

디지털공제프로그램간의 디지털공제영상 비교

단국대학교 치과대학 구강악안면방사선학교실
한 원 정

A comparison of subtracted images from dental subtraction programs

Won-Jeong Han

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, School of Dentistry, Dankook University

ABSTRACT

Purpose : To compare the standard deviation of gray levels on digital subtracted images obtained by different dental subtraction programs.

Materials and Methods : Paired periapical films were taken at the lower premolar and molar areas of the phantoms involving human mandible. The bite registration group used Rinn XCP equipment and bite registration material, based on polyvinyl siloxane, for standardization. The no bite registration group used only Rinn XCP equipment. The periapical film images were digitized at 1200 dpi resolution and 256 gray levels by a flat bed scanner with transparency unit. Dental digital subtraction programs used for this study were Subtractor (Biomedisys Co., Korea) and Emago (Oral Diagnostic Systems, The Netherlands). To measure the similarities between the subtracted images, the standard deviations of the gray levels were obtained using a histogram of subtracted images, which were then analyzed statistically.

Results : Subtracted images obtained by using the Emago program without manual selection of corresponding points showed the lowest standard deviation of gray levels ($p < 0.01$). And the standard deviation of gray levels was lower in subtracted images in the group of a bite registration than in the group of no use of bite registration ($p < 0.01$).

Conclusion : Digital radiographic subtraction without manual selection of reference points was found to be a convenient and superior method. (*Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2002; 32 : 147-51)

KEY WORDS : subtraction technique; image processing, computer-assisted; radiography, dental, digital

서 론

치근단방사선사진을 이용한 디지털공제술은 시간 간격을 두고 촬영한 두장의 방사선사진을 컴퓨터 프로그램을 이용하여 중첩시킨 후 공제하는 술식으로 경조직에 발생한 미세한 변화를 보여주는 우수한 술식이다. 그러므로 치주질환 치료후의 평가, 임플란트 주위 골변화 평가시 매우 유용하게 이용되고 있는 디지털방사선술식이다. 이러한 술식을 위해서는 동일한 기하학적 촬영조건을 가진 방사선 사진 쌍을 얻어야 하며 공간적 관계가 일정하게 되도록 기하학적 촬영조건이 표준화 되어야 한다. 대개는 occlusal stent, cephalostats, electronic positioning device 등의 기계적

인 방법을 이용하여 기하학적으로 표준화된 방사선사진을 얻을 수 있다. 그러나 실제 임상에서 시간간격을 두고 촬영되는 방사선사진의 정확한 기하학적 관계를 유지시키기 위해서 기계적인 방법을 일반적으로 사용하고자 할때 번거로운 점들이 많이 있다. 개인용 컴퓨터의 발달과 함께 디지털 방사선영상을 술자가 쉽게 조작할 수 있게 되면서 방사선사진촬영시 발생하는 기하학적 오차를 보정시켜주는 컴퓨터 알고리즘들에 대하여 연구^{1,6}되었고 개발되어 일부는 상품화되기도 하였다. 이러한 알고리즘에 의한 상의 인기 (image registration)는 기존의 수동인기²나 occlusal stent을 이용한 경우¹ 보다 우수하다고 보고되고 있다. 두 방사선사진상의 대응관계를 결정하는 알고리즘도 기하학적 대응점을 설정하는 방법에 따라서 연구가 이루어지고 있다. 술자가 직접 마우스를 이용하여 각각 두 방사선사진 상에서 대응점을 지정하게 되면 대응점들의 정보를 바탕으로 기준영상에 대한 재구성상이 형성되고 기준방사선사진상과의 디지털공제상이 얻어지게 된다.² 또는 기준이 되

*이 연구는 2000년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.
접수일 : 2002년 6월 14일 채택일 : 2002년 7월 12일
Correspondence to : Dr. Won-Jeong Han
Department of Oral and Maxillofacial Radiology, School of Dentistry, Dankook University, San7-1 Shinbu-Dong, Cheonan, Choong-Nam, 330-716, KOREA
Tel) 82-41-550-1922, Fax) 82-41-553-3707
E-mail) wjhan@dku.edu

는 방사선사진상에 높은 대조도를 갖는 기준점을 정해주게 되면 컴퓨터 알고리즘에 의해서 자동적으로 두 번째 방사선사진상에 대응점이 찾아지게 되고 자동적으로 찾아진 대응점들은 두 번째 방사선영상이 재구성상을 형성할 때 이용된다.³ 술자가 대응점을 설정하는 과정 중에 발생하는 오류는 디지털공제상에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 오차를 줄이기 위하여 술자가 직접 기준점을 설정하는 것이 아니라 변연강조영상기법 (edge enhancement technique) 을 이용하여 구조물의 외형에서 자동적으로 컴퓨터가 기준점을 설정하도록 하는 연구⁵가 이루어 졌으며, 술자가 대응점 설정의 오류를 줄이기 위하여 방사선사진상이 보이는 화면에 확대창을 만든다든지 기준점이 되는 곳에 색깔변화를 주어 정확한 대응점의 위치를 지정할 수 있도록 하는 기존 상용프로그램 개선 연구⁷가 이루어지고 있다. 한편, 디지털 공제술의 알고리즘에 대한 많은 연구는 이루어졌지만 실제 상용화되어 임상에서 이용되고 있는 디지털공제 프로그램은 그리 많지 않으며 프로그램간의 비교 연구도 흔하지 않다.

본 연구에서는 치과용 디지털공제 프로그램으로 널리 알려진 Emago와 subtractor를 이용하여 얻은 디지털공제상의 계조도에 대한 표준편차를 구하고 이를 비교함으로써 두 프로그램에서 얻어진 디지털 공제상의 정확성을 알아보고자 하였다.

재료 및 방법

1. 방사선사진촬영 및 현상

인체 전조두개골이 들어있는 4개의 방사선촬영용 마네킹을 이용하여 하악 양측 소구치, 대구치부위에서 치근단 방사선사진촬영을 하였다. 1주일 후 동일한 부위에서 동일한 조사조건으로 치근단방사선사진촬영을 다시 하였다. 방사선사진촬영은 교합인기군과 교합비인기군으로 나누어 시행하였다. 교합인기군은 고무인상재 (Futar® D occlusion, Kettenbach, Germany)로 교합면을 인기한 교합인기제와 평행촬영용 필름유지장치 (Rinn XCP, Rinn Co., USA)를 이용하여 촬영하였으며 교합비인기군은 평행촬영용 필름유지장치만을 이용하여 촬영하였다. 사용된 필름은 치근단필름 (Kodak dental film, Eastman Kodak Co., USA) No.2이고 구내방사선촬영기 (CCX digital, Trophy, France)로 70 kVp, 8 mA조건에서 노출시간 0.74초로 촬영하였다. 모든 필름은 자동현상기 (A/T2000XR, Air techniques, USA)로 현상하였다.

2. 방사선사진의 디지털화 및 디지털공제술 시행

1) 방사선사진의 디지털화

현상된 필름은 flat bed scanner (Scanmaker 6400XL, Micr-

otek, Taiwan)를 이용하여 1200 dpi, 254 gray scale, 4.5×3.5 cm pixel size로 디지털화하여 jpg. 파일로 저장하였다.

2) 디지털공제술 시행

(1) Emago 프로그램을 이용한 디지털공제술 시행

① emago I

저장된 1쌍의 jpg.파일들을 불러들여 gamma correction으로 대조도를 보정한 후 linear subtraction메뉴를 실행시켰다. 대응점의 설정없이 마우스로 참고방사선사진과 두 번째 방사선사진을 지정하여 공제상을 얻었다. 이를 emago I로 하였다.

② emago II

저장된 1쌍의 jpg.파일을 gamma correction으로 대조도를 보정한 후 reconstruction메뉴를 실행시켰다. 마우스로 지정된 참고방사선사진과 두 번째방사선사진에서 기하학적으로 동일하다고 판단되는 4개의 대응점을 각각 설정하게 되면 참고방사선사진을 기준으로 재구성상이 나타난다. linear subtraction 메뉴를 실행시켜 참고방사선사진과 재구성상간의 공제상을 얻었다. 이를 emago II로 하였다.

(2) Subtractor 프로그램을 이용한 디지털공제술 시행

저장된 1쌍의 jpg.파일을 불러들여 기하학적으로 동일하다고 판단되는 4개의 대응점을 각각의 방사선사진상에서 설정한 후 histogram mapping 메뉴로 대조도를 보정하고 warping 메뉴로 재구성상을 얻고 subtraction 메뉴를 실행하여 공제상을 얻었다. 이를 subtractor로 하였다.

3. 디지털공제상의 비교

디지털공제상간의 유사성을 알아보기 위하여 emago I, emag II, subtractor에서 얻어진 공제상의 히스토그램을 구하고 계조도의 표준편차를 비교하였다. 또한 교합인기제의 사용여부에 따른 공제상을 비교하기 위하여 계조도의 표준편차를 비교하였다. 공제상의 히스토그램과 계조도의 표준편차는 포토샵프로그램 (Adobe photoshop5.5, Adobe, USA)을 이용하여 구하였다. 교합인기군과 교합비인기군에서 각각 emago I, emago II, subtractor 공제상간의 계조도 표준편차의 차이는 분산분석법 (ANOVA)과 Scheff의 검정으로 다중비교검정 (multiple comparison test)하였고 교합인기군 공제상과 교합비인기군 공제상간의 계조도 표준편차의 차이는 독립표본 T 검정 (t-test)으로 통계처리하였다 (SPSS 10.0, SPSS inc., USA).

결 과

1. 교합인기군에서 디지털공제상의 비교

교합인기제 (occlusal registration block)와 평행촬영용 필름유지기구를 이용하여 방사선사진을 촬영한 후 각기 다른

Table 1. AVOVA test for the standard deviation of gray level on the digital subtracted images of occlusal registration block group

	mean	SD	F ratio	F probable
emago I	23.33*	6.55		
emago II	59.17*	8.55	71.63	.00
subtractor	42.94*	9.99		

*statistically significant (p<0.01)

Table 2. Multiple comparison test for the standard deviation of gray level on the digital subtracted images of occlusal registration block group

Scheffe			
group (I)	group (J)	mean defference (I-J)	p value
emago I	emago I		
	emago II	-35.84*	.00
emago II	emago I	35.84*	.00
	emago II	16.23*	.00
subtractor	emago I	19.61*	.00
	emago II	-16.23*	.00

*statistically significant (p<0.01)

공제프로그램에서 얻은 디지털공제상의 제조도 표준편차의 차이를 알아보았다. 전반적으로 emago I에서 제조도 표준편차가 가장 적은 것 (23±6.55)으로 나타났고 그 다음으로 subtractor (42.94±9.99)이었으며 emago II에서 제조도 표준편차가 가장 큰 것 (59.17±8.55)으로 나타났다. 이는 통계학적으로 유의한 차이를 보였으며 (Table 1) emago I, emago II 그리고 subtractor간에서도 각각 제조도의 표준편차가 통계학적으로 유의한 차이를 보였다 (Table 2).

2. 교합비인기군에서 디지털공제상의 비교

교합인기제를 이용하지 않고 평행촬영용 필름유지기구만을 이용하여 방사선사진을 촬영한 후 각기 다른 공제프로그램에서 얻은 디지털공제상의 제조도 표준편차의 차이를 알아보았다. 전반적으로 emago I에서 제조도 표준편차가 가장 적은 것 (28.39±10.53)으로 나타났고 그 다음으로 subtractor (49.17±9.58)이었고 emago II에서 제조도 표준편차가 가장 큰 것 (62.80±8.75)으로 나타났다. 이는 통계학적으로 유의한 차이를 보였으며 (Table 3) emago I, emago II 그리고 subtractor간에서도 각각 제조도의 표준편차가 통계학적으로 유의한 차이를 보였다 (Table 4).

3. 교합인기군과 교합비인기군간의 디지털공제상의 비교

교합인기제의 사용여부에 따른 공제상의 제조도 표준편

Table 3. AVOVA test for the standard deviation of gray level on the digital subtracted image of no occlusal registration block group

	mean	SD	F ratio	F probable
emago I	28.39*	10.53		
emago II	62.80*	8.75	51.64	.00
subtractor	49.17*	9.58		

*statistically significant (p<0.01)

Table 4. Multiple comparison test for the standard deviation of gray level on the digital subtracted image of no occlusal registration block group

Scheffe			
group (I)	group (J)	mean defference (I-J)	p value
emago I	emago I		
	emago II	-34.41*	.00
emago II	emago I	34.41*	.00
	emago II	13.63*	.00
subtractor	emago I	20.78*	.00
	emago II	-13.63*	.00

*statistically significant (p<0.01)

Table 5. The standard deviation of gray level on the digital subtracted images

occlusal registration block		p-value
yes (n=48)	no (n=48)	
41.81±16.97	46.79±17.13	p<0.01

차를 알아보았다. 교합비인기군보다 교합인기군에서 제조도의 표준편차가 더 적었으며 통계학적으로 유의한 차이를 보였다 (Table 5).

고 찰

디지털공제술은 육안으로는 쉽게 관찰되지 않는 작은 경조직변화를 방사선사진상에서 강조시켜 보여주는 우수한 술식이다. 공제하고자 하는 두 방사선사진상은 기하학적으로 규격화되어야 하고 상의 대조도가 일치하여야 한다. 기하학적 규격화 조건을 만족시켜주기 위해서 여러 가지 구내용 기구와 구외용 장치 등이 소개되었으며 기계적인 방법들에 대한 연구가 이루어져 왔다.⁸⁻¹⁰ 그러나 기하학적 규격화를 위하여 이용되는 기구와 장비는 불편하거나 까다로운 조건을 가지므로 임상에서 널리 사용하기에 한계가 있다. 이러한 한계점은 영상의 이동, 회전등의 영상처리과정을 통하여 두 영상간의 기하학적 오차를 줄여주는

컴퓨터 알고리즘에 의해서 많이 해소되고 있다.

본 연구에 이용된 상용 디지털공제프로그램은 Emago/advanced v3.42 (Oral diagnostic System, Amsterdam, The Netherlands)과 subtractor (Biomedisys Co., Seoul, Korea, 2000 Copyright)로 윈도우기반의 개인용 컴퓨터에서 쉽게 이용할 수 있는 디지털공제프로그램이다. 디지털공제상을 얻기 위해서는 두 프로그램 모두 술자가 마우스를 이용하여 기준 방사선사진상과 비교하고자 하는 방사선사진상에 각각 4개의 대응점을 설정하고 각 프로그램의 메뉴에 따라 공제술을 시행한다. 또한 Emago 프로그램은 4개의 대응점을 설정하지 않고 기준방사선사진상과 두 번째 방사선사진상을 마우스로 각각 선택하여 정한 후 task 메뉴에서 gamma correction과 linear subtraction을 실행하여 공제상을 얻을 수도 있다. 그러나 Subtractor 프로그램은 기준 방사선사진상과 비교하고자 하는 방사선사진상에서 반드시 4개의 대응점을 설정하여야만 두 방사선사진상의 공제술이 실행되도록 되어 있다.

두 상용 프로그램간의 공제술 실행 방법의 차이가 있고 사진상의 왜곡도 보정 및 기하학적 보정 알고리즘이 일치하지는 않지만 프로그램 사용자 관점 즉, 술자입장에서 공제술의 정확성을 알아보기 위하여 각 공제상의 히스토그램에서 왜곡도의 표준편차를 비교하였다. 결과적으로 술자가 각각의 방사선사진상에 대응점 설정에 대한 수고없이 단지 모니터상에서 해당 사진상만을 선택한 후 공제술을 시행한 Emago프로그램에서 공제상의 왜곡도 표준편차가 가장 적어서 공제술의 임상 적용시 편리성에 대한 가능성을 제시해주고 있다.

또한 Emago프로그램에서 각각의 방사선사진상에 4개의 대응점을 설정한 경우보다 그렇지 않은 경우의 공제상에서 왜곡도 표준 편차가 적었다는 것은 대응점 설정이 공제상에도 영향을 미칠수도 있다는 것이다. 즉, 술자에 따라 대응점 설정이 달라 질 수 있고 이에 따른 오류가 공제상에도 영향을 미칠수 있다고 생각된다. Lehmann 등¹¹은 술자 또는 컴퓨터 알고리즘이 대응점 설정에 얼마나 영향을 미치는가를 알아보았다. 이들은 상의 다른부위를 대응점으로 정하는 경우가 많고 대응점을 선택할 때 마우스 사용의 한계가 있기 때문에 술자에 의하여 대응점 설정이 좌우될 수 있다고 하였다. 보완책으로 잘못 설정된 대응점을 찾아내서 제거하는 원근투사모델의 적용과 local correlation으로 상 인기(registration)의 정확성을 최대화 시켜 술자와 무관한 설정점기준인기술(landmark-base registration technique)에 대하여 보고하였으며 치아 방사선사진상에서 대응점을 자동으로 찾아내는(automatic extraction) 알고리즘에 대하여 언급하였다.

각각의 방사선사진상에 4개의 대응점을 설정하고 공제술을 시행한 경우에는 Emago프로그램의 공제상이 subtractor프로그램의 공제상보다 더 큰 왜곡도 표준편차 값을

갖는 것으로 나타났다. 이는 재구성영상 형성방법에 따른 디지털영상공제술의 정확성을 비교한 연구⁶에서 Sunny프로그램(subtractor프로그램을 기반으로 만들어진 프로그램)을 이용한 경우가 Emago프로그램을 이용한 경우보다 디지털공제영상의 왜소 회색조 수치의 표준편차가 유의성 있게 작았다는 연구 결과와 일치한다고 볼 수 있다. 물론 Sunny프로그램은 대응점 설정시 오류를 줄이기 위해서 컴퓨터 화면상에 확대창이 나타나게 하거나 커서의 색이 배경색에 따라 바뀌도록 하는 개선된 subtractor프로그램이지만 Emago프로그램과 비교하였을때 더 정확한 공제상을 얻었다는 결과는 일치하였다.

알고리즘에 의한 영상재구성형성시 교합인기제의 사용 유무에 따라서 공제상의 결과가 어떻게 되는지를 알아본 결과 교합인기제를 사용한 방사선사진상에서 공제상의 왜곡도 표준편차 값이 적게 나타났다. 즉, 공제프로그램만을 이용한 경우 보다 교합인기로 기하학적 표준화에 대한 조건을 일치시킨 다음 시행한 공제상이 더 정확하였다고 볼 수 있다. 디지털공제방사선촬영술에 있어서 기계적 및 투사적 규격화의 평가에 대한 연구에서 최 등¹²은 재구성 즉 자동중점을 이용하여 제작된 소구치 부위 및 대구치 부위 전체영상에 대한 공제영상의 표준편차가 비인기군의 경우와 인기군의 경우에서 각각 통계적으로 유의성 있는 차이를 나타내지는 않았다고 보고하였으며 재구성과정에서 교합면 인기와 같은 기계적 규격화 과정을 대체할 수 있다고 언급하였지만 아직까지는 교합인기제를 이용한 표준화 방법이 비표준화 방법보다 공제상이 우수한 것으로 보고되고 있다.¹³

한편, 최근에는 비표준화상태에서 상을 얻은 후 컴퓨터를 이용하여 자동으로 상을 인기(image registration)할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. Byrd 등³은 반자동 배열 알고리즘(semiautomated alignment algorithm)을 임상에 적용시킬 경우 디지털공제술의 효과를 증진시킬 수 있다고 하였다. 비디오카메라로 방사선사진상을 디지털화한 후 첫 번째 방사선상에서만 기준점을 선택하게 되면 이 기준점을 바탕으로 컴퓨터 알고리즘에 의해서 자동적으로 두 번째상에 대응점이 찾아지게 된다. 이렇게 자동적으로 찾아진 기준점은 두 번째 상을 왜곡(warp)하여 재구성영상을 형성하는데 이용된다. Samarabandu 등⁶은 그들이 개발한 알고리즘을 이용하여 자동으로 배열시킨 후 얻은 공제상과 전문가에 의해서 수동으로 배열시킨 후 얻은 공제상을 비교한 결과 차이가 없었다고 보고하였으며 자동배열 술식(automated alignment procedure)으로 비표준화된 방사선사진을 재현성있게 배열(alignment)할 수 있다고 하였다. Ettinger 등⁴은 자동상 인기(automated image registration)에 대해서 언급하면서 치아의 경계(tooth edge), 법랑-백악질 경계부(cementoenamel junction)와 같은 불변적인 해부학적 구조물이 재형성상을 위해서 상을 왜

곡(warp)시키거나 자동으로 중첩시킬때 중요한 정보를 제공하고 기하학적 오차(geometric misalignment)를 수정시켜 주는데 필요하다고 하였다. Yoon 등⁵은 술자가 수동으로 기준점을 설정하지 않고 방사선사진상을 자동으로 배열시킬 수 있는 강력하면서도 간편한 방법을 보고하였다. 각각의 방사선사진상에서 1500 픽셀 이상의 변연상(edge feature)을 찾아내고 두 번째상 변연이 첫 번째상 변연에 자동적으로 배열시키는 방법이었다. 수동방법과 비교한 결과 변이성(variability)이 반정도 적었으며 공제술 실행시간이 3배 정도 시간이 빨랐다고 보고하였다.

각각의 방사선상에 술자가 4개의 대응점을 설정하는 디지털 공제프로그램은 정확하게 대응점을 선택하는 것이 중요하다. 대응점 설정의 주관적인 오차를 줄이기 위한 의도로 컴퓨터 알고리즘을 이용한 자동 상인기의 연구가 앞으로 계속되어야 하고 이를 임상적으로 활용할 수 있는 노력이 필요하리라 사료된다. 아직까지는 교합인기제의 사용으로 개괄적으로나마 기하학적 보정을 시행하는 것이 좋은 공제상 결과를 가져온다고 생각되지만 임상 적용시 불편함을 초래하는 교합인기제 대신 디지털 공제술을 위한 자동화 인기 알고리즘에 대한 연구가 많이 이루어져야 한다고 생각된다.

대응점을 설정하여 공제술을 시행한 경우보다 대응점 설정없이 공제술을 시행한 경우에 보다 정확한 공제결과를 얻을 수 있었으며 대응점 설정과정이 필요치 않기 때문에 술자에 의한 대응점 설정오류를 줄일 수 있었다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. Dunn SM, van der Stelt PF, Ponce A, Fenesy K, Shah S. A compari-

- son of two registration techniques for digital subtraction radiology. *Dentomaxillofac Radiol* 1993; 22 : 77-80.
2. Wenzel A. Effect of manual compared with reference point superimposition on image quality in digital subtraction radiography. *Dentomaxillofac Radiol* 1989; 18 : 145-50.
3. Byrd V, Maryfield-Donahoo T, Reddy MS, Jeffcoat MK. Semiautomated image registration for digital subtraction radiography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1998; 85 : 473-8.
4. Ettlinger GJ, Gordon GG, Goodson JM, Socransky SS, Williams R. Development of automated registration algorithms subtraction radiography. *J Clin Periodontol* 1994; 21 : 540-3.
5. Yoon DC. A new method for the automated alignment of dental radiographs for digital subtraction radiography. *Dentomaxillofac Radiol* 2000; 29 : 11-9.
6. Samarabandu J, Allen KM, Hausmann E, Acharya R. Algorithm for the automated alignment of radiographs for image subtraction. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1994; 77 : 75-9.
7. 허영준, 전인성, 허민석, 이삼선, 최순철, 박태원 등. 재구성영상 형성방법에 따른 디지털공제술의 정확성 비교연구. *대한구강악안면방사선학회지* 2002; 32 : 107-11.
8. Dove SB, McDavid WD, Hamilton KE. Analysis of sensitivity and specificity of a new digital subtraction system. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2000; 89 : 771-6.
9. Ellwood RP, Davies RM, Worthington HV. Evaluation of a dental subtraction radiography system. *J Periodont Res* 1997; 32 : 241-8.
10. Ludlow JB, Peleaux CP, Hill C. Comparison of stent versus laser- and cephalostat-aligned periapical film-positioning techniques for use in digital subtractionradiography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1994; 77 : 208-15.
11. Lehmann TM, Gröndahl K, Gröndahl HG, Schmit W, Spitzer K. Observer-independent registration of perspective projection prior to subtraction of *in vivo* radiographs. *Dentomaxillofac Radiol* 1998; 27 : 140-50.
12. 최봉인, 조봉혜, 나경수. 디지털 공제 방사선 촬영술에 있어서 기계적 및 투사적 규격화의 평가. *대한구강악안면방사선학회지* 1998; 28 : 215-24.
13. 임숙영, 고광준. 디지털 공제방사선영상의 기하학적 보정에 관한 연구. *대한구강악안면방사선학회지* 2001; 31 : 23-34.