

## 촉진 열화 느티나무 부재의 역학적 특성

김 광 철<sup>†,1</sup>, 박 천 영<sup>2</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 주거환경학과, <sup>2</sup>목재문화진흥회

## Mechanical Properties of *Zelkova Serrata Makino* in Accelerated Weathering Test

Gwang-Chul Kim<sup>†,1</sup>, Chun-Young Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Housing Environmental Design, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

<sup>2</sup>Korea Association of Wood Culture, Seoul 137-180, Korea

**Abstract:** This study was carried out to analyze the effects on mechanical properties of deteriorated wood member by outdoor condition. The surface color, mechanical properties and structural stability of traditional wooden structures, exposed in water and UV, could be changeable. For the purpose, accelerated weathering test based on outdoor condition was carried out. The weathering time levels were composed 0, 500, 1000, 1,500 and 2,000 hours and mechanical properties were evaluated on each specimen according to weathering time level. Bending properties were decreased on weathering but recovered after 1,000 hours. Fatigue and impact strength were decreased to 1,000 hours and did not changed since then. Abrasion resistance was minimized in 1,000 hours. This results could be utilized for effectively stability management of traditional wooden structures and members.

**Keywords:** accelerated weathering, static bending, impact strength, abrasion resistance, fatigue

### 1. 서 론

목재는 콘크리트나 철근 등의 다른 재료와 다르게 비균질, 이방성 재료이며, 다공성의 섬유로 구성되어 있고, 다양한 구성 성분을 가지고 있다. 목재가 건축 재료로 사용될 경우 재질 특성상 주변의 온습도 변화 등의 외기 조건에 의하여 열화가 발생할 수 있다. 특히 외부로 노출된 부재의 경우에는 햇빛에 의한 자외선과 우천에 의한 수분에 직접 노출되어 열화 정도는 더 심각하게 발생할 수 있다. 우리의 전통 문화재 건물의 경우 대부분

이 목조로 되어있고, 기둥이나 보 등의 주요 부재가 외부로 노출되어 열화에 쉽게 노출되어 있다. 일반적으로 외기에 노출된 목재는 자외선과 수분에 의해 열화가 진행되는데 세포벽 내 리그닌 분해에 따른 셀룰로오스 사이의 접착력 감소 때문이라고 보고하였다(Kalnins 외 1993). 국내에서는 인공 촉진 열화 실험을 통해 열화에 따른 초음파 전달 속도나 흡습성, 조직 변화 등에 대한 다양한 연구들이 진행되었으나 촉진 열화 방법이 구조재에 대한 평가에 무리가 있었으며, 열화 시간이 상대적으로 짧아 추가적인 연구의 필요성을 제기하였다(강 외 2002, 2003; 김 2012). 또한, 대부분의 연구들이 촉진 열화에 따른 해부학적 성질이나 광학적 특성에 국한되어 역학적 성능 규명에 한계성을 가

2015년 9월 15일 접수; 2015년 10월 19일 수정; 2015년 10월 19일 게재확정

<sup>†</sup> 교신저자 : 김 광 철 (gckim@jbnu.ac.kr)



Fig. 1. Machine for Accelerated Weathering Test.

지고 있다(정 외 2002). 그러나 Yata 등(1995)에 따르면 외기 노출 목재의 경우 재색이 일정 시간 이후에는 더 이상 진행되지 않는다고 보고하였다. 목조 문화재의 경우 재색에 대한 평가와 더불어 과학적 보존을 위해서는 구조적 특성 규명이 매우 중요하다. 잔존 수명과 이에 대한 평가를 위해서는 각각의 역학적 성능과 열화와의 상관관계 규명이 필수적이라 하겠다.

또한 철근 구조물의 경우 휨 피로 거동 등 일정 기간 반복적으로 가해지는 하중에 대한 평가가 중요하게 다루어지지만(장 외 1992; 성 외 2010) 목재는 피로 거동에 대한 평가가 거의 없었다. 사람에 의한 하중이나 지진 등의 진동에 의해 미소하지만 주기적인 피로 하중에 의해 열화된 부재가 구조적으로 어떤 영향을 받는지에 대한 평가 또한 중요하다.

따라서 본 연구에서는 목재 부재를 축진 열화 시험을 진행하여 실제 온습도 조건에서 건축물에서 진행할 수 없는 열화 시험을 모의하여 진행하고, 열화에 의한 재료의 구조적 손상을 평가하기 위해 피로 강도, 충격 강도, 휨 강도 등 역학적 특성을 평가하여 목구조물의 구조재에 대한 열화가 구조적으로 어떠한 손상이 발생하는지를 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료

본 연구에서 사용한 목재는 목조 문화재의 건축 부재로 주로 사용되는 수종 중에 하나인 느티나무(*Zelkova Serrata Makino*)이며, 치수는 30 mm × 30 mm × 500 mm이다. 재료의 함수율과 비중을 측정하기 위하여 각각의 시편에서 30 mm × 30 mm

× 30 mm 치수의 시편을 2개씩 채취하여 실험하였으며, 전건 비중은 0.63 (표준편차 0.07), 함수율은 12% (표준편차 3%)이었다. 축진 열화 시험을 위해 각 열화 단계별로 40개 씩 총 200개의 시편을 사용하였다. 모든 열화 단계가 종료된 후 항온항습실(습도 65%, 온도 20°C)에서 48시간 조습 과정을 거쳐 역학적 성능 평가 실험을 진행하였다.

### 2.2. 실험 방법

#### 2.2.1. 축진 열화 실험

목재에서 축진 열화 시험은 일반적으로 판재의 표면 색도 변화 중심으로 평가가 이루어진다. 그러나 본 실험에서는 구조적 성능을 평가하기 위하여 별도의 축진 열화 시험 장치를 구성하여 사용하였다(Fig. 1). 기존의 문헌 자료를 기초로 일반적인 Xenon weather-O-meter 방식(Model : Model LCE-6101T, Labtech)을 기본 모델로 하여 동일한 조건을 조절할 수 있도록 구축하였다. 자외선 램프로는 BL lamp (Black Light lamp 조사량 : 340 nm파장에서 0.35 w/m<sup>2</sup>)를 사용하였고, 챔버 내 온도 42°C, 상대 습도 70%로 유지하도록 하였다. 120분간 자외선 조사(Light segment)와 18분간 인공 강우(증류수 사용, Spray segment)를 1 cycle로 하는 축진 열화 시험을 실시하였다. 열화 시간은 정 등(2002)의 연구 결과를 바탕으로 하여 0, 500, 1,000, 1,500, 2,000시간으로 설정하였다.

#### 2.2.2. 정적 휨 하중 시험

재료의 휨 특성을 분석하기 위하여 정적 휨 하중 시험을 수행하여 정적 탄성계수를 산출하였다. 지간 거리는 300 mm, 하중 속도 1.5 mm/min로 설정하였고, 실험 방법은 KS F 2208에 따라 진행하였다. 실험 기기는 만능강도시험기(Zwick, 10



Fig. 2. Testing Machine (Bending, Fatigue, Impact, abrasion resistance).

ton)를 사용하였다. 시험편은 각 그룹(0, 500, 1,000, 1,500, 2,000시간)에서 10개를 무작위 추출하여 진행하였으며, 실험 종료 후 지간 거리 내의 두 지점에서 흡수율을 측정하였다.

### 2.2.3. 피로 강도 시험

일반적으로 목재는 접합부 이외에는 피로 강도를 측정하지 않는다. 그러나 목조 문화재를 구성하고 있는 각 부재가 반복적인 외부 조건의 변화에 따라 내부 응력이 발생할 수 있고 이는 강도 저하로 연계될 수 있으며, 개방에 따른 사람의 계속된 가력은 재료의 피로를 가져올 수 있다. 따라서 본 연구에서는 인공 열화 시간에 따른 피로 강도를 평가하였다.

목재의 피로 성능을 평가하기 위하여 본 연구에서는 KS M ISO 13003에 준하여 실험을 진행하였다. 시험편의 크기는 정적 힘 실험과 동일한 치수의 시험편을 준비하였으며, 실험 장비는 만능강도 시험기를 사용하였다. 가력을 위한 진동수는 기자재가 허용하는 최대값인 0.3 Hz로 설정하였고, 가력 하중은 정적 힘 하중 실험을 통해 얻은 힘 강도의 50%를 최대값으로, 10%를 최소값으로 설정하여 부재가 파괴에 이를 때까지 진행하였다. 피로 성능 평가를 위해 파괴 시 사이클과 그때 측정되는 최대 변형을 산출하였다. 각 촉진 열화 그룹별로 반복수는 10회이며, 실험 직후 흡수율과 비중을 측정하였다.

### 2.2.4. 충격 강도 시험

목재의 충격 강도는 KS F 2211의 목재의 충격 힘 시험 방법에 따라 각 촉진 열화 단계별로 측정하였다. 시험편의 크기는 가로, 세로 20 mm, 길이

250 mm이며, 각 그룹별 10개의 시험편에 대하여 측정하였다. 1 m 위에서 단위 중량의 추를 자유 낙하 시켜 위치에너지가 모두 운동에너지로 바뀌는 지점에서 재료의 충격에 의한 파괴 흡수되는 에너지를 측정하였다.

### 2.2.5. 내마모도 시험

내마모도는 KS F 2215에 준하여 평가하였다. 일반적으로 내마모도 실험은 두께 10 mm로 한 번의 길이가 50 mm 정도의 정사각형 시험편으로 강판과 브러시, 그리고 모래를 살포하여 1,000회전 시킨 후 시험 전후의 질량 감소량과 마모 면적을 통하여 평가하게 된다. 그러나 해당 실험 장치의 사용은 본 촉진 열화 시험에 사용된 목재 시험편의 치수를 고려할 경우 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 마모 면적 30\*150 (mm)의 시험편에 대하여 8.15 kgf의 수직 하중이 가해진 상태에서 27 mm/sec의 속도로 34초간 목재를 마모시켜 내마모도를 평가하였다.

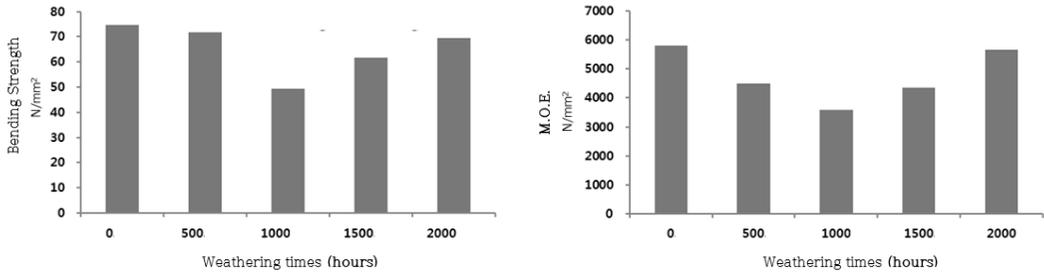
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 정적 힘 성능

힘 실험 결과 촉진 열화 시간이 증가함에 따른 정적 힘 특성은 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 1,000시간이 경과했을 때 가장 낮은 값을 보였으며 이후 회복하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 자외선만을 사용할 경우 강도 감소가 발생하나 (김 2012), 인공 강우에 따른 수분에 의해 산화억제추출물이 조직 변화를 저지하기 때문인 것으로 판단된다(Nzokou et al. 2011). 이러한 결과는 다른 역학 성능 평가에서도 유사하게 확인할 수 있

**Table 1.** Static Bending Properties (Unit : N/mm<sup>2</sup>)

|                           |              | 0 hours     | 500 hours   | 1,000 hours | 1,500 hours | 2,000 hours |
|---------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Bending Strength          | Average      | 74.55       | 71.60       | 49.28       | 61.56       | 69.35       |
|                           | S.D.         | 14.34       | 13.13       | 8.84        | 5.08        | 6.03        |
|                           | <b>Ratio</b> | <b>1</b>    | <b>0.96</b> | <b>0.66</b> | <b>0.83</b> | <b>0.93</b> |
| MOE                       | Average      | 5,792.41    | 4,499.40    | 3,575.69    | 4,346.69    | 5,643.31    |
|                           | S.D.         | 1,358.92    | 863.17      | 841.40      | 726.74      | 812.60      |
|                           | <b>Ratio</b> | <b>1</b>    | <b>0.78</b> | <b>0.62</b> | <b>0.75</b> | <b>0.97</b> |
| Proportional Limit Stress | Average      | 47.13       | 43.48       | 29.14       | 33.41       | 45.63       |
|                           | <b>S.D.</b>  | <b>8.86</b> | <b>8.23</b> | <b>6.36</b> | <b>5.12</b> | <b>5.89</b> |
|                           | <b>Ratio</b> | <b>1</b>    | <b>0.92</b> | <b>0.62</b> | <b>0.71</b> | <b>0.89</b> |



**Fig. 3.** Static Bending Properties.

다. 그러나 많은 선행 연구에 따르면 촉진 열화에 따라 강도가 감소한다는 결과를 보고하지만 이는 열화 시간이나 열화 방법의 차이에 따른 것으로 사료된다. 이러한 경향을 일반화하기 위해서는 보다 추가적인 실험과 연구가 필요할 것이다.

**3.2. 피로 성능**

피로 성능은 다른 항목에 비해 시편별 변이(표준편차 비교)가 매우 크다. 촉진 열화 초기 1,000 시간까지는 목재 조직의 연화로 최대 변이가 증가하지만 1,500시간부터는 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 파괴 사이클 역시 1,000시간까지는 증가하지만 이후 다시 감소하는 결과를 얻었다. 1,000 시간의 촉진 열화 시편이 다른 그룹에 비해 함수율이 14% (표준편차 1%)로 다른 그룹에 비해 약 2% 정도 조금 높은 점을 감안하면, 목재의 피로 성능은 열화 초기 조직 연화로 파괴 사이클과 변형이 증가하지만, 1,500시간 이후 다시 안정화되는 것으로 판단되며, 현미경을 통한 미세 조직 관찰

등의 추가 연구가 필요하다.

**3.3. 충격 성능**

충격 힘 흡수 에너지는 촉진 열화 초기(500시간)에 급격히 감소하고 이후 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 피로 시험에서 언급한 목재 조직의 연화에 따른 성능 감소와 동일한 결과를 나타낸다. 따라서 목조 문화재처럼 시간이 오래된 건물의 목재 부재의 충격강도는 초기에는 수분이나 자외선에 의해 감소될 수 있으나, 일정 시간이 경과되면 충격 강도는 더 이상의 변화가 없다는 것이며, 다양한 수종에 대한 보다 세밀한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

**3.4. 내마모도**

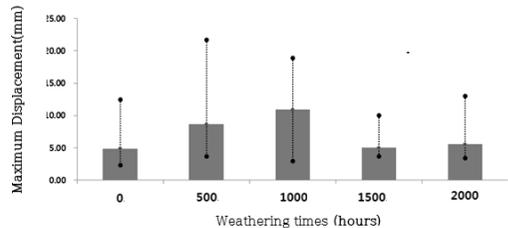
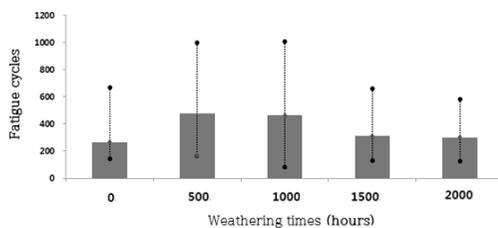
내마모도는 촉진 열화 시간이 증가하면 내마모도 역시 증가하는 결과를 알 수 있다. 1,000시간대 내마모도가 감소하는 결과가 도출되었으나, 함수율이 다른 그룹(평균 13%, 표준편차 3%)에 비

**Table 2.** Fatigue Performance

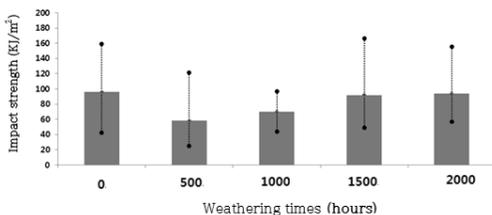
|                           |         | 0 hours | 500 hours | 1,000 hours | 1,500 hours | 2,000 hours |
|---------------------------|---------|---------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| Fatigue Cycle (numbers)   | Average | 265     | 476       | 464         | 311         | 301         |
|                           | S.D.    | 192     | 354       | 368         | 661         | 581         |
|                           | Ratio   | 1       | 1.79      | 1.75        | 1.17        | 1.13        |
| Maximum Displacement (mm) | Average | 4.89    | 8.66      | 10.93       | 5.03        | 5.56        |
|                           | S.D.    | 3.09    | 0.5       | 58.20       | 2.75        | 3.15        |
|                           | Ratio   | 1       | 1.77      | 2.23        | 1.03        | 1.14        |

**Table 3.** Impact Strength Properties (Unit : kJ/m<sup>2</sup>)

|         |  | 0 hours | 500 hours | 1,000 hours | 1,500 hours | 2,000 hours |
|---------|--|---------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| Average |  | 95.97   | 58.13     | 69.66       | 91.83       | 93.72       |
| S.D.    |  | 43.33   | 32.03     | 22.31       | 43.44       | 39.51       |
| Ratio   |  | 1       | 0.61      | 0.72        | 0.95        | 0.97        |



**Fig. 4.** Fatigue Performance.



**Fig. 5.** Impact Strength Properties.

해 2% 정도 높은 것(평균 17%, 표준편차 3%)을 고려하면 거의 균일한 결과가 얻어진다.

**4. 결 론**

본 연구 결과 촉진 열화 시간이 증가함에 따라 정적 휨 성능은 감소하며, 휨 탄성 계수의 경우 열화 초기인 1,000시간에 가장 작고, 그 이후 일정한 결과를 얻었다. 피로 성능의 경우 시편에 따른 변

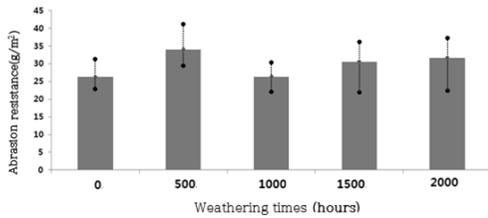
이가 매우 크나, 열화 초기 100시간까지는 조직 연화로 최대 변위가 증가하지만 이후 다시 감소하는 경향을 나타내었으며, 충격 성능의 경우 열화 진행에 따라 세포 사이의 결합이 약화되거나 섬유 마모로 성능이 저하됨을 알 수 있었으며, 내마모도의 경우 1,000시간 때 가장 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

많은 선행 연구에서 목재의 외기 조건에 따른 열화가 진행됨에 따라 점진적으로 강도가 저하되는 것으로 알려져 있지만, 항목에 따라 일정 시간이 경과하면 더 이상의 감소가 발생하지 않는 것으로 평가되고, 특히 휨 성능의 경우 1,000시간 이후 회복되는 것을 알 수 있다.

문화재의 주요 구조 부재인 목재는 수분과 자외선에 직접 노출되므로 색차 변화 등 광학적 특성만이 열화 판단의 기준이 될 수 없다. 중요한 것은

**Table 4.** Abrasion Resistance Properties (Unit : g/m<sup>2</sup>)

|         | 0 hours | 500 hours | 1,000 hours | 1,500 hours | 2,000 hours |
|---------|---------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| Average | 26.24   | 34.05     | 26.35       | 30.56       | 31.67       |
| S.D.    | 3.01    | 4.14      | 2.60        | 4.93        | 4.82        |
| Ratio   | 1       | 1.30      | 1.00        | 1.16        | 1.20        |



**Fig. 6.** Abrasion Resistance Properties.

열화가 구조적으로 어떤 영향을 미치는지를 객관적이고 과학적으로 판단하여 문화재를 안전하게 후대에 계승해야 하며, 이를 위해 다양한 수종, 다양한 열화 방법, 역학적 성능의 정략적 평가 기준 등 추가적인 연구가 필요할 것이다.

## 사 사

이 논문은 2012년도 전북대학교 교비 연구 교원 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

이 연구는 2012년도 문화재청 국립문화재연구소 문화유산 융복합연구(R&D)의 일환인 ‘목조 문화재의 개방과 관람객 출입에 따른 보존 영향 평가’ 연구 사업의 지원을 받아 이루어졌으며, 행정적 및 재정적 지원에 깊이 감사한다.

## 참 고 문 헌

강호양, 김수원, 박상진. 2003. 무수초산 및 포름알데하이드 기상처리 산벚나무의 야외 폭로 및 촉진열화. 목재공학회 31(5): 57-64.

강호양, 박상진, 김영숙. 2002. 촉진 열화 목재의 흡습성과 초음파 전달 속도. 목재공학회 30(1): 18-24.

김광철. 2012. 소나무재의 촉진열화실험에 따른 재색변화에 대한 연구. 한국가구학회 23(2): 152-162.

김광철. 2012. 촉진열화실험에 의한 소나무의 물성 및 조직변화에 대한 연구. 한국가구학회 23(3): 324-331.

성덕룡, 박용걸, 고동춘, 이시용, 민낙기. 2010. 실물 휨 피로시험을 통한 철도 레일의 휨 피로 거동 분석. 한국철도학회 13(2): 201-207.

장동일, 재원규, 손영현. 1992. 강섬유보강 콘크리트의 휨 피로 거동에 관한 연구. 콘크리트학회 4(1): 81-87.

정호, 안병만, 이두면, 신필수, 박수연. 2002. 옥외 노출 소재의 신뢰성 평가 기술 및 표준화. 한국신뢰성학회 정기학술대회. 147-155쪽.

ASTM. 2008. Standard practice for collection of settled dust samples using wipe sampling methods for subsequent determination of metals. American Society of Testing and Materials, Philadelphia, USA.

Kalnins, M. A., Feist, W. C. 1993. Increase in wettability of wood with weathering. Forest Prod. J. 43(2): 55-57.

Pascal Nzokou, D. Pascal Kamdem, Ali Temiz. 2011. Effect of accelerated weathering on discoloration and roughness of finished ash wood surfaces in comparison with red oak and hard maple. Progress in Organic Coatings 71. 350-354.

Wang, J., Wu, X., Jiang, M., Morris, P. 2007. Decay hazard classifications in China for exterior above-ground wood. The International Research Group on Wood Preservation IRG/WP 07-20357. Stockholm, Sweden.