

피부 표면 굴곡 측정을 위한 고속
스캐닝 저 결맞음 간섭계 개발

연세대학교 대학원

의공학과

손 상 루

피부 표면 굴곡 측정을 위한 고속
스캐닝 저 결맞음 간섭계 개발

지도 김 범 민 교수

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2004년 12월 일

연세대학교 대학원

의공학과

손 상 룡

손상륜의 석사 학위논문을 인준함

심사위원 _____ 인

심사위원 _____ 인

심사위원 _____ 인

연세대학교 대학원

2004년 12월 일

감사의 글

대학교 4학년 졸업 논문을 쓰기 시작하면서 졸업까지 지난 3년 동안 아낌없는 지도 편달과 관심으로 큰 도움이 되 주신 김법민 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 중에도 부족한 논문을 읽어주시고 끊임없는 지도를 해주신 김동운 교수님과 하은호 교수님께 깊은 감사를 드리며 학부 과정과 대학원 과정동안 많은 가르침 주신 윤형로 교수님, 이윤선 교수님, 이경중 교수님, 윤영로 교수님, 김영호 교수님, 신태민 교수님, 조효성 교수님, 김한성 교수님, 김경환 교수님께도 감사드립니다. 또한 학과 생활 중 물심양면으로 도움을 주신 안중수 선생님께도 감사드립니다.

연구실 생활동안 항상 모범이 되어주시고 부족한 저에게 큰 조언과 도움을 주신 임강빈 박사님, 오정택 박사님, 대학원 동기로 중학교부터 지겹도록 함께한 새신랑 용희, 언제나 웃는 화준, 즐거운 연구실 생활이 될 수 있도록 도움을 준 현이형, 동수형, 수민이형, 상원, 문식, 성빈에게도 감사드립니다.

언제나 마음 한구석을 따뜻하게 해주는 민혜와 항상 기댈 수 있는 넉넉함을 보여준 기훈형, 현웅형에게 고마움을 전하며 멀리서 즐거움과 힘을 주는 96학번 모든 친구들과 2년간 함께 고생한 대학원 입학 동기들, 매주 함께 땀 흘리며 대학원 생활의 활력소가 되어준 농구 모임 선배님과 후배들에게도 고마움을 전합니다.

마지막으로 오늘이 있기까지 속 많이 썩히고 항상 제멋대로인 저를 큰 사랑으로 믿고 지켜봐주신 부모님과 항상 열심히 사는 동생 수경에게 진심으로 깊은 감사를 드립니다.

2004년 12월

손 상 룬 올림

차 례

그림 차례	iii
국문 요약	v
제 1 장 서론	1
제 2 장 고속 스캐닝 저 결맞음 간섭계 이론	3
2.1. 저 결맞음 간섭계의 기본 이론	3
2.1.1 단색광의 간섭	3
2.1.2 저 결맞음 광원	4
2.1.3 저 결맞음 성질을 갖는 광원의 간섭	5
2.1.4 저 결맞음 광원을 사용한 간섭계	5
2.2. 고속 스캐닝 광지연선	8
2.2.1 회절격자를 이용한 광지연선	8
제 3장 고속 스캐닝 저 결맞음 간섭계 설계	12
3.1. 간섭계의 구성 요소	12
3.1.1 기본적인 간섭계 구성	12
3.1.2 광원 선택	12
3.1.3 고속 스캐닝 광지연선 구성	13
3.1.4 샘플 경로 구성	14
3.1.5 3차원 이미지 구성을 위한 신호 동기화	15
3.1.6 신호 검출 및 복조	17
3.1.7 구동 소프트웨어	19
3.2. 고속 스캐닝 저 결맞음 간섭계 보정	21
3.2.1 시스템의 종축 해상도 검증	21
3.2.2 깊이별 선형성 검증	21
3.2.3 횡축 스캐닝 보정	22

3.2.4	횡축 해상도 검증	25
3.2.5	저 결맞음 간섭계의 신호 대 잡음 비	25
제 4장 피부 표면 굴곡 이미지 획득 및 분석		27
4.1.	피부 표면 굴곡 측정	27
4.1.1	샘플 선정	27
4.1.2	피부 표면 이미지 구현	28
4.2.	기존 피부 표면 굴곡 장치와 비교	32
4.2.1	Laser profilometry	32
4.2.2	저 결맞음 간섭계 이미지와 비교	32
4.3.	일반 피부와 아토피 피부 이미지 구현 및 분석	34
4.3.1	아토피 피부	34
4.3.2	일반 피부와 아토피 피부의 이미지 비교 및 분석	35
4.4.	항 주름성 화장품 치료 전과 치료 후의 효능 평가	39
4.4.1	샘플	39
4.4.2	이미지 획득을 위한 시스템 구성 및 이미지 구현	39
4.4.3	이미지 분석	43
제 5장 결론		50
참고 문헌		51
ABSTRACT		53

그림 차례

그림 2.1	광 경로차에 따른 간섭 관찰	4
그림 2.2	저 결맞음 간섭계	6
그림 2.3	회절격자를 이용한 고속 광지연선	11
그림 3.1	2x2 커플러	12
그림 3.2	회절격자를 이용한 광지연선 설계	14
그림 3.3	샘플 경로 구성	15
그림 3.4	3차원 이미지 구현 과정	16
그림 3.5	이미지 획득 동기화를 위한 출력 신호 구성	17
그림 3.6	일반적인 복조 과정	17
그림 3.7	간섭신호의 중심 주파수	18
그림 3.8	표면값 추출 방법	19
그림 3.9	저 결맞음 간섭계의 개략도	20
그림 3.10	시스템의 종축 해상도	21
그림 3.11	깊이 방향의 선형성 검증	22
그림 3.12	Air force target USAF1951	23
그림 3.13	동작 제어기를 이용한 USAF1951 스캐닝	24
그림 3.14	종축 스캐닝을 위한 픽셀 크기 고정	24
그림 3.15	횡축 해상도 검증을 위한 USAF1951 스캐닝	25
그림 3.16	저 결맞음 간섭계의 신호 대 잡음 비	26
그림 4.1	피부 모사판	27
그림 4.2	중앙 필터를 거치기 전 후의 잡음 제거 이미지	30
그림 4.3	평면 보정 연산 거친 이미지	31
그림 4.4	Laser profilometry의 개략도	32

그림 4.5	Laser profilometry를 이용해 얻은 이미지	33
그림 4.6	저 결맞음 간섭계를 이용해 얻은 이미지	33
그림 4.7	일반 피부와 아토피 피부	34
그림 4.8	일반 피부와 아토피 피부 이미지	36
그림 4.9	일반 피부와 아토피 피부의 2차원 푸리에 변환	37
그림 4.10	파워 스펙트럼 분석 그래프	38
그림 4.11	모사판 획득 위치	39
그림 4.12	항 주름성 화장품 사용 후 피부 표면 굴곡 이미지 A	41
그림 4.13	항 주름성 화장품 사용 후 피부 표면 굴곡 이미지 B	42
그림 4.14	전문가의 분석과 저 결맞음 간섭계의 상관관계	44
그림 4.15	파워 스펙트럼을 이용한 주름 분류	45
그림 4.16	큰 주름과 전문가 평가의 상관관계	45
그림 4.17	중간 주름과 전문가 평가의 상관관계	46
그림 4.18	잔주름과 전문가 평가의 상관관계	46
그림 4.19	항 주름성 화장품 사용전과 사용 후의 파워 스펙트럼 변화	47
그림 4.20	각 주름별 파워 스펙트럼 변화	48
그림 4.21	항 주름성 화장품 사용 전과 사용 후 각 주름별 변화한 샘플 분석	49

국문 요약

피부 표면 굴곡 측정을 위한 저 결맞음 간섭계 개발

피부 표면 굴곡 측정은 피부 광노화 및 아토피 피부 등 각종 병변 진단에 중요하다. 피부 표면 굴곡 이미지 구현을 위해 사용되는 방법은 해상도 및 측정시간과 3차원 이미지의 구현 가능성 등에서 각각 문제점을 가지고 있다.

본 연구는 피부 표면 굴곡 측정을 위해 결맞음 길이가 짧은 광원을 사용하여 저 결맞음 간섭계를 설계 및 제작하였다. 시스템은 빠른 스캐닝을 위해 회절격자를 이용한 고속 스캐닝 광지연선을 사용하였으며 약 $18\mu\text{m}$ 의 종축 해상도와 약 $22\mu\text{m}$ 의 횡축 해상도를 얻었다.

제작된 저 결맞음 간섭계는 기존의 스캐닝 방법과 비교하였을 때 측정 시간과 측정 범위 등에서 장점을 가졌다.

항 주름성 화장품을 사용하기 전·후의 변화를 비교하기 위해 제작된 시스템을 사용하여 이미지를 획득한 후 표준 편차와 2차원 푸리에 변환을 사용하여 분석하였다.

핵심되는 말 : 저 결맞음 간섭계, 회절격자를 이용한 광지연선, 피부 모사판, 항 주름성 화장품

제 1 장 서 론

피부 표면 굴곡 측정은 피부 광노화(Photoaging)의 정량적 분석, 항주름성 약품 또는 기능성 화장품의 효과 평가, 아토피 피부염과 같은 여러 피부염의 표면 분석을 통한 피부 질환 진단, 멜라닌 세포성 모반(melanocytic nevus) 및 악성 흑색종(Melanoma)을 구별하기 위해 필요하다. 이상적인 피부 표면 굴곡 측정을 위해서 만족되어야 하는 조건은 다음과 같다. 객관적인 분석과 정량화를 위해 3차원 이미지 구현이 가능해야 하고 피부 굴곡의 높이에 적합한 해상도를 가져야 하며 신체 굴곡의 영향을 극복할 수 있는 측정 거리 및 종축 측정 범위, 빠른 측정시간을 만족해야 한다. 기존에 사용되던 방법 중 그림자법(shadow method)은 피부 모사판에 임의의 각도로 빛을 비추었을 때 발생하는 그림자의 면적을 이용하여 주름 깊이를 계산하는 방법으로 측정시간이 짧고 해상도가 우수하나 큰 주름의 그림자에 가려 작은 주름을 측정하지 못하며 3차원 이미지 구현이 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 기계적 스타일러스(mechanical stylus)법은 작은 스타일러스를 측정 표면에 접촉하여 이동함으로써 생기는 변위로 주름의 깊이를 분석하는 방법으로 우수한 종축 해상도를 가지고 있으나 측정시간이 오래 걸리고 직접 접촉하는 방식이므로 피부의 표면을 파괴할 수 있을 위험성을 가지고 있다. 최근에 많이 사용되어지는 Laser profilometry법은 피부 표면에 초점을 맞추기 위해 움직인 변위를 이용해 주름의 깊이를 분석하는 방법으로 아주 우수한 종 · 횡축 해상도를 가지나 측정시간이 매우 느리고 가격이 저렴하지 않다는 단점을 가지고 있다.[1][2][3][4]

저 결맞음 간섭계(Low coherence interferometry)는 최근 각막 연구를 시작으로 널리 연구되고 있는 광 결맞음 단층촬영기(Optical coherence tomography)의 기본 원리인 마이켈슨 간섭계에 결맞음 길이가 짧은 광원을 사용하여 얻어지는 간섭신호를 이용하여 이미지를 구현한다.[5] 설계된 시스템은 3차원 이미지 구현이 가능하며 해상도 및 측정 시간에 있어서 피부 표면 굴곡 측정에 적합하리라 예상된다. 본 논문에서는 빠른 이미지 획득을 위해 광 결맞음 단층 촬영기에서 사용되는 고

속 스캐닝 광지연선(Rapid scanning optical delay line)을 적용한 저 결맞음 간섭계(Low coherence interferometry)를 구성하여 시스템의 종 · 횡축 해상도를 평가 하였고 피부 표면 굴곡을 측정하여 이미지를 구현하였으며 2차원 푸리에 변환(FFT)를 통한 파워 스펙트럼 분석으로 정량화를 시도하였다.[6]

제 2장 고속 스캐닝 저 결맞음 간섭계 기본 이론

2.1 저 결맞음 간섭계의 기본 이론

2.1.1 단색광(Monochromatic wave)의 간섭

단색광(monochromatic wave)은 하나의 색을 가진 광원으로 레이저와 같이 하나의 파장을 가진다.

단색광을 파장 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$E = E_0 \cos(\omega t + \alpha) \quad (2.1)$$

다른 경로로 진행하던 두 광파가 만나게 된다면

$$E = E_1 + E_2 = E_{01} \cos(\omega t + \alpha_1) + E_{02} \cos(\omega t + \alpha_2) \quad (2.2)$$

중첩된 두 단색광의 복사조도는

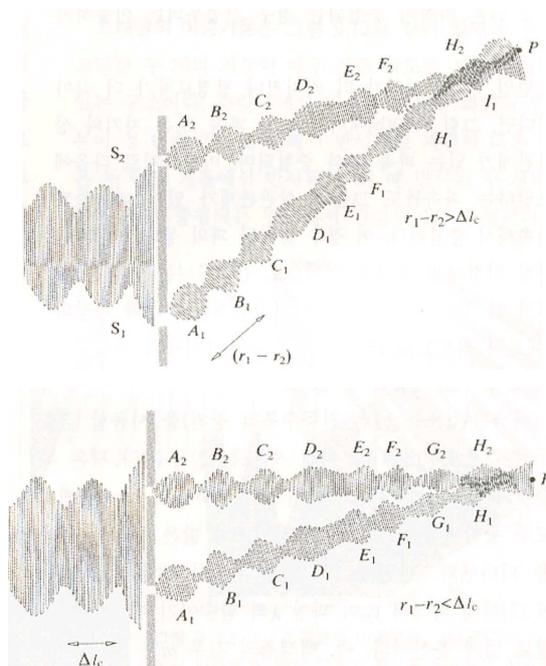
$$\begin{aligned} I \propto \langle E^2 \rangle &= \langle (E_{01} \cos(\omega t + \alpha_1) + E_{02} \cos(\omega t + \alpha_2))^2 \rangle \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\alpha_2 - \alpha_1) \end{aligned} \quad (2.3)$$

만약에 위상차($\alpha_2 - \alpha_1$)가 0일 경우에는 보강 간섭이 나타나고 위상차가 π 일 경우에는 소멸 간섭이 나타난다.[7]

2.1.2 저 결맞음 광원 (Low coherence source)

임의의 공간상의 한 점에서 보면 진행하는 광파는 위상이 일정한 시간 간격동안만 사인함수 형태를 갖는데 규칙적으로 진동하는 광파의 길이를 결맞음 길이 (Coherence length, Δl_c)라 한다. 시간적인 결맞음 성질은 광원의 순수성을 나타내는 것으로 시간적인 결맞음 길이가 길수록 스펙트럼이 얇은 단색성 광원이다.

저 결맞음 광원은 결맞음 길이가 짧은 광원으로 넓은 스펙트럼 대역을 갖으며 두 빛의 광 경로차가 결맞음 길이 내에 있다면 간섭이 관찰되고 결맞음 길이보다 크게 되면 간섭을 거의 관찰하기 힘든 특성을 가진다.[7]



광 경로차가 결맞음 길이보다 클 경우(上),
광 경로차가 결맞음 길이보다 작은 경우(下)

그림 2.1 광 경로차에 따른 간섭 관찰

2.1.3 저 결맞음 성질을 갖는 광원의 간섭

부분적으로 결맞음을 갖는 광원은 넓은 스펙트럼을 가지므로 여러 파장이 존재한다. 각각 파장의 복사조도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 I_1(k_1) &= 2I_0(k_1)[1 + \cos(\Delta Lk_1)] \\
 I_2(k_2) &= 2I_0(k_2)[1 + \cos(\Delta Lk_2)] \\
 &\dots \\
 I_m(k_m) &= 2I_0(k_m)[1 + \cos(\Delta Lk_m)] \\
 I_t(k_1, k_2, \dots, k_m) &= 2 \sum_{i=1}^m I_0(k_i) + 2 \sum_{i=1}^m I_0(k_i) \cos(\Delta Lk_i) \quad (k = \frac{2\pi}{\lambda}) \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

실제로 간섭에 기여하는 부분은

$$\Upsilon(\Delta L, k_1, k_2, \dots, k_m) = 2 \sum_{i=1}^m I_0(k_i) \cos(\Delta Lk_i) \quad (2.5)$$

광원의 스펙트럼 밀도(power spectrum density)를 규격화한 값 $S(\nu)$ 를 이용하여 식 (2.5)를 변형하면 다음과 같다.[5][7]

$$\Upsilon(\Delta L) \approx 2I_0 \int_0^{\infty} S(k) \cos(\Delta Lk) dk \quad (2.6)$$

2.1.4 저 결맞음 광원을 사용한 간섭계

저 결맞음 간섭계는 일반적인 마이켈슨 간섭계(Michelson interferometry)와 같

은 원리이다. 광원에서 나온 빛은 광분배기(Beam splitter)를 통해 각각 샘플(Sample) 경로와 광지연선(Delay line)으로 분배되어 진행되고 샘플과 광지연선에서 반사되어 나온 빛은 다시 광분배기에서 합쳐져 간섭을 일으키며 검출된다.[5][8]

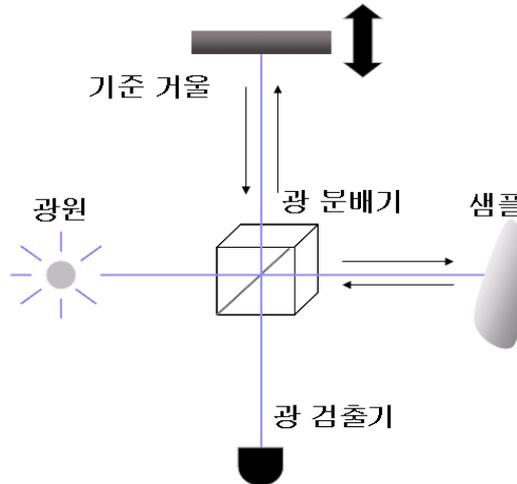


그림 2.2 저 결맞음 간섭계

광지연선의 기준 거울을 움직여 샘플경로와 광지연선 경로의 시간을 지연시킨다면 광 검출기(photodiode)에 의해서 얻어지는 간섭 신호의 전체 파워는 광파 진폭의 제곱을 시간 평균한 값으로 다음과 같다.

$$I(\tau) = \langle |E_r + E_s|^2 \rangle \quad (E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\kappa) \exp(2\pi i t) d\kappa) \quad (2.7)$$

$$I(\tau) = I_r + I_s + Y_{LCI}(\Delta L) \quad (2.8)$$

간섭에 관련된 부분인 $Y_{LCI}(\Delta L)$ 는 식 (2.6)에 의해 샘플과 광 경로 지연선에서 돌아온 빛의 광 경로 차이에 의한 식으로 다음과 같다.

$$Y_{LCI}(\Delta L) = 2r_r r_s \int_0^{\infty} S(k) \cos(\Delta L k) dk \quad (2.9)$$

부분적으로 결맞음 성질을 갖는 광원의 자기 상관 함수는 광원의 파워 스펙트럼 분포의 푸리에 변환이다. 그러므로 광원의 주파수 대역 분석이 가우시안이라면

$$S_0(\nu) \propto \exp\left[-4 \ln\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right)^2\right] \quad (2.10)$$

가 되고 간섭으로 인해 검출되는 부분은 식 (2.11)과 같다.

$$\begin{aligned} Y_{LCI} &\propto \exp\left[-4 \ln\left(\frac{\kappa - \kappa_0}{\Delta\kappa}\right)^2\right] \cos(2\pi\Delta L\nu) \\ &= \exp\left[-4 \ln\left(\frac{\Delta L}{l_c}\right)^2\right] \cos(2\pi\Delta L\nu) \end{aligned} \quad (2.11)$$

위의 식 (2.11)을 통해 결맞음길이(l_c)내에 샘플과 광지연선의 경로차가 있어야 안정적인 간섭무늬가 검출기를 통해 관찰된다.

결맞음 길이는 l_{FWHM} 의 $\frac{1}{2}$ 이므로 식 (2.12)과 같이 나타낼 수 있으며 신호처리 후 종축 해상도가 된다.[5][8][9][10]

$$l_c = \frac{l_{FWHM}}{2} = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \approx 0.44 \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (2.12)$$

만약 샘플과 광지연선의 광 분산이 일치되지 않을 경우에는 군속도로 인한 지연(group delay)과 위상 지연(phase delay)을 분리해서 생각해야 한다. 검출기에서 획득하는 간섭 무늬의 중심 주파수는 위상 지연의 스캐닝 속도(V_ϕ)와 관련이 있

으므로 도플러 중심 주파수 f_0 는 아래 식 (2.13)과 같이 표현된다.[6]

$$f_0 = \frac{V_\phi k_0}{2\pi} = \frac{V_\phi}{\lambda_0} \quad (2.13)$$

2.2 고속 스캐닝 광 지연선 (Rapid scanning optical delay line)

많은 범위로 저 결맞음 간섭계를 응용한 연구가 확장됨에 따라 빠른 이미지 획득을 위한 광지연선이 요구되고 있다. 최근에는 충분한 효율 주기를 가지며 선형성을 유지하는 galvanometer를 기반으로 한 광지연선이 많이 사용되고 있으나 초당 100번 정도의 스캐닝을 하는 것으로 알려져 있다. 스캐닝 속도 개선을 위해 압전기를 이용하여 광섬유를 늘이는 방법, 공명거울을 사용하는 방법, 회전 프리즘이나 cube를 사용하는 방법들이 개발되어 사용되었지만 효율 주기(duty cycle), 기계적 제한, 선형성(linearity)등의 조건을 충분히 만족하지 않는다는 단점을 가지고 있다.[11][12][13]

2.2.1 회절격자(grating)를 이용한 광지연선

회절격자를 사용한 광지연선은 최근 광 결맞음 단층촬영기에 많이 사용되고 있으며 회절격자와 렌즈, 거울로 구성된다. 회절격자에 의해 분광된 빛을 주파수 영역에서 보았을 때의 위상으로 인해 발생하는 경사 함수로 만들어주기 위해 렌즈의 초점 거리 양단에 회절격자와 거울을 놓아 광 지연을 만들어낸다.

광 경로에 따른 위상변화를 전파상수(propagation number)와 광 경로를 사용해 전개하면 아래 식 (2.14) 와 같다.

$$\begin{aligned}
\phi(k) &= 2k[SA + (ABCN) + ND - L_s - MC - CN] \\
&= 2k[SA - L_s + ND + (ARA) - 2QR - MC] \\
&= 2k[II - 2QR - MC]
\end{aligned} \tag{2.14}$$

그림 2.3에서 보면 경로 SA는 광지연선과 샘플 경로로 나누어진 부분부터 회절격자까지의 거리이고 L_s 는 샘플 경로에서의 빛의 이동 거리이며 경로 ND, ARA, QR, MC는 광 경로 지연선에서의 빛의 이동 거리이다. 경로 II는 샘플 경로와 광 지연선의 거리가 정확히 일치하여 0이 되므로 위상 변화는 아래 식 (2.15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
\phi(k) &= 2k(2QR + MC) \\
&= 4kx\sigma - 4kl_f\sigma \sin\Delta\theta
\end{aligned} \tag{2.15}$$

그림 2.3에서 회절격자 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
p(\sin\theta_0 + \sin\Delta\theta) &= m\lambda \\
p\sin\Delta\theta &= m(\lambda - \lambda_0) \\
\sin\Delta\theta &= \frac{m(\lambda - \lambda_0)}{p}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

회절격자의 1차 분광을 사용하므로 $m=1$ 이 되어 식 (2.15)는

$$\phi(k) = 4kx\sigma + 4kl_f\sigma \frac{(\lambda - \lambda_0)}{p} \tag{2.17}$$

가 되고 전파상수를 파장에 관해서 바꾸어 주면

$$\phi(\lambda) = \frac{8kx\sigma}{\lambda} + 8kl_f\sigma \frac{(\lambda - \lambda_0)}{p\lambda} \quad (2.18)$$

가 되며 각속도($w = \frac{2\pi}{c}$)에 관한 식으로 식 (2.18)을 다시 쓰면 아래 식 (2.19)와 같이 된다.

$$\phi(w) = \frac{4\sigma x w}{c} - \frac{8\pi\sigma l_f (w - w_0)}{pw} \quad (2.19)$$

w_0 을 중심 각 주파수라고 보았을 때 위상 지연 시간은

$$t_g = \frac{\phi(w_0)}{w_0} = \frac{4\sigma x}{c} \quad (2.20)$$

가 되며 위상 경로 차이(phase path-length difference)는 다음과 같다.

$$\Delta l_\phi = ct_g = 4\sigma x \quad (2.21)$$

군속도 지연 시간(group delay)은 중심 주파수 범위보다 주파수 변위 구간이 작으면 미분 관계가 되므로

$$t_g = \left. \frac{\partial \phi(w)}{\partial w} \right|_{w=w_0} = \frac{4\sigma x}{c} - \frac{4\sigma l_f \lambda_0}{cp} \quad (2.22)$$

이고 군속도 지연으로 인한 경로 차이(group path-length difference)는 다음과 같다.

$$\Delta l_g = ct_g = 4\sigma x - \frac{4\sigma l_f \lambda_0}{p} \quad (2.23)$$

위의 식과 같이 스캐닝 거울의 각도는 위상 경로 차와 군속도로 인한 경로 차에 모두 관여하며 거울의 offset(x)은 위상 경로에만 관여한다. 군속도 지연으로 인한 경로 차에는 식 (2.23)의 두 번째 항이 큰 영향을 주게 되므로 거울의 작은 각도 조절로 큰 광 경로차를 만들 수 있으며 원하는 중심 주파수를 만들어 낼 수 있다. 회절격자를 사용한 광지연선의 중심 주파수는 식 (2.12)을 통하여 스캐닝 거울이 움직이는 각속도를 이용하여 식 (2.24)과 같이 구할 수 있다.[6][14][15]

$$f_0 = \frac{4x}{\lambda_0} \frac{\partial \sigma(t)}{\sigma(t)} \quad (2.24)$$

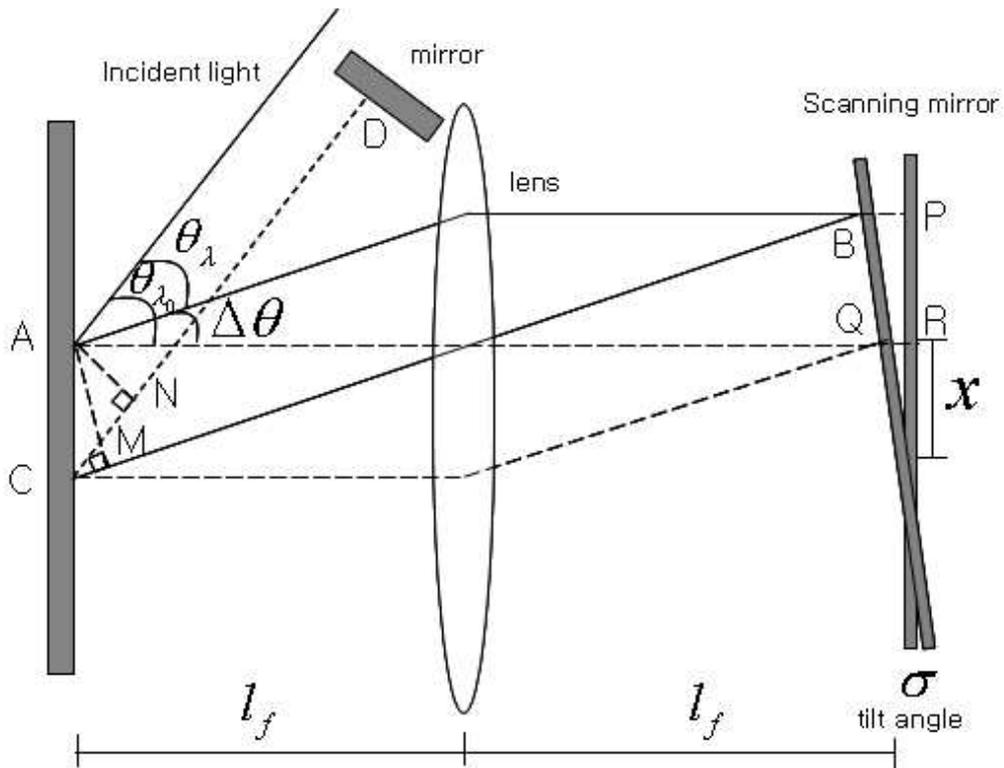


그림 2.3 회절격자를 이용한 고속 광지연선

제 3장 고속 스캐닝 저 결맞음 간섭계 설계

3.1 간섭계의 구성 요소

3.1.1 기본적인 간섭계 구성

본 논문에서는 일반적으로 광 분배기(beam splitter)를 사용하는 bulk 유형의 간섭계를 구성하는 대신 사용하기 편리한 2x2 커플러(coupler)를 사용하여 광섬유(fiber)를 기반으로 하는 간섭계를 구성하였다. 2x2 커플러는 양단에 각각 두개의 광섬유가 연결되어 있는 것으로 아래 그림 3.1과 같다.[16]



그림 3.1 2x2 커플러

3.1.2 광원 선택

피부 표면 굴곡은 보통 얇은 주름이 약 $20\mu\text{m}$ 이고, 깊은 주름이 약 $800\mu\text{m}$ 정도의 범위를 가지므로 가장 작은 주름을 구별할 수 있을 정도의 중축 해상도를 가지는 광원을 사용해야 한다. 사용된 광원의 중심파장(λ_0)은 근적외선 영역인 1296nm 이

고 파장의 반치폭($\Delta\lambda$)이 40nm인 Superluminescent diode(SLD, B&W TEK.INC.)이다.

$$l_c \approx 0.44 \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \approx 18.5\mu m$$

사용된 광원의 결맞음 길이는 약 18.5 μm 이므로 피부 굴곡을 측정하기 위한 조건을 충분히 만족한다. 실험에서 사용된 1300nm 파장을 갖는 광원은 물이나 피 등 인체에 관련된 부분의 흡수 계수가 낮고 충분한 투과 깊이를 갖기 때문에 광 결맞음 단층 촬영기에 많이 사용되고 있다.

3.1.3 고속 스캐닝 광 지연선 구성

빠른 스캐닝을 위해 회절격자를 이용한 광지연선을 구성하였다. 빠르고 안정적인 이미지 획득을 위해 스캐닝 거울은 선형성이 강한 galvanometer를 이용하여 각의 회전을 주었고 원하는 광 경로 차이와 간섭신호의 중심 주파수를 획득하기 위해 식 (2.23)과 (2.24)을 사용하여 적절한 회절격자와 스캐닝 거울의 각을 결정하였다.

2mm의 깊이 스캐닝을 위해 300groove/mm의 회절격자(pitch = 3.33 μm)와 초점거리 100mm인 렌즈를 사용하여 스캐닝 거울의 적절한 각을 결정하였다.

$$\Delta l_g = 4\sigma x - \frac{4\sigma l_f \lambda_0}{p} \approx \frac{4\sigma l_f \lambda_0}{p} = 2mm$$

$$\sigma = \frac{\Delta l_g \cdot p}{4l_f \lambda_0} = \frac{(2mm) \cdot (3.33\mu m)}{4 \cdot (100mm) \cdot (1296nm)} \approx 0.7^\circ$$

스캐닝 거울의 속도를 각각 100Hz와 200Hz로 구동할 때 원하는 중심 주파수를 얻기 위해서 식 (2.24)에 의해 스캐닝 거울의 중심부터 스캐닝 거울에 입사되는 빛의 거리인 x 를 변화하였다.

실험 설계 시 종축 해상도에 큰 영향을 줄 수 있는 군속도 지연에 의한 광 분산 (Group velocity dispersion) 문제를 해결하기 위해서 마이크로미터 단위로 움직이는 미세이동판(micro stage)위에 렌즈와 스캐닝 거울을 배치한 후 회절격자와 렌즈, 렌즈와 스캐닝 거울의 거리를 조절하여 렌즈의 초점거리에 회절격자를 위치시켰다. [6][14][17]

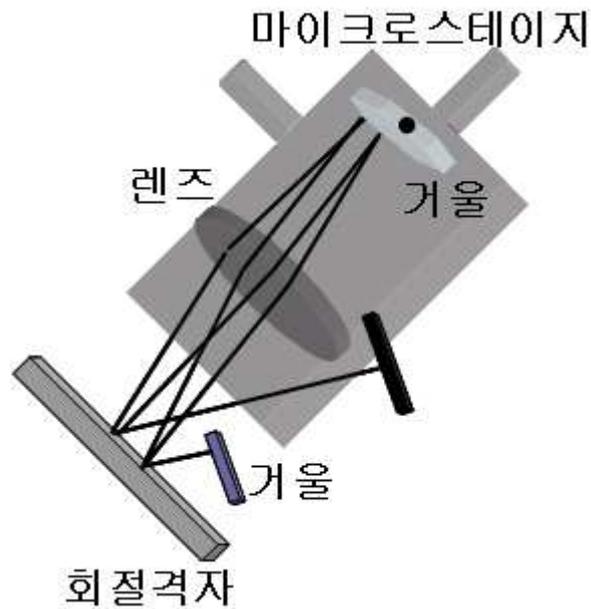


그림 3.2 회절격자를 이용한 광지연선 설계

3.1.4 샘플 경로 구성

피부 표면 굴곡 정량화를 위해서는 보통 3mm x 3mm 이상의 3차원 이미지가 요구된다. 이미지를 구현하기 위해 광 경로 지연선의 깊이 방향 스캐닝(A스캐닝) 외에 샘플 경로의 x(B스캐닝), y(C스캐닝) 방향의 스캐닝이 필요하다. 따라서 x축 스캐닝을 위해 스캐닝 거울을 대물렌즈 앞에 배치하였고, 동작 제어기(Motion controller)를 사용하여 y축 스캐닝을 하였다. 횡축 해상도는 광원의 중심 파장과

대물렌즈의 개구수(Numerical aperture)에 의해서 결정된다.

$$\Delta x = \frac{4\lambda}{\pi} \left(\frac{f}{d}\right) \approx 22\mu m$$

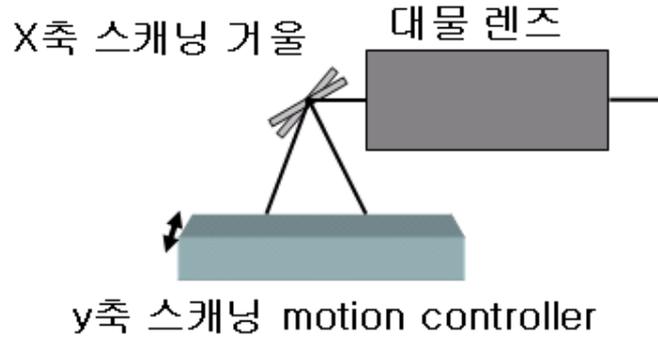


그림 3.3 샘플 경로 구성

3.1.5 3차원 이미지 구현을 위한 신호 동기화

3차원 이미지를 구현하기 위해 광지연선에서 빠른 속도로 종축(A 스캐닝) 스캐닝을 하였고 샘플 라인에서 광지연선의 종축 스캐닝이 진행되는 동안 스캐닝 거울을 이용해 x축 스캐닝을 하였으며 x(B스캐닝), z축 단면 이미지를 구현하는 동시에 동작 제어기를 이용하여 y축(C스캐닝)으로 샘플을 이동해 스캐닝을 수행하였다.

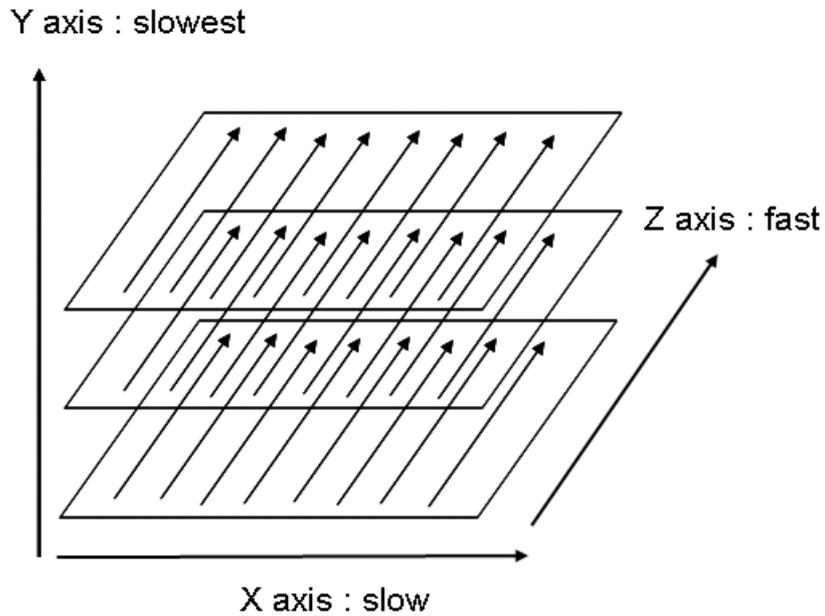


그림 3.4 3차원 이미지 구현 과정

정확한 이미지를 구현하기 위해서는 종축과 횡축 스캐닝의 구동 신호가 동기화 되어야 한다. 따라서 신호를 동기화하기 위해 데이터 출력과 입력을 동시에 수행할 수 있는 National Instrument 사의 PCI-6115 Board의 아날로그 출력을 사용하여 광 경로 지연선의 종축 스캐닝 거울을 움직이도록 하는 구동 신호를 출력하였으며 종축 신호가 출력되는 동시에 한 단면 이미지를 구현할 수 있도록 디지털 출력을 통해 x축 스캐닝을 구동하는 함수 발생기(Function generator)에 자극(Trigger)신호를 주었다. 자극 신호를 받은 함수 발생기는 자극 신호가 입력되면 동시에 원하는 효율 주기를 갖으며 횡축 스캐닝을 수행할 수 있도록 x축 스캐닝 거울에 동작 신호를 출력하였다. 함수 발생기는 Tabor사의 8551을 사용하였으며 8 함수발생기의 Gated mode는 TRIG 입력에 상승 신호가 입력되면 신호 출력 부분에서 선택된 신호가 출력되고 상승 신호가 끝나고 하강 신호가 TRIG 입력에 들어오면 함수 발생기의 출력 부분에서 신호가 나가지 않도록 구동된다. 종축 스캐닝은 선형성을 유지하기 위해 삼각파를 사용하였으며 횡축 스캐닝을 위해서 경사

(ramp)파를 사용하였다.

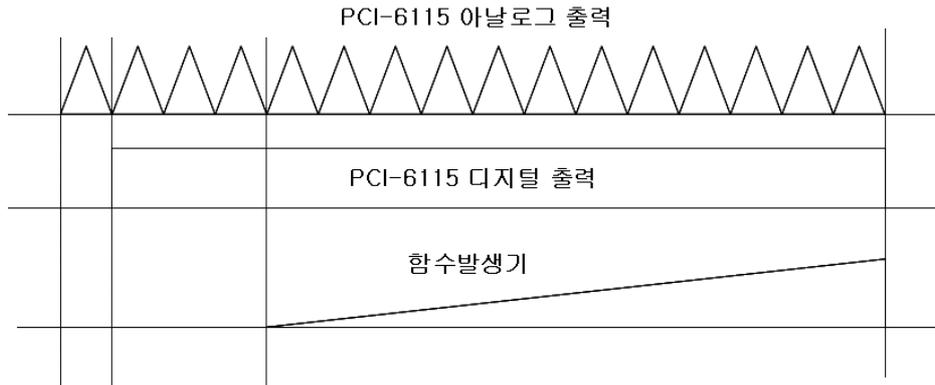


그림 3.5 이미지 획득 동기화를 위한 출력 신호 구성

3.1.6 신호 검출 및 복조 (Demodulation)

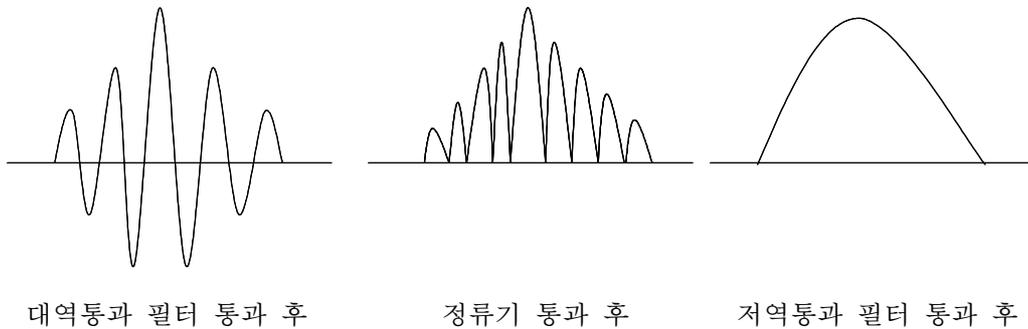


그림 3.6 일반적인 복조 과정

샘플 경로와 광지연선 경로가 정확히 일치할 때 검출되는 간섭신호는 일반적으로 광 검출기(photodiode)를 통해 획득된다. 실험 시 사용한 검출기는 NEW FOCUS 사의 1811로 125MHz의 넓은 반치폭을 가지고 있으므로 고속 신호를 왜곡 없이 받

을 수 있고 자체적으로 40V/mA의 교류 이득을 갖는다. 출력된 신호는 전압증폭기(Stanford Research Systems, SR560)를 통해 증폭되고 아날로그 회로의 복조 과정을 거쳐 envelop를 얻은 후 LabView 프로그램으로 구동되는 데이터 획득 보드(Data acquisition board, NI사 PCI-6115)를 통해 텍스트 파일로 저장되었다. 일반적인 아날로그 회로의 복조 과정은 그림 (3.6)과 같이 대역통과 필터(Bandpass filter)를 거쳐 노이즈를 제거하고, 정류기(Rectifier)와 저역통과 필터(Lowpass filter)를 거쳐 envelop를 얻게 된다.

본 실험 시 샘플 위치에 거울을 사용하고 광지연선의 스캐닝 거울을 100Hz로 구동하여서 약 72kHz의 중심 주파수를 얻었으며 복조 과정은 설계한 아날로그 회로를 이용하여 얻어냈다.

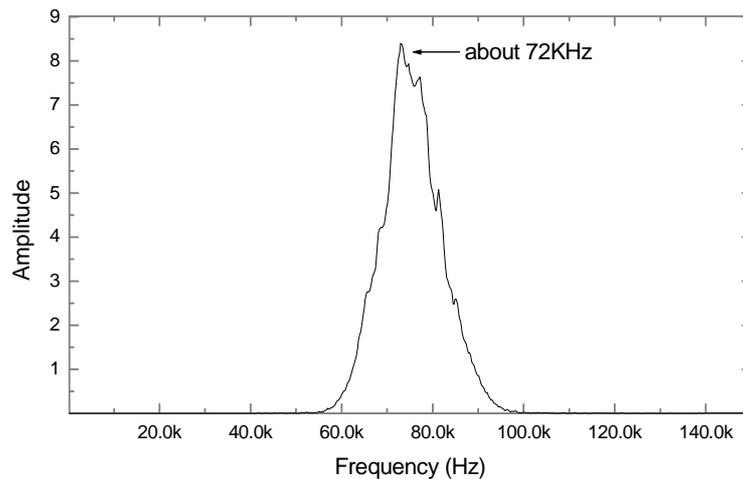


그림 3.7 간섭 신호의 중심 주파수

3.1.7 구동 소프트웨어

구동 소프트웨어는 National Instrument사의 LabView 프로그램을 사용하였으며 구성은 다음과 같다. 종축 스캐닝 구동 회로에 신호를 보내면 동시에 데이터 획득을 수행할 수 있도록 아날로그 입력 채널과 아날로그 출력 채널을 동기화하였다. LabView의 SUB VI중 아날로그 출력의 trigger option에서 start를 AI start trigger로 하였고 AO update를 PCI-6115 Board의 count 입력에 연결하여 AO update 개수에 따라 이미지 한 단면을 만들 수 있는 구형파를 출력하도록 하였다. 표면 이미지를 구현하기 위해 단면의 2차원 데이터를 얻은 후에 입력된 데이터의 불필요한 부분을 잘라내어 깊이 방향 데이터로 정렬하였다. 그 중 가장 큰 데이터 값을 갖는 위치를 피부 표면으로 가정하여 원하는 데이터를 추출하고 동작 제어를 움직인 후 다음 단면의 이미지를 얻어내는 순서로 구성하였다. 표면 이미지를 구성할 수 있는 데이터를 모두 얻은 후에 텍스트 파일 형식으로 저장하였다.

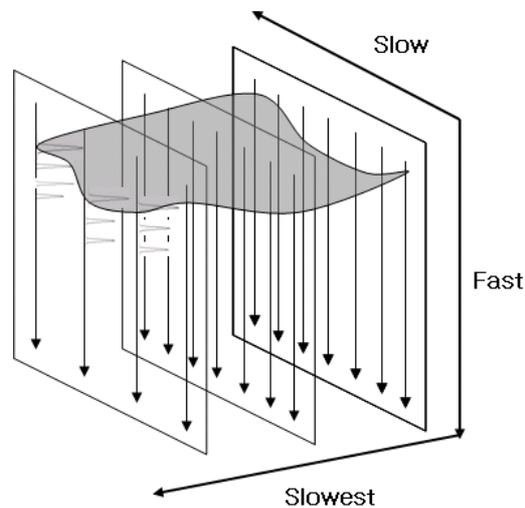


그림 3.8 표면 값 추출 방법

Rapid-scanning optical delay line

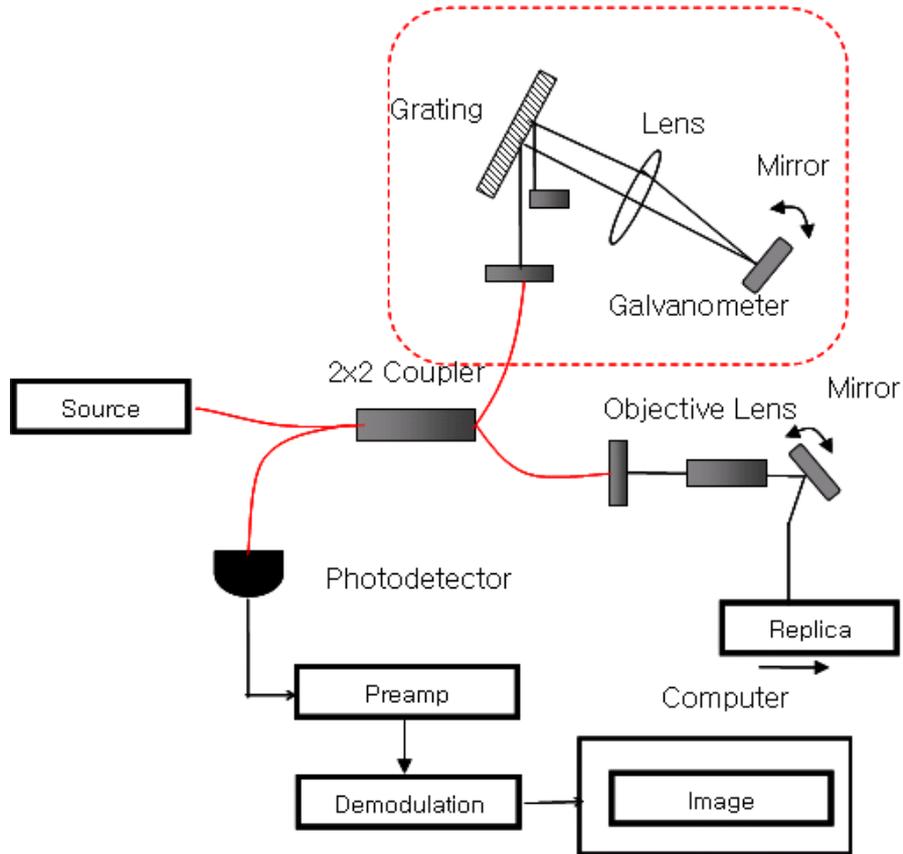


그림 3.9 저 결맞음 간섭계의 개략도

3.2 고속 스캐닝 저 결맞음 간섭계 보정

3.2.1 시스템의 종축 해상도 검증

설계한 저 결맞음 간섭계의 종축 해상도를 검증하기 위해 저장된 텍스트 파일의 깊이 방향 스캐닝인 A스캐닝 한 라인을 추출하여 일반적인 해상도를 검증하여 약 18 μm 의 해상도를 확인했다.

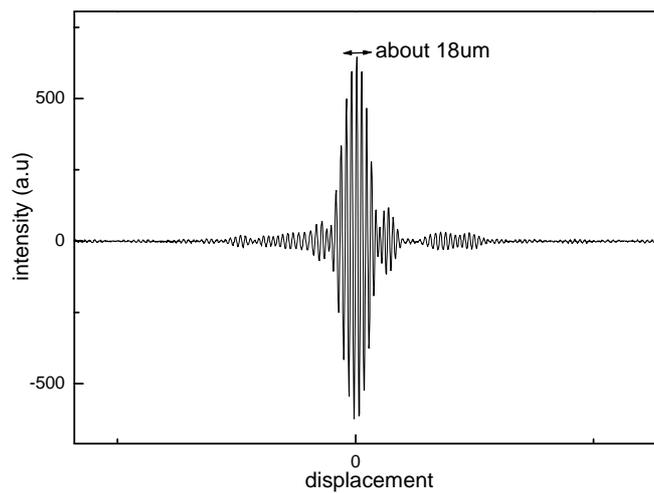


그림 3.10 시스템의 종축 해상도

3.2.2 깊이별 선형성 검증

설계된 저 결맞음 간섭계의 샘플 높낮이에 따른 변화를 측정하기 위해서 횡축 스캐닝인 B, C 스캐닝은 하지 않고 샘플이 위치하는 자리에 거울을 놓은 미세이동

판(micro stage)을 위치시켜 미세이동판을 $20\mu\text{m}$ 씩 위로 움직여가며 픽셀 변화를 측정하였다. 광원에 따르는 저 결맞음 간섭계의 해상도가 $18\mu\text{m}$ 이므로 움직임 거리를 $20\mu\text{m}$ 로 선택하였다. 광지연선의 스캐닝 거울은 200Hz 로 움직였고 초당 샘플링 수는 500k 로 하여 데이터를 얻었으며 얻은 데이터를 통해 $20\mu\text{m}$ 당 5픽셀의 변화가 나타나 한 픽셀 당 $4\mu\text{m}$ 의 재현성을 확인하였다. 결과를 통해 분석한 시스템의 측정 선형성은 약 0.997로 높낮이에 따라 정확한 변화를 보였다.

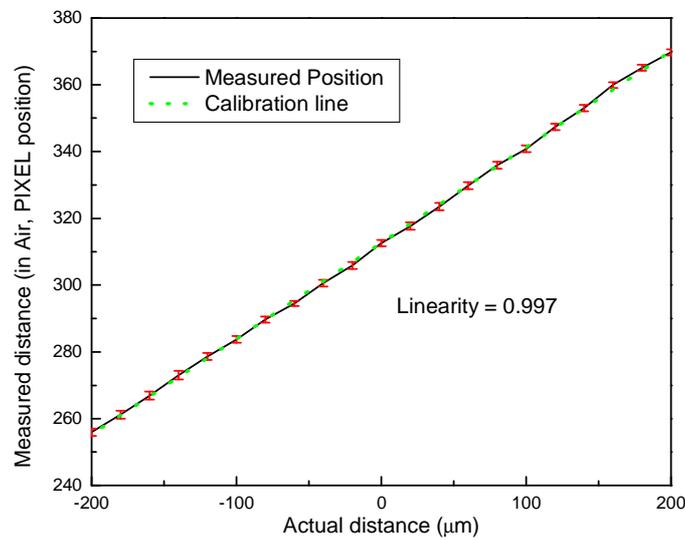


그림 3.11 깊이 방향의 선형성 검증

3.2.3 횡축 스캐닝 보정

원하는 크기의 스캐닝 이미지를 얻기 위해서는 횡축 스캐닝 방향인 B스캐닝의 거울 움직임 각도와 C스캐닝의 동작 제어기 속도를 보정해주어야 한다. 대물렌즈에 따른 횡축 해상도가 약 $20\mu\text{m}$ 이었으므로 그보다 약간 작은 $15\mu\text{m}$ 가 한 픽셀 당 크기가 되도록 하였다. 동작 제어기의 속도는 임의로 조절이 가능하므로 동작 제어

기의 속도를 $15\mu\text{m}$ 로 하여 그림 3.11 Airforce target USAF1951의 화살표 A와 B를 스캐닝 해서 실제 크기를 구하였다. 한 픽셀 크기 당 $15\mu\text{m}$ 로 움직였으므로 B부분의 거리는 약 $570\mu\text{m}$ 이고 A 부분의 거리는 약 $560\mu\text{m}$ 임을 확인하였으며 B스캐닝을 위한 거울의 각도를 바꾸어 한 픽셀 당 크기가 $14.7\mu\text{m}$ 로 원하는 픽셀 크기 $15\mu\text{m}$ 와 거의 같은 값을 갖도록 하였다.

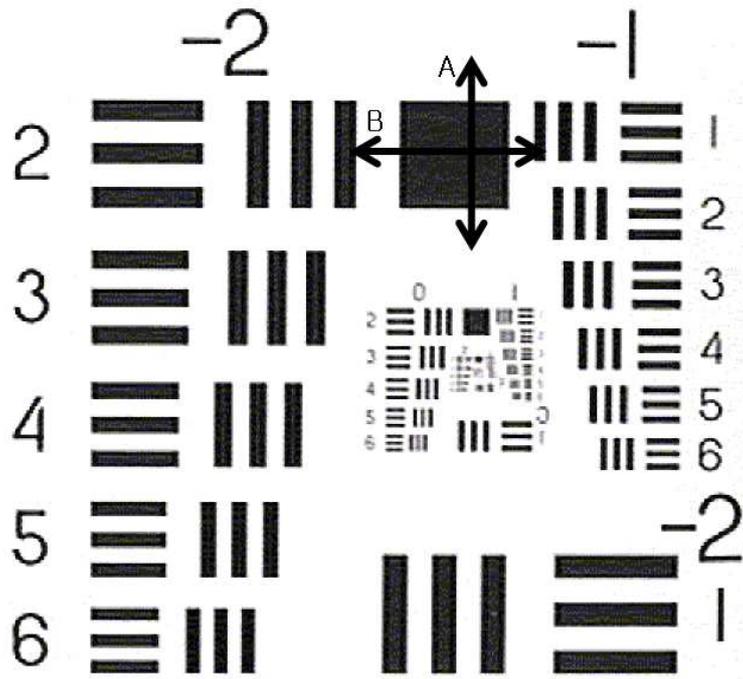


그림 3.12 Airforce Target USAF1951

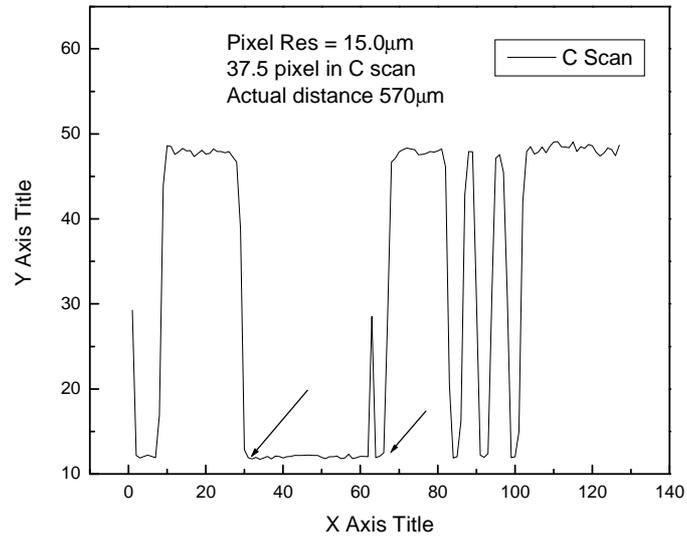


그림 3.13 동작 제어를 이용한 USAF1951 스캐닝

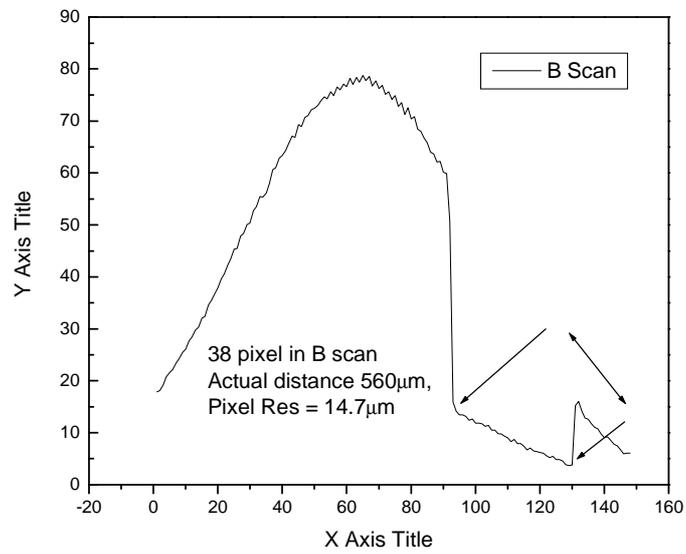


그림 3.14 A 스캐닝을 위한 픽셀 크기 고정

3.2.4 횡축 해상도 검증

저 결맞음 간섭계의 횡축 해상도는 광원의 파장과 대물렌즈의 개구수(Numerical Aperture)에 의해 결정되며 약 $20\mu\text{m}$ 정도였다. 횡축 해상도는 간격 사이의 거리가 알려진 Airforce target USAF1951의 이미지를 얻어 검증하였다. 그림 3.15에서 보이는 G5의 4번째 부분은 줄 사이의 간격이 약 $22\mu\text{m}$ 이므로 횡축 해상도가 계산한 값보다 약간 큰 약 $22\mu\text{m}$ 임을 확인하였다.

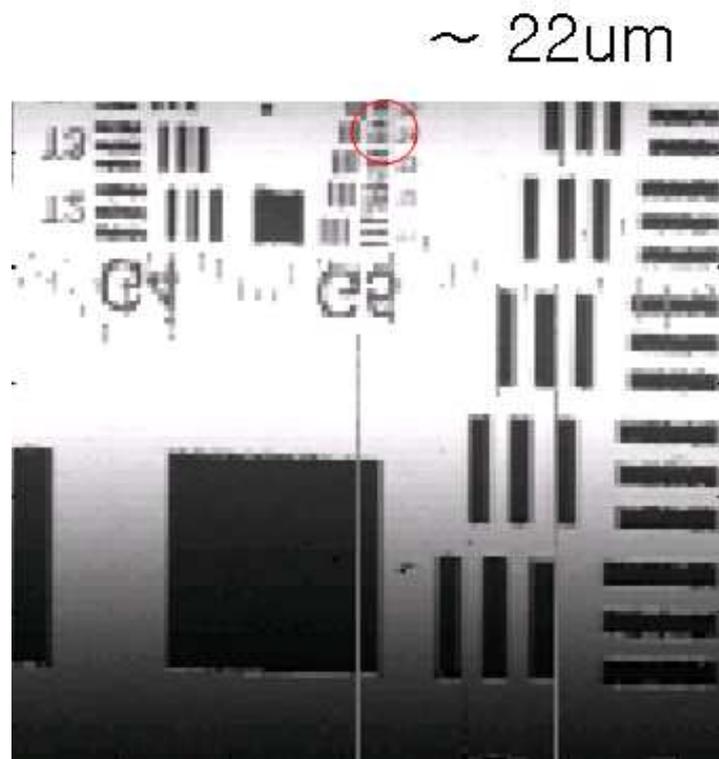


그림 3.15 횡축 해상도 검증을 위한 USAF1951 스캐닝

3.2.5 저 결맞음 간섭계의 신호 대 잡음 비 (SNR)

설계된 저 결맞음 간섭계의 신호 대 잡음 비는 실제 피부 샘플을 놓았을 때를 가

정하여 샘플 경로에 거울을 놓고 거울과 커플러의 샘플 방향 출력 사이에 $\frac{1}{2500}$ 감쇄기판(attenuator)을 설치한 후 전압 전단 증폭기에서 20배 증폭하여 검출된 신호를 사용하여 연산하였다. 아래 그림 3.16은 시스템의 신호 대 잡음 비를 나타내며 감쇄기판에서 약 34dB 정도가 감쇄되었으므로 신호 대 잡음 비는 약 82dB가 된다.[18]

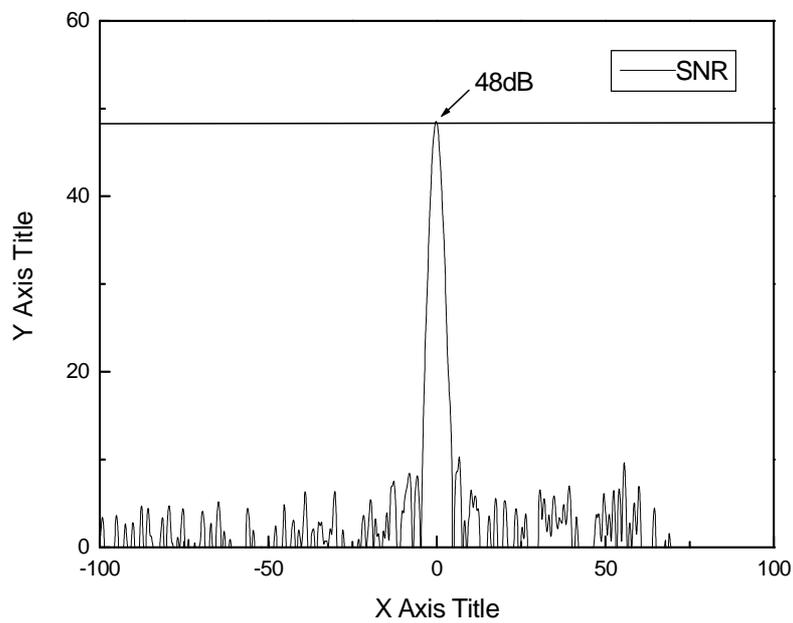


그림 3.16 저 결맞음 간섭계의 신호 대 잡음 비

제 4장 피부 표면 굴곡 이미지 획득 및 분석

4.1 피부 표면 굴곡 측정 (skin topology)

일반적으로 피부 표면 굴곡 측정에 관한 연구 분야를 skin topology라 한다. 다시 말하면 피부 표면의 측정 및 분석을 하는 연구로 광 노화 등으로 인한 피부 주름의 평가, 여러 가지 증상으로 나타나는 피부 질환의 평가 등에 필요하다.

4.1.1 샘플 선정

실제 피부 표면에서 굴곡 데이터를 얻는 것이 이상적이지만 맥박과 피부의 떨림 그리고 각 피부 구성 요소마다 다른 광학계수의 차이 등으로 인해 측정오차가 나타날 수 있으므로 치과용 압인 재료 (impression material)인 Provil®(Heraeus Kulzer Inc., South Bend, USA)로 베이스 (base) 및 경화제 (catalyst)를 1:1 부피로 섞은 후 10분간 도포 후에 얻은 피부 표면의 반대 이미지인 피부 모사판을 사용했다. 피부 모사판은 움직임이 없게 고정이 가능하며 동일한 성분으로 구성되어 있으므로 측정 오차를 최소로 줄일 수 있다.



그림 4.1 피부 모사판

4.1.2 피부 표면 이미지 구현

텍스트 파일로 저장된 데이터를 이용해 3차원 이미지를 구현하였다. 3차원 이미지는 Matlab 프로그램을 사용하여 구현하였으며 구현된 이미지는 스캐닝 과정에 나타나는 기계적인 잡음(noise)과 시편의 기울기 및 장비의 설계에 따른 형상 오차(Forming error)를 가진다. 특히 이미지 구현에 사용된 저 결맞음 간섭계는 샘플 스캐닝 부분에 사용되는 대물렌즈의 굴곡 때문에 상면 만곡이라는 현상이 발생하여 평면 이미지가 렌즈의 구면에 따라 곡면인 것처럼 나타나기도 한다. 그리고 샘플로 사용하는 피부 모사판은 실제 사람 피부에서 얻어지므로 획득되는 부분의 실제 피부의 형태에 따라 전체적인 모양이 결정된다. 따라서 각 모사판마다 갖는 기울기 및 형상이 다르다. 각기 다른 샘플에서 나타나는 형상 오차가 제거되어야만 정확한 굴곡(roughness) 이미지를 구현할 수 있다. 기계적으로 나타나는 잡음은 이미지 사이에 피크 형태로 나타나므로 중앙필터(median filter)를 사용하여 제거가 가능하며 형상 오차는 평면 보정(plane fitting)연산 과정을 통해서 제거할 수 있다.

평면 보정 연산(plane fitting algorithm)은 데이터를 통해 얻은 평면의 전체 기울기에 해당하는 평면을 찾아내어 원래 이미지와 평면 기울기 이미지의 차를 구하는 과정을 통해 수행된다.

평면 방정식은 다음과 같으므로 아래와 같이 전개 될 수 있다.

$$ax + by + cz + d = 0$$

$$\frac{a}{c}x + \frac{b}{c}y + z + \frac{d}{c} = 0$$

$$Ax + By + C = z \quad \left(A = \frac{a}{c}, B = \frac{b}{c}, C = \frac{d}{c} \right)$$

위의 식을 행렬로 전개하면 다음과 같다.

$$[x_i \ y_i \ 1] \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = [z_i] \quad (i = 1, 2, 3, \dots, \text{pixelsize})$$

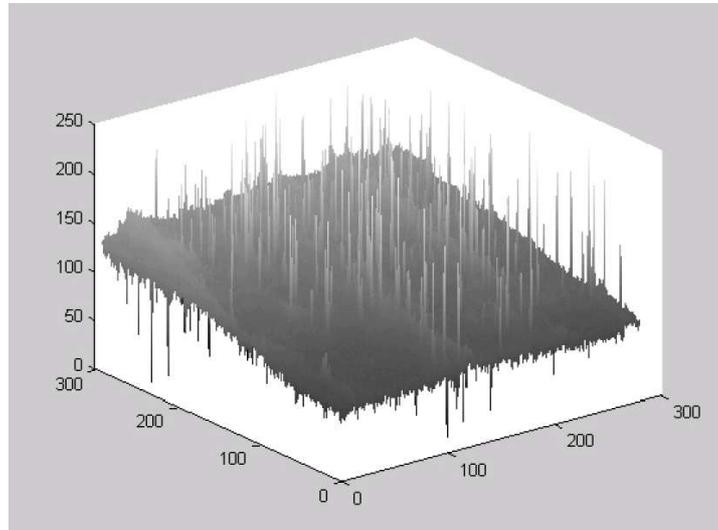
$$(M^T \cdot M)^{-1}(M^T \cdot M) \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = (M^T \cdot M)^{-1}(M^T \cdot N)$$

$$(M = [x_i \ y_i \ z_i], N = [z_i])$$

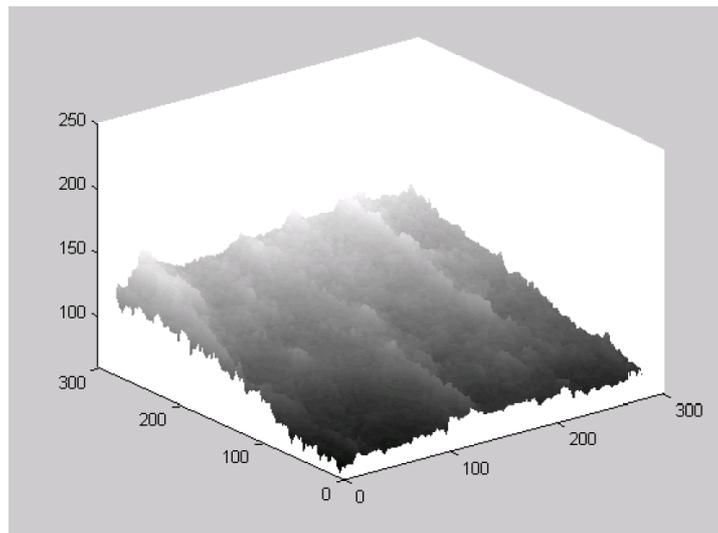
$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = (M^T \cdot M)^{-1}(M^T \cdot N)$$

위의 식을 통해 얻은 A, B, C 값을 이용하여 한 픽셀이 갖는 높이 값을 구해 본래 이미지의 기울기를 갖는 평면을 구하였다.

그림 4.2는 중앙 필터를 하기 전 · 후의 3차원 영상을 구현한 것으로 이미지 사이에 잡음이 중앙 필터 통과 후 사라지는 것을 확인할 수 있다. 그림 4.3은 잡음이 제거된 데이터의 기울기 평면을 구하여 평면 보정한 그림이다.

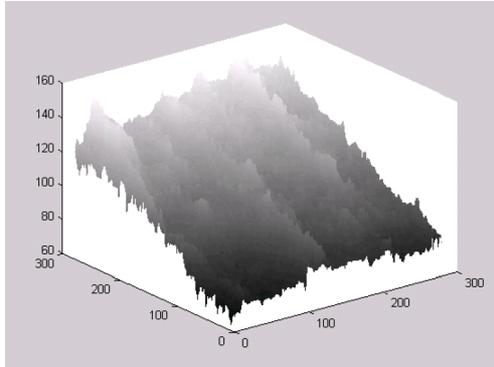


(a) 중앙 필터(median filter) 통과 전

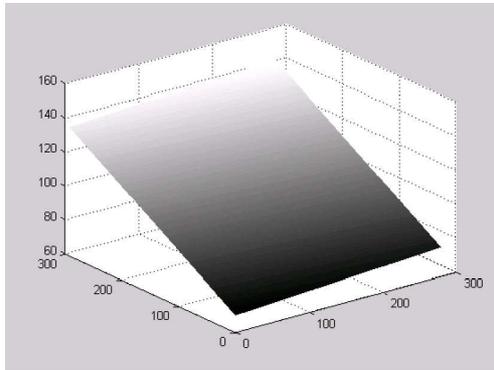


(b) 중앙 필터(median filter) 통과 후

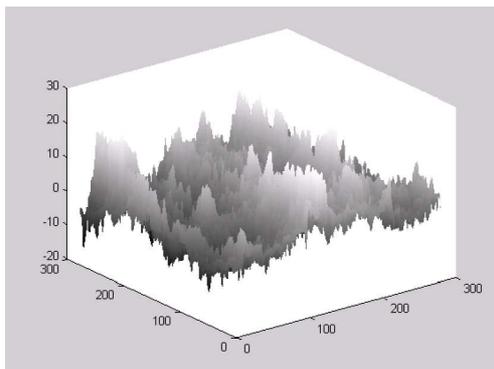
그림 4.2 중앙필터를 거치기 전 후의 잡음 제거 이미지



(a) 형상 오차 보정 전



(b) 형상 오차 보정 위한 기울기 평면



(c) 형상 오차 보정 후

그림 4.3 평면 보정 연산 거친 이미지

4.2 기존 피부 표면 굴곡 측정 장치와 비교

4.2.1 Laser profilometry

Laser profilometry는 자동 초점 장치로 대물렌즈 아래에 샘플을 놓고 대물렌즈의 초점에 샘플의 표면이 위치할 수 있도록 대물렌즈를 위아래로 움직여서 생기는 변위를 사용하여 피부 표면의 3차원 이미지를 구현하는 장치이다. 최소 50nm 정도의 높낮이를 측정할 수 있는 장점이 있지만 측정할 수 있는 범위가 작고 이미지 구현 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.

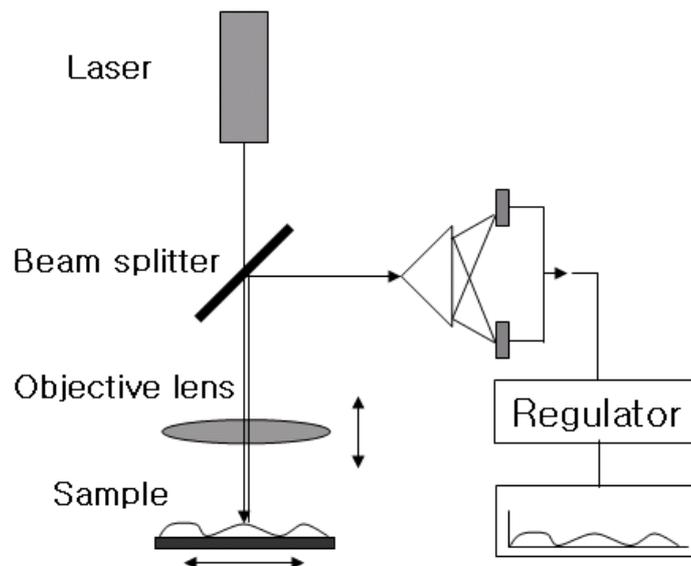


그림 4.4 Laser profilometry의 개략도

4.2.2. 저 결맞음 간섭계 이미지와 비교

그림 4.5는 Laser profilometry를 통해 얻은 이미지이고 그림 4.6은 저 결맞음 간

섭계를 이용해 얻은 이미지이다. Laser profilometry는 $3\mu\text{m}$ 의 해상도로 90분간 측정된 그림이고 저 결맞음 간섭계는 약 2분간 얻은 그림이다. Laser profilometry는 비교적 뛰어난 횡 · 종축 해상도로 인해 부드러운 영상을 확인할 수 있다. 그러나 측정시간이 매우 오래 걸리고 그림에서 확인할 수 있듯이 측정 범위가 충분하지 않으므로 경사가 가파른 부분에 측정 오차를 가지고 있다. 이에 반해 저 결맞음 간섭계를 통해 얻은 그림은 약간 거칠기는 하나 전체적으로 정확한 이미지 구현이 가능함을 확인할 수 있다.

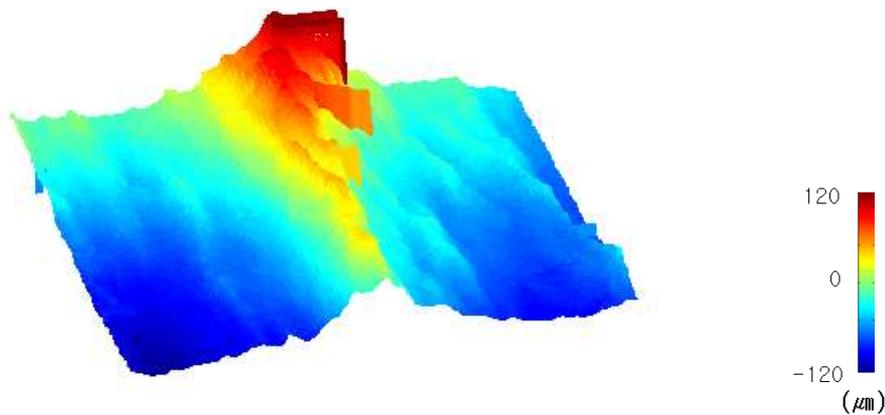


그림 4.5 Laser profilometry를 이용해 얻은 이미지

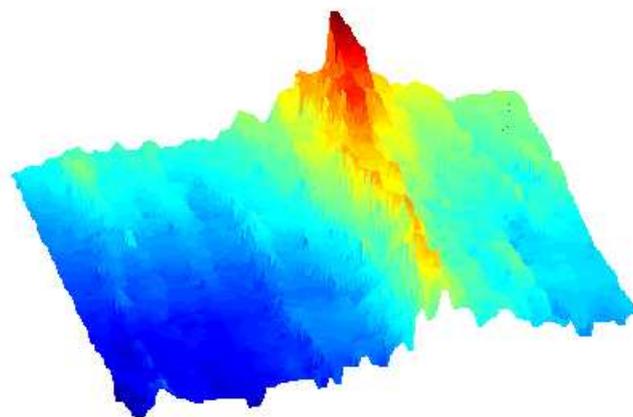


그림 4.6 저 결맞음 간섭계를 이용해 얻은 이미지

4.3 일반 피부와 아토피 피부 이미지 구현 및 분석

4.3.1 아토피 피부

아토피 피부는 태열을 비롯해 주부 습진이나 두드러기, 접촉성 피부염 등을 쉽게 겪을 수 있는 자극에 민감한 알레르기성 피부를 말하며 발병원인은 정확하게 밝혀지지 않았지만 유전적인 이유나, 세균, 곰팡이 등에 의한 감염, 정신적 스트레스 등이 복합적으로 작용하여 나타나는 것으로 알려졌다. 최근에는 ‘새집 증후군’이라는 시멘트 독성 등으로 인한 생활환경에 의한 아토피 피부염이 나타나기도 한다. 아토피 피부염의 증상은 땀을 흘리거나 울로 된 옷을 입으면 피부가 쉽게 가렵고 붉어지기도 하며 앓고 있는 환자의 피부는 건조하며 심한 경우 피부가 뽕비늘 같이 트고 버짐이 나타나게 된다.

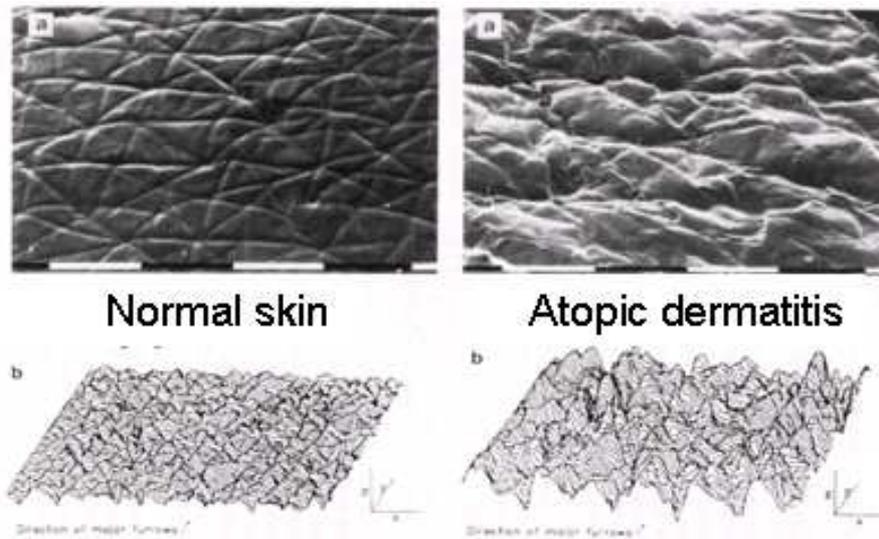
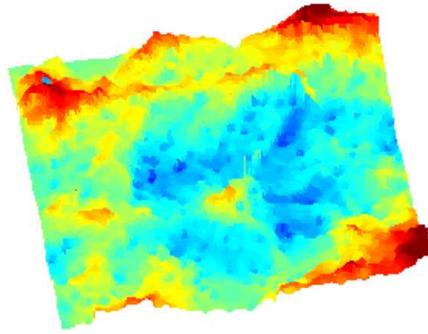


그림 4.7 일반 피부와 아토피 피부

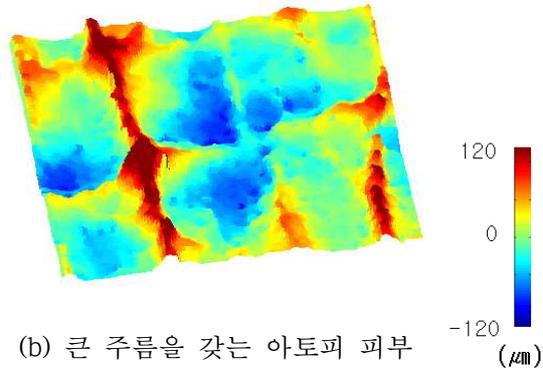
4.3.2 일반 피부와 아토피 피부의 이미지 비교 및 분석

일반 피부를 가진 사람과 아토피 피부염을 앓고 있는 환자의 피부에서 얻은 피부 모사판의 이미지를 구현하였다. 아토피 피부염을 가지고 있는 피부 표면 굴곡 이미지는 그림 4.8을 보면 일반 피부에 비해 굵은 주름과 작은 주름이 많이 나타났으며 방사형의 주름 형태를 띠기도 한다.

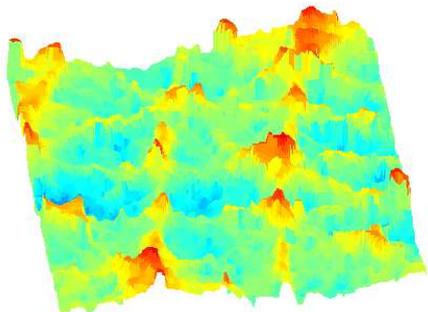
일반 피부와 아토피 피부 이미지 분석을 위해서 일반 피부 샘플과 아토피 피부 샘플 각각 6개를 스캐닝하여 2차원 푸리에 변환을 수행하고 파워 스펙트럼을 분석하였다. 2차원 푸리에 변환을 수행할 경우 일반적으로 영상의 굴곡은 파장으로 간주되어 해석된다. 그림 4.9의 2차원 FFT 영상을 보면 일반 피부에 아토피 피부가 고주파수 성분을 많이 가지므로 잔주름 성분이 많다는 것을 확인할 수 있다. 파워 스펙트럼의 합을 분석해보면 전체 파워의 20%를 갖는 주파수와 50%를 갖는 주파수에서 아토피 피부가 높은 주파수 값을 가지고 있음을 보이며 50%이후의 파워 스펙트럼의 합은 일반 피부와 아토피 피부가 거의 같다는 것을 80%의 파워 스펙트럼을 통해 확인하였다.



(a) 일반 피부

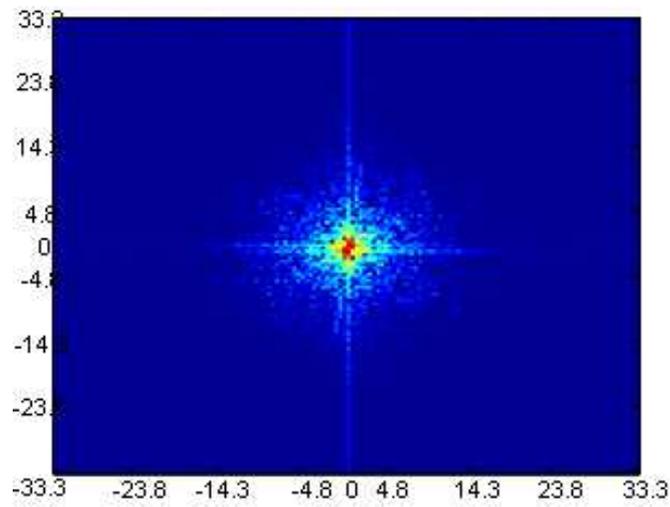


(b) 큰 주름을 갖는 아토피 피부

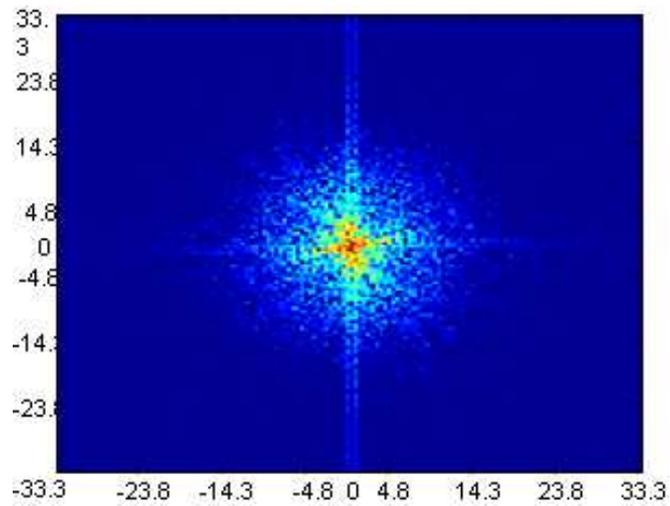


(c) 등방형의 주름을 갖는 아토피 피부

그림 4.8 일반 피부와 아토피 피부 이미지 (2.1mm x 2.1mm)

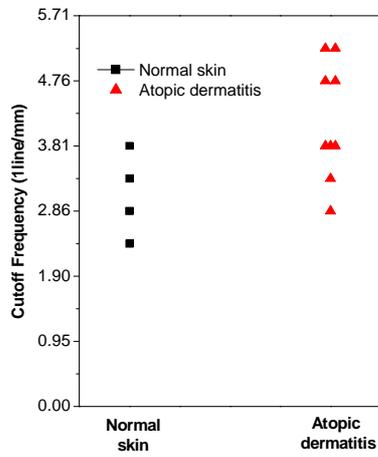


(a) 일반 피부의 2차원 푸리에 변환

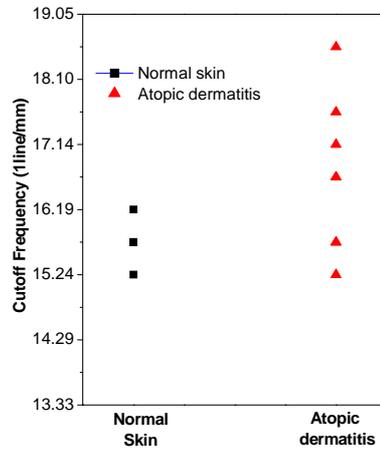


(b) 아토피 피부의 2차원 푸리에 변환

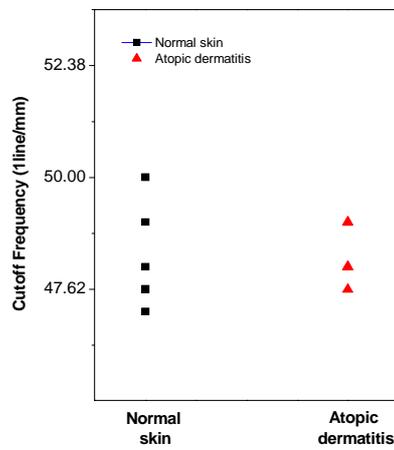
그림 4.9 일반 피부와 아토피 피부의 2차원 푸리에 변환



(a) 20%



(b) 50%



(c) 80%

그림 4.10 일반 피부와 아토피
피부의 파워 스펙트럼 비교

4.4 항 주름성 화장품 치료 전과 치료 후의 효능 평가

4.4.1 샘플

항 주름성 화장품의 효능 평가를 위해 실험에 참여한 18명의 40대 여성의 양쪽 눈가(crow's feet)에 항 주름성 화장품을 사용하기 전과 사용 후 8주 차에 실리콘 수지(Provil®Heraeus Kulzer Inc., South Bend, USA)를 부착하여 얻은 총 36개의 피부 모사판을 사용하였다.

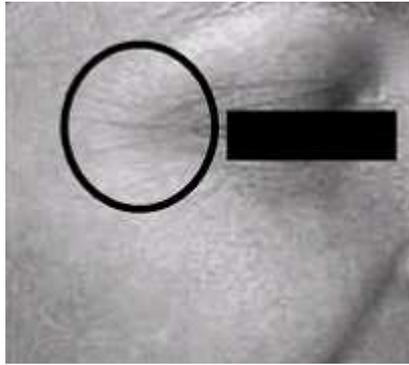


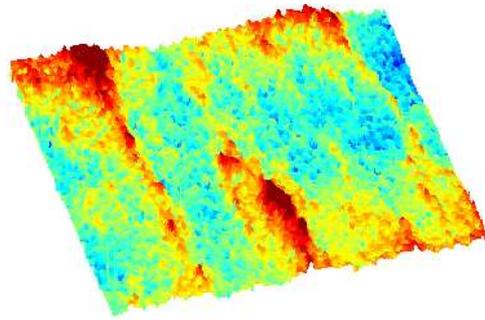
그림 4.11 모사판 획득 위치
(crow's feet)

4.4.2 이미지 획득을 위한 시스템 구성 및 이미지 구현

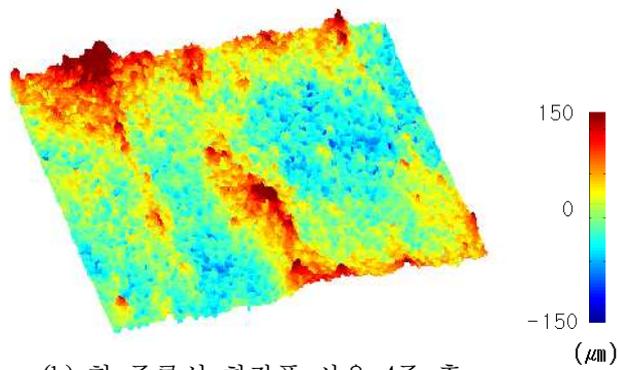
보다 정확한 피부 표면 굴곡 정량화를 위해서는 적어도 3mmx3mm의 크기 이상을 갖는 이미지가 필요하다. 보다 넓은 범위를 빠른 시간 안에 스캐닝 하기 위해 종축 스캐닝을 위한 동작 신호를 200Hz로 하여 초당 400번의 A스캐닝이 가능하게 하였고 정밀한 표면 값 검출을 위해 복조 과정을 동 위상 증폭기(Lock-in amplifier, SR844, Stanford Research Systems)를 사용하였다. 동 위상 증폭기는 기

준 채널의 주파수와 같은 신호를 검출하는 기능을 함으로써 원 신호에 필요 없는 잡음을 제거하고 원하는 신호만 얻어낼 수 있다. A 스캐닝을 하는 동작 신호가 200Hz이므로 광지연선의 스캐닝 거울의 중심으로부터 렌즈를 통과한 빛이 거울에 입사하는 거리를 조절하여 간섭 무늬의 중심 주파수를 162kHz로 조절하였으며 동 위상 증폭기의 시정수(time constant)는 100us, 필터의 경사도는 12dB/oct로 하였다. 데이터 입력 프로그램의 초당 받을 수 있는 데이터는 200k로 하였고 그에 따라 깊이 방향으로 한 픽셀 당 10 μ m의 크기를 갖는다.

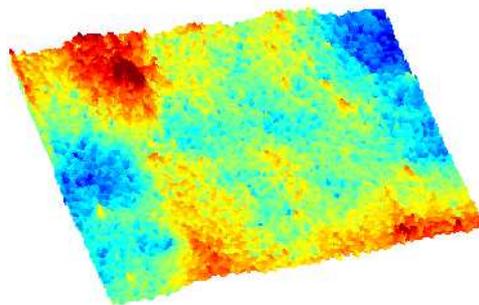
그림 4.12와 4.13은 항 주름성 화장품의 사용전과 4주 후, 8주 후의 피부 모사판을 스캐닝 하여 구현한 4.2mmx4.2mm 이미지이다.



(a) 항 주름성 화장품 사용 전

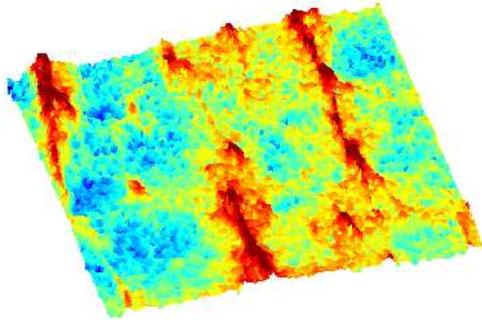


(b) 항 주름성 화장품 사용 4주 후

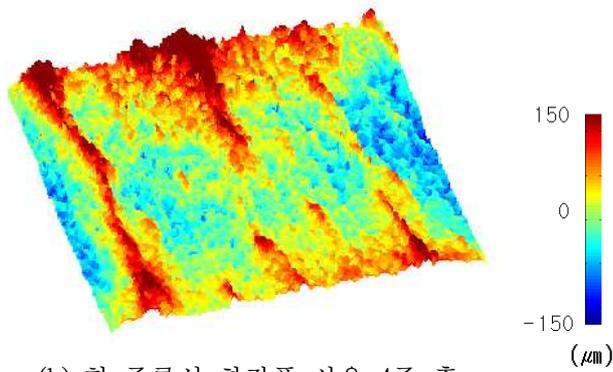


(c) 항 주름성 화장품 사용 8주 후

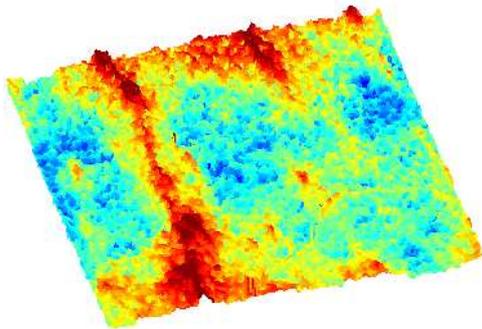
그림 4.12 항 주름성 화장품 사용 후 피부
표면 굴곡 이미지 A
(4.2mmx4.2mm)



(a) 항 주름성 화장품 사용 전



(b) 항 주름성 화장품 사용 4주 후



(b) 항 주름성 화장품 사용 8주 후

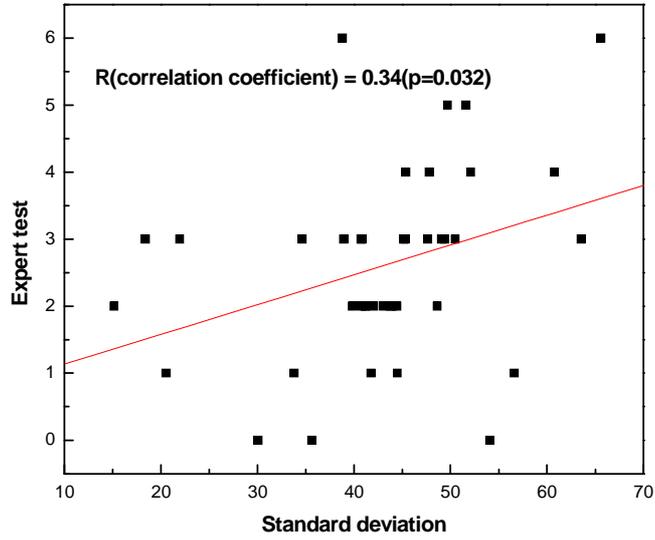
그림 4.13 항 주름성 화장품 사용 후 피부
표면 굴곡 이미지 B
(4.2mmx4.2mm)

4.4.3 이미지 분석

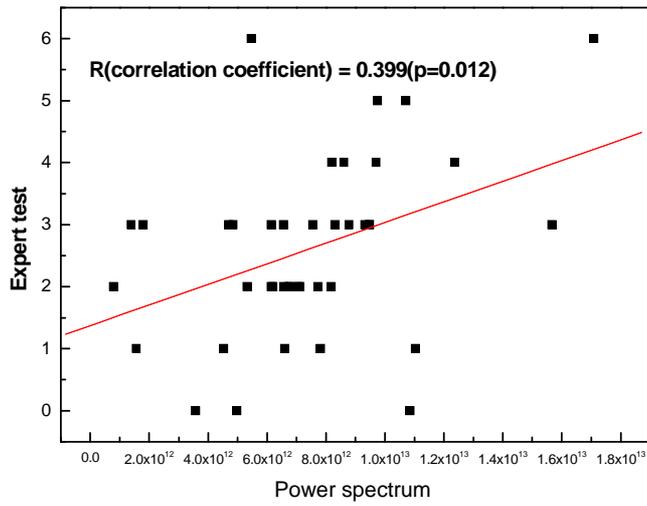
간단한 기하학적 굴곡 평가 방법으로는 높낮이에 대한 평균과 표준 편차가 사용된다. 하지만 평균은 표면의 형상에 따라 달라지므로 표준편차를 이용하는 방법이 많이 사용되고 있다. 본 실험에서는 항 주름성 화장품을 사용하기 전과 사용 후의 굴곡 변화를 비교하기 위해서 총 36개의 피부 모사판을 스캐닝하여 각각의 표준 편차를 구하고 2차원 푸리에 변환을 하여 파워 스펙트럼을 구하였다.

전문가의 육안 평가를 저 결맞음 간섭계를 사용해 얻은 수치와 비교하기 위해 치료 전 피부 모사판의 표준 편차와 파워 스펙트럼의 합을 각각 사용하였다. 그림 4.14는 전문가의 관점에서 주름의 정도를 10단계로 나누고 샘플에 따라 전문가의 진단과 저 결맞음 간섭계가 어떠한 관계를 갖는지 알아본 것으로 표준 편차와는 약 0.34($p=0.032$)의 상관 계수를 보였으며 파워스펙트럼의 합과는 0.399($p=0.012$)의 상관 계수를 확인하였다. 전문가의 육안 평가는 주로 200 μm 이상의 큰 주름만을 관찰한 것이므로 실제 시스템에서 얻은 데이터와는 큰 상관관계를 갖지 않는다.

주름 별 상관관계를 구하기 위해 이미지를 2차원 푸리에 변환하여 각 대역별로 분석하였다. 그림 4.15를 보면 파워 스펙트럼 분포도에서 중심으로부터 거리가 3인 픽셀까지의 구간인 0.5 lline/mm를 큰 주름이라 정하고 거리가 4~20인 픽셀까지의 부분인 0.5~3.37 lline/mm를 중간 주름, 거리가 21~50인 픽셀까지인 3.37~8.417 lline/mm를 잔주름이라 가정하였다. 큰 주름과 중간 주름은 각각 0.373($p=0.018$), 0.38($p=0.015$)의 상관계수를 가졌으며 잔주름은 0.175($p=0.28$)의 상관계수를 가졌다. 잔주름의 경우 눈으로 확인하는 것이 불가능하므로 큰 주름과 중간 주름에 비해 상관관계가 매우 작음을 확인할 수 있다.



(a) 표준 편차



(b) 파워 스펙트럼

그림 4.14 전문가의 분석과 저 결맞음 간섭계의 상관관계

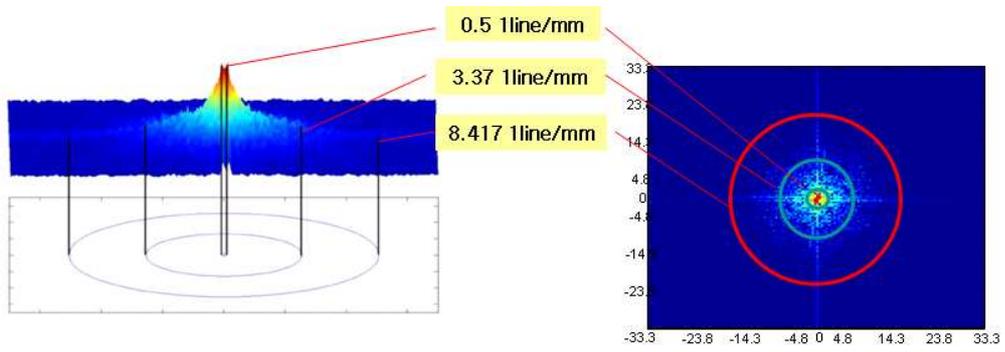


그림 4.15 파워 스펙트럼을 이용한 주름 분류

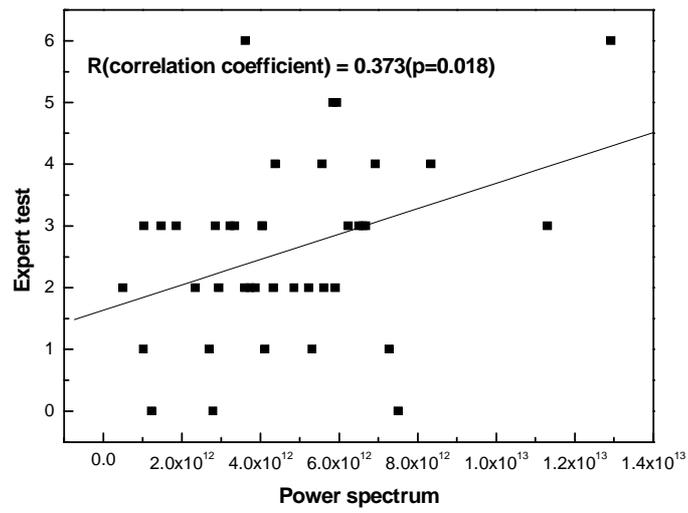


그림 4.16 큰 주름과 전문가 평가의 상관관계

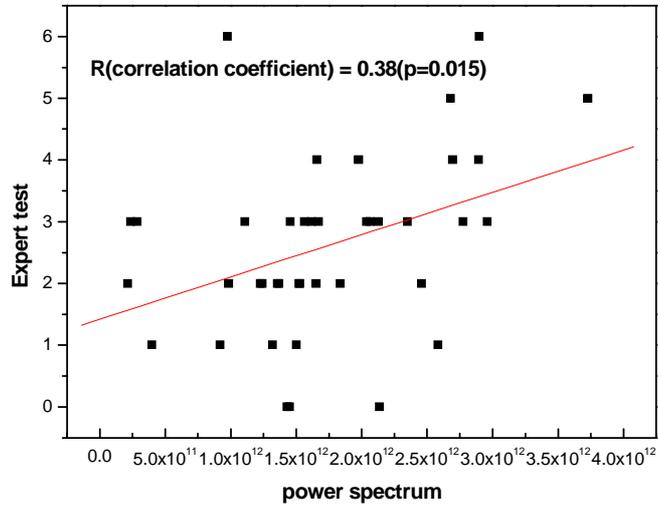


그림 4.17 중간 주름과 전문가 평가의 상관관계

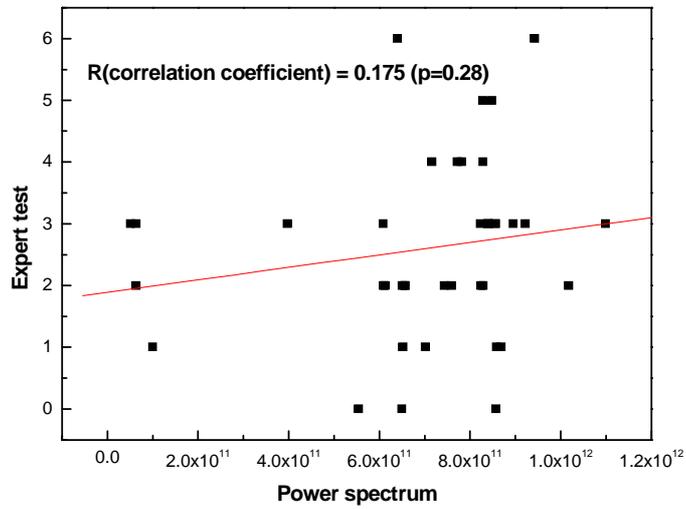


그림 4.18 잔주름과 전문가 평가의 상관관계

전체적인 주름 변화를 관찰하기 위해 2차원 푸리에 변환을 사용하여 파워 스펙트럼의 합을 연산한 결과 항 주름성 화장품을 사용하기 전과 사용 8주 후를 비교하였을 때 전체적으로 약간 주름이 감소하는 것을 그림 4.19를 통해 확인할 수 있다.

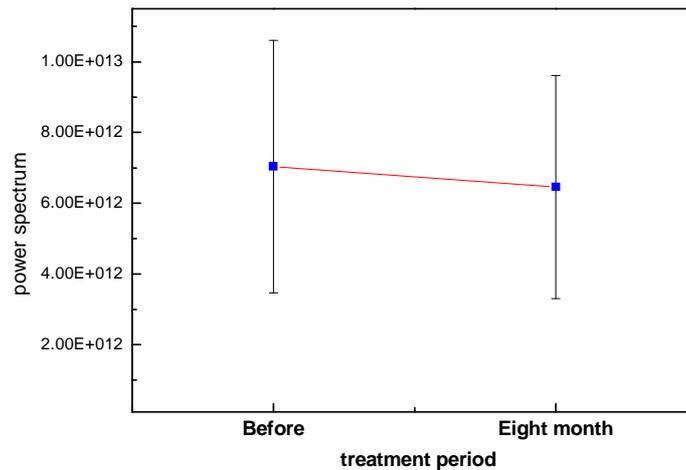
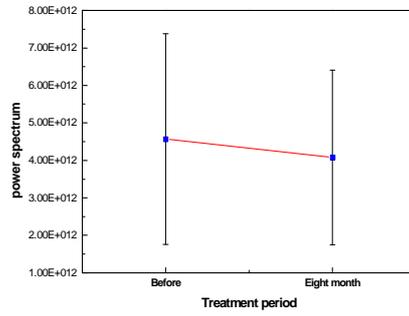
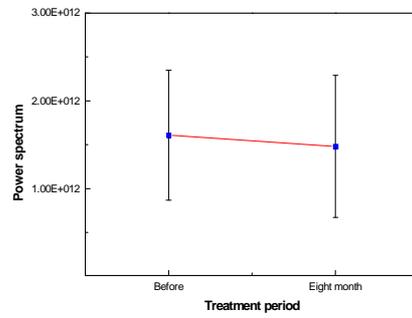


그림 4.19 항 주름성 화장품 사용전과 사용 후의 파워 스펙트럼 변화

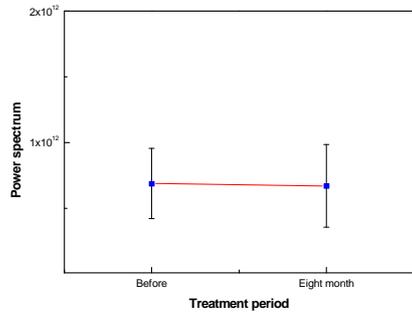
각 주름 대역 별로 사용 전과 사용 후 8주의 줄어든 주름을 분석한 결과 큰 주름과 중간 주름에 해당하는 영역은 파워 스펙트럼의 합이 줄어든 반면 잔주름 영역은 거의 줄어들지 않음을 그림 4.20을 통해 확인할 수 있다. 전체적으로 주름이 줄어든 부분을 단순 비교하기 위한 그림 4.21을 보면 큰 주름이 줄어든 개수는 전체 샘플 36개 중 21개로 약 58%였고, 중간 주름이 줄어든 개수는 19개로 약 53%였으며 잔주름은 17개로 약 47%정도로 나타났다. 따라서 항 주름성 화장품을 사용하기 전과 사용 후의 샘플은 주름이 줄어드는 경향을 보이며 비교적 큰 주름이 잔주름에 비해 많이 줄어드는 결과를 보인다.



(a) 큰 주름 (0.5 line/mm)



(b) 중간 주름 (3.37 line/mm)



(c) 잔주름 (8.417 line/mm)

그림 4.20 각 주름별 파워 스펙트럼 변화

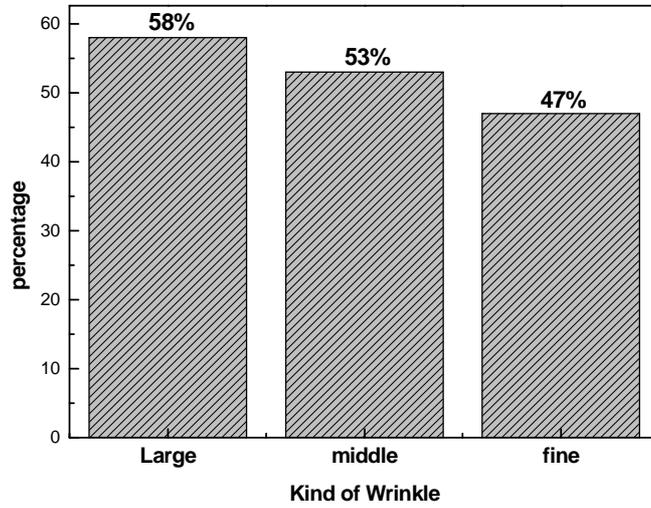


그림 4.21 항 주름성 화장품 사용 전과 사용 후 각 주름별 변화한 샘플 분석

제 5장 결론

피부 표면 굴곡 측정을 위해 비교적 빠른 시간 동안 충분한 스캐닝 깊이를 가지며 높은 해상도로 3차원 이미지를 구현할 수 있는 저 결맞음 간섭계를 설계 및 제작하였다.

피부 표면 굴곡을 측정하기에 적절한 종축 해상도를 갖는 광원을 선택하고 고속으로 스캐닝하기 위해 회절격자를 이용한 광지연선을 사용하였으며 실제 샘플에 적용하기에 앞서 종축 및 횡축 해상도를 검증하고 측정 범위를 보정하였다. 시스템의 종축 해상도는 약 $18\mu\text{m}$ 로 나타났고 횡축 해상도는 airforce target USAF1951을 통해 검증한 결과 $22\mu\text{m}$ 정도였으며 깊이에 따른 선형성은 0.997로 높낮이에 매우 민감하게 반응함을 확인하였다. 피부 표면 굴곡 측정에 적용하기 위해 가장 해상도가 뛰어난 Laser profilometry와 비교하였으며 측정 시간 및 측정 범위 등의 조건이 충분히 충족되어 비교적 정확한 3차원 영상을 구현할 수 있었다.

샘플은 동적 잡음의 영향을 받지 않으며 실리콘으로 제작되어 동일한 광학계수를 가지고 있기 때문에 측정 오차를 최소화할 수 있는 피부 모사판을 사용하였다. 18명의 좌우 눈가 주름에서 36개의 샘플을 얻어 항 주름성 화장품을 사용하기 전과 사용 후의 이미지($4.2\text{mm}\times 4.2\text{mm}$)를 구현하고 주름의 변화를 분석하였다. 이미지 평가를 위해 표준 편차와 2차원 푸리에 변환을 수행하였다. 전문가 평가와 구현된 저 결맞음 간섭계의 이미지를 분석 해 본 결과 사람의 눈으로 관찰 가능한 큰 주름과 중간 주름에서 잔주름에 비해 더 큰 상관관계를 보였다. 전체 파워 스펙트럼 분석 결과 사용전보다 사용 후에 주름이 감소하는 경향을 확인하였고 주름별 스펙트럼 분석 결과 큰 주름과 중간 주름이 잔주름에 비해 많이 줄어들었으며 큰 주름이 줄어든 샘플은 전체 샘플의 약 58%로 나타났다.

향후 많은 샘플을 측정하여 상관관계를 추출하고 실제 피부에 적용해 현재 시스템에서는 고려하지 않는 깊이 방향으로의 정보를 사용한다면 피부 겉모양의 변화에 따른 표피 및 내피 세포의 변화까지도 관찰 및 정량화가 가능하리라 사료된다.

참고문헌

- [1] P. Corcuff, J. L. Leveque, "Skin surface replica image analysis of furrows and wrinkles" In Serup J, Jemec GBE, eds., Handbook of non-invasive methods and the skin. Boca Raton, pp.89-96, CRC press, 1995.
- [2] R. Murphy, D.W.K. Cotton, A.L, S.S. Bleehen. Computer-assisted image analysis of skin surface replicas., Br J Dermatol., vol.124, pp. 571-575, 1991.
- [3] J. Gassmueller, A. Kecskes, and P. Jahn, "Stylus method for skin surface contour measurement" In Serup J, Jemec GBE, eds., Handbook of non-invasive methods and the skin. Boca Raton, pp.83-88, CRC press, 1995.
- [4] J. Efsen, HN. Hansen, S. Christiansen, J. Keiding, "Laser profilometry" In Serup J, Jemec GBE, eds., Handbook of non-invasive methods and the skin. Boca Raton, CRC press, pp.97-106, 1995.
- [5] David Hwang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Shuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, J. G. Fujimoto, " Optical coherence tomography", Science 254, pp. 1178-1181, 1991
- [6] Andrew M. Rollins. Manish D. Kulkarni, Siavash Yazdanfar, Rujchai Ung-arunyawee, Joseph A. Izatt, " In vivo video rate optical coherence tomography", Optics express, vol.9, pp. 219-229,1998
- [7] Eugene Hecht, "Optics, Fourth edition", Addison wesley, 2002
- [8] Brett E. Bouma, G. J. Tearney, "Handbook of Optical coherence tomography", Marcel Dekker, Inc., 2002
- [9] E. A. Swanson, D. Huang, M. R. Hee, J. G. fujimoto, C. P. Lin, C. A. Puliafito, "High-speed optical coherence domain reflectometry", Optics express, vol.17, pp. 151-153, 1992
- [10] A. F. Fercher, W. Drexler, C. K. Hitzenberger, T. Laser, "Optical coherence tomography - principle and application", Rep. Prog. Phys, vol.66, pp239-303

- [11] L. Giniunas, R. Danielius, R. Karkockas, "Scanning delay line with a rotating-parallelgram prism for low-coherence interferometry", Applied optics, vol.38, pp7076-7079, 1999
- [12] N. G. Chen, Q. Zhu, "Rotary mirror array for high-speed optical coherence tomography", Optics letter, vol.607-609, 2002
- [13] J. Ballif, R. Gianotti, Chavanne, R. walti, R. P. Salathe, " Rapid and scalable scans at 21m/s in optical low-coherence reflectometry", Optics letter, vol.22, pp757-759, 1997
- [14] G. J. Tearney, B. E. Boma, J. G. Fujimoto, "high-speed phase- and group-delay scanning with a grating-based phase control delay line", Optics express, vol 22, pp1811-1813, 1997
- [15] A. V. Zvyagin, D. D. Sampson, " Achromatic optical phase shifter-modulator", Optics letter, vol.26, pp187-189, 2001
- [16] J. Bush, P. Davis, M. A. Marcus, "All-fiber coherence domain interferometric techniques", SPIE Photonics east, 2000
- [17] W. K. Niblack, J. O. Schenk, B. Liy, M. E. Brezinski, " Dispersion in a grating-based optical delay line for optical coherence tomography", Applied optics, vol.42, pp 4115-4118,2003
- [18] A. M. Rollins, J. A. Izatt, " optimal interferometer designs for optical coherence tomography", Optics letter, vol.24, pp1484-1486, 1999

ABSTRACT

The fast scanning low coherence interferometry development for skin micro-contour

The skin micro-contour Estimation is important in various studies, for example, photoaging, atopic dermatitis, and even malignant melanomas. The estimation methods for skin micro-contour image have problems at resolution, scanning time, and possibility of 3-D image reconstruction.

In this study, the low coherence interferometry is designed and made using Rapid scanning optical delay line with grating and acquired $18\mu\text{m}$ for axial and $22\mu\text{m}$ for lateral resolution.

The low coherence interferometry is better than other scanning methods aspect of scanning time and dynamic range.

The skin replica is scanned to compare change after using anti-wrinkle cosmeceutics. The standard deviation and the 2-D FFT are used for analyzing images.

Keyword : Low coherence interferometry, Optical delay line using grating, skin replica, anti-wrinkle cosmeceutics