



Received: 2019/11/07
Revised: 2020/01/07
Accepted: 2020/02/08
Published: 2020/03/24

***Corresponding Author:**

Sun-Kwon Lee

Explosion Protection Team, Korea Marine Equipment Research Institute, Ulsan, Republic of Korea

Tel: +82-52-280-9911

Fax: +82-52-280-9911

E-mail: sunkwonlee@komeri.re.kr

Body 온도 특성 분석을 통한 In-Line Flame Arrester의 소염 성능 분석

Analysis of Quenching Performance of In-Line Flame Arrester by Analyzing Temperature Characteristics of Body

고성진, 김병욱, 박정훈, 강규홍, 이선권*

(재)한국조선해양기자재연구원 방폭전력팀

Seong-Jin Ko, Byung-Wook Kim, Jeong-Hoon Park, Gyu-Hong Kang, Sun-Kwon Lee*

Explosion Protection Team, Korea Marine Equipment Research Institute

Abstract

본 연구에서는 화염방지 소염성을 housing 온도 특성의 분석을 통해 유추할 수 있는 방법을 제안하였다. 특히 폭굉 조건에서 화염방지기 Body 외부의 온도 상승과 전이, 그리고 분포 특성 확인을 통해 현상을 실험적으로 분석하고, 소염 성능과의 연계성을 검토하였다.

In this study, we proposed a method to infer flame arrester anti-flame performance through analysis of Housing temperature characteristics. Especially in the detonation condition, the phenomenon was analyzed experimentally by checking the temperature rise, the transition outside the body of the flame arrester, and the distribution characteristics.

Keywords

Flame Arrester(화염방지기),
Quenching(소염),
External Temperature(외부 온도),
Detonation(폭굉)

Acknowledgement

이 논문은 산업통상자원부에서 경제협력관산업육성사업(비즈니스협력형, P0004681)의 지원으로 수행된 연구임.

1. 서론

최근 해양 플랜트 뿐만 아니라 모든 산업에서 안전에 대한 관심이 꾸준히 증가하고 있으며, 이에 따른 연구가 지속되고 있다. 그 중에서도 flame arrester는 해양 플랜트 내에서 많이 사용되고 있는 제품이며, 2016년 9월 국제방폭시스템(IECEx)에서는 scope를 추가함으로써 그 중요성이 점점 커지고 있는 추세이다.

탱크 또는 pipeline 내부는 가공 전후 발생하는 가연성 가스로 인해 연제나 폭발의 위험성을 안고 있다. 이 때 외부에서 화염 또는 폭발이 발생하여 pipeline 내부로 전파되는 경우, 연쇄 폭발로 인한 큰 산업재해를 야기할 수 있다. Flame arrester는 이러한 연쇄 폭발을 방지하기 위하여 사용하는 안전장치이다. 육-해상 플랜트에서는 여러 가지 설비가 탱크에서 배관으로 상호 연결되어 있는 경우가 많기 때문에, 하나의 설비에서 폭발이 발생했을 때 다른 설비에 폭발이 전파되어 확대되지 않도록 Flame arrester를 설치해야한다. Flame arrester는 배관 중간에 설치되는 in-line type과 과말단 및 tank에 설치되는 end-of-line type으로 구분할 수 있다. 설치위치와 조건에 따라 만족해야 할 성능은 다르게 요구되며, 이는 ISO 16852 규격 등에서 다루고 있다.

기본적으로 flame arrester의 핵심은 quenching(소염)을 통해 화염이 확산되는 것을 방지하는 장치이며, element, Body, 격판, element ring으로 구성되어 있다.

Flame arrester와 관련된 기술 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 새로운 형

상이 적용된 flame arrester의 시험연구를 통해 micro slit 구조의 효과에 대한 연구가 Okawa에 의해 진행되었다. Joo는 ceramic foam의 소염능력을 연구하였다. Kiah와 Sulaiman의 연구에서는 curved pipe 내에서의 폭발과 화염의 효과에 대해 연구하였다. Sun은 수치해석기법을 이용하여 화염의 소염성을 분석하였고, 내부 화염의 온도를 해석하였다. 하지만 flame arrester Body의 온도특성을 통한 성능예측에 대한 연구는 크게 이루어지지 않고 있다. flame arrester의 Body 온도특성은 계측이 용이하기 때문에 매우 효과적인 접근 방법이 될 수 있다고 판단된다.

본 연구에서는 ISO 16852에서 제시한 detonation 조건에서 flame arrester의 body의 온도 상승과, 전이, 그리고 분포특성을 통해 현상을 실험적으로 분석하고, 소염성능과의 연계성을 검토하였다. 열 화상 카메라를 활용한 이미징 분석과 폭발 후 시간에 따른 열전달 특성, 그리고 위치에 따른 온도특성을 실제 detonation 환경에서 도출하여 어느 정도 위치에서 소염이 되었는지를 분석해보았다.

2. 본론

2.1 ISO 16852 내 detonation 시험 요구조건에 대한 분석

ISO 16852: 2016은 flame arrester의 요구조건과 성능 시험과 관련된 규격이다. 규격 6절에서는 구조적인 요구사항과 시험요건을 기록하고 있다. Flame arrester는 사용 환경에서 예상되는 기계적, 열적, 그리고 화학적 환경에 대한 내성을 가지도록 규정한다. 또한, flame arrester는 flame quenching 능력을 보유해야 하고, light metal에 대한 규제 또한 만족하여야 한다. Flame arrester의 body는 견고하여야 하며, IEC 60079-1의 joint requirement를 만족하도록 설계하여 안정성을 확보하여야 한다. 반드시 만족해야 하는 시험요건으로는 pressure test, leak test, flow measurement (air), flame transmission test가 있다. 이중 flame transmission test는 내부의 화염을 소염시켜 보호되도록 하는 핵심 성능 요구조건이다. 시험의 조건은 각 flame arrester의 용도에 따라 detonation test, deflagration test, burning test로 나누어진다. Detonation flame arrester는 stable과 unstable 조건으로 구분되고, pipe 내의 restriction 구조에 따라서도 분류된다. detonation flame arrester는 detonation test와 이후 deflagration test를 검증하여 적합 여부가 결정된다. Pipe line 내부의 폭발 화염은 이동하면서 가속된다. 따라서 짧은 거리에서

는 deflagration이 발생하고, 가속되어 detonation 현상으로 전환된다. 이때 deflagration과 detonation의 경계에서 큰 압력과 속도가 발생하는 영역을 거치게 되는 데 이를 unstable detonation 영역이라고 한다. Pipe line의 길이와 surge tank 등을 통해 각 시험조건을 만족하는 화염을 구현하는 형태로 시험이 구성된다.

2.2 In-line flame arrester의 소염성능

In-line flame arrester는 배관 중간에 설치되는 방식으로, 화염을 소염하여 내부의 화염의 확산을 방지하는 기능을 한다.

플랜트 내 배관에서는 보통 crimped-ribbon 형식을 주로 적용하고 있으며, 유체는 잘 통과시키고, 화염을 소염시키는 능력을 요구한다. Crimped-ribbon 방식은 Fig. 1과 같은 구조를 가지며, 화염이 좁은 갭을 통과하면서 온도 저감을 통해 소염되는 기능을 한다. 갭이 좁고 길이가 길수록 소염능력이 향상된다고 볼 수 있다. 그러나 좁은 갭이나 긴 element는 제조공정의 어려움과 비용의 상승이 동반될 뿐만 아니라 유체의 흐름 또한 저해하는 요인이 될 수 있어 가능한 최적화된 제품이 되어야 경쟁력을 확보할 수 있다.

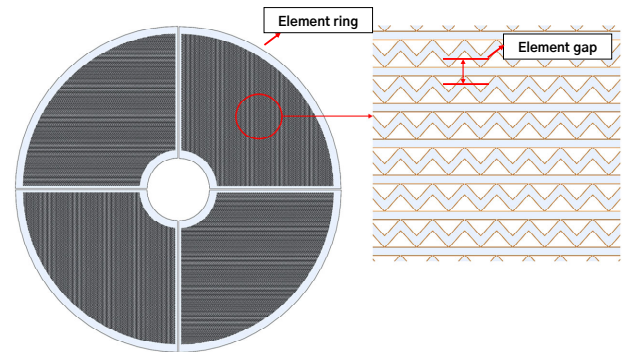


Fig. 1. Structure of flame arrester's elements

2.3 Detonation 조건에서 Body 온도 분석

2.3.1 연구배경 및 목적

In-line flame arrester의 detonation test는 역화여부를 판정하여 합격여부를 판단한다. 시험을 통과하지 못하고 역화가 발생한 경우 개선이 필요하다. 이 때 제품의 개선 방향은 갭을 더 좁히거나 element의 길이를 증대시키는 조치가 보통 시행된다. 하지만 어느 정도의 개선이 필요한지는 일반적인 시험 결과로 파악하기가 매우 어렵다. 시험을 통과하더라도 개발된 장치가 어느 정도의 여유를 가진

것인지 파악하기는 현실적으로 어려운 실정이다. 이를 위해 CFD를 이용한 접근이 많이 이루어지고 있으나 이 또한 현실과 차이가 많이 발생한다. 특히, 이와 같은 차이로 과설계 될 경우 제품의 경제성 및 경쟁력이 떨어지는 경우가 발생한다.

이에 대한 효과적인 접근을 위해 본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 flame arrester의 quenching 원리를 기반으로 실질적이고 간단한 검증방법 도출을 시도하였다. 시험 제품에 다른 조치를 취하지 않고, detonation 시험에서 quenching 성능을 예측할 수 있는 방법으로, flame arrester body의 온도 측정과 분석을 통해 예측하는 것이다. 내부의 화염은 body의 온도상승을 유발하며, 구조에 따라 다양한 형태가 되겠지만 flame arrester body의 길이방향 온도가 내부의 quenching 현상에 따라 다르게 나타날 것이다. 이를 계측 분석하여 과설계 및 부족설계의 수준을 평가하고자 연구를 진행하였다.

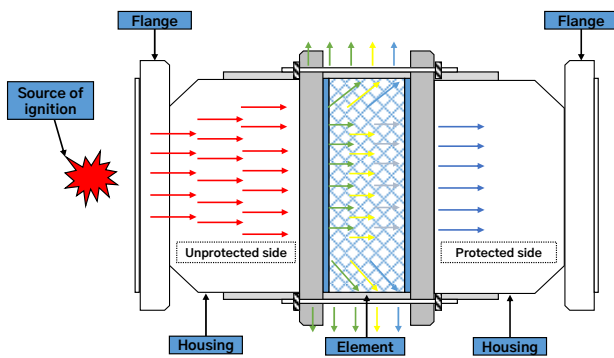


Fig. 2. Operating principle of flame arrester

2.3.2 Temperature evaluation with detonation test

시험대상 제품은 (주)탑세이프의 12인치 flame arrester이다. In-line detonation flame arrester이며 IIA 제품이다. 본 연구는 body의 온도를 통한 분석기술 연구로 세부적인 element 구조나 사양은 제시하지 않았다.

시험을 위해 unprotected side는 detonation 생성을 위한 긴 길이의 배관으로 구성되어 있으며, 화염 가속을 위해 surge tank를 두었다. 화염속도 계측을 위해 4개의 flame detector가 규격의 조건에 적합하도록 설치하였다. Protected side에는 화염 전이 여부를 파악하기 위하여 flame detector를 설치하였다. 본 제품 시험의 initial pressure는 1.6 bar이며 propane 가스를 air와 혼합하여 조성하였다. 정확한 가스 믹싱을 위해 정밀한 MFC(mass flow controller)를 이용하였고, unprotected side의 outlet에서 가

스조성을 측정하여 규격 내 요구 범위 내에서 시험을 실시하였다.

Fig. 3은 시료가 설치된 실제 시험구성을 표현한 사진이다. 배관 내 설치된 In-line flame arrester이며, 센서의 위치와 direction을 표기하였다. Fig. 4는 온도 계측을 위한 실제 타점 설치위치를 사진으로 나타낸 것이다. 화살표는 화염의 방향을 나타낸 것이고, 온도 계측 채널의 번호는 unprotected side에서 protected side 방향으로 배치하였다. CH1과 CH2는 unprotected side에서 flame arrester 시작 부분이며 내부에는 element가 존재하지 않는 공간이다. CH3 ~ CH8은 element가 내부에 존재하는 영역이며, CH9, CH10은 protected side로 flame arrester의 끝단이며 내부에 element가 없는 빈 공간으로 구성되어 있다. 사용한 온도 센서는 K-type으로 측정범위는 -200°C ~ $+1250^{\circ}\text{C}$ 이며 고속 온도 기록계를 이용하여 온도 data를 초당 100개를 받았다. 또한 사용한 열화상카메라는 10 Hz의 사이클로 데이터를 수집했다.



Fig. 3. Installation of high-speed temperature recorder and thermal imaging camera

본 연구에서는 detonation test 결과 역화가 발생하지 않았다. 12인치 in-line flame arrester를 통해 1차 detonation 시험한 결과 velocity는 1,852 m/s - 2,016 m/s의 범위로 측정되었다. 2차 detonation 시험한 결과 velocity는 1,834 m/s - 1,953 m/s의 범위로 측정되었다.

시료의 body 외부 온도를 측정하고 열화상카메라를 활용하여 데이터를 확보했다. Body 온도 계측을 위한 시스템은 Fig. 3과 동일하게 구성하였으며, 세밀한 계측을 위하여 CH2 ~ CH9를 element에 설치, CH1, CH 10은 시료 Body의 온도 타점이며 CH11은 대기 온도이다. 시험 시료 setting은 Fig. 4와 같다.

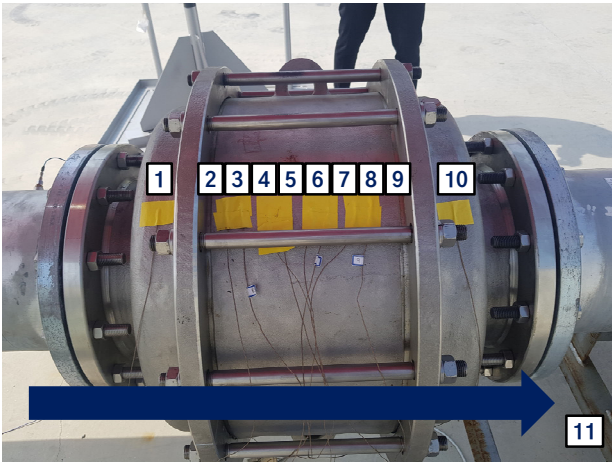


Fig. 4. Temperature sensor attachment points

시험을 실시간으로 계측한 flame arrester의 body 온도는 Fig. 5와 같다. 온도센서가 설치된 부분에 화염이 도착한 시간에 온도의 상승을 관찰할 수 있다. 온도가 상승하는 순간 온도 data의 흔들림은 detonation 시험 시의 폭발 충격파에 의한 노이즈로 판단하였다. 최고 온도는 61°C까지 상승했다.

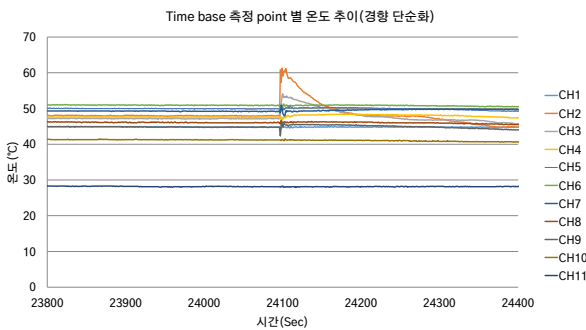


Fig. 5. Temperature trend per point based on time

Fig. 5를 position base 온도 차트로 가공한 것이 Fig. 6이다. Fig. 6를 통해 위치별로 소염이 되는 곳을 추측할 수 있었다. 2번, 3번, 4번 타점에 가장 큰 변화가 발생하였으며 8번 타점부터는 온도가 하락하는 경향을 보이는데, 이는 8번 타점 아래의 element에서 화염이 완전소멸했을 것이라고 분석할 수 있다.

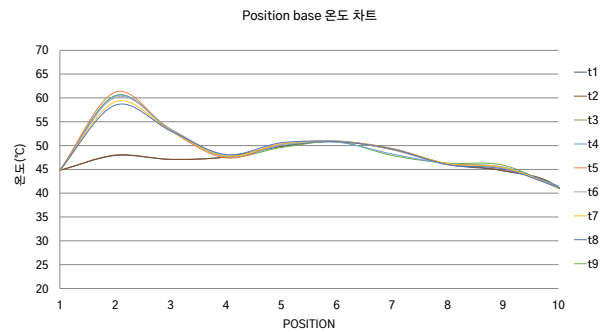


Fig. 6. Temperature trend per point based on position

Fig. 7은 detonation 현상 또한 시간이 경과함에 따라 열 전달에 의해 전반적으로 온도가 상승되었다. Fig. 8의 시험결과에서는 최대 72.4°C가 계측이 되었으나 위치에 따라 동일 길이방향 대비 온도 차가 큰 것을 볼 수 있었다. 이는 flame arrester 내부에서 소염이 될 때 화염이 동일하게 분산되지 않기 때문에 발생한다고 볼 수 있다. 또한 시험제품의 제작 시 element와 body와의 위치관계를 파악해 두는 것이 향후 분석을 위해 필요한 것으로 판단된다. 따라서 특정 부위의 온도측정으로 전체를 파악할 경우 정확한 예측이 어려울 수 있다. 즉 길이방향 온도센서 설치 시 외경방향으로 다수의 센서를 추가배치 하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

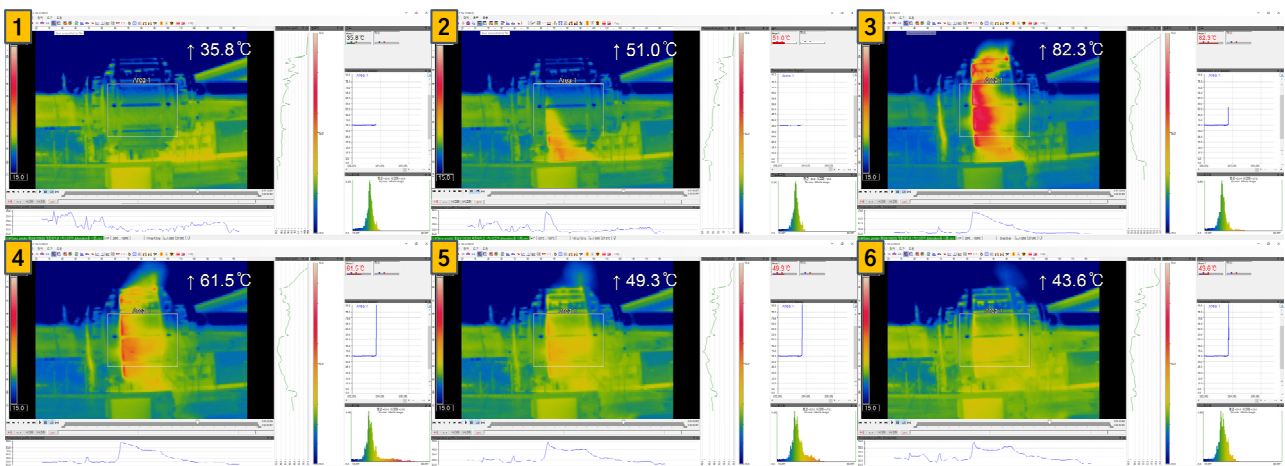


Fig. 7. Primary thermal imaging camera results

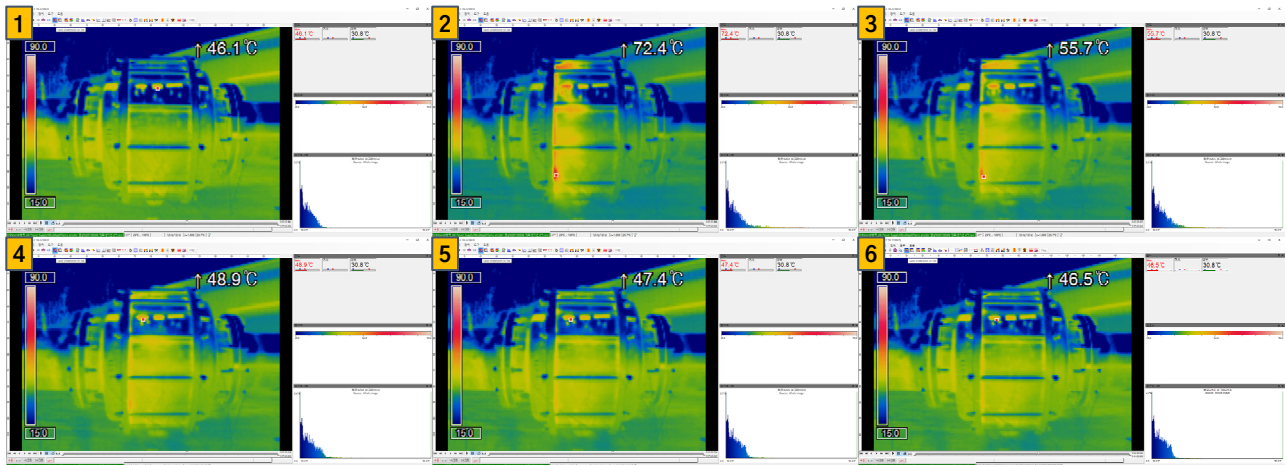


Fig. 8. Secondary thermal imaging camera results

Fig. 9은 동일한 열화상 중 주요 프레임을 발췌하여 표현한 것이다. 2회의 시험에서 각각 최고온도가 측정된 열화상 프레임이다. 붉은 박스 표기 영역은 온도상승이 유의한 영역이다. 시간이 경과 후 발생한 온도상승은 화염이 소멸한 이후 상승한 것으로 유추할 수 있으나 단정할 수는 없다. 즉 화염이 cool down 되지만 화염이 완전 소멸되지 않은 상태의 열전달인지 완전히 소멸한 상태에서 기존의 열에 의한 추가 온도상승인지 결론을 내릴 수 없다. 특히 화염은 내부의 gas를 태우고 매우 빠른 속도로 소멸되기 때문에 element의 어느 위치에서 소염이 되었는지 확정하기 어려운 것이다. 이는 body의 온도를 계측한 것이기 때문에 가지는

한계이다. 하지만 열 해석과의 연계분석으로 내부의 열원의 유추하면 해당 gas의 auto ignition temperature(AIT) 이내인지 여부를 가지고 복합적인 분석이 가능할 것으로 예상할 수 있다. 또한 연구단계에서 pass와 fail 조건의 제품으로 열전달 특성을 분석한다면 보다 정확한 예측이 가능해진다.

3. 결론

본 논문에서는 in-line flame arrester의 body 온도를 계측하여 소염 성능을 분석하였다. 이 시험을 진행하기 위해 (주)탐세이프에서 제공한 12인치 in-line flame arrester를 시료로 사용하였으며 시험은 1.6 bar에서 프로판 가스를 이용하여 진행하였다. Body 온도는 고속온도 기록계와 열전대, 열화상 카메라를 이용하여 측정하였다. 진행한 모든 시험에서 역화는 발생하지 않았다.

- (1) 12인치 in-line flame arrester 모델의 선정 이유는 배관 내 가스의 양이 증가하면 열량이 증가하기 때문에 소형 모델보다 더 높은 온도까지 측정할 수 있기 때문에 크기가 큰 모델을 선정하였다. 12인치 모델 시험 결과 1차 detonation velocity는 1,852 m/s - 2,016 m/s, 2차 detonation velocity는 1,834 m/s - 1,953 m/s의 범위로 나타났다. 온도시험의 경향 단순화 결과 element 입구에서 60.1°C까지 올라감을 확인했으며, 열화상 카메라 결과를 통해 1차 82.3°C, 2차 72.4°C까지 올라감을 확인할 수 있었다. 열화상 카메라 결과를 통해 element에서 cool down되어 소염되는 현상을 시각적으로 확인할 수 있었다.

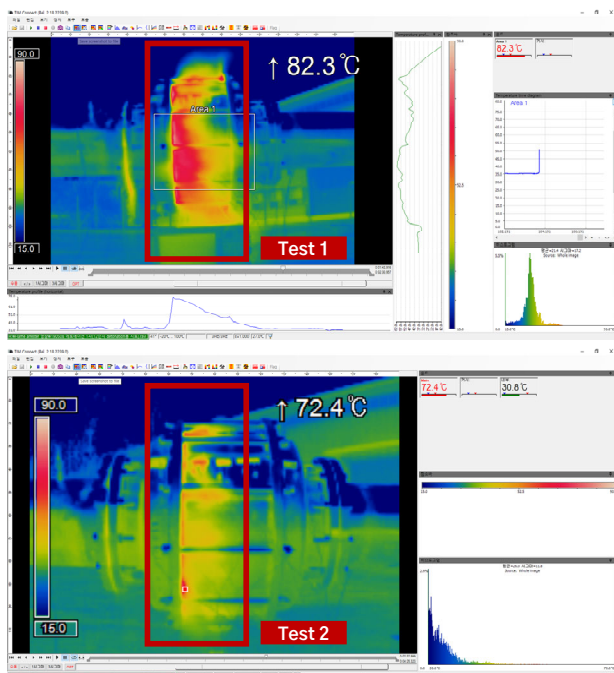


Fig. 9. Thermal imaging cameras main results frame

(2) 위 시험을 통해, body 외부 온도 측정 및 열화상 카메라를 통한 온도 변화를 통해서 직관적이고 간단하게 element 소염을 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다. 단 이 시험의 한계는 element 중심부에서 발생하는 quenching을 정확히 예측하긴 어렵다는 것이다. 이는 추후에 열 해석을 진행하고 가스의 auto ignition temperature를 기준으로 실험결과와 비교 검증을 하면 flame arrester의 과설계를 줄일 수 있는 가장 간단한 방법이 될 수 있다.

참고문헌

- [1] Ko, S.J., Lee, S.K., Kang, G.H., "Performance test of end-of-line flame arrester," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, VOL. 42, pp. 197-202, 2018.
- [2] "Flame arresters-performance requirements, test methods and limits for use," IEC Int. Standard 16852, Second edition, 2016.
- [3] Yoichi Okawa, Seiichiro Asano, Chongho Youn, Syunsuke Ikeda, Toshiharu Kagawa, "Experimental research on a newly developed detonation flame arrester," SICE Annual Conference, 2008.
- [4] Joo, H.I., K. Duncan, G. Ciccarelli, "Flame-quenching performance of ceramic foam," Combustion Science and Technology, VOL. 178, pp. 10-11, 2006.
- [5] M. H. Mat Kiah, R. M. Kasmani, "Experimental study on premixed flame acceleration in closed pipe," Jurnal Teknologi. VOL. 62, no. 1 pp. 45-51, 2013.
- [6] Siti zubaidah sulaiman, Rafiziana M. Kasmani and Azeman mustafa, "Experimental study on the effect of curved tube of premixed hydrogen-air explosion," Journal of Engineering Science and Technology, special issue on SOMCHE 2014 & RSCE 2014 conference, pp. 50-60, 2015.
- [7] ShaoChen Sun, Yuan Shu, Yu Feng, DaChao Sun, HaiTao Long and MingShu Bi, "Numerical simulation of detonation wave propagation and quenching process in in-line crimped-ribbon flame arrester," Cogent Engineering, 2018.