

지배주파수도를 이용한 미소 표면 결함 추출을 위한 영상 처리 알고리즘

A Visual Inspection Algorithm for Detecting Infinitesimal Surface Defects by using Dominant Frequency Map

김 상 원, 권 인 소
(Sang Won Kim and In So Kweon)

Abstract : One of the challenging tasks in visual inspection using CCD camera is to identify surface defects in an image with complex textured background. In microscopic view, the surface of real objects shows regular or random textured patterns. In this paper, we present a visual inspection algorithm to extract abnormal surface defects in an image with textured background. The algorithm uses the space and frequency information at the same time by introducing the Dominant Frequency Map (DFM) which can describe the frequency characteristics of every small local region of an input image. We demonstrate the feasibility and effectiveness of the method through a series of real experiments for a 14" TV CRT mold. The method successfully identifies a variety of infinitesimal defects, whose size is larger than $50\mu\text{m}$, of the mold. The experimental results show that the DFM based method is less sensitive to the environmental changes, such as illumination and defocusing, than conventional vision techniques.

Keywords: texture, surface defect, dominant frequency map, mold, defocusing, neural network

I. 서론

생산공정에서의 초 정밀화 추세에 따라, 미시적인 (microscopic) 관점에서의 검사가 점차 요구되는 실정이다. 검사 대상을 고 배율 현미경을 통해 미시적으로 관찰하면, 대개 "무늬(texture)"가 있는 표면으로 보이게 된다. 무늬는 실제 물체 표면의 거칠기, 조명 조건, 물체 자체의 광학적 성질, CCD 카메라의 성질 등 복잡한 상호 작용으로부터 발생하는 광휘 형태(irradiance pattern)이다. 미시적으로 관찰한 영상은 대개 랜덤 무늬 경향성을 가지므로, 표면의 미세한 결함 검사와 같이 미시적인 영역 추출이 필요할 경우에는, 랜덤한 무늬 환경의 인식이 필수적이다. 그러나, 랜덤한 무늬의 특징을 정확히 규명하기 어려운 이유로 인해, 그 해석에 관한 체계적이고 일반적인 방법은 제시되어 있지 못한 실정이다.

무늬를 가진 영상에서 영상 처리를 통해 영역간의 구분이나, 특정 영역을 추출하는 연구는 크게 다음과 같이 구분될 수 있다[1][2][3][4].

(1) 영상의 특정 영역을 강조하는 밝기 값의 문턱치를 선정하여, 이치화(thresholding)를 행한 후, 영역찾기(blob coloring) 등의 방법으로 레이블링(labeling)을 통해 영역 구분을 행하는 방법 (Classical method);

(2) 어떤 영역의 평균, 분산, 정성적인 분포 값 같은 밝기 값의 통계치를 무늬의 특징으로 하여, 그것의 비교를 통해 영역간의 구분이나 추출을 행하는 방법 (Statistical method);

(3) 무늬를 이루는 기본 요소(Texture Element: Texel)의 성질을 규명하여, 텍셀(Texel)의 차이에 따라 영역을 구분하는 방법 (Structural method);

(4) 무늬 변화의 주기성(주파수)에 대한 정보를 특징치로 하여 영역의 구분, 검출을 행하는 방법 (Spectral method).

고전적인 방법인 방법(1)은, 여러 가지 경우에 걸쳐 가장 널리 사용되는 방법이다. 그러나, 의도하는 영역의 강조를

위해, 처리 절차의 매 단계마다 경험적인 변수가 사용된다 (예:문턱치의 설정). 따라서, 조명 등 환경의 변화에 민감하고, 밝기 값의 차이가 두드러지지 않으면 적용하기가 힘들다는 문제가 있다.

랜덤 무늬하의 영역 추출에 빈번히 사용되는 방법(2)는 그 특성에 따라 2가지로 분류할 수 있다. 첫째, 전 영상에 걸쳐, 일정 크기의 윈도우(예:10x10)를 이동시키며, 그 윈도우 내의 평균, 분산, 평탄도(flatness), 비틀림도(skewness), 엔트로피 같은 밝기 값 통계치를 계산하여, 수치간 비교를 통해 영역 추출을 행하는 방법이다[6][7]. 둘째, 코어커펀스(cooccurrence) 행렬을 통해 최다발생 빈도, 균일도, 랜덤도 등 영역 내 밝기의 정성적 분포를 표현하는 행렬을 구성하여, 그 경향성을 분석함으로써, 영역 추출을 행하는 방법이다[8]. 이 두 방법 모두 인위적인 영상(artificial image)에 대한 통계적 특징치 추출은 용이하나, 실제 영상(real image)에 적용할 경우, 특징치의 직접 비교가 어려운 문제가 있다. 따라서, 이 방법은 랜덤하게 합성된 영상이나, 규칙성이 있는 영상에서의 영역 추출에 주로 사용되어 왔다.

방법(3)은 무늬의 기본 요소를 추출하고, 그 차이를 통해 특정 영역을 추출하는 방법이다[9]. 이 방법은 입자의 존재가 뚜렷한 영상에 대해 적용 가능한 방법이나, 입자의 존재가 용이하게 관찰되지 않으면, 적용하기 힘들다.

방법(4)는 영역의 밝기 신호의 주파수 정보를 무늬의 특징치로 하여 영역 구분을 행하는 방법이다[10]. 푸리에(Fourier) 변환을 통한 일반적인 주파수 접근법은, 무늬 영상 전체의 주기적인 특징은 잘 표현하나, 위치를 결부시켜 표현하기가 어려우므로, 특정 영역의 추출에 적용하기가 어렵다.

따라서, 영상의 좌표 공간과 주파수 공간, 즉, 위치와 주파수를 한 공간에 표현하려는 연구가 진행되어 왔다. 위그너(Wigner) 분포나 영상 스펙트로그램이 그 예이다[11][12][13]. 그러나, 이 연구의 초점은 규칙적인 무늬 영상에 적용하여 거리나 형상 정보를 획득하는 것이 주목적이었다.

본 논문에서는, [12]와 [13]에서의 영상 스펙트로그램(spectrogram)에 의한 접근법을 랜덤한 영상의 영역 추출에 적용하며, 국부적인 위치에 대해 영역의 지배 주파수를 계산함으로써, 기존의 주파수 접근법의 위치 정보 부재 문제

를 해결하려고 한다. 그 구체적인 방법으로서 지배 주파수도(Dominant Frequency Map: DFM)를 제안하고, 이를 분석함으로써, TV 브라운관 금형 표면의 랜덤한 무늬 영상의 영역 추출에 적용하고자 한다. 본 연구에서 실험 표본으로 TV 브라운관 금형을 선정하게 된 배경은, 첫째, 금형 면은 표면이 반짝이는 금속 면이므로, 검사자의 착시에 의한 부정확한 검출이 발생한다. 둘째, 결합의 형상이 다양하여 패턴 매칭(pattern matching) 등의 간단한 방법을 사용할 수 없다. 셋째, 미시적인 관점에서 발생하는 무늬 환경하의 영역 추출의 적절한 예가 된다는 점이다. II장에서는, 위치와 주파수를 동시에 표현하는 방법으로서 지배 주파수도와 TV 브라운관 금형 표면의 광학적 모델을 이론적으로 정립하고, III장에서는 금형의 미세한 결합 검출에 본 방법을 적용, 실험한 결과를 분석하도록 한다. IV장에서는 신경 회로망을 적용하여 초점이 잘 맞지 않아서 선명하지 못한 영상에 대한 결합부의 인식을 기술한다.

II. 국부 주파수 분석의 기초 이론

1. 지배 주파수도

그림 1은, X 방향으로 주파수가 높아지는 정현파 신호 f(x)를 보여 주고 있다.

$$f(x) = \begin{cases} \sin(0.05\pi x), & 0 \leq x \leq 40 \\ \sin(0.1\pi x), & 40 \leq x \leq 80 \\ \sin(0.2\pi x), & 80 \leq x \leq 120 \end{cases} \quad (1)$$

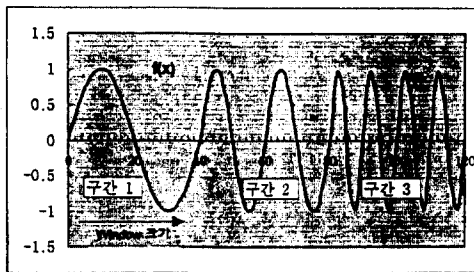


그림 1. 주파수가 점점 높아지는 1차원 신호.
Fig. 1. 1-D signal with increasing frequencies.

길이 W 인 직사각형 윈도우(rectangular window)를 그림 1의 1, 2, 3 구간에 적용한다. (2)을 이용한 각 구간의 신호에 대한 주파수 응답을 그림 2에 보였다.

$$F(\omega) = \sum_{x=0}^{W-1} f(x)e^{-j\frac{2\pi x\omega}{W}} \quad (2)$$

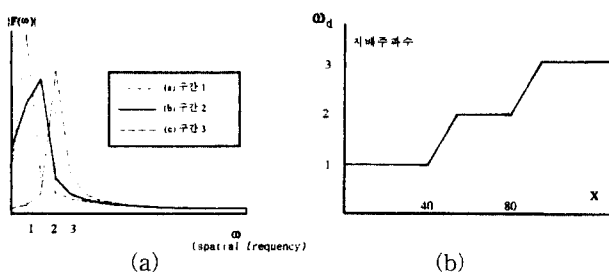


그림 2. 그림 1의 각 구간에 대한 주파수 응답, (a) 각 구간에서의 국부적인 주파수 응답, (b) 구간에 따른 X 방향의 지배 주파수.
Fig. 2. Frequency response in each region of Fig. 1. (a) Local frequency response in each region, (b) Dominant frequency in X direction.

그림 2(a)에서 본 바, 에너지가 최대치인 주파수는 각각 1, 2, 3이다. 주파수 응답치(에너지)를 최대로 하는 주파수를 지배 주파수라고 정의하고, ω_d 로 표시하도록 한다. 직사각형

윈도우를 X방향으로 한 점씩 이동하며, 지배 주파수를 계산하고, X방향의 지배 주파수 변화를 그림 2(b)에 나타내었다. 특정 구간에 지배적인 주파수가 위치(X)에 대해 나타나 있고, 특정 위치 X에 대하여 그 주변부의 주파수 정보를 얻을 수 있다.

전 영상에 대하여, 일정 크기(W)의 윈도우를 X 나 Y 방향으로 이동시키면서, 그 위치에 대한 지배 주파수를 계산하면, X나Y 방향의 지배 주파수도(Dominant Frequency Map)가 구성된다. 지배 주파수도는 영상의 각 좌표에 대하여, 그 주변부의 지배 주파수를 나타냄으로써, 주파수 구분에 의한 영역추출의 실마리가 된다.

2. 지배 주파수도의 주요 인자

지배 주파수도를 구성하여 실제 대상에 적용할 때, 영향을 미치는 중요한 인자 및 선결 작업들은 다음과 같이 4가지로 분류될 수 있다. 첫째, 윈도우의 크기와 검출하기 원하는 영역의 크기 관계, 둘째, 윈도우 신호의 형상, 셋째, 퓨리에 변환을 행하는 윈도우의 크기와 영상 샘플링률, 넷째, 고주파수 통과 필터(high-pass filter)의 적용이다.

2.1 윈도우의 크기와 영역의 크기 사이의 관계

지배 주파수도를 이용하여, 주기성을 가진 배경에서, 특정 영역을 추출할 때, 영역의 크기와 FFT 윈도우 크기 사이의 관계가 결정되어야 한다. 즉, 특정 영역의 크기가 윈도우 크기의 어느 정도 이상이 되어야 주파수 응답에서의 지배 주파수 차이를 통해 검출할 수 있는가 하는 점이다. 이때, 특정 영역은 밝기가 대체로 균일한 DC 영역으로, 배경은 주기가 일정한 AC 영역으로 가정하였다. 밝기가 균일한 특정 영역은, 저주파가 지배적인 주파수 응답을 나타낼 것이며, 영역 추출을 위해서는 지배 주파수가 저주파인 영역을 추출하면 된다. 지배 주파수가 저주파인 주파수 응답을 획득하기 위한, 윈도우 크기, W와 영역의 크기, D와의 관계를 규명해 보기로 한다. 영상에서, 윈도우 길이 W내의 국부적인 영역에 대한 밝기 신호를 $i(n)$ 이라고 하면, 주파수 응답 $I(k)$ 는 다음 (3)과 같이 표현된다.

$$I(k) = \sum_{n=0}^{W-1} i(n)\exp(-j\frac{2\pi nk}{W}) \quad (3)$$

크기 W인 윈도우 내 배경의 밝기 신호는, 길이 A인 영역에 대해, 주기가 f/A 인 sin 함수로 가정하고, 검출하고자 하는 특정 영역은 길이 $W - 2A$ 에 걸쳐, 함수 값이 -1로 일정한 신호라고 가정하였다. 그림 3은 W, A, f의 관계 정립을 위한 모의 실험에서의 밝기 신호 모델을 보인다.

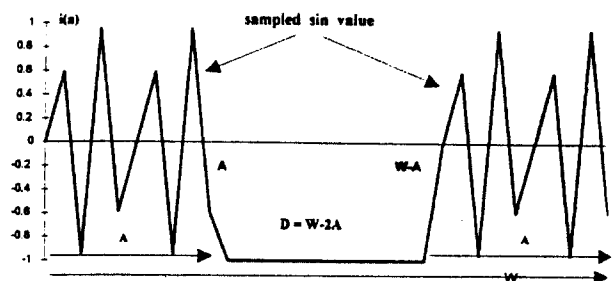


그림 3. 밝기 신호 모델.
Fig. 3. A model of intensity signal.

여기서, $i(n)$ 은 (4)와 같이 표시된다.

$$i(n) = i_n(n) + i_d(n) \quad (4)$$

$$\text{단, } i_n(n) = \begin{cases} \sin(\frac{2\pi nf}{A}), & 0 \leq n < A, W-A \leq n < W \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$i_d(n) = \begin{cases} -1, & A \leq n < W-A \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

f, A, W가 실험 시 조정 가능한 변수들이고, 이들은 상

호 영향을 미치며, 주파수 응답에도 영향을 미치게 된다. 같은 크기의 W 에 대해, $i_n(n)$ 신호가 지속되는 영역 A의 크기가 크고, $i_n(n)$ 의 주파수 f/A 가 높으면, 전체 신호 $i(n)$ 의 주파수 응답에서 고주파 성분이 미치는 영향이 커진다. 변수들에 대한 제한 조건들은 (5)와 같고, 윈도우 크기 W가 16, 32, 64의 경우에 대해 고려하도록 한다.

$$0 \leq f \leq \frac{A}{2}, \quad 0 \leq A \leq \frac{W}{2} \quad (5)$$

(6)은 $i(n)$ 의 주파수 응답 $I(k)$ 를 나타내고 있다.

$$I(k) = \sum_{n=0}^{A-1} \sin\left(\frac{2\pi n f}{A}\right) \exp(-j \frac{2\pi n k}{N}) + \sum_{n=A}^{W-A-1} (-1) \exp(-j \frac{2\pi n k}{N}) + \sum_{n=W-A}^{W-1} \sin\left(\frac{2\pi f}{A}(n - (W-A))\right) \exp(-j \frac{2\pi n k}{N}) \quad (6)$$

따라서, $k = 0$ 일 때의 에너지 $|I(0)|$ 이 주파수 응답에서 최대이기 위한 W와 A, f의 관계 규명이 필요하다. (6)에서, W에 대해서, A, f를 변화시키며, 모델 $i(n)$ 에 대한 주파수 응답을 계산한 결과, DC 항을 나타내는 응답 $|I(0)|$ 이 최대이기 위해서는 (7)이 만족되어야 한다는 결과를 실제로 주파수 응답을 계산함으로써, 얻을 수 있었다. 즉, AC 항의 영향을 나타내는 A의 크기가 W의 32% 이상이어야, 주파수 응답에서 DC항을 나타내는 $|I(0)|$ 이 최대가 된다. 이는 W를 일정하게 하고, f를 $0 \sim A/2$, A를 $1 \sim W/2-1$ 로 변화시켜 가면서, $|I(0)|$ 이 최대일 때의 A를 경험적으로 결정하는 것이다. 그림 4는 AC 구간 A와 지배주파수 ω_d 의 관계를 나타낸 것이다. 그림 4와 같이, 윈도우 크기 W가 일정할 때, AC 영역 A의 크기가 작아질수록, DC 영역 D의 크기가 커지고, 윈도우내의 지배 주파수도 낮아지게 된다.

$$A \leq 0.32W \Rightarrow D \geq 0.36W \quad (7)$$

단, D는 밝기가 균일한 영역의 크기를 나타낸다.

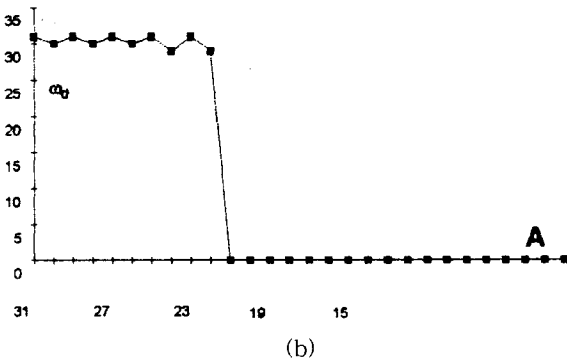
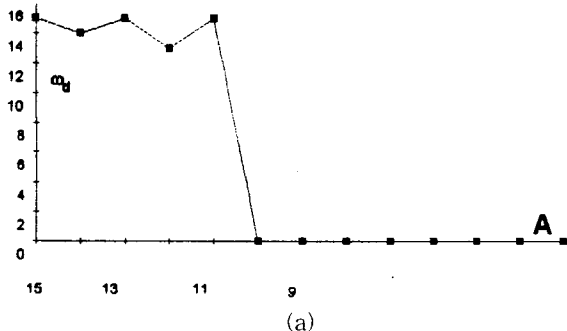


그림 4. f를 A에 대해 최대로 하였을 때, 윈도우 크기 W에 대한 A와 ω_d 의 관계. (a) W=32, (b) W=64.

Fig. 4. Relationship between A and ω_d with respect to window size W, when f is maximum. (a) W=32, (b) W=64.

윈도우 크기 W에 대해, 주파수가 균일한 영역 A의 크기가 $0.32W$ 이하, 즉, 밝기가 균일한 DC 영역의 크기, D가 $0.36W$ 이상이어야, 저주파수 영역으로 판별할 수 있다. D가 $0.36W$ 이하이면, f에 따라 주파수 응답이 변동을 보이므로, 저주파수가 지배적인 응답을 보장하지 못한다. 그림 5에 f, A, W에 대한 밝기 신호 모델과 그 주파수 응답을 나타내었다. W = 64, A = 20, f = 8, D = 24 일 때, 지배 주파수는 0임을 나타낸다.

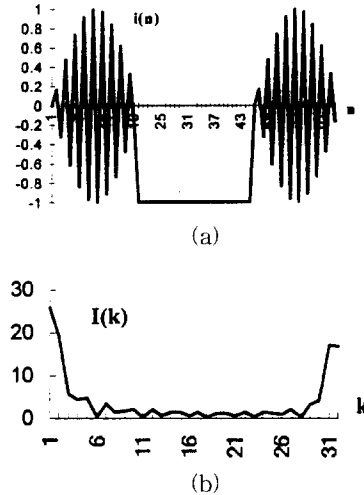


그림 5. f=8, A=20, W=64 일 때. (a) 밝기신호 모델과, (b) 주파수 응답.

Fig. 5. An example for f=8, A=20, and W=64. (a) intensity model, (b) its frequency response.

2.2 윈도우의 선정

푸리에 변환을 수행할 때, 윈도우의 길이가 신호 주기의 정수배가 아니면, 주파수 에너지가 넓은 주파수대로 퍼지는 누설 현상(leakage)이 나타나게 된다. 이 현상을 방지하기 위해 블랙만(Blackmann) 윈도우를 적용한 후, 푸리에 변환을 수행한다. 윈도우 크기 W에 대한 블랙만(Blackmann) 윈도우는 (8)과 같다.

$$W_b(n) = 0.42 + 0.5 \cos\left(2\pi \frac{n}{W-1}\right) + 0.08 \cos\left(4\pi \frac{n}{W-1}\right), \quad 0 \leq n \leq W \quad (8)$$

2.3 윈도우의 크기와 샘플링률

윈도우의 크기가 커지면 날카로운 스펙트럼이 나타나므로, 양호한 주파수 응답을 획득할 수 있으나, 위치에 대한 정보가 모호해지게 된다. 즉, 윈도우의 크기가 커짐에 따라 주변의 범위가 너무 커져서 국부적인(local) 위치가 아닌 전역적인(global) 주파수 특징을 표현하게 된다. 이는 그림 4, 5에서 유추해 볼 수 있다. 그러나, 윈도우의 크기가 작아지면, 위치 판별의 장점은 있으나, 주파수 응답이 넓은 주파수대에 퍼져서(smearred) 나타나게 된다. 실험에서는, 512x512의 영상을 128x128로 샘플링한 상태에서, 길이 16인 윈도우를 사용하였다. 이때의 샘플링(sampling)에서 영상신호가 랜덤하므로, 1/4의 샘플링이 영향을 주지 않을 것이라고 가정하였다. 그러나, 이와 같은 샘플링은, 추출하고자 하는 영역 주변의 주파수 특징 치가 손상되지 않는 범위 내에서, 전적으로 속도를 높이는 데 목적이 있는 것이고, 안정적인 실험을 위해서는 512x512 전 영상에 대해 계산을 하다가, 저주파수가 나타나는 부분만 샘플링을 한다던가 하는 방법이 있을 수 있다. 윈도우 크기의 선정은, 위치 파악(localization)과 양호한 주파수 응답의 획득이라는 상호 충돌적인 목적을 실험적으로 절충한 것이다.

3. 금형 표면의 광학 모델

빛의 반사 현상에는 보통 다음과 같은 두 가지 성분이 관여하게 된다.

(1) 난 반사(lambertian reflection): 빛이 표면의 내부로 투과하여, 물질 내부의 입자들과 충돌한 후에 외부로 반사되는 현상,

(2) 경면 반사(specular reflection): 빛이 표면에서 직접 반사되는 현상.

(1)은 빛이 사방으로 반사됨으로써, 빛의 광휘 형태가 관찰자의 보는 방향에 무관한 특성을 나타내며, (2)는 특정 방향으로 강하게 반사되는 특성을 보이므로, 보는 방향에 따라 빛의 광휘 형태의 변화가 매우 크다. 형성된 영상의 광휘 형태(irradiance pattern)는 이 두 성분의 합으로 나타난다. 즉,

$$I = I_L + I_S \tag{9}$$

단, I_L 은 lambertian 에 의한 성분, I_S 는 specular 에 의한 성분을 나타낸다. 표면의 광학적 성질에 따라, 두 성분 중 하나가 지배적으로 나타나곤 하는데, 난 반사 현상이 지배적인 물질에는, 직물류, 종이, 석고 등이 있고, 경면 반사 현상이 지배적인 물질에는 금속, 거울, 비닐 등이 있다. 본 실험 대상인 금형은, 대체로 경면 반사의 특성이 강하므로, 조명의 성격과 방향에 따라 영상의 밝기 값이 민감하게 변한다. 따라서, 조명은 확산조명(diffused lighting)이 선택되었다. 확산조명을 통해 경면 반사 성분에 의한 효과가 어느 정도 감소되었으나, 표면의 형상에 의한 경면 반사 성질이 여전히 존재한다(그림 6).

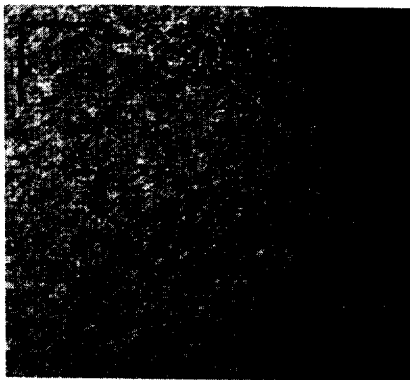


그림 6. 실제 금형 표면의 예 (100 배 확대된 영상).
Fig. 6. A sample image of a TV mold die (100 times magnified image).

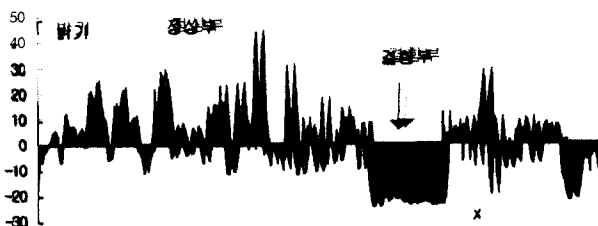


그림 7. 그림 6에서 화살표로 표시된 금형 면에서의 밝기 분포.
Fig. 7. Intensity distribution along a row indicated by an arrow in Fig. 6.

그림 7은 그림 6에 표시된 직선을 따라서 얻어진 밝기 값들을 도시한 것이다. 이때, 먼저 구간내의 밝기 값의 평균을 계산한 후, 각각의 밝기 값에서 구간 평균치를 감산하여 도시하였다. 결함이 없는 정상 면은 표면 조도가 어느 정도 일정하며, 밝기 값들이 일정한 범위 내에서 랜덤하게 높

가 변화한다. 그림7 에서 보여 지듯이, 결함부와 정상부는 표면 조도의 차이가 있으며, 그 차이에 따라 광학적인 반응 양태도 차이가 있음을 관찰 가능하다. 즉, 정상부는 균일한 조도를 가지게 되고, 각 미소 평면의 방향은 랜덤한 것으로 가정할 수 있다.

각 미소 평면은 토렌스-스패로우(Torrance-Sparrow) 반사 모델에서의 가정과 유사하게 완전 경면 반사를 하는 것으로 가정한다. 따라서, 미소 평면의 랜덤한 방향 특성에 의하여, 밝기 값은 카메라와의 기하학적 조건이 경면 반사 조건(입사각=반사각)을 만족할 때는 매우 밝은 값을, 그렇지 않을 때는 어두운 값으로 랜덤하게 나타나 랜덤한 무늬가 영상에 나타나게 된다. 반면, 결함부는 관찰방향(viewing direction)에 따라 그 명암 정도는 다르지만, 주변부에 걸쳐 일정한 조도를 가지게 되며 그 밝기 값이 대체로 일정한 경면 반사의 특징이 강하게 나타난다. 따라서, 정상부는 밝기 값의 분포가 랜덤한 고주파수 영역, 결함부는 밝기가 상대적으로 균일한 저주파수 영역으로 유추해 볼 수 있다.

III. 결함의 판별 및 인식

본 절에서는, 지배 주파수도 정보를 이용하여, 실제 금형 표면의 미세한 결함부를 낮은 단계로 판별(low-level identification)하는 알고리즘을 제안한다. 또한, 지배주파수도 정보에 기반하여, 부분적으로 신경망 회로를 적용하여, 지배주파수도에 의한 방법을 보완함으로써, 결함부를 보다 높은 단계로 인식 (high-level recognition)하는 실험도 수행하여, 결과를 고찰하도록 한다.

1. 실험 장치

그림 8은 실험에 사용된 금형 표면으로부터 얻어진 확대 영상을 나타낸다. 영상에 대응하는 금형 표면의 실제 크기는 2.0x2.5mm이다. 금형 표면에서 많이 관찰되는 결함부와 정상부, 초점 불량부 등을 보인다. 초점 불량부는 금형 표면의 곡률 변화가 매우 심한 부분에서 관찰 표면 전체가 광학계의 초점 심도 내에 있지 못할 때 관찰된다. 실험 대상의 표면은 앞 절에서 논의한 바와 같이 랜덤한 무늬 환경의 영상으로 나타난다. 영상에서의 무늬의 발생은, 물체 표면의 광학적 성질, 조명의 종류, 물체 표면의 기하학적 형상 등 복잡한 상호 작용의 결과이다. 본 절에서는, 실험대상 면의 조명에 대한 광학적 반응 양태의 결과인 영상을 분석하여, 주파수를 특징치로 하는 근거를 확인하고, 미세한 표면 결함부의 추출에 적용한 결과를 고찰하도록 한다.

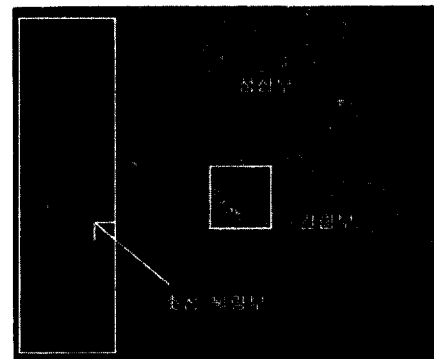


그림 8. 결함이 있는 실제 금형 표면의 예.
Fig. 8. A sample image of a TV mold die with defects.

실험 장치의 개략도와 실제 실험장치의 사진이 그림 9에 도시되어 있고 시스템 구성은 표 1에 요약되어 있다. 실험 대상은 14" TV 브라운관의 금형이며, 이 대상은 경면 반사 표면이라는 성질을 가진다. 조명부는 광섬유(fiber optics)에 의한 확산조명(diffused lighting)을 선택했다. 금형

표면을 확대하여 영상을 획득하기 위한 현미경 프로브의 측정 범위는 가로세로로 2.0 x 2.5mm이다. CCD 카메라로부터 나온 비디오 신호는 프레임 그래버를 통해 512x512 해상도, 8 bit의 데이터로 이산화되며, 영상 처리 계산은 486 PC에서 수행된다. 초점(Focus)이 비교적 잘 맞은 영상에 대해 실험이 진행되었으나, 실제 검사에서의 예외적인 환경 변화에 대응하기 위하여, 초점 불량인 영상의 경우에도 실험하였다. 추출하기 원하는 영역은, 표면 결함인데, 가공 중 발생하는 찍힘(dent), 긁힘(scratch), 도금피트(pit) 등 표면의 기하학적 이상을 유발하는 모든 종류의 것들을 의미한다. 결함 크기는 대략 50 μm 이상이다. 결함의 유형을 정확히 규정하기는 어려우나, 대표적인 결함은 대략 그림 10과 같이 나눌 수 있다.

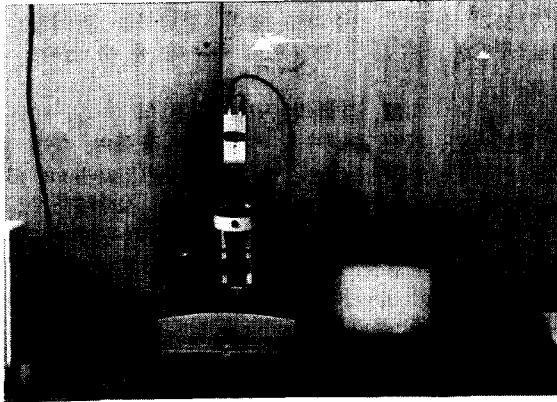


그림 9. 실험 장치의 사진.
Fig. 9. A photograph of the experimental setup.

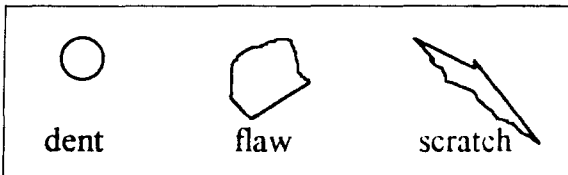


그림 10. 금형 표면의 미소 결함 유형.
Fig. 10. Typical defects found on a die surface.

표 1. 실험 장치의 구성 요소.
Table 1. Components of an experimental setup.

기구 명	
SONY XC-77 B/W CCD Camera	570(H)x485(V) resol., 0.5 Lux 감도, 50dB S/N 비
현미경 probe	관측 범위 2.0x2.5 mm, 초점 심도 100 mm
광섬유 조명	조명 지름 50 mm, 70 W
UIC 512B B/D	Frame Grabber
Processing unit	486 DX2-66 MHz PC
X-Z table	x, z 방향 이동 가능
흑백 모니터	RS 170 신호의 Display

2. 지배 주파수에 의한 결함 영역의 판별법

그림 7에서 본 바와 같이, 정상부에서 추출한 밝기 신호는, 결함부에서 추출한 것보다 상대적으로 고주파 신호라는 사실을 관찰할 수 있다. 따라서, 결함부는 어느 정도 이상의 영역에 걸쳐 저주파수가 지배적인 부분으로, 정상부는 고주파수가 지배적인 부분으로 해석하여, 결함 영역의 추출 작

업을 진행하도록 한다.

영상 전체에 대해 X 방향의 전역적인 지배 주파수도를 구성하고, X 방향의 지배 주파수도에서 저주파수 영역을 찾아, 그 부분에 대해 Y 방향의 국부적인 지배 주파수도를 구성한다(그림 11에 지배주파수도의 구성 절차를 흐름도로 나타내었다). Y 방향의 국부적인 지배 주파수도에서도 저주파수 영역을 찾을 때 결함부라고 판정한다. 실제의 결함 추출 시에는 X 방향으로 지배 주파수도를 스캐닝 하다가, 저주파수 영역을 발견하면 (저주파수 영역은 결함부내의 밝기 변화를 고려하여, 주파수 1 이하로 가정하도록 한다), 그 영역을 중심으로 윈도우 크기에 해당하는 Y 방향의 지배주파수를 계산하여, 저주파수이면 결함부로 판정한다. 결함부의 검출 절차를 다음의 표 2에 나타내었다.

표 2. 지배주파수도를 이용한 결함검출 알고리즘.
Table 2. An algorithm for detecting defects using Dominant Frequency Map.

```

① 원래 image  $I[R][C]$  에 대한 X 방향의 지배주파수도
   구성 (  $DFMX[R][C]$ ,  $R=R_0 \sim R_f$ ,  $C=C_0 \sim C_f$  )
   단, FFT Window 크기는 W 이다.
② X 방향의 지배주파수도를 scan 하며, 결함부 검출.
   for R = R0 ~ Rf
   begin
   for C = C0 ~ Cf
   begin
   if (  $DFMX[R-1][C-1] \sim DFMX[R+1][C+1] \leq 1$  )
   Wd computation
   from  $FFT(I[R-W/2][C], I[R+W/2][C])$ 
   if (  $Wd \leq 1$  )
   Save (C,R) position as defects
   end
   end
end
    
```

실험 시, 사용했던 중요한 인자들에 대해서 설명하도록 한다. 첫째, 3x3의 커널을 전체 지배 주파수도내에서 이동시키며, 커널 안의 원소가 모두 저주파수이면, 결함부라고 판정한다. 이는 잡음(noise)을 제외한 결함부 영역의 검출을 위하여, 적절한 면적(3x3)을 가지는 저주파수 영역을 발견하기 위함이다. 이 커널을 다르게 규정하면, 검출 정도에 약간의 차이가 있으나, 일반성을 위해 필터 적용 시 흔히 사용되는 3x3의 커널을 사용하였다.

둘째, 윈도우 크기 W에 대해, 검출할 수 있는 결함의 크기 D는 규명해야 할 중요한 요소이다. 본 방법은, 저주파수 영역을 결함 영역으로 검출하는 것이다. 그러므로, 저주파수가 지배적인 주파수 응답을 획득하기 위한 D와 W의 관계식 정립이 필요하다. 즉, 윈도우의 크기와 샘플링율에 따른 검출 가능한 결함의 최소 크기는 어느 정도 인가하는 것이다. II절에서, 저주파 영역으로 추출할 수 있는 균일한 밝기 영역의 크기를 계산하였다. II절에서의 결함부 주변의 밝기 신호에 대한 분석 결과를 기반으로 하여, 결함부 영역의 크기 D가 윈도우 크기의 36% 이상이면, 저주파 영역으로 추출할 수 있다는 사실을 그대로 적용하도록 한다. 표 3에, 윈도우 크기에 대해, 검출 가능한 최소 결함의 크기에 대해 요약하였다. 단, 관측 가능한 범위 V를 2.0 mm로 하여, 해상도 R로 획득한 영상일 때의 자료이다. 관측 범위를 좁히고, 해상도를 높인 상태에서 작업하면, 더 작은 크기의 결함 검출이 가능할 것이다. (10)은 이들에 대한 관계식을 나타낸다.

$$R : V = D : X \tag{10}$$

단, D는 $W-2A$ 로서, 검출할 수 있는 결함의 최소 크기를 픽셀 수로, X는 실제의 크기를 mm 단위로 나타낸다.

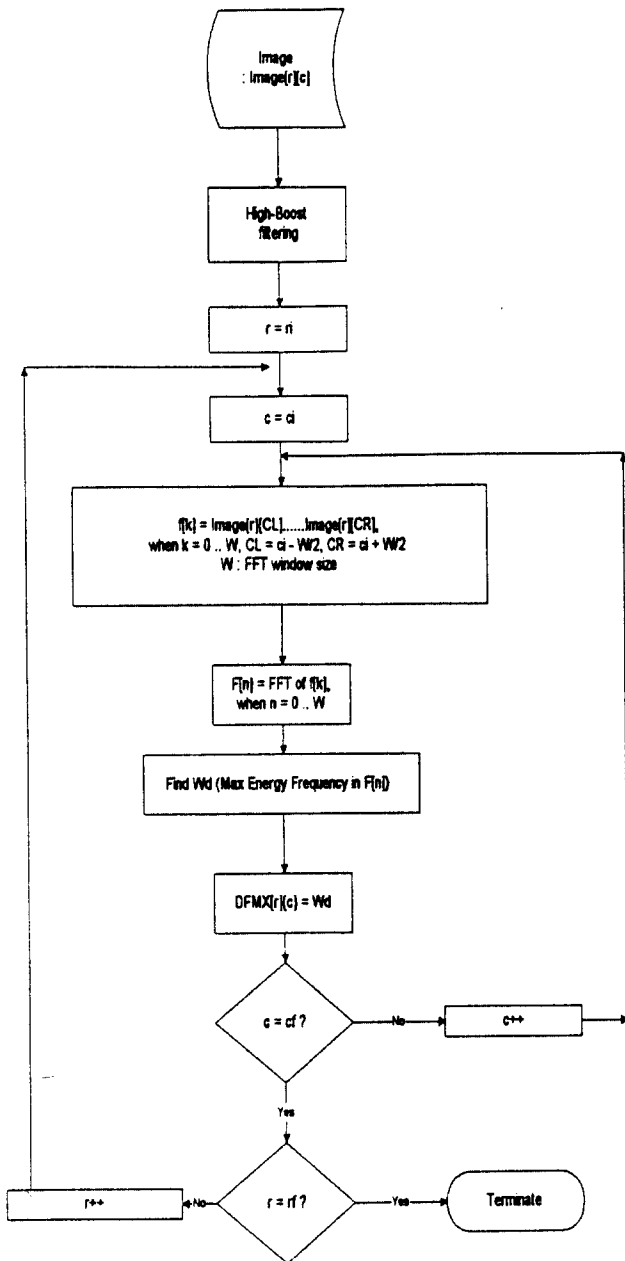


그림 11. 지배주파수도 구성 절차.
Fig. 11. A flow chart computing Dominant Frequency Map.

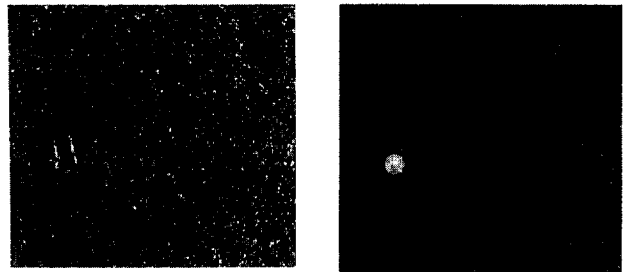
표 3. 영상 해상도, 윈도우 크기에 따른 판별할 수 있는 결함 크기.

Table 3. Detectable sizes of defects as a function of the window size and image resolution.

검출할 수 있는 결함의 크기 (X : mm)			
원도우 W \ 해상도 R	512	256	128
16	0.024	0.047	0.094
32	0.047	0.094	0.188
64	0.094	0.188	0.375

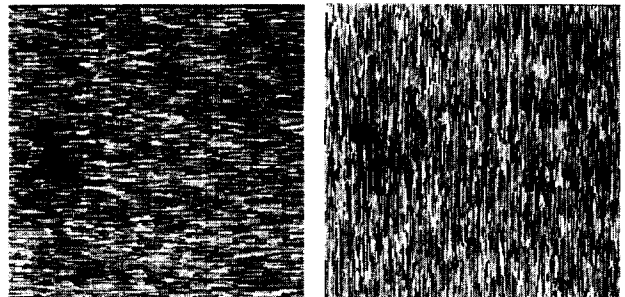
실제 결함 판별을 수행하였을 때, 원래 영상과 결함 추출 결과를 그림 12, 13에 나타내었다. 여기서, 그림 12(a)는 원래 영상, 12(b)는 결함 검출 결과, 그림 13(a), 13(b)는 각각

X 방향의 지배 주파수도와 Y 방향의 지배 주파수도를 표시하고 있다. 주로 찍힘형의 결함에 대한 검출 결과들이다. 그림 14는 또 다른 형태의 결함에 대한 결함 검출 결과를 보여 주고 있다.



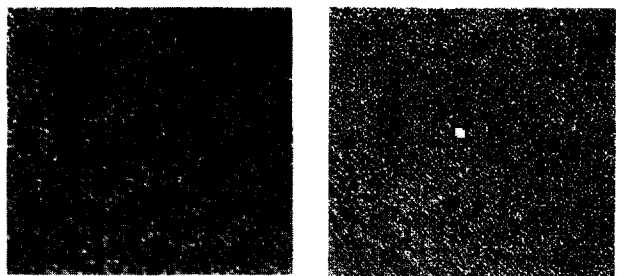
(a) (b)

그림 12. 지배주파수도를 이용한 금형 표면의 결함검출 결과 예. (a) 원 영상, (b) 검출된 결함.
Fig. 12. An example of extracted defects using Dominant Frequency Map. (a) original image, (b) extracted defects.



(a) (b)

그림 13. 그림 12의 영상에 대한 지배주파수도. (a) X 방향, (b) Y 방향.
Fig. 13. Dominant Frequency Maps for the image in Fig. 12. (a) X direction, (b) Y direction.



(a) (b)

그림 14. 지배주파수도를 이용한 금형 표면의 결함검출 결과 예. (a) 원 영상, (b) 결함 검출 결과.
Fig. 14. An example of extracted defects using Dominant Frequency Map. (a) Original image, (b) Extracted defects.

그림 15는 결함이 존재하지 않는 정상금형에 대한 결함 검출 결과를 보여 주고 있다. 본 연구에서 제안된 방법이 결함을 검출하지 않고 있음을 알 수 있다.

결함의 형상에 대한 정보가 없는 상황에서, 본 방법을 적용한 결과, 단지 저주파수 영역을 추출함으로써, 정확하게 결함 검출이 가능하였다. 그림 16에 다른 형상의 결함에 대한 검출 결과를 보인다. 주로 정확히 검출되는 결함은 찍힘

(dent, flaw 형)이며, 긁힘(scratch)형의 결함은 어느 정도의 크기를 가지면 검출 가능하나, 대각선 방향으로 폭이 얇게 나타나면 검출이 어렵다.

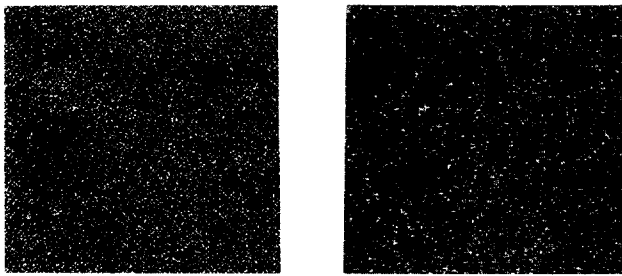


그림 15. 정상 금형 표면에 대한 수행 결과. (a) 원 영상, (b) 결함 검출 결과.
 Fig. 15. Experimental results for a normal die without defects. (a) original image, (b) extracted defects.

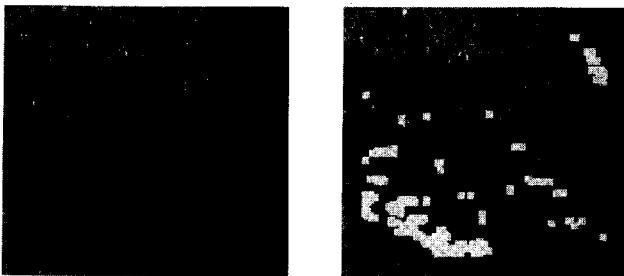


그림 16. 긁힘 형태의 결함에 대한 검출 결과. (a) 원 영상, (b) 결함 검출 결과.
 Fig. 16. Extraction of scratch type defects. (a) original image, (b) extracted defects.

본 방법의 조명에 대한 민감도를 테스트 하기 위한 실험을 수행하였다. 그림 17에, 조명의 변화에 따른 검출 결과를 표시하였다. 의도적으로 조명의 밝기를 어둡게 한 후 (나머지 다른 모든 조건은 불변) 얻어진 두 장의 영상에 대해서 본 방법을 적용한 결과, 조명의 변화에 별로 영향받지 않고, 정확히 결함을 검출하고 있음을 알 수 있다.

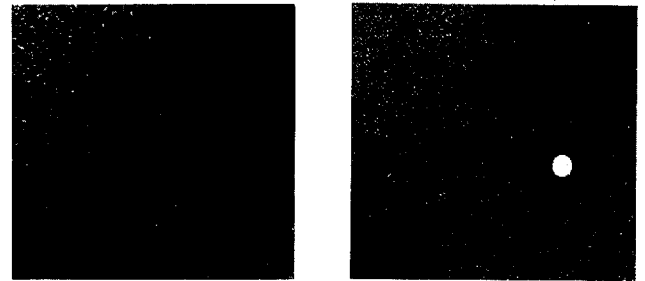
문제점으로 제시되는 것은, 주파수 정보에 기반한 방법이므로, 초점 불량에 민감하다는 점이다. 예로 도시된 지배 주파수도에서 관찰할 수 있듯이, 초점 불량부를 저주파 영역을 나타낸다. 따라서, 실제 검출 시, 초점 불량부를 결함부라고 판정하는 경우가 발생하게 된다. 고주파 강조 필터로 상당 부분 해결할 수 있었으나, 고주파 강조 필터 사용을 통해 얻을 수 있는 효과는 제한적이고, 두 부분을 구분한다는 의미라기보다 초점 불량부의 상태를 향상(enhancement) 시키는 의미가 있을 뿐이다.

다음절에서는, 지배 주파수도 정보에 기반하여, 부분적인 신경 회로망(neural network)의 적용을 통해, 결함부와 초점 불량부의 구분되는 특징들을 학습(learning) 시킴으로써, 각 영역의 인식을 통한 문제 해결을 시도하도록 한다.

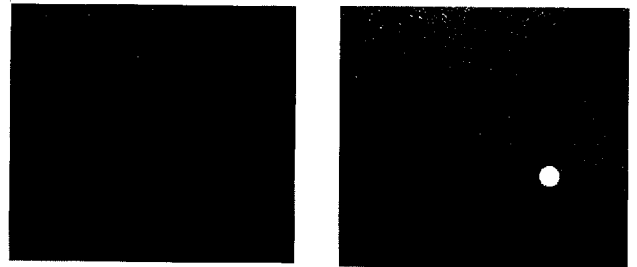
3. 신경 회로망에 의한 결함부의 인식

본 절에서는, 신경 회로망을 이용하여, 보다 높은 단계인 영역의 인식에 의해, 결함부와 초점 불량부의 구분을 시험한다. 신경 회로망을 적용한 이유는, 초점 불량부와 결함부의 구분이 완벽히 안되는 경우가 발생하게 됨으로써, 초점 불량부를 결함부로 인식하는 현상이 간혹 발생하였기 때문이다. 따라서, 지배주파수도를 구성한 후, 앞 절에서와 같은 방법에 기반하여, 결함부라고 판정한 부분에 한해 다시 신

경 회로망을 적용하도록 한다.



(a 1) (a-2)



(b-1) (b-2)

그림 17. 조명 조건의 변화에 따른 결함 검출결과, (a) 조명이 밝을 때, (b) 조명이 어두울 때.

Fig. 17. Experimental results for different illumination conditions. (a) bright illumination, (b) dark illumination.

신경 회로망은, 오차역전파 방법(error back-propagation method)을 이용했고, 가중함수(weight function)는 단극성 시그모이드 함수(unipolar sigmoid function)를, 은닉층(hidden layer)은 2로, 은닉층의 노드는 노드별로 각각 30, 15로, 학습률(learning rate)은 0.3으로, 모멘텀률(momentum rate)은 0.5로 하였다.

먼저, 구분이 용이한 특징치를 선정된 후, 신경 회로망의 입력 벡터(input vector)로 하여 학습시킨다. 다음에, 학습으로부터 계산된 가중치 행렬(weight matrix)을 통해, 출력 노드(output node) 값들을 발생시킨다. 신경 회로망의 이용에 있어서, 영역들간의 확연한 구분을 용이하게 하는 특징치 벡터를 입력 노드로 선정하는 것이 관건이 된다. 원래 영상에 대해, 10x10 크기 영역의 밝기 정보를 입력 노드로 하여 학습시키도록 한다. 학습 시, 많은 수의 표본 추출이 어려운 이유로, 입력 벡터 표본을 각각 50개씩, 도합 300개를 추출한 후, 추출된 값을 평균으로 하여, 일정한 표준 편차 내에서 랜덤한 표본들을 발생 시켰다. 실제 학습 시, 입력 벡터 표본 수를 600개씩 하여 총 3600 개로 학습을 수행하였다. 학습 결과, 적은 수의 표본에도 불구하고, 비교적 빠른 시간에 수렴이 가능했다.

출력 노드는, 4가지의 결함부, 초점 불량 부분, 정상부를 포함하여, 도합 6개로 선정한다. 각 입력 노드는 지배주파수 분석에서 결함부라고 판정한 주변의 10x10의 밝기 값 행렬이다. 행렬의 경향성을 그림 18에 보인다. 그림 18(a)~(c)에서 보여진 것과 같이, 국부적인 10x10 크기의 밝기 정보는, 구분이 용이한 특징이 될 수 있다.

그림 19는 밝기 정보를 이용한 신경 회로망의 적용 결과이다. 초점 불량인 영상의 경우에도, 정확히 결함부를 인식함을 보인다.

지배 주파수도 정보에 기반한 저주파수 영역 판별 후, 주변부의 밝기 정보를 특징치로 한 신경망 회로에 의해, 보다 안정적인 결함부 검출 결과를 확인할 수 있다.

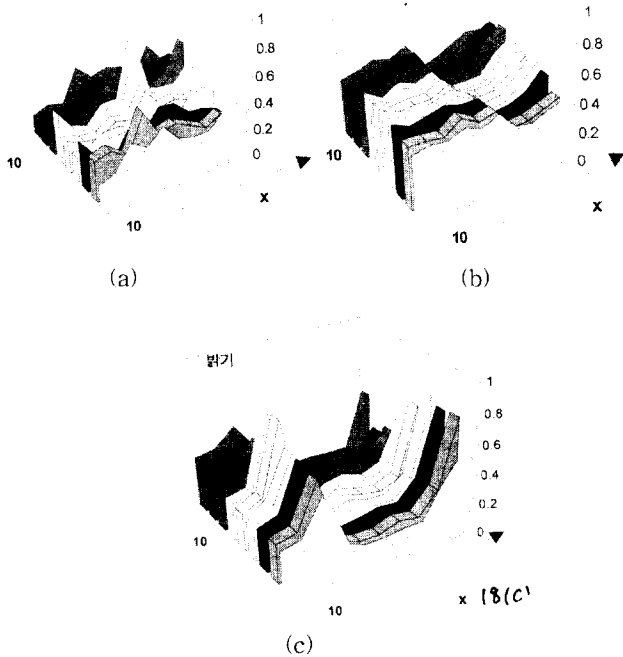


그림 18. 신경 회로망 입력으로 사용된 10x10 윈도우의 대표적인 밝기분포 (밝기의 크기는 0, 1 사이의 값으로 노멀라이즈 된 값임). (a) 정상부, (b) 초점 불량부, (c) 결함부.

Fig. 18. Typical intensity distributions for the neural network (intensity values are normalized between 0 and 1). (a) normal area, (b) defocused area, (c) defect area.

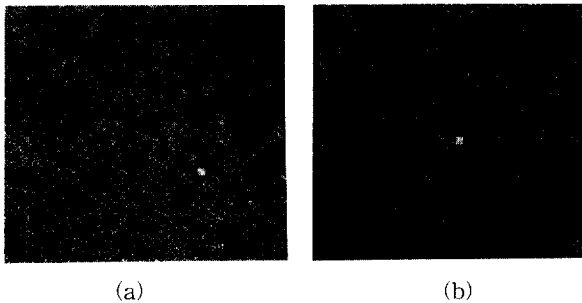


그림 19. 초점 불량부를 가진 금형 표면에 대한 신경망 회로망을 이용한 결함 검출결과. (a) 오른쪽 상단에 초점 불량부가 있는 경우, (b) 왼쪽 하단에 초점 불량부가 있는 경우.

Fig. 19. Extracted defects for an image with defocused parts by the neural network. (a) A case with defocused parts at upper right, (b) A case with defocused parts at lower left.

4. 실험 결과 분석

본 실험에서는, 미시적인 무늬 환경하의 영역 판별 예로서, TV 브라운관의 금형을 선정하여 작업을 수행하였다. 금형 면의 광학적 반응 양태를 분석함으로써, 무늬 영상을 잘 표현하는 특징치로 국부 영역의 지배 주파수를 취하였다. x, y 양방향의 지배 주파수도가 계산되어 사용되었고, 지배 주파수도에서 저주파수 영역을 결함부로 판정하였다.

지배 주파수도를 이용하는 본 방법은 고전적인 방법에 비해, 조명 등 환경의 변화에 별로 영향받지 않는다. 또한,

주파수 정보에 의해 판별할 수 있는 결함의 최소 크기를 밝기 신호 모델을 통해 계산하였다. 속도 향상을 위해, 512x512의 영상을 128x128로 샘플링 하여, 16점 윈도우 FFT를 수행하였을 때, 94μm 이상의 결함을 판별함을 확인할 수 있었다. 현재 이 방법은 덴트(dent), 플로(flow) 형의 결함에는 잘 작용한다고 볼 수 있으나, 폭이 좁은 대각선 방향의 결함에는 그 성능에 어느 정도 한계가 있다. 이는 X, Y 방향의 지배 주파수도를 구성하는데 그 이유가 있다. 안정성을 높이기 위한 방법으로, 원래의 512x512 영상을 보존한 채, 결함 검출 시, 그 주변의 여러 가지 방향에 따른 지배 주파수 계산을 하는 방법이 있을 수 있다.

문제로 제기되는 것 중 하나는, 초점 불량에 의한 저주파수 영역의 발생이다. 이를 해결하기 위해, 밝기 행렬을 입력 벡터로 한 신경망 회로를 이용하여 보다 높은 단계의 영역 인식을 시험하였다. 밝기 행렬을 특징치로 하였을 때, 수렴도와 인식 정확성 면에서 효과적이라는 사실을 확인할 수 있었다.

IV. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는, 랜덤한 무늬 영상의 영역 추출을 위한 방법으로 국부적인 공간 주파수 분석법을 제시하였고, 금형의 표면 결함 검출에 적용하였다. 본 방법을 이용한 랜덤한 환경에서의 영역 추출의 장점은 아래와 같다.

첫째, 밝기의 절대치를 주요 특징치로 하는 방법이 아니므로, 조명의 변화에 검출 결과가 민감하게 변화하지 않는다. 둘째, 경험치의 감소로 인해, 미시적인 관점의 영상에서 영역추출을 행할 때 사용할 수 있는 일반성 있는 방법이다. 셋째, 지배 주파수도를 구성하는 과정의 계산 량이 많으나, 단순 반복적인 계산이므로, 전용 하드웨어의 구현이 용이하다. 넷째, 인간의 시각에 의한 검출과 유사한 방법을 적용하였다.

초점 불량 현상이 지배 주파수도를 통한 영역의 추출에 악영향을 주게 되었고, 본 연구에서는, 초점 정도가 양호하다는 전제하에 실험이 진행되었다. 이때, 초점 불량부와 결함부의 명확한 구별을 위해, 신경 회로망을 결함부의 인식에 적용해서, 밝기 정보를 입력 특징치로 한 경우, 초점 불량인 경우에도 안정적인 검출 결과를 확인할 수 있었다. 본 방법은 지배 주파수도를 구성한 후, 3x3 크기의 커널(kernel)에서의 저주파수 문턱치를 통한 단순 판별을 적용한 것이다. 그러나, 커널의 크기를 확대하여, 주변부의 주파수 정보를 분석함으로써, 추가적인 판별 기준을 두거나, 주변부 특성에 따라 주파수 문턱치를 가변적으로 적용함으로써, 보다 향상된 결과를 획득할 수 있다고 판단된다.

참고 문헌

- [1] K. Y. Song, M. Petron and J. Kittler, "Texture defect detection : A Review", *SPIE Application of Artificial Intelligence X : Machine Vision & Robotics*, vol. 1708, pp. 99-95, 1992.
- [2] T. R. Reed and J. M. Hans Du Buf, "A review of recent texture segmentation and feature extraction techniques", *CVGIP : Image Understanding*, vol. 57, no. 3, pp. 359-372, May, 1993.
- [3] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing, Addison & Wesley*.
- [4] Ballard and Brown, *Computer Vision*, Prentice Hall
- [5] A. Rosenfeld, "Survey : Image analysis and computer vision", "*CVGIP : Image Understanding*", vol. 58, no. 1, pp. 85-135, July, 1993.
- [6] R. Wang, A. R. Hanson and E. M. Riseman, "Texture analysis based on local standard deviation

- of intensity", *IEEE Computer Society Conference on CVPR, Miami Beach, Florida*, pp. 482-488, June 22-26, 1986.
- [7] P. de Souza, "Edge detection using sliding statistical tests", *CVGIP*, vol. 23, pp. 1-14, 1983.
- [8] J. F. Haddon and J. F. Boyce, "Texture segmentation and region classification by orthogonal decomposition of cooccurrence matrices", *Intern. Conf. on Pattern Recognition A*, pp. 692-695,
- [9] T. Matuyama, K. Sauri, and M. Nagao, "A structural analyzer for regularly arranged textures", *Comput. Graph.&Image Proc.*, vol. 18, pp. 259-278, 1982.
- [10] R. Bajcsy and L. Lieberman, "Texture gradient as a depth cue", *CGIP*, vol. 5, no. 1, pp. 52-67 March, 1976.
- [11] Y. C. Jau and R. T. Chin, "Shape from texture using wigner distribution", *In Computer Vision and Pattern Recognition, Computer Society Press*, pp. 515-523, June 1988.
- [12] J. Krumm and S. Shafer, "Local spatial frequency analysis for computer vision", *CMU-RI-TR-90-11: Tech Report, Robotics Institute, Carnegie Mellon University*, no. 11, 1990.
- [13] L. D. Jacobson and H. Wechesler, "Joint spatial/frequency representation", *Signal Processing*, 1988.
- [14] C. A. Lindley, *Practical Image Processing in C*, John Wiley & Sons,
- [15] 김 상원, "국부 주파수 분석에 의한 랜덤한 무늬 영상의 영역 판별", 한국 과학 기술원 자동화 및 설계 공학과 석사 논문, 1994.



김 상 원

1968년 6월 4일생. 1992년 서울대 기계설계학과 졸업. 1994년 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과 졸업(석사). 1994년 ~ 현재 대우중공업 중앙연구소 연구원.



권 인 소

1958년 3월 5일생. 1981년 서울대 기계설계학과 졸업. 1983년 동 대학원 졸업(석사). 1990년 카네기멜론대학 로보틱스 졸업(박사). 1991년 ~ 1992년 일본 도시바 중앙연구소 연구원. 1992년 ~ 현재 한국과학기술원 조교수.