

전자현미경 화상의 정량적 해석을 위한
Stereology, Morphometry 및 Image Analysis

전남대학교 의과대학 병리학교실
정 상 우

<들어가는 글>

형태학에 있어서의 변화량은 다른 물리량처럼 연속적으로서 이산적이 아닙니다. 이와같은 연속적 변화량을 정밀도가 높은 측정방법을 이용하여 수치적으로 표현함으로써 측정치에 객관성과 재현성을 부여할 수 있고 확률론적 해석이 가능하게 된다. 또한 형태학적 자료도 기능학적 자료와 상응하는 높은 정밀도를 가져야만 비로소 형태와 기능을 연계시킨 해석이 가능하게 될 것이다. 따라서, 당연하게, 계량적 형태학은 Virchow 이래로 많은 형태학자의 관심 대상이었으나, 정밀도가 높은 측정방법이 없어 특정분야 이외에는 발달되지 못하였다. 그러나 현재는 microcomputer급에서도 화상분석이 가능하게 되었으며 화상분석에 의한 형태학의 재해석이 활발하게 시도되고 있다.

그러나 지금까지도 전자현미경으로 관찰하여 얻을 수 있는 정보는 다분히 정성적인 것으로 생각하여 왔다. 그 이유는 표본 선택에 있어서의 고의성과 전자현미경 화상 해석에 있어서의 주관성으로 나누어 볼 수 있다.

전자현미경으로 검색하는 부위는 전체 조직의 극히 일부분으로서 흔히 관찰자는 정당한 뒷받침 없이도 검색 부위가 조직 전체를 대변한다고 가정한다. 그러나 조직이 부위에 따라 그 소견을 달리할 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 전자현미경 소견을 객관적으로 표현하기 위해서는, 즉 표본 선택에 있어서 고의성을 피하기 위해서는, 검색 부위를 무작위로 선택하기 위한 표본추출 방법이 요구된다. 무작위 표본추출 방법은 조직 채취 단계에서부터 화상 분석의 단계까지 적용되어야 한다.

전자현미경 화상의 해석이 주관적 평가에 의하는 것은 관찰의 목적이 정성적 정보를 얻기 위한 경우가 많다는 점에도 기인하겠으나 또 하나는 적절한 객관적 평가 방법이 알려져 있지 않기 때문이라고도 생각한다. 전자현미경 화상을 객관적으로 평가하기 위한 방법에는 stereology, morphometry 및 image analysis가 있다.

<추출변량>

현미경 화상내의 대상 구조물을 표현하기 위한 변량들은 형태학의 일반적인 변량들인 기하학적 변량, 광개측학적 변량, 그리고 texture 변량의 3가지로 분류될 수 있다. 그중 화상 해석에 많이 이용되는 변량들은 다음과 같다.

1. Geometric (Global planimetric, Morphometric)

Point density, area density, volume density

Length

Area

Perimeter and convex perimeter

Maximum and minimum diameters (Dmax, Dmin)

Angles of Dmax, Dmin

Ferets x, y

Mass center x, y

Diameter of area-equivalent circle = $2 \cdot ((\text{AREA}/\text{PI})^{**}(1/2))$

Circular shape factor = $4 \cdot \text{PI} \cdot \text{AREA} / \text{PERIMETER}^{**2}$

Elliptical shape factor = Dmin/Dmax

2. Photometric

Mean optical density (ODmean)

Integrated optical density (IOD = AREA*ODmean)

3. Textural

Statistical

: Grey value distribution

Variation of grey values

Structural

: Spatial grey level dependence

Grey level run lengths

Neighbourhood definition

Fourier transformation

위 중에서 얻을 수 있는 변량은 측정방법에 따라 다르다. Stereology 방법으로는 상대적 변량인 area density와 volume density를 구할 수 있다. Morphometry에 의하여서는 도형에 관한 기하학적 변량들을 구할 수 있고, image analysis로는 위의 모든 변량들을 구할 수 있다.

STEREOLOGY

기하학적 확률론에 의하여 단면 또는 투영면의 이차원 화상에서부터 특정 성분의 면적 밀도와 체적 밀도를 측정하는 분야를 stereology라고 한다 (Weibel ER 1979, 1980). Stereology는 광물학에서 광석의 단면을 조사하여 전체 광석중 구성 성분이 차지하는 체적비를 계산하기 위한 방법에서부터 발달하여 왔다. 기하학적 확률론의 원리는 구성 성분의 체적비가 클수록 단면 또는 투영면에서의 면적비가 크며, 따라서 임의의 점이 그 구성 성분의 구조면 위에 놓일 확율이 크다는 것이다. 이 원리에서부터 일정 간격으로 배열된 점으로 구성된 test grid(투명지 위에 일정 간격으로 찍힌 점들의 집합을 생각하라)를 이차원 화상 위에 놓고 특징의 구성 성분 위에 놓이게 되는 점들의 수를 헤아린 후 test grid의 전체 점들의 수와 비교하므로써 구성 성분이 차지하는 면적비와 체적비를 추정할 수 있게 하는 것이 stereology이다. 이를 $P_p = A_a = V_v$ 라고 표시할 수 있다. 점과 면적, 그리고 체적에 관한 이와같은 수식은 어렵잖처럼 보이나 실제로는 확률론적 수학식으로서 점들의 밀도가 면적 밀도와 체적 밀도를 반영하는 믿을만한 것이라는 점이 잘 증명되어 있다.

Stereology에서 전통적으로 사용되는 방법은 점들의 분포비를 조사하는 것으로서 point counting 방법이라고 한다. Test grid를 구성하는 점들의 밀도는 조사대상 성분들이 차지하는 상대적 면적비에 따라 적절하게 결정한다. 점들로 구성된 test grid 외에도 선분 또는 호등, 기하학적 확률분포를 산출할 수 있는 test grid의 사용도 가능하다.

Stereology의 방법은 이차원 화상과 test grid만 있으면 가능하므로 특별한 장비가 없이도 적용이 가능하다. 일반적인 microcomputer에도 point counting의 기능을 쉽게 부여할 수 있으며 morphometry와 image analysis를 위한 device는 대개가 stereology의 기능을 가지고 있다.

Stereology의 방법으로 얻을 수 있는 정보는 상대적인 기하학적 변량으로서 구성대상들의 기하학적 절대량이나 광계측학적 변량 또는 texture 변량에 관한 정보를 거의 얻을 수 없다. Computer system이 발달하기 이전에는 stereology가 계량 형태학의 중요한 분야이었으나 현재는 morphometry와 image analysis로 대체되고 있는 추세이다. 그러나 현재의 계량 형태학의 밑바탕이 stereology라는 것을 부정할 수는 없다.

MORPHOMETRY

구성대상물의 기하학적 특성을 조사 분석하는 것을 형태계측학이라고 정의할 수 있다(Reide UN 과 Reith A 1980). 기하학적 특성을 표현하는 여러 변량들은 자기 설명적(self-explanatory)이므로 기술하지 않는다.

형태계측학적 특성의 측정에는 앞에서 기술한 stereology의 방법이나 뒤에 기술할 image analysis의 방법에 의하여서도 가능하다. 그러나 전통적인 방법은 digitizing tablet 위에 이차원 화상을 올려 놓고 mouse와 같은 추적자로 대상물의 윤곽선을 따라 지나감으로서 대상물이 갖는 여러가지 기하학적 변량의 값을 측정하고 측정값을 data processing unit로 전송하는 것이다. 이와같은 형태계측학적 변량의 측정을 위한 장치로는 개인용 microcomputer, digitizing tablet 및 mouse로도 충분하며 간단한 상업용 program으로 운용이 가능하므로 누구나 손쉽게 접근할 수 있다 (마음만 있으면).

형태계측학적 변량은 단면이 갖는 변량이며 구성 성분의 실제적 변량은

아니다. 그러므로 면적, 직경, 둘레 등의 형태계측학적 변량을 단면의 면적, 단면의 직경, 단면의 둘레 등으로 표시하는 것이 바람직하다. 대상물이 원형 또는 원형과 비슷한 형태를 가지며는 Saltykov(Saltykov 1967)의 unfolding algorithm에 의하여 단면적으로부터 실제 크기를 산출할 수도 있다.

IMAGE ANALYSIS

<화상의 구성>

화상의 구성 - 색화상과 흑백화상

화상은 많은 수의 점들로 구성되어 있으며 각 점들은 색화상의 경우에는 색도(color intensity)를 가지며 흑백화상의 경우에는 휘도(brightness, light intensity)를 가진다.

색화상내 1점의 좌표를 (x,y) 라고 하면 (x,y) 의 색도는 (x,y) 의 함수 $F_c(x,y)$ 로 표현되고 $F_c(x,y)$ 는 빛의 삼원색인 red(R), green(G), blue(B)의 intensity로 분해된다. 즉 다음식이 성립한다.

$$F_c(x,y) = I_R(x,y) + I_G(x,y) + I_B(x,y)$$

$$\begin{aligned} & \times \left[\begin{array}{cccc} I_R(0,0) & I_R(0,1) & \dots & I_R(0,n-1) \\ I_R(1,0) & I_R(1,1) & \dots & I_R(1,n-1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_R(m-1,0) & I_R(m-1,1) & \dots & I_R(m-1,n-1) \end{array} \right] \\ & + \left[\begin{array}{cccc} I_G(0,0) & I_G(0,1) & \dots & I_G(0,n-1) \\ I_G(1,0) & I_G(1,1) & \dots & I_G(1,n-1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_G(m-1,0) & I_G(m-1,1) & \dots & I_G(m-1,n-1) \end{array} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{array}{c}
 + \\
 \left[\begin{array}{cccc}
 I_B(0,0) & I_B(0,1) & \cdots & I_B(0,n-1) \\
 I_B(1,0) & I_B(1,1) & \cdots & I_B(1,n-1) \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 I_B(m-1,0) & I_B(m-1,1) & \cdots & I_B(m-1,n-1)
 \end{array} \right] \\
 \\
 \times \\
 \left[\begin{array}{cccc}
 F_C(0,0) & F_C(0,1) & \cdots & F_C(0,n-1) \\
 F_C(1,0) & F_C(1,1) & \cdots & F_C(1,n-1) \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 F_C(m-1,0) & F_C(m-1,1) & \cdots & F_C(m-1,n-1)
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

수학적으로 색화상을 R, G, B의 intensity를 갖는, 점 $F_C(x,y)$ 의 $m \times n$ 배열이라고 표현할 수 있는 것이다. $F_C(x,y)$ 를 화상단위 또는 화소(image element, picture element, pel, pixel)라고 한다.

흑백화상내 1점의 좌표를 (x,y) 라고 하면 좌표 (x,y) 의 휘도는 (x,y) 의 함수 $F(x,y)$ 로 표현된다. $F(x,y)$ 의 함수값은 흑과 백 또는 그 사이의 어느 한가지 값이므로 휘도를 grey level이라고도 부른다. 화상분석에서는 통상적으로 grey level이라는 표현을 많이 사용한다. 흑백화상내 좌표 (x,y) 는 grey level을 가지므로 흑백화상을 grey image라고 부르는 것이 더 타당하나 관습상 두가지 용어를 혼용한다. 지금부터는 흑백화상보다는 grey image라는 용어를 사용하기로 한다. Grey image를 색화상에서와 마찬가지로 $F(x,y)$ 의 $m \times n$ 배열로 표현할 수 있고 $F(x,y)$ 를 화상단위 또는 화소라고 한다.

$$F(x,y) \times \left[\begin{array}{cccc}
 F(0,0) & F(0,1) & \cdots & F(0,n-1) \\
 F(1,0) & F(1,1) & \cdots & F(1,n-1) \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 F(m-1,0) & F(m-1,1) & \cdots & F(m-1,n-1)
 \end{array} \right]$$

휘도는 광 energy이므로 화소 $F(x,y)$ 는 영(zero)이 아니며 유한(finite)하다. 이를 다음과 같이 표현한다.

$$0 < F(x,y) < \infty$$

화상이 형성된 화상공간의 최소 휘도를 $Lmin$, 최대 휘도를 $Lmax$ 이라고 하며는 위 식은 다음과 같이 표현된다.

$$Lmin \leq F(x,y) \leq Lmax$$

$F(x,y)$ 는 미분이 가능한 연속형 값을 가지므로 analog적이라고 하며 $F(x,y)$ 의 배열로 이루어진 grey image를 analog grey image라고 한다.

하나의 화소는 x 및 y 의 좌표 값과, 세 개의 R, G, B intensity (색화상의 경우) 또는 한 개의 grey level(grey image의 경우)의 값으로 표현된다. 따라서 grey image의 분석에 비하여 색화상분석에 훨씬 큰 연산부하(computational load)가 걸린다. 색화상분석은 cost-efficiency가 높지 않으며 grey image 분석으로도 단색염색이나 광학 filter를 사요하여 색화상을 훌륭하게 분석해 낼 수 있기 때문에 일반적으로 grey image의 분석이 널리 사용되고 있다. 이 글에서는 전자현미경화상이 grey image이므로 grey image의 분석에 대하여 다루는 것으로 한다.

화상의 구성 - Analog Grey Image와 Digital Grey Image

화상이 가지고 있는 정보는 방대하며 방대한 정보로부터 의미를 갖는 단순 정보를 추출해 내기 위해서는 computer의 도움이 필요하다. Computer가 화상의 정보를 처리하려면 먼저 화상을 계수화하여야 한다(digitization). 화상을 계수화하는데에는 scanner와 DC(analog-digital converter)가 필요하다.

Scanner의 감광면(photosensitive surface)은 균일한 크기를 갖는 단위로 구획되어 있다. 각각의 단이를 화상에서와 마찬가지로 화상요소 또는 화소라

고 한다. Scanner에 시료의 화상이 비추인다는 것은 scanner의 감광면상 화소에 화상으로부터 나온 빛이 조사되어 감광면에 시료화상의 영상이 형성되는 것을 의미한다. 즉 scanner의 감광면에 형성된 영상도 화상과 마찬가지로 analog적 화소의 배열이며 analog grey image이다. 화상과 scanner의 영상이 다른 점은 화상의 화소는 무한히 작은 점으로 생각할 수 있고 화상 공간의 최소휘도와 최대휘도 사이의 어떠한 휘도라도 가질 수 있으나 scanner의 화소는 일정한 크기를 가지며 제한된 범위의 휘도만을 갖는다는 것이다. Scanner 화소의 감광도는 아래와 위로 문턱값이 있어서 아래 문턱값보다 약한 빛이 조사되는 경우에는 화소는 영(black)의 휘도를 가지며 위 문턱값보다 강한 빛이 조사되는 경우 화소는 포화(white)된 휘도를 갖는다. 즉 scanner의 한 화소를 $F'(x,y)$ 로 표현하면 다음 관계가 성립한다.

$$Lmin \leq \text{black} \leq F'(x,y) \leq \text{white} \leq Lmax$$

화상과 scanner의 영상이 다른 또 한가지 점은 scanner 화소의 휘도는 scanner내에서 voltage로 변환되고 변환된 voltage를 측정함으로써 휘도를 용이하게 수치화할 수 있다는 것이다.

화상을 분석하기 위해서는 방대한 화상정보를 처리해야 하므로 digital computer를 이용하게 된다. 따라서 analog적 자료를 계수화할 필요가 있다. Scanner 또는 화상분석 system에는 scanner의 화소 좌표와 화소의 휘도에 따라 변환된 voltage amplitude를 정수로 계수화할 수 있는 ADC가 있다. ADC는 scanner의 감광면 중앙부에 위치하는 $N \times N$ 개의 화소에 직교 좌표계(Cartesian coordinate system)에 의한 좌표를 배정한다. 관습상 좌상귀 화소의 좌표를 $(0,0)$ 이라 하고 우하귀 화소의 좌표를 $(N-1, N-1)$ 이라고 하며, 가로를 X축, 세로를 Y축으로 한다. $N \times N$ 개의 화소배열, 즉 정방형의 배열을 선택하는 것은 배열의 연산을 간편하게 하기 위해서이다. ADC는 또한 각 화소의 voltage amplitude를 조사하여 black에 해당하는 amplitude를 0 휘도로 하고 white에 해당하는 amplitude를 $2^n - 1$ 휘도로 하며 그 사이의 amplitude에는 0과 $2^n - 1$ 사이의 휘도를 배정한다. 2^n 개의 휘도로 구분하는 것은 역시 연산을 간편하게 하고 computer의 기억소자를 효과적으로 이용하

기 위한 것이다. ADC에 의해 계수화된 화상을 digital grey image라고 한다. 화상분석에서 화상 또는 grey image라고 함은 통상 digital grey image를 의미하며 화소의 좌표나 휘도를 언급할 때에도 계수화되어 있는 것을 전제로 한다. 지금부터는 이 글에서도 계수화된 의미에서 화상, 좌표, 휘도 등의 용어를 사용하기도 한다. Digital grey image내 한 화소를 $f(x,y)$ 라고 하면 화상은 다음과 같은 화소의 배열이 된다.

$$f(x,y) \times \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \dots & f(N-1,N-1) \end{bmatrix}$$

화상의 해상도는 화소와 휘도의 수에 의하여 결정된다. 화소의 배열이 클수록, 그 휘도의 가짓수가 많을수록 높은 해상도를 갖는다. 그러나 높은 해상도의 화상을 얻기 위하여 화소와 휘도의 수를 증가시키는 데에는 제한이 있다. 512x512개의 화소 배열과 2^8 가지의 휘도로 표현한 화상을 computer system에 기억시켜 처리하기 위해서는 512x512x 2^8 bit의 기억소자, 즉 0.25 Mbyte의 register를 필요로 한다. 고해상도의 화상을 얻기 위해 배열의 크기와 휘도의 수를 증가시키면 하나의 화상을 기억시키기 위해 필요한 기억소자의 크기는 지수적으로 증가한다.

<Image Analysis>

Stereology와 morphometry가 화상내의 구성 성분을 측정하는 데에는 그 구성 성분이 측정의 대상물인가 아닌가하는 것을 결정하기 위한 point 또는 pixel만을 정의하면 된다. 그러나 현미경 화상내의 대상물들은 다양한 휘도나 색도를 가지고 있는 성분이기 때문에 이들로부터 기하학적 변량만을 추출해 낸다면 중요한 정보를 거의 버리게 된다. 휘도 또는 색도가 갖는 정보까지 추출하기 위하여서는 윤곽선 추적 또는 분할(segmentation)로 화상내의 측정

대상을 검출하고 검출된 대상물의 기하학적 변량과 함께 휘도 또는 색도가 갖는 광계측학적 또는 texture 변량들을 구하는 것이 필요하다(Gonzalez RC와 Wintz P 1987).

Image analysis는 ① 화상획득과 처리, ② 분할, ③ 대상검출, ④ 측정, ⑤ 분석의 다섯단계를 거쳐 이루어진다 (그림 A). 현미경 화상을 video camera를 통하여 analog 신호로 변환하고 ADC(analog-digital converter)로 analog 신호를 digital 신호로 바꾸어 grey image(digital image)를 얻는다. Grey image의 휘도를 처리하여 분할에 의해 측정 대상으로 구성된 대상화상(object image)을 추출한다. 추출한 대상화상으로부터 원하는 각종 변량들을 측정하여 통계학적으로 분석한다.

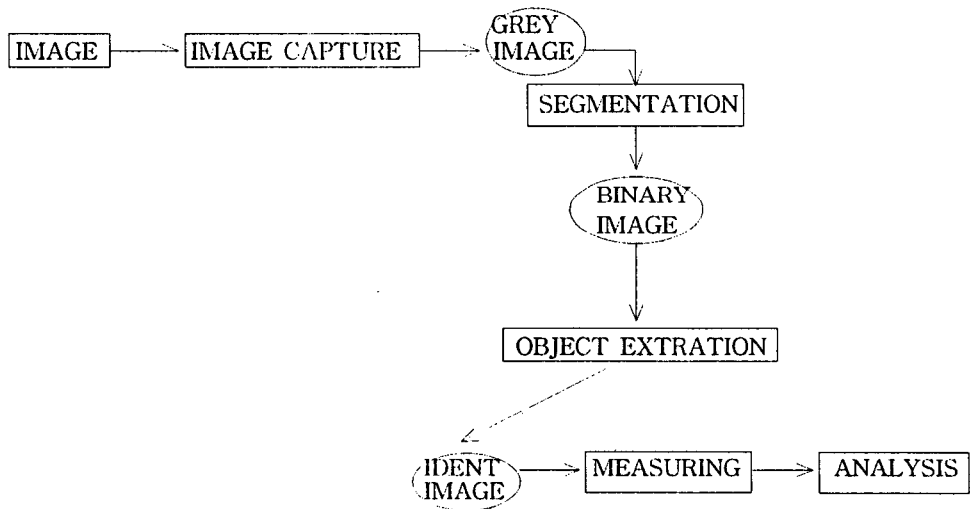


그림 A. Image Analysis의 다섯 단계와 중간 처리 결과

① 화상의 획득과 처리 (Image capture and processing)

Digital grey image를 만드는 것을 화상획득이라고 한다. 획득된 화상으로부터 곧바로 object를 선택하여 변량을 측정할 수도 있으나 화상을 획득할 때의 오류를 보정하고 object의 선택을 용이하게 하기 위해서는 획득된 화상의 전처리가 필요하다.

시료가 없는 상태에서 광원에서부터 조사된 빛으로 만든 화상을 reference

image라고 한다. 이론적으로는 reference image의 화소는 동일한 휘도를 가져야 하나 실제적으로는 그렇지 못하다. 그것은 조사광의 변동, 광축에서부터 화소까지의 거리, scanner의 먼에 따른 감도차이등, 광학기기의 물리적 성질상 발생하는 오차 때문이다. 그 결과, 화상분석 system에서 얻고자 하는 휘도의 식별은 장애를 받게 되는데 이를 shading 현상이라고 한다. Shading의 보정은 시료가 없는 상태의 화면에서 각 화소의 휘도에 따른 보정치를 산출하였다가 시료화상의 각 화소의 휘도에 이 보정치를 곱하여 줌으로서 시료의 모든 화소가 일정한 광조사를 받은 것처럼 교정시켜 준다(shading 오차는 뒷 단계에서 software 적으로도 보정할 수 있다). Shading 보정은 특히 염색강도의 측정과 같이 휘도정보로부터 변량을 추출하고자 할 때에는 필수적이다. Shading 보정외에도 대조강화(contrast enhancement)와 noise 제거를 위한 다양한 함수를 사용하여 휘도를 변환시킴으로서 분할을 더욱 용이하게 해줄 수 있다.

② 분할 (Segmentation)

화상에서 세포나 세포핵과 같이 측정의 대상이 되는 부분을 object 또는 feature라고 하며 나머지 부분을 배경(background)이라고 한다. 화상에서 object와 배경을 구분하는 것을 분할이라고 한다. 분할의 방법에는 문턱값의 설정(thresholding), 변정의(edge definition) 및 region growing 등의 방법이 있다. 문턱값 설정에 의한 분할은 아래와 위의 문턱값을 지정한 후, 지정된 문턱값 이외의 휘도를 갖는 화소를 black으로 만들어 object와 배경을 구분한다. 변정의는 일반적으로 명암이 object의 경계 부위에서 가장 크게 변하기 때문에 휘도의 변화가 큰 화소를 잡아냄으로서 object의 변을 추적할 수 있다는 원리를 이용한다. Region growing은 특정 부분을 핵으로하여 그 주위 화소의 휘도를 조사한 후, 서로 관련된 값을 가지는 화소들을 함께 묶어나가는 방법이다. 분할을 할 때에 배경의 화소에 black의 값(0)을 배정하고 object의 화소에 white의 값 (2^8 가지의 휘도 수를 갖는 경우에는 255)을 배정하며는 black과 white의 2치화상(binary image)을 얻게 된다. 2치화상을 대상으로는 침식과 팽창과 같은 mathematical morphology의 적용이 가능하고 AND, OR, NOT, EXCLUSIVE OR와 같은 Bool 대수의 연산이 가능하

다.

③ 대상추출 (Object extraction, Feature extraction, Connectivity analysis)

배경의 화소를 black으로 표현하고 object의 화소를 white로 표현한 화상이 2치화상이다. 그러나 2치화상에서는 white의 휘도를 갖는 화소들이 어떤 object에 속하는지가 아직 정의되어 있지 못하다. 예를 들면 2치화상내에 2개 이상의 세포핵이 있는 경우에 어느 화소가 어떤 세포핵의 구성화소인지는 아직 정의되어 있지 않은 것이다.

하나의 object를 구성하는 화소들은 서로 연결되어 있으므로 연결된 화소를 함께 묶어 주며는 독립된 object를 정의할 수 있다. Object를 정의하기 위하여 white의 값을 갖는 화소들의 연결성을 조사하는 것이 대상추출이다. 대상추출의 방법에는 (0,0)의 좌표에서부터 X축의 방향에 따라 연결성을 갖는 화소값을 기억하는 run-length encoding 방법과 경계를 구성하는 화소값을 기억하는 boundary chain encoding의 방법이 있다.

④ 측정 (Measuring)

정의된 object를 대상으로 object의 변량을 측정한다. 변량은 object의 형태 계측학적 변량, 광계측학적 변량과 구조학적 변량등 object가 갖는 특성의 전영역을 포함한다. 측정된 parameter들을 응용과 관련된 단위로 쉽게 보정할 수 있다.

⑤ 분석 (Analysis)

화상분석의 출력은 정량적인 산술값(arithmetic value), 논리값(logical value) 또는 분류값(group value)을 가진다. 만일 화상으로 분석 결과가 출력된다면 그것은 엄밀한 의미에서는 화상분석이라고 할 수 없다.

분석에서는 측정된 변량을 대상으로 논리 및 산술 연산을 시행하고 분류와 통계처리를 시행한다. 형태학적 변량은 연속적이고 서로 중첩될 수 있으며 그 무게(weight)가 잘 정의되어 있지 못하다. 그러므로 '충분한' 크기의 표본을 대상으로 가능한 변량을 모두 측정하여 다변수분석(multivariate

analysis)을 통해 가장 길정적이고도 독립적인 변량들을 찾아야 한다.

<끝맺는 글>

이 글에서는 현미경 화상의 정량적 해석 방법 - stereology, morphometry, image analysis - 을 전자현미경 화상을 예로 들어 기술하였다. 그러나 기술 내용은 화상 해석에 관한 일반적인 것으로서 주사현미경 화상등 표본이나 화상의 종류에 제한되지 않고 적용 가능하다. 어느 방법론과 마찬가지로 시작하는 사람이 넘어야 할 문턱이 있으나, 일단 그 문턱을 올라서면 평탄한 길이 있게 마련이다. 문제는 의지라고 생각한다.

REFERENCES

Gonzales RC Wintz P: Digital Image Processing. 2nd edition, Massachusetts, Addison-Weskey Publishing Co, 1987

Riede UN, Reith A (Eds): Morphometry in Pathology. Stuttgart, Gustav Fischer Verlag, 1980

Saltykov SA: The determination of the size distribution of particles in an opaque material from a measurement of the size distribution of their sections. In Proc 2nd Intern Congr for Stereology (Chicago), Berlin, Springer Verlag, 1967, p.163

Weibel ER: Stereological Methods. I, Practical Methods for Biological Morphometry. London, Academic Press, 1979

Weibel ER: Stereological Methods. II. Theoretical Foundations. London, Academic Press, 1980