



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](#)

농학석사학위논문

단층영상합성법을 이용한 대단면  
구조재의 내부 옹이 탐지에 관한  
연구

The study on detecting inner knots in large  
cross section timber using X-ray  
tomosynthesis

2018년 02월

서울대학교 대학원  
산림과학부 환경재료과학전공  
이 현 정

## 초 목

본 연구에서는 구조용 대단면 목재의 품질검사 과정에서 적용 가능한 촬영 조건을 정립하고, 단층영상합성법의 단점인 블러를 최소화할 수 있는 필터를 선정하고자 하였다.

디텍터와 선원을 고정시키고 목재를 이동시켜 영상을 획득하는 촬영 조건을 구현하였다. 블러를 제거하기 위해 해닝 필터, 삼각 필터, 바틀렛 필터를 적용한 뒤 촬영 조건을 구현하기 위해 작성한 알고리즘을 이용하여 단면 영상을 재구성하였다.

실제 단면과 재구성된 영상을 비교한 결과 해닝 필터를 사용했을 때 블러와 건전부 간 명도차가 가장 적어 블러가 필터에 의해 다소 제거되었음을 확인하였다. 또한 옹이의 변동계수가 블러에 비해 상대적으로 크게 나타나 옹이가 더 명확하게 구분될 수 있는 것으로 확인되었다. 따라서 대단면 목재의 단면영상촬영법에서는 해닝 필터가 가장 적합한 것으로 사료되었다.

# 목 차

초록 .....	I
목차 .....	II
List of Tables .....	IV
List of Figures .....	V
1. 서론 .....	1
1-1 연구배경 .....	1
1-2 연구목적 .....	5
2. 연구사 .....	6
2-1 단층영상합성법 .....	6
2-2 더블러링 필터 .....	8
2-3 단층영상합성법 촬영 조건 .....	9
3. 재료 및 방법 .....	13
3-1 공시 재료 .....	13
3-2 X선 실험 장비 .....	16
3-3 실험 방법 .....	18
3-4 영상 처리 .....	22
3-5 필터별 옹이 검출 정확도 분석 .....	31
4. 결과 및 고찰 .....	33
4-1 재구성 영상 획득 .....	33
4-2 필터별 재구성 영상의 정량적 평가 .....	34
5. 결론 .....	49

6. 참고문헌 .....	50
Abstract .....	53

## List of Tables

<b>Table 1</b> Information of specimen .....	14
<b>Table 2</b> The condition of the experiment .....	21
<b>Table 3</b> The number of reconstructed images .....	33
<b>Table 4</b> Quantification using index in specimen #1 .....	45
<b>Table 5</b> Quantification using index in specimen #2 .....	45
<b>Table 6</b> Quantification using index in specimen #3 .....	46
<b>Table 7</b> Quantification using index in specimen #4 .....	46
<b>Table 8</b> The mean statistics of mean-index and c.o.v.-index for all specimens .....	47

# List of Figures

<b>Figure 1</b> Linear tomosynthesis acquisition geometry (Revised by Godfrey, 2005) .....	3
<b>Figure 2</b> Shift-and-add reconstruction of plane A and plane B(Revised by Godfrey, 2005) .....	3
<b>Figure 3</b> Tomosynthesis geometry (Revised image by Godfre y and Dobbins, 2003) .....	11
<b>Figure 4</b> The cross section of specimen and the position of kerfs in timber .....	15
<b>Figure 5</b> Apparatus .....	17
<b>Figure 6</b> (a) The experiment method .....	20
<b>Figure 6</b> (b) The disposition of specimen and apparatus .....	20
<b>Figure 7</b> (a) The flow chart of image reconstruction process .....	23
<b>Figure 7</b> (b) Images of each step .....	23
<b>Figure 8</b> The principle of spatial domain filter .....	25
<b>Figure 9</b> Window filters .....	28
<b>Figure 10</b> Phase difference calculation .....	30
<b>Figure 11</b> Cutting disposition on the cross-section of specimen .....	31
<b>Figure 12</b> Comparison with real image and reconstructed image of specimen #1 .....	36
<b>Figure 13</b> Comparison with real image and reconstructed image of specimen #2 .....	39

<b>Figure 14</b> Comparison with real image and reconstructed image of specimen #3 .....	41
<b>Figure 15</b> Comparison with real image and reconstructed image of specimen #4 .....	43



# 1. 서론

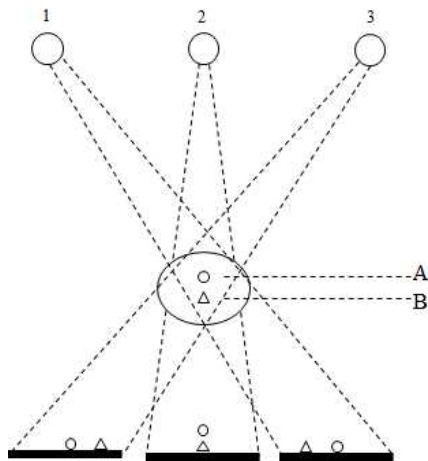
## 1.1 연구배경

국립산림과학원 고시 제2017-9호에서 두께 혹은 너비가 90mm를 초과하는 대단면 구조용재인 보구조재와 기둥구조재는 표면의 결점사항만을 이용해 육안으로 등급구분을 진행한다. 그러나 높은 휨성능을 요구하는 보구조재와 축하중을 받는 부위에 주로 사용하는 기둥구조재는 그 용도상 구조재의 강도성능을 기반으로 한 기계 등급구분이 필요하다. 용이는 목재 내에서 가장 빈번히 발생하고, 목재 강도에 영향이 큰 대표적인 결함이다(Larsen, 2001). 따라서 구조용 목재에서 용이의 위치와 크기가 목재의 기계적 성능에 결정적인 영향을 하게 된다.

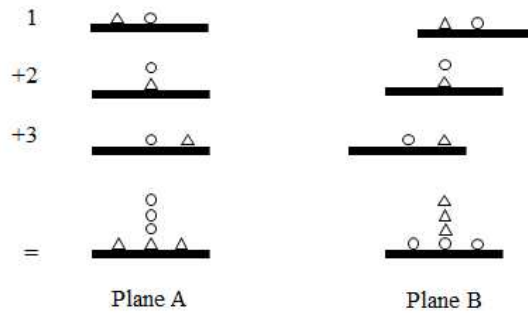
목재의 기계적 성능을 평가하기 위한 방법으로 다양한 비파괴 검사법이 발전하였다. 비파괴 검사법은 사용하는 에너지원에 따라 탄성파, 방사선, 드릴 저항, 마이크로파, 근적외선 등을 사용한 방법이 있다. 이 중 X선을 이용한 비파괴 검사법은 대표적인 비접촉식 검사 방법으로, 신속한 검사가 가능한 장점을 가지고 있다. X선은 다른 에너지원과 달리 목재의 이방성에 영향을 받지 않으며 직진성이 뛰어나 단면 시각화에 유리하다(이, 2017).

X선을 조사하여 용이를 정량적으로 평가하는 방법으로는 Gary(2001), 오(2009) 등이 연구해왔으나 실험 범위가 단면 두께가 얇은 제재목에 한정되어 있고, X선이 투과하는 두께가 두꺼워질수록 신뢰도가 낮아지기 때문에 실제로 구조용 대단면 목재를 생산하는 과정에서 컨베이어 이송 중 X선을 조사하여 더 정밀하게 용이를 탐지하는 연구가 필요하다.

X선 영상의 재구성 방법 중 단층영상합성법(tomosynthesis)은 컴퓨터 단층촬영(computed tomography; CT)과 비교했을 때 촬영 시간이 적게 걸리고 상대적으로 적은 수의 영상만으로 효과적으로 원하는 단면의 영상을 얻을 수 있는 방법이다. 얻어진 영상은 다양한 방법을 통해 재구성되어 원하는 위치의 단면을 얻게 된다. Shift-and-add(SAA) 법은 Figure 1과 같이 각 영상의 촬영 조건에 의한 기하학적 정보를 바탕으로 위상차를 구해 각 영상을 이동하여 더하는 방법으로 적은 수의 영상으로도 원하는 위치의 영상을 얻을 수 있는 가장 대표적인 영상 재구성 방법이다(Godfrey, 2005). Figure 2에서 보듯 평면 A에서  $\triangle$ 이 분산되어 흐릿하게 보이는 것을 확인할 수 있고, 평면 B에서는  $\bigcirc$ 이 겹쳐보이는 것을 확인할 수 있다. 반면 평면 A에서  $\bigcirc$ 가, 평면 B에서  $\triangle$ 가 뚜렷하게 보이는 것을 확인할 수 있다. 그 결과 평면 A에서는  $\bigcirc$ 를 포함하는 평면에, 평면 B에서는  $\triangle$ 를 포함하는 평면에 초점이 맞고 다른 평면은 흐릿하게 블러되는 현상을 확인할 수 있다. 이와 같이 블러가 발생하기 때문에 영상 재구성 과정에서 블러를 제거하는 연구가 필요하다.



**Figure 1** Linear tomography acquisition geometry  
(Revised by Godfrey, 2005)



**Figure 2** Shift-and-add reconstruction of plane A and plane B  
(Revised by Godfrey, 2005)

디블러링(Deblurring)은 영상에 필터 함수를 추가하여 영상을 재구성해 최종 단면 영상에서 블러를 제거하는 것을 말한다. 단층영상 합성법을 가장 활발하게 연구하고 있는 진단의학 분야에서 촬영 조건에 따라 다양한 필터가 개발되었으나, 현재 목재 분야는 단층영상 합성법이 시작 단계에 있어 적절한 필터를 선별하는 연구가 필요하다.

또한 대단면 부재의 품질검사과정에서 X선 촬영을 통해 용이의 위치와 크기를 탐지할 경우 기존의 촬영 조건과 다르게 컨베이어 벨트에서 운송되고 있는 목재를 검사하는 것이 바람직하다. 고정된 피시험체의 주변에 디텍터와 튜브가 회전하는 기존의 촬영 방법은 목재를 고정시키고 X선 장비를 이동시켜야 하므로 실제 공정에서 사용되기엔 어려움이 있다. 따라서 다음의 문제점들을 개선하기 위해 검사과정에서 적용할 수 있는 촬영 조건으로 영상을 획득하고, 이 영상들을 재구성하고, 목재에 적합한 필터를 선정하는 연구가 필요하다.

## 1.2 연구목적

본 연구에서는 구조용 대단면 목재의 생산 과정에서 적용 가능한 촬영 조건을 정립하고, 단층영상합성법의 단점인 블러를 최소화할 수 있는 필터를 선정하고자 한다.

## 2. 연구사

### 2.1 단층영상합성법

X선을 물체에 투과하면 물체의 밀도값에 따라 강도가 감쇠한다. 물체의 두께와 X선의 성질에 따른 감쇠량은 Beer의 법칙에 의해 구할 수 있다. X선을 이용하여 다양한 각도에서 촬영한 방사선 사진으로 물체의 횡단면 영상을 재구성하는 CT는 Radon(1917)이 수학적 기초를 정립한 이후 1970년대부터 진단의학을 중심으로 폭발적으로 사용되고 있다.

X선 단층영상합성법은 X선 CT와 유사한 목적으로 선원과 디텍터의 위상차를 이용하여 초점면의 영상을 구성하지만 CT보다 제한된 각도의 촬영과 저선량의 X선을 이용하여 이미지를 얻을 수 있다.

단층영상합성법에 대한 이론적 제안은 1937년 Ziedses des Plantes가 제한적인 각도와 저선량 X선을 이용한 단층촬영에 대해 연구하며 시작되었다. 이후 디지털 디텍터가 발명될 때까지 몇십년간 이론적으로 존재하다 Garrison 외(1969), Miller 외(1971)에 의해 Ziedses des Plantes의 이론이 실제로 실험되었다. 특히 Grant(1972)가 간단한 재구성 방법과 함께 처음으로 “tomosynthesis” 라고 명명하였다(Dobbins, 2009). 이 단층영상합성법은 거의 2000년이 되어서야 디지털 디텍터의 발명 등의 기술 발전이 비약적으로 이루어졌다.

현재 단층영상합성법은 주로 평판 디지털 디텍터를 사용하며 흉곽 및 유방 진단의학 분야에서 가장 활발한 연구가 이뤄져오고 있다. Niklason 등(2007)는 X선 유방 촬영술과 매우 유사하나 압박한 유방을 제한된 각도에서 촬영하여 영상을 재구성하였다. Dobbins 등(2002)은 단층영상합성법을 이용한 폐결절 촬영을 통해 4mm 직경의 혈관을 구분하고, 기존의 연구들과 비교하였을 때 더

명확한 영상을 획득했음을 보고하였다. 이 외에도 단층영상합성법은 치아 촬영, 혈관 조영술, 뼈 촬영 등의 의학 분야에서 지난 몇 년간 활발히 연구되었다(Dobbins와 Godfrey, 2003).

목재에 대한 연구로는 김(2016)이 단층영상합성법을 목재에 적용하여 목재 내부 열화 평가를 진행하였다. 실대재 목재에 단층영상합성법을 적용한 사례는 김(2016)이 유일하며, 생산 공정 중 적용할 수 있도록 컨베이어 벨트에 이송 중인 목재에 대한 검사 방법은 진행된 바가 없다.

## 2.2 디블러링 필터

영상의 각 화소(pixel) 값에 필터 함수를 적용하여 영상을 선명하게 만드는 필터링 개발에 대한 연구는 영상이 디지털화되면서 다양한 종류로 발전되어 왔다. 이후 단층영상합성법에 발생하는 블러링을 제거하고 명확한 영상을 얻기 위한 디블러링 관련 연구는 단층영상합성법에 대한 연구가 활발해진 2000년대부터 연구되었으며 주로 치아(Oh 등, 2011), 폐, 유방(Dobbins와 Godfrey, 2003) 등 투과 깊이별 영상이 필요한 신체 부위의 진단의학 분야에서 활발히 연구가 진행되었다.

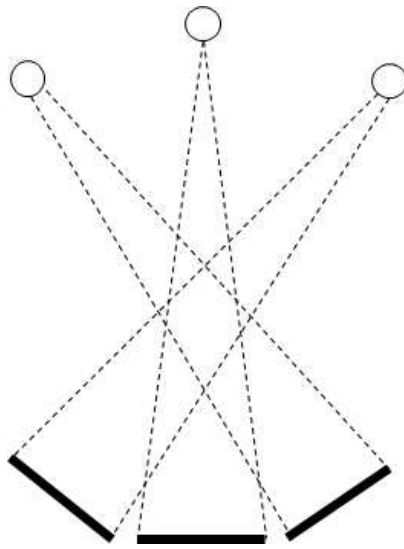
그러나 일정한 각도로 원형으로 촬영한 영상을 라돈 변환한 상태에서 필터를 적용하는 기존의 단층영상합성법과 달리 본 연구에서는 선형으로 촬영한 영상들을 위상차를 이용해 더하기 때문에 기존의 필터를 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 이 경우 재구성 전 영상을 공간 영역 또는 주파수 영역에서 필터 함수와 연산하는 과정이 필요하다. 이와 관련한 다양한 필터 함수들이 개발되었고, 현재도 지속적으로 개량되고 있다(Deng, 2011).

재구성 전 영상에 대한 디블러링은 다양한 분야에서 활용된다. 강(2008)은 CT 영상에 해닝 필터(hanning filter)를 연산하여 아티팩트 제거에 대한 정량적 분석을 진행하였고, Zhao 등(2008)은 digital breast tomosynthesis(DBT)의 선형적 분석 과정 전 디블러링을 위해 주파수 영역의 원본 영상에 필터 함수를 연산하였다.

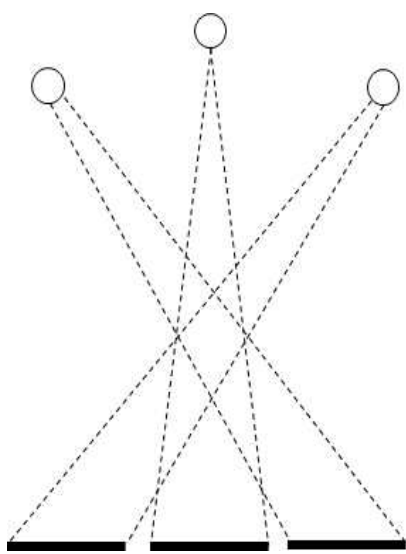


## 2.3 단층영상합성법 촬영 조건

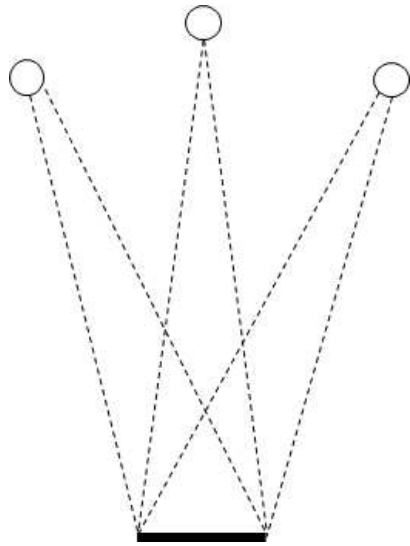
대부분의 단층영상합성법은 Figure 3과 같이 디텍터와 선원이 하나의 동일한 축을 기준으로 같이 회전하거나(Figure 3(a)), 디텍터는 선형으로 움직이고 선원은 회전하거나(Figure 3(b)), 고정된 디텍터를 기준으로 선원이 회전한다(Figure 3(c)) (Dobbins and Godfrey, 2003).



(a)



(b)



(c)

**Figure 3** Tomosynthesis geometry  
(Revised image by Godfrey and Dobbins, 2003)

그러나 실제 목재 생산 공정에서는 촬영 물체, 즉 목재를 고정시키는 방법으로 촬영하기에 어려움이 있다. 따라서 선원과 디텍터를 고정시키고 목재는 이동하는 촬영 조건과 이와 관련한 재구성 알고리즘이 개발될 필요가 있다.

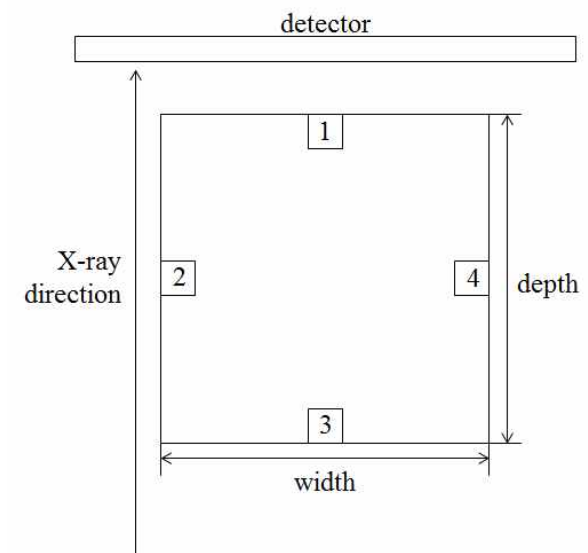
### 3. 재료 및 방법

#### 3.1 공시 재료

본 연구의 실험에서는 국내에서 구조재로 가장 많이 사용되고 있는 낙엽송 (*Larix kaempferi*)을 사용하였다. 고시에 나온 기둥구조재 규격에 맞춰 180mm(D)×180mm(W)×900mm(H)의 전건재를 사용하였다. 건조과정에서 건조결함을 최소화하기 위해 길이방향으로 배할한 4개의 시편을 실험하였으며 평균 밀도는  $0.59 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ , 평균 함수율은 16.4 %이었다. Table 1과 Figure 4에 시편의 세부 정보가 정리되어 있다.

**Table 1** Information of specimen

#	size(mm)	specimen	kerf1	kerf2	kerf3	kerf4	weight (kg)	moisture content (%)	density (kg/m <sup>3</sup> )
1	depth	176.20	9.42	7.85	12.13	7.91			
	width	176.40	10.20	5.10	4.34	6.39	16.20	15.3	580
	height	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00			
2	depth	177.15	11.22	7.55	9.74	8.12			
	width	176.20	5.07	7.43	8.03	5.41	16.75	17.0	600
	height	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00			
3	depth	177.17	11.60	7.90	9.12	11.60			
	width	176.23	5.25	9.43	5.42	6.12	16.65	16.1	600
	height	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00			
4	depth	177.83	8.05	11.59	7.65	9.33			
	width	176.89	8.12	9.33	5.40	5.23	16.30	17.1	580
	height	898.00	898.00	898.00	898.00	898.00			



**Figure 4** The cross section of specimen and the position of kerfs in timber

## 3.2 X선 실험 장비

X선 선원으로 K-4(Softex, 일본)를 사용하여 X선을 조사하였다(Figure 5(a)). 본 장비의 최대 관전압은 60kV, 최대 관전류는 5mA이다.

획득한 영상은 세슘을 신틸레이터로 사용하는 디텍터 EVS4343(DRTech, 한국)을 통해 디지털화하여 분석 컴퓨터에 IMG 파일로 저장되었다(Figure 5(b)). 디텍터의 화소 길이(pixel pitch)는  $140\mu\text{m}$ 이며  $430\text{mm} \times 430\text{mm}$ 의 영상 크기를 나타낼 수 있었다.





(a)



(b)

**Figure 5** Apparatus

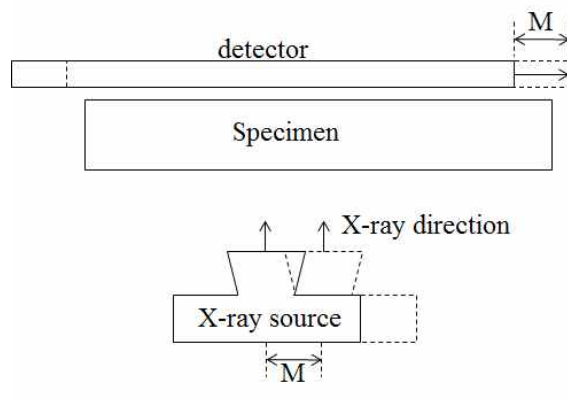
(a) K-4(Softex, Japan) (b) EVS 4343(DRTech, Korea)

### 3.3 실험 방법

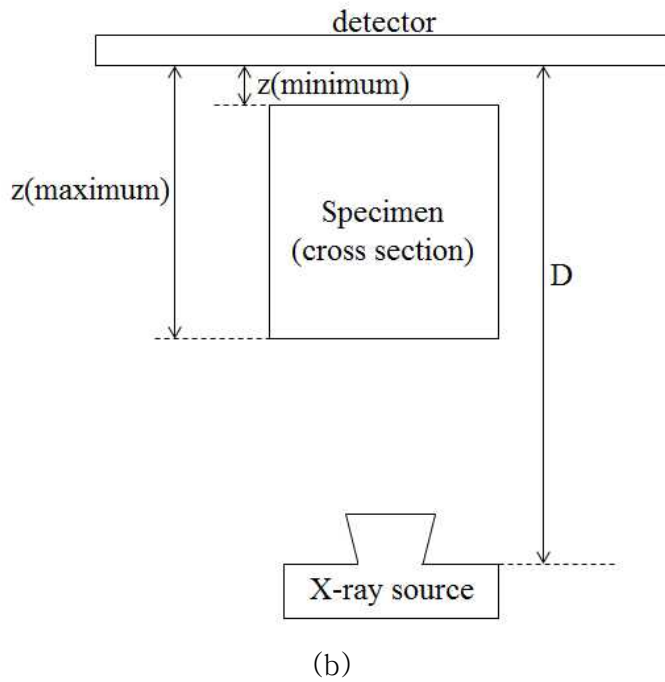
#### 3.3.1 X선을 이용한 목재의 길이방향 영상 촬영

목재 가공현장에서 컨베이어에 이송되는 목재를 측정한다고 가정하였으며, 이 경우 디텍터와 X선 선원은 고정하고 목재가 길이방향으로 이동한다. 따라서 컨베이어에 이송되는 목재를 측정하기 위해서는 X선 선원이 선형 또는 원형으로 이동하고 디텍터와 측정 물체는 고정하는 기존 단층영상합성법과 달리 X선 선원과 디텍터의 상대적인 위치는 변화가 없고 목재만 이동되어 위상차가 발생하여야 한다.

본 연구에서는 측정 환경에 대한 가정을 단순화하여 Figure 6(a)와 같이 목재를 고정하고 X선 선원과 디텍터를 5mm 간격으로 이동시키며 촬영하여 각 시편당 79장의 영상을 획득하였다. Figure 6(a)와 Table 2에 시편별 선원과 디텍터 간의 거리(D), 목재 시편과 디텍터 간의 거리(z), 시편의 이동 간격(M)을 정리하였다.



(a)



**Figure 6** (a) The experiment method (b) The disposition of specimen and apparatus

**Table 2** The condition of the experiment

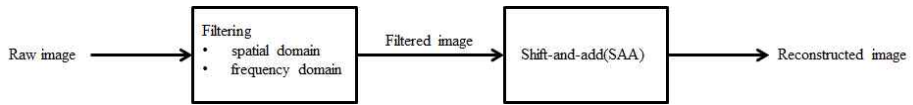
#	D(mm)	z(mm)		M(mm)
		min	max	
1		12.55	188.75	
2	545	11.53	188.68	5
3		12.03	189.20	
4		10.13	187.96	

(D=distance between source and detector, z=distance between specimen and detector, M=moving distance of detector and source)

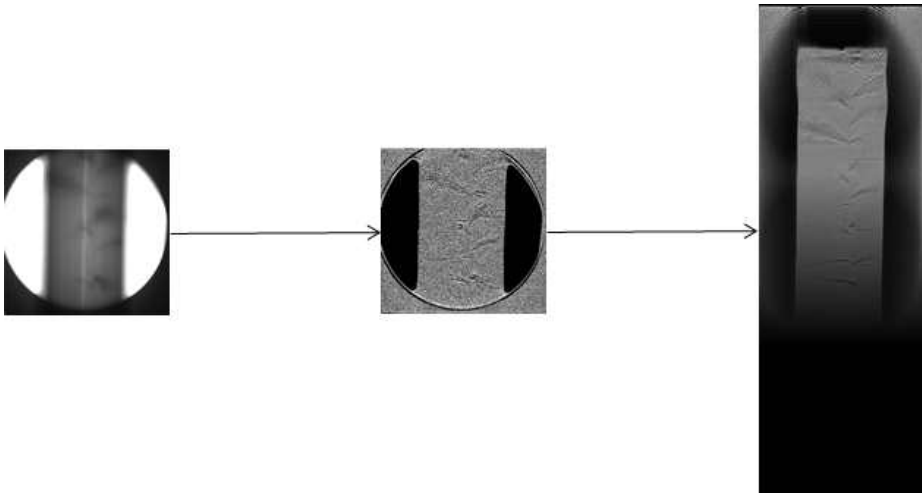
## 3.4 영상 처리

### 3.4.1 영상 처리 과정

X선을 투과하여 얻은 원본 영상은 공간 영역 또는 주파수 영역에서 필터 함수를 연산하여 각 영상을 디블러링 한 뒤, shift-and-add(SAA) 법을 사용하여 투과 깊이별 영상을 재구성한다. 영상 처리 과정의 모식도는 다음과 같다(Figure 7).



(a)



(b)

**Figure 7** (a) The flow chart of image reconstruction process  
(b) Images of each step

## 3.4.2 영상 필터링

### 3.4.1.1 공간영역

IMG 형식의 파일로 저장된 각 영상을 TIF 형식의 파일로 변환하고, 획득한 영상의 블러를 제거하여 영상의 품질을 높이기 위해 필터링 과정을 진행하였다. 필터링은 공간 영역과 주파수 영역에서 작용하였다.

공간 영역 필터링은 입력 영상의 각 화소와 그 이웃에 대응하는  $3 \times 3$  커널(kernel)을 이용하여 연산하고, 필터를 화소별로 이동하여 최종적으로 모든 화소에 대한 연산 결과인 응답함수(response function)를 이용하는 방법으로 공간 컨벌루션이라고도 한다 (Gonzalez 외, 2004) (Eq. 1).

$$g(x,y) = f(x,y) \otimes h(x,y) \quad (1)$$

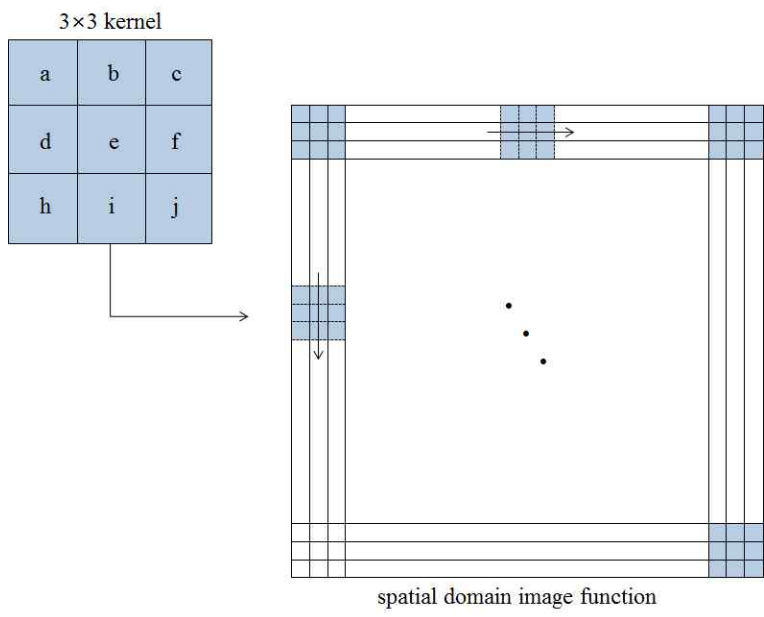
( $g$ =응답 함수,  $f$ =공간 영역 영상 함수,  $h$ =공간 영역 필터 함수,  $\otimes$ : 컨벌루션)

Figure 8과 같이 필터링을 통해 영상의 각 화소값은 이웃 화소값과 평탄화(smoothing) 또는 선명화(sharpening)가 일어나게 되며, 필터링 된 영상을 원본 빼거나 더하는 방법으로 영상을 더 선명하게 만들 수 있다(Eq. 2).

$$f_{filter}(x,y) = f(x,y) \pm g(x,y) \quad (2)$$

( $f_{filter}$  = 필터링 된 영상 함수)





**Figure 8** The principle of spatial domain filter  
(The coefficient of kernel varies on filters.)

### 3.4.1.2 주파수 영역

주파수 영역 필터링은 2차원 고속 푸리에 변환(2D Fast Fourier Transform, 2D FFT)을 이용해 공간 영역의 영상을 주파수 영역으로 재배열하여 필터 함수를 곱하고, 다시 역푸리에 변환을 통해 공간 영역으로 전환하는 방법이다. 필터 함수의 종류에 따라 고주파 성분을 감쇠시켜 영상을 부드럽게 만드는 저역통과 필터(low pass filter), 저주파 성분을 감쇠시켜 영상을 선명하게 만드는 고역통과 필터(high pass filter), 특정 대역의 주파수만 감쇠하거나 통과하는 대역통과 필터(band pass filter), 특정 주파수 이상 또는 이하값을 0으로 만드는 주파수 영역 필터의 단점을 보완하여 특정 주파수 영역을 감쇠시키는 창함수(window function)가 연구되고 있다(Lu와 Antoniou, 2000). 주파수 영역 필터는 근접한 화소 사이의 밀도값을 조정하는 공간 영역 필터와 달리 특정 주파수 영역을 감쇠시켜 더 명확한 영상을 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 창함수 필터인 해닝 필터(hanning window filter)(Eq. 3, Figure 9(a)), 삼각 필터(triangular window filter)(Eq. 4, Figure 9(b)), 바틀렛 필터(bartlett window filter)(Eq. 5, Figure 9(c))를 사용하여 영상을 필터링하였다(Fig 9).

$$w(n) = 0.5 \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \right] \quad (3)$$

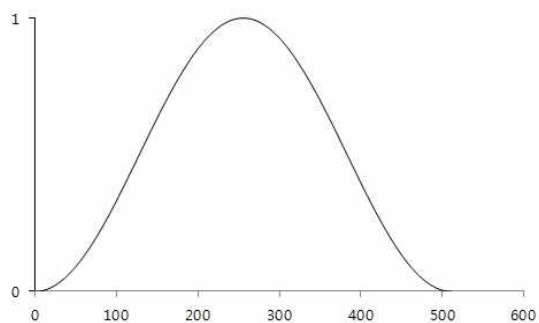
( $N$ =the number of pixel,  $n$ =the disposition of pixel)

$$w(n) = \begin{cases} \frac{2n}{N} & \left(0 \leq n \leq \frac{N}{2}\right) \\ 2 - \frac{2n}{N} & \left(\frac{N}{2} \leq n \leq N\right) \end{cases} \quad (4)$$

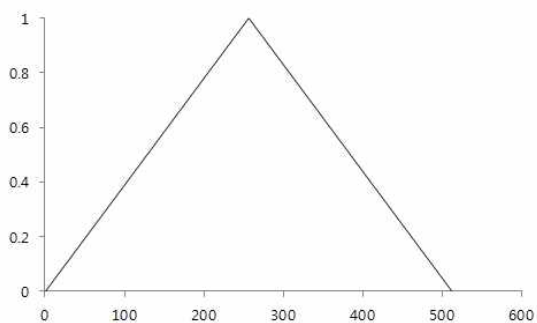
( $N$ =the number of pixel,  $n$ =the disposition of pixel)

$$w(n) = \begin{cases} \frac{2n-1}{N} & \left(0 \leq n \leq \frac{N}{2}\right) \\ 2 - \frac{2n-1}{N} & \left(\frac{N}{2} + 1 \leq n \leq N\right) \end{cases} \quad (5)$$

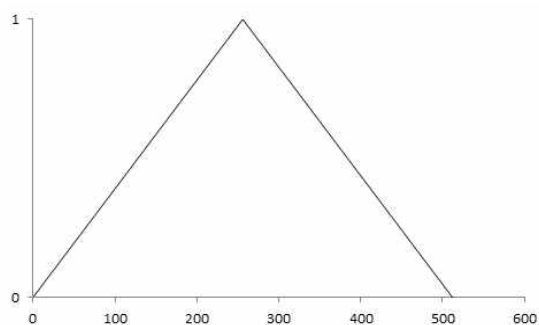
( $N$ =the number of pixel,  $n$ =the disposition of pixel)



(a) Hanning filter



(b) triangular filter



(c) Bartlett filter

**Figure 9** Window filters ( $N=512$ )

### 3.4.2 촬영 조건에 따른 영상 재구성 방법

필터링된 영상은 Shift-and-add(SAA)법을 응용하여 투과 깊이 별 영상으로 재구성하였다. Figure 10과 같이 촬영 조건을 이용하여  $z$ 평면에 있는 특정 위치  $t$ 를 가정해 영상 사이의 위상차를 계산하였다.

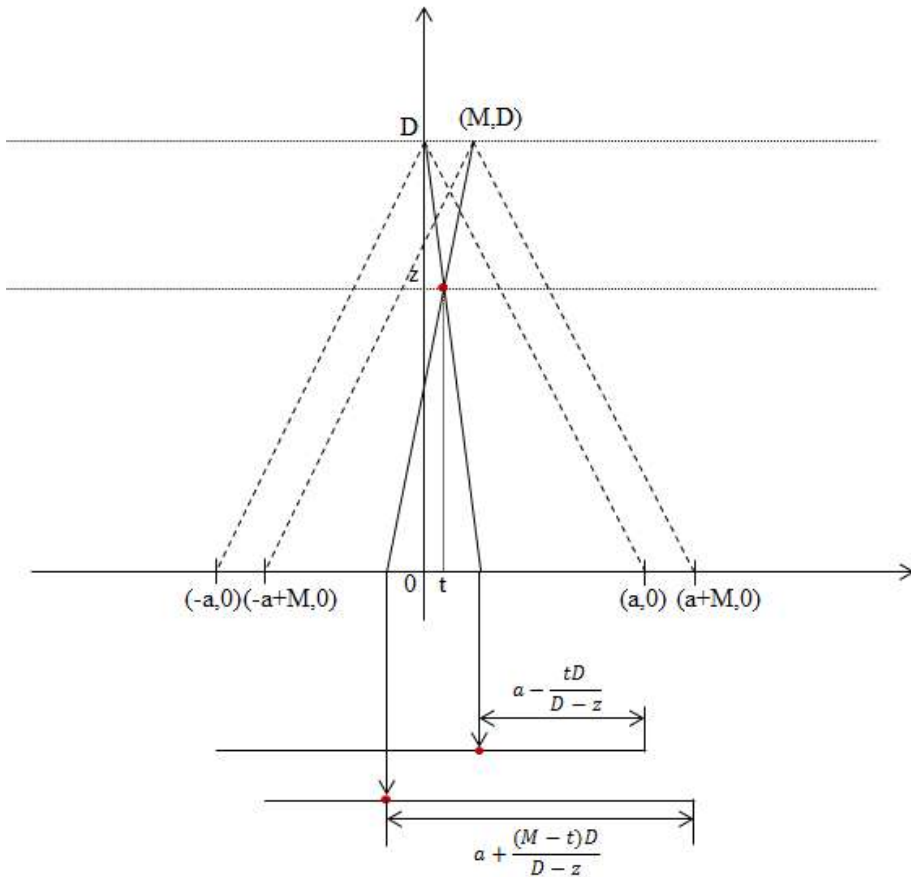


Figure 10 Phase difference calculation

Figure 10에서 볼 수 있듯이 획득한 영상을  $I_{shift}$  만큼 이동하면  $z$  평면의 영상에 초점이 맞추어진다. 따라서  $z$  위치의 평면을 재구

성하기 위해서는 Eq. 6에서 구한  $I_{shift}$ 의 간격으로 획득된 영상들을 이동(shift)한 후 영상을 모두 더하여(add) 재구성 영상을 획득하였다.

$$I_{shift} = \left\{ a + \frac{(M-t)D}{D-z} \right\} - \left( a - \frac{tD}{D-z} \right) = \frac{MD}{D-z} \quad (6)$$

( $I_{shift}$ =영상을 shift할 간격[mm],  $2a$ =디텍터의 길이[mm],  $M$ =시편의 이동 간격[mm],  $D$ =시편별 선원과 디텍터 사이의 거리[mm],  $z$ =목재 시편과 디텍터 사이의 거리[mm])

일련의 영상 처리 과정은 Matlab R2017b(Mathworks, 미국)을 이용하여 진행하였다.

### 3.5 필터별 용이 검출 정확도 분석

#### 3.5.1 실제 단면과 X선 재구성 단면 간 영상 비교

목재 시편을 길이 방향으로 자른 실제 단면과 필터를 포함해 재구성한 X선 영상의 단면을 비교하였다. 실제 단면은 재구성 영상 단면의 깊이를 고려하여 절단면을 지정하였다(Figure 11).

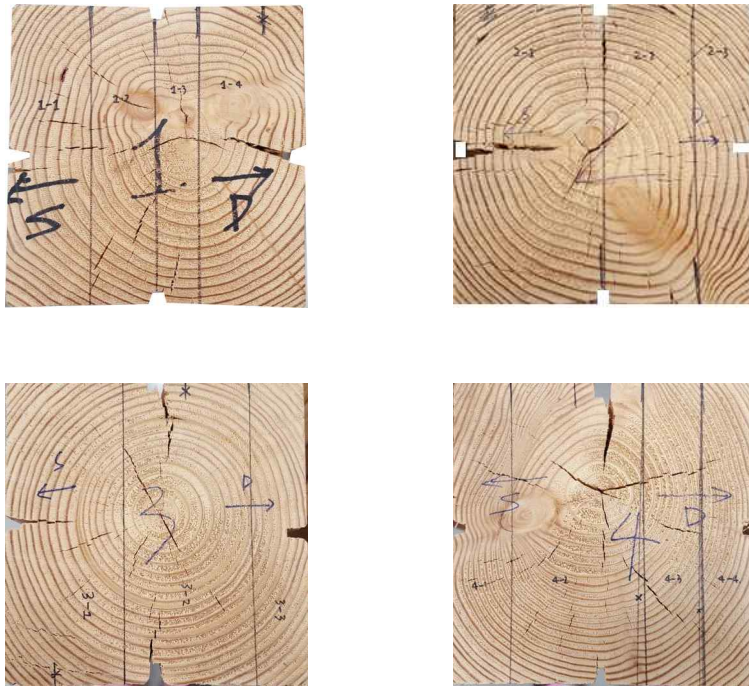


Figure 11 Cutting disposition on the cross-section of specimen

### 3.5.2 필터별 옹이 식별 능력 평가

필터별 단면 간 옹이 식별 능력을 비교 및 정량적 평가를 위해 영상의 동일한 부분을 지정하여 그레이스케일의 평균값(Eq. 7)과 변동계수(coefficient of variance, c.o.v.) (Eq. 8)를 비교하였다.

영상 중 일부 영역을 지정하여 그레이스케일의 평균값을 구하였다. 영역별 평균값 비교를 통해 식별 정확도를 평가하였다.

각 영역의 변동계수가 클수록 영상에서 영역 내부와 윤곽선의 명도 차이가 커져 영상의 식별이 가능하므로 각 영역별 변동계수를 구하였다.

본 연구에서는 단면에서 옹이가 위치한 부분, 블러링 된 부분, 건전한 부분 중  $48 \times 48$  픽셀을 선택하여 평균과 변동계수를 계산하였다.

$$m_a = \frac{\sum_{i=1}^{N_a} p_{a,i}}{N_a} \quad (7)$$

$$c.o.v._a = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_a} (p_{a,i} - m_a)^2}{N_a - 1}}}{m_a} \times 100 \quad (8)$$

( $c.o.v._a$ =a영역의 변동계수(coefficient of variance, %),  $p_{a,i}$ =a영역의 i번째 픽셀의 그레이스케일의 자연로그,  $N_a$ =a영역의 픽셀 개수,  $m_a$ =a영역의 평균)



## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 재구성 영상 획득

재구성 영상 단면은 선원과 목재 시편, 디텍터 사이의 거리에 따라 단면의 개수가 달라지며 본 연구에서는 평균 17장의 단면을 획득하였다. 실험 시편의 X선 투과 깊이가 평균 177.09mm이므로 10 mm 간격으로 영상을 획득하였음을 확인할 수 있었다(Table 3).

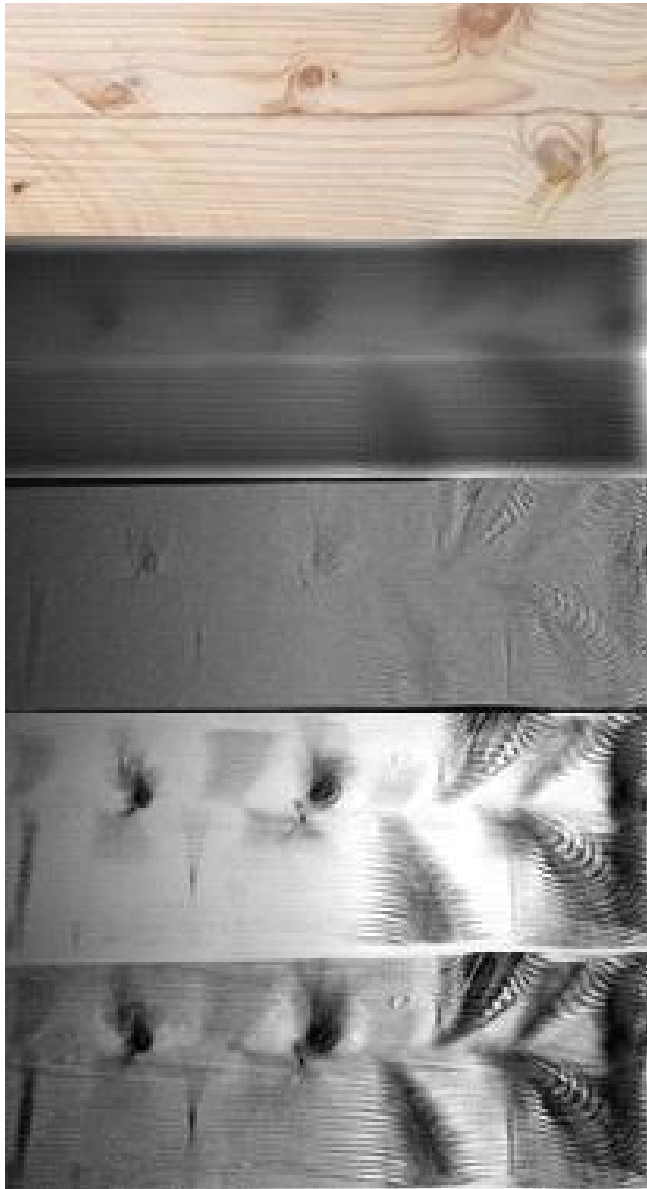
**Table 3** The number of reconstructed images

	Depth [mm]	Distance between X-ray source and detector [mm]	Distance between detector and specimen [mm]		The number of reconstructed images
			minimum	maximum	
1	176.20	545.00	12.55	188.75	17
2	177.15	545.00	11.53	188.68	17
3	177.17	545.00	12.03	189.20	17
4	177.83	545.00	10.13	187.96	17
mean	177.09	545.00	11.56	188.65	17

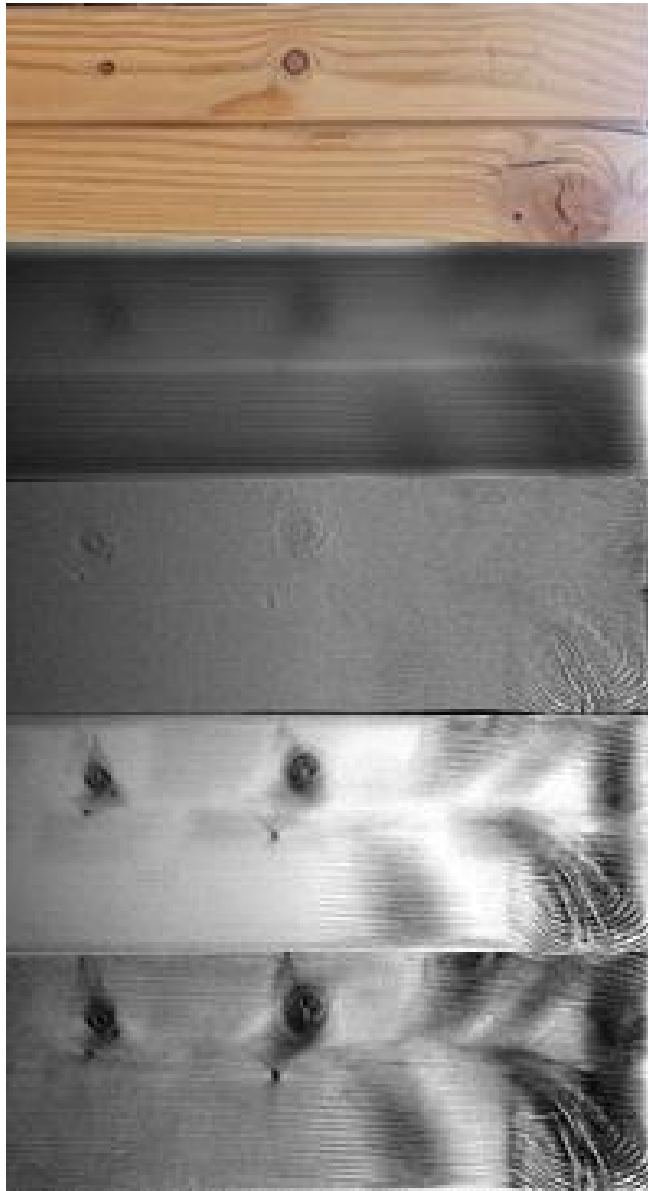
## 4.2 필터별 재구성 영상의 정량적 평가

Figure 12부터 15까지는 4개의 시편에 대한 실제 단면과 디블러링 과정을 거쳐 재구성한 영상 단면을 실제 단면-필터 미적용재구성 영상-해닝 필터 적용 재구성 영상-삼각 필터 적용 재구성 영상-바틀렛 필터 적용 재구성 영상 순으로 비교하였다.

필터 미적용 영상의 경우 실제 단면과 다르게 다른 평면의 옹이가 해당 영상에 보여지는 것을 확인할 수 있는데 이는 블러링에 의해 나타난 형상이며 단층영상합성법의 단점이다. 필터를 적용한 경우 디블러링 효과로 다른 평면의 옹이가 해당 영상에 다소 제거되어 나타나는 것을 시각적으로 확인할 수 있었다.



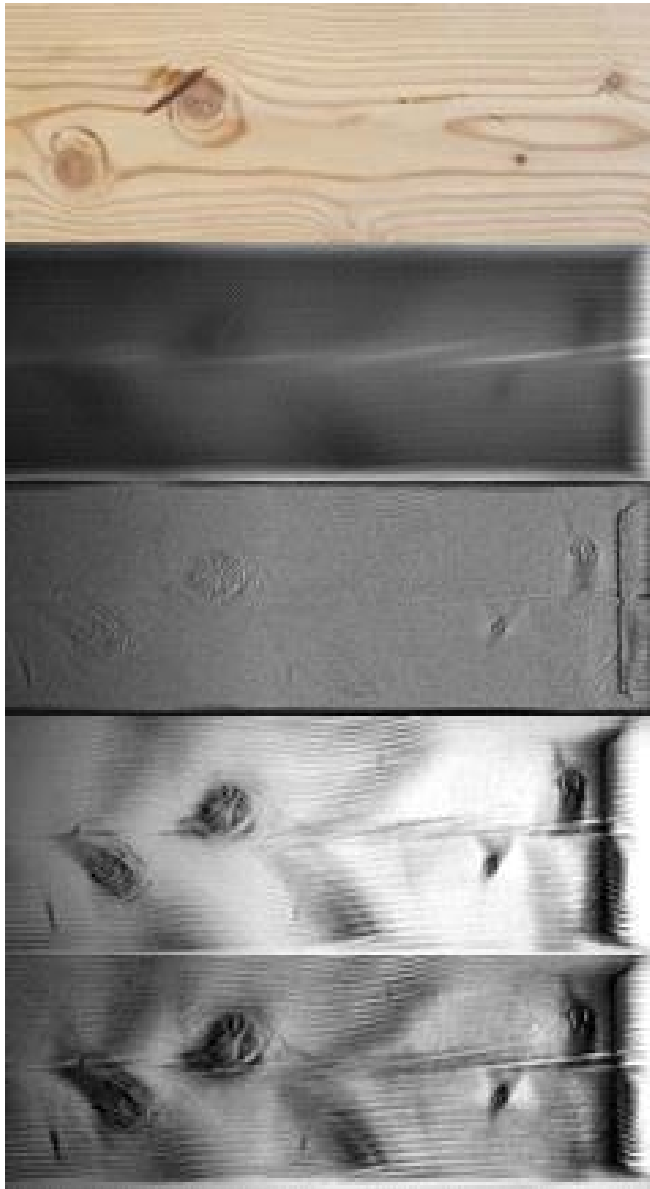
(a)



(b)

**Figure 12** Comparison with real image and reconstructed image of specimen #1

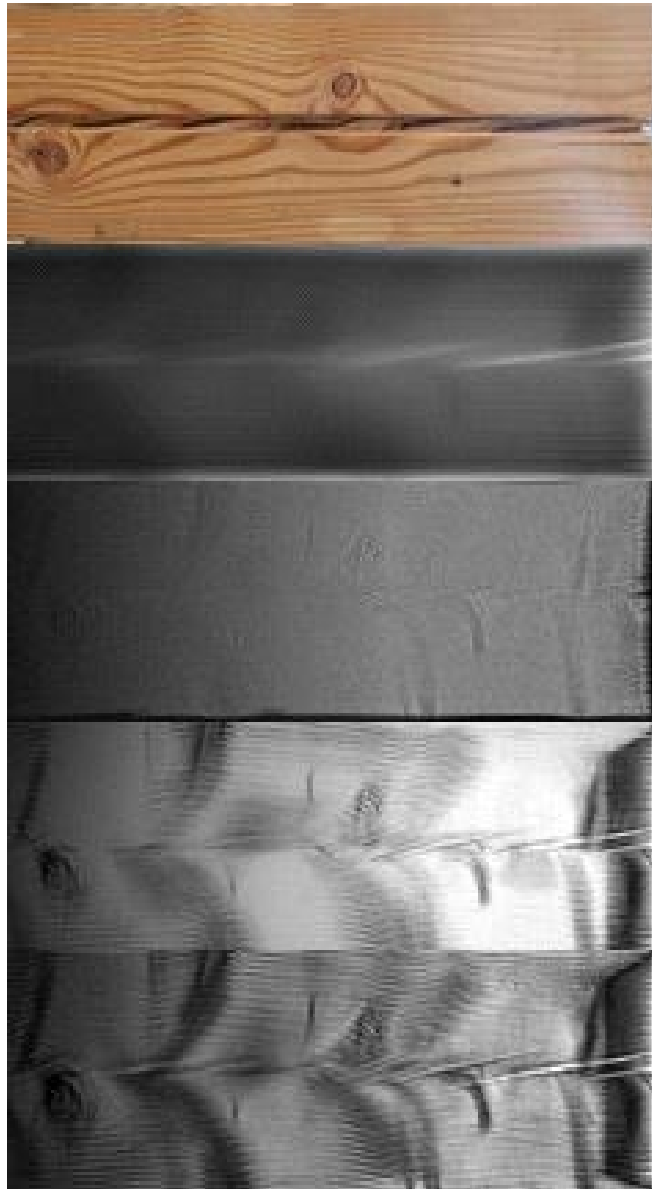
(Position in this order: Detector-(a)-(b)-source)



(a)



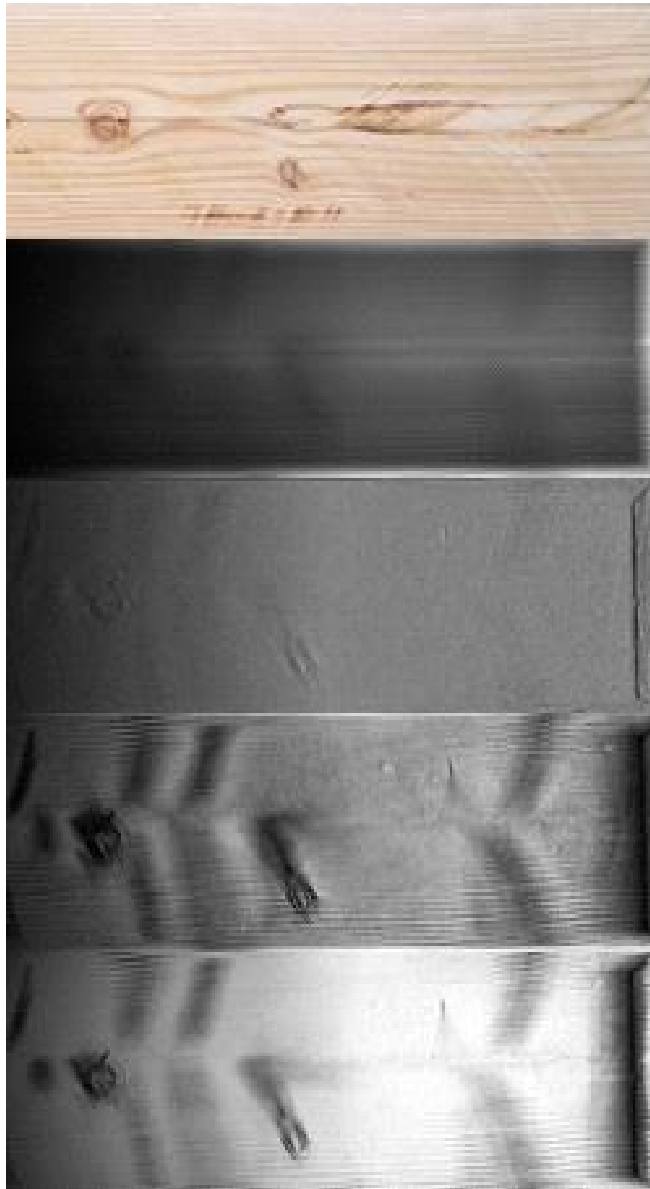
(b)



(c)

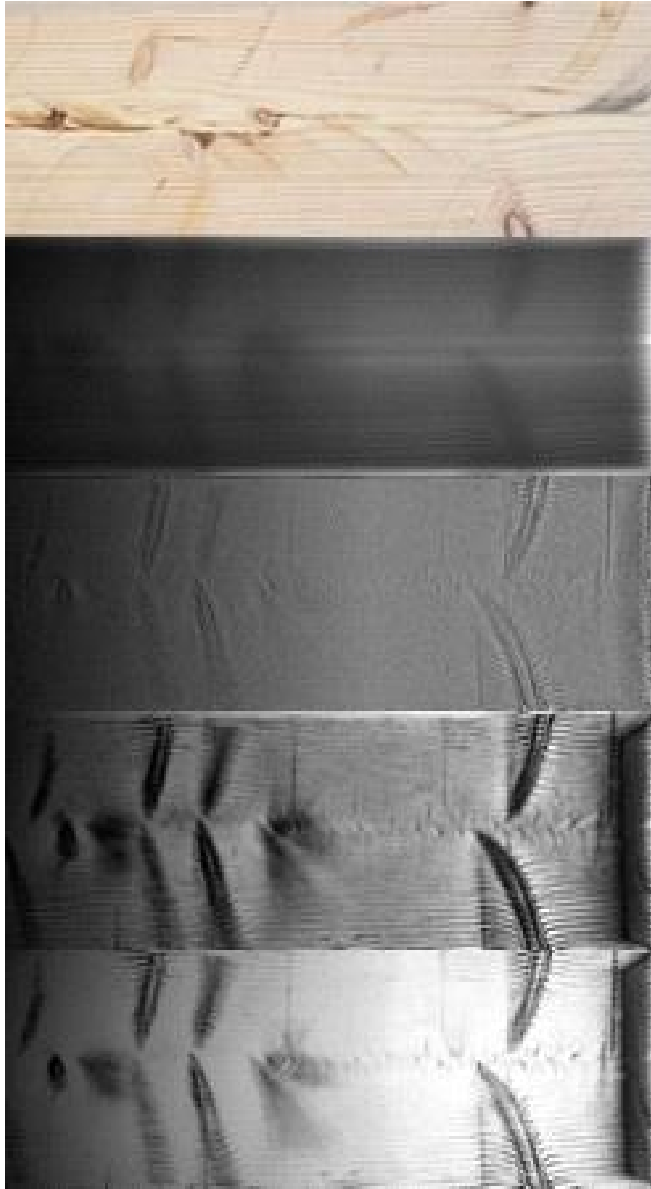
**Figure 13** Comparison with real image and reconstructed image of specimen #2

(Position in this order: Detector – (a) – (b) – (c) – source)



(a)





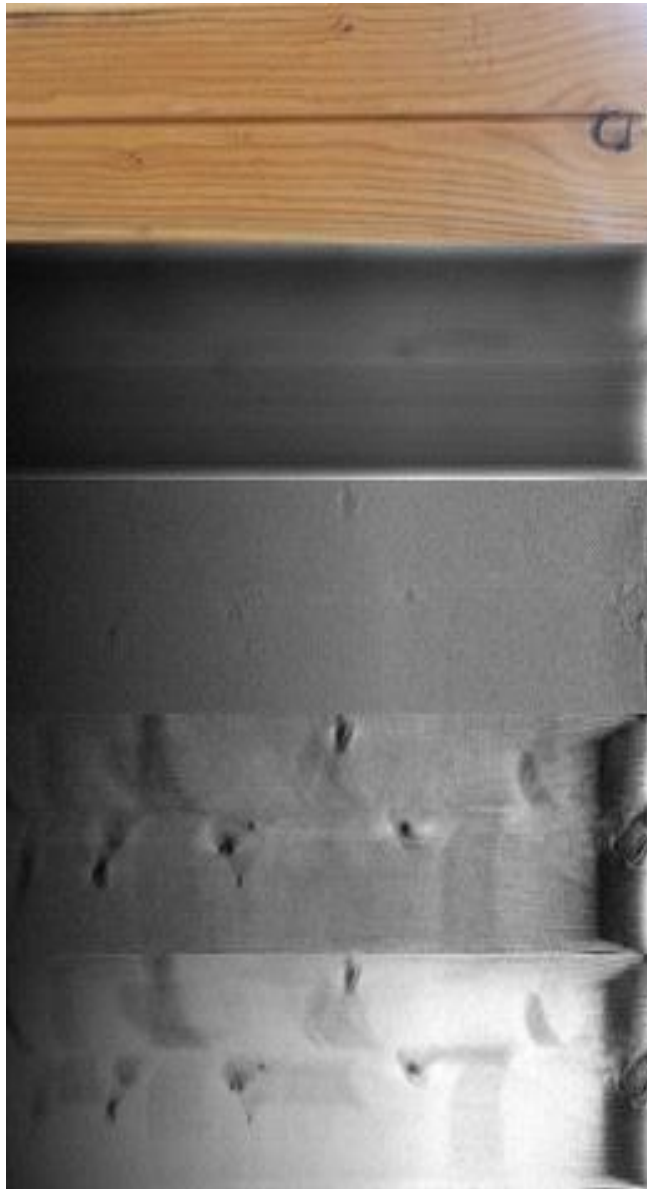
(b)

**Figure 14** Comparison with real image and reconstructed image of specimen #3

(Position in this order: Detector-(a)-(b)-source)



(a)



(b)

**Figure 15** Comparison with real image and reconstructed image of specimen #4

(Position in this order: Detector-(a)-(b)-source)

필터의 효과를 비교하기 위하여 Table 4부터 7까지는 각 단면에 대한 평균-지수와 변동계수-지수를 계산하였다. 평균-지수(mean-index)는 용이 내부, 블러, 건전부 영역을 지정하여 각 영역의 평균 그레이스케일을 비교하였다. 변동계수-지수(c.o.v.-index)는 각 영역의 변동계수(coefficient of variance, c.o.v.)를 계산하였다.

**Table 4** Quantification using index in specimen #1

		no filter	hanning filter	triangular filter	bartlett filter
Mean -index	$m_{knot}$	0.26	0.50	0.62	0.39
	$m_{blur}$	0.30	0.49	0.72	0.52
	$m_{sound}$	0.30	0.46	0.79	0.49
	$m_{knot}/m_{blur}$	0.86	1.08	0.79	0.78
	$m_{knot}/m_{sound}$	0.87	1.02	0.86	0.74
	$m_{blur}/m_{sound}$	0.99	1.06	0.91	1.05
c.o.v. -index	$c.o.v._{knot}$	19.98	23.78	32.69	60.54
	$c.o.v._{blur}$	19.14	15.27	34.32	66.05
	$c.o.v._{sound}$	11.42	12.41	4.14	12.97
	$c.o.v._{knot}/c.o.v._{blur}$	1.04	1.56	0.95	0.92

**Table 5** Quantification using index in specimen #2

		no filter	hanning filter	triangular filter	bartlett filter
Mean -index	$m_{knot}$	0.24	0.40	0.48	0.29
	$m_{blur}$	0.25	0.49	0.63	0.39
	$m_{sound}$	0.33	0.50	0.94	0.65
	$m_{knot}/m_{blur}$	0.95	0.82	0.76	0.73
	$m_{knot}/m_{sound}$	0.71	0.80	0.51	0.44
	$m_{blur}/m_{sound}$	0.75	0.98	0.67	0.60
c.o.v. -index	$c.o.v._{knot}$	9.84	30.06	34.13	48.59
	$c.o.v._{blur}$	32.02	29.33	38.48	60.89
	$c.o.v._{sound}$	6.05	18.84	2.16	8.97
	$c.o.v._{knot}/c.o.v._{blur}$	0.31	1.02	0.89	0.80

**Table 6** Quantification using index in specimen #3

		no filter	hanning filter	triangular filter	bartlett filter
Mean -index	$m_{knot}$	0.13	0.48	0.61	0.41
	$m_{blur}$	0.25	0.49	0.82	0.51
	$m_{sound}$	0.33	0.50	0.92	0.55
	$m_{knot}/m_{blur}$	0.37	0.96	0.67	0.75
	$m_{knot}/m_{sound}$	0.49	0.97	0.75	0.81
	$m_{blur}/m_{sound}$	0.76	0.99	0.90	0.92
c.o.v. -index	$c.o.v._{knot}$	9.24	21.50	27.64	43.36
	$c.o.v._{blur}$	6.12	13.05	21.81	42.28
	$c.o.v._{sound}$	4.81	9.44	2.71	9.84
	$c.o.v._{knot}/c.o.v._{blur}$	1.51	1.65	1.27	1.03

**Table 7** Quantification using index in specimen #4

		no filter	hanning filter	triangular filter	bartlett filter
Mean -index	$m_{knot}$	0.26	0.50	0.83	0.51
	$m_{blur}$	0.31	0.50	0.82	0.53
	$m_{sound}$	0.33	0.50	0.94	0.58
	$m_{knot}/m_{blur}$	0.83	0.05	0.04	0.07
	$m_{knot}/m_{sound}$	0.79	0.04	0.07	0.07
	$m_{blur}/m_{sound}$	1.05	0.99	1.15	1.09
c.o.v. -index	$c.o.v._{knot}$	7.05	11.02	4.80	12.80
	$c.o.v._{blur}$	9.73	8.27	8.62	13.90
	$c.o.v._{sound}$	4.02	9.33	1.60	8.21
	$c.o.v._{knot}/c.o.v._{blur}$	0.72	1.33	0.56	0.92

**Table 8** The mean statistics of mean-index and c.o.v-index for all specimens

		no filter	hanning filter	triangular filter	bartlett filter
Mean -index	$m_{knot}$	0.22	0.47	0.64	0.40
	$m_{blur}$	0.28	0.49	0.75	0.49
	$m_{sound}$	0.32	0.49	0.90	0.57
	$m_{knot}/m_{blur}$	0.75	0.73	0.57	0.58
	$m_{knot}/m_{sound}$	0.72	0.71	0.55	0.52
	$m_{blur}/m_{sound}$	0.89	1.01	0.91	0.92
c.o.v. -index	$c.o.v._{knot}$	11.53	21.59	24.82	41.32
	$c.o.v._{blur}$	16.75	16.48	25.81	45.78
	$c.o.v._{sound}$	6.58	12.51	2.65	10.00
	$c.o.v._{knot}/c.o.v._{blur}$	0.90	1.39	0.92	0.92

평균-지수와 변동계수-지수를 평균하여 정리하였다(Table 8). 그 결과 용이와 건전부의 식별( $m_{knot}/m_{sound}$ )은 필터를 적용했을 때 필터 미적용에 비해 값이 낮으며 이는 건전부의 그레이스케일이 더 크고(밝고) 상대적으로 용이가 더 어둡기 때문에 더 명확하게 보이는 것을 의미한다. 용이와 블러의 식별( $m_{knot}/m_{blur}$ ) 역시 필터를 적용했을 때 필터 미적용에 비해 값이 낮으며 이는 용이와 블러의 명도 차이가 크다는 것을 의미한다. 블러와 건전부의 식별( $m_{blur}/m_{sound}$ )은 필터 미적용 영상에 비해 필터를 적용했을 때 1에 가까운 값을 나타낸다. 이는 블러와 건전부가 비슷한 그레이스케일을 가진다는 의미로 명도차가 크지 않아 블러가 필터에 의해 일부 제거된 것으로 사료된다. 세 종류의 필터 중 삼각 필터와 바틀렛 필터는 용이와 다른 부분의 명도차에 의한 구분이 용이하고, 해닝 필터는 블러가 제거되어 용이를 상대적으로 명확하게 구분하여 볼 수 있다.

반면 용이와 블러의 변동계수비( $c.o.v._{knot}/c.o.v._{blur}$ )는 해닝 필터가

가장 높은데, 이는 블러에 비해 옹이가 내부 영역과 윤곽선의 명도 차가 커 구분이 뚜렷하여 더 명확하게 식별할 수 있음을 의미한다.

결과적으로 해닝 필터는 옹이 자체를 명확하게 식별할 수 있고, 블러는 필터에 의해 제거되기 때문에 가장 효과적으로 단면을 재구성할 수 있는 디블러링 방법으로 사료된다.



## 5. 결론

본 연구에서는 목재 시편을 이동시켜 얻은 영상을 재구성하는 알고리즘을 개발하고 블러를 최소화할 수 있는 필터를 선정하고자 분석을 실시하였다.

기계등급구분 시 X선 탐지의 효율성을 위해 디텍터와 선원을 고정시키고 목재를 선형 이동시켜 영상을 획득하는 촬영 조건을 구현하기 위한 알고리즘을 작성하였고, 시편에 의하여 단면 영상을 재구성할 수 있었다.

획득한 영상은 블러를 제거하기 위해 해닝 필터, 삼각 필터, 바틀렛 필터를 적용하여 깊이별로 단면을 재구성하였다. 분석 결과 해닝 필터를 사용했을 때 블러와 건전부 간 명도차가 적어 블러가 필터에 의해 제거되었고, 블러에 비해 옹이의 변동계수가 가장 크게 나타나 블러보다는 옹이가 선명하게 표현되는 것으로 확인되었다. 따라서 목재의 단면영상촬영법에서는 해닝 필터가 가장 적합한 것으로 사료된다.

## 6. 참고문헌

강보선, 2008, “Hann 필터의 cut-off 주파수 변환에 따른 CT 영상 artifact 제거효과에 대한 정량적 평가”, 한국방사선학회 논문지, v. 2, n. 3, p. 5-9

국립산림과학원 고시 제2017-9호, 2017, ‘목재제품 규격과 품질 기준’, 국립산림과학원

김철기, 2016, “Nondestructive evaluation of wood with reconstructed polychromatic x-ray image”, 서울대학교 박사논문

오정권, 2009, Development of bending strength prediction model for structural lumber using x-ray radiation, 서울대학교 박사논문

이전제, 2017, “목재의 비파괴원리 및 적용”, 서울대학교 출판문화원

Deng G, 2011, “A generalized unsharp masking algorithm”, IEEE trans., Image processing, v. 20, n. 5, p. 1249-1261

Dobbins JT, Godfrey DJ, 2003, “Digital x-ray tomosynthesis: Current state of the art and clinical potential”, Medical Physics, v. 48, p. R65-R106

Dobbins JT, 2009, “Tomosynthesis imaging: At a

translational crossroads” , Medical Physics, v. 36, n. 6, p. 1956–1967

Godfrey DJ, 2005, “Optimization and clinical implementation of matrix inversion tomosynthesis (MITS) for the detection of subtle pulmonary nodules” , Doctoral dissertation, University of Duke

Gonzalez RC 등, 2004, “Digital image processing using MATLAB” , Prenticehall

Kolokytha S, 2015, “On-belt tomosynthesis: 3D imaging of baggage for security inspection” , Doctoral dissertation, University College London

Larsen HJ, 2001, “Properties affecting reliability design of timber structures” , The proceedings of COST E24 seminar on reliability of timber structures

Lu WS, Antoniou A, 2000, “Design of digital filters and filter banks by optimization: A state of the art review” , the proceeding of 10<sup>th</sup> European signal processing conference

Miller ER 등, 1971, “An Infinite Number of Laminagrams from a Finite Number of Radioqraps” , Radiology, v. 98, p. 249–255

Niklason LT 등, 1997, “Digital tomosynthesis in breast imaging” , Radiology, v. 205, n. 2, p. 399–406

Oh JE 등, 2012, “Application of digital tomosynthesis (DTS) of optimal deblurring filters for dental x-ray imaging” , Journal of the Korean physical society, v. 60, n. 6, p. 1161–1166

Schajer GS, 2001, “Lumber strength grading using x-ray scanning” , Forest product journal, v. 51, n. 1, p. 43–50

Zhao B, Zhao W, 2008, “Three-dimensional linear system analysis for breast tomosynthesis” , Medical physics, v. 35, n. 12, p. 5219–5232

## **Abstract**

Hyeon-jeong Lee  
Program in Environmental Material Science  
Department of Forest Science  
The Graduated School  
Seoul National University

The purposes of this study are to establish the applicable conditions for the quality inspection of large-scale structural timber and to select the filter which can minimize the blur that is a disadvantage of tomosynthesis.

The set-up condition for acquiring images by fixing the detector and x-ray tube and moving specimen was decided. After applying the hanning filter, the triangular filter, and the bartlett filter to remove blur, the reconstructed image was made by the algorithm for the set-up condition.

Comparing the actual image with the reconstructed image, it was confirmed that the blur was eliminated by filters because the lightness difference between blur area and sound area was the smallest. Also knots could be more clearly distinguished than blur because the coefficient of variance of knots was relatively larger than that of blur.

Therefore, it is considered that the hanning filter is most suitable for

tomosynthesis of large-scale structural timber.

**Keywords:** structural timber, X-ray, tomosynthesis, deblurring, hanning filter, shift-and-add