

배관 표면 온도 측정을 기반으로 한 배관 내부의 침전물 두께와 분포 모니터링

Shumpei Ito^{*1}

외부 표면 온도를 측정하여 내부의 침전물 두께를 추정하는 방법을 개발하였습니다. 배관 내부에서 흐르는 유체의 온도가 배관 외부의 주변 온도보다 높고, 이때 내부에 침전물이 생기면 배관의 표면 온도가 내려가게 됩니다. 이는 내부의 침전물이 내부 유체에서 배관 표면으로 열이 전달되는 것을 방해하기 때문입니다. 따라서 배관의 표면 온도를 측정한 후 내부 유체로부터 외부의 주변에 있는 유체로 전달되는 열에 대한 열방정식을 풀어 침전물의 두께를 추정할 수 있습니다. 또한 배관 표면의 다중 지점에서 온도를 측정하면서 측정 지점의 침전물 형상과 두께를 추정할 수 있는 알고리즘도 개발하였습니다. 이 알고리즘을 보여줄 수 있는 두 가지 실험을 제시하였습니다. 첫 번째 실험에서는 온도 측정을 통해 모의 침전물의 다양한 모양과 두께를 추정하였습니다. 두 번째 실험에서는 테스트용 배관에 왁스 침전물을 생성시킨 후 온도를 측정하여 왁스의 두께를 추정하였습니다

개요

배관 내의 침전물은 유량 감소 및 배관 막힘 같은 운전상의 문제를 발생시키는 것으로 알려져 있습니다. 예를 들어, 석유 및 가스 사업 분야에서 왁스, Asphaltenes 및 Hydrates와 같은 침전물은 중요한 문제로 인식되고 있습니다. 배관 내부에서의 침전물 생성 과정은 배관 내 유체의 조성, 온도, 압력, 유속과 같이 영향을 미치는 다양한 요인으로 인하여 사전 예측이 어렵습니다. 또한 침전물은 종종 균일하지 않은 형태로 발생하며, 배관의 하단이나 측면에 더 두껍게 침전될 수 있습니다. 따라서 파이프라인 운전 중 이러한 침전물을 모니터링하는 것이 중요합니다.

배관 내부 침전물의 형태를 추정하는 데 사용할 수 있는 몇 가지 기술이 알려져 있습니다⁽¹⁾⁻⁽³⁾. 그러나 파이프라인은 종종 실제 침전물의 두께를 측정하지 않은 채 사용되곤 하는데, 이는 낮은 비용으로 침전물의 두께 및 형상을 실시간으로 추정하는 데 기술적 한계가 있기 때문입니다.

이에 저희는 배관의 표면 온도를 측정하여 침전물의 형상 및 두께를 추정할 수 있는 기술을 개발하였습니다. 배관의 외부 측면에만 온도 센서를 설치하는 이 기술을 사용하는 경우, 실시간으로 침전물의 형상과 두께를 비침습적으로 추정할 수 있습니다. 이 기술은 침전물의 적층 상태를 연속적으로 모니터링할 수 있는 방법을 제공하여 침전물의 제거 시기를 예측하거나 배관이 막히는 것을 방지하여 파이프라인을 최적의 상태로 운용할 수 있습니다.

온도 측정 기반 침전물 추정 원리

이 섹션에서는 이 기술의 원리에 대하여 설명합니다. 배관 내의 유체 온도가 배관 주변의 온도보다 높은 경우, 배관 내부에는 침전물이 쌓인 것으로 추정됩니다. 이 경우 침전물의 내부 및 외부 사이에 온도 차이가 발생하게 되고, 배관 내 유체로부터 배관 외부로 열이 전달되는 것이 방해받아 배관의 표면 온도가 낮아지게 됩니다. 이 기술은 이러한 침전물로 인한 배관 표면 온도 변화 현상을 활용하여, 배관 표면에 설치된 온도 센서로 측정한 온도 정보를 통해 비침습적으로 배관 내 침전물의 두께를 추정합니다. 배관 내부와 외부 사이에 존재하는 온도의 차이에 의존하는 이 기술은 배관 내 유체의 온도와 주변 온도 사이에 차이가 없는 경우 사용할 수 없습니다.

^{*1} Planning and Administration Department, Innovation Center, Marketing Headquarters

두께가 균일한 침전물

이 섹션에서는 침전물의 두께가 균일하다고 가정할 때 배관의 표면 온도를 사용하여 배관 내부의 침전물 두께를 추정하는 일반적인 방법을 제시합니다. 임의의 두 점 사이에서 열 유속의 경우, ‘열 유량 = 온도 차이 / 두 지점 사이의 열 저항’으로 표시할 수 있습니다.⁽⁴⁾ 이 관계에서 배관 내부의 유체로부터 배관의 측방향 길이 L 영역에서 배관 외부로 흐르는 열의 열 유량 Q는 다음과 같습니다.

$$Q = (T_i - T_o) / \left\{ \frac{1}{2\pi r_{pi} L h_i} + \frac{\ln(r_{pi} / (r_{pi} - \delta))}{2\pi L k_d} + \frac{\ln(r_{po} / r_{pi})}{2\pi L k_p} + \frac{1}{2\pi r_{po} L h_o} \right\} \quad (1)$$

T_i : 배관 내 유체 온도

T_o : 배관 주변 온도

h_i : 배관 내부의 열전달 계수

r_{pi} : 배관 내부의 반지름

h_o : 배관 외부의 열전달 계수

r_{po} : 배관 외부의 반지름

k_d : 침전물의 열 전도율

δ : 침전물의 두께

k_p : 배관의 열 전도율

배관 내부로부터 표면으로 흐르는 열의 흐름을 고려할 때, 열 유량 Q는 다음과 같이 표시할 수 있습니다.

$$Q = (T_i - T_p) / \left\{ \frac{1}{2\pi r_{pi} L h_i} + \frac{\ln(r_{pi} / (r_{pi} - \delta))}{2\pi L k_d} + \frac{\ln(r_{po} / r_{pi})}{2\pi L k_p} \right\} \quad (2)$$

T_p : 배관의 표면 온도

식 (1)과 (2)에서 배관 표면 온도 T_p , 배관 내 유체 온도 T_i , 그리고 배관의 주변 온도 T_o 를 사용하여 침전물 두께 δ 를 다음과 같이 유도할 수 있습니다

$$\delta = r_{pi} - r_{pi} \exp \left\{ -k_d \left(\frac{1}{r_{po} h_o} \frac{T_i - T_p}{T_p - T_o} - \frac{1}{r_{pi} h_i} - \frac{\ln(r_{po} / r_{pi})}{k_p} \right) \right\} \quad (3)$$

위의 예는 단열되지 않은 배관의 경우입니다. 단열된 배관의 경우, 온도 센서가 단열재 내부에 설치된 경우와 유사한 열 유량 방정식을 계산하여 침전물의 두께를 추정할 수 있습니다.

두께가 균일하지 않은 침전물

식 (3)은 두께가 균일한 침전물을 가정하고 있기 때문에 균일하지 않게 분포된 침전물에 대해서는 적용할 수 없습니다. 따라서 우리는 두께가 균일하지 않은 침전물도 추정할 수 있는 알고리즘을 개발하였습니다. 이 알고리즘은 그림 1에서 확인할 수 있는 바와 같이 다중 지점에서 측정된 배관의 표면 온도를 사용하여 이러한 침전물의

형상을 추정할 수 있습니다. 우리는 이 알고리즘을 다양한 형태의 데모용 침전물에 대한 시뮬레이션에 적용하여 이러한 알고리즘이 침전물의 형상과 두께를 추정할 수 있는 지 확인하였습니다.

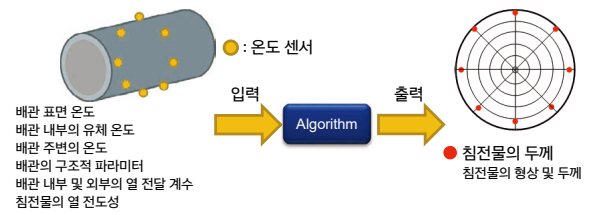


그림1 침전물 형상 추정 알고리즘

데모용 실험

우리는 개발한 알고리즘을 사용하여 실제 배관에 발생하는 침전물의 형상과 시간에 따른 변화를 추정할 수 있는지 확인하기 위해 두 가지 데모 실험을 진행하였습니다.

모의 침전물 층을 사용한 형상 추정 실험

우리는 개발한 알고리즘이 침전물의 형상을 올바르게 추정할 수 있는지 확인하기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였습니다. 100A 염화 비닐 라인 배관의 염화 비닐을 침전물로 가정하고, 배관에서 100mm 구간을 두 개 잘라내어 염화 비닐 층을 그림 2와 같은 다양한 모양으로 가공하였습니다. 그림 2(a)의 경우 배관의 위가 0° 일 때 시계 방향으로 180도인 지점에서 염화 비닐 층을 두겹게 형성시켰고 (아래쪽), 이와 마찬가지로 그림 2(b)의 경우 배관의 90도 및 270도 방향 (우 및 좌)에서 염화 비닐 층을 두겹게 형성시켰습니다. 배관이 단열된 것으로 가정하기 위해, 그림 2(a)와 2(b)의 배관을 단열재를 사용하여 감쌌고, 배관의 둘레면 아래 부분에 온도 센서를 설치하였습니다. 두 대의 순환 장치를 사용하여 배관 내부에 40°C의 따뜻한 물을 순환시켰고, 배관 외부에는 0°C의 차가운 물을 순환시키면서 배관 둘레면의 온도 분포를 측정하였습니다. 그림 2(a)의 배관에는 8개의 온도 센서를 설치하였고, 복잡한 형태의 염화 비닐 층이 있는 그림 2(b) 배관에는 16개의 온도 센서를 설치했습니다. 우리가 개발한 알고리즘을 측정된 온도 분포에 적용하여 염화 비닐 층의 형상을 추정하였습니다.

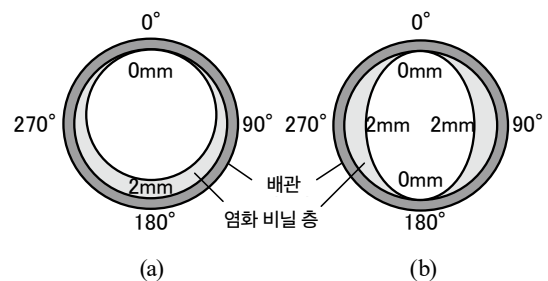
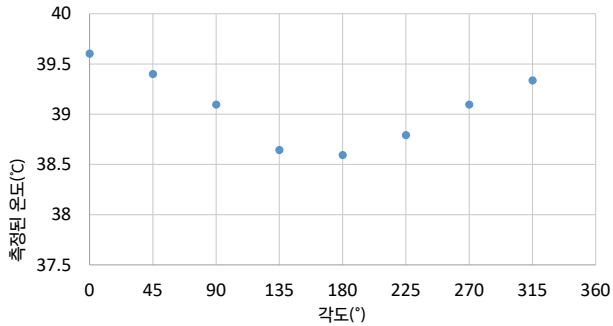


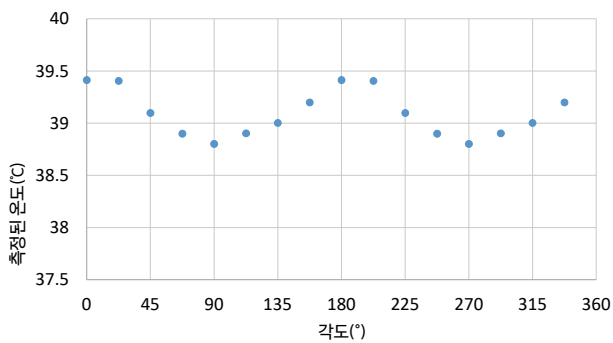
그림2 가공된 염화 비닐로 라이닝 처리된 배관의 단면도

1 배관 내부에서 두께가 균일하지 않은 침전물의 경우, 알고리즘은 배관 내 유체에서 배관 외부로 전달되는 열에 대한 열방정식을 만든 후 이 방정식을 계산하여 침전물의 형상을 추정할 수 있습니다. 이 논문에서는 이 알고리즘의 자세한 내용에 대하여는 취급하지 않았습니다.

그림 3에서 배관의 둘레면에 설치된 온도 센서를 사용하여 측정 한 온도를 확인할 수 있었고 측정 결과 (a)의 경우, 염화 비닐 층이 더 두꺼운 180° 방향에서 온도가 더 낮았습니다. 마찬가지로 (b)의 경우, 염화 비닐 층이 더 두꺼운 90도 및 270도 방향에서 온도가 더 낮았습니다.

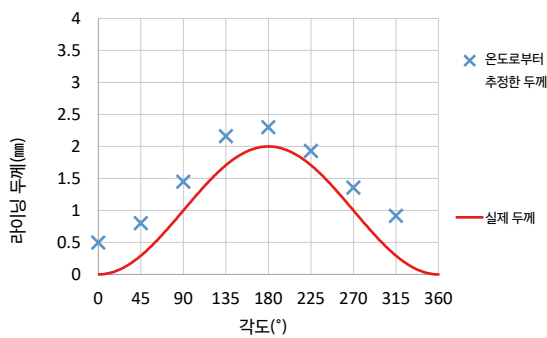


(a)

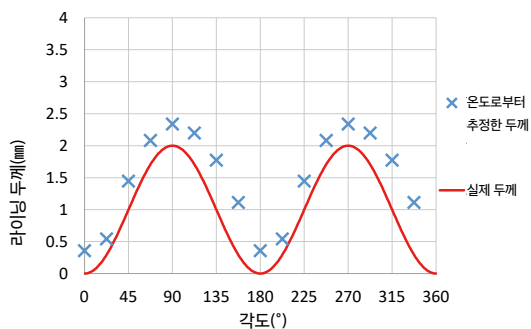


(b)

그림3 측정된 배관 표면 온도



(a)



(b)

그림4 침전물 두께 추정 결과

그림 4에서 우리는 이러한 온도 분포와 우리가 개발한 알고리즘을 사용하여 침전물의 두께 분포를 추정할 수 있었고 또한 두 배관 모두에서 침전물의 형상을 정확하게 추정할 수 있었습니다. 그림 2(b) 배관의 염화 비닐 층은 그림 2(a) 배관보다 형상이 더 복잡하였습니다. 그러나 형태 추정 알고리즘을 효과적으로 작동시키기 위해 측정 포인트 수를 늘려 충분한 온도 측정 포인트를 제공하는 경우 복잡한 형상에도 불구하고 모양을 성공적으로 추정할 수 있다는 사실을 확인할 수 있었습니다.

그림 2(a)의 염화 비닐 층은 배관의 측정 지점에서 0.3mm ~ 0.6mm 범위의 두께 추정 오차를 보였습니다. 이는 추정된 염화 비닐 층의 두께가 실제보다 약간 더 크게 추정되었다는 사실을 의미합니다. 이러한 오차는 배관을 100mm 길이로 절단함으로써 인하여 상단 및 하단의 절단면에서 실제 배관과 다른 열 흐름이 발생하였기 때문으로 예상됩니다. 따라서 실제 배관에서는 훨씬 더 작은 오차를 기대할 수 있습니다.

왁스 침전물 실험

우리는 우리가 개발한 알고리즘이 실시간으로 배관 내부에 있는 침전물의 두께를 추정할 수 있는지 확인하기 위해 또 다른 데모 실험을 수행하였습니다.⁽⁵⁾ 석유 및 가스 사업 분야의 경우, 배관 내 석유의 온도가 내려가서 왁스 침전물이 발생하게 된다는 사실이 알려져 있습니다. 따라서 내부에 내장된 원유 통로 배관을 냉각시킴으로써 내부에서 왁스의 침전을 유발하는 실험 장치를 사용하고 또한 배관의 표면 온도에 기초하여 시간에 따른 왁스의 두께 변화를 실증적으로 추정하였습니다.

그림 5 및 6에서 각 실험 장치의 사진과 계통도를 확인할 수 있습니다. 또한 두 그림 모두 직경이 10mm인 배관에 약 45°C로 가열한 원유를 채워진 상태를 확인할 수 있습니다. 배관 주변에 냉각 재킷을 사용하여 원유를 냉각시킨 후 그림 7과 같이 배관 내부에 왁스 침전물이 발생하였습니다. 냉각 재킷을 통해 흐르는 냉매의 온도는 18°C로 유지되었습니다. 침전된 왁스의 두께를 추정하기 위해 그림 6에서 확인할 수 있는 바와 같이, 배관의 표면에 열전대를 설치하고 단열시키기 위해 열 수축 튜브를 적용하였습니다. 이와 같이 총 10개의 열전대를 배치하여 침전된 왁스의 두께가 길이 방향으로 어떻게 분포되었는지 분석하였습니다. 열 수축 튜브와 배관 사이의 간격을 열전도성 그리스로 채워 열 접촉에 따른 저항을 방지하였습니다. 이 실험에서는 원유를 시간당 1,100ml의 속도로 17시간 동안 흘려보냈고 그 결과 실험의 마지막에는 배관 내 왁스 두께가 약 0.8mm까지 증가하게 되었습니다.

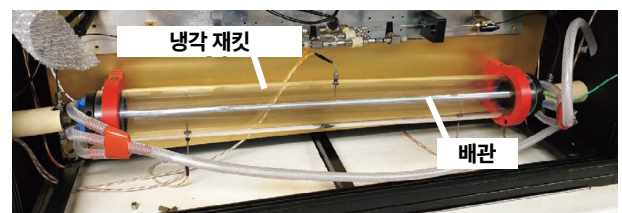


그림5 실험 장치의 사진

배관 표면 온도 측정을 기반으로 한 배관 내부의 침전물 두께와 분포 모니터링

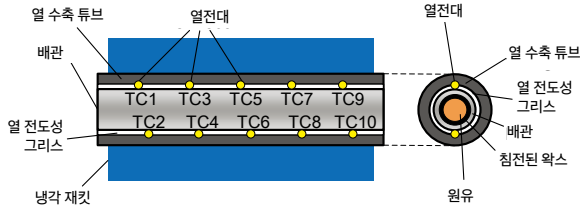


그림6 실험 장치의 구조

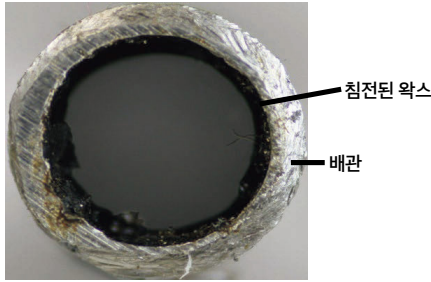


그림7 침전된 왁스

그림 8에서는 배관의 표면 온도를 측정한 결과를 확인할 수 있습니다. 모든 측정 지점에서 배관의 표면 온도는 시간이 경과함에 따라 감소하게 되었습니다. 이러한 온도 변화는 실험을 시작한 후 약 10 시간이 경과할 때까지 왁스의 두께가 서서히 증가하였다는 사실을 의미합니다.

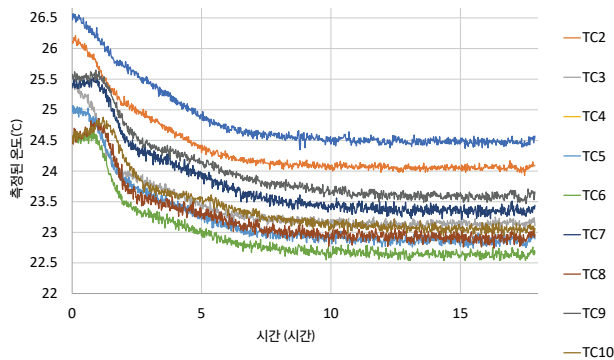


그림8 온도 측정 결과

전체 배관에서 이 기술을 사용하여 측정된 온도로부터 왁스의 평균 두께를 추정하였습니다. 배관의 표면 온도는 써모커플을 사용하여 측정한 온도의 평균값을 사용하였고, 배관 내의 유체 온도는 냉각 재킷 상류에서 측정한 원유의 온도를 사용하였습니다. 또한 배관의 주변 온도는 냉각 재킷 내부에 설치한 온도 센서를 사용하여 측정값을 사용하였습니다. 그림 9를 사용하여 추정 결과를 확인할 수 있습니다. 온도에 기초하여 시간이 경과함에 따라 서서히 증가하는 왁스의 두께를 성공적으로 추정할 수 있었고, 온도로부터 추정된 왁스 두께의 정확성을 입증하기 위해, 실험 중 냉각 재킷의 입구와 출구 사이에서 측정된 압력의 차이에 기초하여 왁스의 두께를 추정하였습니다. 이뿐 아니라, 실험 후 확보한 왁스의 질량으로부터 및 사전에 측

정한 왁스의 밀도에 기초하여 왁스 두께에 대한 다른 추정값을 구하였습니다. 온도에 기초하여 추정된 왁스의 두께는 압력의 차이 및 왁스의 질량으로부터 추정된 값과 잘 일치하였고, 따라서 시간에 따른 왁스 두께의 변화가 온도로부터 정확하게 추정되었다는 사실을 확인할 수 있었습니다.

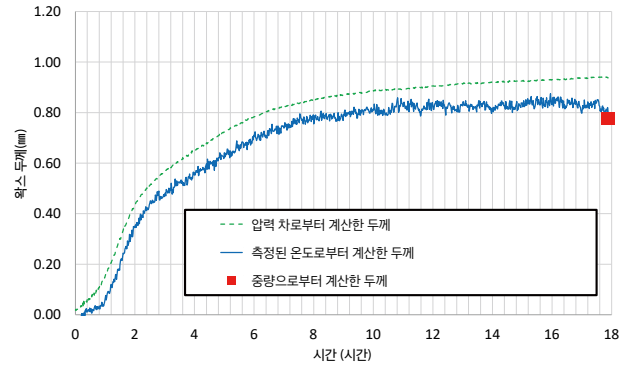


그림9 왁스 두께 추정 결과

결론

배관 내 유체의 온도와 배관 주변의 온도 사이에 차이가 있는 경우, 배관 표면 온도 분포를 측정하여 배관 내 침전물의 형상과 두께를 추정할 수 있는 알고리즘을 개발하였습니다. 다양한 형상으로 가공된 모의 침전물 층을 사용한 데모 실험을 통하여 알고리즘이 실제로 침전물의 형상을 올바르게 추정할 수 있다는 사실을 확인하였습니다. 또 다른 데모 실험에서는 배관 내에 왁스의 침전을 유도하면서 알고리즘을 사용하여 실시간으로 시간의 경과에 따른 침전물 두께 변화를 모니터링 할 수 있다는 사실도 확인할 수 있었습니다.

침전물 형성으로 인하여 발생하는 배관 표면 온도의 변화에 기초하는 본 기술은 배관 표면에 추가된 온도 센서를 사용하여 측정된 값과 다양한 파라미터를 기반으로 침전물의 형상과 두께를 추정할 수 있습니다. 따라서 이 기술을 사용하여 침전물을 효율적인 비용과 비침습적인 방법으로 모니터링 할 수 있으며 배관 라인을 운전함에 있어 유용하게 사용할 수 있을 것입니다. 예를 들어, 압력 게이지를 사용하여 압력의 차이를 측정함으로써 침전물의 두께를 결정하는 경우, 이 기술을 적용하는 것보다 더 많은 시간과 비용이 필요할 수도 있습니다. 향후 침전물의 두께와 형상을 추정할 필요성 여부를 조사하고, 이 추정 기술을 더욱더 발전시키기 위해 추가적인 연구를 진행해야 할 것입니다.

감사의 말씀

우리는 기술을 공동으로 개발하고 두 가지 데모 실험 작업을 수행할 수 있도록 도와준 Tokyo University of Marine Science and Technology에게 감사를 표합니다. 또한 왁스 침전 실험에 도움을 주고 필요한 장비를 제공해준 Kernow Analytical Technology Limited 에게도 감사의 말씀을 전합니다.

REFERENCES

- (1) X. D. Chen, D. X. Y. Li, et al., "On-line fouling/cleaning detection by measuring electric resistance—equipment development and application to milk fouling detection and chemical cleaning monitoring," *J. Food Eng.*, Vol. 61, No. 2, 2004, pp. 181-189
- (2) J. S. Gudmundsson, I. Durgut, et al., "Detection and monitoring of deposits in multiphase flow pipelines using pressure pulse technology," 12th International Oil Field Chemical Symposium: Geilo, April 1-4, 2001
- (3) W. Harara, "Deposit thickness measurement in pipes by tangential radiography using gamma ray sources," *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 44, 2008, pp. 796-802
- (4) S. Mochizuki, M. Akira, *Dennetsukougaku no kiso* [basic heat transfer engineering], Nisshin Shuppan, 1994 (in Japanese)
- (5) S. Ito, Y. Tanaka, et al., "Wax thickness and distribution monitoring inside petroleum pipes based on external temperature measurements," *ACS Omega*, Vol. 6, No. 8, 2021, pp. 5310-5317

* 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.