



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

2024년 2월
석사학위 논문

분광타원계 적용을 위한 광대역 보정기 개발에 관한 연구

조선대학교 대학원

광기술공학과

권해혁

분광타원계 적용을 위한 광대역 보정기 개발에 관한 연구

A Study on the Development of a Broadband
Compensator for Spectroscopic Ellipsometry
Applications

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

광기술공학과

권해혁

분광타원계 적용을 위한 광대역 보정기 개발에 관한 연구

지도교수 박 종 락

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

권 해 혁

권해혁의 석사학위논문을 인준함

위원장 주 기 남 (인)

위 원 박 종 락 (인)

위 원 안 태 정 (인)

2023년 12월

조선대학교 대학원

목 차

제1장 서 론

제1절 연구 배경	1
제2절 연구 목표 및 내용	2

제2장 분광타원계

제1절 타원계의 정의 및 측정원리	4
제2절 분광타원계 관련 이론	6
1. 존스 벡터와 존스 행렬	6
2. 스톡스 파라미터와 물리 행렬	7
3. 푸앵카레 구(Poincaré Sphere)	8
4. 위상 지연자	11

제3장 시뮬레이션 결과 및 분석

제1절 단일 위상지연자에 의한 스톡스 파라미터 변화	12
1. 4분과장판	12
2. 반과장판	18
제2절 이중 위상지연자(반과장판과 4분과장판의 조합) ..	23

제4장 실험결과 및 논의

제1절 예비 실험 : 자체 제작 편광계 사용	32
1. 위상지연자의 특성 파라미터	32
2. 실험 장치 구성	36
3. 데이터 측정 및 보정	38
4. 측정결과 분석 및 논의	41
제2절 본 실험 : 상용 편광계 사용	44
1. 실험 장치 구성	44
2. 데이터 측정 및 보정	46
3. 측정결과 분석 및 논의	49

제5장 결론 52

[참고문헌] 53

표 목차

표 1. 광학 요소 및 축 회전에 대한 존스 행렬과 물러 행렬	9
표 2. 실험에 사용된 위상지연판 매질의 굴절률 계수	33
표 3. 파장별 스톡스 파라미터의 평균 제곱근 오차	50

그림 목차

그림 1. 푸앵카레 구와 편광상태의 예	10
그림 2. 4분파장판에 의한 스톡스 파라미터 변화 시뮬레이션 구성도	14
그림 3. 위상지연 오차가 없는 4분파장판의 회전에 따른 스톡스 파라미터 궤적. (a) 회전 각도: $0^\circ \sim 45^\circ$, (b) 회전 각도: $0^\circ \sim 90^\circ$, (c) 회전 각도: $0^\circ \sim 135^\circ$, (d) 회전 각도: $0^\circ \sim 180^\circ$	15
그림 4. 4분파장판의 위상지연 오차에 따른 스톡스 파라미터 변화. (a) S_1 , (b) S_2 , (c) S_3	16
그림 5. 4분파장판의 위상지연 오차에 따른 스톡스 파라미터의 궤적	17
그림 6. 반파장판에 의한 스톡스 파라미터 변화 시뮬레이션 구성도	19
그림 7. 위상지연 오차가 없는 반파장판의 회전에 따른 스톡스 파라미터 궤적. (a) 회전 각도: $0^\circ \sim 45^\circ$, (b) 회전 각도: $0^\circ \sim 90^\circ$	20
그림 8. 반파장판의 위상지연 오차에 따른 스톡스 파라미터 변화. (a) S_1 , (b) S_2 , (c) S_3	21
그림 9. 반파장판의 위상지연 오차에 따른 스톡스 파라미터 궤적	22
그림 10. 반파장판과 4분파장판 조합에 의한 스톡스 파라미터 변화 시뮬레이션 구성도	25
그림 11. 위상지연 오차가 없는 4분파장판과 반파장판의 회전에 따른 스톡스 파라미터 궤적. 반파장판의 (a) 회전 각도: 160° , (b) 회전 각도: 170° , (c) 회전 각도: 0° , (d) 회전 각도: 10°	26
그림 12. 위상지연 오차가 일 때의 4분파장판과 반파장판의 회전에 따른 스톡스 파라미터 궤적. 반파장판의 (a) 회전 각도: 160° , (b) 회전 각도: 170° , (c) 회전 각도: 0° , (d) 회전 각도: 10°	27
그림 13. 위상지연 오차별 이중 위상지연자의 회전을 통해 얻게되는 스톡스 파라미터들의 총 궤적. (a) $\Delta = \pi/8$, (b) $\Delta = \pi/7$, (c) $\Delta = \pi/6$, (d) $\Delta = \pi/5$, (e) $\Delta = \pi/4$, (f) $\Delta = \pi/3$, (g) $\Delta = \pi/2.5$, (h) $\Delta = \pi/2$, (i) $\Delta = \pi/8$, (j) $\Delta = \pi/7$, (k) $\Delta = \pi/6$, (l) $\Delta = \pi/5$, (m) $\Delta = \pi/4$, (n) $\Delta = \pi/3$, (o) $\Delta = \pi/2.5$, (p) $\Delta = \pi/2$	28

- 그림 14. 위상지연 오차가 일 때 오차가 없는 4분파장판을 구현할 수 있는 오차를 갖는 반파장판과 4분파장판의 회전 각도. (a) 반파장판과 4분파장판의 초기 회전 각도가 $(0^\circ, 0^\circ)$, (b) $(0^\circ, 90^\circ)$ 인 경우 ----- 30
- 그림 15. 위상지연 오차별 최적화 조건에서의 스톡스 파라미터 궤적. (a) $\Delta = -\pi/2.5$, (b) $\Delta = -\pi/3$, (c) $\Delta = -\pi/6$, (d) $\Delta = \pi/6$, (e) $\Delta = \pi/3$, (f) $\Delta = \pi/2.5$ ----- 31
- 그림 16. 복굴절 매질 SiO_2 의 파장에 따른 (a) 굴절률, (b) 굴절률 차 ----- 34
- 그림 17. 복굴절 매질 SiO_2 에 대해 기준파장이 588 nm일 때 위상지연 오차가 $\Delta \leq |\pi/3|$ 인 영역 ----- 35
- 그림 18. (a) 자체제작 편광계를 사용한 예비실험 구성도, (b) 실험 구성 사진 ---- 37
- 그림 19. 보정 전 임의의 회전 각도에서의 광 세기 비교. (a) 4분파장판의 각도: 0° , (b) 반파장판의 각도: 0° , (c) 4분파장판의 각도: 30° , (d) 반파장판의 각도: 30° , (e) 4분파장판의 각도: 60° , (f) 반파장판의 각도: 60° ----- 39
- 그림 20. 보정 후 임의의 회전 각도에서의 광 세기 비교. (a) 4분파장판의 각도: 0° , (b) 반파장판의 각도: 0° , (c) 4분파장판의 각도: 30° , (d) 반파장판의 각도: 30° , (e) 4분파장판의 각도: 60° , (f) 반파장판의 각도: 60° ----- 40
- 그림 21. 측정된 스톡스 파라미터와 이론적 스톡스 파라미터. (a) 이론적 S_1 , (b) 측정된 S_1 , (c) 이론적 S_2 , (d) 측정된 S_2 , (e) 이론적 S_3 , (f) 측정된 S_3 ----- 42
- 그림 22. 위상지연 오차가 없는 4분 파장판에 의한 스톡스 파라미터와 최적화된 각도 조합에서 측정된 스톡스 파라미터 비교. 시작 각도가 (a) $(0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 구한 최적화 각도, (b) $(0^\circ, 90^\circ)$ 일 때 구한 최적화 각도, (c) $(0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 S_1 , (d) $(0^\circ, 90^\circ)$ 일 때 S_1 , (e) $(0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 S_2 , (f) $(0^\circ, 90^\circ)$ 일 때 S_2 , (g) $(0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 S_3 , (h) $(0^\circ, 90^\circ)$ 일 때 S_3 ----- 43
- 그림 23. (a) 상용 편광계를 사용한 본 실험 구성도, (b) 실험 구성 사진 ----- 45
- 그림 24. 보정 전 임의의 회전 각도에서의 스톡스 파라미터 비교. (a) 4분파장판: 60° 일 때의 S_1 , (b) 반파장판: 60° 일 때의 S_1 , (c) 4분파장판: 60° 일 때의 S_2 , (d) 반파장판: 60° 일 때의 S_2 , (e) 4분파장판: 60° 일 때의 S_3 , (f) 반파장판: 60° 일 때의 S_3 ----- 47

그림 25. 보정 후 임의의 회전 각도에서의 스토크스 파라미터 비교. (a) 4분과장판: 60°일 때의 S_1 , (b) 반과장판: 60°일 때의 S_1 , (c) 4분과장판: 60°일 때의 S_2 , (d) 반과장판: 60°일 때의 S_2 , (e) 4분과장판: 60°일 때의 S_3 (f) 반과장판: 60°일 때의 S_3 ----- 48

그림 26. 위상지연 오차가 없는 4분과장판에 의한 스토크스 파라미터와 800 nm 파장에 대해 최적화된 각도 조합에서 측정된 스토크스 파라미터 비교. 시작 각도가 (a) (0°, 0°)일 때 구한 최적화 각도, (b) (0°, 90°)일 때 구한 최적화 각도, (c) (0°, 0°)일 때 S_1 , (d) (0°, 90°)일 때 S_1 , (e) (0°, 0°)일 때 S_2 , (f) (0°, 90°)일 때 S_2 , (g) (0°, 0°)일 때 S_3 , (h) (0°, 90°)일 때 S_3 ----- 51

ABSTRACT

A study on the Development of a Broadband Compensator for Spectroscopic Ellipsometry Applications

By Haehyuck Kwon

Advisor : Prof. Jong-Rak Park, Ph.D.

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

In this paper, a study on the development of a broadband compensator for spectroscopic ellipsometry applications was conducted. We proposed a structure for a broadband compensator using a combination of a half-wave plate and a quarter-wave plate. Simulations were performed to explore various combinations of rotation angles for the half-wave plate and the quarter-wave plate, enabling the realization of the broadband compensator. The simulation results revealed that effective combinations of rotation angles can always be found for the range of the phase retardation error $|\Delta| \leq \pi/3$.

The validity of the proposed structure was confirmed through a preliminary study using a homemade polarimeter. For this preliminary study, we employed a light source with a wavelength of 633 nm and utilized a half-wave plate and a quarter-wave plate made of SiO₂ with a reference wavelength of 588 nm.

Using a commercially available polarimeter, we experimentally demonstrated that the proposed structure could serve as a broadband compensator. To achieve this, experiments were conducted in the wavelength range of 500 nm to 800

nm. The combination of a half-wave plate and a quarter-wave plate made of SiO_2 with a reference wavelength of 588 nm experimentally yielded Stokes vector components that closely agreed with the ideal Stokes vector components, showing a root mean square error of approximately 0.01 to 0.05.

We anticipate that the structure, incorporating a combination of a half-wave plate and a quarter-wave plate as proposed in this study, can be effectively employed for the practical implementation of a broadband compensator in spectroscopic ellipsometry applications.

제1장 서론

제1절 연구 배경

최근 반도체 산업에서 활용되고 있는 기술들 가운데 박막 측정 기술에 대한 수요가 활발하게 증가하고 있다. 반도체 박막의 결정 구조를 결정하는데 사용되는 X-선 회절기술을 통해 결정 구조, 격자 상수, 성장 방향 등을 분석하고 반도체 소자의 품질을 평가할 수 있다^[1-3]. 또한, 반도체 박막의 화학 구성을 분석하고 표면 상태를 조사하는데 사용되는 전자 분광학 기술^[4,5]과 반도체 박막의 미세구조 및 특성을 조사하는데 사용되는 전자 현미경 기술^[6,7] 및 박막의 표면을 미세하게 조사하여 표면의 모양과 구조를 확인하는 원자 힘 현미경^[8,9] 등이 반도체 박막 검사 기술들에 해당한다. 타원계(Ellipsometry)는 박막의 두께, 광학 상수, 흡수 계수 등을 비파괴적으로 측정하는 데 사용되며, 반도체 공정에서 박막 두께 제어와 결함 탐지에 널리 사용된다. 특히 타원계 기술의 경우 OCD (Optical Critical Dimension) 계측 및 검사에도 활용되고 있는데, 가장 정밀도가 좋은 분광타원계(Spectroscopic Ellipsometry)기술에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다^[10-12]. 분광타원계의 경우, 회전하는 위상지연자(Phase Retarder)를 채택함으로써 시편으로 입사하는 빛의 편광상태와 반사된 빛의 편광상태를 조절하며, 여러 파장에 대해 획득한 정보를 바탕으로 박막의 두께, 광학 상수 및 흡수 계수와 같은 중요한 물리적 특성을 정밀하게 결정할 수 있다.

일반적인 위상지연자는 주로 이방성(Birefringence) 매질을 사용하여 광선의 편광상태를 변화시켜 주는 장치이나, 입사되는 빛의 파장에 따라 동일한 위상지연을 제공하지 못하는 단점이 있다. 본 논문에서는 분광타원계에 적용하여 넓은 영역의 파장 대역에 대해 동일한 위상지연을 제공할 수 있는 광대역 보정기 개발에 대해 논하고자 한다.

제2절 연구 목표 및 내용

본 논문에서는 특정 파장에 대해 1/4 파장과 1/2 파장의 위상지연을 각각 갖고 있는 일반적인 4분파장판(Quarter-Wave Plate, QWP)과 반파장판(Half-Wave Plate, HWP)의 조합을 사용하여 넓은 영역의 파장대역에 대해 4분파장판으로 동작하는 광대역 보정기에 대한 연구를 수행하였다. 본 논문의 연구 목표는 다음과 같다.

- 광대역 4분파장판으로 동작하기 위한 일반적인 4분파장판과 반파장판의 각도 조합 결정
- 일반적인 4분파장판과 반파장판 조합을 사용하여 광대역 4분파장판을 구현할 수 있는 파장 영역 탐색

연구 목표 달성을 위해 수행한 본 연구의 세부 연구 내용은 다음과 같다.

- 분광타원계의 기본 원리 및 관련 이론 정리
- 위상지연 오차가 없는 4분파장판 및 반파장판의 회전에 대한 스토크스 파라미터 변화 시뮬레이션
- 위상지연 오차를 갖는 4분파장판 및 반파장판의 회전에 대한 스토크스 파라미터 변화 시뮬레이션
- 광대역 4분파장판으로 동작하기 위한 위상지연 오차를 갖는 4분파장판과 반파장판의 각도 조합 도출 및 결정 시뮬레이션
- 위상지연 오차를 갖는 4분파장판과 반파장판의 조합을 사용하여 광대역 4분파장판을 구현할 수 있는 파장 영역 탐색 및 확인 시뮬레이션
- 자체 제작 편광계(Polarimeter)를 사용한 4분파장판과 반파장판 조합의 스토크스 파라미터 측정 및 분석
- 상용 편광계를 사용한 위상지연 오차를 갖는 4분파장판과 반파장판 조합의 스토크스 파라미터 측정 및 분석

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 타원계의 기본 원리 및 분광타원계

관련 이론에 대해 소개하였으며, 제3장에서는 회전하는 위상지연자(위상지연 오차가 있는 경우와 없는 경우 포함)에 의한 스토크스 파라미터 변화 시뮬레이션 결과와 광대역 4분과장관으로 동작하기 위한 각도 조합 및 과장 영역 탐색 시뮬레이션 결과를 정리하였다. 제4장에서는 자체 제작한 편광계와 상용 편광계를 사용하여 측정한 스토크스 파라미터를 제시하였으며, 제3장의 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다. 마지막으로 제5장에서는 본 논문의 연구 내용 및 결과를 요약하였다.

제2장 분광타원계

제1절 타원계의 정의 및 측정원리

‘Ellipsometry’는 타원을 의미하는 ‘Ellips’와 측정을 의미하는 ‘Metry’가 결합하여 만들어진 용어이며, 특정 편광상태를 지니고 시편에 입사하는 빛이 반사된 후에는 일반적인 편광상태를 의미하는 타원편광으로 변하고 그 편광상태의 변화를 분석하여 시편이 지닌 정보를 찾아내는 기술이기 때문에 가지게 된 명칭이다^[13].

임의의 선형 매질 내에서 진행되는 전자기파의 전기장 성분은 맥스웰 방정식에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$E = E_0 \exp[i(\omega t - kz + \delta)] \quad (1)$$

여기서 E_0 는 전기장의 진폭을 의미하며, ω, k, δ 는 각각 각주파수, 전파상수, 초기위상을 의미한다. 전자기파의 편광상태는 진행방향에 수직인 전기장 성분으로 나타낼 수 있으며, 전자기파가 z 축을 따라 진행하는 경우 이에 수직인 x - y 성분을 가질 수 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다^[14].

$$\mathbf{E} = E_{x0} \exp[i(\omega t - kz + \delta_x)] \hat{\mathbf{x}} + E_{y0} \exp[i(\omega t - kz + \delta_y)] \hat{\mathbf{y}} \quad (2)$$

여기서 $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}$ 는 각 축에 해당하는 단위 벡터를 의미한다. 편광상태를 정의할 때 초기위상(δ) 대신 상대적인 위상차 $|\delta_x - \delta_y|$ 를 사용하며, x 성분과 y 성분의 위상차를 이용하여 빛의 편광상태를 설명할 수 있다. x 성분과 y 성분에 대한 전기장의 상대적인 위상차가 0 또는 π 인 경우 선형편광을 나타내며, $\pi/2$ 인 경우 원형 편광(x 성분과 y 성분 진폭이 동일한 경우), 나머지의 경우에는 타원편광을 나타낸다.

편광기를 통과함으로써 편광상태가 정의된 빛을 시편에 특정 각도로 입사시키면 시편에 입사되는 빛은 시편을 통해 반사된다. 시편으로부터 반사된 빛은 시편의 특성에 따라 편광상태가 변하게 된다. 변화된 편광상태는 검광기(Analyzer)를 사용하여 측정할 수 있으며, 측정된 정보를 분석함으로써 시편의 광학 상수와 두께 등에 대한 정보를 획득할 수 있다.

x - y 성분으로 표현된 전기장을 시편에 입사시키는 경우 x - y 성분의 편광상태는 각각 수평 편광(p -Polarization) 및 수직 편광(s -Polarization) 성분으로 나타낼 수 있으며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_p = E_{p0} \exp[i(\omega t - kz + \delta_p)] , E_s = E_{s0} \exp[i(\omega t - kz + \delta_s)] \quad (3)$$

시편으로부터 반사될 때 빛의 p 성분과 s 성분에 대한 반사계수는 입사하는 전기장에 대한 반사되는 전기장의 비로 표현할 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} \exp(i[\delta_{rp} - \delta_{ip}]) , r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} \exp(i[\delta_{rs} - \delta_{is}]) \quad (4)$$

여기서 $\delta_{ip(s)}, \delta_{rp(s)}$ 는 각각 입사파에 대한 위상, 반사파에 대한 위상을 나타내며, 식 (3)의 공통 항인 $\exp[i(\omega t - kz)]$ 는 상쇄되는 것을 확인할 수 있다. 타원계는 p 편광과 s 편광 사이의 복소 반사 계수비(ρ)를 측정함으로써 물질의 정보를 획득하며, 이를 표현하면 다음과 같다.

$$\rho \equiv \tan \psi \exp(i\Delta) \equiv \frac{r_p}{r_s} \quad (5)$$

식 (5)의 $\tan \psi$ 는 반사계수 p 와 s 편광에 대한 진폭 비의 크기를 의미하며, Δ 는 p 와 s 편광 사이의 위상 차이를 의미한다. 시편의 굴절률 및 두께 등에 대한 분석은 측정된 (ψ, Δ) 와 모델링을 통해 획득한 (ψ', Δ') 을 비교하여 이루어진다.

제2절 분광타원계 관련 이론

1. 존스 벡터와 존스 행렬

존스 행렬(Jones Matrix)은 편광 변화를 수학적으로 표현할 수 있는 행렬 중 하나로 존스 행렬을 적용하면 시편의 정보를 나타내는 파라미터(ψ, Δ)에 따른 편광 변화를 대수적으로 표현할 수 있다. 전기장의 x 성분과 y 성분을 벡터로 표현한 것을 존스 벡터(Jones Vector)라고 하며, 식 (2)의 표현을 존스 벡터로 나타내면 다음과 같다^[15].

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_{x0} \exp i(\omega t - kz + \delta_x) \\ E_{y0} \exp i(\omega t - kz + \delta_y) \end{bmatrix} = \exp i(\omega t - kz) \begin{bmatrix} E_{x0} \exp(i\delta_x) \\ E_{y0} \exp(i\delta_y) \end{bmatrix} \quad (6)$$

편광상태에 영향을 주지 않는 공통 항 $\exp[i(\omega t - kz)]$ 을 생략하여 식 (6)을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x0} \exp(i\delta_x) \\ E_{y0} \exp(i\delta_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x| \exp(i\delta_x) \\ |E_y| \exp(i\delta_y) \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)을 상대적인 위상차 $|\delta_x - \delta_y|$ 로 나타냈을 때의 전기장 성분을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_x = E_{x0} \exp[i(\delta_x - \delta_y)] = |E_x| \exp[i(\delta_x - \delta_y)] \quad (8.1)$$

$$E_y = E_{y0} = |E_y| \quad (8.2)$$

식 (8)로부터 상대적인 위상차의 값에 따라 존스 벡터의 값이 변화하는 것을 유추할 수 있다.

타원계의 측정에서 편광기 또는 위상지연자는 x 축 또는 y 축에 대해 일정한 회전 각도로 설치된다. 특정 광학 요소의 회전은 수학적 변환을 통해 축의 회전에 의해 표현할 수 있다. 회전된 축에 대한 각 전기장 성분은 회전하기 전 각 전기장 성분을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{x'} = E_x \cos\alpha + E_y \sin\alpha \quad (9.1)$$

$$E_{y'} = -E_x \sin\alpha + E_y \cos\alpha \quad (9.2)$$

여기서 α 는 x' - y' 축으로의 회전 각도를 나타낸다. 식 (9.1)과 식 (9.2)를 행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)으로부터 회전을 표현하는 행렬은 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{R}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}(-\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (11)의 $\mathbf{R}(\alpha)$ 는 축이 반시계방향으로 회전하는 것을 의미한다.

2. 스톡스 파라미터와 물리 행렬

존스 벡터와 존스 행렬이 편광된 빛을 해석하기에 간결하고 좋은 방법을 제공하나, 편광되지 않은 빛이나 부분적으로 편광된 빛은 표현할 수 없다. 편광되지 않거나 부분 편광된 빛의 편광상태는 물리 행렬(Mueller Matrix)로 표현할 수 있으며, 물리 행렬과 스톡스 파라미터를 이용하여 모든 종류의 편광상태를 나타낼 수 있다. 광 세기를 통한 스톡스 벡터의 표현은 다음과 같다^[13].

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x + I_y \\ I_x - I_y \\ I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 I_x, I_y 는 각각 x 축과 y 축에 평행한 선형 편광상태의 광 세기를 의미하며, $I_{+45^\circ}, I_{-45^\circ}$ 는 x 축을 기준으로 반시계 방향으로 45° 만큼 회전된 선형 편광, 시계방향으로 45° 만큼 회전된 선형 편광상태의 광 세기를 의미한다. I_R, I_L 은 우원 편광, 좌

원 편광상태의 광 세기를 나타낸다.

본 논문에서 사용한 물러 행렬과 존스 행렬 표현을 표 1에 정리하였다. 회전 각도가 0° 인 경우 편광기의 투과축과 위상지연자의 빠른축(Fast Axis)이 x 축과 평행한 것으로 가정하였고, 회전 방향은 일반적인 각도 규약에 따라 반시계 방향을 양의 방향으로 선택하였다.

3. 푸앵카레 구(Poincaré Sphere)

스토크스 파라미터를 3차원 축으로 표현한다면 편광상태는 구 상의 한 점에 놓일 것이다. 그림 1의 구는 푸앵카레 구로 알려져 있으며, 완전히 편광된 상태의 빛의 경우 푸앵카레 구의 반지름은 총 광 세기인 S_0 를 의미한다. 그림 1을 통해 $S_1 > 0$ 일 때, 편광은 x 축을 향하며, $S_1 < 0$ 인 경우에는 y 축을 향하는 것을 확인할 수 있다. $S_2 > 0$ 인 경우 편광은 $+45^\circ$ 회전을 의미하며, 반대의 경우 -45° 임을 확인할 수 있다. 북극과 남극점은 각각 우원 편광과 좌원 편광을 나타낸다. 이를 통해 임의의 스토크스 파라미터가 어떤 편광상태를 이루고 있는지 시각적으로 해석할 수 있다.

표 1. 광학 요소 및 축 회전에 대한 존스 행렬과 물러 행렬

Optical element	Mueller matrix	Jones matrix
Polarizer(Analyzer) P (A)	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
Compensator(Retarder) C	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\delta & \sin\delta \\ 0 & 0 & -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta) \end{bmatrix}$
Coordinate rotation R (α)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ 0 & -\sin 2\alpha & \cos 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$

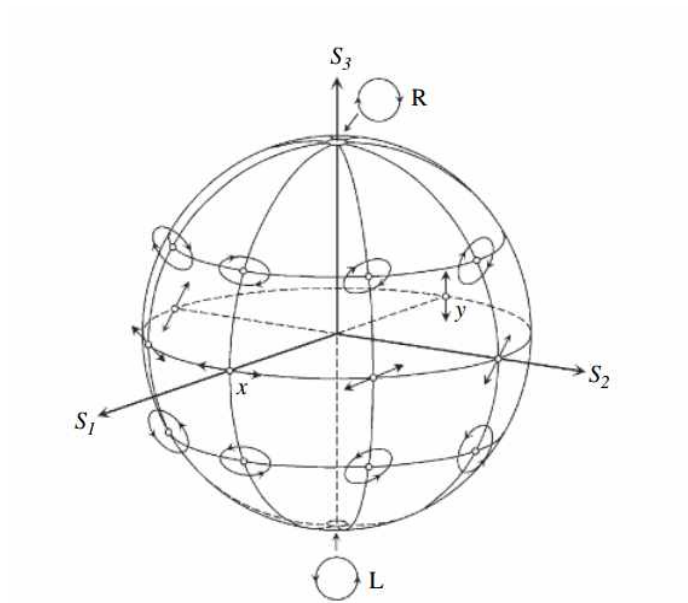


그림 1. 푸앵카레 구와 편광상태의 예^[15]

4. 위상지연자

위상지연자는 주로 시편의 앞단 또는 뒷단에 놓여 편광상태를 변화시키는 장치로 주로 복굴절(Birefringence) 매질을 사용한다. 위상지연자의 회전을 통해 시편의 물리 행렬 정보를 용이하게 획득할 수 있으며, 이를 통해 물질의 특성을 정확하게 측정할 수 있다.

위상지연 정도를 나타내는 위상차(δ)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} |n_e - n_o| d \quad (14)$$

여기서 d 는 위상지연자를 이루는 매질의 두께이며, n_e 와 n_o 는 각각 복굴절 매질에서의 이상광선(Extraordinary Ray)과 정상광선(Ordinary Ray)에 대한 굴절률을 의미한다. 식 (14)로부터 위상차를 $\pi/2$ 가 되도록 한 위상지연자를 4분파장판이라 하며, π 가 되도록 한 위상지연자를 반파장판이라 한다. 식 (14) 좌측 항의 위상차(δ)는 파장과 굴절률에 따라 변하게 되는데 굴절률 또한 파장의 함수이므로 파장에 따라 위상지연이 변하는 특징이 있다.

제3장 시뮬레이션 결과 및 분석

제1절 단일 위상지연자에 의한 스토크스 파라미터 변화

타원계에 보정기(Compensator)로서 사용되는 4분파장판은 기준파장에 대해 $\pi/2$ 만큼의 위상차를 갖도록 설계되어 있다. 일반적인 4분파장판의 위상차는 파장이 바뀌면 설계된 위상차인 $\pi/2$ 에서 벗어나게 되는데 임의의 파장에 대한 위상차(δ_{QWP})와 기준파장에 대한 위상차($\delta_{QWP} = \pi/2$)의 차이를 위상지연 오차($\Delta = \delta_{QWP} - \delta_{QWP}$)로 정의할 수 있다. 이러한 위상지연 오차는 편광상태 변화에 영향을 준다. 이를 확인하기 위해 위상지연 오차를 고려하여 회전하는 위상지연자에 의한 스토크스 파라미터 변화에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 4분파장판

그림 2는 4분파장판에 의한 스토크스 파라미터 변화 시뮬레이션 구성도이다. 먼저 편광기를 통해 입사 광원이 x 축과 평행하게 편광되었다고 가정한 후 물리 행렬을 적용하여 4분파장판의 회전에 따른 스토크스 파라미터 변화에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3에 위상지연 오차가 없는 4분파장판의 회전에 따른 스토크스 파라미터의 궤적을 나타냈다. x 축과 평행한 편광기를 통과한 빛의 편광상태는 푸앵카레 구의 $+S_1$ 축 상에 위치해 있다. 4분파장판의 회전 각도가 45° 가 될 때, 수평 편광상태의 빛은 타원편광을 거쳐 우원 편광상태가 되며, 90° 가 되는 경우 다시 수평 편광상태가 되는 것을 확인할 수 있다. 이어서 다시 타원 편광상태를 거쳐 135° 가 되었을 때 좌원 편광상태가 되며, 180° 가 되는 경우 다시 수평 편광상태에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4에 4분파장판의 위상지연 오차에 따른 스토크스 파라미터 변화를 나타냈다. 위상지연 오차가 $-\pi/2$, $-\pi/3$, $-\pi/6$, 0 , $\pi/6$, $\pi/3$ 인 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 파라미터 S_1 의 경우 오차가 커짐에 따라 감소하는 경향을 보였으며, S_2 의 경우 오차가 커짐에 따라 변화의 진폭이 증가하는 경향을 보였다. 파라미터 S_3 의 경우 오차의 절댓값이 커짐에 따라 변화의 진폭이 감소함을 확인할 수 있다. 위상지연 오차 $\Delta = -\pi/2$ 인 경우 위상지연이 없는 경우에 해당하므로 위상지연자의 회전에 따른 스토크스 파라미터 변화가 없음을 알 수 있다.

그림 5는 4분과장판의 위상지연 오차에 따른 푸앵카레 구 상의 스토크스 파라미터 궤적을 보여주고 있다. 4분과장판의 회전을 통해 얻어진 8자 모양의 궤적이 위상지연 오차에 따라 변하는 것을 확인할 수 있다. 위에서 설명한 바와 같이 위상지연 오차가 $-\pi/2$ 인 경우 위상지연이 없으므로 스토크스 파라미터는 변하지 않고 $S_1 = 1$ 인 지점에 고정되어 있다. 위상지연 오차가 $-\pi/2$ 이상으로 증가함에 따라 8자 모양의 궤적이 나타나기 시작하며, 그 크기가 점점 증가한다. 최종적으로 위상지연 오차가 $\pi/2$ 가 되면, 8자모양의 두 고리가 하나로 결합되어 $S_3 = 0$ 인 대원이 된다. 이 때 위상지연자는 반과장판에 해당되는 위상지연을 갖게 된다.

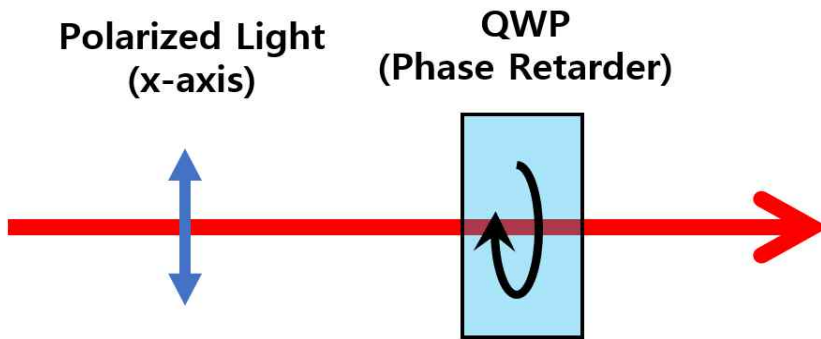


그림 2. 4분파장판에 의한 스토크스 파라미터 변화 시뮬레이션 구성도

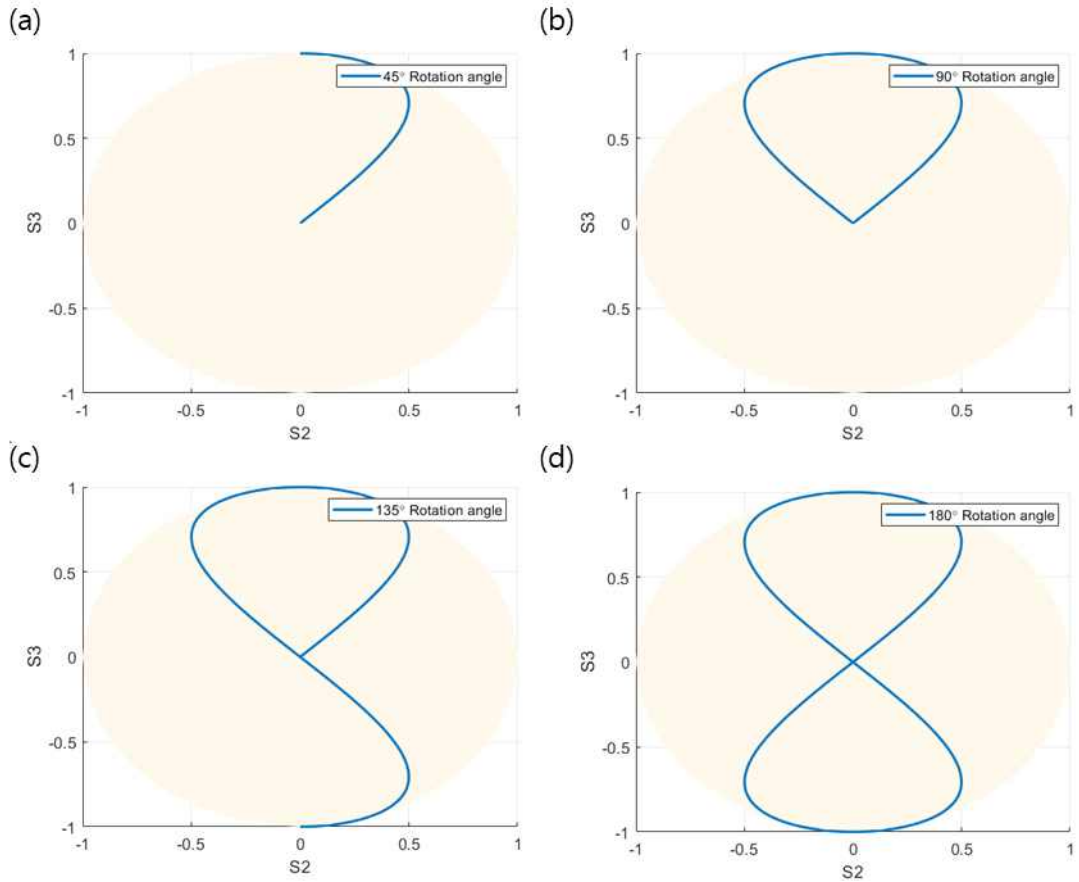


그림 3. 위상지연 오차가 없는 4분파장판의 회전에 따른 스토크스 파라미터 궤적.
 (a) 회전 각도: $0^\circ \sim 45^\circ$, (b) 회전 각도: $0^\circ \sim 90^\circ$, (c) 회전 각도: $0^\circ \sim 135^\circ$, (d) 회전
 각도: $0^\circ \sim 180^\circ$

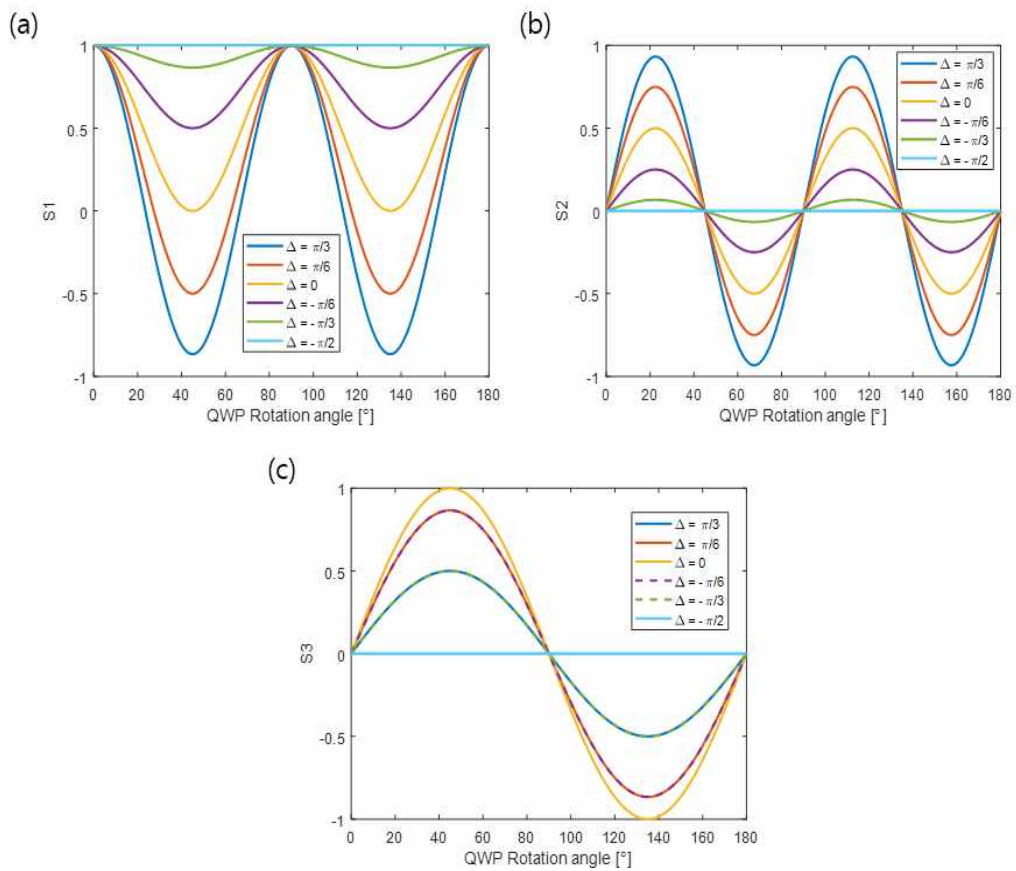


그림 4. 4분과장판의 위상지연 오차에 따른 스토크스 파라미터 변화.
 (a) S_1 , (b) S_2 , (c) S_3

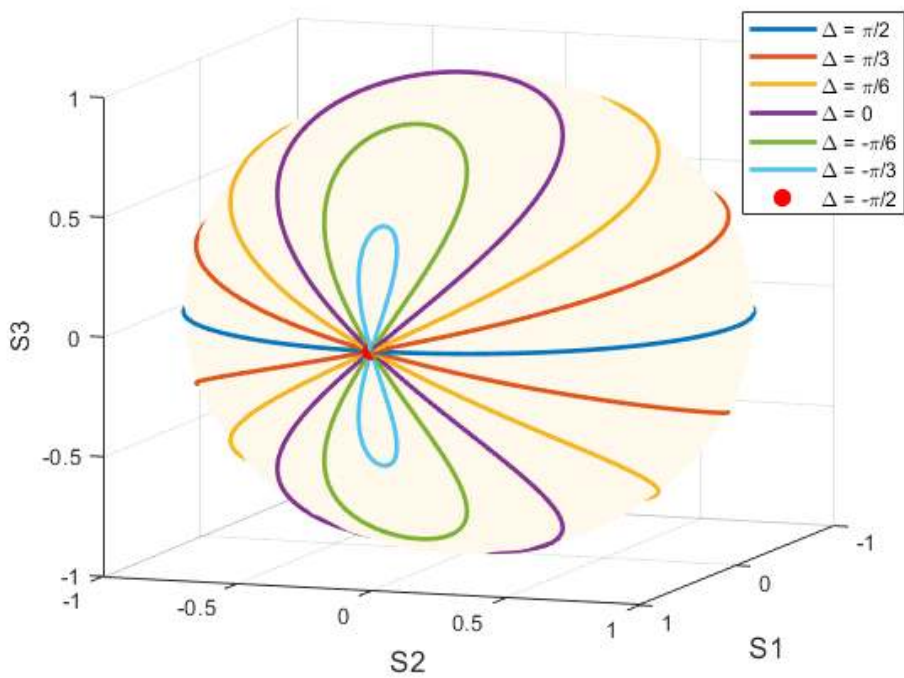


그림 5. 4분파장판의 위상지연 오차에 따른 스토크스 파라미터의 궤적

2. 반파장판

반파장판은 기준파장에 대해 π 만큼의 위상차를 갖도록 설계되어 있다. 일반적인 반파장판 또한 파장 변화에 따라 위상차가 변하는데 의의 파장에 대한 위상차 (δ_{HWP})와 기준파장에 대한 위상차($\delta_{HWP} = \pi$)의 차이를 위상지연 오차 ($\Delta' = \delta_{HWP} - \delta_{HWP}$)로 정의할 수 있다. 반파장판과 4분파장판이 동일한 매질로 구성되어 있는 경우 반파장판의 위상지연 오차(Δ')는 4분파장판의 위상지연 오차 (Δ)의 2배이다.

그림 6은 반파장판에 의한 스토크스 파라미터 변화 시뮬레이션 구성도이다. 4분파장판의 경우와 동일하게 반파장판의 회전에 따른 스토크스 파라미터 변화에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7에 위상지연 오차가 없는 반파장판의 회전에 따른 스토크스 파라미터의 궤적을 나타냈다. 스토크스 파라미터의 궤적은 $S_3 = 0$ 인 대원상에 존재하였으며, 90° 의 회전 각도를 주기로 스토크스 파라미터의 궤적이 반복되었다. 이는 입사된 선형편광의 방향만을 회전시키는 반파장판의 특성을 잘 반영하고 있다.

그림 8에 반파장판의 위상지연 오차에 따른 스토크스 파라미터 변화를 나타내었다. 위상지연 오차가 $-\pi/2, -\pi/3, -\pi/6, 0, \pi/6, \pi/3$ 인 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 파라미터 S_1 의 경우 오차의 절댓값이 커짐에 따라 증가하는 경향을 보였으며 S_2 의 경우 오차의 절댓값이 커짐에 따라 변화의 진폭이 감소하는 경향을 보였다. 파라미터 S_3 의 경우 오차의 절댓값이 커짐에 따라 변화의 진폭이 증가함을 확인할 수 있다.

그림 9는 반파장판의 위상지연 오차에 따른 푸앵카레 구 상의 스토크스 파라미터 궤적을 보여주고 있다. 앞서 확인한 바와 같이 위상지연 오차가 없는 경우 $S_3 = 0$ 인 대원상에 궤적이 존재한다. 위상지연 오차가 발생하기 시작하면 이 대원은 2개의 고리 모양으로 분리되어 8자 형태의 궤적이 나타나기 시작한다. 위상지연 오차의 절댓값이 커짐에 따라 8자 궤적의 크기가 축소된다. 위상지연 오차가 $-\pi/2$ 인 경우 오차가 없는 4분파장판과 동일한 스토크스 파라미터 궤적을 갖게 됨을 확인할 수 있다.

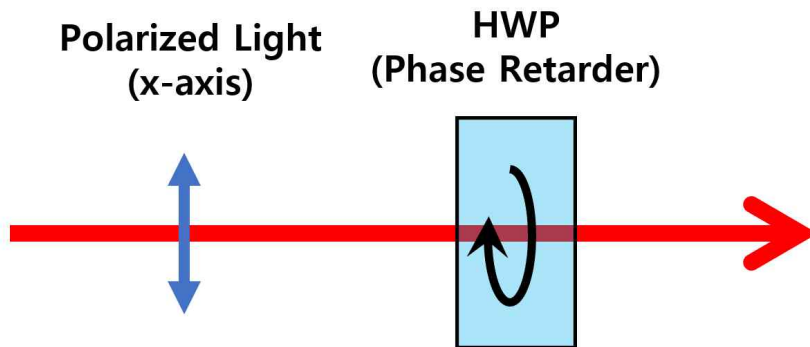
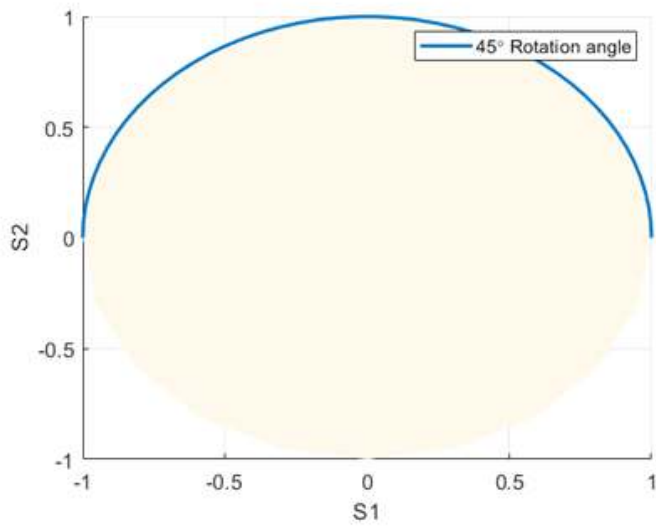
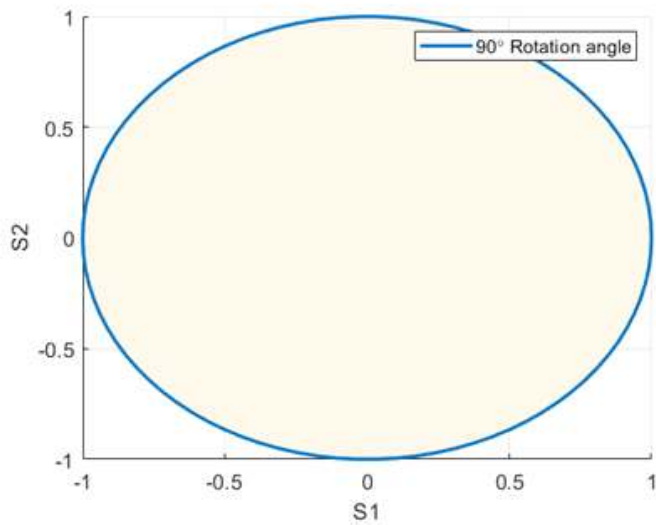


그림 6. 반파장판에 의한 스토크스 파라미터 변화 시뮬레이션 구성도



(a)



(b)

그림 7. 위상지연 오차가 없는 반파장판의 회전에 따른 스토크스 파라미터 궤적.

(a) 회전 각도: $0^\circ \sim 45^\circ$, (b) 회전 각도: $0^\circ \sim 90^\circ$

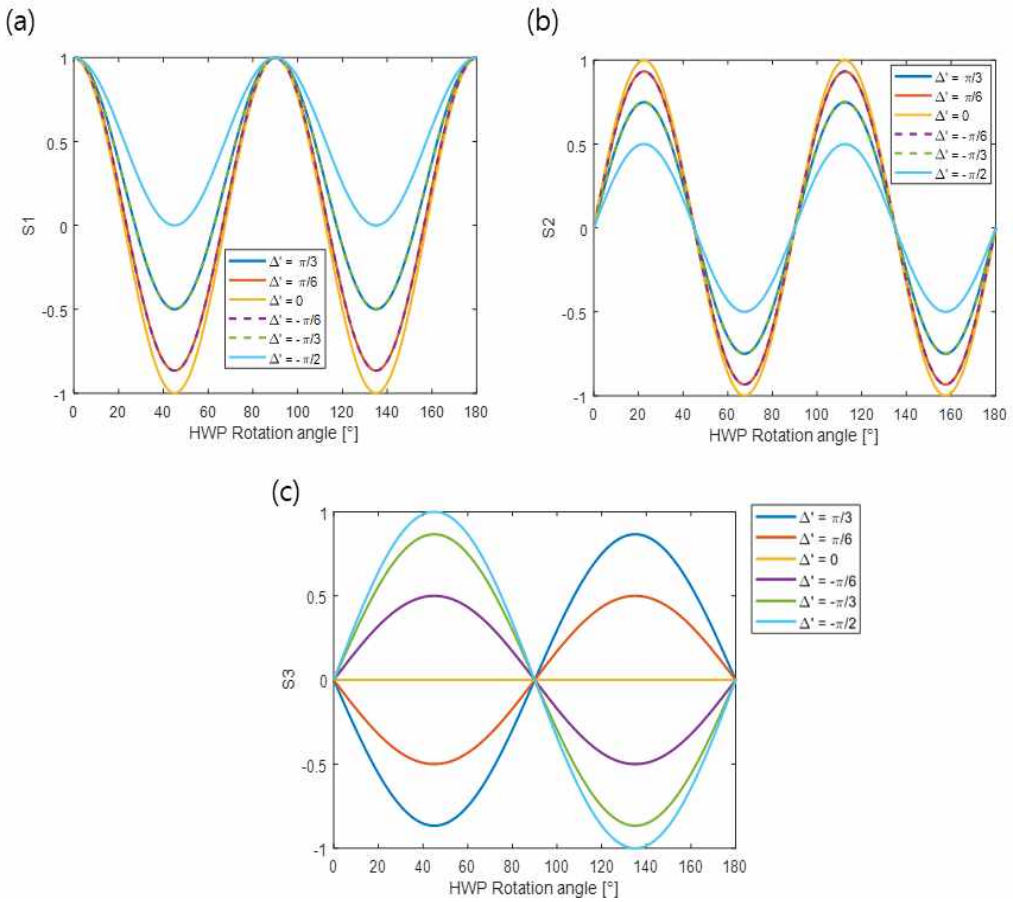


그림 8. 반파장판의 위상지연 오차에 따른 스토크스 파라미터 변화.

(a) S_1 , (b) S_2 , (c) S_3

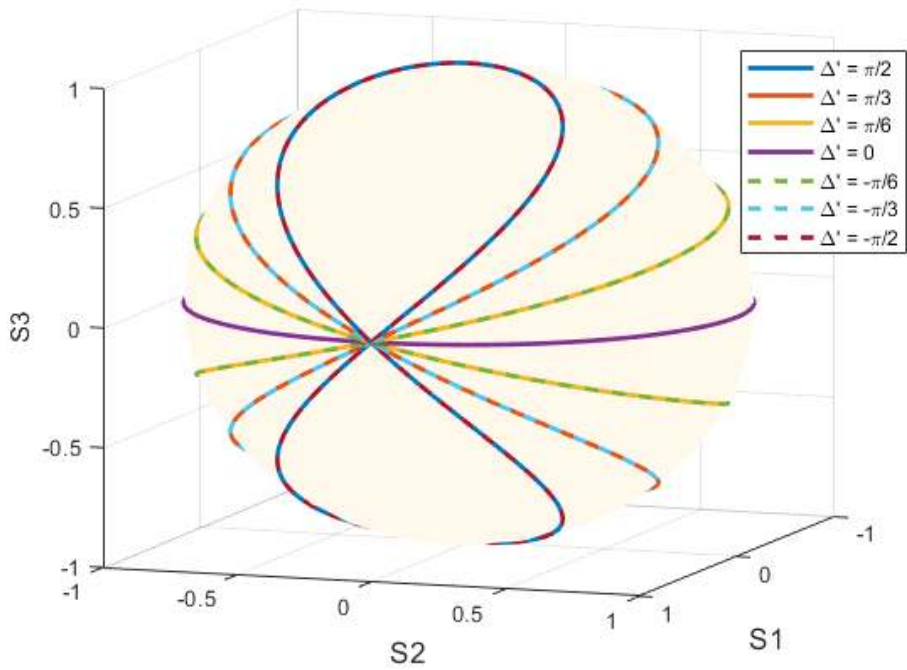


그림 9. 반파장판의 위상지연 오차에 따른 스토크스 파라미터 궤적

제2절 이중 위상지연자(반파장판과 4분파장판의 조합)

본 절에서는 반파장판과 4분파장판의 조합으로 구성된 이중 위상지연자의 회전에 따른 스토크스 파라미터 변화에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 10은 시뮬레이션 구성도이다. 제1절의 경우와 동일하게 입사 광원은 x 축과 평행하게 편광되어 있으며, 서로 독립적으로 회전하는 반파장판과 4분파장판을 순차적으로 통과하였다고 가정하였다. 또한, 반파장판과 4분파장판은 동일한 매질로 구성되어 있다고 가정하였다.

그림 11에 위상지연 오차가 없는 반파장판과 4분파장판의 회전에 따른 스토크스 파라미터 궤적(파란색 실선)을 나타냈다. 검은색 점선은 위상지연 오차가 없는 4분파장판만을 회전시켰을 때 획득하게 되는 스토크스 파라미터 궤적이며, 주황색 점선은 오차가 없는 반파장판만을 회전시켰을 때 획득하게 되는 스토크스 파라미터 궤적이다. 반파장판을 특정 각도로 고정시킨 뒤 4분파장판의 회전에 따른 스토크스 파라미터 궤적을 각 경우에 대하여 획득하였다. 모든 경우에 대해 8자 고리 형태의 궤적을 얻었는데, 반파장판이 회전함에 따라 8자 고리 형태 궤적의 중심점이 $S_3 = 0$ 인 대원을 따라 회전하였다.

그림 12에 위상지연 오차가 $\Delta = \pi/3$ 인 반파장판과 4분파장판의 회전에 따른 스토크스 파라미터 궤적(파란색 실선)을 나타냈다. 검은색 점선은 위상지연 오차 Δ 가 $\pi/3$ 인 4분파장판만을 회전시켰을 때 획득하게 되는 스토크스 파라미터 궤적이며, 주황색 점선은 오차 Δ 가 $\pi/3$ (즉, $\Delta' = 2\Delta = 2\pi/3$)인 반파장판만을 회전시켰을 때 획득하게 되는 스토크스 파라미터 궤적이다. 시뮬레이션을 통해 얻은 모든 스토크스 파라미터 궤적은 검은색 점선과 동일한 형태를 띠고 있었으며, 반파장판이 회전함에 따라 그 궤적의 중심점이 주황색 점선을 따라 이동하였다.

그림 13에 위상지연 오차별($\Delta = \pm\pi/8, \pm\pi/7, \pm\pi/6, \pm\pi/5, \pm\pi/4, \pm\pi/3, \pm\pi/2.5, \pm\pi/2$) 이중 위상지연자의 회전을 통해 얻게 되는 스토크스 파라미터들의 총 궤적(파란색 실선)을 나타냈다. 검은색 점선은 오차가 없는 4분파장판만을 회전시켰을 때 획득하게 되는 스토크스 파라미터 궤적이다. 파란색 실선 궤적들이 중첩된 영역 내에 검은색 점선 궤적이 포함된다면, 오차를 갖는 반파장판과 4분파장판의 조합을 사용하여 오차가 없는 4분파장판을 구현할 수 있다는 것을 의미한다. 시뮬레이션 결과에 대한 분석을 통해 $\Delta \leq |\pi/3|$ 일 때, 오차가 없는 4분파장판을 구현할 수 있음을 확인하였다.

오차가 없는 4분파장판을 구현할 수 있는 오차를 갖는 반파장판과 4분파장판 각각의 회전 각도를 결정하였다. 그림 14는 위상지연 오차가 $\Delta = -\pi/6$ 일 때 오차가 없는 4분파장판을 구현할 수 있는 오차를 갖는 반파장판과 4분파장판의 회전 각도를 나타낸다. 그림 14(a)는 반파장판과 4분파장판의 초기 회전 각도가 $(0^\circ, 0^\circ)$ 인 경우이며, 그림 14(b)는 초기 회전 각도가 $(0^\circ, 90^\circ)$ 인 경우이다. 초기 회전 각도가 $(90^\circ, 0^\circ)$, $(90^\circ, 90^\circ)$ 인 경우도 계산해 보았으나, 이 두 경우에는 연속적인 해가 존재하지 않았다. 그림 14의 결과를 얻기 위해 다음과 같이 주어진 평균 제곱근 오차(Root Mean Squared Error, RMSE)를 이용한 최적화 시뮬레이션을 수행하였다.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{(\hat{S}_1 - S_1)^2 + (\hat{S}_2 - S_2)^2 + (\hat{S}_3 - S_3)^2}{3}} \quad (15)$$

여기서 S_1, S_2, S_3 은 위상지연 오차가 없는 4분파장판에 의한 스토크스 파라미터이며, $\hat{S}_1, \hat{S}_2, \hat{S}_3$ 은 위상지연 오차를 갖는 반파장판과 4분파장판의 조합으로 구성된 이중 위상지연자에 의한 스토크스 파라미터이다. 스토크스 파라미터 S_1, S_2, S_3 은 오차가 없는 4분파장판의 회전 각도 θ 의 함수이며, $\hat{S}_1, \hat{S}_2, \hat{S}_3$ 은 오차를 갖는 반파장판과 4분파장판 각각의 회전 각도 θ_1, θ_2 의 함수이다. 임의의 각도 θ 에 대해 평균 제곱근 오차가 최소가 되는 θ_1, θ_2 를 최적화 방법을 통해 구했다. 이후 회전 각도 θ 의 연속적인 변화에 대해 회전 각도 θ_1, θ_2 의 연속적인 해를 얻고자 하였다.

그림 15는 위상지연 오차별($\Delta = 0, \pm\pi/6, \pm\pi/3, \pm\pi/2.5$) 최적화 조건에서의 스토크스 파라미터 궤적(주황색 점선)이다. 파란색 실선은 위상지연 오차가 없는 4분파장판에 의한 스토크스 파라미터 궤적이다. 위상지연 오차가 $\Delta \leq |\pi/3|$ 인 영역 내에서는 완벽한 해가 존재하나, 이외의 영역에서는 존재하지 않음을 확인할 수 있다.

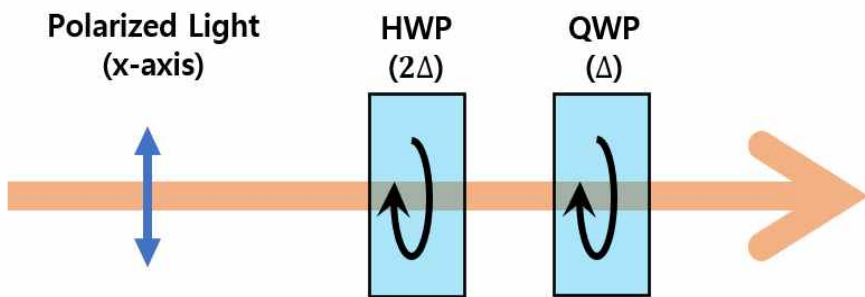


그림 10. 반파장판과 4분파장판 조합에 의한 스토크스 파라미터 변화 시뮬레이션 구성도

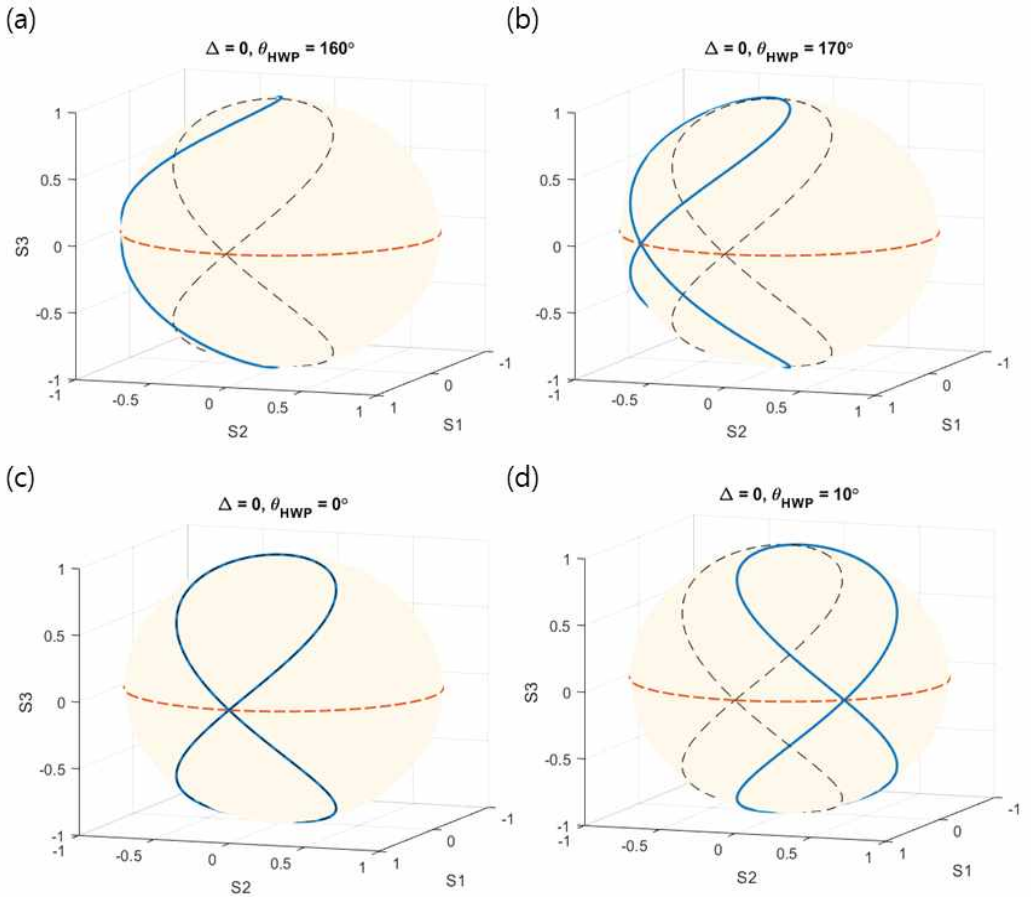


그림 11. 위상지연 오차가 없는 4분파장판과 반파장판의 회전에 따른 스토크스 파라미터 궤적. 반파장판의 (a) 회전 각도: 160° , (b) 회전 각도: 170° , (c) 회전 각도: 0° , (d) 회전 각도: 10°

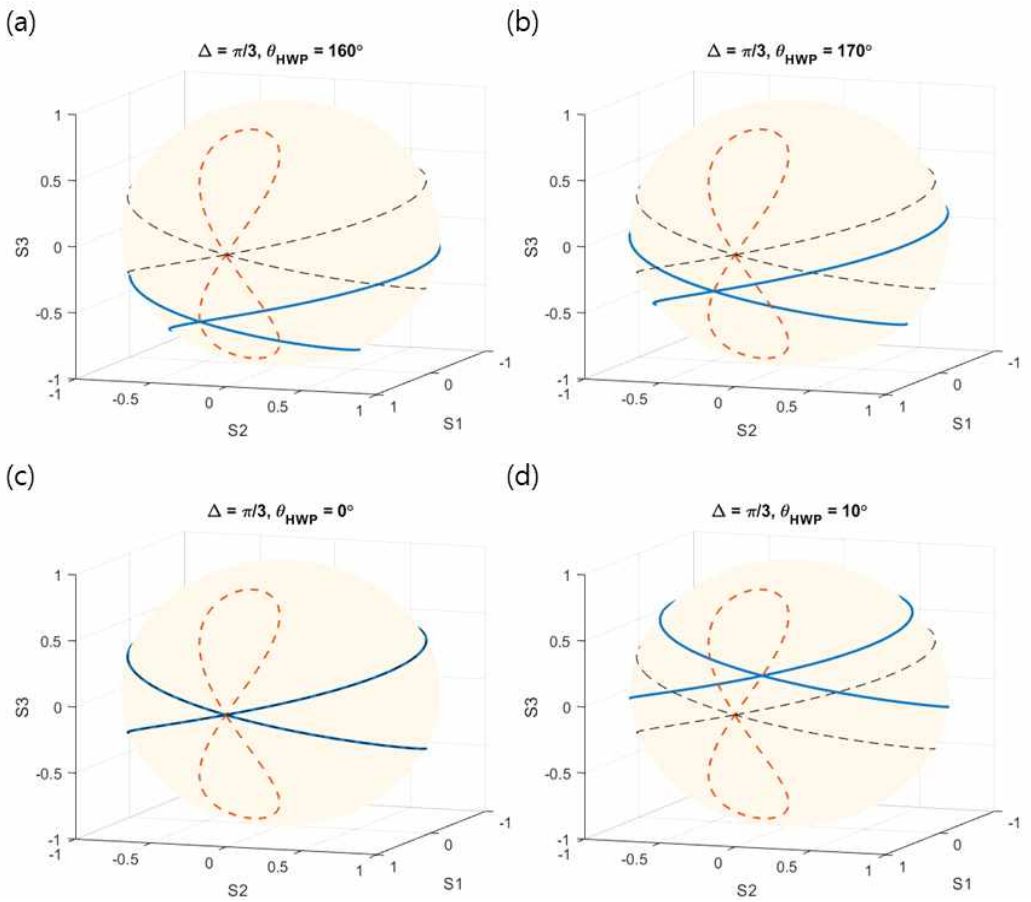


그림 12. 위상지연 오차가 $\pi/3$ 일 때의 4분파장판과 반파장판의 회전에 따른 스토크스 파라미터 궤적. 반파장판의 (a) 회전 각도: 160° , (b) 회전 각도: 170° , (c) 회전 각도: 0° , (d) 회전 각도: 10°

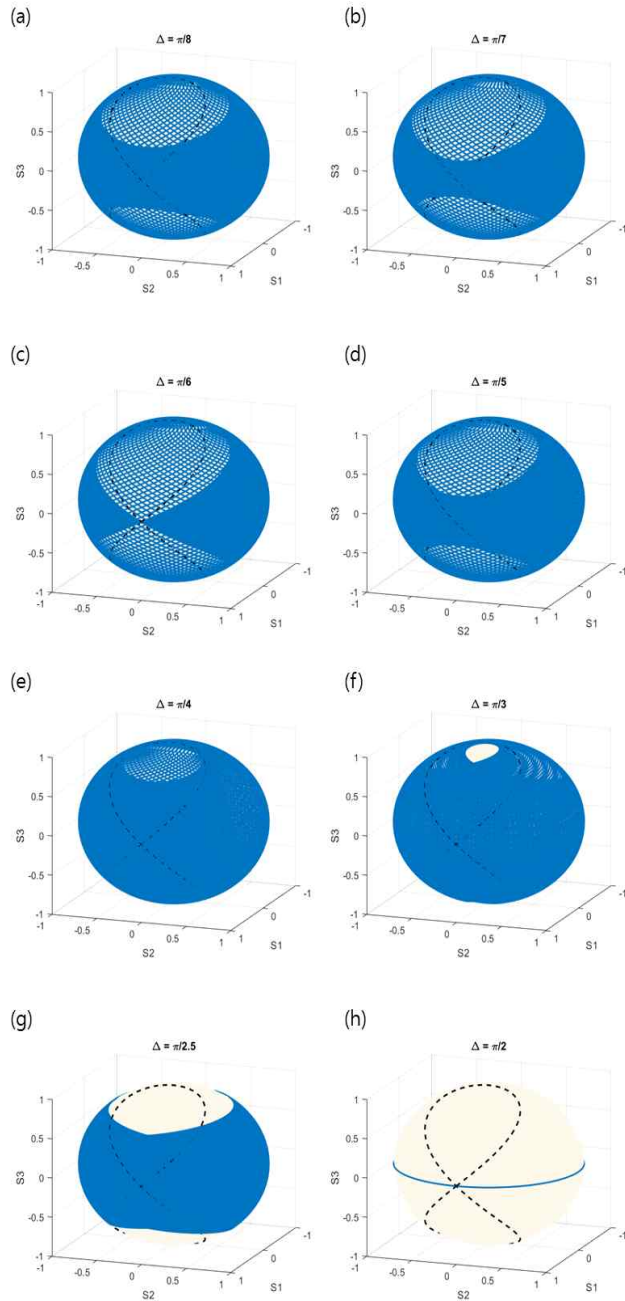


그림 13. 위상지연 오차별 이중 위상지연자의 회전을 통해 얻게되는 스톡스 파라미터들의 총 궤적. (a) $\Delta = \pi/8$, (b) $\Delta = \pi/7$, (c) $\Delta = \pi/6$, (d) $\Delta = \pi/5$, (e) $\Delta = \pi/4$, (f) $\Delta = \pi/3$, (g) $\Delta = \pi/2.5$, (h) $\Delta = \pi/2$, (계속)

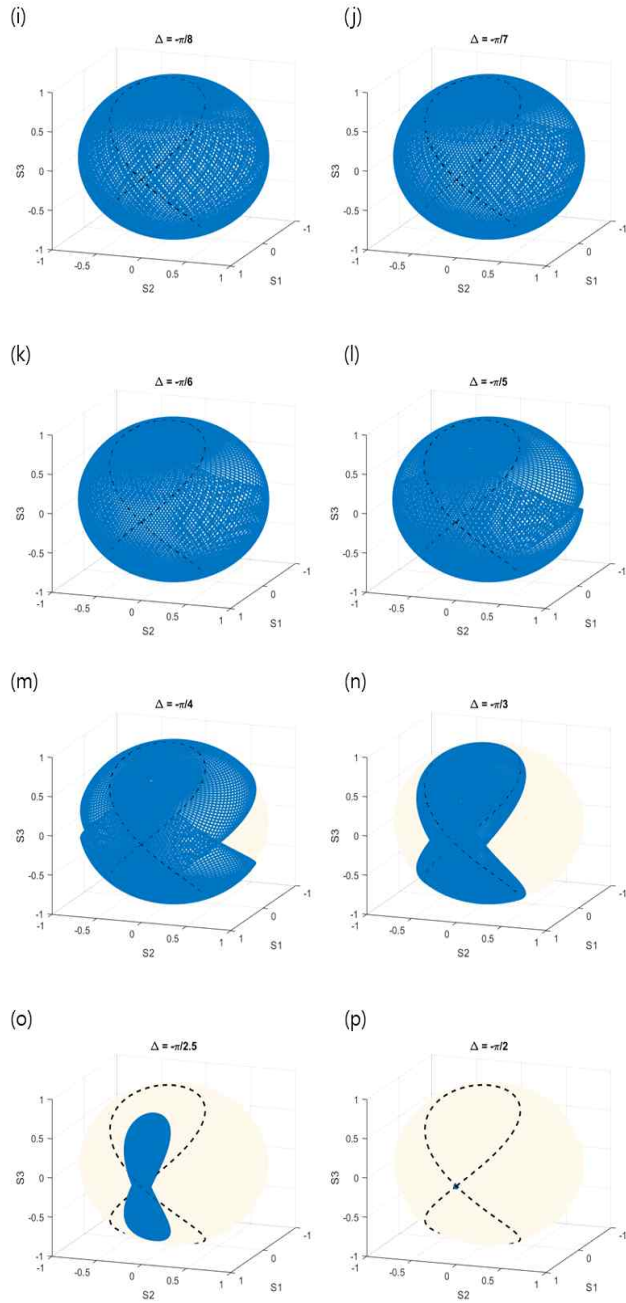
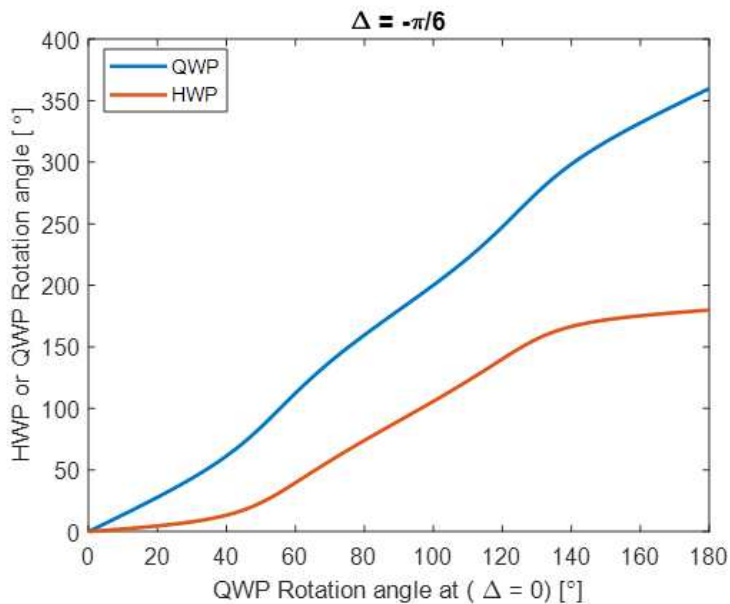
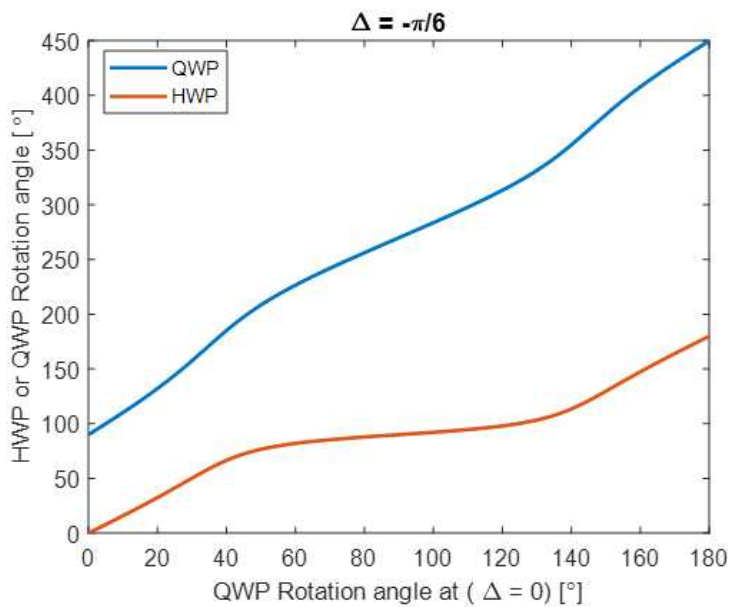


그림 13. (계속) 위상지연 오차별 이중 위상지연자의 회전을 통해 얻게되는
 스토크스 파라미터들의 총 궤적. (i) $\Delta = \pi/8$, (j) $\Delta = \pi/7$, (k) $\Delta = \pi/6$, (l)
 $\Delta = \pi/5$, (m) $\Delta = \pi/4$, (n) $\Delta = \pi/3$, (o) $\Delta = \pi/2.5$, (p) $\Delta = \pi/2$



(a)



(b)

그림 14. 위상지연 오차가 $\Delta = -\pi/6$ 일 때 오차가 없는 4분파장판을 구현할 수 있는 오차를 갖는 반파장판과 4분파장판의 회전 각도. (a) 반파장판과 4분파장판의 초기 회전 각도가 $(0^\circ, 0^\circ)$, (b) $(0^\circ, 90^\circ)$ 인 경우

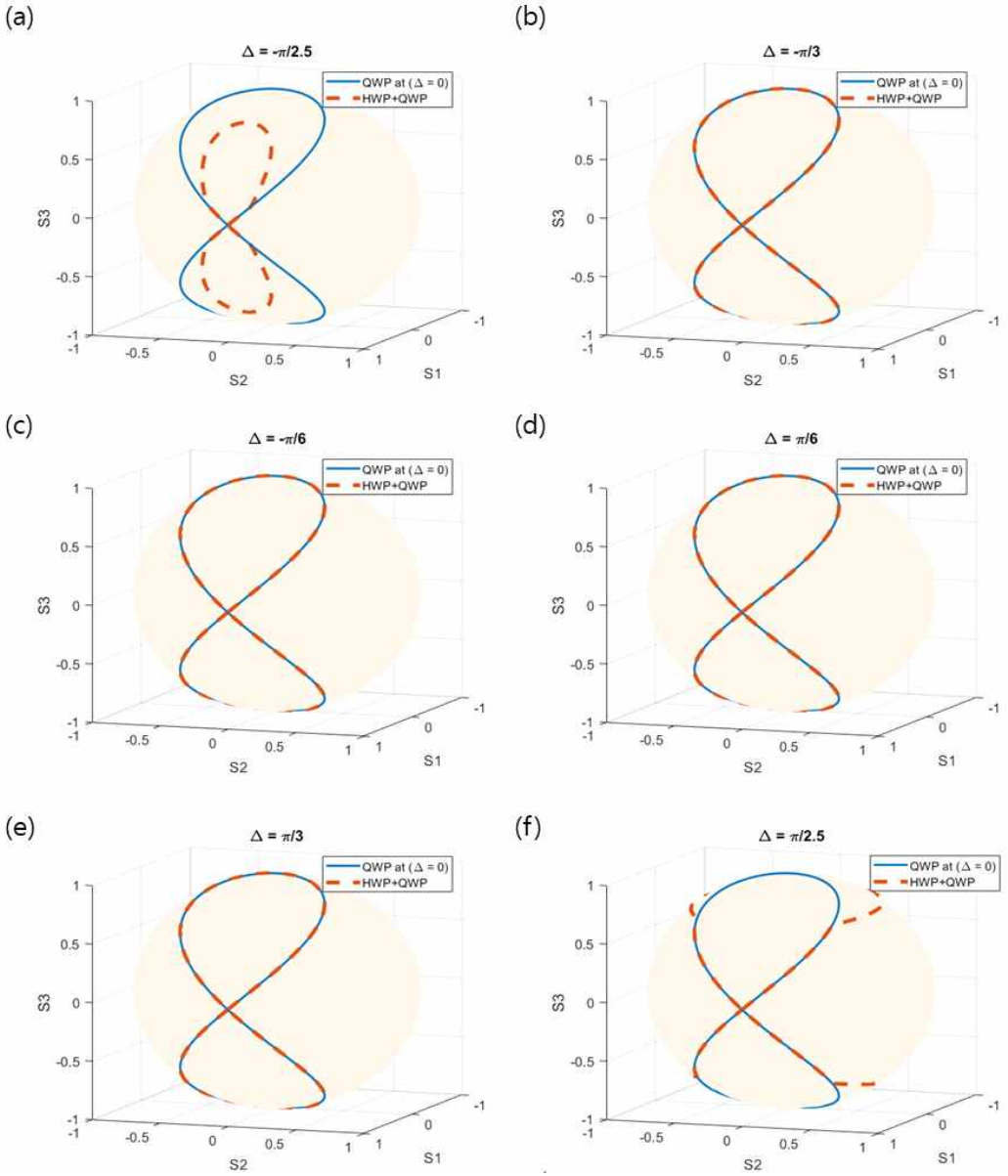


그림 15. 위상지연 오차별 최적화 조건에서의 스토크스 파라미터 궤적. (a) $\Delta = -\pi/2.5$, (b) $\Delta = -\pi/3$, (c) $\Delta = -\pi/6$, (d) $\Delta = \pi/6$, (e) $\Delta = \pi/3$, (f) $\Delta = \pi/2.5$

제4장 실험결과 및 논의

제1절 예비 실험 : 자체 제작 편광계 사용

1. 위상지연자의 특성 파라미터

다양한 파장에 대한 실험을 수행하기 전 633 nm의 파장에 대한 예비실험을 진행하였다. 예비실험을 위해 588 nm의 기준파장을 갖고 있는 4분파장판과 반파장판을 사용하였다. 실험에 사용된 4분파장판(WPQ10M-588, Thorlabs)과 반파장판(WPH10M-588, Thorlabs)은 석영(SiO₂) 재질로 되어있으며, 이에 대한 굴절률을 표 2에 정리하였다^[17].

표 2의 A , B , C , D , F 는 굴절률을 표현하는 Sellmeier 모델의 분산계수를 나타내는 것으로 일정 파장범위 내에서 유효한 굴절률을 제공한다. 제2장 2절에서 언급한 바와 같이 n_e 와 n_o 는 각각 복굴절 매질에서의 이상광선과 정상광선에 대한 굴절률을 의미한다. 표 2의 계수와 다음의 Sellmeier 모델 식을 사용하여 굴절률을 계산할 수 있다^[17].

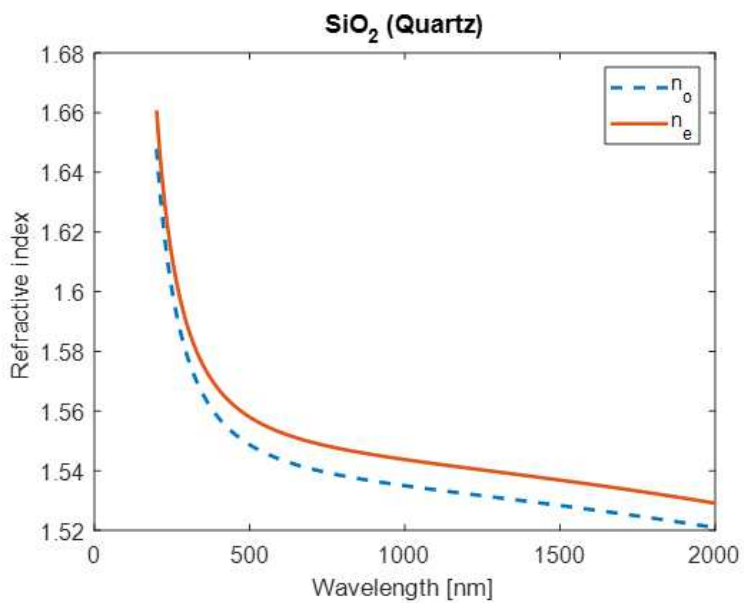
$$n_{o,e}^2 = A_{o,e} + \frac{B_{o,e}\lambda^2}{\lambda^2 - C_{o,e}} + \frac{D_{o,e}\lambda^2}{\lambda^2 - F_{o,e}} \quad (16)$$

표 2와 식 (16)을 이용하여 파장에 따른 굴절률과 이상광선과 정상광선 사이의 굴절률 차를 얻었으며 이를 그림 16에 나타내었다. 파장이 짧아질수록 이상광선과 정상광선에 대한 굴절률과 굴절률 차는 모두 증가하고 있음을 알 수 있다.

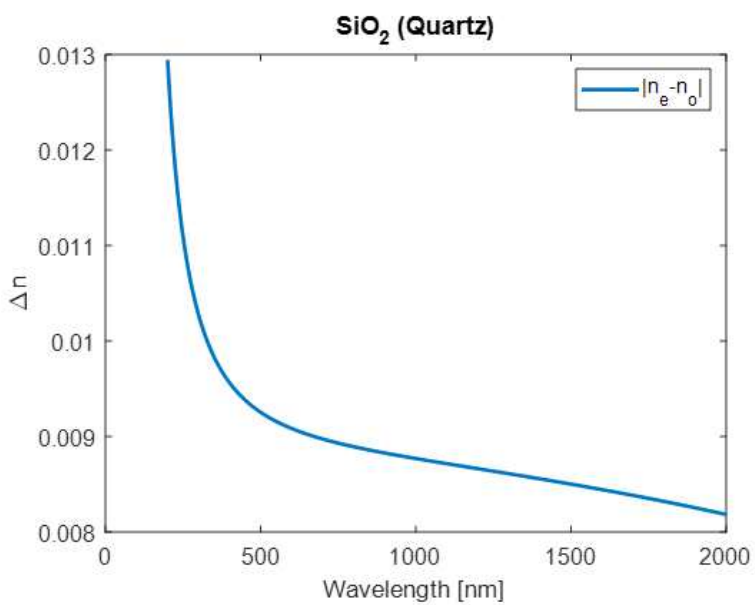
그림 17은 복굴절 매질 SiO₂에 대해 기준파장이 588 nm일 때 위상지연 오차가 $\Delta \leq |\pi/3|$ 인 영역($375 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1600 \text{ nm}$)을 보여주고 있다. 따라서 기준파장이 588 nm인 SiO₂재질의 반파장판과 4분파장판의 조합을 사용하여 375 nm에서 1600 nm 사이 대역에 대한 광대역 보정기를 구현할 수 있음을 알 수 있다.

표 2. 실험에 사용된 위상지연판 매질의 굴절률 계수^[17]

Polarization	Dispersion coefficients				
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i> (10 ⁻²)	<i>D</i>	<i>F</i>
o	1.28604141	1.07044083	1.00585997	1.10202242	100
e	1.28851804	1.09509924	1.02101864	1.15662475	100



(a)



(b)

그림 16. 복굴절 매질 SiO₂의 파장에 따른 (a) 굴절률, (b) 굴절률 차

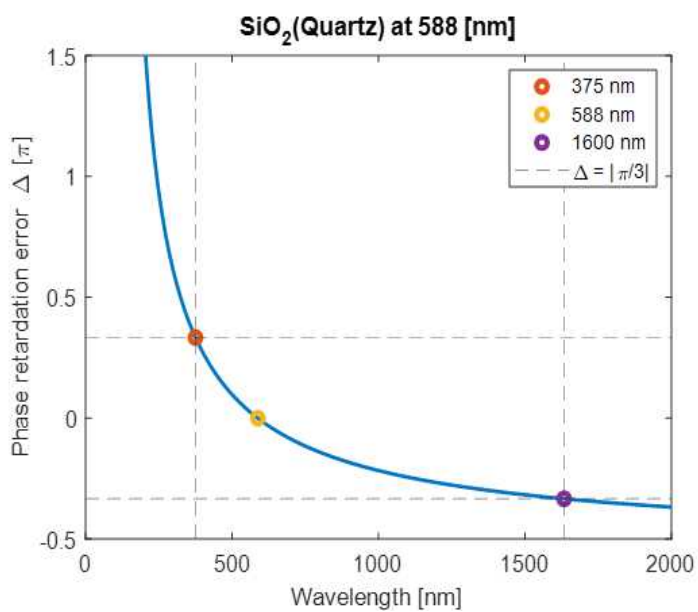


그림 17. 복굴절 매질 SiO₂에 대해 기준파장이 588 nm일 때 위상지연 오차가 $\Delta \leq |\pi/3|$ 인 영역

2. 실험 장치 구성

그림 18은 자체 제작 편광계를 사용한 예비실험 구성도와 실험 구성 사진을 보여주고 있다. 시뮬레이션 구성도와 동일하게 광원부 뒷단에 편광기, 반파장판, 4분파장판을 순서대로 설치하였다. 자체 제작 편광계는 편광기(WP12L-VIS, Thorlabs)와 4분파장판(WPQ10M-633, Thorlabs) 그리고 광 검출기(DET10A2, Thorlabs)를 사용하였으며, 광원은 633 nm의 파장을 가진 헬륨-네온레이저(HNLS008R; Thorlabs)를 사용하며, 편광기와 위상지연자의 회전을 위해 모터 스테이지(PRM1Z8, Thorlabs)와 모터회전 스테이지(K10CR1, Thorlabs)를 사용하였다.

스토크스 파라미터 측정을 위한 편광계의 구성은 고정된 4분파장판에 대하여 편광기를 회전시키거나 고정된 편광기에 대하여 4분파장판을 회전시키는 경우로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 편광기를 회전시키는 방식을 선택하였다. 회전하는 편광기를 통과한 광 세기는 다음과 같다^[16].

$$I(\theta, \phi) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta \cos \phi - S_3 \sin 2\theta \sin \phi) \quad (17)$$

여기서 θ 는 선형 편광기의 회전 각도를 의미하며, ϕ 는 위상지연자의 위상차를 의미한다. 스토크스 파라미터는 다음의 식으로 표현된다^[16].

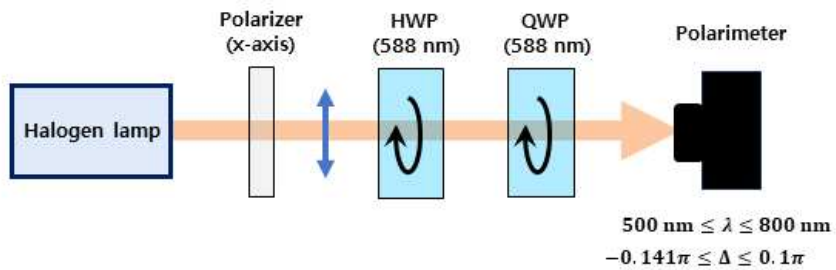
$$S_0 = I(0^\circ, 0^\circ) + I(90^\circ, 0^\circ) \quad (18.1)$$

$$S_1 = I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) \quad (18.2)$$

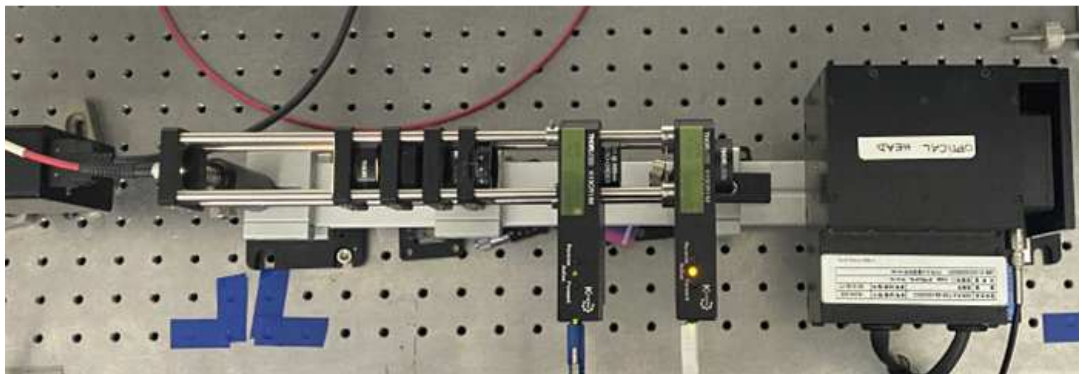
$$S_2 = 2I(45^\circ, 0^\circ) - S_0 \quad (18.3)$$

$$S_3 = S_0 - 2I(45^\circ, 90^\circ) \quad (18.4)$$

4분파장판 없이 편광기를 0° , 45° , 90° 회전시켜 각각의 경우에 대한 광 세기를 측정하였고, 4분파장판을 배치하고 편광기를 45° 회전시킨 경우에 대한 광 세기를 추가로 측정하였다. 광 검출기로부터 검출된 광 세기 전압 신호는 LabVIEW DAQ(NI-9205)를 거쳐서 데스크톱에 수집되었다. 측정된 광 세기 데이터와 식 (18)의 관계식을 사용하여 스토크스 파라미터를 최종적으로 획득하였다.



(a)



(b)

그림 18. (a) 자체제작 편광계를 사용한 예비실험 구성도, (b) 실험 구성 사진

3. 데이터 측정 및 보정

자체 제작한 편광계를 사용하여 광 세기를 측정하였다. 그림 19는 보정 전 임의의 회전 각도에서의 광 세기(측정된 결과와 이론적 결과)를 비교한 결과이다. 광 세기의 전반적인 개형은 유사하나, 진폭과 위치의 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 광학계의 부정확한 정렬에 기인한 것으로 판단되었다. 최적화 분석을 통해 정렬 오차 보정을 위한 각 소자별 틀어진 회전 각도를 찾았다. 최적화 분석을 위해 측정된 광 세기와 이론적 광 세기간의 평균 제곱근 오차를 사용하였다.

최적화 분석 결과 4분과장관은 -1.51° , 반과장관은 2.52° , 자체 구성한 편광계 쪽의 편광기는 -0.82° 만큼 틀어져 있었음을 알 수 있었다. 틀어진 각도만큼 보정하여 다시 광 세기를 측정하였다. 그림 20은 보정 후 임의의 회전 각도에서의 광 세기(측정된 결과와 이론적 결과)를 비교한 결과이다. 측정된 결과와 이론적 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

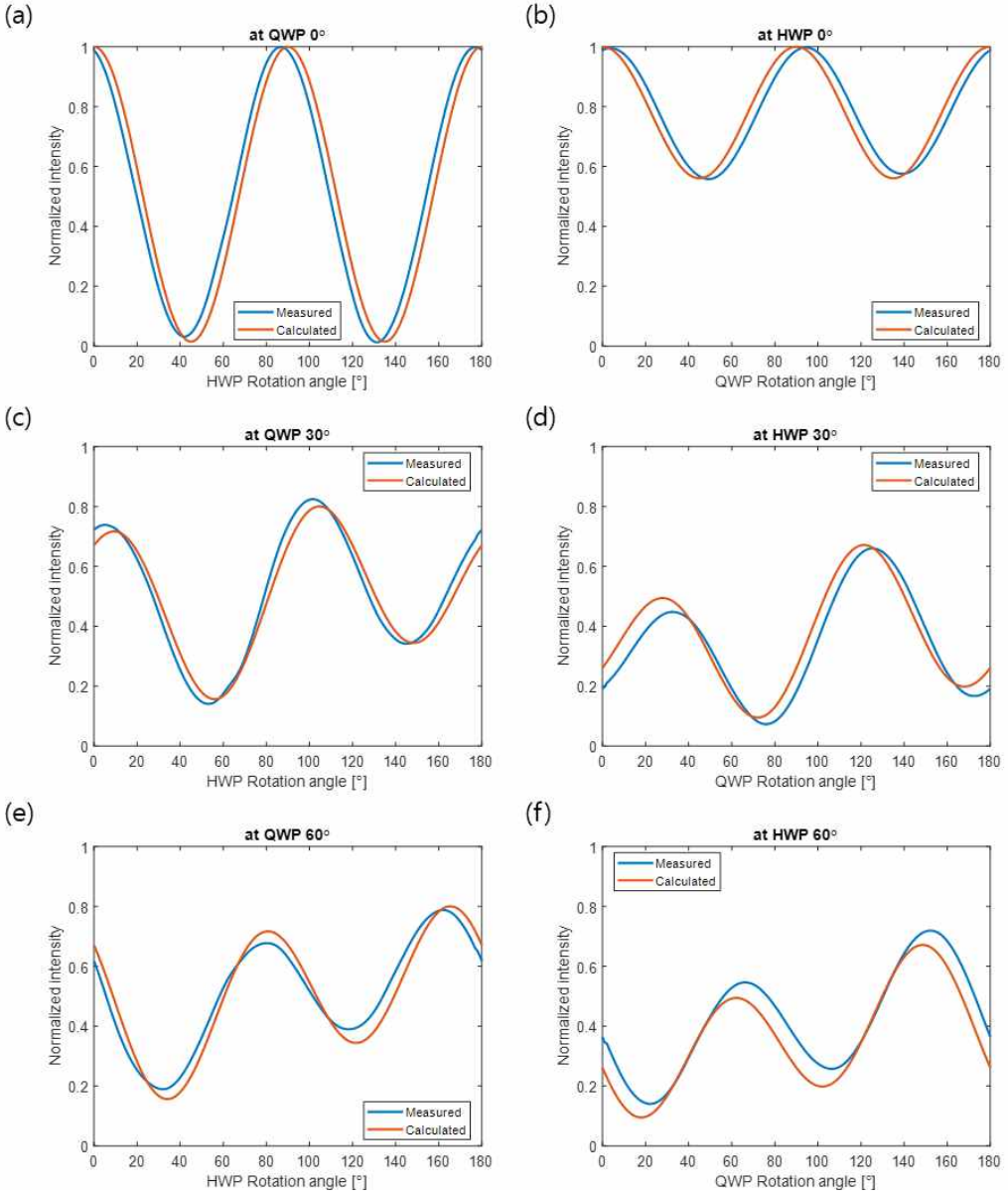


그림 19. 보정 전 임의의 회전 각도에서의 광 세기 비교. (a) 4분파장판의 각도: 0° , (b) 반파장판의 각도: 0° , (c) 4분파장판의 각도: 30° , (d) 반파장판의 각도: 30° , (e) 4분파장판의 각도: 60° , (f) 반파장판의 각도: 60°

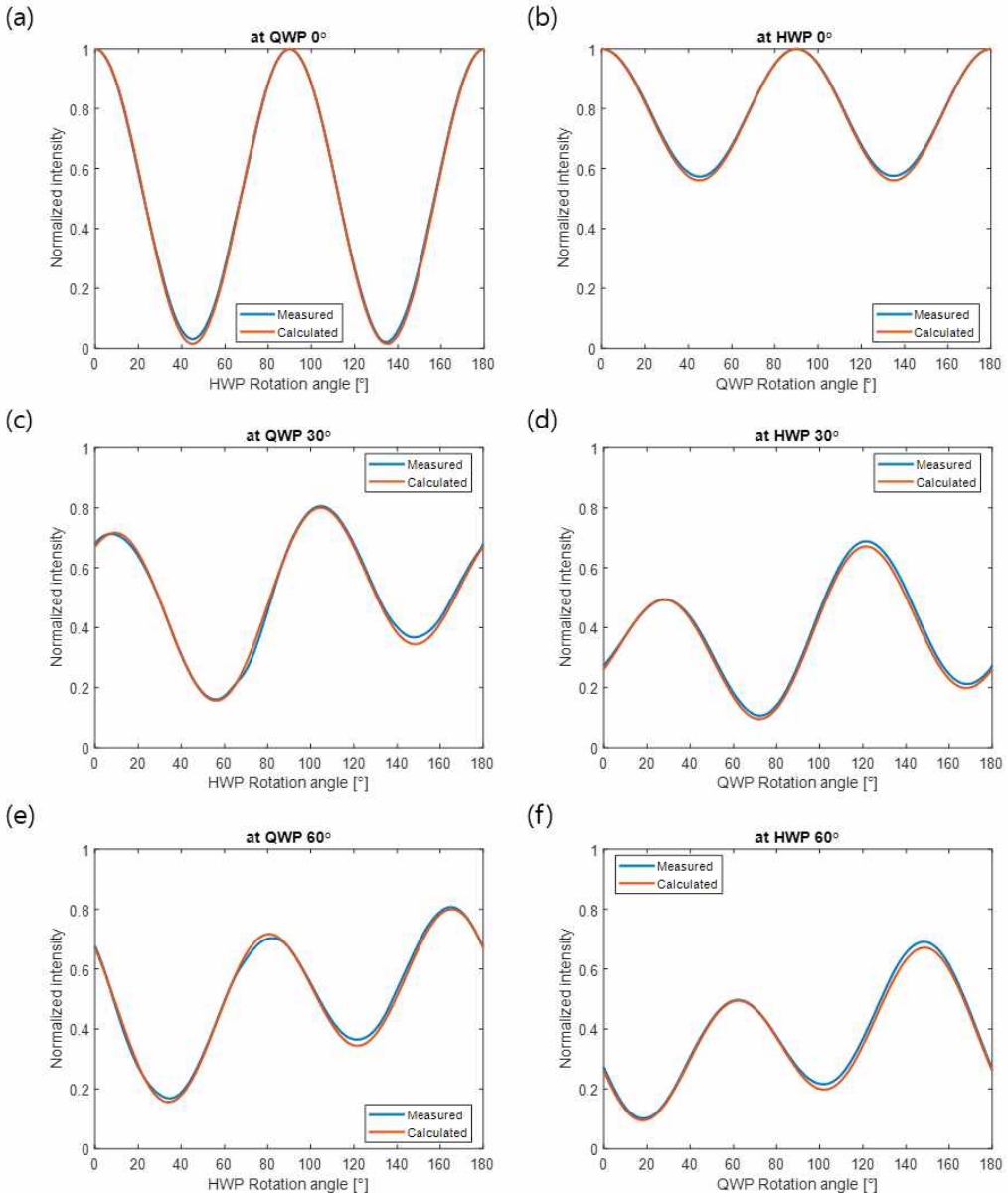


그림 20. 보정 후 임의의 회전 각도에서의 광 세기 비교. (a) 4분파장판의 각도: 0° , (b) 반파장판의 각도: 0° , (c) 4분파장판의 각도: 30° , (d) 반파장판의 각도: 30° , (e) 4분파장판의 각도: 60° , (f) 반파장판의 각도: 60°

4. 측정 결과 분석 및 논의

광학계의 정렬을 보정한 후 광 세기를 다시 측정하고, 최종적으로 스토크스 파라미터를 획득하였다. 그림 21은 측정된 스토크스 파라미터와 이론적 스토크스 파라미터를 보여주고 있다. 두 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 22는 위상지연 오차가 없는 4분 파장판에 의한 스토크스 파라미터(이론적으로 계산된 값)와 최적화된 각도 조합에서 측정된 스토크스 파라미터(실험적으로 측정된 값)를 비교한 결과이다. 이 때, 앞서 설명한 바와 같이 실험에 사용된 반파장판 및 4분파장판의 기준파장은 588 nm이고 보정기를 구현한 파장은 633 nm이므로 위상지연 오차 $\Delta = -0.039$ 인 경우에 해당한다. 시작 각도가 $(0^\circ, 0^\circ)$, $(0^\circ, 90^\circ)$ 인 경우 모두 비교적 두 결과가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 시작 각도가 $(0^\circ, 0^\circ)$ 인 경우 스토크스 파라미터 S_1, S_2, S_3 에 대한 평균 제곱근 오차는 각각 0.0201, 0.0259, 0.0347이었으며, 시작 각도가 $(0^\circ, 90^\circ)$ 인 경우 평균 제곱근 오차는 각각 0.0120, 0.0268, 0.0154이었다.

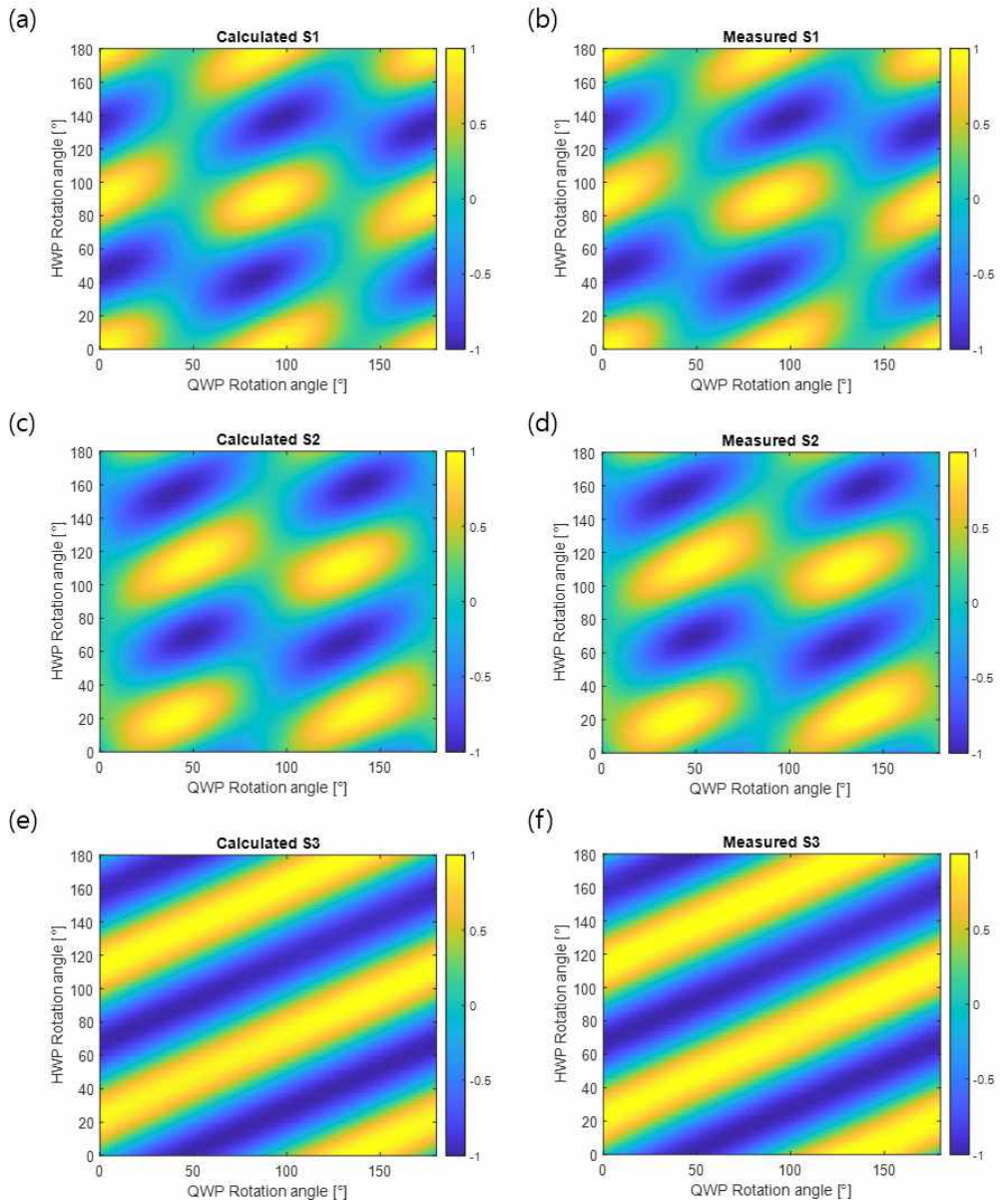


그림 21. 측정된 스톡스 파라미터와 이론적 스톡스 파라미터. (a) 이론적 S_1 , (b) 측정된 S_1 , (c) 이론적 S_2 , (d) 측정된 S_2 , (e) 이론적 S_3 , (f) 측정된 S_3

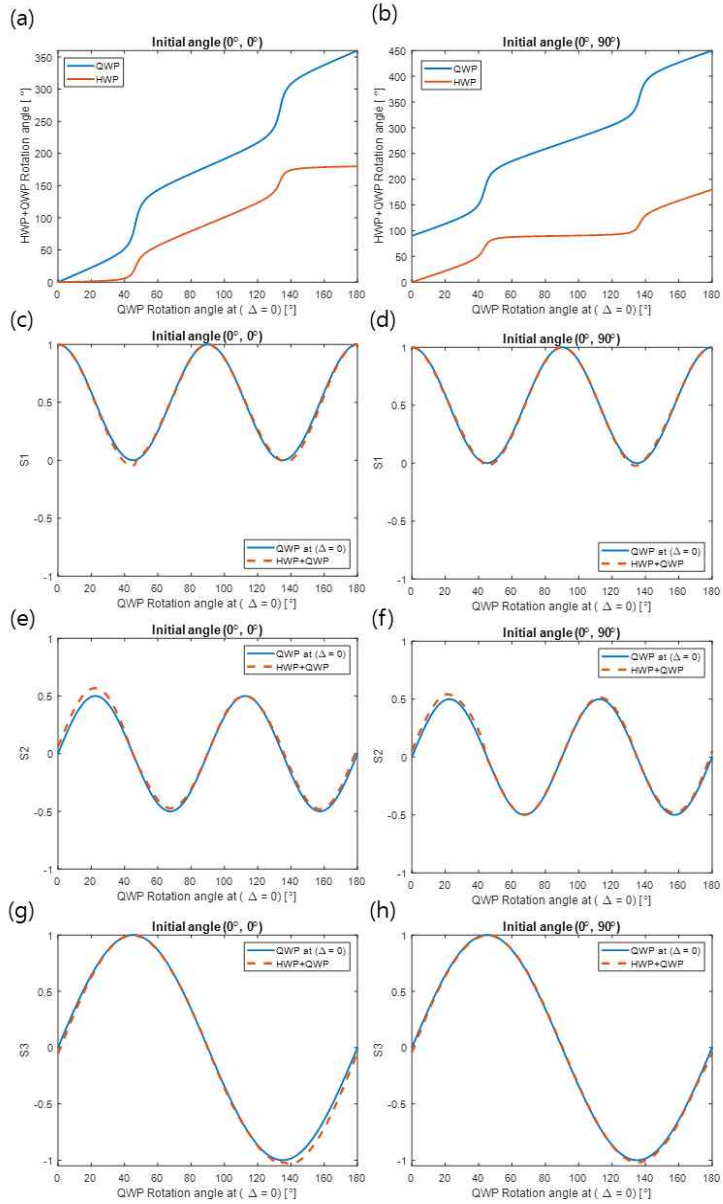


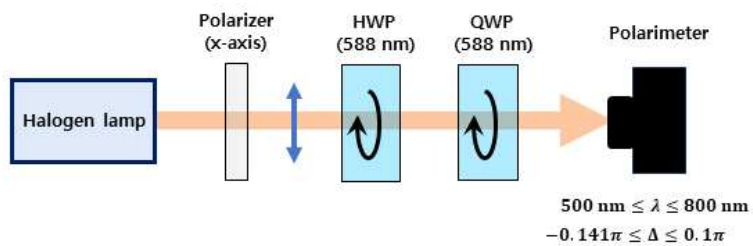
그림 22. 위상지연 오차가 없는 4분 파장판에 의한 스토크스 파라미터와 최적화된 각도 조합에서 측정된 스토크스 파라미터 비교. 시작 각도가 (a) $(0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 구한 최적화 각도, (b) $(0^\circ, 90^\circ)$ 일 때 구한 최적화 각도, (c) $(0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 S_1 , (d) $(0^\circ, 90^\circ)$ 일 때 S_1 , (e) $(0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 S_2 , (f) $(0^\circ, 90^\circ)$ 일 때 S_2 , (g) $(0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 S_3 , (h) $(0^\circ, 90^\circ)$ 일 때 S_3

제2절 본 실험 : 상용 편광계 사용

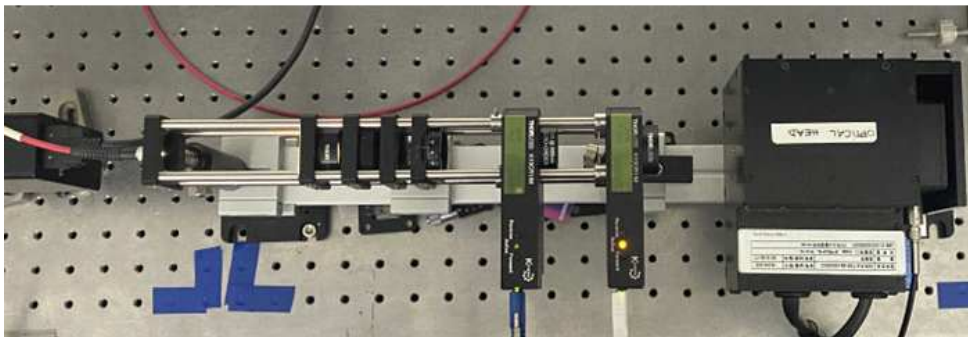
1. 실험 장치 구성

그림 23은 상용 편광계를 사용한 본 실험 구성도와 실험 구성 사진을 보여주고 있다. 예비 시뮬레이션에서와 동일하게 광원부 뒷단에 편광기, 반파장판(WPH10M-588, Thorlabs), 4분파장판(WPQ10M-588, Thorlabs)을 순서대로 설치하였다. 할로젠 램프 광원, 상용 편광계인 Tokyo Instruments 사의 Poxi-spectra, 위상지연자의 회전을 위한 모터회전 스테이지(K10CR1, Thorlabs)를 사용하였다.

실험에 사용된 상용 편광계인 Tokyo Instruments 사의 Poxi-spectra는 500 nm ~ 800 nm 사이의 파장에서 대략 1000개의 다른 파장에 대한 스토크스 파라미터 데이터를 제공하며, 파장의 분해능은 대략 2 nm이내이다.



(a)



(b)

그림 23. (a) 상용 편광계를 사용한 본 실험 구성도, (b) 실험 구성 사진

2. 데이터 측정 및 보정

예비실험의 경우와 마찬가지로 정렬 오차 보정을 진행한 후 스토크스 파라미터 측정을 수행하였다. 그림 24와 25는 각각 보정 전과 후 임의의 회전 각도에서의 스토크스 파라미터(측정된 결과와 이론적 결과)를 비교한 결과이다. 보정 후 측정된 결과와 이론적 결과가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 최적화 분석을 통해 추출한 4분파장판과 반파장판의 보정 각도는 각각 1.29° 와 -2.13° 이었다.

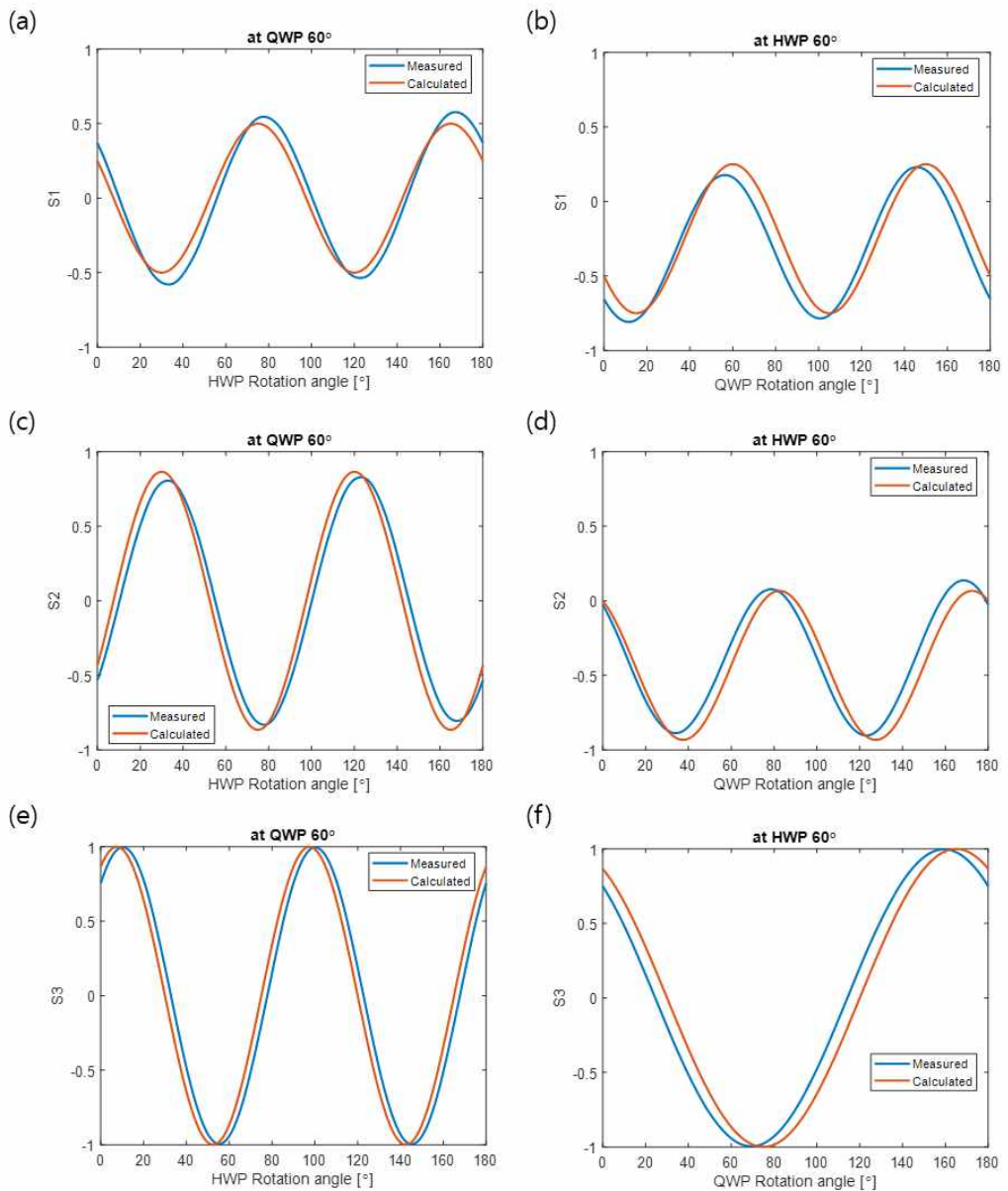


그림 24. 보정 전 임의의 회전 각도에서의 스토크스 파라미터 비교. (a) 4분파장판: 60°일 때의 S_1 , (b) 반파장판: 60°일 때의 S_1 , (c) 4분파장판: 60°일 때의 S_2 , (d) 반파장판: 60°일 때의 S_2 , (e) 4분파장판: 60°일 때의 S_3 (f) 반파장판: 60°일 때의 S_3

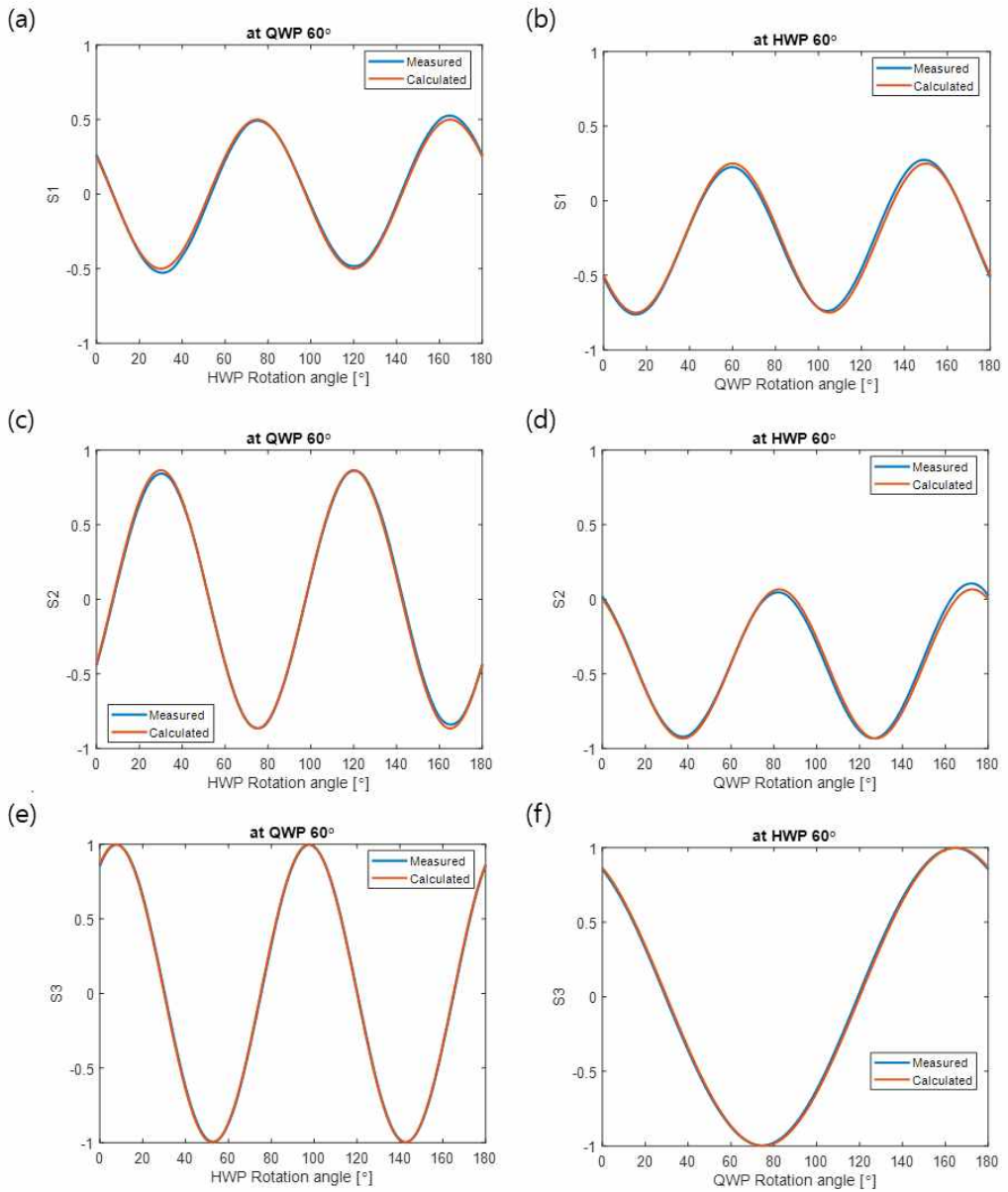


그림 25. 보정 후 임의의 회전 각도에서의 스토크스 파라미터 비교. (a) 4분파장판: 60°일 때의 S_1 , (b) 반파장판: 60°일 때의 S_1 , (c) 4분파장판: 60°일 때의 S_2 , (d) 반파장판: 60°일 때의 S_2 , (e) 4분파장판: 60°일 때의 S_3 (f) 반파장판: 60°일 때의 S_3

3. 측정 결과 분석 및 논의

광원의 파장이 각각 500 nm, 588 nm, 633 nm, 700 nm, 800 nm인 경우에 대하여 최적화된 기준 파장이 588 nm인 반파장판과 4분파장판의 회전 각도 조합을 이론적으로 구하였다. 그 후 이론적으로 구한 각도 조합조건에서 스토크스 파라미터를 실험적으로 측정하였다. 그림 26은 800 nm 파장에 대해 최적화된 각도 조합에서 측정된 스토크스 파라미터를 보여주고 있다. 이 경우 시작 각도가 $(0^\circ, 0^\circ)$ 와 $(0^\circ, 90^\circ)$ 인 두 경우에 대하여 연속적인 각도 조합 해가 존재하였다. 두 경우 모두에 대해 측정된 스토크스 파라미터와 위상지연 오차가 없는 4분파장판에 의한 스토크스 파라미터가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 그 외의 파장에 대해서도 회전 각도 조합에 대한 이론적 분석과 스토크스 파라미터에 대한 측정을 진행하였으며, 800 nm의 경우와 유사하게 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

표 3에 측정된 스토크스 파라미터와 이론적 스토크스 파라미터간의 파장별 평균 제곱근 오차를 나타내었다. 표 3의 시작 각도 A는 반파장판과 4분파장판의 시작 각도가 $(0^\circ, 90^\circ)$ 임을 의미한다. 시작 각도 B는 파장이 500 nm일 때 $(90^\circ, 0^\circ)$ 의 시작 각도를 의미하며, 나머지의 경우에는 $(0^\circ, 0^\circ)$ 의 시작 각도를 의미한다. 위상지연자의 기준파장과 동일한 588 nm의 경우에도 대략 0.02에서 0.03 정도의 평균 제곱근 오차를 보였으며, 전체적으로 대략 0.01에서 0.05 내외의 평균 제곱근 오차가 존재함을 알 수 있다. 이러한 오차는 광학 정렬 오차, 광원의 불안정성, 실험 장치의 진동, 배경광 등에 의한 것으로 판단된다.

표 3. 파장별 스토크스 파라미터의 평균 제곱근 오차

RMSE		500 nm	588 nm	633 nm	700 nm	800 nm
Initial angle A	S ₁	0.0300	0.0208	0.0212	0.0445	0.0199
	S ₂	0.0501	0.0259	0.0216	0.0530	0.0215
	S ₃	0.0224	0.0152	0.0063	0.0481	0.0279
Initial angle B	S ₁	0.0282	0.0170	0.0171	0.0447	0.0211
	S ₂	0.0498	0.0167	0.0202	0.0517	0.0209
	S ₃	0.0196	0.0173	0.0173	0.0447	0.0249

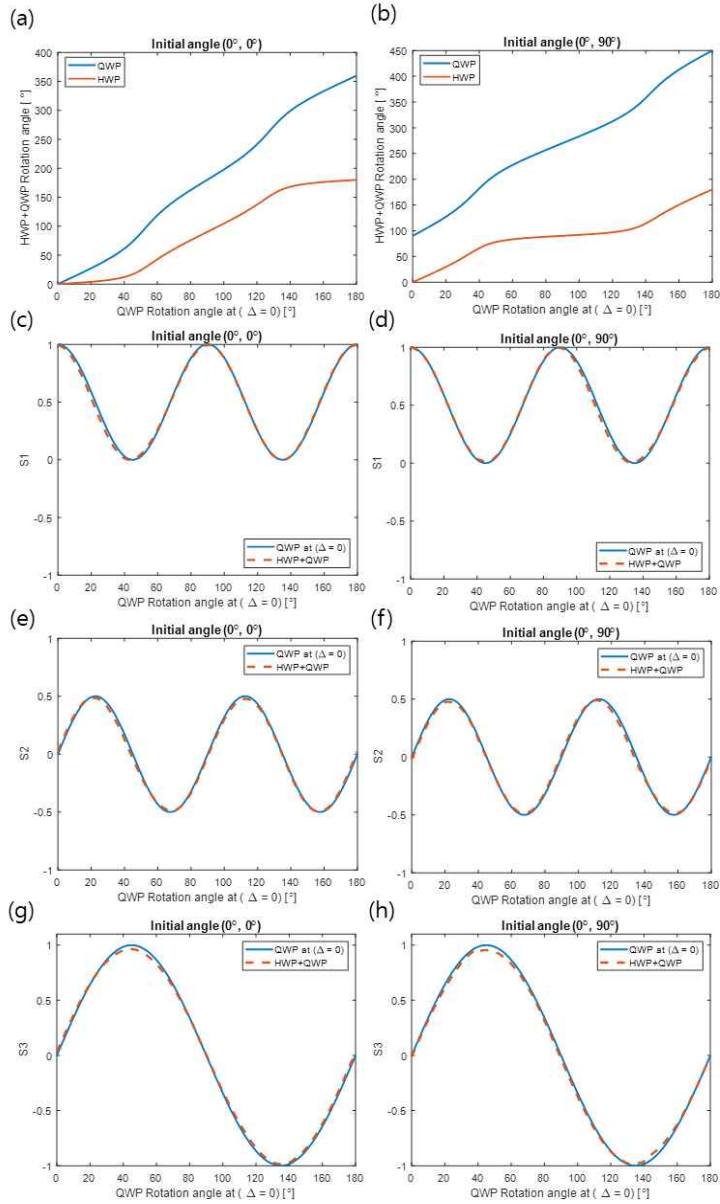


그림 26. 위상지연 오차가 없는 4분과장판에 의한 스토크스 파라미터와 800 nm 파장에 대해 최적화된 각도 조합에서 측정된 스토크스 파라미터 비교. 시작 각도가 (a) $(0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 구한 최적화 각도, (b) $(0^\circ, 90^\circ)$ 일 때 구한 최적화 각도, (c) $(0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 S_1 , (d) $(0^\circ, 90^\circ)$ 일 때 S_1 , (e) $(0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 S_2 , (f) $(0^\circ, 90^\circ)$ 일 때 S_2 , (g) $(0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 S_3 , (h) $(0^\circ, 90^\circ)$ 일 때 S_3

제5장 결론

본 논문에서는 분광타원계 적용을 위한 광대역 보정기 개발에 관한 연구를 수행하였다. 반파장판과 4분파장판 조합을 사용한 광대역 보정기의 구조를 제안하였다. 광대역 보정기로 작용할 수 있는 반파장판과 4분파장판 각각의 회전 각도 조합에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 위상지연 오차 $|\Delta| \leq \pi/3$ 영역 내에 있을 때 유효한 회전 각도 조합이 관측되었다.

자체 제작한 편광계를 사용한 예비실험을 통해 본 논문에서 제안한 구조의 유효성을 확인하였다. 예비실험을 위해 633 nm의 광원과 588 nm의 기준파장을 갖는 SiO₂ 재질의 반파장판과 4분파장판을 사용하였다.

상용 편광계를 사용한 본 실험을 통해 본 논문에서 제안한 이중 위상지연자의 구조가 광대역 보정기로 사용될 수 있음을 검증하였다. 이를 위해 500 nm~800 nm 파장 영역대에 대한 실험을 수행하였고, 588 nm의 기준파장을 갖는 SiO₂ 재질의 반파장판과 4분파장판 조합 구조를 통해 실험적으로 얻은 스토크스 벡터의 성분과 이상적인 스토크스 벡터의 성분이 대략 0.01~0.05 내외의 평균 제곱근 오차 내에서 일치함을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 반파장판과 4분파장판 조합 구조를 사용하여 광대역 타원계를 위한 실용적인 위상지연 보정기 구현이 가능할 것으로 기대된다.

[참고문헌]

- [1] Lu, Liming, et al, "Quantitative X-ray diffraction analysis and its application to various coals," *Carbon* **39**(12), 1821-1833 (2001).
- [2] Copeland, Llewellyn Everard, and Robert H. Bragg, "Quantitative X-ray diffraction analysis," *Analytical Chemistry* **30**(2), 196-201 (1958).
- [3] Holder CF, Schaak RE, "Tutorial on Powder X-ray Diffraction for Characterizing Nanoscale Materials," *ACS Nano* **13**(7), 7359-7365 (2019).
- [4] Vickerman, John C., and Ian S. Gilmore, eds. *Surface analysis: the principal techniques*. (John Wiley & Sons, 2011), pp. 374-381
- [5] Tougaard, S, "Formalism for quantitative surface analysis by electron spectroscopy." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* **8**(3), 2197-2203 (1990).
- [6] Goodhew, Peter J., and John Humphreys. *Electron microscopy and analysis*. (CRC press, 2000).
- [7] Benstetter, Günther, Roland Biberger, and Dongping Liu. "A review of advanced scanning probe microscope analysis of functional films and semiconductor devices," *Thin Solid Films* **517**(17), 5100-5105 (2009).
- [8] Sikora M, Wojcieszak D, Chudzyńska A, Zięba A, "Improved Methodology of Cross-Sectional SEM Analysis of Thin-Film Multilayers Prepared by Magnetron Sputtering," *Coatings*. **13**(2), 316 (2023).
- [9] Mwema, Fredrick Madaraka, et al, "Atomic force microscopy analysis of surface topography of pure thin aluminum films," *Materials Research Express* **5**(4), (2018).

- [10] Huang, Hsu-Ting, and Fred L. Terry Jr, "Spectroscopic ellipsometry and reflectometry from gratings (scatterometry) for critical dimension measurement and in situ, real-time process monitoring," *Thin Solid Films* **455**, 828-836 (2004).
- [11] Jellison Jr, G. E, "Spectroscopic ellipsometry data analysis: measured versus calculated quantities," *Thin solid films* **313**, 33-39 (1998).
- [12] Hwang, Gukhyeon, et al, "Robust dynamic spectroscopic imaging ellipsometer based on a monolithic polarizing Linnik interferometer," *Optics Express* **31**(12), 19569-19587 (2023).
- [13] 안일신, *엘립소메트리*. (한양대학교 출판부, 2017).
- [14] Fowles, Grant R, *Introduction to modern optics*. (Courier Corporation, 1989).
- [15] Fujiwara, Hiroyuki, *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*. (John Wiley & Sons, 2007).
- [16] Schaefer, Beth, et al, "Measuring the Stokes polarization parameters," *American Journal of Physics* **75**(2), 163-168 (2007).
- [17] Ghosh, Gorachand, "Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals," *Optics communications* **163**(1-3), 95-102 (1999).