



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](#)

2023년 8월
석사학위논문

독립적으로 분배비 가변과 위상 이동 제어가
가능한 이터븀 도핑된 광섬유
측면 가공 커플러의 개발

조선대학교 대학원

물리학과

김현성

독립적으로 분배비 가변과 위상 이동 제어가
가능한 이터븀 도핑된 광섬유
측면 가공 커플러의 개발

Development of ytterbium-doped fiber side-polished coupler with the independently
controllable function of both variable splitting ratio and phase shifts

2023년 8월 25일

조선대학교 대학원

물리학과

김현성

독립적으로 분배비 가변과 위상 이동 제어가
가능한 이터븀 도핑된 광섬유
측면 가공 커플러의 개발

지도교수 최은서

이 논문을 이학 석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 4월

조선대학교 대학원

물리학과

김현성

김현성의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 곽우섭 (인)

위원 조선대학교 교수 안태정 (인)

위원 조선대학교 교수 최은서 (인)

2023년 5월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서 론	1
제 2 장 광섬유 커플러 동작 이론	3
제 1 절 광섬유 커플러	3
1. 광섬유 커플러의 동작 원리	3
2. 광섬유 커플러의 제작 방법	5
3. 광섬유 커플러의 제작 방법에 따른 특징	8
제 2 절 광섬유의 비선형 굴절률 변화	16
1. 광섬유의 비선형 굴절률 변화 원리	16
2. 이터븀 도핑된 광섬유를 이용한 위상 이동자	16
3. 이터븀 도핑된 광섬유를 이용한 위상 이동 간섭계	18
제 3 장 샘플 가공 및 간섭계 제작	28
제 1 절 측면 가공 광섬유 커플러 제작	28
1. 단일모드 광섬유 측면 가공 및 광섬유 커플러 제작	28
2. 이터븀 도핑된 광섬유 측면 가공 및 광섬유 커플러 제작	32

제 2 절 가공된 커플러를 이용한 위상 이동 간섭계의 개발	37
1. 측면 가공 커플러를 이용한 위상 이동 간섭계 구현	37
2. 이터븀 광섬유 길이에 따른 위상 이동 간섭계 구성	37
제 4 장 측면 가공 광섬유 커플러의 특성 측정 결과	42
제 1 절 광섬유 커플러의 가변 분배비 측정 결과	42
1. 단일모드 광섬유 커플러의 가변 분배비 특성	42
2. 이터븀 도핑된 광섬유 커플러의 가변 분배비 특성	46
제 2 절 광섬유 커플러의 위상 이동 특성 측정 결과	61
1. 가변 분배비에 따른 위상 이동 특성	61
2. 이터븀 광섬유 길이에 따른 위상 이동 특성	74
제 5 장 실험 결과 분석	78
제 6 장 결론	80
참고문헌	81

List of Figures

그림 2-1. 커플러 내부에서 각각의 광섬유로 입사한 광신호가 전달되는 모습	3
그림 2-2. 융합 광섬유 커플러 제작 방법	6
그림 2-3. 감쇠장 커플러 구조	6
그림 2-4. 출력이 두 개로 분할되는 평면 도파관 커플러 구조	7
그림 2-5. 측면 가공 커플러 구조	8
그림 2-6. 측면 가공된 광섬유	9
그림 2-7. 석영 블록에 고정된 광섬유의 단면도	9
그림 2-8. 단일모드 광섬유의 측면 가공 거리에 따른 전력 감쇠 상수	13
그림 2-9. 이터븀 도핑된 광섬유의 측면 가공 거리에 따른 전력 감쇠 상수	13
그림 2-10. 단일모드 광섬유의 측면 가공 거리에 따른 투과 광세기와 전달 광세기	14
그림 2-11. 이터븀 도핑된 광섬유의 측면 가공 거리에 따른 투과 광세기와 전달 광세기	14
그림 2-12. 거리 s_1 과 s_2 에서 점 P 로 향하는 E_1 과 E_2	19
그림 2-13. 영의 이중슬릿 실험 구성 개략도	22

그림 2-14. 마이컬슨 간섭계 개략도	24
그림 2-15. 광섬유를 이용한 마이컬슨 간섭계의 예시	25
그림 2-16. 이터븀 도핑된 광섬유를 위상 이동자로 이용한 마이컬슨 간섭계의 예시	26
그림 2-17. 마하-젠더 간섭계 개략도	26
그림 2-18. 광섬유를 이용한 마이컬슨 간섭계의 예시	27
그림 2-19. 이터븀 도핑된 광섬유를 위상 이동자로 이용한 마하-젠더 간섭계의 예시	27
그림 3-1. V자 홈이 파진 석영 블록의 길이, 두께 및 V자 홈의 길이	29
그림 3-2. V자 홈이 파진 석영블록	30
그림 3-3. 측면 가공 후 630 nm 광원과 연결하여 측면 가공된 위치 확인	30
그림 3-4. 한 쌍의 측면 가공된 광섬유	31
그림 3-5. 단일모드 광섬유로 제작한 측면 가공 광섬유 커플러 개략도	31
그림 3-6. 측면 가공 광섬유 커플러 하우스에 고정된 측면 가공 단일모드 광섬유 한 쌍	31
그림 3-7. 세 가지 샘플과 석영 블록의 위치	32
그림 3-8. 단일모드 광섬유와 접합한 이터븀 도핑된 광섬유	33

그림 3-9. UV 에폭시를 이용하여 이터븀 도핑된 광섬유를 석영 블록에 고정 한 모습 34

그림 3-10. 측면 가공된 이터븀 도핑된 광섬유의 측면 가공 위치 확인 34

그림 3-11. 측면 가공이 완료된 이터븀 도핑된 광섬유 34

그림 3-12. 측면 가공 광섬유 커플러에 장착된 측면 가공된 이터븀 도핑된 광섬유 한 쌍 35

그림 3-13. 각각의 측면 가공 광섬유 커플러 개략도 36

그림 3-14. 측면 가공 광섬유 커플러로 구성된 마이컬슨 간섭계 개략도 37

그림 3-15. 측면 가공 측면 가공 광섬유 커플러를 이용해 구성된 간섭계의 개략도 38

그림 3-16. 980 nm 펌프 광원의 동작 전류에 따른 광원 출력 특성 40

그림 3-17. 980 nm 펌프 광원의 동작 전류에 따른 WDM 커플러 투과 광세기 ... 41

그림 4-1. 1310 nm에서 측면 가공 광섬유 커플러의 특성을 확인하기 위한 시스템 개략도 43

그림 4-2. 단일모드 측면 가공 광섬유 커플러의 각 포트별 투과 광세기(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 44

그림 4-3. 단일모드 측면 가공 광섬유 커플러의 각 포트별 분할 비율(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 45

그림 4-4. 샘플 #1의 개략도 47

그림 4-5. 샘플 #1의 각 포트별 투과 광세기(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 47

그림 4-6. 샘플 #1의 각 포트별 각 포트별 분할 비율(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 48

그림 4-7. 샘플 #2의 개략도 50

그림 4-8. 샘플 #2의 각 포트별 투과 광세기(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 50

그림 4-9. 샘플 #2의 각 포트별 각 포트별 분할 비율(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 51

그림 4-10. 샘플 #3의 개략도 53

그림 4-11. 샘플 #3의 각 포트별 투과 광세기(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 53

그림 4-12. 샘플 #3의 각 포트별 각 포트별 분할 비율(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 54

그림 4-13. 샘플 #1의 각 포트별 각 포트별 광세기(@ 980 nm) (a) Port A에 입사했

을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 55

그림 4-14. 샘플 #1의 각 포트별 각 포트별 분할 비율(@ 980 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 56

그림 4-15. 샘플 #2의 각 포트별 각 포트별 광세기(@ 980 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 57

그림 4-16. 샘플 #2의 각 포트별 각 포트별 분할 비율(@ 980 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 58

그림 4-17. 샘플 #3의 각 포트별 각 포트별 광세기(@ 980 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 59

그림 4-18. 샘플 #3의 각 포트별 각 포트별 분할 비율(@ 980 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때 60

그림 4-19. 샘플 #1에서 신호광을 Port A에, 펌프광을 Port 1에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 62

그림 4-20. 샘플 #1에서 신호광을 Port A에, 펌프광을 Port 2에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 62

그림 4-21. 샘플 #1에서 신호광을 Port B에, 펌프광을 Port 1에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 63

그림 4-22. 샘플 #1에서 신호광을 Port B에, 펌프광을 Port 2에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 63

그림 4-23. 샘플 #1에서 신호광을 Port 1, 펌프광을 Port A에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 64

그림 4-24. 샘플 #1에서 신호광을 Port 1, 펌프광을 Port B에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 64

그림 4-25. 샘플 #1에서 신호광을 Port 2, 펌프광을 Port A에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 65

그림 4-26. 샘플 #1에서 신호광을 Port 2, 펌프광을 Port B에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 65

그림 4-27. 샘플 #2에서 신호광을 Port A, 펌프광을 Port 1에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 66

그림 4-28. 샘플 #2에서 신호광을 Port A, 펌프광을 Port 2에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 66

그림 4-29. 샘플 #2에서 신호광을 Port B, 펌프광을 Port 1에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 67

그림 4-30. 샘플 #2에서 신호광을 Port B, 펌프광을 Port 2에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 67

그림 4-31. 샘플 #2에서 신호광을 Port 1, 펌프광을 Port A에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 68

그림 4-32. 샘플 #2에서 신호광을 Port 1, 펌프광을 Port B에 입사했을 때 (a) 눈금

에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 68

그림 4-33. 샘플 #2에서 신호광을 Port 2, 펌프광을 Port A에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 69

그림 4-34. 샘플 #2에서 신호광을 Port 2, 펌프광을 Port B에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 69

그림 4-35. 샘플 #3에서 신호광을 Port A, 펌프광을 Port 1에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 70

그림 4-36. 샘플 #3에서 신호광을 Port A, 펌프광을 Port 2에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 70

그림 4-37. 샘플 #3에서 신호광을 Port B, 펌프광을 Port 1에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 71

그림 4-38. 샘플 #3에서 신호광을 Port B, 펌프광을 Port 2에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 71

그림 4-39. 샘플 #3에서 신호광을 Port 1, 펌프광을 Port A에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 72

그림 4-40. 샘플 #3에서 신호광을 Port 1, 펌프광을 Port B에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 72

그림 4-41. 샘플 #3에서 신호광을 Port 2, 펌프광을 Port A에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 73

그림 4-42. 샘플 #3에서 신호광을 Port 2, 펌프광을 Port B에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과 73

그림 4-43. 이터븀 도핑된 광섬유 길이별 인가한 펄프 양에 따른 간섭 신호 (a) 10 cm, (b) 6.7 cm, (c) 6 cm, (d) 5 cm, (e) 4 cm, (f) 3.3 cm 75

그림 4-44. 이터븀 도핑된 광섬유 길이별 인가한 펄프 양에 따른 위상 이동량 (a) 10 cm, (b) 6.7 cm, (c) 6 cm, (d) 5 cm, (e) 4 cm, (f) 3.3 cm 76

그림 4-45. 커플러 샘플별 펄프 양에 따른 위상 이동량 (a) Sample #1, (b) Sample #2, (c) Sample #3 77

List of Tables

표 2-1. 제작 방법에 따른 커플러 특징	8,9
표 3-1. 단일모드 광섬유의 특성	29
표 3-2. 이터븀 도핑된 광섬유의 특성	32
표 3-3. 1310 <i>nm</i> 광원 특성	39
표 3-4. 980 <i>nm</i> 펌프 광원 특성	39
표 3-5. 사용한 WDM의 특성	40
표 3-6. 사용한 집광기(Collimator)의 특성	41

ABSTRACT

Development of ytterbium-doped fiber side-polished coupler with the independently controllable function of both variable splitting ratio and phase shifts

Hyun Sung Kim

Advisor : Prof. Eun Seo Choi, Ph.D.

Department of Physics

Graduate School of Chosun University

In this paper, a side-polished fiber coupler was fabricated using ytterbium-doped optical fiber and its properties were measured. The fabricated side-polished fiber coupler has a variable split ratio and can perform phase shifts independently. The split ratio characteristics of the fabricated side-polished fiber couplers were similar to those of single-mode fibers. To verify the phase-shifting characteristics, a phase-shifting interferometer was constructed using the side-polished ytterbium-doped fiber coupler, and the phase-shifting characteristics were analyzed from the generated interference signals. Sufficient phase-shifting could be induced by adjusting screw to change the split ratio. From the measurement results of the phase shifts caused by the pump light while maintaining a fixed split ratio, the fabricated side-polished ytterbium-doped fiber coupler was able to induce a phase shift of about 2π . The qualitative dependence of the phase shift on the length of the ytterbium-doped optical fiber used was also confirmed. We have shown that the side-polished fiber coupler fabricated with ytterbium-doped optical fiber can arbitrarily adjust the splitting ratio and can independently control the phase shift using external pump light. The development of photonic devices that can independently control these two functions is expected to increase their usefulness in various applications.

제 1 장 서 론

광섬유는 유리 또는 플라스틱으로 만들어진 길고 얇은 원통형의 광도파로이다. 광섬유의 한쪽 끝에 빛을 입사시키면 광섬유 코어와 클래딩의 굴절률 차이에 의한 전반사에 의해 빛의 손실이 거의 없이 광섬유의 반대쪽 끝까지 진행한다. 이러한 장점 때문에 현대 사회에서 광섬유는 통신, 레이저, 검사 장비, 의료, 조명, 예술 등의 다양한 분야에서 사용되고 있다.

광섬유는 광통신에서 이용하는 광도파로로 광섬유를 통해 신호를 주로 받는다. 기존에 구리선을 사용하여 통신 신호를 주고받던 방식은 여러 가지 단점들이 있었다. 통신 신호로 전기 신호를 이용하기 때문에 외부의 전자기파에 의한 간섭으로부터 자유로울 수가 없었고 그로 인한 통신 신호의 왜곡이 쉽게 발생하였다. 또한, 구리선을 통해 통신을 하게 되면 구리선 자체의 저항으로 인해 발생하는 발열 문제가 발생할 수 있다. 하지만 광통신은 광으로 하기 때문에 전자기파 간섭 현상으로 인한 신호 왜곡이 거의 없는 장점을 가질 수 있다[1,2]. 광통신에서 광신호를 손실이 없이 장거리 통신을 하기 위해서 광섬유를 이용하고 있다. 광섬유는 의료 분야에서도 많이 사용하는데, 대표적인 예가 내시경이다[3,4]. 얇고 긴 광섬유의 특징으로 인해 접근하기 어려운 좁은 공간에 삽입하기 쉽기 때문에 내부 장기에 빛을 전달하고 표면에서 반사된 빛을 수광하는데 이용하고 있다. 최근에는 혈관 촬영에도 사용되어 혈류 정보를 얻는 데도 사용되고 있다. 광간섭 단층영상 기법(OCT, Optical Coherence Tomography)은 빛의 간섭성을 이용하여 표본의 단층 영상을 얻을 수 있는데 주로 투명도가 높은 각막이나 망막과 같은 샘플을 대상으로 하는 안과 의료 기술로써 사용되고 있다[5,6].

광섬유 커플러는 광섬유 레이저 또는 증폭기 시스템에서 사용되고 있다. 레이저를 동작시키기 위해서는 이득 매질에 펌프광을 인가해야 하고 증폭된 광은 외부로 일정 부분 방출되어야 한다. 광섬유로 구성된 링 레이저에서는 광섬유 커플러를 이용하여 서로 다른 파장 대역의 광을 합치거나 분배하는 기능을 광섬유 내부에서 광손실 없이 수행할 수 있다. 광섬유 커플러를 이용하는 다른 응용 분야로는 양자 광학 실험 및 양자 정보 처리 시스템을 고려할 수 있다. 양자 통신을 위한 얽힌 광원 상태를 생성하고, 양자 간섭 실험을 수행하며, 장거리에 걸쳐 양자 상태를 배포하는 데 사용될

수 있다. 광섬유 커플러는 광자에 인코딩된 양자 정보의 조작 및 배포를 가능하게 하는 데도 중요한 역할을 한다. 또 다른 응용 분야로는 광신호를 한 곳에 모으거나 다른 여러 곳으로 분배할 수 있기 때문에 한 신호를 다양한 사용자 또는 장치에 분배해야 하는 광통신 분야에도 널리 사용된다. 또한, 광섬유 커플러는 입력 광을 여러 단으로 분할하여 서로 다른 광학 경로 간의 간섭을 가능하게 할 수 있기 때문에 간섭계의 구성에 필수적으로 사용된다. 광섬유 커플러를 이용하여 얻은 간섭은 환경의 물리량, 변화 또는 교란, 위상 이동을 측정하는 데 사용된다.

OCT는 간섭계를 이용하여 획득한 간섭 신호를 분석하여 영상화함으로써 안구의 구조를 파악한다. 의료 분야에서 간섭계를 이용하여 OCT와 같이 생체의 단층 영상을 획득할 수 있었다. 천문학에서는 간섭계를 이용하여 천체의 특성을 파악하기 위해서 이용하고 있으며 박막이나 코팅의 두께를 측정하는 재료 분야에서도 간섭계를 이용하고 있다[7,8]. 간섭계는 광원에서 나온 빛을 빔 분할기를 이용해 두 갈래로 나뉘고, 양 팔의 거울에서 반사되어 돌아오는 두 빛을 모아 측정한다. 이 때 나뉜 두 빛의 진행 거리나 전파 속도가 서로 조금이라도 차이가 발생하면 간섭무늬가 나타난다 [9,10,11]. 간섭계를 광섬유로 구성할 경우, 빔 분할기 대신 광섬유 커플러라는 광섬유 광학 소자를 이용한다. 광섬유 커플러를 이용하면 빛을 공기 중으로 노출하지 않고 광섬유 내에서 분할시킬 수 있다. 그러므로 빛을 공기 중으로 노출하지 않아 광 손실을 줄일 수 있고, 광섬유를 빠져나온 빛을 다시 광섬유로 입사시키기 위한 광 정렬을 할 필요가 없다는 장점이 있다.

본 연구에서는 이터븀 도핑된 광섬유(Ytterbium-doped Fiber)를 사용하여 빛 분할 비율을 조절할 수 있는 측면 가공 광섬유 커플러를 제작하여 분할 비율이 고정된 광섬유 커플러를 대체하여 사용자의 필요에 맞는 분할 비율을 직접 조절할 수 있게 제작하고자 하였다. 이터븀 도핑된 광섬유는 외부 펌프광이 입사하면 광섬유 코어에서 비선형 굴절률의 변화가 나타난다. 이러한 특징을 이용하여 위상 이동자로 활용할 수 있다. 그러므로 이터븀 도핑된 광섬유 커플러를 측면 가공하여 제작함으로써 분할 비율이 사용자의 필요에 따라 변경이 가능한 분할비 가변이 가능한 커플러의 기능과 펌프광의 입사 조건에 따라 위상 이동량의 제어가 가능한 위상 이동자로서의 기능을 동시에 구현하고자 하였다. 실험을 통해 측정된 가변 분할기 특성과 펌프광과 이터븀 도핑된 광섬유 길이에 따른 위상 이동 특징을 제시하고 독립적으로 이 두 기능이 구현이 가능함을 보이고자 하였다.

제 2 장 광섬유 커플러 동작 이론

제 1 절 광섬유 커플러

1. 광섬유 커플러의 동작 원리

광섬유 커플러는 단일 광신호 또는 다중 광신호를 하나로 합치거나 여러 개로 나누는 기능을 수행하는 광섬유 소자이다. 보통 광섬유 커플러는 광섬유의 코어를 서로 근접하게 만들어 한 광섬유에서 다른 광섬유로 빛이 전달되게 만든다. 광섬유 커플러는 제작 방법과 응용 분야에 따라서 종류가 나뉘어진다. 한 광섬유에 입사한 빛이 코어가 근접한 영역을 통과하면서 일부의 빛은 그대로 통과하고 일부의 빛은 다른 광섬유로 전달되는데, 이때 나누어진 각각의 빛의 광세기 비율을 분할 비율이라고 하며, 이는 광섬유 커플러의 중요한 특징 중의 하나이다. 광섬유 커플러에서 광이 전달되는 과정을 그림 2-1에 나타내었다.

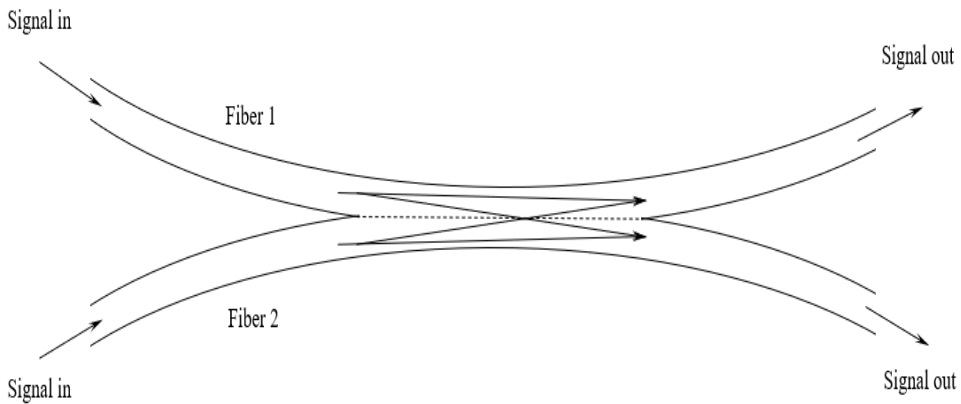


그림 2-1. 광섬유 커플러 내부에서 각각의 광섬유로 입사한 광신호가 전달되는 모습

광섬유 커플러는 광결합을 통해서 작동하기 때문에 두 광섬유 간의 모드 결합 정도가 매우 중요하다. 한 광섬유에서 다른 광섬유로 빛이 전달되기 위해서는 두 광섬유 모드 간의 중첩이 필요하다. 광섬유의 모드 중첩이 어느 정도로 일어나는지에 대한 척도를 결합 계수 c 라고 한다.

$$c = \frac{\omega}{2} \int_A (\epsilon_1 - \epsilon) \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2^* dA \quad (2-1)$$

여기서, ω 는 빛의 각 진동수, ϵ_1 은 코어 유전율, ϵ 은 클래딩의 유전율, \mathbf{e}_1 은 첫 번째 광섬유의 전파 방향과 무관한 전기장 벡터 함수, \mathbf{e}_2 는 두 번째 광섬유의 전파 방향과 무관한 전기장 벡터 함수이다.

이때 강자성 물질이 아닌 경우, 유전율 ϵ 은 굴절률 n 과 다음과 같은 관계를 가진다.

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (2-2)$$

여기서, ϵ_0 는 진공에서의 유전율이다.

식 (2-1)은 식 (2-2)를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c = \frac{\omega \epsilon_0}{2} \int_A (n_1^2 - n^2) \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2^* dA \quad (2-3)$$

여기서, n_1 은 첫 번째 광섬유의 코어 굴절률이다.

광섬유와 같이 원통형 시스템의 전자기장 모드는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}(x, y, z) &= \mathbf{e}(x, y) e^{i\beta z} \\
 \mathbf{H}(x, y, z) &= \mathbf{h}(x, y) e^{i\beta z}
 \end{aligned} \quad (2-4)$$

여기서, \mathbf{E} 는 전기장을 \mathbf{H} 는 자기장을 나타낸다. β 는 모드 전파 상수이다.

그러면 식 (2-3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c = \frac{\omega \epsilon_0}{2e^{i\beta z}} \int_A (n_1^2 - n_2^2) \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2^* dA \quad (2-5)$$

굴절률 n 은 첫 번째 광섬유 주변 물질의 굴절률인데, 두 개의 광섬유가 서로 맞닿아 있다면 굴절률 n 을 두 번째 광섬유의 코어 굴절률 n_2 로 쓸 수 있다. 그러면 식 (2-5)은 다음과 같다.

$$c = \frac{\omega \epsilon_0}{2e^{i\beta z}} \int_A (n_1^2 - n_2^2) \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2^* dA \quad (2-6)$$

이 식에 따르면, 결합 계수 c 는 각각의 광섬유의 전기장 모드뿐만 아니라 각각의 광섬유의 굴절률에 의해서도 변할 수 있다는 것을 알 수 있다[12,13].

2. 광섬유 커플러의 제작 방법

광섬유 커플러는 두 개 또는 다수의 광섬유들이 서로 결합되어 한 광섬유에서 다른 광섬유로 빛을 일부 전달할 수 있게 제작된 광소자이다. 광섬유 커플러는 어떤 광섬유를 사용하는지, 어떤 방법으로 제작하는지에 따라서 구분할 수 있다.

(1) 융합 광섬유 커플러(Fused Fiber Coupler)

융합 광섬유 커플러는 두 개 이상의 광섬유를 열적으로 융합하여 제작한다. 보통 융합 접합기를 사용하여 광섬유를 융합한다. 준비된 광섬유는 정밀 기계 고정 장치 또는 자동 정렬 시스템에 고정하여 원하는 구성(예: 2×2 커플러의 경우 나란히)으로 광섬유가 정렬되도록 한다. 일반적으로 전기 아크 또는 레이저를 사용하여 융합에 필요한 열을 생성하고, 광섬유에 국부적인 부분에만 열을 가하여 광섬유를 녹이고 융합시킨다. 융합이 끝나면 융합 부위를 식히고 외부 충격으로부터 보호하기 위한 보호 코팅을 부착함으로써 완성된다.

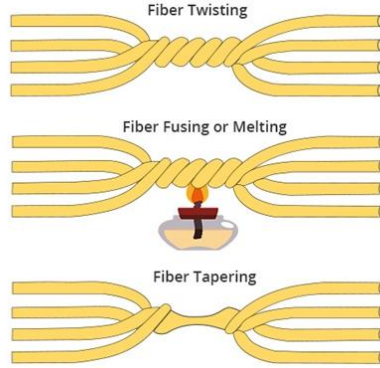


그림 2-2. 융합 광섬유 커플러 제작 방법[14]

(2) 감쇠장 커플러(Evanescent Field Coupler)

감쇠장 커플러는 평면 도파관과 단일모드 광섬유 사이의 공명을 이용하여 제작한다. 단일모드 광섬유의 모드가 비대칭 다중모드 평면 도파관의 고차 모드에 결합될 때 커플러의 효과가 증명되었다[15]. 다중모드 평면 도파관의 단일모드 광섬유를 가깝게 배치하면서 결합 정도를 확인할 수 있다. 이때 다중모드 평면 도파관의 단일모드 광섬유 사이의 간격은 결합 강도를 결정하며 간격에 따라 원하는 결합 비율을 얻을 수 있다. 이후 다중모드 평면 도파관의 단일모드 광섬유 사이에 굴절률 정합액 등을 사용하여 커플링 효과를 증가시킨다.

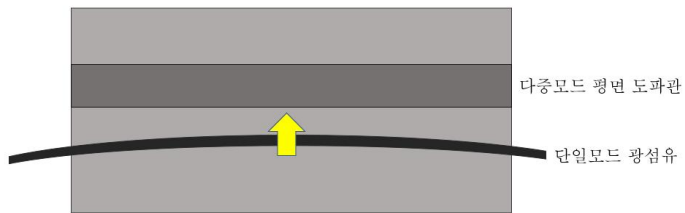


그림 2-3. 감쇠장 커플러 구조

(3) 평면 도파관 커플러(Planar Waveguide Coupler)

평면 도파관 커플러는 평면 기판에 도파관으로써 사용할 수 있는 재료를 증착하는 방법으로 광결합을 유도한다. 평면 기판에 원하는 결합 비율이나 성능 요구 사항을 반영하여 도파관 구조를 설계한다. 도파관은 평면 기판에 화학적 증기 증착 (Chemical vapor deposition, CVD)나 스퍼터링 등의 증착 기술을 사용하여 도파관 재료를 평면 기판에 증착시킨다. 이후 도파관 층에 감광성 레지스트 재료를 도포한다. 그 이후에 도파관 패턴을 따라 레지스트를 자외선 광에 노출시킨다. 건식 에칭 (플라즈마 에칭) 또는 습식 에칭과 같은 에칭 기술을 사용하여 무늬가 새겨진 레지스트 다음의 도파관 재료를 선택적으로 제거한다. 에칭 작업이 끝나면 원하는 도파관 구조가 완성됨으로써 커플러로 사용할 수 있다.

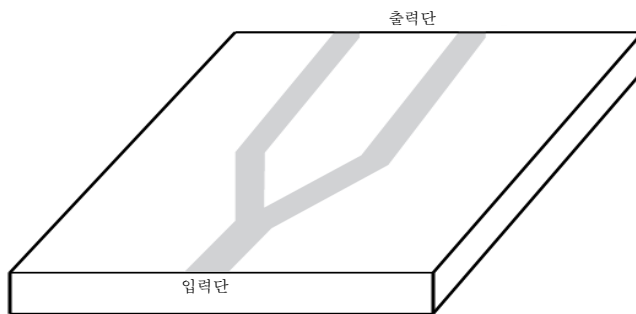


그림 2-4. 출력이 두 개로 분할되는 평면 도파관 커플러 구조

(4) 측면 가공 광섬유 커플러(Side-Polished Fiber Coupler)

측면 가공 광섬유 커플러는 두 개의 광섬유의 측면을 각각 가공하고 맞댐으로써 광결합을 유도할 수 있다. 먼저 광섬유를 정밀 연마 장치에 고정하거나 특수 측면 연마 도구에 장착한다. 광섬유의 측면을 가공하기 위해 표면이 평평한 연마 판이나 연마 필름을 이용하는데 이 때 광섬유의 측면이 가공 판이나 필름과 접촉하도록 광섬유를 연마 필름에 접촉시킨다. 측면을 가공하기 위해서는 광섬유를 연마

판이나 필름에 대해 문지르면서 부드러운 압력을 가한다. 이 과정에서 광섬유의 클래딩이나 코어의 일부를 제거하여 광섬유 측면에 평평하거나 각진 광택 표면이 만들어진다. 이때 광섬유의 가공 면에 굴절률 정합액을 얇게 발라 다른 측면 가공 광섬유와의 결합이 용이하게 만든다. 광섬유의 가공된 면을 다른 광섬유의 가공된 면에 맞게 함으로써 광결합 효과를 얻을 수 있다.

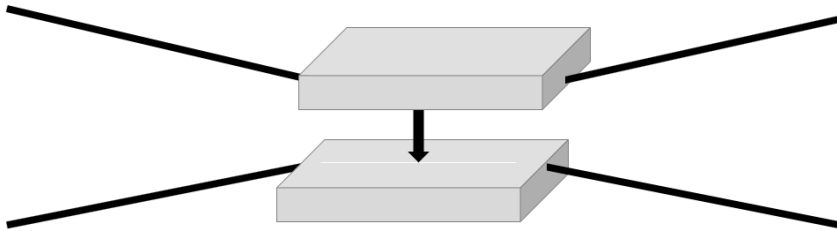


그림 2-5. 측면 가공 커플러 구조

3. 광섬유 커플러의 제작 방법에 따른 특징

광섬유 커플러는 제작 방법에 따라 다른 특징을 가지진다. 광학계를 구성할 때 요구되는 특성에 따라 알맞은 광섬유 커플러를 사용해야 한다. 표 2-1은 앞서 소개했던 커플러의 주요 특징들을 정리한 것이다.

표 2-1. 제작 방법에 따른 커플러 특징

종 류	특 징
융합 광섬유 커플러 (Fused Fiber Coupler)	<ul style="list-style-type: none"> 가장 일반적인 제작 방법 다수의 광섬유를 한 번에 결합할 수 있음 분할 비율이 단 한 가지로 고정됨 분할 비율 정도는 광섬유 융합 구역 길이에 따라 달라지며 파장과는 무관함
감쇠장 광섬유 커플러 (Evanescent Field Coupler)	<ul style="list-style-type: none"> 광섬유 외부로 전자기장이 확장하는 감쇠장을 이용 광섬유의 감쇠장 부근에 다른 광섬유를 접근시킴 접근 거리에 따라 분할 비율이 결정

<p>평면 도파관 커플러 (Planar Waveguide Coupler)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 평평한 기판에 다른 굴절률을 가지는 재료를 증착함 • 증착된 재료가 광도파로 역할을 함 • 출력단으로 이어지는 증착 재료의 입력단에서의 갈라진 각도에 따라 분할 비율이 결정됨
<p>측면 가공 광섬유 커플러 (Side-Polished Fiber Coupler)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 광섬유 외부에서 코어에 가까워지게 클래딩을 제거함 • 측면 가공 위치가 코어에 가까워질수록 광손실이 증가 • 측면 가공 광섬유로 광손실과 수광을 모두 수행함으로써 빛을 분할함 • 측면 가공 위치를 조절함으로써 분할 비율 조절

본 연구에서는 다양한 광섬유 커플러 제작 방법 중에서 측면 가공을 통해 광섬유 커플러를 제작하였다. 측면 가공 광섬유는 보호 피복이 없는 코어와 클래딩으로만 이루어진 광섬유에 곡률을 주어 석영 블록에 고정하고 그림 2-6과 같이 측면을 가공하여 클래딩을 제거함으로써 가공된 부분에서 광손실을 유도한다. 광섬유의 측면을 가공하려면 광섬유를 고정해주는 보조 수단이 필요하다[16].

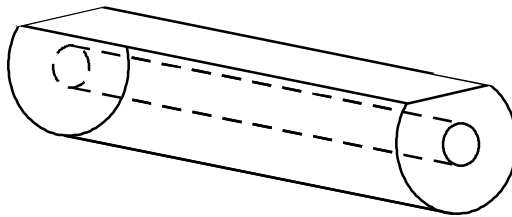


그림 2-6. 측면 가공된 광섬유

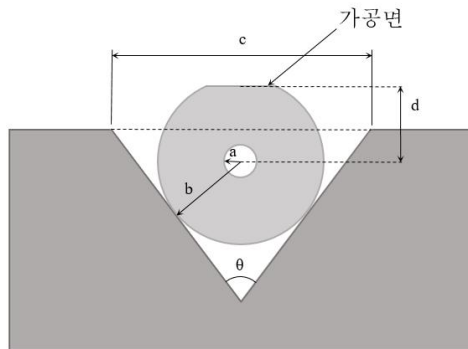


그림 2-7. 석영 블록에 고정된 광섬유의 단면도

V자 블록에 놓인 광섬유의 단면도는 그림 2-7과 같다. 광섬유의 측면이 가공되어 갈수록 가공 단면은 점점 코어와 가까워진다. 이때 광섬유의 코어 반지름을 a , 클래딩 반지름을 b , 블록의 끝면의 단면에서 V자 홈의 폭을 c , 광섬유 코어가 V자 홈에 들어간 깊이를 d , V자 홈이 파여진 각도를 θ 라고 한다면, d 는 식 (2-7)과 같이 쓸 수 있다.

$$d = \frac{c}{2} \cot \frac{\theta}{2} - bc \csc \frac{\theta}{2} \quad (2-7)$$

광섬유의 코어에서 클래딩으로 빠져나와 측면 가공된 부분에서 광손실이 발생한다. 그러므로 광손실은 d 가 아닌 $d - a$ 를 고려해야 한다.

광섬유의 코어 반지름 a 와 코어의 굴절률 n_{co} , 클래딩의 굴절률 n_{cl} 과 관련된 광섬유의 중요한 매개변수가 또 한 가지 있는데 이는 V 수이다. 빛이 광섬유를 통과하면서 지날 수 있는 경로를 모드라고 하는데, 단일모드 광섬유는 단 한가지 모드만 가능하고 다중모드 광섬유는 여러 가지 모드를 가질 수 있다. 광섬유의 모드 수는 정규화된 주파수 또는 V 수라고 하는 매개변수로 알 수 있으며, 광섬유가 단일모드 광섬유로 작동하기 위한 조건은 $V < 2.405$ 이다. 광섬유에서 V 수는 다음과 같다.

$$V = \frac{\pi}{\lambda} a (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2} \quad (2-8)$$

광섬유를 측면 가공하여 클래딩이 제거된 공간에 채워진 물질의 굴절률을 n_{ex} 라고 하면, 클래딩과 클래딩이 제거된 곳의 V 수는 다음과 같다.

$$V_{ex} = \frac{\pi}{\lambda} a (n_{ex}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}, \quad \text{단, } n_{ex} > n_{cl} \quad (2-9)$$

즉, 클래딩이 제거된 부분이 공기 또는 다른 물질 등의 굴절률이 다른 물질로 채워지게 된다면, V 수가 바뀌게 되고, 광섬유의 유도 모드의 유도 굴절률이 바뀌게 된다. 또한, 이 유도 모드에 미치는 영향은 $d - a$ 가 감소함에 따라 증가한다. 만약, n_{ex} 가 유효 굴절률 n_{eff} 보다 큰 경우에는 가공 전 광섬유에 유도된 전력은 체렌코

포 방사선이라고 알려진 방사 각도의 방향으로 방사된다[17].

$$\cos \theta_R = \frac{n_{eff}}{n_{ex}} \quad (2-10)$$

$$\theta_R = \cos^{-1} \frac{n_{eff}}{n_{ex}} \quad (2-11)$$

또한, 광섬유의 측면을 가공함으로써 발생하는 손실에 대해서 전력 감쇠 상수라는 값으로 표현한 두 가지 방정식이 있다.

LZ Formula

Leminger와 Zengele는 전력 감쇠 상수에 대해 광섬유의 기본 모드와 외부 물질의 방사선 모드 사이의 결합으로 접근하였다. LZ Formula의 전력 감쇠 상수 α 는 다음과 같다[17,18,19].

$$\alpha = \frac{4\sqrt{2}}{a} \frac{1-b}{V} \sqrt{\Delta(1+2\Delta b)} \frac{V_{ex}^2 - bV^2}{V_{ex}^2 K_1^2[V\sqrt{b}]} \quad (2-12)$$

$$\times \int_0^1 \sqrt{1-x^2} \exp\left[-\frac{2Vd}{a} \sqrt{\left(\frac{V_{ex}^2}{V^2} - b\right)x^2 + b}\right] dx$$

여기서, a 는 광섬유의 코어 반경, b 는 광섬유 클래딩의 반경, d 는 코어 중심부터 가공면까지의 거리, V 는 광섬유 기본 모드의 V 수, V_{ex} 는 클래딩과 외부 물질 사이의 모드의 V 수이다. Δ 는 $(n_{co} - n_{cl})/n_{co}$ 로 정의되고, K_1 은 1차 제 2종 베셀 함수이다[17,20].

Vassallo's Formula

Vassallo는 측면 가공 광섬유의 전파 장을 표현하기 위해서 평면파 확장을 기반으로 접근하였다. Vassallo's Formula의 전력 감쇠 상수 α 는 다음과 같다.

$$\alpha \approx \frac{4\sqrt{2\Delta}}{a(1+2b\Delta)} \frac{1-b}{K_1^2 V \sqrt{b}} \frac{\sqrt{b(V_{ex}^2 - bV^2)}}{V_{ex}^2} K_0\left[\frac{2\sqrt{b} Vd}{a}\right] \quad (2-13)$$

여기서, a 는 광섬유의 코어 반경, b 는 클래딩의 반경, d 는 코어 중심부터 가공면까지의 거리, V 는 광섬유 기본 모드의 V 수, V_{ex} 는 클래딩과 외부 물질 사이의 모드의 V 수, $\Delta = (n_{co} - n_{cl})/n_{co}$, K_0 는 0차 제 2종 베셀 함수, K_1 는 1차 제 2종 베셀 함수이다.

이 두 방정식을 통해 측면 가공된 광섬유의 전력 감쇠 상수를 계산할 수 있고, 가공 깊이에 따라서 예상되는 손실 정도를 유도할 수 있다[17]. 단일모드 광섬유의 코어 반경 $a = 5\mu m$, 클래딩의 반경 $b = 62.5\mu m$, 코어의 굴절률 $n_{co} = 1.448$, 클래딩의 굴절률 $n_{cl} = 1.445$ 일 때, 단일모드 광섬유의 기본 모드의 V 수는 $V = 1.13$ 이고 비굴절률 차 $\Delta = 0.00207$ 이다. 또한, 외부 물질이 굴절률 $n_{ex} = 1.464$ 을 가진 경우 클래딩과 외부 물질 사이의 모드 V 수는 $V_{ex} = 2.81$ 이다. 단일모드 광섬유의 코어 반경은 $5\mu m$ 이므로 가능한 측면 가공 거리는 $0 \sim 57.5\mu m$ 이다. 이 상수 값을 통해 단일모드 광섬유의 가공 거리에 따른 전력 감쇠 상수를 계산하였다. 이터븀 도핑된 광섬유의 코어 반경 $a = 2\mu m$, 클래딩의 반경 $b = 62.5\mu m$, 코어의 굴절률 $n_{co} = 1.451$ 클래딩의 굴절률 $n_{cl} = 1.445$ 일 때, 이터븀 도핑된 광섬유의 기본 모드의 V 수는 $V = 0.625$ 이고 비굴절률 차 $\Delta = 0.00414$ 이다[21]. 또한, 외부 물질이 굴절률 $n_{ex} = 1.464$ 을 가진 경우 클래딩과 외부 물질 사이의 모드 V 수는 $V_{ex} = 1.124$ 이다. 이터븀 도핑된 광섬유의 코어 반경은 $2\mu m$ 이고, 클래딩의 반경은 $62.5\mu m$ 이므로 가능한 측면 가공 거리는 $0 \sim 60.5\mu m$ 이다. 이터븀 도핑된 광섬유도 단일모드 광섬유와 동일하게 계산하였다.

그림 2-8과 그림 2-9는 가공된 클래딩에서부터 코어의 중심까지의 거리를 $30\mu m$ 에서부터 $0\mu m$ 까지의 범위에 대해서 단일모드 광섬유와 이터븀 도핑된 광섬유의 감쇠 계수를 각각 그린 그래프이다.

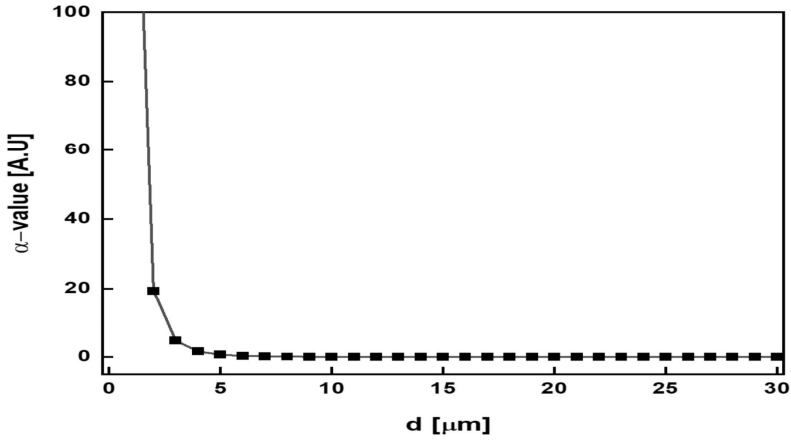


그림 2-8. 단일모드 광섬유의 측면 가공 거리에 따른 전력 감쇠 상수

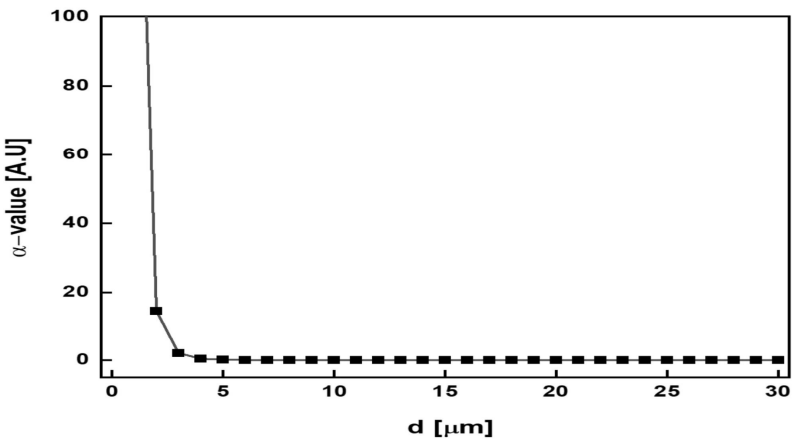


그림 2-9. 이터븀 도핑된 광섬유의 측면 가공 거리에 따른 전력 감쇠 상수

코어 중심부터 가공면까지 거리 d 가 감소할수록 전력 감쇠 상수 α 가 증가함을 확인할 수 있다. 또한 전력 감쇠 상수는 식(2-14)에 의해 입사 광세기와 투과 광세기의 비율의 지수함수로 표현되므로 측면 가공 거리에 따라 투과 광세기와 전달된 광세기를 확인할 수 있다.

$$\alpha x = \ln \frac{I_0}{I_x} \quad (2-14)$$

코어 중심부터 가공면까지 거리 d 가 감소할수록 투과 광세기가 줄어들고 그 양만큼 손실 광세기가 커진다. 측면 가공 광섬유에서 거리 d 가 감소할수록 광을 전달받는 광섬유가 수광할 수 있는 광세기가 커질 수 있다. 그림 2-10과 그림 2-11은 광감쇠 계수를 100% 투과되는 경우에 대해 정규화한 그래프이다.

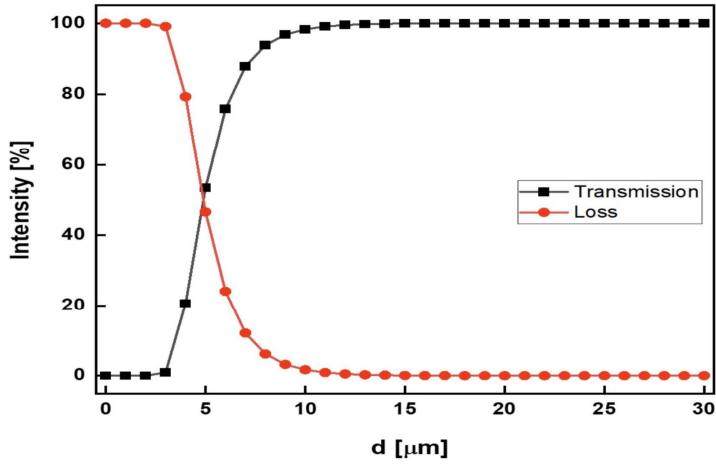


그림 2-10. 단일모드 광섬유의 측면 가공 거리에 따른 투과 광세기와 전달 광세기

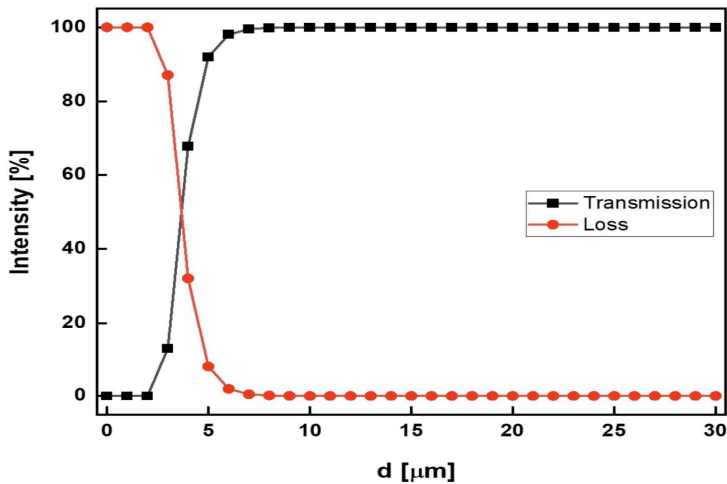


그림 2-11. 이터븀 도핑된 광섬유의 측면 가공 거리에 따른 투과 광세기와 전달 광세기

단일모드 광섬유를 측면 가공하는 경우 약 $10 \mu m$ 정도의 거리가 되면 광손실이 발생하기 시작하였다. 이 정도의 거리면 아직은 코어를 가공하지는 않았지만 코어를 통해서 전달되는 광신호가 외부로 나오기 시작하는 깊이로 판단된다. 여기서부터 약간의 거리 변화에도 매우 민감하게 광손실이 발생하는 것을 그림 2-10으로부터 알 수 있다. 이러한 특성은 이터븀 도핑된 광섬유의 경우에도 유사한 형태를 나타내고 있다. 그림 2-11을 살펴보면 유사한 광감쇠 특성을 보인다. 두 광섬유를 측면 가공한 경우 광손실에 대한 민감도는 투과광을 이용하여 비교함으로써 보다 세밀하게 파악이 가능하다. 그림 2-10와 그림 2-11를 살펴보면 단일모드 광섬유의 경우 광손실이 $10 \mu m$ 정도에서 시작하지만 이터븀 도핑된 광섬유의 경우에는 $10 \mu m$ 미만인 거리에서 시작된다. 그러므로 측면 가공에 따른 광손실을 제어하는데 있어서 이터븀 도핑된 광섬유가 더 정밀한 가공 제어가 필요하다는 것을 확인할 수 있는 점이다. 이러한 점에서 이터븀 도핑된 광섬유의 광손실은 측면 가공에서의 정밀한 제어가 필요할 것이고 이는 커플러의 성능의 재현성을 고려한다면 매우 민감하기 때문에 제작에서의 어려움이 있을 것으로 예상된다.

제 2 절 광섬유의 비선형 굴절률 변화

1. 광섬유의 비선형 굴절률 변화 원리

물질의 비선형성은 빛과 물질의 상호작용을 통해 물질의 광학적 특성을 변화시키기 때문에 광학에서는 매우 흥미로운 현상이다[22]. 일반적으로 비선형 현상은 강한 전기장이 매질에 입사하는 경우 물성의 변화로 인해 나타난다. 이러한 효과는 편광으로 설명되고 일반적으로 아래와 같은 식 (2-15)와 같이 표현된다.

$$\bar{P} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \bar{E} + \epsilon_0 \chi^{(2)} \bar{E}^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} \bar{E}^3 + \dots \quad (2-15)$$

여기서 $\chi^{(1)}$ 은 물질의 선형 흡수 또는 선형 굴절률 등의 선형 반응 감수율이고, $\chi^{(2)}$ 와 $\chi^{(3)}$ 는 2차 비선형 감수율과 3차 비선형 감수율이다. 여기서 3차 비선형 감수율 $\chi^{(3)}$ 는 3차 고조파 생성, 4파 혼합(Four-wave mixing) 그리고 비선형 굴절 현상과 관련이 있다. 광섬유의 비선형 굴절률은 이 3차 비선형 감수율 $\chi^{(3)}$ 와 관련이 있다. 광섬유의 유효 굴절률은 일반적으로 다음 식 (2-16)의 형태를 따른다.

$$n(\omega, I) = n(\omega) + n_2 I \quad (2-16)$$

여기서, $n(\omega)$ 은 진동수 ω 에서 굴절률의 선형 부분이고, n_2 는 3차 비선형 감수율 $\chi^{(3)}$ 과 관련된 비선형 파라미터이고 I 는 광세기이다. 즉, 광섬유의 비선형 굴절률은 광세기에 의존하며, 광세기가 증가하면 광섬유의 비선형 굴절률이 증가한다[23].

2. 이터븀 도핑된 광섬유를 이용한 위상 이동자

이터븀 도핑된 광섬유에 펄스광을 입사시키면 광섬유의 비선형적 효과에 의해 코어의 굴절률이 변한다. 이터븀 도핑된 광섬유의 비선형 특징으로 인한 굴절률 변화를 이해하기 위해서는 비선형 감수율을 고려해야 한다. 펄스광 흡수에 따른 비선

형 감수율의 변화는 복소수 형태로 감수율을 이용하여 표현할 수 있다. 식 (2-17)은 복소수 형태의 감수율을 표현한 것이다.

$$\chi_{ij}(\omega) = \chi'_{ij}(\omega) + i\chi''_{ij}(\omega) \quad (2-17)$$

여기서 i 는 전이 전 에너지 준위이고, j 는 전이 후 에너지 준위이다. $\chi'_{ij}(\omega)$ 는 굴절률과 연관이 있고, $\chi''_{ij}(\omega)$ 는 펌프광의 흡수와 연관이 있다. 이때 물질 내부에서 진행되는 파동의 파수는 다음과 같이 쓸 수 있다[24].

$$k = \frac{n\omega}{c} \sqrt{1 + \frac{\chi_{ij}(\omega)}{n^2}} \quad (2-18)$$

여기서 c 는 진공에서 광속이고, ω 는 빛의 각 진동수이다. 또한 파수를 굴절률 n 과 흡수 계수 α 로 표현하면 다음과 같다[24].

$$k = \frac{\omega}{c} [n + n_{ij}(\omega)] - i \frac{\alpha_{ij}(\omega)}{2} \quad (2-19)$$

식 (2-18)과 식 (2-19)에 의해 흡수 계수와 굴절률을 표현하면 다음과 같다.

$$\alpha_{ij}(\omega) = -\frac{\omega}{c} \frac{\chi''_{ij}(\omega)}{n} \quad (2-20)$$

$$n_{ij}(\omega) = \frac{\chi'_{ij}(\omega)}{2n} \quad (2-21)$$

여기에서 실수부의 $\chi'_{ij}(\omega)$ 와 허수부의 $\chi''_{ij}(\omega)$ 는 Kramers-Kronig 변환과 연관되어 있다[24,25]. 이 변환에 따르면 다음의 관계를 갖는다.

$$\chi'_{ij}(\omega) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \omega' \frac{\chi''_{ij}(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2-22)$$

식 (2-22)에 식 (2-20)와 식 (2-21)을 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$n_{ij}(\omega) = \frac{c}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\alpha_{ij}(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2-23)$$

식 (2-23)에 따르면, 흡수 계수 α 로 표현되는 펌프광 흡수 특성에 따라 굴절률 n 이 변하는 결과를 확인할 수 있다. 광섬유 길이가 l 이고, 신호광의 중심파장이 λ_s , 신호광의 각 진동수는 ω_s 일 때, 굴절률의 변화와 위상 이동의 관계는 다음과 같다 [24].

$$\Delta\phi = \int_0^l \frac{2\pi}{\lambda_s} \Delta n(z) dz \quad (2-24)$$

여기서 z 는 광섬유 내부의 위치이고, $\Delta n(z)$ 는 광섬유 내부 z 에서의 굴절률의 변화량, $\Delta\phi$ 는 위상 이동 정도이다. 즉, 굴절률의 변화에 따라서 위상이 이동함을 확인할 수 있다. 이 관계를 통해서 이터븀 도핑된 광섬유에 펌프광을 입사함으로써 광섬유의 굴절률이 변하게 되고 그로 인해 광섬유에서 진행되는 파동의 위상이 이동하게 됨을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 이터븀 도핑된 광섬유에 펌프광을 입사할 경우 이터븀 도핑된 광섬유는 위상 이동자로 사용할 수 있다.

이 현상을 이용함으로써 홀로그래픽 디지털 현미경에서 위상 이동을 제어하여 간섭신호의 위상 특성을 복원할 수 있었다[26]. 이 뿐만 아니라 광섬유 내부에서 발생하는 비선형 굴절률과 관련된 다양한 물리적인 현상에 대한 분석을 다른 시뮬레이션 및 실험 결과가 발표되었었다[27].

3. 이터븀 도핑된 광섬유를 이용한 위상 이동 간섭계

광섬유 코어에서 유도된 굴절률 변화량은 매우 작기 때문에 측정이 쉽지 않다. 굴절률을 직접적으로 측정하는 방법으로 굴절률 변화가 유도된 광섬유를 포함하는

광섬유 간섭계를 구성하고자 하였다. 광섬유 간섭계는 두 팔의 광경로차에 의한 간섭 신호를 발생시킨다. 광섬유 코어에서 발생하는 유도 굴절을 변화는 매우 작은 값이지만 간섭 신호의 이동을 나타내기에는 충분한 양이다. 이러한 점에서 위상 이동 간섭계를 제작된 광섬유 커플러로 구성하고 이 간섭계에서 나타나는 간섭 신호의 이동을 측정함으로써 광섬유 코어에 유도된 위상 이동량을 분석하고자 한다.

간섭(Interference)이란 두 개 이상의 파동이 서로 상호작용하면서 발생하는 현상이다. 파동의 중첩으로 인해 간섭이 발생하고, 상대적인 위상에 따라 서로의 파동 최고점이 중첩되면 보강 간섭을, 한 파동의 최고점과 다른 파동의 최저점이 중첩되면 상쇄 간섭이 발생한다. 동일한 주파수를 가지는 전기장을 \vec{E}_1 과 \vec{E}_2 로 나타내면 두 평면파의 간섭을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 &= \vec{E}_{01} \cos(ks_1 - \omega t + \phi_1) \\ \vec{E}_2 &= \vec{E}_{02} \cos(ks_2 - \omega t + \phi_2)\end{aligned}\tag{2-26}$$

전기장을 \vec{E}_1 과 \vec{E}_2 가 점 P로 향하는 모습을 그림 2-12에 그려놓았다.

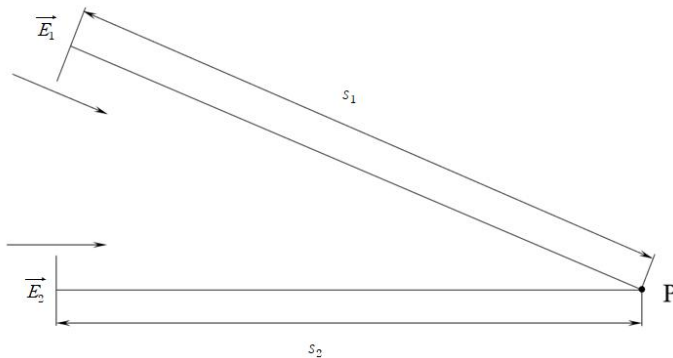


그림 2-12. 거리 s_1 과 s_2 에서 점 P로 향하는 \vec{E}_1 과 \vec{E}_2

식 (2-25)에서, $k = 2\pi/\lambda$ 이고, s_1 과 s_2 는 각각의 평면파가 이동한 거리, ϕ_1 과 ϕ_2 는 각각의 평면파의 초기 위상($t=0$ 일 때)을 나타낸다. 이 파동들이 한 점 P에서 합쳐진다고 하면, 점 P에서의 전기장 \vec{E}_P 는 다음과 같다.

$$\vec{E}_P = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (2-26)$$

그러면, 점 P 에서의 복사조도 I 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 I &= \epsilon_0 c \langle \vec{E}_P^2 \rangle = \epsilon_0 c \langle \vec{E}_P \cdot \vec{E}_P \rangle \\
 &= \epsilon_0 c \langle (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \rangle \\
 &= \epsilon_0 c \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle
 \end{aligned} \quad (2-27)$$

식 (2-27)을 정리하면 다음과 같아진다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \epsilon_0 c \langle \vec{E}_1^2 \rangle \\
 I_2 &= \epsilon_0 c \langle \vec{E}_2^2 \rangle \\
 I_{12} &= 2\epsilon_0 c \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle
 \end{aligned} \quad (2-28)$$

\vec{E}_1 과 \vec{E}_2 는 식 (2-25)에 의해 주어지므로,

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(ks_1 - \omega t + \phi_1) \cos(ks_2 - \omega t + \phi_2) \quad (2-29)$$

여기서,

$$\alpha = ks_1 + \phi_1, \quad \beta = ks_2 + \phi_2 \quad (2-30)$$

라고 정의하면, 식 (2-29)는 식 (2-30)에 의해 다음과 같이 정리된다.

$$2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = 2\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\alpha - \omega t) \cos(\beta - \omega t) \quad (2-31)$$

여기서 삼각함수 정리를 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$2 \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} [\langle \cos(\alpha + \beta - 2\omega t) \rangle + \langle \cos(\beta - \alpha) \rangle] \quad (2-32)$$

첫 번째 항은 시간 평균을 취하면 0이 되어 사라지고, 남은 항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 2 \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle &= \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \langle \cos(\beta - \alpha) \rangle \\
 &= \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \langle \cos(k(s_2 - s_1) - \phi_1 + \phi_2) \rangle
 \end{aligned} \quad (2-33)$$

여기서, 위상차 δ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\delta = k(s_2 - s_1) - \phi_1 + \phi_2 \quad (2-34)$$

그러면 식 (2-33)는 다음과 같이 정리된다.

$$2 \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \langle \cos \delta \rangle \quad (2-35)$$

식 (2-35)를 식 (2-28)에 의해 복사조도로 다시 표현하면,

$$I_{12} = \epsilon_0 c \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \langle \cos \delta \rangle \quad (2-36)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \epsilon_0 c \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1 \rangle = \epsilon_0 c \vec{E}_{01}^2 \langle \cos^2(\alpha - \omega t) \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_{01}^2 \\
 I_2 &= \epsilon_0 c \langle \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \epsilon_0 c \vec{E}_{02}^2 \langle \cos^2(\beta - \omega t) \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_{02}^2
 \end{aligned} \quad (2-37)$$

로 쓸 수 있으므로, 식 (2-36)은 다음과 같다.

$$I_{12} = 2 \sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \delta \rangle \quad (2-38)$$

그러면, 점 P 에서의 복사조도는 다음과 같다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \delta \rangle \quad (2-39)$$

여기서 두 파동이 한 점원에서 발생한 파동이고, 점 P 에 도달하기까지 동일한 시간 간격의 경로를 이동했다고 한다면, 위상차 $\phi_2(t) - \phi_1(t)$ 는 0이다. 즉, 식 (2-39)은 이렇게 정리가 된다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 + I_2} \cos \delta \quad (2-40)$$

이때, 이 두 파동은 서로 결맞음(Coherent)이라고 한다. 그러면 위상차 δ 에 대해 $\cos \delta = +1$ 인 경우는 복사조도가 최대, $\cos \delta = -1$ 인 경우는 복사조도가 최소이다. 간섭에 대해 실험적으로 수행된 것은 Young의 이중슬릿 실험이었다. Young의 이중슬릿은 하나의 광원에서 나온 빛을 먼저 작은 구멍을 통과시켜 점광원 역할을 하도록 했으며, 작은 구멍을 통과한 빛들은 한 스크린에 있는 두 슬릿을 통과하도록 설계했다. 그 도식도를 그림 2-13에 그려놓았다.

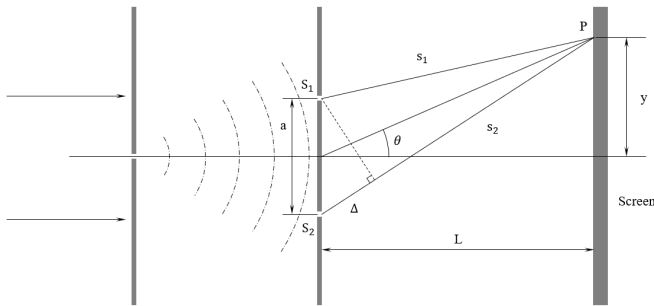


그림 2-13. 영의 이중슬릿 실험 구성 개략도

두 구멍 S_1 과 S_2 에서 점 P 까지 거리가 각각 s_1 , s_2 라면, $s_2 - s_1 = \Delta = a \sin \theta$ 이다. 점 P 에서 경로 차이의 보강간섭과 상쇄간섭이 일어나기 위한 조건은 다음과 같다.

(보강간섭) $\Delta = a \sin \theta = m \lambda$

(상쇄간섭) $\Delta = a \sin \theta = (m + \frac{1}{2}) \lambda$ (단, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) (2-41)

여기서, $y \ll L$ 즉, θ 가 매우 작다고 하면 $\sin \theta \approx \tan \theta \approx y/L$ 이므로 식 (2-41)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

(보강간섭) $y = \frac{m \lambda L}{a}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

(상쇄간섭) $y = \frac{(m + \frac{1}{2}) \lambda L}{a}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

(2-42)

결국, 복사조도가 최대이거나 최소인 부분끼리는 일정한 간격을 가지게 되고, 복사조도가 최대인 부분과 최소인 부분은 번갈아가며 나타나게 되며, 슬릿과 스크린 사이의 간격이 커질수록, 구멍의 간격이 작아질수록 중심축에서 멀어지게 된다.

공간상에서 측정되는 간섭신호의 명암을 간섭계를 다른 형태로 구성함으로써 시간의 함수로 측정할 수 있다. 이러한 기능을 위해서 간섭계가 제안되었으며 다양한 간섭계 중에서 마이컬슨 간섭계와 마하-젠더 간섭계가 널리 이용되고 있다.

이터븀 도핑된 광섬유를 이용하여 광섬유 간섭계를 구성할 수 있다. 식 (2-24)에 의해 이터븀 도핑된 광섬유에 펄프광을 입사하면 광섬유 코어의 굴절률이 변화하며 그에 따라 광섬유를 통과하는 빛의 위상 이동이 발생한다. 이러한 위상 이동 특성을 관찰하기 위해서는 이터븀 도핑된 광섬유를 활용하여 간섭계를 구성해야 한다. 그림 2-14은 마이컬슨 간섭계의 개략도이다.

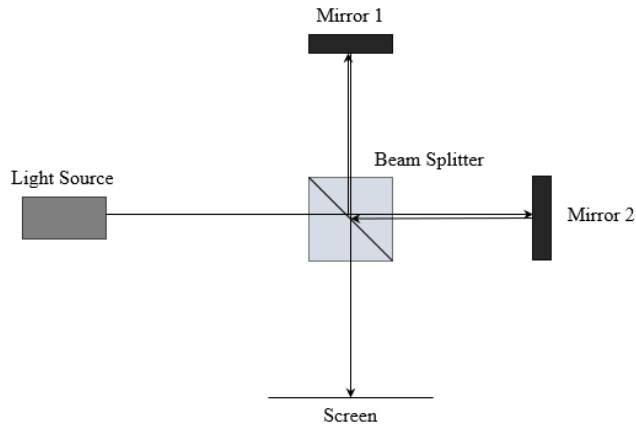


그림 2-14. 마이컬슨 간섭계 개략도

마이컬슨 간섭계는 분할된 두 빛이 지나가는 경로의 작은 차이를 측정하는데 사용되는 간섭계이다. 두 경로 중 한 경로에 굴절률이 다른 표본을 위치시키고 빛이 통과하면 표본에 의해 광경로차가 발생되고 그 결과 간섭신호의 변화가 발생한다. 이 간섭무늬의 분석을 통해 표본의 굴절률을 정밀하게 측정할 수 있다. 천문학에서는 블랙홀과 같은 무거운 천체의 충돌로 인해 발생하는 중력파를 탐지하는데도 사용된다. 마이컬슨 간섭계를 광섬유로 구성할 경우는 빔 분할기를 광섬유 커플러로 대체하여 동일한 기능을 수행할 수 있다.

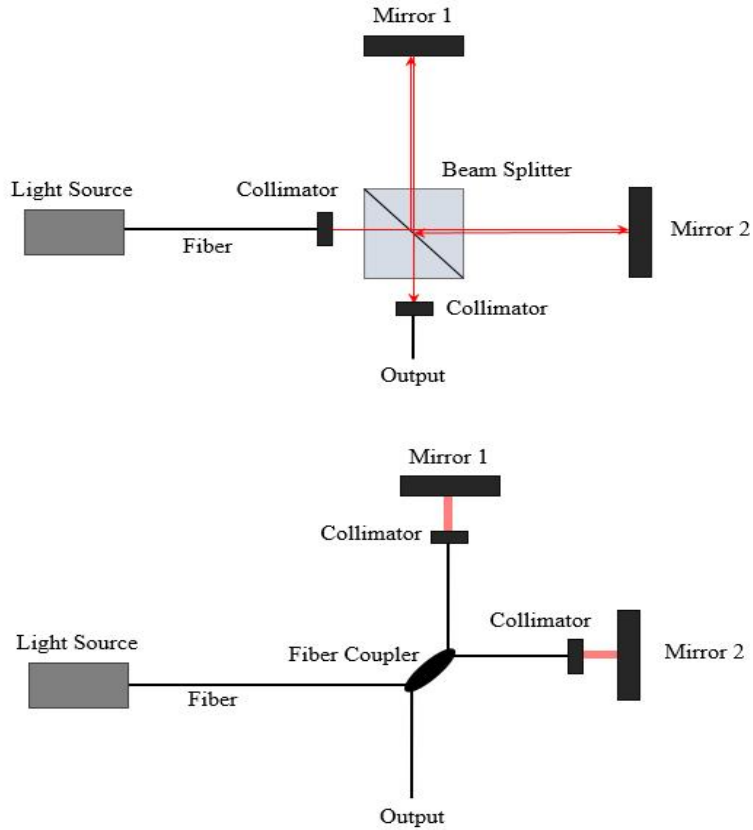


그림 2-15. 광섬유를 이용한 마이컬슨 간섭계의 예시

마이컬슨 간섭계 구조로 이터븀 도핑된 광섬유를 위상 이동자로 사용하려는 경우, 광섬유 커플러와 집광기 사이에 이터븀 도핑된 광섬유를 삽입하고 펌프 광원을 연결하여 펌프광을 통한 위상 이동을 발생시킨다.

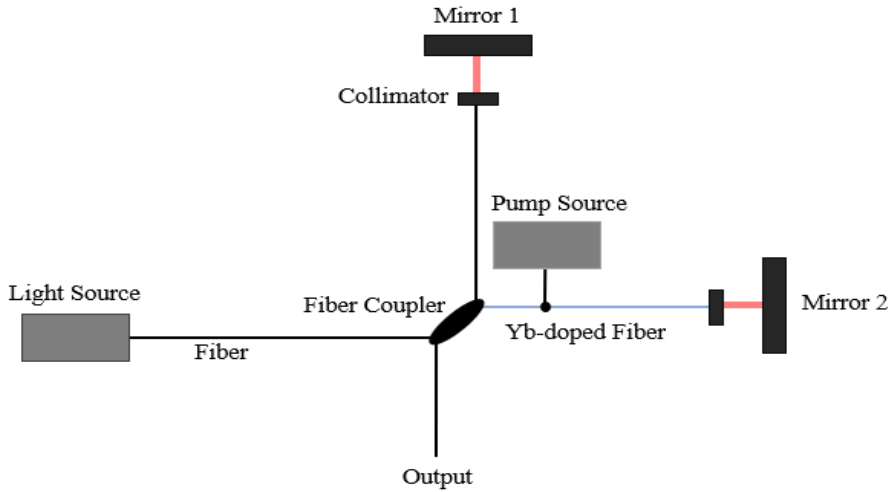


그림 2-16. 이터븀 도핑된 광섬유를 위상 이동자로 이용한 마이컬슨 간섭계의 예시

마이컬슨 간섭계와 기능은 유사하지만 구성에 차이를 가지는 간섭계로는 마하-젠더 간섭계가 있다. 마하-젠더 간섭계는 빔 분할기를 두 개 사용하여 빛이 왕복하며 이동하는 것이 아닌 한 방향으로만 이동한다는 것이 다르며, 마이컬슨 간섭계보다 더 안정적인 장점이 있다. 그림 2-17은 마하-젠더 간섭계의 개략도이다.

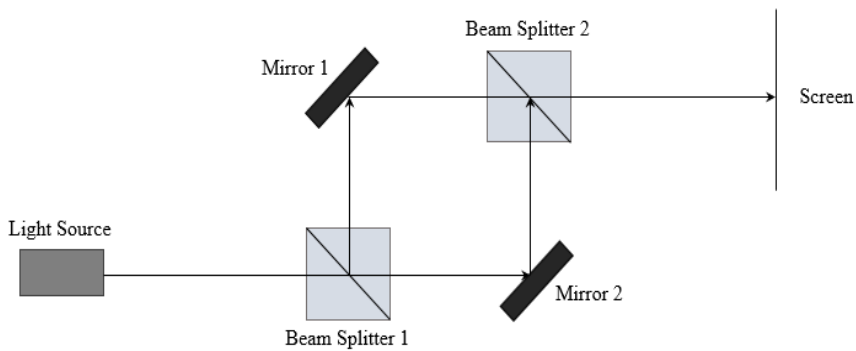


그림 2-17. 마하-젠더 간섭계 개략도

마하-젠더 간섭계 구조에서 이터븀 도핑된 광섬유를 위상 이동자 효과를 측정하기

위해서는 빔 분할기 사이에 이터븀 도핑된 광섬유를 배치해야 펌프광에 의한 위상 이동을 확인할 수 있다.

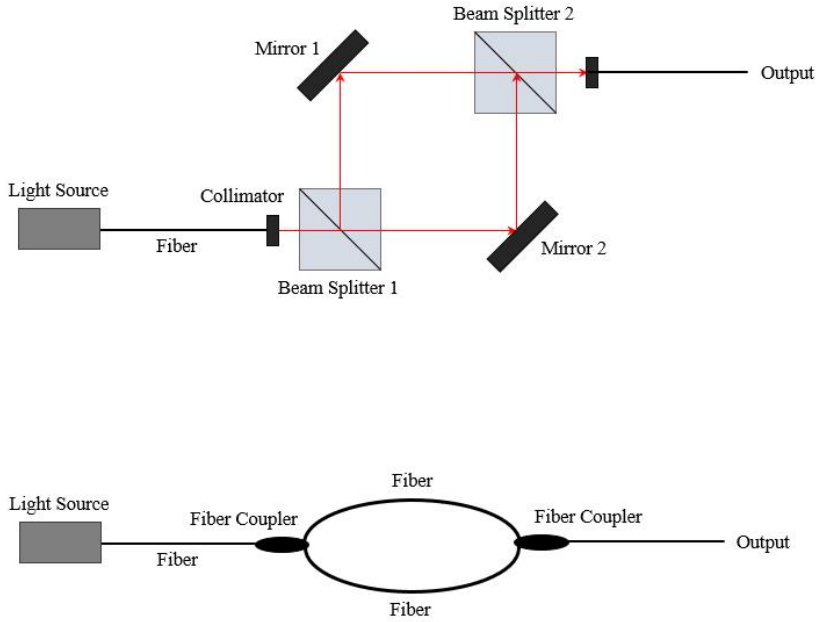


그림 2-18. 광섬유를 이용한 마이켈슨 간섭계의 예시

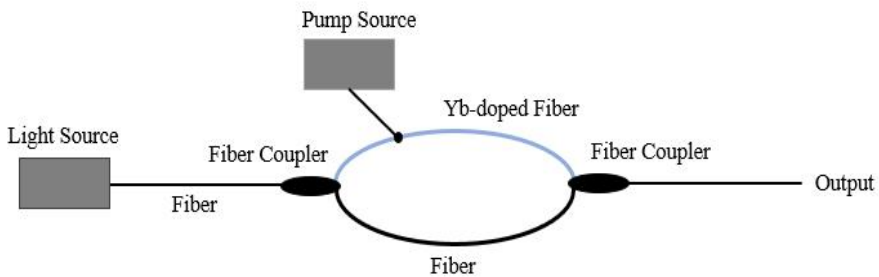


그림 2-19. 이터븀 도핑된 광섬유를 위상 이동자로 이용한 마하-젠더 간섭계의 예시

제 3 장 샘플 가공 및 간섭계 제작

측면 가공을 하고자 하는 광섬유는 일반적인 단일모드 광섬유와 이터븀 도핑된 광섬유를 이용하였다. 단일모드 광섬유를 이용하여 측면 가공 광섬유 커플러를 제작하고 동일한 방법으로 이터븀 도핑된 광섬유를 이용하여 측면 가공 광섬유 커플러를 제작하여 가변 분배비 특성을 서로 비교하고자 하였다. 이터븀 도핑된 광섬유는 펌프광에 의한 굴절률의 변화가 유도된다. 그러므로 굴절률 변화에 의한 위상 이동 특성은 펌프광에 의한 의존성 뿐만 아니라 광섬유의 길이에 의해서도 영향을 받을 것이다. 그러므로 이러한 요소들을 파악하고자 서로 다른 길이를 가지는 이터븀 도핑된 광섬유를 이용하여 측면 가공된 샘플을 제작하였다. 제작된 샘플을 이용하여 광섬유 커플러를 제작하고 가변 분배비 뿐만 아니라 이터븀 도핑된 광섬유의 길이에 따른 위상 이동 특징을 확인하고자 하였다. 이터븀 도핑된 광섬유의 길이를 10 cm, 15 cm로 다르게 사용하였고, 이터븀 도핑된 광섬유의 총 길이에서 1:2 또는 2:3이 되는 위치에서 측면 가공을 수행하였다.

제 1 절 측면 가공 광섬유 커플러 제작

1. 단일모드 광섬유의 측면 가공 및 광섬유 커플러 제작

단일모드 광섬유의 측면을 가공하기 위해서는 광섬유가 흔들리지 않도록 고정해야 한다. 실험에서는 V자로 홈을 판 석영 블록에 광섬유가 흔들리지 않도록 고정하였다. 먼저 V자 석영 블록의 길이만큼 단일모드 광섬유의 코팅을 제거하였다. 코팅을 제거한 단일모드 광섬유를 석영 블록의 V자 홈에 밀착되도록 고정한 후 자외선(UV, Ultraviolet) 에폭시를 이용하여 고정시켰다.

표 3-1. 단일모드 광섬유의 특성[28]

Model	1260 - 1625 nm SMF-28 Ultra FC/APC Single Mode Patch Cables (P3-SMF28Y-FC)
Fiber Type	SMF-28 Ultra
Operating Wavelength	1260 - 1625 nm
Cutoff Wavelength	< 1260 nm
Mode Field Diameter	9.2 ± 0.4 μm @ 1310 nm 10.4 ± 0.5 μm @ 1550 nm
Cladding Diameter	125 ± 0.7 μm
Coating Diameter	242 ± 5 μm
Max Attenuation	≤ 0.32 dB/km @ 1310 nm ≤ 0.18 dB/km @ 1550 nm
NA	0.14
Connectors	FC/APC, 2.0 mm Narrow Key
Jacket	Ø900 μm Yellow Hytrel Tubing

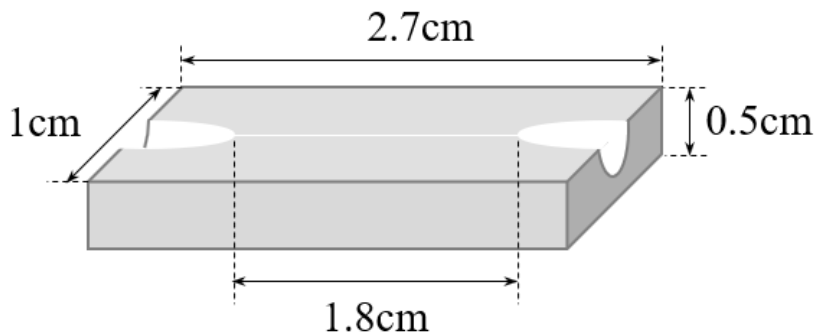


그림 3-1. V자 홈이 파진 석영 블록의 길이, 두께 및 V자 홈의 길이



그림 3-2. V자 홈이 파진 석영블록

자켓과 코팅을 제거한 단일모드 광섬유를 V자 석영 블록에 고정하였다. 측면 가공 광섬유 커플러로 제작하기 위해서는 한 쌍, 즉 두 개의 샘플이 필요하므로 똑같은 샘플을 추가로 제작하였다. 자외선 광을 이용하여 UV 에폭시가 완전 경화시킨 이후에 단일모드 광섬유의 측면 가공을 시작하였다. 측면 가공을 진행하면서, 중심 파장 1310 nm인 SLD(superluminescent diode) 광원을 연결하여 실시간으로 광섬유 끝단에서 출력되는 광세기를 확인하였다. 측면 가공에 따른 광 손실이 어느 정도 되는지 확인하면서 측면 가공을 진행하였다. 측면 가공을 마친 광섬유에 눈에 보이는 630 nm 광원을 연결하여 측면 가공된 위치를 파악하고 표시하였다.

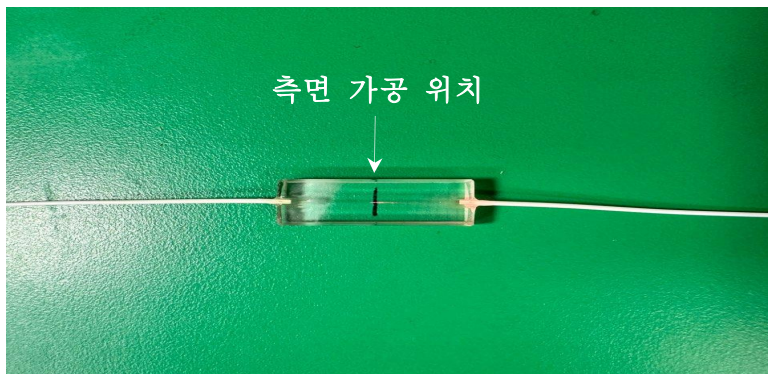


그림 3-3. 측면 가공 후 630 nm 광원과 연결하여 측면 가공된 위치 확인

측면 가공이 완료된 단일모드 광섬유를 이용하여 커플러를 만들기 위해 측면 가공

한 위치가 서로 맞닿게 V자 석영 블록의 위치를 조정하여 조절 나사가 있는 측면 가공 광섬유 커플러 하우스에 넣고 고정하였다.



그림 3-4. 한 쌍의 측면 가공된 광섬유

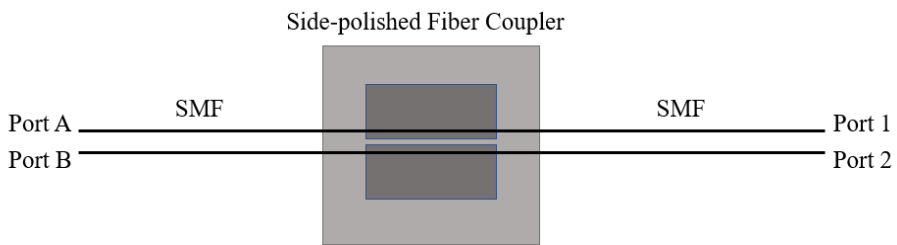


그림 3-5. 단일모드 광섬유로 제작한 측면 가공 광섬유 커플러 개략도

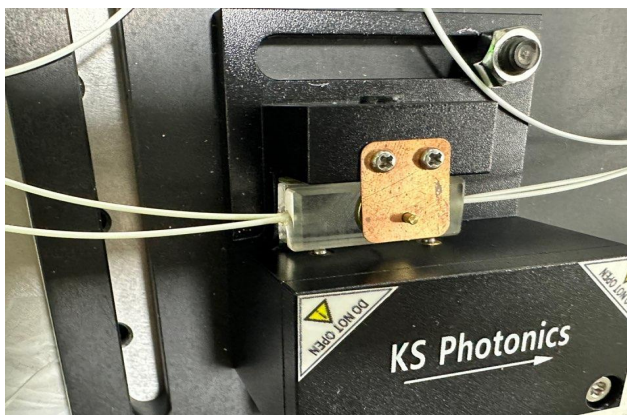


그림 3-6. 측면 가공 광섬유 커플러 하우스에 고정한 측면 가공된 단일모드 광섬유 한 쌍

2. 이터븀 도핑된 광섬유의 측면 가공 및 광섬유 커플러 제작

이터븀 도핑된 광섬유를 측면 가공하여 커플러로 제작하는 방법은 단일모드 광섬유로 진행하는 것과 동일하다. 샘플을 제작할 때 이터븀 도핑된 광섬유의 길이 의존성을 파악하기 위해 서로 다른 길이의 이터븀 도핑된 광섬유를 이용하여 샘플을 제작하였고 이터븀 도핑된 광섬유의 양 끝단에는 단일모드 광섬유를 연결하고 측면 가공을 진행하였다. 이터븀 도핑된 광섬유를 측면 가공할 때 각각의 샘플마다 측면 가공 위치가 다르게 결정하여 이터븀 도핑된 광섬유를 V자 석영 블록에 밀착 고정하였다. 이 실험에서 세 가지 샘플을 다음 그림 3-7과 같이 설정하고, V자 석영 블록에 고정하였다.

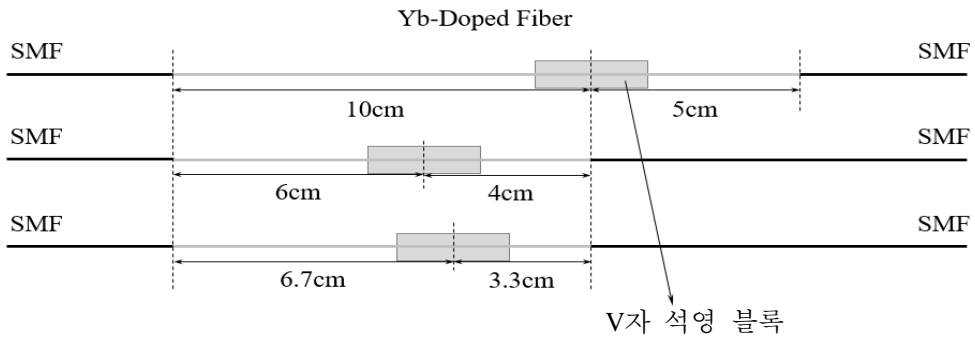


그림 3-7. 세 가지 샘플과 석영 블록의 위치

표 3-2. 이터븀 도핑된 광섬유의 특성[21]

Model	Core-Pumped SM Yb-Doped Fiber (YB1200-4/125)
Cladding Geometry	Round
Absorption at 920 nm	$280 \pm 50 \text{ dB/m}$
Mode Field Diameter at 1060 nm	$4.4 \pm 0.8 \mu\text{m}$
Cladding Diameter	$125 \pm 2 \mu\text{m}$
Coating Diameter	$245 \pm 15 \mu\text{m}$
Core NA	0.2
Cut-off Wavelength	$1010 \pm 70 \text{ nm}$

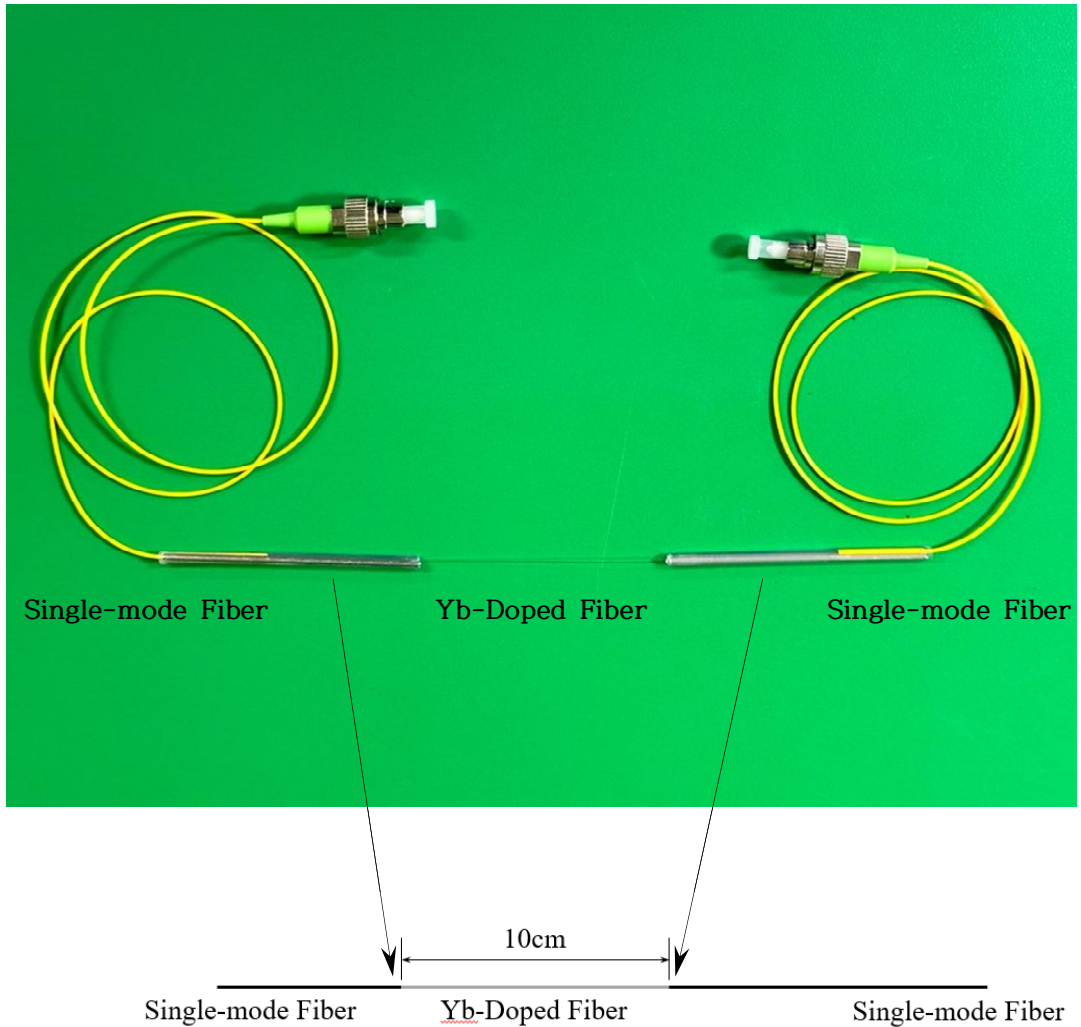


그림 3-8. 단일모드 광섬유와 접합한 이터븀 도핑된 광섬유

이때, 이터븀 도핑된 광섬유의 코팅을 벗겨낼 때, V자 홈의 길이인 1.8 cm보다는 길게 벗겨내야 코팅이 벗겨지지 않은 이터븀 도핑된 광섬유가 V자 홈의 밖에 위치할 수 있다. 만약 코팅이 벗겨지지 않은 이터븀 도핑된 광섬유가 V자 홈 위에 위치한 경우에는 측면 가공시 매우 쉽게 부러지기 때문에 반드시 코팅이 벗겨진 이터븀 도핑된 광섬유만이 V자 홈에 위치해야 한다.



그림 3-9. UV 에폭시를 이용하여 이터븀 도핑된 광섬유를 석영 블록에 고정한 모습

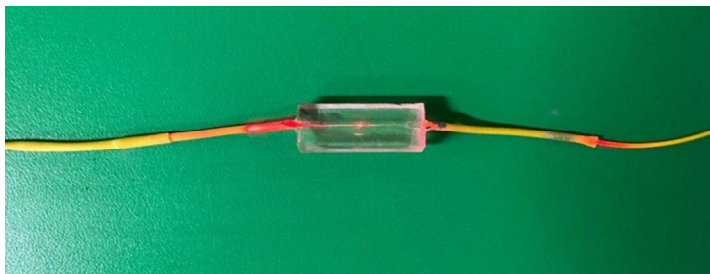


그림 3-10. 측면 가공된 이터븀 도핑된 광섬유의 측면 가공 위치 확인

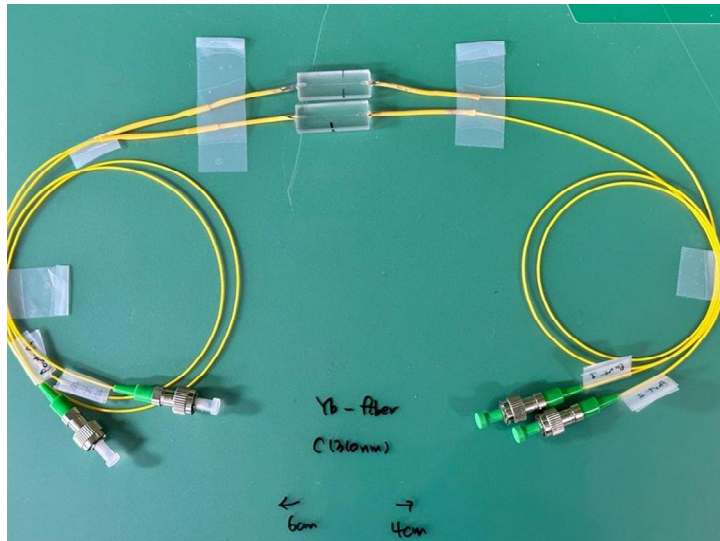


그림 3-11. 측면 가공이 완료된 이터븀 도핑된 광섬유

측면 가공된 이터븀 도핑된 광섬유로 측면 가공 광섬유 커플러에 장착하는 방법
 도 단일모드 광섬유의 경우와 동일하게 측면 가공 위치가 맞게 석영 블록의 위
 치를 조정하여 측면 가공 광섬유 커플러 하우스에 고정하여 완성하였다.

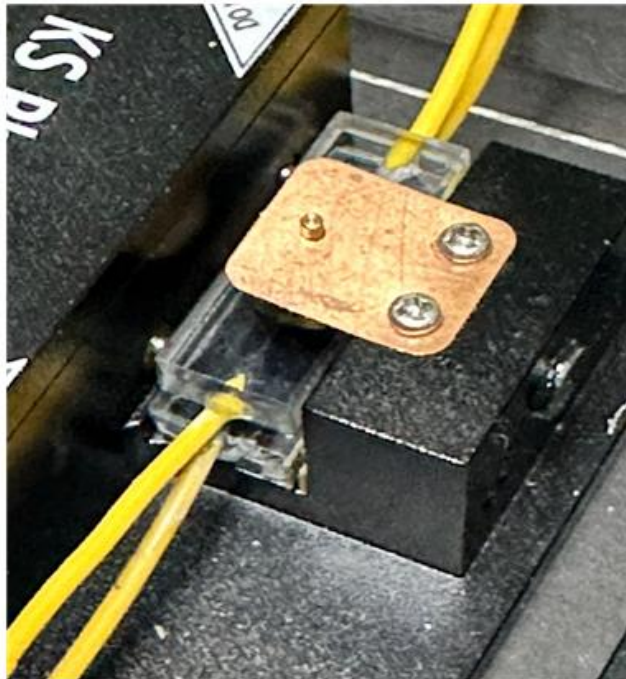
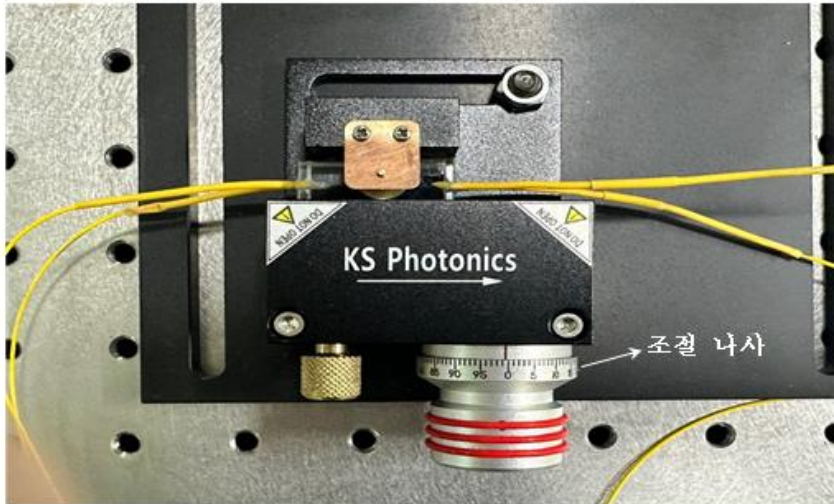
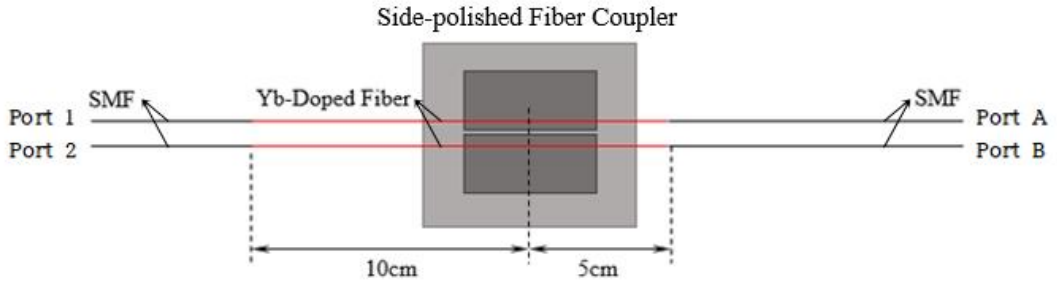
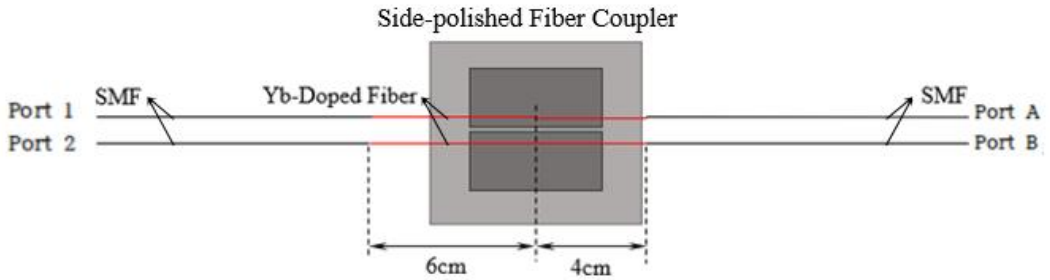


그림 3-12. 측면 가공 광섬유 커플러에 장착된 측면 가공된 이터븀 도핑된 광섬유 한 쌍

Sample #1



Sample #2



Sample #3

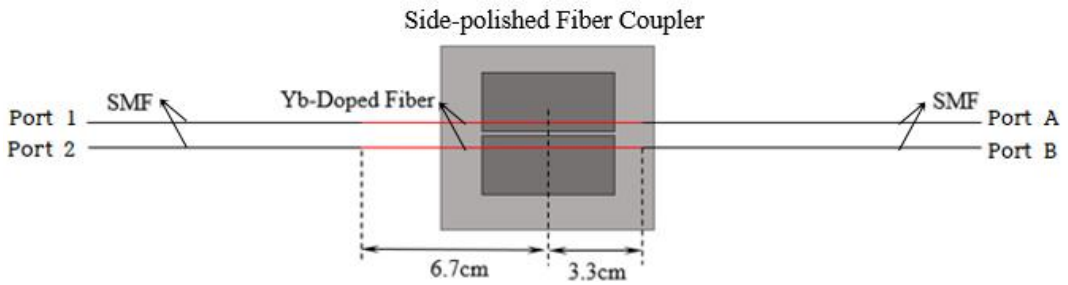


그림 3-13. 각각의 측면 가공 광섬유 커플러 개략도

제 2 절 가공된 커플러를 이용한 위상 이동 간섭계의 개발

1. 측면 가공 광섬유 커플러를 이용한 위상 이동 간섭계 구현

가공된 광섬유 커플러를 이용하여 위상 이동 특성을 측정하기 위해서 위상 이동 간섭계를 구현하였다. 위상 이동은 간섭 신호에서 매우 민감하게 반응하기 때문에 측정하기 쉬운 면이 있으면서 동시에 시스템 구현이 편리한 점이 있다. 그런 장점을 이용하고자 측면 가공 광섬유 커플러를 사용하여 광섬유 마이켈슨 간섭계를 구성하였다. 이때 측면 가공 광섬유 커플러는 2×2 광섬유 커플러이므로, 커플러의 한 쪽에는 광원과 측정기를 연결하고, 커플러의 반대쪽은 기준단과 샘플단으로 설정하여 광 경로차를 가지는 간섭계를 구성하였다.

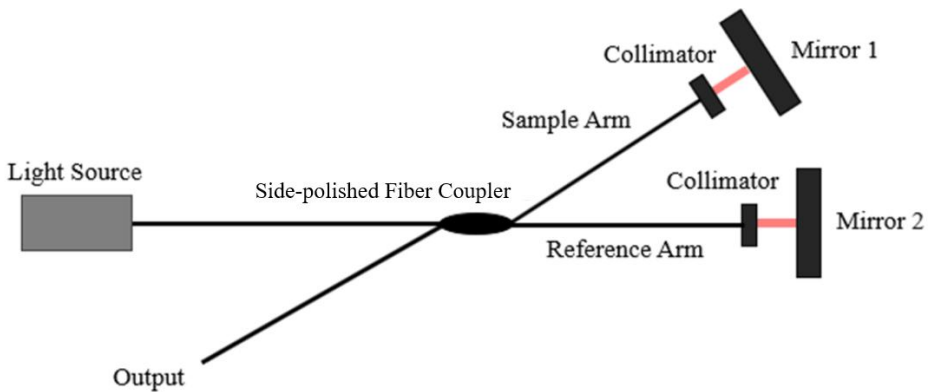


그림 3-14. 측면 가공 광섬유 커플러로 구성된 마이켈슨 간섭계 개략도

이때, 이터븀 도핑된 광섬유를 위상 이동자로 이용할 경우, 기준단과 샘플단의 물리적인 길이 조절을 통해서 광 경로차를 유도하는 것이 아니라 펌프광을 이용해 이터븀 도핑된 광섬유의 위상 이동을 제어할 수 있다.

2. 이터븀 도핑된 광섬유 길이에 따른 위상 이동 간섭계 구성

펌프광을 이용하면 이터븀 도핑된 광섬유는 위상 이동자로서의 기능을 수행할

수 있다. 위상 이동량은 펌프광이 입사되는 이터븀 도핑된 광섬유의 길이에 따라 달라지므로, 이터븀 도핑된 광섬유의 길이에 따라 위상 이동 간섭계를 각각 구성하였다. 이터븀 도핑된 광섬유의 길이가 같더라도 측면 가공 위치가 다르기 때문에 측면 가공 위치부터 단일모드 광섬유와 접합한 위치까지의 거리에 따라 달라질 것이다. 980 nm 펌프광은 파장 분할 다중화(WDM, Wavelength Division Multiplexing) 커플러를 이용하여 이터븀 도핑된 광섬유에 입사시켰다. 측면 가공 광섬유 커플러를 이용한 개략도는 그림 3-15와 같다.

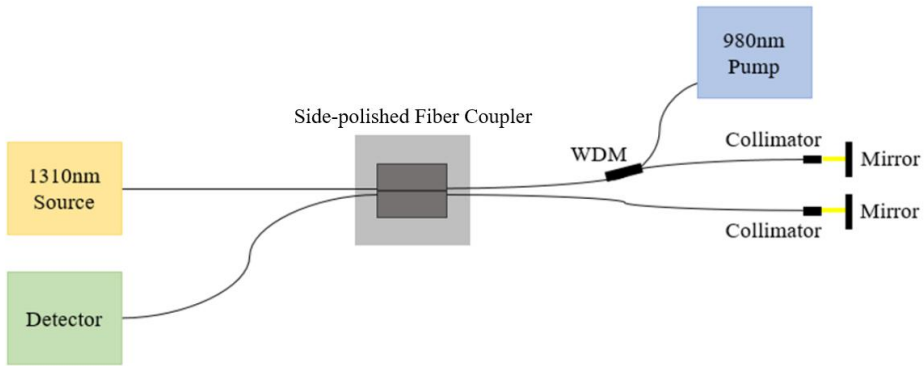


그림 3-15. 측면 가공 광섬유 커플러를 이용해 구성한 간섭계의 개략도

표 3-3. 1310 nm 광원 특성[29]

Model	Superluminescent Diode (EXS210057-01)
Center Wavelength	1280 - 1320 nm
Output Power	5 mW
Bandwidth (FWHM)	100 - 200 nm
Operating Current	450 mA
Package Type	Butterfly
Pin Code	14-Pin
Connector	FC/APC

표 3-4. 980 nm 펌프 광원 특성[30]

Model	FBG-Stabilized Laser Diodes (BL976-SAG300)
Wavelength	976 nm
Minimum Power	300 mW
Typical Drive Current	470 mA
Package	SM Butterfly, FC/APC
Pin Code	14-Pin Type
Laser Mode	Single Transverse Mode

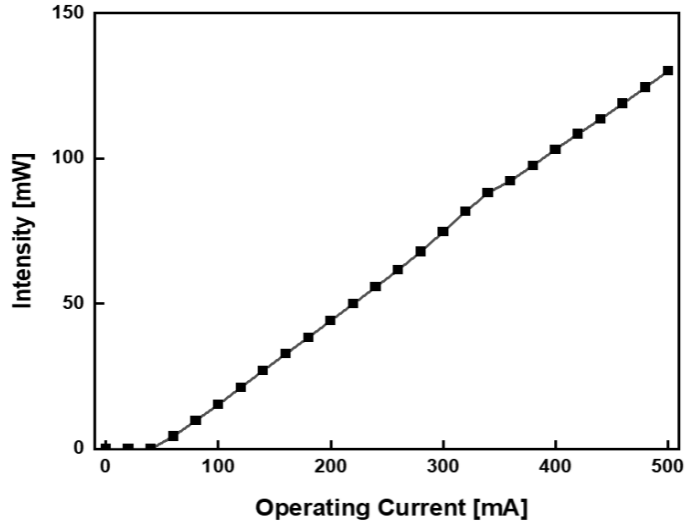


그림 3-16. 980 nm 펌프 광원의 동작 전류에 따른 광원 출력 특성

표 3-5. 사용한 WDM 커플러의 특성[31]

Model	W980S330A1A
Operating Wavelength	980 nm / 1310 nm
Bandwidth	± 15.0 nm
Insertion Loss	≤ 0.4 dB
Isolation	≥ 15 dB
Polarization-Dependent Loss	≤ 0.2 dB
Directivity	≥ 60 dB
Termination	FC/APC

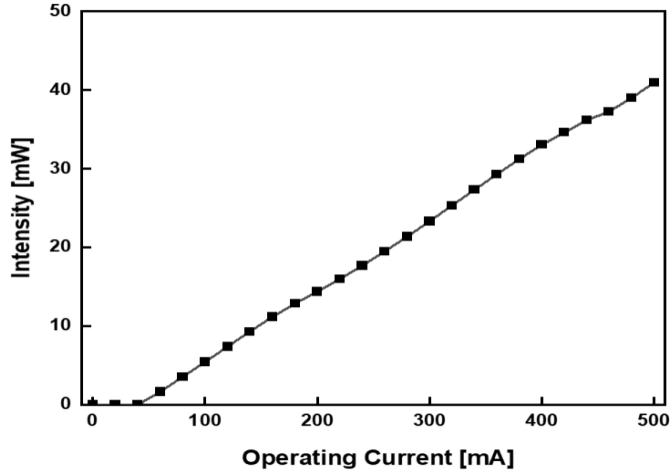


그림 3-17. 980 nm 펌프 광원의 동작 전류에 따른 WDM 커플러 투과 광세기

샘플단과 기준단에 광섬유로 전달된 광을 거울에 반사시켜 다시 재결합시키기 위해 사용한 집광기는 광섬유 pigtailed된 형태로 아래와 같은 사양을 가지고 있다.

표 3-6. 사용한 집광기(Collimator)의 특성[32]

Model	F260APC-C
Alignment Wavelength	1310 nm
Lens AR Coating	1050 - 1620 nm R _{avg} < 0.5 %
Waist Diameter	2.8 mm
Waist Distance	15.35 mm
Full-Angle Divergence	0.034°
NA	0.16
Focal Length	15.52 mm
Housing Outer Diameter	11 mm

제 4 장 측면 가공 광섬유 커플러의 특성 측정 결과

제 1 절 광섬유 커플러의 가변 분배비 측정 결과

1. 단일모드 광섬유 커플러의 가변 분배비 특성

제작한 측면 가공 광섬유 커플러의 분배비 특성을 확인하기 위해 1310 nm 광원과 측면 가공 광섬유 커플러를 연결하여 투과되는 광세기를 측정하기 위해 그림 4-1과 같이 구성하였다. 사용한 광원의 중심파장인 1310 nm에서 측면 가공 광섬유 커플러 각각의 포트에서 출력되는 광세기를 커플러의 조절 나사의 눈금을 조정하면서 측정하였다. 측면 가공 광섬유 커플러로 입사하는 빛의 세기는 1310 nm에서 3.33 mW이다. 각각의 입력 포트와 출력 포트는 그림 3-5에서 보이는 것과 같다.

광을 Port A에 입사했을 때, 커플러 조절 나사의 눈금이 0에서 50까지 증가할 때 그림 4-2(a)에서와 같이 Port 1에서 측정된 광세기는 감소하다가 50에서 100 사이에서는 증가하는 양상을 보였다. 눈금이 0에서 55까지 증가할 때는 Port 2에서 측정된 광세기는 증가하다가 55에서 100 사이에는 감소하는 양상을 보였다. 광을 Port B에 입사했을 때, 조절 나사의 눈금이 0에서 40까지 증가하면서 그림 4-2(b)에서와 같이 Port 1에서 측정된 광세기는 증가하다가 40에서 100 사이에는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port 2에서는 눈금이 0에서 55까지 증가하면서 광세기가 감소했다가 55에서 100 사이에는 광세기가 증가하는 양상을 보였다. Port 1에 광이 입사했을 때는 그림 4-2(c)와 같이 조절 나사의 눈금이 0에서 50까지는 Port A의 광세기가 감소했다가 50에서 100 사이에는 광세기가 증가하는 양상을 보였다. Port B에서는 눈금 0에서 40까지는 광세기가 증가했다가 40에서 100 사이에는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port 2에 광을 입사했을 때, 그림 4-2(d)와 같이 조절 나사의 눈금이 0에서 60까지는 Port A의 광세기가 증가했다가 60에서 100 사이에는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. 눈금 0에서 60까지는 Port B에서의 광세기가 감소했다가 60에서 100 사이에는 광세기가 증가하는 양상을 보였다. 각각의 포트에서 광세기가 같아지는 구간은 모든 포트에서 눈금이 25~30과 85~90 사이의 구간이었다.

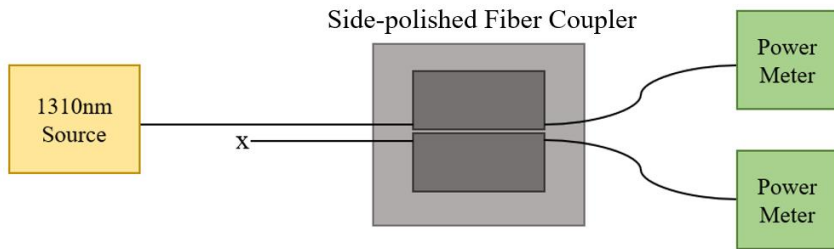


그림 4-1. 1310 nm 중심파장을 가지는 광원을 이용하여 측면 가공 광섬유 커플러의 분배비 특성을 확인하기 위한 실험 장치 개략도

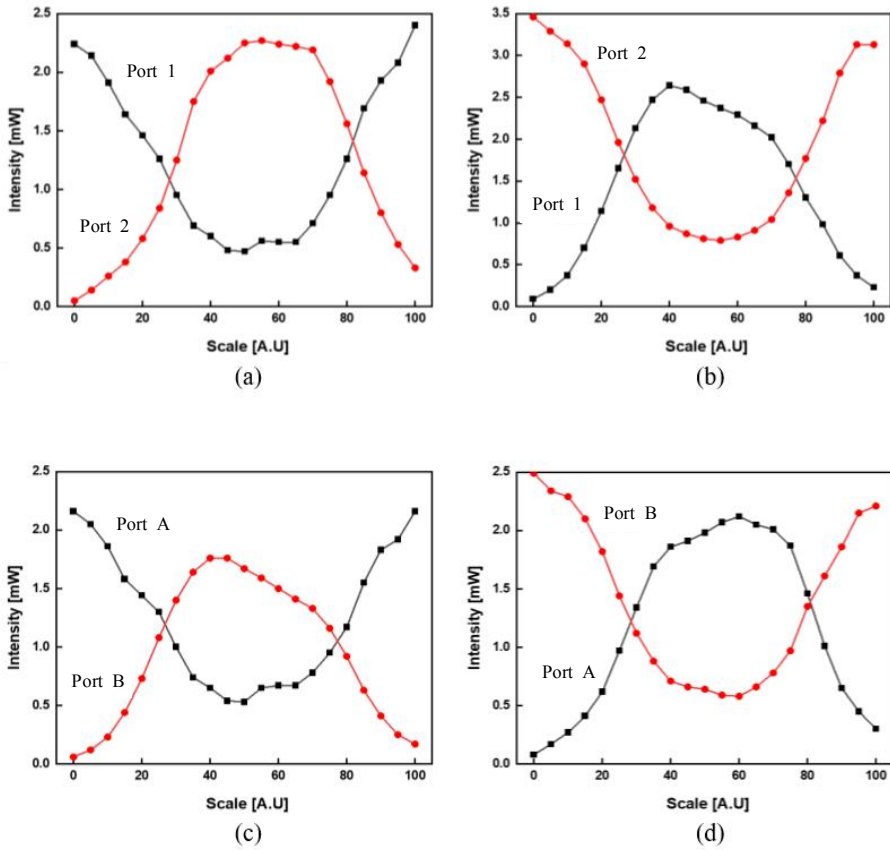


그림 4-2. 단일모드 측면 가공 광섬유 커플러의 각 포트별 투과 광세기(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

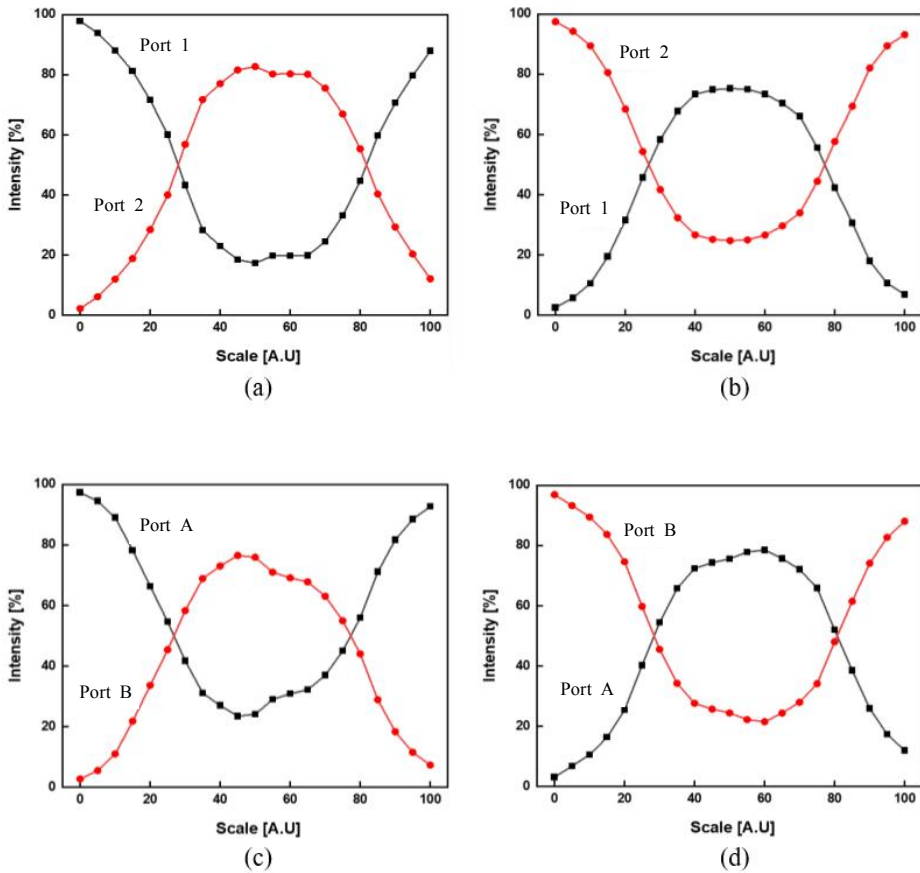


그림 4-3. 단일모드 측면 가공 광섬유 커플러의 각 포트별 분할 비율(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

포트별 분할 비율은 각 포트별 투과 광세기의 결과에서 계산하고자 하는 포트의 출력 광세기를 두 포트의 출력 광세기의 합으로 나누어 비율을 계산하였다. 분할 비율의 증감은 투과 광세기의 양상과 유사하였다. 최대 분할 비율은 Port A에 광을 입사했을 때 17.2:82.7, Port B에 입사했을 때 75.2:24.8, Port 1에 광을 입사했을 때 23.5:76.5, Port 2에 광을 입사했을 때 78.5:21.5이었다. 분할 비율이 최대일 때 눈금은 Port A, Port B, Port 1에 광을 입사했을 때 50, Port 2에 입사했을 때 60이었다. 50:50의 비율은 눈금이 20~30와 80 근처에서 관찰되었다.

2. 이터븀 도핑된 광섬유 커플러의 가변 분배비 특성

이터븀 도핑된 광섬유로 제작한 커플러의 가변 분배비 측정은 광원의 중심 파장인 1310 nm와 펌프 광원의 중심 파장인 980 nm에서 수행하였다. 이때 그림 3-14에 표시된 포트에 광원을 입사하였다. 가변 분배비를 측정하기 위한 광학 시스템은 단일모드 광섬유로 제작한 커플러를 측정할 때와 동일하게 측정하였고, 980 nm에서 측정할 때는 1310 nm 광원 대신 980 nm 펌프 광원을 연결하여 측정하였다. 1310 nm에 대한 분배 비율의 측정은 신호광의 대한 분배 특성을 분석하기 위해서 측정하였고 980 nm에 대한 분배 비율은 펌프광에 대한 분배 특성을 분석하기 위함이다. 커플러에 의한 펌프광의 분배 비율 특성은 이터븀 도핑된 광섬유가 펌프광을 흡수하여 비선형 굴절률 변화를 나타내는 현상과 관련이 있기 때문에 위상 이동 특성을 파악하는데 매우 중요한 자료가 될 것이다. 그런 점에서 서로 다른 파장 대역에서 제작된 측면 가공 광섬유 커플러의 분배 비율 특성을 파악할 필요가 있다. 샘플 #1에 대한 입력 및 출력 포트에 대한 설명은 그림 4-4와 같다.

각 포트별 출력 광세기는 1310 nm 광을 Port A에 입사했을 때, Port 1에서는 그림 4-5(a)와 보이는 것과 같이 눈금이 0에서 10 사이에서는 광세기가 감소했다가 10에서 45 사이에서는 광세기가 증가하는 양상을 보였다. Port 2에서는 눈금이 0에서 10 사이에서는 광세기가 증가했다가 10에서 100 사이에서는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port B에 광을 입사했을 때, Port 1에서는 그림 4-5(b)에서 보이는 것과 같이 조절 나사의 눈금이 0에서 10 사이에서는 광세기가 증가했다가 10에서 100 사이에는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port 2에서는 눈금 0에서 10까지는 광세기가 감소했다가 10 이후부터 100 사이에는 광세기가 증가하는 양상을 보였다. Port 1에 광을 입사했을 때, Port A에서는 그림 4-5(c)에서 보이는 것과 같이 조절 나사의 눈금이 0에서 12.5까지는 광세기가 감소했다가 이후부터 100 까지는 광세기가 증가하는 양상을 보였다. Port B에서는 눈금 0에서 12.5까지는 광세기가 증가했다가 12.5에서 100 사이에서는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port 2에 광을 입사했을 때, Port A에서는 그림 4-5(d)와 같이 조절 나사의 눈금이 0에서 15까지 광세기가 증가했다가 이후부터 100 까지는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port B에서는 눈금 0에서 12.5까지 광세기가 감소했다가 100까지는 광세기가 증가하는 양상을 보였다. 각각의 포트에서 광세기가 같아지는 구간은 Port A에 광을 입

사했을 때 5~7.5, 15~17.5, Port B, 1, 2에 입사했을 때 7.5~10, 12.5~15이었다.

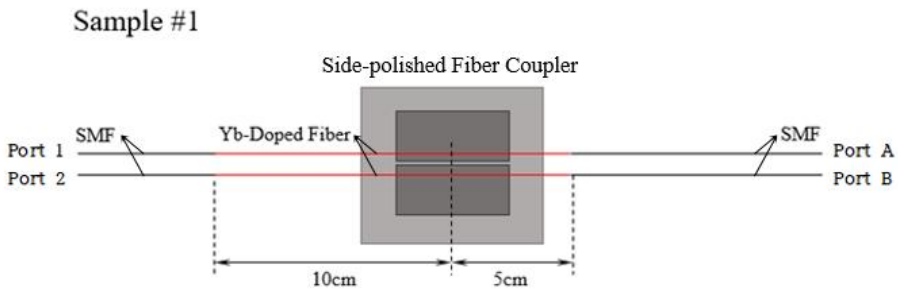


그림 4-4. 샘플 #1의 개략도

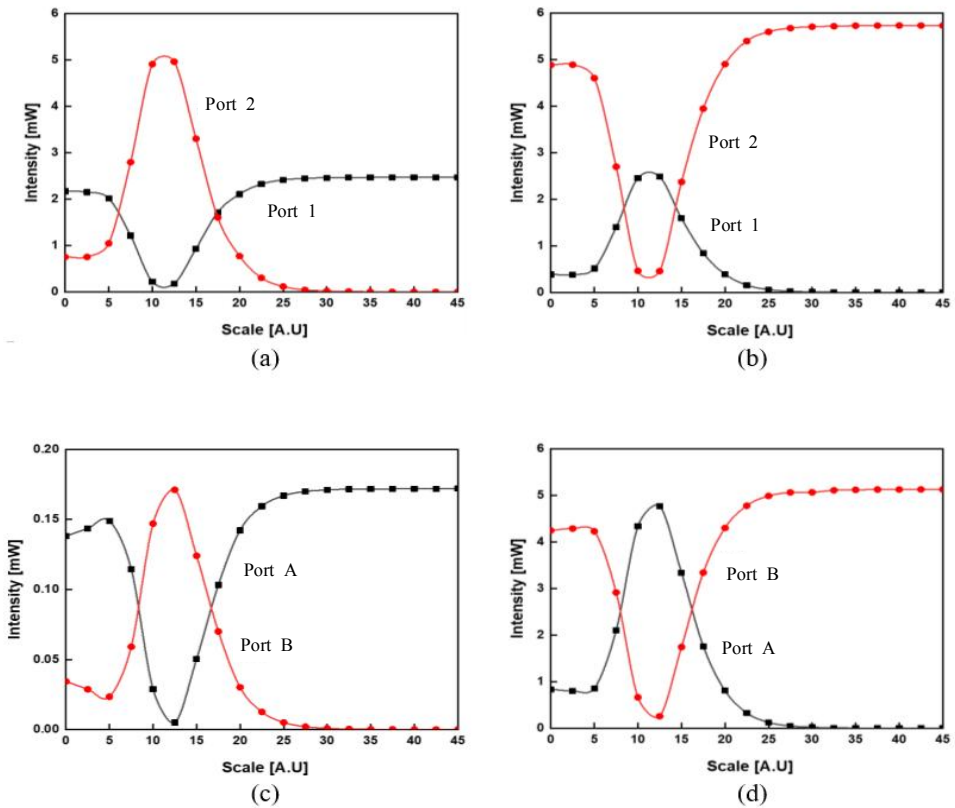


그림 4-5. 샘플 #1의 각 포트별 투과 광세기(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

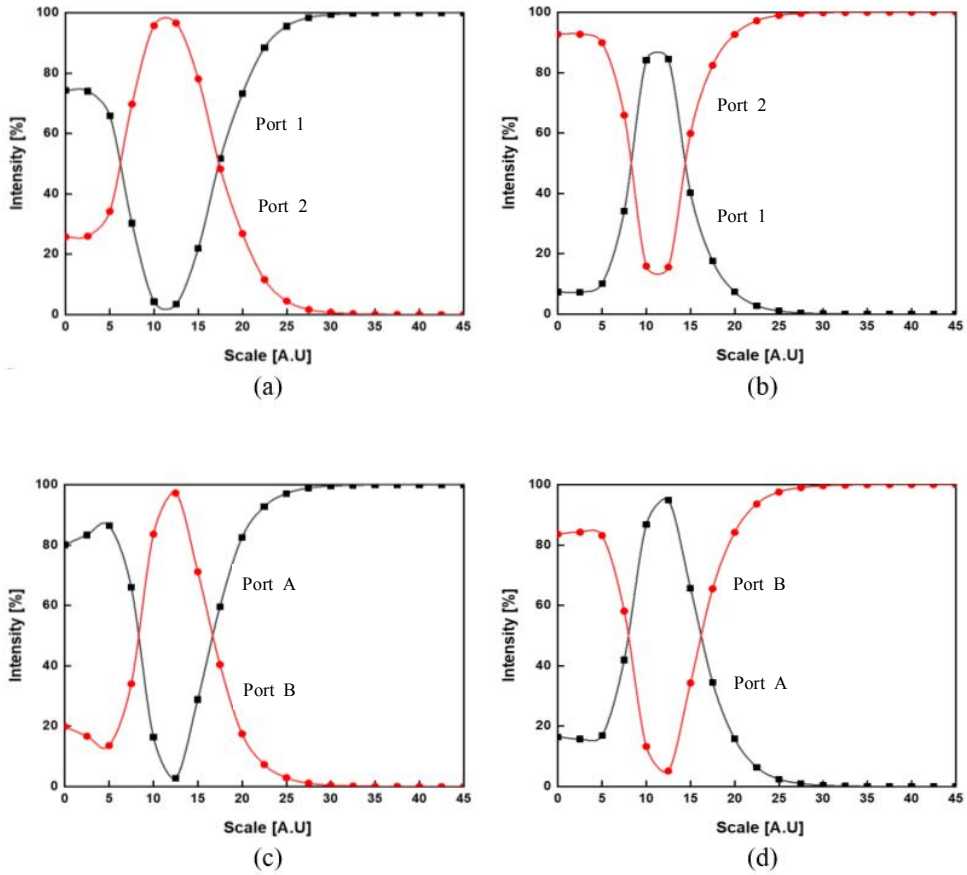


그림 4-6. 샘플 #1의 각 포트별 분할 비율(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

각 포트별 분할 비율은 단일모드 측면 가공 광섬유 커플러의 각 포트별 분할 비율과 동일한 방법으로 계산하였다. 분할 비율이 5:5인 구간은 Port A에 광이 입사했을 때 5~7.5, Port B, Port 1, Port 2에 입사했을 때 7.5~10이었다. 최대 분할 비율은 Port A에 광을 입사했을 때 3.5:96.5, Port B에 입사했을 때 84.5:15.5, Port 1에 입사했을 때 2.8:97.2, Port 2에 입사했을 때 94.9:5.1이었다. 분할 비율이 최대일 때 눈금은 Port A, Port B에 입사했을 때 10~12.5, Port 1, Port 2에 입사했을 때 12.5이었다. 50:50이 되는 위치는 5~10과 15~20에서 발견되었다.

샘플 #2(그림 4-7)에 대한 측정 결과는 다음과 같았다. 각 포트별 출력 광세기는 1310 nm 광을 Port A에 입사했을 때, Port 1에서는 그림 4-8(a)에서와 같이 눈금 20에서 55까지는 광세기가 증가했다가 75까지는 감소하는 양상을 보였다. Port 2에서는 눈금 0에서 55까지 광세기가 증가했다가 그 이후부터 100까지는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port B에 광을 입사했을 때, Port 1에서는 그림 4-8(b)와 같이 조절 나사의 눈금이 30에서 50까지는 광세기가 증가했다가 75까지는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port 2에서는 눈금 0에서 55까지는 광세기가 증가했다가 55에서 100까지는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port 1에 광을 입사했을 때, Port A에서는 그림 4-8(c)와 같이 조절 나사의 눈금이 15에서 60까지는 광세기가 증가했다가 95까지는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port B에서는 눈금 0에서 55까지는 광세기가 증가했다가 100까지 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port 2에 입사했을 때, Port A에서는 그림 4-8(d)와 같이 조절 나사의 눈금이 30에서 60까지는 광세기가 증가했다가 80까지는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port B에서는 눈금 0에서 55까지 광세기가 증가했다가 100까지는 광세기가 증가하는 양상을 보였다. 각각의 포트에서 광세기가 같아지는 구간은 나타나지 않았다.

Sample #2

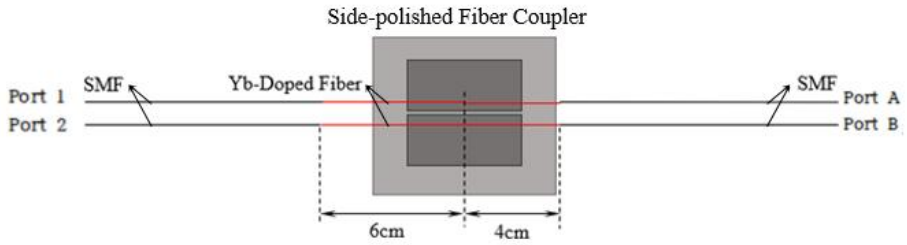


그림 4-7. 샘플 #2의 개략도

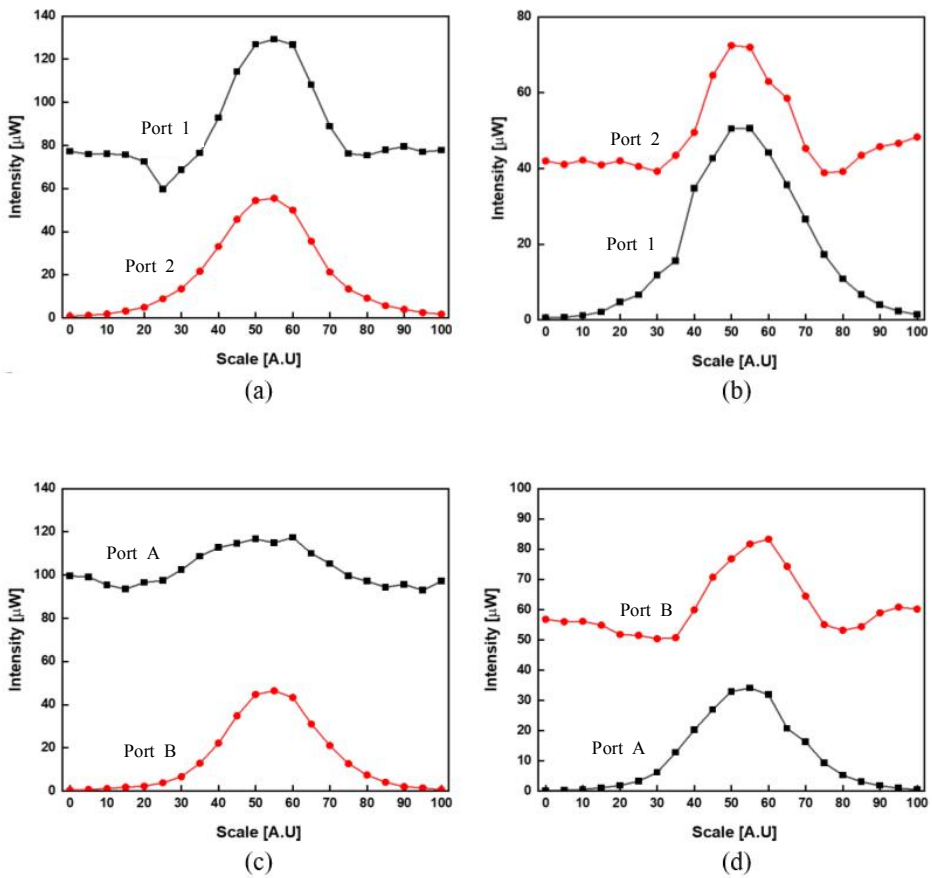


그림 4-8. 샘플 #2의 각 포트별 투과 광세기(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

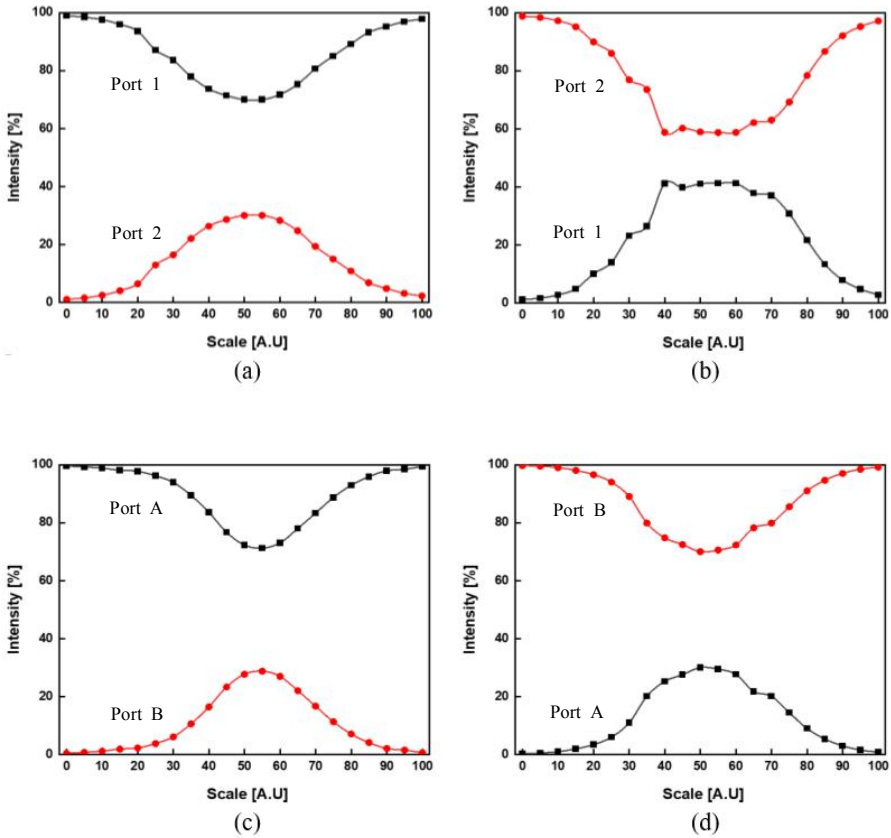


그림 4.9. 샘플 #2의 각 포트별 분할 비율(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

각 포트별 최대 분할 비율은 Port A에 광을 입사했을 때 69.9:30.1, Port B에 입사했을 때 41.3:58.7, Port 1에 입사했을 때 71.2:28.8, Port 2에 입사했을 때 30.0:70.0이었다. 분할 비율이 최대일 때 눈금은 Port A, Port B, Port 1에 입사했을 때 55, Port 2에 입사했을 때 50이었다.

샘플 #3(그림 4-10)에 대한 측정 결과는 다음과 같았다. 각 포트별 출력 광세기는 1310 nm 광을 Port A에 입사했을 때, Port 1에서는 그림 4-11(a)에서와 같이 눈금 0에서 55까지 광세기가 감소했다가 100까지는 증가하는 양상을 보였다. Port 2에서는 눈금 0에서 40까지 광세기가 증가했다가 100까지는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port B에 광을 입사했을 때, Port 1에서는 그림 4-11(b)에서와 같이 조절 나사의 눈금이 0에서 40까지 광세기가 증가했다가 이후부터 100까지는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port 2에서는 눈금 0에서 55까지 광세기가 감소했다가 이후부터 100까지는 광세기가 증가하는 양상을 보였다. Port 1에 입사했을 때, Port A에서는 그림 4-11(c)에서와 같이 조절 나사의 눈금이 0에서 60까지 광세기가 감소했다가 그 이후부터 100까지는 광세기가 증가하는 양상을 보였다. Port B에서는 눈금 0에서 40까지 광세기가 증가했다가 100까지 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port 2에 입사했을 때, Port A에서는 그림 4-11(d)에서와 같이 조절 나사의 눈금이 0에서 45까지 광세기가 증가했다가 이후부터 100까지는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port B에서는 눈금 0에서 60까지 광세기가 감소했다가 이후부터 100까지는 광세기가 증가하는 양상을 보였다. 각각의 포트에서 광세기가 갈아지는 구간은 나타나지 않았다.

Sample #3

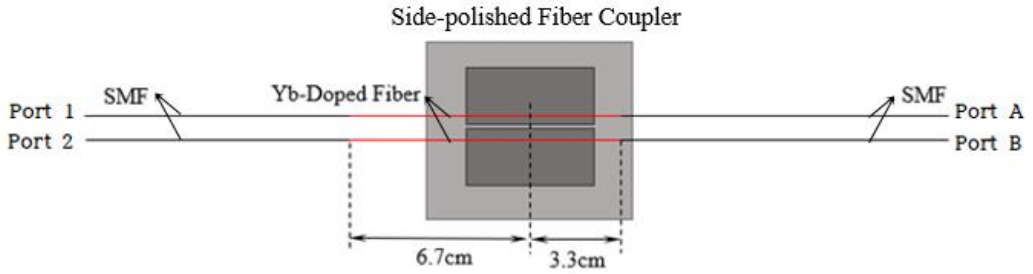


그림 4-10. 샘플 #3의 개략도

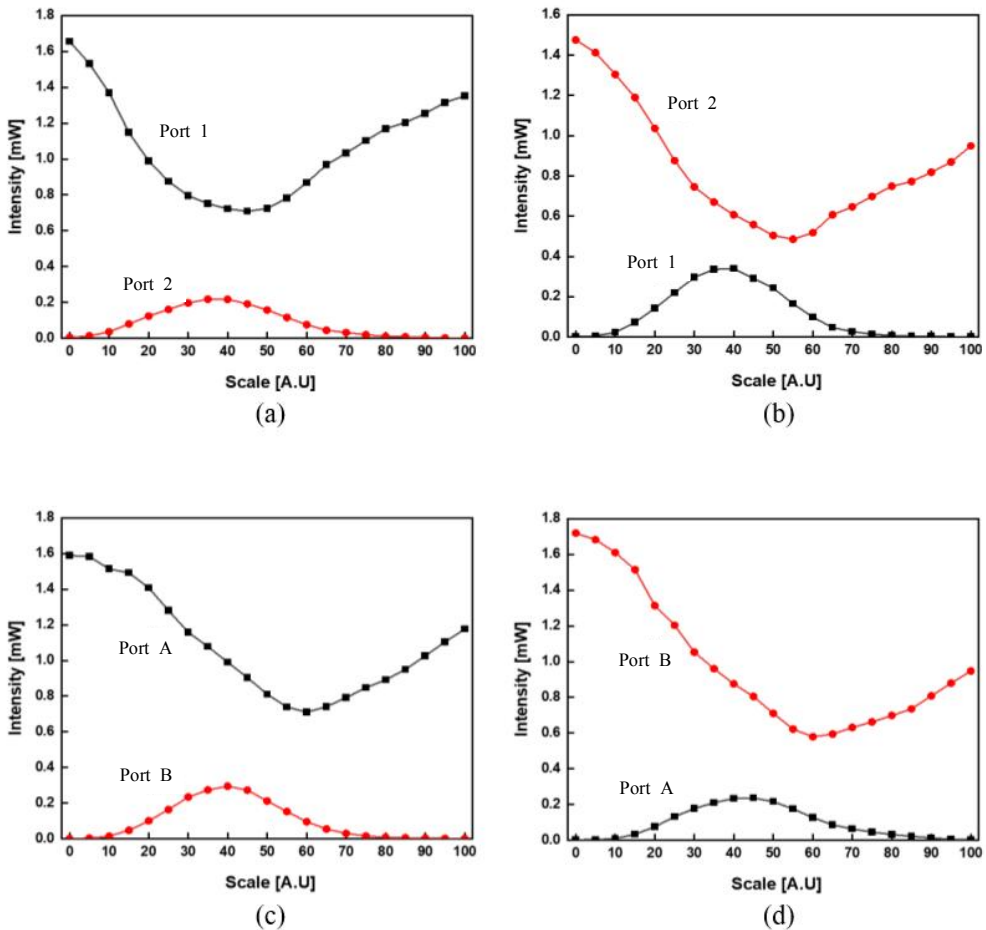


그림 4-11. 샘플 #3의 각 포트별 투과 광세기(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

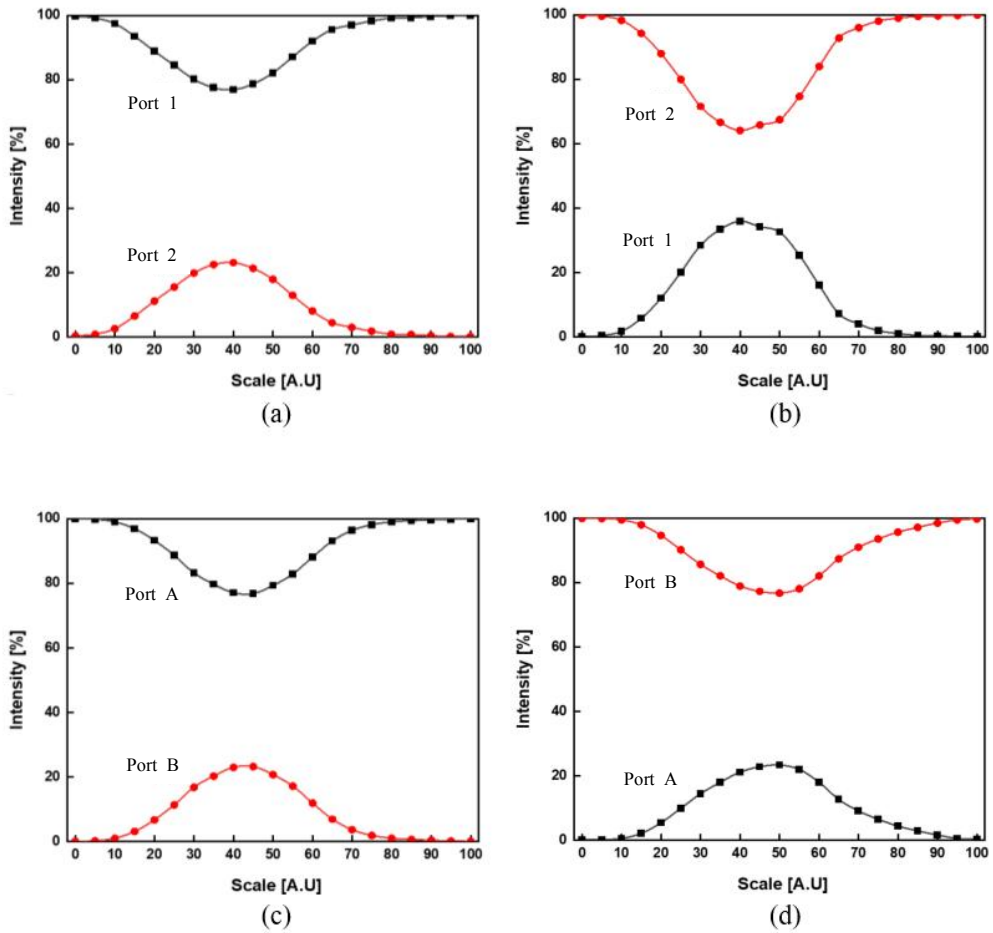


그림 4-12. 샘플 #3의 각 포트별 분할 비율(@ 1310 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

입력 포트에 대한 설명은 그림 4-4와 같다. 980 nm 광을 Port A에 입사했을 때 각 포트별 출력 광세기는 Port 1에서는 그림 4-13(a)와 같이 눈금 0에서 2.5까지 광세기가 감소했다가 이후부터 45까지는 증가하는 양상을 보였다. Port 2에서는 눈금 0에서 2.5까지 광세기가 증가했다가 그 이후부터 100까지는 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port B에 입사했을 때, Port 1에서는 그림 4-13(b)와 같이 조절 나사의 눈금이 0에서 2.5까지 광세기가 증가했다가 100까지 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port 2에서는 눈금 0에서 2.5까지 광세기가 감소했다가 그 이후부터 100까지는 광세기가 증가하는 양상을 보였다. Port 1에 입사했을 때, Port A에서는 그림 4-13(c)와 같이 조절 나사의 눈금이 0에서 5까지 광세기가 감소했다가 20까지 광세기가 증가하는 양상을 보였다. Port B에서는 눈금 0에서 5까지 광세기가 증가했다가 100까지 광세기가 감소하는 양상을 보였다.

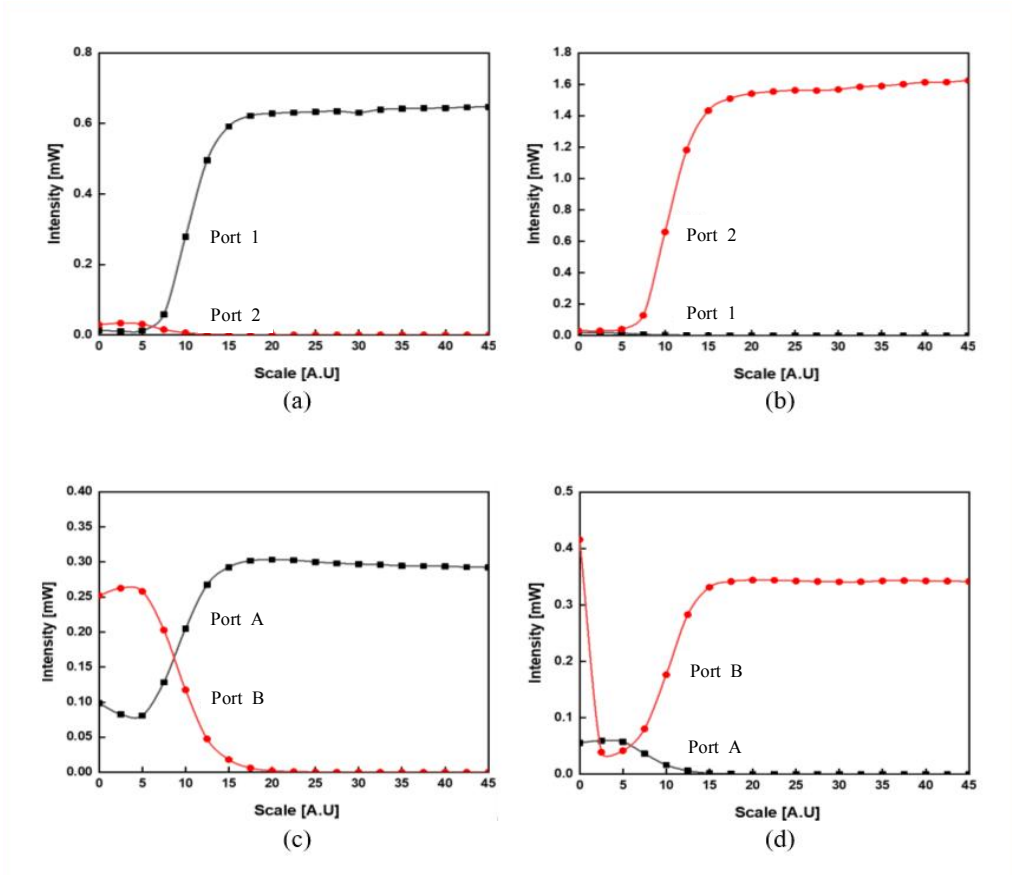


그림 4-13. 샘플 #1의 각 포트별 광세기(@ 980 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

Port 2에 입사했을 때, Port A에서는 그림 4-13(d)와 같이 조절 나사의 눈금이 0에서 2.5까지 광세기가 증가했다가 20까지 광세기가 감소하는 양상을 보였다. Port B에서는 눈금 0에서 2.5까지 광세기가 감소했다가 100까지 광세기가 증가하는 양상을 보였다. 각각의 포트에서 광세기가 같아지는 구간은 나타나지 않았다.

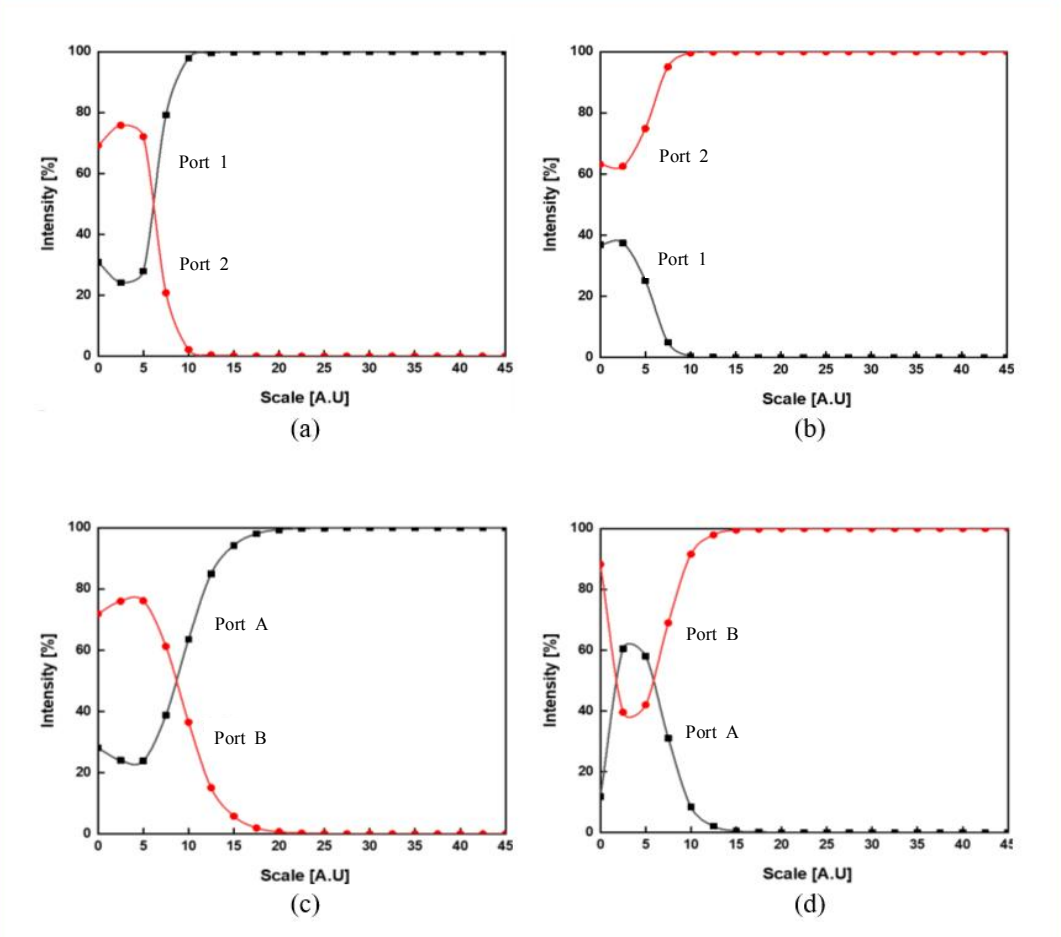


그림 4-14. 샘플 #1의 각 포트별 분할 비율(@ 980 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

각 포트별 최대 분할 비율은 Port A에 입사했을 때 24.2:75.8, B에 입사했을 때 37.5:62.5, Port 1에 입사했을 때 23.8:76.2, Port 2에 입사했을 때 60.4:39.6이었다. 분할 비율이 최대일 때 눈금은 Port A, Port B에 입사했을 때 40, Port 1에 입사했을 때 45, Port 2에 입사했을 때 50이었다. 5~10에서 50:50으로 분배되었다.

입력 포트에 대한 설명은 그림 4-7와 같다. 샘플 #2의 각 포트별 출력 광세기는 980 nm 펌프 광을 입사했을 때 포트별로 출력되는 광세기가 매우 작았다. 광이 커플링을 하지 않고 그대로 출력하는 포트의 광세기는 눈금의 조절과는 무관하게 무작위적으로 출력되었다. 하지만 커플링 되어 광을 전달받는 쪽 포트의 광세기는 커플링이 일어나는 구간에서 증가하였다.

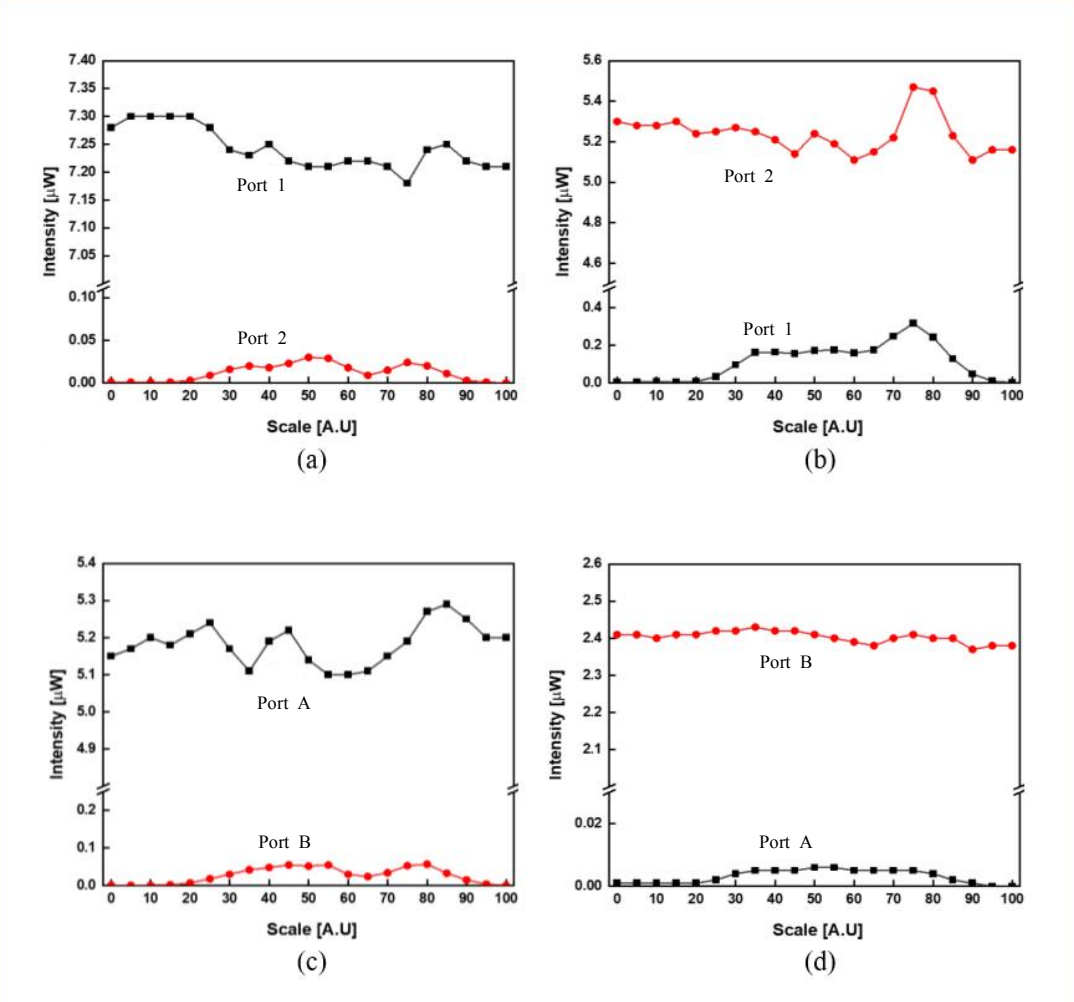


그림 4-15. 샘플 #2의 각 포트별 광세기(@ 980 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

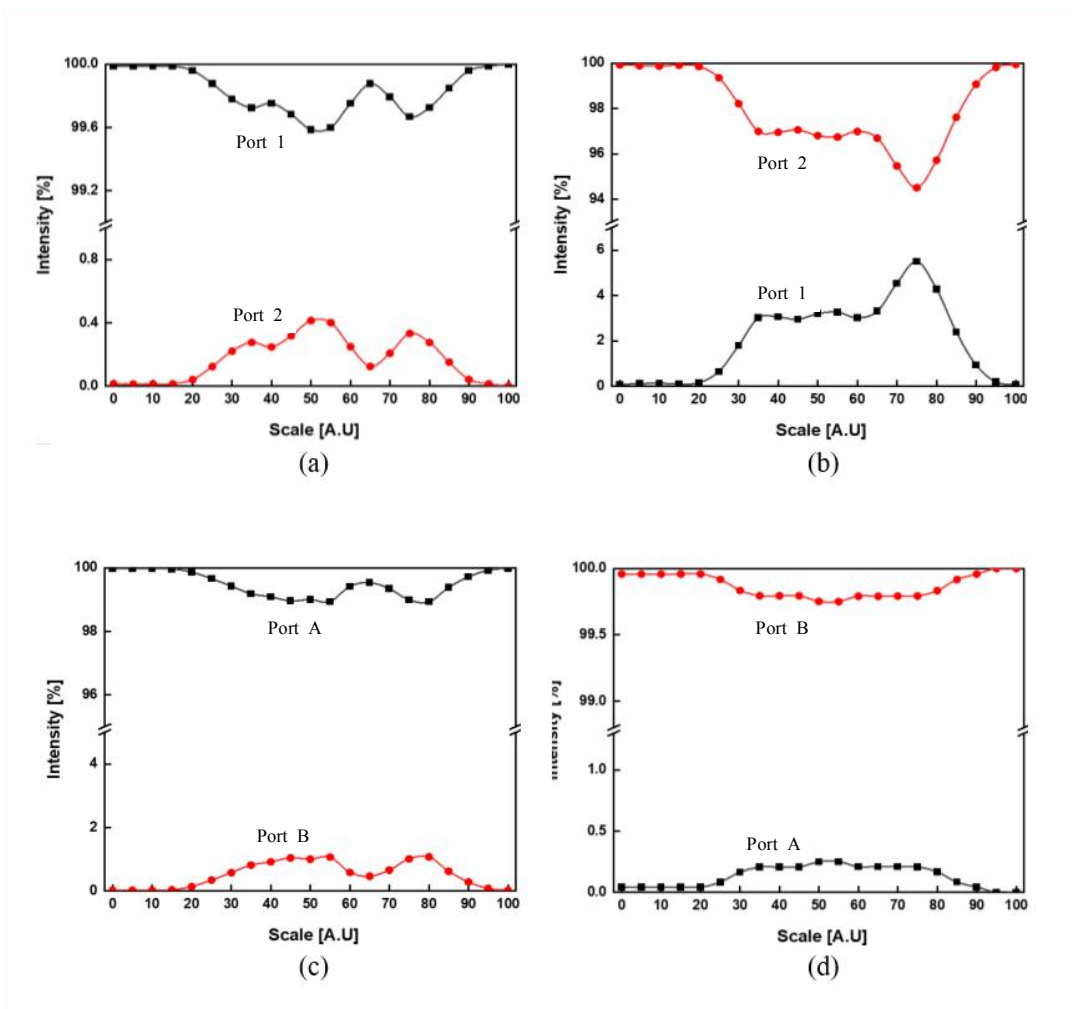


그림 4-16. 샘플 #2의 각 포트별 분할 비율(@ 980 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

각 포트별 최대 분할 비율은 Port A에 입사했을 때 99.6:0.4, B에 입사했을 때 5.5:94.5, Port 1에 입사했을 때 98.9:1.07, Port 2에 입사했을 때 0.2:99.8이었다. 분할 비율이 최대일 때 눈금은 Port A에 입사했을 때 50, Port B에 입사했을 때 75, Port 1, Port 2에 입사했을 때 55이었다.

입력 포트에 대한 설명은 그림 4-10와 같다. 샘플 #3의 각 포트별 출력 광세기는 샘플 #2와 유사하게 모든 포트에서 광세기가 약하게 출력되었다. 광이 커플링을 하지 않고 그대로 출력하는 포트의 광세기와 커플링 되어 광을 전달받는 포트의 광세기가 유사하게 변화하였다.

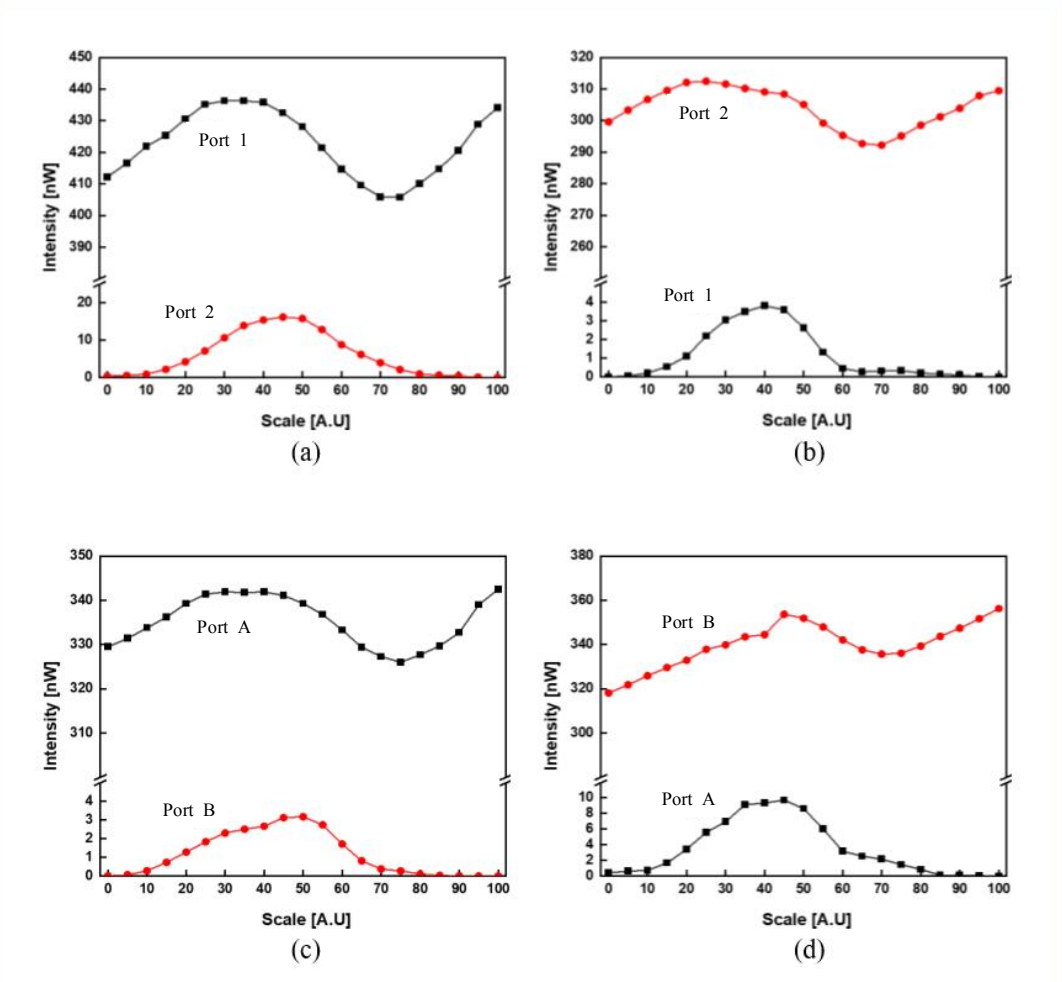


그림 4-17. 샘플 #3의 각 포트별 광세기(@ 980 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

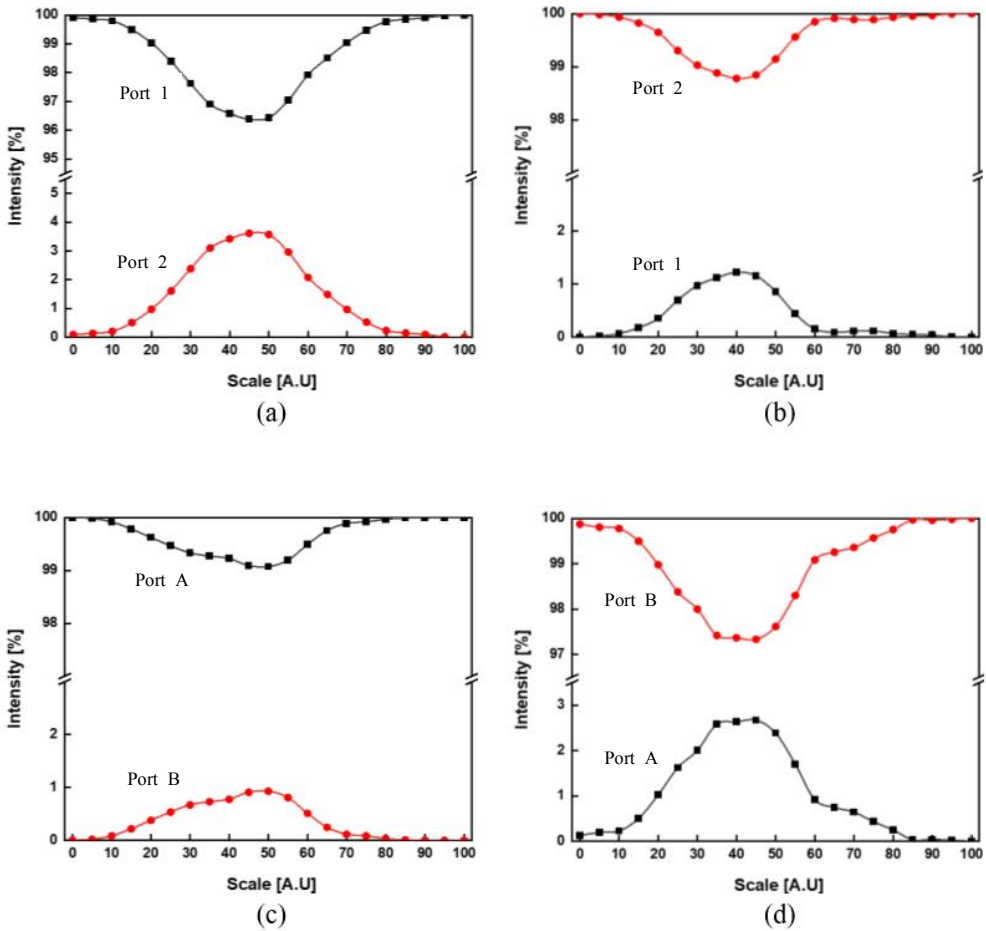


그림 4-18. 샘플 #3의 각 포트별 분할 비율(@ 980 nm) (a) Port A에 입사했을 때, (b) Port B에 입사했을 때, (c) Port 1에 입사했을 때, (d) Port 2에 입사했을 때

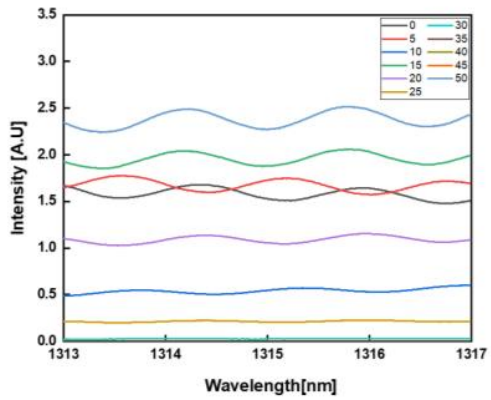
각 포트별 최대 분할 비율은 Port A에 입사했을 때 96.4:3.6, B에 입사했을 때 1.2:98.8, Port 1에 입사했을 때 99.1:0.9, Port 2에 입사했을 때 2.7:93.3이었다. 분할 비율이 최대일 때 눈금은 Port A에 입사했을 때 45, Port B에 입사했을 때 40, Port 1에 입사했을 때 50, Port 2에 입사했을 때 45이었다.

제 2 절 광섬유 커플러의 위상 이동 특성 측정 결과

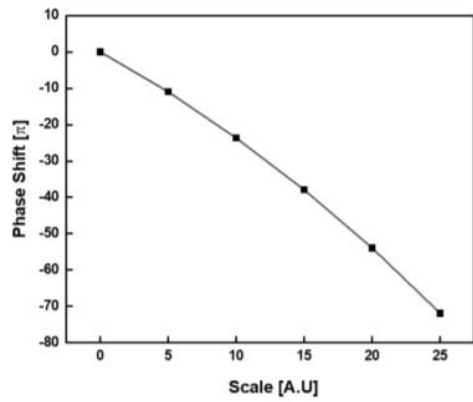
1. 가변 분배비에 따른 위상 이동 특성

측면 가공 광섬유 커플러의 눈금을 조절함으로써 각각의 포트의 분배비가 변화하고 그에 따른 광세기가 달라짐에 따라 발생하는 간섭무늬 스펙트럼의 위상 이동이 얼마나 발생하는지 측정하였다. 1310 nm 광세기를 3.33 mW로 고정, WDM 커플러를 통과하여 이터븀 도핑된 광섬유로 입사하는 980 nm 펌프 광세기를 14.38 mW로 고정하였다. 커플러의 조절 나사 눈금만 조절하여 간섭계의 간섭 신호의 위상 이동을 확인하였다. 간섭계는 그림 3-15와 동일하게 구성하였고, 광원의 입사 포트와 펌프의 입사 포트를 변경하면서 측정하였다.

샘플 #1을 이용하여 구성한 간섭계의 조절 나사의 눈금에 따라 간섭 신호를 측정하였다. 눈금에 따라 간섭 신호의 광세기가 증감하였고 동시에 위상 또한 이동하였다. 위상 이동은 단위 눈금 5당 몇 주기 이동하는지 파악하고 한 주기 이내의 상세한 이동은 피크의 위상 이동 파장을 한 주기의 파장으로 나누어 주기와 합하여 계산하였다. 샘플 #1은 눈금 5당 다섯 주기 정도 위상이 이동하였고, 0에서 25까지 60π에서 70π 정도 위상이 이동하였다.

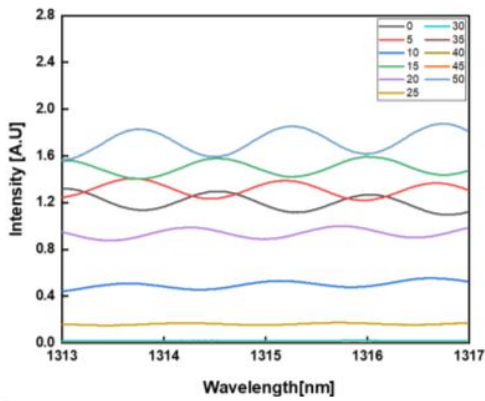


(a)

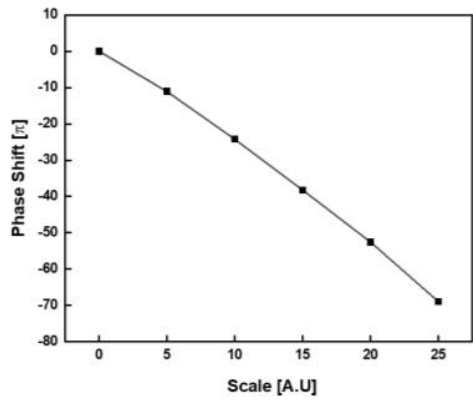


(b)

그림 4-19. 샘플 #1에서 신호광을 Port A에, 펌프광을 Port 1에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

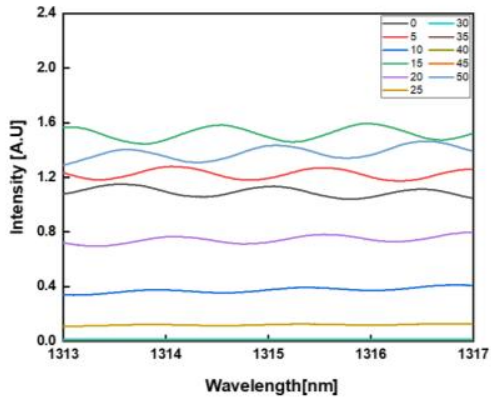


(a)

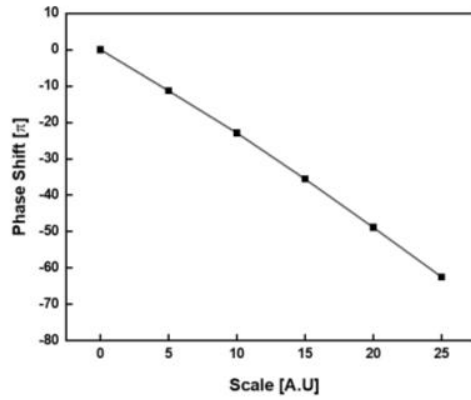


(b)

그림 4-20. 샘플 #1에서 신호광을 Port A에, 펌프광을 Port 2에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

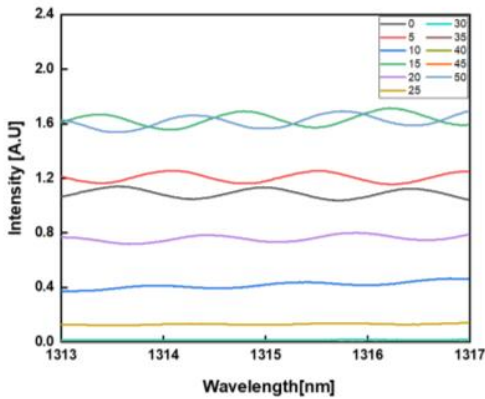


(a)

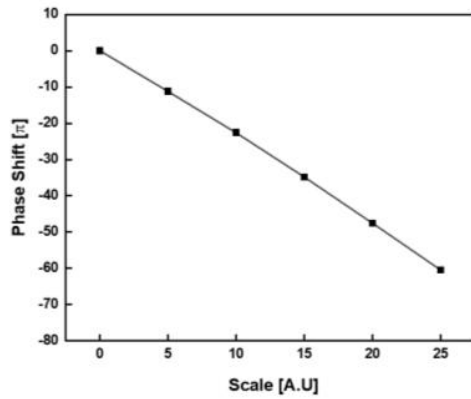


(b)

그림 4-21. 샘플 #1에서 신호광을 Port B에, 펌프광을 Port 1에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

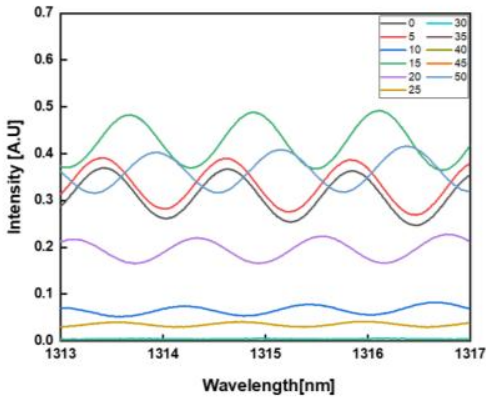


(a)

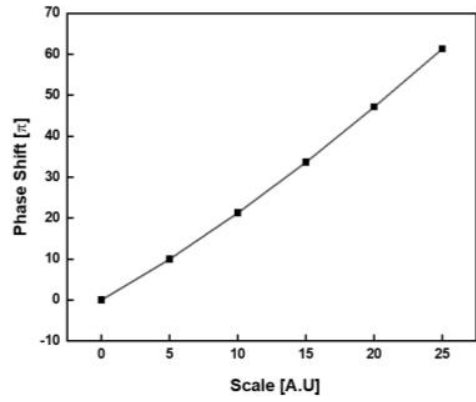


(b)

그림 4-22. 샘플 #1에서 신호광을 Port B에, 펌프광을 Port 2에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

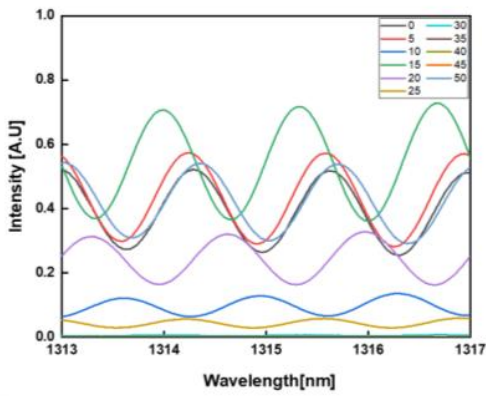


(a)

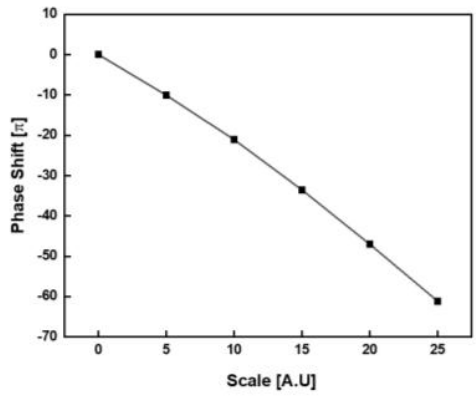


(b)

그림 4-23. 샘플 #1에서 신호광을 Port 1, 펌프광을 Port A에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

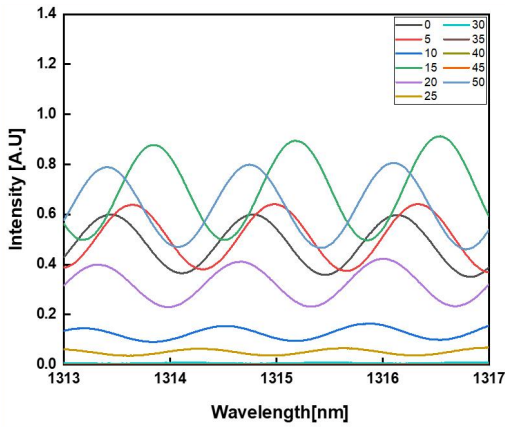


(a)

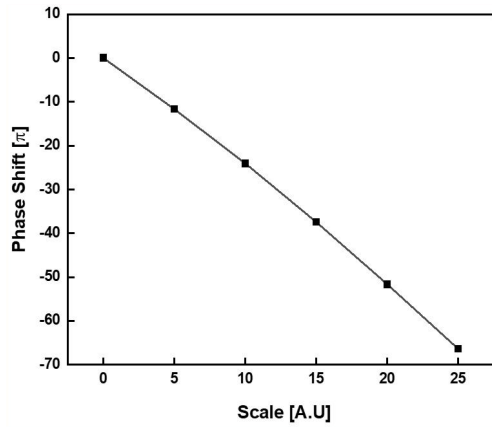


(b)

그림 4-24. 샘플 #1에서 신호광을 Port 1, 펌프광을 Port B에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

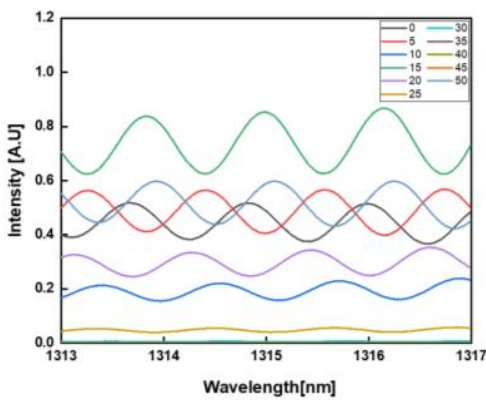


(a)

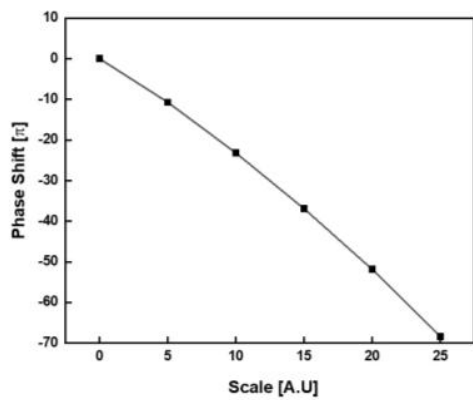


(b)

그림 4-25. 샘플 #1에서 신호광을 Port 2, 펌프광을 Port A에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과



(a)



(b)

그림 4-26. 샘플 #1에서 신호광을 Port 2, 펌프광을 Port B에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

샘플 #2의 간섭 신호 측정과 위상 이동 계산도 샘플 #1과 같다. 샘플 #2의 간섭 신호의 광세기 변화는 샘플 #1과 같이 눈금에 따라 변화하였다. 샘플 #2는 눈금 10마다 두 주기 정도 변화였다. 눈금 0~20이 모두 0인 이유는 간섭 신호가 매우 약하여 피크를 찾기 어렵기 때문에 피크를 구분할 수 있는 20부터 위상 이동을 측정하였다. 눈금 20~100까지 위상은 적게 15π 에서 많게 30π 이동하였다.

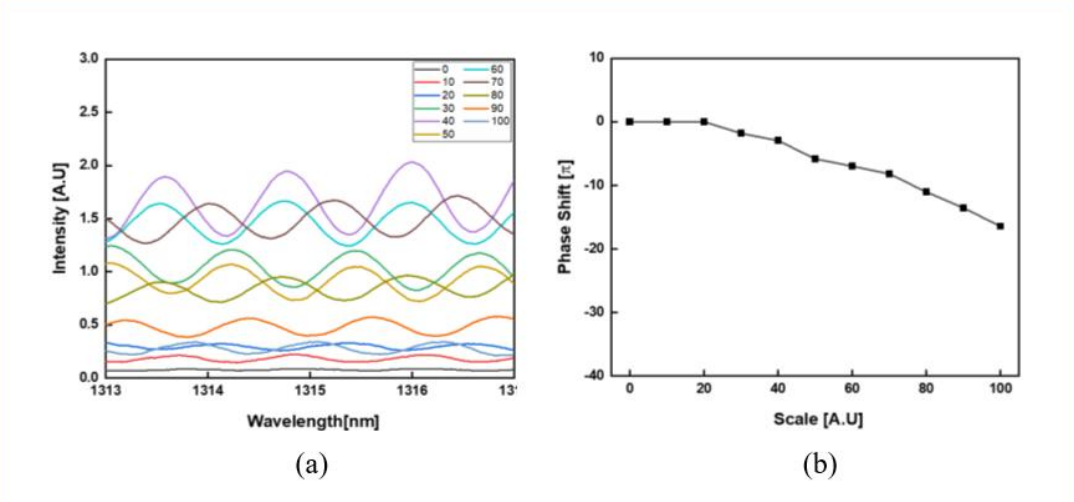


그림 4-27. 샘플 #2에서 신호광을 Port A, 펌프광을 Port 1에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

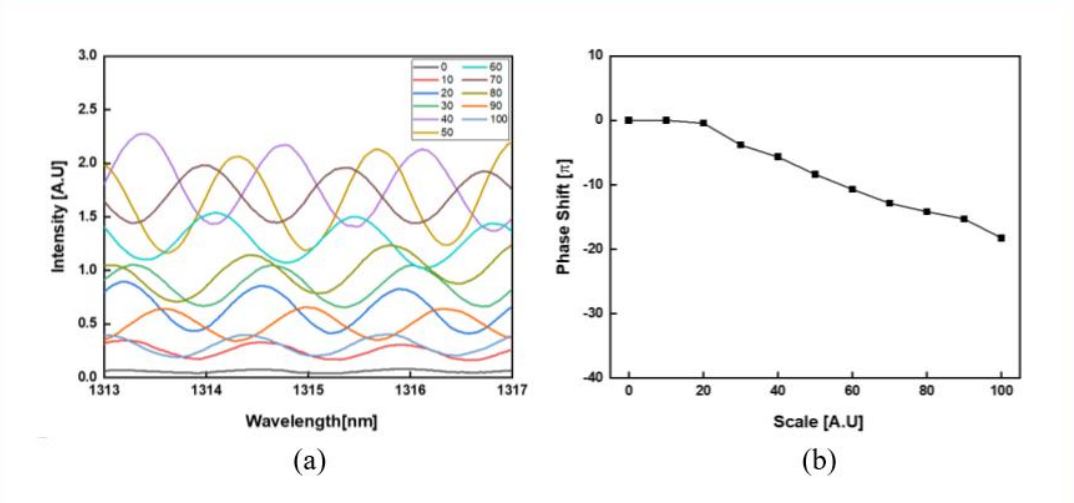
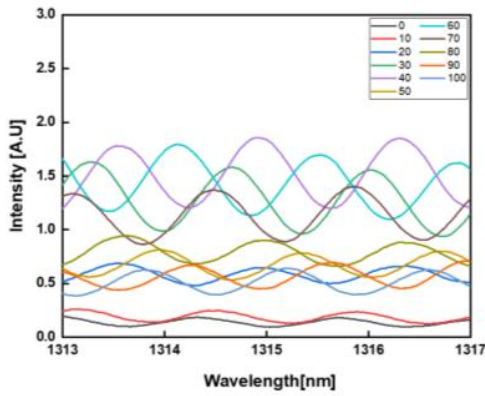
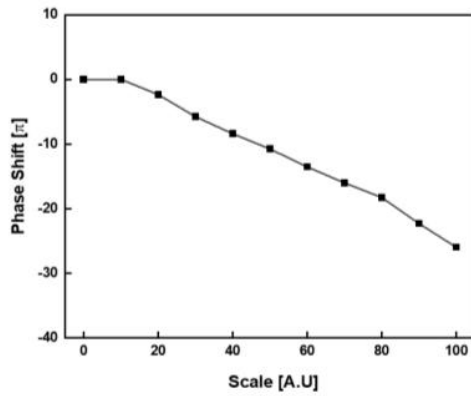


그림 4-28. 샘플 #2에서 신호광을 Port A, 펌프광을 Port 2에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

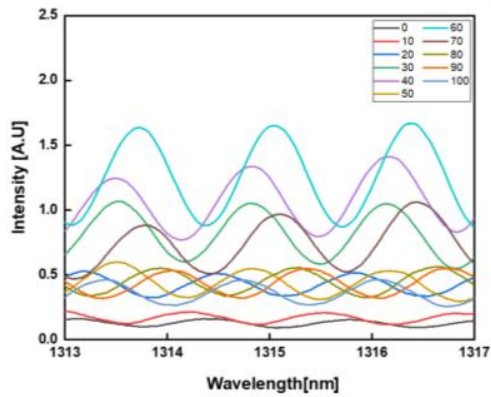


(a)

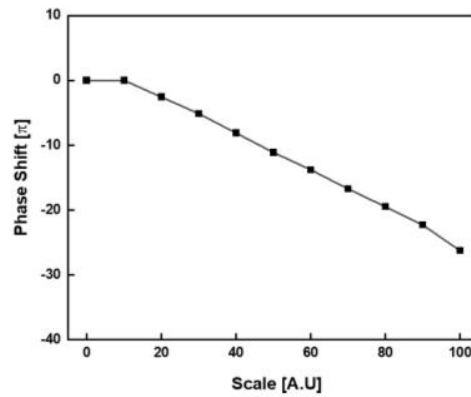


(b)

그림 4-29. 샘플 #2에서 신호광을 Port B, 펌프광을 Port 1에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과



(a)



(b)

그림 4-30. 샘플 #2에서 신호광을 Port B, 펌프광을 Port 2에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

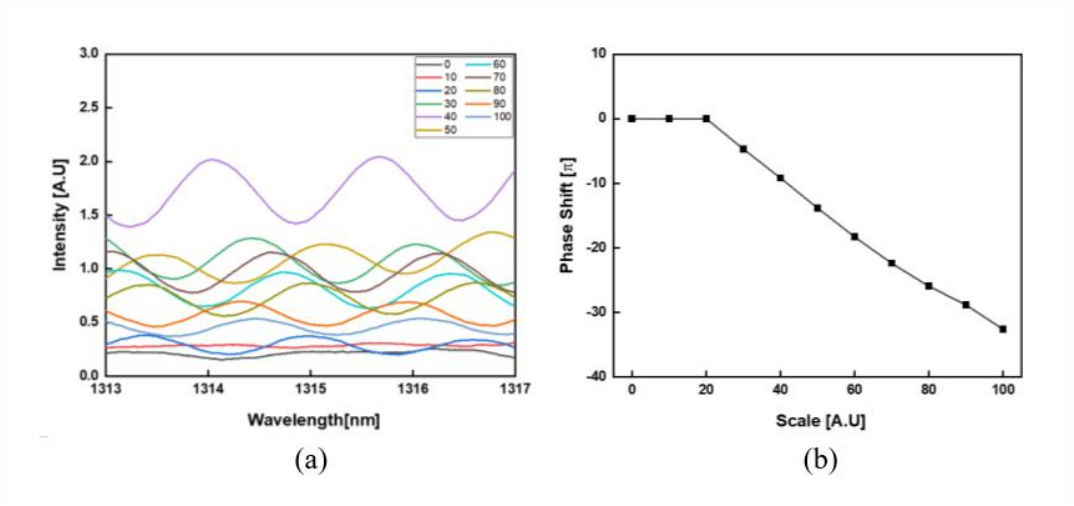


그림 4-31. 샘플 #2에서 신호광을 Port 1, 펌프광을 Port A에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

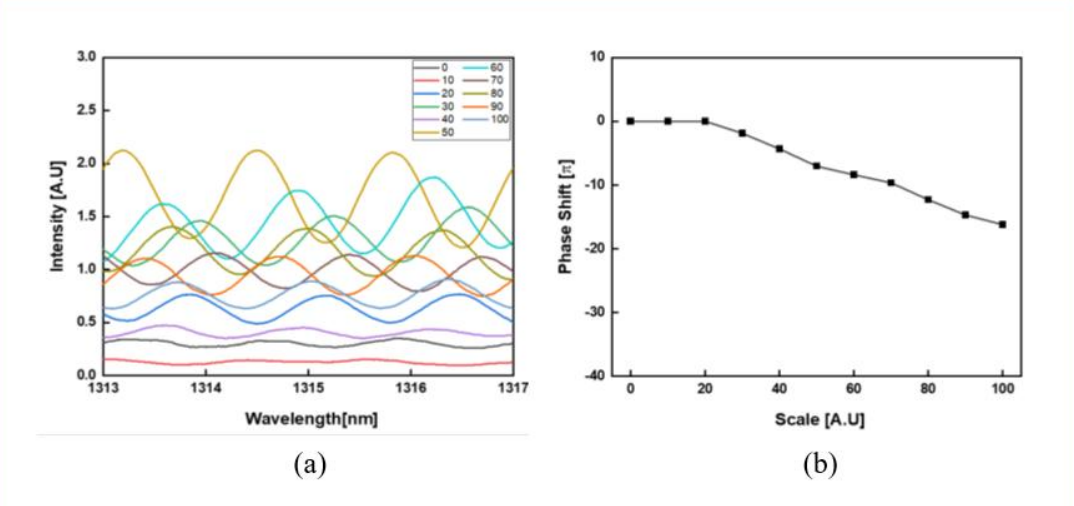


그림 4-32. 샘플 #2에서 신호광을 Port 1, 펌프광을 Port B에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

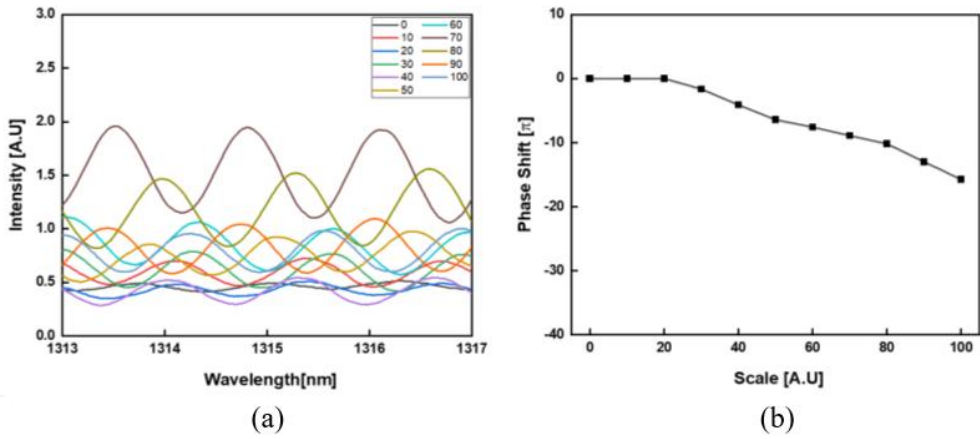


그림 4-33. 샘플 #2에서 신호광을 Port 2, 펌프광을 Port A에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

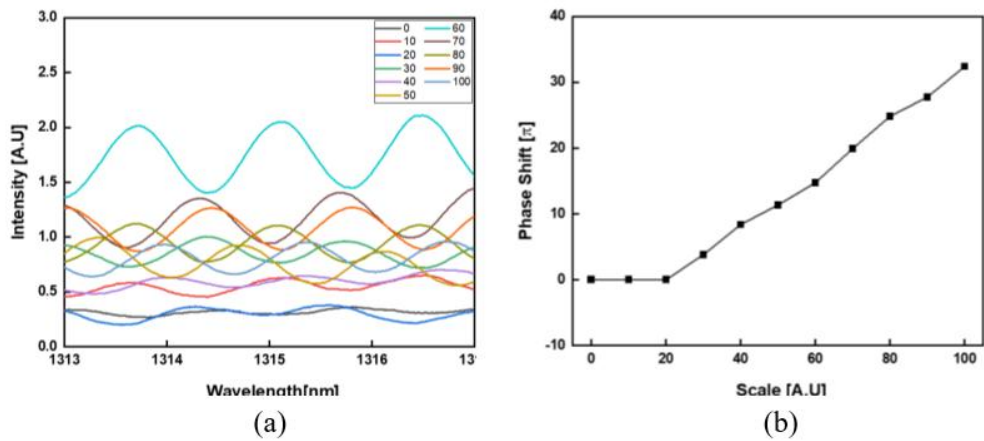


그림 4-34. 샘플 #2에서 신호광을 Port 2, 펌프광을 Port B에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

샘플 #3의 간섭 신호 측정과 위상 이동 계산도 샘플 #1, #2과 같다. 샘플 #3의 간섭 신호의 광세기 변화는 샘플 #1, #2과 같이 눈금에 따라 변화하였다. 샘플 #3는 눈금 10마다 다섯 주기 정도 변화였다. 눈금 0~40이 모두 0인 이유는 간섭 신호가 매우 약하여 피크를 찾기 어렵기 때문에 피크를 구분할 수 있는 눈금부터 위상 이동을 측정하였다. 눈금 40~100까지 위상은 적게 40π 에서 많게 50π 이동하였다.

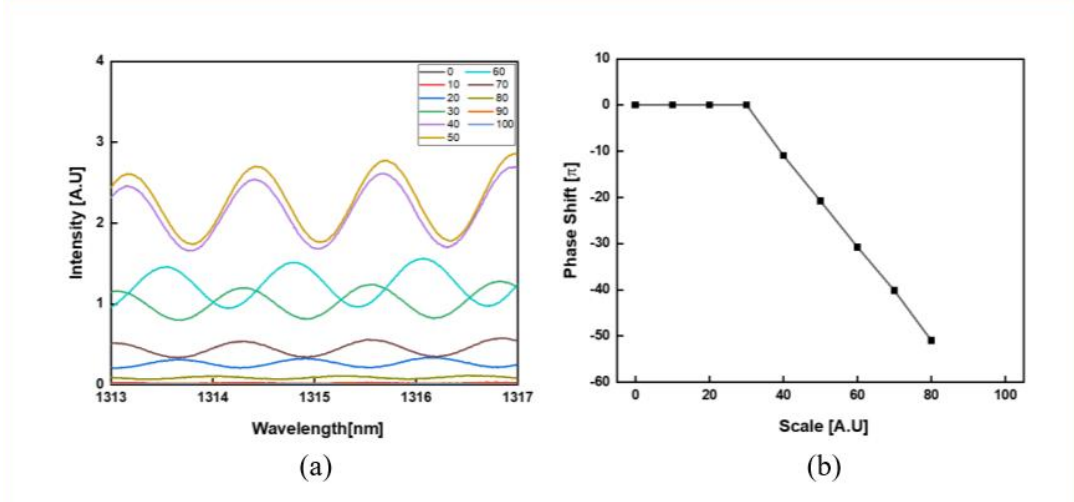


그림 4-35. 샘플 #3에서 신호광을 Port A, 펌프광을 Port 1에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

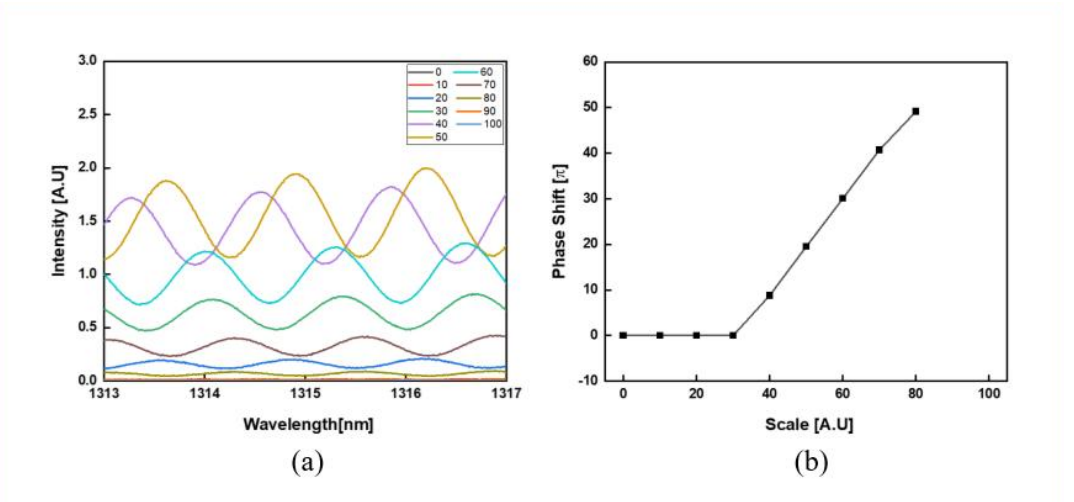
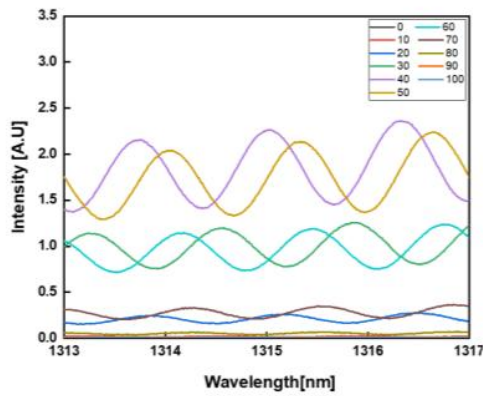
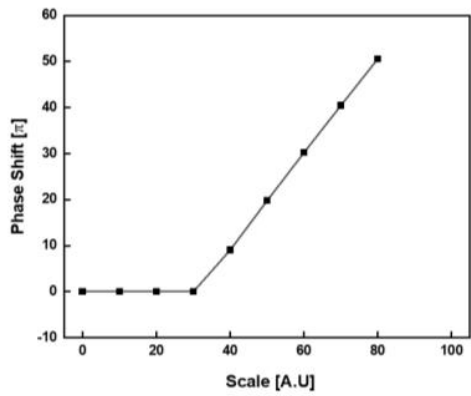


그림 4-36. 샘플 #3에서 신호광을 Port A, 펌프광을 Port 2에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

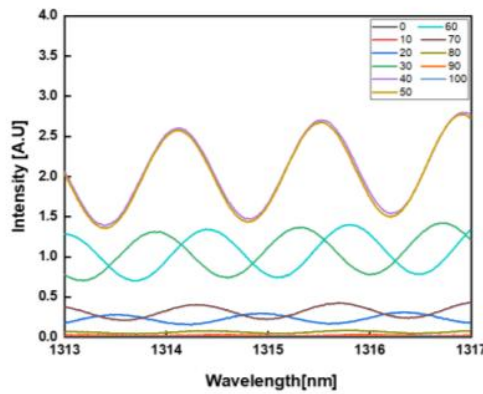


(a)

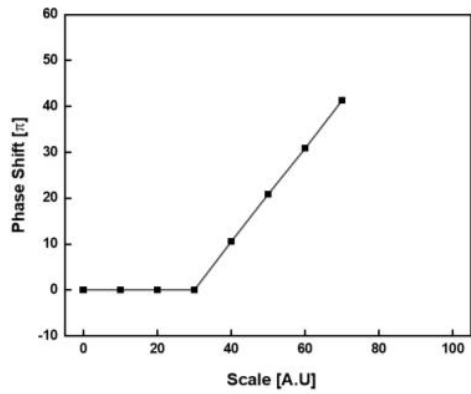


(b)

그림 4-37. 샘플 #3에서 신호광을 Port B, 펌프광을 Port 1에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

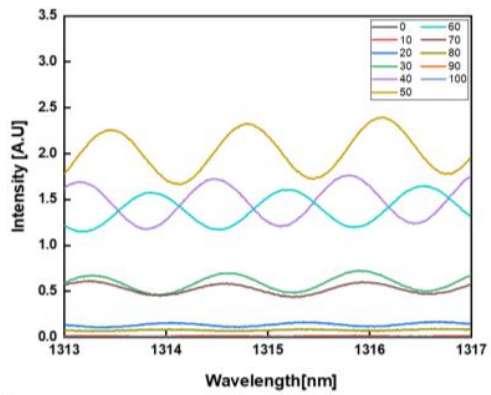


(a)

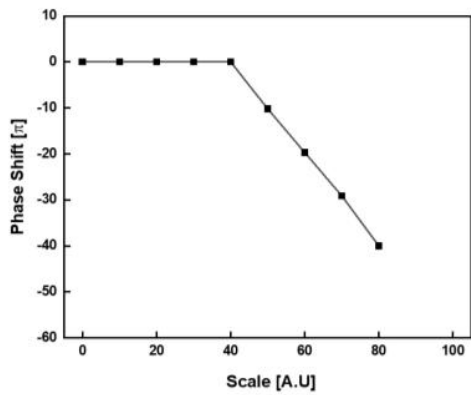


(b)

그림 4-38. 샘플 #3에서 신호광을 Port B, 펌프광을 Port 2에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

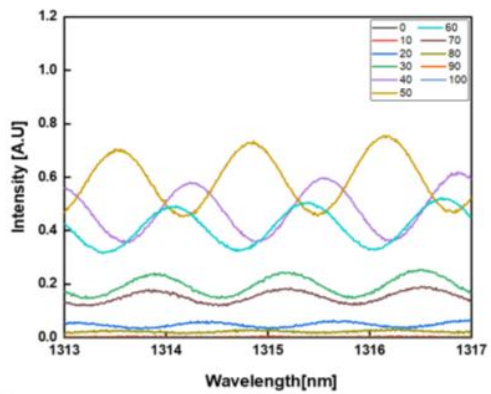


(a)

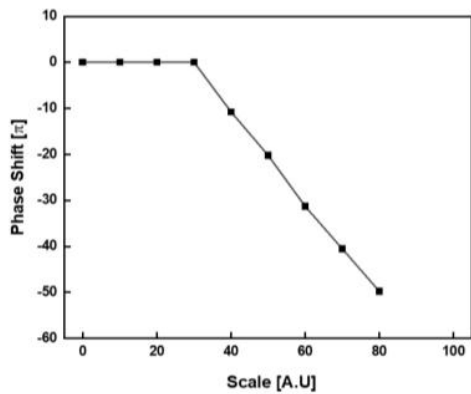


(b)

그림 4-39. 샘플 #3에서 신호광을 Port 1, 펌프광을 Port A에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

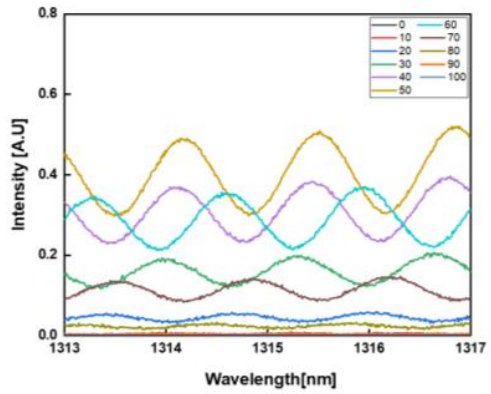


(a)

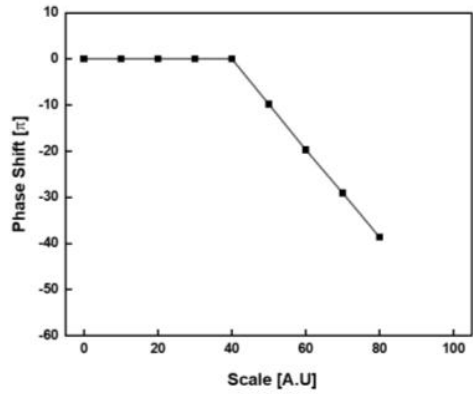


(b)

그림 4-40. 샘플 #3에서 신호광을 Port 1, 펌프광을 Port B에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

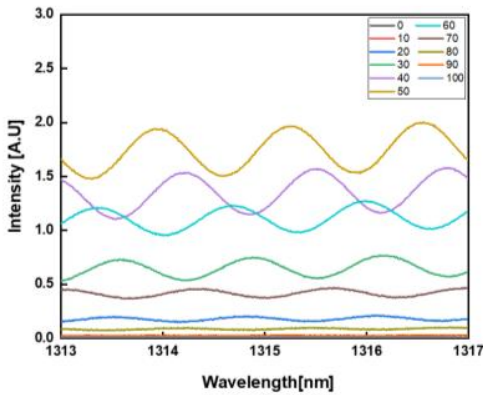


(a)

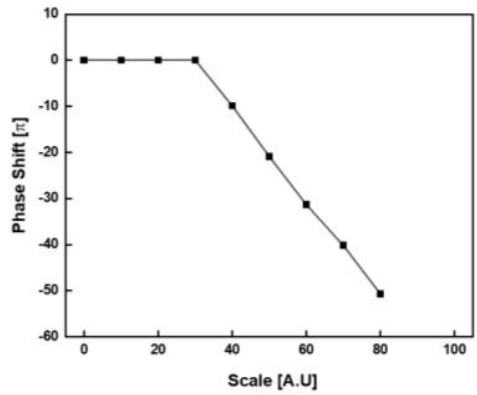


(b)

그림 4-41. 샘플 #3에서 신호광을 Port 2, 펌프광을 Port A에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과



(a)



(b)

그림 4-42. 샘플 #3에서 신호광을 Port 2, 펌프광을 Port B에 입사했을 때 (a) 눈금에 따른 간섭 신호, (b) 위상 이동 결과

2. 이터븀 광섬유 길이에 따른 위상 이동 특성

커플러에 사용한 이터븀 도핑된 광섬유는 길이에 따라 펌프광을 흡수하는 양이 다르기 때문에 같은 펌프 광세기를 입사하더라도 이터븀 도핑된 광섬유의 길이에 따라 위상 이동량이 다르다. 실험에서는 WDM 커플러로부터 980 nm 펌프광을 흡수하기 시작하는 이터븀 도핑된 광섬유 입사 부분부터 측면 가공 위치까지의 길이에 따른 위상 이동량을 측정하였다.

그림 4-43에서는 각각의 이터븀 도핑된 광섬유의 길이가 다른 경우에 펌프 광세기에 따른 간섭신호의 이동 정도를 보여주고 있다. 각각의 광섬유 길이에 따라서 신호광의 광손실이 다르므로 광세기의 차이도 보여지고 있으며 간섭신호의 이동량에서도 차이가 있다는 것을 알 수 있다.

그림 4-44와 4-45에서는 특정 파장에서의 위상 이동 정도를 추적하여 그런 위상 이동량을 볼 수 있다. 펌프광의 세기가 인가되는 전류량에 따라서 증가함에 따라 선형적인 특성을 보이면서 위상 이동이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 실제 측정에서는 전류값이 증가하면서 간섭신호가 장파장 또는 단파장쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 이동하는 방향은 광경로차의 부호에 따른 것으로 광경로차의 절대량만을 고려하고 있기 때문에 부호는 양인 경우만을 고려하고자 하였다.

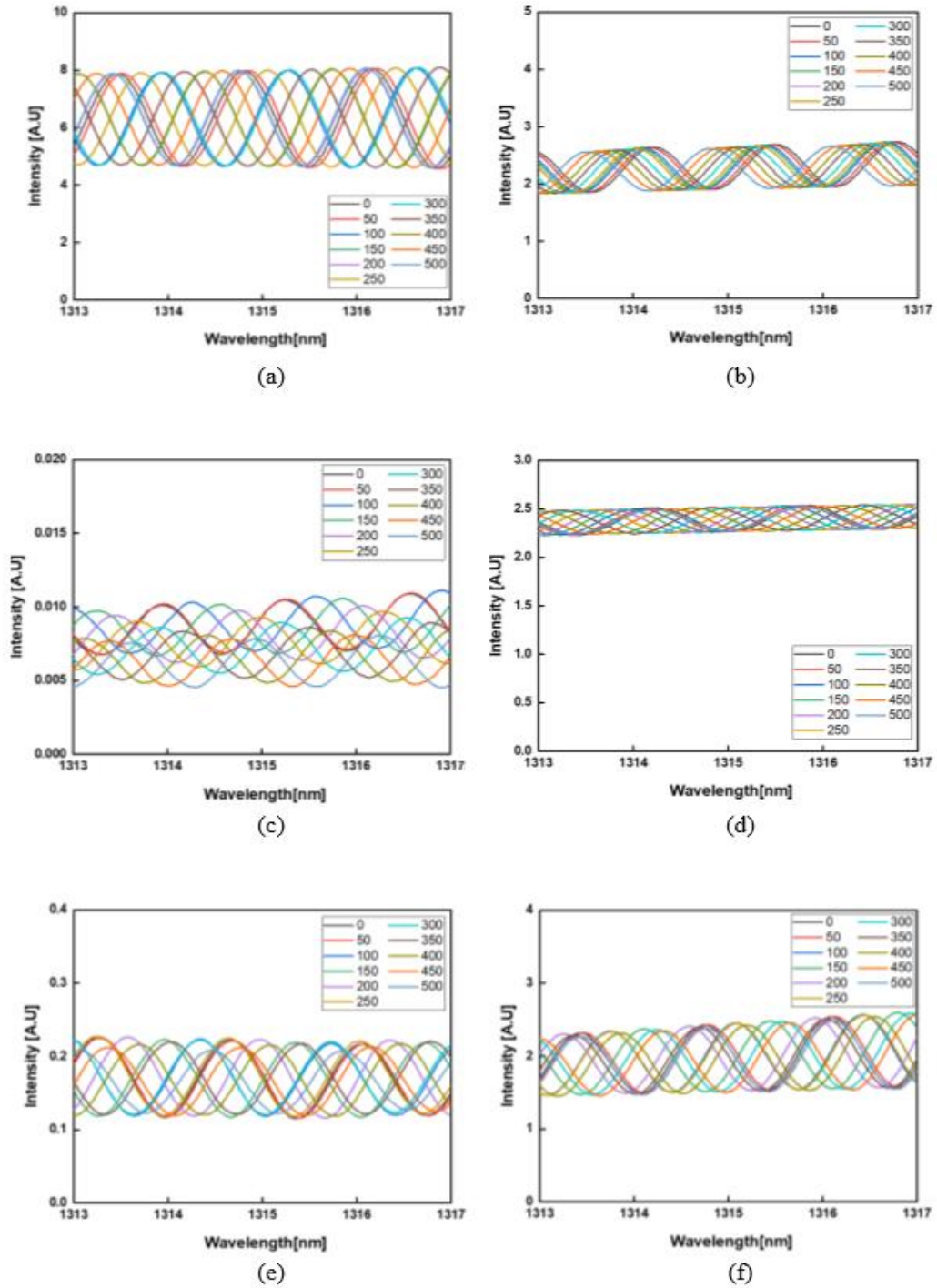
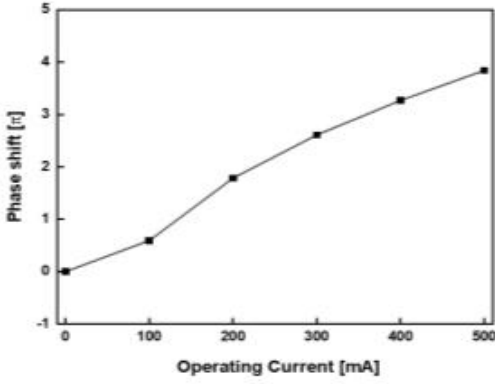
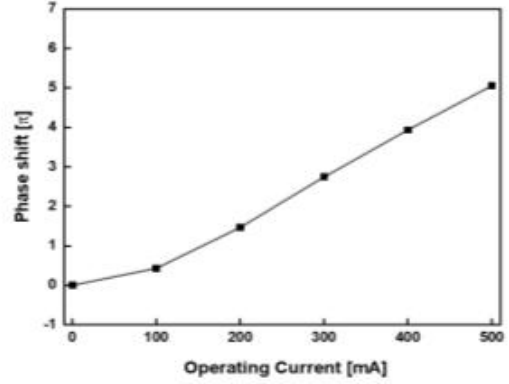


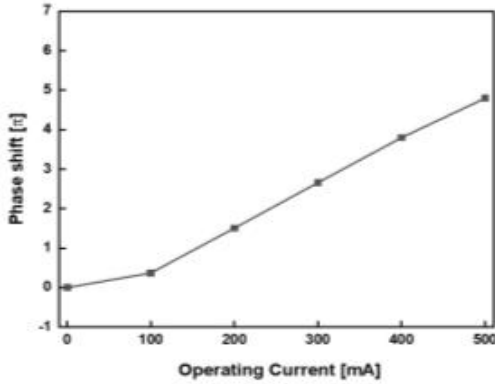
그림 4-43. 이터븀 도핑된 광섬유 길이별 인가한 펌프 양에 따른 간섭 신호 (a) 10 cm, (b) 6.7 cm, (c) 6 cm, (d) 5 cm, (e) 4 cm, (f) 3.3 cm



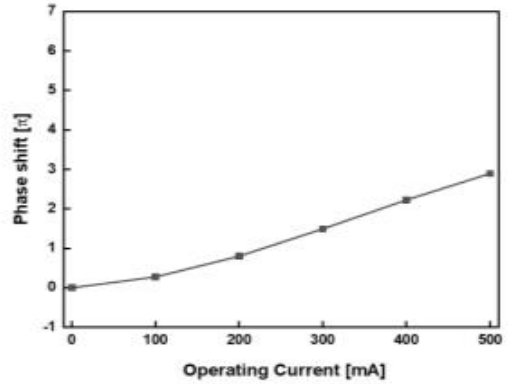
(a)



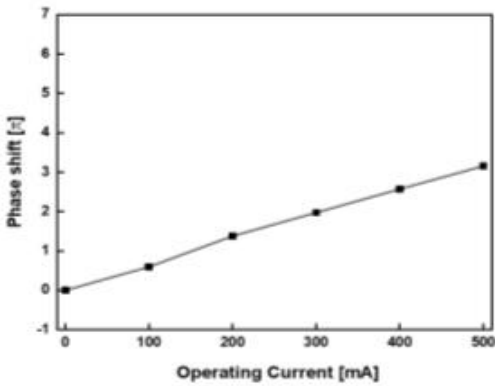
(b)



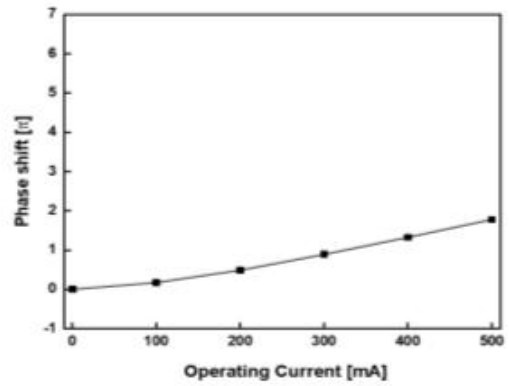
(c)



(d)

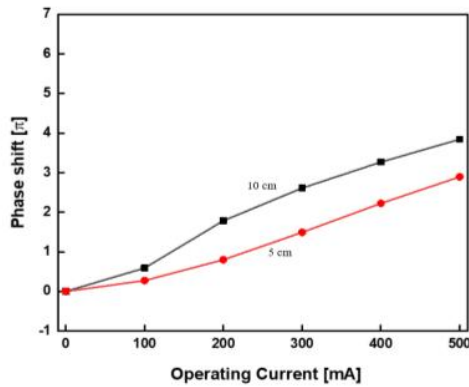


(e)

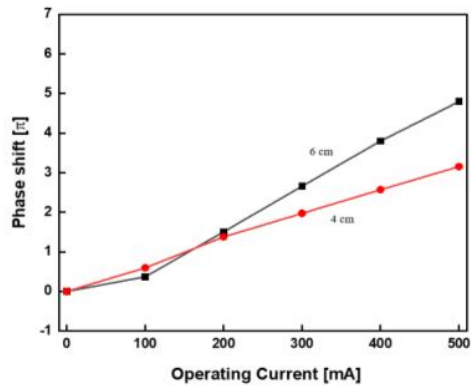


(f)

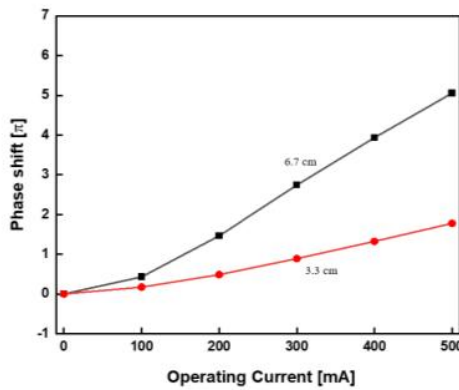
그림 4-44. 이터븀 도핑된 광섬유 길이별 인가한 펄스 양에 따른 위상 이동량 (a) 10 cm, (b) 6.7 cm, (c) 6 cm, (d) 5 cm, (e) 4 cm, (f) 3.3 cm



(a)



(b)



(c)

그림 4-45. 커플러 샘플별 펌프 양에 따른 위상 이동량 (a) Sample #1, (b) Sample #2, (c) Sample #3

커플러에 사용한 이터븀 도핑된 광섬유의 길이에 따른 위상 이동량 측정 결과이다. 펌프 광의 작동 전류를 500 mA까지 가했을 때 위상은 10 cm는 3.84π , 6.7 cm는 5.06π , 6 cm는 4.80π , 5 cm는 2.89π , 4 cm는 3.12π , 3.3 cm는 1.78π 이동하였다. 위상 이동량이 이터븀 도핑된 광섬유 길이에 따르지 않는 것으로 보이나, 샘플 별로 이터븀 도핑된 광섬유 길이에 따른 위상 이동량을 비교했을 때 한 샘플의 위상 이동량은 이터븀 도핑된 광섬유 길이에 따른다.

제 5 장 실험 결과 분석

측면 가공 광섬유 커플러에 1310 nm 광원을 연결하여 1310 nm에서의 커플러 분할 비율을 측정하였다. 측정 결과, 단일모드 광섬유로 제작한 커플러의 분할 비율은 최소 100:0 ~ 75.2 : 24.8, 최대 100:0 ~ 82.7 : 17.3이었다. 이터븀 도핑된 광섬유로 제작한 커플러 중 샘플 #1의 분할 비율은 최소 100 : 0 ~ 15.5 : 84.5, 최대 100 : 0 ~ 1.7 : 98.3이었고, 고정 비율 커플러로 자주 사용되는 비율인 99 : 1, 9 : 1, 7 : 3, 5 : 5의 비율을 모두 사용할 수 있었다. 샘플 #2의 분할 비율은 최소 100 : 0 ~ 71.1 : 28.9, 최대 100 : 0 ~ 57.9 : 42.1이었고, 샘플 #3의 분할 비율은 최소 100 : 0 ~ 76.9 : 28.9, 최대 100 : 0 ~ 64.0 : 36.0이었다. 각각의 샘플마다 분할 비율 특성이 다른 원인으로서는 측면 가공 정도에 따라 광원으로부터 빛이 입사한 광섬유가 측면 가공 위치에서 손실되는 정도가 다르며, 그에 따라 광결합하는 정도에도 영향을 주기 때문으로 생각된다. 샘플들마다 광결합의 특성이 다른 것은 가공 깊이에 따른 광손실이 매우 급격하게 변하기 때문으로 생각되는데 그림 XX의 시뮬레이션 결과를 볼 때 가공 깊이의 수십 마이크론 정도의 미세한 변화에도 광손실의 변화가 급격하게 일어나는 점을 고려한다면 가공 깊이를 보다 정밀하게 제어하면서 측면 가공을 할 필요가 있다. 거의 유사한 조절 나사 눈금에서 신호광과 펌프광의 분배 비율이 50:50으로 나뉘는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 커플러를 통과한 광세기의 총량이 펌프광의 경우 신호광의 경우와는 달리 매우 작기 때문에 원하는 위상 이동을 유도하기 어려운 것으로 파악된다. 그러므로 위상 이동은 신호광의 입사 포트와는 달리 반대편 포트에서 펌프광을 입사해서 유도하는 것이 효과적인 방법으로 판단된다.

두 번째 측정에서는 가변 분배비를 통한 간섭신호 스펙트럼의 위상 이동을 측정하였다. 눈금을 증가시켜가면서 샘플 #1은 눈금 5마다 10π 정도, 샘플 #2는 눈금 20마다 6.5π 정도, 샘플 #3은 눈금 20마다 20π 정도 위상이 이동하였다. 실험에 사용한 측면 가공 광섬유 커플러는 조절 나사에 의해 석영 블록을 비틀어가면서 서로 맞닿는 측면 가공 면적을 조절하게 된다. 이때, 측면 가공 광섬유 커플러의 눈금 10당 0.00353° 정도의 각도로 움직이게 되는데, 석영 블록의 비틀림 정도에 따라 광경로 차이가 미세하게 발생함에 따라 간섭무늬 스펙트럼의 위상이 이동하는 것으로 파악된다. 조절 나사를 조정하는 것만으로도 충분히 큰 위상 이동이 발생하는 것을

확인할 수 있었다. 하지만 눈금의 이동은 분배 비율의 변화를 유도한다는 점에서 위상 이동과는 달리 각 포트별 광세기가 달리 전달되는 점을 고려해야 한다. 위상 이동 간섭계에서 필요한 2π 정도의 위상 이동을 고려할 때 조절 나사의 눈금 변화가 너무 작은 값이기 때문에 정교한 위상 이동을 위한 방법으로는 세밀한 눈금 조절이 필수적이라는 점을 알 수 있었다. 이러한 정밀 제어가 가능하다면 미세 눈금 변화로 인한 분배 비율에서의 변화량이 크지 않다는 점을 고려할 때 위상 이동 간섭계에서 위상 이동하기 위한 방법으로 사용할 가능성이 높다고 생각된다.

세 번째 측정에서는 펌프광을 인가할 때 커플러에 사용된 이터븀 도핑된 광섬유의 길이에 따른 위상 이동 정도를 측정하였다. 샘플 #1의 이터븀 도핑된 광섬유의 길이는 10 cm, 5 cm이었고, 위상 이동량은 3.84π , 2.89π 이었다. 샘플 #2의 이터븀 도핑된 광섬유의 길이는 6 cm, 4 cm이었고, 위상 이동량은 4.80π , 3.16π 이었다. 샘플 #3의 이터븀 도핑된 광섬유의 길이는 6.7 cm, 3.3 cm이었고, 위상 이동량은 5.10π , 1.78π 이었다. 이터븀 도핑된 광섬유의 길이에 따라 같은 펌프 광세기를 가해도 위상 이동량이 확실하게 차이가 있었다. 하지만 길이에 비례하는 특성을 확인할 수는 없었다. 이러한 이유는 가공된 측면 가공 광섬유 커플러의 가공 특성이 반영된 결과로 이해된다. 사용된 이터븀 도핑된 광섬유 길이에 비례하는 분배 비율에서의 특징은 관찰할 수 없었다. 이러한 점에서 사용한 광섬유 길이에 대한 특징을 파악하기 위해서는 보다 정밀한 측면 가공과 그에 따른 광섬유 커플러의 안정적인 성능을 확보할 필요가 있다고 생각된다. 특히 조절 나사를 제어하는 경우 이러한 점들이 광섬유 커플러의 성능과 밀접한 관련을 가질 수 있기 때문에 다양한 샘플을 제작하여 숙련된 개발 노하우를 통해 개발된 커플러를 이용하여 확인할 필요가 있다. 펌프광에 의한 위상 이동의 경우 일반적으로 사용한 이터븀 도핑된 광섬유 길이에 선형적으로 비례하는 위상 이동 특성이나 경향을 보이지 않는다. 이러한 비선형을 고려한 해석을 수행할 필요가 있다. 펌프광이 WDM 커플러를 통해 이터븀 도핑된 광섬유에 입사되기 전 연결되어 있는 단일모드 광섬유를 통과하는데 이 과정에서 코어의 크기가 서로 다른 광섬유의 연결에서 광손실이 발생할 수 있다. 그러면 실제 이터븀 도핑된 광섬유에 입사하는 펌프광의 광세기는 인가된 전류값에 대응하는 펌프 광세기가 전달되지 못할 수 있다. 이러한 요인들로 인해 사용한 이터븀 도핑된 광섬유 길이에 대한 위상 이동의 비례관계를 파악하기 어려운 것으로 해석된다. 이러한 점을 고려하여 보다 정량적인 분석을 추가적으로 진행할 필요가 있다.

제 6 장 결론

본 연구에서는 이터븀 도핑된 광섬유를 측면 가공하여 제작한 측면 가공 커플러를 제작하여 가변 분배비 특성을 가지는 측면 가공 커플러로서의 특성을 파악하였고, 이터븀 도핑된 광섬유를 기반으로 하는 광섬유 위상 이동자로 사용할 수 있음을 확인하였다. 그 결과 제작한 커플러를 이용하여 가변 분배비가 가능한 위상 이동 간섭계를 구현할 수 있었다. 단일모드 광섬유로 제작한 커플러의 분할 비율과 이터븀 도핑된 광섬유로 제작한 커플러의 분할 비율을 비교할 때, 광섬유의 측면 가공 정도에 따라 샘플마다 최대 분할 비율은 달랐으나, 1310 nm 중심 파장에서의 분할 비율 양상은 유사한 결과를 나타내었다. 이를 통해 단일모드 광섬유로 제작한 커플러 대신 이터븀 도핑된 광섬유로 제작한 커플러로 대체가 가능함으로 확인할 수 있었다. 980 nm 광에 대해서 광섬유 커플러는 손실이 크고 분배 비율의 변화폭이 너무 작아 굴절을 변화를 직접적으로 유도하기 어렵다는 것을 파악할 수 있었다. 이 결과로부터 펌프광을 신호광과는 반대편인 포트에서 입사시킴으로써 효율적인 비선형 굴절을 변화를 유도하고자 하였다. 위상 이동을 유도하기 위해서는 가공된 측면 가공 커플러의 조절 나사를 조절하는 방법도 유용함을 확인할 수 있었다. 하지만 미세 조절을 위해서는 펌프광에 의한 굴절을 변화를 통해 위상 이동을 제어하는 것이 효율적임을 확인할 수 있었다. 측면 가공된 이터븀 도핑된 광섬유를 서로 다른 길이를 가지도록 하여 커플러를 제작하였고 길이에 따라 위상 이동 정도의 차이가 발생하였다.

이터븀 도핑된 광섬유를 이용하여 측면 가공된 광섬유 커플러를 제작하면 커플러 자체가 분할 비율을 조절할 수 있으면서 동시에 위상 이동도 제어할 수 있는 장점을 가질 수 있다. 펌프광의 광세기를 조절하거나 측면 가공 광섬유 커플러의 조절 나사를 조절함으로써 최적의 가시도를 가지는 간섭신호의 발생이 가능할 것이고 이 간섭신호의 위상 이동 특성을 세밀하게 조정할 수 있을 것이다.

차후 진행할 실험으로는 측면 가공의 정도에 따라 커플러의 효율이 다름을 확인하였으므로 더 많은 샘플을 제작하고 다양한 실험 결과를 취득하여 이터븀 도핑된 광섬유의 전체 길이와 측면 가공 위치에 따른 광섬유 측면 가공 커플러의 특성을 파악하고자 한다. 휘도류가 도핑된 광섬유로 제작한 광섬유 커플러를 이용하여 다양한 간섭계에 적용하여 다양한 응용분야에서 활용하고자 한다.

참고문헌

- [1] Lam, C., Hong Liu, Koley, B., Xiaoxue Zhao, Kamalov, V., & Gill, V., “Fiber optic communication technologies: What’s needed for datacenter network operations”, IEEE Communications Magazine, 48(7), 32 - 39. (2010).
- [2] Morioka, T., Awaji, Y., Ryf, R., Winzer, P., Richardson, D., & Poletti, F., “Enhancing optical communications with brand new fibers”, IEEE Communications Magazine, 50(2), s31 - s42. (2012).
- [3] Aleksandrov, S. E., Gavrilov, G. A., Sotnikova, G. Y., & Ter-Martirosyan, A. L., “Optical-fiber-tip temperature control system for fiber-coupled laser modules in medical equipment”, Semiconductors, 48(1), 129 - 134. (2014).
- [4] Caravaca-Aguirre, A. M., & Piestun, R., “Single multimode fiber endoscope”, Optics Express, 25(3), 1656. (2017).
- [5] PODOLEANU, A. G., “Optical coherence tomography”, Journal of Microscopy, 247(3), 209 - 219. (2012).
- [6] Wojtkowski, M., Kowalczyk, A., Leitgeb, R., & Fercher, A. F., “Full range complex spectral optical coherence tomography technique in eye imaging”, Optics Letters, 27(16), 1415. (2002).
- [7] Monnier, J. D., “Optical interferometry in astronomy”, Reports on Progress in Physics, 66(5), 789 - 857. (2003).
- [8] Ghim, Y.-S., Rhee, H.-G., Yang, H.-S., & Lee, Y.-W., “Thin-film thickness profile measurement using a Mirau-type low-coherence interferometer”, Measurement Science and Technology, 24(7), 075002. (2013).

- [9] Peck, E. R., “A New Principle in Interferometer”, Design Journal of the Optical Society of America, 38(1), 66. (1948).
- [10] Hariharan, P., “Modified Mach-Zehnder Interferometer”, Applied Optics, 8(9), 1925. (1969).
- [11] Jaffe, J. H., “Concerning the Use of the Fabry-Perot Interferometer for Wave-Number Measurement in the Infrared”, Journal of the Optical Society of America, 43(12), 1170. (1953).
- [12] Snyder, A. W., “Coupled-Mode Theory for Optical Fibers”, Journal of the Optical Society of America, 62(11), 1267. (1972).
- [13] Hyun Sung Kim, Seung Seok Lee, Eun Seo Choi, “Characteristics of Side-Polished Yb-doped Fiber Coupler with Variable Splitting Ratio and Phase Shift”, New Phys.: Sae Mulli 2022; 72: 705-716 (2022).
- [14] “Classified by Manufacturing Technologies”, FS Community,
<https://community.fs.com/blog/how-do-different-fiber-optic-couplers-work.html>
- [15] Panajotov, K. P., “Evanescent field coupling between a single-mode fiber and a planar waveguide with absorption or gain”, Journal of the Optical Society of America B, 13(11), 2468. (1996).
- [16] Digonnet, M. J. F., & Shaw, H. J., “Analysis of a Tunable Single Mode Optical Fiber Coupler”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 30(4), 592 - 600. (1982).
- [17] Tseng, S.-M., & Chen, C.-L., “Side-polished fibers”, Applied Optics, 31(18), 3438. (1992).

- [18] Collins, G. B., & Reiling, V. G., “Čerenkov Radiation”, *Physical Review*, 54(7), 499 - 503. (1938).
- [19] Frank, I. M., “TRANSITION RADIATION AND THE CERENKOV EFFECT”, *Soviet Physics Uspekhi*, 4(5), 740 - 746. (1962).
- [20] Leminger, O., & Zengerle, R., “Determination of single-mode fiber coupler design parameters from loss measurements”, *Journal of Lightwave Technology*, 3(4), 864 - 867. (1985).
- [21] “Core-Pumped SM Yb-Doped Fiber, Single Clad”, Thorlabs, https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=336&pn=YB1200-4/125
- [22] Sheik-Bahae, M., & Hasselbeck, M. P., “Third-order optical nonlinearities”, *Handbook of Optics*, 4, 16-1. (2000).
- [23] Agrawal, G. P., “Nonlinear fiber optics”, In *Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century* (pp. 195-211). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. (2000).
- [24] R. H. Pantell and H. E. Puthoff, “Fundamentals of Quantum Electronics”, chap. 3, Wiley, New York, (1969).
- [25] John R. Reitz, F. J. Milford, and R. W. Christy, “Foundations of Electromagnetic Theory”, *Series in Physics*, 3rd ed., chap. 19, Addison Wesley, Reading, MA, (1980)
- [26] Ma, H.J., Lee, S.S., Park, S. et al, “Development of Digital Holographic Microscopy on an All-Optical Phase Shifter”, *J. Korean Phys. Soc.* 75, 685 - 692 (2019).
- [27] Kim E. S., Kang H. W., Ma H. J., Choi E. S., “Analysis for Phase Control

Condition of Ytterbium-doped Optical Fiber-based Phase Shifting Interferometer”.
NPSM. 70, 797-803. (2020).

[28] “1260 - 1625 nm SMF-28 Ultra FC/APC Single Mode Patch Cables”, Thorlabs,
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=334&pn=P3-SMF28Y-FC-1#4045

[29] “Superluminescent Diode”, EXALOS, <https://www.exalos.com/sled-modules/>

[30] “FBG-Stabilized Laser Diodes, 976 nm”, Thorlabs, https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=8042&pn=BL976-SAG300#8057

[31] “Wavelength Division Multiplexers: 980 nm / 1310 nm”, Thorlabs,
www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=375&pn=W980S330A1A#9227

[32] “1310 nm, FC/APC Fiber Collimation Package”, Thorlabs, https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1696&pn=F260APC-C

Publication

Journal Papers(KCI)

1. 김현성, 이승석, 최은서, “Characteristics of Side-Polished Yb-doped Fiber Coupler with Variable Splitting Ratio and Phase Shift”, New Physics: Sae Mulli, Vol. 72, No. 9, pp. 705-716, 2022.

Conference Papers(International)

1. 이승석, 김현성, 서정민, 고영민, 안태정, 최은서, “Tunable optical delay line using UV-stretchable polymer-coated CFBG”, Photonics West(SPIE Proceeding), p. 36, 2023.
2. 이승석, 김현성, 최은서, “Dispersive fiber-optic interferometer with extended probing depth”, Photonics West(SPIE Proceeding), 10488-42, pp. 1-6, 2022.
3. 이승석, 김현성, 최은서 “Side-View Optical Coherence Tomography Imaging without Rotation of Probe”, SPIE Advanced Biophotonics Conference, p. 37, 2021.
4. 이승석, 김현성, 이병일, 최은서 “Dispersive Fiber Optic Interferometer Capable of Depth Ranging Longer than Coherence Length”, SPIE Advanced Biophotonics Conference, p. 37, 2021.

Conference Papers(Domestic)

1. 김현성, 김은선, 마혜준, 최은서 “서로 독립적인 가변 분할비와 위상 이동자 특성을 가지는 측면 가공된 이터븀 도핑 광섬유 커플러”, 제 30회 광전자 및 광통신 학술대회(COOC), p. 101, 2023.

2. 이승석, **김현성**, 최은서 “측면 반사 프로브를 이용한 광단층영상”, 한국광학회 동계학술발표회, p. 39, 2023.
3. 이승석, **김현성**, 최은서 “Matched CFBG 광지연선로 광증폭의 이론적 배경”, 한국물리학회 광주전남지부학술발표회, p. 7, 2022.
4. 이승석, **김현성**, 마혜준, 이병일, 최은서, “기하위상 렌즈를 이용한 샘플의 깊이 정보 획득”, Advanced Biophotonics Conference, p. 33, 2022.
5. **김현성**, 마혜준, 이승석, 최은서 “측면 가공 위치에 따른 간섭계 위상 제어 특성”, 한국물리학회 가을학술발표회, p. 279, 2022.
6. 이승석, **김현성**, 이병일, 최은서 “SFFT분석을 통한 CFBG 간섭계 프로파일 신호 분석 기법”, 한국광학회 하계학술발표회(OPC), p. 350, 2022.
7. **김현성**, 이승석, 최은서, “광섬유 굽힘 센서를 이용한 무게 및 진동 측정”, 제 29 회 광전자 및 광통신 학술대회(COOC), p. 176, 2022.
8. **김현성**, 이승석, 마혜준, 최은서, “측면 가공 커플러의 제작 조건에 따른 위상 이동 특성”, 한국물리학회 봄학술논문발표회, p. 174, 2022.
9. **김현성**, 이승석, 마혜준, 최은서, “기능 집적화된 측면 연마 광섬유 커플러”, 한국물리학회 광주전남지부학술발표회, p. 10, 2021.
10. 마혜준, 이승석, **김현성**, 최은서, “광학적 위상 제어 기법이 적용된 위상이동 디지 털 홀로그래피 현미경 시스템”, Photonics Conference , p. 39, 2021.
11. 김은선, **김현성**, 최은서, “비선형 위상 이동을 이용한 광경로차의 모호성 해결 방법”, 한국물리학회 가을학술논문발표회, p. 206, 2021.