

철강 후판의 표면 검사를 위한 융합조명계 설계

조은덕*·김경범**†

*한국교통대학교 대학원, **†한국교통대학교 기계자동차항공공학부

Fused Illumination Mechanism Design for Steel Plate Surface Inspection

Cho Eun Doek* and Kim Gyung Bum**†

*Graduate school, Korea National University of Transportation

**† Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation

ABSTRACT

In this paper, a fused illumination mechanism for detecting surface defects in steel plates was designed by applying the discriminant function that can differentiate the contrast of defects and non-defects. There is low contrast, non-uniformity, and no feature characteristics in steel plate surfaces. The fused illumination mechanism is devised, based on those characteristics. Optimum parameters of the fused illumination mechanism are determined by applying the discriminant function after acquiring the defect image in steel plate surfaces. The performance of the proposed mechanism is verified by experiments.

Key Words : Fused Illumination Mechanism, Steel plate, Defect detection, Discriminant function

1. 서 론

철강은 다양한 산업에서 수많은 용도로 사용되고 있다. 그 중 철강 후판의 쓰임이 전체의 50%를 차지하고 있고, 대표적으로 자동차용 강판과 선박 건조에 가장 많이 쓰이고 있다. 철강 후판의 수요가 증가함에 따라 품질 향상에 대한 요구도 증가하고 있다. 철강 후판의 품질 관리 목록 중에서도 표면 품질은 고객이 가장 우선적으로 관찰할 수 있고, 품질에 대한 평가를 내리기에 가장 중요하기 때문에 표면 품질 검사가 가장 철저해야 한다⁽¹⁾.

현재 대부분의 국내 철강 제조업체들이 보유하고 있는 자동 표면 검사 시스템은 결함 검출의 정확성은 우수하지만 결함을 분류하는 분류 능력은 매우 미흡하기 때문에 자동화 검사 이후 수동검사가 이루어지는 곳도 있다⁽²⁾.

본 연구에서는 저대비·비균일·무특징 철강 후판의 자동

검사 모듈 개발을 위해 철강 후판 결함의 특징에 대해 분석하고 결함의 정확한 분류를 위해 결함과 비결함 영역의 뚜렷한 구분이 되는 영상을 얻기 위한 기본 조명 메커니즘의 구조적인 특징을 이용한 융합된 조명 메커니즘을 이용해 영상을 획득하고 결함과 비결함의 차별화를 위한 판별 기준함수를 적용하여 융합조명계 설계를 제안하고자 한다.

2. 철강 후판 표면 결함

철강 후판의 표면 결함으로는 Fig. 1과 같이 스케일(scale), 스캐프(scab), 균열(crack), 이물흔(foreign object) 등의 요철 결함과 구멍 결함(hole) 등이 있다⁽⁴⁾.

철강 후판의 비결함 표면의 경우 조사된 조명의 정반사 성분이 주로 카메라 센서에 감지되며 결함 영역보다 밝게 나타난다. 결함 중 스캐프, 균열, 이물흔 등의 요철 결함 표면의 경우는 불완전 확산 반사 성분의 영향으로 비결함 영역보다 어둡게 나타난다.

†E-mail: kimgb@ut.ac.kr

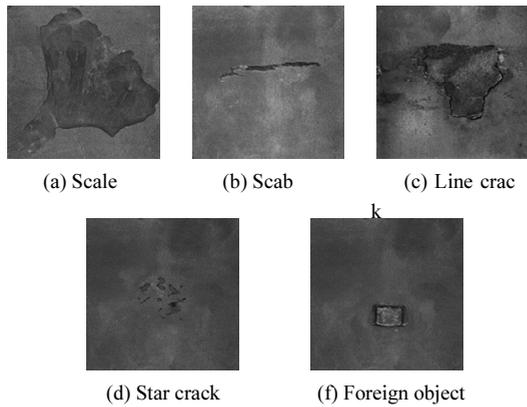


Fig. 1. Steel plate defects

철강 후판의 비결함 표면의 경우 조사된 조명의 정반사 성분이 주로 카메라 센서에 감지되며 결함 영역보다 밝게 나타난다. 결함 중 스캐, 균열, 이물흙 등의 요철 결함 표면의 경우는 불완전 확산 반사 성분의 영향으로 비결함 영역보다 어둡게 나타난다.

스케일의 경우 불규칙하고 면적이 타 결함에 비해 넓은 요철 결함 형상을 보인다. 스캐의 경우 스케일과 유사한 형태이지만 개재물 표면의 반사특성에 의해 비결함 표면과 가른 밝기 특성을 보인다. 피크랙은 횡방향으로 긴 요철 형태를 가지며, 스타크랙은 다른 크랙들에 비해 면적이 작고 불규칙한 모양과 배치를 갖는 요철 형태의 결함이다. 이물흙은 이물 혼입에 의해 발생하는 결함의 형태로 혼입되는 이물질의 형태에 따른 모양 특성을 가진 요철 결함이다. 구멍 결함에서는 표면에 흑연 층이 생성되어 빛을 흡수하는 성질이 있어 영상의 밝기가 어두운 특성이 있는 결함이다.

3. 융합조명계 최적화

3.1 기본 및 융합 조명 메커니즘

철강 후판 표면의 결함 영역과 비결함 영역의 차별화된 영상을 얻기 위해 적용한 기본 조명 메커니즘에는 단방향 경사조명(DI; directional illumination), 양방향 경사조명(BI; bi-directional illumination), 동축조명(CI; coaxial illumination), 돔조명(DOI; dome illumination)을 사용하였다.

Fig. 2의 단방향 경사조명(DI)은 표면이 불규칙한 경우 확산 반사를 발생시켜 요철 결함이 있는 표면의 영상을 취득하기 유리하지만 영상이 어둡게 나오는 경향이 있다. 이 단점을 보완하기 위해 양방향 경사조명(BI)을 사용한다. 동축조명(CI)은 카메라와 조명을 동일한 축에 위치시켜 표면에 정반사 되는 성분을 카메라에 탐상 되며 시야

내의 균일하고 높은 조도의 영향을 줄 수 있는 장점이 있으며 구멍결함이나 반사 특성이 적은 표면에 사용이 용이하다. 돔조명(DOI)의 경우는 어떠한 형상의 대상물에도 균일한 조도의 영향을 주며 가장 큰 장점은 그림자를 만들어 내지 않기 때문에 요철 결함에서 그림자의 영향없이 영상을 획득할 수 있다.

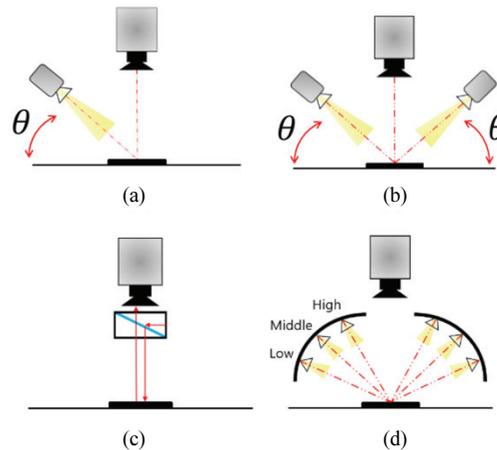


Fig. 2. Basic illumination mechanism, (a) Directional illumination, (b) Bi-directional illumination, (c) Coaxial illumination, and (d) Dome illumination.

융합 조명 메커니즘의 사용은 위에서 언급한 기본 조명들의 특성을 고려하여 기본 조명 메커니즘을 사용해 얻는 영상보다 결함 영역과 비결함 영역이 차별화된 영상을 얻는 것에 있다.

Fig 3 (a)와 같은 BI&CI은 경사조명의 영향으로 요철 결함 부분에 발생할 수 있는 그림자의 영향을 줄이기에 효과가 있다.

Fig 3 (b)의 경우 DOI&CI은 일반적으로 불규칙한 표면 결함의 형태에도 균일하고 밝으며, 그림자의 영향을 받지 않는 영상을 얻을 수 있다.

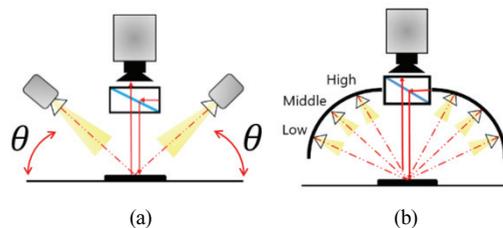


Fig. 3. Combination illumination mechanism, (a) Bi-directional & Coaxial illumination and (b) Coaxial & Dome illumination.

3.2 조명 메커니즘의 변수에 따른 영상 획득

철강 후판의 표면 결함 영역과 비결함 영역의 차별화를 극대화 할 수 있는 조명계 변수를 최적화 하기 위해 기본 조명과 조합 조명의 변수를 다양화 하여 영상을 획득하였다.

Fig 2의 기본 조명에서 DI과 BI은 결함 시편과 조명의 각도에 따른 영향을 알아보기 위해 θ 를 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 의 범위에서 10° 간격으로 각도를 조정하여 각 5장의 영상을 획득하였다. Fig 3 (d)와 같은 DOI은 높이에 따라 상(high), 중(middle), 하(low) 3개의 채널별로 컨트롤할 수 있는 컨트롤러를 이용, 상, 중, 하, 상중, 상하, 중하, 상중하의 조명이 조사된 총 7장의 영상을 획득하였고, BI&CI에서 BI과 같은 조건인 각도 별 영상 5장, DOI&CI에서 채널 별 7장씩의 영상을 획득하였다.

5가지 조명계 변수와 5가지 결함 시편을 이용하여 DI 영상 25장, BI 영상 25장, DOI 영상 35장, BI&CI 영상 25장, DOI&CI 영상35장, 총145장의 각각 조명계 변수를 다르게 적용한 영상을 획득하였다.

3.3 판별 기준함수

판별 기준함수(DF; discriminant function)는 어떠한 패턴이나 특징 등이 여러 개의 군으로 나누어져 있을 때, 어떤 개체가 어느 군에 속하는 가를 판별할 때 쓰이는 함수이다. 본 연구에서 사용된 판별 기준함수는 두 영역의 분리도를 차별화할 수 있는 특징을 가진 판별 함수를 이용하고자 한다.

조명 메커니즘의 최적 변수를 판단하기 위해 조명 변수 별 영상에 판별 기준함수를 적용하고, 분리도를 나타내어 최적 조명 변수를 결정할 수 있다. 결함 영역과 비결함 영역의 분리도를 나타내기 위해 각 영역의 밝기 값의 평균과 분산을 이용한 Fisher Ratio⁽⁶⁾와 각 영역의 경계선 정보를 이용해 분리도를 나타내는 Tenengrad Euclidian⁽⁷⁾함수를 사용하여 조명 변수 별 분리도를 나타내었다.

3.3.1 Fisher Ratio

영역간의 분리도를 판단하기 위해 주로 사용되는 판별 기준함수이다. 획득 영상에서 비교 대상인 두 영역의 픽셀 값의 분산이 작고, 평균 값의 차가 클수록 분리도가 크게 나타나는 특성이 있다.

$$DF_{FR} = \frac{(m_1 - m_2)^2}{v_1 + v_2} \quad (1)$$

획득 영상에 Fisher Ratio를 적용하기 위해 결함영역과 비결함 두 영역의 픽셀 값을 행렬화 하고 각 영역의 평균

픽셀 값과 분산 값을 계산하여 위의 (1)식에 대입하여 분리도를 계산한다. 여기서 m_1, m_2 는 결함과 비결함 영역의 평균 밝기 값을 나타내고, v_1, v_2 는 결함과 비결함 영역 밝기 값의 분산을 나타낸다. 이 계산 값이 크면 클수록 두 영역의 분리도가 크다고 판단할 수 있다.

3.3.2 Tenengrad-Euclidian 함수

Tenengrad-Euclidian 함수⁽⁷⁾는 식 (2)에 표현된 것처럼 결함 영역이 포함된 영상의 경계선 정보(F_{TE-d})와 비 포함된 영상의 경계선 정보(F_{TE-df})의 차를 이용한다.

$$DF_{TE} = (F_{TE-d} - F_{TE-df}) \quad (2)$$

$$I(x, y) = \sqrt{[I_x(x, y) + I_y(x, y)]^2}$$

$$F_{TE} = \sum_x \sum_y I(x, y)^2, I(x, y)^2 > T$$

$I(x, y)$ 는 소벨 1차 미분 마스크를 적용한 영상이며, 이 영상의 모든 픽셀값을 더하여 나타낸 경계선 값이 F_{TE} 이다. 잡음의 영향을 줄이기 위해 임계값 T 를 정의하여 T 값 이상의 픽셀값 만을 경계선 값으로 획득한다. 이 함수 역시 계산 값이 클수록 두 영역의 분리도가 크다고 판단한다.

4. 판별 기준함수 성능 비교

기본 조명 메커니즘과 융합 조명 메커니즘을 적용하여 획득한 영상에 판별 기준함수를 적용하여 각 결함 별 적합 영상과 비적합 영상으로 분류하였다.

4.1 Fisher Ratio 적용 결과

Fisher Ratio를 적용한 결과를 각 조명계 별 최대 분리도를 갖는 조명 변수 데이터를 이용, 각 결함 별 최대 Fisher Ratio값을 갖는 조명계를 Fig 4와 같이 그래프로 나타냈고, 각 결함 별 최대 Fisher Ratio값을 갖는 조명 변수를 Table1을 이용해 나타냈다. 적용 결과 최대 누적 조명계로 나타난 DOI를 적용한 영상을 적합 영상으로 하고, 낮은 분리도의 경향을 BI & CI를 적용한 영상을 부적합 영상으로 하여 비교하였다.

적합영상(Best images)과 부적합 영상(Worst images)을 Table 2에 나타냈으며, 적합 영상 중 결과는 적합 영상이라고 나타났으나 육안으로 확인하기에는 결함 영역과 비결함 영역의 구분이 확실하게 나타났다고 볼 수 없고 부적합 영상에서 적합 영상에서 보다 구분이 더 확실하였다. Table 3는 결함 영역(defect area; DA)과 비결함 영역(defect free

area; DFA)을 어느 영역으로 선택하느냐에 따라 분리도가 어떤 영향을 나타내는지 나타낸 결과이다. 여기서 DA1과 DFA1 영역을 이용해 Fisher Ratio를 계산한 결과와 DA1과 DFA2 영역을 이용해 계산한 결과가 다른 것을 볼 수 있다.

Fisher Ratio는 철강 후판의 표면 잡음 성분 등으로 인해 픽셀 값이 고르지 못한 특성이 있기 때문에 결함 영역과 비결함 영역의 선택 영역에 따라 분리도가 다르게 나타나는 문제점을 알 수 있었다.

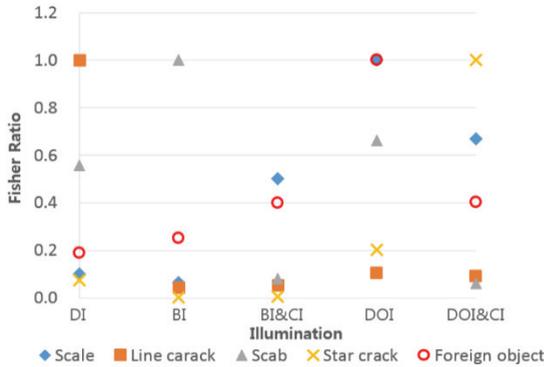


Fig. 4. Fisher Ratio results by illumination mechanisms.

Table 1. Illumination systems with maximum Fisher ratio

판별 기준함수	결함종류	최적조명 (변수)	최대누적 조명
Fisher Ratio	Scale	DOI (Middle)	DOI (Middle)
	Scab	BI(30°)	
	Line crack	DI(50°)	
	Star crack	DOI&CI (Low)	
	Foreign object	DOI(Middle)	

Table 2. Image results by Fisher ratio

Defects	DOI Image (Best images)	BI & CI Image (Worst images)
Scale		
Scab		

Line crack		
Star crack		
Foreign object		

Table 3. Fisher Ratio value according to area selection

Line crack image		
	DFA 1	DFA 2
DA 1	0.2438	0.0174
DA 2	0.1993	0.0548
DA 3	0.0625	0.1495

4.2 Tenengrad-Euclidian 함수적용 결과

Tenengrad-Euclidian 함수 또한 마찬가지로 Fig. 5와 Table 4를 이용하여 각 결함 별 최적 조명을 나타내는 그래프와 최대 Tenengrad-Euclidian 값을 갖는 조명 변수를 Table 4을 이용해 나타냈다. 적용 결과 최대 누적 조명계로 나타난 BI & CI를 적용한 영상을 적합 영상으로 하고, 분리도가 가장 낮은 경향으로 나타난 DI를 적용한 영상을 부적합 영상으로 하여 비교하였다.

적합 영상(Best images)과 비 적합 영상(Worst images)을 Table 5와 같이 나타냈고, 비교한 결과 Fisher Ratio를 적용한 결과와는 반대로 부적합 영상 보다 적합 영상에서 결함 비결함의 구분이 확실한 것을 직관적으로 알 수 있다.

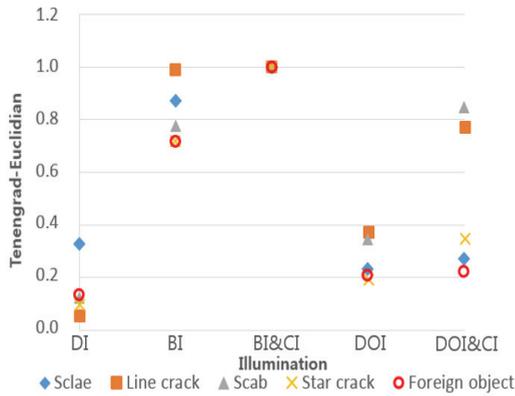


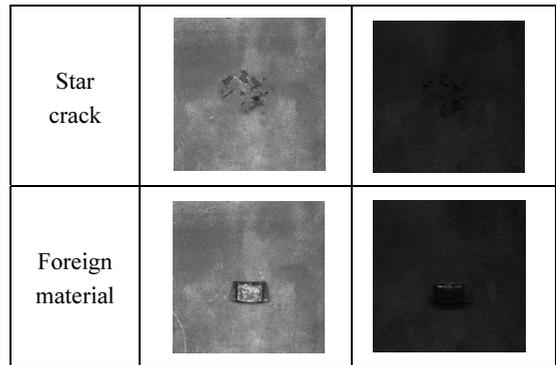
Fig. 5. Tenengrad-Euclidian result by illumination mechanism.

Table 4. Illumination variables with maximum Tenengrad-Euclidian

판별 기준함수	결합종류	최적 조명 (변수)	최대누적 조명
Tenengrad-Euclidian	Scale	BI&CI(70°)	BI&CI (70°)
	Scab	BI&CI(60°)	
	Line crack	BI&CI(70°)	
	Star crack	BI&CI(70°)	
	Foreign object	BI&CI(70°)	

Table 5. Image result by Tenengrad-Euclidian

Defects	BI&CI Image (Best images)	DI Image (Worst images)
Scale		
Scab		
Line crack		



5. 융합조명계 선정

Fisher Ratio함수와 Tenengrad-Euclidian 함수를 적용한 결과를 통해 최적 메커니즘을 선정하였다. Fisher Ratio는 적합 영상보다 비 적합 영상에서 결함, 비결함 영역의 구분이 더 확실하고, 선택 영역에 따라 분리도가 달라지는 문제점이 있다. 따라서 Tenengrad-Euclidian 함수를 판별 기준함수로 선정하였다. 이를 적용한 5가지 결합의 적합 영상을 이용하여 적합 조명계를 도출하고, 가장 많은 누적 수를 갖는 조명 변수를 최적 조명 메커니즘으로 선정한다. 그 결과 Table 4에 나타난 것과 같이 가장 많은 누적수를 갖는 양방향 경사조명과 동축조명을 조합한 조명계(BI&CI)를 최적 조명 메커니즘으로 선정하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 철강 후판의 표면결함에 대해 분석하고 결함 영역과 비결함 영역의 대비의 차별화를 위해 판별 기준함수를 선정하였다. 그 결과 Tenengrad-Euclidian 함수가 Fisher Ratio함수에 비해 결함과 비결함 영역의 구분을 더 확실하게 나타냈다. 또한, 선택 영역의 따른 분리도의 비 일관성을 나타내는 Fisher Ratio함수의 문제점을 극복하여 Tenengrad-Euclidian 함수를 최적 판별 기준함수로 선정하였다. 본 연구에서는 이 판별 기준함수를 이용하여 모든 결함에서 대응할 수 있는 양방향 경사조명과 동축조명을 조합하는 융합조명계를 선정하고 이에 대한 최적 변수를 도출하였다.

감사의 글

이 논문은 정부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구 지원사업 (2015R1D1A1A01056691)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bae, H. M., Park, C. H., Yun, J. P. and Choi, S. H., "Optic Method for Surface Defect Inspection of Cold Strip", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, pp.61-64, 2014.
2. Nirbhar Neogi, Dusmanta K Mohanta, Pranab K Dutta, "Review of vision-based steel surface inspection systems", *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, pp.1-5, 2014.
3. Kim, S. J., Cho, E. D., Kim, G. B., "Surface defect analysis of steel plate and investigation of illumination parameters for surface inspection", *Proceedings of IPIU 2017*, 2017.
4. Moon, C. I., Choi, S. H., Joo, W. J., Kim, K. B. and Kim, C. H., "Development of a Neural Network Classifier for the Classification of Surface Defects of Cold Rolled Strips", *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol.24, No.4, pp. 79, 2007.
5. Kim, D. I., Lee, S. H., Kim, K. B., "Development of Plate Surface Defect Detection Technique using Image Processing", *Journal of ICROS*, Vol.30, pp.447-448, 2015.
6. Do, L. N., Yang, H. J., "Classification of Cognitive States from MRI data using Fisher Discriminant Ratio and Regions of Interest", *International Journal of Contents*, Vol.8, No.4, pp.3-4, 2012.
7. Lee, S. H., Kim, J. H., Choi, B. T., Ko, S. J., "Autofocusing Algorithm for Video Camera using the Difference of Medians", *Journal of KICS*, Vol.23, No.1, pp.41-51, 1998.

접수일: 2017년 8월 3일, 심사일: 2017년 9월 18일,
 게재확정일: 2017년 9월 22일