

# 영흥도선의 화학적 특성

차미영<sup>1</sup>

국립해양문화재연구소 수중발굴과

## Chemical Characteristics of Timbers from the Yeongheungdo Shipwreck

Mi Young Cha<sup>1</sup>

Underwater Excavation & Conservation Division, National Research Institute of Maritime  
Cultural Heritage, Taean, 32112, Korea

<sup>1</sup>Corresponding Author: [cmy0403@korea.kr](mailto:cmy0403@korea.kr), +82-41-675-2031

**초록** 영흥도선은 인천 옹진군 섬업벌 해역에서 인양된 통인신라시대의 고선박이다. 이 고선박의 상태를 파악하기 위하여 최대함수율과 온수추출, 알카리추출, 유기용매추출, 리그닌, 홀로셀룰로오스, 회분 분석을 통한 화학조성 분석과 FT-IR 및 solid state <sup>13</sup>C NMR, XRD을 통해 화학적 특성을 조사하였다. 영흥도선 선체편 외층의 최대함수율은 평균 623%로 수침고목재의 전형적인 특징인 셀룰로오스 감소에 따른 리그닌의 상대적인 증가 및 회분이 증가하는 현상을 보여주었다. 즉 영흥도선 선체편 외층의 셀룰로오스 흡수피크는 소멸되거나 현저하게 감소되어 나타났다. 또한 리그닌을 나타내는 흡수피크는 급격하게 증가하였다. 그러나 영흥도선 선체편 내층의 경우 헤미셀룰로오스와 일부 결정 및 비결정 영역의 셀룰로오스 흡수피크가 감소하여 나타났다. 따라서 영흥도선 선체편의 외층과 내층의 분해 정도의 차이가 큼을 보여주었다.

**중심어:** 수침고목재, 셀룰로오스, 리그닌, 분해, 영흥도선

**ABSTRACT** The Yeongheungdo shipwreck was excavated in the sea of Seomeopbeol, Ongjin-gun, Incheon, Korea. Chemical characterization of timbers from the shipwreck occurred via maximum moisture content, chemical composition, FT-IR, solid state <sup>13</sup>C NMR, and XRD analyses. As maximum moisture content of the outer part of the timbers averaged 623%, a phenomenon in that lignin increased relatively, according to the decrease in cellulose, and the ash content increased, which is typical of waterlogged archaeological wood was shown. The results from the FT-IR and solid state <sup>13</sup>C NMR analyses showed that the cellulose band of the outer part had disappeared or had remarkably decreased. In addition, the bands assigned to lignin dramatically increased. However, regarding the inner part of the timbers, hemicellulose and some crystalline cellulose and amorphous cellulose bands decreased. Therefore, a large difference exists between the degradation levels of the outer and inner parts of the timbers of the Yeongheungdo shipwreck.

**Key Words:** Waterlogged archaeological wood, Cellulose, Lignin, Degradation, Yeongheungdo shipwreck

### 1. 서론

영흥도선은 2013년 인천 옹진군 섬업벌 해역에서 인양

된 고선박으로 잔존 크기는 길이 6 m, 폭 1.4 m이다. 이 고선박은 선체 구조 및 결구 방식이 경주 안압지선과 유사하다는 것, 8~9C에 제작된 것으로 추정되는 파도무늬 도기

병이 선체 내부에서 발굴되었다는 것, 중앙 저판의 방사성 탄소연대측정 후 위글매치(wiggle matching)법으로 분석한 결과 95.4%의 신뢰구간에서 A.D. 710~730년과 A.D. 750~774년으로 확인된 것을 종합하여 통일신라시대로 편년되었다(National Research Institute of Maritime Cultural Heritage, 2014).

우리나라 해역에서 수중 발굴된 고선박은 모두 14척으로 약 500여 년~1200여 년간 해양에 매장되어 있다가 발굴되었다. 이와 같이 수백 년간 해양에 매장되어 있다가 발굴된 수침고목재는 바닷물과의 화학작용, 미생물과 해양 천공동물의 침해로 목재의 화학적, 물리적, 미시형태적 특징이 변화된다(Grattan, 1987). 또한 난파선과 같이 크기가 큰 대형의 수침고목재는 하나의 선체편 내에서도 분해 정도의 차이가 크다(Kim, 1990b). 따라서 고선박과 같은 대형의 수침고목재는 보존처리에 앞서 상태 파악 및 보존처리를 위한 기초자료를 얻고자 화학적 특성 분석을 진행한다.

De Jong(1977)은 수침고목재의 상태를 최대함수율에 따라 3가지 등급으로 구분하여 열화정도를 판단할 수 있는 근거를 제시하였고, Jensen and Gregory(2006)는 수침고목재의 물리적 특성을 파악할 수 있는 다양한 방법을 제시하였다. Hoffmann(1981), Hoffmann and Jones(1990)은 수침고목재의 화학적 열화 특징을 현미경적 연구 방법을 통해 설명하였다. 국내 연구진은 1990년대 신안선(Kim, 1990b), 완도선(Kim, 1990a), 진도 통나무배(Kim, 1993)의 화학적 특성에 대한 연구를 진행한 바 있다.

1990년대 초까지는 수침고목재의 화학적 특성에 대한 연구는 추출물, 홀로셀룰로오스, 리그닌, 회분 등의 화학조성 분석과 FT-IR, GC, HPLC 등의 분석을 통해 진행되었다면(Hoffmann, 1981; Hedges, 1990; Hoffmann and Jones,



**Figure 1.** Samples for analysis of maximum moisture content and general chemical composition.

1990; Kim, 1990a; Kim, 1990b; Kim, 1993), 최근에는 앞선 연구 방법과 함께 solid state  $^{13}\text{C}$  NMR,  $^{31}\text{P}$  NMR, XRD, GPC, ICP 등의 분석 방법을 적용하여 연구를 진행하고 있다(Bardet *et al.*, 2009; Salanti *et al.*, 2010; Lionetto *et al.*, 2014; Pizzo *et al.*, 2015; Oron *et al.*, 2016). 뿐만 아니라 TEM, CLSM 등의 현미경적 연구방법을 이용한 미시형태적 분해 특성과 선택적인 염색을 통해 세포내 리그닌 및 다당류의 분해에 대한 연구도 진행되고 있다(Kim and Singh, 2000; Björdaal, 2012; Singh, 2012). 이와 같은 연구를 통해 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스와 같은 다당류의 분해에 따른 리그닌 함량의 상대적인 증가라는 수침고목재의 특성이 도출된 것이다.

본 연구에서는 영흥도선의 보존처리에 앞서 최대함수율과 온도, 알카리, 유기용매 추출, 리그닌, 홀로셀룰로오스, 회분의 정량 분석을 통한 화학조성 분석과 FT-IR, solid state  $^{13}\text{C}$  NMR, XRD 분석법을 적용하여 영흥도선의 화학적 특성을 조사하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료

본 연구를 위해 영흥도선 선체편에서 시료를 임의로 채취할 수 없었던바 세척 중 선체에서 떨어진 편을 최대함수율과 화학조성 분석을 위한 시료로 사용하였다(Figure 1). 이 시료는 선체의 바깥면에서 떨어진 편으로 외층으로 규정하였다. 또한 연륜연대분석을 위해 채취하였던 연륜 core를 선체의 외층과 내층의 열화상태 비교를 위한 기기 분석 시료로 사용하였다(Figure 2). Core의 총 길이는 약 8.7 cm이며, 가장 바깥면의 2 cm를 외층 시료로 사용하였고, 수(pith)에 가까운 가장 안쪽 2 cm를 채취하여 내층 시료로 사용하였다. 영흥도선의 선체편은 소나무속 소나무류(*Pinus* spp.)로 식별되어(Kim and Cha, 2014) 건전한 소나무를 대조용 공시재료로 사용하였다.



**Figure 2.** Sample for analysis of FT-IR, solid state  $^{13}\text{C}$  NMR, XRD. (A) Outer part, (B) Inner part.

## 2.2. 방법

### 2.2.1. 최대함수율

분석 시료 중 최대함수율 측정을 위한 시료는 비커에 담아 감압탈기한 후 포수재로 만들었다. 포수재의 중량을 측정한 후 105°C에서 항량이 될 때까지 건조한 후 전건중량을 측정하였다(Jensen and Gregory, 2006).

$$MC_{\max} = \frac{M_{\text{swet}} - M_{\text{ms}}}{M_{\text{ms}}} \times 100$$

Where,  $MC_{\max}$  : mass of maximum water per mass of cell wall material(g/g)

$M_{\text{swet}}$  : mass of water in wet sample(g)

$M_{\text{ms}}$  : mass of cell wall material(g)

### 2.2.2. 화학조성 분석

수침상태의 분석 시료는 건조과정 중 발생할 수 있는 성분상의 변화를 최소화하기 위해 동결건조한 후 60~80 mesh의 크기의 목분을 제작하여 실험시료로 사용하였다. 목재의 추출성분은 온수(TAPPI T207), 알카리(1% NaOH, TAPPI T212) 및 유기용매(ethanol:benzene=1:2, TAPPI T204)를 TAPPI standard에 의해 정량하였다. 리그닌의 함량(%)은 72% 황산가수분해법에 의하여 정량하였고(TAPPI T222), 홀로셀룰로오스의 함량(%)은 Wise법(Wise *et al.*, 1946)에 따라 아염소산나트륨을 사용하여 정량하였다. 회분은 575°C의 탄화로에서 회화시킨 후 정량하였고(TAPPI T211) SEM-EDX를 통해 회분의 성분을 분석하였다.

### 2.2.3. 기기분석

에탄올과 벤젠혼액을 사용하여 추출한 탈지시료를 300 mesh 이하의 분말로 만든 후 적외선 분광분석(FT-IR), 고체상태  $^{13}\text{C}$  NMR(solid state  $^{13}\text{C}$  NMR), X선 회절분석(X-Ray Diffraction, XRD)의 시료로 사용하였다. FT-IR (SENSOR 27, Bruker Optics, Germany) 분석은 KBr에 공시재료를 0.5%로 혼합한 후 펠릿을 제작하여 분석하였다. Solid state  $^{13}\text{C}$  NMR(Bruker Avance 400, Bruker Optics, Germany)은 100.62 MHz에서 샘플의 회전 속도 13 kHz,

접촉시간은 1 ms, 채택한 완화 시간은 5 s, 획득시간은 10.3 ms의 조건에서 분석하였다. XRD(X'Pert PRO, PANalytical, Netherlands)는  $\text{CuK}\alpha$ 선을 이용하여 40 Kv, 30 mA의 조건에서 분석하였으며, Segal법에 의해 상대결정화도를 산출하였다(Segal *et al.*, 1959; Lee and Kim, 1992).

$$\text{Cr.(\%)} = [(I_{200} - I_{\text{am}}) / I_{200}] \times 100$$

Where,  $I_{200}$  : Diffraction intensity of (200),  $2\theta = 22.8^\circ$

$I_{\text{am}}$  : Diffraction intensity of amorphous region,  $2\theta = 18^\circ$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 최대함수율

영흥도선 선체편 외층의 최대함수율은 Table 1과 같다. 최대함수율 측정 시료 중 가장 높은 것은 837%, 가장 낮은 것은 391%, 평균은 623( $\pm 140$ )%로 측정되어 열화정도의 차이가 크다는 것을 확인할 수 있었다.

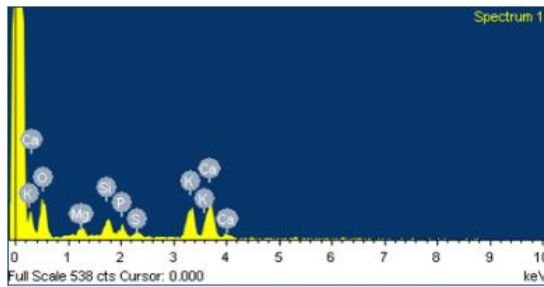
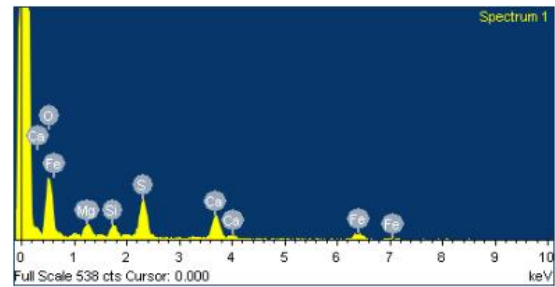
수침고목재의 최대함수율은 목재의 부후 정도와 관련이 있으며(Grattan, 1987) 수침고목재의 부후 정도를 측정하는데 사용되는 전통적인 방법이다(Kim *et al.*, 2004; Jensen and Gregory, 2006). 일반적으로 생재함수율(green moisture content)은 수종, 산지, 벌목계절, 수간의 부위 등에 따라 다르나, 30~200% 범위이고 한국 소나무는 115% 정도이다(The Korean Society of Conservation Science for Cultural Heritage, 2011). 따라서 생재함수율을 100% 내외로 고려한다면 목질부 1 kg에 대하여 약 1 kg의 수분을 함유한 상태이다(Sawada, 2000). 영흥도선 선체편 외층의 최대함수율은 평균 623%로 열화가 많이 진행된 상태를 알 수 있었다. 또한 De Jong(1977)은 수침고목재의 최대함수율에 따라 열화정도를 구분하였는데 평균함수율이 623%인 영흥도선 외층은 Class I(>400%)로 구분된다. 이는 건전한 상태가 거의 없고 내부까지 열화가 많이 진행된 상태를 나타낸다.

**Table 1.** Maximum moisture contents of outer part in waterlogged archaeological wood(%)

Samples	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Average
Maximum moisture contents	710	590	688	837	594	767	510	391	518	623

**Table 2.** General chemical composition of waterlogged and recent wood of *Pinus* spp.(%)

	Extractives			Holocellulose	Lignin	Ash
	Hot water	1% NaOH	Ethanol-Benzen			
Waterlogged archaeological wood (Outer part)	2.43	18.16	1.13	15.43	69.28	8.28
Recent wood	2.51	15.44	3.77	79.04	26.86	0.10

**Figure 3.** SEM-EDX diagram of the ash of recent wood.**Figure 4.** SEM-EDX diagram of the ash of waterlogged archaeological wood.

### 3.2. 화학조성 분석

영흥도선 선체편 외층의 화학조성분석 결과는 Table 2와 같다. 외층의 홀로셀룰로오스와 리그닌의 비율은 0.2 : 1, 건전재는 2.9 : 1의 비율로 홀로셀룰로오스는 급격하게 감소되었고 리그닌은 상대적으로 증가한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 다당류가 우선적으로 분해되어 상대적으로 리그닌이 증가한 것으로 수침고목재의 일반적인 특징이다(Hoffmann and Jones, 1990; Hedges, 1990; Kim, 1990a; Kim, 1990b).

추출물 중 알칼리 추출물의 함량은 증가하였는데 이것은 저분자의 다당류가 분해된 것을 의미한다. 또한 유기용매 추출의 감소는 수지성분이 분해되었음을 나타낸다.

선행 연구결과에 의하면 수침고목재의 회분 함량은 건전재에 비해 10~20배 높게 측정되는 것이 일반적이다(Hedges, 1990; Hoffmann and Jones, 1990; Kim, 1990a; Kim, 1990b; Giachi *et al.*, 2003). 그러나 영흥도선 외층의 회분은 8.28%로 건전재에 비해 82.8배 높게 분석되었다. 공시재료 회분의 주성분은 Figure 3과 같이 Ca, K, Si 등이다. 반면 외층 회분의 주성분은 S, Ca, Fe 등으로 S과 Fe의 함량이 높았다(Figure 4). S은 목재의 구성 성분은 아니며 배가 난파한 후 목재를 가해한 혐기성 세균의 대사과정

중 생성된 것으로 목재에 축적된 성분이다(Fors *et al.*, 2008). Fe은 선체가 해양에 매장되어 있을 때 목재 내부로 침투된 성분이다(Hedges, 1990; Giachi *et al.*, 2003; Cha *et al.*, 2006). 또한 영흥도선은 발굴 당시 개흙과 철부식화합물이 선체에 고착된 상태로 출수되었다(National Research Institute of Maritime Cultural Heritage, 2014). 또한 일부 선체편은 마치 석재와 같이 단단한 상태로 출수되었는데, 철제유물이 부식되면서 철화합물이 다공질인 목재 내부로 침투되어 나타난 현상이다. 실험에 사용한 시료는 철화합물이 고착된 시료가 아님에도 불구하고 회분함량이 높게 측정된 것은 영흥도선에 고착된 철화합물이 선체에 전체적으로 영향을 미치고 있음을 보여주는 결과이다. 영흥도선은 회분의 함량이 매우 높으므로 보존처리 시 치수안정화제의 침투를 용이하게 하여 좋은 보존처리 결과를 얻기 위해서는 세척이 무엇보다도 중요하다는 것을 시사해 준다.

### 3.3. FT-IR 분석

FT-IR 분석 결과는 Figure 5와 같다. 영흥도선 내층과 공시재료의 스펙트럼이 매우 유사하여 내층은 건전재와 매우 유사한 상태임을 알 수 있다. 그러나 xylan을 나타내는  $1730\text{ cm}^{-1}$ 가 내층과 외층의 스펙트럼에서 모두 소멸된

바 영흥도선의 내층의 헤미셀룰로오스도 분해되었음을 알 수 있다(Kuo *et al.*, 1988; Pizzo *et al.*, 2015; Oron *et al.*, 2016).

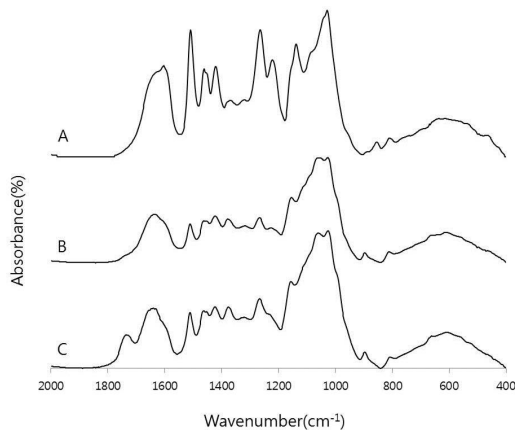
외층의 스펙트럼에서는 홀로셀룰로오스를 나타내는  $1060\text{ cm}^{-1}$ ,  $1030\text{ cm}^{-1}$ ,  $870\text{ cm}^{-1}$ 은 완전히 소멸되었고,  $1370\text{ cm}^{-1}$ 은 감소되어 나타났다. 또한 리그닌을 나타내는  $1510\text{ cm}^{-1}$ ,  $1270\text{ cm}^{-1}$ ,  $1230\text{ cm}^{-1}$ 은 급격하게 증가되어 나타났다. 이와 같은 결과는 다당류의 분해에 따른 리그닌의 상대적인 증가를 나타내는 것이다(Kuo *et al.*, 1988; Pizzo *et al.*, 2015; Oron *et al.*, 2016).

FT-IR 분석을 통해 영흥도선 외층과 내층의 화학적 조성의 차이가 큼을 확인할 수 있었다.

### 3.4. Solid state $^{13}\text{C}$ NMR 분석

영흥도선 외층과 내층의 화학적 특성을 파악 및 FT-IR 분석 결과를 보완하기 위해 진행하였던 solid state  $^{13}\text{C}$  NMR 분석 결과는 Figure 6과 같으며, 공시재료와 내층 및 외층의 화학조성 차이가 있음을 알 수 있다(Kim and Newman, 1995; Bardet *et al.*, 2009).

내층과 공시재료의 피크는 유사한 경향을 나타낸다. 다만 헤미셀룰로오스를 나타내는  $21\text{ ppm}$ 과  $172\text{ ppm}$ , 셀룰로오스 비결정영역의  $84\text{ ppm}$ 과 셀룰로오스 결정영역의  $89\text{ ppm}$ 이 소멸되어 나타났다. 이를 통해 영흥도선 내층의 헤미셀룰로오스와 셀룰로오스가 일부 분해되었음을 확인할 수 있었다.



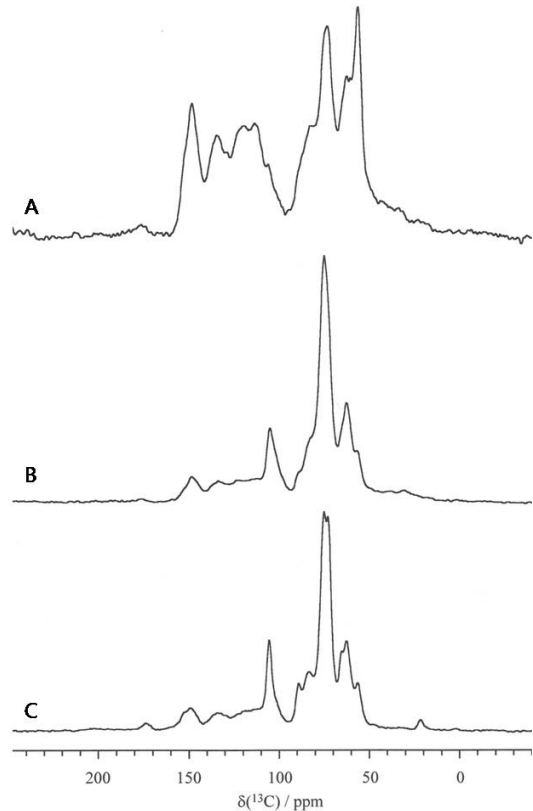
**Figure 5.** FT-IR spectra of recent and waterlogged archaeological wood. (A) Outer part 3, (B) Inner part, (C) Control.

외층의 스펙트럼에서 셀룰로오스를 나타내는  $65\text{ ppm}$ ,  $75\text{ ppm}$ ,  $89\text{ ppm}$ ,  $105\text{ ppm}$ 은 관찰되지 않았고 이 중  $65\text{ ppm}$ ,  $89\text{ ppm}$ 은 결정형 셀룰로오스를 나타낸다. 또한  $56\text{ ppm}$ ,  $114\text{ ppm}$ ,  $118\text{ ppm}$ ,  $134\text{ ppm}$ ,  $148\text{ ppm}$ 은 리그닌을 나타내는 것으로 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스의 분해에 따른 리그닌의 상대적인 증가로 해석할 수 있다.

따라서 solid state  $^{13}\text{C}$  NMR 분석을 통해 외층과 내층의 분해차이가 급격함을 확인할 수 있었다.

### 3.5. XRD 분석

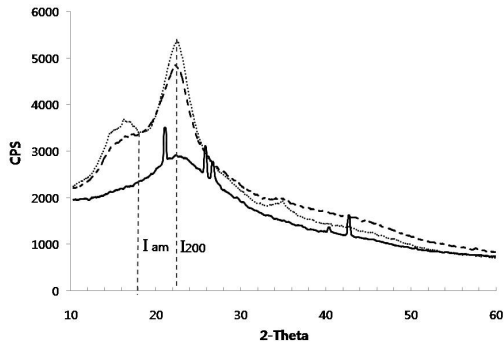
영흥도선 선체편의 외층과 내층의 XRD 분석 결과는 Figure 7과 같다. 외층의 경우 셀룰로오스의 결정성을 나타내는  $I_{200}$ 과 비결정형 셀룰로오스를 나타내는  $I_{am}$ 의 회절강도가 급격하게 감소하였다. 그러나 내층은 결정형 셀룰로오스의 회절강도가 다소 감소하였다. 이 결과를 통해 외



**Figure 6.** Solid state  $^{13}\text{C}$  NMR spectra of recent wood and waterlogged archaeological wood. (A) Outer part 3, (B) Inner part, (C) Control.

**Table 3.** Relative crystallinity of recent wood and waterlogged archaeological wood

		Relative crystallinity(%)
Waterlogged archaeological wood	Outer part	41.7
	Inner part	45.1
Recent wood		51.6

**Figure 7.** X-ray diffraction profiles of recent wood and waterlogged archaeological wood. Outer part: solid line, Inner part: Dashed line, Control: Dotted line.

층과 내층의 셀룰로오스 분해 정도의 차이가 크다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이와 같은 결과는 Lionetto 등(2014) 및 solid state  $^{13}\text{C}$  NMR 분석 결과와도 일치하였다.

Table 3은 영흥도선 선체편의 상대결정화도를 나타낸 것이다. 측정된 외층의 상대결정화도가 셀룰로오스의 결정영역과 비결정영역의 회절강도가 급격하게 감소했음에도 다소 높게 측정되었다. 이것은 Figure 7의 비결정형 셀룰로오스 및 결정형 셀룰로오스의 회절강도가 모두 감소하였고 또한 Figure 6의 solid state  $^{13}\text{C}$  NMR 분석 결과와도 일치하였다.

Figure 7의 외층 분석 그래프의  $2\theta$ 에서 관찰되는  $20.9^\circ$ ,  $25.7^\circ$ ,  $26.5^\circ$ 는 Magnesium phosphide,  $40.1^\circ$ 는 Silicon oxide로 확인되었다. 이 물질을 구성하는 성분은 회분의 구성 원소로 확인된 바 있으며(Figure 4) 특이사항은 아니다.

#### 4. 결론

영흥도선 선체편 외층의 최대함수율은 평균 623%로 분해가 상당히 진행된 상태를 확인하였다. 외층의 화학조성 분석 결과 홀로셀룰로오스는 감소하였고 리그닌은 상대적으로 증가하였다. 또한 회분은 8.28%로 매우 높았으며 주성분은 S, Ca, Fe이다.

영흥도선 선체편 외층과 내층의 화학적 특징은 고선박과 같은 대형의 수침고목재에서 나타내는 특징을 그대로 보여주었다. 즉 외층은 분해가 급격하게 진행되는데 반해, 내층은 분해정도는 미비하였다. FT-IR 및 solid state  $^{13}\text{C}$  NMR, XRD 분석 결과 선체편 외층의 결정 및 비결정 영역의 셀룰로오스 흡수피크는 소멸되거나 급격하게 감소되어 나타났다. 또한 리그닌 흡수피크는 급격하게 증가되어 나타났다. 그러나 내층은 헤미셀룰로오스와 일부 결정 및 비결정영역의 셀룰로오스 흡수피크만 감소하여 나타났다.

영흥도선 선체편 외층과 내층의 화학적 특징은 매우 상이하였다. 외층은 분해가 많이 진행되는데 반하여 내층의 분해정도는 미비하여 건진재와 유사한 상태였다. 또한 회분이 함량이 매우 높았던 바 영흥도선의 보존처리에는 이와 같은 특성을 고려하여 보존처리 방침을 계획하여야 할 것이다.

본 연구에서 적용한 최대함수율은 비교적 간단하게 수침고목재의 상태를 진단할 수 있는 방법이다. 화학조성 분석은 홀로셀룰로오스와 리그닌 추출물의 함량변화를 통해 수침고목재의 일반적인 특성을 파악할 수 있다. FT-IR 및 solid state  $^{13}\text{C}$  NMR, XRD와 같은 기기분석은 적은 양의 시료로도 고목재의 특성을 파악할 수 있는 매우 좋은 방법이다. 그러나 이와 같은 연구 방법은 분석 시료 내에서의 일반적인 특성을 나타내는 방법으로 수침고목재의 특성을 모두 이해하는데 적합한 것은 아니다. 따라서 향후 현미경적 연구를 통해 세포내 화학조성 분포에 대한 연구를 추가적으로 진행해야 할 것이다.

#### REFERENCES

- Bardet, M., Gerbaud, G., Giffard, M., Doan, C., Hediger, S. and Pape, L.L., 2009,  $^{13}\text{C}$  high-resolution solid-state NMR for structural elucidation of archaeological woods. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 55, 199-214.
- Björdal, C.G., 2012, Microbial degradation of waterlogged

- archaeological wood. *Journal of Cultural Heritage*, 13, 118-122.
- Cha, M.Y., Lee, K.H., and Kim, Y.S., 2006, Alteration of physical and chemical characteristics of waterlogged archaeological woods after cleaning. *Journal of Conservation Science*, 19, 19-30. (in Korean with English abstract)
- De Jong, J., 1977, Conservation techniques for old waterlogged wood from shipwrecks found in the Netherlands. in Walters A.H.(ed.), *Biodeterioration investigation techniques*. Applied Science Publishers, London, 295-338.
- Fors, Y., Nilsson, T., Risberg, E.D., Sandstrom, M. and Torssander, P., 2008, Sulfur accumulation in pinewood (*Pinus sylvestris*) induced by bacteria in a simulated seabed environment: implications for marine archaeological wood and fossil fuels. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 62, 336-347.
- Giachi, G., Bettazzi, F., Chimichi, S. and Staccioli, G., 2003, Chemical characterization of degraded wood in ships discovered in a recent excavation of the Etruscan and Roman harbour of Pisa. *Journal of Cultural Heritage*, 4, 75-83.
- Grattan, D.W., 1987, 3 Waterlogged wood. *Conservation of Marine Archaeological Objects*, Butterworth & Co., Oxford. 55-67.
- Hedges, J.I., 1990, The chemistry of archaeological wood, *Archaeological wood properties chemistry and preservation*. American Chemical Society, Washington D.C., 111-140.
- Hoffmann, P., 1981, Chemical wood analysis as a means of characterizing archaeological wood. *Proceedings of the ICOM Waterlogged Wood Working Group Conference*, Ottawa, September 5-18, 73-83.
- Hoffmann, P. and Jones, M.A., 1990, Structure and degradation process for waterlogged archaeological wood. *Archaeological Wood Properties Chemistry and Preservation*. American Chemical Society, Washington D.C., 35-65.
- Jensen, P. and Gregory, D.J., 2006, Selected physical parameters to characterize the state of preservation of waterlogged archaeological wood: a practical guide for their determination. *Journal of Archaeological Science*, 33, 551-559.
- Kim, E.H. and Cha, M.Y., 2014, Identification of timber of Yeongheungdo Shipwreck. *Incheon Ongjingun Yeongheungdo Shipwreck Underwater Excavation*. 368-372. (in Korean)
- Kim, I.J., 1990a, Chemical and micromorphological changes of archaeological waterlogged wood degraded in marine situations. *Conservation Studies*, 11, 157-169. (in Korean)
- Kim, I.J., 1993, Conservation and characteristics of timber form the Jindo logboat. *Report on the Excavation of Jindo Logboat Mokpo Conservation Institute for Maritime Archaeological Finds*, 121-129. (in Korean)
- Kim, Y.S., 1990b, Chemical characteristics of waterlogged wood. *Holzforschung*, 44, 169-172.
- Kim, Y.S. and Newman, R.H., 1995, Solid state <sup>13</sup>C NMR study of wood degraded by the brown rot fungus *Gloeophyllum trabeum*. *Holzforschung*, 49, 109-114.
- Kim, Y.S., Kim, G.H. and Kim, Y.S., 2004, *Wood Protection Science*. Chonnam National University Press. (in Korean)
- Kim, Y.S. and Singh, A.P., 2000, Micromorphological characteristics of wood biodegradation in wet environments: a review. *IAWA Journal*, 21, 135-155.
- Kuo, M.L., McClelland, J.F., Luo, S., Chien, P.L., Walker, R.D. and Hse, C.Y., 1988, Applications of infrared photo-acoustic spectroscopy for wood samples. *Wood Fiber Science*, 20, 132-145.
- Lee, W.Y. and Kim, N.H., 1992, Fine structure of some major softwoods and Hardwoods by x-ray diffraction methods. *Mokchae Konghak*, 20(1), 28-37. (in Korean with English abstract)
- Lionetto, F., Quarta, G., Cataldi, A., Cossa, A., Auriemma, R., Calcagnile, L. and Frigione, M., 2014, Characterization and dating of waterlogged woods from an ancient harbor in Italy. *Journal of Cultural Heritage*, 15, 213-217.
- National Research Institute of Maritime Cultural Heritage, 2014, *Incheon Ongjingun Yeongheungdo Shipwreck underwater excavation*. (in Korean with English abstract)
- Oron, A., Liphschitz, N., Held, B.W., Galili, E., Klein, M., Linker, R. and Blanchette, R., 2016, Characterization of archaeological waterlogged wooden objects exposed on the hyper-saline Dead Sea shore. *Journal of Archaeological Science*, 9, 73-86.
- Pizzo, B., Pecoraro, E., Alves, A., Macchioni, N. and Rodrigues, J.C., 2015, Quantitative evaluation by attenuated total reflectance infrared (ATR-FTIR) spectroscopy of the chemical composition of decayed wood preserved in

- waterlogged conditions. *Talanta*, 131, 14-20.
- Salanti, A., Zoia, A., Tolppa, E.L., Giachi, G. and Orlandi, M., 2010, Characterization of waterlogged wood by NMR and GPC techniques. *Microchemical Journal*, 95, 345-352.
- Sawada, M., 2000, Introduction of conservation science(trans. Kim, S.B. and Chung, K.Y.). Seokyung Publishing Co., 89-93. (Original work published 1997)
- Segal, L., Creely, J.J., Martin, A.E. and Conrad, C.M., 1959, An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. *Textile Research Journal*, 29, 786-794.
- Singh, A.P., 2012, A review of microbial decay types found in wooden objects of cultural heritage recovered from buried and waterlogged environments. *Journal of Cultural Heritage*, 13, 16-20.
- Technical Association of Pulp and Paper Industry, 1996-1997, TAPPI standard.
- The Korean Society of Conservation Science for Cultural Heritage, 2011, Conservation Science Terminology. (in Korean)
- Wise, I.E., Murphy M. and D'Addieco A.A., 1946, Chlorite Holocellulose, it's fraction bearing on summative wood analysis and on the hemicelluloses. *Paper Trade Journal*, 122, 35-43.
-