

분포형 광섬유 센서를 이용한 풍력발전기의 기계적 부하 측정 및 모니터링

Measurement and Monitoring of Mechanical Loads of Wind Turbines Using Distributed Fiber Optic Sensor

이 중 원* · 허 영 철* · 남 용 윤* · 이 근 호* · 김 유 성** · 이 용 배**

Jong Won Lee, Young Cheol Huh, Yong Yun Nam, Geun Ho Lee,
Yoo Sung Kim and Yong Bae Lee

(2007년 5월 1일 접수 ; 2007년 10월 8일 심사완료)

Key Words : Distributed Fiber Optic Sensor(분포형 광섬유센서), Mechanical Load(기계적 부하), Wind Turbine
(풍력발전기)

ABSTRACT

A method for measurement and monitoring of mechanical loads in large slender structures such as wind turbine blade and tower is presented based on continuous strain data obtained from distributed fiber optic sensor. An experimental study was carried out on an aluminum cantilever beam. A static load test was performed and the calculated moment from the distributed fiber optic sensor agree well with the actual applied moment. A series of damages was inflicted on the beam, and vibration tests were carried out for each damage case. The estimated natural frequencies from the distributed fiber optic sensor for each damage case are found to compare well with those from a conventional accelerometer and a numerical analysis based on an energy method.

1. 서 론

풍력발전기는 실제 운용 전에 성능평가 및 인증을 위하여 주요 기계요소의 기계적 부하, 풍향 관련 신호 및 발전기 운전상태 등을 현장에서 측정해야 한다. 풍력발전기의 주요 기계요소로서는 블레이드, 주축 및 타워가 있으며 주로 장대 구조물들로 구성된다. 블레이드와 타워에 대해서는 스트레인 게이지를 부착하여 굽힘 모멘트를 측정해야하며, 주축에 대해서는 역시 스트레인 게이지를 부착한 후 굽힘 모멘트 및 토크를 측정해야 한다⁽¹⁾.

현재 풍력발전기에 대한 시장의 중요한 요구 중 하나는 대용량화이며 이에 따른 기계요소들의 대형화가 수반되어야 한다. 예를 들어 5MW급 풍력발전기의 블레이드 로터 지름과 타워의 높이는 약 120m이며, 이러한 대형화에 따른 기술적 문제점들이 부각되는 한편 유지관리 문제가 대두되고 있다.

한편, 협소한 국토 및 민원문제 등으로 인한 육상 풍력발전의 한계점들을 극복하고 해상의 고품질 풍력자원을 이용하기 위하여 해상풍력발전기에 대한 개발이 요구되고 있다. 해상풍력발전기 건설에 대한 비용을 절감하기 위해 발전기의 대용량화가 더욱 요구되고 있으며, 접근성 제약으로 인한 효과적 유지관리 및 신뢰성 확보 등을 위한 기술개발이 필요하다.

이러한 대형 풍력발전기와 해상풍력발전기의 효과적인 유지관리를 위해서는 상태 모니터링 기술의 개발 및 적용이 필요하다. 즉, 대형 풍력발전기의 구조적

† 교신저자: 정회원 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부
E-mail : jwlee@kimm.re.kr

Tel: (042) 868-7472, Fax: (042) 868-7477

* 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

** (주)소암컨설팅트

안전성 확보 및 지속적 운전을 위한 효과적인 유지관리를 위해서는 정기점검이 필수적이거나, 이것만으로 안전성을 충분히 보장할 수 없기 때문에 상태 모니터링 시스템을 설치하여, 장기간에 걸쳐 누적되는 구조물의 노후화 정도 및 갑작스런 이상발생을 항상 감시할 필요가 있다. 또한, 모니터링에 의한 장기적인 자료의 축적은 해당 구조물의 이력이 될 수 있으며, 이는 정기점검 및 유지관리를 위한 자료로 활용될 수 있고, 장기적인 거동예측 및 유사한 또는 새로운 발전기의 설계 시 중요한 기초 자료로 이용될 수 있다. 이러한 상태 모니터링을 통하여 1차적으로 고장이나 손상을 추정하게 되며, 이의 단계는 우선 고장 및 손상발생유무의 판정, 고장 및 손상위치의 판정, 고장 및 손상 정도의 추정 그리고 잔여수명 산정의 단계로 이루어진다.

앞에서 언급된 바와 같이 풍력발전기의 성능평가를 위해서도 블레이드 및 타워의 굽힘 모멘트 측정이 요구되지만, 나아가서 발전기의 운용 중 유지관리를 위하여 블레이드 및 타워에 발생하는 기계적 부하를 항상 측정하여 모니터링 할 필요가 있다. 블레이드 및 타워의 굽힘 모멘트 측정을 위해서는 스트레인 게이지를 부착하여 인장응력 및 압축응력을 측정한다. 이때 일반적으로 이용되는 게이지는 금속형 포일 게이지인데, 최근 이를 대체할 수 있는 광섬유 센서(FOS: fiber optic sensor)에 대한 개발 및 적용이 활발히 수행되고 있다. 광섬유 센서는 일반 스트레인 게이지와 같은 기능을 가지면서 전자기파의 영향을 받지 않아 노이즈를 현저히 줄일 수 있으며, 한 개의 광섬유에 여러 개의 센서를 연결하여 사용하는 멀티플렉싱이 가능하다. 개발되고 있는 광섬유 센서의 종류는 여러 가지가 있으나, 가장 대표적으로 이용되고 있는 센서는 FBG(fiber bragg gratings) 센서이다. 이인재 등⁽²⁾은 모형 헬리콥터의 블레이드에 FBG 센서를 설치하고, 빔 커플러를 사용하여 회전체의 광섬유와 광 신호 처리부를 연결하여 회전 중인 블레이드에 발생하는 스트레인을 측정하였다. 또한 강래형 등⁽³⁾은 보와 평판의 스트레인 측정을 위하여 FBG 센서를 설치하고, 변위-스트레인 변환 관계식을 이용하여 구조물의 변위 신호를 추정하는 방법을 제안하였다. 한편 분포형 광섬유 센서(distributed FOS)를 이용하면 1m 전후의 게이지 길이(gage length)로 분포 스트레인을 측정할 수

있다. FBG 센서와 분포형 광섬유 센서를 비교하면, 분포형 광섬유 센서는 긴 게이지 길이를 가지며 넓은 영역을 측정할 수 있는 반면 정확도가 약간 떨어지고 동적 측정이 불가능하였다⁽⁴⁾. 그러나 최근 개발된 분포형 광섬유 센서 분석기를 이용하면 제한된 범위이지만 동적 측정이 가능하며, 따라서 풍력발전기 기계요소들의 운용 중 진동측정에 활용할 수 있다. 이 분포형 광섬유 센서에 대해서는 2장에 자세히 설명하였다.

풍력발전기 블레이드 및 타워, 교량, 선박 등과 같은 장대 기계요소 및 구조물에 대해 실제 운용 환경하에서 전체(global) 스트레인을 측정하기 위해서는 국부적 영향을 배제하기 위하여 게이지 길이를 길게 하는 것이 바람직하다. 선박에서도 선체응력 모니터링을 위한 스트레인을 측정할 때 2차적 혹은 국부응력 분포를 배제하기 위하여 긴 게이지 길이로 측정하는 것을 권장하고 있다⁽⁵⁾. 또한 콘크리트 구조물과 같이 불균질 재료로 시공된 구조물의 스트레인 측정을 위해서도 게이지 길이를 길게 하여 평균 스트레인을 구할 수 있도록 하고 있다. 대형 장대구조물의 상태 모니터링에 대해 분포형 센서가 가지는 또 다른 장점은 넓은 범위에 걸친 손상탐지가 가능하다는 것이다. 균열과 같은 손상은 국부적으로 응력변화를 발생시키며 따라서 손상위치에 근접하여 부착한 포인트 센서는 손상을 민감하게 감지할 수 있지만, 손상 근처에 포인트 센서가 없는 경우 손상을 탐지 못하는 경우가 발생한다. 그러나 분포형 센서는 비록 손상에 대한 민감도는 떨어지나 넓은 범위에 걸쳐 손상탐지가 가능하여 손상탐지의 실패확률을 줄일 수 있다.

이 논문에서는 성능평가를 위하여 풍력발전기 블레이드 및 타워의 기계적 부하를 측정할 때, 효과적이고 신뢰성 있는 측정을 위하여 분포형 광섬유 센서를 이용한 스트레인 측정에 대한 방법을 제안하고 이를 정적실험을 통하여 검증하였다. 또한, 진동신호를 이용한 풍력발전기 블레이드 및 타워의 상태 모니터링을 위하여 분포형 광섬유 센서의 활용을 제안하고, 이를 진동실험 및 손상실험을 통하여 검증하였다. 분포형 광섬유 센서를 설치하여 손상 단계별 진동실험을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 구조물의 손상을 탐지하고자 하는 시도는 이 연구에서 최초로 수행된 것이라 판단된다.

2. 분포형 광섬유 센서

광섬유에 대단히 폭이 좁은 레이저(pulsed laser) 파형요소를 보내면 산란(scattering) 현상이 발생한다. 그 중 일부는 반사되며 광 다이오드에 의해 수신되는 진폭은 입사광의 것보다 대단히 작다. 만약, 광섬유의 주위 환경(예: 온도, 스트레인)에 변화가 있으면 Fig. 1과 같이 레일리 산란(Rayleigh scattering), 라만 산란(Raman scattering) 및 브리유앵 산란(Brillouin scattering)의 3가지 산란현상이 관심의 초점이 된다.

광섬유에 빛을 보내게 되면 광파(light waves)만이 전달되는 것이 아니라 자연적으로 음파(sound waves)가 발생된다. 이렇게 전파되는 광파와 음파 사이의 상호작용에 의해 브리유앵 반사가 일어난다. 이 브리유앵 반사는 2개의 성분 즉, 스토크스(Stokes)와 반-스토크스(anti-Stokes) 범위의 파장으로 분리되기 때문에 이들은 각각 원래 광섬유에 보내진 빛의 색과는 다른 색을 띠게 된다. 이러한

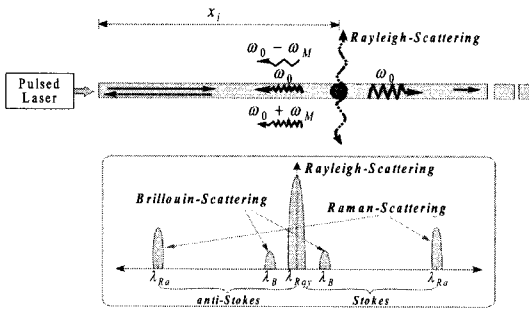


Fig. 1 Fundamentals of the fiber optic sensor

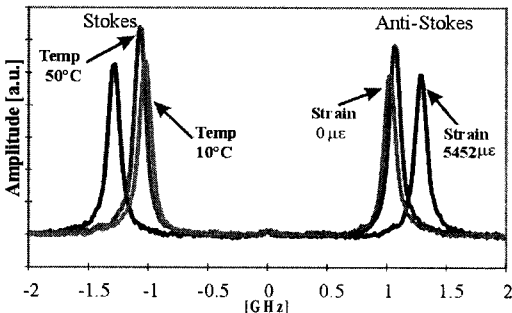


Fig. 2 Offset of Brillouin frequency from center frequency(9.75 GHz)⁽⁶⁾

브리유앵 산란은 온도, 스트레인 및 압력과 같은 외부 영향에 따라 민감하게 반응한다. Fig. 2는 온도 및 스트레인 변화에 따른 브리유앵 산란 신호의 변화를 보이고 있다. 즉, 케이블 주변의 온도가 변하게 되면 스토크스 및 반-스토크스 신호의 진폭이 변하며, 스트레인의 변화가 있는 경우에는 주파수가 변하게 된다. 즉, 스트레인 계측 시 별도의 장치 없이 온도보정이 가능하다. 브리유앵 산란을 이용한 스트레인 계측의 원리를 자세히 살펴보면 다음과 같다.

브리유앵 산란의 주파수(F)와 파워(P)는 온도(T)와 스트레인(ϵ)의 변화에 의해 선형적으로 변화하며 이를 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$P = C_{R\epsilon} \cdot \epsilon + C_{PT} \cdot T \quad (1)$$

$$F = C_{R\epsilon} \cdot \epsilon + C_{FT} \cdot T \quad (2)$$

여기서, $C_{R\epsilon}$ 은 스트레인 변화에 의한 브리유앵 파워 변화 ($\Delta P/\mu\epsilon$) 계수, C_{PT} 는 온도 변화에 의한 브리유앵 파워 변화 ($\Delta P/^\circ C$) 계수, $C_{R\epsilon}$ 은 스트레인 변화에 의한 브리유앵 주파수 변화 ($\Delta F/\mu\epsilon$) 계수, 그리고 C_{FT} 는 온도 변화에 의한 브리유앵 주파수 변화 ($\Delta F/^\circ C$) 계수이다. 이들 4개의 계수는 광섬유에 대하여 온도와 스트레인을 변화시키며 실험적으로 구할 수 있다. 따라서 온도 보상된 스트레인을 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{P \cdot C_{FT} - F \cdot C_{PT}}{C_{R\epsilon} \cdot C_{FT} - C_{R\epsilon} \cdot C_{PT}} \quad (3)$$

영국 Sensornet사에서는 브리유앵 산란을 이용한 분포형 광섬유 센서 측정장비인 DTSS(distributed temperature and strain sensing)를 개발하였다. 이 장비를 이용하면 게이지 길이가 1m인 분포 스트레인을 계측할 수 있고, 자체적 온도보정이 가능하며, 정적 스트레인은 물론 10 Hz까지 동적 스트레인 계측이 가능하다. 정적 스트레인 계측 시에는 레이저 및 변조기(modulator)의 튜닝 및 안정화, 브리유앵 스펙트럼 및 파워 측정 등의 알고리즘을 통하여 스트레인을 계측하며, 다수의 스위프(sweep)를 수행한 후 이를 평균한 값을 출력한다. 한편, 동적 스트레인 계측 시에는 정적 스트레인 계측 시 수행되었던 레이저 및 변조기의 튜닝 및 안정화 결과를 그대로 이용하기 때문에 정적 측정 후 계측한다. 튜닝

및 안정화 과정이 생략되고 정적 측정범위보다 적은 범위의 스트레인을 측정하며, 상대적인 스트레인의 변화 값을 측정하는 알고리즘을 사용하기 때문에 빠르게 스트레인을 측정할 수 있다.

3. 굽힘 모멘트 측정

3.1 블레이드 및 타워의 기계적 부하 측정

풍력발전기의 기계적 부하 측정을 위해서는 정상 운전상태와 고장상태 등을 포함하는 여러 측정 하중 케이스(measurement load cases)에 대하여 Table 1과 Fig. 3의 항목을 측정해야 한다⁽¹⁾.

이때 굽힘 모멘트를 구하기 위해서는 각 기계요소의 대상 부위에 인장응력 및 압축응력을 측정해야 하며, 이를 위하여 일반적으로 기존 스트레인 게

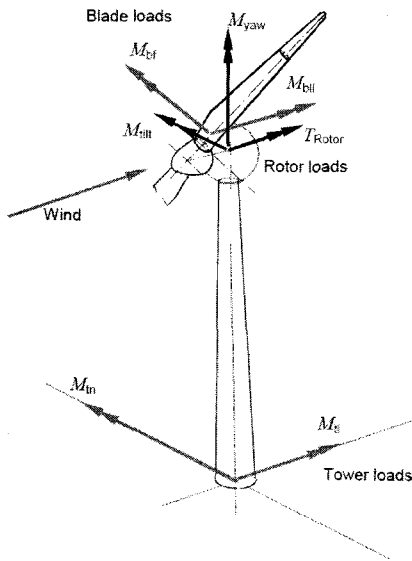


Fig. 3 Fundamental wind turbine loads⁽¹⁾

Table 1 Wind turbine fundamental load quantities⁽¹⁾

Load quantities	Specification	Comments
Blade root loads	Flap bending Load-lag ending	Blade 1: mandatory Other blades: recommended
Rotor loads	Tilt moment Yaw moment Rotor torque	The tilt and yaw moment can be measured in the rotating frame of reference or on the fixed system (for example, on the tower)
Tower loads	Bottom bending in the two direction	

이지를 인장 측과 압축 측에 부착한 후 브리지를 구성한다. 이때 스트레인 게이지 브리지의 출력 전압 값을 실제 모멘트 값으로 환산하기 위해서는 보정(calibration) 작업이 수반되어야 한다⁽⁷⁾. 이 과정에서 1차적으로 스트레인 게이지를 통한 인장 및 압축 스트레인의 신뢰성 있는 측정이 선행되어야 한다.

3.2 정적실험 방법

분포형 광섬유 센서를 이용한 풍력발전기 블레이드 및 타워의 굽힘 모멘트 측정에 대한 적용성을 검증하기 위하여 Fig. 4와 같이 캔틸레버 보에 대한 정적실험을 수행하였다. 사용된 시편의 재질은 순수 알루미늄(AL 6061)으로서 길이가 5.7m이며 단면이 0.05 m × 0.05 m이다. 게이지 길이가 1m인 분포형 광섬유 센서(FOS 1 - FOS 4)를 캔틸레버 보의 하단 표면에 길이 방향으로 부착한 후 DTSS를 이용하여 스트레인을 계측하였으며, 비교분석을 위하여 게이지 길이가 5mm인 일반 스트레인 게이지 9개(SG 1 - SG 9)를 Fig. 5에 보인 위치에 부착하였다.

실험에 사용된 DTSS는 분포형 광섬유 센서 계측 시스템으로서, 브리유앵 산란의 특성을 이용하여 광섬유에 가해진 스트레인, 온도, 압력 등을 계측할 수 있는 장비이다. Fig. 4의 DAQ 시스템(Kyowa, UCAM-500A)에는 일반 스트레인 게이지를 연결하여 포인트 스트레인을 계측하였다. 한편 추후 설명될 진동실험의 결과를 비교하기 위하여 보 끝단 가까이 가속도계(AC)를 부착하였으며 B&K사의 4370 모델을 사용하였다.

캔틸레버 보의 자유단에서 수직 집중하중(245 N)을 가하여 발생하는 스트레인을 분포형 광섬유 센서와 일반 스트레인 게이지로부터 측정하였다. 분포형 광섬유 센서에 대해서는 하중이 가해진 상태에서 약 20분간 정적 계측을 수행하였으며, 이때 약 50회의 스위프 과정이 수행되었다. 성능평가를 위한 굽힘 모멘트 측정을 위해서는 고정단측 한 지점에서의 스트레인만을 측정해도 되지만, 상태 모니터링을 위해서는 길이 방향으로 전 구간에 걸친 스트레인을 모두 측정하여 분포를 파악하는 것이 유용하다. 이때 일반 스트레인 게이지를 이용하면 각 게이지마다 케이블을 연결해야 하지만 광섬유 센서를 이용하면 하나의 광섬유 케이블을 이용하여 다수의 지점에서 스트레인을 계측할 수 있는 장점이 있다.

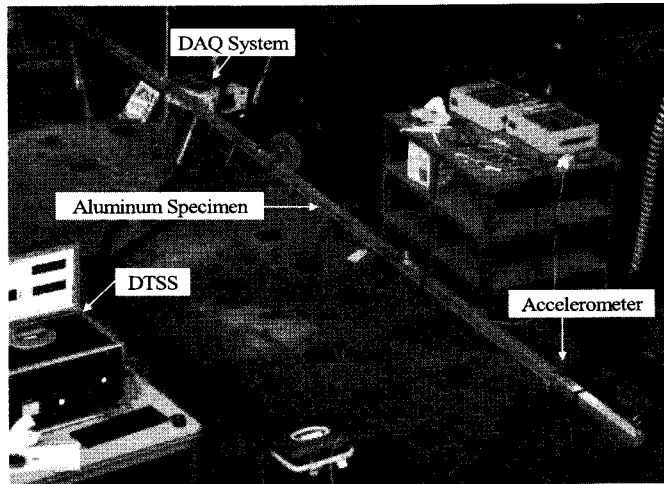


Fig. 4 Experimental setup for the cantilever beam

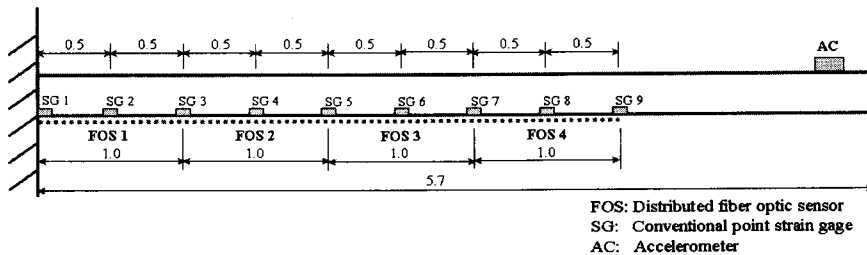


Fig. 5 Sensor locations(lengths in m)

3.3 굽힘 모멘트 측정 결과

임의의 위치 x 에 부착된 일반 스트레인 게이지로부터 측정된 결과를 이용하여 다음 식과 같이 굽힘 모멘트를 계산 할 수 있다.

$$M(x) = \epsilon(x)EI/y \quad (4)$$

여기서, $M(x)$ 는 굽힘 모멘트, $\epsilon(x)$ 는 측정된 스트레인, E 는 영계수, I 는 단면 2차모멘트, y 는 중립축에서 게이지까지의 거리이다.

한편 x_1 에서 x_2 까지 분포된 광섬유 센서로부터 측정된 스트레인($\epsilon_{x_1-x_2}$)과 굽힘 모멘트의 관계는 다음과 같다.

$$\epsilon_{x_1-x_2} = \frac{1}{(x_2-x_1)} \frac{y}{EI} \int_{x_1}^{x_2} M(x) dx \quad (5)$$

그러나 $M(x)$ 의 분포가 선형일 때는 분포 스트레인은 x_1 과 x_2 의 중심 위치에서의 스트레인과 일치하

며 따라서, 중심 위치에서 식 (4)를 이용하여 굽힘 모멘트를 계산할 수도 있다.

일반 스트레인 게이지와 분포형 광섬유 센서에서 측정된 스트레인과 이들로부터 구한 굽힘 모멘트를 Table 2에 정리하였다. 분포형 광섬유 센서의 분해능은 광섬유 케이블의 길이에 따라 차이가 있지만 약 10-20 $\mu\epsilon$ 이다. 그러나 다수의 스위프트에 의한 측정결과들을 평균하여 최종 측정값이 출력되기 때문에 스트레인 값이 마지막 자리까지 표현되고 있다.

분포형 광섬유 센서로부터 구한 굽힘 모멘트와 실제 작용 모멘트와의 오차를 살펴보면 분포형 광섬유 센서를 이용하여 굽힘 모멘트 측정이 가능한 것으로 판단된다. 단 FOS 1에 대한 오차가 상대적으로 크게 나타난 것은, 광섬유 케이블의 곡률반경 손실(bending loss)을 고려하여 고정단의 끝단까지 케이블을 완전히 부착하지 못했기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 이 실험에서는 일반 스트레인 게이지에 의한 굽힘 모멘트의 오차가 분포형 광섬유 센서에 의

Table 2 Measured strains and bending moments

Location (m)	Strain ($\mu\epsilon$)		Bending moment (Nm)		
	FOS	SG	From FOS	From SG	Applied
0.0	-	956	-	1394 (0.70)	1384
0.5	840	864	1225 (2.92)	1259 (0.19)	1262
1.0	-	781	-	1139 (0.03)	1139
1.5	695	699	1014 (0.29)	1019 (0.24)	1017
2.0	-	612	-	892 (0.20)	894
2.5	523	529	762 (1.26)	771 (0.04)	772
3.0	-	443	-	646 (0.51)	649
3.5	356	360	519 (1.47)	525 (0.34)	527
4.0	-	271	-	395 (2.17)	404

- Note 1) FOS : fiber optic sensor
- Note 2) SG : conventional point strain gage
- Note 3) Location is distance from the fixed end.
- Note 4) Location of the FOS is distance between the center of the sensor and the fixed end.
- Note 5) The values in parentheses are errors in % for the applied moment.
- Note 6) $E=70$ GPa

한 오차보다 상대적으로 약간 적지만, 현장에서의 실제 크기 구조물에 대한 측정에서는 전자기장의 영향 및 국부응력의 영향 등으로 인해 일반 스트레인 게이지에 의한 오차가 크게 나타날 것으로 예상된다. 그러나 분포형 광섬유 센서는 위 영향들을 배제할 수 있기 때문에 대형 구조물에 대해 현장에서 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 고유진동수 측정

4.1 에너지법을 이용한 균열 보의 고유진동수

구조물 일부에 균열 또는 부식 등 손상이 발생되거나 노후화되면 국부강성이 감소하게 되며 이는 구조물 고유진동수의 감소를 초래한다. 따라서 구조물의 고유진동수를 측정하여 손상을 평가하는 방법은 진동신호를 이용한 상태 모니터링의 전통적 방법 중 하나이다. Yang 등⁽⁸⁾과 Owolabi 등⁽⁹⁾은 열린 균열이 존재하는 보에서 변형 에너지의 균형 조건식을 이용하여 균열 보의 등가 굽힘 강성을 분수함수의 형태로 유도하고, 단순지지 및 고정지지 조건의 보에 대해 균열 크기와 위치 변화에 따른 고유진동수를 계산하는 연구를 수행하였다. 에너지법을 이용함으로

써 단순한 정식화가 가능하고 균열 보를 연속보로 가정함에 따라 갈레르킨법(Galerkin method)을 이용하여 균열 보의 고유해를 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다. 허영철 등⁽¹⁰⁾에서는 변형 에너지 균형조건을 이용하여 하나의 균열이 존재하는 캔틸레버 보에 대해서 균열 크기와 위치 변화에 따른 고유진동수를 계산하고 이를 실험을 통하여 검증하였다.

변형 에너지 균형 조건식을 이용하고 파괴역학 이론 및 응력확대계수 K_I 를 적용하면, 열린 균열이 존재하는 보에서의 등가 굽힘강성 EI_c 를 다음 식으로 구할 수 있다⁽⁸⁾.

$$EI_c = \frac{EI}{1 + EI \cdot R(a,c) / [1 + ((x-c)/\{k(a)a\})^2]} \quad (6)$$

여기서,

$$R(a,c) = \frac{2D(a)}{k(a)a [\arctan((1-c)/\{k(a)a\}) + \arctan(c/\{k(a)a\})]}$$

$$D(a) = \frac{18\pi [F(a)]^2 a^2}{Ebh^4}$$

$$k(a) = \frac{3\pi [F(a)]^2 (h-a)^3 a}{[h^3 - (h-a)^3] h}$$

여기서, $F(a)$ 는 K_I 의 경계보정계수(boundary correction factor), a 는 균열깊이, c 는 균열위치, b 는 보의 폭, h 는 보의 높이이다.

식 (6)을 이용하면 임의 위치 및 깊이의 열린 균열이 존재하는 보의 등가 굽힘강성을 구할 수 있다. Fig. 4의 캔틸레버 보에서 균열이 고정단에서 1.71 m 위치에 발생하였을 때($c=1.71$ m, $c/L=0.3$) 균열 깊이(a/h)에 따른 등가 굽힘강성(EI_c)의 변화를 식 (6)을 이용하여 구할 수 있으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

균열이 있는 오일러-베르누이(Euler-Bernoulli) 보에서 횡방향의 변위를 $w(x,t)$ 라고 정의하면 등가 굽힘강성 EI_c 를 적용한 운동방정식은

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[EI_c \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right] + \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

으로 표현할 수 있고 $w(x,t) = W(x)Q(t)$ 로 변수

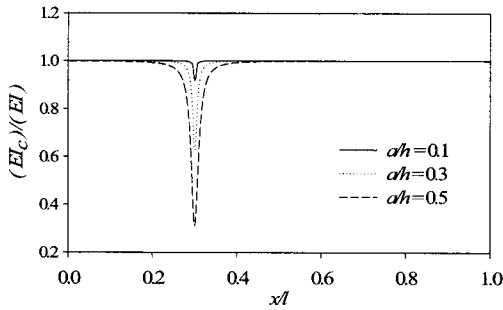


Fig. 6 Variation of normalized bending stiffness

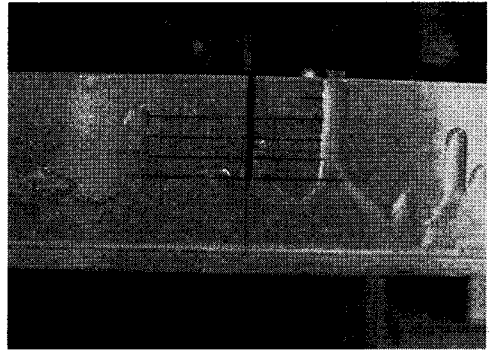


Fig. 7 Inflicted crack ($a/h=0.5$)

분리하면 다음과 같은 보의 방정식을 얻을 수 있다.

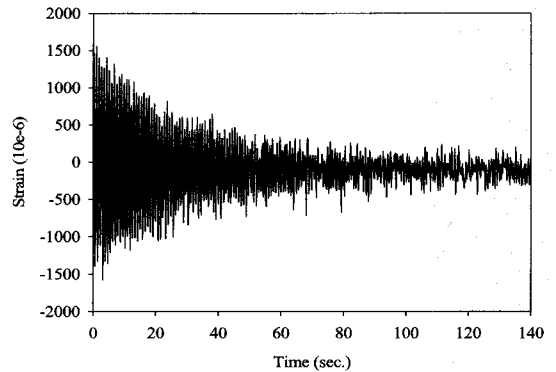
$$\frac{d^2}{dx^2} \left[EI_c \frac{d^2 W}{dx^2} \right] - \rho A \omega_c W = 0 \quad (8)$$

여기서, ω_c 는 균열 보의 고유진동수이다. 캔틸레버 보에 대한 식(8)의 해를 구하기 위해 갈레르킨법을 사용하였다.

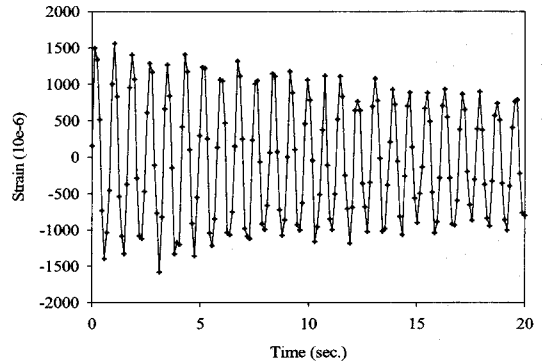
4.2 진동실험 방법

균열발생 및 진전에 따른 고유진동수의 변화를 살펴보기 위하여, Fig. 4의 알루미늄 캔틸레버 보에 인위적으로 균열을 발생시키며 자유진동실험을 수행하였다. 즉, 캔틸레버 보의 자유단에 초기변위를 가하여 자유진동을 발생시킨 후 분포형 광섬유 센서와 가속도계로부터 진동신호를 측정하였다. 이때 광섬유 센서로부터의 스트레인 데이터는 8.7 Hz의 속도로 취득하였으며, 자유진동신호의 감쇠경향을 파악하여 약 140초간 데이터를 취득하였으며, 따라서 주파수 분해능은 약 0.007 Hz이다. 한편 비교를 위하여 Fig.5에 보인 바와 같이 일반 가속도계를 자유단 근방에 설치하여 가속도를 함께 측정하였다.

균열깊이를 단계적으로 깊이 발생시키면서 자유진동실험을 수행하였으며, 캔틸레버 보 고정단에서 0.57 m 위치($c/L=0.1$)에 균열을 발생시켰다. 즉, Fig.7에 보인 바와 같이 균열 깊이와 보 높이의 비(a/h)가 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5가 되도록 순차적으로 균열깊이를 깊게 발생시켰으며, 각 손상 단계별로 3회의 자유진동실험을 수행하여 동적 스트레인을 측정하였다. 3회에 걸쳐 측정된 동적 스트레인 데이터를 이용하여 1차 고유진동수를 각각 계산하였고, 이를 평균하여 각 손상단계별 1차 고유진동수를 구하였다. Fig. 8에는 균열이 없는 상태에서 분포형 광



(a) From 0 sec. to 140 sec.



(b) From 0 sec. to 20 sec.

Fig. 8 Time history of FOS 3

섬유 센서(FOS 3)로부터 측정된 동적 스트레인의 시간이력 예를 나타내었고, Fig. 9에는 이의 푸리에 변환 결과를 나타내었다. 시간이력 신호는 자유진동의 형상을 보이고 있으며, 푸리에 변환 결과를 이용하여 1차 고유진동수를 쉽게 구할 수 있다. 한편, 실제 구조물에서도 하중을 많이 받는 부위에서 손상이 발생할 확률이 높기 때문에, 인위적 균열을 고정단

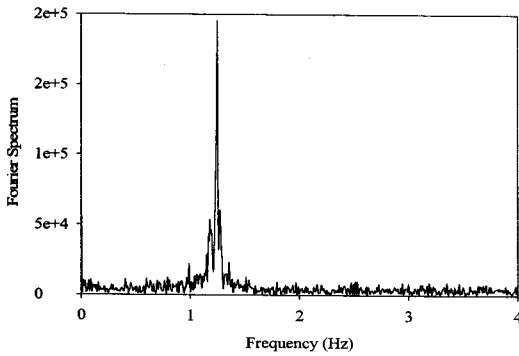


Fig. 9 Fourier amplitude spectrum of FOS 3

근처에서 발생시켰다.

4.3 손상실험 결과

분포형 광섬유 센서로부터 측정된 1차 고유진동수, 일반 가속도계로부터 측정된 결과, 식 (6) 및 (8)을 이용한 수치해석결과 및 엄밀해를 Table 3에 비교하였다. 여기서 해석치와 실험치의 오차는 일반 스트레인 게이지 설치를 위한 케이블의 중량 때문인 것으로 판단된다.

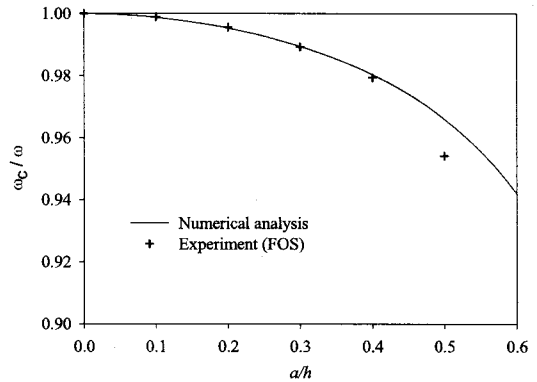
식 (6) 및 (8)을 이용하여 손상실험의 경우와 동일한 조건($c=0.57$ m, $c/L=0.1$)에서 균열깊이의 비 (a/h)를 0.02에서 0.6까지 변화시켜가며 1차 고유진동수를 계산하였으며, 그 결과를 분포형 광섬유센서와 일반 가속도계로 측정한 결과와 각각 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 여기서 ω 는 균열 전 고유진동수, ω_c 는 균열 보의 고유진동수이다.

손상의 정도가 심해질수록 고유진동수가 감소함을 알 수 있고, 분포형 광섬유 센서로부터 구한 1차 고유진동수와 일반 가속도계로부터 구한 고유진동수의 오차는 0.5%이하로서 합리적으로 진동신호를 예측한 것으로 판단된다. 또한 분포형 광섬유 센서로부터 구한 고유진동수의 결과와 수치해석으로부터 구한 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 분포형 광섬유 센서를 이용한 진동신호 기반의 상태 모니터링이 가능한 것으로 사료된다. 추후 DTSS의 기술 개발이 수반되어 데이터 취득 속도 및 정밀도를 향상시키면 고차의 고유진동수 측정도 가능하게 될 것이다.

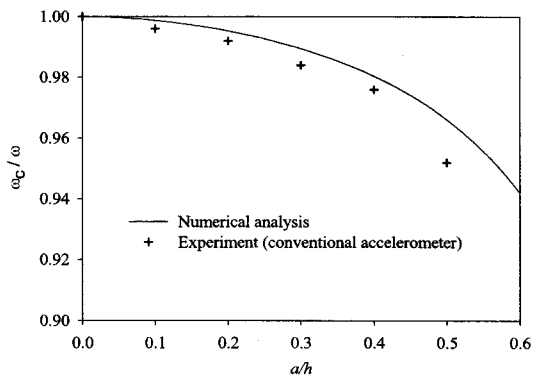
위에서 이용된 수치해석 방법을 이용하여 임의 균열위치와 균열깊이에 대한 고유진동수 계산이 가능하며, 이를 예측결과와 비교하면 균열의 위치와 깊

Table 3 First natural frequencies (Hz)

FOS	Conventional accelerometer	Numerical analysis	Exact
1.245	1.250	1.260	1.260



(a) Distributed fiber optic sensor



(b) Conventional accelerometer

Fig. 10 Variation of the first natural frequencies according to crack depth

이를 추정하는 것이 가능하다. 예를 들어 신경망기법⁽¹¹⁾을 이용한 손상추정이 가능한데, 임의의 다양한 균열위치와 균열깊이에 대한 수치해석을 수행하여 훈련패턴을 생성하고 이를 통해 신경망을 학습시킨 후, 분포형 광섬유 센서를 통해 측정된 고유진동수를 신경망에 입력시키면 균열의 위치와 깊이를 추정할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 풍력발전기의 블레이드 및 타워 등 장대구조물에 대한 기계적 부하 측정 및 모니터링을

수행할 때, 효과적이고 신뢰성 있는 측정을 위하여 분포형 광섬유 센서를 이용한 스트레인 측정에 대한 방법을 제안하고 이를 실험을 통하여 검증하였다.

분포형 광섬유 센서의 장점은 첫째, 게이지 길이가 길어서 대형 장대구조물의 스트레인 계측에 효과적으로 활용될 수 있고 둘째, 전자기장의 영향을 받지 않으며 셋째, 하나의 광케이블로 여러 지점의 스트레인 계측이 가능한 것이다. 이러한 분포형 광섬유 센서는 동적 스트레인 계측이 불가능하였으나 최근 개발된 분포형 광섬유 센서 분석기를 이용하여 제한된 범위이지만 동적 스트레인 계측을 수행하였다.

분포형 광섬유 센서를 알루미늄 캔틸레버 보에 부착한 후 정적실험을 수행하여 굽힘 모멘트를 계측하였으며, 이를 실제 작용 모멘트와의 비교를 통하여 그 적용성을 검증하였다. 한편, 캔틸레버 보에 손상을 가하며 자유진동실험을 수행하면서 분포형 광섬유 센서로부터 동적 스트레인을 계측하였고 이를 이용하여 고유진동수를 구하였다. 단계적으로 인위적 손상을 가하며 측정한 고유진동수가 손상정도가 심해지면서 감소함을 알 수 있었고, 가속도계를 통하여 구한 고유진동수 및 수치해석결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 분포형 광섬유 센서를 이용하여 풍력발전기의 블레이드 및 타워와 같은 장대구조물의 기계적 부하를 효과적으로 계측하고 나아가 상태 모니터링에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 결과물은 산업자원부의 출연금으로 수행한 풍력핵심기술연구센터사업과 산업기술연구회의 출연금으로 수행한 기본사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- (1) IEC 61400-13, 2001, Wind Turbine Generator Systems - Part 13: Measurement of Mechanical Loads, International Electrotechnical Commission.
- (2) Lee, I. J., Lee, J. M., Lee, S. B. and Hwang, Y. H., 2006, "On-line Strain Measurement of Rotating Blade Using Fiber Bragg Grating Sensors and Beam Coupler", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 11, pp. 1172~1178.
- (3) Kang, L. H., Kim, D. K., Rapp, S., Baier, H. and Han, J. H., 2006, "Dynamic Deformation Estimation of Structures Using Fiber Optic Strain Sensors", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 1279~1285.
- (4) Ohno, H., Naruse, H., Kihara, M. and Shimada, A., 2001, "Industrial Applications of the BOTDR Optical Fiber Strain Sensor", Optical Fiber Technology, Vol. 7, pp. 45~64.
- (5) ABS, 1995, Guide for Hull Condition Monitoring Systems, American Bureau of Shipping & Affiliated Companies.
- (6) Kluth, R., Watley, D., Farhadiroushan, M., Park, D. S., Lee, S. U., Kim, J. U. and Kim, Y. S., 2006, "Case Studies on Distributed Temperature and Strain Sensing (DTSS) by Using Optic Fibre", International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis.
- (7) Nam, Y. S., Yoo, N. S. and Lee, J. W., 2006, "Signal Monitoring and Calibration of Mechanical Loads on a Wind Turbine", Proceeding of the 2006 Spring Conference of Korea Wind Energy Association, Korea Wind Energy Association, pp. 287~293.
- (8) Yang, X. F., Swamidas, A. S. J. and Seshadri, R., 2001, "Crack Identification in Vibrating Beams Using the Energy Method", Journal of Sound and Vibration, Vol. 244, pp. 339~357.
- (9) Owolabi, G. M., Swamidas, A. S. J. and Seshadri, R., 2003, "Crack Detection in Beams Using Changes in Frequencies and Amplitudes of Frequency Response Functions", Journal of Sound and Vibration, Vol. 265, pp. 1~22.
- (10) Huh, Y. C., Kim, J. K. and Kim, B. H., 2006, "Crack Identification of Euler-Bernoulli Beam Using the Strain Energy Method", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, KSNVE 06A-11-02.
- (11) Haykin, S., 1994, Neural Networks - a Comprehensive Foundation, Macmillan, New York.