

물체-검출기 동기회전 방식의 X-선 단층영상시스템 설계 및 성능개선에 관한 연구

Design and Performance Improvement of a Digital Tomosynthesis System for Object-Detector Synchronous Rotation

강성택, 조형석, 노병옥

(Sung-Taek Kang, Hyung-Suck Cho, and Byung-Ok Roh)

Abstract : This paper presents design and performance improvement of a new digital tomosynthesis (DTS) system for object-detector synchronous rotation. Firstly, a new DTS system, called ODSR (Object-Detector Synchronous Rotation), is suggested and designed to acquire X-ray digital images. Secondly, the shape distortion of DTS images generated by an image intensifier is modeled. And a new synthesis algorithm, which overcomes the limitations of the existing synthesis algorithms, is suggested to improve the sharpness of the synthesized image. Also an artifact analysis of the DTS system is performed. Thirdly, some performance indices, which evaluate quantitatively performance improvement, are defined. And the experimental verification of the performance improvement is accomplished by the ODSR system newly designed. The advantages of the ODSR system are expressed quantitatively, compared with an existing system.

Keywords : digital tomosynthesis, X-ray image, distortion, sharpness, artifact

I. 서론

X-선 단층영상시스템은 그 동안 3차원 물체에 대한 단층평면의 상태를 모니터링 하기 위한 목적으로 사용되어 왔다[1]-[3]. 라미노그래피 (laminography)의 원리를 응용한 이 시스템은 의료목적으로 주로 사용되는 CT (computerized tomography)와는 그 구조가 달라서 인쇄 회로기판 등과 같은 산업용 부품의 단층영상을 용이하게 구현할 수 있도록 되어 있다. 단층영상 구현기술은 물체의 원하는 입의의 평면에 대하여 단층영상을 얻을 수 있는 이점 때문에 매우 중요한 연구 주제가 되고 있다. 그러나 아직 그 동안 제안된 시스템들은 구조적인 한계 등으로 인해 영상의 왜곡, 영상의 질(quality)의 저하 등 문제점들을 보이고 있다[4][5].

Adams[6] 등은 회전 빔(scanned-beam) 방식의 단층영상 시스템을 개발하였다. 이 시스템을 이용하여 인쇄 회로기판 위의 리드부품의 접합부에 대한 납 페이스트, 납량, 보이드(void), 정렬상태 등을 실시간으로 검사하였다. 그런데 이 방법은 형광막 (fluorescence)을 이용하여 영상을 얻기 때문에 영상의 질이 떨어져 고정밀의 부품을 검사하기에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 또한 기계적 합성에 의하여 한 개의 단층영상만을 얻게 되므로 단층영상의 선명도(sharpness)를 향상시키기 어렵고, 고정도의 기구장치를 필요로 하게 된다. S.Rooks[7]등은 전자적으로 회전시킬 수 있는 X-선 튜브와 영상증배관

(image intensifier)을 사용하여 단층영상을 구현할 수 있는 단층영상시스템을 개발하였다. 이 시스템에서는 X-선 빔이 회전함에 따라 물체에 대한 X-선 영상이 영상증배관의 가장자리 영역에 결상되고, 결상된 영상집합(image set)은 컴퓨터에서 보정을 거친 후 합성이 이루어진다. 이 방식은 컴퓨터에 의하여 단층영상의 선명도를 개선할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 영상증배관의 가장자리 영역에서 획득된 영상집합은 왜곡이 매우 심한 문제점이 있다. 또한 개발된 회전식 X-선 튜브는 초점(focal spot)의 크기가 커서 정밀한 전자부품을 검사하기에는 한계가 있고, X-선빔의 투사각이 제한되어 있어서 단층영상에서 인조간섭(artifact)이 크게 발생한다.

X-선 단층영상 시스템에서 구현된 합성영상의 성능을 향상시키기 위한 연구가 진행되었다[8]-[11]. 먼저, 영상의 왜곡보정에 대한 연구가 이루어졌다. Doi 등은 투과식 X-선 장치에서 영상증배관에 의해 발생하는 형상왜곡을 보정하기 위한 수학적 모델링을 수행하였다. 그들은 증배관 위에 결상되는 X-선원의 기하학적 관계를 이용하여 왜곡율의 수식을 유도하였다. 그런데 이 수식은 증배관의 수직축에 대하여 대칭구조에 대하여 유도된 것이다. 그러므로 X-선이 수직축에 대하여 경사각을 갖고 입사하는 단층영상 시스템에 있어서는 새로운 왜곡보정 모델링이 이루어져야 한다. 다음으로, 영상의 선명도를 향상시키기 위한 연구가 이루어졌는데, Rooks와 Sack는 구현된 단층영상의 선명도를 향상시킬 수 있는 합성알고리즘을 제안하였다. 최대법(maximum method)이라 불리는 이 방법은 영상집합의 동일한 위치에 대한 화소값들을 비교하여 최대의 그레이 값(gray value)을 갖는 화소를 선택한다. 물체의 경계선(edge line) 밖의 화소가 가장 큰 그레이 값으로 채워지게 되므로, 물체와 배경이

접수일자: 1998. 8. 10., 수정완료: 1998. 11. 26.

강성택: 전자부품종합기술연구소 정밀기기연구센터

조형석: 한국과학기술원 기계공학과

노병옥: 선문대학교 산업공학과

* 본 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구에 의하여 연구되었습니다.

명확하게 구별된다. 이 알고리즘은 화소의 평균만을 구하던 방법에 비하여 경계선이 명확해지는 결과를 얻을 수 있다. 그런데 최대범은 화소의 최고 그레이 값만을 취하게 되므로 물체의 형상에 따라서는 단층내에 그레이 값의 변화가 급격하게 생기는 영역이 존재하게 되는 문제점을 안고 있다. 또한, 인조간섭에 대한 연구가 진행되었다. 인조간섭은 합성된 영상내에서 X-선원과 물체형상이 이루는 구조 때문에 발생하는 일종의 가짜영상으로, 단층영상에서 발생하는 불가피한 현상이다. Klotz[12]-[14] 등은 이 현상을 규명하고 알고리즘으로 해결하고자 시도한 바 있으나 뚜렷한 개선을 보이지 못하였다.

본 논문에서는 먼저 X-선원을 고정하고 물체와 검출기를 동기회전 시켜가며 영상집합을 획득할 수 있는 새로운 방식의 단층영상시스템을 고안하고 설계한다[15]. 다음으로 설계된 시스템을 이용하여 단층영상의 질과 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 연구한다. 즉, 영상증배관의 구면에 의한 형상왜곡을 보정하기 위한 수학적 모델을 유도한다. 또한 단층영상의 선명도를 개선하기 위하여 새로운 합성알고리즘을 고안하고, 인조간섭을 줄이기 위한 수식을 유도한다. 마지막으로 성능개선의 정도를 정량적으로 평가하기 위한 평가지수(evaluation index)를 제안한다. 그리고 제안된 지수들을 이용하여, 실험을 통하여 획득된 영상으로부터 형상왜곡의 보정, 선명도의 개선 및 인조간섭의 향상결과를 정량적으로 평가한다.

II. 물체-검출기 동기회전에 의한 X-선 단층영상 구현 시스템의 설계

단층영상을 구현하기 위한 세 가지 요소는 X-선원, 대상물체 및 검출기이다. 기존의 단층영상 시스템은 X-선원과 검출기를 동기회전시키면서 일정한 회전각마다 순차적으로 영상을 획득하였다. 획득된 영상집합(image set)이 기계적으로 또는 컴퓨터에 의해서 합성되면 단층영상이 구현된다. 본 논문에서는 물체-검출기 동기회전(ODSR : Object-Detector Synchronous Rotation) 방식의 새로운 X-선 단층영상시스템을 제안한다. 그림 1에 ODSR 시스템을 이용한 X-선 단층영상 구현의 원리를 나타내었다. X-선원은 대상물체의 수직축에 대하여 ψ° 만큼 기울어져 입사되고 있다. 물체를 통과한 X-선빔은 고정된 영상증배관에 의하여 가시광선으로 변환되고 강도(intensity)가 증가된다. 증배관의 출력창에 결상된 영상을 CCD 어레이에서 받아들인다. 대상물체와 검출기(CCD 어레이)는 두 개의 모터에 의하여 동기회전한다. 단층영상의 합성원리를 설명하기 위하여 단층영상을 구하고자 하는 물체의 초점평면(focal plane)에 영문자 'A'를 놓고, 초점 이외의 평면에 영문자 'B'를 놓는다. X-선원이 물체에 입사되면, 두 영문자는 영상증배관의 입력면에 결상된다. 물체와 CCD 어레이가 동기회전하는 동안 순차적으로 획득한 영상집합(I_N)이 CCD 어레이에 결상된다. 영상집합을 살펴보면, 초점평면 상의 'A'는 항상 CCD 어레이의 같은 위치에 결상되지만, 초점의 평면 상의 'B'는 각기 다른 위치에 결상됨을 볼 수 있다. 그러므로 이 영상집합을 합성하게 되면, 'A'는 중첩되어 선명

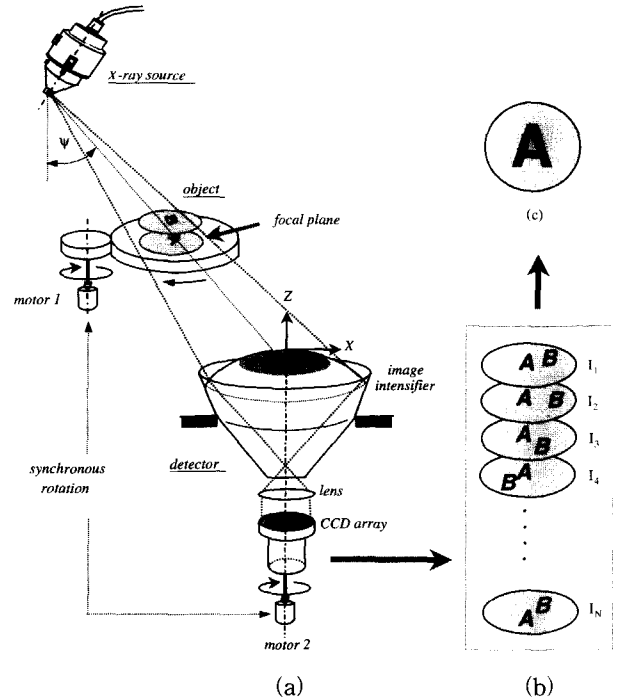


그림 1. 디지털 단층영상 획득 원리. (a)단층영상 시스템의 개략도, (b)영상집합 (c)합성된 결과.

Fig. 1. Principle of realizing the digital tomosynthesis image. (a)schematic diagram of the system, (b)image set (c)synthesized result.

해지지만, 'B'는 흐려지게 된다. 결국 초점평면에 놓인 영문자 'A'가 상대적으로 선명하게 남게 된다.

ODSR 시스템은 기존의 단층영상 시스템에 비하여 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 첫째, X-선 영상은 영상증배관의 중앙영역에 의하여 획득되므로, 영상증배관의 바깥영역에 의해 얻어지는 기존 시스템의 영상에 비하여 형상왜곡이 작다. 둘째, 새로운 합성 알고리즘의 개발로 단층영상의 선명도가 훨씬 개선된다. 셋째, 기존 시스템에 비하여 투사각(ψ)을 크게 증가시킬 수 있으므로 단층영상에서 발생하는 인조간섭을 크게 줄일 수 있다. 반면에 ODSR 시스템은 물체를 회전시켜야 하므로 회전을 위한 구동체가 필요하며 물체의 관성모우멘트의 크기에 제한을 받는 단점이 있다.

ODSR 시스템의 설계를 위한 파라미터를 그림 2에 나타내었다. X-선원의 투사각은 영상의 인조간섭과 밀접하게 관련되어 있다. 투사각이 클수록 인조간섭이 줄어든다. 기존의 회전식 X-선 튜브는 구조상 투사각을 30° 이상으로 크게 할 수 없으나, ODSR 시스템은 투사각이 60° 까지 가능하도록 설계되었다. 물체와 검출기의 회전부는 관성 모우멘트를 고려하여 설계되었다. 대상물체와 회전테이블의 하중에 의하여 발생하는 관성 모우멘트를 계산하여 모터 1을 1kw로 선정하였다. 모터 1과 모터 2의 감속비는 9:1이다. 타이밍 벨트는 미끄러짐 없이 정확한 비율로 두 개의 기어를 회전시킬 목적으로 사용되었다. 검출부에서 큰 중량의 영상증배관은 고정되고, 모터 2에 의하여 CCD 어레이가 회전한다. 회전시 신호선과

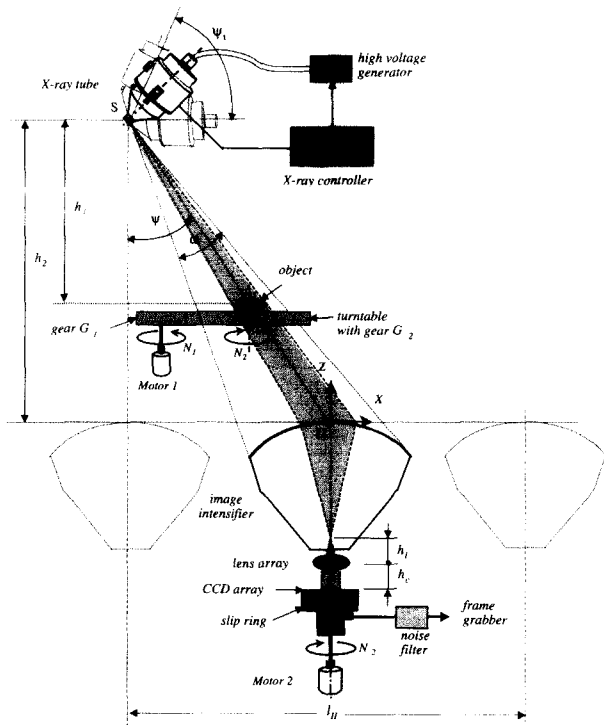


그림 2. 물체-검출기 동기회전 시스템의 설계 파라미터.

Fig. 2. Design parameters of the object-detector synchronous rotation system.

전원선의 꼬임을 방지하기 위하여 슬립링(slip ring)을 사용하였고, 슬립링으로 인하여 영상에 발생하는 노이즈를 제거하기 위하여 노이즈 필터회로가 CCD 어레이의 출력단에 연결되어 있다. 노이즈 필터회로는 노이즈의 컷오프 효과(cutoff effect)를 올리기 위하여 필터링된 출력을 피드백 시켜주는 귀환 무한 임펄스응답 필터들(recursive infinite impulse response filters)로 구성하였다. X-선원의 투사각이 커지면 별도의 구동모터가 영상 증배관을 탑재한 볼스크류를 \$l_H\$ 거리만큼 움직여 그 위치에서 영상을 받을 수 있도록 되어 있다. 표 1에 ODSR 시스템의 설계사양을 나타내었다. 보통 \$h_1\$이 10mm에서 60mm사이에서 대상물체의 1mm에서 7mm 정도의 크기를 영상으로 획득하게 되는데, 이 영상을 영상증배관의 가운데 1/2 영역내에서 영상으로 받아들이기 위하여 증배관의 입력직경을 150mm의 것으로 하였다. 증배관은 증폭된 영상을 1/10의 크기로 집속하여 출력하도록 되어 있다. 각 화소의 정밀도는 \$20\mu m \times 30\mu m\$ 이하가 되도록 CCD array를 선정하였다. 그림 3은 ODSR 시스템의 사진을 보여주고 있다.

III. X-선 단층영상의 성능향상을 위한 이론식

본 장에서는 X-선 단층영상의 성능을 향상시키기 위한 몇 가지 이론적 방법이 제안된다. 영상에 나타나는 형상왜곡을 보정하기 위한 수학적 모델이 유도되고, 단층영상의 선명도를 향상시키기 위한 합성 알고리즘이 제안된다. 그리고 인조간섭을 줄이기 위하여 수식을 유도

표 1. 물체-검출기 동기회전 시스템의 설계사양.

Table 1. Design specifications of the object-detector synchronous rotation system.

Item	Specifications	Maker & Model No.
● Source part		
X-ray tube	focal spot size 5 μ m at 100KV, 100 μ A $\psi = \psi_1 : 0^\circ \sim 60^\circ$ beam angle $\omega : 25^\circ$	X-TEK Co Ultrafocus III B
X-ray controller	operating voltage : 30~125KVp beam current : 10~1000 μ A	X-TEK Co. SR125
● Object part		
Turntable	vertical stroke $h_1 : 10\sim 450$ mm gear ratio $G_1 : G_2 = 1 : 9$ table diameter $D_a : 560$ mm	manufactured part
Motor 1	nominal power : 1KW nominal rotating speed $N_1 : 3000$ rpm	Samsung Elec . Co. CSM-10BB1ANT3
Motor 2	nominal power 100W reduction gear ratio : 1/9 turning speed ratio $N_2 : N_1 = 1 : 9$	Samsung Elec . Co. CSM-01BB1ANT3
● Detector part		
Image intensifier	vertical distance $h_2 : 584$ mm magnification ratio $h_2/h_1 : 1.24\sim 56.6$ nominal input diameter : 150mm output window diameter : 15mm limiting resolution : 42 lp/cm horizontal stroke $l_H : 980.3$ mm	Thomson TH9449HP
lens array	vertical position $h_f : 23$ mm, $h_c : 40$ mm	Nical Co
CCD array	effective pixels : 768 \times 494. unit cell size : 8.4(H) \times 9.8(V) μ m	Nical Co ND960RD10
slip-ring unit	number of touch plate signal : 3	Nical Co.
frame grabber	512 \times 512 \times 8bit	Bargold
computer	Pentium 100Mhz	HP

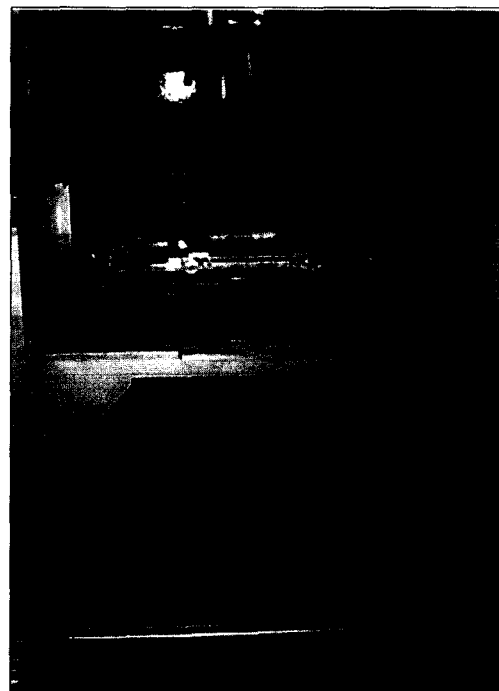


그림 3. 물체-검출기 동기회전 시스템의 사진.

Fig. 3. Photograph of the object-detector synchronous rotation system.

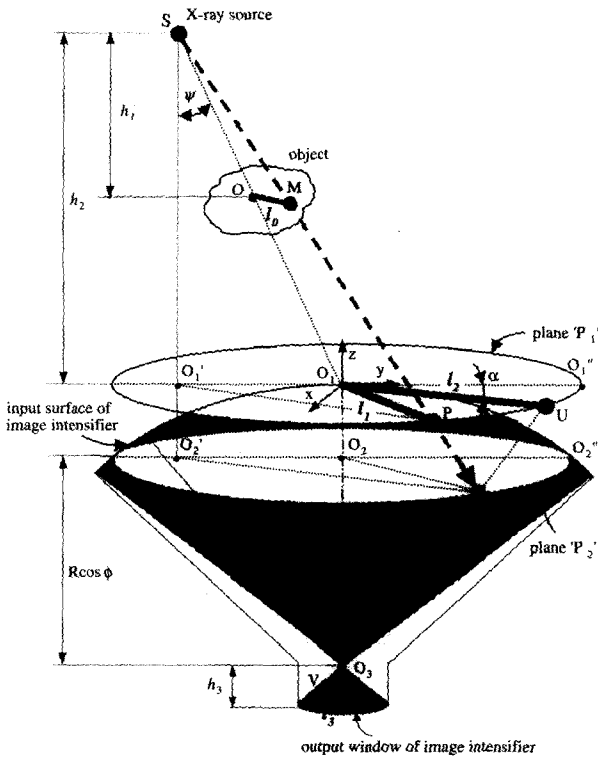


그림 4. 형상왜곡 해석을 위한 다이어그램.
Fig. 4. A diagram for shape distortion analysis.

한다.

1. 형상왜곡 및 보정의 수학적 모델

그림 4는 X-선 영상의 형상왜곡을 모델링하기 위한 개략도를 나타내고 있다. X-선원은 균일한 강도로 대상 물체에 입사되고 있다고 가정한다. 영상증배관의 입력면은 구(sphere)로 가정한다. 그림에서 평면 'P1'은 영상증배관의 표면에 접하는 수평평면을 나타내고, 'P2'는 영상증배관 상의 입사점(Q)를 포함하는 수평평면을 나타낸다. 만약 X-선원이 투사각 θ 로 증배관에 입사된다면, 물체 내의 직선 l_0 상의 한 점 M은 증배관의 표면 Q점에 결상된다. X-선은 이 표면에서 각 θ 만큼 굴절되어 증배관의 출력창의 직선 l_3 상의 점 V로 결상된다. 여기서 삼각형 O_3O_1U 와 삼각형 O_3O_4V 를 살펴보면 직선 l_3 는 직선 l_0 의 투영이 아닌 직선 l_2 의 투영인 것을 알 수 있다. 이것은 X-선 영상이 영상증배관의 구면으로 인하여 l_1 로부터 l_2 로 왜곡됨을 의미한다. 즉, 형상왜곡은 $l_1 \rightarrow l_2$ 로의 과정에서 발생된다. l_1 과 l_2 간의 관계를 구하기 위하여 다음과 같이 여러 직선과 각에 대한 변수가 정의되었다.

$$l_1 = \overline{O_1P}, l_2 = \overline{O_1U}, \rho_1 = \overline{O_1P},$$

$$\rho_2 = \overline{O_2Q}, l' = \overline{O_2Q} \quad (1)$$

$$\alpha = \angle O_1 \hat{O}_1 U = \angle O_2 \hat{O}_2 Q,$$

$$\beta = \angle O_1 \hat{O}_1 P,$$

$$\delta = \angle O_1 \hat{O}_1 P = \angle O_2 \hat{O}_2 Q \quad (2)$$

또, 기하학적인 관계로부터 다음 식을 얻는다.

$$l_1 \sin \beta = \rho_1 \sin \delta \quad (3)$$

$$l' \sin \alpha = \rho_2 \sin \beta \quad (4)$$

삼각형 SO_1P 와 삼각형 SO_2Q 는 서로 닮은 꼴이므로, 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\rho_1 = \frac{h_2}{h_2 + R(1 - \cos \phi)} \cdot \rho_2 \quad (5)$$

여기에서 h_2 는 광원으로부터 평면 'P1'까지의 수직거리이고, R은 영상증배관의 곡률반경, ϕ 는 직선 O_3Q 와 z축 사이의 각이다. 삼각형 O_3O_2Q 와 삼각형 O_3O_1U 는 닮은 꼴이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$l' = l_2 \cos \phi \quad (6)$$

그러므로 왜곡된 길이 l_2 는 (3), (4), (5) 및 (6)으로부터 유도된 형상왜곡비(shape distortion ratio) k_s 를 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$l_2 = k_s \cdot l_1 \quad (7)$$

$$k_s = \frac{h_2 + R(1 - \cos \phi)}{h_2} \cdot \frac{\sin \beta}{\cos \phi} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \quad (8)$$

여기에서 왜곡비 k_s 는 형상왜곡의 정도를 나타낸다. 또 각 α 는 두 개의 관계식 $l' \sin \alpha = \rho_2 \sin \beta$, $l' = R \sin \phi$ 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\alpha = \sin^{-1} \left[\frac{1}{R \cdot \sin \phi} \cdot \left(\frac{h_2 + R(1 - \cos \phi)}{h_2} \cdot l_1 \sin \beta \right) \right] \quad (9)$$

그러므로 형상왜곡길이 l_2 는 (7), (8) 및 (9)를 이용하여 원래의 길이 l_1 로부터 계산될 수 있다.

X-선 영상에서 발생하는 형상왜곡을 보정하는 과정은 왜곡의 역 과정이 된다. 즉, 왜곡된 영상이 획득되었을 때 왜곡된 길이 l_2 로부터 왜곡식 (7)의 역수를 이용하여 보정길이 l_1 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$l_1 = \frac{1}{k_s} \cdot l_2 \quad (10)$$

그러므로 X-선 영상의 왜곡보정은 (10)에 의하여 이루어지게 된다. 또 증배관의 출력면 상의 영상 l_3 는 물체의 길이 l_0 와 다음과 같은 관계식을 갖는 것을 알 수 있다.

$$l_3 = \frac{k_s \cdot h_2 \cdot h_3}{h_1 \cdot R} \cdot l_0 \quad (11)$$

2. 단층영상의 선명도 개선 알고리즘

단층영상에 있어서 선명도는 단층 영상면이 주위 배경에 비하여 선명한 정도를 의미한다. 단층영상은 물체

의 초점평면에 대하여 획득된 영상집합을 합성하여 구현하므로, 영상의 선명도는 영상합성 방법을 개선하여 향상시킬 수 있다. 단층영상을 구현하기 위한 기존의 영상합성 방법에는 평균법(average method)과 최대법(maximum method)의 두 가지가 있다. 평균법은 영상집합의 각 영상에 있어서 같은 위치의 화소에 대한 평균값을 계산하는 방법이다. 이 방법은 계산이 빠른 장점이 있으나, 화소들의 평균값만을 계산하기 때문에 단층의 주위가 흐려져 단층영상의 선명도가 떨어지는 단점이 있다. 최대법은 영상집합의 각 영상에 있어서 같은 위치에 대한 그레이 값을 비교하여 가장 큰 값을 선택하는 방법이다. 경계선은 가장 큰 화소값으로 채우게 되므로 물체와 배경간의 그레이 값의 차이가 뚜렷해진다. 이 방법은 평균법에 비해 단층의 경계가 선명해지긴 하지만, 단층영역 내부에서 그레이 값이 급격히 변화되는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 평균법에서 나타나는 흐려진 경계선을 선명하게 하면서도 영상의 그레이 값을 균일하게 하여 최대법의 문제점도 개선할 수 있는 알고리즘을 연구하였다. '근평균법(root-mean)'이라 명명된 이 방법은 평균법과 최대법의 장점만을 고려한 것이다. 즉, 단층영역에 대해서는 근평균(root average)이 계산하고, 배경영역에 대해서는 최대값을 선택하게 된다. 알고리즘은 다음과 같다.

$$I(i, j) = (2^n - 1) - \sqrt[N]{(2^n - 1 - I_1) \times (2^n - 1 - I_2) \times \dots \times (2^n - 1 - I_N)} \quad (12)$$

여기에서 $I_N(i, j)$ 은 0부터 $(2^n - 1)$ 사이의 값을 가지며, N 은 사용된 영상의 개수이다. 만약 같은 위치의 N 개 화소 중 어느 하나라도 255가 되면($N=8$), 즉 X-선원이 대상 물체를 통과하지 않은 화소이면, (12)의 근 내부의 값은 0이 된다. 결국 I_m 의 값은 255가 되고 이 화소는 배경영상이 됨을 알 수 있다. 만약 N 개 화소의 모든 값들이 255가 아니면, 즉 단층의 내부이면, N 계급 근 계산에 의하여 화소의 평균치가 얻어지게 되고 이것은 단층영역이 된다. 단층영상의 경계선의 바깥영역은 255로 채워지고, 내부영역은 N 개 화소의 평균값이 된다. 그러므로 제안된 근평균 알고리즘에 의하여 선명한 경계선과 거의 균일한 그레이 값을 갖는 단층영상이 얻어질 수 있음을 알 수 있다.

3. 단층영상의 인조간섭(artifact) 해석

인조간섭 영상은 대상물체의 형상과 시스템의 구성 요소간의 기하학적 관계에 의하여 발생하는 인조영상이다. 그림 5는 원뿔형상의 물체의 단층영상에서 나타나는 인조간섭 현상을 보여주고 있다. X-선원으로부터 영상면에 투영된 4개의 영상($I_1 \sim I_4$)은 이해를 돕기 위하여 평면도로 나타내었다. 4개 영상의 공통영역이 단층영상이 된다. 원뿔의 밑면에서 높이 h 에 있는 초점평면에 대하여 단층영상은 반경 r_c 의 영역이 되어야 하지만, 더 큰 반경 r_{ar} 의 영역이 단층영상을 이루게 됨을 볼 수 있다. 기하

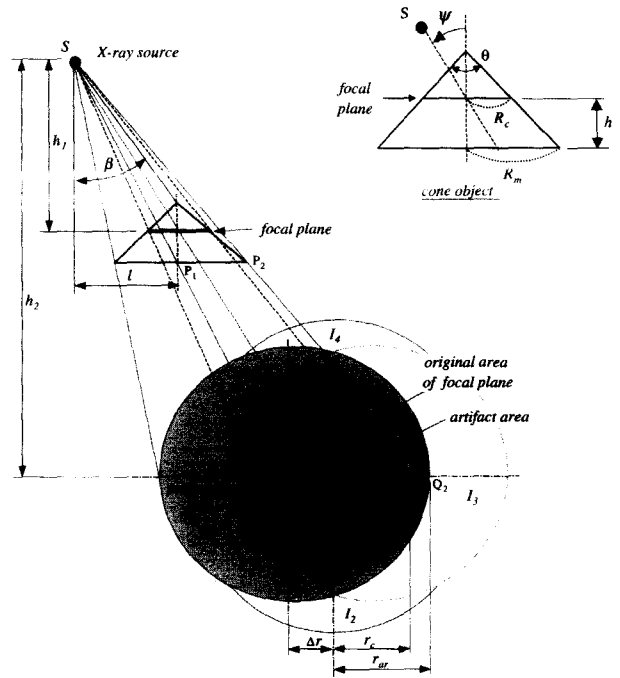


그림 5. 원뿔형 물체에서 발생한 인조간섭(투영영상들은 평면도로 나타내어짐).

Fig. 5. Artifact generation of a cone-type object (The projected images are represented as plane views).

학적으로 인조간섭은 광원과 원뿔의 꼭지점이 이루는 각 β 가 원뿔의 꼭지각 θ 의 1/2보다 작게 될 때 발생한다. 즉, 인조간섭 발생조건은 $\beta < \frac{\theta}{2}$ 이다.

삼각형 SP_1P_2 와 삼각형 SQ_1Q_2 가 닮은 꼴이므로, 다음 식이 성립한다.

$$\Delta r + r_{ar} = \frac{h_2}{h_1 + h} \cdot R_m \quad (13)$$

여기에서 Δr 은 투영된 영상 I_1 의 중심으로부터 합성된 영상(단층영상)의 중심까지의 거리이며 다음 식으로 계산된다.

$$\Delta r = \frac{h_2}{h_1 + h} \cdot \tan \psi \quad (14)$$

그러므로 인조간섭 반경 r_{ar} 은 (13)와 (14)으로부터 다음과 같은 수식으로 유도된다.

$$r_{ar} = \frac{h_2}{h_1 + h} \cdot (R_m - h \cdot \tan \psi) \quad (15)$$

(15)로부터 대상물체의 크기(R_m)와 구성요소의 위치(h_1, h_2)가 고정되었을 때, 물체의 높이 h 에 대한 단층의 인조간섭 반경은 X-선원의 투사각 ψ 의 함수가 됨을 알 수 있다. 즉, X-선원의 투사각을 증가시키므로써 단층영상의 인조간섭을 줄일 수 있게 된다. 단, 투사각이 커지면 형상왜곡이 증가하게 되므로 적절한 한도내에서 투사각의 크기가 제한되어야 한다.

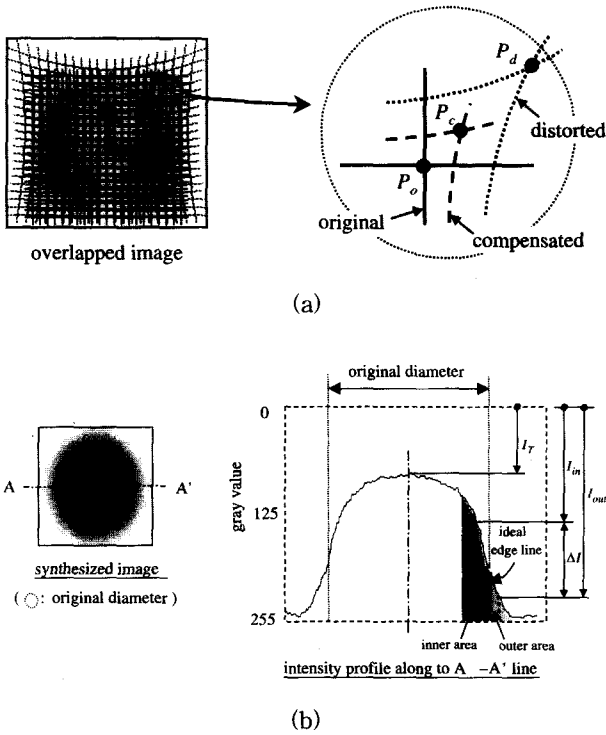


그림 6. 평가지수를 정의하기 위한 파라미터. (a) 형상왜곡보정지수 파라미터, (b) 선명도지수 파라미터.

Fig. 6. Parameters for defining the evaluation indices. (a) parameters for shape compensation, (b) parameters for sharpness.

IV. 단층영상의 성능 평가지수(evaluation index)

이 장에서는 단층영상의 성능을 정량적으로 평가하기 위한 세 가지 평가지수를 제안한다.

1. 형상보정의 평가지수

그림 6(a)에 형상보정지수(shape compensation index)를 정의하기 위한 파라미터를 나타내었다. 왜곡의 정도를 명확히 나타내기 위하여 와이어 그리드(wire grid)를 대상물체로써 사용하였다. 왜곡 전과 왜곡 후의 그리드의 영상을 중첩하여 표시하였다. 왜곡 전의 그리드의 교차점을 P_0 , 왜곡 후 그리드의 교차점을 P_d , 보정된 후의 교차점을 P_c 라고 하였다. 형상보정의 정도는 왜곡된 원래의 교차점이 얼마나 보정되었는가로 평가할 수 있으며, 평가지수 E_d 는 다음과 같이 정의한다.

$$E_d = \frac{\lambda_d - \lambda_c}{\lambda_d} \quad (16)$$

여기서 λ_d 는 P_0 와 P_d 간의 거리이고, λ_c 는 P_0 와 P_c 간의 거리이다. (16)의 E_d 값은 0과 1사이에서 변화한다. 만약 완벽한 보정이 이루어진다면, λ_c 는 0이 되므로 E_d 값은 1이 된다. 보정이 전혀 이루어지지 않았다면 λ_d 와 λ_c 는 같은 값이 되어 E_d 는 0으로 된다. 그러므로 (16)에 의해 정의된 형상보정지수는 영상의 보정된 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 지수로써 사용될 수 있음을 알 수 있다.

2. 선명도 평가지수

단층영상의 선명도를 정량적으로 평가하기 위해서 평가지수를 제안한다. 그림 6(b)에 원형단층영상과 이 영상의 수평축(A-A')에 대한 강도 프로파일을 나타내었다. 단층영상에 대한 원래의 직경(original diameter)은 계산에 의해 구해진 단층영상의 직경을 표시한 것이다. 단층영상의 선명도는 경계선 주위의 그레이 값의 차이에 의해 평가될 수 있다. 즉, 경계선을 따른 내부영역(inner area)과 외부영역(outer area)의 그레이 값의 차이를 계산하여 선명도 평가지수로 삼는다. 그러므로 평가지수 E_{SH} 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$E_{SH} = \left(\frac{\Delta I}{(2^n - 1) - I_T} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (17)$$

여기에서 ΔI 는 경계선 내부영역의 평균강도 I_{in} 과 경계선 외부영역의 평균강도 I_{out} 간의 차이이다. I_T 는 프로파일의 최소값을 나타내며, n 은 데이터 비트 수로서 본 논문에서는 8로 사용하였다. 이상적인 단층영상일 때는 직사각형 형태의 프로파일이 되므로 ΔI 는 $(255 - I_T)$ 가 되고 E_{SH} 는 1이 된다. 경계선에서의 그레이 값의 변화가 작을수록, 즉 영상의 경계가 불선명해질수록 E_{SH} 는 1로부터 점점 작은 값이 된다. 그러므로 (16)은 선명도를 정량적으로 평가할 수 있는 지수로써 사용될 수 있다.

3. 인조간섭 평가지수

단층영상에서 발생하는 인조간섭은 인조간섭 영역의 크기에 의해 평가될 수 있다. 그림 5의 인조간섭 영상으로부터 평가지수 E_{AR} 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$E_{AR} = \frac{r_{ar} - r_c}{r_{ar}} \quad (18)$$

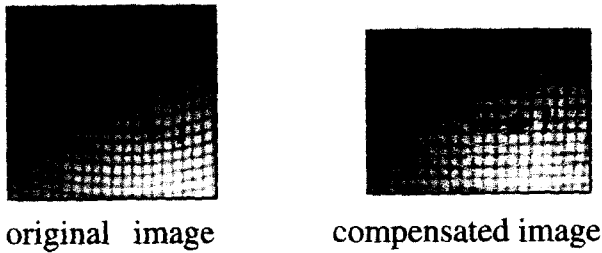
여기서 r_c 는 계산에 의해서 구해진 이상적인 단층영상의 반경이고, r_{ar} 은 인조간섭 반경이다. 인조간섭이 발생하지 않았을 때는 $r_{ar} = r_c$ 가 되어 E_{AR} 은 0이 된다. 인조간섭이 점점 크게 발생하게 되면 E_{AR} 도 점점 증가한다. 만일 초점평면이 물체의 밖에 놓여 있을 때($r_c = 0$)도 인조간섭이 발생하면, E_{AR} 은 1이 된다. 그러므로 단층영상에서 발생하는 인조간섭의 크기는 (18)에 의하여 정량적으로 평가될 수 있음을 알 수 있다.

V. 실험을 통한 검증

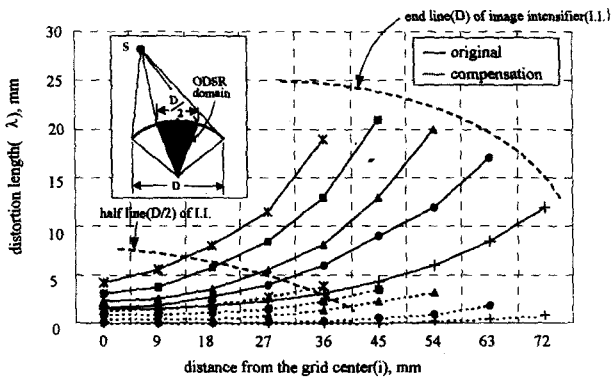
III장에서 유도한 수식들을 이용하여 단층영상의 성능을 개선하기 위하여 실험을 수행한다. 또한 실험을 통하여 획득된 영상으로부터 IV장에서 제안된 지수들을 이용하여 형상왜곡의 보정, 선명도의 개선 및 인조간섭의 향상결과를 정량적으로 평가한다. 그 결과로부터 기존의 다른 시스템에 비하여 성능이 향상되었음을 검증하고자 한다.

1. 형상왜곡의 보정

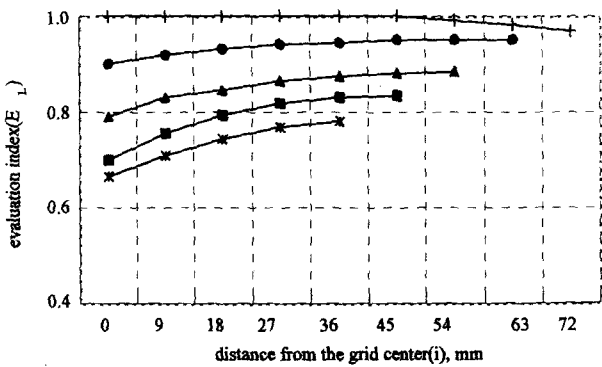
그림 7(a)는 실험에 사용된 와이어 그리드에 대한 왜곡영상과 (10)을 이용하여 보정한 영상의 결과를 보여주고 있다. 그리드 샘플은 그리드가 4.5mm 간격으로 배열



(a)



(b)



(c)

그림 7. 실험영상의 보정 및 평가($\psi=30^\circ$) (+:j=0, ●:j=2, ▲:j=4, ■:j=6, *:j=8). (a)원래의 영상과 보정된 영상, (b)그리드의 거리에 따른 보정결과, (c)형상보정의 평가.

Fig. 7. Compensation and evaluation of an experimental image ($\psi=30^\circ$). (a) original image and compensated image, (b) compensation result according to grid distance, (c) evaluation of shape compensation.

되어 32×32 의 크기로 이루어져 있다. 이는 사용된 직경 145mm의 영상증배관의 가장자리 영역에서의 왜곡까지 충분히 관측될 수 있는 크기이다. X-선의 투사각은 30° 로 고정되어 있다. X-선원의 투사방향이 j축이므로 이 방향에 따라 패턴의 왜곡이 심해짐을 보여주고 있다. 또한 i축에 따라 멀어질수록 패턴의 왜곡이 다소 나타나고 있다. 즉 pin-cushion 왜곡의 형태를 보이고 있다.

그림 7(b)는 (a)의 영상으로부터 측정된 왜곡길이(λ)의 변화를 나타낸다. 그림에서 원래 영상의 데이터는 실선으로, 보정된 데이터는 점선으로 표시되었다. 영상증배관에 의하여 왜곡되는 정도를 알아보기 위하여 두 개의 굵은 점선이 데이터 내에 그려졌다. 하나는 영상증배관의 경계선 영역(D)을 표시하며, 다른 하나는 증배관의 절반영역(D/2)을 나타낸다. 기존 시스템이 영상증배관의 바깥쪽 영역을 통하여 영상을 획득하는 반면, 본 논문에서 설계된 ODSR 시스템은 증배관의 가운데 영역(D/2)을 주로 사용한다. 영상증배관의 절반선(half line)인 D/2 영역에서의 영상왜곡 길이는 증배관의 경계선에서의 왜곡길이에 비해 약 1/3 정도임을 알 수 있다. 그러므로 원래의 왜곡영상으로 비교해 볼 때, 제안된 ODSR 시스템이 기존 시스템에 비하여 왜곡이 적은 더 우수한 영상이 획득되어짐을 알 수 있다.

그림 7(b)의 보정된 영상의 데이터는 왜곡영상이 획기적으로 개선되었음을 보여주고 있다. 왜곡길이는 보정을 거친 후 원래 길이의 약 13.3%로 줄어들었다. 왜곡의 보정정도를 정량적으로 평가하기 위하여 (16)으로 정의된 평가지수를 사용하였다. 평가지수 E_L 의 계산결과를 그림 7(c)에 나타내었다. 그림(c)는 그리드의 중심에서 지수의 값이 거의 1을 유지하여 보정이 거의 완벽하게 이루어졌음을 보여주고 있다. i축으로 거리가 멀어짐에 따라 지수의 값은 서서히 증가한다. 이는 중심에서 멀어질수록 왜곡이 점점 많이 남아 있음을 의미한다. 또한 같은 i축 위치에 대하여 j축으로 거리가 멀어질수록 지수의 값이 점점 감소하고 있다. 이는 투사각 30° 에 대하여 획득하여 왜곡이 큰 영상이기때 보정을 하여도 투사각에 따른 영향이 남아 있음을 의미한다. 유도한 (10)을 이용하여 보정을 하여도 이렇게 오차가 발생하는 이유는 (10)의 파라미터의 측정값이 정확하지 않거나 실험시 발생한 오차로 추정된다. 따라서 영상증배관을 이용하여 영상을 획득하는 경우에는 가능한 증배관의 중앙영역을 이용하는 것이 더 정확한 영상을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

2. 선명도 개선

단층영상의 선명도를 평가하기 위하여 그림 8(a)와 같은 원뿔모양의 물체를 대상으로 실험하였다. 원뿔의 밑면 직경은 10mm이고, 초점평면은 밑면에서 3mm위에 고정되어 있다. X-선 투사각은 30° 이다. 광원과 초점평면 사이의 수직거리(h1)는 275mm이고, 광원과 영상증배관의 표면까지의 거리(h2)는 584mm이다. 이 원뿔에 대한 단층영상을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험영상으로 각각 구현한 결과를 그림 8(b)와 (c)에 나타내었다. 합성에 사용된 영상의 수는 8개이다.

단층영상은 평균법, 최대법, 그리고 (12)로 정의된 근평균법에 의해 각각 구현되었다. 평균법의 경우 초점평면의 경계선 주위로 흐려진 영역이 존재함을 보여주고 있다. 최대법의 경우 영상의 경계선은 선명해졌지만, 단층영역 내에서 그레이 값의 급격한 변화가 생기는 것을 알 수 있다. 반면에 본 논문에서 제안한 근평균법에 의한 단층영상의 경우에는 경계선도 선명해졌고 단층내부

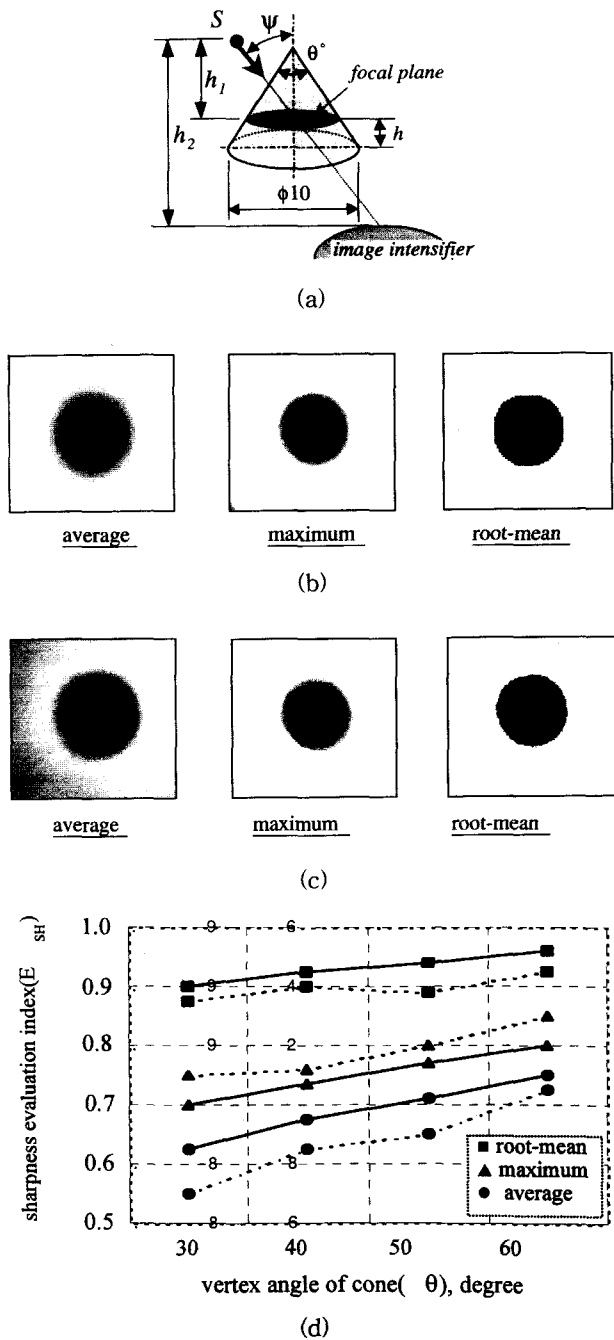


그림 8. 원뿔에 대한 단층영상의 선명도 평가. (a) 원뿔형상, (b) 시뮬레이션에 의한 단층영상, (c) 실험에 의한 단층영상($\psi=30^\circ$, $\theta=50^\circ$, $h=3$).

Fig. 8. Sharpness evaluation for the cross-sectional images of a cone. (a) cone shape, (b) cross-sectional images by simulation, (c) cross-sectional images by experiment, (d) sharpness evaluation data (—:simulation, ---:experiment).

의 그레이 값도 거의 균일하게 얻어졌음을 볼 수 있다. 이렇게 구현된 단층영상들의 선명도를 정량적으로 평가하기 위하여 앞에서 유도한 (17)을 사용하였다. 계산된

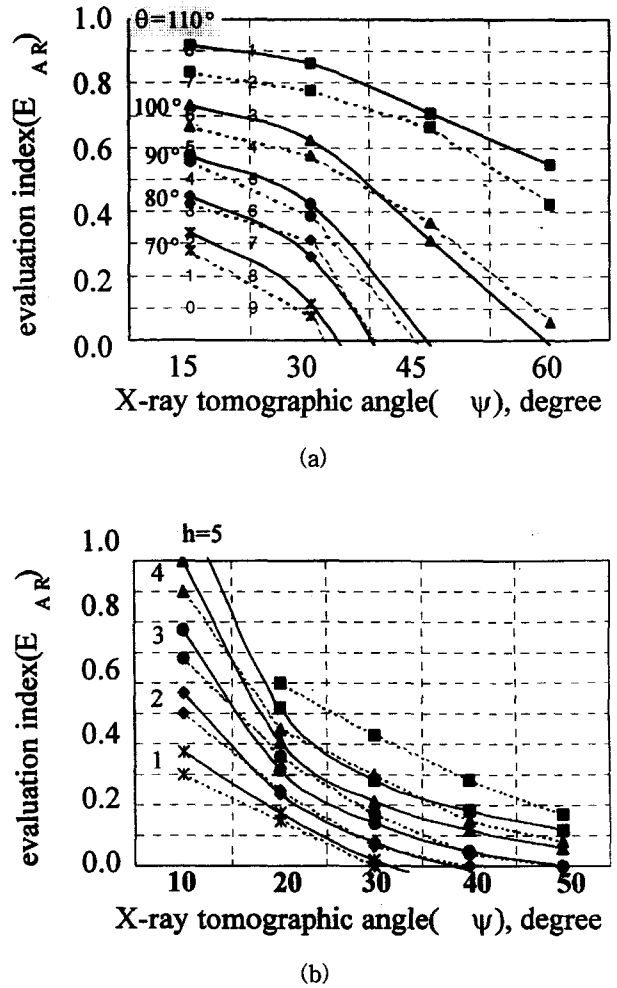


그림 9. X-선 투사각에 따른 원뿔의 인조간섭 평가. (a) 꼭지각의 변화($h=3$), (b)높이 h 의 변화.

($\theta=70^\circ$)(—:simulation, ---:experiment)

Fig. 9. Artifact evaluation for a cone according to an X-ray tomographic angle. (a) artifact according to vertex angle, (b) artifact according to height h .

평가지수 E_{SH} 의 결과가 그림 8(d)에 나타내어졌다. 근평균법에 의한 영상의 결과가 가장 큰 지수의 값을 보여주고 있다. 시뮬레이션의 결과는 근평균법의 지수의 값이 평균법에 비하여 32.4%, 최대법에 비하여 20.5% 상승된 결과를 보여준다. 실험에 의한 결과도 시뮬레이션의 경향을 잘 따르고 있음을 보여주고 있다. 이 결과는 평균법과 최대법의 장점만을 취하여 제안된 근평균법 알고리즘이 다른 두 방법에 비하여 더욱 우수함을 정량적으로 나타낸다. 근평균법에 의하여 단층영상의 선명도가 현저하게 향상되었음을 알 수 있다.

3. 인조간섭 개선

인조간섭에 대한 실험도 그림 8(a)의 원뿔에 대하여 수행하였다. 실험조건은 선명도 실험 때와 같다. 그림 9는 X-선 투사각에 따른 인조간섭의 결과를 보인 것이다. 평가지수는 앞에서 정의한 평가지수의 (18)을 사용하였다.

그림 (a)는 초점평면의 높이 $h=3$ 에 대한 경우인데, 투사각의 증가에 따라 평가지수의 값이 급격히 감소함을 보이고 있다. 이는 X-선원의 투사각도를 높여줌으로써 인조간섭을 줄일 수 있음을 의미한다. 꼭지각(θ)이 110° 인 경우 시뮬레이션 결과 투사각 15° 일 때 평가지수 E_{AR} 의 값이 0.91이었으나, 투사각이 커짐에 따라 점차 감소하다가 투사각 60° 에서 0.55가 되었다. 이는 평가지수가 39.6% 감소한 결과로써 인조간섭의 영향이 현저히 줄어들었음을 의미한다. 꼭지각이 110° 이하의 경우에는 인조간섭의 영향이 훨씬 더 줄어들었다. 그 이유는 꼭지각의 크기가 작아짐에 따라 원뿔의 같은 높이에 대한 초점평면의 면적이 점점 넓어지기 때문이다. 실험결과도 시뮬레이션의 경향과 일치함을 보이고 있다.

그림(b)는 꼭지각을 70° 로 고정하고 투사각을 바꾸어 가며 인조간섭의 영향을 살핀 것이다. 투사각의 증가에 따라 평가지수의 값이 급격히 줄어들음을 볼 수 있다. $h=3$ 인 경우, 시뮬레이션의 결과 투사각 10° 에서 평가지수의 값이 0.78이었으나, 투사각 40° 에서 0.05로 떨어져 93.5%의 감소효과가 얻어졌다. 그런데 h 가 커질수록 인조간섭의 영향이 커짐을 보이고 있다. 이는 인조간섭이 발생하는 조건에서 h 가 커지면 인조간섭의 반경과 원래의 단면의 반경과의 차이가 커지기 때문이다. 이상의 결과로부터 X-선원의 투사각을 높여줌으로써 단층영상에 발생하는 인조간섭의 영향을 줄여 정확한 단층영상을 구현할 수 있음을 알 수 있다. 기존 시스템의 투사각이 30° 이내로 제한되는데 반하여, 본 논문에서 설계한 ODSR 시스템은 60° 까지 증가가 가능하므로 인조간섭의 영향을 훨씬 줄일 수 있는 장점이 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 기존의 단층 시스템을 가지고 있는 단점을 개선하기 위하여 X-선원을 고정하고 물체와 검출기를 동기회전 시켜가며 영상집합을 획득할 수 있는 새로운 방식의 단층영상시스템을 고안하고 설계하였다. 그리고 설계된 시스템을 이용하여 단층영상의 성능을 개선시킬 수 있는 방법을 연구하였다. 즉, 영상증배관의 구면에 의한 형상왜곡을 보정하기 위한 수학적 모델을 유도하였고, 단층영상의 선명도를 개선하기 위한 새로운 합성알고리즘인 근평균법을 고안하였으며, 인조간섭을 줄이기 위한 수식을 유도하였다. 또한 영상의 성능개선의 정도를 정량적으로 평가하기 위한 평가지수를 제안하였다. 그리고 설계된 시스템을 이용하여 획득된 영상으로부터 왜곡을 보정하고 선명도를 개선하고 인조간섭을 감소시킨 결과를 각각 보였다. 개선된 영상에 대하여 제안된 평가지수에 의하여 왜곡의 보정, 선명도의 개선 및 인조간섭의 개선결과를 정량적으로 평가하였다. 그 결과 본 논문에서 제안된 ODSR 시스템이 기존 시스템에 비하여 더 우수한 성능을 보여 주었다.

참고문헌

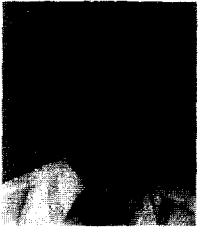
[1] Z. Kolitsi and G. Panayiotakis, "A multical projection method for digital tomosynthesis," *Medical*

- Physics*, vol. 19, no. 4, pp. 1045-1050, 1992.
- [2] S. M. 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, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A*, vol. 18, no. 4, pp. 851-861, 1995.
- [3] M. Okimura, S. Rooks and R. Urban, "Inspection of very-fine pitch connections on PCMCIA cards," *Proceedings of NEPCON West '93*, pp. 752-762, 1993.
- [4] D. P. Chakabarty, "Image intensifier distortion correction," *Med. Phys.*, vol. 14, no. 2, pp. 249-252, 1987.
- [5] P. Haaker, E. Klotz, R. Koppe and R. Linde, "Real-time distortion correction of digital X-ray II/TV systems: an application example," *SPIE*, vol. 1027 Image Processing II, pp. 261-266, 1988.
- [6] J. A. Adams, B. D. Black, *Automated Laminography System for Inspection of Electronics*, US Patent 5081656(1992).
- [7] S. Rooks and T. Sack, "X-ray inspection of flip chip attach using digital tomosynthesis," *Circuit World*, vol. 21, no. 3, pp. 51-55, 1995.
- [8] R. G. Gould, "Image resolution of a microchannel plate X-ray image intensifier," *Medical Physics*, vol. 5, no. 1, pp. 27-30, 1978.
- [9] E. Hell, H. J. Besch, L. Brabetz, P. Kuhn and A. H. Walenta, "Position resolution, high rate behaviour and space charged induced image distortion of a multiwire X-ray detector for digital subtraction angiography," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. A269, pp. 404-414, 1988.
- [10] A. P. Hammersley, S. O. Svensson, A. Thompson, H. Graafsma and A. Kvick, "Calibration and correction of distortions in two-dimensional detector systems," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 66, no. 3, pp. 2729-2733, 1995.
- [11] H. Doi, Y. Suzuki and Y. Hara, "Real-time X-ray inspection of 3-D defects in circuit board patterns," *Fifth International Conference on Computer Vision (ICCV'95)*, pp. 575-582, June, 1995.
- [12] E. Klotz, P. Haaker, R. Koppe, R. Linde and H. Moller, "A new digital tomosynthesis method with less artifacts for angiography," *Med. Phys.* vol. 12, no. 4, pp. 431-436, 1985.
- [13] T. A. Siewert, M. W. Austin, G. K. Lucey and M. J. Plott, "Evaluation and qualification standards for an X-ray laminography system," *Materials Evaluation*, pp. 1027-1035, Sept., 1992.
- [14] M. W. Austin and T. A. Siewert, "The contributions of out-of-plane material to a scanned-beam laminography image," *Materials Evaluation*,

pp. 1194-1198, Oct., 1994.

[15] S. T. Kang and H. S. Cho, Arbitrary Cross-Sectional Recognition of 3-Dimensional Objects

Using a Digital Tomosynthesis, Ph. D. Dissertation, KAIST 1998.



강 성택

1962년 6월 5일생. 1986년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1989년 한국과학기술원 생산공학과 석사. 1998년 한국과학기술원 자동화공학과 박사. 1989년-1991년 삼성전자 생산기술연구소(전임연구원). 1992년-현재 전자부품종합기술연구소(선임연구원). 관심분야는 머신비전, X-선 검사 시스템, 패턴인식, 자동검사시스템.

조 형 석

제어·자동화·시스템공학 논문지 제4권, 제1호, 참조.

노 병 옥

제어·자동화·시스템공학 논문지 제2권, 제4호, 참조.