



코너 특정점 기반의 영상분석을 활용한 진공단열재 결함 검출

김범수^a, 양정현^a, 김연원^{b*}

^a경상국립대학교 기계시스템공학과, ^b목포해양대학교 해양메카트로닉스공학부

Defect detection of vacuum insulation panel using image analysis based on corner feature detection

Beom-Soo Kim^a, Jeonghyeon Yang^a, Yeonwon Kim^{b*}

^aDepartment of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

^bDivision of Marine Mechatronics, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

(Received 06 December, 2022 ; revised 12 December, 2022 ; accepted 15 December, 2022)

Abstract

Vacuum Insulation Panel (VIP) is an high energy efficient insulation system that facilitate slim but high insulation performance, based on based on a porous core material evacuated and encapsulated in a multi-barrier envelope. Although VIP has been on the market for decades now, it wasn't until recently that efforts have been initiated to propose a standard on aging testing. One of the issues regarding VIP is its durability and aging due to pressure and moisture dependent increase of the initial low thermal conductivity with time. It is hard to visually determine at an early stage. Recently, a method of analyzing the damage on the a material surface by applying image processing technology has been widely used. These techniques provide fast and accurate data with a non-destructive way. In this study, the surface VIP images were analyzed using the Harris corner detection algorithm. As a result, 171,333 corner points in the normal packaging were detected, whereas 32,895 of the defective packaging, which were less than the normal packaging, were detected. These results are considered to provide meaningful information for the determination of VIP condition.

Keywords : Vacuum insulation panel; Harris corner detection; Image processing; crumpled paper, aging test.

1. 서 론

화석에너지의 무분별한 사용으로 인한 배기가스 증가는 지구온난화의 주된 원인으로 알려져 있다. 특히 이산화탄소 배출을 증가시키며 인류에 전례 없는 심각한 위협을 가하고 있다[1]. 2015년 프랑스 파리에서 개최된 제21차 유엔기후변화협약(UNFCCC) 당사국총회(COP 21)의 핵심 결의안은 환경 건전성을 보장하면서 지속 가능한 개발을 촉진하는 조치였다. 이러한 국제사회의 흐름에

발맞추어 한국은 온실가스를 2030년 배출전망치(BAU) 대비 37% 감축하기로 협의하였고, 이를 위해 정부는 2018년부터 수준으로 법적 단열기준을 대폭 강화였다. 최근에는 패시브하우스, 제로에너지빌딩 등이 등장하면서 에너지 사용량을 최소화하는 동시에 독립적으로 관리할 수 있게 하고 있다. 그러나 전통적인 PF보드 등 유기단열재의 경우 가격 대비 우수한 단열성능으로 인해 주로 사용되고 있으나 관련 법규를 만족하기 위해서는 상당한 두께가 요구되고 있어 매우 제한적이라 할 수 있다.

이러한 환경 변화 속에 건축 분야에서는 충분한 단열성능이 확보되며 단열 두께를 최소화할 수 있는

*Corresponding Author: Yeonwon Kim
Division of Marine Mechatronics, Mokpo National Maritime University
Tel: +82-61-240-7237 ; Fax: +82-61-240-7835
E-mail: k.yeonwon@mmu.com

진공단열재(VIP: Vacuum Insulation Panel)가 재조명 받고 있다. VIP는 전통적인 단열재와 비교하여 얇은 두께로 매우 효율적인 단열기능을 수행한다.[2-4] 특히, 동일 구조체 내 공간 활용을 극대화할 수 있고, 특히 건축물 리모델링 시 면적손실 없이 최신 법적 단열성능을 충족할 수 있는 장점이 있어 전 세계적으로 사용량이 증가하고 있다 [5, 6]. VIP는 단위 두께당 높은 열 전도저항을 제공하는 외피재와 내부의 심재(다공성 충전재) 및 가스흡착재(getter)로 구성되어 있다. VIP의 설계 최적화, 열적 및 기계적 성능 평가 및 장기 내구성 평가에 관한 많은 연구가 이루어졌다 [7-10]. 이러한 노력으로 오늘날 VIP는 초기 비 노화 상태에서 최저 2~4mW/mK에서 25년 후 일반적으로 8mW/mK 전도율을 갖는 최첨단 단열성능을 나타내게 되었다. 그러나 VIP의 낮은 열 전도성은 내부 진공을 기반으로 하기에 외피의 물리적 손상이 발생하면 진공도 상승으로 인해 성능이 급격히 저하하게 된다[11]. 예를 들어, 시간이 지남에 따라 VIP의 초기 낮은 내압은 증가하는데, 이는 주로 밀봉 공정 후 패널에 남아 있는 잔류 가스, 코어 재료의 저장 가스 방출 및 외피 영역 전체로부터의 침투로 인해 발생한다[12]. 이러한 내압 증가에 의한 진공 불량은 작업자가 육안으로 조기에 판단하는 것은 불가능하기에 경우에 따라 단열재가 설치된 제품 전체를 폐기해야 할 수 있다. 종래는 단열재를 가열 후 열전도율을 측정방식으로 진공과외 여부를 검사하도록 하는 기술이 사용되고 있으나, 이러한 방법은 특정부분(중앙부) 검사 값만으로 양부판정이 이루어져 주변부의 단열불량을 판별하기 어려울 뿐만 아니라 검사에 긴 시간이 소모된다.

최근에는 영상처리기술을 이미지 분석에 적용하여 소재 표면을 분석하는 방법이 널리 이용되고 있다. 이러한 기술은 비파괴 분석 방법으로 빠르고 정확한 데이터값을 제공할 뿐만 아니라, 사물의 모서리(corner)와 같은 형태학적 구분이 가능한 장점을 가지고 있다. 이미지 처리에서 객체의 모서리 감지는 매우 중요한 요소로 영상의 가장자리 곡선에서 밝기가 급격하게 변화하는 지점이거나 곡률이 최대인 극점으로 일반적으로 인식되고 있다. 이와 관련하여 명암도 기반[13], 윤각기반[14] 및 모델기반 방법[15-17] 등 객체에서 모서리를 검출하는 연구가 진행되었다. 그 중 본 연구에서는 진공 단열재 표면 이미지 분석을 위하여

명암도 기반의 해리스 코너 검출 (Harris corner detection) 알고리즘 이용하여 진공단열재의 진공도 저하를 확인하고자 한다.

2. 접근방법

2.1. Harris corner 검출

Fig. 1은 Harris 모서리 검출을 이용한 각 영역에서의 명암도(intensity)의 변화량을 판별하기 위해 적용한 방법을 나타낸 이미지이다. Fig. 1(a)는 객체(파란색 영역)의 flat 영역, Fig. 1(b)는 경계(edge) 부분, Fig. 1(c)는 코너 부분에서 노란색으로 표시된 작은 윈도우를 위아래, 좌우로 이동하면서 윈도우 안에 있는 영역의 명암도의 변화량을 판별하였다. Flat한 영역에서는 윈도우 이동에 따라서 변화량이 매우 작으며, 변화량이 한 방향으로만 나타나면 경계 영역으로 판정하였으며, 변화가 수직, 수평 양방향으로 크게 나타나면 코너로 판정하는 방법이다. Harris 모서리 검출 알고리즘은 먼저 공분산 행렬(covariance matrix)를 구하기 위해서 다음 단계를 거친다[17].

step 1. 입력 이미지에서 x축, y축 미분을 구한다.

$$I_x = \frac{\partial I}{\partial x}, I_y = \frac{\partial I}{\partial y}, I_x I_y = \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y} \quad (1)$$

step 2. 모든 픽셀의 미분들의 곱을 구한다.

$$I_x^2 = I_x I_x, I_y^2 = I_y I_y, I_{xy} = I_x I_y \quad (2)$$

step 3. 공분산 행렬을 구한다.

$$M = \sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_{xy} \\ I_{xy} & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

step 4. 윈도우 shift 에 따른 에러 함수(error function)은 다음과 같이 정의한다.

$$E(u,v) = \sum_{x,y} w(x,y) [I(x+u,y+v) - I(x,y)] \quad (4)$$

여기서, $I(x+u,y+v)$ 는 shifted 명암도이고, $I(x,y)$ 는 명암도이다. 식 4는 쌍일차 근사화(bilinear

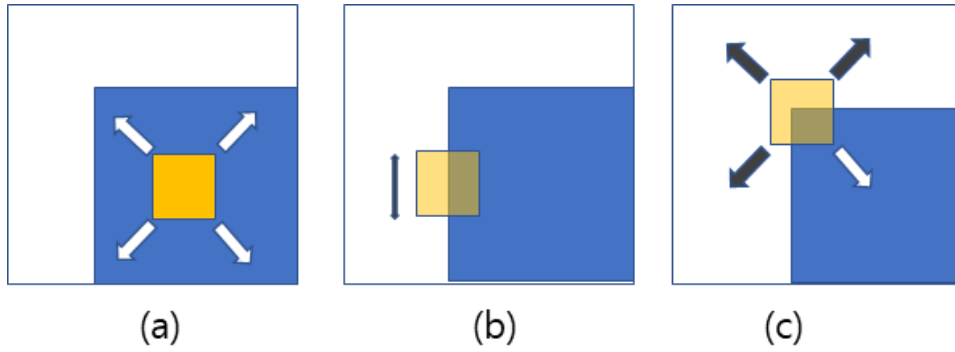


Fig. 1. Shifting the window and change the intensity. (a) flat: no change in all directions, (b) edge: no change along the edge direction, (c) significant change in all directions

approximation)를 통해 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$E(u, v) \simeq [u \ v] M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에서 α 는 실수 대칭행렬이므로 공분산행렬의 고유값은 모두 실수이고 서로 다른 고유값에 해당되는 고유벡터는 직교한다. 따라서 공분산행렬의 고유벡터 기저로 하는 좌표계는 Fig. 2와 같다. 윈도우가 만큼 shift 했을 때 명암도의 변화가 작으면 식(4)의 에러 함수 값이 작다는 것을 의미하고 이는 식 (5)에서 공분산 행렬의 고유값이 매우 작다. 즉 flat 영역일 경우 고유값은 Fig. 2의 원점 근방에 위치하게 된다. 고유값 중 어느 한쪽이 월등히 크면 Fig. 1-(b)에 해당되고, 이 경우 고유값들은 Fig. 2의 가로축이나 세로축에 가깝게 위치한다. 윈도우내에서 명암도 변화가 Fig. 1-(c)에서와 같이 모든 방향으로 크게 나타나면, 공분산행렬의 고유값은 Fig. 2의 corner로 표시된 영

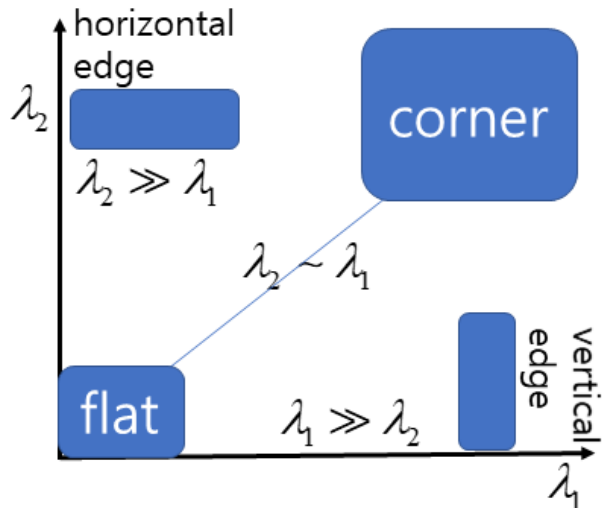


Fig. 2. Shifting the window and change the intensity. (a) flat: no change in all directions, (b) edge: no change along the edge direction, (c) significant change in all directions

역에 위치하게 된다.

식 (5)의 공분산 행렬의 고유값 (λ_1, λ_2)을 구하여 식 (6)으로 표현된 모서리 응답 측도(measure of corner response)[13]를 이용하면 모서리를 쉽게 판별할 수 있다.

$$R = \det(M) - \alpha \text{trace}(M)^2 = \lambda_1 \lambda_2 - \alpha (\lambda_1 + \lambda_2)^2 \quad (6)$$

여기서 α 는 0.04~0.06 인 파라미터이고, 이때 구해진 R 의 부호와 크기에 따라 주어진 윈도우 영역이 Fig. 2에서와 같이

- (1) $R < 0, ((\lambda_1 \ll \lambda_2) \text{ or } (\lambda_2 \ll \lambda_1))$: 경계
- (2) $R > 0, (\lambda_1 \sim \lambda_2)$: 코너
- (3) $R \ll 0, ((\lambda_1 \ll 1) \text{ and } (\lambda_2 \ll 1))$: flat

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3 (a)는 5개의 모서리를 갖는 도형 이미지이며, (b)는 이 도형을 Harris 모서리 검출하였을 때 모서리 지점으로 인식한 부분을 붉은색 점으로 표시한 이미지이다. Fig. 3 (a)의 5개 모서리가 모두 검출되는 것을 확인할 수 있었으며, 경계선 영역이 아닌 모서리부분만 검출되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3 (c)는 구겨진 종이(crumpled paper)의 이미지를 나타내며, (d)는 (c)의 구겨진 종이를 Harris 모서리 검출을 통해 검출된 영역을 붉은색 점으로 표시한 이미지를 나타내었다. Fig. 3(d)의 결과에서도 확인할 수 있듯이 명암도가 한 방향으로 변화가 일어난 경계선 영역이 아닌 다양한 방향으로 명암도 변화가 일어난 곳을 모서리로 인식하고 검출하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, crumpled paper에서 모서리의 검출은 빛을 이용한 물체 면에서의 불규칙적인 위상관계의 간섭 패턴에 의한 콘트라스트(contrast)의 변화를 분석

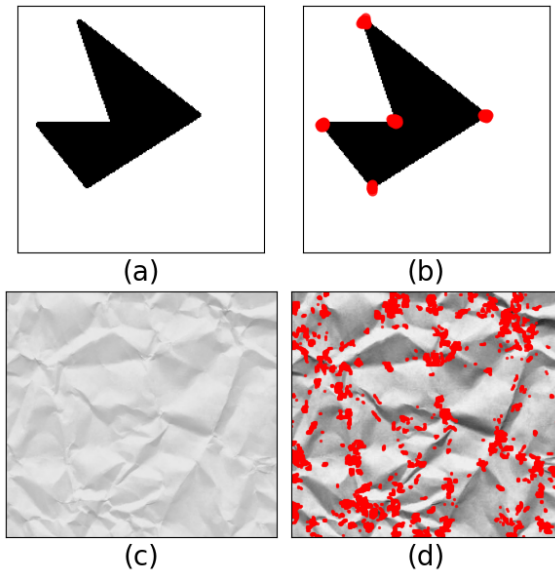


Fig 3. Harris corner detection examples (a) original image, (b) Harris corner detection for (a), red marks represent the corners of the polygon, (c) crumpled paper (d) red marks represent the corners of the crumpled paper.

하는 스페클 패턴(speckle pattern)에서도 유사한 연구 결과를 확인할 수 있었다[18].

Fig. 4 (a)에는 정상 진공단열재의 이미지를 나타내었으며, Fig. 4(b)에는 Harris 모서리 검출을 이용한 이미지 결과를 나타내었다. Fig. 4 (c)와 (d)에는 정상 진공단열재에 비해 구겨짐이 덜한 불량 진공단열재의 이미지와 Harris 모서리 검출을 이용한 이미지 결과를 나타내었다. Fig. 4(b)에 나타난 정상 진공단열재에서는 검출결과에서는 171,333개의 모서리가 검출되었으며, 정상 진공단열재에 비해 구겨짐이 덜한 불량 진공단열재인 Fig. 4 (d)에서는 32,895 개의 모서리가 검출되었다. 진공단열재의 경우에도, Harris 모서리 검출을 통해 정상과 불량품의 모서리 개수의 차이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, VIP의 비교분석이 가능한 것을 판단된다. 특히 불량 진공단열재의 경우, 한방향으로의 명암도가 변화가 관찰되는 영역 및 평평한 영역의 비율이 정상 진공단열재에 비해 많은 것을 Fig. 4 (c)와 (d) 이미지에서 확인이 가능하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 진공단열재 패널(VIP)의 표면 이미지로부터 Harris corner 검출 방법을 활용한 패널의 불량 여부 평가 결과를 나타내었다.

1. VIP 소재의 경우, 윈도우 이동에 따른 변화량

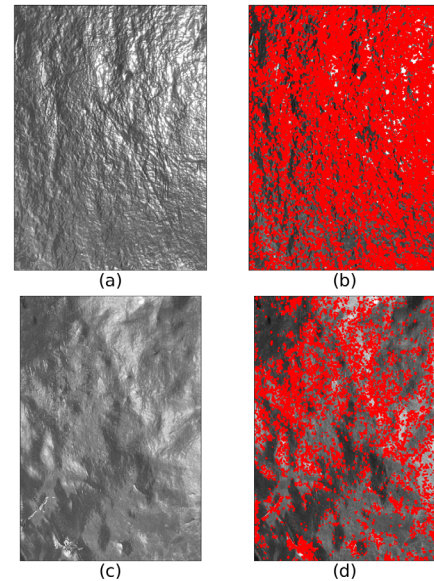


Fig 4. Harris corner detection for VIPs. (a) normal VIP, (b) Harris corner detections for the normal VIP, red marks represent the corners of the normal VIP (c) bad VIP (d) red marks represent the corners of the bad VIP.

이 작고 한방향으로만 나타나면 경계 부분으로 판정하고, 변화가 수직 및 수평 양방향으로 나타나면 코너로 판정되는 것을 확인할 수 있었다.

2. 정상 VIP의 경우 171,333개 모서리가 검출되었으며, 구겨짐이 적은 불량 VIP에서는 32,895개가 검출되었다.

이상의 결과로부터, Harris corner 검출 방법을 기반으로 한 이미지 분석은 VIP 외피불량에 대한 객관적, 정량적으로 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 검사방법의 효율적 적용을 위해 적절한 문턱값(threshold) 및 연구변수간의 상호의존성에 대한 누적데이터를 확보해야 하며, 이것은 VIP성능 평가에 대한 표준화된 성능 기준 마련을 위한 기초자료 및 품질예측 정보로 활용 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 과제(결과물)는 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과물입니다.(2022RIS-002)

REFERENCE

- [1] K. Dong, X. Dong, C. Dong, Determinants of the global and regional CO₂ emissions: what causes what and where?, *Appl. Econ.* 51 (2019) 5031-5044.
- [2] R. Caps, H. Beyrichen, D. Kraus, S. Weismann, Quality control of vacuum insulation panels: methods of measuring gas pressure, *Vacuum* 82 (7) (2008) 691-699.
- [3] J. S. Kwon, C. H. Jang, H. Jung, T. H. Song, Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels, *Int. J. Heat Mass Transfer* 52 (23) (2009) 5525-5532.
- [4] S.E. Kalnæs, B.P. Jelle, Vacuum insulation panel products: a state-of-the-art review and future research pathways, *Appl. Energ.* 116 (2014) 355-375.
- [5] A Binz, A. Moosmann, G. Steinke, U. Schonhardt, F. Fregnan, H. Simmler, S. Brunner, K. Ghazi, R. Bundi, U. Heinemann, H. Schwab, J. J. M. Cauberg, M. J. Tenpierik, G. Johannesson, T. Thorsell, M. Erb, B. Nussbaumer, Vacuum insulation in the building sector—Systems and applications (Subtask B), *IEA/EBC Annex 39* (2005) 1-134.
- [6] F. E. Boafo, Z. F. Chen, C. D. Li, B. B. Li, T. Z. Xu, Structure of vacuum insulation panel in building system, *Energy Build.* 85 (2014) 644-653.
- [7] C. D. Li, Z. C. Duan, Q. Chen, Z. F. Chen, F. E. Boafo, W. P. Wu, J. M. Zhou, The effect of drying condition of glassfibre core material on the thermal conductivity of vacuum insulation panel, *Mater. Design* 50 (2013) 1030-1037.
- [8] C. D. Li, Z. F. Chen, F. E. Boafo, Q. Chen, J. Zhang, J. M. Zhou, X. L. Ye, C. Y. Li, Determination of optimum drying condition of VIP core material by wet method, *Drying Technol.* 31 (10) (2013) 1084-1090.
- [9] C. D. Li, Z. F. Chen, F. E. Boafo, T. Z. Xu, L. Wang, Effect of pressure holding time of extraction process on thermal conductivity of glassfiber VIPs, *J. Mater. Process. Technol.* 214 (2013) 539-543.
- [10] D. Xiaobo, G. Yimin, B. Chonggao, H. Yongnian, X. Zhen'gang, Optimization of glass fiber based core materials for vacuum insulation panels with laminated aluminum foils as envelopes, *Vacuum* 97 (2013) 55-59.
- [11] J. Fricke, U. Heinemann, H. P. Ebert. Vacuum insulation panels—From research to market, *Vacuum* 82 (7) (2008) 680-690.
- [12] P. Porta, Gas problem and gettering in sealed-off vacuum devices, *Vacuum* 47 (6) (1996) 771-777.
- [13] H. Chris, M. Stephens, A combined corner and edge detector., *Alvey vision conference* 15 (50) (1988.) 10-5244.
- [14] L. Kitchen, A. Rosenfeld, Gray-level corner detection, *Pattern recognition letters* 1 (2) (1982) 95-102.
- [15] A. Guiducci, Corner characterization by differential geometry techniques, *Pattern Recognition Letters*, 8 (5) (1988) 311-318.
- [16] A. Singh, M. Shneier, Grey level corner detection: A generalization and a robust real time implementation, *Comput. graph. image process.*, 51 (1) (1990) 54-69.
- [17] P. Ram, S. Parvathy, Analysis of Harris corner detection for color images, 2016 International Conference on Signal Processing (2016) 405-410.
- [18] V. F. Rad, E. E. Ramírez-Miquet, H. Cabrera, M. Habibi, A. R. Moradi, Speckle pattern analysis of crumpled papers. *Applied Optics* 58 (24) 6549-6554.