

국내 목조건축물 단청의 방염제 처리에 따른 영향 및 탐지방법 연구¹

김 대 운² · 김 철 웅³ · 한 성 희³ · 정 용 재^{4,†} · 한 규 성⁵

Flame Retardant Treatment's Effects and Detection Method on Wooden Buildings' Pigment Layer (Dan-cheong)¹

Dae Woon Kim² · Chul Woong Kim³ · Sung Hee Han³ · Yong Jae Chung^{4,†} · Gyu Seong Han⁵

요 약

방염제 도포 후 나타나는 목조건축물의 문제점을 파악하기 위해 통계자료 분석 및 현장조사를 수행하였다. 방염제 도포 후 백화현상과 단청 박락현상이 목조건축물에서 가장 빈번히 나타났다. 이러한 문제점은 기둥, 연목, 가구부재 등 방염제의 도포가 상대적으로 많이 이루어지는 건축물의 상부에서 가장 높게 나타났다. 현장에서 방염제를 도포한 건물과 도포하지 않은 건물을 파악하기 위해 P-XRF를 이용하여 총 20개 종의 원소를 분석하였다. 이 중 현장의 모든 방염제 처리구에서 황 원소(S)가 나타났기 때문에 이를 방염제 도포의 탐지자로 설정하였다. 이를 통해 현장에서 방염제의 도포를 확인할 수 있는 비파괴분석을 방법을 정립할 수 있었다. 실제 송광사(전남 순천)의 목조건축물을 대상으로 한 잔류성분분석을 통해 실제 현장적용이 가능함을 확인하였다.

ABSTRACT

To figure out the problems of flame retardant treatment (FRT) on wooden buildings, field investigation and analysis of statistical data are performed. After FRT on historical wooden building, efflorescence and exfoliation showed most often. These problems appeared especially on column, rafter and Ga-gu (Ingredients for supporting structure of a roof) which are liberally spreaded. To compare before and after FRT, analyzed 20 elements using P-XRF. In this process,

¹ Date Received August 2, 2013, Date Accepted March 21, 2014

² 공주대학교 생물학과. Department of Biology, College of Natural Science, Kongju National University, Kongju 314-701, Republic of Korea

³ 한림보존테크. Hanrim Conservation & Technology, Jeonju 560-870, Republic of Korea

⁴ 한국전통문화대학교 문화유산융합대학원 수리복원학과. Department of Heritage Conservation & Restoration, Graduate School of Convergence Cultural Heritage, Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo 323-812, Republic of Korea

⁵ 충북대학교 목재종이과학과. Department of Wood and Paper Science, College of Agriculture, Life, & Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Republic of Korea

† 교신저자(Corresponding author): 정용재(e-mail: iamchung@nuch.ac.kr)

found sulfur which informs FRT. This helped set up nondestructive assay. Through this process, confirmed field application by analysis residue component of Songgwang-sa Temple.

Keywords : flame retardants, wooden building, dan-cheong, exfoliation, efflorescence

1. 서 론

방염제는 사전적 의미로 가연성의 재료에 방염성을 부여하는 화학약품이다(소방방재청고시 제 2012-34호, 2012.2.9., 일부개정). 방염제는 재료에 물리적·화학적 결합을 통해 연소하기 어려운 상태를 유지시킨다. 문화재에 대한 방염처리는 1973년 승례문과 흥인지문을 기점으로 현재까지 지속적으로 사용되어 오고 있다. 우리나라 문화재 중 유형문화재는 건조물, 전적, 서적, 고문서, 회화 조각, 공예품 등으로 구분되는데(문화재보호법 법률 제11228호, 2012.1.26 개정), 이들 중 목조건축물은 국보 21건, 보물 120건, 시도지정 1,144건 등 총 1,285건이 지정되어 관리되고 있다(National Statistical Office, 2008). 유기질 문화재의 경우 재질적 특성상 화재에 매우 취약하며, 특히 목조건축물은 착화 후 매우 빠른 속도로 화재 확산과 화염이 전파되기 때문에 일반 소방기계·기구로는 진화가 어렵다(Back *et al.*, 2010). 특히 목조건축물을 구성하는 목재는 발열량이 약 5,000 kcal/kg, 수지(송진)는 약 8,500 kcal/kg으로 다른 재료에 비해 높은 발열량을 가지고 있어 화재에 취약한 특징을 가진다(Kim 2010). 더욱이 우리나라의 중요 목조건축물은 대부분 사찰건물로써 특성상 대부분 산지에 위치해 있는데(Chang *et al.* 2008), 산간에 위치한 목조건축물은 화재발생시 초기 진압이 어려워 한번 화재가 발생되면 그 피해가 매우 크다는 위험이 있다(Park 2011). 이는 2006년도 통계청 자료에서 사찰의 화재는 발생건수가 교회나 다른 시설물에 비해 적으나 피해액은 월등히 높은 것을 통해 알 수 있다(National Statistical Office 2006).

방염제는 작용 효과에 따라 3가지 유형을 갖는다고 보고되었다(Son 1988). 첫 번째, 가연성 물질의

연소 시 열분해 과정을 변화시킴으로써 가연성 휘발성 물질의 생성을 억제하는 인화합물계, 두 번째, 연소 시 가연물질의 표면을 코팅하거나 주위에 불연가스를 발생시켜 산소의 공급을 방해하는 암모니아 화합물계 또는 붕소화합물, 세 번째, 불꽃 연소의 전파를 방지하는 자유라디칼 방해제인 할로겐 화합물계이다. 목조문화재에서는 대부분 인 화합물계를 이용하여 방염처리를 수행하여 왔고 1976년부터 현재까지 목조문화재에 가장 많이 사용된 Dimefox (공신개발(주)) 또한 인화합물계열이다.

그러나 방염제는 이러한 이점에도 불구하고 현재 문화재 재질에 많은 부작용을 야기하고 있다. 특히 단청의 백화현상과 박락현상, 목재 내부로 수분을 끌어들이며 목재함수율을 높이는 문제점이 대표적인 예이다. 최근 국정감사 자료에 의하면 방염제 도포에서 사용되는 약품이 목조문화재에 심각한 백화현상과 박락현상을 일으킨다고 밝히고 있다(방염제 도포사업, 이대로 좋은가?, 2008년 문화재청 국정감사). 하지만 이러한 사실에도 불구하고 실제 방염제가 도포된 목조건축물을 대상으로 한 체계적인 손상상태 조사는 수행되고 있지 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내에 위치한 목조건축물을 대상으로 방염제 도포에 따른 피해실태 조사를 수행하고 이를 지정유형별, 연차별, 손상 유형별로 나누어 다각적인 통계 분석을 수행하였다.

또한 방염제 도포에 따른 손상 원인을 분석하기 위해서는 실제 목조건축물에 방염제가 도포되었는지를 정확하게 파악할 필요가 있다. 그러나 현재 방염제 도포기록은 건축물별 정확한 기록이 남아 있지 않는 실정이다. 더욱이 방염처리한 물품에 대한 현행 검사방법이 체계적으로 이루어지지 않아 여러 문제점을 야기하고 있다(Kim *et al.* 2011; Park *et al.* 2011). 이에 본 연구에서는 목조 건축물에 방염제 도

Table 1. Survey site of sprayed flame retardant wooden buildings

| No. | Location | Registered number | | Site name | Building name |
|-----|---------------------|-------------------|------|--------------------------------------|-------------------|
| 1 | Seoul | Tr | 142 | Dongmyo | Jeongjeon |
| 2 | Gyeonggi Anseong | Tr | 823 | Seoknam-sa temple | Yeongsanjeon |
| 3 | Gyeonggi Anseong | Tr | 824 | Cheongryong-sa temple | Daewoongjeon |
| 4 | Gyeonggi Anseong | PT | 114 | Chiljang-sa temple | Daewoongjeon |
| 5 | Gyeonggi Anseong | PT | 115 | Chiljang-sa temple | Cheonwangmun |
| 6 | Chungbuk Cheongwon | Tr | 664 | Ansim-sa temple | Daewoongjeon |
| 7 | Chungbuk Cheongwon | PT | 112 | Ansim-sa temple | Birojeon |
| 8 | Chungbuk Cheongwon | Not specified | | Ansim-sa temple | Chilseonggak |
| 9 | Chungnam Gongju | Tr | 801 | Magok-sa temple | Daewoongbojeon |
| 10 | Chungnam Gongju | Tr | 802 | Magok-sa temple | Daewoongbojeon |
| 11 | Chungnam Seochon | IF | 197 | Lee Ha Bok's building | Anchae |
| 12 | Chungnam Seochon | IF | 197 | Lee Ha Bok's building | Sarangchae |
| 13 | Chungnam Seochon | IF | 197 | Lee Ha Bok's building | Araechae |
| 14 | Chungnam Seochon | IF | 197 | Lee Ha Bok's building | Gwangchae |
| 15 | Jeonbuk Jeonju | HS | 339 | Gyeonggijeon | Jeongjeon |
| 16 | Jeonbuk Jeonju | HS | 339 | Gyeonggijeon | Naesammun |
| 17 | Jeonbuk Jeonju | HS | 339 | Gyeonggijeon | Oesammun |
| 18 | Jeonbuk Jeonju | HS | 339 | Gyeonggijeon | Jeonjusago |
| 19 | Jeonbuk Jinan | Not registered | | Royal Edict Issued to Seong Seok-rin | Eeseogak |
| 20 | Jeonbuk Wanju | Tr | 608 | Webong-sa temple | Bogwangmyeongjeon |
| 21 | Jeonnam Suncheon | Tr | 1311 | Seonam-sa temple | Daewoongjeon |
| 22 | Jeonnam Suncheon | Not registered | | Seonam-sa temple | Jijangjeon |
| 23 | Jeonnam Suncheon | Not registered | | Seonam-sa temple | Iljumun |
| 24 | Jeonnam Suncheon | Tr | 804 | Jeonghye-sa temple | Daewoongjeon |
| 25 | Jeonnam Yeosu | NT | 304 | Jinnamgwan | Jinnamgwan |
| 26 | Gyeongbuk Andong | Tr | 448 | Bongjeong-sa temple | Hwaeomgangdang |
| 27 | Gyeongbuk Andong | Tr | 449 | Bongjeong-sa temple | Gogeumdang |
| 28 | Daegu | Tr | 350 | Dodongseowon | Jungjeongdang |
| 29 | Gyeongbuk Yeongju | HS | 55 | Dodongseowon | Gyeongyeomjeong |
| 30 | Gyeongbuk Gyeongju | Tr | 442 | Yangdong Village | Gwangajeong |
| 31 | Gyeongbuk Gyeongju | HS | 154 | Oksanseowon | Gyeonggak |
| 32 | Gyeongbuk Gyeongju | Tr | 413 | Dokrakdang | Dokrakdang |
| 33 | Gyeongnam Tongyeong | NT | 305 | Sebyeonggwan | Sebyeonggwan |
| 34 | Gyeongnam Yangsan | Tr | 1120 | Sinheong-sa temple | Daegwanjeon |
| 35 | Gangwon Gangneung | Tr | 165 | Ojukheon House | Mongryongsil |
| 36 | Gangwon Hongcheon | Not registered | | Suta-sa temple | Honghoeru |

[†]NT; National treasure, Tr; Treasure, PT; Province tangible cultural heritage, IF; Important folklore cultural heritage, HS; Historic site

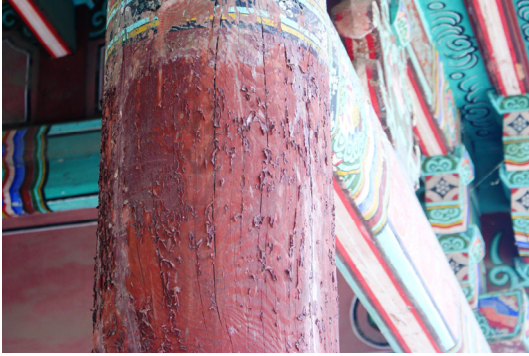


Fig. 1. Pigment layer (Dan-cheong) exfoliation after FRT (Jeonbuk Gyeonggijeon).

포여부를 평가하기 위하여 형광X선분석기(P-XRF)를 이용하여 목조건축물의 잔류 방염제 화학성분을 측정하여 공통적으로 나타나고 있는 인자를 선정하고, 이를 현장평가를 통해 적용가능성을 확인하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 방염제 도포 목조건물 현황분석

방염제 도포 목조건물의 현황은 1991년에서 2006년 동안 방염처리한 목조문화재를 대상으로 지정유형별, 지역별, 연차별로 구분하여 분석을 수행하였다. 조사 장소는 1991년부터 2006년 사이 국내 방염제 도포현황 통계분석을 통하여 선정하였다. 총 465개의 지정문화재, 1,945개의 건물을 지역별로 나누어, 18지역 36개 건물을 선정하였다(Table 1).

선정된 조사장소에서 방염제 처리 후 부작용을 파악하기 위해 백화 및 단청박락 현상을 조사하였다. 백화 및 박락은 진행 정도에 따라 일부 발생, 전체 발생, 전체 심함의 3단계로 구분하였다. 일부 발생은 몇 개의 목부재에서 백화현상이 확인된 경우, 전체 발생은 한 건물의 4방위 중 3방위 이상에서 백화현상이 발생되었을 경우, 전체 심함은 발생지역이 4방위 전체에 걸쳐있으면서 눈으로 뚜렷하게 백화현상이 나타나는 경우를 의미한다(Figs. 1, 2).



Fig. 2. Efflorescence damage after FRT (Gyeonggi Anseong Seoknam-sa temple).

2.2. 공시재료

본 실험에서는 한국의 목조건축물에 가장 많이 사용되는 소나무(*Pinus densiflora*)를 사용하였다. 공시목재는 박피한 원주목을 사용하였으며, 목재 내부 수분 및 수지로 인한 간섭을 피하기 위하여 2년간 실내에서 자연건조를 한 후 재단하여 사용하였다. 목재 시험편의 직경은 15 cm, 길이 7 cm로 하였다.

실제 목조 건축물에서는 대부분 목재 표면에 단청을 채색하므로 분석 시 동일한 조건을 주기 위하여 단청안료를 채색하였다. 채색한 단청안료는 총 9종으로 석간주, 뇌록, 양록, 삼청, 육색, 지당, 먹, 주홍, 다자이다. 안료의 교착제는 초산비닐수지계열(polyvinyl acetate)의 폴리졸 506 (대양화학)을 사용하였다. 방염약제는 1999년에 개발되어 현재까지 문화재의 방염에 주로 사용되는 (주)공신개발의 Dimefox III이다. Dimefox III는 붕사(Borax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 방염·방부효과), 모노인산암모늄(Mono-ammonium Phosphate, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 방염효과), 구아니딘설파메이트(Guanidine Sulfamate, $\text{NH}_2\text{C}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$, 방염·방부효

Table 2. The number of FRT* wooden buildings in Korea

| Site | Year | | | | | | | | | | | | | | | | Total |
|-----------|------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|-------|
| | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | |
| Seoul | | 9 | 3 | 1 | | | 10 | 7 | 13 | 1 | | | 15 | 5 | | 64 | |
| Daegu | 1 | | | 12 | 3 | 8 | 2 | 1 | 3 | 12 | 1 | | 4 | | 11 | 58 | |
| Dae Jeon | 2 | 2 | | | | | | 5 | | | | | | | | 9 | |
| Gwangju | | | | 1 | 5 | | | 1 | | 1 | | | | | | 8 | |
| Incheon | 1 | 1 | 4 | 3 | | 5 | 5 | 3 | | 4 | | | 6 | | 9 | 41 | |
| Ulsan | | | | | | 1 | | | | | | | 1 | | | 2 | |
| Busan | 2 | 4 | | | | | | 5 | | | | | | | 8 | 6 | 25 |
| Gangwon | 7 | | 10 | | 2 | 15 | 12 | 6 | 11 | 1 | 4 | | 18 | | 15 | 16 | 117 |
| Gyeonggi | | 18 | 7 | 15 | 14 | 14 | 10 | 20 | | 6 | 8 | | 6 | 18 | 5 | 16 | 157 |
| Jeju | | | 1 | | | | | | 5 | | | | | | | | 6 |
| Chungbuk | 6 | | 2 | 12 | 12 | 9 | 3 | 11 | | 14 | 22 | 15 | 8 | 12 | 23 | 7 | 156 |
| Chungnam | 12 | 7 | 15 | 7 | 9 | 21 | 11 | 8 | 27 | 10 | 13 | 7 | 22 | | 7 | | 176 |
| Jeonbuk | 2 | 9 | 5 | 17 | 16 | 5 | 31 | 10 | 12 | 16 | 18 | 31 | 2 | | 68 | | 242 |
| Jeonnam | 2 | 12 | 20 | 31 | 23 | 3 | 8 | 14 | 6 | 51 | 6 | 48 | 7 | 1 | 17 | | 249 |
| Gyeongbuk | 30 | 17 | 37 | 36 | 31 | 46 | 72 | 19 | 25 | 47 | 62 | 66 | 62 | 20 | 6 | 4 | 580 |
| Gyeongnam | 5 | 12 | 32 | 18 | 37 | 28 | 6 | 10 | 19 | 9 | 38 | 53 | 20 | | 7 | 30 | 324 |
| Total | 70 | 91 | 136 | 153 | 152 | 155 | 170 | 120 | 121 | 172 | 172 | 220 | 156 | 66 | 181 | 79 | |

*FRT : Flame Retardant treatment

과), 붕산(Boric acid, H₃BO₃, 방충·방부효과), 그리고 안정제 및 침투제를 주성분으로 한다. 방염제의 안정제 및 침투제는 제조사의 기업비밀로서 화학 성분을 확인할 수 없었다.

2.3. 방염제 도포 유무에 따른 비파괴적 탐지인자 탐색

방염제는 “방충·방염제 도포공사 시방서”에 준하여 처리하였다. 도포 방법은 스프레이 방식이며, 도포 횟수는 2회이다. 방염제 도포량은 원주목의 표면적을 산출하여 500 mg/m²로 도포하였다(원주목 1개당 1회 도포량 : 8.2g). 1회 도포 후 48시간, 2회 도포 후 7일간 실내에서 건조하였다.

방염제 도포를 파악할 수 있는 탐지인자 탐색을 위해 약제 도포 전·후 표준시편의 잔류성분을 분석하였다. 분석기기는 실제 현장에서도 동일한 분석이 가능한 형광X선분석기(Alpha 1000 P-XRF analyzer, Inove-X system)를 이용하였다. 분석에 사용된 P-XRF는 이동이 가능하며, 목조건축물이 위치한 현장에서 즉각 확인이 가능한 기기이다. 분석조건은 조사경 5 mm, soil mode (40 kv, 4 W, Measurement Time 30 sec, 2 times)이다. P-XRF는 시료의 표면만이 분석이 가능하며, 원자번호 15번(Phosphorus) 이상의 원소를 비파괴적으로 탐지하는 기기적 특징을 갖는다. 따라서 방염제의 주성분인 붕소는 탐지가 불가능하였기 때문에 붕소 이외의 탐지가능 인자를 찾는데 주력하였다.

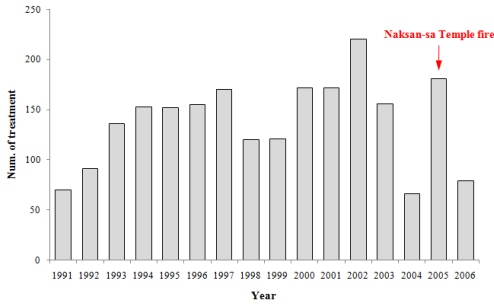


Fig. 3. The number of FRT wooden buildings (1991~2006).

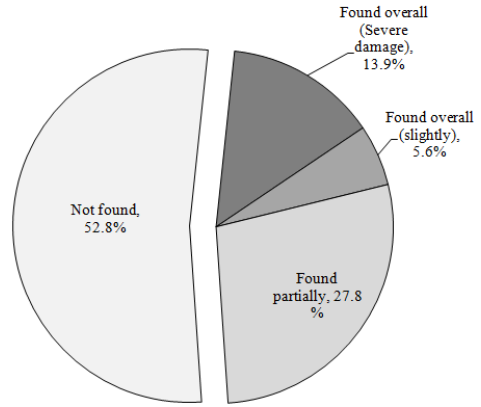
2.4. 현장조사를 통한 방염제 잔류성분분석

목재에 방염제 도포에 따른 잔류성분 분석을 위해 현장조사를 수행하였다. 조사장소는 전남 순천시에 위치한 송광사이며, 조사건물은 방염제를 도포한 건물인 약사전, 방염제를 도포하지 않은 대웅전, 삼일암이다. 잔류성분 분석은 실험실에서 분석에 사용된 동일한 형광X선분석기를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 방염제 도포 목조건물 현황분석

1991년부터 2006년까지(16년간) 유형별 방염제 도포현황을 분석한 결과 국보 지정 문화재의 경우 총 33개소를 대상으로 58회, 보물의 경우는 208개소를 대상으로 295회, 사적의 경우는 521개소를 대상으로 608회, 중요민속자료의 경우 549개소를 대상으로 540회 수행되었다. 단순히 건축물 대비 도포건수의 비율을 비교해 보면 국보, 보물, 사적, 중요민속자료 순으로 도포 빈도수가 차이가 나타났다(국보 : 1.8회, 보물 : 1.4회, 사적 : 1.2회, 중요민속자료 : 1.0회). 이는 문화재청 또는 지방자치단체의 방염처리의 대상 선정 시 목조 건축문화재의 중요도에 따라 선정된다는 것을 간접적으로 파악할 수 있었다. 또한 국보나 보물이 개별 건물로 지정되어 방염제 도포가 수행되



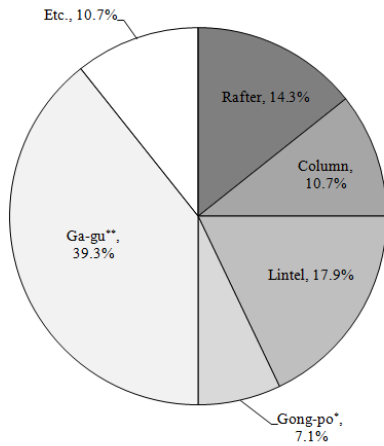
※ Data based on the number of buildings.

Fig. 4. Damage degree of pigment layer (Dan-cheong) efflorescence after FRT.

는 반해 사적과 중요민속자료는 대부분 가옥 전체로 지정을 받는다는 것을 고려해보면 실제적인 건축물 별 도포건수 비율은 더 크게 차이가 날 것으로 예상된다. 또한 지역별로 보면 국보, 보물, 중요민속자료로 지정된 목조건축물에서 경북지역이 가장 높은 방염제 도포 빈도수를 나타내었다. 이는 상대적으로 지정 목조건축물이 가장 많은 지역이기 때문인 것으로 사료된다(Back *et al.* 2010).

연차별 방염제 도포건수를 분석한 결과, 총 분석 기간 동안 평균 연간 약 138건의 방염제 도포가 수행되어지고 있었으며, 2002년까지 도포 건수가 증가하다 이후 감소하는 경향을 나타내었다(Table 2). 특징적으로 2005년도에 방염제 도포건수가 증가한 원인은 2005년 4월 발생한 낙산사 화재 때문으로 사료된다(Fig. 3).

방염제 도포 후 목조건축물에서 백화현상은 총 조사지역 36개소 중 17개소(47.2%)에서 확인되었다. 전체 발생건수 중 부분발생이 10건(27.8%)으로 가장 많은 분포도를 차지하며, 다음으로 전체 심함이 5건(13.9%)으로 나타났다(Fig. 4). 백화현상이 특정 목부재에서 일어나는지를 파악하기 위해 부재들을 종류별로 조사한 결과 대부분의 부재에서 다양하게 발생되었으며, 가구, 인방, 연목, 기둥, 공포 순으로 빈도

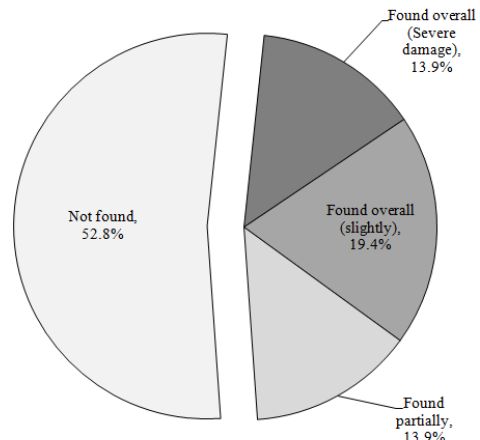


* Materials for supporting structure of a roof
 ** Furniture materials between column and roof

※ Data based on the number of materials

Fig. 5. Damage position of efflorescence in the wooden building after FRT.

가 높게 나타났다(Fig. 5). 특히 주로 기둥과 연목 및 가구부재 등에서 백화현상이 상대적으로 많이 확인되었는데, 이는 방염제 도포 시 주로 건축물의 상부에 위치하는 부재들에 상대적으로 많은 도포가 이루어졌을 가능성과 주변 환경의 영향으로 인한 약제 잔류 등을 가정할 수 있을 것으로 보인다. 방염제의 잔류는 방염효과를 지속시키는데 효과적이지만 단청의 박락 및 백화현상을 야기한다고 알려져 왔다(Park *et al.* 2013). 2006년 이전의 방염제 도포공사는 대부분 지붕을 포함한 모든 부재에 방염제 도포가 이루어졌으나 이후 방염제 처리에 따른 단청의 안정성에 악영향을 줄 수 있다는 연구 결과가 보고됨에 따라 최근에는 창방 하부만 처리가 이루어지고 있다. 본 연구의 조사 대상인 건축물은 2006년 이전에 방염제가 처리된 건축물로 건축물 상부에 다수 발견되는 단청 박락 및 백화현상이 방염제의 오랜 잔류로 인한 현상이라고 사료된다. 또한 방염제가 처리된 건축물의 하부는 강우에 의해 지속적으로 씻겨 나갈 수밖에 없으며, 이로 인해 약제의 농도가 감소했을 것이라 예측된다. 이러한 현상으로 단청의 박락 및 백화현상이 상대적으로 적게 관측되었을 것이라 사료



※ Data based on the number of buildings.

Fig. 6. Damage degree of pigment layer (Dan-cheong) exfoliation after FRT.

된다. 다음으로 백화현상이 일어난 곳을 건물 방향별로 보면 건물 전체에서 동시에 진행되는 경우가 가장 많이 확인되었으며 다음으로 후면과 전면 순서로 백화현상이 발견되었다(Fig. 8).

단청박락 현상은 총 대상지역 36개소 중 17개소(47.2%)에서 확인되었다(Fig. 6). 훼손양상은 전체 발생이 19.4%로 가장 높고 다음으로 비슷한 비율로 전체 심함(13.9%)과 부분 발생(13.9%)이 나타나고 있다. 부재 종류별로 발생빈도를 비교해 보면 공포, 가구, 연목, 기둥, 인방의 순으로 훼손 양상이 나타났다(Fig. 7). 단청박락 현상을 건물 방향별로 보면 백화현상과 동일하게 전체에 걸쳐 동시에 박락이 진행되는 경우가 가장 많이 확인되었으며, 다음으로 건물 전면, 후면 순으로 확인되었다(Fig. 8).

3.2. 방염제 잔류 성분 분석

형광X선분석(P-XRF) 결과 모든 시편에서 Calcium (Ca)과 Potassium (K)을 포함한 총 20개의 원소가 검출되었다(Table 3). Calcium (Ca)과 Potassium (K)은 DimefoxⅢ의 성분이 아닌 단청 채색에 사용된 교착제인 폴리졸의 성분으로 방염제 잔류 성분 탐지인자

Table 3. Chemical component change after FRT - XRF analysis results

| Sample | Negative control | | | Dimefox III | | |
|--|------------------|----------------|----------------------|-------------|----------------|----------------------|
| | Element | Quantity (ppm) | Standard error (ppm) | Element | Quantity (ppm) | Standard error (ppm) |
| Wood | Ca | 465 | ± 50 | Ca | 416 | ± 47 |
| | K | 251 | ± 40 | K | 456 | ± 45 |
| | Cl | 533 | ± 129 | Cl | 1,154 | ± 159 |
| | Rb | 23 | ± 2 | Rb | 8 | ± 2 |
| | Sr | 23 | ± 2 | Sr | 22 | ± 2 |
| | Mo | 28 | ± 4 | Mo | 32 | ± 4 |
| | - | - | - | S | 28,579 | ± 1,598 |
| | - | - | - | Br | 8 | ± 2 |
| Wood + (Iron oxide red) | Ca | 49,307 | ± 2,016 | Ca | 33,157 | ± 1,738 |
| | K | 25,815 | ± 355 | K | 37,916 | ± 1,669 |
| | S | 46,024 | ± 4,366 | S | 83,202 | ± 7,444 |
| | Cl | > 10% | ± 0% | Cl | > 10% | ± 1% |
| | Cr | 546 | ± 40 | Cr | 683 | ± 56 |
| | Mn | 4,743 | ± 172 | Mn | 7,062 | ± 308 |
| | Fe | > 10% | ± 0% | Fe | > 10% | ± 1% |
| | Ni | 520 | ± 50 | Ni | 608 | ± 69 |
| | Cu | 305 | ± 28 | Cu | 306 | ± 34 |
| | - | - | - | Zn | 68 | ± 14 |
| | Pb | 30 | ± 8 | Pb | 50 | ± 11 |
| | - | - | - | Br | 14 | ± 4 |
| | Sr | 61 | ± 5 | Sr | 70 | ± 6 |
| | Mo | 31 | ± 5 | Mo | 54 | ± 6 |
| Wood + (Cyanin green + Ultramarine blue) | Ca | 97,156 | ± 1,479 | Ca | 81,728 | ± 1,213 |
| | K | 510 | ± 95 | K | 462 | ± 85 |
| | Cl | 8,906 | ± 483 | Cl | 7,805 | ± 439 |
| | Ti | 1,388 | ± 87 | Ti | 1,160 | ± 77 |
| | Fe | 715 | ± 15 | Fe | 589 | ± 16 |
| | Cu | 197 | ± 15 | Cu | 152 | ± 14 |
| | Rb | 8 | ± 2 | Rb | 9 | ± 2 |
| | Sr | 31 | ± 2 | Sr | 28 | ± 2 |
| | Mo | 28 | ± 4 | Mo | 29 | ± 4 |
| | - | - | - | S | 17,966 | ± 1,832 |
| | - | - | - | Zn | 15 | ± 5 |
| Wood + (Cyanin green + Permanent yellow) | Ca | > 10% | ± 0% | Ca | > 10% | ± 0% |
| | K | 749 | ± 170 | K | 1,011 | ± 203 |
| | - | - | - | S | 21,064 | ± 3,961 |
| | Cl | 38,162 | ± 1,545 | Cl | 37,882 | ± 1,706 |
| | Ti | > 10% | ± 0% | Ti | > 10% | ± 0% |
| | Cr | 65 | ± 10 | Cr | 89 | ± 12 |
| | Mn | 66 | ± 6 | Mn | 110 | ± 8 |
| Fe | 331 | ± 18 | Fe | 482 | ± 23 | |

국내 목조건축물 단청의 방염제 처리에 따른 영향 및 탐지방법 연구

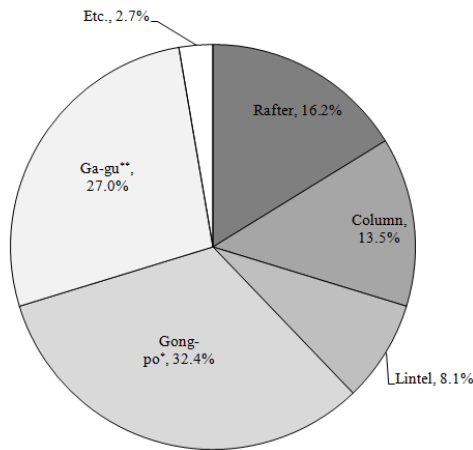
| Sample | Negative control | | | Dimefox III | | |
|---|--|----------------|----------------------|-------------|----------------|----------------------|
| | Element | Quantity (ppm) | Standard error (ppm) | Element | Quantity (ppm) | Standard error (ppm) |
| | Cu | 1,082 | ± 37 | Cu | 1,331 | ± 43 |
| | Sr | 92 | ± 4 | Sr | 123 | ± 5 |
| | Mo | 37 | ± 4 | Mo | 31 | ± 4 |
| Wood + (Cobalt blue + Titanium dioxide) | I | 2,541 | ± 722 | - | - | - |
| | Ca | > 10% | ± 0% | Ca | 90,858 | ± 2,117 |
| | K | 1,651 | ± 227 | K | 1564 | ± 216 |
| | S | 16,905 | ± 3,682 | S | 40,412 | ± 4,336 |
| | Cl | 7,280 | ± 1,104 | Cl | 5,916 | ± 1,110 |
| | Ti | > 10% | ± 1% | Ti | >10% | ± 1% |
| | Cr | 131 | ± 13 | Cr | 117 | ± 14 |
| | Mn | 132 | ± 8 | Mn | 126 | ± 8 |
| | Fe | 986 | ± 34 | Fe | 619 | ± 26 |
| | Cu | 437 | ± 25 | Cu | 390 | ± 24 |
| | - | - | - | Br | 8 | ± 2 |
| | - | - | - | Pb | 19 | ± 6 |
| | Sr | 158 | ± 6 | Sr | 128 | ± 5 |
| | Mo | 23 | ± 4 | Mo | 23 | ± 4 |
| | Wood + (Permanent orange G + Lead red) | - | - | - | I | 3,538 |
| Ca | | 17,165 | ± 726 | Ca | 12,551 | ± 606 |
| K | | 1,049 | ± 247 | K | 1,394 | ± 257 |
| S | | > 10% | 2% | S | >10% | ± 1% |
| Cl | | 30,643 | ± 2,176 | Cl | 21,554 | ± 1,903 |
| Ti | | > 10% | ± 1% | Ti | >10% | ± 1% |
| Cr | | 148 | ± 20 | Cr | 195 | ± 20 |
| Mn | | 311 | ± 17 | Mn | 202 | ± 0.13 |
| Fe | | 259 | ± 22 | Fe | 144 | ± 20 |
| Co | | 286 | ± 74 | Co | 313 | ± 0.68 |
| Cu | | 292 | ± 67 | Cu | 317 | ± 59 |
| Hg | | 895 | ± 117 | Hg | 830 | ± 0.97 |
| As | | 8,393 | ± 348 | As | 7,366 | ± 280 |
| Se | | 230 | ± 26 | Se | 257 | ± 0.23 |
| Pb | | 67,520 | ± 2,256 | Pb | 55,505 | ± 1,679 |
| Rb | 154 | ± 17 | Rb | 152 | ± 0.14 | |
| Mo | 44 | ± 9 | Mo | 44 | ± 8 | |
| Wood + (Titanium dioxide R760) | Ca | 44,037 | ± 1,457 | Ca | 29,361 | ± 1,132 |
| | K | 1,047 | ± 293 | K | 1,799 | ± 333 |
| | - | - | - | S | 25,719 | ± 5,832 |
| | Ti | > 10% | ± 2% | Ti | >10% | ± 2% |
| | Cr | 337 | ± 29 | Cr | 340 | ± 31 |
| | Mn | 261 | ± 13 | Mn | 309 | ± 15 |
| | Cu | 164 | ± 19 | Cu | 164 | ± 21 |
| Br | 12 | ± 2 | Br | 16 | ± 3 | |

| Sample | Negative control | | | Dimefox III | | | |
|--|------------------------------|----------------|----------------------|-------------|----------------|----------------------|-------|
| | Element | Quantity (ppm) | Standard error (ppm) | Element | Quantity (ppm) | Standard error (ppm) | |
| | Sr | 96 | ± 5 | Sr | 103 | ± 5 | |
| | Mo | 17 | ± 5 | Mo | 26 | ± 5 | |
| Wood + (Permanent black PR. colony) | Ca | > 10% | ± 0% | Ca | >10% | ± 0% | |
| | K | 943 | ± 184 | K | 958 | ± 173 | |
| | S | 14,145 | ± 3,086 | S | 22,263 | ± 3,163 | |
| | Cl | 13,183 | ± 828 | Cl | 11,492 | ± 759 | |
| | Ti | 2,654 | ± 170 | Ti | 2,454 | ± 161 | |
| | Mn | 76 | ± 7 | Mn | 81 | ± 7 | |
| | Fe | 2,098 | ± 49 | Fe | 2,067 | ± 47 | |
| | Cu | 664 | ± 29 | Cu | 693 | ± 30 | |
| | Rb | 6 | ± 2 | Rb | 11 | ± 2 | |
| | Sr | 136 | ± 5 | Sr | 144 | ± 5 | |
| | Mo | 32 | ± 4 | Mo | 44 | ± 5 | |
| | Wood + (Toluidine red) | Ca | 7,523 | ± 393 | Ca | 5,996 | ± 362 |
| | | K | 1,271 | ± 204 | K | 1,861 | ± 248 |
| S | | > 10% | ± 4% | S | >10% | ± 4% | |
| Cl | | 69,860 | ± 3,144 | Cl | 76,059 | ± 3,502 | |
| Ba | | 288 | ± 46 | Ba | 253 | ± 47 | |
| Cr | | 74 | ± 10 | Cr | 91 | ± 11 | |
| Mn | | 489 | ± 23 | Mn | 556 | ± 26 | |
| Fe | | 651 | ± 31 | Fe | 676 | ± 34 | |
| Co | | 1,093 | ± 205 | Co | 1,431 | ± 246 | |
| - | | - | - | Cu | 927 | ± 200 | |
| Hg | | 2,992 | ± 347 | Hg | 3,181 | ± 394 | |
| As | | 24,879 | ± 1,446 | As | 27,987 | ± 1,740 | |
| Se | | 798 | ± 81 | Se | 863 | ± 92 | |
| Pb | | > 10% | ± 1% | Pb | >10% | ± 1% | |
| Rb | | 399 | ± 45 | Rb | 464 | ± 53 | |
| Mo | | 157 | ± 16 | Mo | 213 | ± 20 | |
| Wood + (Iron oxide red + permanent black PR.colony) | | Ca | > 10% | ± 0% | Ca | >10% | ± 0% |
| | K | 7,079 | ± 248 | K | 8,875 | ± 309 | |
| | S | 19,055 | ± 3,159 | S | 29,965 | ± 3,873 | |
| | Cl | 33,358 | ± 1,074 | Cl | 38,354 | ± 1,244 | |
| | Cr | 103 | ± 11 | Cr | 116 | ± 12 | |
| | Mn | 1,251 | ± 31 | Mn | 1,540 | ± 40 | |
| | Fe | 35,342 | ± 778 | Fe | 43,950 | ± 1,052 | |
| | Ni | 120 | ± 23 | Ni | 132 | ± 25 | |
| | Cu | 145 | ± 24 | Cu | 476 | ± 27 | |
| | Rb | 8 | ± 2 | Rb | 6 | ± 2 | |
| | Sr | 108 | ± 5 | Sr | 114 | ± 5 | |
| Mo | 36 | ± 4 | Mo | 45 | ± 5 | | |

Table 4. Sulfur component content change after FRT

| Pigment | Negative control (ppm) | Dimefox III (ppm) | Increment (ppm) | Remark |
|---|------------------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| Wood | ND* | 28,579 | +28,579 | Available field test |
| Cyanin green + Ultramarine blue | ND* | 17,966 | +17,966 | Available field test |
| Cyanin green + Permanent yellow | ND* | 21,064 | +21,064 | Available field test |
| Titanium dioxide R760 | ND* | 25,719 | +25,719 | Available field test |
| Iron oxide red | 46,024 | 83,202 | +37,178 | - |
| Cobalt blue + Titanium dioxide | 16,905 | 40,412 | +23,507 | - |
| Permanent black PR. colonyl | 14,145 | 22,263 | +8,118 | - |
| Toluidine red | > 10% | > 10% | - | - |
| Iron oxide red + permanent black PR.colonyl | 19,055 | 29,965 | +10,910 | - |

*ND : Not Detected



*Materials for supporting structure of a roof

** Furniture materials between column and roof

※ Data based on the number of materials

Fig. 7. Damage position of exfoliation in the wooden building after FRT.

에서 제외하였다(Hong, 2012). 분석 결과를 토대로 각각의 원소별로 방염제 도포 후 새롭게 검출되었거나 도포 전에 검출되었던 원소가 도포 후 검출되지

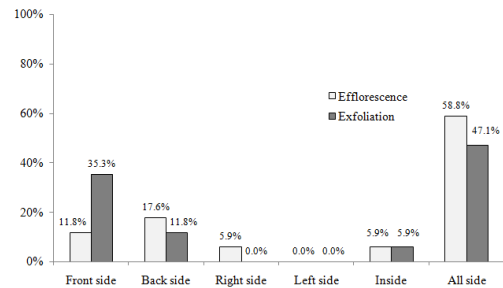


Fig. 8. Exfoliation and efflorescence according to the building direction after FRT.

않았는지를 비교하였다. 또한 특별한 원소에서 약품 도포 후 유의적으로 검출량이 증가한 것은 없는지를 확인하였다.

검출된 총 20개의 원소 중에서 모든 시편에서 동일하게 검출되는 공통원소를 제외하여 비교한 결과 대부분의 시편에서 황(S) 원소가 20,000 ppm 이상 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Table 4). 이는 방염제 물질에서 방염, 방부의 목적으로 첨가된 구아니딘설파메이트(Guanidine Sulfamate, NH : C (NH₂)₂ · NH₂SO₃H)의 황 원소가 검출된 것으로 사료된다.

Table 5. Comparison of sulfur element on FRT and non-FRT buildings

| FRT buildings | Elements | Quantity (ppm) | Standard error (ppm) | Non-FRT buildings | Elements | Quantity (ppm) | Standard error (ppm) |
|---|----------|----------------|----------------------|--|----------|----------------|----------------------|
| Yaksa-Jeon inner pillar (No paint site) | Ca | 2,007 | ± 85 | Daewoong-Je on inner floor (No paint site) | Ca | 2,007 | ± 85 |
| | K | 2,553 | ± 99 | | K | 2,553 | ± 99 |
| | S | 10,600 | ± 1,022 | | P | 26,649 | ± 3,525 |
| | Cl | 999 | ± 133 | | Cl | 4,647 | ± 358 |
| | Ti | 193 | ± 35 | | Ti | 312 | ± 44 |
| | Mn | 22 | ± 4 | | Cr | 19 | ± 3 |
| | Fe | 386 | ± 12 | | Mn | 103 | ± 6 |
| | Br | 66 | ± 3 | | Fe | 1,122 | ± 21 |
| | Rb | 7 | ± 2 | | Zn | 25 | ± 5 |
| | Sr | 20 | ± 2 | | As | 13 | ± 2 |
| Mo | 25 | ± 4 | Br | 33 | ± 3 | | |
| Yaksa-Jeon inner floor (No paint site) | Ca | 1,837 | ± 80 | Samilam inner floor (No paint site) | Ca | 795 | ± 55 |
| | K | 942 | ± 60 | | K | 437 | ± 42 |
| | S | 2,793 | ± 623 | | Cl | 1,028 | ± 130 |
| | Cl | 1,033 | ± 129 | | Sr | 17 | ± 2 |
| | Ti | 117 | ± 31 | | Mo | 28 | ± 4 |
| | Fe | 371 | ± 12 | | | | |
| | Br | 6 | ± 2 | | | | |
| | Rb | 9 | ± 2 | | | | |
| | Sr | 23 | ± 2 | | | | |
| | Mo | 34 | ± 4 | | | | |

붕산(H_3BO_3)과 붕사($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), 모노인산암 모늄($NH_4H_2PO_4$)도 방염제의 주성분으로 작용하나 다른 화학물질 보다 상대적으로 적은양이 포함되어 있거나(Phosphorus), 분석에 사용된 P-XRF의 기기적 특성상 원자번호 15번 이하의 경량원소 분석이 불가능하여(Boron) 탐지되지 않은 것으로 파악된다. 방염제의 안정제 및 침투제로 추정되는 브롬(Br)이나 아연(Zn) 성분도 방염제 도포 후 새롭게 검출이 되었으

나 극소량(10~100 ppm)이 검출되어 유의적인 결과 값에서 제외하였다. 또한 방염제를 도포하지 않은 석간주 등 몇몇 안료를 채색한 목재시편에서 황(S) 원소가 검출되었다. 이는 단청의 원료로 사용되는 안료의 순도 또는 교착제에 의한 간섭(오차)으로 추정되어 현장적용에서는 탐지 위치에서 제외하였다.

3.3. 현장조사를 통한 방염제 잔류성분분석

방염제 잔류 성분 분석 결과를 바탕으로 방염제 도포를 확인할 수 있는 화학적 탐지자로 황 원소(S)를 결정하였다. 이후 국내 목조건축물을 대상으로 현장조사를 수행하였다. 현장적용 시 보다 정확한 탐지를 위하여 안료가 채색된 목재부에서는 분석을 지양하고, 채색되지 않은 목재부에서만 분석을 수행하였다. 순천 송광사에서 방염제를 도포한 건물과 도포하지 않은 건물 총 3동을 분석한 결과 방염제를 도포한 건물에서는 황(S) 원소가 검출되었으며, 방염제를 도포하지 않은 건물에서는 황(S) 원소가 검출되지 않았다(Table 5).

4. 결 론

방염제는 주요 목조문화재에 화재 발생시, 초기 화재 확산을 지연시키는 매우 중요한 역할을 수행한다. 하지만 이러한 이점에도 불구하고 다양한 부작용을 야기하고 있다. 특히 단청의 백화현상과 박락현상, 목재 내부로 다량의 수분을 함유시키는 문제점이 대표적인 예이다. 하지만 국가적 차원에서 중요 목조건축물의 방염제 도포는 필요악일 수밖에 없다. 현재까지 방염제를 대체할 수 있는 다른 방안이 구축되어 있지 않기 때문이다.

방염제 도포 건축물의 현장조사 결과 여러 부작용이 확인되었다. 백화현상이라고 불리는 염색현상(Crystallization)은 단청의 본래의 색상을 퇴색시키고 있었으며, 박락현상을 통해 직접적으로 단청 채색층이 떨어져 나가는 경우도 많이 나타나고 있었다. 특히 이러한 부작용은 상대적으로 약제의 도포가 상대적으로 많이 이루어지는 건축물의 상부(기둥, 연목, 가구부재 등)에서 높게 나타나고 있었다. 이를 통해 방염제의 잔류현상이 백화현상 및 단청 박락현상을 가속화 시키는 것으로 판단되었다.

실제 목조건축물에서 방염제를 도포한 건물과 도포하지 않은 건물을 파악하기 위해 P-XRF를 이용하여 분석한 결과 대부분의 시편에서 칼슘(Ca)과 칼륨(K) 원소가 대부분의 비율을 차지하고 있었다. 칼슘

과 칼륨원소는 안료의 교착제로 사용되는 폴리졸의 주요 성분으로서 분석 시 함께 탐지된 것으로 파악된다(Hong 2012). 대부분의 구아니딘계 방염제, 인산계 방염제는 황(S)원소가 주요 원소로 구성되어 있다고 보고되고 있다(Park *et al.* 2013). 본 연구를 통해서도 P-XRF를 통해 황(S) 원소를 방염제 도포 탐지자로 사용이 가능할 것이라 판단되었으며, 실제 송광사(전남 순천) 목조건축물의 현장조사를 통해 가능성을 확인하였다. 이를 통해 현장에서 방염제의 도포를 확인할 수 있는 비파괴적 정성분석 방법을 정립할 수 있었다.

사 사

본 연구는 2011년 국립문화재연구소의 R&D 연구과제 「목조문화재 방염제 성능개선을 위한 기초연구(NRICH-1107-B17F)」의 일환으로 수행하였습니다.

REFERENCES

- Back, M.-H., Lee, J.-H. 2010. The Study for Fire Prevention of Main Wooden Cultural Properties of Korea. *Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.* 24(3): 1-8
- Chang, H.-S., Cho, W.-S., Kim, H.-G.. 2008. A Study on the Methods of Fire-Safety in Cultural Property Wooden Buildings. *Journal of Korean Institute of Rural Architecture* 10(4): 25-32.
- Hong, S.-W. 2012. Analysis of Dan-Chung Treated Wooden by Flame Retardant Performance. Department of Architectural Engineering, The Graduate School, Tongmyong University: 30-38.
- Inspections of government offices(Cultural Heritage Administration) report. 2008. Policy recommendations for the prevention of Sungnyemun accident.
- Kim, H.-J., Lee, S.-E. Oh, K.-H. 2011. A Study on the On-site Flame Resistant Treatment in Domestic. *Journal of Korean Institute of Fire Sci*

- & Eng. 25(2): 33-38.
- Kim, T.-G. 2010. Consideration on Fire-prevention Facilities for Wooden Cultural Heritages. CONSERVATION STUDIES 31: 156-171.
- Korea Fire Institute. Standard of the flame-resistant test and detailed rules. Revision 2005.11.21.
- National Emergency Management Agency. Notification No. 2012-34, 2012.02.09, Standard for type approval system and goods inspection of flame retardant treatment.
- National Statistical Office. 2006. damage of human life by burned site.
- National Statistical Office. 2008. Management situation of cultural heritage, Number of designated cultural heritage.
- Park, C.-W., Hong, S.-W., Lee, J.-K., Lim, N.-G. 2013. Flame Retardant and Weather Proof Characteristic of Dan-Chung Treated Wooden by Flame Retardant Performance 13(2): 122-130.
- Park, D. 2011. Fire Safety Measures for the Key Cultural Assets in Korea through Case Analysis. Journal of the Korean Society of Disaster Information 7(1): 64-74.
- Park, S.-H., Baek, E.-S. 2011. A Study on the Ways of Securing the Effectiveness of Field Flame Retardant Coating Process. Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng. 25(2): 95-100.
- Son, Y.S. 1988. Trace back on the past of flame retardant treatment and countermeasure in the Korea. Journal of Chemistry of Fire Prevention No.2(2): 31-41.
- The Cultural Properties Protection Law. Article No.11228, Revision 2012.01.26.