



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

정위적방사선수술에서
다엽콜리메이터 너비의 영향분석

제주대학교 대학원

의 학 과

채 수 민

2012년 1월

정위적방사선수술에서 다엽콜리메이터 너비의 영향분석

지도교수 정 영 배

채 수 민

이 논문을 의학 석사학위 논문으로 제출함

2012년 1월

채수민의 의학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

제주대학교 대학원

2012년 1월

Impact of Multileaf Collimator Leaf Width on Stereotactic Radiosurgery

Soo-Min, Chae
(Supervised by professor Young-Bae, Jeong)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Medicine

2012. 1.

This thesis has been examined and approved.

Date _____

Department of Medicine
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

ABSTRACT

In this study, we investigated the impacts of multileaf collimator (MLC) width difference in 3D conformal radiotherapy (3DCRT) and intensity modulated radiotherapy (IMRT) and volumetric intensity modulated arc therapy (VMAT, RapidArc) plan of stereotactic radiosurgery (SRS) for spinal lesions. 19 spinal lesions were retrospectively planned with 3mm MLC and 5mm MLC by both 3DCRT and IMRT. Planning target volume dose coverage, surrounding normal tissue dose sparing, and treatment efficiency were measured and compared each treatment plan. At the last we compared RapidArc plan with other treatment plans which the best plan of them. 3mm MLC system showed advantage in dose coverage of the planning target volume and surrounding normal tissue dose sparing as compared with 5mm MLC system, but there was no statistically significance. IMRT showed advantage in dose coverage of the planning target volume (Target volume coverage $88.68 \pm 0.61\%$ vs $84.55 \pm 0.88\%$, $p < 0.05$; Conformity index 1.24 ± 0.05 vs 1.45 ± 0.14 , $p < 0.05$) and surrounding normal tissue dose sparing (Dose gradient index 6.98 ± 0.21 vs 7.39 ± 0.25 , $p > 0.05$; CV90 $0.02 \pm 0.01 \text{ cm}^3$ vs $0.51 \pm 0.12 \text{ cm}^3$, $p < 0.05$; CV50 $1.00 \pm 0.20 \text{ cm}^3$ vs $1.61 \pm 0.16 \text{ cm}^3$, $p > 0.05$) as compared with 3DCRT system, in addition to that, there was statistically significance in parts. RapidArc plan efficiency was more effective than 5mm IMRT system, and was similar to 3mm IMRT system. There was a little difference in dose coverage of the planning target volume by MLC leaf width difference, but to warrant the clinical significant of these results further investigation is needed.

Key word: multileaf collimator (MLC) leaf width, stereotactic radiosurgery (SRS), 3D conformal radiotherapy (3DCRT), intensity modulated

radiotherapy (IMRT), conformity index, RapidArc, Volumetric intensity modulated arc therapy (VMAT)

목 차

A b s t r a c t	-----	i
목 차	-----	ii
List of Tables	-----	iii
List of Figures	-----	iv
I. 서 론	-----	1
II. 대상 및 방법	-----	4
1. Target Data		
2. 다엽콜리메이터		
3. 방사선치료계획 수립		
4. 평가지표		
1) 표적선량분포측면		
2) 주변정상조직보호측면		
3) 치료계획의 기계적효율성측면		
5. 통계학적 분석		
III. 결 과	-----	12
1. 표적선량분포측면		
1) Target volume coverage		
2) Conformity index		
2. 주변정상조직보호측면		
1) Dose gradient index		
2) 척수보호측면		
3. 치료계획의 기계적효율성측면		
IV. 고 찰	-----	25
V. 참 고 문 헌	-----	33

List of Tables

Table 1. Treatment site and tumor volume	-----	10
Table 2. Target volume coverage of each treatment group	-----	16
Table 3. Conformity index of each treatment group	-----	19
Table 4. Dose gradient index of each treatment group	-----	22

List of Figures

Figure 1. Beam's eye view of the 3 mm multileaf collimator and the 5 mm multileaf collimator conforming to the lesion -----	11
Figure 2. Target volume coverage of 3 mm multileaf collimator system and 5 mm multileaf collimator system -----	17
Figure 3. Target volume coverage of intensity modulated radiotherapy system and 3D conformal radiotherapy system -----	18
Figure 4. Conformity index of 5 mm multileaf collimator system and 3 mm multileaf collimator system -----	20
Figure 5. Conformity index of 3D conformal radiotherapy system and intensity modulated radiotherapy system -----	21
Figure 6. Dose gradient index of 5 mm multileaf collimator system and 3 mm multileaf collimator system -----	23
Figure 7. Dose gradient index of 3D conformal radiotherapy system and intensity modulated radiotherapy system -----	24

I. 서론

1~5회의 짧은 시술로 고용량의 표적치사량을 조사하는 정위적방사선수술 (Stereotactic radiosurgery, SRS)은 그 정확성과 복잡성에서 일반방사선치료와는 차별화된 치료기법으로 1951 Lars Leksell에 의해 그 개념이 정립된 이후 지금까지 많은 발전을 이룬 치료분야이다 (Khan, 2003; Christer, 1995; Wu등, 1990). 표적에 대해 최적화된 선량일치도를 보이며 동시에 표적외부지역에서 흡수선량이 급격히 감소하여 주변정상조직의 방사선손상을 최소화하는 특징을 보이는 정위적방사선수술은 초기에는 두개강내 병변에 대한 시술이 주로 시행되었으나, 기술의 발달과 함께 폐병변, 간병변, 척추병변 같은 체부로 확장되고 있다. 그 중 척추병변은 두개강내병변과 마찬가지로 호흡 및 내부장기의 운동에 영향을 가장 적게 받는 부위로 정위적방사선수술을 시행하기에 용이하다. 또한 다엽콜리메이터 (Multileaf collimator, MLC)를 사용하여 세기변조방사선치료 (Intensity modulated radiotherapy, IMRT)기법으로 정위적방사선수술을 시행하는 것이 효과적인 것으로 보고 (Fang-Fang등, 2002; Mohamed등, 2011)되어 현재는 많은 기관에서 이를 기반으로 정위적방사선수술을 시행하고 있다. 가장 최근에 등장한 체적세기변조회전조사법 (Volumetric intensity modulated arc therapy, VMAT)은 지금까지 나온 기법들의 장점들만을 취합한 시스템으로 이중 대표적인 것이 래피드아크 (RapidArc[®], Varian Medical Systems, Palo Alto, CA)인데 치료결과가 가장 좋은 것으로 많은 문헌에서 보고되고 있다 (Timothy등, 2001; Stanley등, 2001; Q-Jackie등, 2009; Cedric X Yu, 1995; Fang-Fang등, 2002; Sua등, 2010; Karl Otto, 2008).

한편, 방사선치료시 방사선조사면의 모양을 적절하게 만들어주는 다엽콜리메이터는 방사선을 차폐하는 각각의 leaf의 제어를 컴퓨터로 자동으로하는 시스템으로 15년여동안 조사면 크기, 각 텅스텐 leaf 너비 등에 있어서 지속적인 발전을 보여왔다. 2000년 Thomas Bortfeld등이 6 Mega Voltage 엑스선에서 이론적으로 최적화된 leaf 너비 발표 이후 일반방사선치료에 주로 쓰이는 표준형 다엽콜리메이터 각 leaf 너비는 5~10 mm 범위로, 작은표적을 대상으로 하는 방사선수술에

주로 쓰이는 초소형 다엽콜리메이터의 각 leaf 너비는 1~4 mm 범위로 (James 등, 2009; Mohamed 등, 2011) 인정되었다. 다엽콜리메이터의 각각 leaf 너비가 작을수록 더욱 더 세밀한 모양의 방사선조사면을 만들 수 있기 때문에 지속적인 연구와 발전이 이루어져 왔으며, 이에 따라 다엽콜리메이터 leaf 너비 영향에 대한 다양한 연구결과들이 발표되었다. 초기에 나온 표준형 10 mm 너비의 다엽콜리메이터와 초소형 다엽콜리메이터를 비교한 많은 연구 (Youling 등, 2010; Shichao 등, 2011; Lu 등, 2005; Kubo 등, 1999; Pavel 등, 2005)에서 5 mm보다 작은 초소형 다엽콜리메이터의 결과가 좋았다는 보고들이 있다. 그러나, 10 mm 너비와 5 mm 너비의 다엽콜리메이터간에는 차이가 없다는 보고도 있었다 (Jay Burmeister 등, 2004). 최근의 표준형의 기준이 되고 있는 5 mm 너비의 다엽콜리메이터와 초소형 다엽콜리메이터를 비교한 결과들 또한 많이 보고되어 있다. 이 중 3차원입체조형방사선치료 (3D conformal radiotherapy, 3DCRT)기법을 이용한 정위적방사선수술시 초소형 다엽콜리메이터의 결과 (Jian-Yue 등, 2005; Jacqueline 등, 2003; James 등, 2009; Q-Jackie 등, 2009)가 부분적으로 좋은 것으로 나왔다.

이렇듯 다엽콜리메이터는 너비가 더 작을수록 대체적으로 좋은 치료계획을 만들 수 있는 것으로 나타나고 있다. 그러나 3 mm 너비의 다엽콜리메이터 시스템은 5 mm 너비의 다엽콜리메이터 시스템과 달리 치료기법에 제약이 존재한다. 3 mm 너비의 다엽콜리메이터 시스템은 선형가속기에 탈부착하는 방식이어서 최신의 치료기법인 래피드아크는 수행이 불가능하다. 정위적방사선수술용으로 인정받고 있는 초소형 다엽콜리메이터 기준에 부합하는 3 mm 너비의 다엽콜리메이터를 사용하는 대신 지금까지 사용되는 치료기법 중 가장 좋은 것으로 평가받고 있는 래피드아크 치료기법을 포기해야 하는 실정이므로, 실제 5 mm 너비의 다엽콜리메이터를 이용하는 래피드아크 치료기법을 3 mm 너비의 다엽콜리메이터를 이용하는 3차원입체조형방사선치료 혹은 세기변조방사선치료와 비교하여 실효성을 검증할 필요도 있을 것으로 사료된다. 이에 따라서, 본 연구에서는 척추 병변에 대한 정위적방사선수술을 시행함에 있어서 5 mm 너비와 3 mm 너비의 다엽콜리메이터 시스템을 3차원입체조형방사선치료기법과 세기변조방사선치료기법으로 나누어서 비교분석하여 차이의 유무를 확인하고, 추가로 5 mm 너비 다

엠펙콜리메이터 시스템을 이용한 래피드아크와 비교를 통하여 래피드아크의 효율성을 평가하고자 한다.

II. 대 상 및 방 법

1. Target Data

본 연구는 2011년 4월부터 9월까지 제주한라병원에서 시행된 19 사례의 척추전이병변에 대해 시행된 정위적방사선수술의 치료계획을 분석하였다. 치료부위가 다르면 처방 선량이 달라지고, 주변 장기 에 대한 영향이 달라지게 됨으로써 발생할 수 있는 분석 상의 오류를 줄이기 위해 본 연구는 척추전이병변이라는 단일병변에 국한하여 시행하였다. 19례의 척추전이병변을 원발 종양별로 분류하면, 간암 6례, 신장암 1례, 유방암 7례, 담도암 3례, 폐암 2례이다. 환자의 연령은 50세부터 74세까지, 평균 연령은 60.74 ± 2.10 세 이었고, 표적종양의 체적은 1.07 cm^3 부터 32.85 cm^3 로 평균 $7.48 \pm 1.74 \text{ cm}^3$ 이었으며, 표적종양의 최대길이는 1.57 cm 부터 7.07 cm 로 평균 $3.02 \pm 0.28 \text{ cm}$ 이었다 (Table 1).

2. 다엽콜리메이터

3 mm 와 5 mm 다엽콜리메이터 leaf 너비 에 따른 영향을 비교하기 위해 BrainLAB사의 3 mm 다엽콜리메이터와 Varian사의 5 mm 다엽콜리메이터를 사용하였다 (Figure 1). BrainLAB m3 초소형 다엽콜리메이터는 정위적방사선치료를 위해 선형가속기에 탈부착할 수 있는 부속물로 최대치료 크기는 $9.8 \times 9.8 \text{ cm}^2$ 이며, leaf은 중심부터 3 mm 너비 14 pairs, 4.5 mm 너비 6 pairs, 5.5 mm 너비 6 pairs 로 구성되어 있다. Varian CLINAC iX에 기본 부속품으로 설치되어 있는 120-leaf 다엽콜리메이터는 leaf 구성은 중심부터 5 mm 너비 40 pairs, 그 바깥으로는 10 mm 너비로 구성되어 있다.

3. 방사선치료계획 수립

치료계획용 영상 촬영시 및 방사선수술 시행시 환자는 모두 동일한 자세를 재현하였으며 움직임을 최소화하기 위하여 SBRT Body Pro-Lok™ (CVICO medical solution, USA)라는 전신고정장치를 사용하였다. 각 환자는 치료계획용 CT, MRI 영상을 똑같이 3 mm 두께로 얻었다. 이 영상들은 컴퓨터치료계획용 컴퓨터에서 MRI 바탕으로 표적 윤곽을 그릴수 있도록 image fusion 되었다. 이 후 MRI 바탕으로 표적종양윤곽을 그려서 정했고, 주변정상조직도 마찬가지로 방법으로 윤곽을 그려서 정하였다. 방사선치료계획은 5 mm 와 3 mm 다엽콜리메이터를 비교하기 위하여 각각 3차원입체조형방사선치료 계획과 세기변조방사선치료 계획을 만들어서 비교분석 하였다. 3차원입체조형방사선치료와 세기변조방사선치료는 조건을 최대한으로 유사하게 만들기 위해서, 모두 동일하게 9방향 (0도, 40도, 80도, 120도, 160도, 200도, 240도, 280도, 320도)에서 방사선이 조사되도록 하였다. 처방등선량의 100%가 표적종양의 95% 이상을 감싸도록 치료계획을 만들었으며, 최대선량이 110%가 넘지 않도록 하였다. 이를 위해 3차원입체조형방사선치료는 표적종양체적에 5 mm margin을 두어 방사선조사가 이루어지도록 치료계획을 세웠다. 3 mm 다엽콜리메이터를 이용한 치료계획과 5 mm 다엽콜리메이터를 이용한 치료계획은 모두 동일하게 Varian Elipse IMX version 8.9 (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA)라는 동일한 컴퓨터소프트웨어를 사용하여 Dose Volume Optimizer (DVO) version 8.9를 사용하여 optimization 하였으며 Anisotropic Analytic Algorithm (AAA) version 8.9 방식을 사용하여 volume dose를 계산하였다. 입력하여야 하는 사항들은 동일하게 입력하여 치료계획을 만들고, 이를 분석하였다.

4. 평가지표

각 치료계획의 효율성을 비교하기 위하여 표적종양선량분포에 대한 측면, 주변정상조직 보호에 대한 측면, 치료계획의 기계적 효율성에 대한 측면으로 나누어

평가지표를 정하였다.

1) 표적선량분포측면 (Target coverage criteria)

(1) Target volume coverage

1993년 Radiation Treatment Oncology Group (RTOG) radiosurgery guideline에 target coverage를 다음과 같이 제안하였다.

$$\text{Target coverage} = \frac{\text{Minimum dose in target volume}}{\text{Prescription dose}}$$

Target coverage의 이상적인 값은 1.0 이고, 0.9-1.0 이 protocol에 적절하고, 0.8-0.9는 minor deviation, <0.8은 major deviation으로 평가하였다. 그렇지만, 방사선수술에서는 선량이 표적주변에서 급속히 감소하기 때문에, 주변정상조직의 특성에 따라서 표적의 아주 작은 부분에서 선량이 굉장히 작게 치료계획이 만들어질 수 있으므로, 선량개념이 아닌 체적개념으로 수정이 필요하였다. 많은 문헌 (V.Sankaranarayanan등, 2003; Nicoletta J Lomax등, 2003)에서도 이러한 이유로 체적개념을 사용하고 있으므로, 이에 본 연구에서도 다음과 같이 체적개념의 Target volume coverage (TVC)를 사용하였다.

$$\text{TVC} = \frac{\text{Volume within the target receiving at least the prescription isodose}}{\text{Target volume}} \times 100\%$$

Target volume coverage의 이상적인 값은 100%이지만, 본 연구에서는 최대한 80% 이상이 되도록 치료계획을 수립하였다.

(2) Conformity index

Conformity index는 표적체적에 대한 방사선량 일치도를 정량화하여 경쟁하는 방사선치료계획 비교시, 치료계획 평가시, 임상부작용 평가시에 사용된다. 1993년 Radiation Therapy Oncology Group (RTOG)은 정위적방사선수술의 질적 보증과

치료계획평가 지침을 protocol 90-05 & 93-05에서 제시하였다 (Edward등, 2000; Linda등, 2011; Edward등, 1996; Luis등, 2004). 여기서 RTOG는 Conformity index로서 PITV를 다음과 같이 제안하였다 (Edward등, 2000; David등, 2004; Anees등, 2010).

$$PITV = \frac{\text{Prescription isodose volume}}{\text{Target volume}}$$

PITV의 가장 이상적인 값은 1로 이는 표적체적과 처방등선량체적이 일치한다는 뜻이다. PITV 값이 1보다 커질수록, 표적체적보다 피폭되는 체적이 크다는 뜻으로, 이는 정상조직에 방사선이 조사된다는 뜻이며, PITV 값이 1보다 작으면 표적체적 부분에 충분한 방사선량을 받지 못 한다는 것을 의미한다. RTOG 지침에 따르면, PITV가 1과 2 사이에 있을 때, 그 방사선수술 치료계획의 선량일치도는 수용할 만한 것으로 되어 있다 (Anees등, 2010). 이후 RTOG의 Conformity index, 즉 PITV 비율은 서로 다른 방사선수술 체계에서 치료계획의 일치도(conformity)를 비교하기 위해 가장 많이 사용되는 Conformity index이었다 (Edward등, 2000; David등, 2004; Anees등, 2010). 이후 RTOG의 Conformity index 지표는 수정 보완되어 현재는 Paddick(2000)에 의해 제안되고 Nakamura등(2001)에 의해 확립된 new conformity index를 많이 사용하고 있다.

$$^*CI = \frac{\frac{^{\dagger}PIV}{^{\ddagger}PTV_{PIS}}}{\frac{PTV_{PIS}}{^{\S}TV}} = \frac{PIV \times TV}{PTV_{PIS} \times PTV_{PIS}}$$

^{*}CI ; Conformity index

[†]PIV ; Prescription isodose volume

[‡]PTV_{PIS} ; Planning target volume encompassed within the prescription isodose surface

[§]TV ; Target volume

Paddick과 Nakamura는 각각 Conformity index가 정위적방사선수술에서 치료계획의 효율을 비교하는 데, 가장 적절하다고 밝힌 바 있다. 이에 본 연구에서도

Conformity index는 Paddick과 Nakamura의 정의를 사용하였다.

2) 주변정상조직보호측면 (Normal tissue sparing criteria)

주변정상조직 보호에 대한 측면에서 우선 생각해 보아야 할 것이 종양에서 주변정상조직으로 갈수록 흡수되는 방사선량이 얼마나 급격한 비율로 줄어드는가를 확인하고, 이후 위험성이 높은 주변장기에 각각 흡수되는 방사선량을 절대값으로 나누어서 분석하였다.

(1) Dose gradient index

1993년 RTOG가 제안한 세가지 기준에는 종양 외부에서의 선량감소라는 중요한 사항에 관한 언급이 없었다. 이에 Paddick등(2006)은 같은 Conformity index 값을 보이는 치료계획을 비교하기 위하여 처방등선량체적에 대해 처방등선량의 50%를 받는 체적의 비율을 보는 Dose gradient index (GI)를 제안하였다.

$$GI = \frac{{}^*V_{50}}{{}^\dagger PTV_{PIS}}$$

^{*}V₅₀ ; Volume receiving at least 50% dose of the prescription dose

[†]PTV_{PIS} ; Planning target volume encompassed within the prescription isodose surface

GI 값은 표적밖에서 급격한 선량의 감소를 보여준다 할 수 있겠다. 본 연구에서도 Paddick의 GI 를 사용하였다.

(2) 척수보호측면

척추병변을 방사선 수술함에 있어서 가장 위험성이 높은 주변장기는 척수이므로 척수에 대한 방사선 노출량의 지표로 CV90 (Spinal cord volume receiving at least 90% dose of the prescription dose), CV50 (Spinal cord volume receiving at least 50% dose of the prescription dose)으로 정하여 비교분석하였다 (Karl Otto, 2008).

3) 치료계획의 기계적효율성측면 (Treatment Efficiency)

치료계획의 기계적 효율성 측면은 기계출력방사선량 (Monitor Unit, MU)을 각각 비교하였다.

5. 통계학적 분석

실험 군 사이의 통계적 유의성 검증은 SPSS ver 18.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 사용하여 독립표본 T 검정 및 분산분석을 시행하였으며, 대표값은 mean±standard error로 표시하였다.

Table 1. Treatment site and tumor volume

Patient	Sex	Age	Tumor origin	Site	Volume (cm ³)	Maximum size (cm)
문OO	F	50	Breast	T-spine	1.07	1.63
문OO	F	50	Breast	C-spine	2.02	1.57
고OO	M	57	Liver	T-spine	2.22	1.84
고OO	M	57	Liver	T-spine	2.84	2.09
김OO	F	74	Breast	L-spine	2.98	2.61
고OO	M	57	Liver	T-spine	3.34	2.38
김OO	F	74	Breast	C-spine	3.34	2.57
김OO	F	74	Breast	T-spine	3.99	2.34
김OO	F	57	Bile duct	T-spine	4.68	3.31
김OO	F	74	Breast	C-spine	5.12	3.82
강OO	M	52	Lung	L-spine	5.99	2.39
김OO	F	57	Bile duct	T-spine	6.42	3.40
강OO	M	54	Liver	T-spine	7.12	3.16
고OO	M	57	Liver	T-spine	7.75	3.15
고OO	M	57	Liver	T-spine	8.38	3.31
김OO	F	74	Breast	L-spine	10.51	3.69
전OO	M	70	Kidney	L-spine	11.36	3.60
강OO	M	52	Lung	L-spine	20.16	3.46
김OO	F	57	Bile duct	T-spine	32.85	7.07

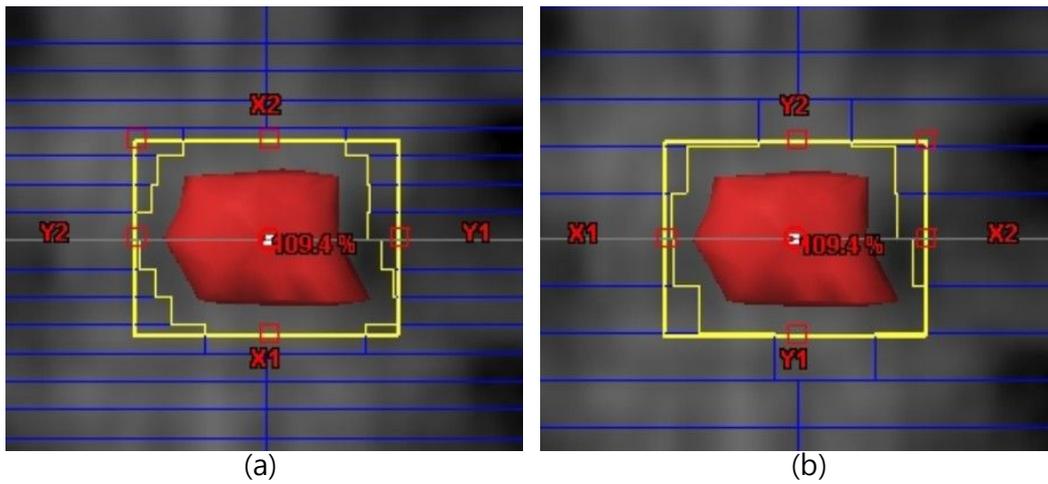


Figure 1. Beam's eye view (BEV) of (a) the 3 mm multileaf collimator (MLC) system and (b) the 5 mm multileaf collimator (MLC) system conforming (Yellow) to the target lesion (Red).

Ⅲ. 결 과

첫 번째는 다엽콜리메이터 크기에 따라 5 mm 군과 3 mm 군으로 나누어 비교분석하였고, 각각 3차원입체조형방사선치료군과 세기변조방사선치료군을 포함하였다. 두 번째는 방사선치료 방식에 따라 3차원입체조형방사선치료군과 세기변조방사선치료군으로 나누어 비교분석하였고, 각각 3 mm 와 5 mm 군을 포함하였다. 마지막으로 5 mm 다엽콜리메이터 시스템을 사용하는 래피드아크치료군을 세기변조방사선치료군과 비교분석 하였다.

1. 표적선량분포측면 (Target coverage criteria)

1) Target volume coverage

Target volume coverage 전체는 71.78~99.06%로 평균 $88.11 \pm 0.60\%$ 이었다 (Table 2). 5 mm 다엽콜리메이터 치료군은 71.78%에서 97.28%까지로 평균 $85.81 \pm 0.85\%$ 이고, 3 mm 다엽콜리메이터 치료군은 76.22%에서 97.28%까지로 평균 $87.42 \pm 0.79\%$ 로 나타났다. 5 mm 다엽콜리메이터에서 3 mm 다엽콜리메이터로 바꿀 경우 평균적으로 1.88% Target volume coverage가 향상되는 경향을 보이나 통계학적 유의성은 나타나지 않았다 ($p=0.822$) (Figure 2). 치료군을 3차원입체조형방사선치료군과 세기변조방사선치료군으로 나누어서 다시 분석해 보면 3차원입체조형방사선치료군은 71.78%에서 92.57%까지 평균 $84.55 \pm 0.88\%$ 의 값을 보였으며, 세기변조방사선치료군은 81.52%에서 97.28%까지 평균 $88.68 \pm 0.61\%$ 값을 보였다. 치료기법을 3차원입체조형방사선치료에서 세기변조방사선치료로 바꿀 경우 평균적으로 4.88% Target volume coverage가 향상되는 것으로 나타났고 이는 통계적인 유의성이 있는 것으로 나타났다 ($p=0.005$) (Figure 3). 래피드아크치료군과 세기변조방사선치료군을 비교하면 래피드아크치료군은 82.13%에서 99.06%로 평균 $94.06 \pm 1.06\%$ 의 값을 보였으며, 5 mm 세기변조방사선치료군은 평균 $87.59 \pm 0.87\%$, 3 mm 세기변조방사선치료군은 평균 $89.77 \pm 0.81\%$ 값을 보여서 래피드아크치료군이 5 mm 세기변조방사선치료군과 3

mm 세기변조방사선치료군보다 각각 13.10%, 10.35% 향상된 Targer volume coverage 값을 보였으며 통계적으로도 유의성을 보였다 ($p=0.000$, $p=0.042$).

2) Conformity index

Conformity index 전체는 1.12~1.74로 평균 1.33 ± 0.02 값을 보였다 (Table 3). 5 mm 다엽콜리메이터 치료군은 1.17에서 1.74까지로 평균 1.36 ± 0.02 이고, 3 mm 다엽콜리메이터 치료군은 1.16에서 1.73까지로 평균 1.34 ± 0.03 으로 나타났다. 5 mm 다엽콜리메이터에서 3 mm 다엽콜리메이터로 바꿀 경우 평균적으로 1.47% Conformity index 값이 향상되는 경향을 보이거나 통계적 유의성이 나타나지 않았다 ($p=0.719$) (Figure 4). 치료군을 3차원입체조형방사선치료군과 세기변조방사선치료군으로 나누어서 다시 분석해 보면 3차원입체조형방사선치료군은 1.21에서 1.74까지 평균 1.45 ± 0.14 의 값을 보였으며, 세기변조방사선치료군은 1.16에서 1.38까지 평균 1.24 ± 0.05 의 값을 보였다. 치료기법을 3차원입체조형방사선치료에서 세기변조방사선치료로 바꿀 경우 평균적으로 14.48% Conformity index 값이 향상되는 것으로 나타났고 이는 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다 ($p=0.000$) (Figure 5). 래피드아크치료군과 세기변조방사선치료군을 비교하면 래피드아크군은 1.12에서 1.36으로 평균 1.23 ± 0.02 의 값을 보였으며, 5 mm 세기변조방사선치료군은 평균 1.25 ± 0.01 , 3 mm 세기변조방사선치료군은 평균 1.24 ± 0.01 값을 보여서 래피드아크치료군이 5 mm 세기변조방사선치료군과 3 mm 세기변조방사선치료군보다 각각 1.60%, 0.81% 향상된 경향의 Conformity index 값을 보였으며 통계적으로는 유의성을 보이지 않았다 ($p=0.977$, $p=0.997$).

2. 주변정상조직보호측면 (Normal tissue sparing criteria)

1) Dose gradient index

Dose gradient index 전체는 4.39~10.96으로 평균 6.97 ± 0.15 값을 보였다 (Table 4). 5 mm 다엽콜리메이터 치료군은 5.10에서 10.96까지로 평균 7.34 ± 0.23 이고, 3 mm 다엽콜리메이터 치료군은 5.16에서 10.75까지로 평균 7.03 ± 0.22 으

로 나타났다. 5 mm 다엽콜리메이터에서 3 mm 다엽콜리메이터로 바꿀 경우 평균적으로 4.22% Dose gradient index 값이 향상되는 경향을 보이거나 통계적 유의성까지는 나타나지 않았다 ($p=0.822$) (Figure 6). 치료군을 3차원입체조형방사선 치료군과 세기변조방사선치료군으로 나누어서 다시 분석해 보면 3차원입체조형 방사선치료군은 5.10에서 10.96까지 평균 7.39 ± 0.25 의 값을 보였으며, 세기변조 방사선치료군은 5.41에서 10.76까지 평균 6.98 ± 0.21 의 값을 보였다. 치료기법을 3차원입체조형방사선치료에서 세기변조방사선치료로 바꿀 경우 평균적으로 5.55% Dose gradient index 값이 향상되는 경향을 보였지만, 통계적인 유의성은 없는 것으로 나타났다 ($p=0.156$) (Figure 7). 래피드아크치료군과 세기변조방사선 치료군을 비교하면 래피드아크치료군은 4.39에서 8.01로 평균 6.09 ± 0.24 의 값을 보였으며, 5 mm 세기변조방사선치료군은 평균 7.17 ± 0.30 , 3 mm 세기변조방사선치료군은 평균 6.79 ± 0.29 값을 보여서 래피드아크치료군이 5 mm 세기변조방사선치료군과 3 mm 세기변조방사선치료군보다 각각 15.06%, 10.31% 향상된 경향의 Dose gradient index 값을 보였으나 통계적으로는 유의성을 보이지 않았다 ($p=0.106$, $p=0.504$).

2) 척수보호측면

CV90 전체값은 0 cm^3 부터 3.83 cm^3 으로 평균값은 $0.21\pm 0.05\text{ cm}^3$ 이었다. CV90 값은 5 mm 다엽콜리메이터 치료군은 평균 $0.33\pm 0.12\text{ cm}^3$, 3 mm 다엽콜리메이터 치료군은 평균 $0.19\pm 0.06\text{ cm}^3$ 으로 3 mm 다엽콜리메이터 치료군에서 평균적으로 42.42% 향상되는 경향을 분명히 보였지만 통계적 유의성은 부족했다 ($p=0.055$). CV90 값은 3차원입체조형방사선치료군은 평균 $0.51\pm 0.12\text{ cm}^3$, 세기변조방사선치료군은 평균 $0.02\pm 0.01\text{ cm}^3$ 으로 세기변조방사선치료군에서 평균적으로 96.08% 향상되는 것으로 나타났으며 통계적 유의성 또한 매우 높았다 ($p=0.000$). CV90 값은 래피드아크치료군에서 평균 $0.18\pm 0.02\text{ cm}^3$, 5 mm 세기변조방사선치료군에서 $0.29\pm 0.01\text{ cm}^3$, 3 mm 세기변조방사선치료군에서 $0.11\pm 0.012\text{ cm}^3$ 으로 래피드아크치료군이 5 mm 세기변조방사선치료군보다는 평균적으로 37% 향상, 3 mm 세기변조방사선치료군보다는 평균적으로 63% 하향되는 경향을 보였으나 모두 각각 통계적 유의성은 없었다 ($p=1.000$, $p=1.000$).

CV50 전체값은 0 cm³부터 6.85 cm³으로 평균값은 1.23±0.12 cm³ 이었다. CV50 값은 5 mm 다엽콜리메이터 치료군은 평균 1.34±0.16 cm³, 3 mm 다엽콜리메이터 치료군은 평균 1.27±0.21 cm³로 3 mm 다엽콜리메이터 치료군에서 평균적으로 5.22% 향상되는 경향을 보였지만 통계적 유의성은 없었다 (p=0.382). CV50 값은 3차원입체조형방사선치료군은 평균 1.61±0.16 cm³, 세기변조방사선치료군은 평균 1.00±0.20 cm³으로 세기변조방사선치료군에서 평균적으로 37.89% 향상되는 경향을 보였지만 통계적 유의성은 없었다 (p=0.617). CV50 값은 래피드아크치료군에서 평균 0.92±0.26 cm³, 5 mm 세기변조방사선치료군에서 1.05±0.19 cm³, 3 mm 세기변조방사선치료군에서 0.95±0.35 cm³으로 래피드아크치료군이 5 mm 세기변조방사선치료군과 3 mm 세기변조방사선치료군보다 각각 12.38%, 3.16% 향상되는 경향을 보였으나, 통계적 유의성은 없었다 (p=0.997, p=1.000).

3. 치료계획의 기계적효율성측면 (Treatment Efficiency)

MU 전체값은 148 MU 부터 530 MU으로 평균값은 282.03±10.02 MU 이었다. MU 값은 5 mm 다엽콜리메이터 치료군은 평균 249.53±12.46 MU, 3 mm 다엽콜리메이터 치료군은 평균 299.50±19.31 MU 으로 3 mm 다엽콜리메이터 치료군에서 평균적으로 20.03% 더 많이 필요한 것으로 나타났고 통계적 유의성도 있었다 (p=0.033). MU 값은 3차원입체조형방사선치료군은 평균 195.66±7.10 MU, 세기변조방사선치료군은 평균 353.36±13.24 MU으로 세기변조방사선치료군에서 평균적으로 80.60% 더 많이 소비되는 것으로 나타났다 (p=0.000). MU 값은 래피드아크치료군에서 평균 312.11±15.85 MU, 5 mm 세기변조방사선치료군에서 307.00±14.24 MU, 3 mm 세기변조방사선치료군에서 399.74±16.70 MU으로 래피드아크치료군이 5 mm 세기변조방사선치료군보다 1.66% 약간 늘어난 경향이 있고 (p=0.999), 3 mm 세기변조방사선치료군보다 21.92% 소비가 적은 것으로 나타났다 (p=0.000).

Table 2. Target volume coverage of each treatment group

Patient	Volume (cm ³)	*3DCRT		†IMRT		RapidArc
		5 mm	3 mm	5 mm	3 mm	5 mm
1	1.07	92.57	92.11	86.72	89.29	95.80
2	2.02	71.78	81.68	83.37	86.48	90.10
3	2.22	87.70	87.39	87.74	89.69	95.36
4	2.84	84.28	90.46	92.36	89.80	96.65
5	2.98	87.56	88.04	97.04	97.28	94.93
6	3.34	88.86	88.75	87.75	90.46	94.57
7	3.34	86.83	88.12	88.01	88.09	99.06
8	3.99	87.59	79.85	84.59	87.00	97.63
9	4.68	89.64	89.85	89.38	96.43	93.12
10	5.12	78.14	78.64	85.24	89.74	98.96
11	5.99	73.18	76.22	81.52	85.00	93.79
12	6.42	80.95	81.96	93.22	93.70	92.19
13	7.12	81.78	81.60	89.84	89.33	96.49
14	7.75	76.03	77.45	88.44	91.78	98.31
15	8.38	87.55	86.83	87.63	90.79	82.13
16	10.51	88.47	89.11	86.77	88.86	97.88
17	11.36	83.49	83.42	84.23	84.66	96.39
18	20.16	80.49	83.39	82.87	85.05	85.38
19	32.85	89.77	91.46	87.49	92.27	88.49
평균		84.03 ±1.36	85.07 ±1.14	87.59 ±0.87	89.77 ±0.81	94.05 ±1.06

*3DCRT ; 3D conformal radiotherapy

†IMRT : intensity modulated radiotherapy

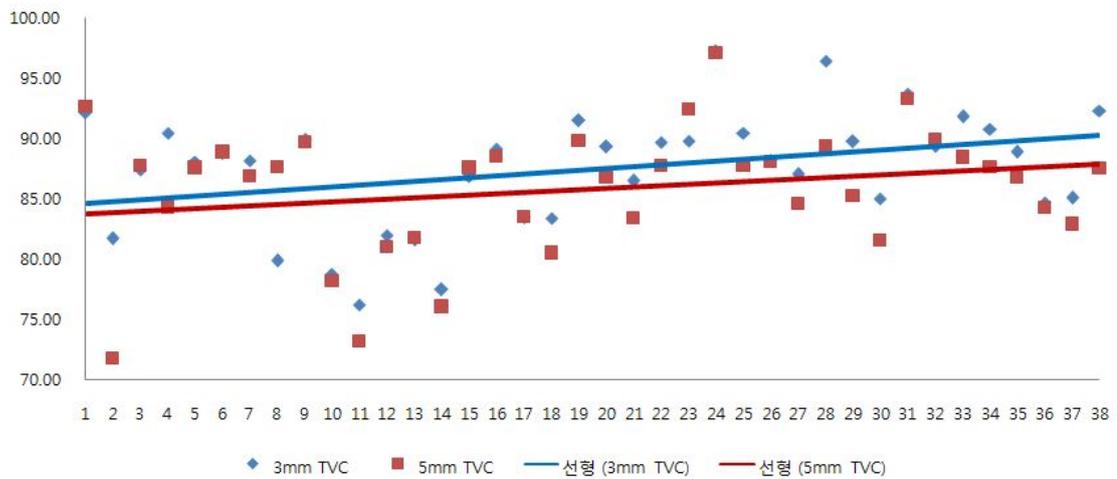


Figure 2. Target volume coverage (TVC) of 3 mm multileaf collimator (MLC) system (Blue) and 5 mm multileaf collimator (MLC) system (Red). The ideal TVC value is 100%. The TVC value of 3mm MLC system is closer than the TVC value of 5mm MLC system to 100%, but there is no statistical significance between the value of 5mm MLC system and 3mm MLC system ($p=0.822$).

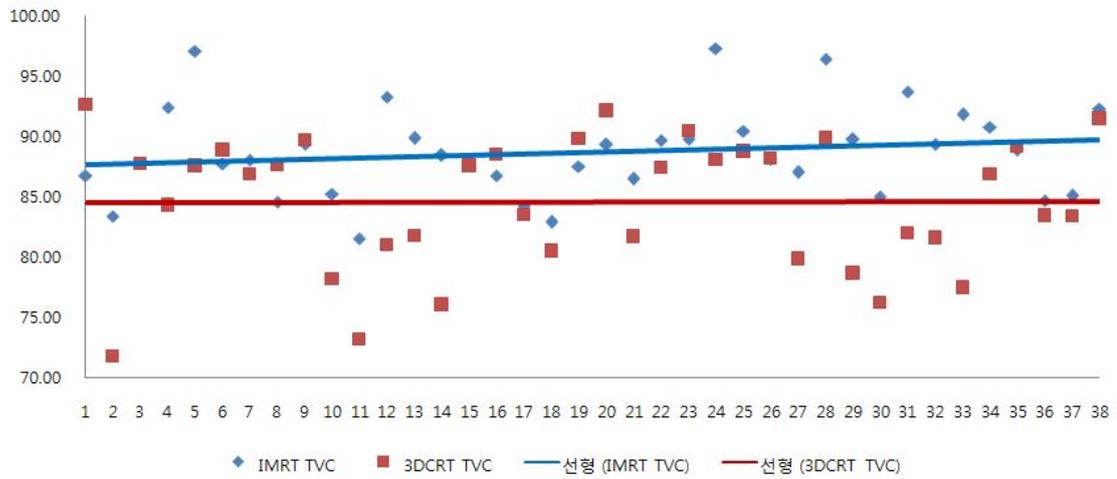


Figure 3. Target volume coverage (TVC) of intensity modulated radiotherapy (IMRT) system (Blue) and 3D conformal radiotherapy (3DCRT) system (Red). The ideal TVC value is 100%. The TVC value of IMRT system is closer than the TVC value of 3DCRT system to 100%, and there is statistical significance between the value of IMRT system and 3DCRT system ($p=0.005$).

Table 3. Conformity index of each treatment group

Patient	Volume (cm ³)	*3DCRT		†IMRT		RapidArc
		5 mm	3 mm	5 mm	3 mm	5 mm
1	1.07	1.47	1.30	1.27	1.28	1.28
2	2.02	1.49	1.45	1.32	1.30	1.36
3	2.22	1.67	1.62	1.33	1.38	1.28
4	2.84	1.45	1.32	1.21	1.25	1.14
5	2.98	1.35	1.37	1.17	1.16	1.14
6	3.34	1.50	1.54	1.28	1.26	1.27
7	3.34	1.51	1.44	1.25	1.30	1.31
8	3.99	1.36	1.36	1.31	1.33	1.26
9	4.68	1.64	1.66	1.21	1.21	1.21
10	5.12	1.64	1.53	1.26	1.24	1.34
11	5.99	1.57	1.56	1.32	1.27	1.17
12	6.42	1.74	1.73	1.20	1.20	1.20
13	7.12	1.37	1.37	1.17	1.17	1.24
14	7.75	1.61	1.61	1.21	1.20	1.17
15	8.38	1.37	1.36	1.22	1.19	1.29
16	10.51	1.21	1.21	1.21	1.16	1.12
17	11.36	1.30	1.29	1.29	1.24	1.15
18	20.16	1.35	1.32	1.23	1.21	1.20
19	32.85	1.40	1.38	1.24	1.20	1.20
평균		1.47 ±0.03	1.44 ±0.03	1.25 ±0.01	1.24 ±0.01	1.23 ±0.02

*3DCRT ; 3D conformal radiotherapy

†IMRT : intensity modulated radiotherapy

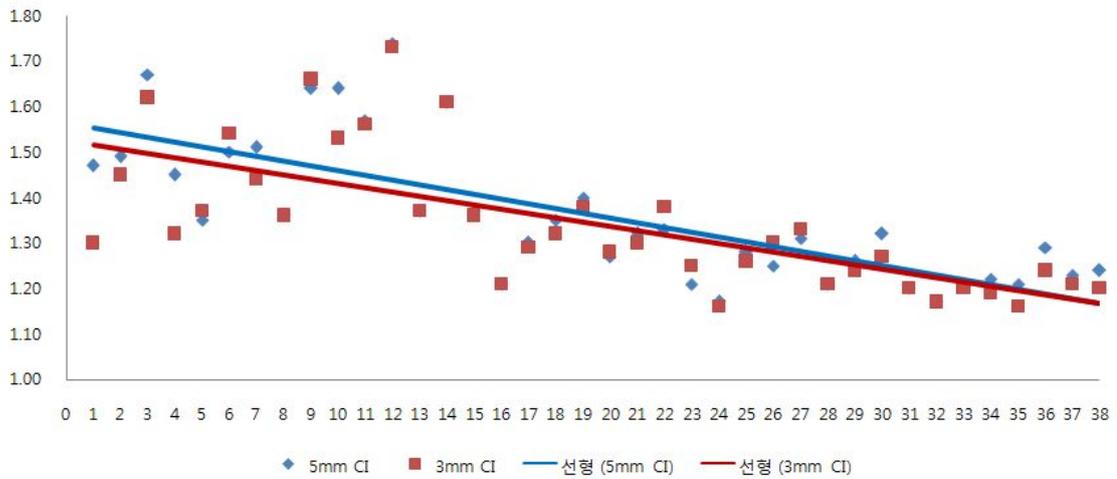


Figure 4. Conformity index (CI) of 5 mm multileaf collimator (MLC) system (Blue) and 3 mm multileaf collimator (MLC) system (Red). The ideal CI value is 1. The CI value of 3mm MLC system is closer than the CI value of 5mm MLC system to 1, but there is no statistical significance between the value of 5mm MLC system and 3mm MLC system ($p=0.719$).

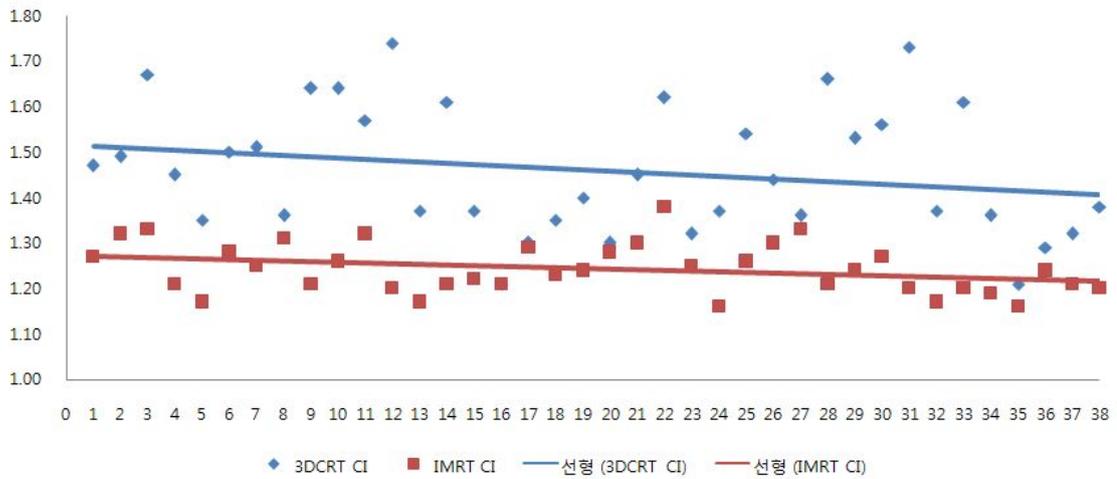


Figure 5. Conformity index (CI) of 3D conformal radiotherapy (3DCRT) system (Blue) and intensity modulated radiotherapy (IMRT) system (Red). The ideal CI value is 1. The CI value of IMRT system is closer than the CI value of 3DCRT system to 1, and there is statistical significance between the value of IMRT system and 3DCRT system ($p=0.00$).

Table 4. Dose gradient index of each treatment group

Patient	Volume (cm ³)	*3DCRT		†IMRT		RapidArc
		5 mm	3 mm	5 mm	3 mm	5 mm
1	1.07	9.50	9.64	9.95	10.76	8.01
2	2.02	9.34	8.47	8.65	7.85	6.80
3	2.22	6.68	7.57	8.35	7.10	6.96
4	2.84	10.96	9.32	6.34	6.88	5.46
5	2.98	7.65	6.94	8.17	7.85	6.69
6	3.34	7.45	6.33	7.95	7.60	6.81
7	3.34	7.42	7.64	7.46	6.98	5.35
8	3.99	8.59	10.18	7.90	6.86	6.36
9	4.68	8.56	8.57	7.97	6.50	7.29
10	5.12	7.89	8.03	8.25	7.10	5.27
11	5.99	9.70	8.10	7.80	6.11	7.83
12	6.42	7.46	6.13	6.61	6.20	6.22
13	7.12	6.38	6.29	6.53	7.32	5.20
14	7.75	6.37	6.20	6.12	5.72	4.56
15	8.38	5.77	5.37	5.41	5.41	5.80
16	10.51	5.72	6.46	5.54	5.52	4.39
17	11.36	5.80	5.89	5.44	6.07	4.74
18	20.16	6.21	5.97	5.78	5.58	6.29
19	32.85	5.10	5.16	6.05	5.54	5.62
평균		7.50 ±0.37	7.28 ±0.34	7.17 ±0.30	6.79 ±1.25	6.09 ±0.24

*3DCRT ; 3D conformal radiotherapy

†IMRT : intensity modulated radiotherapy

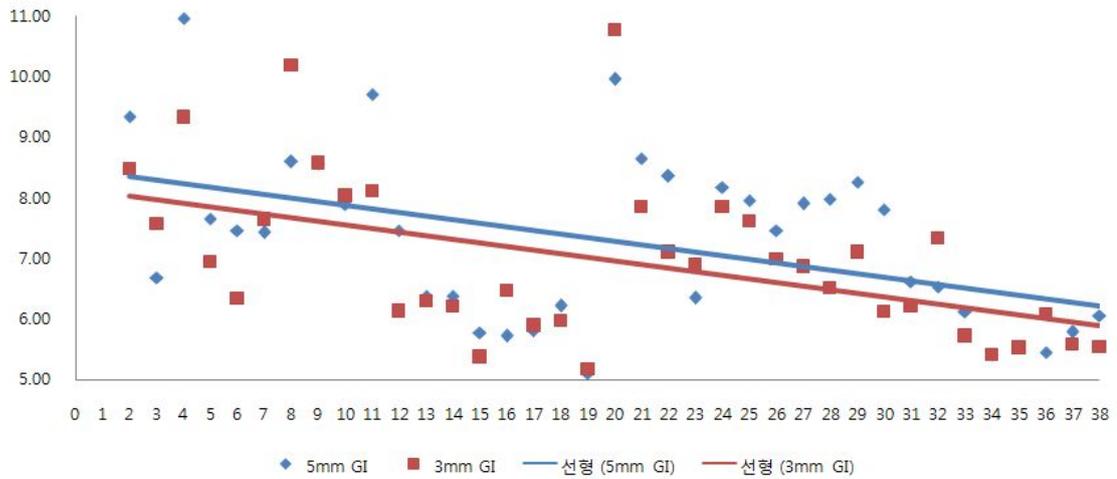


Figure 6. Dose gradient index (GI) of 5 mm multileaf collimator (MLC) system (Bule) and 3 mm multileaf collimator (MLC) system (Red). The ideal GI value is 0. The GI value of 3mm MLC system is closer than the GI value of 5mm MLC system to 0, but there is no statistical significance between the value of 5mm MLC system and 3mm MLC system ($p=0.822$).

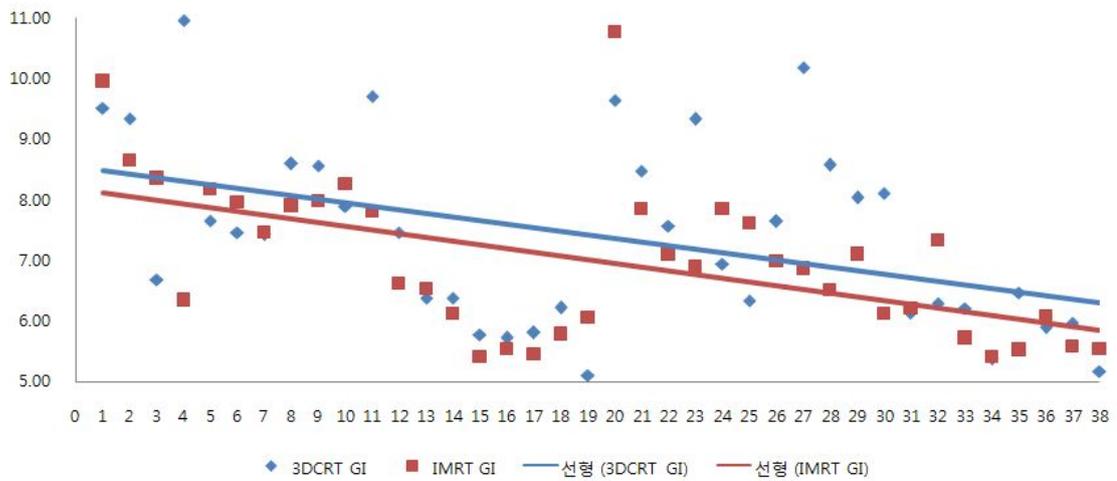


Figure 7. Dose gradient index (GI) of 3D conformal radiotherapy (3DCRT) system (Blue) and intensity modulated radiotherapy (IMRT) system (Red). The ideal GI value is 0. The GI value of IMRT system is closer than the GI value of 3DCRT system to 0, but there is no statistical significance between the value of IMRT system and 3DCRT system ($p=0.156$).

IV. 고 찰

정위적방사선수술 (Stereotactic Radiosurgery, SRS)이란 표적위치에 대한 3차원적인 좌표유도 수행이 가능한 정위적 기구를 사용하여 정확하고 정밀하게 표적에만 방사선을 조사하는 반면 주변정상조직은 방사선손상을 받지 않도록 하는 고난이도의 치료로서 1~5회의 시술로 표적의 치사가 가능할 정도로 고용량의 방사선을 조사하는 것으로 시술 횟수와 방사선량에 있어 일반방사선치료와 차별화된 방사선치료 기법이다. Horsley와 Clarck에 의해 병변의 위치를 3차원적으로 측정하는 보조시스템을 이용하는 정위적 (stereotactic)이란 개념이 시작되었으며, 1951년 Lars Leksell에 의해 1회에 고용량의 표적치사량 방사선을 조사함과 동시에 주변조직의 보호를 극대화하는 방사선수술이란 개념이 만들어졌다. 이 후 정위적방사선수술 및 정위적체부방사선치료란 개념은 1990년대 초부터 확고히 정립되었다 (Khan, 2003; Christer, 1995; Wu등, 1990; Timothy등, 2001; Pavel등, 2005; Nakamura등, 2001). 정위적방사선수술의 특징은 표적에 대해서 최적화된 선량일치도 (conformity)를 보이며 동시에 표적외부지역에서 흡수선량의 급격한 감소를 보여 주변정상조직의 방사선 손상을 최소화할 수 있는 것이다. 정위적방사선수술이 과거에는 두개강내 병변 시술에 주로 사용되었으나, 최근에는 기계의 발달에 힘입어서 폐병변, 간병변, 척추병변 같은 다양한 체부종양으로 확장되었다. 그 중에서 척추병변은 다른 체부 부위와 달리 호흡 및 내부 장기의 운동에 영향을 받지 않거나 그 영향이 미미하여, 두개강내 표적처럼 정확성과 정밀도를 살려서 정위적방사선수술을 시행하기 용이하다. 척추병변환자는 과거에는 심한 통증으로 장시간 같은 자세를 유지해야 하는 방사선수술을 받기가 힘들었는데, 최근에는 영상유도기법의 도입으로 시술시간을 획기적으로 줄이며 정확도 또한 높게 유지할 수 있게 되어서 척추병변에 대해서 영상유도 정위적방사선수술을 이용한 치료를 많이 시행하고 있다 (Q-Jackie등, 2009; Fang-Fang등, 2002; Samuel등, 2003; Yin등, 2008; Almon등, 2003, Yin등, 2004). Fang-Fang등(2002)은 세기변조방사선치료 (Intensity modulated radiotherapy, IMRT)기법을 이용한 정위적방사선수술이 척추병변에 적합한지를 3 mm 초소형 다엽콜리메이터

(Multileaf collimator, MLC)를 사용하여 연구한 결과 주변정상조직에는 방사선량을 적게 하면서도 표적종양에는 많은 양의 방사선을 정확히 조사하여 정위적방사선수술의 특징을 적절히 구현할 수 있다는 것을 확인하였다. 다엽콜리메이터는 정위적방사선수술에서도 사용하기에 적합한 것으로 보고되어 있다 (Fang-Fang등, 2002; Jurgen등, 1996; Mohamed등, 2011). Mohamed등(2011)이 방사선수술에 초소형 다엽콜리메이터를 사용함에 있어서 선량측정적(dosimetric), 기계적(mechanical) 특성을 확인한 결과 정위적방사선수술의 특징을 구현하는데 적합하다는 결론을 도출한 바 있다. Conformity Index가 1993년 RTOG에서 제안한 이래 Paddick 및 Nakamura 등에 의해 수정되어 지금 현재 가장 많이 정위적방사선수술의 치료계획의 평가지표로 사용되고 있다. 최근의 연구들 (Jacqueline등, 2003; Jian-Yue등, 2005; James등, 2009; Lisa등, 2009; Youling등, 2010; Anees등, 2010; Shichao등, 2011)에서 Conformity Index 평균값이 1.13~1.71으로 보고되어 있으며, 본 연구에서 나온 Conformity Index 값은 평균값은 1.33 ± 0.02 , 범위는 1.12~1.74로 각 치료군 모두 정위적방사선수술을 수행하는데 적합함을 확인하였다.

한편, 방사선조사면의 모양을 적절하게 만들어주는 다엽콜리메이터는 방사선을 차폐하는 각각의 leaf를 컴퓨터를 통해 자동 제어하는 시스템으로 15년여동안 조사면 크기, 각 텅스텐 leaf 너비 등에 있어서 지속적인 발전을 보여왔다. 2000년 Thomas등(2000)이 6 Mega Voltage 엑스선에서 이론적으로 최적화된 leaf 너비는 1.5~2 mm 이라고 발표하였고, 이후 표준형 다엽콜리메이터 leaf 너비에 따른 통계학적, 임상적 의미를 찾고자 하는 많은 연구들이 발표되었다. 그에 따라 일반방사선치료에 주로 쓰이는 표준형 다엽콜리메이터 각 leaf 너비는 5~10 mm 범위로, 작은표적을 대상으로 하는 방사선수술에 주로 쓰이는 초소형 다엽콜리메이터 각 leaf 너비는 1~4 mm 범위로 통상적으로 사용되고 있다. 정확한 치료기 특징인 정위적방사선수술에 다엽콜리메이터를 사용하는 것이 타당한가에 대해서는 Mohamed등(2011)이 초소형 다엽콜리메이터가 방사선수술의 기계적, 물리적 특징을 구현하는데 적합하다고 보고한 바 있으며, Fang-Fang등(2002)도 3 mm 너비의 초소형 다엽콜리메이터를 사용하여 치료시 적절한 표적 방사선량과 주변 조직 보호 등의 정위적방사선수술의 특징을 구현하는데 적합하다고 보고한 바

있다. 이렇듯 다엽콜리메이터가 방사선수술에 사용되면서, 다엽콜리메이터 각각 leaf 너비가 작을수록 더욱 더 세밀한 모양의 방사선조사면을 만들 수 있기 때문에 지속적인 연구와 발전이 이루어져 왔다으며, 그에 따라 다엽콜리메이터 leaf 너비의 영향에 대한 다양한 연구결과들이 발표되었다. 정위적방사선수술보다 표적이 큰 세기변조방사선치료시 여러 연구 (Youling등, 2010; Shichao등, 2011; Lu 등, 2005)에서 10 mm 너비의 표준형 다엽콜리메이터보다 초소형 다엽콜리메이터를 사용하였을 경우 표적선량분포나 주변정상조직보호에서 보다 좋은 결과를 얻을 수 있다고 하였다. Youling등(2010)은 상부식도암에서 세기변조방사선치료 계획에 있어서 다엽콜리메이터의 너비 4 mm vs 10 mm를 비교분석하였다. 그 결과 4mm 너비가 평균 기계출력방사선량도 효율적으로 적었고, 표적종양방사선량분포, 주변정상조직보호 등에서 의미있는 좋은 결과를 얻었다. Shichao등(2011)이 비인강암에서 세기변조방사선치료시 4 mm vs 10 mm를 비교한 결과 표적종양선량분포는 좋으나, 종양주변조직보호에는 별 차이가 없는 것으로 나타났다. Lu등(2005)이 전립선암에서 세기변조방사선치료를 사용함에 있어서 4 mm vs 10 mm 의 각기 다른 다엽콜리메이터 leaf 너비를 비교하였는데, 4 mm 다엽콜리메이터 시스템에서 정상조직인 직장, 방광에 대한 방사선량이 유의하게 더 적게 투여되는 것으로 나타났다. 또한 표적이 작은 정위적방사선수술시 10 mm 너비의 표준형 다엽콜리메이터와 3 mm 너비의 초소형 다엽콜리메이터를 비교한 결과 3 mm 너비의 초소형 다엽콜리메이터가 더 좋은 결과를 얻을 수 있다는 여러 보고 (Kubo, 1995; Pavel등, 2005)가 있었다. Kubo등(1995)이 정위적방사선수술을 시행하는데 3차원입체조형방사선치료를 시행하는데, 1.7 mm (MRC system MLC) vs 3 mm (BrainLAB m3 MLC) vs 10 mm (Varian's MLC)에 따른 차이를 비교하였다. 그 결과 1.7mm 와 3 mm 는 각각 10 mm 보다 좋은 결과를 얻었다. 1.7mm 와 3 mm는 각각 PTV 1.0~2.0 사이에 도달하였다. Pavel등(2005)이 간병변 및 폐병변의 방사선수술시 일반방사선치료, 세기변조방사선치료, 역동적 입체조형 회전 방사선수술에 대해서 3 mm와 10 mm 다엽콜리메이터를 비교해 본 결과 세기변조방사선치료시 3 mm 다엽콜리메이터의 표적종양방사선량분포가 더 좋은 것으로 나타났다. 표준형 다엽콜리메이터중 최근의 가장 많이 사용되고 있는 5mm 너비의 다엽콜리메이터와 초소형 다엽콜리메이터를 비교한 연구 중에는 3

차원입체조형방사선치료 (3D conformal radiotherapy, 3DCRT)기법을 이용한 정위적방사선수술시 초소형 다엽콜리메이터를 사용한 치료 군에서 더 좋은 결과를 얻을 수 있다는 여러 보고 (Jian-Yue등, 2005; Jacqueline등, 2003; James등, 2009; Q-Jackie등, 2009)가 있었다. Jian-Yue등(2005)이 정위적방사선수술 34 증례를 역동적 입체조형 회전 방사선수술(Dynamic conformal arc therapy)과 세기변조방사선치료를 시행함에 있어서 3 mm vs 5 mm vs 10 mm 다엽콜리메이터를 비교하여 3 mm 다엽콜리메이터를 사용한 군에서 conformity index가 통계학적으로 더 좋게 나온다는 것을 발견하였으며, 또한 표적체적이 커질수록 conformity index 차이가 줄어든다는 것도 보고하였다. Jacqueline등(2003)이 두개강내 병변에 대한 입체조형 방사선수술을 시행할 때 3 mm (BrainLAB's micro MLC)와 5 mm (Varian Millenium MLC) 다엽콜리메이터를 비교하였는데, 선량일치도, 주변정상조직 보호에 있어서 향상된 결과를 얻어냈다. James등(2009)이 폐병변과 간병변에서 방사선수술시 2.5 mm (120-leaf BrainLAB/Varian high-definition)와 5 mm (120-leaf Varian Millenium)를 비교하여 표적종양방사선분포, 주변정상조직보호에서 좋은 결과를 얻어냈다. Q-Jackie등(2009)이 정위적방사선수술을 시행함에 있어서 2.5 mm (Novalis TX HD 다엽콜리메이터)와 5 mm 다엽콜리메이터(standard Millenium MLC) 크기를 비교한 결과 표적종양방사선분포에서 좋은 결과를 얻어냈으며, 특히 표적종양이 작을수록, 보호해야할 주변정상조직의 모양이 복잡하게 생길수록 다엽콜리메이터 크기가 작을 때 더 효과적이라는 결과를 보여주었다. 이러한 결과들과 대조적으로 Jay Burmeister등(2004)은 표적종양이 아주 작거나 모양이 단순할 경우 5 mm vs 10 mm 다엽콜리메이터의 효과차이가 없다고 발표하였다.

본 연구결과에서, 첫 번째 다엽콜리메이터 5 mm 군과 3 mm 군으로만 구분하여 3차원입체조형방사선치료와 세기변조방사선치료를 통합하여 비교하면, 표적종양방사선량분포 측면에서 Target volume coverage는 $85.81 \pm 0.85\%$ vs $87.42 \pm 0.79\%$ ($p > 0.05$), Conformity index는 1.36 ± 0.02 vs 1.34 ± 0.03 ($p > 0.05$), 주변정상조직보호 측면에서 Dose gradient index는 7.34 ± 0.23 vs 7.03 ± 0.22 , ($p > 0.05$), CV90은 $0.33 \pm 0.12 \text{ cm}^3$ vs $0.19 \pm 0.06 \text{ cm}^3$ ($p > 0.05$), CV50은 $1.34 \pm 0.16 \text{ cm}^3$ vs $1.27 \pm 0.21 \text{ cm}^3$ ($p > 0.05$)으로 각각 나타나 차이는 있었지만, 통계적인 유

의성까지는 나타내지 못했다. 그러나 치료계획의 기계적 효율성 측면에서 Monitor unit은 249.53 ± 12.46 MU vs 299.50 ± 19.31 MU ($p=0.033$)로 나타나 3 mm 다엽콜리메이터 system의 효율성이 떨어지는 것으로 나타났다. 더 세분하여 5 mm 다엽콜리메이터와 3 mm 다엽콜리메이터를 각각 3차원입체조형방사선치료군 vs 세기변조방사선치료군으로 나누어서 비교하여도 Target volume coverage는 3차원입체조형방사선치료에서 $84.03 \pm 1.36\%$ vs $85.07 \pm 1.14\%$ ($p>0.05$), 세기변조방사선치료에서 $87.59 \pm 0.87\%$ vs $89.77 \pm 0.81\%$ ($p>0.05$) (Table 2)로 나타났으며, Conformity index는 3차원입체조형방사선치료에서 1.47 ± 0.03 vs 1.44 ± 0.03 ($p>0.05$), 세기변조방사선치료에서 1.25 ± 0.01 vs 1.24 ± 0.01 ($p>0.05$) (Table 3)로 나타났다. Dose gradient index는 3차원입체조형방사선치료에서 7.50 ± 0.37 vs 7.28 ± 0.34 ($p>0.05$), 세기변조방사선치료에서 7.17 ± 0.30 vs 6.79 ± 1.25 ($p>0.05$) (Table 4)로 나타나서 모두 통계학적 차이를 보이지는 않았다. 본 연구의 방사선치료계획들에 대한 Conformity index는 전체 평균 1.33 ± 0.02 , 범위는 1.12~1.74로 최근에 보고되어 있는 Conformity index의 값이 1.13~1.71 이므로 정위적방사선수술의 기준에는 충분히 부합하였으나 다엽콜리메이터 leaf 너비가 5 mm에서 3 mm로 2 mm만큼의 너비를 줄여서는 방사선치료계획의 향상의 효과가 미미하여 통계학적인 차이를 유발할 정도는 아니었다.

두 번째 방사선치료방식에 따라 3차원입체조형방사선치료군과 세기변조방사선치료군으로만 구분하고 각 군에는 3 mm 군과 5 mm 군을 포함시켜서 분석하면, 표적종양방사선량분포 측면에서 Target volume coverage는 $84.55 \pm 0.88\%$ vs $88.68 \pm 0.61\%$ ($p=0.005$) (Figure 4), Conformity index는 1.45 ± 0.14 vs 1.24 ± 0.05 ($p=0.000$) (Figure 6)으로 나왔으며, 주변정상조직보호 측면에서 Dose gradient index는 7.39 ± 0.25 vs 6.98 ± 0.21 ($p>0.05$) (Figure 8), CV90은 0.51 ± 0.12 cm³ vs 0.02 ± 0.01 cm³ ($p=0.000$), CV50은 1.61 ± 0.16 cm³ vs 1.00 ± 0.20 cm³ ($p>0.05$)로 각각 나타났다. 치료계획의 기계적 효율성 측면에서 Monitor unit은 195.66 ± 7.10 MU vs 353.36 ± 13.24 MU ($p=0.000$)으로 나타나서, 표적종양치료효과측면에서 통계적으로 세기변조방사선치료가 우월한 것으로 나타났다. 정상조직보호측면에서는 부분적으로 통계적 의미가 있었으나 기계효율적 측면에서는 세기변조방사선치료가 비효율적인 것으로 나타났다. 치료 방식은 3 mm 군과 5 mm 군을 통합

또는 분리해서 분석하나 양자 모두 3차원입체조형방사선치료에서 세기변조방사선치료로 바뀌면 표적종양치료효과나 정상조직보호측면에서 효과적이었고 부분적으로 통계학적 차이를 보일 정도로 차이가 명확하였다.

정위적방사선수술은 지난 수십년동안 새로운 혁신적인 기계들의 발달과 함께 회전조사방법 (Arc therapy), 3차원입체조형치료방법 (3D conformal radio-therapy, 3DCRT), 세기변조방사선치료방법 (Intensity modulated radiotherapy, IMRT) 등으로 발달해 왔으며, 최근에는 체적세기변조회전조사법 (Volumetric intensity modulated arc therapy, VMAT)이라는 이러한 방법들을 통합한 시스템이 사용되고 있다. 체적세기변조회전조사법 중 가장 대표적인 것이 래피드아크 (RapidArc[®], Varian Medical Systems, Palo Alto, CA)로 치료결과가 가장 좋은 것으로 많은 문헌에서 보고되고 있다 (Timothy등, 2001; Stanley등, 2001; Q-Jackie 등, 2009; Cedric X Yu, 1995; Fang-Fang등, 2002; Sua등, 2010; Karl Otto, 2008). 체적세기변조회전조사법은 회전하는 세기변조치료법 모델로 역동적 방사선치료 기기의 움직임 (Dynamic gantry motion)과 방사선속 세기변조 (Beam intensity modulation) 기법이 결합되어 나타난 것으로 이러한 개념은 1995년 Cedric X Yu 등에 의해서 소개되었으며, 많은 공을 들인 이후 2008년이 되어서야 상용화되었다 (Q-Jackie등, 2009; Cedric X Yu, 1995; Sua등, 2010). 래피드아크는 가장 최신의 체적세기변조회전조사법으로, 최근에서야 사용되기 시작하였다. 래피드아크는 치료기기체부가 다양한 속도로 회전하면서 다엽콜리메이터가 지속적으로 움직이고, 시간당 기계출력방사선량도 변화하면서 조사되어 세기변조방식의 방사선치료를 수행한다 (Karl Otto, 2008). Sua등(2010)이 전립선암에서 기존의 세기변조방사선치료방법과 래피드아크 1회전과 래피드아크 2회전을 비교하였더니, 1회전 래피드아크는 기존 세기변조방사선치료와 비교시 주변정상조직 (직장, 방광, 소장 등)보호가 떨어졌으나, 2회전 래피드아크는 세기변조방사선치료와 유사하였으며, 시술시간 및 기계출력방사선량은 래피드아크가 더 효과적이었다. Q-Jackie등 (2009)이 체적세기변조회전조사법과 고정기법의 세기변조방사선치료방법을 비교한 결과 1회전 체적세기변조회전조사법은 고정기법의 세기변조방사선치료방법에 비해서 주변정상조직보호 등에서 떨어지는 것으로 나타났으나, 2회전 체적세기변조회전조사법은 고정기법 세기변조방사선치료방법에 비교해 더 좋은 표적종양

방사선량분포와 주변정상조직 보호를 나타냈다.

세 번째로 래피드아크 치료군과 세기변조방사선치료군을 비교하였더니 표적종양 방사선량분포 측면에서 Target volume coverage는 래피드아크 $94.05 \pm 1.06\%$ vs 5 mm IMRT $87.59 \pm 0.87\%$ ($p=0.000$) vs 3 mm IMRT 89.77 ± 0.81 ($p=0.042$) (Table 2)으로, Conformity index는 래피드아크 1.23 ± 0.02 vs 5 mm IMRT 1.25 ± 0.01 ($p>0.05$) vs 3 mm IMRT 1.24 ± 0.01 ($p>0.05$) (Table 3)으로 나타났으며, 주변정상조직보호 측면에서 Dose gradient index는 래피드아크 6.09 ± 0.24 vs 5 mm IMRT 7.17 ± 0.30 ($p>0.05$) vs 3 mm IMRT 6.79 ± 0.29 ($p>0.05$) (Table 4)로 CV90은 래피드아크 $0.18 \pm 0.02 \text{ cm}^3$ vs 5 mm IMRT $0.29 \pm 0.01 \text{ cm}^3$ ($p>0.05$) vs 3 mm IMRT $0.11 \pm 0.012 \text{ cm}^3$ ($p>0.05$)로 CV50은 래피드아크 $0.92 \pm 0.26 \text{ cm}^3$ vs 5 mm IMRT $1.05 \pm 0.19 \text{ cm}^3$ ($p>0.05$) vs 3 mm IMRT $0.95 \pm 0.35 \text{ cm}^3$ ($p>0.05$)로 나타났다. 치료계획의 기계적 효율성 측면에서 Monitor unit은 래피드아크 $312.11 \pm 15.85 \text{ MU}$ vs 5 mm IMRT $307.00 \pm 14.24 \text{ MU}$ ($p>0.05$) vs 3 mm IMRT $399.74 \pm 16.70 \text{ MU}$ ($p=0.000$)으로 나왔다. 5 mm 다엽콜리메이터 시스템을 사용하지만 치료방식이 가장 진보한 것으로 평가받고 있는 래피드아크를 사용하면 5 mm 세기변조방사선치료보다 효과적이며 3mm 세기변조방사선치료와 유사한 효율성을 보여주었고, Target volume coverage와 Monitor unit의 경우에는 오히려 3 mm 세기변조방사선치료보다도 효과적인 것으로 나타났다.

본 연구결과 척추병변의 정위적방사선수술시 다엽콜리메이터의 너비 3 mm 군과 5 mm 군을 비교해보면 3 mm 군이 좋은 결과의 가능성을 보여주고 있지만, 통계적인 차이를 만들어내지는 못 했다. 또한 5 mm 다엽콜리메이터를 사용할 경우에도 기존의 정위적방사선수술의 기준에 충분히 부합되고 있다. 따라서 5mm에서 3mm로 2mm의 너비를 줄이는 것이 임상적 차이로까지 확장되기 위해서는 더 많은 연구와 검증이 필요할 것으로 사료된다. 오히려 다엽콜리메이터의 너비보다는 치료기법의 선택이 더 중요한 요소로 작용하고 있음을 확인할 수 있었다. 거기에 더해 5mm 다엽콜리메이터 시스템을 사용하는 래피드아크 치료기법은 3mm 다엽콜리메이터 시스템의 가장 좋은 치료기법인 세기변조방사선치료기법과 비교하여 효율성이 떨어지지 않고, 부분적으로는 보다 더 나은 결과를

기대할 수 있으므로 정위적방사선수술용으로 평가되는 초소형 규격인 3mm 다엽 콜리메이터 자리를 표준형이지만 5mm 다엽콜리메이터를 사용하는 래피드아크 치료기법이 충분히 대체할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서, 3mm 다엽콜리메이터 시스템이 래피드아크 치료기법을 사용할 수 없다면 래피드아크를 사용할 수 있는 5mm 다엽콜리메이터 시스템을 사용하는 사용자 입장에서 굳이 3mm 다엽 콜리메이터로의 전환이 필요한지에 대해서는 보다 많은 연구와 검증이 필요할 것으로 사료된다.

VI. 참고 문헌

Faiz M. Khan : The physics of radiation therapy. 3rd ed., 507-508 (2003)

Christer Lindquist : Gamma knife radiosurgery. Seminars in Radiation Oncology 5, 197-202 (1995)

Wu A, Lindner G, Maitz AH, Kalend AM, Lunsford LD, Flickinger JC, Bloomer : Physics of gamma knife approach on convergent beams in stereotactic radiosurgery. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. 18, 941-949 (1990)

Fang-Fang Yin, Samuel Ryu, Munther Ajlouni, Jingeng Zhu, Hui Yan, Harrison Guan, Kathleen Faber, Jack Rock, Muwaffak Abdalhak, Lisa Rogers, Mark Rosenblum, Jae Ho Kim : A technique of intensity-modulated radiosurgery (IMRS) for spinal tumors. Medical Physics 29, 2815-2822 (2002)

Mohamed M. Galal, Sine'ad Keogh, Sultan Khalil : Dosimetric and mechanical characteristics of a commercial dynamic mMLC used in SRS. Medical Physics, Vol. 38, 4225-4231 (2011)

Timothy D. Solberg, Kristen L. Boedeker, Randi Fogg, Michael T. Selch, Antonio A. F. Desalles : Dynamic arc radiosurgery field shaping: a comparison with static field conformal and noncoplanar circular arcs. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. 49, 1481-1491 (2001)

Stanley H. Benedict, Robert M. Cardinale, Qiuwen Wu, Robert D. Zwicker, William C. Broaddus, Radhe Mohan : Intensity-modulated stereotactic radiosurgery using dynamic micro-multileaf collimation. Int. J. Radiation

Oncology Biol. Phys. 50, 751–758 (2001)

Q. Jackie Wu, Sua Yoo, John P. Kirkpatrick, Danthai Thongphiew, Fang-Fang Yin : Volumetric arc intensity-modulated therapy for spine body radiotherapy: comparison with static intensity-modulated treatment. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. 75, 1596–1604 (2009)

Cedric X Yu : Intensity-modulated arc therapy with dynamic multileaf collimation: An alternative to Tomotherapy. Phys. Med. Biol. 40, 1435-1449 (1995)

Sua Yoo, Q. Jackiewu, W. Robert Lee, Fang-Fang Yin : Radiotherapy treatment plans with Rapidarc for prostate cancer involving seminal vesicles and lymph nodes. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. 76, 935–942 (2010)

Karl Otto : Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. Medical Physics 35, 310-317 (2008)

Thomas Bortfeld, Uwe Oelfke, Simeon Nill : What is the optimum leaf width of a multileaf collimator? Medical Physics 27, 2494-2502 (2000)

James A Tanyi, Paige A Summers, Charles L Mccracken, Yiyi Chen, Li-Chung Ku, Martin Fuss : Implications of a high-definition multileaf collimator (HD-MLC) on treatment planning techniques for stereotactic body radiation therapy (SBRT): A planning study. Radiation Oncology 4:22 (2009)

Youling Gong, Shichao Wang, Lin Zhou, Yongmei Liu, Yong Xu, You Lu, Sen Bai, Yuchuan Fu, Qingfeng Xu, Qingfeng Jiang : Dosimetric comparison using different multileaf collimeters in intensity-modulated radiotherapy for upper

thoracic esophageal cancer. *Radiation Oncology* 5:65 (2010)

Shichao Wang, Youling Gong, Qingfeng Xu, Sen Bai, You Lu, Qingfeng Jiang, Nianyong Chen : Impacts of multileaf collimators leaf width on intensity-modulated radiotherapy planning for nasopharyngeal carcinoma: Analysis of two commercial Elekta devices. *Medical dosimetry* 36, 153-159 (2011)

Lu Wang, Peter Hoban, Kamen Paskalev, Jie Yang, Jinsheng Li, Lili Chen, Weijun Xiong, Charlie C.M. : Dosimetric advantage and clinical implication of a micro-multileaf collimator in the treatment of prostate with intensity-modulated radiotherapy. *Medical Dosimetry* 30, 97-103 (2005)

H. Dale Kubo, Richard B. Wilder, Conrad T. E. Pappas : Impact of collimator leaf width on stereotactic radiosurgery and 3D conformal radiotherapy treatment plans. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* 44, 937-945 (1999)

Pavel Dvorak, Dietmar Georg, Joachim Bogner, Bernhard Kroupa, Karin Dieckmann, Richard Pötter : Impact of imrt and leaf width on stereotactic body radiotherapy of liver and lung lesions. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* 61, 1572-1581 (2005)

Jay Burmeister, Patrick N. Mcdermott, Todd Bossenberger, Edgar Ben-Josef, Kenneth Levin, Jeffrey D. Forman : Effect of MLC leaf width on the planning and delivery of sMLC IMRT using the CORVUS inverse treatment planning system. *Medical Physics* 31, 3187-3193 (2004)

Jian-Yue Jin, Fang-Fang Yin, Samuel Ryu, Munther Ajlouni, Jae Ho Kim : Dosimetric study using different leaf-width MLCs for treatment planning of

dynamic conformal arcs and intensity-modulated radiosurgery. *Medical Physics* 32, 405-411 (2005)

Jacqueline Elizabeth Monk, Julian Richard Perks, David Doughty, Piers Nicholas Plowman : Comparison of a micro-multileaf collimator with a 5-mm-leaf-width collimator for intracranial stereotactic radiotherapy. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* 57, 1443-1449 (2003)

Q Jackie Wu, Zhiheng Wang, John P Kirkpatrick, Zheng Chang, Jeffrey J Meyer, Mei Lu, Calvin Huntzinger, Fang-Fang Yin : Impact of collimator leaf width and treatment technique on stereotactic radiosurgery and radiotherapy plans for intra- and extracranial lesions. *Radiation Oncology* 4:3 (2009)

V. Sankaranarayanan, S. Ganesan, S. Oommen, T.K. Padmanaban, J. Stumpf, K.M. Ayyangar : Study on dosimetric parameters for stereotactic radiosurgery and intensity-modulated radiotherapy. *Medical Dosimetry* 28, 85-90 (2003)

Nicoletta J. Lomax, Stefan G. Scheib : Quantifying the degree of conformity in radiosurgery treatment planning. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* 55, 1409-1419 (2003)

Edward Shaw, Charles Scott, Luis Souhami, Robert Dinapoli, Robert Kline, Jay Loeffler, Nancy Farnan : Single dose radiosurgical treatment of recurrent previously irradiated primary brain tumors and brain metastases: Final report of RTOG protocol 90-05. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* 47, 291-298 (2000)

Linda X. Hong, Madhur Garg, Patrick Lasala, Mimi Kim, Dennis Mah, Chin-Cheng Chen, Ravindra Yaparpalvi, Dinesh Mynampati, Hsiang-Chi Kuo,

Chandan Guha, Shalom Kalnicki : Experience of micromultileaf collimator linear accelerator based single fraction stereotactic radiosurgery: Tumor dose inhomogeneity, conformity, and dose fall off. *Medical Physics* 38, 1239-1247 (2011)

Edward Shaw, Charles Scott, Luis Souhami, Robert Dinapoli, Jean-Paul Bahary, Robert Kline, Moody Wharam, Christopher Schultz, Phillip Davey, Jay Loeffler, John Del Rowe, Lawrence Marks, Barbara Fisher, Kyu Shin : Radiosurgery for the treatment of previously irradiated recurrent primary brain tumors and brain metastases: Initial report of Radiation Therapy Oncology Group protocol 90-05. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* 34, 647-654 (1996)

Luis Souhami, Wendy Seiferheld, David Brachman, Ervin B. Podgorsak, Maria Werner-Wasik, Robert Lustig, Christopher J. Schultz, William Sause, Paul Okunieff, Jan Buckner, Lucia Zamorano, Minesh P. Mehta, Walter J. Curran : Randomized comparison of stereotactic radiosurgery followed by conventional radiotherapy with carmustine to conventional radiotherapy with carmustine for patients with glioblastoma multiforme: report of Radiation Therapy Oncology Group 93-05 protocol. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* 60, 853-860 (2004)

David W Andrews, Charles B Scott, Paul W Sperduto, Adam E Flanders, Laurie E Gaspar, Michael C Schell, Maria Werner-Wasik, William Demas, Janice Ryu, Jean-Paul Bahary, Luis Souhami, Marvin Rotman, Minesh P Mehta, Walter J Curran Jr : Whole brain radiation therapy with or without stereotactic radiosurgery boost for patients with one to three brain metastases: Phase III results of the RTOG 9508 randomised trial. *The Lancet* 363, 1665-1672 (2004)

Anees Dhabaan, Eric Elder, Eduard Schreibmann, Ian Crocker, Walter J. Curran, Nelson M. Oyesiku, Hui-Kuo Shu, Tim Fox : Dosimetric performance of the new high-definition multileaf collimator for intracranial stereotactic radiosurgery. *Journal Of Applied Clinical Medical Physics* 11, 197-211 (2010)

Ian Paddick : A simple scoring ratio to index the conformity of radiosurgical treatment plans : Technical note. *J. Neurosurg.* 93, 219-222 (2000)

Jean L. Nakamura, Lynn J. Verhey, Vernon Smith, Paula L. Petti, Kathleen R. Lamborn, David A. Larson, William M. Wara, Michael W. Mcdermott, Penny K. Sneed : Dose conformity of gamma knife radiosurgery and risk factors for complications. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* 51, 1313–1319 (2001)

Paddick I, Lippitz B : A simple dose gradient measurement tool to complement the conformity index. *J. Neurosurg.* 105, Suppl:194-201 (2006)

Yin FF, Wang Z, Yoo S, Wu QJ, Kirkpatrick J, Larrier N, Meyer J, Willett CG, Marks LB : Integration of cone-beam CT in stereotactic body radiation therapy. *Technol Cancer Res Treat.* 7, 133-139 (2008)

Samuel Ryu, Fang Fang Yin, Jack Rock, Jingeng Zhu, Archie Chu, Eduard Kagan, Lisa Rogers, Munther Ajlouni, Mark Rosenblum, Jae Ho Kim : Image-guided and intensity-modulated radiosurgery for patients with spinal metastasis. *Cancer* 96, 2013-2018 (2003)

Almon S. Shiu, Eric L. Chang, Jin-Song Ye, Mingfwu Lii, Laurence D. Rhines, Ehud Mendel, Jeffrey Weinberg, Sanjay Singh, Moshe H. Maor, Radhe Mohan, James D. Cox : Near simultaneous computed tomography image-guided stereotactic spinal radiotherapy: an emerging paradigm for achieving true

stereotaxy. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* 57, 605–613 (2003)

Yin FF, Ryu S, Ajlouni M, Yan H, Jin JY, Lee SW, Kim J, Rock J, Rosenblum M, Kim JH. : Image-guided procedures for intensity-modulated spinal radiosurgery. *Technical Note, J Neurosurg.* 101, 419-424 (2004)

Jurgen Voges, Harald Treuer, Volker Sturm, Charlotte Buchner, Ralph Lehrke, Martin Kocher, Susanne Staar, Johannes Kuchta, Rolf-Peter Miller : Risk analysis of linear accelerator radiosurgery. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* 36, 1055-1063 (1996)

감사의 글

세계 7대 자연경관으로 선정된 아름다운 섬 제주에서 지낸 시간들 중에서 가장 뜻깊은 발자취를 남길 수 있게 해 주었던 2년간의 대학원 기간이었습니다.

“迷者不問路(미자불문로)”라는 말이 있습니다. 어리석은 자는 길을 묻지 않는다. 즉 남의 의견을 묻지 않고 자신을 과신하여 파멸을 자초하는 것으로 길을 묻는 겸허함이 결여된 결과 길을 잃게 되는 것을 의미합니다. 어쩌면 제 자신도 이처럼 자신의 부족함을 깨닫지 못한 채 길을 잃고 있었는지 모릅니다. 그런 저에게 부족함을 일깨워주고 길을 묻는 겸허함과 길을 물을 수 있는 용기를 낼 수 있도록 도움을 주었던 대학원 시절이었습니다.

우선 부족함이 많은 저를 올바르게 나아갈 수 있게 지도해주신 정영배 지도교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 서로 다른 분야에 정진하는 사람들이 같은 방향을 바라보고 함께 걸어가는 것이 쉬운 일이 아닐진데 저를 다독거리고 보듬어주시며 제가 바르게 나아갈 수 있도록 물심양면으로 도움을 주셨습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다. 또한 원활한 대학원 생활에 도움을 주시고 논문 작성에 조언을 아끼지 않으신 최국명 교수님, 김봉수 교수님, 김상기 교수님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 그리고 대학원 과정에서 새로운 학문의 길을 열어주신 강희경 교수님, 이근화 교수님, 김수영 교수님께 감사의 말씀 드립니다. 특히 대학원 과정 중 많은 실험으로 인한 저의 히스테리를 받아준 이기웅 선생님, 양은희 선생님께도 감사의 말씀을 전합니다. 아울러 제가 제주도에서 이렇게 학문을 쌓을 수 있게 도와주신 최일봉 교수님, 김성수 원장님, 이정석 선생님께도 심심한 감사를 드립니다.

마지막으로 대학원 다닌다고 가정생활에 소홀히 했음에도 불구하고 가장 큰 조력자로서, 영혼의 동반자로 나를 지탱해 준 요리남자와 나의 경쟁자인 두 아들 윤호, 승현이에게 감사와 사랑의 마음을 전합니다.

2012년 1월. 채수민 올림