

Brillouin(브릴루앙)산란을 이용한 분산 광섬유 센서를 사용하는 고온 측정 기술

Yoshihiro Kumagai^{*1}

Shinichiro Tezuka^{*1}

Satoshi Matsuura^{*1}

실리카 유리 광섬유는 용융점이 높아(1,000℃ 이상) 고온 센서로서 주목받고 있습니다. DTS(distributed temperature sensor – 분산 온도 센서)로 사용되는 Raman 산란 강도의 온도 의존성을 활용한 ROTDR(Raman optical time domain reflectometry – Raman 광학 시간 도메인 반사 측정) 기술이 이미 실용화되어 있습니다. 그러나 Raman 산란 강도 비율 측정을 기반으로 한 ROTDR은 고온에서 광섬유 손실 등의 문제로 인하여 장기간 300℃ 이상의 온도를 정확하게 측정하는 것이 어렵습니다. Brillouin 산란을 이용하는 다른 유형의 DTS는 입사광과 Brillouin 산란광 사이의 주파수 차이를 기반으로 온도를 결정하며, 감쇠에 덜 민감하므로 300℃ 이상의 온도를 측정에 유망한 방식입니다. 본 논문에서는 Brillouin 산란을 이용한 분산 광섬유 센서 고온 측정 기술에 대하여 설명하고, 이 기술의 실용화 가능성을 결정하기 위한 노력을 소개하고자 합니다.

개요

최 근 몇 년 동안 화학 공장, 철강과 업스트림 오일 및 천연가스 산업에서 고온 환경에서의 온도 측정에 대한 수요가 증가하고 있습니다. 광섬유는 고온에서 사용이 가능하며, 온도 분포를 측정할 수 있기 때문에 분산형 고온 센서로 사용하는 것에 대한 관심이 증가하고 있습니다. 그림 1은 광섬유 센서로 둘러싼 분산 온도 센서를 사용한 온도 모니터링의 예입니다. 이 경우 대상물(제철소의 철 제련로) 주변에 광섬유 센서를 배치하여 온도를 모니터링합니다. 이러한 유형의 온도 모니터링은 내열 벽돌의 남은 두께나 부식 정도를 예측하거나 핫 스팟을 감지하며 금속의 러너 유출(runner leaks)을 예측하는 등 유지 관리 솔루션을 제공할 수 있습니다.

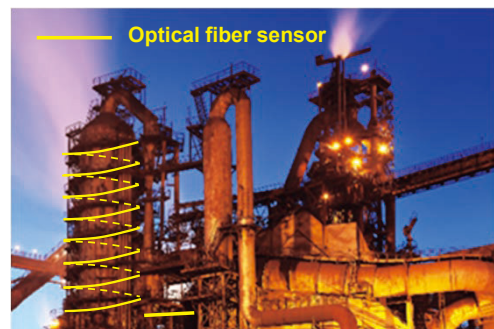


그림1 분산 광섬유 온도 센서를 사용한 온도 모니터링의 예

분산 광섬유 온도 센서

광섬유를 통해 전파되는 빛은 광섬유의 길이를 따라 미세한 정도로 산란합니다. 광산란에는 Rayleigh, Brillouin 및 Raman의 세 가지 주요한 유형이 있습니다. ROTDR(Raman optical time domain reflectometry – Raman 광학 시간 도메인 반사 측정)⁽¹⁾은 Raman

^{*1} Sensing Research & Development Department, Innovation Center, Marketing Headquarters

산란에 의해 생성된 두 종류 광(Stokes 및 anti-Stokes)의 강도 비율의 온도 의존성을 활용하여 온도를 측정합니다. 일반적으로 300°C를 초과하는 고온 환경에서는 시간이 경과함에 따라 광섬유의 감쇠의 변화가 일어나게 됩니다. 이러한 변화는 ROTDR에서 측정 오류로 표시되며, 이로 인하여 높은 정확도로 온도를 측정하는 것이 어려워집니다⁽²⁾. 한편, Brillouin 산란을 사용하는 경우, 분산 온도 센서는 BFS(Brillouin frequency shift - Brillouin 주파수 변이)를 통해 온도를 계산합니다. BFS는 들어오는 광과 Brillouin 산란광 사이의 주파수 차이를 의미합니다. 감쇠의 변화는 측정에 영향을 미치지 않기 때문에 300°C 이상의 온도를 측정할 수 있게 됩니다. 실제로 몇몇 연구 기관에서는 최근에 Brillouin 산란을 이용한 분산형 고온 센서에 대한 실험 결과를 보고하고 있습니다⁽³⁾⁽⁴⁾.

고온 측정 기술의 연구 및 개발

개요

이러한 배경을 기초로 ROTDR을 통해 달성할 수 없는 고온 범위에 대한 분산 온도 센서를 실현하기 위해, 우리는 Brillouin 산란광의 온도 의존성을 활용한 광섬유 온도 센서의 적용 가능성을 조사해 왔습니다. 이 논문에서는 고온 환경에 노출된 광섬유의 BFS 거동에 대한 실험 평가를 제시하고, Brillouin 산란광을 활용한 분산 광섬유 온도 센서의 성능과 그 성능에 영향을 미치는 요소를 정확하게 하며, 이 기술의 실용화를 위해 해결해야 할 문제를 확인하는데 기울이고 있는 노력에 대하여 설명하려 합니다.

BOCDA(Brillouin optical correlation domain analysis - Brillouin 광학 상관 도메인 분석)

우리는 BOCDA(Brillouin optical correlation domain analysis - Brillouin 광학 상관 도메인 분석) 기반 측정 시스템을 개발하였습니다⁽⁵⁾. BOCDA는 빠른 측정 속도, 높은 공간 해상도 및 무작위 접근 능력⁽⁶⁾ 등으로 특징지을 수 있습니다. 우리는 여기서 500m 거리 범위, 30mm의 공간 해상도, ± 1 MHz(온도로 환산할 경우 약 $\pm 1^\circ\text{C}$)의 정확도 및 70 Hz의 샘플링 속도를 가진 BOCDA 측정 시스템을 사용하였습니다(그림 2).



그림2 이 연구에서 사용된 BOCDA 측정 시스템

BOCDA 측정 원리

이 BOCDA에서 사용된 Brillouin 산란은 광섬유의 음파에 의한 산란입니다. 유도된 Brillouin 산란은 광섬유의 한쪽 끝에서 들어오는 펌프의 광과 반대쪽의 다른 쪽 끝에서 반대되는 프로브의 광 사이의 상호 작용으로 인해 산란합니다. BOCDA에서는 유도된 Brillouin 산란은 펌프 및 프로브 광의 주파수 변조를 통해 임의의 위치에서만 생성됩니다. 프로브 광의 주파수는 펌프 광의 주파수보다 약 11GHz 더 낮게 설정되고, Brillouin 산란 스펙트럼은 프로브 및 펌프 광의 주파수 차이와 산란광의 전력을 측정하여 구할 수 있습니다. BFS는 Brillouin 산란 스펙트럼이 최고점에 있을 때의 주파수 차이를 의미합니다. BFS는 광섬유에 가해지는 온도와 변형에 따라 변화하기 때문에 측정된 BFS에서 온도와 변형 값을 추출할 수 있습니다. BFS와 온도는 일반적으로 선형 관계로 간주되어 왔으나, 최근 연구⁽⁷⁾에서는 500°C를 초과하는 온도에서 비선형성이 나타난 것으로 보고되었습니다. 이는 광섬유 재료의 온도에 대한 영률(Young's modulus)의 비선형 의존성에 기인한 것으로 판단됩니다.

실험 평가

고온에서 광섬유 온도 센서를 사용할 수 있을 지 확인하기 위해 고온 환경에서 BFS의 온도 응답성과 BFS의 온도 의존성을 평가하기 위한 실험 작업을 수행했습니다.

평가 시스템

그림 3에서 BFS 동작 평가 시스템을 확인할 수 있습니다. 실험실에서는 전기로를 사용하여 고온 환경을 구성하였고, Ge(게르마늄)을 투여한 합성 용합 실리카 싱글 모드 파이버(SMF-28e+; Corning Inc.)를 UV 경화 수지로 코팅한 후 FUT(fiber under test - 테스트용 시료)로 사용하였습니다. 코팅의 영향을 줄이기 위해 실험을 시작하기 전 FUT를 600°C의 온도에 1시간 동안 노출시켜 완전히 태워 사용하였습니다. FUT의 길이는 약 21m이고 전기로 내에서 여러 번 감을 수 있도록 FUT의 프로브 광 끝으로부터 7.8-12.5m 부분은 고정하지 않은 상태로 남겨두었습니다.

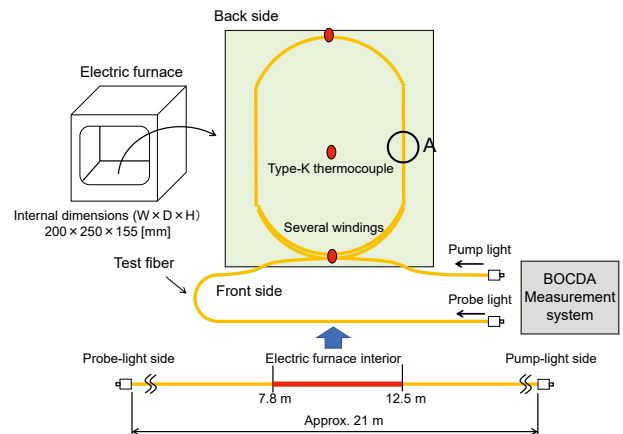


그림3 평가 시스템

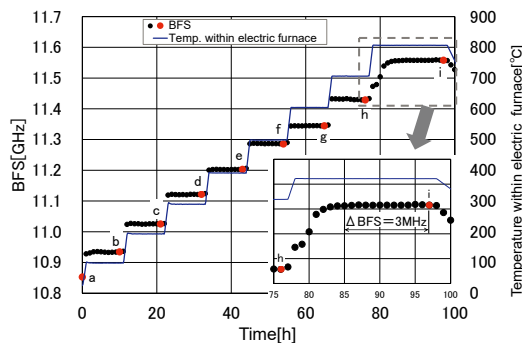
측정 결과

50mm 공간 해상도, 50Hz/포인트의 샘플링 속도, 6~14m의 측정 구간에서 10mm의 간격을 사용하여 측정하였습니다. 온도를 실온으로부터 100℃ 간격으로 800℃까지 가열한 후 다시 100℃간격으로 실온까지 냉각하는 방식으로 전기로를 프로그래밍하여 실험 작업을 수행하였습니다. 가열 작업의 경우 각 100℃ 간격으로 1시간 동안 수행한 한편, 각 100℃ 간격의 냉각은 4시간에 걸쳐 수행하였습니다(100℃로부터 실온까지 냉각하는 경우 제외). 800℃의 경우를 제외하고, 일단 타깃 온도에 도달하면, 그 상태를 10시간 동안 유지하였고, 800℃의 경우 20시간 동안 유지하였습니다.

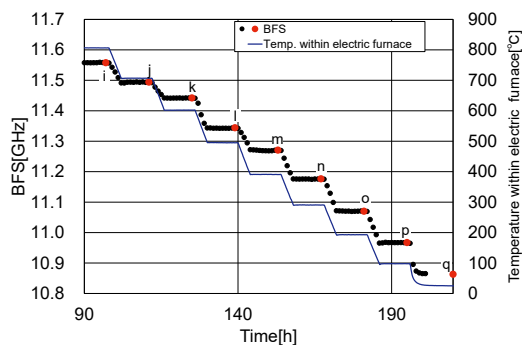
평가 결과

a) BFS 온도 응답성

그림 4는 BFS 분포 측정 작업 중 프로브 광 끝 측으로부터 10m 지점(그림 3의 A 부근)에서 획득한 BFS 온도응답성입니다. 그림 4의 적색 점(a-q)는 그림 5의 온도 의존성을 보여줍니다. BFS는 상승 및 하락 중인 온도와 함께 변화하였고, BFS는 800℃까지 온도가 상승한 직후를 제외하고 각 온도에서 시료를 유지하는 동안 수 MHz(온도로 표시하는 경우 수 ℃)만큼 변동이 있었습니다. 그림 4(a)의 점선을 통해 800℃까지 온도가 상승하는 동안 시간에 따른 BFS의 단계별 변화를 확인할 수 있습니다. 이는 광섬유 제조 시 잔류하는 내부 응력이 고온 환경하에서 이완되는 현상으로 인하여 발생할 수 있습니다. 별도의 평가 실험에서 우리는 800℃ 미만에서도 유사한 단계별 변화를 확인할 수 있었지만, 해당 변화가 발생하는 데 걸리는 시간은 800℃까지 온도가 상승하는 동안 관찰된 시간보다 더 길었습니다.



(a) At temperature increase from room temperature to 800℃



(b) At temperature decrease from 800℃ to room temperature

그림4 프로브 광 측으로부터 약 10m 지점에서의
BFS 온도 응답성

b) BFS 온도 의존성

그림 5는 그림 4의 적색 점을 기반으로 생성된 BFS 온도 의존성을 보여줍니다. BFS 온도 의존성에서 히스테리시스가 나타났으며, 동일한 온도 환경에서도 온도 상승과 하락 사이에 차이가 있다는 사실을 관찰할 수 있었습니다. 섹션 3.3에서 언급한 대로 이는 BFS가 광섬유에 가해지는 변형에 민감하게 반응하며, 따라서 800℃에서 남아 있는 잔류 응력의 완화와 관련된 내부 응력의 변화를 감지하기 때문일 것입니다. 온도를 여러 번 가열 및 냉각시킬 때, 두 번째 및 그 이후의 온도 상승 및 하락 중 BFS는 그림 5의 온도 감소 동안의 BFS와 거의 동일하였으며(수 MHz 이내), 이로써 우수한 재현성을 확인할 수 있었습니다.

첫 번째 온도 상승 중 BFS와 온도 사이의 관계는 선형적이지 않았지만, 다음과 같이 계산할 수 있습니다.

$$f = -510 T^2 + 1300 \times 10^3 T + 10.840 \quad (1)$$

이때, f 는 BFS(GHz)이고, T 는 온도(℃)입니다. BFS는 T 에 대하여 2차 의존성을 가지고, 이 식의 역함수는 BFS를 온도로 변환하는데 사용하는 보정 곡선입니다.

위 내용은 평가 실험의 한 가지 예입니다. 또한 더 긴 기간 동안 BFS 동작을 평가하기 위한 실험을 시작하였으며, 이에 대한 결과는 조만간 발표할 예정입니다.

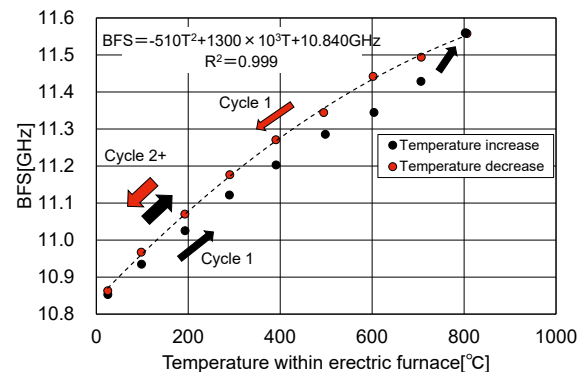


그림5 프로브 광 측 끝으로부터 약 10m 지점에서의
BFS 온도 의존성

평가 결과 요약

BFS는 온도에 대하여 2차 의존성을 가지고 있고, 매우 안정적이었습니다. 보정 곡선을 사용하여 BFS를 온도로 변환할 수 있다는 사실을 확인할 수 있었습니다. 광섬유의 내부 응력 차이로 인하여 동일한 온도 환경에서도 BFS에 차이가 발생할 수 있지만, 남아 있는 잔류 응력의 완화 후에는 BFS의 재현성이 양호하였습니다.

앞으로 해야 할 과제

이 기술은 아직 연구 개발 단계에 있지만 광섬유를 고온 센서로 사용하는 데 있어 그 잠재적 가능성을 인정받기 시작하였습니다. 실제로 응용하기 위해서는 아직 해결해야 할 많은 문제가 있기 때문에 우리는 다음과 같은 노력을 통해 이를 해결하고자 합니다.

1. 장기간 고온 노출 후 신뢰성 검증
2. 고온 이외의 환경 인자 하에서의 성능 검증(예: 진동, 고온, 부식)
3. 광섬유에 가해지는 변형으로 인한 온도 측정에 대한 영향력 검증
4. 컨셉 증명 실험을 통한 값 검증
5. 측정 대상물에 센서를 설치하고 유지하는 방법의 확립
6. 내열 코팅된 광섬유 가격 인하 모색

고온 센서로서 광섬유를 실용화하는 과정에서 이러한 노력을 기울이고, 이에 대한 다양한 측면을 고려하여 문제를 해결하는 것이 중요합니다.

내열 코팅 섬유

광섬유는 일반적으로 외경이 약 $125\mu\text{m}$ 정도인 얇은 석영 유리로 만들어져 있기 때문에 쉽게 파손될 수 있습니다. 이러한 이유로 인하여 광섬유에는 일반적으로 보호용 수지를 코팅합니다. 그러나 수지 코팅은 350°C 를 초과하는 온도에서 분해되기 때문에 고온 환경에서 적용하기에 적합하지 않습니다. 고온 측정에는 금속 코팅된 광섬유가 상용화돼 있습니다. 그러나 이는 특수한 섬유로 분류되어 높은 비용이 필요합니다. 더구나 금속과 유리 사이의 열팽창 계수의 차이로 인하여 마이크로 밴드가 발생하기 때문에 0.5dB/km 인 표준 광섬유와 비교하였을 때 10dB/km 의 손실이 발생합니다. 표 1에서는 다양한 상업용 코팅을 적용한 광섬유의 내열 온도 차를 확인할 수 있습니다.

표 1 코팅 별 내열 온도의 차

코팅의 종류	내열 온도	설명
UV 경화 수지	최대 85°C	일반용, 경제적
폴리아미드 수지	최대 300°C	일반용
알루미늄	최대 400°C	높은 전달 손실
구리	최대 500°C	높은 전달 손실
금	최대 700°C	높은 전달 손실, 비경제적

결론

우리는 Brillouin 산란광을 이용한 광섬유 센서의 고온 측정 기술을 제시하였고, 그 사용 가능성을 입증하기 위해 기울인 노력에 대하여 설명하였습니다. 이러한 기술은 광섬유를 고온 센서로 활용하는 관점에서 매우 혁신적입니다. 그러나 광섬유 제작에 사용되는 유리는 고온에서 고유한 특성을 가지고, 구조적 완화⁸⁾ 및 물성의 변화와 같은 특징을 가지고 있습니다. 따라서 장시간 사용 중 센서의 신뢰성을 평가하는 것이 필요합니다. 우리는 Brillouin 광 산란을 통한 분산 광섬유 온도 센서의 성능과 이에 영향을 미치는 요인을 명확히 분석하는 목표를 달성하기 위해 또한 이를 실제로 적용하기 위해 지속적으로 노력할 것입니다.

REFERENCES

- (1) J. P. Dakin, D. J. Pratt, et al., "Distributed Optical Fibre Raman Temperature Sensor Using a Semiconductor Light Source and Detector," *Electron. Lett.*, Vol. 21, No. 13, 1985, pp. 569-570
- (2) I. Laarossi, M. Á. Quintela, et al., "Comparative Experimental Study of a High-Temperature Raman-Based Distributed Optical Fiber Sensor with Different Special Fibers," *Sensors*, Vol. 19, No. 3, 2019, pp. 574-587
- (3) P. Xu, Y. Dong, et al., "1200°C High-temperature Distributed Optical Fiber Sensing Using Brillouin Optical Time Domain Analysis," *Appl. Opt.*, Vol. 55, No. 21, 2016, pp. 5471-5478
- (4) Y. Bao, G. Chen, "High-temperature Measurement with Brillouin Optical Time Domain Analysis of an Annealed Fused-silica single-mode Fiber," *Opt. Lett.*, Vol. 41, No. 14, 2016, pp. 3177-3180
- (5) K. Hotate, T. Hasegawa, "Measurement of Brillouin Gain Spectrum Distribution Along an Optical Fiber Using a Correlation-based Technique: Proposal, Experiment and Simulation," *IEICE Trans. Electron.*, E83-C, 2000, pp. 405-412
- (6) Y. Kumagai, S. Matsuura, et al., "Enhancement of BOCDA System for Aircraft Health Monitoring," in *Proc. IEEE SICE Annu. Conf.*, 20 08, p p. 218 4 -2187
- (7) Y. Li, F. Zhang, et al., "Wide-range Temperature Dependence of Brillouin Shift in a Dispersion-shifted Fiber and Its Annealing Effect," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 21, No. 7, 2003, pp. 1663-1667
- (8) K. Saito, "What is 'virtual temperature'?", *NEW GLASS*, Vol. 27, No. 104, 2012, pp. 49-52 (in Japanese)

* All company names, organization names, product names, service names and logos that appear in this paper are either trademarks or registered trademarks of Yokogawa Electric Corporation or their respective holders.