

무아레 프린지 기법 적용 광섬유 센서를 위한 다점 측정 모델의 개발

Development of Multiplexing Model for Moire-Fringe-Based Fiber Optic Sensor

김대현*[†], 이연관**[†], 김천곤***[†]

Daehyun Kim*[†], Yeon-Gwan Lee and Chun-Gon Kim***[†]

초 록 본 논문에서는 무아레 광섬유 센서의 활용성을 극대화할 수 있는 다점 측정 기술에 대해 연구하였다. 특히 기존의 무아레 광섬유 센서가 갖는 다점 측정 기술의 한계점을 극복하기 위해 반사형 단일 프린지만을 사용한 신개념의 광섬유 센서를 고안하였으며 이를 통해 다점 측정의 방법을 획기적으로 개선할 수 있게 되었다. 또한 기존의 다점 측정 원리들을 조사하여 이를 바탕으로 본 연구에서 개발한 무아레 광섬유 센서에 적용 가능한 네 개의 다점 측정 모델을 제시하였다. 이 모델은 기본적으로 파장 분할 다점 측정법과 시간 분할 다점 측정법에 기초를 두고 설계 되었으며 특별히 프린지 기반 광섬유 센서와 같이 외적 형태의 광섬유 센서에 적용 가능한 모델로 제안하였다. 최종적으로 제안된 다점 측정 모델들을 실험적으로 검증하기 위해 광학 시스템을 실제로 제작하였고 프린지 광섬유 센서에 적용하여 본 연구에서 제안된 다점 측정법의 가능성을 성공적으로 검증하였다.

주요어: 다점 측정, 광섬유 센서, 시간분할방식, 파장분할방식

Abstract This paper shows a multiplexing technique to maximize the application of a moire-fringe based fiber optic sensor to lots of structure. Especially, a novel fringe-based fiber optic sensor was proposed to overcome the difficulty of multiplexing of a previous moire-fringe-based fiber optic sensor. The novel fringe-based fiber optic sensor is composed of a single reflective fringe and two optical fibers. Therefore, the multiplexing is easily realized because of the simplicity of optical structure inside the sensor. This paper also proposed four models of the multiplexing techniques. The models are based on a wavelength division multiplexing(WDM) technique and a time division multiplexing(TDM) one. Basically, the models would be profitable for a general extrinsic fiber optic sensor such as the fringe-based fiber optic sensor. Finally, the real optical system was manufactured by using the proposed model and successfully examined to prove the feasibility of the model for the application.

Keywords: Multiplexing, Fiber Optic Sensor, TDM, WDM

1. 서 론

광섬유 센서를 스마트 구조물에 적용한 연구는

선진국에서조차 1980년대 중반부터 이루어지기 시작하였다. 연구 초반에는 우주, 항공과 같은 첨단 분야와 국방 분야에 적용이 제한되었으나, 90년대

들어 일반 기계설비 및 기간산업에까지 적용이 확대되었다. 그러나 이러한 센서계를 이루는 부품소재의 가격이 매우 높아 광섬유 센서를 많은 구조물에 적용하기 어려웠다. 하지만 최근 들어 센서 자체에 대한 연구가 안정화되고 상품화가 빠르게 이루어지고 있어 점차 적용연구가 확대되고 있는 실정이다. 그리고 공용 통신망의 광케이블화로 인한 광통신 관련 부품의 대량 생산으로 광섬유 센서 시스템을 구성하는 광학 부품들의 가격이 급격히 떨어지고 있다. 따라서 기존 센서에 비해 많은 장점을 보유하고 있는 광섬유 센서의 적용이 우주항공과 같은 첨단 분야뿐만 아니라 일반 기계 구조물로의 사용으로 점차 확대되고 있다.

또한 세계는 점차 하나의 정보망으로 통합되어가는 추세이며 이러한 추세는 광섬유를 이용한 광통신망을 통해서 가능하다. 향후 광섬유 센서를 산업기계, 자동차, 항공기와 같은 일반 기계 구조물뿐만 아니라 원자력 발전소 및 관련 발전 설비와 같은 기간산업에 적용시 점차 확대되어 가는 광통신망과의 연계가능성으로 인해 구조물들 간의 정보교환을 통한 효율적이고 적은 유지비용을 갖는 통합된 진단시스템을 갖출 수 있을 것으로 전망된다. 이를 위해 보다 효율적이고 단순한 그리고 높은 신뢰도를 갖는 신개념의 광섬유 센서 연구가 필요하다.

특히 광섬유 센서는 전자기파의 영향을 받지 않고 센서 수명과 직결되는 부식과 같은 환경적 영향에 강하며, 신호의 원거리 전송이 가능하다. 이들 여러 장점들 중 가장 두드러진 장점은 다점 측정의 가능성이다. 기존의 전기적 신호에 기반을 둔 센서는 한 라인의 전기선에 여러 개의 센서들을 연결할 수 있는 다점 측정 기술에 제한점이 많았다. 보통 하나의 전기 센서에는 두 가닥의 전기선이 반드시 필요하다. 이러한 사실은 수십 많게는 수백 개의 센서를 필요로 하는 대형 구조물의 건전성 모니터링 연구에 있어서는 매우 치명적인 단점으로 작용한다. 특히 다량의 전선은 센서 시스템의 설치에 어려움을 줄뿐 아니라 닫힌 루프(closed loop) 형태로 전선이 연결될 경우, 안테나의 역할을 하게 되어 주변 전기 신호에 반응하는 전기적 노이즈를 발생시킨다. 그러나 광섬유 센서의 경우, 기본적으로 광신호를 사용하기 때문에 근본적으로 전기적 노이즈에 무관한 센서 시스템을 구성할 수 있다.

또한 광통신 기술 분야의 다양한 신호 분할 방식을 이용해 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 센서를

장착할 수 있는 다점 측정 기술을 손쉽게 적용할 수 있다. 본 논문에서는 무아레 광섬유 센서의 활용성을 극대화할 수 있는 다점측정기술에 대해 연구하였다. 특히 기존의 무아레 광섬유 센서가 갖는 다점 측정 기술의 한계점을 극복하기 위해 반사형 단일 프린지만을 사용한 신개념의 광섬유 센서를 고안하였으며 이를 통해 다점 측정의 방법을 획기적으로 개선할 수 있게 하였다. 또한, 광섬유 센서에 적용 가능한 다점 측정 원리들을 조사하였으며 이를 바탕으로 본 연구에서 개발한 무아레 광섬유 센서에 적용 가능한 다점 측정 모델을 제안하였다. 그리고 제안된 모델을 실험적으로 검증하여 본 연구에서 제안된 다점 측정법의 활용성을 성공적으로 검증하였다.

2. 다점 측정법(Multiplexing)

신개념의 무아레 광섬유 센서에 적용 가능한 다점 측정 방법을 개발하기 위해 기존의 다점 측정 원리들에 대해 다음과 같이 조사하였다.

2.1. 시간 분할 다점측정법(Time Division Multiplexing, TDM)

시간 분할 다점 측정법(TDM)은 처음에 벨스 등에 의해 광강도형 광섬유 센서의 다점 측정을 위해 처음 제안되었다[1]. 이때 광섬유 센서들은 서로의 신호를 구별하기 위해 센서들 간의 광경로 차를 발생시킨다. 그리고 사용되는 광원의 빛이 단일 펄스(pulse) 형태의 일정 주기를 갖고 발생되면 각 센서를 통과하면서 시간차를 갖고 광검출기로 돌아오게 된다. Fig. 1은 시간 분할 다점 측정법을 기본적으로 보여주는 그림으로써 반복되는 여러 펄스 형태의 빛들은 각 센서들을 통과하여 광검출기로 돌아올 때, 각 센서 사이의 광경로차에 의해 서로 구별된다. 이때 광경로차를 발생시키기 위해 인위적으로 상당한 길이의 광섬유를 모든 센서 사이에 배치한다. 최종적으로 각 센서들을 통과한 펄스의 빛들만을 구별하여 모으게 되면, 모든 센서들에서 발생하는 광강도의 변화를 센서 별로 구별하여 측정할 수 있게 된다. 또한 스플리터와 로드는 추가로 자기 기준 시간 분할 다점 측정법(self-referencing TDM)을 새롭게 제안하였다[2].

그리고 광강도형 센서뿐 아니라 간섭형 센서에

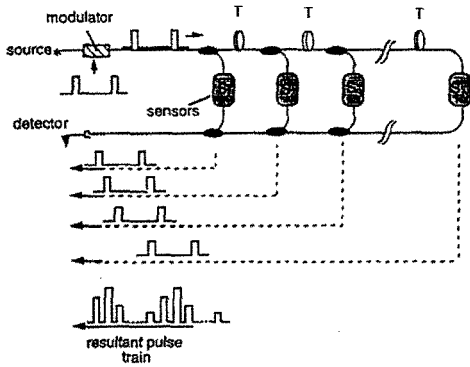


Fig. 1 Basic time division multiplexed sensor array[3]

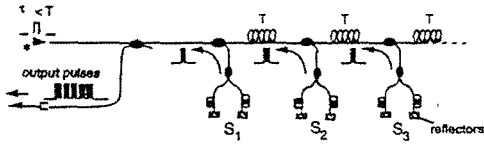


Fig. 2 Time division multiplexed serial arrays based on Michelson interferometer sensor elements[3]

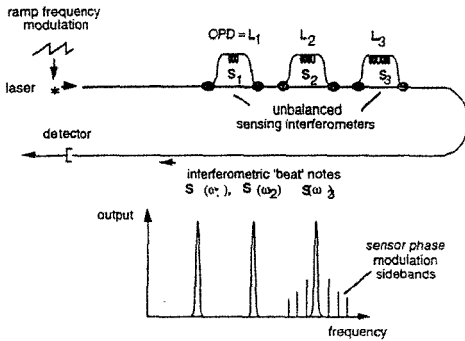


Fig. 3 FMCW interferometric sensor multiplexing[3]

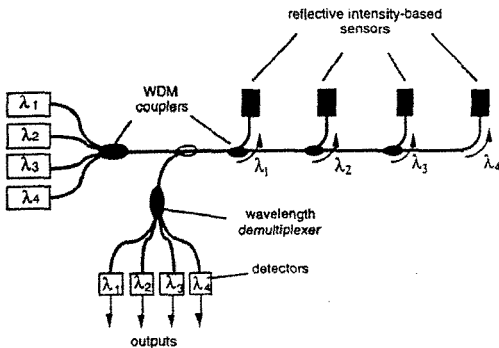


Fig. 4 Wavelength division multiplexed sensor array[3]

대해서도 시간 분할 다점 측정법을 적용하기 위한 많은 연구들이 이루어 졌다[4,5]. 특히 Fig. 2는 마흐젠더(Mach-Zehnder)와 마이켈슨(Michelson) 간섭계에 적용된 시간 분할 다점 측정법의 개념도를 보여주고 있다[6].

2.2. 주파수 분할 다점 측정(Frequency Division Multiplexing, FDM)

지금까지 광강도형 광섬유 센서에 적용 가능한 주파수 분할 다점 측정법들에 대한 여러 연구들이 진행되어 왔다[7,8]. 그 중 레이더-기반 주파수 변조 연속 파형(radar-based frequency-modulated continuous wave) 방법은 광강도형 센서 네트워크를 가능하게 하였다. 이 경우에는 여러 광강도 센서들의 합성을 위해 칩트(chirped)된 RF 광강도 모듈레이터 소스가 사용되고 광감지기 측정 신호에는 기준 칩트 신호가 전기적으로 합성된다[9,10]. Fig. 3은 여러 불균형 간섭계(unbalanced interferometer)들을 광섬유에 연결하고 여기에 주파수 변조된 광신호를 보내는 형태의 주파수 분할 다점 측정법을 보여주고 있다.

각각의 간섭계는 독립적인 진동주파수를 갖고 있어 출력신호를 나타내는 그림처럼 각각의 진동 주파수가 구별되어 나타난다. 이때 각각의 센서 신호를 구분하기 위해 대역 필터(band filter)를 사용하여 여러 센서의 신호를 동시에 측정할 수 있게 되는 것이다.

2.3. 파장 분할 다점 측정(Wavelength Division Multiplexing, WDM)

파장 분할 다점 측정법은 광섬유 통신 시스템에 있어 매우 유익한 기술인 동시에 매우 강력한 기능이기도 하다. 기존의 다점 측정법과 달리 파장 분할 다점 측정법은 빛을 이용하는 통신에 있어 많은 양의 데이터를 동시에 원거리로 보낼 수 있는 핵심적인 기술이기도 하다. 따라서 본 기술은 광섬유 센서의 다중화에도 매우 유용하게 쓰일 수 있다. 다음의 Fig. 4는 파장 분할 다점 측정법을 사용하여 여러 개의 광섬유 센서들을 다점 측정할 수 있는 기본적인 개략도를 보여주고 있다.

그림에서처럼 이 방식은 광강도형뿐만 아니라 간섭형 센서에도 적용가능하다. 또한 각 센서들은 특

정 파장의 광원에만 반응하기 때문에 여러 파장의 광원을 한번에 사용하더라도 최종적으로 각 센서를 통해 광검출기로 돌아온 광원의 빛은 다시 파장에 따라 분리되어 개별적으로 측정된다. 따라서 이 같은 개념은 광원의 빛을 효율적으로 사용한다는 면에서 매우 우수한 개념이라 할 수 있다. 그러나 여러 광소자들 특히 커플러(coupler)나 광파장분할기(WDM)의 기술적 한계 때문에 상대적으로 많은 수의 센서를 동시에 측정하기는 다소 곤란하다. 특히 CWDM(coarse-wavelength-division multiplexing)의 경우 보통 3-4개의 파장으로 광신호를 분리할 수 있어 사용 가능한 센서 역시 이 숫자에 제약을 받게 된다. 그러나 최근에는 DWDM(dense-wavelength-division multiplexing)의 기술개발에 힘입어 많은 수의 센서 측정이 가능해지고 있으며 또한 관련 기술의 발전에 힘입어 향후에는 보다 많은 수의 센서 사용이 가능해질 것으로 예상된다.

그리고 이러한 파장 분할 다점 측정법은 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서 시스템에 적용되어 보다 효과적이며 다점 측정법으로 활용된다. 이때 각각의 광섬유 브래그 격자 센서들은 각자 특정 파장에 반응하고 라인폭(linewidth) 또한 매우 작기 때문에 광대역 파장을 광원으로 사용할 경우 매우 많은 수의 센서를 동시에 동작시킬 수 있다. 물론 파장의 이동량에 따라 센서의 수가 제한되기 때문에 한번에 동작시킬 수 있는 센서의 수에는 한계가 있다. 그러나 앞서 설명했듯이 파장 분할 다점 측정법은 광섬유 브래그 격자 센서의 다중화를 획기적으로 해결할 수 있는 방법중에 하나이다.

3. 다점 측정을 위한 무아레 기법 적용 광섬유 센서의 개념 설계

본 논문에서 사용할 무아레 기법 광섬유 센서 시스템의 광학적 특성을 고찰하였다. 그리고 앞서 조사한 다양한 광섬유 다점 측정법 적용 사례를 통해 무아레 광섬유 센서에 적용 가능한 다점 측정 광학계 시스템을 제안하고 설계하였다.

3.1. 무아레 광섬유 센서 시스템의 광학적 특징

3.1.1. 광강도형 센서로서의 특징

광섬유 센서는 크게 외부 환경 변화의 측정 주체

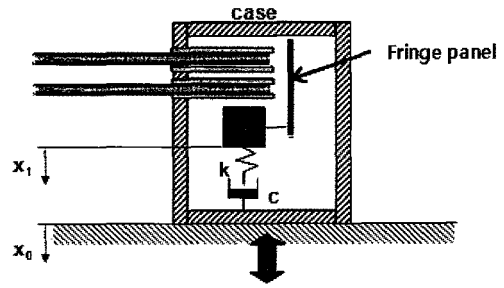


Fig. 5 New optical sensor for measurement of acceleration

가 무엇인지에 따라 내적(intrinsic) 형태와 외적(extrinsic) 형태로 구분된다. 전자의 광섬유 센서는 외부 환경 변화의 측정 주체가 광섬유 그 자체인 반면, 후자의 경우는 광섬유 자체의 직접적인 변화가 아닌 외부 환경의 변화를 2차적으로 광섬유를 이용해 측정하게 된다. 이때 내적 형태의 센서는 광원의 손실이 작아 한 라인(line)의 광섬유에 여러 개의 센서를 쉽게 구성할 수 있으며 다점 측정 역시 상대적으로 단순한 광학계를 이용해 가능해진다. 그러나 외적 형태의 광섬유 센서는 센서 내부에 존재하는 공기층과 같은 외부 요인 때문에 한 라인의 광섬유 내부에 여러 개의 센서를 구성하는 것은 매우 어려운 작업이다. 본 연구에서 설계/개발하고 있는 무아레 광섬유 센서는 Fig. 5에서와 같이 프린지 격자판의 상대 변위를 두 개의 광섬유로 입력되는 반사파의 광강도를 이용해 측정하게 된다[11].

따라서 앞서 조사한 내적 형태의 광섬유 센서 다점 측정법은 직접적으로 적용하기 어렵다. 그리고 기본적으로 본 센서는 외적 형태의 센서에 가깝기 때문에 대표적 외적 광섬유 센서인 외부 페브리-페롯 간섭계 센서의 다점 측정법을 확장하는 방향으로 다점 측정 광학계를 설계해야 한다. 더욱이 본 센서는 하나의 광섬유에서 발생하는 광학적 특성을 추적해야 하는 외부 페브리-페롯 간섭계 센서와 달리 두 개의 광섬유에서 발생하는 광강도를 동시에 측정해야 하기 때문에 이를 해결할 수 있는 새로운 형태의 광원시스템 구성이 필요하다.

3.1.2. 기존의 무아레 광섬유 센서와의 차이점

기존의 무아레 광섬유 센서는 Fig. 6(a)와 같이 두 개의 광 격자판과 광원부에서 센서 헤드부까지

광원이 빛을 전달하는 광섬유 그리고 격자판을 지난 빛을 감지하는 두 개의 광섬유로 이루어진다 [12,13]. 따라서 최소 세 가닥의 광섬유가 필요하며 이 같은 광학적 특성은 다점 측정 모델로 광학계를 확장할 때 광시스템을 복잡하게 만든다. 그러나 본 연구개발을 통해 새롭게 제안된 무아레 광섬유 센서는 Fig. 5와 같이 광원의 빛을 센서 헤드부까지 전달하는 광섬유와 격자판에서 반사된 빛을 다시 감지하는 광섬유가 동일하게 구성된다. 따라서 Fig. 6(b)와 같이, 센서 구동부 광학 설계를 매우 단순화할 수 있게 되어 이전의 센서 시스템보다 단순한 형태의 광학계 구성이 가능해지고, 다점 측정 역시 보다 단순한 형태로 가능해 질 수 있다.

3.2. 다점 측정 원리를 적용한 무아레 기법 광섬유 센서

앞절에서 설명했듯이 본 연구에서 개발한 무아레 광섬유 센서는 기존의 무아레 광섬유 센서와 다른 특성을 갖고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 특성에 맞는 여러 가지 다점 측정 가능 광학계 모델을 다음과 같이 제안하였다.

3.2.1. 제안 모델 1

우선 두 개의 무아레 광섬유 센서를 다점 측정할 수 있는 가장 단순한 형태의 광학계를 설계해 보았다. 이를 위해, 여러 다점 측정 광학 시스템중 구성이 다소 용이한 파장 분할 다점 측정법을 적용해 광학 시스템을 구성하였다. Fig. 3에서와 같이 하나의 센서를 구동하기 위해서는 두 개의 광섬유를 이용해 광원의 빛을 센서 헤드로 보내야 하며 동시에 동일한 두 광섬유에서 발생하는 두 개의 광신호를 광검출기로 연결해야 한다. 즉 하나의 광섬유 센서를 구동하기 위해 두 개의 채널이 필요하게 된다. Fig. 7은 이러한 점을 고려하면서 동시에 두 개의 광섬유 센서를 구동하기 위한 방법으로 4 채널 CWDM의 사용을 제안하였다.

그림에서처럼 광대역 광원(BLS, broadband light source)으로부터 각 센서로 입력되는 광신호는 모두 다른 파장의 빛이 되며, 이렇게 입력된 빛은 센서내에 설치된 격자판의 상태를 개별적으로 감시하게 된다. 최종적으로 두 개의 센서로부터 발생하는

총 네 개의 광신호는 커플러를 통해 하나의 광섬유로 통합된다. 이렇게 통합된 광신호는 하나의 광섬유를 통해 광검출기로 연결된다. 이때 각각 네 개의 광신호를 분리해 내기 위해 CWDM을 다시 사용하게 된다. 이렇게 광시스템을 구성할 경우, 광원과 CWDM을 연결해 주는 한 가닥의 광섬유와 두 개의 센서로부터 발생하는 센서 출력을 광검출기로 다시 연결해 주기 위한 한 가닥의 광섬유 이렇게 총 두 가닥의 광섬유를 이용해 두 개의 광섬유 센서를 동시에 구동할 수 있게 된다. 따라서 두 개의 센서를 동시에 사용해야 하는 경우, 매우 단순한 형태로 원거리 측정 시스템을 구성할 수 있게 된다.

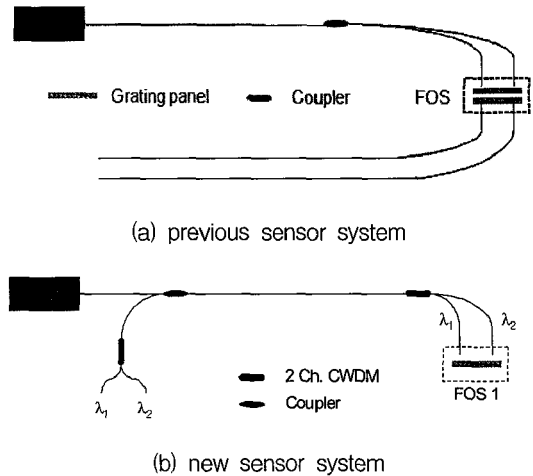


Fig. 6 Driving system for moire-fringe-based fiber optic sensor

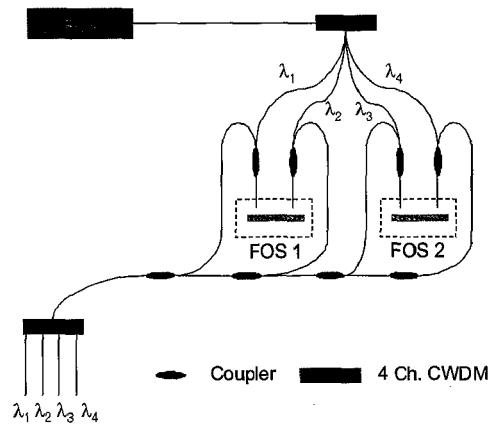


Fig. 7 Model 1 : multiplexing technique for two fiber optic sensors

3.2.2. 제안 모델 II

본 절에서는 앞서 제안된 모델 I을 확장하여 더 많은 숫자의 광섬유 센서를 동시에 사용할 수 있는 모델을 제안하고자 한다. 기본적으로 사용되는 광학계는 CWDM과 커플러로 모델 I과 유사하다. 다음의 Fig. 8과 같이 광대역 광원으로부터 발생한 광원의 빛을 커플러를 통해 분기하여 3번째 4번째 광섬유 센서를 구동하기 위한 광원으로 사용한다. 또한 3, 4번째 센서의 출력 신호는 모델 I과 같이 별도의 CWDM을 통해 각각의 측정 신호를 분리하여 신호처리 하도록 하였다. 최종적으로 광원으로 사용되는 광섬유 라인 하나와 출력단 광원라인 두 개 총 세 개의 라인 내에 총 네 개의 광섬유 센서를 배치할 수 있게 된다.

추가로 다음의 Fig. 9와 같이 제안 모델 II에서 광원을 분리해 내기 위해 커플러를 사용하지 않고 대신 CWDM을 하나 더 추가한다면 보다 간단한 형태로 광학 시스템의 구성이 가능해 진다. 그러나 비용의 문제가 있기 때문에 두 모델간의 선택은 사용자의 편의에 따라 결정될 수 있다고 사료된다.

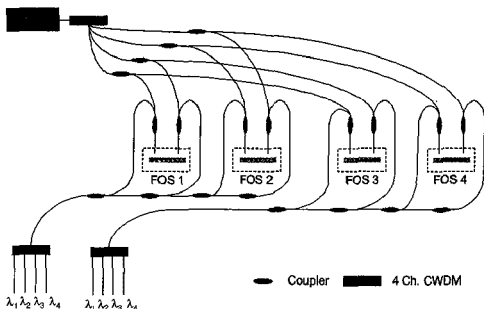


Fig. 8 Model II : multiplexing technique for two fiber optic sensors

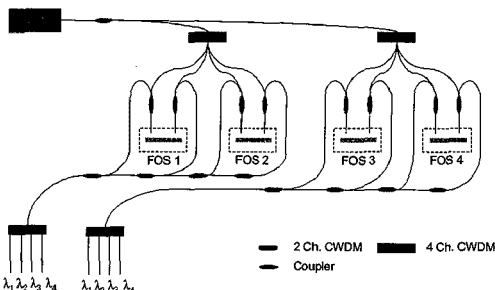


Fig. 9 Modified model II : multiplexing technique for two fiber optic sensors

3.2.3. 제안 모델 III

앞서 설명한 모델 I과 모델 I의 확장 모델인 모델 II의 경우, 5개 이상되는 센서를 동시 다점 측정하기 위해서는 4채널 CWDM의 사용이 계속적으로 추가되어야 하는 설계이다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 2채널 CWDM과 N채널 CWDM을 사용한 새로운 다점 측정 모델을 제안하고자 한다.

Fig. 10과 같이 우선 광대역 광원에서 출력되는 다파장 광원 신호를 2채널 CWDM을 사용하여 각 센서에서 사용되는 특정 파장만을 선택할 수 있게 된다. 이렇게 되면 각 센서들은 해당 파장의 광원만을 사용하게 되므로 분리할 수 있는 파장의 개수만큼 센서의 개수를 증가시킬 수 있게 된다. 또한 동시에 각 센서에서 사용되는 동일한 파장의 광원 출력을 구별하기 위해 두 개의 다채널 CWDM을 사용하였다. 그리고 여러 개의 센서로부터 출력되는 신호 역시 서로 다른 파장의 빛을 사용하기 때문에 CWDM에 의해 손쉽게 구분될 수 있다. 이러한 광학부 설계는 이전의 두 모델에 비해 다채널 CWDM의 추가 없이 센서의 확장이 가능하다는 점에서 다소 향상된 모델이라고 평가할 수 있다. 물론 2채널 CWDM은 센서의 추가에 따라 계속적으로 필요하지만 다채널 CWDM에 비해 상대적으로 비용이 저렴하기 때문에 큰 비용은 추가 되지 않을 것이다.

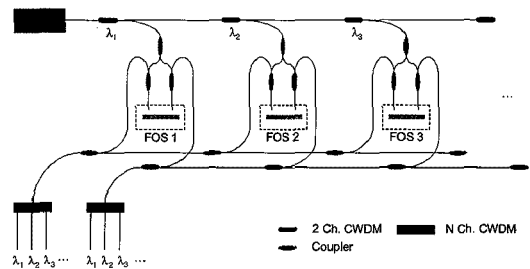


Fig. 10 Model III : multiplexing technique for two fiber optic sensors

3.2.4. 제안 모델 IV

앞서 제안했던 모델들의 경우, 다점 측정은 가능하지만 기존의 다른 다점 측정법에 비해 사용되는 광섬유의 가닥수가 많아 구성이 다소 복잡하다. 예를 들어 마지막 제안 모델인 모델 III의 경우, 광원 입력단에 필요한 광섬유 한 가닥과 출력단에서 센

서 출력을 측정하기 위한 두 가닥의 광섬유가 필요하다. 이처럼 다점 측정을 위해 사용되는 광섬유의 가닥수가 많을수록 광학 시스템의 구성은 복잡해진다. 따라서 사용되는 광섬유의 가닥수를 줄일 수 있는 다점 측정 모델의 연구를 추가로 진행하였다. 또한 본 연구를 통해 새롭게 제안된 무아레 센서 이전의 센서 형태는 Fig. 6(a)에서와 같이 통상 세 가닥의 광섬유를 사용하고 또한 광 출력부와 입력부가 분리되어 있어 다점 측정을 위해 광학 시스템을 구성할 때 여러 제약점이 따르게 된다. 그러나 Fig. 6(b)와 같이 본 연구에서 새롭게 제안한 센서 시스템은 격자판에서 반사되어 돌아오는 광원의 크기를 측정하게 된다. 이러한 사실은 매우 단순하게 보이지만 격자판을 투과한 빛을 별도의 수광부에서 빛을 측정하는 형태의 기존 센서 시스템에 비해 하나의 광섬유 라인이 줄어든 점과 입사부와 수광부의 광섬유 라인을 동일하게 사용할 수 있다는 점에서 상당한 차이를 나타낸다. 또한 이 같은 사실은 여러 센서를 확장하는 면에서 광학부 설계시 상당한 장점으로 작용할 수 있다. Fig. 11은 이러한 장점을 활용하여 다점 측정 광학부를 새롭게 설계한 개략도를 보여주고 있다.

그림에서와 같이 한 라인의 광섬유를 사용하여 다점 측정 광학계 시스템을 획기적으로 단순화시킬 수 있게 된다. 그러나 이 같은 개념으로 다점 측정이 가능해 지려면 제2.1절의 시간 분할 다점 측정법을 동시에 활용해야 한다. 즉 TDM과 WDM 방식을 동시에 사용하는 하이브리드 형태의 다점 측정법이 되는 것이다. 다시 말해, 그림에서처럼 한 센서에서 사용되는 두 개의 광원 신호의 분리는 파

장 분할법을 이용하게 되고 동시에 여러 센서에서 출력되는 신호의 분리는 시간 분할법을 통해 가능해 지는 것이다.

4. 실제 적용 실험을 통한 다점 측정법 검증

본 논문에서는 기존의 무아레 센서 시스템에서 실현되지 못한 다점 측정 구현을 위해 다양한 광학계 구성을 새롭게 제안/설계하였다. 앞서 설명한 여러 제안 모델을 실제 시스템으로 구성하고 이를 검증해 보았다. 우선 시스템 검증을 위해 다점 측정을 위해 사용되는 다양한 광학 부품들에 대한 광학 특성을 검사하였고, 이를 이용해 다점 측정 광학계를 구성하였다. 최종적으로 이렇게 구성된 광학계를 이용해 본 연구에서 새롭게 제안한 무아레 센서에 적용하여 제안된 모델의 다점 측정 가능성을 검증하였다.

4.1. 광학 부품의 광학 특성 검사

본 논문에서 사용되는 주요 광학 부품으로는 CWDM 을 들 수 있다. 본 시스템 구성에 앞서 2 채널 CWDM과 4 채널 CWDM 의 성능을 검증해 보았다. 검사 방법은 다음의 Fig. 12와 같이 CWDM에 광대역 광원(BLS, JDS Uniphase)을 입사시킨 후 OSA(optical spectrum analyser, Anritsu 9710B)로 투과 스펙트럼을 검사하였다.

Fig. 13는 본 연구에서 사용한 1530 nm와 1550 nm 대역의 CWDM 장비와 투과 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림에서처럼 20 nm 씩의 투과영역(bandwidth)을 보여주고 있다. 또한 Fig. 14 는 4

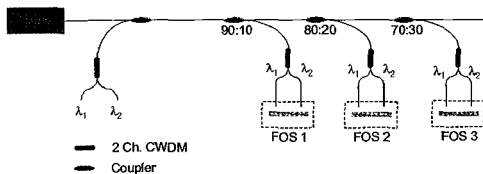


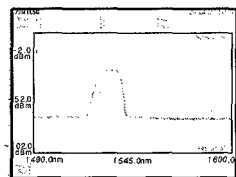
Fig. 11 Model IV : multiplexing technique for two fiber optic sensors



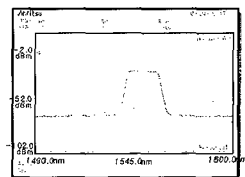
Fig. 12 Test setup for checking the performance of CWDM



(a) 2ch. CWDM



(b) Spectrum @ 1530nm



(c) Spectrum @ 1550nm

Fig. 13 Spectrum analysis of 2-channel CWDM

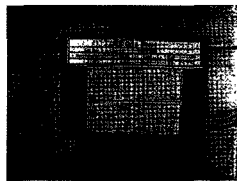
채널 CWDM 장비와 각 파장에 따른 투과 영역을 보여주고 있다. 그림에서처럼 각 파장에서 다른 파장의 간섭을 받지 않는 영역으로 파장 영역이 분할됨을 확인할 수 있다.

참고로 이때 사용된 광대역 광원의 파장 스펙트럼은 다음의 Fig. 15과 같다.

4.2. 무아레 센서를 적용한 다점 측정 실험

본 논문에서는 아직까지 한 개의 센서만이 구성 되어 동시에 두 개의 센서를 연결하는 실험을 구현하기는 어려움이 있었다. 그러나 앞서 제안했던 여러 광학계 구성 모델들의 검증에 위해 우선 하나의

센서만을 이용해 실험을 수행하였다. 단 동시에 두 센서의 구현 가능성을 검증하기 위해 동일한 실험을 반복적으로 수행하였다. 즉, 두 개의 센서 모듈에 각각 독립적으로 센서를 부착하여 반복 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 다점 측정을 위한 대표적 모델인 모델 I을 우선 검증해 보았다. 이를 위해 3절에서 설명한 Fig. 7의 모델과 같이, 두 개의 CWDM과 커플러를 이용해 광학계를 구성하였다. Fig. 16은 실험 셋업을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 광대역 광원을 CWDM에 연결한 후, 1530 nm와 1550 nm의 파장의 광원을 센서에 연결하였고 다시 센서로부터 발생한 광신호의 취득을 위해 커플러를 이용해 CWDM에 연결하였다. 그리고 CWDM을 통해 발생하는 1530 nm와 1550 nm의 광원을 각각 광검출기에 연결하였다. 마지막으로 진동기(shaker)에 장착되어 있는 센서를 가진하여 이때 발생하는 센서의 신호를 오실로스코프로 취득하였으며 GPIB 선을 이용해 데이터를 컴퓨터로 전송하여 저장하였다.



(a) 4ch. CWDM

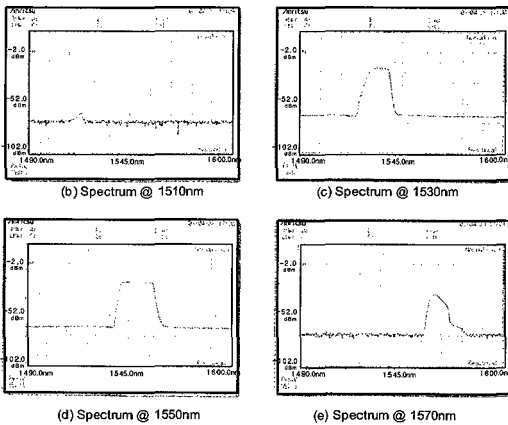


Fig. 14 Spectrum analysis of 4-channel CWDM

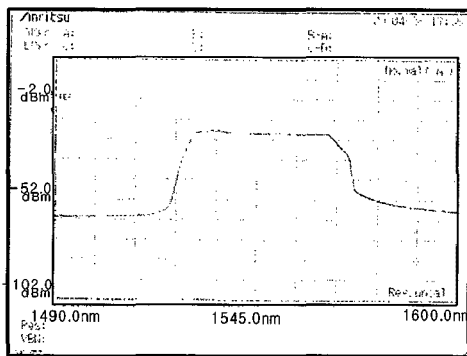


Fig. 15 Spectrum analysis of broadband light source



Fig. 16 Test set-up for checking the performance of the multiplexing-Model I

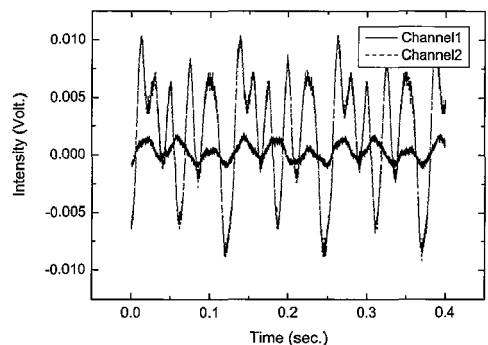


Fig. 17 Sensor signals in the multiplexing-Model I

Fig. 17는 1530nm과 1550nm 파장의 광원에 각각 연결된 두 가닥의 광섬유에서 취득한 두 개의 신호를 보여주고 있다. 비록 가진 진동이 미소하여 신호가 정현파 형태를 갖추지는 못했지만 그림에서처럼 두 개의 광검출기에서 성공적으로 취득됨을 확인할 수 있었다. 또한 CWDM의 남은 두 파장대 광원을 이용해 동일한 실험을 반복 수행하여 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 모델 I의 다점측정 가능성을 성공적으로 검증할 수 있었다. 또한 모델 I의 검증 실험을 통해 모델 II의 다점측정 가능성을 간접적으로 확인할 수 있었다.

다음으로 모델 III의 검증을 위해, Fig. 18과 같이 제3장에서 설명한 모델 III의 광학계를 구성하였다. 그림과 같이, 2 채널 CWDM과 두 개의 4 채널 CWDM을 사용하여 광학계를 구성하였으며 앞선 모델 I의 실험과 동일한 방법으로 센서에서 발생하는 신호를 성공적으로 취득할 수 있음을 Fig. 19의 취득 신호 그림을 보고 알 수 있다. 참고로 본 연

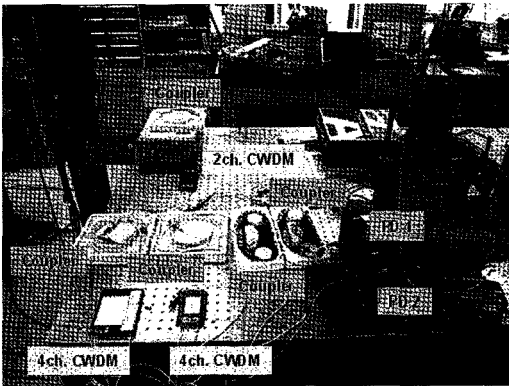


Fig. 18 Test set-up for checking the performance of the multiplexing-Model III

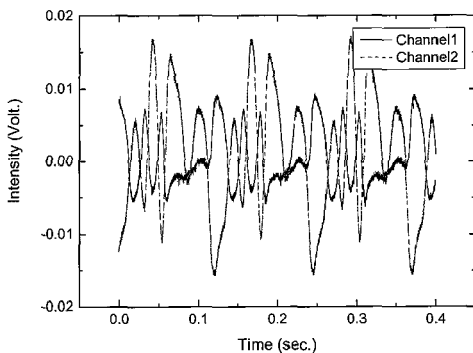


Fig. 19 Sensor signals in the multiplexing-Model III

구에서 수행한 두 실험은 다점 측정을 위해 제안된 두 광학 모델을 사용할 경우, 신호의 취득이 성공적으로 이루어질 수 있는지 단순히 확인한 것이다. 향후 센서의 제작이 완료된 후 보다 정밀한 시험이 가능할 것으로 기대한다.

5. 결론

본 논문에서는 현재 개발되고 있는 신개념 무아레 광섬유 센서의 활용성을 극대화할 수 있는 다점측정 기술에 대한 다양한 광학 모델을 제안하였고 동시에 제안된 모델을 실험으로 검증하였다. 이를 위해, 기존의 무아레 광섬유 센서가 갖는 단점을 보완하기 위해 단일 프린지 광섬유 센서를 고안하여 사용하였다. 그리고 광섬유 센서에 적용 가능한 기존의 다점 측정 원리들을 조사하였으며 이를 바탕으로 본 연구에서 개발한 무아레 광섬유 센서에 적용 가능한 네 가지의 다점 측정 모델을 새롭게 제안하였다. 그리고 제안된 네 가지 모델중 CWDM으로 구현이 가능한 두 가지 모델에 대해 실제 실험적 검증을 수행하기 위해 광학 시스템으로 구성하였다. 최종적으로 제안된 광학 모델들을 실제 신개념 무아레 광섬유 센서 시스템에 적용하여 다점 측정의 가능성을 성공적으로 보였다. 추가로 향후 TDM 장비의 구축과 더불어 가장 단순화된 제안 모델 IV의 검증도 가능할 것으로 예상하며 이러한 시스템 구현을 통해 보다 다양한 실험이 가능할 것이라 사료된다.

참고 문헌

- [1] A. R. Nelson, D. H. McMahon, and R. L. Gravel, "Passive multiplexing system for fiber-optic sensors," *Applied Optics*, Vol. 19, No. 17, pp. 2917-2920, (1980)
- [2] W. B. Spillman, and J. R. Load, "Self-referencing multiplexing technique for fiber-optic intensity sensors," *J. Lightwave Technology*, LT-5, Vol. 5, No. 7, pp. 865-869, (1987)
- [3] J. Dakin and B. Culshaw, *Optical Fiber Sensors Volume Four Applications, Analysis, and Future Trends*, Artech House, Inc., (1997)

- [4] J. L. Brooks, M. Tur, B. Y. Kim, K. A. Fesler, and H. J. Shaw, "Fiber-optic interferometric sensor arrays with freedom from source phase-induced noise," *Optics Letter*, Vol. 11, No. 7, pp. 473-475, (1986)
- [5] A. D. Kersey, A. Dandridge and A. Tveten, "Time-division multiplexing of interferometric fiber sensors using passive phase-generated carrier interrogation," *Optic Letters*, Vol. 12, No. 10, pp. 775-777, (1987)
- [6] M. J. Marrone, A. D. Kersey and A. Dandridge, "Fiber-optic Michelson array with passive elimination of polarization fading and source feedback isolation," *Proc. 8th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors*, Monterey, CA, p. 69, (1992)
- [7] J. Mlodzianowski, D. Uttamchandani, B. Culshaw, "A simple frequency domain multiplexing system for optical point sensors," *IEEE J. Lightwave Technology*, LT-5, Vol. 5, No. 7, pp. 1002-1007, (1987)
- [8] K. I. Mallalieu, R. Youngquist, D. E. N. Davies, "FMCW of optical source envelope modulation for passive multiplexing of frequency-based fiber-optic sensors," *Electron. Lett.*, Vol. 22, No. 15, pp. 809-810, (1986)
- [9] I. P. Giles, D. Uttam, B. Cylshaw, D. E. N. Davies, "Coherent optical-fiber sensors with modulated laser sources," *Electron. Lett.*, Vol. 19, No. 1, pp. 14-15, (1983)
- [10] S. A. Al-Chalabi, B. Culshaw, D. E. N. Davies, I. P. Giles and D. Uttam, "Multiplexed optical interferometers-an analysis based on radar systems," *Proc. IEEE Part J.*, Vol. 132, No. 2, pp. 150-156, (1985)
- [11] Yeon-Gwan Lee, Sang-Oh Park, Dae-Hyun Kim, Byeong-Wook Jang and Chun-Gon Kim, "Development of reflection-type optical fiber sensor using one grating panel," *SPIE 2009 Conference*, San Diego, California, USA, (2009)
- [22] Maria Q Feng and Dae-Hyun Kim "Novel fiber optic accelerometer system using geometric Moiré fringe," *Sensors and Actuators A: Physical* 128, pp. 37-42, (2006)
- [13] Dae-Hyun Kim and Maria Q. Feng, "Ambient vibration-measurement of real building structure by using fiber optic accelerometer," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 26, No. 6, pp. 373-379, (2006)