

# 위상 기반 사차원전산화단층촬영과 진폭 기반 사차원전산화단층촬영 영상에서의 위상차 평가

삼성서울병원 방사선종양학과

이소향 · 박수연 · 김종식 · 최병기 · 박희철 · 정상훈

**목 적 :** 본 연구는 위상 기반 방식으로 배열 된 사차원 전산화 단층 촬영 영상(4DCT, 4-dimensional computed tomography)를 이용하여 진폭 기반 방식에서의 재구성 하였을 때의 위상 차이를 분석하였다.

**대상 및 방법 :** 2015년 02월부터 03월 까지 호흡동조 방사선 치료를 받은 간암 환자 10명의 사차원 전산화 단층 촬영 영상을 대상으로 분석 하였다. RPM respiratory gating (RPM 1.7.5, Varian, USA)장치를 이용하여 위상 기반 배열 방식의 호흡주기별 영상을 획득 하였으며, 획득된 호흡 주기별 영상은 치료계획시스템(Pinnacle 9.2, Philips, USA)을 이용하여 호흡주기별 복부의 움직임 값을 측정하였다. 최대 호기(50%)와 최대 흡기(0%)에서의 복부 움직임을 진폭으로 하여 10개 위상의 진폭 기반 호흡위상을 재구성하고, 이를 위상 기반 사차원영상촬영영상의 호흡 위상과 비교 하였다.

**결 과 :** 위상 기반 및 진폭 기반 사차원단층촬영영상으로 재구성한 영상에서의 위상 차이는 최대 30% 호흡위상에서 확인할 수 있었으며, 30% 호흡 위상에서 평균 0.13 cm (최대 0.24 cm)의 위치 차이를 확인할 수 있었고, 동일 측정 점 위치가 가지는 위상차는 30% 위상에서 평균 8.7%(최대 16.5%)의 위상차를 확인하였다. 전체 호흡 구간에서 평균 위치 차이는 0.4 cm, 평균 위상 차이는 13.0%임을 확인하였다.

**결 론 :** 본 연구 결과는 위상 기반 방식으로 배열된 4DCT 영상을 진폭 기반 방식에서의 변환하였을 때 계산 값과 실측값을 분석한 결과 최대 16.5%의 위상차가 발생함을 확인하였다.

**핵심용어 :** 사차원 전산화 단층 촬영 영상, 호흡 움직임, 호흡 동조 방사선 치료, 위상 기반 배열 방식, 진폭 기반 배열 방식

## 서 론

호흡을 이용한 사차원전산화단층촬영영상(4DCT, Four-dimensional computed tomography)은 종양 및 내부 장기의 움직임을 치료계획에 반영하여 정상장기에 전달되는 선량을 줄일 수 있어<sup>1)</sup> 폐암 및 간암 등의 방사선 치료에 널리 사용되고 있다. 치료의 정확성을 높이기 위하여 환자의 호흡 신호를 이용하여 사차원전산화단층촬영영상을 재구성하는 방식에 대한 연구 및 이를 이용한 호흡동조 방사선치료 연구가 이루어져 왔다.<sup>2,3)</sup>

사차원 전산화 단층 촬영 (4DCT, Four-dimensional computed tomography) 영상을 재배열하는 방법에는 외부 표지자로부터 얻어지는 호흡 신호와 동기화 하여 한 호흡

주기의 시간을 등분하여 위상으로 분류하는 시간 분할 위상 기반 배열 방식<sup>4)</sup>과 외부의 특정 지점에서 움직이는 거리를 등분하여 위상으로 재구성하는 진폭 분할 위상 기반 배열 방식<sup>5)</sup>이 있다.

진폭 기반 방식으로 사차원단층촬영영상을 재구성할 경우 영상의 질이 좋아지며 내부 장기의 위치를 상대적으로 잘 파악할 수 있다는 장점<sup>1,2,5)</sup>이 보고되었으나, 실제 환자의 호흡이 불균일할 경우 잘못된 위상에서의 변환을 초래할 수 있다는 한계를 지니고 있다.<sup>6,7)</sup> 상대적으로 진폭 변화에 따른 영향이 적은 시간 분할 위상 기반 방식이 실제 임상에서 널리 사용되고 있다.<sup>6,7)</sup> 하지만, 시간 분할 방식으로 배열한 영상에서도 환자의 호흡 불규칙, 영상 신호 시스템의 분석 방법에 따라 위상 기반 배열 오차가 발생할 수 있다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 시간 분할 위상 기반 방식을 사용하여 10개의 위상으로 배열된 실제 환자의 사차원전산화단층촬영 영상을 이용하여 진폭 분할 위상 기반 방식으로 위상 위치를 분석하였을 때 두 위상 값의 차이를 분석하고자 하였다.

본 논문은 2015년 5월 29일 접수하여 2015년 6월 25일 채택되었음.

책임저자: 정상훈, 삼성서울병원 방사선종양학과  
서울시 강남구 일원동 50번지, 135 71  
E-mail : sanghoon.jung@gmail.com

## 대상 및 방법

2015년 2월부터 3월까지 간암 환자 중 호흡 동조 방사선 치료를 시행한 환자를 대상으로 모의치료 시 획득한 10명의 사차원전산화단층촬영영상을 분석하였다. 모든 환자의 영상은 RPM(Real-Time Position Management, 1.7.5, Varian, USA)과 전산화단층모의치료기(LightSpeed RT 16, GE, USA)로 획득한 사차원 영상을 사용하였으며, 모든 영상은 위상 기반, 즉 시간 분할 위상 기반 방식으로 재구성되었다.

사차원전산화단층촬영 영상을 재구성하는데 위상 기반 재구성 방식과 진폭 기반 재구성 방식으로 분류할 수 있다. 위상 기반 재구성 방식은 시간 분할 위상 방식으로, 한 호흡 주기의 시간을 10등분하여 사차원전산화단층촬영 영상으로 재구성하는 방식이다. 이에 반해 진폭 기반 재구성 방식은 진폭 분할 위상 방식이며, 외부 표지자의 호흡으로 인해 움직이는 거리를 10등분하여 사차원전산화단층촬영 영상으로 재구성하는 방식이다.

호흡 위상 분석을 위해 사용되는 상용 시스템은 대표적으로 RPM과 안자이(Anzai Medical, Japan)가 널리 사용되고 있으며, RPM은 진폭 및 위상 기반 방식 모두 사용가능하며, 호흡을 대표하는 특정지점에 적외선 반사체 블록 (Infrared Reflector Block)의 움직임을 평면적으로 분석하는 방식이다. 안자이(AZ-733VI, Anzai, Japan)의 경우 호흡으로 인한 압력을 감지하는 벨로우즈 벨트 방식과 레이저를 이용하여

특정 위치의 거리 변화를 호흡 움직임으로 제공하는 방식이 있다. 본 연구를 위해 RPM의 위상 기반으로 재구성된 사차원전산화단층촬영 영상을 안자이의 레이저를 이용한 호흡 위상으로 변환하였을 경우로 가정하여 방식에 따른 위상차 연구를 수행하였다.

시간 분할 위상 기반으로 구성된 사차원전산화단층촬영 영상을 이용하여 진폭 분할 위상을 도출하기 위해, 상용치료계획시스템(Pinnacle3 9.2, Philips, The Netherlands)에서 각 환자의 50% 위상 영상에서 외부 표지자 적외선 반사체 블록 (Infrared Reflector Block)의 중앙 지점과 체표가 만나는 지점의 좌우, 상하 (X,Z) 좌표 값을 고정 값으로 지정한 뒤 0%, 30%, 40%, 50%, 60%, 80% 시간 분할 위상 기반 영상에서의 전후 (Y) 좌표 값을 획득하였다.

최대 호기와 최대 흡기에서의 복부 내 적외선 반사체 블록의 영상좌표를 분석하여, 최대값과 최소값의 차이를 호흡으로 인한 진폭이라 정의하였다. 이를 등분하여 호흡 주기별 진폭 분할 위상 배열 방식으로서의 예측 값을 계산하였을 때 실제 위상에서 측정된 진폭 값과 얼마나 오차가 발생하는 지(Figure 1), 50% 위상을 기준으로 값이 대칭을 이루는 지를 확인하고, 예측한 진폭의 변화량을 역으로 위상 변화 오차 값으로 재계산하여(최대흡기의 값을 기준으로 각 위상에서 실제로 움직인 거리의 값을 최대호기의 값으로 나누어 %Phase로 환산) 계산 값과 실제 해당 %p Phase 와 오차로 위상차가 발생하는 지, 각각의 평균값과 표준 편차 값을

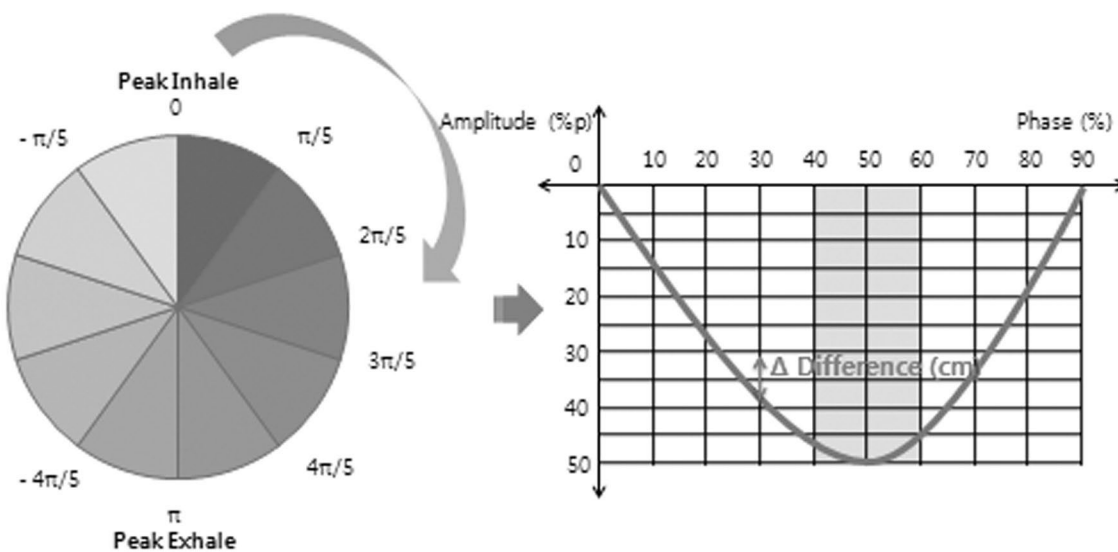


Fig 1. Compare Virtual Amplitude Value to Real Phase Value

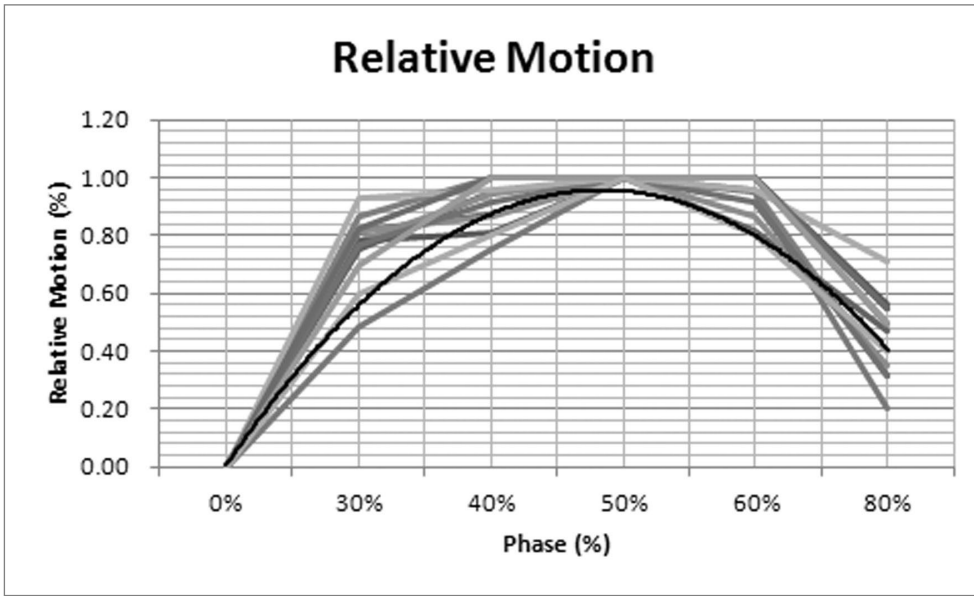


Fig 2. Relative Motion

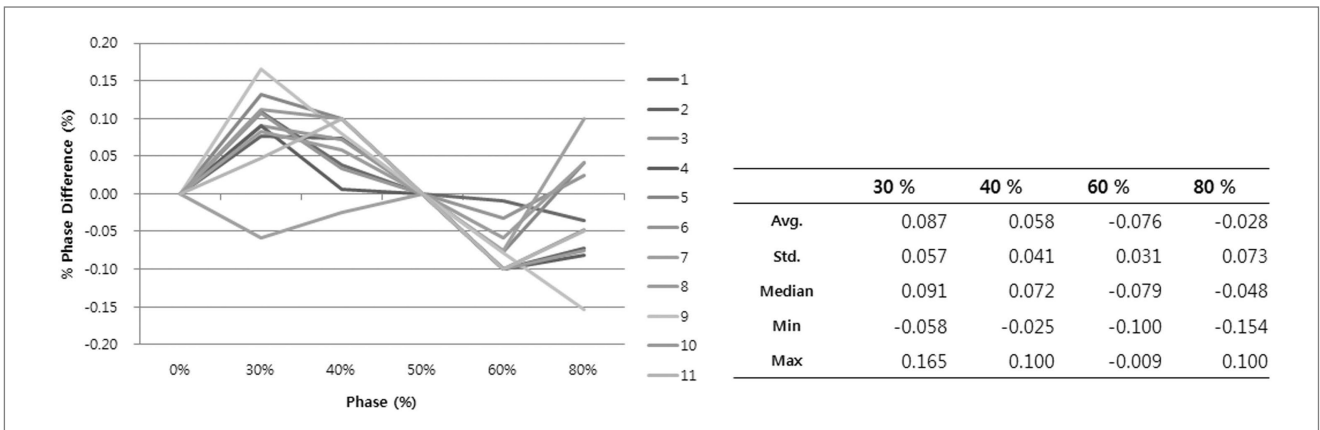


Fig 3. Amplitude %Phase Difference

Table 1. Difference (Unit in centimeter(cm))

#	Phase	0%	30%	40%	50%	60%	80%	RMS
1		0.00	0.23	0.08	0.00	0.02	0.07	0.13
2		0.00	0.12	0.11	0.00	0.15	0.11	0.13
3		0.00	0.20	0.16	0.00	0.22	0.10	0.17
4		0.00	0.17	0.01	0.00	0.19	0.16	0.15
5		0.00	0.17	0.13	0.00	0.10	-0.05	0.12
6		0.00	0.13	0.04	0.00	0.04	-0.03	0.07
7		0.00	-0.07	-0.03	0.00	0.09	-0.12	0.08
8		0.00	0.10	0.07	0.00	0.07	-0.05	0.07
9		0.00	0.24	0.11	0.00	0.11	0.22	0.18
10		0.00	0.11	0.10	0.00	0.10	0.08	0.10
11		0.00	0.04	0.09	0.00	0.09	0.05	0.07

Table 2. %p Phase Difference (Unit in ratio(%))

Phase #	30%	40%	60%	80%
1	10.9	3.8	-0.9	-3.6
2	7.7	7.4	-10.0	-7.3
3	9.0	7.2	-10.0	-4.8
4	9.1	0.6	-10.0	-8.1
5	13.2	10.0	-7.7	4.1
6	10.8	3.3	-3.3	2.5
7	-5.8	-2.5	-7.5	10.0
8	8.3	5.8	-5.8	4.2
9	16.5	7.9	-7.9	-15.4
10	11.2	10.0	-10.0	-7.5
11	4.8	10.0	-10.0	-5.0

로 분석하였다.[Figure 3]

### 결 과

진폭 분할 위상 방식으로 계산한 기댓값과 실제 위치의 오차 값은 30% 위상에서 0.24 cm 로 가장 크게 나타났으며, 평균 오차 역시 30% 위상에서 0.13 cm 로 가장 크게 나타났다. 각 환자의 편차 제곱 값의 평균으로 구한 오차 값의 실효치는 최소 0.7 cm, 최대 0.18 cm, 평균 0.12 cm, 표준편차 0.4 cm 로 나타났다. [Table.1]

위상 기반 및 진폭 기반 사차원단층촬영영상으로 재구성한 영상에서 동일 측정 점 위치가 가지는 위상차는 30% 위상에서 평균 8.7% (최대 16.5%)로 가장 크게 나타났다. 전체 호흡 구간에서 평균 위치 차이는 0.4 cm, 평균 위상 차이는 13.0% 임을 확인 하였다. [Table.2]

### 결론 및 고찰

본 연구의 한계점으로 실제 진폭 배열 시스템을 가정하여 재구성한 위상을 시간 분할 위상과 비교한 것을 생각할 수 있다. 본 연구에서 계산한 진폭 분할 위상의 경우, 특정 지점의 최대 흡기와 최대 호기를 호흡으로 인한 진폭이라 가정하여 계산한 것이므로, 각각의 방식으로 재구성한 사차원 단층촬영영상을 사용한 결과와 차이가 발생할 수 있다.

하지만, 본 연구에서 진폭 분할 위상을 획득하는데 있어, 영상의 특정 지점에서의 거리 변화량을 진폭 값으로 획득하였고, 이는 안자이 시스템에서 고정된 레이저를 통해 어느 특정 포인트까지의 거리 변화량을 진폭 값으로 획득하는 방식에 근거하였다.

또한 RPM 시스템과 전산화 단층 모의 치료기를 연동하여 얻은 사차원전산화단층촬영 영상의 경우 외부 표지자가 위치하는 상하 방향(Z축 방향)의 일정 구간에서 하나의 호흡을 사용하여 사차원 영상을 만드나, 본 연구에서는 특정 위치의 호흡 움직임을 이용하여 구성하였다. 하지만, 본 연구는 호흡 움직임으로 인한 내부 장기의 움직임에 관한 연구가 아니고, 외부 표지자를 이용한 호흡동조 방사선 치료에 영향을 줄 수 있는 두 방식 간 위상 차이를 분석한 연구이기 때문에 본 연구의 분석 방법은 적합한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 동일한 사차원 영상을 이용하여 진폭 및 시간 분할 위상차를 분석하였다. 정상장기에 전달되는 선량을 줄이기 위해 사용되는 호흡연동방사선치료의 방사선조사 호흡위상 구간을 40% ~ 60%를 사용할 경우, 진폭 분할 방식에서의 위상은 평균 42.8~52.4%의 위상구간을 의미한다. 또한, 동일 영상의 위상 기반 20%의 Duty Cycle의 경우 진폭 분할 방식에서, 평균 6.7% (범위, 0 ~ 15.3%)의 Duty Cycle 차이를 발생할 수 있으며, 이는 방사선치료 시 선량 차이를 유발할 수 있어, 호흡동조방사선치료 시 호흡 위상 분할 방식에 대한 정확한 이해를 기반으로 한 임상적용이 필요하다.

## 참고문헌

1. Li R, Lewis JH, Cervino LI, Jiang SB : 4D CT sorting based on patient internal anatomy. *Phys Med Biol.* 2009 Aug 7;54(15):4821-33
2. Lu W, Parikh PJ, Hubenschmidt JP, et al: A comparison between amplitude sorting and phase-angle sorting using external respiratory measurement for 4D CT. *Med Phys.* 2006 Aug;33(8):2964-2974
3. Vedam SS, Keall PJ, Kini VR, et al : Determining parameters for respiration-gated radiotherapy. *Med Phys.* 2001 Oct;28:2139-2146
4. Wink N, Panknin C, Solberg TD : Phase versus amplitude sorting of 4D-CT data. *J Appl Clin Med Phys.* 2006 Winter;7(1):77-85
5. Gianoli C, Riboldi M, Spadea MF, Travaini LL, et al : A multiple points method for 4D CT image sorting. *Med Phys.* 2011 Feb;38(2):656-67
6. Rietzel E, Chen GTY: Improving retrospective sorting of 4D computed tomography data. *Med Phys.* 2006 Feb;33(2):377-379
7. Mutaf YD, Antolak JA, Brinkmann DH: The impact of temporal inaccuracies on 4DCT image quality. *Med Phys.* 2007 May;34(5):1615-1622
8. S Vedam, P J Keall, V R Kini, H Mostafavi, et al : Acquiring a four-dimensional computed tomography dataset using an external respiratory signal. *Phys Med Biol.* 2003 Jan 7;48(1):45-62
9. V?squez AC, Runz A, Echner G, Sroka-Perez G, Karger CP : Comparison of two respiration monitoring systems for 4D imaging with a Siemens CT using a new dynamic breathing phantom. *Phys Med Biol.* 2012 May 7;57(9):N131-43
10. Glide-Hurst CK, Schwenker Smith M, Ajlouni M, Chetty IJ : Evaluation of two synchronized external surrogates for 4D CT sorting. *J Appl Clin Med Phys.* 2013 Nov 4;14(6):4301

---

Abstract

## Evaluation of difference in respiratory phase between amplitude- and phase-based four-dimensional computed tomography

Department of Radiation Oncology, Samsung Medical Center, Seoul, Korea

So Hyang Lee, Soo Yeon Park, Jong Sik Kim, Byung Ki Choi, Hee Chul Park, Sang Hoon Jung

---

**Purpose** : Under the assumption of change to the amplitude based sorting, the study will use four dimensional computed tomography imaging (4DCT) arrayed using the phase based sorting to analyze the respiratory phase difference.

**Materials and Methods** : The study analyzed the 4DCT (4-dimensional computed tomography) images of 10 liver cancer patients that were treated with respiratory gated radiotherapy from 2015 February to March. Using RPM respiratory gating (RPM 1.7.5, Varian, USA) equipment, imaging according to respiratory cycle of phase based sorting was acquired and using a treatment planning system (Pinnacle 9.2, Philips, USA) the acquired imaging according to respiratory cycle was used to measure the abdominal movement value by respiratory cycle. The measuring point was the point where the center point of the Marker Block and the body surface met in the 50% phase image and here the coordinate values Lateral, Vertical, Longitudinal (X, Y, Z) were set as reference points, and on the X, Z plane identical to the reference point, using the identical method the Y axis coordinate value of each 0%, 30%, 40%, 50%, 60%, 80% phase images were acquired to quantitatively measure the variation of distance to the Y axis. The abdominal movement value according to respiration was applied to the theoretical model that the value decreases linearly from maximum inhalation to maximum exhalation to divide the variation of my value to predict as amplitude value by respiratory cycle and conversely the variation in amplitude was recalculated with the phase variation deviation value to analyze.

**Results** : The deviation value between expected value and actual location was the largest in the 30% phase with 0.24 cm, and standard deviation was also the largest in 30% phase with 0.13 cm. The effective value of the deviation value derived from the average of the deviation squared value of each patient appeared as minimum 0.7 cm, maximum 0.18 cm, average 0.12 cm, and standard deviation 0.4 cm. Also by dividing the actual movement distance value with the peak expiration value then converting it into %Phase, the deviation value with actual phase 16.5% in 30% phase, 10.0% and 40% phase, 10.0% and 60% phase, 15.4% and 80% phase, and overall average about 13%, and arraying based on amplitude, phase shift occurred and further it was from peak expiration the chance of deviation occurrence was increasingly measured.

**Conclusion** : Based on the results of the study there were differences between value acquired based on theoretical model and actual value. Therefore in respiratory gated radiotherapy using external surrogates, there needs to be establishment of respiration gated radiation system that avoids the combination of two Sorting methods considering that there will be occurrence of treatment and corresponding clinical differences due to the phase difference that occur due to the Amplitude based Phase Sorting.

---

**Keyword** : 4DCT, Respiratory Motion, Respiratory Gated Radiotherapy, Amplitude based Sorting, Phase Based Sorting