

표면 검사를 위한 조도 균제도 기반 하이브리드 조명계 설계

조은덕*·김경범**†

*한국교통대학교 대학원, **†한국교통대학교 기계자동차항공공학부

Hybrid Illumination System Design based on Illuminance Uniformity for Surface Inspection

Cho Eun Deok* and Kim Gyung Bum**†

*Graduate school, Korea National University of Transportation

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

ABSTRACT

In this paper, the hybrid illumination system for effectively detecting surface defects in steel plate with low-contrast, non-uniformity and featureless is designed based on illuminance uniformity. First of all, characteristics of steel plate defects were considered and typical inspection illumination system is implemented. Optimum illumination parameters for uniformly illuminating an inspection area in the typical illumination system are selected based on the illuminance uniformity and illuminance distribution measurement. The illuminance uniformity and illuminance distribution are measured using an illuminometer based on the arduino. Through illuminance distribution analysis of the typical illumination, an hybrid illumination is designed by fusing bi-directional illumination and coaxial illumination. The hybrid illumination showed higher uniformity ratio and illuminance distribution than the typical illuminations. The hybrid illumination system showed the ability to uniformly illuminate the entire inspection region of steel plate surface.

Key Words : Hybrid Illumination System, Illuminance Uniformity, Surface Defect, Surface Inspection

1. 서 론

우리나라의 철강산업은 1980년 이후로 급격히 성장하여 2016년도 기준 세계 6위의 조강능력을 가지고 있으며, 양적 성장 보다는 질적 성장 전략을 추진하고 있다. 제품의 질적 성장을 위해 품질을 검사하는 검사장비에 대한 필요성 또한 중요시 되고 있다. 하지만 현재 철강 검사 공정에서 주로 쓰이는 자동화 검사 장비는 주로 국외 제품이 주로 사용되고 있다. 철강 후판은 표면 품질에 따라 조선용 판재, 압력 용기용, 용접구조용 등으로 아주 다양

한 산업 분야에서 쓰이고 있지만, 이를 검사하기 위한 자동화 표면 검사 장비에 대한 개발이 미비한 실정이다[1-3]. 표면 검사를 위한 자동화 검사 장비 개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있지만, 표면결함을 효과적으로 검출하기 위한 조명 메커니즘에 대한 연구는 아직 부족한 상황이다. 이러한 이유는 철강이 생성되는 환경이 고온의 환경, 먼지, 기름, 수증기가 매우 혼잡하기 때문에 이러한 요소들에 있어서 검사장비(카메라, 조명계, 신호처리장비 등)에 적절한 물리적, 환경적으로 강건한 검사장비의 개발이 어렵다. 또한 철강 후판 표면의 영상은 저대비·비균일·무특징의 특성이 있어 결함과 비결함 영역을 뚜렷이 구분할 수 있는 조명 시스템의 개발이 어렵기 때문이다. 따라서

†E-mail: kimgb@ut.ac.kr

자동화 표면 검사장비 개발의 어려움에 대응하여 결함을 효과적으로 검출하기 위한 조명 시스템 개발 연구의 필요성이 있다.

본 연구에서는 철강 후판 표면결함의 표면 특성을 고려하고, 기본 조명계의 조도 균제도와 조도 분포 측정을 통한 보정을 통해 최적 조명조건을 선정하였다. 이 최적 조명조건에 대한 기본 조명계들의 조도분포를 분석하여 양방향 경사 조명과 동축 조명을 융합한 실험계획법 기반 하이브리드 조명계를 설계하였다. 이에 대한 성능은 저대비·비균일·무특징 표면인 철강 후판을 대상으로 수행한 결과, 만족할 만한 결과를 얻었다.

2. 조도 균제도 기반 기본 조명계 분석

철강 후판의 표면결함에는 대표적으로 스케일(Scale), 스캐프(Scab), 균열(Crack), 이물흡(Foreign-object), 구멍(Hole) 등이 있다. 이러한 결함들은 표면이 오목하게 패이거나, 볼록하게 나온 요철형태의 표면결함이다. 이러한 철강 표면 영상은 저대비·비균일·무특징의 특성을 갖는다. 이러한 철강 후판 표면의 특성을 고려하여 우선, 조명계 분석을 위해 단방향 경사조명, 양방향 경사조명, 동축 조명, 돔조명으로 구성하였다[4].

표면결함 검사를 위한 검사 광학계의 조명계는 검사되는 영역을 전체적으로 균일하게 조사하고, 결함과 비결함의 대비를 잘 나타내어 뚜렷이 영상화해야 한다. 임의의 위치와 높이, 조명의 세기로 구성된 검사 광학계의 조명계는 매우 불균일한 조도분포와 낮은 조도 균제도를 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 각 조명계에서 조도 균제도와 조도분포에 영향을 줄 수 있는 제어인자를 선정하고, Fig. 1과 같이 아두이노를 이용해 구현한 조도 측정기를 사용하여 조도 균제도(illuminance uniformity)를 기반으로 기본 조명계를 분석하였다. 이를 위해 각 조명계의 조도 균제도와 조도분포 측정은 KS C 7612에 명시된 4점법을 이용해 평균조도를 측정하여 산출된다. 총 32개의 일정 간격의 측정점을 가진 조도측정기를 9개의 영역으로 나누어 조도를 측정하고, 식 (1)을 이용하여 조도 균제도를 나타낸다.

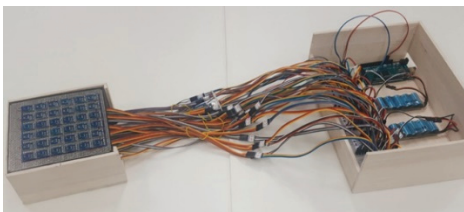


Fig. 1. Implemented Arduino illuminometer.

이를 통해 각 조명계가 검사영역 전체를 가장 균일하게 조사할 수 있는 최대 조도 균제도와 최적의 조도분포를 갖는 최적 조명조건을 도출한다.

$$U_1 = E_{\min} / E_{\text{ave}} \quad (1)$$

여기서 E_{\min} 은 9개의 영역중의 최저 평균조도, E_{ave} 는 전체영역의 평균조도를 의미한다. 또한 이러한 방법으로 측정된 각 영역의 평균조도를 이용하여 전체영역의 조도 분포를 나타낸다.

각 조명계의 조도 균제도와 조도분포에 영향을 줄 수 있는 제어인자는 조명계가 구성될 수 있는 제한적 공간에서의 물리적 위치와 높이, 조명의 세기 등으로 선정고 모든 제어인자의 수준을 3단계로 나누어 실험을 진행하였다.

단방향 경사조명의 보정 실험에서의 제어인자는 Fig. 2 (a)와 같이 조명과 측정물 간의 높이(24/26/28cm), 조명의 세기(약/중/강)를 제어인자로 선정하고 각 인자들의 변화에 따른 조도 균제도와 조도분포를 측정하였다. Fig. 2 (b)의 양방향 경사조명은 단방향 경사조명을 양쪽으로 배치하는 구조이기 때문에 두 조명간의 거리를 추가적으로 선정하여 조명과 측정물 간의 높이(24/26/28cm), 조명의 세기(약/중/강), 두 조명간의 거리 변화(5/7.5/10cm)에 따른 조도 균제도와 조도분포를 측정하였다. Fig. 2 (c) 동축 조명의 경우 단방향 경사조명과 같은 조명과 측정물 간의 높이(30/32/34cm), 조명의 세기(약/중/강)를 제어인자로 선정하였다. Fig. 2 (d) 돔 조명의 경우는 반구의 형태를 갖고 있어 영상 획득을 위해 제한된 위치와 높이로 구성 되고, 제어인자는 높이 별 3개의 채널(1/2/3channel)과 각 채널의 조명의 세기(약/중/강)로 선정하였다.

각 조명계의 최적 조명조건을 찾는 기본 조명계의 조도 균제도 분석 결과를 Table 1에 나타내었다.

먼저 Table 1에서 단방향 경사조명에서의 최적 조명조건은 조명의 높이 26cm, 조명의 세기 중에서 조도 균제도가 0.65로 나타났지만, 이 조건에서의 조도분포를 보면 한쪽에 치우친 분포를 볼 수 있다. 이는 한 방향에서의 조명 조사로 인해 조명에 가까운 부분이 더 높은 조도 분포를 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 전체영역을 균일하게 조사하기 위한 검사 조명계로는 부적합하다고 판단하였다.

양방향 경사조명에서는 조명의 높이 24cm, 두 조명간의 거리 5cm, 조명의 세기 중으로 조도 균제도가 0.96으로 매우 높은 수치를 나타냈으며, 조도 분포에서는 대칭성이 있고 전체적으로 균일한 조도 분포를 나타냈다. 하지만 중심부분의 조도가 양쪽 부분의 조도보다 낮게 분포하였다. 이는 양 조명간의 간섭이 일어나지 않는 영역에서 낮은 조도분포를 나타내는 것으로 판단하였다.

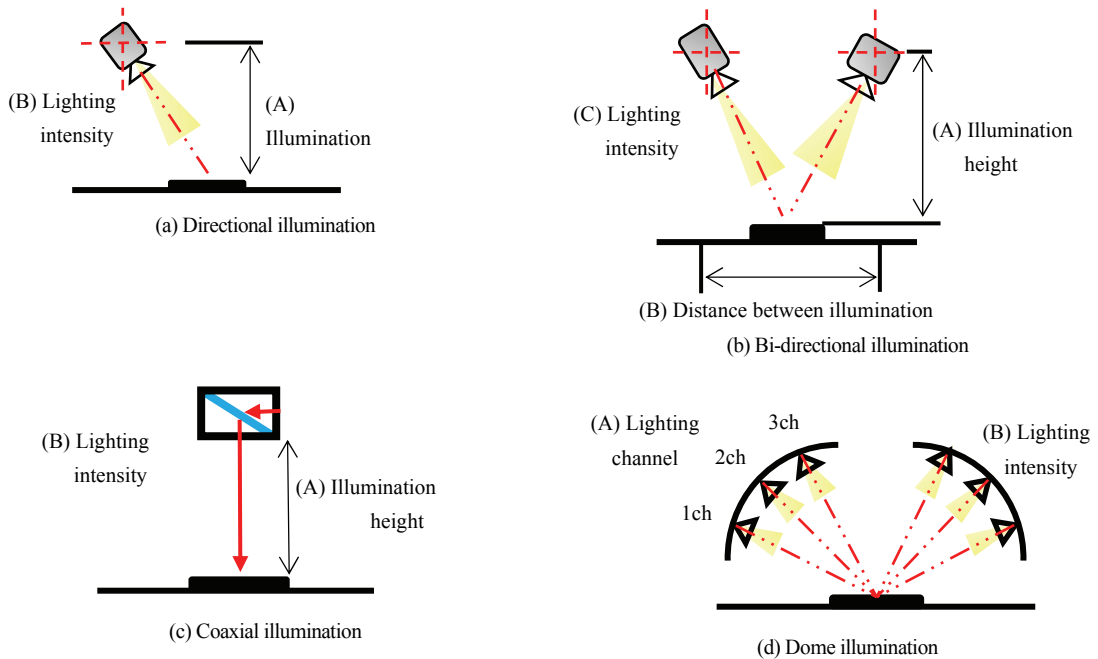


Fig. 2. Factors of illumination system calibration.

Table 1. Illuminance uniformity based analysis results of typical illuminations

Illumination	Directional illumination	Bi-directional illumination	Coaxial illumination	Dome illumination
Factors	(A) Illumination height (B) Light intensity	(A) Illumination height (B) Distance between illumination (C) Light intensity	(A) Illumination height (B) Light intensity	(A) Illumination channel (B) Light intensity
Optimal factors	(A) 26cm (B) Middle	(A) 24cm (B) 5cm (C) Middle	(A) 34cm (B) Low	(A) 1+2channel (B) High
Illuminance uniformity	0.65	0.96	0.85	0.89
Optimum illuminance distribution				

동축 조명의 실험결과는 조명의 높이 34cm, 조명의 세기 하로 조도 균제도가 0.85로 높은 균제도를 나타냈지만 조도분포에서 중심부분이 양 측면에 비해 높은 조도분포를 나타냈다.

돔 조명의 경우 제어인자와 수준을 변화하며 실험한 결과 모든 조건에서 그림과 같은 동일한 조도 분포를 나타냈으며, 조도 균제도의 변화는 0.83-0.89로 매우 근소한 차이였다. 하지만 조도 분포를 분석해 보면 모든 모서리 부분에서 낮은 조도분포를 나타낸 것을 알 수 있다. 돔

조명으로 검사영역 전체를 균일하게 조사하기 위해서는 측정영역에 비해 매우 큰 조사영역을 갖는 돔 조명이 필요할 것으로 판단된다.

Table 1의 기본 조명계들의 조도분포 중 양방향 경사조명과 동축 조명의 조도분포를 분석해 보면 두 조명을 조합하여 사용할 경우 단일적으로 사용된 조명의 조도 균제도와 조도분포 보다 더 향상된 성능을 나타낼 것으로 판단하였다. 따라서 두 기본 조명계를 융합하여 하이브리드 조명계를 설계하였다.

3. 하이브리드 조명계 설계

3.1 하이브리드 조명계

양방향 경사조명과 동축 조명의 최적 조명조건에서 조도 균제도 기반 조도분포를 비교를 통해, 두 조명계를 융합한 하이브리드 조명계(hybrid illumination)를 설계하였다. 설계된 하이브리드 조명계는 Fig. 3과 같으며, 하이브리드 조명계 또한 최대 균제도와 조도분포를 갖는 최적 조명 조건 선정에 위한 실험을 진행하였다. 실험은 실험계획법 중 다구치 방법(Taguchi method)을 적용하였다[5,6]. 다구치 방법은 직교배열표를 사용하여 최소한의 실험횟수로 전체실험과 매우 유사한 결과 데이터를 얻을 수 있다. 여기서, 실험의 특성치인 S/N비(Signal to noise ratio)는 망대특성(Larger-the better type characteristic)을 이용하였다.

3.2 하이브리드 조명계의 최적 조명조건

하이브리드 조명계의 최적 조명조건을 선정하기 위해 양방향 경사조명과 동축 조명의 조도 균제도 기반 분석 결과를 토대로 조도 균제도와 조도분포에 가장 큰 영향을 끼칠 것으로 예상되는 제어인자를 선정하였다. 양방향 경사조명의 제어인자는 두 조명간의 거리와 조명의 세기이며, 동축 조명은 조명의 높이와 조명의 세기로 선정하여, Fig. 4와 같이 총 4개의 제어인자와 그 수준을 3단계로 하여 실험을 진행하였다.

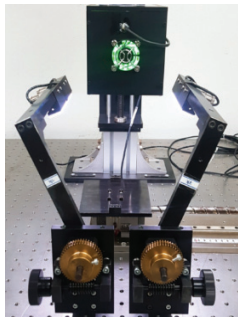


Fig. 3. Hybrid illumination.

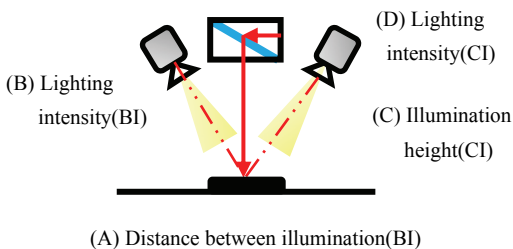


Fig. 4. Hybrid illumination.

Table 2. Selected Factors and levels of hybrid illumination

Factors	level		
	1	2	3
(A) Distance between BI	5	7.5	10
(B) Light intensity of BI	Low	Middle	High
(C) Height of CI	30	32	34
(D) Light intensity of CI	Low	Middle	High

Table 3. Experiment results of hybrid illumination

No	Factors				Uniformity ratio	S/N(η)
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	0.94	9.30
2	1	2	2	2	0.98	9.39
3	1	3	3	3	0.96	9.37
4	2	1	2	3	0.92	9.20
5	2	2	3	1	0.95	9.33
6	2	3	1	2	0.93	9.26
7	3	1	3	2	0.90	9.10
8	3	2	1	3	0.90	9.11
9	3	3	2	1	0.92	9.20

Table 4. ANOVA summary table

Factors	DOF	Sum of squares	Mean of squares	F value
(A)	2	0.0723	0.0361	10.3321
(B)	2	0.0102	0.0051	1.4527
(C)	2	0.0033	0.0017	0.4782
(D)	2	0.0038	0.0019	0.5473
Sum	8	0.0904		
Error	4	0.0140	0.0035	

Table 2는 선정된 제어인자와 그 수준을 나타낸 것이다. Table 3는 직교배열표와 함께 측정된 조도 균제도와 망대 특성으로 간주하여 계산한 S/N비를 나타낸 것이다. 서로 다른 인자들이 조도 균제도에 영향을 주는 효과는 Table 2의 각 인자수준에 대한 S/N비로 알 수 있다.

Table 4는 분산분석(ANOVA)을 실시한 결과이다. 양방향 경사조명 간의 거리(A)가 조도 균제도 변화에 가장 큰 영향을 미치며, 두 조명간의 거리가 가까울수록 조도 균제도가 더 향상되는 것으로 판단된다. 조도 균제도를 최대화 시키기 위한 하이브리드 조명계의 최적 조명조건은 $A_1B_2C_3D_1$ 이다. 최적 조명조건을 구하는 식 (2)를 이용해 이 조명조건에서의 S/N비를 예측해 보면 9.43으로 다구치 실험을 통해 최대 특성치를 나타냈던 실험 번호 2번에 비해 0.04dB 증가한 것을 볼 수 있다.

Table 5. Binary image comparison of bi-directional and hybrid illumination

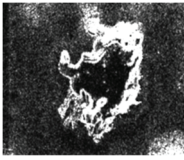
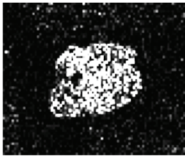
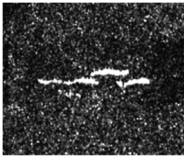
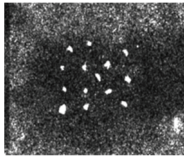

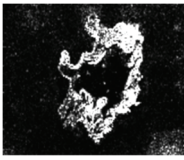
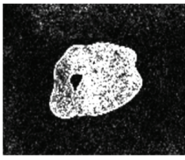
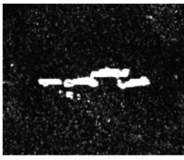

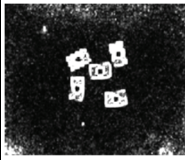
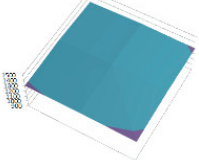
Defects	Scale	Scab	Line crack	Star crack	Foreign object
Bi-directional illumination					
SNR value	0.53	0.59	0.36	0.42	0.35
Hybrid illumination					
SNR value	0.92	0.86	0.89	0.95	0.88

Table 6. Illuminance uniformity for the hybrid illumination

Illumination	Hybrid illumination
Illuminance uniformity	0.99
Optimum illuminance distribution	

$$\eta_0 = m + (m_{A_1} - m) + (m_{B_2} - m) + (m_{C_3} - m) + (m_{D_1} - m) \quad (2)$$

기본 조명계 중 최대 조도 균제도를 나타냈던 양방향 경사조명과 성능을 비교해 보면 조도 균제도 면에서 양방향 경사조명보다 0.3정도 향상된 수치를 나타냈다. 0.3의 향상은 수치적으로는 큰 향상이 아니지만 실제 결함 영상의 이진화 영상을 비교한 Table 5를 보면 육안으로 확인하기에도 결함과 비결함이 뚜렷이 구분되는 것과 잡음의 영향을 정규화 수치로 나타낸 SNR값을 비교해 보면 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 이 SNR[4]값은 클수록 영상에서 잡음의 영향이 적은 것을 나타낸다. 또한 양방향 경사조명의 조도분포에서 양 측면의 조도가 낮은 영향을 Table 6의 하이브리드 조명계에선 조도 균제도가 0.99로 조도분포 또한 전체적으로 균일하게 나타낸 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 저대비·비균일·무특징의 표면결함을 검사하기 위해 조도 균제도 기반 기본 조명계 분석을 통해 각 조명계의 최적 조명조건을 선정하였다. 이를 통해 양방향 경사조명과 동축 조명을 조합한 하이브리드 조명계를 설계하였다. 하이브리드 조명계의 최적 조명조건은 기본 조명계에서 최대 조도 균제도와 양방향 경사조명과 비교한 결과, 조도 균제도가 0.99로 0.3 향상되었고 조도분포 또한 향상된 성능을 보였다.

하이브리드 조명계는 저대비·비균일·무특징의 표면 결함 검사를 위해 검사영역을 전체적으로 균일하게 조사하여 결함과 비결함의 대비를 향상시키고 잡음의 영향을 최소화할 수 있는 최적 조명계라고 판단된다.

참고문헌

1. Nirbhar N. et al., "Review of Vision-Based Steel Surface Inspection Systems", EURASIP J. on Image and Video Processing, No. 50, pp. 1-6, 2014.
2. Cheol Ho Kim et al., "Classification of Surface Defect on Steel Strip by KNN Classifier", J. of Korean society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 8, pp. 80-88, 2006.
3. Bong gyu Ji, Sang Jin Park et al., "Inspection of Surface Longitudinal Microcrack in Thick Steel Plates Using Focused Surface Wave EMAT", J. of Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 37, No. 6, pp. 443-449, 2017.
4. Eun Deok Cho, Gyung Bum Kim, "A Study on Illumi-

- nation Mechanism of Steel Plate Inspection Using Wavelet Synthetic Images”, J. of Semiconductor & Display Technology, Vol. 17, No. 2, pp. 26-31, 2018.
5. Byung In An, Gyung Bum Kim, “Development of Structured Hybrid Illumination System and Optimum Illumination Condition Selection for Detection of Surface Defects on Silicon Wafer in Solar Cell”, J. of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 36, No. 5, pp. 505-512, 2012.
 6. Jin Woo Son et al., “Experimental Study on Wash-out and Warpage in In-Mold Coating with Film Inserts”, J. of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 42, No. 3, pp. 213-219, 2018.
-
- 접수일: 2019년 9월 4일, 심사일: 2019년 9월 18일,
게재확정일: 2019년 9월 23일