

화염에 노출된 목재 마루 시스템의 신뢰성 해석에 관한 연구*¹

김 광 철*^{2†} · 이 전 제*³

Study on the Reliability Analysis of Wood Floor System Exposed to Fire*¹

Gwang-Chul Kim*^{2†} · Jun-Jae Lee*³

요 약

내화 성능은 표준 화염 조건에 노출된 목구조물의 안전성 평가를 위한 중요한 기준이 된다. 내화 성능의 기준으로 여러 나라에서 지속 시간과 파괴 시까지의 시간이 사용되고 있다. 본 연구에서는 화염에 대한 신뢰성 설계의 기초 연구로서 화염에 노출된 목재 마루 시스템의 신뢰성 해석이 진행되었다. 해석은 수치 해석적 방법과 결정론적 방법 두 가지를 모두 사용하였다. 두 방법 간에는 큰 차이를 보이지 않았다. 화염에 노출된 마루시스템의 신뢰도는 부재의 변이계수에 크게 의존하였으며 부재의 강도나 하중은 신뢰도에 크게 영향하지 않았다.

ABSTRACT

Fire performance is the important criterion for evaluating of safety of wood structures which exposed to the standard fire condition. Endurance time and time-to-failure are used as the criteria for fire performance in many countries. Reliability analysis about wood floor system which exposed to fire was carried out as preliminary research for reliability-based design on fire. Analyses were conducted by two methods, numerical analysis method and deterministic method. They didn't show the difference between two methods. The reliability of floor exposed to fire showed strong dependence on the coefficient of variation of member and did not be influenced by the strength or load of member.

*¹ 접수 2004년 6월 24일, 채택 2004년 8월 18일

*² 익산대학, Iksan National College, Iksan 570-752, Korea

*³ 서울대학교 농업생명과학대학, College of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

† 주저자(corresponding author) : 김광철(e-mail: gckim@iksan.ac.kr)

Keywords: fire performance, endurance time, time-to-failure, fire criteria, reliability-based design, numerical analysis method, coefficient of variation

1. 서 론

화염에 노출된 구조물의 안전성을 평가하는데 있어 그 구조물이 구조적 성능을 유지할 수 있는가 하는 내화성능이 중요한 기준 중의 하나이다. 이 내화성능의 문제는 특히 목구조물에 있어서 두드러지게 부각되고 있는 문제이다. 이러한 내화성능을 평가하는 기준으로 우리나라를 제외한 여러 나라에서 가장 널리 쓰이는 방법은 내화시간을 평가하는 것이다. 내화시간이란 구조물이 화염에 노출되었을 때 파괴에까지 이르는 시간을 말하며, 실제 화재 시에는 인명의 구조와 진화작업을 할 수 있는 시간으로서, 각 나라별로 정해진 화염조건과 구조물의 형태에 따라 내화시간을 법규로 정하고 있다. 국내에서도 최근 들어 목조주택의 공급 증대로 인해 내화에 관한 관심이 고조되고 있으며 이에 관련된 연구(Kim & Lee, 1995; Kim & Lee, 1997; Park & Lee, 1997)들도 진행되었다.

기존의 목구조물의 내화성능을 평가하고 등급을 구분하는 방법으로는, 단독부재보다 구조물의 경우 여러 인자들의 복합적 영향 때문에 화염에 좀더 안전한 내화성능을 보이지만 이를 실제적으로 측정할 방법이 없다. 기존의 방법은 단순히 표준화염 조건(ASTM E 119-95)이나 재료의 화염에 대한 지속시간이나 파괴에 이르는 시간을 비교하는 것으로, 다른 구조물간의 성능 비교뿐이기 때문에 다른 조건, 다른 환경, 다른 재료에서는 비교나 참조가 불가능하다. 또한 실제 중요한 문제가 되는 것은 화재의 발생빈도나 재료의 화염에 대한 지속시간이 아니라, 화재에 따른 구조물의 붕괴 위험성(파괴확률)을 측정하는 것이지만, 현행 내화 기준으로는 이에 적합한 방법도 부족하지만 무엇보다 이를 실제 구조 설계에 적용시키기가 어렵다는 것이다.

내화시간과 함께 파괴에 이르기까지의 시간은 화염에 노출된 구조물의 하중 지지력을 표현하는 중요한 계수이다. 하지만, 단순한 부재의 endurance time이나 파괴에 이르는 시간으로는 내화에 대한 명확한 기

준제시가 불가능하다. 특히 재료성질의 변이가 담보되지 않는 기존의 단순한 내화에 대한 평균시간으로는 정확한 내화성능 평가가 되지 않는 문제점이 있다. 즉 같은 내화성능을 가진다고 인정되는 재료일지라도 정확한 재료의 성질 변이를 고려하면 그 재료의 화재에 대한 안전도(safety)가 다르게 나타난다는 것이다. 따라서 목구조물의 내화에 대한 설계기준을 제정하여야 할 필요가 대두되고 있는 시점에서, 기존의 단순 비교적 방법을 지양하고 새로운 확률론적 방법에 기초한 신뢰성 이론이 내화 성능 평가에 도입되어야 할 것으로 생각된다.

신뢰성 이론이라 함은 기존의 허용응력법 등의 결정론적 방법의 문제점을 해소하기 위하여 구조설계 분야에서 발전된 것으로서 이미 강도나 강성에 기초한 구조설계 분야에서는 선진국의 경우 코드화 되어 사용되고 있는 실정이다. 국내에서도 이와 관련된 연구(Kim & Lee, 1996)들이 몇몇 진행되었으며 여러 경우에 있어 적용 가능성이 연구 검토되고 있다.

구조물의 내화에 기초한 신뢰성 설계 기준을 제시하기 위해서는 먼저 강도와 강성에 기초해 적용되던 신뢰성 이론이 화염에 노출된 구조물에서는 어떻게 적용가능한지를 살펴보고 저항부분과 하중부분의 해석 시에 어떤 식으로 올바른 해석을 실시할 수 있을지를 고찰하여야 한다. 또한 모든 구조설계 이전엔 반드시 구조물의 성능분석 또는 안전성 해석이 선행되어야 하므로, 화염에 노출된 구조물의 내화 구조설계 이전에 목재의 내화에 대한 신뢰성 해석 역시 내화설계의 전 단계로서 반드시 선행되어야 할 부분이다. 따라서 본 연구에서는 신뢰성 이론을 도입하여 가상 목재 마루 시스템의 안전성 해석을 실시하였다.

설계자는 구조물을 설계하는데 있어 정해진 기간 내에 부재가 심한 화재에 대해서도 잔존할 수 있기를 높은 확신으로 믿을 수 있을 만큼 설계되기를 바란다. 신뢰성 해석이란 이런 믿음을 확률화된 수치로 표현하는 것이다. 지금까지 화염에 노출된 부재의 내화성능은 그래프를 이용하는 등의 방법에 의해 평가되고

있다. 하지만, 최근 들어 모든 설계법이 확률론적 설계법 쪽으로 옮겨가고 있는 추세에서 내화설계 역시 확률에 기초한 신뢰성 설계로 옮겨가야 할 것이다. 이 신뢰성 설계의 전 단계인 신뢰성 해석을 위해서는 내화성능을 예측하는 모델이 필요하며 이는 구조물의 내화성능부분에서 뿐만 아니라 설계측면에서도 가장 중요한 부분이다. 신뢰성 해석에서 중요한 것은 부재의 평균 파괴시간 등이 아니라 훨씬 변이가 심한 부재의 강도분포이다. 본 연구에서는 Kim & Lee (1996) 등의 제안에 따라, 부재의 저항은 대수 정규분포한다고 가정하고 부재의 하중측면은 정규분포를 한다는 전제 하에 신뢰성 해석을 실시하였다. 신뢰성 지수산정은 결정론적 방법과 Kim & Lee (1996)의 수치해석적 방법 두 가지를 사용하여 계산하였다. MOR과 MOE를 기초 저항값으로 사용하여 신뢰성 해석을 실시하는 과정에서 결정론적 방법과 수치해석적 방법 간의 차이는 대개 변수 처리 시간과 결과 도출 시간에서 발생하는 것으로 통상 시간적 측면에서 20~30% 후자가 더 소요된다(Hasofer *et al.*, 1974). 게다가 결정론적 방법의 경우 구조물의 안전성에 크게 영향하는 하중간의 비율이나, 하중과 저항의 비율 등의 기여도가 전혀 고려되지 않는 단점이 있으나 해석 방법이 편리하고 계산에 소요되는 시간이 짧다는 장점이 있다. 따라서 해석결과의 차이가 어느 정도 존재한다면, 해석 시간의 차이를 떠나서 더 안전하고 정확한 해석이 가능한 수치해석적 방법이 사용되어야 할 것이다. 하지만 해석 결과의 차이가 크지 않다면, 설계자가 친숙한 방법을 선택 사용하는 것도 무방할 것이다.

2. 해석 및 방법

표준화염에 노출된 목구조물의 신뢰성 해석을 실시하기 위해서는 먼저 해석의 두 가지 임의변수인 재료의 저항부분(R로 정의)과 하중부분(S로 정의)을 정의하여야 한다. 두 변수는 상관관계가 존재하지만 해석의 편의상 서로 독립적이라고 가정하여 해석을 실시한다. 화염에 노출된 구조물의 저항부분은 재료의 파괴에 이르기까지의 시간에 해당하고, 하중부분은 fire endurance에 해당한다고 볼 수 있다. 즉, $R=t_r$ 이고, $S=t_d$ 에 해당한다(Ellingwood & Shaver, 1977;

Galambos & James, 1982; Hasofer *et al.*, 1974; Kiureghian, 1989; Kececioglu, 1991).

2.1. 파괴에까지 이르는 시간

표준화염에 노출된 목재 보의 신뢰성 해석을 실시하기 위해서는 먼저 재료의 저항부분이 되는 파괴까지의 시간을 구해야 한다. 하지만 실제 실험을 통해 파괴시간을 구한다는 것은 경제적인 면이나 시간적 측면에서 막대한 손실이 된다. 따라서 파괴에까지 이르는 시간을 근사하게 예측할 수 있는 모델을 개발할 수 있다면 이를 이용하는 것이 편리할 것이다. 이에 따라 내화성능과 파괴에 이르기까지의 시간을 예측할 수 있는 모델과 방법을 제시하고자 많은 연구가 이루어져왔다(Burros, 1975; Clancy, 1996; Collier, 1994; Cramer & White, 1996; Knudson & Schniewind, 1975; Konig, 1994; Lie, 1972; Noren, 1988; Ouchi, 1988, Takeda & Mehaffey, 1996; Thomas *et al.*, 1996; Thomas *et al.*, 1994; White, 1996). 본 연구에서는 Moment-residual cross-section modulus model (Schaffer *et al.*, 1988)을 저항부 해석에 사용하였다. 화염에 노출된 마루시스템의 방정식은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$aB = \frac{MY(t_r, C)}{I(t_r, C)} \quad (1)$$

a : Performance factor of exposed joist,

B : MOR of joist at room temperature

M : Applied moment caused by both dead and live loads, t_r : time to failure

$Y(t_r, C)$: Distance to extreme fiber

$I(t_r, C)$: Moment of inertia about an axis mid-height the remaining uncharred section

식 1을 전개하면 다음의 식 2와 같다.

$$aB = \frac{M(d - C \cdot t_r)/2}{(b - 2C \cdot t_r)(d - C \cdot t_r)^3/12} \quad (2)$$

b : Width of joist, d : Depth of joist

식 (2)를 t_f 에 관해 풀면 3차식이 유도된다.

$$\frac{6M}{aB} = bd^2 - 2Cd(d+b)t_f + C^2(b+4d)t_f^2 - 2C^3t_f^3 \quad (3)$$

이 식에서 3차항을 삭제하고 2"×6"나, 2"×10" 부재를 적용해 파괴에까지 이르는 시간을 구하면 원식과 3차항을 삭제한 식 사이에, 1.58~0.35% 정도의 오차가 발생한다. 이 정도의 오차라면 식 (3)을 예측식으로 사용할 수 있다. 하지만, 식 (2)의 좌측 부분이 온도의 상승에 의한 강도의 변화는 설명할 수 있지만 열의 축적에 의한 단면의 강도감소는 설명하지 못하고 있다는 단점이 있다. 따라서 식 (2)의 좌측에 시간에 관련된 항을 추가하여 이를 보정하여야 한다. 이 경우 시간에 관련된 부재의 형상인자를 도입하면 식은 다음의 (4)와 같아진다.

$$\frac{B}{1 + \left(\frac{b+2d}{bd}\right)rt_f} = \frac{M(d - C \cdot t_f)/2}{(b - 2C \cdot t_f)(d - C \cdot t_f)^3/12} \quad (4)$$

식 4를 t_f 에 관해 정리한 후 3차항을 삭제하고 풀면 다음의 식 (5)가 얻어진다.

$$t_f = \frac{2Ca(b+d) + \frac{6M(b+2d)z}{bdB} - \sqrt{\left[2Ca(b+d) + \frac{6M(b+2d)z}{bdB}\right]^2 - 4C^2(b+4d)\left(bd^2 - \frac{6M}{B}\right)}}{2C^2(b+4d)} \quad (5)$$

본 연구에서는 식 (5)를 t_f 의 최종 계산식으로 사용하여 화염에 노출된 부재의 저항해석에 이용하였다.

2.2. 내화 성능

목재 마루 시스템의 fire duration은 다음의 식 (6)과 같다(Gross, 1977; Schaffer et al, 1988).

$$t_d = \frac{W A_F}{5.5 A_w H^{1/2}} \quad (6)$$

여기서, 모든 변수는 임의 변수이다.

W : Fuel load density, A_F : Floor area,

A_w : Opening area

H : Opening height, t_d : fire duration

2.3. 신뢰성 해석을 위한 자료 해석

2.3.1. 저항 해석

저항부분의 해석에는 식 (5)에서 얻어진 파괴에 이르기까지의 시간 예측 식을 이용하였다. 신뢰성 지수를 산정하는데 있어 어떤 방법을 사용하든지 먼저 평균값과 변이계수를 구하여야 한다. 평균값과 변이계수는 각각 다음과 같다. 변수들 위의 막대기 표시 (\bar{X})는 임의변수의 평균값을 의미한다.

$$\mu_R = \frac{2Ca(b+d) + \frac{6M(b+2d)z}{bdB} - \sqrt{\left[2Ca(b+d) + \frac{6M(b+2d)z}{bdB}\right]^2 - 4C^2(b+4d)\left(bd^2 - \frac{6M}{B}\right)}}{2C^2(b+4d)}$$

$$\Omega_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R} \text{ 이고,}$$

$$\sigma_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial C}\right)^2 \sigma_C^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial a}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial M}\right)^2 \sigma_M^2} \text{ 이다.}$$

2.3.2. 하중 해석

하중부분의 해석에는 식 (6)에서 얻어진 duration time을 이용한다. 역시 평균값과 변이계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$\mu_S = \frac{\bar{W} \bar{A}_F}{5.5 \bar{A}_w \bar{H}^{1/2}}$$

$$\Omega_S = \sqrt{\Omega_W^2 + \Omega_{A_F}^2 + \Omega_{A_w}^2 + \Omega_H^2/4}$$

이들 저항과 하중의 해석 식을 이용하여 화염에 노출된 목재 마루 시스템의 신뢰성을 평가해 보았다.

2.4. 신뢰성 평가를 위한 기초 자료

화염에 노출된 목재 마루 시스템의 신뢰성 평가를 위한 기초 자료는 다음의 Table 1과 같다.

Table 1. Resistance variables for reliability analysis of wood floor assembly

	Depth (mm)	Width (mm)	Modulus of rupture (kgf/cm ²)	Char rate (mm/min)	Thermal degrade factor (mm/min)	Moment (kgf-cm)	K (1/mm)
Avg	229	37	371	0.65	5.1	21,950	0.06

Table 2. Load variables for reliability analysis of wood floor assembly

	Fuel load density (kg/m ²)	Floor area (m ²)	Opening area (m ²)	Opening height (m)
Avg	27	40	10	15

Table 3. Averages and coefficients of variation of resistance and load parts

μ_R (min)	μ_S (min)	Ω_R	Ω_S
718	32.0	0.40	0.36

μ_R : average of resistance. μ_S : average of loads.
 Ω_R : Coefficient of variation for resistance.
 Ω_S : Coefficient of variation for loads.

마루 시스템에 사용된 부재의 치수 및 물리적 성질은 가장 널리 쓰이는 수종에 대해 연구한 Schaffer *et al* (1988)의 자료를 인용하였다.

탄화속도, C는 북미 등에서는 관습적으로 분당 0.65 mm (1/40 inch)를 사용하고 있으며(Schaffer, 1977), 유럽지역에서는 침엽수와 활엽수간의 차이를 두면서 밀도를 290 kg/m³과 450 kg/m³을 경계로 하여 대개 0.5에서 0.8 mm/min을 사용하고 있다(Konig, 1994). 본 연구에서는 치수 등을 주로 북미 자료를 인용하였으므로 0.65 mm/min을 탄화속도로 사용하였다.

열적 열화 인자, γ 는 80년대 초 Woeste & Schaffer의 연구 등을 통해 4.3 mm/min (0.17 in/min)정도가 적당한 것으로 인정되고 있었으나, 최근의 연구(Schaffer & White, 1988)에 의하면 5.1 mm/min (0.2 in/min)가 적합한 것으로 받아들여지고 있다. 따라서 본 연구에서도 후자를 사용하였다.

사하중과 활하중에 의해 가해지는 모멘트는 21,950 kgf-cm가 적당한 값으로 추천(Schaffer & White, 1988)되고 있다.

형상인자, K는 Table 1의 자료를 이용하여 계산하면 0.06 (1/mm)이 된다.

Fuel load density란 화염하중이라고도 불리며, 마루의 단위 면적 당 포함되어 있는 가연성 물질의 총량을 말한다. 북미의 단독주택의 경우 27 kg/m² 정도로 조사되어 있다. 본 연구에서는 이 값을 사용한다.

마루의 면적 역시 위의 화염하중이 실험된 면적 40 m²를 사용한다.

채광이나 환기 등을 위해 설치된 개구부의 면적은 바닥면적의 1/10을 사용한다(한국의 건축물 구조 기준 등에 관한 규칙 참조, 1996). Gross 등의 실험 기준에 따라 개구부의 평균 높이는 1.5 m를 사용한다.

위의 자료들과 예측 식들을 이용하여 장선이 2"×10" douglas-fir로 이루어진 목재 마루 시스템이 표준 화염(ASTM, 1995)에 노출되었을 때의 저항과 하중의 평균값과 변이계수 등을 계산하면 Table 3과 같다(계산은 수학 package인 Matlab, Ver. 4.02를 사용하였다).

3. 결과 및 고찰

3.1. 수치해석법에 의한 신뢰성 해석

Kim & Lee (1996)에 의하면 목재 마루 시스템의 신뢰성 지수는 다음과 같다.

$$\phi N_o = \gamma_S \tag{7}$$

여기서,

$$\phi = \exp(-\alpha_R \beta \Omega_R) \tag{8}$$

$$\gamma_S = 1 + \alpha_S \beta \Omega_S \tag{9}$$

Table 4. The results of reliability analysis for two methods

	Numerical method	Deterministic method
β	1.6	1.5

β : Reliability index

$$N_o = \bar{R}/\bar{S}, \rho = \bar{L}/\bar{D} \quad (10)$$

$$\alpha_R = \frac{\phi \Omega_R N_o}{\sqrt{\phi^2 \Omega_R^2 N_o^2 + \Omega_S^2}} = \frac{\gamma_S \Omega_R}{\sqrt{\gamma_S^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad (11)$$

$$\alpha_S = \frac{\Omega_S}{\sqrt{\phi^2 \Omega_R^2 N_o^2 + \Omega_S^2}} = \frac{\Omega_S}{\sqrt{\gamma_S^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad (12)$$

단, $\Omega_S = \sqrt{\Omega_{SD}^2 + \Omega_{SL}^2 \rho^2} / (1 + \rho)$

위의 방정식들을 수치해석적 기법으로 풀기 위해서 Newton-Raphson의 무한 반복법을 사용한 Kim & Lee (1996)의 프로그램을 이용하였다. 결과는 Table 4에 제시하였다.

3.2. 결정론적 해석법에 의한 신뢰성 해석

위의 수치해석법보다 정확도는 떨어지지만 편리함이나 시간소요가 적은 결정론적 해석법을 이용한 신뢰성 지수 산정은 다음과 같다.

구조물이 안전할 확률은 $Rel = Pr(R/S > 1)$ 이다. 괄호 안의 항을 로그를 취하면 $\ln(R/S > 0)$ 이 되며 $\ln(R/S)$ 를 J 라 하고 이를 변형하면 $Rel = Pr(J > 0) = 1 - F_J(0)$ 가 된다. 여기서 F_J 는 변수 J 에 대한 누적밀도 함수가 된다. 여기에 FOSM법을 사용하여 정리하면 평균과 분산은 다음과 같아진다.

$$\mu_J \cong \ln \frac{\mu_R}{\mu_S}, \sigma_J^2 \cong \Omega_R^2 + \Omega_S^2 \quad (13)$$

이식을 J 에 대해 표준화 하면

$$\lambda = \frac{J - \mu_J}{\sigma_J} \quad (14)$$

이것에 위의 식들을 대입하면 $Rel = Pr\left(\lambda > -\frac{\mu_J}{\sigma_J}\right)$ 가 된다. 여기서 신뢰성 지수 β 가 정의된다.

$$\beta = \frac{\mu_J}{\sigma_J} = \frac{\ln \frac{\mu_R}{\mu_S}}{\sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad (15)$$

3.3. 목재 마루 시스템의 내화에 대한 신뢰성 해석

Table 3의 결과와 3.1.절과 3.2.절의 해석법을 이용하여 해석을 실시한 결과는 Table 4와 같다.

신뢰성 해석의 결과는 확률론적 방법과 결정론적 방법간에 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 어떤 방법을 사용하든 비슷한 결과가 얻어짐으로 어떤 방법이 더 편리한지 또는 설계자가 어떤 방법이 익숙한지에 따라 임의대로 사용하면 될 것이다. 여기서 신뢰성 지수 1.5라 함은 $P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta)$ 에 따라 0.092 얻어지고 이것은 위의 자료로 구성된 목재 마루 시스템이 화염에 1시간 노출되었을 때의 파괴확률이 9.2%로 매우 낮음을 나타낸다. 또한 신뢰성 지수 1.5라 함은 단독주택에 요구되는 최소 신뢰성 지수값(Kim & Lee, 1996)과 유사함을 보였다. 화염에 노출된 마루 시스템의 신뢰성 해석의 결과가 어떤 변수에 가장 영향을 받는가에 대해 두 방법 간의 차이가 거의 없으므로 결정론적 방법을 이용하여 해석을 실시하였을 경우, 부재의 저항값이나 하중값 등을 변화시킨 결과는 Fig. 1과 2 같이 신뢰성 해석결과에 별 영향을 끼치지 않았다. 즉, 파괴에 이르기까지의 시간이나 하중 지속 시간의 차이는 다른 변수에 비해 화염에 노출된 부재의 안전성에 끼치는 영향이 상대적으로 적음을 알 수 있다. 또한 하중부위의 변이계수는 목조뿐만 아니라 다른 건축에서도 각 해당 기관에서 설계방식의 보급과 편의를 위해 상수항처럼 고정을 시키는 것이 현실이므로, 하중부위의 변이계수 변이에 따른 안전성 해석은 실시하지 않았다.

목구조물에 사용되는 부재는 인공적으로 생산되는 재료가 아닌 자연의 재료인 목재이므로 다른 건축부

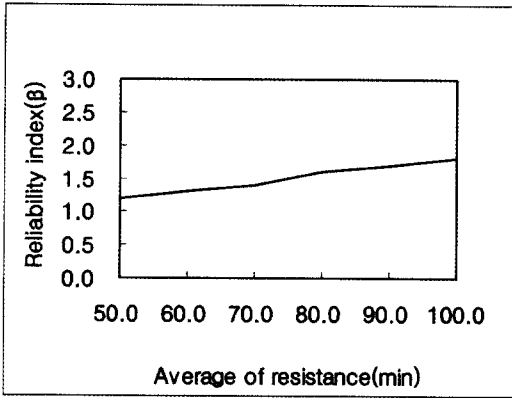


Fig. 1. Reliability indices with the different resistance value.

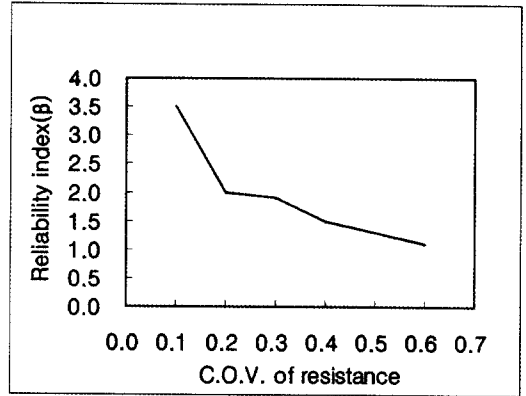


Fig. 3. Reliability indices with the different C.O.V. for resistance.

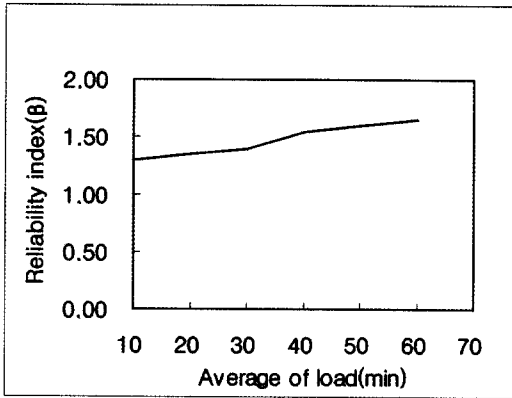


Fig. 2. Reliability indices with the different load.

Table 5. Reliability indices with the different C.O.V. for resistance

β	μ_R (min)	μ_S (min)	Ω_R	Ω_S	
A	15	36.04	16.03	0.40	0.36
B	20	36.04	16.03	0.20	0.36

μ_R : average of resistance. μ_S : average of loads.

Ω_R : Coefficient of variation for resistance.

Ω_S : Coefficient of variation for loads.

β : Reliability index.

재에 비해 성질의 변이가 심한게 현실이다. 목구조물에 있어 강도나 강성이 기초한 설계의 경우에도 목재의 강도나 강성이 나타내는 변이가 구조물의 안전에 가장 크게 영향을 끼치는 이미 보고된 바 있다(Kim & Lee, 1996). 하지만 목구조물의 내화성능을 나타내는데 있어 가장 널리 사용되던 파괴에 이르기까지의 시간이나 endurance time으로는 목질재료가 가지는 성질의 불균일성을 정확히 표시할 방법이 없다. 단순히 파괴에 이르기까지의 시간이나 endurance time으로 비교한 경우 Table 5의 두 시스템은 같은 내화성능을 나타내게 된다. 하지만 신뢰성 이론에 기초한 안전성 해석의 경우 신뢰성 지수값이 1.5와 2.0으로 다르게 나타난다. 즉 화염에 노출된 두 시스템 모두 시

스템의 저항값이 36.04분으로 계산되어 같은 내화성능을 가진 구조물로 간주되더라도 실제로 재료가 가지는 변이를 고려하면 신뢰성 지수를 역이용하여 계산할 경우 실제로 시스템 A의 경우는 저항값이 29.8분으로 시스템 B에 비해 현격한 차이를 보임을 주목해야 한다. 실제 구조물을 설계하는 설계자에게 주어지는 재량권의 대부분인 저항부위에서의 변이계수가 달라지면 Table 5의 결과처럼 안전성이 다르게 해석되는 것이다. 따라서, 기존의 방법에 따랐을 때 같은 성능을 나타내는 재료(저항부위와 하중부위가 같은 평균값을 가지면 기존의 방법에서는 같은 내화성능을 가지는 재료로 간주된다)일지라도 재료 성질의 변이의 정도, 즉 변이계수가 다르다면 그 구조물의 안전도는 크게 영향 받음을 주목할 때, 기존의 단순 비교적인 내화성능 비교보다는 과학적이며 확률적인 신뢰성 이론을 내화기준 제정에 도입하여 새로운 내화설계

기준을 설립하여야 할 것으로 사료된다. 저항부위의 변이계수의 변이에 따른 신뢰성 지수의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 변이계수가 0.2 정도까지는 매우 높은 신뢰도를 보였다. 즉, 같은 성능을 나타내는 재료 일지라도 재료의 성질이 균일하다면 화재에 대해 더 높은 안전성을 보임을 관찰할 수 있다.

4. 결 론

기존의 내화에 관한 연구가 특정한 기준 없이 endurance time이나 파괴 시까지의 시간에 한정되어 단순히 각 실험간의 결과 비교만 가능하고 다른 설계 방법간의 비교나 교류가 불가능했던 문제점을 지양하기 위해 각 설계법간의 비교와 경제적 설계가 가능한 신뢰성 이론을 내화설계에 도입하여 설계기준을 제시하고자 그 전 단계의 연구로 목재 마루 시스템의 신뢰성 해석을 실시하였다.

(1) 수치해석적 방법과 결정론적 방법간의 차이는 크지 않았다. 따라서 설계자의 임의대로 친숙한 방법을 사용하여 화염에 노출된 구조물의 안전성 해석을 실시할 수 있을 것이다.

(2) 화염에 노출된 목재 마루 시스템의 신뢰도는 재료의 강도나 부하 하중에는 별 영향을 받지 않았다.

(3) 기존의 방법으로는 같은 성능을 나타내는 재료 일지라도 재료 성질의 변이를 고려할 경우 안전성이 다르게 나타났다. 따라서, 재료의 가변성을 반영할 수 있는 신뢰성 이론의 도입이 필요함을 알 수 있었다.

Nomenclature

A_F : Floor area
 A_w : Openign area
 b : beam width
 B : Modulus of rupture at room temperature
 C : Char rate
 d : Beam depth
 H : Opening height
 I : Moment of inertia
 K : Ratio of perimeter to area of cross section

M : Applied moment
 R : Member or structural resistance
 S : Applied load
 t_d : Fire duration
 W : Fuel load density
 Y : Distance from beam centroid to outer fiber
 α : Ratio of high-temperature to normal-temperature strength
 β : Safety index or reliability index
 γ : Thermal degrade factor
 μ : Statistical mean
 σ : Standrad deviation
 Φ : Accumulative density function for standard normal distribution
 Ω : Coefficient of variation

참 고 문 헌

1. ASTM E-119. 1995. Standard test methods for fire tests of building construction and materials. Annual Book of standards Vol. 04. 07. Construction. Philadelphia. PA.
2. Burros R. H. 1975. Probability of failure of building from fire. *J. of the structural Division*, ASCE, Vol. 101 No. ST9: 1947~1960.
3. Clancy P. 1996. Sensitivity study of variables affecting time-of-failure of wood framed walls in fire. Proceedings of the International Wood Engineering Conference. Vol. 2: 263~268.
4. Collier P. 1994. Fire resistant light timber framed walls. Pacific Timber Engineering Conference Gold Coast Australia. Vol. 2: 248~254.
5. Cramer S. M. and R. H. White. 1996. Fire endurance modelling of wood structural system. Proceedings of the International Wood Engineering Conference. Vol. 2: 249~256.
6. Ellingwood B. and J. R. Shaver. 1977. Reliability of RC beams subjected to fire. *J. of the structural Division*, ASCE, Vol. 103 No. ST5: 1047~1059.
7. Galambos, T. V. and James G. Mc. 1982. Probability based load criteria Assessment of current design practice. ASCE 108(ST5): 959~977.

8. Gross, D. 1977. Measurement of fire loads and calculations of fire severity. *Wood and Fiber* 9(1): 72~85.
9. Hasofer, Abraham M., and Niels C. Lind. 1974. Exact and invariant second moment code format. *J. Eng. Mechanics* 100(1): 111~121.
10. Kameda H. and K. Takeshi. 1975. Reliability theory of deteriorating structures. *J. of the structural Division*, ASCE, Vol. 101 No. ST1: 295~310.
11. Kececioglu, Dimitri. 1991. Reliability engineering handbook. Volume 2. Prentice Hall. 19~31.
12. Kiureghian, A. D. 1989. Measure of structural safety under imperfect states of knowledge. ASCE 115 (5): 1119~1140.
13. Kim G. C. and J. J. Lee. 1996. Reliability analysis of wood floor system using suitable distribution model for each variable. *Mokuzai Gakkaishi*. 42(10): 969~976.
14. Kim, J. W. and J. J. Lee. 1997. Estimating MOE of thermal degraded wood by stress wave method. M. S. thesis. College of Agriculture & Life Science. Seoul National University.
15. Kim, Y. G. and J. J. Lee. 1995. Studies on prediction about behavior of wood beam under standard fire condition. M. S. thesis. College of Agriculture & Life Science. Seoul National University.
16. Knudson R. M. and A. P. Schniewind. 1975. Performance of structural wood members exposed to fire. *Forest Prod. J.* 25(2): 23~32.
17. Konig J. 1994. Structural fire design of timber structures according to Eurocode 5. Pacific Timber Engineering Conference Gold Coast Australia. Vol. 2: 539~548.
18. Lie T. T. 1972. Optimum fire resistance of structures. *J. of the structural Division*, ASCE, Vol. 98 No. ST1: 215~232.
19. Noren J. B. 1988. Failure of structural timber when exposed to fire. Proceedings of the 1988 International Conference on Timber Engineering. Vol. 2: 397~406
20. Ouchi T. 1988. Thermal conductivity of wood at high temperature. Proceedings of the 1988 International Conference on Timber Engineering. Vol. 2: 441~447.
21. Schaffer E. 1977. State of structural timber fire endurance. *Wood and Fiber* 9(2): 145~170.
22. Park, J. S. and J. J. Lee. 1997. Studies on bending properties of wood according to temperature. M. S. thesis. College of Agriculture & Life Science. Seoul National University.
23. Schaffer E. L., R. H. White, and F. E. Woeste. 1988. Fire endurance model validation by unprotected joist floor fire testing. Proceedings of the 1988 International Conference on Timber Engineering. Vol. 2: 432~440.
24. Takeda H. and J. R. Mehaffey. 1996. Model for predicting fire resistance performance of wood-stud walls with or without insulation. Proceedings of the International Wood Engineering Conference. Vol. 2: 257~262.
25. Thomas G. C., A. H. Buchanan, A. J. Carr, C. M. Fleischmann, and P. J. Moss. 1996. Modelling structural fire performance of light wood frame construction. Proceedings of the International Wood Engineering Conference. Vol. 2: 241~248.
26. Thomas G., A. Buchanan, A. Carr, and C. Fleischman. 1994. Light timber framed walls exposed to compartment fires. Pacific Timber Engineering Conference Gold Coast Australia. Vol. 2: 531~538.
27. White R. H. 1996. Tensile strength of fire-exposed wood members. Proceedings of the International Wood Engineering Conference. Vol. 2: 385~390.
28. Woeste F. E. and E. L. Schaffer. 1981. Reliability analysis of exposed light frame wood floor assemblies. USDA. Forest Serv. Res. Pap. FPL-386: 1~15.
29. 건축물 구조 기준등에 관한 규칙. 1996.