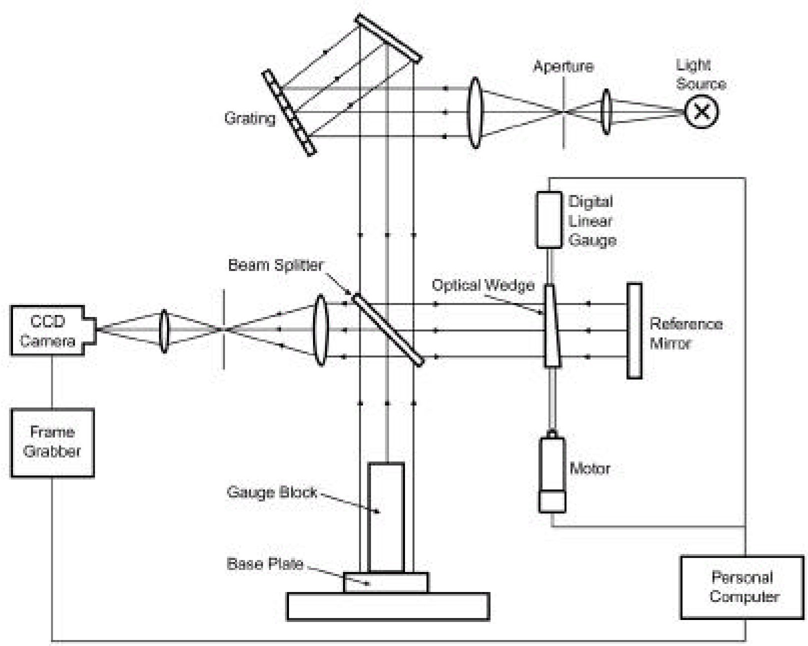

Figure 11. The improved Gauge block interferometer (using a DC motor)

3-1-2. 간섭무늬 강도분포의 계수화

CCD 카메라로 받아들여진 간섭무늬의 강도분포를 image acquisition borad를 이용하여 0에서 255 계조 사이의 gray level로 A/D 변환시킨 후 컴퓨터에 기억시킨다.

3-1-3. 환경측정

(1) 온도

① 온도 안정화 시스템

게이지 블록 간섭계의 온도 안정화 시스템 구축을 위해 구리판과 구리 튜브를 사용하였다. 대략적인 구조는 Figure 12. 에 나타내었다. 게이지 블록 간섭계의 외부를 단열재와 구리 튜브를 접착시킨 구리판으로 막은후 알루미늄 커버로 마무리를 하였다. 구리판에는 두 개의 구리 튜브를 이중으로 연결하였는데 하나의 구리 튜브의 끝에서 물을 흘려 보내고 다른 하나의 구리 튜브의 반대편 끝에서 물을 흘려 보내서 물이 흘러가면서 온도가 변화하는 것을 최소화하였다(Figure 13.).
Figure 14. 는 온도 안정화 시스템을 구축하기 전의 게이지 블록 간섭계의 모습이고, Figure 15 (a) 부터 (c) 까지는 modified 하는 과정을 나타낸 것이다. 최종적인 모습으로 온도 안정화 시스템을 구축한 모습이 Figure 9. 와 같은 모습이다.
안정도를 시험해 본 결과 170분 동안 4 mK의 변화만이 관측되어 측정에 매우 적합한 온도 안정화를 보이는 것을 알 수 있었다. Figure 16. 에 시간에 따른 온도의 변화를 그래프로 그렸다.

② 온도 측정 및 교정

NRLM-Tsugami 게이지 블록 간섭계는 열전대를 이용한 온도 측정 시스템을 사용한다. 사용되는 열전대는 구리와 콘스탄틴이 점접합(spot welding)된 T형 열전대인데[(16)], 두 개의 열전대를 결합하여 두 접점(기준 접점과 측온 접점) 사이의 온도차에 해당하는 기전력을 검출하는 방식을 사용한다(Figure 17.)[(17)].
게이지 블록 간섭계는 간섭계의 내부에 여러 개의 게이지 블록을 배열하여 순차적으로 측정할 수 있도록 설계되어 있으며, 각 게이지 블록의 온도를 측정하기 위한

7개의 열전대 측온 접점이 존재한다. 다른 7개의 기준 접점은 간섭계 외부에 위치하는 항온챔버 내에 삽입되어 있는데, 항온챔버는 단열을 위하여 진공, 물, 그리고 실리콘 오일의 3중 구조로 되어있다.

다채널 스캐너(Keithley 705 모델, 스캐너 카드 7168 장착)에 의해 선택된 열전대의 기전력은 나노볼트미터(nanovoltmeter; Keithley 182 모델)에 의해 측정된 후 컴퓨터로 입력되는데, 이때 나노볼트미터로 측정된 기전력 V_d 는 온도에 의한 기전력을 V_t , 접촉 기전력을 V_c , 측정기의 오프셋을 V_o 라고 하면,

$$V_d = V_t + V_c + V_o \tag{3-1}$$

와 같다. V_t 만을 측정하기 위하여 나노볼트미터에 입력되는 열전대의 극성을 반대로 전환할 수 있도록 스캐너 카드(Keithley 7168) 한 장을 추가로 사용하였다. 즉, 카드1은 7개중 1개의 열전대를 선택하기 위한 것이며, 카드2는 선택된 열전대의 극성을 전환하기 위하여 사용하였다.

열전대의 극성이 (+)와 (-)인 경우의 나노불트미터의 측정값이 각각 $V_d^{(+)}$와 $V_d^{(-)}$ 이고, 접촉 기전력의 크기를 각각 $V_c^{(+)}$와 $V_c^{(-)}$라고 하면, 온도에 의한 기전력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_t = \frac{1}{2}[\{V_d^{(+)} - V_d^{(-)}\} - \{V_c^{(+)} - V_c^{(-)}\}]. \tag{3-2}$$

여기서 우측항의 $-\frac{1}{2}\{V_c^{(+)} - V_c^{(-)}\}$는 접촉기전력에 대한 보정 값에 해당되며, 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 스캐너 카드1의 채널을 합선(short)시키고 스캐너 카드2를 통해 극성을 전환하면서 나노볼트미터의 출력 $V_d^{(+)}$와 $V_d^{(-)}$를 측정하면, 이 경우에는 $V_t = 0$ 이므로 아래 식(3-3)과 같이 보정값을 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2}\{V_c^{(+)} - V_c^{(-)}\} = \frac{1}{2}\{V_d^{(+)} - V_d^{(-)}\} \tag{3-3}$$

열전대가 연결될 7개의 채널에 대해 각각 접촉 기전력에 대한 보정 값을 측정하였으며, 그 결과는 Table 2. 의 맨 우측열에 나타나있다. 항온챔버 내에 있는 열전대 기준 접점의 절대 온도는 빙점(ice point)저항이 25.5 Ω인 표준백금저항 온도계(Standard Platinum Resistance Thermometer : SPRT, Rosemount 162 CE)를 사용하여 측정하였다. 표준 저항(Tinsley 5685A, 25 Ω)과 SPRT의 저항비를 AC 브릿지(ASL F17A 모델)를 사용하여 측정한 후, 물의 삼중점(0.01 ℃)과 갈륨의 녹는점(29.7646 ℃)에서 교정된 온도계의 교정 곡선 수식에 대입하였다.

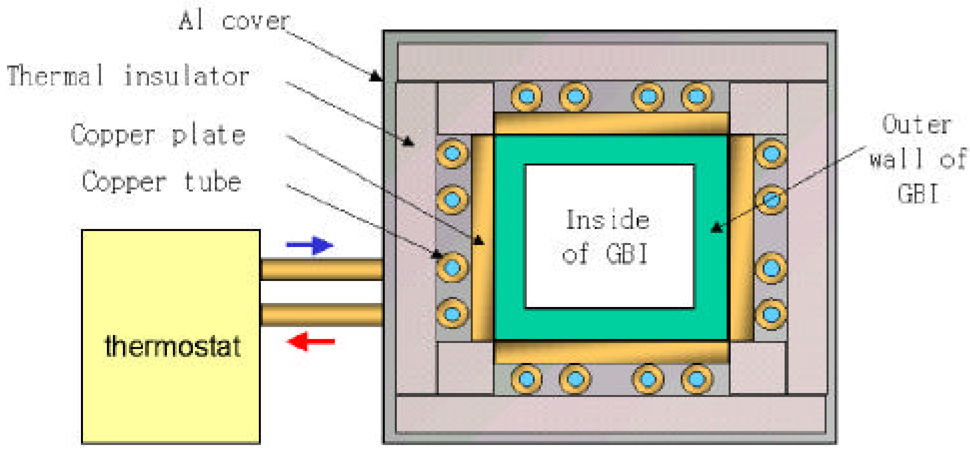

Figure 12. Schematic of Temperature Stabilizing System
for Gauge Block Interferometer

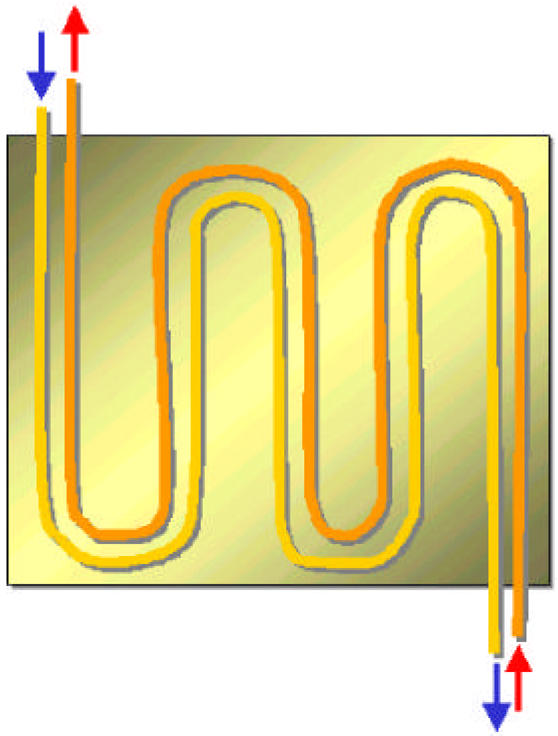

Figure 13. Design of Cu plate / Cu tube.

T형 열전대의 접점간 온도차는 일반적으로 기전력에 대한 6차 혹은 7차 다항식의 합으로 표현된다. 하지만 상온에서만 측정을 하는 경우, 측정 온도 영역이 ±0.5 K에 불과하므로 일차식으로 근사해도 충분하다. SPRT의 온도가 t이고, 열전대의 접점간 온도차와 기전력이 각각 Δt 와 V 라고 하면, 게이지 블록의 표면 온도 t_{GB} 는

$$\begin{aligned} t_{GB} &= t + \Delta t \\ &= t + B + S \cdot V \end{aligned} \tag{3-4}$$

로 구해진다. 이 식에서 S와 B는 각각 온도차 Δt 와 기전력 V 와의 선형 관계식의 기울기와 절편으로서, 열전대 시스템의 교정을 통하여 구해지는 상수이다(Table 2.). 교정은 차등 열전대의 기준 접점과 측온 접점을 서로 다른 항온 챔버에 넣고 항온 챔버간에 온도차를 발생시키면서, 교정된 두 개의 표준백금저항온도계로 각 항온챔버 내부의 온도를 절대 측정하고, 이와 동시에 열전대에서 발생하는 기전력을 나노볼트미터로 측정함으로써 이루어졌으며, 시스템에 사용되는 7개의 열전대에 대한 온도차와 기전력 사이의 함수 관계식을 구하였다. Nanovoltmeter를 통해 읽은 열전대의 기전력, 표준 저항의 온도 값 그리고 표준 저항 온도와 SPRT 온도의 저항비 값 (AC bridge)은 GPIB(IEEE 488) 통신으로 받아들였다.

(2) 압력 (Atmospheric pressure)

기압계는 간섭계 근처에 위치시키고 간섭계와 같은 높이에 위치시켰다. GPIB(IEEE 488) 통신으로 값을 받아들였다.

(3) 습도

공기 흐름에 영향을 덜 받는 습도계를 간섭계 속에다 세웠다. RS232C 통신으로 값을 받아들였다.

(4) CO_2 농도

게이지 블록 간섭계 내부의 공기를 관을 통해 CO_2농도계에 연결하여 흡입된 공기로부터 CO_2 농도를 측정하였다. CO_2 농도는 측정기의 아날로그 신호를 NI사의

Figure 14. Gauge block interferometer before modification.

Figure 15 (a). Gauge block interferometer being modified.

Figure 15 (b). Gauge block interferometer being modified.

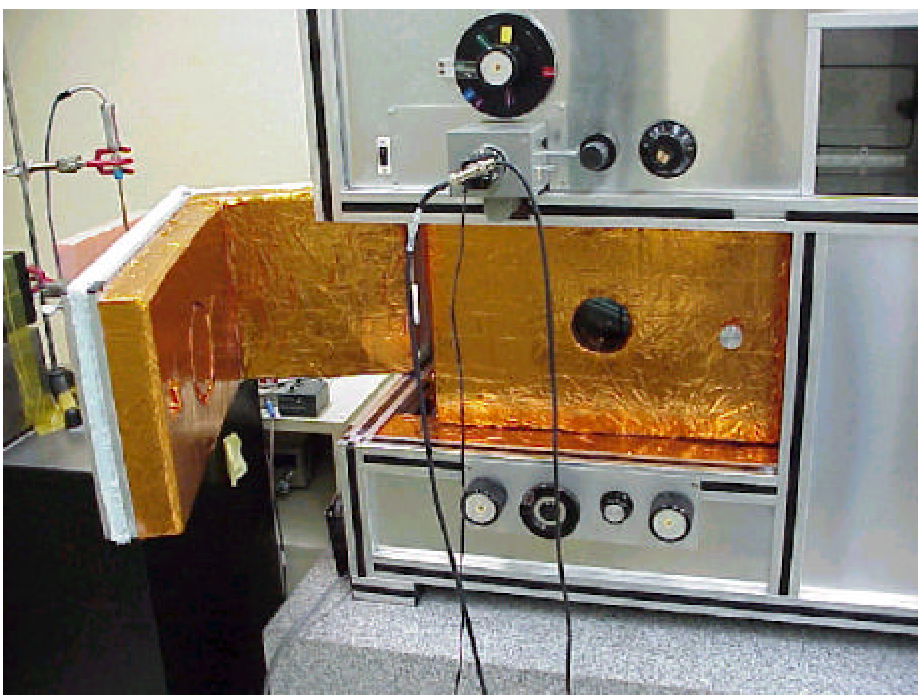

Figure 15 (c). Gauge block interferometer being modified

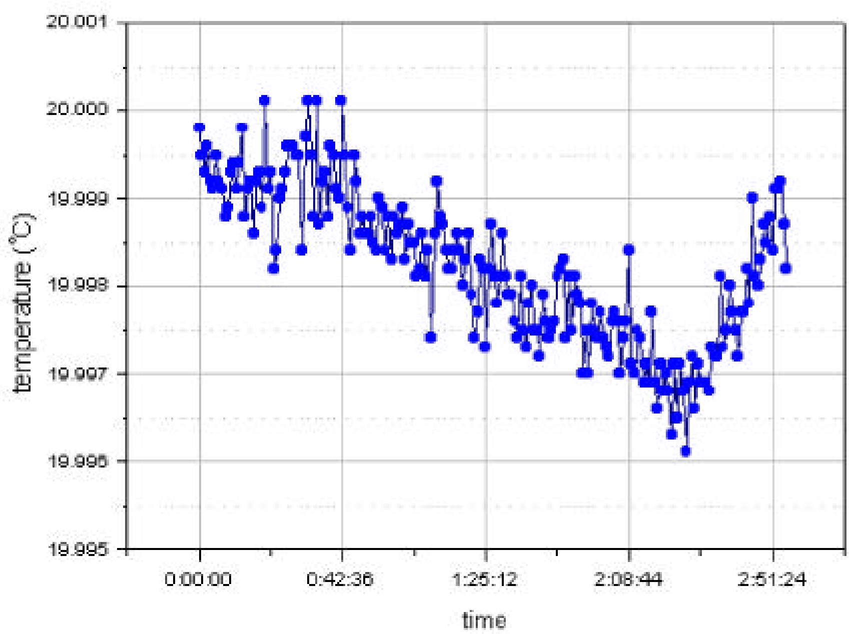

Figure 16. Temperature variation with time
(Stability ; 4 mK/170 min)

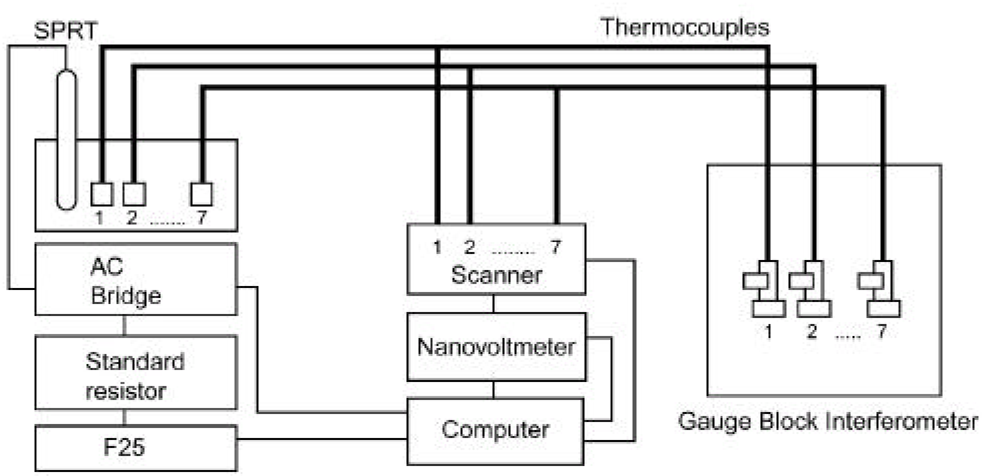

Figure 17. The schematic of temperature measurement system
of Gauge block interferometer

Table 2. The Calibration result of thermal coupler system.

Thermal Coupler Number.	B (K)	S (KV^{-1})	Calibration value of Contact Electromotive Force **접촉 기전력 보정값** (nV)
1	0.0031	25968	- 18
2	0.0019	25935	- 22
3	- 0.0013	25860	- 19
4	- 0.0005	25935	- 12
5	- 0.0024	25902	- 8
6	- 0.0027	25840	- 6
7	- 0.0069	25785	17

DAQ 보드인 PCI 6035E를 통해 A/D 변환하여 받아들였다. 환경측정은 소수 차수부를 읽기 전과 후에 측정하여 그 값들의 평균값을 사용하였다. 이렇게 함으로써 측정동안 있을 환경 변화에 대한 오차를 줄여 측정의 정확도를 기하였다. 온도, 압력, 습도 그리고 CO_2 농도를 이용하여 파장에 따른 공기중의 굴절률을 계산하였다 (앞의 이론부분 참고).

3-2. 게이지 블록 간섭무늬의 소수 차수부 읽기

(1) 기존의 방법으로 소수 차수부 읽기

소수 차수부는 Figure 18. 에서 보는 것과 같이 베이스 플레이트의 간섭무늬 중 어두운 부분을 정렬 쐐기를 이용하여 기준선에 맞춘 후 그 값을 0(기준)으로 잡았다. 그런 다음 게이지 블록 때문에 어긋난 간섭무늬가 기준선의 중앙에 오도록 쐐기를 이동시킨 후, 쐐기가 이동한 만큼의 길이 게이지 값을 읽고(Figure 18. 에서 a부분), 베이스 플레이트 면의 다음 차수의 간섭무늬가 기준선의 중앙에 오도록 쐐기를 이동시켜 길이 게이지 값(Figure 18. 에서 b부분)을 읽었다. NRLM-Tsugami 게이지 블록 간섭계의 광원은 수은등(10 mm 이상)과 카드늄등(10 mm 이하)으로 되어있고, 각각은 4가지의 파장을 가지고 있다. 따라서 각각에 대해 모두 소수 차수부를 읽고, 합치법을 이용하여 길이 값을 계산하였다.

(2) FFT 방법을 이용한 소수 차수부 읽기

① 저주파 여과

CCD 카메라로 받은 간섭무늬상에는 전기적인 잡신호(electronic noise)가 포함되어 있는데 이를 제거하기 위하여 data의 모든 pixel에 대해 3×3 pixels 인 작은 창으로 국소 평균을 시켜주면서, 급격한 강도의 변화, 즉 고주파 성분이 완화(round off)되게 하여 계수화된 강도분포에 포함되어 있는 광원에 의한 잡신호 및 전기적 잡신호를 제거할 수 있게 하였다.

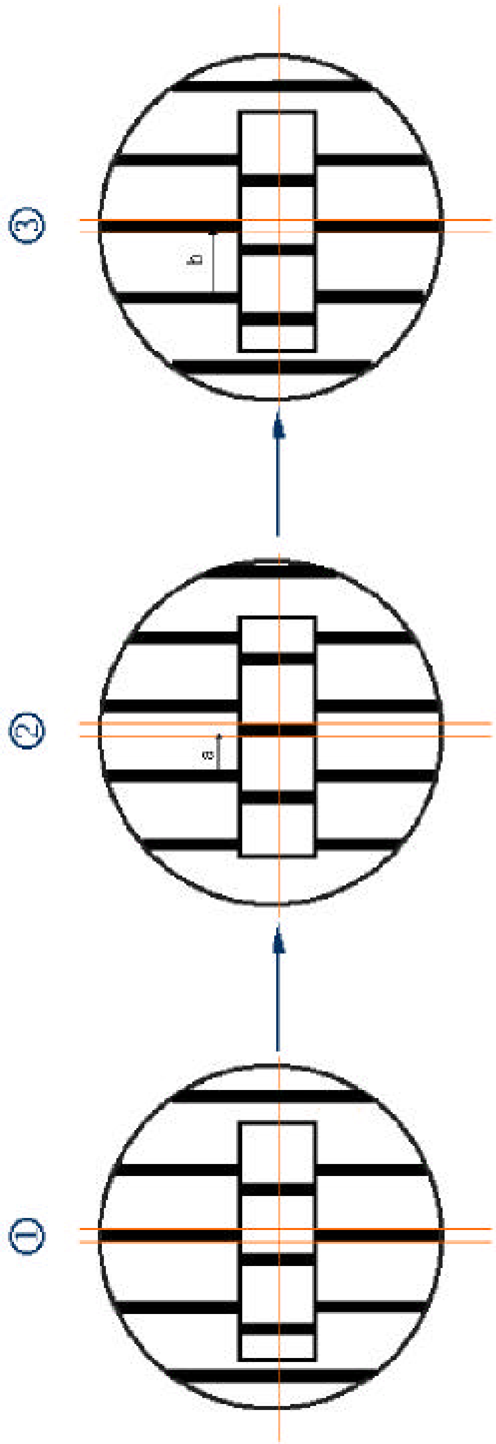

Figure 18. The conventional method of reading a fractional fringe order of Gauge block.

② 간섭무늬 강도 받아들이기

간섭무늬 강도분포의 계수화, 환경측정, 각종 위상 보정량의 보정 그리고 길이 계산 등의 과정은 모두 기존의 방법과 같으나, 소수 차수부를 읽는데 있어서 FFT 방법을 도입하였다. 최근의 국외 학술지에 보고된 FFT방법을 보완하여 더욱 정확한 값의 소수 차수값을 측정하기 위해, FFT 방법을 적용하면서 게이지 블록의 중앙점 이외의 영향을 최소화 할 수 있도록 하였다. 이 방법의 특징은 Tsai와 Bitou가 했던 것처럼 간섭무늬 image의 강도 곡선을 공간적으로 구하지 않고, 광학 쐐기를 이동시키면서, 고정된 점에서의 강도 변화를 측정하여 사용한다는 점이다. 쐐기를 일정 속도로 움직이게 하는 DC 모터를 사용하여 쐐기를 이동시키면서 게이지 블록의 중앙점과 이 점과 나란한 y축을 따라 베이스 플레이트 위와 아래에서의 간섭무늬의 강도 변화를 CCD camera와 frame grabber를 통해 받아 들였다. 측정 후에는 광학 쐐기가 원 위치로 자동으로 돌아오게 하였는데, 이때에는 광학 쐐기 뒤쪽에 접촉하고 있는 길이 게이지의 지시값을 RS232C 통신을 통해 인터페이스 하여 사용하였다.

③ FFT방법으로 소수 차수 계산

광학 쐐기의 이동에 의해 발생하는 강도 변화는 CCD 카메라와 frame grabber를 통해 컴퓨터로 받아들여지며, DC모터의 구동으로부터 간섭무늬 강도 변화 측정, 반송 주파수 f_0의 검출, 위상의 계산 그리고 소수 차수를 구하는 모든 과정이 클릭 한 번으로 이루어지도록 자동 측정 소프트웨어를 제작하였다. 소프트웨어는 Visual Basic으로 작성하였는데, FFT를 이용한 간섭무늬의 소수 차수를 구하는 부분의 form은 Figure 19.와 같다. 측정된 원 데이터와 이를 FFT 한 스펙트럼, 그리고 filtering하여 역 변환시킨 결과의 power, 그리고 계산된 위상 $\phi(x)$이 각각 베이스 플레이트 위, 게이지 블록, 베이스 플레이트 아래의 3군데 점에 대해 도시되어 있다. 창의 왼쪽 아래에는 모터 구동부가 보이며, 아래 오른쪽에는 최종적으로 계산된 소수차수 값이 나타나있다.
간섭무늬의 이미지와, 측정점 3군데는 Figure 20.의 오른쪽 부분에 나타나 있고, 3개의 파장에 대해 측정된 소수 차수 값과, 이로부터 구한 게이지 블록의 길이는 왼쪽 편에 나타나도록 되어있다.

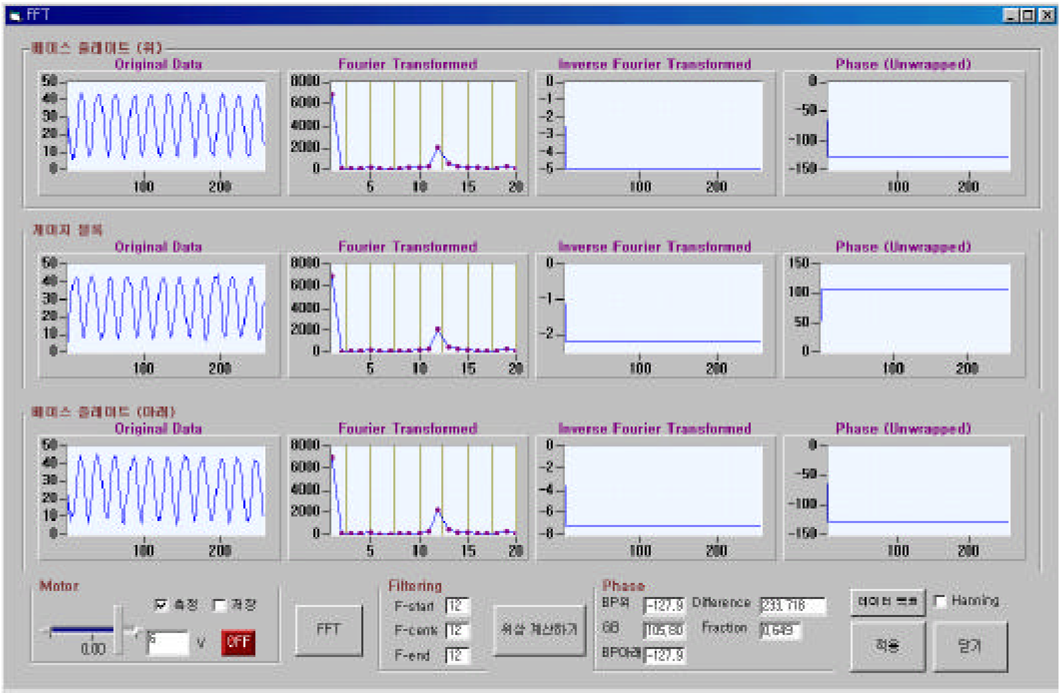

Figure 19. Analysis window of FFT.

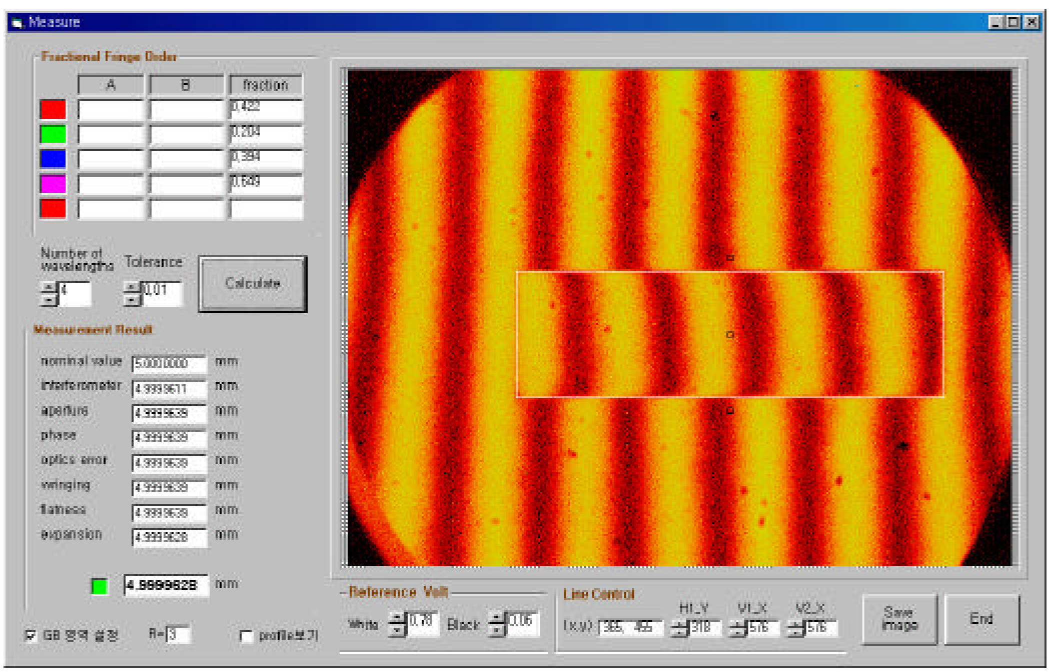

Figure 20. Measurement window.

3-2. 각종 위상 보정량의 보정과 길이 계산

합치법으로 구한 게이지 블록의 길이는(앞 절에서 설명했던 것처럼) 완전한 것이 아니다. 따라서 게이지 블록 간섭계에 대한 보정, 각종 위상변화량에 대한 보정이 필요하며, 게이지 블록은 표준 기준 조건 20 ℃에서의 길이로 보고해야 하기 때문에 열팽창에 대한 효과의 보정이 요구되어진다(18).

따라서, 간섭무늬의 분석을 통한 합치법을 사용하여 측정한 게이지 블록의 중앙 길이는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$l = \frac{1}{q}\sum_{i=1}^{q}(M_i + F_i)\frac{\lambda_i}{2n} + \triangle t_g \cdot \alpha \cdot L + l_{ob} + l_A + l_E$$
$$+ l_R + l_{o.c} + l_w + l_G$$

l : 표준 온도인 20 ℃ 에서의 게이지 블록의 길이

L : 게이지 블록의 명목 길이

q : 측정에 사용한 파장의 개수

M_i : 게이지 블록 길이를 측정에 사용한 빛의 반파장으로 나누었을 때의 정수 부분

F_i : 간섭무늬의 소수 차수 부분

λ_i : 사용한 빛의 진공 파장

n : 공기의 굴절률

$\triangle t_g$: 표준온도인 20 ℃로부터 게이지 블록의 온도가 벗어나는 온도, 즉 $(20 - t_g)$

l_{ob} : 빛의 사각 입사에 의한 위상변화량에 대한 보정

l_A : 유한한 개구 크기에 의한 오차 보정

l_E : 광학계의 불완전함에서 기인하는 오차 보정 = 0

l_R : 게이지 블록과 베이스플레이트의 표면거칠기 차이에 의한 위상 변화에 대한 보정

$l_{o.c}$: 재질에 따른 위상 변화에 대한 보정 = 0

l_w : 밀착효과에 의한 위상변화량에 대한 보정 = 0

l_G : 게이지 블록의 기하학적 불완전성(평행도, 평면도)에 의한 보정 = 불확도로 산정

3-3. 기존의 방법과 푸리에 변환 방법의 결과 비교

3-3-1. 반복도 비교

기존의 수동 방법을 이용하여 측정한 소수 차수와 푸리에 변환 방법(FFT 방법)을 도입하여 측정한 소수 차수의 값을 비교하였다. 반복적인 측정을 통해 두 가지 방법으로 측정된 소수 차수 F의 값은 잘 일치하였으며, 5 mm 게이지 블록을 Cd 등의 보라색 파장으로 측정한 경우, 수동 방법은 0.684, FFT 방법은 0.681 이 얻어졌다. 반복도를 모든 파장에 대해 5 mm 게이지 블록으로 실험 해 보았을 때 FFT 방법이 수동 방법 모다 월등히 우수하게 나타났다. 이 결과는 Table 3. 와 Figure 21. 에 나타내었다. Figure 21. 은 측정 횟수에 따른 소수 차수 값을 나타낸 것으로, 그래프에서 기하모형은 각 파장을 나타낸 것으로 ★▶-보라파장, ◀■-파란파장, ●▲-붉은파장, ▼◆-초록파장, 이다. 각 기하 모형 뒤에 이니셜 M과 A는 각각 측정 방법의 약자로 M은 manual(수동), A는 auto(자동)이다. R, G, B, A는 파장의 색을 나타내는 것으로 Red(빨강), Green(녹색), Blue(파랑), Violet(보라)를 나타낸다. FFT 방법으로 측정한 소수 차수의 값이 훨씬 좋은 반복도를 보인다는 것을 알 수 있다.

3-3-2. 게이지 블록 길이 측정 비교

FFT 방법으로 구한 게이지 블록의 길이 값과 기존의 수동 방법으로 구한 게이지 블록 길이 값을 비교해 보면, FFT 방법이 기존의 방법 보다 반복도 면에서 월등히 좋은 것으로 나타났으며(Table 4.), 합치법의 공차도 훨씬 작게 얻어졌다.
Figure 22. 는 Table 4.를 그래프로 나타낸 것으로 사각형 표식은 수동을 나타내고 원 표식은 FFT 방법으로 구한 값을 나타낸다.
게이지 블록의 길이를 나타낼 때는 Table 5.와 Table 6. 처럼 나타낸다. Table 5.는 스틸 게이지 블록이고 Table 6.은 세라믹 게이지 블록이다. nom. length는 호칭치수를 나타내는 것이고 게이지 블록의 길이는 길이 표준 물이기 때문에 좀더 정확한 측정을 위해서 게이지 블록의 양 단면에 대해서 모두 측정하는데, $\triangle l_{left}$ (㎛) 는 게이지 블록의 오른쪽면을 밀착시키고 왼쪽면을 측정하여 호칭 치수와의 차이를 나타내고 $\triangle l_{right}$ (㎛)는 게이지 블록의 왼쪽면을 밀착시키고 오른쪽면을 측정하여 호칭 치수와의 차이를 나타낸 것으로 최종길이는 이 두 값을 평균한 값

인 $\triangle l$ (㎛)로 나타낸다.
호칭 치수보다 작으면 음의 값을 가지고 크면 양의 값을 가진다. 측정은 모두 0.5 mm 100 mm 사이의 게이지 블록에 대해 이루어졌다. u_c (nm)는 측정 불확도를 말하는 것으로 측정 불확도의 산정은 ISO의 불확도 표현 지침 (Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement)을 따른 것이다.

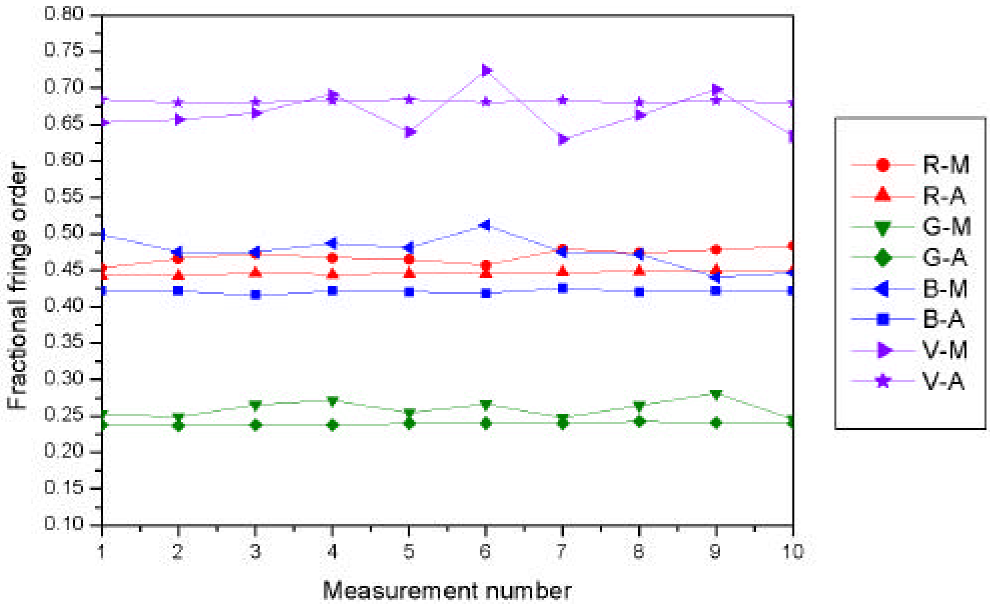

Figure 21. The fractional fringe order comparate conventional method with FFT method. Using a 5 mm Ceramic Gauge Block.
Where, ★▶-Violet, ◀■-Blue, ●▲-Red, ▼◆-Green.

Table 3. The repeatability compare conventional method with FFT method. The M is abbreviation of Manual (conventional method) and A is abbreviation of Auto (FFT method).

Wave-length	Red (643.9nm)		Green (508.6 nm)		Blue (480.0 nm)		Violet (467.8 nm)	
Mesuared method	M	A	M	A	M	A	M	A
Standard Deviation	0.010	0.003	0.012	0.002	0.022	0.003	0.030	0.002

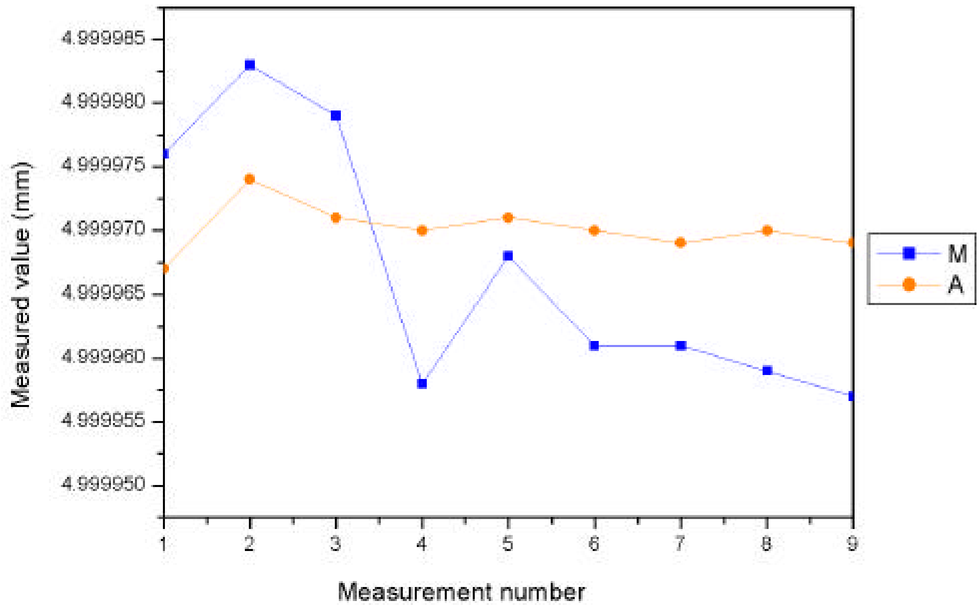

Figure 22. Measurement number Vs. Measured value
for conventional method and FFT method.
Where, ■-Manual method, ●-Auto(FFT) method.

Table 4. Mesured values compared conventional method with FFT method.

	M	A
Average	4.999967	4.999970
Standard Deviation	0.000010	0.000002

Table 5. Measurement results for Steel gauge blocks

nom. length	central length (deviation from nominal length)			uncertainty
L (mm)	$\triangle l_{left}$ (μm)	$\triangle l_{right}$ (μm)	$\triangle l$ (μm)	u_c (nm)
0.5	0.033	0.025	0.029	28
1.01	-0.021	-0.027	-0.024	28
1.1	-0.005	-0.004	-0.005	28
6	-0.018	-0.009	-0.013	28
7	-0.022	-0.026	-0.024	28
8	-0.010	0.005	-0.003	28
15	0.008	0.007	0.007	28
80	0.035	0.004	0.020	32
90	-0.067	-0.060	-0.063	33
100	-0.097	-0.098	-0.098	34

Table 6. Measurement results for Ceramic gauge blocks

nom. length	central length (deviation from nominal length)			uncertainty
L (mm)	$\triangle l_{left}$ (μm)	$\triangle l_{right}$ (μm)	$\triangle l$ (μm)	u_c (nm)
0.5	-0.033	-0.026	-0.030	28
1.0	-0.028	-0.026	-0.027	28
1.01	-0.020	-0.025	-0.023	28
1.1	0.060	0.065	0.062	28
6	0.010	0.020	0.015	28
7	0.038	0.038	0.038	28
8	0.030	0.043	0.036	28
80	0.127	0.113	0.120	32
90	0.087	0.090	0.088	33
100	0.143	0.148	0.145	34

4. 결론 및 고찰

게이지 블록의 길이를 간섭계를 이용하여 절대 측정할 때, 간섭무늬로부터 소수차수값을 구하여야 하는데, 기존의 수동 방법은 측정을 할 때 사람의 눈으로 간섭무늬의 어두운 부분을 찾아야 하는 일 때문에 눈이 피로하고 측정시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 측정하는데 있어서의 정확도도 그 만큼 떨어져 믿을 수 있는 값을 구하는 것이 어려웠다. 이런 어려움을 해결하는 방법으로 FFT 에 의한 소수 차수 측정법을 도입하였다. 고정된 간섭무늬에서 공간적인 강도분포를 읽어들여 FFT 시키는 방법을 사용하지 않고, 일정한 속도로 간섭무늬의 위상을 변화시키면서 이 때 발생되는 강도 변화를 3군데의 공정점에서 측정하여 FFT 시키는 방법을 사용하였다. 이 방법으로 게이지 블록의 길이를 측정해 본 결과 평면도가 좋지 않은 게이지 블록의 경우에도 아무런 문제없이 정확히 중앙 치수를 측정할 수 있게 되었다. 또한 간섭무늬의 소수차수 측정의 반복도를 기존의 수동방법과 새로운 FFT 방법에 대해 비교해 본 결과 FFT 방법이 월등히 우수한 것으로 분석되었다. FFT 방법의 도입으로 인하여 tilt의 방향에 영향을 받지 않고 측정할 수 있고 측정이 기존의 방법에 비해 훨씬 쉬워지고 빨라지면서도 정확도가 높아지는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 본 연구에서는 스틸 재질의 게이지 블록 10개와 세라믹 재질의 게이지 블록 10개에 대해 양쪽 측정면에 대한 중앙치수를 각각 절대 측정하였는데, 스틸 게이지 블록의 경우는 스틸 베이스 플레이트를 세라믹 경우에는 세라믹 베이스 플레이트를 사용하여 측정을 수행하였다. 간섭무늬의 분석 방법은 FFT를 사용하여 자동화하여 측정의 반복성 향상이나 측정시간의 단축등을 이룩하였으나, 하드웨어쪽의 문제, 특히 노후된 스펙트럼 램프를 주파수 안정화 레이저들로 교체하는 문제가 해결되어야 긴 게이지 블록의 측정에서 겪는 어려움-눈으로 인식되지 않을 정도로 낮은 간섭무늬 contrast, 빛의 주기적 떨림 현상등-이 해소될 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

(1) Dai Xiaoli, et al, "High-accuracy absolute distance measurement by means of wavelength scanning heterodyne interferometry", Meas. Sci. Technol. Vol. 9, 1031 (1998).

(2) J. H. Bruning, *Optica Shop Testing*, 2ed, ed. D. Malacara, John Wiley & Sons, Inc. New York, (1991).

(3) D. J. Pugh, et al., "Automatic gauge block measurement using multiple wavelength interferometer", SPIE, Vol 656, 244, (1986).

(4) Tatsuya Narumi, et al., "Development of new automatic gauge block interferometer up to 250 mm", SPIE, Vol 3477, 76, (1998)

(5) Youichi Bitou, et al., "Gauge block measurement using a wavelength scanning interferometer", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, No. 10, 6084 (2000).

(6) Minghong Tsai, et al., "Fractional fringe order method using Fourier analysis for absolute measurement of gauge block thickness", Optical Review, Vol 6, No. 5, 449 (1999).

(7) Mitsuo Takeda et al., "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis computer-based topography and interferometry", J. Opt. Soc. Am., Vol. 72, No. 1, 156 (1982).

(8) Ted Doiron and John S. Beers, "The gauge block handbook", NIST Monograph 180, U.S. Goverment Printing Office Washington, DC. (1995).

(9) **송양섭 외**, "**국제단위계**", **제7개정판**, **한국표준과학연구원**, **대전** (1998).

(10) T. J. Quinn, "International Report - Practical realization of the definition of the metre", Metrologia, Vol. 36 No. 3, 211 (1997).

(11) **강주식 외**, "**최고측정능력평가**", **한국표준과학연구원**, **대전** (1998).

(12) Lyubomudrov, O.V. and Etsin, I. Sh., "Possibilities of measuring length by coincidence of fractional part of interference orders", Sov. J. Opt. Tech., Vol. 51, 624 (1985).

(13) G. Bonsch and E. Potulski, "Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formulae", Metrologia, Vol. 35, No. 2, 133 (1998)

(14) Alfred Zajac, *Hect optics*, 2ed, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., (1987).

(15) Brigham, E. Oran, “The fast Fourier transform and its applications”, Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, (1988).

(16) **김용규 외**, “**국제온도눈금**(ITS-90)**에 준한 규격화된 열전대의 온도-기전력 기준표**”, **한국표준과학연구원**, **대전** (1994)

(17) **강주식 외**, “**게이지 블록 간섭계의 온도 측정 시스템 교정 및 온도 측정 불확도의 분석**”, **새물리**, Vol. 41, No. 1, 22(2000).

(18) **도진열 외**, “**길이분야 핵심 측정표준 국제비교**”, **한국표준과학연구원**, **대전** (1999).