

# 국부 전립선 종양을 위한 냉동시술 시뮬레이터의 개발

김혁\*, 이재범\*, 신영길\*, 한광준\*\*

{jinge,offbeat,yshin}@cglab.snu.ac.kr\*, hahn@seas.gwu.edu\*\*

서울대학교 전산학과와 그래픽연구소\*, 조지워싱턴대 그래픽연구소\*\*

## Cryotherapy Simulator for Localized Prostate Cancer

Jin Ge\*, Jaebum Lee\*, Yeong Gil Shin\*, James. K. Hahn\*\*

Seoul National University, Dept of Computer Science, Graphics Lab\*

George Washington University, Institute of Computer Graphics\*\*

### 요 약

국부 전립선 종양의 냉동시술이란 직장초음파영상을 이용하여 종양제거를 위한 6개의 냉동침(Cryoprobe)을 환자의 전립선에 삽입하고 전립선 부위를  $-40^{\circ}\text{C}$  까지 냉동시켜 암세포를 제거하는 새로운 수술방법이다. 이 새로운 냉동시술에 있어서 비뇨기과 의사들의 수술에 대한 숙련도와 정확도를 높이기 위하여 컴퓨터 시뮬레이터가 필요하다.

본 연구에서는 3차원 직장초음파영상 볼륨에서 냉동침에 의한 영상의 변형을 직선에 의한 볼륨변형기법을 사용하여 실시간으로 보여 주었으며 냉동에 의한 영상의 변화도 실시간으로 시뮬레이트 하였다.

### 1. 서론

최근 국부 전립선 종양의 치료에 있어서 최첨단 분야가 바로 냉동시술분야이다. 전립선 냉동시술은 비뇨기과, 방사선과 등의 전문 의학지식과 컴퓨터 그래픽 기술 등의 집약이 필요한 분야이다. 본 논문에서는 직선에 의한 볼륨변형기법(Line feature based volume deformation)을 이용하여 냉동침의 삽입에 의한 변형된 전립선 초음파영상을 실시간으로 시뮬레이트 하는 방법과 냉동시간에 따른 초음파 영상의 변화를 보여주는 방법을 제안한다.

전립선 냉동시술은 종양부위를 선택하여 일정한 간격으로 냉동침을 삽입한 뒤 컴퓨터 제어에 의하여 종양조직을 냉동시켜 파괴하는 수술 기법이다. 냉동침을 정확히 삽입하기 위하여 직장초음파 영상을 사용하며 냉각액으로는 아르곤액체가 쓰인다. 수술의 위험 요소들로는 냉동침에 의한 직

장 벽의 파손과 과도한 냉각에 의한 직장벽의 파괴이다. 이런 위험 요소를 최소화하기 위하여 비뇨기과 의사들의 수술에 대한 숙련도가 요구되며 이를 위하여 전립선 냉동수술 시뮬레이터의 개발이 필요하게 되었다.

시뮬레이터의 주요 기능은 냉동침과 전립선 조직의 상대적 위치를 판단할 수 있는 실시간 초음파 영상과 냉동시간에 따른 초음파 영상의 변화를 렌더링 하는 것이다. 비뇨기과 의사들은 시뮬레이터로 가상수술을 진행하여 수술에 대한 숙련도를 높임으로서 위험 요소인 직장 벽의 파손과 과도한 냉각에 의한 직장벽의 파괴를 막을수 있다.

시뮬레이터에 사용된 데이터는 3차원 초음파 영상 볼륨이다. 3차원 볼륨에서 직선에 의한 볼륨 변형 기법과 시간에 따른 3차원 냉동테이블(Thermal Table)을 이용하여 실시간으로 냉동침에 의해 변형된 초음파 영상과 냉동된 전립선 초음파 영상을 렌더링하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 초

음과 영상과 볼륨 변형기법에 대한 관련된 연구 방법들에 대해 소개하고 3장에서는 직선에 의한 볼륨 변형 기법을 설명하며 4장에서는 냉동테이블에 의한 전립선 초음파영상의 렌더링에 대해 설명한다. 그리고 5장에서는 실험 및 결과를 보여주며 6장에서는 결론 및 향후과제를 제시한다.

## 2. 관련된 연구

초음파 영상에 대한 연구는 볼륨그래픽 분야에서 많이 진행되어 왔다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 3차원 볼륨영상의 생성, 3차원 가시화를 위한 모델링, 3차원 가시화 알고리즘 등을 중심으로 이루어져 왔다. 변형(Deformation)에 대한 연구는 컴퓨터그래픽의 중요한 분야로 많은 연구들이 진행되고 있다.

본 논문과 근접한 연구로는 실시간 초음파 영상의 시뮬레이터를 개발한 이스라엘 Tele-Aviv 대학의 Daniel Cohen-Or 교수의 연구를 참고로 할 수 있다.

아래에 본 연구와 관련된 연구들에 대해 소개하고자 한다.

### 2.1 Affine 변환을 이용한 초음파 영상의 재구성

Daniel Cohen-Or 교수는 임의의 각도에서 얻은 2차원 초음파 영상들로 3차원 볼륨을 만들고 이런 3차원 볼륨에서 실시간으로 2차원 영상을 재구성하는 초음파 시뮬레이션 시스템을 개발하였다. 이 연구의 핵심은 3차원 볼륨의 재구성이며 2차원 영상의 재구성은 Regular 3D 볼륨에서 2차원 텍스처 매핑을 이용하였다.[1]

### 2.2 직선에 의한 변형기법

Keith Waters 는 직선에 의한 다각형 메시의 변환을 이용하여 효율적인 얼굴 표정 애니메이션을 구현하였다. 이 기법은 가장 적은 비용으로 3차원 데이터의 변형을 구현하며 하드웨어의 지원 없이 실시간으로 변환이 가능하다는 것이다.[2]

비슷한 기법으로는 특성에 의한 이미지 모핑 기법이다. T.Beier과 S.Neery 는 이 논문에서 직선들로 이루어진 특성 벡터를 이용하여 실시간으로 두 이미지 사이에서 부드러운 모핑을 구현하였다.[3]

관련된 연구들을 살펴보면 실시간 렌더링을 위하여 기본적으로 선형 변환을 사용하였다.

본 논문에서는 가장 적은 비용으로 비 선형 변환을 구현하였다. 이 방법은 위의 직선에 의한 변형 기법에 근거하여 새로운 변형 테이블(Deformation Table)을 사용함으로써 근육조직이 냉동침에 의해 변형되는 효과를 실시간으로 구현하였다.

## 3. 직선에 의한 볼륨 변형 기법

### 3.1 초음파 영상의 구성

전립선 냉동수술에서의 초음파 영상을 얻는 과정은 그림 1.과 같다. 초음파 장비는 항문으로 직장내 삽입되며 전립선 부위에 초음파를 발사하여 영상을 얻는다.

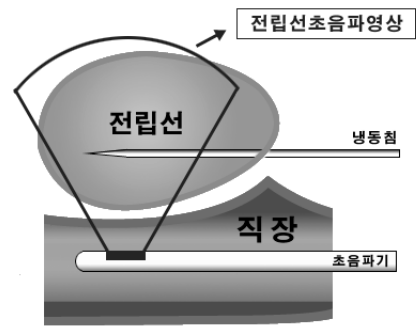


그림 1. 전립선 초음파 영상 표시도

본 연구에서는 이렇게 얻어진 3차원 초음파 영상을 이용하여 만들어진 볼륨을 사용하여 시뮬레이터의 입력 데이터로 하였다.

### 3.2 초음파 영상 시뮬레이션을 위한 기하학적 연구

직장초음파 영상은 두 가지 형식이 있으며 각각 Lateral 모드와 Elevation 모드로 부른다. 그림 2 와 3 은 Lateral 과 Elevation 모드를 도시한 것이다[4].

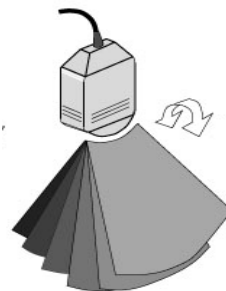


그림 2. Lateral

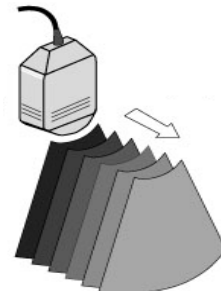


그림 3. Elevation

3차원 볼륨에서 이런 형식의 초음파 영상들을

재구성하기 위하여 이런 단면들과 3차원 볼륨 사이의 기하학적 관계를 연구하였다. 그림 4는 3차원 볼륨과 Lateral, Elevation 단면의 공간 배치를 보여주는 것이다[5].

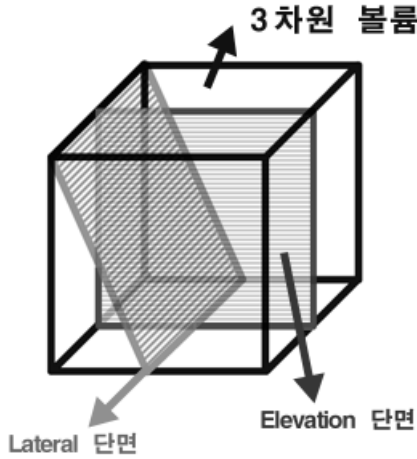


그림 4. 볼륨과 단면의 위치 관계

### 3.3 냉동침에 의한 근육조직의 변형

냉동침에 의한 근육조직의 변형을 관찰하기 위하여 실험을 진행하였다. 그림 5, 6에서 보다싶이 동물 근육으로 실험한 결과 냉동침에 의한 근육의 변형은 후크의 법칙을 기본적으로 만족한다는 것을 알 수 있다

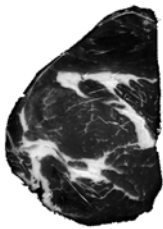


그림 5. 변형전 근육

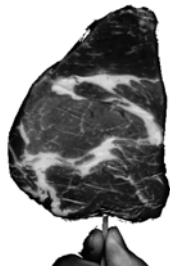


그림 6. 변형된 근육

물리학에서 물체는 수직하중을 받을 때 물체는 그림 7과 같이 포물선 모양으로 변형하게 된다. 이때 물체의 변형은 후크의 법칙을 만족한다[6].

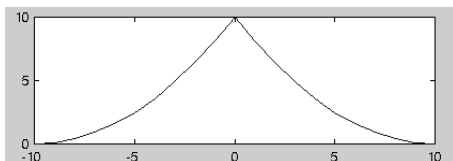


그림 7. 변형 테이블

이때 변형의 테이블의 넓이와 높이는 물체의 단성계수와 가해진 힘의 크기에 정비례하고 변형의 크기는 냉동침과의 거리에 반비례한다[7].

변형 테이블의 X축은 변형이 일어나는 범위, 즉 3차원 볼륨에서 냉동침과의 거리가 X축의 최대값을 초과하지 않은 범위에서 일어난다. 테이블의 Y축은 변형에 의해 원래 위치에서 이동한 위치 값을 보여준다.

3차원 볼륨에서 이 변형 테이블을 볼륨의 한 복셀  $V(x,y,z)$ 의  $x, y, z$  벡터에 각각 적용함으로써 매 복셀의 변형을 표시 할 수 있다.

$V(x',y',z')$ 는 변형된 위치를 표시하고  $f(x,y,z)$ 는 복셀에 가해진 힘을 표시하며  $Length\_from\_probe$ 는 복셀에서 냉동침까지의 거리를 나타낼 때 변형된 위치를 구하는 식은 아래와 같다.

$$V(x',y',z') = V(x,y,z) * f(x,y,z) / Length\_from\_probe;$$

이 식은 직교성에 의하여  $x, y, z$  축으로 나누어 표시할 수 있다.

$$V(x') = V(x) * f(x) / Length\_from\_probe;$$

$$V(y') = V(y) * f(y) / Length\_from\_probe;$$

$$V(z') = V(z) * f(z) / Length\_from\_probe;$$

변형 테이블을 이용하여 이 식을 간단히 하면 계산을 최소화 할 수 있다.

$$V(x')=V(x) * Table[f(x)][Length\_from\_probe];$$

$$V(y')=V(y) * Table[f(y)][Length\_from\_probe];$$

$$V(z')=V(z) * Table[f(z)][Length\_from\_probe];$$

### 3.4 Incremental 방법으로 변형된 단면 영상의 구현

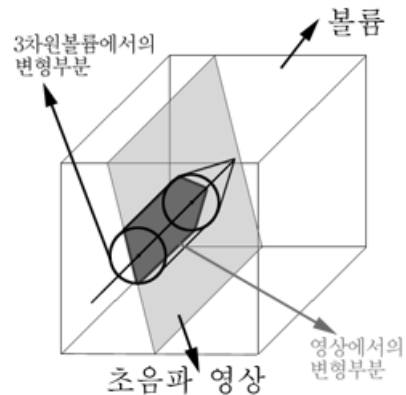


그림 8. 단면 영상에서의 변형 부분 표시도

초음파 영상의 가시화는 그림 8에서와 같이 언제나 볼륨의 한 단면에서 이루어진다. 볼륨 전체

의 변형을 실시간으로 구하는 것은 현실적으로 하드웨어의 제약으로 인하여 실현이 불가능하다. 그러나 초음파 영상의 특성에 의하여 볼륨의 변형을 가시화 하고자 하는 단면에서만 구하면 실시간으로 변형된 영상을 얻을 수 있다.

그러므로 초음파 단면 영상의 매 복셀에서 냉동침까지의 거리를 구하는 작업이 필요하다. 만약 이런 3차원 거리 계산을 매 복셀에서 다 하게 되면 실시간으로 이미지를 얻어 낼수 없게 된다. 이를 위하여 Incremental 한 방법을 사용하였다[8].

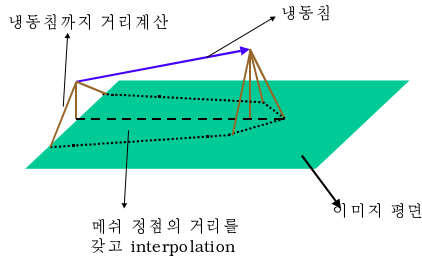


그림 9. Incremental 한 단면 영상의 구현

이는 모든 단면의 픽셀에서 직선까지의 거리를 구하는 것이 아니라 냉동침의 영향을 받는 다각형 메쉬의 정점에서만 거리 계산을 하고 나머지 점들은 이 값들을 interpolation하여 쓴다.

이런 방법들을 통하여 실시간으로 냉동침에 의한 전립선 조직의 초음파영상의 변형을 구현하였다.

#### 4. 냉동에 의한 초음파 영상의 변화

냉동침에 아르곤액체를 주입하면 그 주위의 생체조직은  $-40^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각된다.

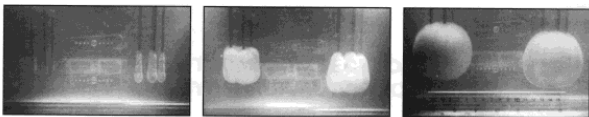


그림 10. 냉동침에 의한 얼음구의 형성과정

이런 급속한 냉각에 의해 냉동침을 에워싸고 그림 10 과 같이 얼음구가 형성된다. 볼륨에서 이런 얼음구를 구현하기 위하여 이에 대한 수학적인 표시가 필요하다. 그림 11 은 냉각 10 분 뒤 냉각침 주변의 온도를 표시한 그래프다.

이 그래프에 의하여 3차원 냉동 테이블을 만들었다.

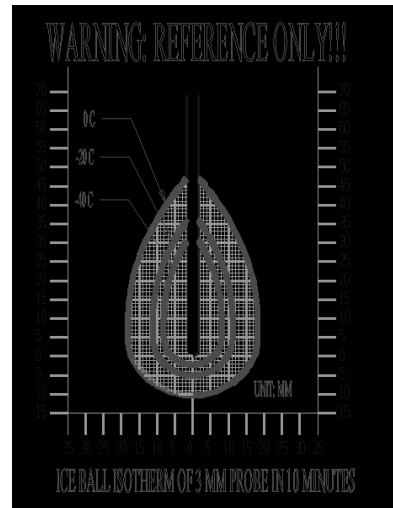


그림 11. 2차원 냉동 테이블

이런 냉동 테이블을 볼륨에 적용하기 위하여서는 3차원 변환이 필요하다. 이 냉동 테이블의 3차원 표시는 그림 와 같다.

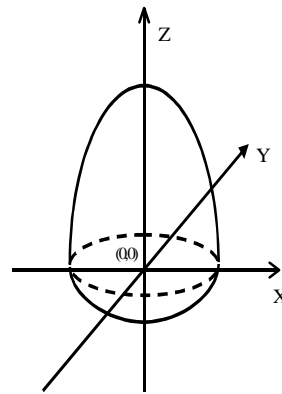


그림 12. 냉동 테이블의 3차원 표시도

시간에 따라 냉동 테이블을 업데이트 하면서 이미지영상에 이 부분을 적용한다.

그림 13은 실제 냉동된 전립선의 초음파 영상이고 그림 14는 이 방법으로 시뮬레이트한 냉동에 의한 초음파 영상이다.

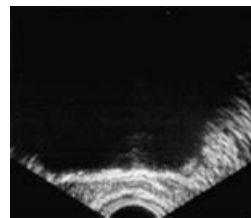


그림 13. 냉동된 전립선의 실제 초음파영상

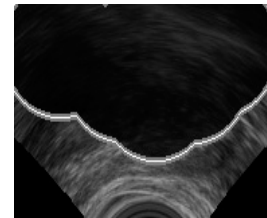


그림 14. 시뮬레이트한 초음파영상

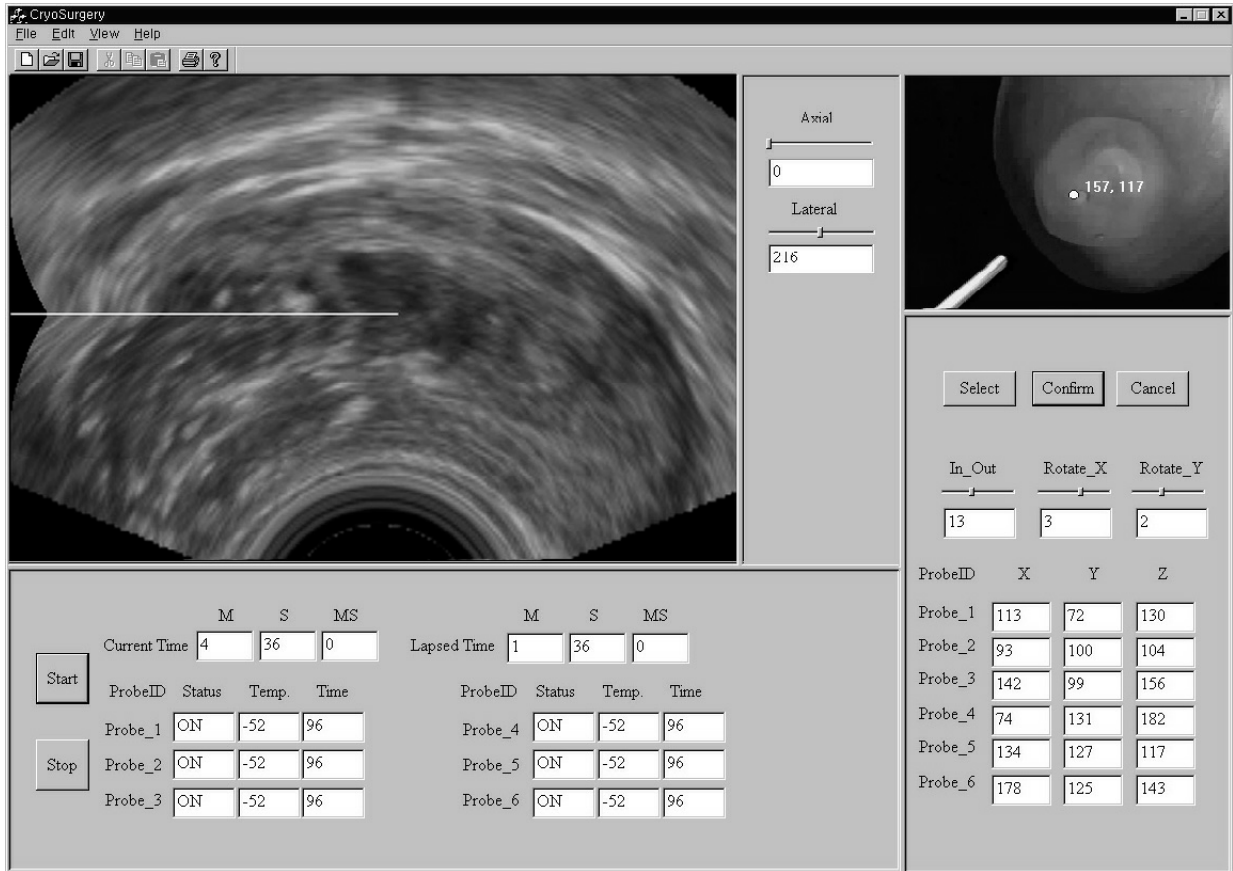


그림 15. 시뮬레이션 시스템의 인터페이스

## 5. 실험 및 결과

본 연구의 시뮬레이션 시스템은 Pentium III 450MHZ 의 PC에서 구현되었으며 개발환경은 Windows98 이고 사용된 언어는 Visual C++ 6.0이며 다른 그래픽 라이브러리를 사용하지 않았다.

본 시스템의 인터페이스는 위 그림 15 와 같다. 제어를 위한 인터페이스로는 변형과 냉동을 제어 하기 위한 컨트롤 다이얼로그와 영상 모드 제어 다이얼로그가 있고 영상 인터페이스로는 초음파 영상 윈도우와 냉동침의 삽입점을 지정하는 윈도우로 나뉘어 진다.

시뮬레이터가 렌더링한 냉동에 의해 변형된 전립선의 초음파 영상은 그림 16, 17, 18, 19 들이다.

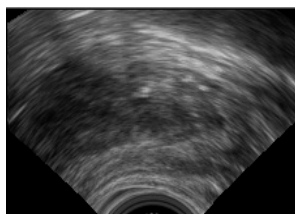


그림 16. 냉동 전



그림 17. 냉동시간 3분

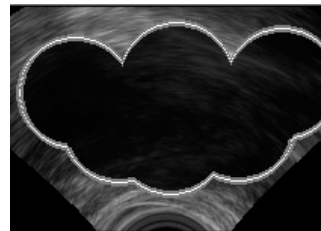


그림 18. 냉동시간 6분

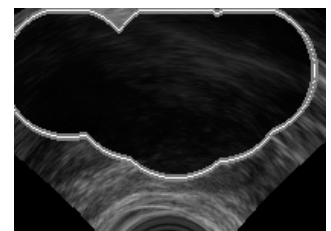


그림 19. 냉동시간 9분

냉동침의 삽입에 의한 변형된 초음파 영상을 렌더링 하는데 걸리는 시간을 비교하였다.그중 Small Volume 의 크기는 225\*245\*254 이고 Big

Table size \ volume	small volume	big volume
"90 * 30" Table	47 ms	57 ms
"120 * 40" Table	64 ms	73 ms
"150 * 50" Table	87 ms	96 ms
"240 * 60" Table	106 ms	122 ms

그림 20. 변형된 영상 렌더링 시간 비교표

Volume 의 크기는 337\* 369 \* 391 이다. 물체의 탄성계수와 힘을 이용한 변형 테이블의 범위를 조절하여 변형의 범위를 변화시키면서 변형된 영상을 렌더링한 시간을 비교하였다. 변형 테이블을 이용하는 기법으로 실시간으로 변형된 영상을 렌더링 하였다. 렌더링 된 영상들은 그림 21, 22, 23, 24 와 같다.

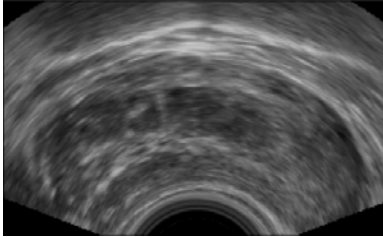


그림 21. 변형전 초음파 영상

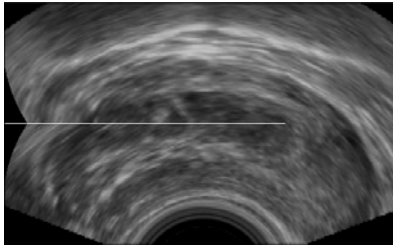


그림 22. 수평 이동에 의해 변형된 영상

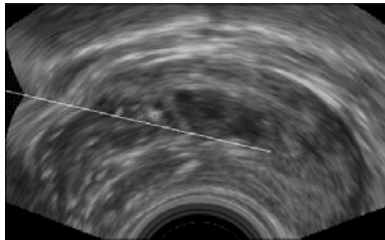


그림 23. 상하 이동에 의해 변형된 영상

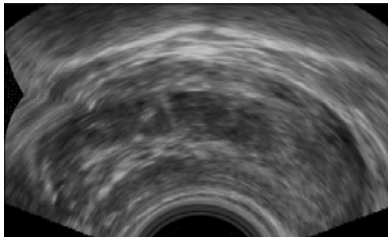


그림 24. 좌 우 이동에 의해 변형된 영상

## 6. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 3차원 직장초음파영상 볼륨에서 냉동침에 의한 영상의 변형을 직선에 의한 볼륨변형기법과 변형 테이블을 사용하여 실시간으로 보

여 주었으며 냉동에 의한 영상의 변화도 3차원 냉동 테이블을 이용하여 실시간으로 시뮬레이트 하였다.

본 연구의 직선에 의한 변형기법은 단면 영상 뿐 만 아니라 전체 볼륨에 적용해 볼 수도 있다. 그리고 냉동 영상에서 필터링을 사용하여 냉동부위의 변두리를 더욱 실제에 가깝게 표현하는 연구도 향후 연구에서 다뤄야 할 부분들이다.

## References

- [1] D. Aiger, D. Cohen-Or "Real-Time Ultrasound Imaging Simulation." Real-Time Imaging, Volume 4(3), 263--274, August 1998.
- [2] Keith Waters, "A Muscle Model for Animating Tree Dimensional Facial Animation" Volume 21, Number 4, SIGGRAPH 1987.
- [3] Thaddeus Beier, Shawn Neery "Feature Based Image Metamorphosis" Volume 26, Number2, SIGGRAPH 1992.
- [4] Thomas R. Nelson and Todd Todd Elvins "Visualization of 3D Ultrasound Data" IEEE Computer Graphics and Applications, 13(6), pp. 50-57, November 1993.
- [5] James.G.Colsher "Interative Three-Dimensional Image Reconstruction from Tomographic Projections" Computer Graphics and Image Processing, 6(6), pp. 513-537, December 1977.
- [6] Stephen Cotin, Herve Delingette, Nicholas Ayache "Real-time Elastic Deformations of Soft Tissue for Surgery Simulation" IEEE TVCG Vol 5, No 1. Jan-Mar 1999.
- [7] D.Cohen-Or, D.Levin, A.Solomovici "Three Dimensional Distance Field Metamorphosis" ACM Transactions of Graphics, Volume 17 (2), April 1998.
- [8] Alan Watt "3D Computer Graphics" Addison-Wesley 1993.