열화상 영상을 이용한 래들의 내화물 열화도 분석

Analyzing Refractory Bricks of Ladles using Infrared Images

이 상 준, 전 용 주, 김 상 우*
(Sang Jun Lee¹, Yong-Ju Jeon¹, and Sang Woo Kim^{2,*})

¹Department of Electrical Engineering, POSTECH

²Department of Electrical Engineering, Department of Creative IT Engineering, POSTECH

Abstract: In the steel manufacturing process heat-endurance deterioration of a ladle used to cause a big accident. In this paper, an infrared imaging system and image analyzing procedure are proposed for inspecting refractory bricks of a ladle. The proposed algorithm contains following three parts: two-stage image selection procedure, reference point detection, and analysis of heat-endurance deterioration. Experiments were conducted with real data from a steel plant and detailed configuration of infrared imaging system was presented.

Keywords: ladle, refractory, steel industry, infrared image analysis

I. 서론

세계적인 핵심 산업 중 하나인 철강 산업 분야에서는 공정 자동화를 위한 여러 가지 연구가 진행되어왔다. 대표적인 연구로서 품질제어를 위한 결함탐상 시스템이나, 철강번호 인식을 통한 물류제어, 제조공정 감시를 위한 모니터링 시스템 등이 있다[1-6]. 철강 제조공정에서는 작은 사고가 고온의 용강으로 인하여 큰 사고로 이어지기 쉽기 때문에, 안전 관리 시스템 관련 연구가 각광받고 있는 추세이다. 따라서 온도 감시 시스템이나 압력측정을 통한 제조공정 상태감시 시스템에 대한 연구가 진행된 바 있다[7].

최근 일반적인 영상 시스템 이외에 열화상 카메라를 이용한 고장진단 시스템이 각광받고 있다[8]. 건물에 대한 진단 및 열 방출 현황 분석이 대표적인 예이며, 최근 의학 분야에서도 활발히 이용되는 추세이다[9-11]. 열화상 카메라의 해상도의 한계 및 좀 더 효율적인 활용을 위해 CCD 카메라와의 혼합 활용관련 응용분야도 연구되고 있는 추세이다[12].

본 논문에서 대상으로 하는 래들은 고온의 용강을 운반하고 다른 제조공정으로 옮기는 둥근모양의 쇄그릇이다. 래들 내부에는 뜨거운 용강의 온도로부터 래들의 모형을 유지하기 위해 내화물이라는 벽돌이 설치된다. 이 내화벽돌은

제조공정에 반복되어 사용됨에 따라 그 두께가 얇아지며 성능이 떨어지는데, 내화벽돌의 두께가 임계 두께 이하로 떨어질 경우 래들이 파괴되는 큰 사고로 이어지기 쉽다.

본 논문에서는 열화상 카메라를 이용하여 얻은 래들의 표면온도를 통해 내화물의 열화정도 분석 알고리즘을 제안한다. 전처리 과정으로서 래들의 움직임을 고려한 영상선정 방법과 초해상도 기법을 활용한 영상 전처리 과정을 소개한다. 래들의 동일 지점 온도변화를 관측하기 위한 기준점 검출 알고리즘을 개발하였으며, 열화도 분석을 위한 온도 비율 수치를 제안한다. 실제 철강제조공정에서 획득한 영상을 이용하여 실험하였으며, 시스템 구성 및 영상 분석 방법 등의 내용을 포함한다.

II 장에서는 철강공정상의 래들에 대한 배경지식과 열화상 영상 획득 시스템에 대하여 설명한다. III 장에서는 영상 시퀀스정보에 대한 전처리과정인 영상선정알고리즘을, IV 장에서는 동일 지점에 대한 온도 관측을 위한 기준점 검출 알고리즘을 설명한다. V 장에서 열화도 분석 기법을 소개하며 VI 장에서는 결론에 대하여 논한다.

II. 배경지식

1. 래들 및 내화물

래들은 용강을 옮기는 원형의 쇄그릇이다. 철강공정에서 래들은 천장에 설치된 크레인에 의해 운반되며, 조업자에 따른 차이가 있지만 약 0.4m/s의 속도로 움직인다. 래들의 담기는 용강은 1500~1600℃로 최종 제품의 종류나 첨가되는 성분에 따라 차이가 있다. 고온의 용강 온도를 버티기 위하여 래들 내부에는 내화물이 설치된다.

래들이 공정에서 여러 번 사용됨에 따라 내화물의 두께가 줄어드는데, 그 두께가 임계두께 이하로 줄어든 경우 사고로 이어질 확률이 급격히 증가한다. 일반적으로 내화물의 열화는 전반적으로 발생하며, 현재 육안검사 및 X선 검사를 이용하여 내화물의 전반적인 두께를 추정한다. 이렇게

* Corresponding Author

Manuscript received December 31, 2014 / revised January 20, 2015 / accepted January 22, 2015

이상준, 전용주: POSTECH 전자전기공학과

(lsj4u0208@postech.ac.kr/jjeon83@postech.ac.kr)

김상우: POSTECH 창의IT융합공학과, 전자전기공학과

(swkim@postech.ac.kr)

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT/SW 창의연구과정의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2013-H0502-13-1109).

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 “IT명품인재양성사업”의 연구결과로 수행되었음(C1515-1121-0003).

※ 본 논문은 ICROS 대구경북지구학술대회에서 초안이 발표되었음.

그림 1. 영상획득 시스템.

Fig. 1. Infrared imaging system.

그림 2. 영상획득 시스템 설치 위치.

Fig. 2. Camera configuration.

추정된 정확도가 정확하지 않기 때문에 현재 실제 공정에서는 래들을 50번 사용한 후 내화물을 수리하며 3번의 수리주기를 거친 후 조기 교체한다.

래들을 사용함에 따른 내화물이 전반적으로 열화되기도 하지만, 공정상에서 용강과의 물리적 충격 혹은 화학적 반응으로 인해 열화가 국부적으로 진행될 수 있다. 전반적인 열화의 경우 육안 검사 및 주기적인 교체를 통해 사고를 방지할 수 있지만, 국부열화는 시기 및 위치를 예측하기 힘들며 큰 사고로 이어질 가능성이 크다. 본 논문은 내화물 국부열화를 대상으로 열화도 분석을 목표로 한다.

2. 영상 획득 시스템

래들의 전반적인 온도는 그림 1의 시스템 구성을 통하여 획득할 수 있다. 본 연구에서는 내화물 열화도 분석의 가능성을 검토하기 위하여, 시스템 구성도 중 하나의 열화상 카메라와 영상저장기기를 설치하여 영상을 획득하였다. 영상 획득 시 FLIR사의 T420 열화상 카메라를 사용하였으며, 이 제품은 320x240의 공간 해상도와 -20~650도의 온도 분석의 성능을 가진다.

영상을 획득하기 위한 구체적인 공정상 래들의 움직임 및 카메라 설치 위치는 그림 2와 같다. 래들은 천장에 설치된 크레인을 통하여 이동되며 공정단계를 진행하는 위치에 도달하면 1층의 공정장소에 놓인다. 열화상 카메라를 2층에 설치하여 래들의 움직임 경로가 촬영되도록 하였으며, 열화상 카메라의 화상에 래들이 들어올 때부터 나갈 때까지의 영상이 시퀀스 형태로 저장되도록 설치하였다.

그림 3은 획득한 열화상 영상의 예시를 보여준다. 래들

그림 3. 래들의 열화상 예시 영상.

Fig. 3. Thermal image of a ladle.

의 열화상 영상은 초당 30프레임의 속도로 촬영되었으며, 각 래들은 약 750~1000장의 영상으로 구성된다. 획득한 열화상 영상의 크기는 320x240이며 각 픽셀값은 해당 영역의 온도를 의미한다. 실제 철강공정에서 15일간 획득한 255개의 영상 시퀀스를 대상으로 내화물 열화도 분석 실험을 진행하였다.

III. 영상 선정 알고리즘

획득한 열화상 영상 시퀀스에 대한 전처리 단계로서 두 단계로 구성된 영상선정 알고리즘에 대하여 소개한다. 첫 번째 영상선정 과정은 래들 전체가 나타나는 영상을 선정하는 과정이다. 열화상 영상획득 시스템에서 래들이 카메라에 들어오기 시작할 때부터 래들이 화면에 사라질 때까지 영상이 시퀀스형태로 저장된다. 저장된 영상시퀀스는 y_k , $k = 1, \dots, K$ 로 표현할 수 있다. 여기서 K 는 각 영상시퀀스가 가지는 프레임 영상의 개수이다.

설치한 열화상 카메라는 래들의 일부가 화면에 들어오기 시작할 때부터 나갈 때까지의 영상을 획득한다. 따라서 획득한 영상 시퀀스 중에 래들의 전체적인 모습이 담겨있는 영상은 일부에 불과하다. 실험적으로 분석하였을 때 약 30%의 프레임 영상에 래들의 모든 모습이 나타난다. 래들의 일부만 포함된 영상에 대하여 후속 알고리즘을 적용하는 것은 비효율적이므로 첫 번째 영상선정과정에서 래들의 전체적인 모습이 담겨있는 영상을 선정한다.

용강이 담겨있는 래들은 배경보다 뜨겁다는 사실을 이용하여, 영상 시퀀스의 각 프레임 영상에 대하여 문턱치 기법(threshold method)을 적용한다. 래들의 표면온도는 300°C 전후인 반면, 주변부의 온도는 상온으로 25°C 전후라는 점을 이용하여 200°C의 문턱치 값을 선정하였다. 전체 영상대비 해당 문턱치보다 큰 값을 가지는 영역의 비율을 구한다. 각 프레임 영상에 대하여 구조물 부분을 제외한 대략적인 래들의 비율에 대하여 알 수 있다. 이렇게 구한 비율그래프의 예시는 그림 4와 같다. 가로축은 영상 시퀀스의 각 프레임 영상을 나타내며, 세로축은 각 프레임영상에서 래들이라 추정되는 영역이 차지하는 비율을 의미한다. 래들이 카메라의 화상에 나타나 지나감에 따라 래들이라 추정되는 영역이 증가하다가 잠시 동안 일정한 후 다시 감소하는 것을 볼 수 있다. 전체 영상 대비 문턱치보다 높은 온도를 가지는 비율이 크다는 것은 영상에 나타나는 래들의 비율이 크다

그림 4. 프레임 영상에 나타나는 래들의 비율.

Fig. 4. Proportions of ladles on a sequence of images.

그림 5. 첫 번째 영상선정과정 결과 제외 및 포함 영상 예시.

Fig. 5. Examples of excluded and included image.

는 것을 의미하게 된다. 래들 추정부분의 비율에 대하여 실험적인 수치를 이용한 문턱치 기법을 한 번 더 적용하여 래들의 전반적인 모습이 나타나는 영상들을 선정할 수 있다. 첫 번째 영상선정과정을 통하여 선정된 영상들은 y_k , $k = x_l, \dots, x_h$ 로 표현할 수 있다.

그림 5(a)는 첫 번째 영상선정과정을 통해 제외시켜준 영상의 예시를 보여주며, 그림 5(b-c)와 같이 래들의 대부분의 모습이 드러난 영상들에 대하여 후속 과정을 진행하였다.

획득한 열화상 영상의 크기는 320x240 픽셀로 1픽셀은 약 3~4cm를 표현한다. 정형질 내화벽돌의 가로 폭이 10cm 정도이고 국부적인 열화는 내화벽돌 사이에서 주로 발생하며, 래들의 외피가 철이라 열전도율이 높다는 점을 감안할 때 세부적인 정보를 표현할 수 있는 고화질영상이 필요하였다. 고화질 영상을 얻는 방법에는 해상도가 높은 카메라를 사용하거나 낮은 해상도의 카메라를 여러 대 사용하는 방법이 있으나, 카메라 시스템을 설치하는데 드는 비용이 크다는 단점이 있다. 이에 전처리 과정으로서 영상의 해상도를 향상시키는 초해상도기법(super-resolution)을 적용하였다. 초해상도기법을 활용가능 한 모든 영상에 적용하는 것은 계산량이 급격히 많아진다는 점에서 문제가 있다. 두 번째 영상선정 과정에서는 초해상도 기법을 효과적으로 적용하기 위해 적용 대상영상을 선정하는 과정이다.

초해상도 기법은 여러 장의 영상정보를 이용하여 해상도를 향상시키는 방법이다[13]. 원하는 움직임을 가진 저해상도 영상을 획득하는 제어 방식(controlled method)과 저해상도 영상들 사이의 움직임에 대한 제어 없이 영상간의 움직임을 추정하는 비제어 방식(uncontrolled method)로 분류된

그림 6. 초해상도 기법의 예시 영상.

Fig. 6. An example of super-resolution.

그림 7. 래들의 움직임 추정.

Fig. 7. An example of ladle motion.

다. 대표적인 방법으로는 아래와 같은 generative model(1)에 대한 gradient descent 기법(2)을 적용하는 방법이 있다[14].

$$F = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^K \|y_i - W_i X\|_2^2 - \log p(X) \quad (1)$$

$$\frac{dF}{dX} = -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^K W_i^T (y_i - W_i X) - \frac{d}{dX} \log p(X) \quad (2)$$

초해상도 기법은 동일 대상에 대한 움직임이 있는 여러 장의 영상정보를 이용하여 높은 화질의 영상을 추정하는 기법이다. 대상물의 서브픽셀 단위의 미세움직임 정보를 이용하여 고화질 영상을 추정하며, 일정 간격의 서브픽셀 움직임을 가진 대상에 적용할 때 효과적이다.

서브픽셀 단위의 정보를 이용하기 위해 단위픽셀에 다수의 래들이 포함되는 지점을 찾기 위하여 래들 움직임의 추정과정이 필요하다. 한 대상물에 대한 여러 장의 사진에서 움직임을 추정하는 방법은 gradient descent 기법 등을 포함하여 여럿 소개된 바 있다[15]. 본 논문에서는 아래와 같은 영상들 사이의 상관계수를 최적화 시키는 ECC (Enhanced Correlation Coefficient) 알고리즘을 차용하였다[16].

$$E_{ECC}(p) = \frac{I_1 \circ I_2(p)}{\|I_1\| \|I_2(p)\|} \quad (3)$$

여기서 I_1 , I_2 는 비교하고자하는 두 영상을, p 는 추정하고자 하는 대상물의 움직임을 의미한다.

래들의 움직임을 ECC 알고리즘으로 추정해보면 그림 7과 같이 래들이 왼쪽으로 이동하여 공정장소로 들어와 공정장소에 도착하면 아래로 내려가는 것을 볼 수 있다.

그림 8. 단위픽셀내의 래들 움직임.

Fig. 8. Ladle motion within unit-pixel with 4x4 grid.

초해상도 기법은 적용하고자 하는 영상들에 일정한 서브 픽셀 단위의 움직임이 있을 때 가장 효과적이다. 앞에서 추정된 래들의 움직임에서 각 점은 하나의 프레임 영상을 의미한다. 각 점을 중심으로 유닛 픽셀 크기의 박스 내에 위치하는 점들의 개수가 가장 많은 점을 기준점으로 정한다. 이 기준점에 대하여 단위픽셀 내의 움직임을 살펴보면 그림 8과 같다.

상하 움직임이 거의 없기 때문에 해상도를 큰 폭으로 향상시키기에는 정보가 부족하였다. 해상도 두 배 향상을 위하여 선정한 기준점을 중심으로 단위픽셀 내에 아래 그림과 같은 4x4 그리드(grid)를 형성하였다. 초해상도 기법을 적용하여 가로세로 해상도를 두 배로 향상시키는 데에는 이론적으로 1/2의 움직임을 가지는 4장의 영상이면 충분하다. 하지만 실제 데이터를 보면 1/2의 이상적인 모션을 가진 영상을 획득하기 힘들기 때문에 4x4 그리드를 고안하였다. 겹치는 정보를 최소화 하기위하여 그리드에서 영상이 존재하는 블록에서만 초해상도 기법을 적용할 영상들을 한 장씩 선정하였다. 각 블록의 중심에서 가장 가까운 영상을 그 블록의 대표 영상으로 사용한다. 그리드 내에서 좌우의 움직임은 충분하기 때문에 적어도 4장 이상의 영상이 선택되며, 최대 16장의 영상에 대하여 초해상도 기법을 적용하고자 했다.

위와 같은 영상선정방법으로 선택한 영상들에 대하여 초해상도 기법을 적용 할 경우 겹치는 정보를 줄이면서 처리 시간적인 면에서 효율적인 정보선택을 할 수 있다는 면에서 장점을 가진다. 그림 9는 320x240의 원본 열화상 영상을

그림 9. 원본 영상.

Fig. 9. An original image.

그림 10. 초해상도 기법 적용 결과영상.

Fig. 10. A result image of super-resolution technique.

나타내며, 그림 10은 640x480으로 가로세로 해상도를 두 배 증가시킨 초해상도 기법의 결과영상에 대한 것이다.

원본 영상과 초해상도 기법 적용 결과영상을 비교해보면, 복잡도가 높은 부분에서 초해상도 기법 적용영상이 더 뚜렷함을 확인할 수 있다. 이는 추후에 이어지는 기준점 검출 알고리즘의 정확도를 올려주고, 열화도를 판단하는 데에 있어 단일영상을 이용하는 것 보다 많은 정보를 이용할 수 있음을 의미한다.

IV. 기준점 검출 알고리즘

제철소 제강공정 라인에서 래들은 크레인에 의해 이동한다. 하지만 크레인은 조업자에 의해 작동되기 때문에 각 작업마다 래들의 경로에 차이가 있다. 그림 11은 동일번호 래들임에도 불구하고 조업자의 운전에 따라 래들의 이동 높이가 다름을 보여준다.

여러 래들의 온도 히스토리 정보를 이용하기 위해서는 동일 지점에 대한 온도 변화추이를 관찰할 수 있어야한다. 본 단락에서는 그림 12와 같이 모든 래들에 나타나는 구조적인 특성을 활용하여 가버필터를 이용한 기준점 검출 알고리즘을 제시한다. 그림 12(a)는 가로바 구조물을, 그림 12(b)는 세로바 구조물을 의미한다. 각 번호에 해당하는 래들의 동일지점들에 대한 온도 변화를 분석하는 것을 목표로 한다.

그림 11. 래들 이동경로의 차이.

Fig. 11. Different moving route of ladles.

(a)

(b)

그림 12. 래들의 구조적인 특징.

Fig. 12. Structural features of a ladle.

그림 13. 가버 코사인 필터.
Fig. 13. Gabor cosine filter.

가버필터는 공간 도메인 내에서 가우스(Gauss) 함수로 변조된 복소 사인함수(complex sinusoid function)이다[17].

$$G(x, y | k_x, k_y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] \times \exp[-j2\pi f(k_x x + k_y y)] \quad (4)$$

여기서 $\sqrt{k_x^2 + k_y^2} = 1$, σ 는 가우시안의 분산을 나타내고 f 는 주파수이며, k_x 와 k_y 를 조절해서 필터의 각도를 변화시킬 수 있다. 이 네 가지 파라미터를 조절함으로써 가버필터의 모양을 변화시킬 수 있다.

본 알고리즘에서는 가로·세로바에 존재하는 블랍(blob) 형태의 특징을 추출하기 위하여, 가버함수의 실수부분에 해당하는 아래와 같은 가버 코사인 필터를 사용하였다.

$$G(x, y) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{x'}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y'}{\sigma_y}\right)^2\right\}\right] \cos(2\pi f x') \quad (5)$$

여기서 $x' = x \cos\theta + y \sin\theta$, $y' = -x \sin\theta + y \cos\theta$ 이며, θ 는 방향을 나타내는 변수, f 는 주파수를 나타낸다. σ_x 와 σ_y 는 각각 가우시안 함수의 x 방향과 y 방향의 분산을 나타낸다. 그림 13은 가로방향과 세로방향의 가버 코사인 필터를 나타낸다.

래들의 열화상 영상에 대하여 가로바에 맞춰 설계된 가로방향의 가버필터를 적용하고 이에 대한 수직 투영 프로파일은 아래 수식을 통하여 구할 수 있다. $H_p(y)$ 는 $N \times M$ 크기의 영상 $I(i, y)$ 의 수직투영 프로파일을 의미한다.

$$H_p(y) = \sum_{i=1}^N I(i, y) \quad (6)$$

그림 14. 예시 열화상 영상(a)에 대한 가버 필터 결과(b) 및 수직 투영 프로파일(c).
Fig. 14. An original image(a), the result of gabor filtering(b) and its vertical projection profile(c).

그림 15. 가버필터(좌) 및 구조 가중치(우).
Fig. 15. A gabor filter(left) and structure weight(right).

그림 14는 열화상 예시 영상 및 가버필터 결과, 이에 대한 수직투영 프로파일을 보여준다.

수평 투영 프로파일의 결과를 보게 되면, 가로 구조물의 위치에서 반응이 크게 나타남을 확인할 수가 있다. 하지만 래들과 배경과의 큰 온도차이(300°C)로 인해 경계면에서도 반응도가 크게 나타난다. 배경과의 경계에서 나타나는 반응과 가로바에서 나타나는 반응을 구분하기 위해, 경계(edge)의 반응은 억제하며 구조물에서 큰 반응도를 가지는 구조 가중치(structure weight)를 이용한 가버필터링 기법을 제안한다. 구조 가중치는 아래와 같이 정의 된다.

가로 방향의 가버필터를 0을 기점으로 이진화한다. 위 그림에서 l_1 , l_2 영역은 0보다 작은 부분을 의미하며, 이는 Gabor 반응의 배경부분을 의미한다. 이를 기반으로 한 구조 가중치에 대한 수식은 아래와 같다.

$$Structure\ Weight(x, y) = \frac{\min(L_1, L_2)}{\max(L_1, L_2)} \quad (7)$$

여기서 L_1 과 L_2 는 l_1 과 l_2 영역의 평균치를 의미하며, 고안한 구조 가중치는 0~1의 값을 지닌다. 평탄하거나 블랍 부분에서는 1에 가까운 값을, 경계 영역에서는 0에 가까운 값을 가진다. 위 예시 영상에 대한 구조 가중치 영상은 그림 16과 같다.

그림 16. 예시 영상에 대한 구조가중치 영상.
Fig. 16. An image of structure weight.

그림 17. 구조 가중치를 이용한 가버필터 결과(좌) 및 이에 대한 수직투영 프로파일.
Fig. 17. The product image of the result of gabor filtering and structure weight(left) and its vertical projection profile.

그림 18. 중간 영역 검출.
Fig. 18. Middle region detection.

그림 19. 세로바 검출 과정.
Fig. 19. Detection procedure for vertical bars.

열화상 영상에 대한 가버 필터링 결과와 구조 가중치 영상의 곱하고 이에 대한 프로파일을 분석하면 그림 17과 같이 가로바를 검출해낼 수 있다.

위와 같은 과정을 통하여 모든 래들에 존재하는 가로바 두 개를 찾아낼 수 있고, 이 영역을 중간영역(middle region)이라 정의한다. 그림 18은 중간영역의 예시를 보여준다. 이어지는 내용은 정확한 기준점 검출하는 과정에 대한 것이다.

중간 영역에는 항상 세로바들이 포함되어 있다. 파라미터 조정을 거친 세로방향의 가버필터를 이용하면 대략적인 세로바의 위치를 검출할 수 있다. 대략적인 세로바의 위치에 실험적인 여백(margin)을 주고 세로바를 포함하고 있는 관심영역을 선정한다.

좌측 및 우측의 세로바 관심영역이 정의 되었으므로, 소벨(Sobel) 필터 가로 세로 방향으로 적용한다. 소벨 필터는 에지 특성을 강화하는 필터이므로 구조물의 경계면이 반응이 높게 나타난다. 이후 이진화를 수행하여 세로바의 경계를 검출한다. 경계 반응이 낮은 세로바를 고려하기 위해 아래와 같은 코너 커널(Corner kernel)을 고안하였다. 이진화된 영상으로부터 코너점을 검출하기 위해서 좌측 및 우측 형태에 적합한 코너 커널을 적용하였다. 코너점 검출에 사용된 소벨 필터와 코너 커널은 그림 20과 같으며, 그림 21은 세로바 관심영역으로부터 기준점을 검출하는 일련의 과정을 보여준다.

구조물의 검출 결과를 보게 되면 정확한 기준점을 찾는 것을 볼 수 있다. 또한 코너 커널의 특성 때문에 위 결과영상과 같이 코너 지점에 소실이 발생하더라도 어느 정도 정확한 기준점 추정이 가능함을 확인할 수 있다.

래들 영상으로부터 2개의 좌측 및 우측 코너 기준점을 검출하였으므로, 두 점의 거리(L)와 두 점이 이루는 각도(θ)를 획득 할 수가 있다. 본 알고리즘에서는 기준점, 거리, 각도 정보를 추출함으로써, 서로 다른 위치 및 시간에 촬영된 래들 영상들에 대해서 동일한 거리 및 각도 정보를 가지도록 크기조절(resize) 및 회전(rotation)을 통해 영상들을

그림 20. 소벨 필터(좌) 및 코너 커널(우).
Fig. 20. Sobel filter(left) and corner kernel(right).

그림 21. 기준점 검출 과정.
Fig. 21. A procedure for reference points detection.

그림 22. 기준점 검출 결과.
Fig. 22. The result for reference points detection.

그림 23. 기준점을 이용한 그리드 영상.
Fig. 23. Grid image using the reference point.

보정한다. 보정된 영상에 대해 기준점을 기준으로 항상 동일 지점이 관측 가능하도록 한다. 아래는 기준점 검출 알고리즘의 정확도 지표를 나타낸다. 사람이 수동적으로 검출한 기준점과 알고리즘을 통해 검출된 기준점 사이의 거리를 측정하면 좌측 코너의 경우 0.6828 픽셀, 우측 코너 0.8254 픽셀의 단위픽셀 이하의 오차를 가진다. 실제 사람이 코너영역을 검출함에 있어서도 측정 오차가 발생하는 것을 고려할 때, 알고리즘에서 측정되는 기준점의 신뢰도를 확인할 수 있다.

다음은 획득한 기준점을 통해 동일한 지점을 관측하는 것에 대한 내용이다. 검출된 기준점으로부터 서로 다른 래들 영상에 대해서 아래와 같이 10x10 픽셀의 그리드(grid)를 구성한다. 기준점(0,0)을 기준으로 하였을 때 동일한 위치의 영상을 획득하였다.

획득된 영상들에 대해서 상관 계수(Correlation Coefficient)를 구하여 동일한 지점이 맞는지 확인하였다. 상관 계수 값

그림 24. 기준점으로부터 얻은 동일 지점 및 상관계수.

Fig. 24. The identical regions and their correlation coefficient.

은 완전히 일치 하면 1의 값의 가지며, 유사성이 낮을수록 0에 가까운 수치를 나타내며, 그 식은 아래와 같다.

$$R = \frac{\sum_s \sum_t [f(s,t) - \bar{f}][w(s,t) - \bar{w}]}{\left\{ \sum_s \sum_t [f(s,t) - \bar{f}]^2 \sum_s \sum_t [w(s,t) - \bar{w}]^2 \right\}^{1/2}} \quad (8)$$

$\bar{f}$: mean of $f(x,y)$
 $\bar{w}$: mean of $w(x,y)$

아래 그림은 서로 다른 10개의 래들에 대한 기준점으로 획득된 동일한 지점의 영상을 나타낸다. 그래프는 각 상관 계수 값을 나타내며, 결과로부터 1에 가까운 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 기준점을 통해 서로 다른 시간에 촬영된 래들에 대해서 열화상 영상에 위치변화나 회전등의 요소가 작용하더라도 동일 지점을 관측할 수 있다.

V. 열화도 분석 알고리즘

래들의 사용 횟수에 따른 내화물의 열화로 크랙(crack) 또는 내화벽의 두께가 얇아짐에 따라서 내화물의 열차단 특성이 약화된다. 따라서 래들의 표면으로 전도 되는 열량이 많아진다. 그림 25는 서로 다른 시간에 촬영된 동일한 래들에 대해서 기준점 검출 결과로부터 얻은 4개의 동일한 관측 지점에 대한 온도 분포를 나타낸다.

래들을 사용함에 따라 온도가 꾸준히 증가할 것이라 예상했으나, 사용 시간에 따른 온도의 변화 추이는 관측되지 않는다. 이는 크게 2가지의 원인으로 해석할 수 있다.

첫 번째는 용강의 초기온도에 대한 것이다. 제강 공정에서 용강의 성분 및 최종 제품의 종류에 따라 용강의 온도가 다르다. 이러한 온도의 변화폭은 약 1,450~1,600°C 정도로 나타나며, 이는 열화상 카메라에서 관측되는 표면의 온도에 영향을 준다.

두 번째는 열화상 카메라의 관측오차에 대한 것이다. 열화상 카메라는 0k 이상의 온도를 가진 대상체가 방사하는

그림 25. 래들 사용 횟수에 따른 온도 변화.

Fig. 25. Temperatures of identical points.

그림 26. 래들 온도에 영향을 주는 요소.

Fig. 26. Elements that affect surface temperature.

적외선 에너지를 이용하여 온도를 측정하게 된다. 따라서 대상체가 방사하는 적외선이 원거리 상의 매질을 통해 전파 되며 카메라에 도달되는 복사 에너지로부터 온도를 나 타낸다.

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_{target} \times \tau_{path} \quad (9)$$

위의 수식에서도 나타내듯이 ϵ_{eff} (유효 복사율)은 ϵ_{target} (대상체의 복사율)과 τ_{path} (광로 투과율)로 결정된다. 여기서 경로상의 매질의 형태에 따라서 광로 투과율이 변화한다. 제강 공정 환경은 외부의 온도 및 습도와 같은 대기 상태, 먼지, 수증기가 시간에 따라 많이 변화하는 환경을 가지고 있으므로 정확한 유효복사율의 추정이 어렵다.

실제 래들 표면의 온도 변화에 영향을 끼치는 요인에는 그림 26(a)와 같이 래들이 담고 있는 용강의 초기 온도와 열화 정도에 따른 내화물의 두께, 철판 두께가 있다. 여기서 철판 두께는 변화하지 않는 고정된 요인이고, 실제로는 용강의 온도와 사용 횟수에 따른 내화벽의 열화도만이 래들 표면의 온도 변화에 영향을 준다. 하지만 이러한 래들의 표면 온도를 열화상 카메라를 통해 관측하게 되면 그림 26(b)와 같이 대기상태에 의한 영향이 추가로 고려가 되어야 한다. 대기 상태의 영향은 정확히 분석하기 어려우므로, 카메라에서 관측되는 절대 온도의 값은 신뢰 할 수 없게 된다.

본 논문에서는 열화상 카메라 절대 온도 정보를 신뢰하기 힘들다는 문제를 해결하기 위해 열화상 온도의 상대적인 패턴을 활용하여 내화물의 열화도를 측정하는 방법을 제안한다. 상대 온도를 활용하여 열화도 측정을 위해 아래와 같은 가정을 한다. 용강의 온도에 의해 나타나는 외부 표면 온도는 정상 상태(Steady state)로 가정하였으며, 열화상 측정당시에 기여하는 대기 상태는 균일한 것으로 가정하였다. 이러한 가정 하에 상대적인 온도정보를 활용한 내 화물 열화도 분석 기법을 소개한다.

열화도를 분석하는데 쓰이는 가정인 정상상태는 시간에 따른 온도 분포의 변화가 없을 때를 의미한다. 정상상태 열전도는 온도의 구배가 선형으로 감소하게 되며, 열전도 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (10)$$

그림 27. 용강 및 대기의 온도.

Fig. 27. Temperatures of melting steel and air.

그림 28. 내화물의 두께가 다른 경우.

Fig. 28. The case of different thickness of refractory.

여기서 q 는 직각 방향으로의 열 흐름 속도, A 는 표면적, T 는 온도, x 는 표면에 직각 방향으로의 거리, k 는 열전도도 (thermal conductivity)로 정의되는 비례상수를 의미한다. 이 수식을 그림 27에 적용하면 (11)의 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{q}{A} = k \frac{T_1 - T_2}{B - 0} = k \frac{\Delta T}{B} \quad (11)$$

정상상태에서 열전도는 내화물의 두께와 온도 차이로 선형화 된다. 따라서 용강의 온도가 동일할 때 그림 28과 같이 내화물의 두께가 다른 상황에서의 표면 온도 변화의 차이는 (13)와 같다.

$$k \frac{T - T_1}{B_1} = k \frac{T - T_2}{B_2} \quad (12)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{B_2}{B_1} \quad (13)$$

표면 온도의 비는 내화물의 두께 비율로 나타남을 알 수 있다. 또한 유효복사율이 대상체의 복사율과 대기투과율의 곱으로 나타나는 사실에 기반하여, 아래와 같이 상대온도 정보를 이용하여 내화물의 열화도를 분석하는 온도비율 수치를 고안하였다.

$$r(i, j) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \frac{t_c(i, j)}{t_s} \quad (14)$$

여기서 S 는 분석하고자 하는 원형 영역의 크기에 의해 결정되는 개수 파라미터이며, $t_c(i, j)$ 는 국부열화 유무를 확인하고자 하는 지점의 온도를 t_s 는 원의 둘레에 있는 점들의 온도를 의미한다. 따라서 $r(i, j)$ 는 온도 비율 영상으로 나타나게 되고, $r(i, j)$ 의 값이 1 이상인 경우는 주변 보다 높은 온도를 의미하며, 1 이하인 경우는 주변보다 온도 값이 낮은 경우를 의미한다. 즉, 온도비율 수치는 주변 영역에 대한 중심부의 온도 비를 의미하며, 어떤 지점이 국부열화가 진행됨에 따라 증가하는 추세를 가진다.

그림 29. 온도차이가 있는 열화상 영상에 대한 온도비율영상.

Fig. 29. The temperature ratio image of nonuniform infrared image.

그림 30. 예시 래들의 열화상 온도 변화.

Fig. 30. Temperatures of an example ladle.

그림 29는 열화상 영상으로부터 생성된 온도비율영상을 나타낸다. 열화상 영상에 나타나는 위, 아래 부분의 온도 차이에도 불구하고 평활화 된 온도비율분포를 확인할 수 있다.

그림 30은 예시 래들(6번)의 기준이 되는 네 지점에 대한 열화상 영상 온도를 의미한다. 해당 래들에 대하여 그림 31(a)와 같이 9개 지점에 대한 온도비율 변화 추이는 그림 31(b)와 같다.

열화상 영상의 온도는 용강의 초기 온도 및 열화상 카메라 측정시의 대기 상태에 의해서 변화가 심하게 나타나며, 관측된 온도로부터 내화물의 열화정도를 측정하기 어렵다. 하지만 온도 비율 영상을 통해 온도 비율의 변화 추이를 보게 되면 거의 1에 가까운 값을 나타내며, 시간에 따른 열화 정도가 거의 없음을 확인 할 수가 있다. 열화상 영상의 온도에 영향을 주는 요인들과 무관하게 온도비율이 일정하게 유지됨을 확인할 수가 있다.

그림 31. 온도비율 관측 지점(a) 및 온도 비율 변화추이(b).

Fig. 31. Experimental points(a) and its temperature ratio changes.

그림 32. 가상 온도 상승 모델(a) 및 온도 특성 분포(b).

Fig. 32. Model(a) and distribution(b) for increasing temperature.

그림 33. 온도상승 모델을 적용에 대한 절대온도 비교.

Fig. 33. The temperature of the increasing temperature model.

실제 공장에서 획득한 데이터는 모두 정상 래들에 대한 영상들로서, 온도 비율 정보로부터 내화물의 열화도 측정에 대해 정상적인 값들이 표현됨을 확인 하였다. 하지만 실제 내화물의 열화로 인한 사고 데이터나 열화가 많이 진행된 데이터는 획득하기 어려웠다. 제안된 알고리즘의 열화도 판정에 대한 성능 확인을 위해서 가상의 열화 모델을 이용하였다. 표면의 온도 전도 특성을 고려하여 가우시안(gaussian) 함수로 근사한 온도 상승 모델을 사용하였다. 사용된 온도 특성 분포는 그림 32와 같다.

그림 33은 온도상승모델을 그림 33(a)의 가운데에 적용했을 때에 대한 온도그래프를 보여준다. 온도 자체만으로 온도의 상승을 관찰하기 위해서는 많은 수의 데이터를 확인 해야만 알 수 있다.

그림 34(a)의 중심부에 가상 온도 상승 모델을 적용하였으며, 그림 34(b)는 그림 34(a)의 아홉 개 지점에 대한 온도 비율 수치를 보여준다.

열화가 진행된다고 가정하였던 중심부의 온도비율 수치는 증가하는 반면 그 외의 부분에서는 거의 일정하거나 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

실제 열화상 카메라를 통해 관측되는 래들 표면의 온도 정보는 래들 용강의 초기 온도 및 측정과정에서 발생하는 대기 상태 노이즈로 인하여 신뢰 할 수 없다. 따라서 열화상 카메라의 온도만으로는 내화물의 열화정도를 알기 어렵다. 이에 정상 상태 열전도 특성 및 유효 복사율의 특성을 고려하여 열화상 카메라에서 측정된 온도의 비율 영상을

그림 34. 온도비율 관측 지점(a) 및 온도 비율 변화추이(b).

Fig. 34. Experimental points(a) and its temperature ratio changes.

생성하였고, 용강의 초기 온도 및 대기 상태의 변화에 무관하게 내화물 열화에 따른 온도 비율 변화를 관측하였다. 실제 공정에서 획득한 정상 영상에서 시간에 따라 일정한 비율을 나타냄을 확인 하였으며, 가상의 열화 모델에 대해서 열화 영역 위치에서만 열화에 따른 온도 비율 상승을 관측할 수가 있었다. 영상의 온도비율 수치 변화를 확인함으로써 내화물의 국부열화 유무를 파악할 수 있다.

VI. 결론

본 논문은 래들 내화물의 국부 열화정도를 분석하기 위한 열화상 카메라 시스템과 영상분석 기법에 대한 것이다. 제안하고자 하는 열화분석 기법은 크게 세 단계로 구성된다. 첫 번째 단계는 영상 시퀀스 형태로 저장된 정보에서 대표영상을 선정하는 동시에 초해상도 기법의 효율적인 적용을 위한 영상선정 과정이다. 두 번째 단계는 동일 번호 래들의 동일 지점에 대한 온도 변화 추이를 관찰하기 위한 기준점 검출 알고리즘이다. 마지막은 래들의 열화상영상에서 상대적인 온도 정보를 이용하여 내화물의 국부 열화 유무를 분석하기 위한 열화도 분석 알고리즘이다. 실제 철강 공정의 래들에 주변에 설치한 영상획득기기 한 대의 영상으로 실험하여 알고리즘의 실현가능성을 검토하였으며, 네 방향에서 영상을 획득하여 처리할 경우 래들의 모든 옆면에 설치되어있는 내화물의 국부 열화 정도를 분석할 수 있을 것이라 예상된다.

REFERENCES

- [1] B. R. Suresh, R. A. Fundakowski, T. S. Levitt, and J. E. Overland, "A real-time automated visual inspection system for hot steel slabs," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 5, no. 6, pp. 563-572, Nov. 1983.
- [2] V. Lashkia, "Defect detection in X-ray images using fuzzy reasoning," *Image and Vision Computing*, vol. 19, no. 5, pp. 261-269, Apr. 2001.
- [3] Y. J. Jang and J. S. Lee, "Development of a reliable real-time 3D reconstruction system for tiny defects on steel surfaces," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 12, pp.

- 1061-1066, 2013.
- [4] D. Choi, Y. Jeon, J. P. Yun, and S. W. Kim, "Pinhole detection in steel slab images using Gabor filter and morphological features," *Applied Optics*, vol. 50, no. 26, pp. 5122-5129, 2011.
 - [5] Y. Joo and K. Huh, "Robust defect size measuring method for an automated vision inspection system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 11, pp. 974-978, 2013.
 - [6] J. P. Yun, S. H. Choi, and S. W. Kim, "Real-time vision-based defect inspection for high-speed steel products," *Optical Engineering*, vol. 48, no. 3, Mar. 2009.
 - [7] M. Kano and Y. Nakagawa, "Data-based process monitoring, process control, and quality improvement: Recent developments and applications in steel industry," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 12-24, Jan. 2008.
 - [8] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, "Infrared thermography for condition monitoring - A review," *Infrared Physics & Technology*, vol. 60, pp. 35-55, Sep. 2013.
 - [9] C. A. Balaras, A. A. Argiriou, and T. Jayakumar, "Infrared thermography for building diagnostics," *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 2, pp. 171-183, Feb. 2002.
 - [10] B. B. Lahiri, S. Bagavathiappan, T. Jayakumar, and J. Philip, "Medical applications of infrared thermography: A review," *Infrared Physics & Technology*, vol. 55, no. 4, pp. 221-235, Jul. 2012.
 - [11] S. J. Lee, Y. Jeon, and S. W. Kim, "Development of a ladle analysis software using IR camera," *Proc. of ICROS (Institute of Control, Robotics and Systems) 2014 Daegu-Gyeongbuk Branch Conference (in Korean)*, pp. 29-32, Nov. 2014.
 - [12] M. Fidali and W. Jamrozik, "Diagnostic method of welding process based on fused infrared and vision images," *Infrared Physics & Technology*, vol. 61, pp. 241-253, Nov. 2013.
 - [13] S. C. Park, M. K. Park, and M. G. Kang, "Super-resolution image reconstruction: a technical overview," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 20, no. 3, pp. 21-36, May 2003.
 - [14] D. Capel and A. Zisserman, "Computer vision applied to super resolution," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 20, no. 3, pp. 75-86, May 2003.
 - [15] L.-K. Liu and E. Feig, "A block-based gradient descent search algorithm for block motion estimation in video coding," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 419-422, Aug. 1996.
 - [16] C. D. Evangelidis and E. Z. Psarakis, "Parametric image alignment using enhanced correlation coefficient max-

imization," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, no. 10, pp. 1858-1865, 2008.

- [17] R. Mehrotra, K. R. Namuduri, and N. Ranganathan, "Gabor filter-based edge detection," *Pattern Recognition*, vol. 25, no. 12, pp. 1479-1494, Dec. 1992.

이 상 준

2011년 포항공과대학교(POSTECH) 전자전기공학과(공학사). 2011년~현재 포항공과대학교(POSTECH) 전자전기공학과 석박사 통합과정 재학. 관심분야는 최적화, 기계학습, 패턴인식, 영상처리.

전 용 주

2008년 경북대학교 전자전기컴퓨터 공학부(공학사). 2010년 포항공과대학교(POSTECH) 전자전기공학과(석사). 2010년~현재 포항공과대학교(POSTECH) 전자전기공학과(박사과정 재학). 관심분야는 영상처리, 공정자동화, 패턴인식.

김 상 우

1983년 서울대학교 제어계측공학과(공학사). 1985년 동 대학원 제어계측공학과(공학석사). 1990년 동 대학원 제어계측공학과(공학박사). 1992년~ 2011년 포항공과대학교 전자전기공학과 교수. 2012년~현재 포항공과대학교 창의IT융합공학과/전자전기공학과 교수. 관심분야는 최적제어, 최적화 알고리즘, 지능제어, 공정자동화.