



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

디지털홀로그래피와
위상 펼침을 이용한 물체의
3차원 데이터 추출에 관한 연구



濟州大學校 大學院

物理學科

尹 宣 奎

2007 年 2 月

디지털홀로그래피와
위상 편차를 이용한 물체의
3차원 데이터 추출에 관한 연구

指導教授 劉 榮 勳

尹 宣 奎

이 論文을 物理學 碩士學位 論文으로 提出함

2007 年 2 月

尹宣奎의 物理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (인)

委 員 _____ (인)

委 員 _____ (인)

濟州大學校 大學院

2007 年 2 月

A Study of Obtaining the 3D data Using Phase Unwrapping and Digital holography

Seon-Kyu Yoon
(Supervised by professor Young-Hun Yu)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree
of Master of Natural Science

2007 . 2 .

This thesis has been examined and approved.

2007. 2. .

Department of Physics
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

Contents

List of Figures	i
SUMMARY	iv
I. 서론	1
II. 이론	3
1. 디지털 홀로그래피	3
2. 위상 펄칭	7
3. Goldstein 알고리즘의 문제점	12
4. 수정된 Goldstein algorithm	14
III. 실험 및 방법	20
1. 전산기 시늬	20
2. 실험장치	22
IV. 결과 및 고찰	25
1. 전산기 시늬 결과	25
2. 실험 결과	30
V. 결론	37
참 고 문 헌	38

List of Figures

그림 1. 디지털 홀로그래피	3
(a) 기록, (b) 재생	
그림 2. 수치적 홀로그램 재생의 좌표계	5
그림 3. 1차원에서의 wrapping과 펼침의 예	8
(a) 코사인 함수, (b) 지수 함수	
그림 4. 3차원에서의 wrapping과 펼침의 예	9
그림 5. Goldstein 알고리즘의 흐름도	9
그림 6. 3개의 residue가 존재할 때 Goldstein 알고리즘 연산	10
(a) residue 쌍 연결, (b) 잔여 residue 연결, (c) branch cut의 균형 맞춤	
그림 7. 전산기 시뮬을 통한 Goldstein 알고리즘 결과	11
(a) 물체, (b) Wrapped 데이터, (c) 펼침 데이터, (d) Residue 데이터, (e) Branch cut 데이터	
그림 8. 전산기 시뮬 데이터	12
(a) 원본 데이터, (b) wrapped 위상 데이터	
그림 9. 전산기 시뮬을 통한 Goldstein 알고리즘 결과	13
(a) 위상 펼침 데이터, (b) Branch cut 데이터	
그림 10. Wrapped, residue, branch cut 데이터의 영역	14
그림 11. Wrapped 데이터 영역 중 일부분에 대한, residue 데이터의 영역	14
그림 12. Residue와 경계선의 관계	15
그림 13. Residue와 경계선의 관계	16
그림 14. Wrapped 데이터 영역, residue 데이터의 영역과 경계선 데이터 영역	17
그림 15. 경계선과 branch cut의 비교	18
(a) 경계선 데이터와 residue 위치, (b) wrapped 데이터, 경계선 데이터와 residue 위치, (c) Branch cut 데이터	

그림 16. 전산기 시뮬을 통한 수정된 Goldstein 알고리즘의 결과	18
(a) Goldstein 알고리즘의 위상 펼침 데이터,	
(b) 수정된 Goldstein 알고리즘의 Branch cut 데이터,	
(c) 수정된 Goldstein 알고리즘의 위상 펼침 데이터	
그림 17. CGH 데이터	20
그림 18. Mach-Zehnder 형태의 디지털 홀로그래피 간섭계 구성도	22
그림 19. 마이크로 렌즈의 재생된 위상정보와 실상의 위상정보 확대	23
그림 20. 제작된 식료	23
(a) 증착된 선 마스크, (b) 식각된 선 마스크, (c) 식각된 사각 마스크	
그림 21. 사용된 물체	24
(a) 마스크 B1, (b) 마스크 C1, (c) 마스크 C2	
그림 22. 잡음 제거된 위상 데이터와 위상 펼침 결과	25
(a) 잡음 제거된 위상 데이터,	
(b) 잡음 제거된 위상 데이터의 위상 펼침	
그림 23. 위상 펼침 결과	26
(a) Goldstein 알고리즘, (b) 수정된 Goldstein 알고리즘	
그림 24. Branch cut 결과	27
(a) Goldstein 알고리즘, (b) 수정된 Goldstein 알고리즘,	
(c) Goldstein 알고리즘에서 문제되는 부분의 branch cut,	
(d) 수정된 Goldstein 알고리즘에서 문제되는 부분의 branch cut	
그림 25. 부분적인 Wrapped 데이터	28
(a) Wapped 데이터에서 확인할 부분, (b) Wrapped 데이터의 S1,	
(c) Wrapped 데이터의 S2, (b)Wrapped 데이터의 S3	
그림 26. 마이크로 렌즈의 위상 데이터	30
그림 27. 마이크로 렌즈의 위상 펼침 결과	30
(a) Goldstein 알고리즘, (b) 수정된 Goldstein 알고리즘	
그림 28. Goldstein알고리즘과 수정된 Goldstein 알고리즘의 결과에 대한 차	31
(a) 3D plot, (b) Density plot	

그림 29. 위상 펼침한 마이크로 렌즈의 Density plot	31
(a) Goldstein 알고리즘, (b) 수정된 Goldstein 알고리즘	
그림 30. 마스크 패턴의 위상 데이터에서 0차광, 실상, 허상의 위치	32
그림 31. B1에 대한 결과	33
(a) 위상 데이터, (b) B1 a에 대한 위상 펼침,	
(c) B1 b에 대한 위상 펼침, (d) B1 a에 대한 위상 펼침,	
(e) B1 b에 대한 위상 펼침	
그림 32. C1에 대한 결과	34
(a) 위상 데이터, (b) C1 a에 대한 위상 펼침,	
(c) C1 b에 대한 위상 펼침,(d) C1 a에 대한 위상 펼침,	
(e) C1 b에 대한 위상 펼침	
그림 33. C2에 대한 결과	35
(a) 위상 데이터, (b) C2 a에 대한 위상 펼침,	
(c) C2 b에 대한 위상 펼침, (d) C2 a에 대한 위상 펼침,	
(e) C2 b에 대한 위상 펼침	

SUMMARY

Generally, many kinds of phase unwrapping methods are used to obtain three-dimensional feature in digital hologram. The Goldstein algorithm is representative method which requires small memory and short execution time for an unwrapping process.

In case of a complex structure in wrapping data, however, the Goldstein algorithm is not appropriate comparing to simple structure of wrapping image. The problem occurs when connecting the shortest distance in residue eliminating process and deleting it in calculating. This is because couple of residue locate at boundary line.

The proposed algorithm presents a solution of Goldstein algorithm problem using modified calculation of boundary residue.

Consequently, we could have good result of three-dimensional data even if the structure has complex feature.

I. 서론

물리학 및 정밀기계산업 등 응용과학이 발전됨에 따라 단순한 형태의 관측이 아닌 그 목적에 따라 시료의 물리적, 화학적 특성을 정량적으로 측정 할 수 있으며, 3차원의 입체적인 상을 관찰 할 수 있는 방법이 개발되고 있다. 미시세계의 경우 주사 전자 현미경 (Scanning electron microscope : SEM), 원자 현미경 (Atomic force microscope : AFM), 공초점 현미경 (Confocal microscope) 등이 사용되어지고 있다. 이러한 방법은 주사를 통한 3차원 정보 수집을 하기 때문에 주사로 인한 시간지연과 진동이 발생된다. 최근 이러한 단점을 보완하기 위해서 디지털 홀로그래피를 이용한 현미경에 대한 연구가 진행되어지고 있다.

디지털 홀로그래피는 홀로그래피의 일부분이다. 홀로그래피 (Holography)는 1940년대 영국의 과학자 Dennis Gabor[1,2]에 의해 제안되었고, 디지털 홀로그래피 (Digital Holography) 기술은 30여 년 전부터 개발되어온 기술이다. 이는 Goodman과 Laurence[3]에 의해 제안된 수치적 재생 방법을 이용하는 것으로서, Kronrod등[4]에 의하여 실현되었다. 그리고 Haddad[5], Kreuzer와 Pawlitzek[6], Kebbel, Hartmann과 Juptner[7], Coppola[8] 등에 의해 연구되어 왔다. 최근 반도체 관련 기술이 발전으로 CCD (Charged Coupled Device)를 홀로그램 입력 장치로 사용할 수 있게 되었고, 컴퓨터의 발전으로 실시간으로 연속적인 대상물체의 홀로그램 (hologram) 데이터를 입력 받아 처리 할 수 있게 되었다.

디지털 홀로그래피를 통해 얻어진 물체의 위상정보는 물체의 3차원 정보를 분석하는데 사용되어지고 있다. 이때 디지털 홀로그래피를 통해 얻어진 위상정보는 기준파와 물체파의 위상차 (ϕ)를 나타내며, 위상차 정보의 범위는 $-\pi \leq \phi < \pi$ 이다. 하지만, 실제의 물체 위상은 2π 범위 이상의 값을 가지고 있다. 이를 수치적 해석을 통하여 복원하는 방법이 위상 펼침 (Phase unwrapping)으로 이와 관련된 많은 방법들이 연구 되고 있다[9-17].

1차원 위상 펼침은 Itoh의 이론이 많이 사용되고 있다[18]. 이는 인접한 위상차간의 미분 값은 같은 구간의 실제 위상의 미분 값과 같음을 이용한 것으로, 미분

불가한 점이 없는 경우 위상차의 미분 값을 적분하여 실제 위상을 재생하는 것이다. 하지만, 연속적이지 않고 미분 값을 나타낼 수 없는 특이점 (Singular point)들이 존재할 때 적분되어진 값은 원래의 위상과는 다른 값을 나타내게 된다. 이는 2차원 배열로 나타내는 위상차 데이터에서도 같은 결과를 나타낸다. 2차원 배열에서 특이점이 없다면, 어떠한 경로를 선택하여 적분을 하여도 같은 결과를 나타내지만, 특이점이 존재 할 때 경로에 따라 다른 값을 얻게 되는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 알고리즘 중에서 하드웨어적인 부담이 적고, 연산시간이 가장 짧은 Goldstein 알고리즘을 많이 사용하고 있다[19].

하지만, Goldstein 알고리즘은 복잡하고 해상도 근처의 데이터에서 잘못된 결과를 나타낸다.

본 논문에서는 해상도근처에서 복잡한 구조의 경우, Goldstein 알고리즘에서 발생하는 문제점을 분석하고, 이를 이용하여 해상도근처에서 복잡한 구조의 경우에서도 올바른 위상 펼침 할 수 있는 방법을 구현하고 이를 이용하여 3차원 상을 얻고자한다.

II. 이론

1. 디지털 홀로그래피

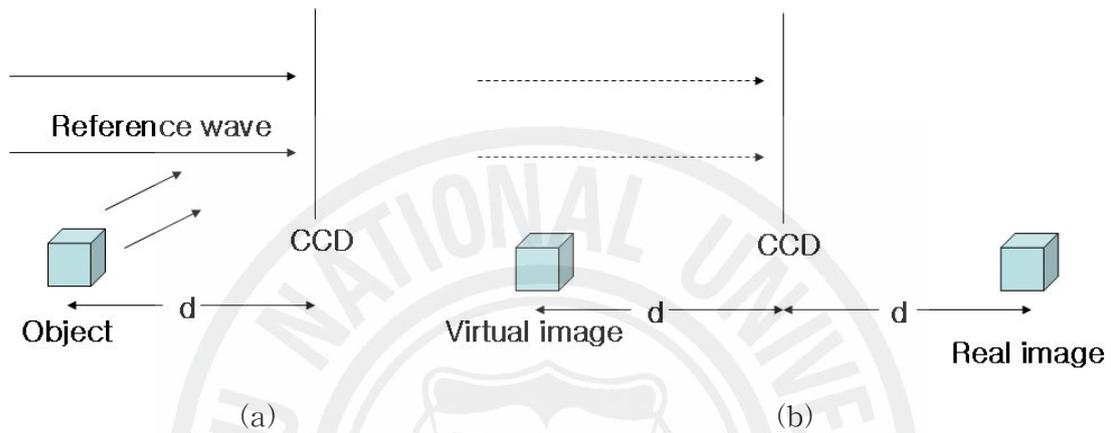


그림 1. 디지털 홀로그래피 : (a) 기록, (b) 재생

디지털 홀로그래피는 기본적으로 평면 참조광과 물체광을 홀로그램 건판 (hologram plate) 대신 CCD를 사용하여 기록하고 수학적으로 재생하는 것이다. 그림 1 (a)에서와 같이 물체는 일반적으로 3차원이고 표면 반사로 확산되어 거리 d 만큼 떨어진 CCD에 기록된다. 이때 기록된 간섭무늬 패턴은 참조광과 물체광에 의한 것으로 다음과 같이 물체파가 참조파가 주어진다면,

$$\begin{aligned} \text{물체파} : E_O(x,y) &= a_O(x,y)e^{i\phi_O(x,y)} \\ \text{참조파} : E_R(x,y) &= a_R(x,y)e^{i\phi_R(x,y)} \end{aligned} \quad (2.1)$$

CCD에 기록되는 참조광과 물체광에 의한 간섭무늬는 강도 (intensity)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
I(x,y) &= |E_O(x,y) + E_R(x,y)|^2 \\
&= E_O(x,y)E_O^*(x,y) + E_R(x,y)E_R^*(x,y) \\
&\quad + E_O(x,y)E_R^*(x,y) + E_R(x,y)E_O^*(x,y)
\end{aligned} \tag{2.2}$$

식 (2.2)에서 $E_O(x,y)E_O^*(x,y) + E_R(x,y)E_R^*(x,y)$ 은 0차광이며, $E_O(x,y)E_R^*(x,y)$ 는 물체의 실상을 나타내고 $E_R(x,y)E_O^*(x,y)$ 은 허상을 나타낸다. 이는 두 광의 간섭을 나타낸 식으로서 실제 기록 되어지는 홀로그램은 다음과 같다.

$$h(x,y) = h_0 + \beta\tau I(x,y) \tag{2.3}$$

여기서 β 는 진폭정도의 기울기와 물체의 빛의 감도 특성 비율이며 τ 는 노출 시간이고 디지털 홀로그램에서는 CCD에 기록되기 때문에 h_0 는 무시된다.

그림 1 (b)에서와 같이 홀로그램을 재생하기 위하여 사용되는 재생파가 기록되어진 참조파와 같다면,

$$\begin{aligned}
E_R(x,y)h(x,y) &= [h_0 + \beta\tau(a_R^2 + a_O^2)]E_R(x,y) \\
&\quad + \beta\tau a_R^2 E_O(x,y) + \beta\tau E_R^2(x,y)E_O^*(x,y)
\end{aligned} \tag{2.4}$$

이때 우변의 첫 번째 항은 0차이고, 두 번째 항은 물체파의 허상이고 마지막 항은 실제 물체파이다. 이때 $\beta\tau a_R^2$ 은 이미지의 휘도에 관계되어지고 발생되어지는 물체의 실상은 일그러짐이 발생한다. 일그러짐이 없는 실상을 재생하기 위해서는 참조광이 E_R^* 이어야 한다.

$$\begin{aligned}
E_R^*(x,y)h(x,y) &= [h_0 + \beta\tau(a_R^2 + a_O^2)]E_R^*(x,y) \\
&\quad + \beta\tau a_R^2 E_O^*(x,y) + \beta\tau E_R^{*2}(x,y)E_O^*(x,y)
\end{aligned} \tag{2.5}$$

재생과 기록은 비슷한 매개변수로 사용되기 때문에 허상과 실상은 쌍을 이루어 홀로그램에 기록된다.

광학적 재생에서는 허상은 원래 물체의 위치에 존재하고 실상은 거리 d 에서 나타나지만, 디지털 홀로그래피에서는 실상은 CCD를 넘어서 위치하게 된다. 어퍼처에서 광파의 회절은 입사광에 수직하므로 Fresnel-Kirchhoff 적분을 이용하

여 나타내면

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho'}}{\rho'} dx dy \quad (2.6)$$

$$\text{where : } \rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2}$$

이다. 여기서 $h(x, y)$ 는 홀로그램 함수이고 ρ' 는 홀로그램면과 재생면 사이의 거리다.

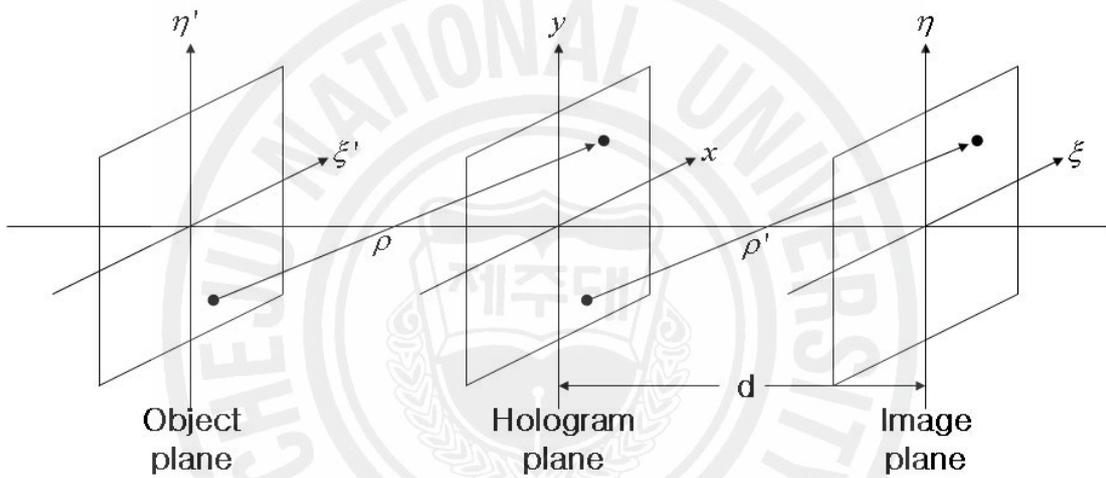


그림 2. 수치적 홀로그램 재생의 좌표계

그림 2와 같이 회절 패턴은 CCD면 뒤에서 거리 d 만큼 떨어져 실상면에서 복소수 진폭을 재생한다. 이때 $\Gamma(\xi', \eta')$ 은 수치적 재생의 기본이 되며, 실수는 강도를 허수는 위상을 나타낸다. 식 (2.5)은 왜곡이 없는 실상을 나타내며, 복소수 참조광을 사용하여 재생한다. 왜곡이 없는 실상은 디지털 홀로그래피에 E_R^* 을 이용하므로 식 (2.6)을 정리하면,

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) \frac{e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho}}{\rho} dx dy \quad (2.7)$$

$$\text{where : } \rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2}$$

이다. 재생면과 CCD면의 관계가 ξ, η 와 x, y 이므로, $\rho = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + d^2}$ 을 급수전개하면,

$$\rho = d + \frac{(\xi-x)^2}{2d} + \frac{(\eta-y)^2}{2d} - \frac{1}{8} \frac{[(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2]^2}{d^3} + \dots \quad (2.8)$$

이다. 4번째 항 이후에는 파장보다 매우 작기 때문에 ρ 는 선형이라고 볼 수 있다.

$$\rho = d + \frac{(\xi-x)^2}{2d} + \frac{(\eta-y)^2}{2d} \quad (2.9)$$

이를 식 (2.7)에 대입하여 인수분해하면,

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda d} e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}d} e^{-i\frac{2\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)} e^{-i\frac{2\pi}{\lambda d}(x\xi + y\eta)} dx dy \quad (2.10)$$

이는 Fresnel 근사나 Fresnel 변환이라 하며, Fourier 변환과 유사하다. 이는 홀로그램 뒷면에 파장에 대한 재생을 가능하게하고 이때 재생되는 상은 실상이다. 계산 되어지는 강도는 $|\Gamma(\xi, \eta)|^2$ 이고 위상은

$$\phi(\xi, \eta) = \arctan \frac{\text{Im}[\Gamma(\xi, \eta)]}{\text{Re}[\Gamma(\xi, \eta)]} \quad (2.11)$$

이다. 이때 위상정보는 물체에 대한 3차원 정보를 가지고 있으나 $-\frac{\lambda}{2} \leq \phi < \frac{\lambda}{2}$ 범위의 값을 나타내므로 이 위상 데이터를 이용하여 3차원 정보를 얻으려면 위상 필름을 이용해야 한다.

2. 위상 펼침

1차원 위상 펼침은 Itoh의 이론이 많이 사용된다[18]. 실제 위상이 $\phi(x)$ 이고, 표본화를 위한 기준인 Nyquist rate[20]에 의한 최소 표본화 비를 만족하는 wrapped 위상 (Wrapped phase)과 위상 펼침한 위상의 관계는 다음과 같다.

$$W\{\phi(n)\} = \psi(n) = \phi(n) + 2\pi k \quad (2.12)$$

여기서 W 는 Wrapping 연산자 (wrapping operator)이고, $\psi(n)$, $\phi(n)$ 은 각각 wrapped 위상과 재생된 위상이다. k 는 정수이고, n 은 표본화에 따른 상수이다.

Wrapping 연산자는 항상 $\psi(n)$ 이 $-\pi \leq \psi(n) < \pi$ 이 되게 한다. Itoh의 계산에 의하면 wrapped 위상의 차이와 실제 위상의 차이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta\{\phi(n)\} &= \phi(n+1) - \phi(n) \\ \Delta\{k(n)\} &= k(n+1) - k(n) \end{aligned} \quad (2.13)$$

식 (2.12)과 (2.13)를 사용하여 wrapped 위상의 차,

$$\Delta\{W\{\phi(n)\}\} = \Delta\{\phi(n)\} + 2\pi\Delta\{k_1(n)\} \quad (2.14)$$

이를 다시 wrapped 연산자를 적용하면,

$$W\{\Delta\{W\{\phi(n)\}\}\} = W\{\Delta\{\psi(n)\}\} = \Delta\{\phi(n)\} + 2\pi[\Delta\{k_1(n)\} + k_2(n)] \quad (2.15)$$

여기에서 k_1 과 k_2 는 두 번의 wrapping 연산자를 사용하여 나타난 것이다. 이 식 (2.15)은 wrapped 위상차가 다음의 구간에 존재하게 하다.

$$-\pi < \Delta\{\phi(n)\} \leq \pi \quad (2.16)$$

따라서 $2\pi[\Delta\{k_1(n)\}+k_2(n)]$ 은 0이 되어,

$$\Delta\{\phi(n)\}=W\{\Delta\{W\{\phi(n)\}\}=W\{\Delta\{\psi(n)\}\} \quad (2.17)$$

된다. 이는 인접한 wrapped 위상 데이터의 미분 값이다. $W\{\Delta\{\psi(n)\}\}$ 은 실제 위상면의 인접한 점 사이의 미분 값인 $\Delta\{\phi(n)\}$ 가 같다. 그러므로 미분 불가능한 점이 없다면, 재생된 위상은 다음과 같다.

$$\phi(m)=\phi(0)+\sum_{n=0}^{m-1}W\{\Delta\{\psi(n)\}\} \quad (2.18)$$

식 (2.18)은 위상 펼침에 의한 위상은 wrapped 위상차를 이용하여 구할 수 있음을 보여준다. 이를 계산으로 확인해 보면 다음과 같다.

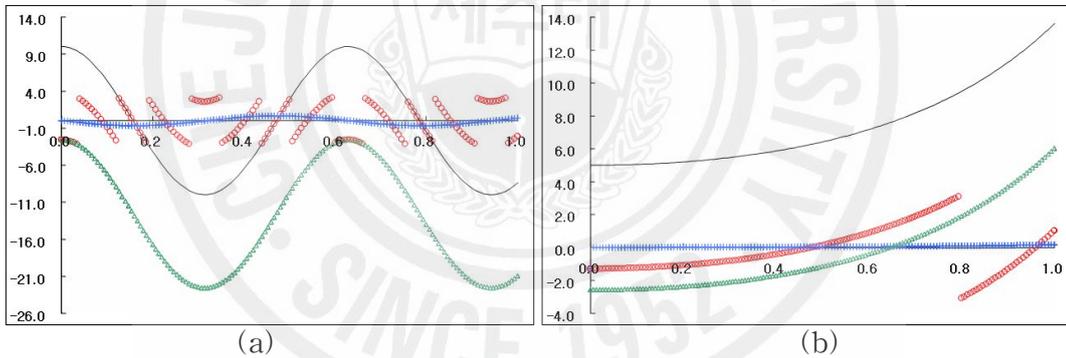


그림 3. 1차원에서의 wrapping과 펼침의 예

(—: 원 데이터, ○: wrapped 데이터, +: 미분 데이터, △: 펼침 데이터)

: (a) 코사인 함수, (b) 지수 함수

그림 3에서 실선 (—)은 원본 데이터, 원 (○)은 wrapped 데이터, 삼각형 (△)은 펼침 데이터이고 더하기표시 (+)는 인접한 wrapped 데이터의 미분 값이다.

이를 3차원으로 확장하면 다음 그림 4와 같은 결과를 얻게 된다.

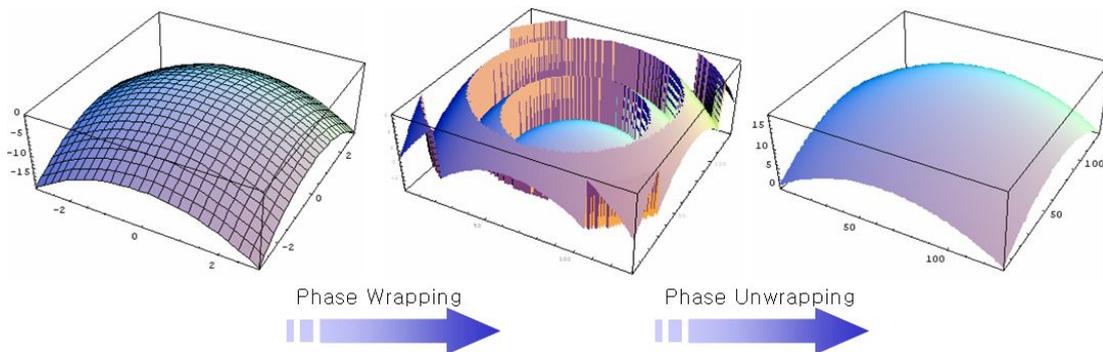


그림 4. 3차원에서의 wrapping과 펼침의 예

Wrapped 위상정보가 불연속면일 때 계산에서 얻어지는 값은 기대 값과 다르다. 이는 wrapped 위상에서 비연속적이고 위상범위를 벗어난 값인 특이점에 의하여 나타난다. 2차원에서도 특이점으로 인한 잘못된 결과를 얻게 된다. 이러한 특이점을 제외하고 원래의 결과를 얻게 위한 방법들이 많이 연구되어지고 있다 [9-17]. 이러한 방법 중 필요한 메모리의 크기가 작고 연산시간이 가장 짧은 Goldstein 알고리즘이 많이 사용되고 있다.

Goldstein 알고리즘의 순서도는 다음 그림 5와 같다.



그림 5. Goldstein 알고리즘의 흐름도

여기서 Residue는 특이점과 같고, branch cut은 특이점을 제거한 경로이다. 이

알고리즘에서 residue와 branch cut은 적분 경로에 의존하는 값들의 집합이다 [19]. 이를 통하여 cut을 제외한 어떠한 경로로 적분을 하여도 원래의 값을 얻을 수 있다. 일반적으로 branch cut을 positive residue와 negative residue를 연결하는 것이다. 즉, 에너지 보존 법칙에 의하여 그 합이 0이 된다.

$$\text{Positive residue} + \text{Native residue} = 0 \quad (2.19)$$

하지만 이러한 연결을 잘못할 경우 계산 할 수 없는 영역이 발생한다.

이러한 영역이 발생하기 않도록 하기 위하여 Goldstein 알고리즘에서는 임의의 residue를 선택하여 그 점에서 가까운 residue를 찾아 연결한다. 이는 시작점을 기준으로 하여 $3 \times 3 \rightarrow 5 \times 5 \rightarrow 7 \times 7$ 과같이 한 변이 홀수인 정사각형 행렬로 확장 하면서 인접한 residue를 찾는 것이다.

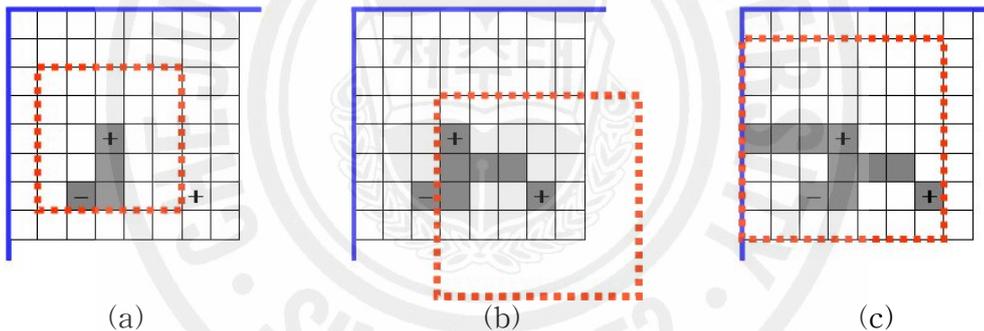


그림 6. 3개의 residue가 존재할 때 Goldstein 알고리즘 연산

: (a) residue 쌍 연결, (b) 잔여 residue 연결, (c) branch cut의 균형 맞춤

그림 6은 Goldstein 알고리즘을 간략히 설명해 준다. (a)는 시작되어지는 점에서 행렬을 확장하여 5×5 행렬일 때 다른 residue를 찾았다. 이를 연결하여 branch cut한다. 이때 cut의 값은 두 residue가 음과 양으로 0을 나타낸다. (b)는 다른 cut을 제외한 잔여 residue에서 행렬을 확장하는 중에 7×7 일 때 branch cut을 이루고 있는 점과 연결 된다. 전체 branch cut의 값이 양의 값을 나타낸다. (c)에서는 branch cut이 0 아닌 값을 나타낼 때, branch cut을 가장 가까운 벽으로 연결하여 총 합을 0으로 만드는 것이다. 이때 벽은 양과 음의 값을 갖기 때문

에 연결되는 모든 cut은 0이 된다.

Goldstein 알고리즘을 전산기 시뮬을 한 결과 그림 7과 같다.

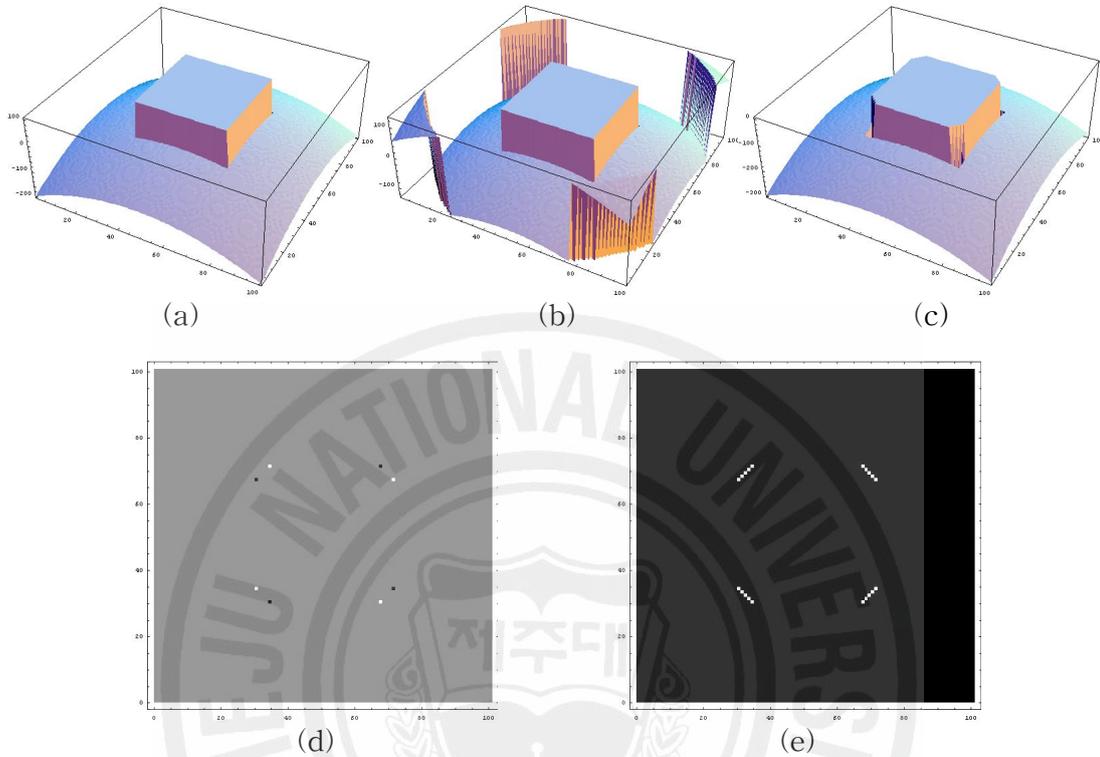


그림 7. 전산기 시뮬을 통한 Goldstein 알고리즘 결과
: (a) 물체, (b) Wrapped 데이터, (c) 펼침 데이터, (d) Residue 데이터,
(e) Branch cut 데이터

그림 7 (a)은 물체를 위상을 나타내는 것이고, (b)는 물체의 wrapped 위상을 나타낸다. (c)는 Goldstein 알고리즘으로 위상 펼침 한 결과를 나타낸다. (d)는 Goldstein 알고리즘이 적용되어 나타나는 결과 중 특이점에 대한 정보를 나타내는 것이다. (e)는 이 특이점을 가까운 점끼리 연결한 결과이다. 이 연결된 선의 합은 0이 되고, 전체 합은 0이 된다.

3. Goldstein 알고리즘의 문제점

Goldstein 알고리즘은 복잡하고 해상도 근처에서 문제를 발생시킨다. 이는 Goldstein 알고리즘 특성상 일정한 거리 두고 발생하는 residue 쌍에 대해서는 최단거리를 이용하여 연결하기 때문에 발생하는 것이다. 해상도 근처에서 나타나는 residue 쌍에 대해서는 최단 거리를 이용하여 연결하면, 원래의 쌍이 아닌 다른 residue와 연결되어진다. 이를 확인하기 위하여 다소 복잡하고 분해능에 가깝도록 만들어진 데이터를 이용하여 Goldstein 알고리즘을 적용하였다. 이때의 분해능은 변화점이 1픽셀을 사이에 둘 경우이다. 이러한 경우를 고려하기 위한 데이터는 다음 그림 8과 같다.

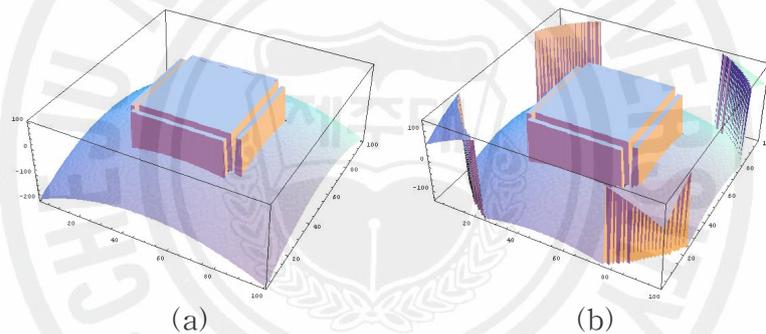


그림 8. 전산기 시늬 데이터 : (a) 원본 데이터, (b) wrapped 위상 데이터

이때 사용되어진 데이터의 형태는 앞 절의 그림 7에서 사용한 데이터에서 가운데 사각형을 돌출부를 기준으로 하여 1픽셀의 간격을 두고 존재하는 얇은 사각형 형태의 돌출부를 추가하였다. 가상의 복잡하고 분해능에 가까운 데이터를 만든 것이다.

이를 Goldstein 알고리즘을 이용한 결과 다음과 같다.

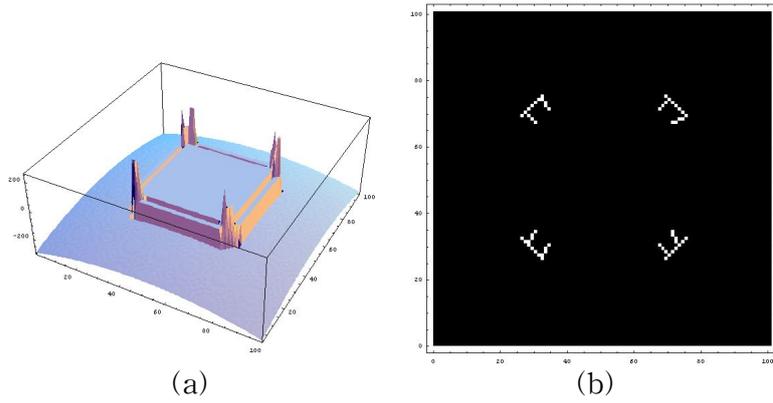


그림 9. 전산기 시뮬을 통한 Goldstein 알고리즘 결과
 : (a) 위상 펼침 데이터, (b) Branch cut 데이터

위 결과를 보면, branch cut을 한 위치에서 잘못되어진 결과가 나타나고 있다. 이는 잘못 계산되어진 부분에서 branch cut의 방향에 관한 문제이다. 'II'형태의 branch cut에서 'II'형태로 나타나는 branch cut은 중앙의 사각형에 의해 발생된 residue에 의한 것으로서 그림 7 (e)과 비교하면, 그 방향이 다르다. 이러한 문제점은 모든 곳에서 관찰되는 것은 아니다. 분해능에 가깝게 위치한 복잡한 형태의 데이터에서 발견되는 것으로 최단 거리의 residue를 연결하면서 발생된 문제이다.

4. 수정된 Goldstein 알고리즘

문제를 해결하기 위하여 residue가 발생하는 위치에 대하여 고려하였다.

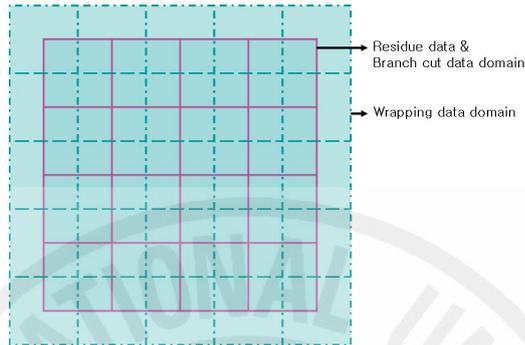


그림 10. Wrapped, residue, branch cut 데이터의 영역

Residue의 위치는 그림 10에서와 같이 4개의 wrapped 데이터 중앙에 위치한다. Residue를 연결하는 branch cut 역시 residue와 같은 영역에 존재한다. 계산에 의해 residue의 값이 λ 이면 positive residue이고, $-\lambda$ 이면 negative residue로 나타난다. 현재 Goldstein 알고리즘에서 잘못된 결과가 나타나는 데이터에서 residue가 발생하는 위치를 확인하면 다음 그림 11과 같다.

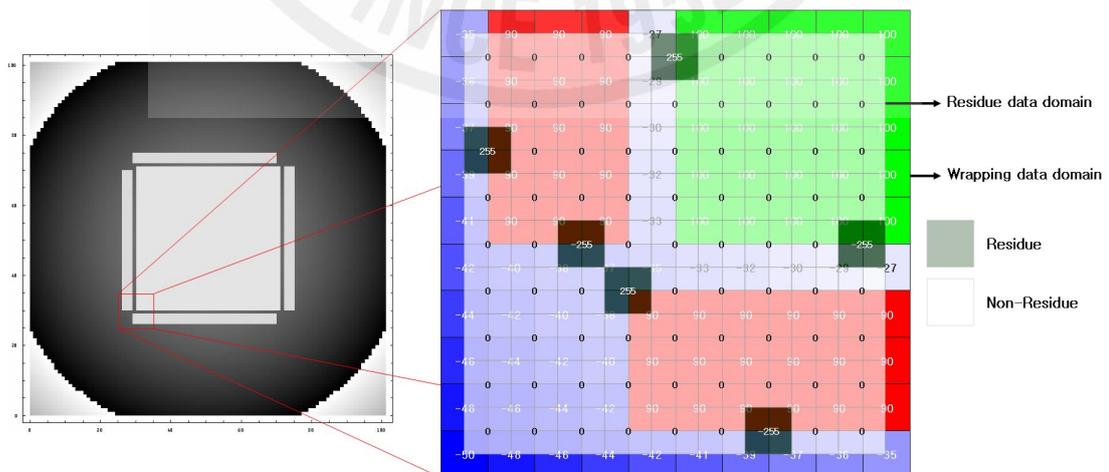


그림 11. Wrapped 데이터 영역 중 일부분에 대한, residue 데이터의 영역

Residue가 발생하는 위치를 확인한 결과, 반구와 각각의 사각형이 만나는 경계에서 residue가 발생하는 것으로 확인되었다. 그리고 동일한 물체에 의한 경계에 positive residue와 negative residue가 존재함을 확인 할 수 있었다. 경계 사이에서 발생하는 residue에 대하여 생각하였다.

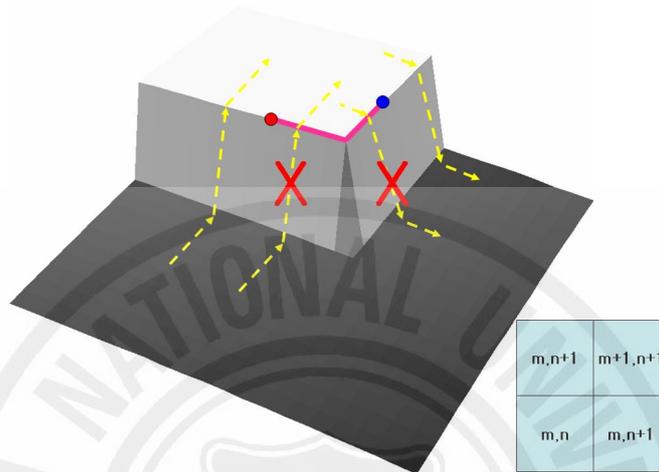


그림 12. Residue와 경계선의 관계

Residue를 찾을 때 다음 식 (3.1)을 이용하여 찾는다.

$$W[(m,n)-(m+1,n)] + W[(m+1,n)-(m+1,n+1)] + W[(m+1,n+1)-(m,n+1)] + W[(m,n+1)-(m,n)] \quad (3.1)$$

여기서 (m,n) , $(m+1,n)$, $(m,n+1)$, $(m+1,n+1)$ 는 그림 12와 같이 2×2 행렬의 각각의 위치를 나타내며 이때 위치는 CCD의 픽셀이다. 계산된 결과가 λ , $-\lambda$, 0 으로 나타나며, 0 은 residue가 없는 것이다. 이때 residue가 발생하는 경우는 식 (3.1)에서 $W[\Delta\phi]$ 을 연산하는 과정에서 $\Delta\phi$ 의 범위가 $-\frac{\lambda}{2} \leq \Delta\phi < \frac{\lambda}{2}$ 을 벗어나 식 (2.12)에 의하여 k 값이 양의 정수 혹은 음의 정수가 사용되어지는 항이 홀수 개일 때 발생된다. 따라서 residue가 경계선의 모든 위치에서 발생하는 것이 아니라 변화폭이 $\frac{\lambda}{2}$ 이상 인 경계선에서만 발생할 수 있는 것이다. 따라서 변화폭이

$\frac{\lambda}{2}$ 이상인 값인 위치에 대해서만 경계선으로 사용한다. 따라서 residue를 포함하는 경계선을 얻을 수 있다.

그림 12에서처럼 $\frac{\lambda}{2}$ 이상의 값인 경계선을 지나는 경로를 선택하여 위상 펼침을 한 경우 부정확한 값이 나타난다. 따라서 경계선을 지나지 않는 경로를 선택해야 하는 것이다. 이는 경계선에 위치하는 residue들을 연결함으로 경계선을 넘어 잘 못 계산되어지는 영역을 최소화 시켜야하는 것이다.

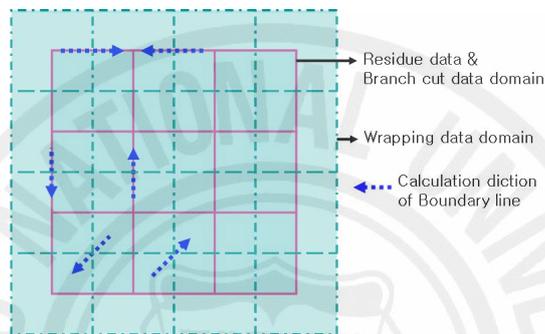


그림 13. Residue와 경계선의 관계

그림 13에서와 같이 수직과 수평방향으로 계산된 경계선은 residue와 branch cut이 위치하는 영역과 다른 영역에 발생한다. 이는 수직 수평 방향으로 계산되어지는 값이 residue이나 branch cut의 사이에 위치하기 때문에 어느 위치에 대한 경계선인지 불확실하다. 하지만 대각선 방향인 45° 와 -45° 로 경계선을 계산하면 계산된 결과의 위치가 residue와 branch cut이 영역과 일치한다. 계산 방향에 따른 경계선 차이가 발생하면 안 된다. Wrapped 데이터는 그 값이 $-\frac{\lambda}{2} \leq \phi < \frac{\lambda}{2}$ 사이 값만 존재하기 때문에 두 픽셀의 차의 절대 값이 $\frac{\lambda}{2}$ 이상일 경우에만 경계선으로 사용할 수 있다. 현재 사용하고 있는 모든 wrapped 데이터는 8bit 흑백 이미지를 받아 사용하고 있기 때문에 wrapped 데이터에서 위상이 존재할 수 있는 범위는 $-127.5 \leq \psi(n) < 127.5$ 이다. 따라서 안정적으로 residue를 포함하는 경계선을 이루기 위하여 변화폭의 절대 값이 126이상 일 때를 경계선으로 나타내

었다. 이때 126은 0.494118λ 임으로 기준 값을 0.494λ 로 정하였다.

이상의 내용을 그림 11의 데이터에 적용하면 다음 그림14와 같은 결과를 얻을 수 있다.

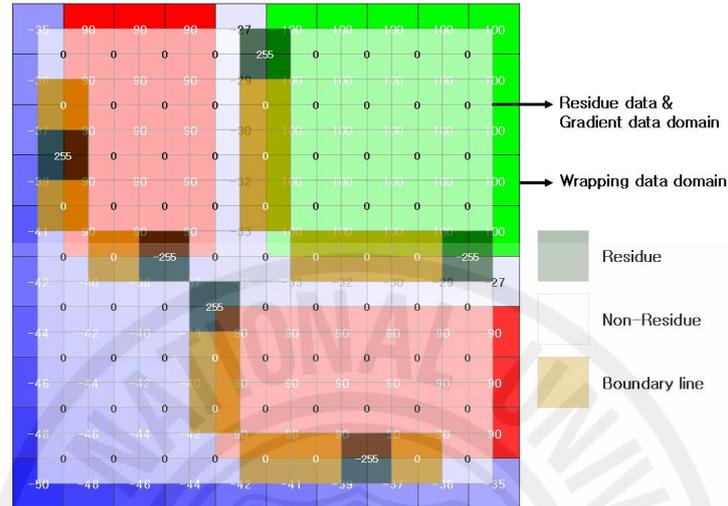


그림 14. Wrapped 데이터 영역, residue 데이터의 영역과 경계선 데이터 영역

동일한 사각형에서 발생하는 residue는 동일 경계선에 존재하고 쌍을 이루고 있음이 확인된다.

이를 정리하면, 인접한 두 픽셀의 변화량이 0.494λ 이상인 경계선에 존재하는 residue가 2개 이상일 경우 경계선에 위치한 residue를 우선적으로 연결해야 한다는 것이다. 이를 이용하여 Goldstein 알고리즘을 수정하여 실행한 결과 다음과 같다.

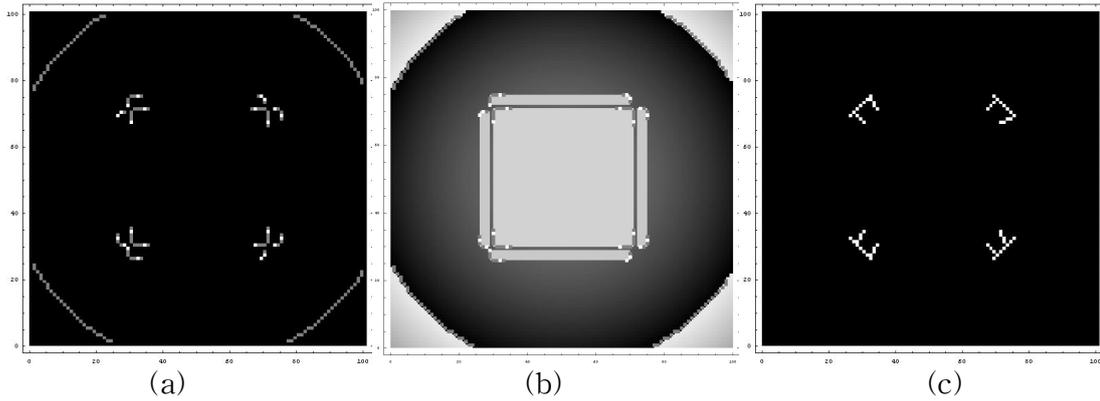


그림 15. 경계선과 branch cut의 비교

: (a) 경계선 데이터와 residue 위치,
 (b) wrapped 데이터, 경계선 데이터와 residue 위치, (c) Branch cut 데이터

그림 15 (a)에서 경계선은 회색으로, residue의 위치는 흰색으로 나타내었다. (b)를 보면 경계선에 residue가 존재하고 있음을 확인 할 수 있다. 경계선에 존재하는 residue들을 우선적으로 연결하도록 하면,

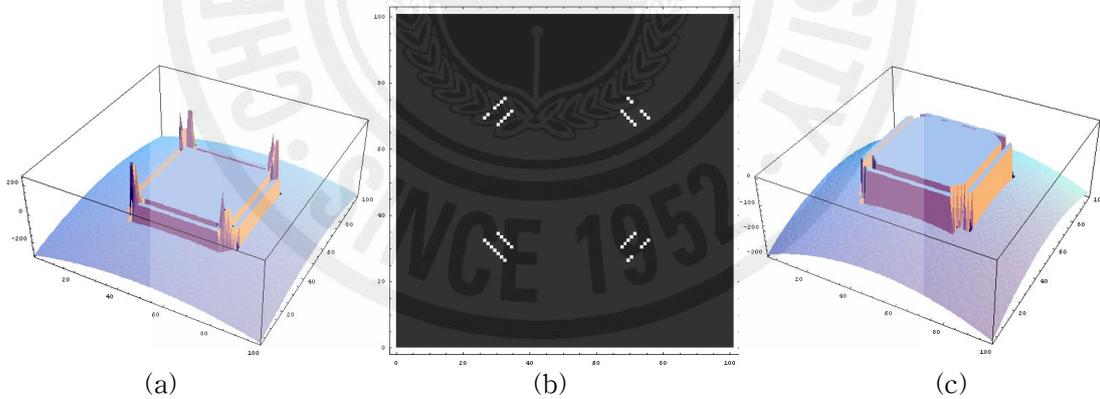


그림 16. 전산기 시뮬을 통한 수정된 Goldstein 알고리즘의 결과

: (a) Goldstein 알고리즘의 위상 펼침 데이터,
 (b) 수정된 Goldstein 알고리즘의 Branch cut 데이터,
 (c) 수정된 Goldstein 알고리즘의 위상 펼침 데이터

동일 경계선의 residue를 우선적으로 branch cut한 결과 그림 15 (c)에서 ‘II’형

태로 되었던 것이 그림 16 (b)과 같이 수정이 되어졌다. 그림 16 (b)에서 중앙의 ‘/’형태의 branch cut은 기존의 Goldstein 알고리즘에 결과인 그림 10 (a)과 같은 결과를 나타내고 있다. 이는 중앙의 큰 사각형에 의한 것으로 경계면을 이용하여 branch cut을 하였기 때문에 구분할 수 있는 것이다. 외각에 있는 branch cut은 큰 사각형 주위에 있는 얇고 긴 사각형에 의한 것임을 확인 할 수 있다. 그 결과 branch cut 부분에서 잘못된 결과가 사라졌음을 확인 할 수 있다. 이는 경계선을 이용하여 branch cut을 하면, 상호 연관성이 있는 residue를 연결 할 수 있음을 보여준다. 즉, 경계선을 이용하면, 위와 같이 분해능에 가까이에 위치한 물체에서 나타나는 unwrapping 결과에 대한 문제점을 해결할 수 있다.



Ⅲ. 실험 및 방법

1. 전산기 시늬

전산기 시늬는 CGH (Computer Generated Hologram)를 이용하여 복잡하고 분해능에 가까운 데이터를 만들었다. CGH로 만들어진 데이터는 그림 17과 같다.

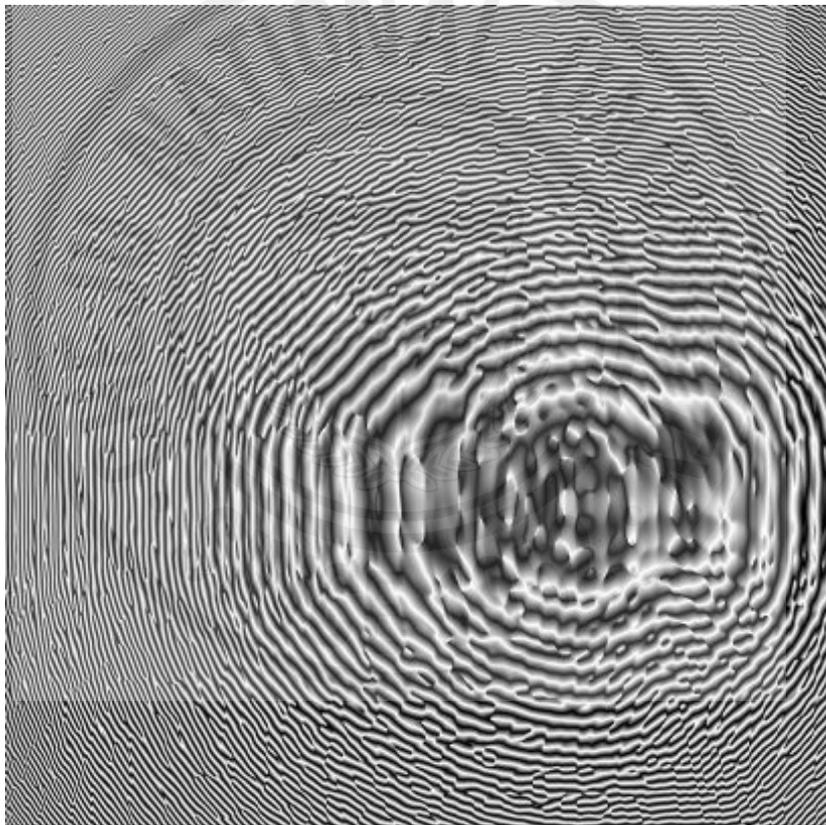


그림 17. CGH 데이터

홀로그램이 기록된 건판 표면은 간섭과 회절에 의한 강도 변화를 기록한다. 건판에 기록되어진 강도 변화는 건판의 깊이를 변화시킨다. 홀로그램을 기록한 파장과 다른 파장을 사용하여 건판의 표면에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이때 기록

되어진 파장과 같은 파장을 사용하면, 표면정보와 대상 물체의 정보가 기록된 홀로그래ムの 재생상이 동시에 관찰되므로 다른 파장을 사용하는 것이다.

건판 측정에 사용된 파장이 건판의 최대 깊이와 같다면, 2π 가 넘지 않는 범위에서의 깊이 측정이 가능하다. 이를 이용한 건판 표면의 위상정보는 디지털 홀로그래피의 수치적 재생으로 얻을 수 있다. 이는 물체를 CGH 사용하여 만들어진 홀로그래ם 데이터와 같다. 따라서 CGH로 만들어진 홀로그래ם이 건판의 표면의 위상정보라고 가정 할 수 있다.

CGH로 만들어진 홀로그래ם이 건판의 표면에 대한 위상정보라고 할 때 Goldstein 알고리즘과 수정된 Goldstein 알고리즘을 비교한다. 각각의 방법으로 위상 펼침한 결과와 연산시간의 차이를 확인한다. 측정에 사용된 파장과 건판의 깊이가 같기 때문에 위상 펼침한 값은 CGH로 만들어진 홀로그래ם과 같다.



2. 실험장치

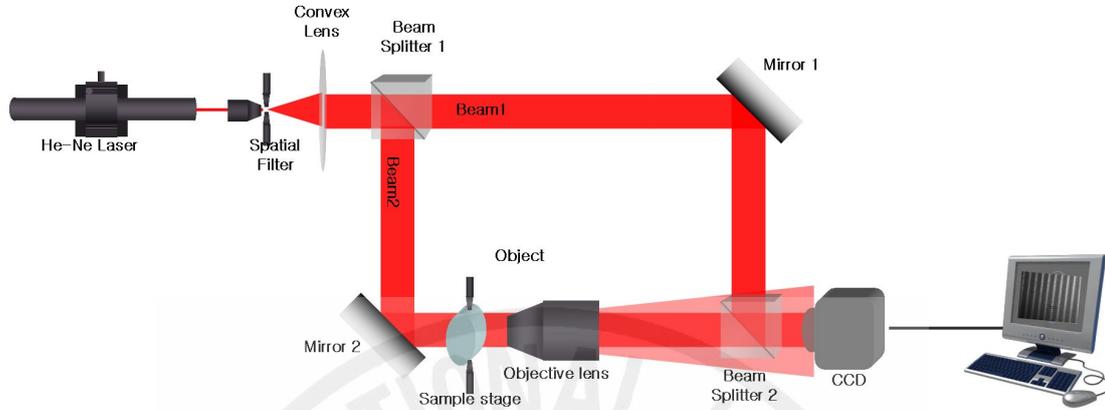


그림 18. Mach-Zehnder 형태의 디지털 홀로그래피 간섭계 구성도

실험에 사용한 디지털 홀로그래피 간섭계는 그림 18과 같이 투과형 Mach-Zehnder 간섭계를 사용하였다. 사용된 광원은 He-Ne 레이저로 파장은 632.8 nm이다. 광원에서 나온 빛은 공간여과기 (spatial filter) 와 볼록렌즈 (convex lens)를 통과하여 평행광으로 진행하게 된다. 이 평행광은 광 분할기 1 (Beam splitter 1)을 통과하여 두 개의 빛으로 나뉜다. 이때 빔 1 (beam 1)은 거울 1 (mirror 1)에 반사하고 다시 광 분할기 2에서 반사되어 CCD에 입사한다. 빔 2는 거울 2에 반사되어 물체를 투과하고 이 투과된 물체광은 현미경 대물렌즈 (object lens)를 통과하여 광 분할기 2를 지나 CCD에 입사 된다. 이때 입사된 두 광은 CCD 표면에서 간섭무늬를 형성하고 CCD에 기록한다. 사용된 CCD는 REDLAKE사의 ES4020이다. 실험에 사용된 시료는 마이크로 렌즈와, 마스크 (mask) 패턴을 사용하였다. 위 광학계를 통해 CCD로 얻어진 시료의 홀로그램을 수치적 재생을 통해 위상만을 계산하였다. 이 위상정보를 이용하여 기존의 Goldstein 알고리즘과 기울기 데이터를 이용하는 수정된 Goldstein 알고리즘을 이용하여 비교하였다.

마이크로 렌즈는 일반적인 것을 사용하였다. 렌즈의 일부분만의 정보를 비축 (off-axis) 디지털 홀로그래피 방식으로 기록하였다. 기록된 홀로그램 위상정보는

그림 19와 같이 그중 실상의 위상정보를 확대 사용하였다.

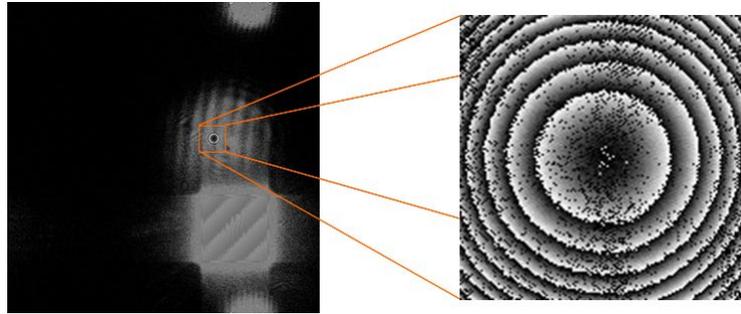


그림 19. 마이크로 렌즈의 재생된 위상정보와 실상의 위상정보 확대

측정된 마이크로 렌즈의 위상정보를 Goldstein 알고리즘과 수정된 Goldstein 알고리즘을 이용하여 그 차이를 확인하였다.

마스크 패턴은 높이와 깊이를 측정하기 위한 3개의 시료 중 깊이에 대한 시료를 사용하였고 그림 20과 같다.

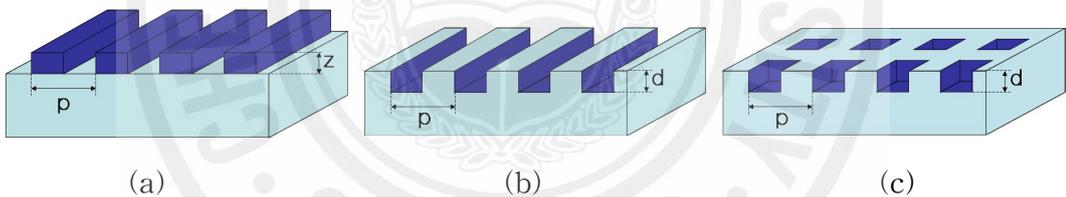


그림 20. 제작된 시료
: (a) 증착된 선 마스크, (b) 식각된 선 마스크, (c) 식각된 사각 마스크

그림 20은 사용된 시료의 마스크 패턴의 도식을 나타내고 있다. 이때 물체의 높이는 z , 깊이는 d , 주기는 p 이다. (a)는 증착되어진 시료이고, (b)와 (c)는 식각된 시료이다. 이중 식각된 시료만을 사용하였다. 이때 시료 제작시 목표 깊이는 200nm이다. 식각된 선 마스크는 한 기판 안에 주기를 1.8, 1.5, 1, 0.8과 0.5 μm 로 제작되었고 마스크 B1으로 나타냈다. 식각된 사각 마스크는 주기가 1 μm 와 2.5 μm 인 주기로 각각의 기판에 제작되어 마스크 C1과 C2로 나누었다.

마스크 패턴은 투과형 on-axis 디지털 홀로그래피 방식을 사용하여 위상정보

를 얻었다. 측정된 각각의 마스크의 위상정보는 다음 그림 21과 같다.

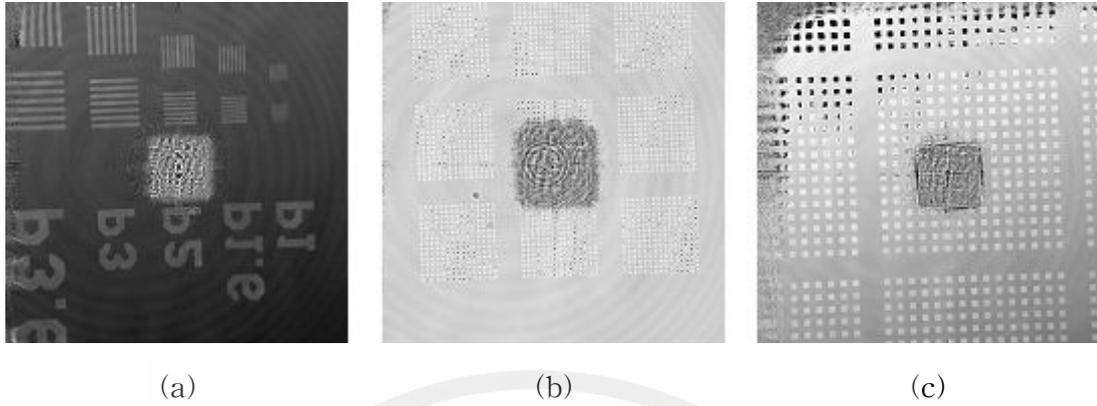


그림 21. 사용된 시료와 위상정보
: (a) 마스크 B1, (b) 마스크 C1, (c) 마스크 C2

이때 위상정보는 투과형 디지털 홀로그래피를 사용하였기 때문에 위상 펼침 된 정보는 깊이가 높기로, 높이가 깊이의 값으로 나타게 된다. 이 위상정보를 수정된 Goldstein 알고리즘을 이용하여 위상 펼침 함으로서 시료의 깊이를 측정하였다.

IV.결과 및 고찰

1. 전산기 시늬 결과

데이터 잡음으로 인하여, 잘못된 결과를 도출 할 수 있기 때문에 잡음 여과를 하고 Goldstein 알고리즘을 사용하였다. 이때 사용된 잡음 여과방법은 인접한 픽셀간의 값을 이용하여 평균을 취하는 average filtering을 사용하였다.

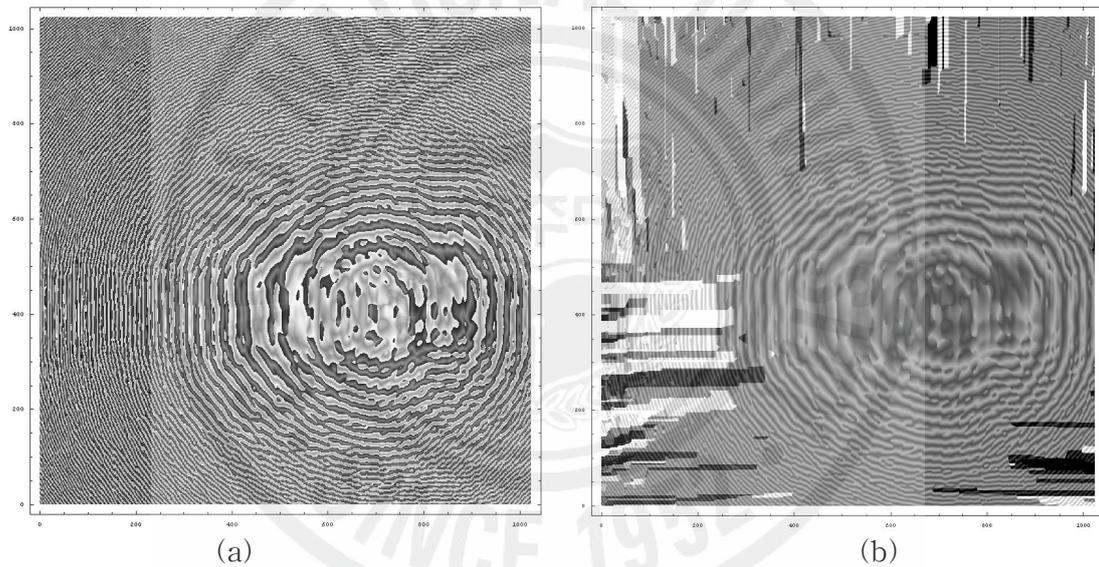


그림 22. 잡음 제거된 위상 데이터와 위상 펼침 결과

: (a) 잡음 제거된 위상 데이터, (b) 잡음 제거된 위상 데이터의 위상 펼침

위 그림 22를 살펴보면, 잡음 여과 후 위상 펼침을 한 결과가 잘못된 결과가 나타나고 있음을 확인하였다. 이는 잡음에 대한 여과가 반드시 좋은 결과를 나타나게 하는 것은 아니며, 그 상황에 따라 여과방법의 변화 등이 필요하다는 것이다. 즉, 여과방법을 그 데이터 상황에 따라 변경해야하는 것이다. 이는 데이터를 분석하고 여과 방법을 선택함에 따라 시간지연이 필요하다는 것이며, 잘못 선택

되어진 여과방법은 나쁜 결과를 도출 할 수 있다. 이러한 단점 때문에 잡음 여과를 사용하지 않고 Goldstein 알고리즘과 수정된 알고리즘을 사용하여 확인하였다.

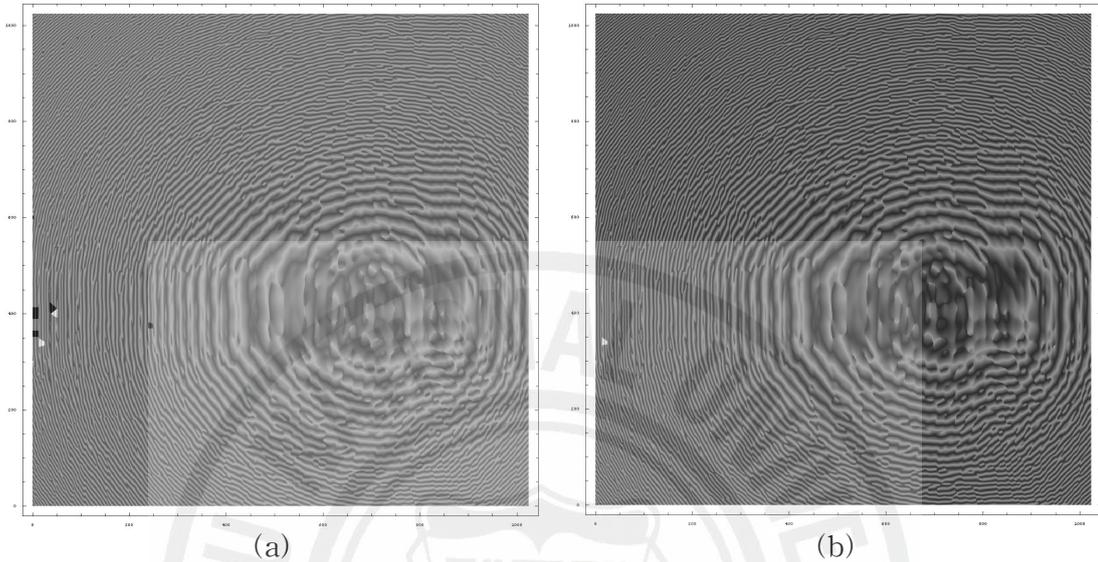


그림 23. 위상 펼침 결과

: (a) Goldstein 알고리즘, (b) 수정된 Goldstein 알고리즘

그림 23은 Goldstein 알고리즘을 이용하여 위상 펼침을 한 경우와 수정된 알고리즘을 이용하여 위상 펼침한 결과이다. (a)의 결과를 보면 위상변화가 급격하게 일어나는 부분에서 잘못된 결과가 나타나고 있음을 확인하였다. (b)에서는 잘못된 결과가 많은 부분 줄어들었고, 한 부분에 대한 잘못이 나타나고 있음을 확인하였다. 이는 경계선 정보를 인접한 두 화소 사이의 1차 미분 값을 이용하여 결정할 때 기준에 따른 문제로 판단되어진다. 이 부분에 대한 추가 연구가 필요하다. branch cut 결과를 살펴보면, 문제가 잘못된 결과를 나타내는 부분에서 branch cut 방향이 변화 되어 있음을 확인 할 수 있다.

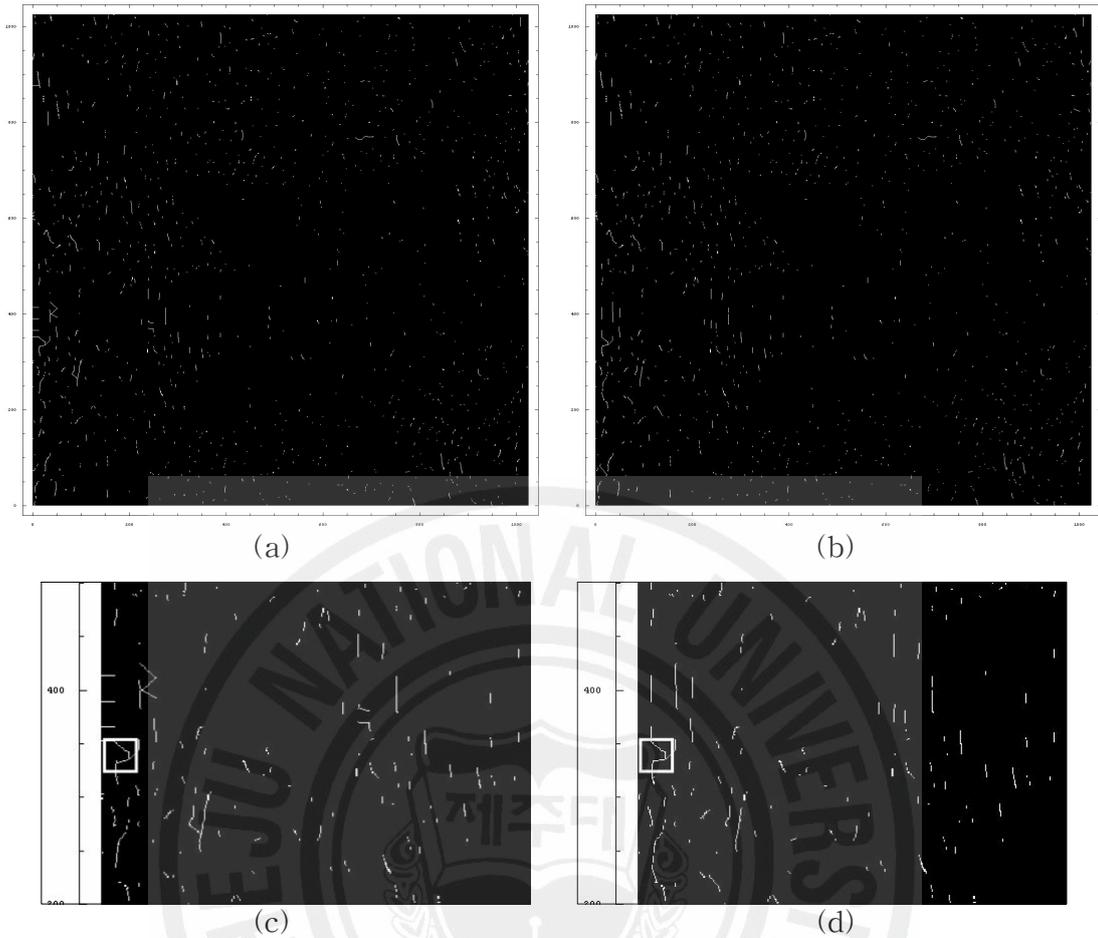


그림 24. Branch cut 결과

: (a) Goldstein 알고리즘, (b) 수정된 Goldstein 알고리즘, (c) Goldstein 알고리즘에서 문제되는 부분의 branch cut, (d) 수정된 Goldstein 알고리즘에서 문제되는 부분의 branch cut

그림 24는 Goldstein 알고리즘과 수정된 알고리즘을 이용한 위상 펼침 과정에서 branch cut을 나타내고 있다. (a)는 Goldstein 알고리즘에서 branch cut 결과이다. (b)는 수정된 알고리즘에서 branch cut 결과이다. 두 branch cut 결과를 보면 대부분의 branch cut의 방향은 일치하고 있다. (c)는 Goldstein 알고리즘을 이용하였을 때 문제되는 부분에 대한 branch cut이다. (d)는 문제되는 부분에 대한 수정된 알고리즘에서의 branch cut 이다. Goldstein 알고리즘에서 문제가 되는 부분에 대한 branch cut이 수정된 알고리즘에서 변화가 나타나고 있다. 또한, 해

결되지 못한 위치에서의 branch cut 방향은 그림 24 (c)와 (d)의 사각형 내에서처럼 변화가 없음이 확인되어진다.

데이터의 변화가 문제되는 부분과 그 외의 부분에서 차이를 확인하였다. 이는 Goldstein 알고리즘에서 나타나는 문제가 해상도 근처에서 변화인지에 대하여 확인하기 위함이다. 문제되는 부분과, 상단부분, 왼쪽 모서리 부분에서도 위상의 변화정도가 많기 때문이다.

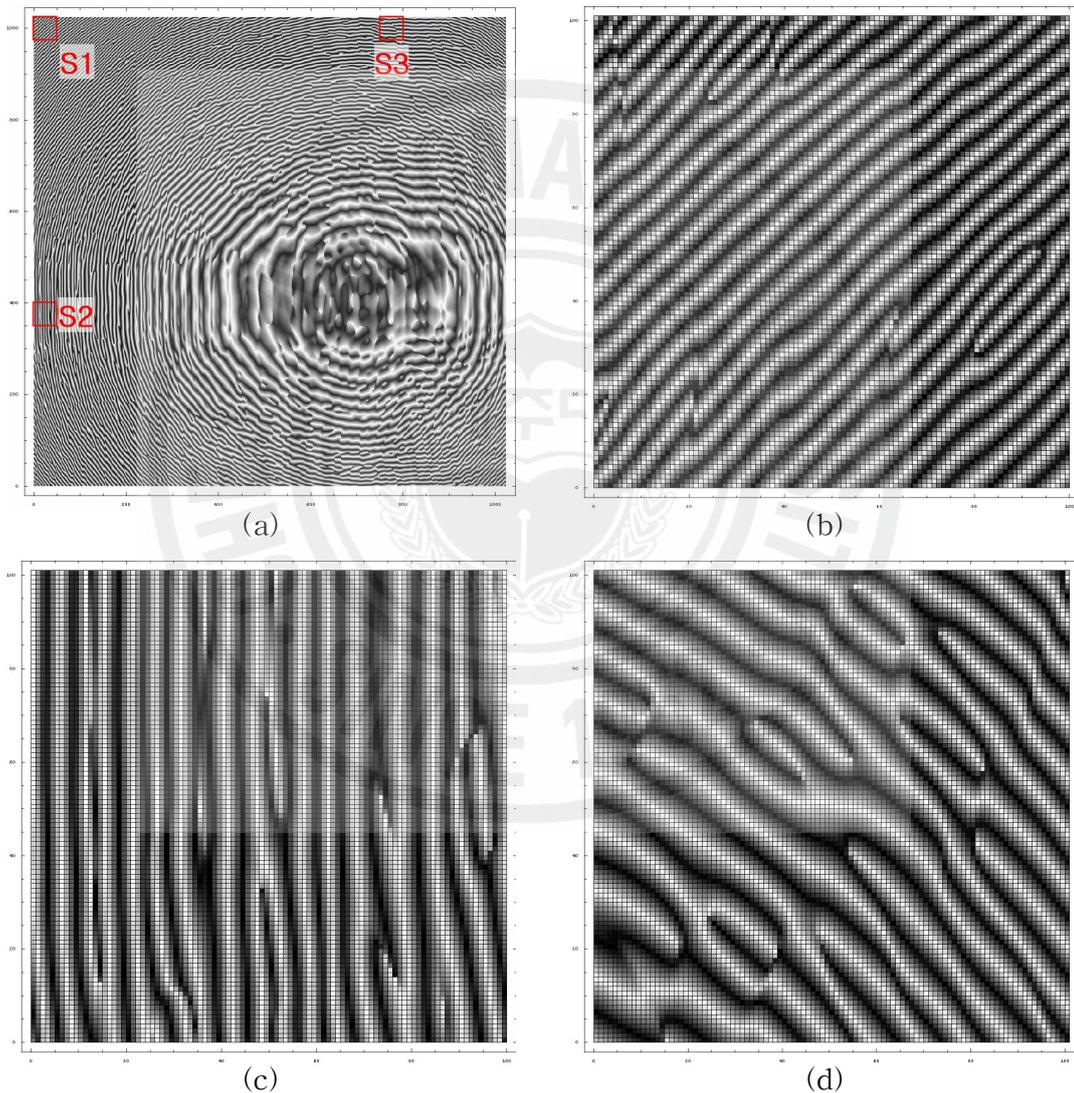


그림 25. 부분적인 Wrapped 데이터

: (a) Wapped 데이터에서 확인할 부분, (b) Wrapped 데이터의 S1,
(c) Wrapped 데이터의 S2, (b)Wrapped 데이터의 S3

그림 25 (a)는 실제 간섭무늬이며, 변화가 많은 왼쪽 모서리 부분을 S1이라고 그림 25 (b)에 나타내었다. Goldstein 알고리즘에서 문제가 발생하는 부분은 S2라 하고 그림 25 (c)에 나타내었다. 마지막으로 변화는 작지만 복잡한 무늬를 가지고 있을 것 추정되어지는 부분을 S3라 하고 그림 25 (d)에 나타내었다. 각 부분에 대하여 데이터의 변화를 관찰하였다. S1의 경우 데이터의 변화는 많으나 규칙적이고 대부분이 연속적인 면을 이루고 있다. 연속적인 면이 주를 이루고 있기 때문에 발생되어지는 residue가 적으며, 해상도 근처에 인접한 물체에 다른 쌍의 residue가 나타나지 않는다. 문제가 되는 S2의 경우 데이터의 변화가 많고 불연속적인 면에 많이 존재하게 된다. 이는 해상도 근처에 인접한 물체에 다른 쌍의 residue가 나타나므로 잘못된 연산이 루어지게 된다. S3은 불연속적인 면이 존재하지만, 변화가 적고 그 폭도 넓기 때문에 다른 residue 쌍에 의한 영향을 받지 않게 되는 것이다. 즉 불연속적인 면이 많고 데이터의 변화가 큰 복잡한 부분에서 다른 residue 쌍에 의한 영향으로 잘 못된 branch cut이 이루어지게 됨을 확인 하였다.

2. 실험 결과

광학계를 통해 얻어진 마이크로 렌즈의 위상 데이터에 적용해 보았다.

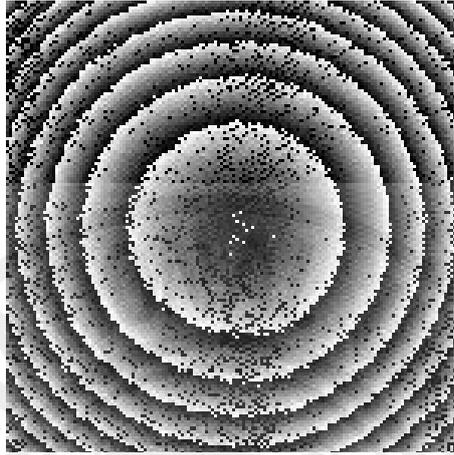


그림 26. 마이크로 렌즈의 위상 데이터

그림 26과 같이 디지털 홀로그래를 통해 얻어진 위상정보를 Goldstein 알고리즘과 수정된 Goldstein 알고리즘을 이용하여 재생정보를 얻었다.

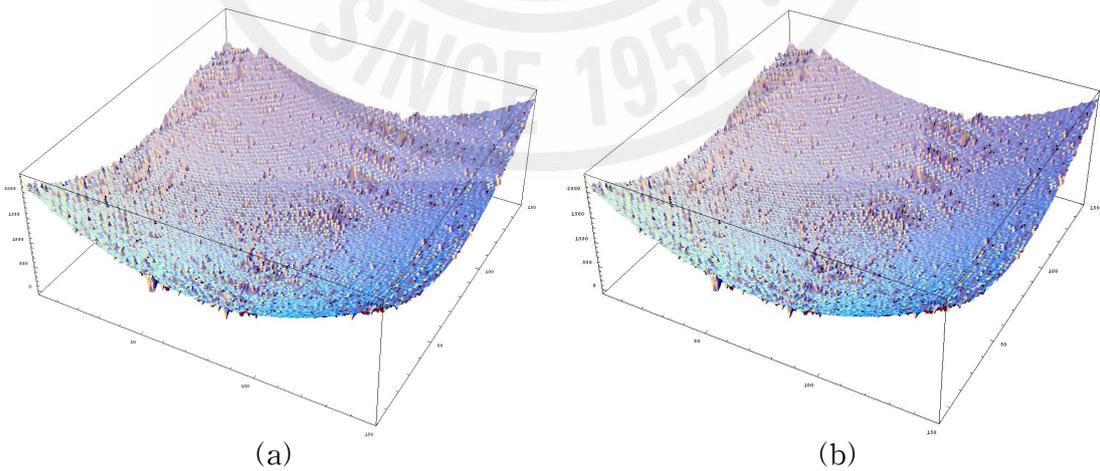


그림 27. 마이크로 렌즈의 위상 펼침 결과

: (a) Goldstein 알고리즘, (b) 수정된 Goldstein 알고리즘

그림 27을 보면, 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 두 값의 차를 계산하면,

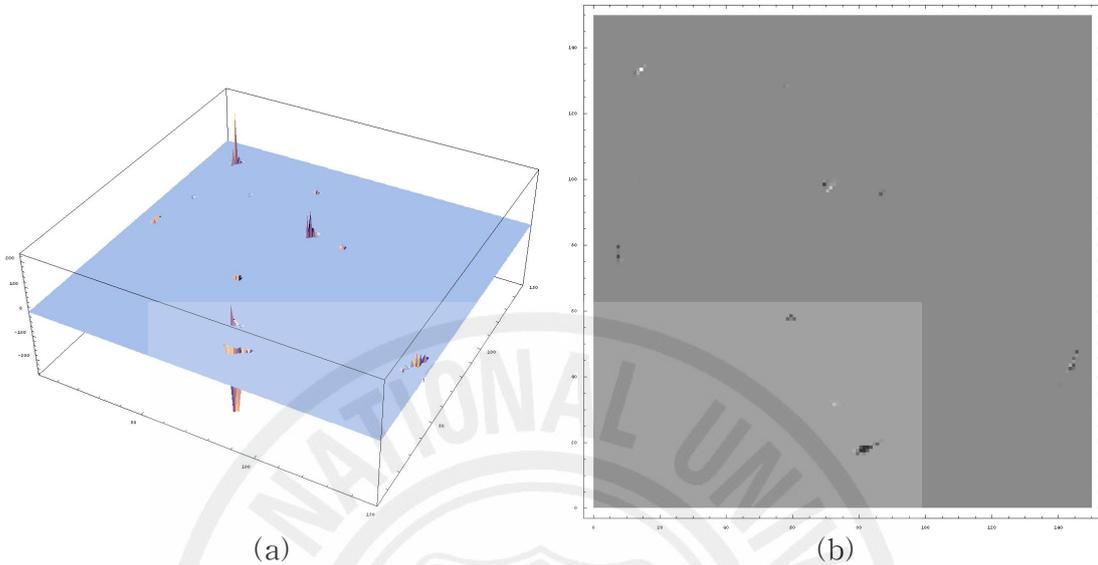


그림 28. Goldstein 알고리즘과 수정된 Goldstein 알고리즘의 결과에 대한 차
: (a) 3D plot, (b) Density plot

그림 28은 Goldstein 알고리즘과 수정된 Goldstein 알고리즘의 결과에 대한 차를 나타낸 것이다. 이 중 19행에서 80열에서 근처에서 많은 변화가 나타남을 확인할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 19행에 대한 그래프를 그려보면 다음과 같다.

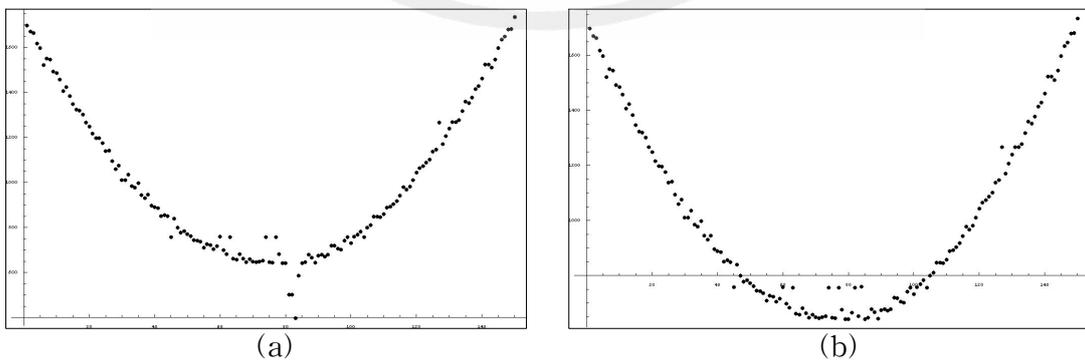


그림 29. 위상 펼침한 마이크로 렌즈의 19행의 데이터
: (a) Goldstein 알고리즘, (b) 수정된 Goldstein 알고리즘

그림 29를 보면, 전체적인 변화가 일치하나 80번째에서 85번째 값의 변화를 살펴보면 수정된 Goldstein 알고리즘이 비교적 완만한 변화를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이는 branch-cut 방향이 더욱 정확하게 되었음을 의미한다.

다음은 마스크 패턴을 이용하여 결과이다. 다음 그림 30에서처럼 마스크 패턴 중앙에 0차광과 허상에 의한 영역이 존재하고 있다. 이러한 0차광과 허상을 제거하기 위한 많은 방법들이 연구되어지고 있다[21-24]. 하지만 본 논문에서는 위상 펼침에 대하여 논하고 있으며, 반드시 마스크 패턴 전체가 필요한 것이 아니기 때문에 0차광과 허상을 제거하지 않은 데이터를 사용한다. 그리고 위상 펼침을 한 결과가 보는 방향에 따라 달리 보일 수 있기 때문에 보는 방향을 달리 하여 나타내었다.

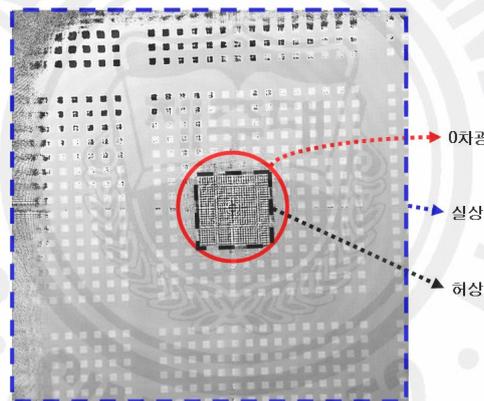


그림 30. 마스크 패턴의 위상 데이터에서 0차광, 실상, 허상의 위치

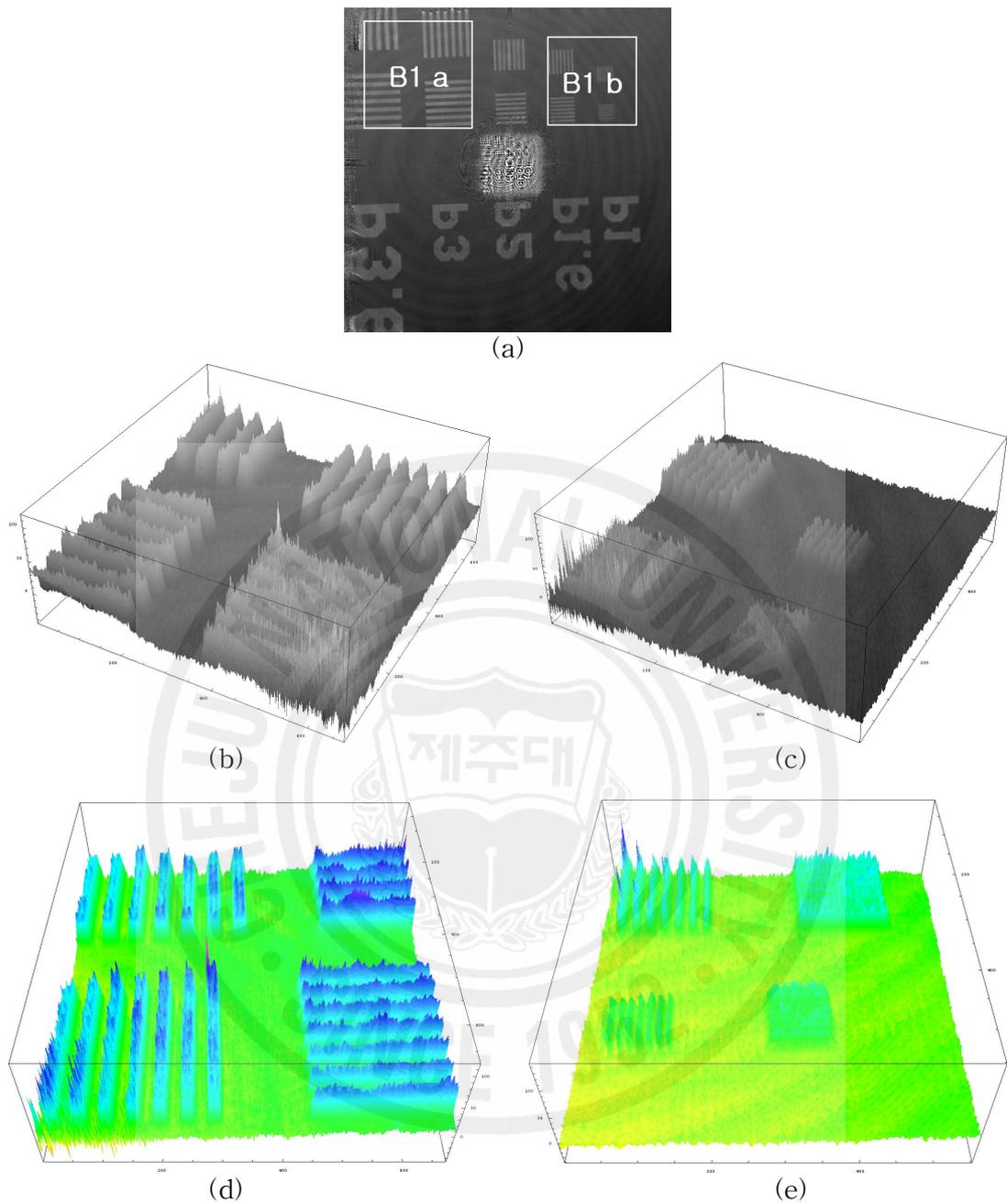


그림 31. B1에 대한 결과 : (a) 위상 데이터, (b) B1 a에 대한 위상 펼침, (c) B1 b에 대한 위상 펼침, (d) B1 a에 대한 위상 펼침, (e) B1 b에 대한 위상 펼침

그림 31 (a)에서 왼쪽부터 주기값은 $1.8 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$, $0.8 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$ 이다. 수정된 Goldstein 알고리즘으로 B1에 대한 위상 펼침 결과, 평균적으로 높은 B1 a의 경우 약 $124.08 \sim 74.49 \text{ nm}$ 이고 B1 b는 약 $124.08 \sim 111.67 \text{ nm}$ 로 나타났다.

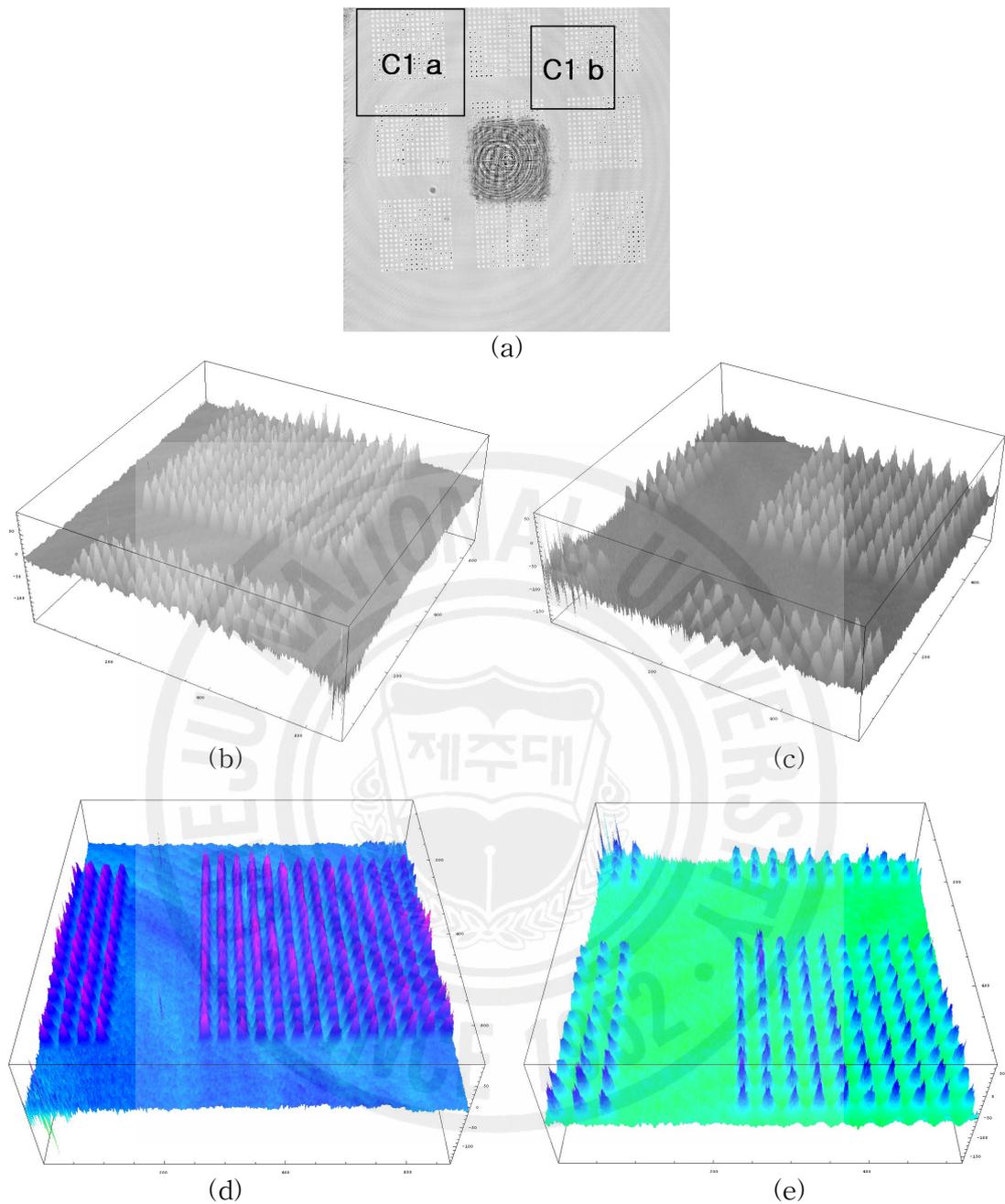


그림 32. C1에 대한 결과 : (a) 위상 데이터, (b) C1 a에 대한 위상 펼침, (c) C1 b에 대한 위상 펼침, (d) C1 a에 대한 위상 펼침, (e) C1 b에 대한 위상 펼침

그림 32의 데이터는 주기가 $1 \mu\text{m}$ 이다. 수정된 Goldstein 알고리즘으로 C1에 대한 위상 펼침 결과, 평균적으로 높은 C1 a의 경우 약 $148.89 \sim 136.49 \text{ nm}$ 이고 C1 b는 약 $148.89 \sim 124.08 \text{ nm}$ 로 나타났다

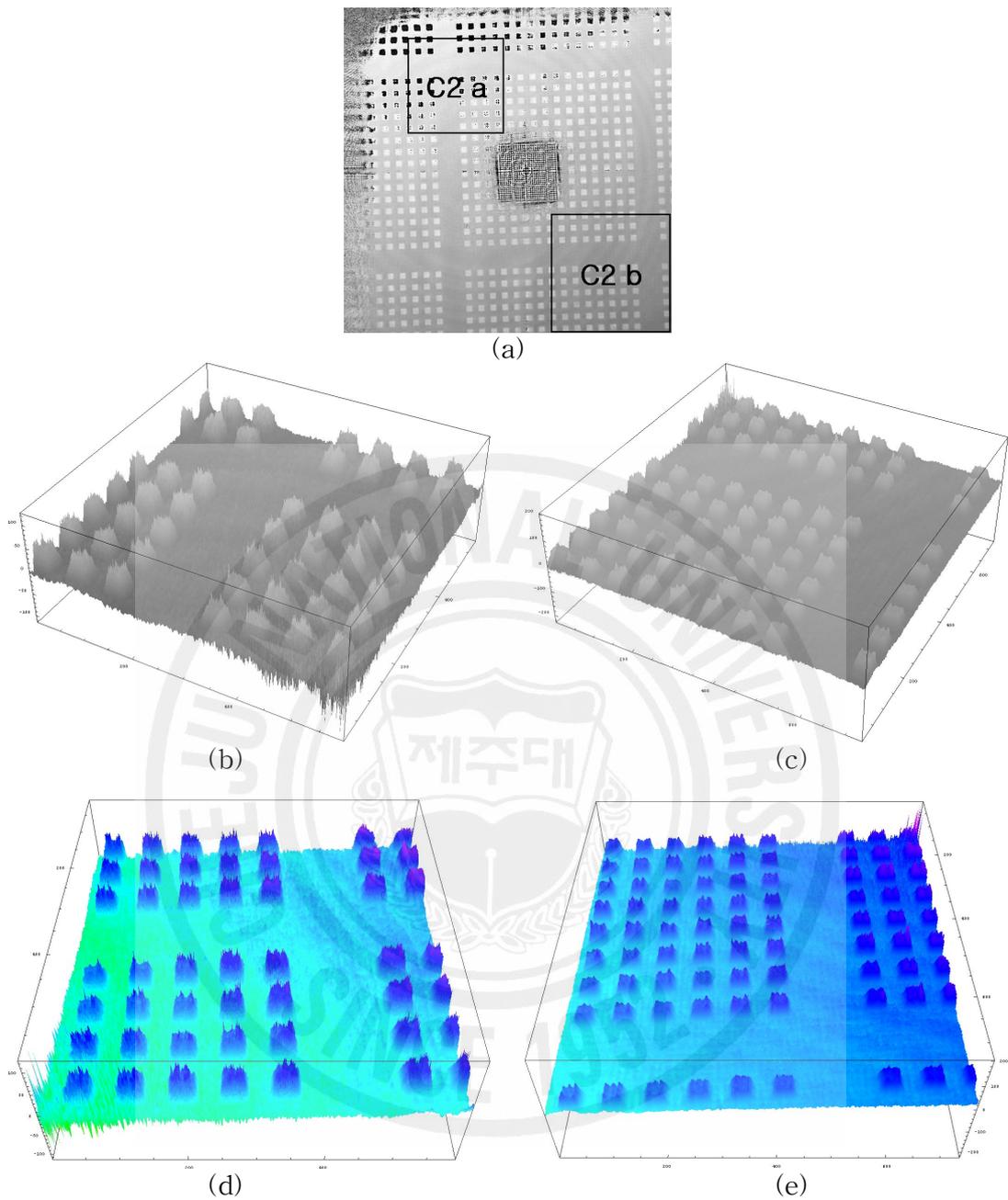


그림 33. C2에 대한 결과 : (a) 위상 데이터, (b) C2 a에 대한 위상 펼침, (c) C2 b에 대한 위상 펼침, (d) C2 a에 대한 위상 펼침, (e) C2 b에 대한 위상 펼침

그림 33의 데이터의 주기는 $0.5 \mu\text{m}$ 이다. 수정된 Goldstein 알고리즘으로 C2에 대한 위상 펼침 결과, 평균적으로 높은 C2 a의 경우 약 $173.71 \sim 124.08 \text{ nm}$ 이고 C2 b는 약 $136.49 \sim 86.85 \text{ nm}$ 로 나타났다. 위 3가지 마스크 패턴을 이용한 위상

펼침 결과 모든 패턴이 구별되도록 위상 펼침 되었다.

마스크 패턴의 위상 펼침 결과에서 원형의 잡음이 나타나고 있다. 그 형태가 모든 마스크 패턴 위상정보에서 관찰 되고, 주기적인 형태로 나타나고 있기 때문에 간섭계에 의한 영향으로 판단되어진다. 그 형태가 중앙에서는 넓은 간격으로, 모서리 부분에서는 좁아지는 형태로 미루어 불룩한 형태의 물체로 판단되어진다. 즉, 불룩한 물체로 인한 간섭무늬의 영향으로 나타나는 것이다. 이는 실험 장치에서 대물렌즈의 면에 의한 간섭의 영향이다. 대물렌즈의 간섭에 의한 영향을 고려할 때 위상 펼침 결과가 좋음을 확인 할 수 있었다.

또한, 전산기 묘사를 통해 얻어진 위상 펼침 결과에서 수정된 Goldstein 알고리즘이 기존 Goldstein 알고리즘의 연산시간 보다 10%증가하였음을 확인 할 수 있었다. 이는 다른 위상 펼침 방법을 이용한 시간보다는 짧은 시간이며, 시간 증가 대비 정확도가 높아진 것이다. 디지털 홀로그래프를 통하여 얻어진 위상정보에 간섭계나 프로그램의 오류로 인한 잡음이 존재하지 않는다면, 수정된 Goldstein 알고리즘을 통하여 복잡하고 해상도 근처에 위치한 물체에 대한 구분도 가능하다.

V. 결론

Goldstein 알고리즘이 복잡하고 분해능에 가까운 부분에서의 잘못 연산되어지고 있음을 확인하였다. 이를 해결하기 위하여 경계선과 residue 사이의 연관성을 확인하였다.

그 결과 경계선에 residue가 위치할 경우 쌍을 이루는 residue 또한 경계선에 위치한다. 이는 경계선에 존재하는 residue는 Goldstein 알고리즘으로 원래의 쌍을 찾을 수 없음을 의미한다. 이를 보완하기 위하여 경계선에 있는 residue는 경계선에서 그 외의 residue는 Goldstein 알고리즘을 이용함으로써 더욱 정확한 branch cut을 할 수 있다. 복잡하고 분해능에 가까운 환경에서 얻어지는 위상 데이터에 대해서도 경계선을 이용하여 branch cut을 하면, 이때 발생되어지는 잘못된 연산을 수행하는 문제를 해결 할 수 있다.

복잡하고 분해능에 가까운 부분에 대한 정확한 branch cut이 가능하게 되어 분해능에 가깝게 위치한 물체에 대한 구별이 가능하게 되었다.

참 고 문 헌

- [1] Gaber, D., "A New Microscopic Principles", Nature 161, No. 4098, pp. 777-778, 1948
- [2] Gaber, D., "Microscopy by Reconstructed Wavefront", Proc. Roy. Soc. (London) A 197, pp.454-487, 1949
- [3] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, " Digital image formation from electronically detected holograms", Appl. Phys. Lett., vol. 11, pp.77-79, 1967
- [4] M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov, and L. P. Yaroslavskii, "Reconstruction of a hologram with computer", Sov. Phys. Tech. Phys., vol. 17, pp.434-444
- [5] Haddad W, Cullen D, Solem J, Longworth J, McPherson A, Boyer K, Rhodes K Fourier-transform holographic microscope. Appl Opt 31(24), pp.4973-4978, 1992.
- [6] Kreuzer HJ, Pawlitzek RA, "Numerical Reconstruction for in-line Holography in Reflection and under glancing Incidence", In: Juptner W, Osten W (eds) Proc 3rd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns. Akademie, Berlin, pp.364-367, 1997.
- [7] Kebbel V, Hartmann HJ, Juptner W, "Application of digital holographic microscopy for inspection of micro-optical components". In: Proc SPIE vol 4398. pp.189-198, 2001.
- [8] Coppola G, De Nicola S, Ferraro P, Finizio A, Grilli S, Iodice M, Magro C, Pierattini G, "Evaluation of residual stress in MEMS structures by means of digital holography", In: Proc. SPIE vol 4933, pp.226-31, 2003.
- [9] J. M. Huntley, "Noise-immune phase unwrapping algorithm", Appl. Opt., vol.28, pp.3268-3270, 1989
- [10] T. J. Flynn, "Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity", J. Opt. Soc. Am. A, vol.14, No. 10, pp.2692-2701
- [11] G. Fornaro, G. Franceschetti, R. Lanari, E. Sansositi and M. Tesauro, "Global and local phase unwrapping technique: A comparison", J. Opt. Soc. Am. A, Vol 12, pp.2355-2366

- [12] H. O. Saldner and J. M. Huntley, "Profilometry using temporal phase unwrapping and spatial light modulator-based fringe projector", *Opt. Eng.*, vol 36, pp.10-615, 1997
- [13] M. D. Pritt, "Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR", *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol.43, pp.728-738, 1996
- [14] Howard A. Zebker and Yanping Lu, "Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-squares, and synthesis algorithms", *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 15, pp.586-597, 1998
- [15] Vyacheslav V. Volkov and Yimei Zhu, "Deterministic phase unwrapping in the presence of noise", *Opt. Lett.*, Vol. 28, pp.2156-2158, 2003
- [16] Wei Xu, "A Region-Growing Algorithm for InSAR Phase Unwrapping", *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, VOL. 37, pp.124-134, 1999
- [17] Yasuhiro Takaki and Hitoshi Ohzu, "Fast numerical reconstruction technique for high-resolution hybrid holographic microscopy", *Appl. Opt.*, Vol. 38, pp.2204-2211, 1999
- [18] K. Itoh, "Analysis of the phase unwrapping problem", *Appl. Opt.*, vol. 21, pp.2407-1982
- [19] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, "Two-Dimensional Phase Unwrapping", John Wiley & Sons, 1998, pp.103-107
- [20] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Digital Signal Processing*, Prentice-Hall, New Jersey, 1975, pp.29
- [21] Yasuhiro Takaki, "hybrid holographic microcopy free of conjugate and zero-order images", *Appl. Opt.*, Vol. 38, pp.4990-4996
- [22] James Millerd, "Modern Approaches in Phase Measuring Metrology", *SPIE*, Vol. 5856, pp. 14-22, 2005
- [23] James Millerd, "Modern Approaches in Phase Measuring Metrology", *SPIE*, Vol. 5856, pp. 14-22, 2005
- [24] S. Suja Helen, "Achromatic phase shifting by a rotating polarizer", *Opt. Communications*, pp. 249-254, 1998

감사의 글

벌써 2년간의 대학원 생활을 마무리 합니다. 아무것도 모르면서 공부하겠다고 덤벼들던 저를 졸업하기 까지 도움을 주신 분들께 감사의 마음을 표현하고자 합니다.

즐겁게 하고 싶은 일을 하라시며 부족한 저를 지도하시면서 마음고생하신 유영훈 교수님 감사합니다. 교수님께서 제게 해주신 말씀은 항상 마음속에 제가 나태해질 때 마다 저를 채찍질 할 것 같습니다. 다시 한 번 감사드립니다. 그리고 부족한 저를 가르쳐 주시고 격려해주신 홍성락 교수님, 최치규 교수님, 현남규 교수님, 고정대 교수님, 김두철 교수님, 김용주 교수님 감사합니다. 또한 부족한 저를 연수생으로 받아주시어 응원해 주시고 격려해 주신 KIST 영상미디어 센터의 김성규 박사님 감사합니다.

비선형 실험실에서 학부 때부터 저를 보면서 정신적인 스트레스로 고생한 형준이형, 동기 잘 못 만나서 스트레스 받고 힘들어 할 때마다 응원해준 김아름, 실험실 막내에서 벗어나게 해준 김선, 추강, 같은 실험실은 아니지만 단순 암기로 공부할 때마다 이해하면서 공부하고 지적해 주신 호정이형, 실수를 지적해준 창영이형, 수업 받을 때 마다 나 때문에 고생한 동기 김승현, 스트레스를 풀어주기 위해 고생한 용준, 안수, 내로인해 잡일이 조금 늘어나서 고생한 작은 아름, 대단한 사람도 아닌데 대단하게 봐준 창조, 골 혜련, 서아름 그리고 학과 후배들 모두 감사합니다.

KIST 연수생으로 있으면서 언제나 칭찬해 주시고 격려해 주신 규환이형, 문제가 있을 때 마다 처음부터 정리하면서 문제를 풀어가도록 해준 광훈이형, 고민을 들어주고 실수도 너그럽게 이해해준 동욱이형, 처음부터 따뜻하게 맞이해준 지현이, 상우, 유진이, 보미, 상우, 경원, 중위 정석이 모두 감사합니다.

공부하는거 열심히 폼나게 멋있게 하라고 하신 현규 사장님 아니 형, 논문을 쓰면서 많은 도움을 주셨던 신상훈 박사님, 맛있는 밥을 사주시면서 격려해주신 박민철 박사님 감사합니다.

학위과정 중 사적인 고민을 해결해주면서 고생한 내게는 형제나 같은 친구 승섭이, 동생이지만 친구 같은 곰탕이 정욱, 이제 전역하는 해군 대위 친구 이승희, 남자같이 터프하지만 마음은 여린 이지아, 공부 잘하라고 기도 해줬을 것 같은 연동성당 청년회, 언제나 저에게 관심어린 충고를 해주신 사무엘형님, 베드로 형님, 힘들지 말라고 기도해 주신 현요한 신부님 감사합니다.

제가 태어나면서 지금 까지도 고생만 하시는 부모님, 아들 같은 막내 사위라고 아껴 주시는 장인, 장모님, 손자 걱정을 많이 하시는 외할머니, 형 같은 외삼촌 감사합니다. 언제나 제 편인 처형들 고맙습니다. 그리고 나 때문에 항상 스트레스만 받는 동생 선욱아 고마워.

마지막으로 공부하는 남편 때문에 임신한 몸으로 혼자서 고생한 수경이, 건강하게 태어나서 고마운 지은아 사랑해요.

이외에도 격려해주신 많은 분들이 계십니다. 그 분들께 감사합니다.

이 많은 분들에게 부끄럽지 않은 사람들이 되겠습니다.

