

# 백색광 간섭계의 위상 정점 알고리즘에서 조명에 따른 위상 정점 모호성에 관한 연구

김기홍<sup>#</sup>, 이형석<sup>\*</sup>

## Phase Peak Ambiguity According to Illumination in White-Light Phase-Shifting Interferometry

Geehong Kim<sup>#</sup> and HyungSeok Lee<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

White light scanning interferometry has gotten a firm position in 3D surface profile measuring field. Recently, the LCD industry gave a chance for this technology to enter into real industry fields. It is known that white-light phase-shifting algorithm give a best resolution compare to other algorithms, but there are some problems to be resolved. One of them is 300nm jump in height profile, called bat-wing effect. The main reason of this problem is an ambiguity of phase-peak detection algorithm, and some solution has been proposed, but it didn't work perfectly. In this paper, I will show the cases when these effects are occurred, and these height discrepancies will be almost disappeared when broad-band illuminators are used.

**Key Words** : White-Light Interferometry (백색광 간섭계), Phase-Shifting Algorithm (위상 정점 알고리즘), 3D Profile Measurement (3 차원 형상 측정), Bat-Wing Effect (300nm 높이 단차 오류)

### 1. 서론

백색광 간섭계는 LCD 산업의 발전과 함께 최근 크게 주목을 받고 있는 3 차원 측정 기술 중의 하나이다. Fig. 1 은 백색광 간섭계의 기본 원리를 보여준다. 이 방법은 백색광의 짧은 가간섭성 (coherence length)을 이용하며, 측정점과 기준점의 광경로차(optical path difference)가 광분할기를 기준으로 3~4  $\mu\text{m}$  이내일 때 발생하는 간섭 신호를 획득, 해석함으로써 측정점의 3 차원 높이를 복원한다. 이때 이용되는 해석 알고리즘으로 많은 연구자

들에 의하여 다양한 방법이 개발되었으며, 최근의 연구 동향은 SEST<sup>1,2</sup>(squared-envelope function estimation by sampling theory)와 같이 측정 속도를 수십  $\mu\text{m/s}$  이상으로 높이는 연구와 위상 정점 알고리즘(white-light phase shifting algorithm)<sup>3,4,5</sup>에서 측정 정도를 높이는 연구에 집중되고 있다.

SEST 와 같이 가시도 곡선(envelope)을 이용하는 알고리즘은 알고리즘의 종류, 카메라의 속도에 따라 수십 ~ 수백  $\mu\text{m/s}$  의 속도를 구현할 수 있지만, 경면(mirror surface)류 제품에서는 표면이 지나치게 거칠게 표현되는 단점을 가지고 있어서 PCB

접수일: 2007 년 7 월 24 일; 게재승인일: 2007 년 11 월 7 일

<sup>#</sup> 교신저자: 한국기계연구원 나노기계연구본부

E-mail: geehong@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7076

<sup>\*</sup> (주)나노시스템

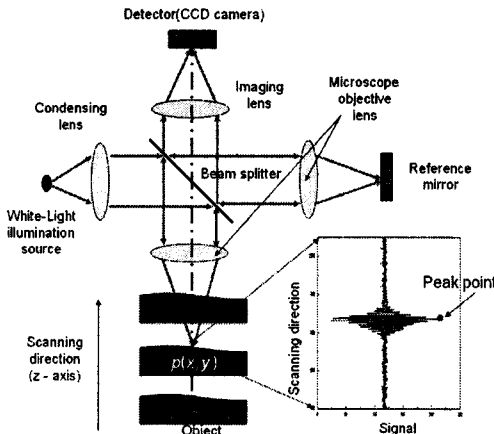


Fig. 1 Principles of White-Light Scanning Interferometry

제품이나 BGA(ball grid array)와 같이 수십  $\mu\text{m}$ 의 큰 높이차(height step)를 가지는 패턴의 해석에 활용되고 있다.

이에 반하여 위상 정점 알고리즘에서는 10 nm 이하의 측정 정확도를 얻을 수 있지만, 간섭 신호의 한 주기(period)를 4 등분하여 신호를 획득하여야 하는 제약 조건으로 가시도 알고리즘과 같이 고속의 스캐닝을 할 수 없는 단점을 가진다. 특히 이 알고리즘은 측정물의 표면 특성에 의하여 영향을 받는데, 대표적인 현상이 박막(thin film)에 의한 간섭 신호의 왜곡과 위상 정점 모호성에 따른 300 nm 높이 단차가 발생하는 점이다. 300 nm 높이 단차값은 텅스텐 할로젠 램프의 중심 파장이 대략 600 nm 이기 때문이며, 다른 종류의 조명을 사용할 경우에는 대략 광원의 중심 파장의 절반에 해당하는 값으로 측정 오차가 발생한다. 이 300 nm 측정 오차는 경면류의 표면 측정에서 매우 뚜렷하게 식별되는데, 이러한 오차는 측정의 신뢰성을 떨어뜨리는 주요한 요인으로 작용하고 있다.

Akiko Harasaki<sup>6</sup> 등은 광위상 간섭계(phase-shifting method)의  $2\pi$  모호성(ambiguity)을 해결하는 위상 복원(phase unwrapping)과 유사한 높이 복원(height unwrapping) 방법을 제시하였지만, 알고리즘 자체에 몇가지 문제점을 가지고 있다. 이 논문에서는 300 nm 높이 오차가 발생하는 경우에 대하여 고찰하고 일반적인 텅스텐 할로젠 램프보다 가시 광선 영역에서 스펙트럼이 우수한 조명을 사용함으로써 이러한 오차 발생 빈도를 현저히 떨어뜨릴 수 있음을 보여주고자 한다.

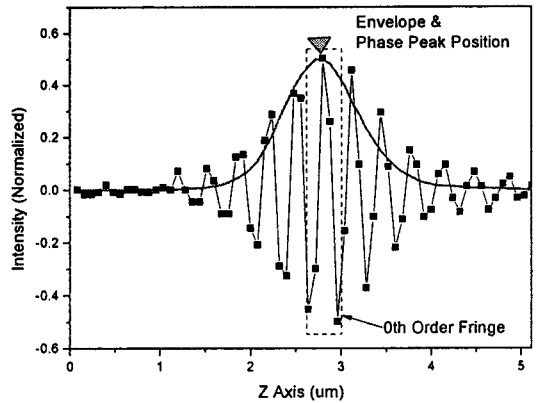
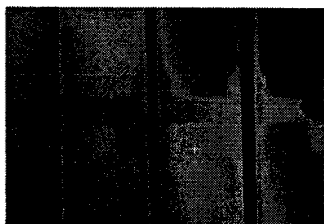


Fig. 2 Ideal Interferogram from a Mirror Surface. Al coated Mirror, 20x Obj., 80 nm Frame Step, Tungsten-Halogen Lamp

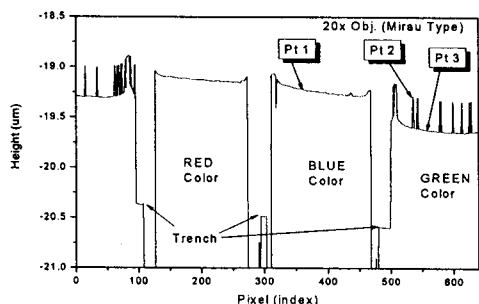
## 2. 간섭 신호 분석

Fig. 2 는 가장 일반적이고 이상적인 간섭 신호의 형태를 보여준다. 이러한 간섭 신호로부터 높이를 계산하는 알고리즘은 크게 가시도 정점(envelope peak) 과 위상 정점(phase peak) 알고리즘으로 분류된다. 가시도 정점 알고리즘이란 Fig. 2 의 실선의 가우시안 형태로 표시된 그래프와 같이 간섭 신호의 외형(envelope)을 추출한 후 이의 최대 정점을 검출하는 방법으로 디지털 신호 처리법을 포함하여 다양한 방법들이 개발되었다.<sup>7</sup> 위상 정점 알고리즘은 Fig. 2 의 간섭 신호에서 변화가 가장 심한 1 주기 신호(이를 보통 0 차 오더 신호라 함)에서 정점을 추출하는 방법으로 Larkin<sup>3</sup> 과 Sandoz<sup>4</sup> 의 방법이 가장 대표적이다. 일반적으로 위상 정점 알고리즘이 가시도 정점 알고리즘보다 측정 정밀도가 우수하지만, 0 차 오더의 신호 위치를 추출하는 방법에 따라 정확도가 좌우되는 단점이 있다.

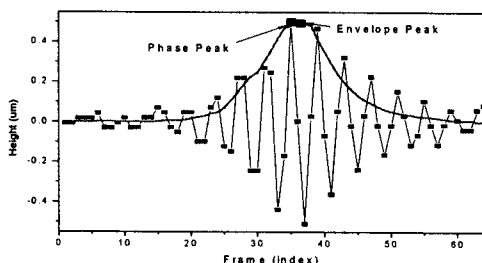
이러한 간섭 신호는 이론적으로는 측정점과 기준점의 광경로차가 0 인 지점을 기준으로 좌우 대칭의 형태를 가져야 한다. 그러나 실제 간섭 신호에서는 대물렌즈의 개구수(numerical aperture), 측정점의 반사도, 색상, 거칠기 등에 의하여 왜곡이 발생하는데, 경면(mirror surface)과 같이 이상적인 표면에서 획득한 간섭 신호에서도 이러한 비대칭성이 존재한다. 일반적으로 측정면의 반사도가 높은 금속 표면에서는 이러한 비대칭성이 미미하며, 측



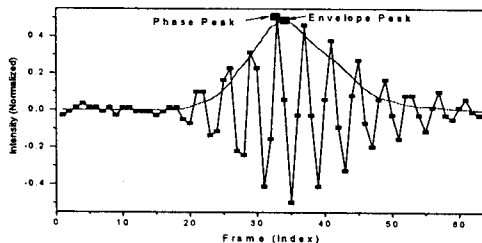
(a) Color Height Map of Color Filter for LCD Panel



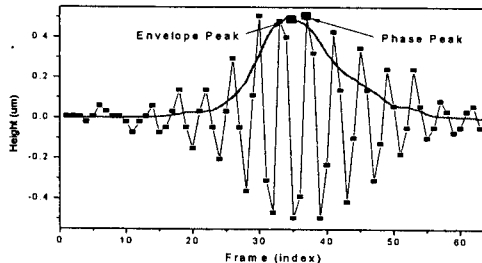
(b) Sectional Height Profile of Color Filter



(c) Interferogram and Envelope Graph at Pt1



(d) Interferogram and Envelope Graph at Pt2



(e) Interferogram and Envelope Graph at Pt3

Fig. 3 Examples of 300nm Height Jump Problem

정 정확도에 미치는 영향도 적다. 그러나 색상을 가진 표면, 매우 거친 기계 가공면, 그리고 표면에 수십 A 의 얇은 투명 박막(transparent thin film)이 도포된 표면에서는 간섭 신호의 왜곡 정도가 심해지며, 특히 0 차 오더의 간섭 신호 위치를 모호하게 하여 300 nm 높이 단차를 유발하는 것으로 보고되고 있다.

Fig. 3 은 LCD 의 주요 패널인 컬러 필터(color filter)에서 이러한 300 nm 높이 단차 오류가 발생하는 예를 보여준다. Fig. 3(a)는 위상 정점 알고리즘을 이용하여 측정된 컬러 필터의 3 차원 맵을 보여준다. 이 맵에서 우측의 원형 패턴은 컬러 필터의 컬럼 스페이스(column spacer)이며, 수직의 띠 영역은 컬러 셀간을 구분 짓는 BM(black matrix) 패턴이다. BM 패턴들로 구분되는 영역은 좌측에서부터 초록색, 붉은색, 푸른색, 초록색 컬러 폴리머가 도포된 영역이며, 이 영역들에서 전술한 300 nm 높이 단차 오류가 발생한다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)의 임의의 위치에서 가로 방향의 단면 높이 형상을 도시한 그림이다. 이 그림을 보면 붉은색과 푸른색 컬러 영역에서는 연속적이며 매끄러운 형상을 보여주지만, 초록색 영역에서는 다수의 돌출된 측정점들이 있음을 알 수 있다. 이러한 측정점들이 전술한 위상 정점 알고리즘에서의 300 nm 높이 단차 오류 현상이다. 이와 같이 동일한 위상 정점 알고리즘이 적용되었음에도 특정 컬러 패턴 영역에서 집중적으로 발생하는 것은 이러한 오류가 측정면의 상태와 밀접한 관계가 있음을 보여준다. 이러한 현상이 국부적으로 소수 측정점에서 발생할 때는 메디안 필터(median filter)와 같은 영상 처리 기법을 이용하여 쉽게 제거되므로, 실제 측정에서는 큰 문제를 야기하지 않지만 Fig. 3(b)에서와 같이 일정한 영역 내부의 다수 측정점에서 발생할 때는 이를 완벽하게 제거하기란 매우 어렵다.

Fig. 3 의 (c)~(e)는 (b)에 표시된 3 지점에서의 간섭 신호와 가시도 곡선, 그리고 위상 및 가시도 정점을 표시한 그림이다. Pt1 지점은 위상 정점 알고리즘이 정확하게 적용된 경우로서, 이는 Fig. 3(c)의 간섭 신호에서 정확한 0 차 오더 신호 위치에서 위상 정점을 계산하였음을 의미한다. Pt2 와 Pt3 은 300 nm 의 상대 높이차를 가진 점으로 Fig. 3(d), (e)만으로는 어느 측정점이 정확하다고 판단할 수 없다. 이는 Pt2 처럼 돌출된 지점들이 정확

한 측정점이라 가정하면, Pt3 이 포함된 형상 라인의 측정점들이 실제 높이에서 아래쪽으로 300 nm 단차 오류가 발생하였다 판단할 수 있다. 그러나 반대의 경우에는 Pt2 처럼 돌출된 지점들이 실제 높이에서 위쪽으로 300 nm 단차 오류가 발생하였다고 판단할 수 있다. 따라서 300 nm 단차 오류를 제거할 때 어느 지점을 기준으로 하느냐에 따라 상이한 결과가 나올 수 있는 문제점이 있다.

Fig. 3(e)는 300 nm 단차 오류의 원인을 보여준다. 이 간섭 신호에서는 Fig. 3(c), (d)와는 달리 0 차 오더의 신호가 뚜렷하지 않는데, 이는 0 차 오더 신호에서 광강도값이 갑자기 작아지기 때문이다. 이러한 가시도의 왜곡으로 인하여 위상 정점을 검출하는 0 차 오더 신호의 위치가 모호해져 Fig. 3(b)에서와 같은 300 nm 단차 오류가 발생한다.

이러한 가시도 왜곡 현상은 측정물의 표면 특성이 시스템의 파장 스펙트럼을 왜곡하기 때문으로 생각된다. 실제 색상이 있는 측정물의 경우, 색상이 없는 측정물에 비하여 간섭 신호의 가시도 곡선이 넓고 편평해지며, 간섭 신호를 주파수 영역에서 관찰하면, 시스템의 전체 스펙트럼에서 일부 영역만이 반사되고 있음을 알 수 있다. 이러한 위상 정점의 모호성은 수학적으로 해석하기 어려우며, 측정물에 따라 해석 방법이 바뀔 수 있기 때문에 오차를 보정하기가 매우 어렵다.

### 3. 조명광의 특성에 따른 위상 정점 모호성

앞에서 언급한 위상 정점 모호성으로 인한 300 nm 높이 단차 오류를 해결하기 위하여 소프트웨어적인 높이 보정(height unwrapping) 알고리즘이 제시되었다.<sup>6</sup>

$$\left| H_{envelope}(i) - H_{envelope}(i+1) \right| < \frac{f}{4} \bar{\lambda}$$

$$\left| H_{phase}(i) - H_{phase}(i+1) \right| > \frac{f}{4} \bar{\lambda} \quad (1)$$

$$\left| H_{envelope}(i) - H_{envelope}(i+1) \right| < \frac{f}{4} \bar{\lambda}$$

$$\left| H_{phase}(i) - H_{phase}(i+1) \right| < \frac{f}{4} \bar{\lambda} \quad (2)$$

식 (1)은 높이 보정을 할 측정점을 판단하는 조건, 그리고 식 (2)은 높이 보정이 완료되는 조건을

나타낸다. 수식에서  $H_{envelope}$ ,  $H_{phase}$  는 각각 가시도 정점 및 위상 정점 알고리즘을 이용하여 해석한 동일 측정점에서의 높이값,  $i$  는 측정점의 인덱스,  $f$  는 대물렌즈 개구수에 대한 보상 팩터 (NA factor),  $\bar{\lambda}$  는 간섭 신호의 중심 파장을 의미한다. 보정 방법은 식 (1) 조건에 해당하는 측정점에서 식 (2)의 조건이 만족할 때까지  $(f/2)\bar{\lambda}$  를 더하거나 빼는 방법으로 수행된다.

이 알고리즘의 문제점은 보정의 기준점에 대한 판별 조건이 없으며, 일차원적인 보정 방법만을 제시하였기 때문에 2 차원 측정 영역에 대하여 식 (1), (2)의 보정을 수행하면 오히려 300 nm 높이 단차가 비정상적으로 증가하는 결과를 초래할 수 있다. 그러므로 아직까지는 소프트웨어적인 방법으로 위상 정점 모호성에 의한 300 nm 높이 단차 오류를 성공적으로 제거하기란 매우 어렵다.

앞에서 언급한 바와 같이 위상 정점 모호성의 원인은 가시도 왜곡에 있으며, 이를 개선하는 가장 좋은 방법은 측정 시스템의 광학 스펙트럼을 개선함으로써 간섭 신호의 가시도 왜곡을 둔감시키는 것이다. 측정 시스템의 광학적 스펙트럼을 결정하는 주요 부품으로는 광원, CCD 카메라, 그리고 대물렌즈와 같은 광학 부품들이다. 이 중 대부분의 CCD 카메라는 400 nm ~ 800 nm 파장 대역에서 반응하고, 광학 부품들은 이러한 가시광선 영역에서 균일한 특성을 가지도록 설계되었으므로, 광원을 이용하여 시스템의 특성을 개선하는 것이 가장 효과적이다.

Fig. 4 는 현미경 광학계에 많이 사용되는 백색 광원들의 스펙트럼 특성을 보여준다. 백색광 간섭계에서는 텅스텐 할로겐 램프를 많이 사용하는데, 이는 제어하기가 쉽고, 가격이 매우 저렴하기 때문이다. 그러나 스펙트럼이 주로 적외선 영역에 치우

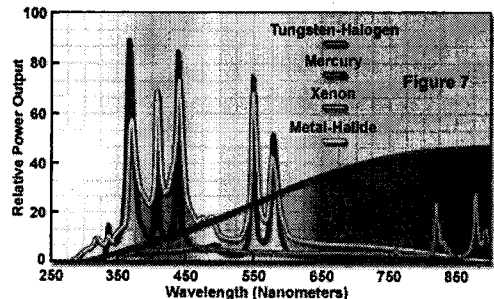


Fig. 4 Spectral Characteristics of Common Light Sources

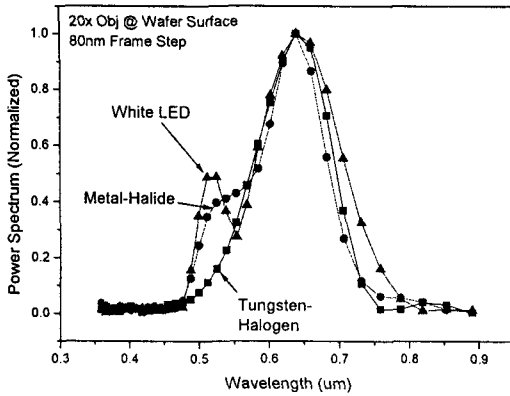


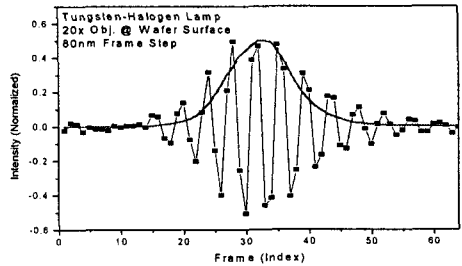
Fig. 5 Spectrum Characteristic on a Mirror Surface according to a variety of Lamps

쳐져 있어서 가시광선 영역은 다른 아크(arc) 램프에 비하여 매우 나쁘다.

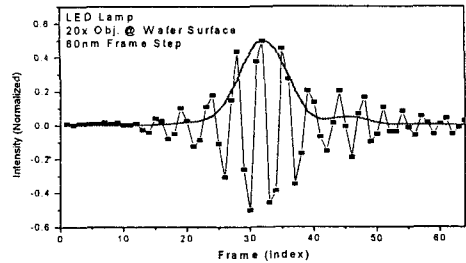
Fig. 4 에 표시된 조명 외에 최근 고휘도 백색광 LED 를 사용하는 경우도 늘어나는 추세이다. LED 는 수명이 반 영구적일 뿐만 아니라, 응답 특성이 다른 램프에 비하여 매우 빠르고, 소형이며, 열이 거의 방출되지 않는 장점을 가진다. 이 논문에서는 기존의 텅스텐 할로겐 램프와, 메탈 할라이드 (metal-halide), 그리고 백색 LED 램프를 통하여 위상 정점의 모호성이 어떻게 바뀌는지 관찰하였다.

Fig. 5 는 경면에서의 간섭 신호를 이용하여 광원에 따른 시스템의 주파수 특성을 도시한 그림이다. 시스템의 주파수 특성은 Fig. 4 의 광원의 스펙트럼과, CCD 카메라의 주파수 응답 특성, 그리고 각종 필터, 대물렌즈, 파이버(fiber) 등의 광학 부품에 의한 응답 특성이 모두 고려된 최종적인 스펙트럼을 의미한다. Fig. 5 에서 보듯이 메탈 할라이드와 백색 LED 가 텅스텐 할로겐 램프보다 500 nm 파장 대역에서 우수한 특성을 가짐을 알 수 있다.

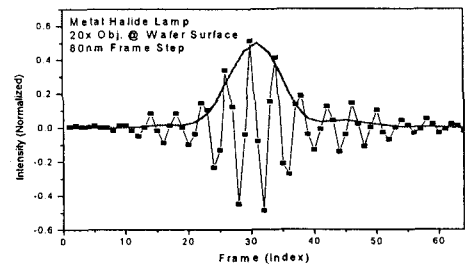
Fig. 6 은 웨이퍼 표면에서 20x 미라우(Mirau) 타입의 간섭 대물렌즈를 이용하여 획득한 간섭 신호를 전술한 조명에 따라 비교한 그림이다. CCD 카메라는 PULNiX 사의 TM-7CN 을 사용하였고, 간섭 신호의 프레임(frame) 간격은 대략 80 nm 이다. Fig. 6(a)~(c)에 있는 실선의 가우시안 형태의 곡선은 간섭 신호의 외곽을 나타내는 가시도 곡선(envelope graph)을 의미한다. Fig. 6(d)는 (a)~(c) 간섭 신호의 가시도 곡선만을 추출하여 비교한 그림이다. 그림에서 보듯이 LED 나 메탈 할라이드 램프를 사용할



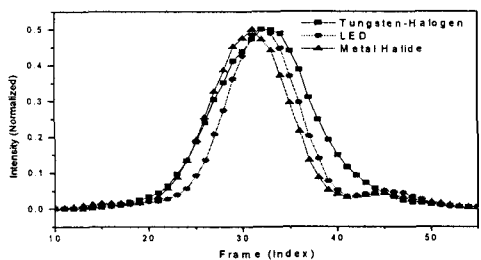
(a) Tungsten-Halogen Lamp



(b) White-LED Lamp



(c) Metal-Halide Lamp



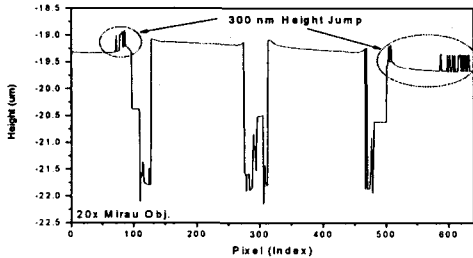
(d) Comparison of Envelop Graphs

Fig. 6 Comparison of Interferogram and Envelope Graph according to Lamps

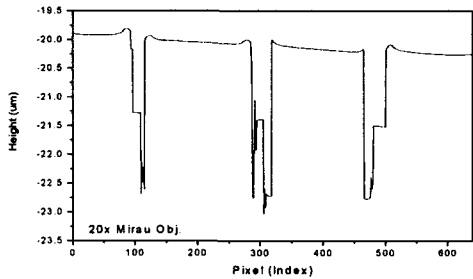
때 가시도 그래프가 좀더 날카로워짐을(sharp) 알 수 있다.

이와 같이 백색광 간섭계의 조명을 바꿀 경우 가시도 곡선에서 기존의 텅스텐 할로겐 램프를 사용할 때 보다 이득을 볼 수 있으며, 이러한 특징이 전술한 위상 정점 모호성에 의한 300nm 높이

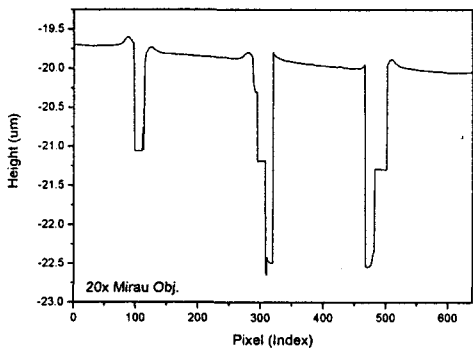
단차 오류를 보상해 줄 것으로 기대할 수 있다.



(a) Profile when using Tungsten-Halogen Lamp



(b) Profile when using White-LED Lamp



(c) Profile when using Metal-Halide Lamp

Fig. 7 Comparison of Line Profiles of a Color Filter according to Lamps

#### 4. 실험

Fig. 7 은 LCD 컬러 필터를 전술한 3 개 램프를 활용하여 측정된 단면 형상을 보여준다. 사용된 대물렌즈는 미라우(Mirau) 타입의 20 배 간섭 대물렌즈이다. Fig. 7 (a)에서 보듯이 텅스텐 할로겐 램프를 사용할 때는 특정 색상 패턴에서만 집중적으로 300 nm 높이 단차 오류가 발생함을 볼 수 있다. 그

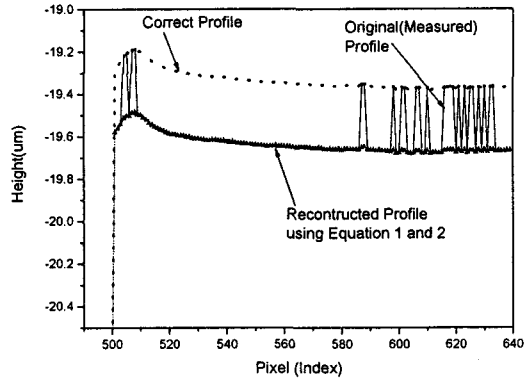


Fig. 8 Problem of Height Unwrapping Algorithm which is described in Equation (1) and (2)

러나 Fig. 7 (b), (c)에서 보듯이 동일한 시스템과 해석 알고리즘에서도 메탈 할라이드와 백색 LED 에서는 이러한 문제가 전혀 나타나지 않음을 볼 수 있다. 더욱이 중요한 점은 Fig. 7(a)의 300 nm 높이 발생 지점의 형상을 전술한 (1), (2)의 수식을 이용하여 보정하면 돌출된 측정점들을 모두 노이즈로 인식하여 Fig. 8 의 삼각형 실선 그래프와 같이 복원한다. 그러나 Fig. 7 의 단면 형상들을 서로 비교하면 정확한 단면 형상은 Fig. 8 의 점선으로 표시한 그래프와 같이 복원되어야 함을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 300 nm 높이 단차 오류가 발생하였을 때 실제 높이는 알 수 없다는 것을 의미한다. 이러한 점에서도 메탈 할라이드나 백색 LED 를 사용할 경우 측정 불확도를 크게 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

#### 5. 결론

이 논문에서는 백색광 간섭계에서 위상 정점 알고리즘을 사용할 때 발생하는 위상 정점 모호성을 스펙트럼이 우수한 조명을 사용함으로써 크게 개선할 수 있음을 보여주었다. 특히 위상 정점 모호성으로 발생하는 300 nm 높이 단차 오류는 해석 알고리즘으로 해결할 수 없는 어려운 문제이며, LCD 와 같이 경면류의 표면 형상 측정에서 측정 성능을 떨어뜨리는 주요한 요인 중의 하나였다. 이 논문에서는 기존의 텅스텐 할로겐 램프보다는 메탈 할라이드와 같은 아크(arc) 램프류나 최근 각광을 받고 있는 백색 LED 를 사용함으로써 전술한 문제를 근본적으로 해결할 수 있음을 보여주었

다. 특히 백색 LED 의 경우 아직은 휘도가 다른 램프에 비하여 낮지만, 최근 일반 조명 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있으므로, 향후 백색광 간섭계에서도 최적의 조명 장치로 이용될 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 대덕특구연구본부가 진행중인 “특구 보유키술 사업화 개발 사업”의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Hirabayashi, A., Ogawa, H. and Kitagawa, K., “Fast surface profiler by white-light interferometry by use of a new algorithm based on sampling theory,” Appl. Opt., Vol. 41, No. 23, pp. 4876-4883, 2002.
2. Ko, K. W., Ko, K. C. and Kim, J. H., “Pole Height Inspection on LCD Glass via High Speed White Light Interferometry,” J. of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 21-28, 2007.
3. Larkin, K. G., “Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry,” J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 13, No. 4, pp. 832-843, 1996.
4. Sandoz, P., “An algorithm for profilometry by white-light phase-shifting interferometry,” J. Mod. Opt., Vol. 43, No. 8, pp. 1545-1554, 1996.
5. Park, M. C. and Kim, S. W., “Direct Quadratic Polynomial Fitting for Fringe Peak Detection of White Light Scanning Interferometry,” Optical Engineering, Vol. 39, No. 4, pp. 952-959, 2000.
6. Harasaki, A., Schmit, J. and Wyant, J. C., “Improved vertical-scanning interferometry,” Appl. Opt., Vol. 39, No. 13, pp. 2107-2115, 2000.
7. Kim, G. H., “Thin-Film Thickness Profile Measurement using White-Light Scanning Interferometry,” Ph.D. Thesis, KAIST, 2000.