

디지털 영상 합성에 의한 X선 단층 영상의 형상 정확도와 선명도 분석

Analysis of X-ray Image Qualities - Accuracy of Shape and Clearness of Image using X-ray Digital Tomosynthesis

노 영 준, 조 형 석, 김 형 철, 김 성 권

(Young Jun Roh, Hyung Suck Cho, Hyeong Cheol Kim, and Sung-Kwon Kim)

Abstract : X-ray laminography and DT (digital tomosynthesis) that can form a cross-sectional image of 3-D objects promise to be good solutions for inspecting interior defects of industrial products. DT is a kind of laminography technique and the difference is in the fact that it synthesizes the several projected images by use of the digitized memory and computation. The quality of images acquired from the DT system varies according to image synthesizing methods, the number of images used in image synthesizing, and X-ray projection angles. In this paper, a new image synthesizing method named 'log-root method' is proposed to get clear and accurate cross-sectional images, which can reduce both artifact and blurring generated by materials out of focal plane. To evaluate the quality of cross-sectional images, two evaluating criteria: (1) shape accuracy and (2) clearness of the cross-sectional images are defined. Based on these criteria, a series of simulations are performed, and the results show the superiority of the new synthesizing method over the existing ones such as averaging and minimum methods.

Keywords : X-ray laminography, cross-sectional image, digital tomosynthesis, image evaluation

I. 서론

제품의 내부 결함이나 외관상 가려진 부분의 검사는 X선의 투과 성질을 이용한 방법이 사용된다. 그러나, X선 투사 영상(Radiography image)에서는 투사 선상에 있는 모든 물체가 겹쳐진 채로 영상이 얻어지므로 대상 물체의 정확한 내부 형태를 알기 어렵다. 따라서, 정확한 검사를 위해서는 임의의 단면에 대한 영상을 얻는 X선 단층 영상법이 요구된다. 최근 전자 회로기판은 실장 효율의 극대화를 위해 BGA(Ball Grid Array), FCA(Flip Chip Array) 등 새로운 형태의 부품을 사용한 접합 기술이 이용된다. 그러나, 이들 부품은 실장 부위가 칩의 안쪽에 붙어있기 때문에 기존의 외관 검사가 불가능할 뿐 아니라 리드의 영향과 납땀부의 접침 문제 등으로 인해 기존의 X선 투사 영상으로 검사하기 어려우므로 X선 단층 영상 기법을 이용하여 임의의 한 단면을 검사할 수 있는 검사 시스템이 요구된다.

단층 영상을 얻기 위해서는 투사 방향을 달리하여 얻은 여러장의 영상이 필요하며, 토모그래피(tomography), 라미노그래피(laminography), 디지털영상합성법(digital tomosynthesis) 등의 방법이 있다. 토모그래피는 구하고자 하는 단면에 대한 X선 투영 데이터들을 얻고 이들의 연산에 의하여 단면 영상을 얻는 방식으로, 의료 부문 및 제품의 내부 결함 검사에 널리 적용되고 있다. 라미노그

라피는 X선의 위치와 X선 검출기의 상대 위치에 의하여 결정되는 특정 단면(초점 평면)에 대한 단층 영상을 얻어내는 방식으로 Adams[1], Black[2] 등에 의하여 일반 전자 부품의 리드부 납땀 검사와 Rooks[3][4] 등에 의한 BGA 납땀 검사에 적용되었다. 그러나, 라미노그래피 영상에서는 투사 X선 상에 존재하는 초점 평면밖의 다른 물체의 잔상이 남는 가림 현상(artifact)으로 인하여 단면 영상의 형상이 왜곡되거나 영상의 선명도가 저하된다. 이러한 문제점을 개선, 극복하기 위한 방법으로 영상을 단순 중첩시키는 대신 컴퓨터에 의한 영상 합성으로 구현한 것이 디지털 영상 합성법이며[1][5], 대상 물체에 따라 영상의 합성 방식을 달리함으로써 상퍼짐이나 가림 현상을 줄인, 보다 개선된 단층 영상을 구할 수 있게 된다. Rooks[2]는 BGA와 flip chip에 대한 단층 영상 획득에 최소법을 적용하여 라미노그래피 영상 보다 향상된 영상을 얻음을 보였다[6]. 그러나, 현재 영상 합성 방식에 대한 연구와 합성된 단층 영상에 대한 정량적인 평가에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 가림 현상과, 상퍼짐을 줄이고 선명한 단층 영상을 얻기 위한 디지털 영상 합성법과 영상의 평가에 대하여 연구한다. 단층 영상은 영상 합성법 외에 X선 투사각, 합성 영상의 개수 등에 따라 다르게 나타나는데, 이들 영상은 피검물의 초점 평면에 대한 단층 형상에 대한 정확도의 척도와 영상의 선명성 정도의 두 가지에 대하여 평가할 수 있으며 이에 대한 정량화된 평가 기준을 제시한다. 그리고, 두 가지의 평가 기준에 의하여 향상된 단층 영상을 얻기 위하여 평균법과 최소법의 장점을 동시에 취하여 상퍼짐을 줄이고 선명한 영상

접수일자 : 1998. 4. 20., 수정완료 : 1999. 4. 20

노영준, 조형석 : 한국과학기술원 기계공학과

김형철, 김성권 : 삼성전자 생산기술센터

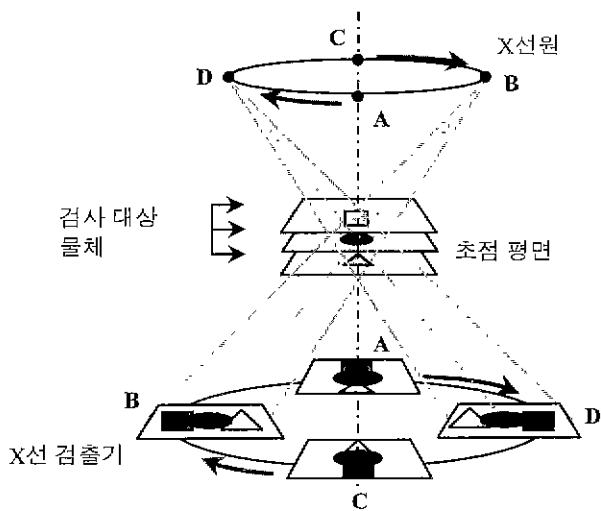
※ 본 연구는 1996-1997년 한국과학기술원에서 삼성전자의 산 학과제로 연구되었습니다.

을 얻기 위한 log-root법을 제안하고 모의 실험을 통하여 합성 영상의 효과를 보인다. 모의 실험에서는 단순한 형상을 갖는 물체에 대하여 합성 영상 개수, 투사각, 영상 합성법을 달리하여 얻은 단층 영상을 정확도와 선명도의 두 가지 평가 기준에 의하여 평가하고, 각 영향을 분석한다.

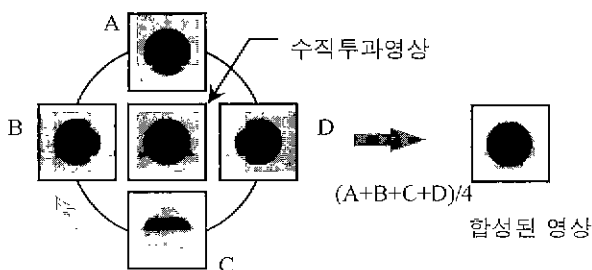
II. X선 단층 영상 획득의 원리

1. 라미노그래피의 원리

라미노그래피의 원리는 X선 영상에서, 구하고자 하는 단면 이외의 부분에 의한 상의 영향을 줄여 특정 단면의 영상을 상대적으로 선명하게 부각시키는 방법이다[7]. 그림 1(a)는 라미노그래피의 원리를 설명하는 그림으로 영상을 얻고자 하는 단면에 대하여 X선을 일정 각도로 투사하며 회전시키면, 그 면에서 기하학적인 초점 평면이 결정된다. 이때 X선원의 위치와 초점 평면의 중심의 연장선 상에 검출기의 중심이 위치하도록 동기화시켜 각 방향에서 투사한 X선 영상을 얻게 되면, 초점 평면 상의 물체는 투사 방향에 상관 없이 항상 검출기의 일정한 위치에 상을 맺게 되는 반면 초점 평면 밖의 물체는 투사 방향에 따라 검출기에 상을 맺는 위치가 달라지게 된다. 이 원리로부터 각 방향에서 얻어진 영상들을 중첩시키게 되면 초점 평면상의 형상만이 선명하게 부각되게 된다[1]



(a) 라미노그래피의 영상 획득 방법



(b) 영상 중첩에 의한 단층 영상 획득

그림 1(b)는 라미노그래피의 원리에 의하여 세 개의 단면에 각기 삼각형, 원형, 사각형의 물체가 있는 경우, 초점 평면상의 물체인 원형에 대한 단층 영상을 구하는 것을 보여주는 것으로써, 각 방향에 대하여 X선 투사 영상을 구하였을 때의 영상들과 이들 영상을 평균화하여 얻은 초점 평면에 대한 단층 영상을 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이 초점 평면에 있는 원형의 물체는 각 영상에서 위치 동일한 위치에 상을 맺지만 타 평면상의 삼각형, 사각형은 각기 다른 곳에 상이 맺게 되어 이들 영상을 중첩시키게 되면 그 영향이 줄어들어 중첩 영상에서는 나타나지 않게 된다.

라미노그래피 방식으로 단층을 얻기 위해서는 X선의 위치와 X선 검출기의 위치를 상대적으로 이동시킬 수 있는 구조가 필요하다[6]. 최근 개발된 SBL(Scanned Beam Laminography)는 X선을 전기적으로 조향하여 빠르게 회전시키고 동시에 형광스크린을 회전시켜 얻어지는 영상들을 회전하는 거울을 통하여 유도된 투사 영상을 중첩. 카메라에서 라미노그래피 영상을 얻는다.

2. 단층 영상에서 초점 평면 밖의 물체의 영향

라미노그래피 단층 영상에서 초점 평면 밖의 물체는 각 투사 영상을 중첩함에 따라 그 영향이 줄어든다. 그러나, 실제로 그 영향이 완전히 제거되지 않고 상퍼짐으로 남아 선명도를 저하시키는데, 특히 X선 투과율이 낮은 물체의 경우에는 그 영향이 크다. 단층 영상에서 초점 평면 밖의 물체에 의한 잔상으로 인하여 원래의 단층 형상을 제대로 구하지 못하는 경우가 생길 수 있는데 이를 가림 현상(artifact)라고 한다[8][9]. 이는 특정 단면만을 여러 각도에서 투사하는 토모그래피와는 달리 라미노그래피 영상은 초점 평면 밖의 물체까지 함께 투영된 영상들을 중첩시켜 얻기 때문이다.

가림 현상은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 그 중 하나는 초점 평면 근처에 단면이 큰 물체가 있는 경우 투사 방향을 달리해도 항상 겹치는 부분이 존재하여 단층 영상에서 일부분이 남는 경우로 가림 현상 1로 정의한다. 그리고, 이는 투사각과 대상 물체의 기하학적 관계에 의하여 결정되므로 투사각에 따라 그 정도가 달라지거나 나타나지 않을 수도 있게 된다. 두 번째 가림 현상의 원인으로는 제한된 투사각으로 초점 평면 근처의 물체를 피하지 못하는 전자의 경우와 달리 각 투사 영상 중에서 일부 방향에서 X선의 감쇄가 특별히 커서 영상들을 중첩시키더라도 그 영향이 남아 형상 오차를 유발하는 경우로 가림 현상 2로 정의한다. 결과적으로 실제 단면 형상이 초점 평면 밖의 물체에 의하여 왜곡되어 얻어지는 것을 통칭하여 가림 현상이라고 정의한다. 그림 2는 두 가지의 가림 현상에 대하여 설명하는 그림으로 중첩 영상에서 초점 평면상의 물체 A, B외에 가림 현상에 의한 또 다른 잔상이 남는 것을 보여준다. 그림 2(a)는 가림 1에 해당하는 것으로 초점 평면이 아닌 곳에 위치한 물체 C가 X선 위치 1,2에 대하여 각각 영상 평면에서 일부가 겹치게 되어 중첩 영상에서도 그 영향이 그대로 남은 것이며, 그림 2(b)는 가림 현상 2의 예로써 초

그림 1. 라미노그래피의 원리.
Fig. 1. Principle of laminography.

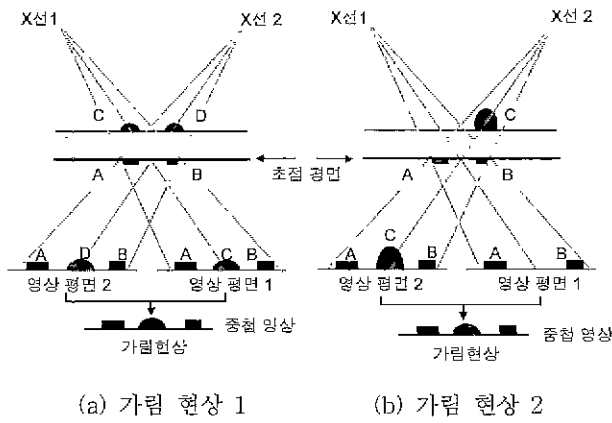


그림 2. 라미노그래피 영상에서의 가림 현상.
Fig. 2. Artifacts in laminography image.

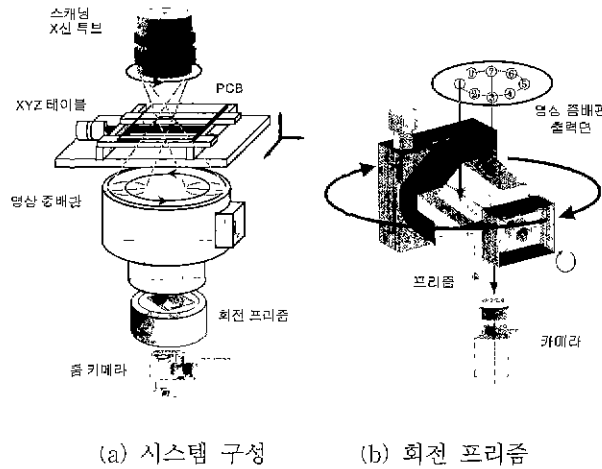


그림 3. 디지털 영상 합성 시스템.
Fig. 3. Digital tomosynthesis system.

점 평면 밖의 물체 C에 의한 X선의 감쇄가 상대적으로 커져 영상의 중첩 후에도 그 영향이 남는 경우이다.

3. 디지털 영상 합성법

라미노그래피는 앞서 설명한 것과 같이 가림 현상에 의한 영상 오차나 상퍼짐 효과로 단층 영상의 선명도가 떨어지는 단점이 있는데 이를 개선하기 위한 방법으로 디지털 영상 합성법이 있다. 디지털 영상 합성법은 라미노그래피와 영상을 얻는 원리에 있어서 같으나 각기 다른 방향에서 투사된 영상을 단순 중첩하는 라미노그래피와 달리 각 방향에서 투사한 영상들을 메모리에 저장한 후, 컴퓨터에 의한 연산으로 합성하는 방식이다. 즉, 각 방향에서 구한 각각의 영상을 평균화, 최소값 연산 등의 합성 과정을 통해 단층 영상을 얻음으로써 라미노그래피 영상의 상퍼짐이나 가림 현상의 영향을 줄여주거나 피하고자 하는 방식이다[6].

디지털 영상 합성법을 구현하기 위한 단층 영상 시스템은 그림 3과 같다. 일정 범위 내의 임의의 위치에 X선을 발생시킬 수 있는 특수 X선 튜브를 사용하여 여러 방향에서 X선을 피검물에 투사할 수 있으며, X선 검출기로 큰 입력면을 갖는 영상 증배관을 사용하여 X선 검

출기의 이동 없이 여러 방향의 투사 영상을 얻을 수 있도록 한다. 즉, 회전 X선의 위치에 따른 검사 영역의 투사 영상은 영상 증배관의 가장자리에 차례로 맺히게 되며 출력면에 맺히는 전체 영상에서 검사 영역에 대한 부분만을 취하는 방식으로 각 방향의 투사 영상을 얻는다. 이때, 영상 증배관 출력면에서의 부분 영상은 회전 프리즘을 통하여 한대의 카메라로 얻도록 하였다. 그림 3(b)는 회전 프리즘의 구조를 나타내는 그림으로, X선이 회전하며 8방향의 투사 영상을 얻는 경우, 프리즘의 굴절을 이용하여 영상 증배관의 중앙에 위치한 카메라로 X선 투사 위치에 따라 맺히는 원주 상의 8개의 영상을 차례로 얻게 된다. 그림의 시스템 구조에서는 투사 영상, 단층 영상을 모두 얻을 수 있으며, 영상 증배관의 임의의 위치를 검출기로 사용할 수 있으므로 배율과 투사각의 변화가 유연한 장점을 갖게 된다.

III. 단층 영상 품질 결정 요인과 영상의 평가

X선 단층 영상에서 물체의 단면 형상을 쉽게 파악하기 위해서는 물체의 단면 형상에 대한 영역이 배경 영상에 대하여 뚜렷해야 하며, 또한 단면 형상을 정확하게 나타내어야 한다. 따라서, 명암 분포의 뚜렷한 정도와 단면 형상의 정확한 정도를 X선 단층 영상의 품질로써 평가할 수 있다. 디지털 영상 합성에 의한 X선 단층 영상의 품질을 결정하는 주요 요인으로는 X선 투사각, 합성 영상의 개수, 영상 합성방법 등이 있다. 이들 요인 중, X선 투사각은 영상 획득의 기하학적 조건으로 가림 현상을 결정 짓는 주된 요인이며, 단층 영상 합성에 사용되는 영상의 개수는 초점 평면 영상의 배경에 대한 상대적 선명도에 주된 영향을 준다. 그리고, 각 방향에서 구해진 영상들을 연산하는 방법에 따라서 라미노그래피에서 나타나는 상퍼짐을 줄이거나, 선명도를 개선하는 등 단층 영상의 질을 개선할 수 있게 된다. 본 장에서는 단층 영상의 질에 영향을 미치는 X선 투사각, 합성 영상의 개수, 영상 합성법에 대하여 각각의 영향에 대하여 설명한다

1. 합성 영상의 개수

한 초점 평면에 대한 단층 영상을 얻기 위해서는 서로 다른 방향에서 투사하여 얻은 영상들을 합성해야 한다. X선과 형광 스크린의 회전에 의하여 연속적으로 생성되는 영상들을 중첩 시키는 라미노그래피와 달리 디지털 영상 합성에서는 제한된 개수의 영상을 사용하여 단층 영상을 얻게 된다. 합성 영상의 개수를 충분히 많이 취하여 이들 영상을 평균화하게 되면 라미노그래피에서의 광학적 노출과 유사한 효과의 영상이 얻어진다. 평균화의 방법을 사용하여 단층 영상을 얻는 경우, 영상의 개수에 비례하여 초점 평면 밖의 물체에 의한 잔상이 점차 소멸되므로 개수가 많을 수록 그 효과는 크다. 특히, 투과율이 낮은 초점 평면 밖의 물체에 의한 잔상으로 나타나는 가림 현상 2의 경우 합성 영상의 개수에 비례하여 그 영향이 크게 줄어든다. 또한 제한된 방향에서 X선을 투사함에 따라 합성 영상에서 초점 평면밖의 물체 잔상은 방향성을 남긴다. 합성 영상의 개수를 많이 할수록 전방향에 대하여 고르게 상을 퍼지게 하여 잔상의 방

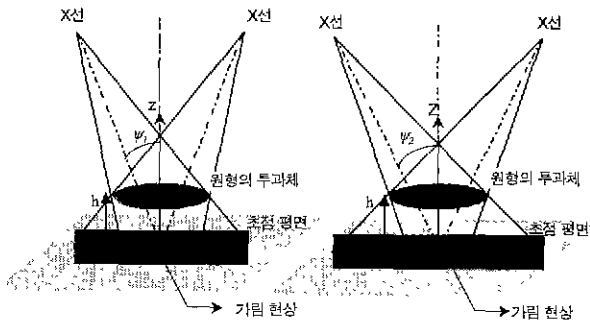


그림 4. 가림 현상에서의 투사각의 영향.
Fig. 4. X-ray projection angle effect on artifact.

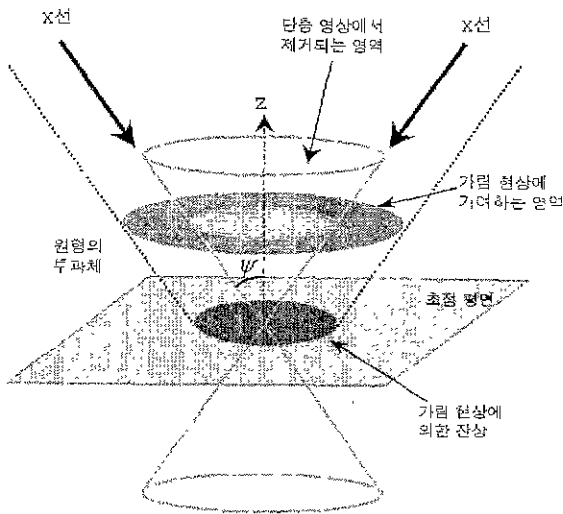


그림 5. X선 투사각에 따른 가림 현상의 영역.
Fig. 5. Artifact area with respect to x-ray projection angle.

향성 효과를 줄이고 정밀한 영상을 얻을 수 있다.

2. X선 투사각과 가림 현상

라미노그래피 방식의 X선 단층 영상에서는 초점 평면 이외의 부분이 함께 영상으로 얻어지므로 가림 현상에 의한 영상 오차가 존재한다. 특히, 가림 현상중 가림 현상 1의 경우, 투사각은 가림 현상으로 남는 영상 오차와 직접적인 연관이 있다.

그림 4는 X선 투사각의 가림 현상에 대한 효과를 보여주는 그림으로, 초점 평면에서 높이 h만큼 떨어진 곳에 위치하는 원형 모양의 투과체에 대하여 2방향에서 얻은 영상을 중첩하여 단층 영상을 구할 때, 투사각이 상대적으로 큰 ψ_2 의 경우, 초점 평면상에서 상이 겹치는 영역이 줄어들음을 보여준다. 이와 같이 가림 현상은 투사각과 직접적인 관계를 갖지만 대상 물체의 형상에 따라 중첩되는 영역이 다르므로 투사각만으로 일반화할 수는 없다. 그러나, 라미노그래피의 X선 투사 조건(X선이 중심축을 기준으로 원형의 궤적에서 초점 평면을 투사)을 통하여 원뿔이나, 구의 형상과 같이 방향성이 없는 원형의 단면을 갖는 물체에 대한 가림 현상 1은 다음과 같은 해석이 가능하다. 초점 평면에서 거리 h의 물체 단면이 초점 평면에서 잔상을 남기지 않기 위해서는 단면 반경

표 1. 원뿔과 반구형상에 대한 가림 현상 오차.

Table 1. Artifact error for cone and hemisphere objects.

원뿔	$e_{art}(h) = 0$ $e_{art}(h) = (\tan \alpha - \tan \psi) \cdot h$	$\alpha < \psi$ $\alpha \geq \psi$
반구	$e_{art}(h) = 0$ $e_{art}(h) = (R/\cos \psi - h \cdot \tan \psi) - \sqrt{R^2 - h^2}$	$h < R \cdot \sin \psi$ $h \geq R \cdot \sin \psi$

α : 원뿔 꼭짓점의 중심각, ψ : 선 투사각

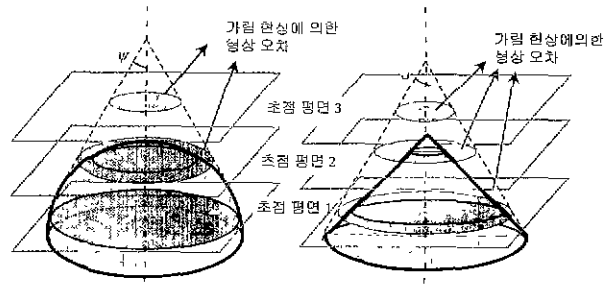


그림 6. 반구와 원뿔의 가림 현상.
Fig. 6. Artifact in cone and hemisphere objects.

r 이 $h \cdot \tan \psi$ 보다 작아야 하며 이보다 큰 물체는 겹치는 영역이 존재하여 가림 현상으로 남는다.

즉, 단층 영상에서 상퍼짐으로 제거될 수 있는 영역은 그림 5와 같이 초점 평면상에 꼭짓점을 두고 아래, 위로 중심 각 ψ 를 갖는 가상의 원뿔 내부 영역이며, 이 원뿔의 외부 형상은 가림 현상으로 잔상을 남기는 영역이다. 이러한 기하학적 관계를 통하여 높이 방향으로 반지름 $r(z)$ 의 원형 단면을 갖는 물체에 대하여 높이 h에 초점 평면을 두었을 때, 단층 영상에서 구해지는 단면 형상의 반지름 r_{art} 은 다음 (1)로 표현 된다.

$$r_{art}(h) = \max\{r(z) - |(z - h) \cdot \tan \psi\} : r_{art}(h) \geq r(h) \quad (1)$$

$$e_{art}(h) = r_{art}(h) - r(h) : r_{art}(h) \geq r(h) \quad (2)$$

(1)에서 투사각 ψ 가 커질수록 $r_{art}(h)$ 가 $r(h)$ 에 가까워지며, 이는 단층 영상이 실제 단면 형상에 가까운 영상이 얻어지게 됨을 의미한다. 이때의 영상 오차는 (2)와 같이 실제 단면의 형상 반지름과 합성 영상의 반지름 차이로 정의된다. 위 (2)에 의하면, 원뿔과 반구형의 형상에 대한 단면 영상을 구할 때 얻어지는 가림 현상의 영상 오차는 표 1과 같다.

즉, 원뿔인 물체의 경우 원뿔의 중심각 α 가 투사각 ψ 보다 큰 경우, 그림 6(a)와 같이 초점 평면의 높이가 달라짐에 따라 오차는 선형적으로 증가하여 꼭짓점에서도 마치 일정 크기의 단면을 갖는 것처럼 상을 맺게 된다. 또한, 투사각이 원뿔의 중심각과 같거나 더 큰 경우 모든 단면에 대하여 오차 없이 정확한 단면을 구할 수 있다. 반 구형의 물체 경우에 있어서는 가림 현상에 의한 영상 오차가 그림 6(b)와 같이 높이에 따라 다르게 나타난다. 즉, 반구의 바닥면에서부터 높이 $h = R \sin \psi$ 까지는 가림 현상 없이 정확한 단면 형상을 얻을 수 있는 높이

가 되며, 동일한 반구에 대하여 투사각이 클수록 정확한 단면 형상을 구할 수 있는 높이 h의 범위가 커지며, 가림 현상이 존재하는 구간에서의 오차 또한 줄어들을 수 있다.

그러나, 단면 형상이 원형이 아닌 일반적인 형상의 경우, 가림 현상 1과 가림 현상 2에 의한 오차가 함께 나타나게 되어 투사각과 오차의 관계를 일반화하기 어려우며, 형상에 따라 가림 현상 2가 지배적인 경우, 투사각이 클 때 형상 오차가 오히려 커질 수 있다.

3. 영상 합성 방법

여러 각도에서 투사한 영상들을 합성하여 초점 평면에 대한 단층 영상을 구할 때 다양한 영상 합성 알고리즘을 적용하여 라미노그래피의 단점을 개선할 수 있는 것이 디지털 영상 합성법의 큰 장점이다. 라미노그래피에서 나타나는 가림 현상 중, 가림 현상 1의 경우는 영상을 얻는 제한된 투사각도에 기인한 것으로 추가의 정보 없이 해결하기 어려운 단층 영상의 단점이며, 가림 현상 2의 경우에는 합성 방식의 변화에 따라 해결이 될 수 있다.

영상 합성은 단층 영상에서 초점 평면상의 형상에 대한 선명도를 높이고, 동시에 상퍼짐과 가림 현상을 줄일 수 있는 방향으로 이루어 져야 한다. 따라서, 이 두 가지의 기준을 만족시키기 위한 합성법으로 각 영상을 화소별로 다음과 같은 연산을 취한다 편이상 영상은 일반적으로 흔히 사용되는 8bit 밝기값 영상을 기준으로 하였다. log-root법에 의한 영상 합성의 과정은 다음과 같다.

Step 1 : 우선 영상의 밝기값 I를 반전시킨 후 (3)과 같이 Log연산을 사용하여 매개 변수 A값으로 정의한다. 이는 Log의 비선형적 함수 특성을 이용하여 각 방향의 투사 영상에서 X선 투과 거리가 작은 곳을 상대적으로 가중치를 두어 연산하고자 한 것이다

$$A_{i,j}^m = \ln(2^8 - I_{i,j}^m) \quad (3)$$

여기서 $I_{i,j}^m$ 는 m번째 취득한 영상에서 i행, j열 지점의 밝기값이다.

Step 2 : 서로 다른 방향에서 얻어진 각각의 A 값들의 근평균(root-mean)을 통하여 합성 값 M을 얻는다.

$$A_{i,j} = \sqrt[N]{A_{i,j}^1 \times A_{i,j}^2 \times \dots \times A_{i,j}^m \times \dots \times A_{i,j}^{N-1} \times A_{i,j}^N} \quad (4)$$

Step 3 : 마지막으로 A 변수의 정의에 따라 (5)를 사용, 영상의 밝기값으로 변환한다.

$$I_{i,j}^{Log-root} = 2^8 - e^M \quad (5)$$

곱셈 연산은 최소법의 합성 방법과 같이 초점 평면 밖의 물체에 의한 상퍼짐을 소거하는 효과를 가지며, 또한 모든 방향에서 얻어지는 값들의 근평균으로 평균화의 의미를 함께 가진다. 따라서, log-root법에 의한 단층 영상에서는 상퍼짐을 없애고 작은 투사 거리에 가중치를 둔 log연산에 의하여 투과 거리가 작은 부분에 대한 고려로 선명도를 높일 수 있게 된다.

4. 단층 영상의 평가 기준

각각의 영상 합성법에 따라 결과적으로 나오는 단층 영상의 품질을 정량적으로 평가하는 것이 필요하다. 좋은 단층 영상으로 판단할 수 있는 기준으로는 형상 정확도와 영상의 선명도로 크게 두 가지를 들 수 있다. 형상에 대한 정확도는 원래의 단층 형상에 어느 정도 가까운 정확한 단층 영상을 구했는지의 기준이며, 단층 영상의 선명도는 초점 평면상의 형상이 배경에 대해 어느 정도 선명하게 상을 형성하는지에 대한 기준이다 먼저 형상 오차 E_{rms} 는 단면 영상의 무게 중심으로부터 N_p 개의 방향에 대한 경계점 간의 길이 오차 비율을 구하여 이 값들에 대한 rms값으로 정의한다.

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{E_{sim}}{N_p} \cdot \sum_i \left(\frac{r_i - r_{o,i}}{r_i} \right)^2} \quad (6)$$

$$A_s = 1 - E_{rms} \quad (7)$$

- r_{oi} : 구해진 단층 형상의 원주 방향 길이
- r_i : 실제 단층 형상의 원주 방향 길이
- N_p : 형상 비교점의 수

형상 정확도 A_s 는 (7)과 같이 정의하여 1에 가까울 수록 정확한 형상으로 평가 한다.

단층 영상을 평가함에 있어서 초점 평면상의 형상과 배경간의 명암 대비도가 클 수록 선명한 단층 영상이 되며, 또한 단층 형상과 배경의 분리를 위한 이진화 임계값(threshold value) 결정도 용이하므로 좋은 영상이라고 할 수 있다. 따라서, 영상의 선명도는 단층 형상 내부와 배경 부분의 명암 값 차이로 볼 수 있으며, 이와 함께 내부와 배경의 명암 분포도 함께 평가되어야 한다. 그림 7에서 보이는 바와 같이 단층 영상의 히스토그램을 통하여 단층 형상 내부와 배경간의 구분이 용이한 정도를 평가 할 수 있다.

즉, 내부와 배경간의 명암의 평균값이 차이가 클수록, 또한 각 영역의 밝기값이 균일할 경우 선명도가 좋은 영상으로 평가할 수 있으며, 반면에 평균값 차가 크지 않거나 밝기값이 넓은 분포를 갖는 경우 경계 부분의 구분이 모호하게 되므로 선명도가 낮은 영상으로 평가할 수 있다. 따라서, 이러한 개념을 사용하여 영상의 선명도를 평가하기 위하여 단층 형상 내부와 배경 영역의 평균값과 표준 편차를 모두 고려한 선명도의 지수 C_s 를 다음 (8)과 같이 정의 한다.

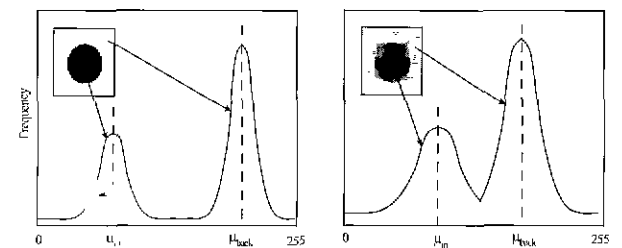


그림 7. 단층 영상의 선명도.
Fig. 7. Clearness in x-ray images

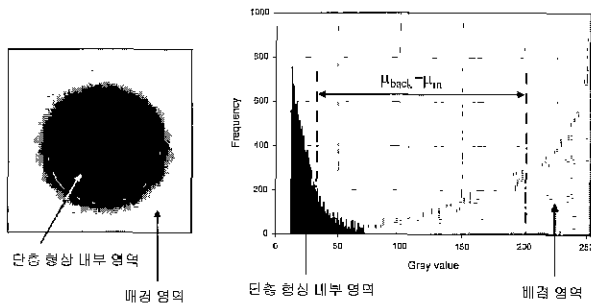


그림 8 단층 영상 내부와 배경의 밝기 분포.
Fig. 8. Intensity distribution of cross-section and background.

$$C_o = \frac{\mu_{back} - \mu_m}{2^n - 1} \sqrt{\frac{(2^{n-2} - \sigma_{back})}{2^{n-2}} \cdot \frac{(2^{n-2} - \sigma_m)}{2^{(n-1)}}} \quad (8)$$

μ_m, σ_m : 단면 내부의 명암 분포에 대한 평균, 표준편차

$\mu_{back}, \sigma_{back}$: 배경의 명암 분포에 대한 평균, 표준편차

(8)에서 첫번째 항은 두 영역의 평균값의 차를 n-bit 밝기값으로 정규화한 것으로 두 영역의 평균값 차가 클수록 1에 가까운 값을 가지며, 두번째 항은 두 영역의 분포에 의한 선명도 영향을 고려하기 위한 것으로 각 영역의 표준 편차가 작을수록 큰 값을 가지게 된다. 2^{n-2} 는 n-bit 밝기값 분포에서 표준 편차를 정규화하기 위한 값이다.

영상의 선명도 평가를 위하여 단층 영상을 이진 처리하여 물체의 단층 영상 내부와 배경에 대한 명암 분포를 얻고 각각의 평균값과 표준 편차를 구한다. 그림 8에서와 같이 영상의 이진화는 영상의 밝기값 분포에서 골짜기가 되는 곳을 이진화의 임계값(threshold)으로 하였다.

IV. 모의 실험

1. 모의 실험 조건

디지털 영상 합성에 의한 단층 영상을 얻을 때, 합성 영상의 개수, 투사각, 합성법 등에 따른 가림 현상과 산 퍼짐의 영향을 보기 위한 대상 물체로 그림 9에서와 같은 원뿔, 사각뿔, 반구형으로 선정하고 모의 실험으로 단층 영상에서의 투사각, 영상 합성법, 합성 영상 개수 등에 의한 영향을 살펴 보았다. 단층 영상 합성을 위해 필요한 각 방향에서의 X선 투사 영상은 X선이 검사 대상 물체를 투과할 때 감쇄되는 정도를 표현하는 (9)를 사용하여 생성하였다.

$$I = I_o \cdot e^{-\mu x} \quad (9)$$

여기서, I_o 는 초기의 X선 강도, I 는 감쇄된 X선 강도, μ 는 물체의 X선 감쇄 계수, x 는 X선이 물체를 투과한 거리이다 모의 실험에서는 $\mu = 0.7$ 의 감쇄 계수를 사용하였으며, 감쇄 되기 전의 X선 강도는 255의 밝기값을 기준으로 하였다.

실제의 영상에서는 X선 영상을 얻는데 있어서 영상 증배관, 카메라 렌즈등에 의한 영상의 광학적 왜곡이 있

표 2. 모의 실험 조건.

Table 2. Simulation conditions.

시스템 변수	조건1	조건2	조건3	조건4
투사각 (ψ)	30°	35°	40°	45°
배율 ($m = L_1/L_o$)	6	6	6	6
검사 영역 크기 반경(R_o)	5	5	5	5
회전 X선 반경(R_s)	20.1	19.1	17.8	22.3
X선-피검물 간의 거리(L_o)	34.9	27.2	21.2	22.3
X선-영상증배관 간의 거리(L_1)	209.4	163.2	127.2	111.5

(길이 단위 : mm)

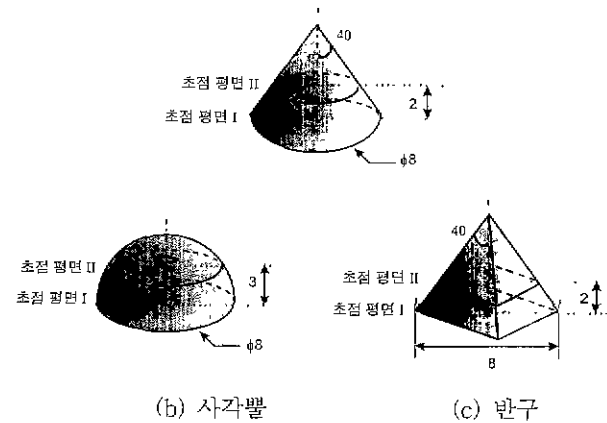


그림 9. 모의 실험 대상 물체.

Fig. 9. Objects used in simulation.

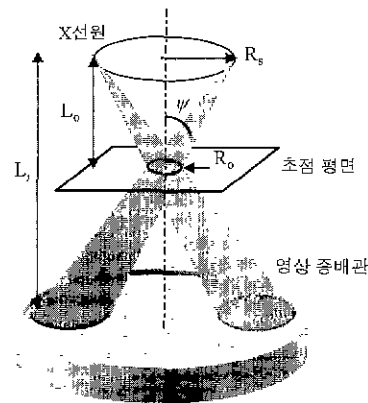


그림 10. 단층 시스템의 주요 변수.

Fig. 10. System parameters

을 수 있으나, 영상 합성은 왜곡의 보정 이후 이루어지는 후처리 과정으로 합성 영상 개수, 투사각에 따른 가림 현상, 합성법 등과 무관하므로 본 모의 실험에서는 영상의 왜곡은 고려하지 않았다 모의 실험에 사용된 시스템의 각종 변수들은 그림 10에서 표현하였으며 주요 변수 값들은 표 2와 같다.

본 장에서는 단층 영상의 품질을 결정하는 요인으로 제시한 투사각, 합성 영상의 개수, 영상 합성법에 대하여 다양한 조건으로 초점 평면에 대한 단층 영상을 얻고, 이들 영상은 형상 정확도와, 영상의 선명도 두 가지에

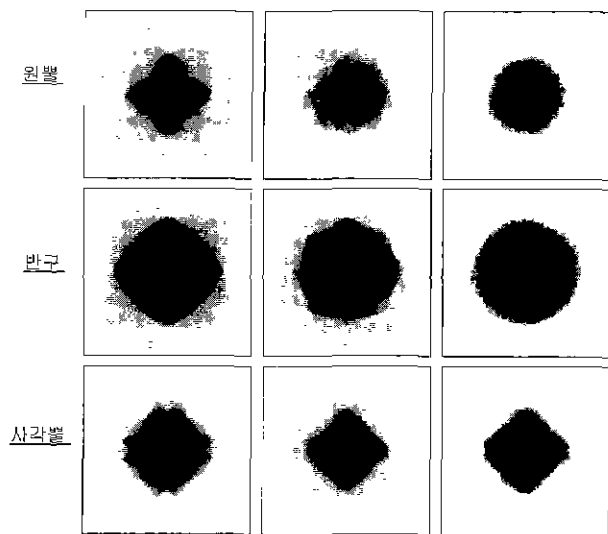
대하여 평가하고 비교한다.

2. 합성 영상의 개수에 따른 영상 품질

단층 영상을 얻기 위한 합성 영상의 개수에 대한 영향을 보기 위하여 각각의 대상 물체에 대한 단층 영상을 구하였다. 단층 영상을 구하기 위한 초점 평면은 각 물체의 초점 평면 Π 이며, X-ray 투사각 40° 에 대하여 단층 영상을 구하였다 그림 11은 각 물체에 대하여 합성 영상의 개수를 달리하여 얻은 단층 영상이다. 이때, 영상의 합성은 라미노그래피 단층 영상의 기본 원리인 평균법을 사용하였다. 합성에 사용된 영상의 개수가 많아질수록 단층 영상에서 방향성이 없이 부드럽고, 정확한 단층 영상이 얻어짐을 알 수 있으며, 여러 영상의 평균에 의하여 초점 평면 밖의 물체에 의한 잔상은 영상의 개수에 비례하여 영향이 소멸되어 상대적으로 단면 형상이 선명하게 얻어짐을 알 수 있다. 그림 12는 합성 영상의 개수에 따른 단층 영상의 품질을 형상 정확도와 영상 선명도에 대하여 평가한 그래프로서, 영상의 개수가 많아짐에 따라 형상 정확도와 선명도가 모두 향상되는 경향을 보인다. 이들 물체 중에서 단면 형상이 크게 변화하는 원뿔과 사각뿔의 경우 구하는 초점 평면의 형상보다 큰 단면에 의한 가림 현상으로 영상 개수의 증가에 따른 효과가 크게 난다. 형상 정확도와 선명도를 평가한 그림에서 보는 바와 같이 8개 이상의 영상에서 영상 개수의 증가에 따른 영상 품질의 개선이 둔감해 지는 것을 볼 수 있으며, 메모리와 시간의 한계를 고려할 때, 실제 적용에서의 영상 개수는 8개가 적합하다.

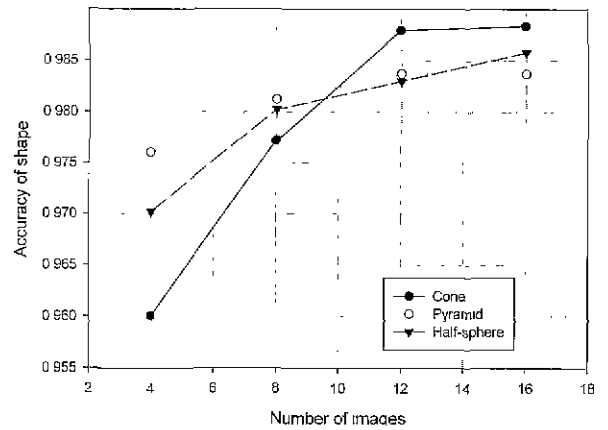
2 투사각에 따른 영상 품질

단층 영상에서 일반적으로 투사각이 작은 경우 가림 현상에 의한 형상 왜곡이 크게 나타남을 앞서 설명하였다. 가림 현상은 특히 영상에서 형상의 왜곡으로 나타나므로 단층 영상의 품질을 형상 정확도의 기준으로 평가

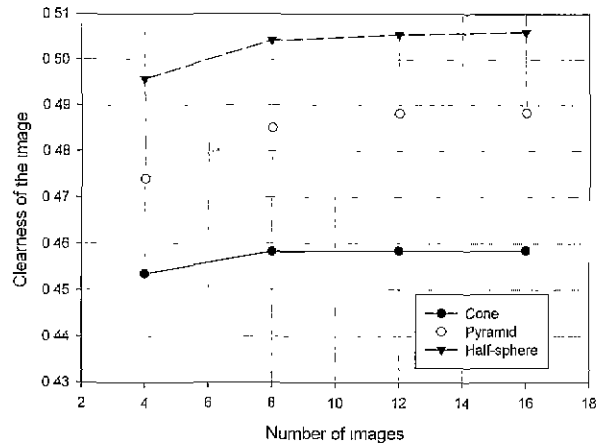


(a) 4개 영상 (b) 8개 영상 (c) 16개 영상

그림 11. 합성 영상 개수에 따른 단층 영상의 효과.
Fig. 11. DT images with respect to number of images used in synthesis.

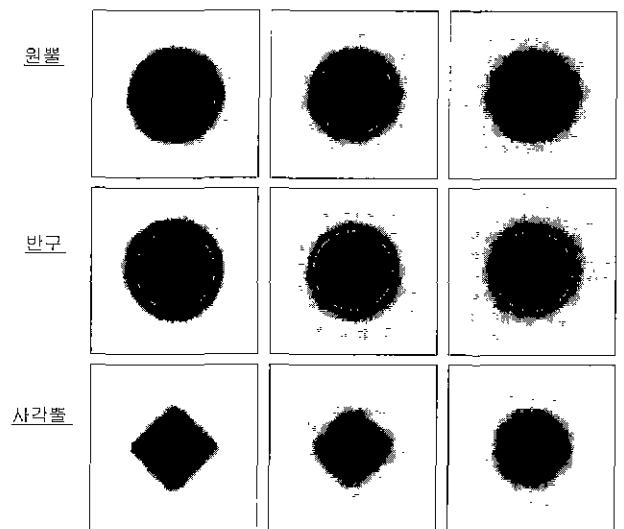


(a) 단층 영상의 형상 정확도



(b) 단층 영상의 선명도

그림 12. 합성 영상 개수에 따른 단층 영상의 평가.
Fig. 12. Evaluation of DT images with respect to number of images.



(a) 투사각 25° (b) 투사각 35° (c) 투사각 45°

그림 13. X선 투사각에 따른 단층 영상.
Fig. 13. DT images with respect to x-ray projection angles.

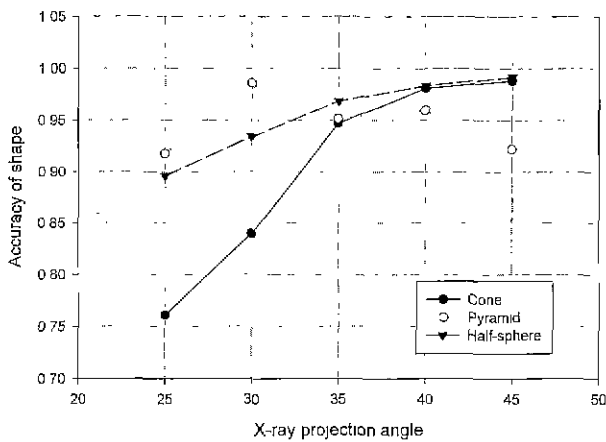


그림 14. 투사각에 따른 단층 영상의 형상 정확도.
Fig. 14. Evaluation of DT images w.r.t x-ray projection angles.

하였다. 단층 영상은 세가지 대상 물체의 초점 평면 II에 대하여 구하였으며(그림 13), 투사각의 영향을 고려하기 위하여 충분히 많은 수의 영상(16개의 영상)을 평균화 하여 단층 영상을 구하였다.

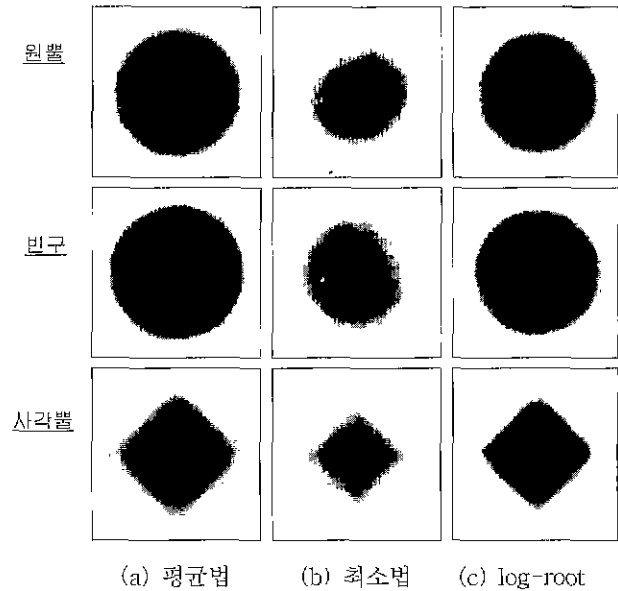
원뿔의 경우 투사각 25°에서 가림 현상으로 인하여 실제 단면 형상(흰 선으로 표시된 부분)보다 크게 단층 영상이 구해지지만, 투사각을 점차 크게 키우게 되면, 가림 현상에 의한 영향이 줄어들어 투사각 45°의 영상에서는 실제 단면 형상과 동일한 형상이 구해진다. 반구의 경우 원뿔보다 가림 현상이 크게 나타나므로 투사각 45°의 영상에서도 오차가 큰 단층 영상이 얻어지며, 사각뿔의 경우 원뿔이나 반구에 비하여 가림 현상이 작아서 25°의 영상에서도 오차가 크지 않으며 오히려 45°의 투사각에 대한 영상에서 모서리 부분이 왜곡됨을 볼 수 있다.

그림 14는 이들 영상을 형상 정확도에 대하여 평가한 그래프로서 반구와 원뿔의 경우 투사각을 크게 할수록 좋은 영상이 얻어짐을 보이지만, 사각뿔의 경우 앞의 두 물체와 달리 다소 불규칙적인 경향이 나타나는데 이는 물체 형상에 의한 특징으로 투사각에 따라 가림 현상 2에 의한 효과가 함께 나타나기 때문이다.

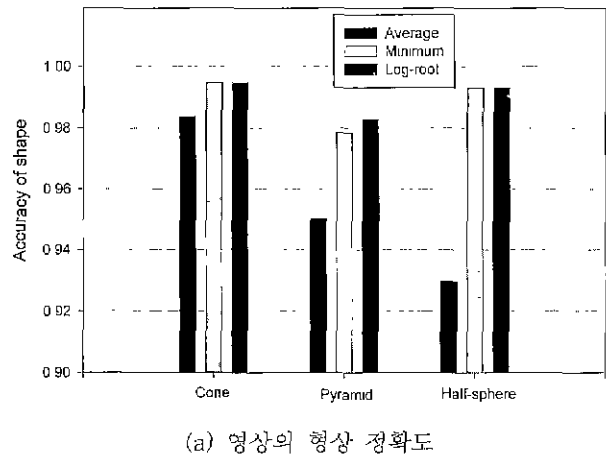
3. 영상 합성법에 따른 영상 품질

영상을 합성하는 방법에 따른 단층 영상의 차이를 보이기 위하여 각 대상 물체에 대하여 초점 평면 I에 대한 단층 영상을 구하고 평가 하였다. 평균법에 의한 단층 영상에서는 배경에 상퍼짐이 존재하는 것을 볼 수 있으나, 최소법을 사용한 경우 이러한 상퍼짐이 나타나지 않는다. 그러나, 최소법에 의한 단층 영상에서는 단층 형상 내부의 명암 분포가 균일하지 못하고 가장자리 부분에서 선명하지 못한 단점을 가진다. 반면에 log-root에 의한 단층 영상에서는 동일한 경우 가장자리가 선명하며 동시에 상퍼짐도 없는 단층 영상을 얻어짐을 알 수 있다.

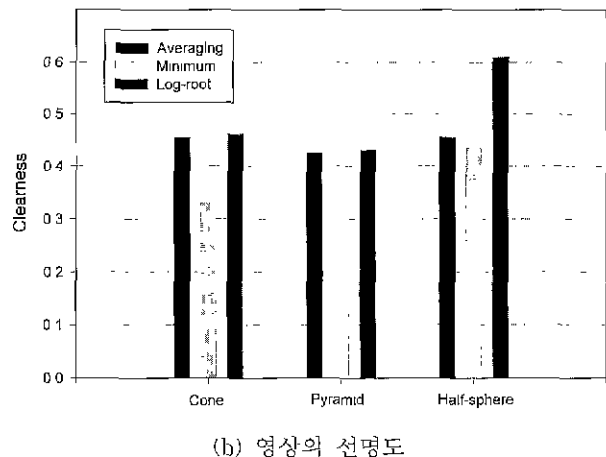
그림 16은 세가지 영상 합성법에 따른 단층 영상을 형상 정확도와 영상의 선명도에 대하여 평가한 그래프로서 전체적으로 두 가지 기준에 있어 모두 log-root법이 평균법이나 최소법보다 나은 성능을 보인다.



(a) 평균법 (b) 최소법 (c) log-root
그림 15. 합성법에 따른 단층 영상.
Fig. 15. DT images with respect to image synthesizing methods.



(a) 영상의 형상 정확도



(b) 영상의 선명도

그림 16. 영상 합성법에 따른 단층 영상의 평가.
Fig. 16. Evaluation of DT images with respect to image synthesizing methods.

V. 결론

본 논문에서는 선명하고 정확한 X선 단층 영상을 얻기 위하여 디지털 영상 합성에 의한 단층 영상 시스템과 영상 합성법을 제안하고, 디지털 영상 합성에 의한 단층 영상의 질을 결정하는 주 요인들로 X선 투사각, 영상 합성 방식, 합성 영상의 개수를 정의하고 이들에 의한 영향을 파악하였다. 라미노그래피 방식에 의한 단층 영상에서 나타나는 가림 현상에 의한 오차는 일반적으로 투사각을 크게 함에 따라 줄어들며, 상피검은 영상을 합성하는 방법에 따라 줄여주거나 없앨 수 있다. 선명하고 정확한 단층 영상을 구하기 위하여 기존의 평균법이나 최소법을 사용하는 대신 두 가지의 장점을 취한 Log-Root법을 제안하였으며, 이를 통해 가림 현상을 줄이고, 상피검을 줄여 선명도를 높인 단층 영상을 구할 수 있었다.

시스템으로부터 구해지는 단층 영상의 품질을 평가하기 위하여 형상에 대한 정확도와 단층 형상과 배경의 구분 척도가 되는 선명도의 두 가지를 정의하고 투사각에 따라, 또 영상 합성법에 따라 달라지는 단층 영상을 비교하였다. 이 수치를 통해 비교해본 결과로 투사각이 클수록 정확하고, 선명한 단층 영상을 얻으며 영상 합성법 중에서는 제안한 Log-Root법을 사용하였을 경우가 가장 선명한 단층 영상을 구함을 보였다.

그러나, 가림 현상중 투사각에 의한 제약 조건으로 나타나는 가림 현상은 각 화소 단위로 계산하는 영상 합성법만으로는 해결할 수 없으며 제한된 투사각으로 얻은 영상으로부터 3차원 형상을 인식하여 가림 현상을 근본적으로 해결할 수 있는 방식이 필요하다.

참고문헌

- [1] J. Adams, "X-ray laminography analysis of ultra fine pitch solder connections on ultra thin boards," *Integrated Circuit Metrology, Inspection, and Process Control V (SPIE)*, vol. 1464, pp. 484-497, 1991.
- [2] S. Black, D. L. Millard, and K. Nilson, "An animated interface for X-ray laminographic inspection of fine-pitch interconnect," *IEMT Sym-*

posium, pp. 207-211, 1991.

- [3] S. Rooks, M. Okimura and R. Urban, "Inspection of very fine pitch connections on PCMCIA cards," *Proc Nepcon West'93*, pp. 752-762, 1993.
- [4] S. Rooks, B. Benhabib, and K. C. Smith, "Development of an inspection process for ball-grid-array technology using scanned beam X-ray laminography," *IEEE Trans. Components, Packing, and Manufacturing Technology - Part A*, vol. 18, no 4, December, pp. 851-861, 1995.
- [5] B. D Baker and J. A. Adams, US Patent 5081656, 1992.
- [6] S. Rooks and T. Sack, "X-ray inspection of flip chip attach using digital tomosynthesis," *Surface Mount International Conference (San Jose)* 51-55, 1994.
- [7] A. E. M Bocage, French Patent 536464(1922).
- [8] T. A. Siewert and M W Austin, "Evaluation and qualification standards for an X-ray laminography system," *Materials Evaluation*, Sept., pp. 1027-1035, 1992.
- [9] T. A. Siewert and Mark W. Austin, "The contributions of out of plane materials to a scanned-beam laminography image," *Materials Evaluation*, Oct., pp. 1194-1198, 1994
- [10] E. F. Kaelble, *Handbook of X-rays*, McGraw Hill, New York, pp. 1-31.
- [11] J. C. Russ, *The Image Processing Handbook*, CRC Press, Boca Raton, 1992
- [12] Y. K. Ryu and H. S. Cho, "Visual inspection scheme for use in optical solder joint inspection system," *IEEE ICRA '96, Minnesota, USA*, 1996
- [13] "Computed tomography details casting defects," *Advanced Materials & Process*, Nov., pp. 54-56, 1990.
- [14] 이의종, "공업용 방사선 투과 검사," 팔드, 서울, pp. 67-132, 1994.
- [15] X-ray를 이용한 PCB 납땜 검사 장치 개발, 연구보고서, 한국과학기술원, 삼성전자, 1998.



노영준

1971년 6월 18일생. 1995년 연세대학교 기계공학과 (공학사). 1997년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사). 1997년-현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정 관심분야는 로봇비전, 지능제어, 신호처리.

조형석

제어·자동화·시스템공학 논문지 제4권, 제1호, 참조.



김형철

1965년 2월 20일생 한양대학교 전자공학, 1995년 아주대 산업대학원 수료, 1988년-현재 삼성전자 생산기술센터 로봇비전팀, 관심분야는 로봇제어, 공장 자동화.

김성권

제어·자동화·시스템공학 논문지 제4권, 제1호, 참조.