

풍력발전기 블레이드 변형 측정을 위한 액체금속 스트레인 게이지 개발

Development of Liquid Metal Strain Gauge for Measuring WT Blade's Deformation

박인겸¹, 서영호¹, 김병희^{1,✉}

In Kyum Park¹, Youngho Seo¹, and Byeong Hee Kim^{1,✉}

¹ 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 (Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University)
✉ Corresponding author: kbh@kangwon.ac.kr, Tel: +82-33-250-6374

Manuscript received: 2014.6.17 / Revised: 2015.2.4 / Accepted: 2015.2.13

In this paper, the embedding type novel liquid metal strain gauge was developed for measuring the deformation of wind turbine blades. In general, the conventional methods for the SHM have many disadvantages such as frequency distortion in FBG sensors, the low gauge factor and mechanical failures in strain gauges and extremely sophisticated filtering in AE sensors. However, the liquid metal filled in a pre-confined micro channel shows dramatic characteristics such as high sensitivity, flexibility and robustness to environment. To adopt such a high feasibility of the liquid metal in flexible sensor applications, the EGaln was introduced to make flexible liquid metal strain gauges for the SHM. A micro channeled flexible film fabricated by the several MEMS processes and the PDMS replication was filled with EGaln and wire-connected. Lots of experiments were conducted to investigate the performance of the developed strain gauges and verify the feasibility to the actual wind turbine blades health monitoring.

Key Words: EGaln (이게인), Wind turbine blade (풍력발전기 블레이드), Liquid metal (액체금속), Strain gauge (스트레인 게이지), Structural health monitoring (구조건강진단)

1. 서론

최근 풍력발전기가 점차 대형화됨에 따라 여러 가지 기술적 문제점들이 부각되고 있다. 특히 해상이나 극한지역에 설치되는 풍력발전기의 경우 접근성의 제약으로 인해 구성 부품 및 제어 시스템의 효과적 유지관리와 신뢰성을 확보하기 위한 실시간 모니터링 기술이나 구조건강진단 (Structural Health Monitoring, SHM) 기술을 적용할 필요성이 점차 증가하고 있다.

실시간 상태 모니터링은 풍력발전 중에 발전기의 상태를 상시 모니터링 하면서, 센서들로부터 측정되는 데이터를 지속적으로 처리하고, 분석된 결과를 통해 장기간에 걸쳐 누적되는 부품의 노후화나 갑작스런 이상발생을 감지할 수 있도록 한다.

특히 풍력발전기 블레이드의 경우 제작과정에서 전수시험이 불가능하고, 흡습, 진눈깨비, 자외선 조사, 부식, 피로, 돌풍이나 낙뢰 등에 의해 손상될 위험성이 높으므로 블레이드의 변형량을 포함한 정적, 동적 이상현상을 상시 모니터링하여

운전 중에 발생할 수 있는 위험에 대비할 필요가 있다.¹

이러한 풍력발전기 블레이드의 상태 모니터링을 위하여 주로 광섬유 격자센서(fiber Bragg grating sensor, FBG),^{2,4} 스트레인 게이지(strain gauge),⁵ AE(Acoustic Emission) 센서^{6,7} 등의 다양한 센서들이 사용되어 왔다.

FBG의 경우 코어에 주기적인 변조를 줌으로써 특정파장의 빛을 반사시키는 방식으로 삽입손실이 적고 파장선택도가 높으며 구조적 유연성이 높아 풍력발전기 점검, 유지, 안전성 진단에의 활용 가능성이 높아지고 있으나, 온도나 습도와 같은 주변환경 변화에 따른 주파수 왜곡 등의 문제가 남아 있어 아직까지는 상용화에는 어려움을 겪고 있다. 현장에서 가장 널리 사용되고 있는 스트레인 게이지는 가격면에서 유리하고 측정 데이터의 신뢰성과 환경변화에 안정성은 뛰어나지만 게이지율(gauge factor)과 최대 스트레인이 작아(<5%) 대변형의 측정이 어려우며, 재료특성 상 가혹한 환경 하에서 과도한 스트레인이나 반복하중을 받을 경우 파단이나 파괴가 발생하는 문제가 있다.

AE 센서의 경우에는 블레이드 재료 내에 설치하여 블레이드의 변형이나 파괴 중에 발생하는 탄성파를 측정하는 방식으로 설치의 용이성과 높은 감도를 가진 장점이 있으나, 유의미한 신호를 얻기 위해서는 풍력발전기 가동 중에 발생하는 다양한 배경소음을 모두 차단하거나 필터링(filtering)해야만 하는 한계가 있다.

한편, 최근 MEMS 기술의 급속한 발전에 따라 유연구조물(탄성기관) 내부에 형성된 마이크로 채널에 상온에서 액상을 유지하는 액체금속을 주입한 센서를 개발하고 이를 이용하여 입사빛의 회절에 따른 색상변화를 통해 변형량을 측정하거나,⁸ 햅틱로봇(haptic robots)이나 웨어러블기기(wearable devices)를 위한 압력, 촉각센서^{9,10}나 플렉서블 모바일 기기를 위한 유연 안테나^{11,12} 등을 제작하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 액체금속은 독성이 없어 인체에 무해하면서도 탄성기관에 캡슐화되어 유연구조물에 적용이 용이하고, 고체금속과는 달리 피로균열이 없으며, 주변환경에 대해 강인성을 가진 장점을 가진 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 기존의 풍력터빈 블레이드 변형 측정 방법의 단점을 극복하기 위하여 탄성기관 내에 액체금속을 캡슐화 한 새로운 방식의 액체금속 스트레인 게이지를 제안하고, MEMS 공정을 통해

Table 1 Characteristics of Eutectic Gallium Indium

Ingredient	Ga 75.5% + In 24.5%
Color and Form	Silver-colored, odorless
Melting point	15~16°C
Freezing point	-19°C
Density	6.25g/ml@25°C
Stability	Stable
Resistivity(ρ)	$29.4 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$

제작된 스트레인 게이지의 성능을 검증하고자 한다. 또한 간단한 응용시험을 통해 실제 풍력 발전기 블레이드에의 적용 가능성도 검토하였다.

2. 액체금속 스트레인 게이지의 설계

2.1 액체금속 재료의 선택

액체금속은 녹는점 이상에서 액체상태가 된 모든 금속을 지칭하지만, 협의의 의미로는 사용온도에서 액체상태인 금속을 말한다. 본 논문에서는 무독성이며 접착특성, 내구성, 전도성 및 열전도도가 우수하고 상대적으로 점성과 비중이 작은 갈륨-인듐합금(Gallium Indium Eutectic, EGaIn)을 게이지 제작을 위한 액체금속으로 선정하였다. Table 1은 본 연구에서 사용한 EGaIn의 물리적 성질을 보여 주고 있다.

EGaIn은 특정한 단면과 길이를 가진 채널 내로 주입할 경우에도 채널 내에서 안정된 금속결합을 유지하기 때문에 센서나 전극으로 사용하는데 매우 효과적인 것으로 알려져 있다.¹³

2.2 액체금속 스트레인 게이지의 설계

일반적으로 금속 스트레인 게이지는 목적에 따라 설계된 금속 호일 패턴(metallic foil pattern)을 유연 배면필름(backing) 위에 접합한 형태로 제작되며, 피측정 물체의 유효위치에 접착하여 변형이나 동적거동을 측정한다.

본 연구에서 개발한 액체금속 스트레인 게이지의 설계원리는 기존의 금속 스트레인 게이지와 동일하지만, 금속 호일 패턴 대신에 액체금속을 사전에 설계된 탄성필름 내의 마이크로 채널 내로 주입하여 스트레인을 측정할 수 있도록 하였으며, 필요에 따라서는 피측정 물체에 직접 패턴을 가공하고 액체금속을 주입, 캡슐화하여 스트레인을 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

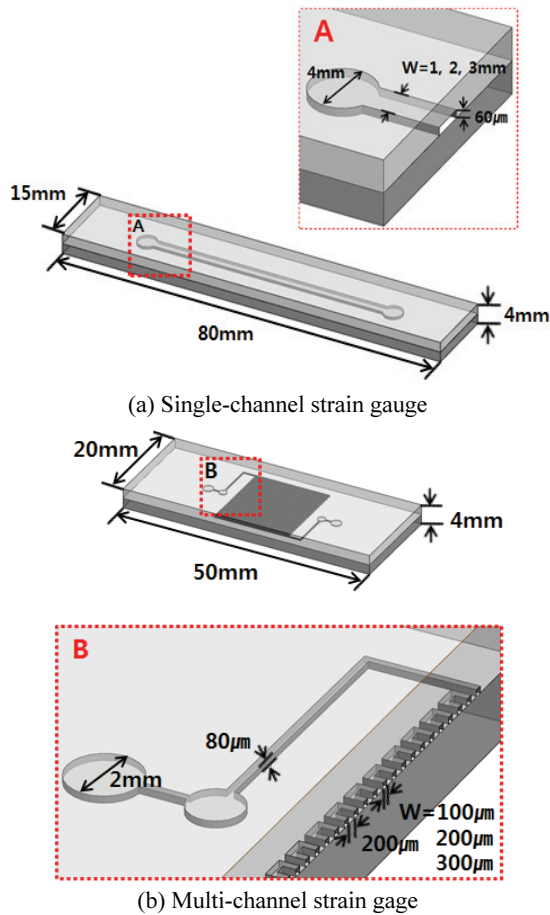


Fig. 1 Design of strain gauge channel

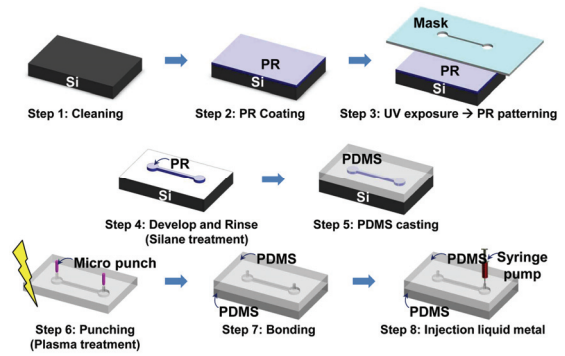
2.2.1 단일 채널 스트레인 게이지 설계

먼저 액체금속을 이용한 스트레인 게이지 개발의 타당성을 검증하기 위하여 단일 채널(single channel) 방식의 액체금속 스트레인 게이지를 설계하고 기초적인 특성시험을 시행하였다.

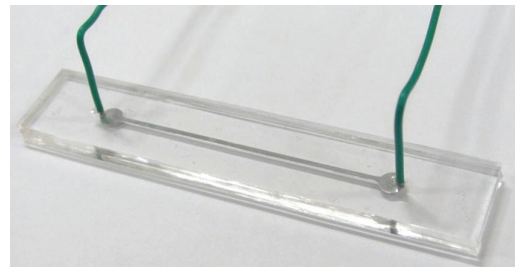
설계된 단일 채널 스트레인 게이지는 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 채널 깊이(h)를 $60\mu\text{m}$ 로 고정하였고, 채널 단면적에 따른 게이지율 및 선형성 변화 등을 검증하기 위하여 채널 폭(w)을 각각 1, 2, 3mm로 변화시켰으며, 채널 길이(L)는 50mm로 설계하였다. 시편의 크기는 $80 \times 15 \times 4\text{mm}$ 이다.

2.2.2 다중 채널 스트레인 게이지 설계

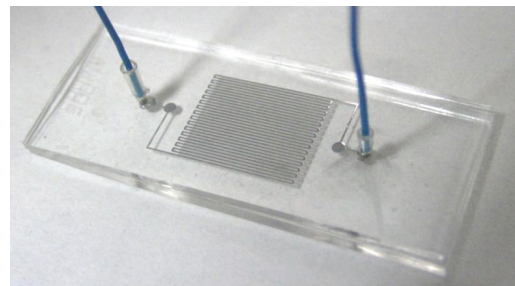
2차로 설계된 액체금속 스트레인 게이지는, Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 지그재그 방식의 사형구조(serpentine)를 가지며, 채널 깊이와 채널 간의 피



(a) Fabrication process



(b) Fabricated single-channel strain gauge



(c) Fabricated multi-channel strain gauge

Fig. 2 Fabrication of liquid metal strain gauge

치를 각각 $80\mu\text{m}$ 와 $200\mu\text{m}$ 로 고정하고, 주입되는 액체금속의 체적변화 오차를 최소화하면서 채널 단면적의 영향을 검증하기 위하여 채널 폭의 변화값을 각각 100, 200, $300\mu\text{m}$ 로 단일채널 방식보다 1/10 축소하여 설계하였다. 채널의 총 길이는 550mm로 설계하였으며 시편의 외관 크기는 $50 \times 20 \times 4\text{mm}$ 이다.

3. 액체금속 스트레인 게이지의 제작

액체금속 스트레인 게이지의 제작은 Fig. 2(a)와 같다. 먼저 포토리소그래피(photo lithography) 공정을 이용하여 양각 채널을 가진 실리콘(Si) 몰드를 제작하고, PDMS 복제공정을 통해 음각 채널을 가진 상판을 제작한 후, PDMS 하판 필름을 플라즈마

본딩하여 탄성기판을 완성하였다.

액체금속 주입을 위한 구멍은 PDMS 복제와 본딩 공정 사이에 마이크로 펀칭을 통해 가공되었으며, 제작된 채널 내에 액체금속을 실린지 펌프 (syringe pump)로 주입한 후 외부 전극을 연결하고 밀봉하여 액체금속 스트레인 게이지를 완성하였다. Fig. 2(b)와 (c)는 완성된 단일채널 스트레인 게이지와 다중 채널 스트레인 게이지의 사진을 보여주고 있다.

4. 액체금속 스트레인 게이지의 평가

4.1 측정장치 및 측정조건

일반적으로 스트레인 게이지는 자체 온도보상에도 불구하고 외부온도의 변화가 크면 측정오차의 원인이 되는 길보기 변형도(apparent strain)와 게이지율의 변화가 발생한다. 길보기 변형도는 재료의 외부에서 하중이 가해지지 않더라도 온도의 변화에 따라서 스트레인 게이지의 저항 변화로 인하여 생겨나는 변형도 출력값이며, 게이지율은 실제의 변형도와 스트레인 게이지의 저항 변화 사이의 비례상수로 온도의 함수이다.¹⁴

본 연구에서는 제작된 액체금속 스트레인 게이지의 성능평가를 위하여 Fig. 3과 같은 시험장치를 구성하고 온도변화에 따른 액체금속 스트레인 게이지의 성능변화를 관찰하였다.

스트레인 게이지의 양단을 변형기구의 양단지그에 단단히 고정시킨 후 LM가이드 조절손잡이(jog handle)와 우측면의 스케일을 이용하여 시편에 각각 5%, 10%, 15% 및 20%의 상대적인 대변형을 주었으며, LCR 미터(HIOKI사, 모델 3534-50)로 저항변화를 측정하였다. 또한 온도 변화에 따른 저항변화 특성을 고찰하기 위하여 오븐 및 저온냉장고 내에서 -40, -20, 20, 40, 60℃로 온도를 변화시키며 시편의 변형시험을 수행하였으며, 저항의 안정성이 확보되도록 변형 후 1분 뒤에 저항을 측정하였다. 실험결과의 신뢰성 확보를 위하여 인장 후 회복 방식으로 5회 반복 실험하고 측정된 평균과 표준편차를 계산하였다.

Fig. 4는 상온(20℃)에서 액체금속 스트레인 게이지를 5%, 10%, 15%, 20% (실제 변형길이: 단일채널 - 3mm, 6mm, 9mm, 12mm; 다중 채널 - 2mm, 4mm, 6mm, 8mm)로 변형시키면서 측정된 저항 R의 초기저항 (R₀) 대비 저항변화율[%ΔR = (R - R₀)/R₀ × 100]을 보여주고 있다.

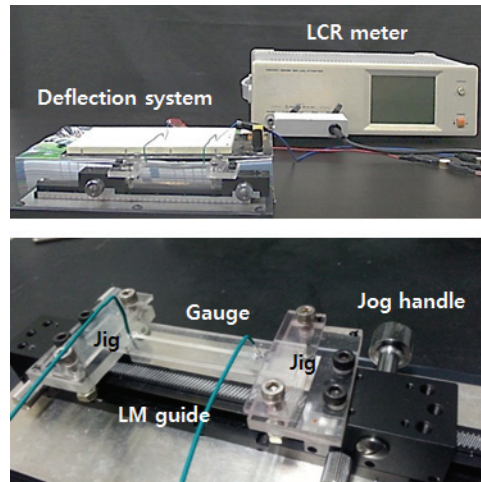
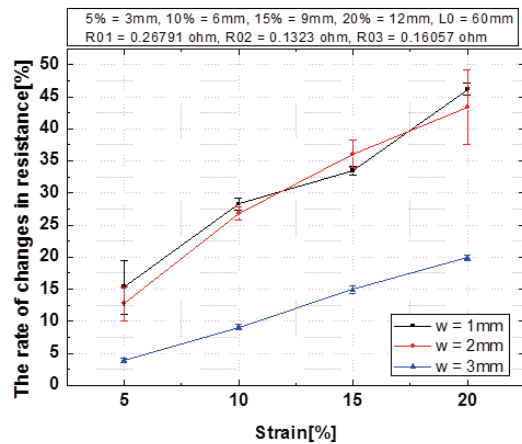
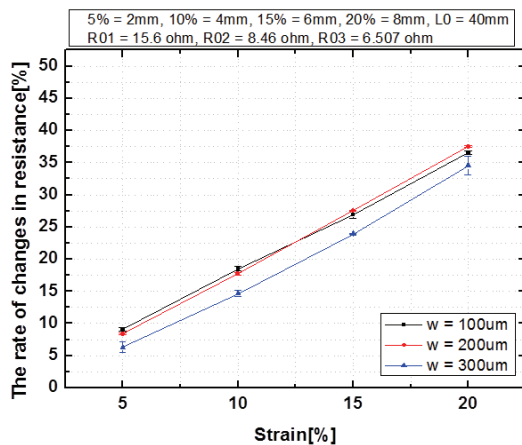


Fig. 3 Experimental setup



(a) Single-channel



(b) Multi-channel

Fig. 4 Rate of resistance change depend on strain

Table 2 Measured vs calculated resistance (single)

Channel Width (mm)	1	2	3
Calculated(Ω)	0.245	0.123	0.082
Measured(Ω)	0.268	0.154	0.088
Error(%)	8.6	25.2	7.4

Table 3 Measured vs calculated resistance (multi)

Channel Width (μm)	100	200	300
Calculated(Ω)	16.0	8.7	6.84
Measured(Ω)	15.5	8.5	6.51
Error(%)	3.1	2.3	4.8

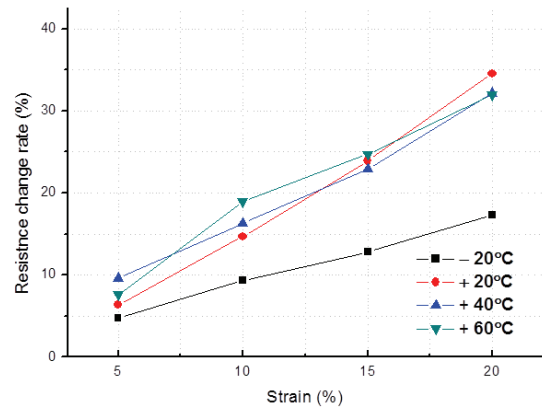
4.2 단일 채널 스트레인 게이지의 성능

Fig. 4(a)의 단일 채널의 결과를 통해 채널 폭이 클 수록($w=3$) 평균화 효과에 의하여 선형성은 우수하지만, 채널 폭이 작을 수록($w=1$) 게이지율이 커지는 경향을 나타나고 있음을 알 수 있다.

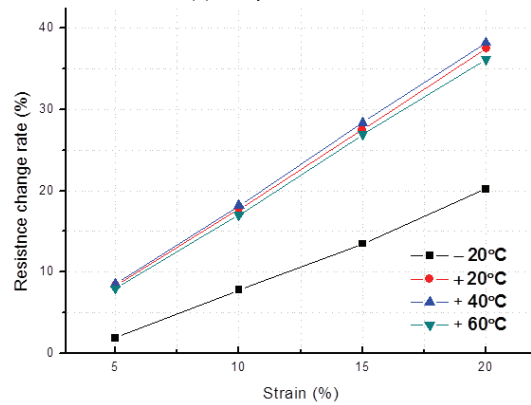
한편 Table 2은 상온에서(20°C) 통상적인 저항계 산식($R_0 = \rho \cdot L/w \cdot h$, ρ 값은 Table 1 참조)을 통해 계산된 저항값과 제작된 단일채널 시편의 실제 저항측정값을 비교하고 있다. 단일 채널 방식은 가공 및 성형정밀도와 주입된 액체금속의 양적오차의 영향이 큰 편이어서 스트레인 게이지 제조의 재현성에 한계가 있는 것으로 판단된다.

4.3 다중 채널 스트레인 게이지의 성능

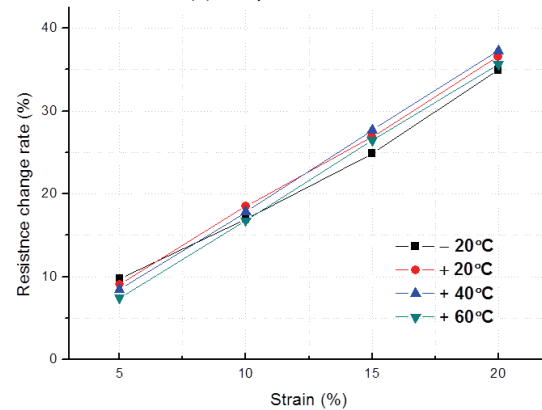
Fig. 4(b)에 의하면 채널 단면적을 충분히 줄인 다중 채널 스트레인 게이지의 경우 채널들의 평균화 효과에 의하여 선형성과 저항변화율이 안정되게 나타나고 있음을 알 수가 있다. 특히 Table 3의 초기저항값의 이론값과 측정값 사이의 비교 결과에서 알 수 있듯이 단일 채널 방식에 비하여 이론값과 측정값 간의 차이가 작고, 특히 $200\mu\text{m}$ 채널 폭을 가진 게이지의 경우에는 초기저항값의 이론값과 측정된 저항 값의 차이는 3% 이하로 상용 금속 스트레인 게이지의 제품별 평균적인 편차인 5~10% 보다 작게 나타나고 있으며, 측정편차나 게이지율도 가장 우수한 것으로 나타나고 있다. 이는 $100\mu\text{m}$ 에 비해서는 충분한 평균화 효과를 가지며 $300\mu\text{m}$ 에 비해서는 액체금속 충전효과나 채널형상 오차의 영향이 상대적으로 작은 것으로부터 기인한 것으로 판단되나, 보다 엄밀한 설계를 위해서는 채널 내 액체금속의 부피 차에 의한 영향에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.



(a) $300\mu\text{m}$ channel



(b) $200\mu\text{m}$ channel



(c) $100\mu\text{m}$ channel

Fig. 5 Rate of resistance change depend on temperature

4.4 주변온도 변화에 따른 특성

Fig. 5는 다중 채널 액체금속 스트레인 게이지의 주변온도 변화에 따른 저항변화율 변화를 비교하여 보여주고 있다. Fig. 5(a)와 (b)의 $300\mu\text{m}$ 및 $200\mu\text{m}$ 채널의 경우에는 20°C 이상의 온도에서는

성능을 유지하지만, -20℃의 저온에서는 게이지율이 저하되는 결과를 보여주고 있다. 이는 일반적으로 EGaln의 녹는점은 약 15℃로 알려져 있고 -20℃의 분위기에서는 EGaln이 고상으로 존재하므로 액체상태와는 다른 재료적 성질을 나타내는 것으로 해석할 수가 있다. 또한 채널 폭이 커질 경우 액체금속의 부피가 증가함에 따라 주변온도 변화에 따른 게이지율 변화가 커지는 것을 관찰할 수 있다.

한편, Fig. 5(c)의 100μm 채널의 경우 온도변화에 따른 게이지율의 변화가 거의 없으며 전체적으로 선형성을 잘 유지하고 있다. 특히, 물리적으로 고상인 -20℃ 환경에서도 대변형 시에 미세한 게이지율 저하가 나타나긴 하지만 전반적으로 액체상태의 게이지율과 유사한 크기와 경향을 보이고 있다. 이는 채널의 폭이 감소함에 따라 변형에 따른 저항변화 비율(일종의 감도)이 커지면서 온도변화와 상변화에 따른 효과가 감소하고 100μm 전후의 채널에서 액상과 고상 사이의 저항변화를 값이 유사한 경향이 보이기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 개발된 액체금속 스트레인 게이지를 극한 지역의 풍력발전기 블레이드에까지도 적용이 가능하게 하기 위해서는 -20℃ 이하의 저온영역에서 채널 폭과 변형량 변화에 액체금속 스트레인 게이지의 성능 평가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. Case Study - 풍력발전기 블레이드 적용

본 연구에서는 풍력발전기의 변형측정을 위해 개발한 액체금속 스트레인 게이지의 타당성을 검증하기 위하여, Fig. 6(a)와 같은 실제 소형 풍력발전기의 블레이드(재료: FRP)를 외팔보 구조로 설치하고, Fig. 6(b)의 유한요소해석 결과 가장 변형이 크게 발생하는 부분에 액체금속 스트레인 게이지(다중채널, 채널단면 8×100μm, 채널길이는 550mm)를 부착하여 임펄스 및 주파수 입력에 대한 간이동적응답시험을 수행하였다.

Fig. 7(a)는 1.5Hz의 진폭으로 10회 반복하중을 가하였을 경우의 액체금속 스트레인 게이지의 응답곡선이며, Fig. 7(b)는 임펄스 해머로 블레이드 표면에 충격을 가하였을 경우의 얻어진 응답곡선을 각각 보여주고 있다. 전반적으로 느린 주기적인 입력신호와 빠른 임펄스 충격입력을 모두 잘 추종하고 있는 것으로 보이며, 향후 주파수응답 특성 및 임펄스 응답특성 등의 추가 연구를 통해 액체

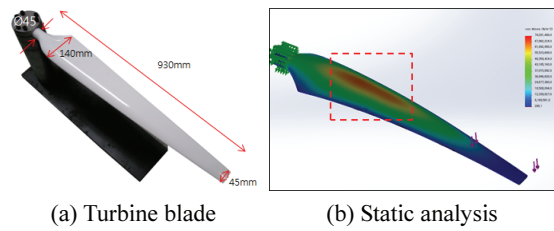
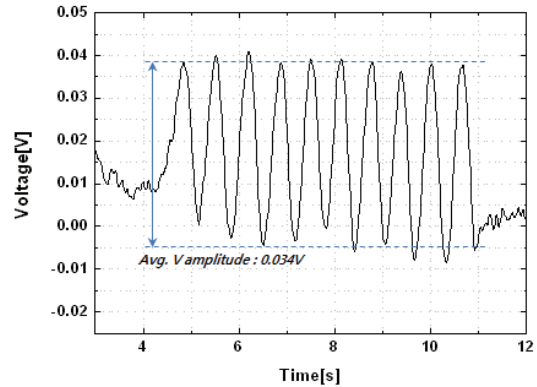
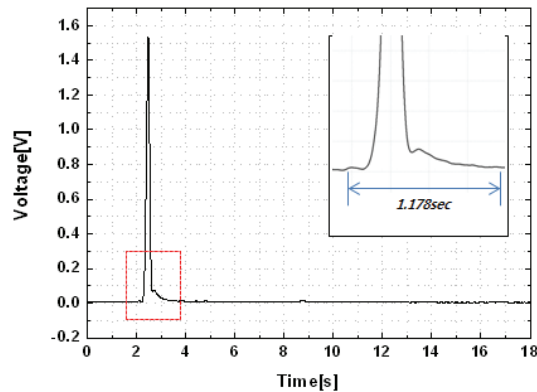


Fig. 6 Wind turbine blade for case study



(a) 1.5Hz vibration response



(b) Impulse response

Fig. 7 Simple dynamic response test results

금속 스트레인 게이지의 동적응답특성에 관한 연구를 추가로 진행할 예정이다.

6. 결론

본 연구에서는 풍력발전기의 변형측정을 위한 액체금속 스트레인 게이지를 개발하고 대변형 및 온도 변화에 따른 스트레인 측정 특성을 고찰하여 기존의 금속 스트레인 게이지의 대체 가능성과 풍

력발전기 블레이드(총길이 930mm)에의 적용 가능성을 검증하였으며, 포토 리소그래피와 PDMS 몰딩 및 플라즈마 본딩공정을 통해 제작된 탄성기관 내에 액체금속 EGaIn 주입하여 액체금속 스트레인 게이지를 안정적으로 제작할 수 있었다.

실험결과 채널 폭이 200 μ m 인 게이지가 선형성, 게이지율, 측정편차 면에서 모두 우수하였으나, 저온 고상 상태에서는 액상과 다른 게이지율을 보이고 있어, 환경에 대한 강인성에 있어서는 100 μ m 다중 사형 채널 방식이 우수한 특성이 있다. 또한 개발한 스트레인 게이지를 소형 풍력발전기 블레이드에 실제로 장착한 간이동특성 시험을 수행하여 현장에서의 활용의 가능성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No. 201340 30200240)입니다. 또한 부분적으로 강원대학교 2014년 전임교원 기본연구비지원사업(과제번호-120140241)의 지원을 받았습니다.

REFERENCES

1. Yang, B. and Sun, D., "Testing, Inspecting and Monitoring Technologies for Wind Turbine Blades: A Survey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, pp. 515-526, 2013.
2. Kim, K., Lee, J. M., and Hwang, Y., "Determination of Engineering Strain Distribution in a Rotor Blade with Fibre Bragg Grating Array and a Rotary Optic Coupler," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 46, No. 10, pp. 758-762, 2008.
3. Kim, S. W., Kim, E. H., Rim, M. S., Shrestha, P., and Lee, I., "Structural Performance Tests of Down Scaled Composite Wind Turbine Blade using Embedded Fiber Bragg Grating Sensors," *International Journal of Aeronautical & Space Science*, Vol. 12, No. 4, pp. 346-53, 2011.
4. Bang, H.-J., Kim, H.-I., and Lee, K.-S., "Measurement of Strain and Bending Deflection of a Wind Turbine Tower using Arrayed FBG Sensors," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 12, pp. 2121-2126, 2012.
5. Schubel, P., Crossley, R., Boateng, E., and Hutchinson, J., "Review of Structural Health and Cure Monitoring Techniques for Large Wind Turbine Blades," *Renewable Energy*, Vol. 51, pp. 113-123, 2013.
6. Blanch, M. J. and Dutton, A. G., "Acoustic Emission Monitoring of Field Tests of an Operating Wind Turbine," in *Damage Assessment of Structures V*, Dulieu-Barton, J. M., Brennan, M. J., Holford, K. M., and Worden, K.(Eds.), *Key Engineering Materials*, Vols. 245-246, pp. 475-482, 2003.
7. Rumsey, M. A. and Musial, W., "Application of Acoustic Emission Nondestructive Testing during Wind Turbine Blade Tests," *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 123, No. 4, pp. 270-270, 2001.
8. Mohammed, M. G. and Dickey, M. D., "Strain-Controlled Diffraction of Light from Stretchable Liquid Metal Micro-Components," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 193, pp. 246-250, 2013.
9. Okamura, A. M. and Cutkosky, M. R., "Feature Detection for Haptic Exploration with Robotic Fingers," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 20, No. 12, pp. 925-938, 2001.
10. Tajima, R., Kagami, S., Inaba, M., and Inoue, H., "Development of Soft and Distributed Tactile Sensors and the Application to a Humanoid Robot," *Advanced Robotics*, Vol. 16, No. 4, pp. 381-397, 2002.
11. Yang, L., Martin, L. J., Staiculescu, D., Wong, C., and Tentzeris, M. M., "Conformal Magnetic Composite RFID for Wearable RF and Bio-Monitoring Applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 56, No. 12, pp. 3223-3230, 2008.
12. Hayes, G. J., So, J.-H., Qusba, A., Dickey, M. D., and Lazzi, G., "Flexible Liquid Metal Alloy (egain) Microstrip Patch Antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 60, No. 5, pp. 2151-2156, 2012.
13. Dickey, M. D., Chiechi, R. C., Larsen, R. J., Weiss, E. J., Weitz, D. A., and Whitesides, G. M., "Eutectic Gallium-Indium (EGaIn): A Liquid Metal Alloy for the Formation of Stable Structures in Microchannels at Room Temperature," *Advanced Functional Materials*, Vol. 18, No. 7, pp. 1097-1104, 2008.

14. Daily, J. W. and Riley, W. F., "Hand-book on Experimental Mechanics," Prentice-Hall Englewood Cliffs, pp. 41-78, 1987.