

백색광 마이켈슨 간섭계를 이용한 광섬유 고리의 편광 교차결합 측정

Investigation of the Polarization Cross-Coupling in Fiber Coils Using White Light Michelson Interferometer

조민식* 도재철*
Jo, Min-Sik Do, Jae-Chul

ABSTRACT

The investigation of the polarization cross-coupling in fiber coils was made using white light Michelson interferometer. The white light interferometer has a light source of about 13nm spectral bandwidth and measurement resolution of less than -80dB . The measurement found that the 200m fiber coil has a polarization cross-coupling of about -64dB in average and -46dB in maximum.

주요기술용어(주제어) : Polarization Cross-Coupling(편광 교차결합), White Light Michelson Interferometry(백색광 마이켈슨 간섭계), Fiber Coil(광섬유고리)

1. 서론

광섬유 자이로에 일반적으로 활용되는 핵심 부품중의 하나가 편광유지 광섬유(polarization maintaining fiber)이다. 높은 복굴절 특성을 가지는 편광유지 광섬유는 광섬유에 인가되는 외부 압력 등의 영향에 대해서 비편광유지 단일모드 광섬유(non-polarization maintaining single mode fiber)에 비교하여 매우 강한 특성을 가진다^[1]. 이러한 편광유지 광섬유도 광섬유 자체의 성능 한계 상황이나 외부 영향에 노출되었을 때 완벽한 편광유지 특성을 지속하는 것은 불가능하다. 즉, 광섬유 내에서 진행되는 main 편광모드 성

분이 미소하나마 main 편광모드에 수직한 secondary 편광모드 성분으로 전환되는 편광 교차결합(polarization cross-coupling)이 발생할 수 있다. 이와 같은 편광유지 광섬유 내에서의 편광 교차결합은 광섬유 자이로의 바이어스 성능을 저하시키는 주요 원인들 중의 하나이다.^[2,3]

광섬유의 편광유지 능력 평가는 일반적으로 광섬유의 한 편광축을 따라 선형 편광된 넓은 선폭의 광원(broadband light source)을 입사시킨 후, 서로 수직한 두 편광축 방향의 광출력 세기의 비율을 측정하여 조사할 수 있다^[4]. 그러나 이러한 측정은 광섬유 내부의 전체영역에 대한 정보를 제공할 뿐 국부적인 위치에 따른 편광 교차결합에 대한 정보를 제공해 주지는 못한다. 광섬유 자이로와 같은 응용분야에서는 광섬유 내부의 편광 결합이 발생하는 실제 위치를 파악하는 것이 매우 중요하다. 편광 교차결합은 자이로 시

† 2006년 5월 9일 접수~2006년 7월 20일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : minsjo@add.re.kr

시스템의 성능에 직접적으로 영향을 미치는 변수로서, 필요시 정확한 편광 교차결합 지점을 조사하여 관련 편광특성 문제점을 해결해야 하기 때문이다.

본 논문에서는 광섬유 자이로에 활용되는 광섬유 코일의 편광 교차결합을 조사하였다. 광섬유 코일의 편광 교차결합의 크기와 위치에 대한 정확한 평가를 위하여 백색광 간섭계를 제작, 활용하였다.

2. 백색광 마이켈슨 간섭계를 활용한 편광 교차결합 측정원리

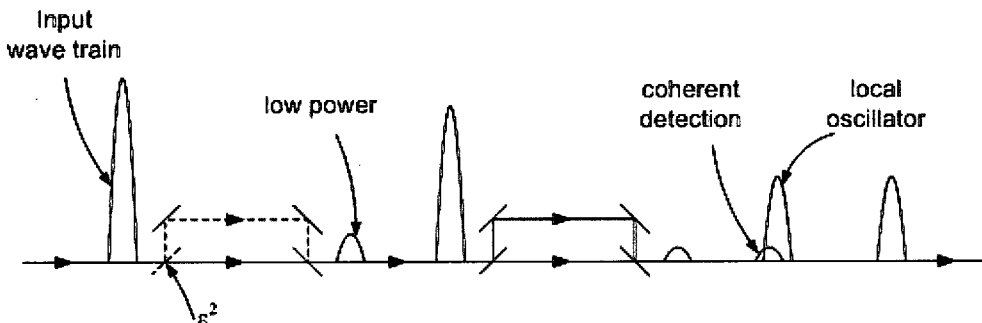
가. 백색광 간섭계의 편광 교차결합 측정원리

광섬유의 편광 교차결합을 측정하는 방법은 백색광 간섭계의 원리를 근간으로 한다.^[3,5,6] 백색광은 넓은 스펙트럼 선폭을 가지기 때문에 매우 짧은 가간섭(coherence) 거리를 가진다. 이는 광섬유 내의 편광 교차결합 측정시 주변 반사파에 대한 영향을 감소시키고 공간 분해능을 높이는 장점이 있다. 광섬유 내의 편광 교차결합 측정은 동일하지 않은 두개의 광경로를 가지는 간섭계에서의 백색광 이용에 핵심이 있다. 그림 1은 백색광 간섭계를 이용한 광파의 중첩원리를 보여주고 있다. 앞단의 1차 간섭계에서 광파의 분리가 발생하고 뒷단의 2차 간섭계에서 광파의 중첩을 유도한다. 2차 간섭계를 통과한 두 광파의 광경로 차이가 광원의 가간섭 길이보다 짧으면 간섭무늬를 얻을 수 있으며, 가간섭 길이보다 길어지면 간섭무늬는 사라진다. 마찬가지로, 파열(wave train)의 경우, 1차 간섭계에서 광경로 차이가 커지면 2차 간

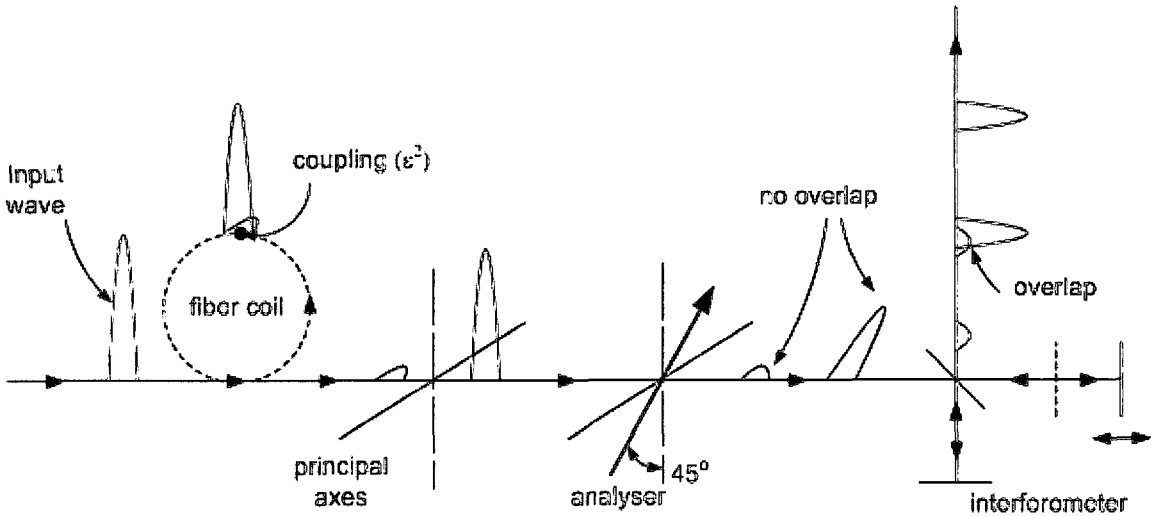
섭계 출력단에서 광파의 중첩이 어려워진다. 하지만, 2차 간섭계의 광경로 차이가 1차 간섭계에서 발생한 광 경로차이를 동일하게 보상할 수 있다면 광파들은 다시 중첩이 가능하게 되어 간섭무늬의 visibility는 복원된다.

이때 1차 간섭계의 광분할기(beam splitter)가 매우 적은 분리비(splitting ratio) (ϵ^2 와 $1-\epsilon^2$, $\epsilon^2 \ll 1/2$)를 가진다면, 높은 복굴절 광섬유에서의 편광 교차결합과 유사한 경우이다. 광섬유의 편광 주축과 정렬된 편광모드는 해당 모드의 경로를 따라 진행하고 편광 주축과 수직인 모드의 경로를 따라서는 매우 적은 세기의 편광 교차결합 성분 광파가 진행한다. 그림 1의 간섭계에서 표현된 짧은 경로는 편광유지 광섬유 내부를 지나는 fast 모드 광파가 진행되는 경로에 해당하고, 간섭계의 긴 경로는 광섬유 내부의 slow 모드 광파가 진행되는 경로에 해당한다. 한편, 2차 간섭계에서 광분할기의 분리비율이 50%($\epsilon^2=1/2$)라면, 1차 간섭계 출력 광파 두 개는 2차 간섭계를 통과한 후 각각 절반의 출력 세기를 가지는 동일한 펄스 종류 두 개씩 모두 4개의 펄스로 나누어 질 것이다(그림 1).

백색광 간섭계에서는 광파의 주요(main) 편광성분과 편광 교차결합된 미소 편광성분을 간섭시킴으로써 그 결과를 분석할 수 있다. 그림 1에서 2차 간섭계는 편광 교차결합 측정을 수행하는 백색광 마이켈슨 간섭계의 역할을 나타낸다. 그러나 불행히도 백색광 간섭계에 입력된 이들 두 광파는 편광이 서로 수직한 까닭에 비록 공간적으로 교차하더라도 간섭무늬를 만들 수 없다. 서로 수직한 편광성분의 두 광파가 간섭이 가능하도록 하기 위해서 백색광 간섭계의 출



[그림 1] 미소 광분할기를 통과한 두개 광파가 입력되는 백색광 간섭계 개념도



[그림 2] 백색광 마이켈슨 간섭계에서의 편광 교차결합 측정 원리

력단에 45도 편광기(analyzer)를 위치하여 fast 모드와 slow 모드의 광파가 편광기의 편광축에 45도로 입사하도록 하였다. 그러면 두 모드의 광파는 편광기의 편광축 성분과 이에 수직한 성분으로 나누어진다. 이 중 두 광파의 편광기 편광축 성분은 서로 동일한 편광을 가지게 되므로 간섭무늬를 만들 수 있다. 그림 2는 백색광 간섭계를 활용한 편광 교차결합 측정 원리를 보여 준다.

앞에서 언급되었듯이, 그림 1의 1차 간섭계의 광경로 차이 발생은 편광유지 광섬유 고리 자체를 진행하는 수직한 두 개 편광 모드사이의 진행속도의 차이 효과로 인해 유발된 경로 차이에 해당된다. 그림 1의 2차 간섭계는 마이켈슨 간섭계 구조의 백색광 간섭계로 대체할 수 있다. 따라서 광섬유 고리를 통과하면서 야기된 두 광파의 광경로 차이는 마이켈슨 간섭계에서 간섭계의 한쪽 arm의 길이를 변화시킴으로써 보상할 수 있다. 마이켈슨 간섭계에서 광섬유 고리의 광경로 차이를 상쇄시키는 순간 간섭이 가능해지며, 두 광파의 간섭무늬 contrast는 편광 교차결합 진폭 비율 ϵ 과 같으므로 매우 민감한 백색광 간섭계의 편광 교차결합 분별능력을 확보할 수 있다.

광섬유 고리를 진행하면서 여러 개의 편광 교차결합 지점이 존재할 때, 마이켈슨 간섭계의 한쪽 arm에 부착된 반사경 위치를 간섭계 arm의 길이방향으로 스

캔하면 광섬유 고리 각 지점에서의 편광 교차결합을 분리하여 측정할 수 있다. 마이켈슨 간섭계의 경로차 ΔL_r 은 광섬유 고리의 끝단과 분석하고자 하는 광섬유 지점 사이의 거리 L_f 과 아래의 관계를 가진다.

$$2\Delta L_r = \Delta n_b L_f \quad (1)$$

여기서 Δn_b 는 광섬유의 복굴절을 차이이다.

광섬유의 길이(longitudinal) 방향으로 두 지점의 거리가 depolarization length $L_D (= L_c / \Delta n_b)$ 보다 길다면, 백색광 간섭계에서 광섬유 상의 두 지점을 구분해 내는 것은 가능하다. 예를 들어, 두 편광모드 사이의 복굴절율 차이 $n_b = 5 \times 10^{-4}$ 이고, 간섭계 광원의 가간섭 거리(coherence length) $L_c = 30 \mu\text{m}$ 이면 depolarization length $L_D = 6\text{cm}$ 이고, 이 수치는 해당 편광 교차결합 측정 시스템의 공간 분해능을 의미한다.

나. 편광 교차결합 측정의 물리적 해석

백색광 마이켈슨 간섭계를 이용한 광섬유 고리의 편광 교차결합을 조사할 때, 광섬유 상의 거리 l 인 위치에서 관측되는 편광 교차결합 진폭 $\rho(l)$ 은 아래와 같이 쓸 수 있다^[7].

$$\rho(l) = \frac{I_{\text{demodulated}}(l\Delta n_b)}{I_{\text{demodulated}}(0)} \quad (2)$$

관계식 (2)의 결과는 불규칙적으로 분포하는 편광 교차결합 함수로 일반화하여 확대할 수 있다. 마이켈슨 간섭계 입력단에서의 main 편광성분 광파의 진폭을 $A(t)$ 라 하고, $\rho(l)$ 가 편광결합 진폭의 계수라면, main 편광성분에 수직한 secondary 편광성분 광파의 진폭은 다음과 같다.

$$a(t) = \int_0^L \rho(l)A(t - \frac{l\Delta n_b}{c})dl \quad (3)$$

여기서 L 은 광섬유 총 길이이다. 그러면, 광경로 차이 δ 를 가지고 마이켈슨 간섭계에 입사하는 두 광파에 대하여 간섭계 출력단 검출기에서 측정되는 광파의 진폭은 아래의 물리량에 비례한다.

$$A_{\text{det}}(t) = [A(t) + a(t)] + [A(\frac{t-\delta}{c}) + a(t - \frac{\delta}{c})] \quad (4)$$

이때, 간섭무늬의 세기는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I(\delta) = & \langle A(t) \cdot A^*(t - \frac{\delta}{c}) \rangle \quad (5) \\ & + \langle \int_0^L \rho(l)A(t - \frac{l\Delta n_b}{c}) \cdot A^*(t - \frac{\delta}{c})dl \rangle \\ & + \langle \int_0^L \rho(l)A(t - \frac{\delta}{c} - \frac{l\Delta n_b}{c}) \cdot A^*(t)dl \rangle \end{aligned}$$

수식 (5)에서, 첫 번째 항은 광원의 일반적인 간섭무늬 패턴이고, 뒷부분의 두 항은 편광 교차 결합된 성분 항의 간섭무늬 패턴이다. 광원의 가간섭 길이가 매우 짧을 때, $\delta > 0$ 인 조건하에서 두 개의 편광 교차결합 항 중에서 첫 번째 항만이 0이 아닌 값을 가진다. 따라서 두 광파의 광경로 차이 $\delta > L_c$ (L_c 는 광원의 가간섭 길이)인 조건하에서 마이켈슨 간섭계의 간섭무늬 세기 출력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I^2(\delta) = \int_0^L h(l)\eta^2(\frac{\delta - l\Delta n_b}{c})dl \quad (6)$$

여기서, h 는 광섬유의 국부적인 h-parameter이고^[4], η 는 광원의 autocorrelation 함수의 envelop이다. 이때, 광섬유 상의 위치 l 인 지점에서의 low-pass filtered된 h-parameter는 다음과 같다.

$$h_f(l) = \frac{\Delta n_b I^2(1\Delta n_b)}{L I^2(0)} \quad (7)$$

마찬가지로, 백색광 간섭계 검출기를 통해 측정된 광섬유의 위치 l (광섬유 끝단에서 분석하고자 하는 지점까지의 거리)인 지점에서의 편광 교차결합 세기는 관계식 (2)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

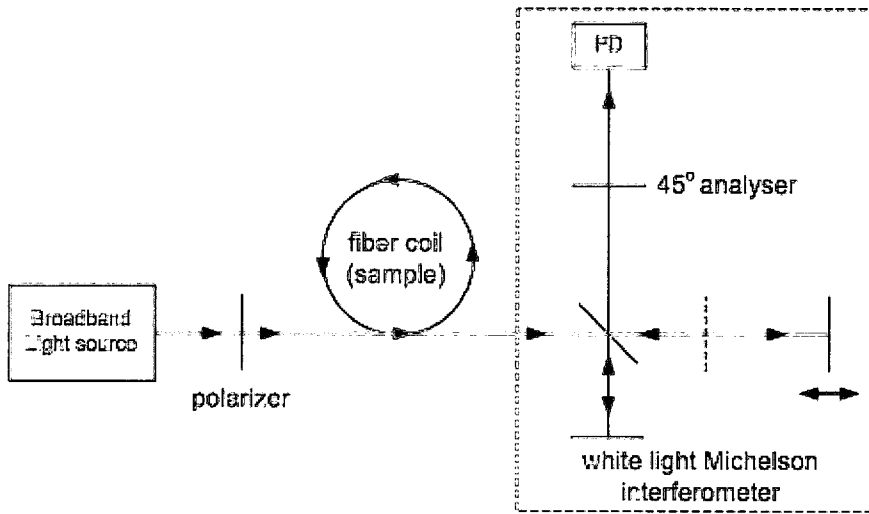
$$|\rho(l)|^2 = \frac{I^2(1\Delta n_b)}{I^2(0)} \quad (8)$$

관계식 (8)에 표현된 편광 교차결합 세기 값은 filter에 의해 demodulated된 값으로서, 출력 값은 즉시 dB 단위로 구해진다. 관계식 (7)과 관계식 (8)은 광섬유 고리의 편광 교차결합 측정값과 광섬유 고리의 h-parameter의 관계를 보여주고 있다.

3. 실험 및 결과분석

가. 편광 교차결합 측정 시스템 구성

백색광 간섭계 원리를 이용한 편광 교차결합 측정 방식은 앞에서 언급하였듯이 depolarization length L_D 크기의 공간 분해능을 가지고 광섬유 고리안의 불규칙적으로 분포된 결합성분의 연속적인 측정을 가능하게 해준다. 측정하고자 하는 광섬유 고리의 길이가 L 일 때, 움직이는 반사경이 부착된 마이켈슨 간섭계의 스캐닝 거리 L' 은 적어도 $\Delta n_b L/2$ 이상이 되어야 전체 광섬유 길이를 조사할 수 있다. 편광 교차결합 측정을 위한 백색광 간섭계의 개략도가 그림 3에 나타나 있다. 백색광 간섭계는 광섬유 고리의 편광특성을 평가하기 위하여 자체적으로 개발된 장비이다. 백색광 간섭계의 광원으로 어븀 첨가된(Er-doped) 무편광(unpolarized), broadband 스펙트럼 source가



[그림 3] 광섬유 고리의 편광 교차결합 측정 장치 개략도

사용되었으며, 편광기(polarizer)를 통하여 편광파로 만든 후에 측정샘플에 입사하도록 하였다. 측정샘플은 광섬유 고리이다. 광원과 측정 샘플 입력단 사이, 그리고 샘플 출력단과 마이켈슨 간섭계 입력단 사이의 연결은 빔 collimator를 사용하여 광선의 발산을 제한하였다. 편광기의 편광축은 편광유지 광섬유의 편광 주축과 일치하도록 정렬한다. 광섬유 고리를 통과하여 나온 광파는 50% 광분할기에 의해 50:50으로 나누어져서 마이켈슨 간섭계의 두 arm에 각각 입사된다. 마이켈슨 간섭계의 한쪽 arm은 linear motor stage 위에 장착하여 반사경의 위치 이동을 가능하게 하여, 광섬유 고리 내부에서 유기된 main 편광 성분과 이에 수직인 편광 교차결합 성분인 두 광파 사이의 광경로 차이를 보상해주는 기능을 수행하도록 하였다. 고정 반사경과 이동 반사경 사이에서 되 반사되어 광분할기에 입사된 광파는 또 다른 편광기(analyser)에 의해서 동일한 편광축 방향으로 투영된 편광 성분을 발생시킴으로서, 원래 편광이 서로 수직하여 간섭이 불가능한 광파를 간섭 가능한 상태로 만들어 준다. 여기서 만들어진 두 광파는 동일한 편광 상태를 가지게 되어 가간섭이 가능한 중첩이 이루어 졌을 때 간섭무늬를 만들어 낸다. 즉 편광교차결합된 부분의 간섭무늬 정보는 간섭계 출력단의 광검출기에 의해서 간섭무늬의 세기로 얻어진다. 검출

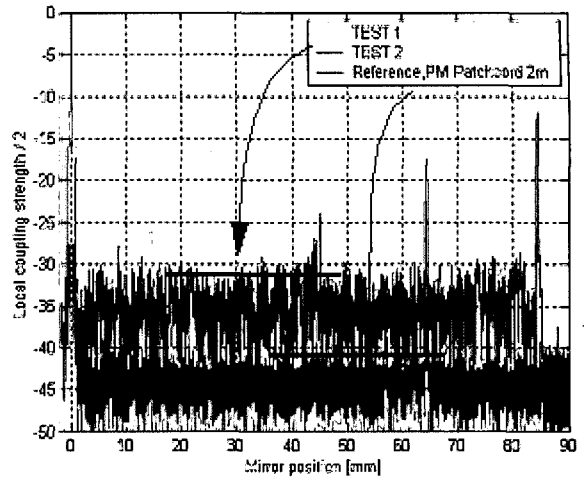
기 앞단에 장착된 analyser은 두 광파의 편광축을 일치시키려는 도구로서, 그림 2에서 기술한 경우와 같이 반드시 간섭계 입력단 앞에 있을 필요는 없다. 본 편광 교차결합 백색광 간섭계에서는 간섭계 입력단 앞에 광학부품의 수가 증가할수록 광학계의 정렬에 유리하지 못한 상황을 피하기 위한 목적으로 간섭계 출력단에 analyser를 위치하였다. 단, 이때 간섭계의 광분할기는 입력 광파의 편광상태에 무관하게 동일한 50%의 광분할비를 유지하여야 한다. 백색광 마이켈슨 간섭계에 사용된 광분할기는 non-polarizing beam splitter(중심파장 $1.55\mu\text{m}$)로서 편광상태가 수직인 main 광파와 편광 교차결합 광파를 동일하게 50% 광분할하고 있다. 마이켈슨 간섭계에서 고정 반사경은 평면 반사경을 사용하였으며, 이동 반사경은 corner cube를 사용하여 간섭계 광경로 정렬을 용이하게 하였다. linear motor stage의 scan 속도는 1.1mm/sec 이고, 최대 scan 가능 거리는 150mm 로서 편광유지 광섬유의 복굴절률 차이 $\Delta n_b = 5 \times 10^{-4}$ 이라고 할 때 600m 길이까지의 광섬유 측정이 가능하다. 광원의 spectrum bandwidth는 13nm (FWHM)으로, 광원의 가간섭 거리는 $50\mu\text{m}$ 이내이다. 백색광 간섭계의 편광교차 결합 측정 분해능은 -80dB 이하이다. 표 1은 백색광 마이켈슨 간섭계의 기술변수 항목 및 해당 성능규격을 정리한 것이다.

[표 1] 백색광 마이켈슨 간섭계의 기술항목 및 성능 규격

기술 항목	성능 규격	비고
scan speed	1.1mm/sec	
scan range	150mm	
light source wavelength	1.56μm	
spectrum bandwidth	13nm(FWHM)	
max. optical output power	10dBm	
source coherence length	< 50μm	
spatial resolution in PM fiber	10cm	$\Delta n_b = 5 \times 10^{-4}$
min. optical receiving power	-30dBm	
sensitivity	< -80dB	

나. 시험 결과 및 분석

광섬유 자이로에 적용되는 편광유지 광섬유 고리의 편광 교차결합에 대한 측정결과가 그림 4에 나타나 있다. 광섬유의 길이는 약 200m이고, 광섬유 권선층에 몰딩제가 처리되어 최종적으로 고리형태를 갖춘 상태의 샘플이다. 그림 4에서 Reference 신호는 고리가 아닌 free 상태의 편광유지 광섬유 2m을 이용하여 측정된 간섭계 출력 결과이다. 편광 교차결합이 -82dB(그래프의 -41dB) 정도의 매우 적은 값을 보이고 있다. 그래프에서 세로축의 local coupling 세기는 실제 값의 절반을 표시한 것이다. 그림 4의 TEST 1과 TEST 2는 광섬유 길이가 200m인 광섬유 고리의 편광 교차결합 특성을 2회 측정된 결과이다. 두 번의 측정 결과가 대체로 유사하여 중첩된 모양을 보이고 있다. 그래프에서 편광 교차결합 세기는 평균 -64dB(그래프의 -32dB)의 값을 가지고 있으며, 반사경 위치 45mm 지점에서 강한 편광 교차결합이 관측되고 있다. 반사경의 위치 85mm 지점에서의 강한 결합신호는 광섬유 고리의 첫 부분 위치를 의미한다. 관계식 (1)에 의하면 측정된 광섬유 고리의 복굴절률 차이를 계산할 수 있다.



[그림 4] 광섬유 고리의 편광 교차결합 측정결과

$$\Delta n_b = \frac{2L_r}{L_f} = \frac{2 \cdot 85\text{mm}}{200\text{m}} = 8.5 \times 10^{-4}$$

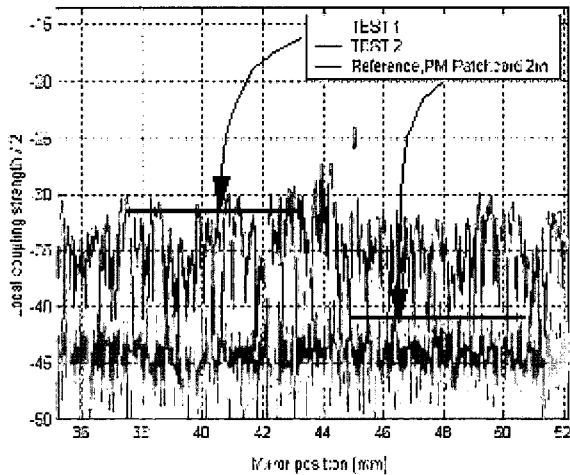
마찬가지로, 편광 교차결합이 강하게 확인된 반사경 위치 45mm에 해당하는 광섬유 고리의 위치는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L_f = \frac{2L_r}{\Delta n_b} = \frac{2 \cdot 45\text{mm}}{8.5 \times 10^{-4}} = 106\text{m}$$

위에서 얻은 106m는 광섬유 고리의 끝부분으로부터의 거리를 나타낸다. 즉, 광섬유 고리의 앞단으로부터 94m(=200m-106m) 진행한 지점에서 편광 교차결합이 강하게 발생했음을 알 수 있다.

그림 5는 그림 4에서 반사경 위치 45mm 주변의 데이터를 선택하여 확대 표시한 것이다. 기타 영역에서 평균 -64dB(그래프의 -32dB)의 편광 교차결합을 보이는 것에 비해, 45mm 영역에서 -46dB(그래프의 -23dB)까지 편광 교차결합이 증가했음을 확인할 수 있다. 즉, 편광 교차결합 크기가 약 100배 증가했음을 알려주고 있다. 그림 4에서 반사경의 위치가 85mm 보다 큰 경우에 관측된 TEST 1과 2의 신호는 두 광파의 겹침(overlap)이 더 이상 존재하지 않기 때문에 편광 교차결합 성분이 전혀 없는 background에 해당한다. 이때의 검출기 출력은 -82dB로서, 2m짜리 편

광유지 광섬유 Reference 샘플의 신호크기와 대체로 일치하고 있다. 이는, 고리형태가 아닌 free 상태의 2m 길이 편광유지 광섬유 샘플은 편광 교차결합이 background 수준으로 거의 발생하지 않았음을 알려 주는 결과이기도 하다. 반사경 위치 65mm 부분(광섬유 위치는 앞단에서 47m 지점)에서의 편광 교차결합 세기 증가는 Reference 신호와 TEST 신호가 동시에 큰 값을 가지고 있는 점을 고려할 때, 광섬유 자체의 편광특성에 기인한 신호가 아니며, 측정 중 검출기 단에 noise 성분이 개입되어 발생한 신호인 것으로 예측된다.



[그림 5] 광섬유 고리의 편광 교차결합 측정결과 (반사경 위치 45mm 근처)

4. 결론

광섬유자이로에 사용되는 광섬유 고리의 편광 교차결합 특성이 백색광 마이켈슨 간섭계를 활용하여 평가되었다. 광섬유 고리의 평균 편광 교차결합 세기는 약 -64dB로 측정되었으며, 고리형태로 만들기 이전의 원 상태 광섬유에 비교하여 약 20dB의 편광 교차결합 발생이 확인되었다. 이는 원래 광섬유에 권선(winding) 공정과 몰딩제 처리공정을 추가하여 광섬유 고리로 만드는 과정에서 발생한 결과이다. 한편, 광섬유 고리 106m 지점에서 -46dB의 강한 편광 교

차결합이 확인되었다. 이와 같은 광섬유 고리의 국부적인 편광 교차결합 분포 정보는 향후 광섬유 코일의 고리 권선 공정이나 몰딩제 처리방식 등의 개선에 유용하게 활용될 것이다. 더불어, 광섬유 코일에서의 편광 교차결합 특성의 지속적인 측정, 분석 및 관리는 광섬유자이로 성능 개선 측면에도 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] I. P. Kaminow, "Polarization in optical fibers", IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-17, pp.15~22, 1981.
- [2] H. C. Lefevre, J. P. Bettini, S. Vatoux and M. Papuchon, "Progress in optical fiber gyroscopes using integrated optics", Proceedings of AGARD/NATO, CP-383, pages 9A/1-13, 1985.
- [3] H. C. Lefevre, "Comments about fiber-optic gyroscopes", SPIE proceedings, Vol. 838, pp.86~97, 1987.
- [4] S. C. Rashleigh, W. K. Burns, R. P. Moeller and R. Ulrich, "Polarization holding in birefringent single-mode fibers", Optics Letters, Vol. 7, pp.40~42, 1982.
- [5] H. Takada, J. Noda, K. Okamoto, "Measurement of spatial distribution of mode coupling in birefringent polarization-maintaining fiber with new detection scheme", Optics Letters, Vol. 11, pp.680~682, 1986.
- [6] Takada, K., K. Chida, and J. Noda, "Precise method for angular alignment of birefringent fiber based on an interferometric technique", Applied Optics, Vol. 26, pp.2979~2987, 1987.
- [7] P. Martin, G. Le Boudec, H. C. Lefevre, "Test apparatus of distributed polarization coupling in fiber gyro coils using white light interferometry", SPIE Vol. 1585, Fiber Optic Gyros : 15th Anniversary conference, pp.173~178, 1991.