

# 목구조 설계를 위한 확정론적 구조 설계법과 확률 기반 구조 설계법의 비교 연구<sup>1</sup>

박문재<sup>2</sup> · 김광철<sup>†3</sup>

## Methods for wooden structural design- A comparative research between deterministic design and probability based design<sup>1</sup>

Moon-Jae Park<sup>2</sup> · Gwang-Chul Kim<sup>†3</sup>

### ABSTRACT

Probability based design(PBD)method has some advantages against current design methods. First, it can provide the quantitative values for the structural safety or capacity through the reliability index,<sup>β</sup>. That presented the certainty on the corresponding structure for the designer or user, also that permitted the broad consideration in the safety of structures. In addition, it can give the quantitative lifetime of the related structure in the calculation process of target reliability index. Also, incidental economical efficiency can be expected because decrease of required structural material can be obtained by using the practical material data. Unlikely current deterministic structural design methods, main advantage is the reflection of real condition in the structural design process by application of the data with not small clear specimen but structural size material.

Advanced countries, namely America, Canada, Europe, Australia and New Zealand already converted from allowable stress design(ASD) method to PBD method and used as a standard wooden structures code in the late 1980s and 1990s. Other domestic constructions standards such as the steel or concrete constructions accepted and used the PBD methods already. Accordingly, wooden structural design method also should be converted from deterministic ASD to probabilistic LRFD(Load and resistance factor design) in order to keep pace with worldwide demands for PBD.

Hence, to suggest the reason of introduction the PBD in domestic wooden structural design and analysis, a brief example was used to show the different reliability index by using the different design methods. Definition, merits and demerits of deterministic ASD and probabilistic LRFD were followed. Also the three examples were presented to show the similarity and differences between ASD and LRFD. Finally, connection problems that might cause a disputation in wooden structural design and analysis were broadly examined.

**Keywords:** PBD, ASD, LRFD, wooden structural design, reliability index.

1. 논문접수: 2009. 04. 01.; 심사: 2009. 05. 01.; 투고확정: 2009. 07. 17.. 본 연구는 국립 산림과학원지원연구 “강도 설계법 전환 기술 개발”의 일부임.

2. 국립 산림과학원, Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea.

3. 전북대학교 주거환경학과, Dept. of Housing Environmental Design, Chonbuk National University, Jeonju, Korea.

† Corresponding author: Gwang-Chul Kim (E-mail: gckim@chonbuk.ac.kr)

## 1. 서론

구조 설계의 목적은 안전과 사용성에 관련된 어떤 성능 기준을 충족시켜 주는 것이다. 이러한 성능 기준은 대개 한계 상태(성능과 비성능 사이의 한계를 수학적으로 기술하는 것)로 공식화된다. 한계 상태를 기술하기 위해 사용되는 변수들은 하중, 강도와 강성변수들, 치수와 기하학적 결점들이다. 이 변수들이 확률변수이기 때문에 한계 상태와 관련된 설계의 결과 역시 불확실성과 관련 되어 있어 이러한 원리를 사용한 구조 설계법을 확률 기반 설계법(Probability based design, PBD)라 한다.(Thelandersson and Larsen, 2003) 또한 확정론적 설계법의 대표적인 허용응력 설계법(Allowable stress design, ASD)의 기본 개념은 하중을 선정하고 탄성해석을 통해 이들 하중들로부터 응력을 계산하고 이들 응력들이 항복이나, 파쇄 또는 좌굴 등이 일어나는 파괴점에서의 한계 응력에 대한 안전 비율값보다 작은지를 점검하는 것이다.(Bodig, 1991) 현행 목조건축 규준의 기원은 1935년에 발표된 미국임산물협회의 Wood Handbook 중 Wood as an Engineering Material이라는 항목이다. 이 항목에 처음으로 목구조 설계에 대한 제반 사항이 정리 되어 발표 되었다.(Rammer, 2006) 최근 전 세계적인 구조 설계법의 경향은 재료에 독립적인 설계 방법 즉, 다양한 건축 재료별로 각각의 구조설계법을 운영할 것이 아니라 모든 건축 재료를 통합하여 적용 가능한 구조설계법 개발로의 변환이다. 또한 각 건축 재료의 강도값을, 기존의 경험에 의존하는 확정론적 방법이 여러 제반 문제점을 가짐에 따라 재료가 가지는 강도값 자체를 최대한 실질적으로 반영하는 확률 기반 방법으로 변환되고 있는 상황이다. 가까운 일본에서도 성능 기반 규준의 도입과 함께 국제적 표준의 화합에 많은 노력을 기울이고 있다.(The building center of Japan, 2004) 국내의 경우에도 강구조나 콘크리트구조에서는 이미 구조설계법이 변형되어 사용되고 있으며 목구조에서도 기존의 확정론적 방법인 ASD를 PBD로 전환하기 위한 일련의 연구가 진행되고 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 확정론적 구조 설계법인 ASD와 PBD의 대표적인 하중 저항 계수 설계법(Load and resistance factor design, LRFD)의 비교 및 목구조의 최대 눈집인 접합부의 PBD에 대한 고찰을 하고자 한다. 목재의 경우 다른 건축재료와 달리 비강도가 높고 재료 성질의 변이가 심하며 이방성이 있고, 수분에 따른 복잡한 거동을 보이며, 다른 재료에 비해 심한 크리프 효과(Thelandersson and Larsen, 2003)를 나타낸다. 따라서 이 사항들을 구조 설계 시 특별히 고려해야 한다. 하지만 국내의 경우 목구조설계 전문가도 거의 전무할 뿐 아니라 구조 설계 시에 이러한 목재의 특성이 제대로 반영되지 않고 있다. 게다가 강구조 등의 다른 건축구조와 달리 목구조의 구조해석이나 설계 시에는 다른 건축 재료에 비해 고려해야 할 강도적 성질과 강성이 더 많기 때문에 목재에 대한 전문 지식이 없는 사람이 해석을 하거나 설계를 할 때에는 치명적인 위험에 노출될 수도 있다. 또한 구조 설계 시에 반드시 고려되어야 할 중요한 부분인 하중 부하 속도에 따른 목재만의 고유한 강도적 특성과 지속성에 대한 문제점이 목재라는 건축 재료에 익숙하지 않은 다른 구조설계자들에게서 간과되고 있어 목구조의 안전성에 큰 위험이 되고 있다(Bodig,1991). 특히 국내의 경우 더욱 심각한 상황이다. 국내 목구조물의 설계 규준에 가장 영향을 끼치는 미국의 목구조물 설계 기준으로는 National Design Specification for Wood Construction(NDS)와 Load and Resistance Factored Design for Engineered Wood Construction(LRFD), 그리고 Wood Frame Construction Manual(WFCM)이 있다. 이 중 ASD를 대표하는 NDS도 2005년부터는 기존의 ASD뿐만 아니라 LRFD도 사용 할

수 있도록 하는 이원체제를 취하고 있다.(Rammer, 2006) 미국의 경우 ASD에서 LRFD로의 전환에 콘크리트 구조는 20년, 강구조는 10년이 소요되었다. 목구조의 경우 기존 설계법에 대한 집착으로 인해 목재 산업에서 처음 채택한 것은 ASD에서 LRFD로의 약식 전환(soft conversion)이었다.(Fridley, 1997) 하지만 국내의 경우 이미 다른 건축구조에서 PBD에 근거한 설계법으로의 전환이 이루어졌고 이미 사용되고 있기 때문에 굳이 약식변환을 거친 후 완전한 전환으로 가야 할지는 논의의 대상이 될 수 있다. 특히 1년에 백만가구 이상의 주택이 목구조로 시공되고 있어 전 세계적으로 가장 많은 수의 목조 주택이 시공되고 있는 미국의 경우에는 연방정부의 법률과 지방정부의 법률의 혼재로 인해 기존의 확정론적 방법에서 PBD로의 전환이 쉽지 않았다. 하지만 우리의 경우 다양한 목구조설계법이 존재하지 않으므로 외국과는 달리 여러 전문가들의 검토만 걸친다면 손쉽게 형식 전환이 가능하리라 여겨진다. 미국은 2000년도 이전에 3개의 기관이 각기 목구조에 대한 코드를 관할하였다. 각 기관에서 제정한 코드로는 ICBO(the International Conference of Building Officials)의 Uniform Building Code(미시시피강 서쪽의 대부분 주에 사용), SBCCI(the Southern Building Code Congress International)의 Standard Building Code(미 남동쪽 주 대부분에서 사용), BOCA(the Building Officials and Code Administrators International, Inc.)의 National Code(미 북동쪽 주 대부분에서 사용)가 존재했다. 하지만 위의 세 기관을 중심으로 ICC(International Code Council)를 구성하여, 2000년에 새로운 International Building Codes(IBCS)를 제작하여 통일된 체계로 발전시켰다.(Green & Hernandez, 2000)

## 2. ASD와 PBD

입의의 구조물에 있어 설계의 목적은 기대수명 동안에 원하는 정도의 신뢰도 혹은 확신을 가지고 특정한 성능 기준을 충족시키는 것이다. 성능 기준은 각기 다른 설계 상황 혹은 한계 상태에 관련되어 있는 것으로 설계 공정 중 엔지니어에 의해 주로 고려되는 것이다. 예를 들어, 수용 가능한 변형 혹은 진동의 사용성 한계 상태, 부재의 휨이나 전단 파괴, 화재에 어느 정도 노출 후 충분한 잔존 강도, 혹은 크랙의 진전으로 인한 접합부의 파괴 등이 있다. 이렇게 형성화된 문제들을 성능 기반 설계(performance-based design)라고 한다. 각 한계 상태에 대한 성능을 정량화 하는데 있어서 입력치에 주어진 불확실성은 계산된 성능 결과 값에 어느 정도의 불확실성을 발생시킨다. 따라서 실제 성능은 승인 기준을 충족시키지 못할 가능성을 늘 갖게 되며, 구조 설계는 비성능에 대한 허용 가능한 확률을 가지고 기준을 만족시키기 위해 보정되어야 한다. 이 확률을 목표 파괴 확률(target probabilities of failure)이라 부른다. 일반적으로, 공학 시스템의 성능은 성능 함수 혹은 한계 상태 함수에 의해 기술되며  $G(x) = C(x_c, d_c) - D(x_d, d_d)$ 의 형식으로 표현된다. 여기서,  $G(x)$ 는 간접 확률 변수들의 함수이고, 성능을 나타내는  $C$ 와 요구  $D$  두 함수간의 차이로 표현할 수 있다.  $x_c, x_d$ 는 모든 입의의 혹은 불확실성의 확률 변수를 나타내는 것이고  $d_c, d_d$ 는 충분한 확신으로 알려진 모든 정량화 변수들을 나타내는 것이다. 예를 들면, 휨 성능에 영향을 끼치는 보의 깊이는  $d_c$  항에 포함되고 반면에 휨 모멘트 요구에 영향을 끼치는 지간거리는  $d_d$  항에 포함된다. 반면에 휨강도는  $x_c$  항에, 실제 가해지는 하중은  $x_d$  항에 포함된다.  $G < 0$

는 파괴 확률  $P_f$ 을 나타내며 신뢰도는  $1 - P_f$ 에 해당한다. 요구에 대한 통계량들은 모든 재료에 대해 공통이며 반면에 성능과 관련된 모든 변수들은 재료에 따라 다르다. 기존의 ASD법에 비해 PBD 사용이 갖는 장점으로는 재료 정보 취득의 향상, 모델링의 용이, 품질 관리 절차의 용이 등이며 PBD를 사용했을때 실제 현장 적용이나 제조에 있어 개혁을 용이하게 할 수 있다. 신뢰도 계산과 성능 기반 설계를 실생활에 접목시키기 위한 두 가지 방법으로는 주문형 설계법 (customised design approach)과 명문화 절차(codified procedure)가 있는데 주문형 설계법은 중요한 구조물이나 기성제품의 개발 등에 필요한 방법으로, 각각의 특정한 설계 상황을 연구하거나 해당 구조물의 설계 수명을 얻기 위한 목표 신뢰도를 확보하는 방법을 사용하여 확률론적 변수들  $d_c, d_d$ 의 결정을 위한 값들을 얻기 위한 것이다. 명문화절차는 주문형 접근법이 필요치 않는 많은 간단한 적용처에 적합한 것이다.(Thelandersson and Larsen, 2003) Crews와 Michael(1996)에 의하면, PBD는 세계적인 추세이며, 재료의 성질이나 성능모델의 변이를 좀 더 정확히 고려할 수 있게 해주는 성능감소계수( $\Phi$ )내의 변이를 이용하는 것으로, 타당한 합리적 근거를 가지고 있음을 강조하였다. 결국 PBD가 ASD보다 더 균일하고 정량적인 수준의 신뢰성을 부여하게 된다. 전통적으로, ASD에서는 적절한 강도와 일반 사회공동체에서 용인된다고 여겨지는 수준의 안전성을 얻는 것에 집중해 왔다. 하지만, 한계상태의 개념은 일반적인 공동체 그리고 특별한 고객들이 관심을 가지는 기타의 설계 관련 고려 사항들, 예를 들면 사용성, 안전성 그리고 안정성까지 참고해야 한다. 다시 말하면 크랙이 발생하거나 휘지 않아야 할 것을 규정하는 사용성, 파괴되지 않을 것을 규정하는 안전성, 내려앉지 않을 것을 규정하는 안정성 모두에 대해 고려해야 한다는 것이다. 이들 기준중 하나라도 만족시키지 못한다면 하나나 그 이상의 성능상태에서 한계를 초과했다고 말한다. 사용성 한계상황에서의 이탈은 대참사는 아니지만 성가심과 여분의 일을 고객에게 안겨준다. 사용성 하중 조합은 대개의 한계상황 설계 코드 내에서 보수문제를 야기할만한 충분한 빈도로 일어나거나 구조물이 설계되었던 목적을 뒤 흔들어 놓을 만큼의 하중조합의 합리적인 예측치 또는 연간 5%정도의 확률로 지정되어있다. 한편 강도 한계상황으로부터의 이탈은 구조적 파괴를 의미하며, 안정성 한계상황으로부터의 이탈이 대참사가 되어 결국 생명을 위협할 수 있는 주요 구조적 피해가 되는 것과 같이 강도 한계상황으로부터의 이탈도 같은 방식으로 취급될 수 있다. 모든 사람은 구조물이 구조물의 기대수명동안 구조체가 파괴될 확률이 매우 낮기를 바라며, 이러한 파괴는 과부하나 저성능으로 인해 발생하는데, 과부하는 적절한 하중계수를 사용하여 처리하고 저성능은 성능저하계수와 실험 자료의 5% 값으로부터 유도된 강도성능을 사용하

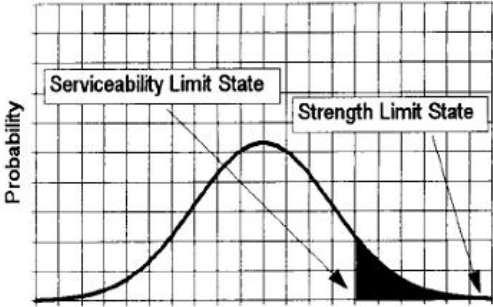


Fig. 1. Probability distribution model for typical loads on a structure (Crews & Michael,1996).

여 처리한다. 그림 1은 하중에 대한 고전적인 통계분포 모델을 보여주는 것으로 하중효과들은 대개 정규분포나, 대수 정규분포, 구벨분포를 따른다. 확률분포를 보면, 주어진 하중을 초과할 확률은 전체 분포곡선하의 면적에 대한 그림1의 그늘진 영역의 비율이다.

하중에 대한 확률 분포에서와 같은 방식으로, 재료의 변이나 파괴 역학 그리고 기량의 변이 등에 기인한 강도에 대한 확률 분포 모델도 있다. 강도에 대한 확률 분포 모델은 그림 2에 나타나 있으며 하중곡선에 비해 종모양의 형태를 취한다. 이 도형에서의 주요 관심사는 주어진 강도에 도달하지 않는 경우이다. 곡선하의 전체면적의 비율로 표현되는 수치의 좌측부분하의 면적이 강도에 도달하지 않을 확률을 나타낸다. 하중분포 곡선과 강도분포 곡선을 겹치면 그림3과 같으며, 강도곡선이 하중곡선의 우측에 놓이게 된다. 두곡선이 가까워질수록 파괴확률은 증가한다. 두곡선의 겹치는 면적이 두 곡선하의 전체 면적에 대한 비율로 하중이 강도를 초과할 확률로서 표현된다. 하중이 강도를 초과할 때 파괴가 일어나며, 파괴를 피하고 싶을 때는 겹치는 면적을 최소화 하면 된다. 설계 시에 공칭 하중보다 하중을 높게 잡고 공칭강도보다 강도를 낮게 잡으면 파괴확률은 수용할 만한 수준으로 감소된다.

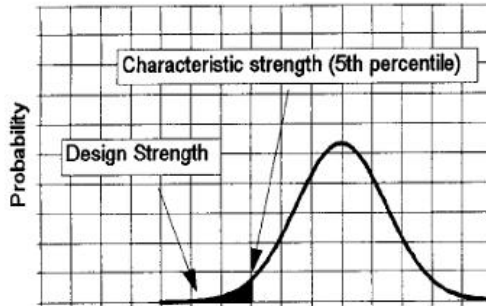


Fig. 2. Probability distribution model for strength (Crews & Michael,1996).

Chen(1999)에 의하면, 신뢰도(또는 안전도)란 만족할만한 성능을 확률적으로 측정하는 것으로서, 파괴확률의 보조 함수의 관점에서 표현될 수 있다. 구조물의 신뢰도에 관해 이야기할 때는 특별한 한계 상태에서의 안전 성능을 확률적으로 언급하는 것이다. 한계 상태라 함은 최종 파괴(붕괴)나 더 이상 사용하지 못하는 상태(과도한 진동, 처짐, 크랙 등)를 언급하는 것이다. PBD의 개념은 저항이 가해지는 하중에 부적절할 확률이 존재한다는 것이다.(역으로 말하면 하중이 허용 가능한 강도를 초과하는 것). 이 확률은 그림 3의 겹치는 부분으로 표현할 수 있다.

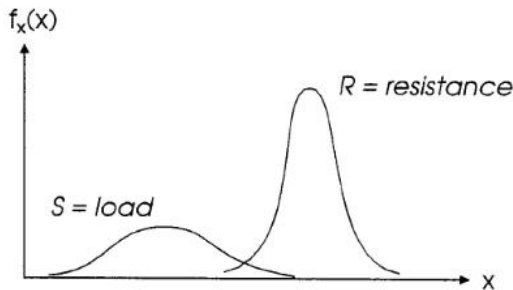


Fig. 3. Basic concept of structural reliability (Chen, 1999).

PBD의 목적은 이 상태의 확률을 수용 가능할 만큼 작게 하는 것이다. 파괴확률을 가장 간단히 표현하면  $P_f = P[(R - S) < 0]$ 이며 이에 기초한 PBD의 설계 점검 방정식은  $\phi R_u \geq \sum \gamma_i Q_i$ 로 일반화 할 수 있다.(Chen,1999) CWC(2005)에 따르면, ASD는 모든 전체 구조물과 각각의 개별 구조성분들이 탄성 거동을 한다는 가정 하에 해석되고, 설계 방정식은 부하되는 응력  $\leq$  재료의 강도/ 안전 계수(safety factor)로 표현 할 수 있다. PBD의 미국 버전인 LRFD는 안전을 설계에 포함시키기 위한 좀 더 합리적인 방법으로 방정식의 저항측 부분에 특정 한계 상태와 관련된 부재의 전체적인 저항을 사용하는 것이다. 이러한 한계 상태는 파괴나 처짐량에 대한 한계 혹은 진동의 한계 등이다. 변이를 점검하고 한계 상태를 고려하기 위한 적당한 계수들이 방정식의 하중 측에 적용된다. 이러한 접근 방식에서는 계수들이 방정식의 하중 측과 저항 측 모두에 적용된다. 이들 하중과 저항 계수 설계 접근법이 캐나다에서 목재와 다른 주요 구조재료들에 사용되는 한계 상태 설계법(LSD)의 기본이다. 이 설계 형식은 재료 성질과 하중의 변이를 고려하기 위해 뿐만 아니라 파괴 결과들을 고려하기 위해서도 확률적 접근법을 사용한다. LSD(Limit states design, 한계 상태 설계법)의 경우 NBCC 4.1.2 조항에 따르면 한계 상태 설계 형식은 계수화된 저항  $\geq$  계수화된 하중 효과로 표현되며, 하중 효과는 저항과 같은 단위를 사용해야(kN, kN/m) 하고 가능한 하중 조합 모두를 고려하여 가장 불리한 효과에 의해 지배된다. 기본 방정식은  $\phi R \geq \sum(\alpha_i SL_i)$ 로 표현할 수 있으며 여기서,  $\phi$ = 저항측이나 특정 재료 성질에 적용되는 저항 계수. 재료 성질과 치수의 변이, 가공상의 변이, 파괴 형식(연성이나 취성이나) 그리고 저항의 예측시에 발생하는 불확실성 등을 고려하는 계수이다.  $R$ = 특정 재료의 성질에 기초한 부재, 접합부 혹은 구조물의 계산된 저항이다.  $\alpha_i$ = 특정 하중과 하중 조합에 대한 특정 하중 계수이다.  $SL_i$ = 특정 하중들로서 D,L,S,W,E,H,P,T(고정중,활하중,적설하중,풍하중,지진하중,토압,수축에 의한 압력과 효과들, 팽창이나 처짐량)이다. 강도 한계 상태에 비해, 사용성 한계 상태는 주관적이어서 좀 더 폭 넓은 해석의 자유를 가질 수 있다.(CWC, 2005)

Crews 와 Michael(1996)에 따르면, 강도 한계 상황에 대한 PBD의 설계 방정식은  $R_d \geq S^*$ 처럼 표현되며, 여기서  $R_d$ 는 부재의 설계 최대 성능이며  $S^*$ 는 계수화된 하중으로 인해 부재에 가해지는 설계 작용 효과(design action effect)이다. 설계 최대 성능은  $R_d = \phi R_u$ 처럼 단면의 공칭 성능에 재료 성능 감소 계수를 곱하여서 구해지며, 여기서  $R_u$ 는 공칭 성능이며,  $\phi$ 는 재료성능 감소 계수로서, 구조재의 형식에 따른 적절한 안전도를 부여하기 위해 각 나라별 코드 위원회에서 정의되는 값이다. 공칭 성능은 적절한 강도보정계수를 곱한 테이블화된 특성화 값으로 제공되는데  $R_u = k_{mod} R_k$ 처럼 정의되며, 여기서,  $R_k$ 는 구조부재의 기본 강도 값이며,  $k_{mod}$ 는 코드 내에 정의된 강도보정계수의 총 효과로서 하중지속이나 하중 나눔, 치수와 안정성의 효과 등이 고려된 설계 작용에 관련된 것이다. 기존의 ASD 규준과 PBD 규준 사이의 근본적인 차이는 설계 개념, 하중 그리고 기본 설계 응력에 있다. 위의 식들에 비해, ASD 규준은 일반적으로  $f'_k \leq k_{mod} F'_k$ 와 같은 형식의 설계 방정식을 사용한다. 여기서,  $f'_k$ 는 실제 응력이고,  $F'_k$ 는 고려된 설계 작용에 대한 기본 허용 응력이다. PBD에서는 활하중, 사하중 그리고 조합하중에 대한 설계 효과가 반드시 앞의 방정식들에서 얻어진 계수화된 설계 성능과 비교되어야 한다. 모든 경우에 있어 강도 한계 상태가 만족된다면 설계 성능은 하중 효과 보다 크거나 같아야 한다. 설계

하중이 매우 드물게 발생하는 한계 상태 사건에 대한 주어진 것으로 계수화 된다면 최대 하중은 근본적으로 실제작용 하중보다 크다. 방정식의 강도측도 또한 반드시 강도 한계 상태 사건에서 기대되는 하중 종류하의 부재의 성능에 해당되어야 한다. 한계 상태 규준에서 주어지는 특정 응력은 따라서 부재의 파괴 이전 직전에 얻어질 것으로 예상될 수 있는 응력이어야 한다. 이들 특정 응력은 본질적으로 한계 상태 형식에서 인지되고 있는 기본 허용 응력보다 크고, 안전 지수는 응력보다 원칙적으로 하중 측에 적용된다.(Crews & Michael,1996)

이러한 PBD가 기존의 확정론적 설계법들에 비해 갖는 장점으로는 구조물의 안전이나 성능여부를 정량화 할 수 있다는 점 즉, 신뢰성 지수  $\beta$ 를 사용하여 구조물의 안전도를 수치적으로 나타냄으로써 설계자나 사용자에게 관련 구조물에 대한 확실성을 심어주고 좀더 폭 넓은 고찰을 가능하게 했다는 점과 목표 신뢰성 지수를 산정 하는 과정에서 확실성 있는 기간을 부여함으로써 내구연한을 정량화 할 수 있다는 점, 그리고 동일한 재료를 가지고도 기존의 확정론적 설계법들에 비해 사용할 수 있는 용도가 다양해지고, 더불어 재료 사용량이 줄어들기 때문에 부수적인 경제성도 기대할 수 있다는 점이다. Gromala(1996)는 PBD, 특히 LFRD는 ASD에서는 볼 수 없는 세 가지의 장점이 있음을 언급 하였다. 우선 하중의 계수화(load factoring)로서, 안전계수가 다양한 하중비와 하중조합에 대한 신축법에 따라 효과적으로 정해진다. 이렇게 함으로써 LFRD는 각각의 경우에 따라 좀 더 유연한 안전 수준을 유지할 수 있다. 둘째 설계 강도와 실제 재료 강도의 유사성이다. 기존의 ASD에 익숙한 설계자는 설계 허용값이 실제 값보다 크다고 믿는 경향이 있다. 하지만 LFRD에서의 설계값은 부재의 실제 강도값과 거의 일치한다. 셋째, 가르치기 쉽다는 것이다. 전세계 목재공업이 직면하고 있는 한가지 문제점은 교육이 어렵다는 것이었다. 대부분의 구조 기술자들은 주요 구조부를 금속이나 콘크리트로 설계하려고 하기 때문에 이러한 재료들에 많은 관심이 쏠리고 있다. LFRD에서는 설계과정이 재료의 종류와는 무관하게 진행되므로, 이미 LFRD를 이해하고 있는 사람이면 LFRD를 이용하여 목구조물을 설계하는 것이 가능할 것이다. 또한 숨겨진 ASD의 안전계수가 LFRD에서는 분명한 하중과 저항계수로 표시되기 때문에 교육과정이 간단하다.(Gromala,1996) Faherty 와 Williamson(1989)에 의하면 LFRD의 장점으로는 구조신뢰도를 한층 일관성 있게 규제 가능하고, 기존 ASD에서 행해지던 과도설계 감소를 통해 경제성을 개선할 수 있으며 ASD에서는 탄성적 개념만 사용하던 것을 넘어 세계적 추세인 강도 개념을 사용하는 흐름으로 병합될 수 있음을 강조하였다. 또한 설계자의 실제 설계 상황 인식도를 개선시킬 수 있고 여러 다른 건축 재료들 간의 양립할 수 있는 설계 규준의 가능성이 증대되며 감소된 재료의 변이로부터 얻을 수 있는 이점에 대한 인식 가능성이 증대될 수 있다고 하였으며 마지막으로 기존의 ASD에 비해 손쉽게 새로운 실험 자료나 하중 자료를 경신할 수 있는 규준 형식임을 강조하였다.(Faherty & Williamson, 1989) Ayyub 와 White(1987)에 의하면 구조물의 설계에는 많은 불확실성의 내재로 절대적인 안전성의 부여가 곤란하지만, 불확실성을 정량적으로 취급하여 확률적 해석을 할 수 있다면 설계에 포함되는 위험요소를 허용수준, 즉 파괴 확률  $P_f$  이내로 제한할 수 있다고 하여 PBD의 효율성을 언급하였다. 또한 설계 규준은 가능한 간단하고, 설계자에게 익숙한 형태로 표시되어야 할 뿐만 아니라 구조부재에 대한 안전성 수준이 일정해야 함을 주장하며, ASD에서는 안전계수 하나만을 고려한 허용응력을 사용하여 안전성을 도모하지만, PBD에서는 하중 및 저항계수를 각기 분리하여 사용하기 때문에 ASD보다 안전에 대한 여유를 더 확보할 수 있다고 하였다.(Ayyub & White, 1987) 한편, 조 등은(1986)

ASD와 달리 PBD에서는, 구조물에 일정기간동안 여러 개의 시간변화하중이 작용하고, 이때 각각의 하중이 동시에 그들의 수명간 최대치에 도달할 경우는 거의 없기 때문에 구조물의 성분은 기대수명내의 각각의 하중의 최대치들의 합보다는 작은 전체하중에 대해서 설계 되어야 함을 강조 하였다.(조 등, 1986) Sexsmith(1978)의 자료는, 설계 방정식의 형태에 따라 구조물의 안전도가 크게 달라질 수 있음을 보여줌으로써 기존의 확률론적 방법을 지양하고 PBD로의 전환이 반드시 필요하다는 것을 보여준다. 본 예제에서 사용하는 신뢰도 지수는 FOSM에서 가장 흔히 사용하는 정의를 따라  $\beta = \bar{x}/\sigma_x = (\ln \bar{R}/\bar{U}) / \sqrt{V_R^2 + V_U^2}$  를 사용한다.

**예제 1.** 휨을 받는 집성재보를 가정한다. 사하중/활하중의 비=0.25, 보의 용적=40,000in<sup>3</sup>으로 가정한다. 이런 조건에서 사하중을 1 unit으로 하면 활하중은 4 unit이 되고 총 하중 5 unit이 된다. 활하중의 실제 최대 수명은 공칭 활하중의 1.1배이므로 활하중은 1.1(4)=4.4 unit이고 전체 하중은 5.4 unit이 된다.

**①ASD에 의한 계산**

$f_b$ 가 2,400psf라고 하자. 건조 사용 조건으로 가정하고 하중 지속은 보통의 경우로 가정하면 실제 휨응력은  $f_b(1.15)(5.4)/5.0=1.242 f_b$ 가 된다. 여기서 1.15는 눈이 2개월 지속된다는 가정 하에서 보정된 값이고 5.4/5.0은 공칭응력을 실제 응력으로 보정해주는 값이다. 실제 강도값은  $R=2.59 f_b(1.06)(0.85)=2.33 f_b$  여기서 2.59  $f_b$ 는 MOR로서 본 연구에서 참조한 캐나다의 기존자료를 환산할 경우에 기준이 되고 있는 80,000in<sup>3</sup>에 대해 치수효과에 대한 보정 후 자료를 평균한 것이고 1.06은 본 예제의 40,000in<sup>3</sup>에 대한 치수효과 보정값이며 0.85는 눈 지속에 대한 실제 강도 감소를 가정한 것이다. 설하중의 표준편차는  $\sigma_s=0.20(4.4)=0.88$  여기서 0.20은 변이계수이고 4.4는 평균 설하중값이다. 사하중의 표준편차  $\sigma_d$ 는 0.10(1.0)=0.10 따라서 총 하중의 표준편차는  $\sqrt{0.88^2 + 0.10^2} = 0.89$ 이고 이것의 변이계수는 0.89/5.4=0.16이 된다. 저항의 변이계수는 0.21이다. 이러한 모든 조건을 반영한 신뢰도 지수는  $\beta = \ln(2.33/1.24) / \sqrt{0.21^2 + 0.16^2} = 2.4$ 이다.

**②PBD의 캐나다 형식인 한계 상태 설계법(LSD)에 의한 계산**

위와 같은 가정 하에 성능계수  $\phi$ 는 0.7로 한다. 설계 방정식은 다음과 같다.  $0.7 \bar{R} = 1.25D + 1.5L$  여기서 R는 평균 저항이고 D와 L은 각각 공칭 사하중과 공칭 활하중이다. D=1 unit, L=4 unit 이므로  $\bar{R} = (1.25(1) + 1.5(4))/0.7=10.4$  units이다. 실제 하중은  $\bar{U} = 1.0D + 1.1L = 1.0(1) + 1.1(4)=5.4$  units이다. 변이계수는 위의 허용 응력 설계의 예에서 제시한 것과 같다. 따라서 모든 조건을 고려한 신뢰도 지수는  $\beta = \ln(10.4/5.4) / \sqrt{0.21^2 + 0.16^2} = 2.48 \approx 2.5$ 이다.(Sexsmith, 1978) 일견하면 2.4와 2.5라는 신뢰도 지수의 차이가 미비한 것으로 보이지만 신뢰도 지수를 파괴확률로 환산할 경우 아주 큰 차이가 되므로 무시할 수 없는 차이로 해석할 수 있다. 즉, 모든 조건을 동일하게 하더라도 어떤 설계 방정식에 기초했느냐에 따라 구조물의 신뢰도는 확연한 차이가 나타나므로 설계자가 설계 기준을 선정할 경우 신중한 접근이 필요하다.



### 3. ASD와 PBD의 유사성

아래 두 개의 설계 예제 2와 3(Gromala, 1996)은 기존의 확정론적 설계법의 대표인 ASD와 확률 기반 설계법의 대표인 LRFD, 두 방법이 상당한 유사성을 지니고 있음을 보여줄 수 있는 적절한 예라 할 수 있다. 단지 두 과정의 유사함뿐만 아니라 두 과정의 최종 결과 사이의 호환성에도 유의하여 주목할 필요가 있다고 판단된다.

**예제 2.** 들보의 설계를 가정한다: 바닥보, 부재 폭 = 130mm, 작용 모멘트= 52.0 kN-m  
 ⇔(10.4 kN-m 사하중; 41.6 kN-m 활하중). 보의 두께를 정하라.

가정:  $F_b = 1680\text{kgf/cm}^2$  (ASD);  $4270\text{kgf/cm}^2$  (LRFD), 모든 크기/부피 효과는 기본 설계값에 포함된다.(이 값은 ASD와 LRFD에서 동일하다.) 다른 조건은 필요하지 않다.(부재는 기준 조건에 있다: 건조, 무처리 등)

Table.1. Selected design values for ASD and LRFD.

Description	Size/Grade	Species	Design Properties	
Allowable Stress Design(ASD) Values <sup>1</sup>				
Glulam beam	5-1/8" wide (130mm)	DF	$F_b = 1680\text{kgf/cm}^2$	$E=126000\text{kgf/cm}^2$
Bolt	5/8" diameter	So. Pine framing	$Z = 8.32 \text{ kN}$	-
Load and Resistance Factor Design(LRFD) Values <sup>2</sup>				
Glulam beam	5-1/8" wide (130mm)	DF	$F_b = 4270\text{kgf/cm}^2$	$E=126000\text{kgf/cm}^2$
Bolt	5/8" diameter	So. Pine framing	$\lambda\Phi_b Z = 14.3 \text{ kN}$	-

<sup>1</sup> Values taken from NDS, <sup>2</sup> Values taken from AF&PA LRFD Manual(AF&PA,1996)

ASD	LRFD
<p>ASD에서의 설계 방정식은 아래와 같다. :</p> $C_D F_b S_{ASD} \geq (10.4 + 41.6)$ <p>여기서, <math>F_b</math>는 허용휨응력이고, <math>S_{ASD}</math>는 필요한 단면계수이다. 이 예에서 NDS에 따르는 하중지속시간 인자는 :</p> $C_D = 1.00(\text{floor load})$ <p>허용휨응력에 <math>1680\text{kgf/cm}^2</math>을 대입하면</p> $F'_b = F_b \cdot C_D = 1680\text{kgf/cm}^2$ <p>이 방정식을 풀면 <math>S_{ASD} = 3141.4\text{cm}^3</math>가 되며, 이 값에 만족하기 위해서는 두께가 38.1cm인 부재를 사용하여야 한다.</p>	<p>LRFD에서의 설계 방정식은 아래와 같다. :</p> $\lambda \cdot \Phi_b \cdot M \geq 1.2D + 1.6L = 1.2(10.4) + 1.6(41.6)$ <p>AF&amp;PA/ASCE 16-95에 따르면 <math>\lambda = 0.80</math>, <math>\Phi_b = 0.85</math>이다. 계산된 결과인 <math>774294\text{kgm}^2/\text{s}^2</math>를 앞의 계수들로 나누어 주면 요구되는 모멘트 저항은 <math>2764.5 \text{ kgm}^2/\text{s}^2</math>가 된다. 공칭 휨강도가 <math>4270 \text{ kg/cm}^2</math>인 부재의 경우에 요구되는 단면계수는 <math>2764.5\text{cm}^3</math>가 된다. 설계 깊이는 35.8cm로 ASD에 비해 7%의 재료를 절약할 수 있다. AF&amp;PA LRFD 지침서에는 보의 설계값들이 나와 있으므로 <math>\lambda\Phi_b M</math>을 쉽게 구할 수 있도록 하여 준다. 설계 단면계수는 두 경우에 모두 <math>126000\text{kg/cm}^2</math>이므로, 따라서 처짐을 기준으로 설계를 할 경우에는 두 경우 모두 동일한 두께의 부재를 요구하게 된다.</p>

**예제 3.** 볼트 접합부 설계의 예: 지붕트러스 현의 이음, 인장 강도 = 32.0 kN⇔(8.0kN 사하중과, 24.0kN 설하중), 주부재의 두께 = 76mm, 덧댐 부재의 두께 = 38mm, 수종 = Southern Pine 일때 지름이 15.8mm인 볼트의 필요 개수를 정하라.

가정:  $Z = 8.3 \text{ kN (ASD)}$ ;  $\lambda\Phi Z = 14.4 \text{ kN(LRFD)}$  (표 1참조). 목리에 평행한 순수한 인장강도; 적절한 측면거리와 끝면 거리가 두 경우 모두에 적용된다. 형태에 따른 효과는 기본 설계값에 포함된다. 이외의 다른 설계보정은 필요로하지 않는다.(부재는 기준상태에 있다. - 건조, 무처리 등),  $F_{yb}$ (볼트의 휨항복강도) = 31500kg/cm<sup>2</sup>

ASD	LRFD
<p>이 경우의 기본적인 설계방정식은 아래와 같다.</p> $Z_{ASD} \geq 32.0 \text{ kN}$ <p>여기서 <math>Z_{ASD}</math>는 설계 결합부 강도이며 단일 볼트의 강도, <math>Z</math>에 볼트의 개수, <math>n</math>을 곱한 값이다. 이 경우의 하중지속시간 계수는 NDS에 따라</p> $C_D = 1.15 (\text{snowload})$ <p>위의 표에서 지름인 15.8mm인 볼트 하나의 설계강도는 8.32kN이다.</p> <p>하나의 열에 4개의 볼트가 요구된다고 가정한다. NDS 표7.3.6A에 따르면 세 개의 볼트에 대해 <math>C_g</math>는 0.91이 된다. 이 값을 기초로한 결합부의 설계성능 <math>Z_{ASD}</math>는 아래와 같다.</p> $Z_{ASD} = n \cdot Z \cdot C_D \cdot C_g = 34.8 \text{ kN}$ <p>강도/필요강도 = 34.8/32 = 1.09</p>	<p>이 경우의 설계방정식은 아래와 같다.</p> $\lambda \cdot \Phi \cdot Z \geq 1.2D + 1.6S = 48.0 \text{ kN}$ <p>위의 표에서와 같이 지름이 15.8mm인 볼트 하나의 <math>\lambda\Phi Z</math>값은 14.4kN임을 알 수 있다. 앞에서와 마찬가지로 한열에 4개의 볼트가 사용된다고 가정한다. group action factor, <math>C_g</math>는 0.91이다. 이 값을 기초로 하여 결합부의 설계강도 <math>Z_{LRFD}</math>는 다음과 같이 구해질 수 있다.</p> $Z_{LRFD} = n \cdot \lambda\Phi Z \cdot C_g = 52.3 \text{ kN}$ <p>OK(강도/필요강도 = 52.3/48.0 = 1.09)</p>

#### 4. ASD와 PBD의 차이점

다음의 예제 4(Gromala,1994)는 ASD와 PBD의 대표인 LRFD간에 어떠한 차이점이 있는지를 보여주는 좋은 예이다. 실제 ASD와 LRFD 두 설계 방법에 있어서 가장 큰 차이는 하중계수와 저항계수의 존재일 것이다.

**예제 4.** 볼트 설계의 예 - 사하중 4.5kN과 설하중 14.4kN, 즉 총인장력이 18.9kN인 지붕트러스 chord slice를 가정한다. 주부재는 76mm, 측면부재는 38mm이며 수종은 Hem-fir이다. 사용하는 볼트의 지름은 13mm이다.

가정 - 힘은 목리에 평형하게 작용하는 인장력뿐이다. 요구되는 측면 거리와 끝면 거리를 만족시키는 배열이다. 부재의 제작과 사용의 조건은 모두 다 건조한 조건이다. 볼트의 휨 항복 강도( $F_{yb}$ )는 31500kgf/cm<sup>2</sup>이다.

ASD	LRFD
<p>기본설계방정식은 다음과 같다.</p> <p><math>Z' \geq 18.9 \text{ kN}</math></p> <p>여기서 보정된 접합강도, <math>Z'</math>,는 볼트의 개수, <math>n</math>, 보정되지 않은 단일볼트의 성능, <math>Z</math>, 그리고 다음의 보정계수들을 곱해준 것이다.</p> <p>보정계수 : <math>C_D = 1.15</math>(설하중)</p> <p><math>C_M = 1.0</math>(건조조건)</p> <p><math>C_t = 1.0</math>(정상 온도)</p> <p><math>C_g =</math> 결정되어야 할 것</p> <p><math>C_{\Delta} = 1.0</math>(충분한 끝면거리와 측면거리)</p> <p>보정하지 않은 13mm 단일볼트의 성능은 4.95kN이다(NDS Table)</p> <p>4개 볼트가 한 열이라고 가정하면 NDS의 표에 의해 <math>C_g = 0.91</math>이 된다. 따라서 보정한 성능은</p> $Z' = n \times Z \times C_D \times C_g =$ $4 \times 4.95 \times 1.15 \times 0.91 = 20.7 \text{ kN} = \text{O.K. (성능/요구} = 20.7/18.9 = 1.096)$ <p>만일 이 트러스가 마루에 사용된다면 <math>C_D = 1.0</math>이 되고 보정계수는 <math>4 \times 4.95 \times 1.0 \times 0.91 = 18.0 \text{ kN}</math> 이 되어 만족스럽지 못하게 된다.</p>	<p>기본설계방정식은 다음과 같다.</p> $\lambda \times \Phi \times Z \geq 1.2D + 1.6S$ <p>여기서, <math>\lambda</math>는 시간효과 계수이며 허용응력법의 하중 지속 계수와 유사한 것이며, <math>\Phi</math>는 저항계수로서 접합부의 경우에는 0.65로 모든 접합부에 동일한 값이 적용된다. 대개는 <math>\lambda \Phi Z</math>가 계산된 표의 형태로 제공되는 값을 설계 시에 사용한다. 표에 의하면 이 경우의 <math>\lambda \Phi Z</math>값은 8.55kN이며, 그를 작용 계수는 동일하게 0.91이 되어 <math>\lambda \Phi Z' = n \times \lambda \Phi Z \times C_g = 4 \times 8.55 \times 0.91 = 31.1 \text{ kN}</math> 여기서 이 수치가 나타내는 것이 ASD 값보다 50% 정도 높게 나타남을 알 수 있다. 그렇다면 이 값이 강도적으로 50% 높다는 의미라고 혼동 할 수 있다. 하지만 설계방정식의 오른쪽 항을 보게 된다면 이런 오해가 풀릴 것이다. <math>1.2 \times 4.5 + 1.6 \times 14.4 = 28.44 \text{ kN}</math>이 된다. 따라서 설계 성능/요구되는 성능 = <math>31.1/28.4 = 1.094</math>로 ASD와 유사함을 알 수 있다. 하지만 ASD 기준에서는 이 재료가 마루에 사용될 경우 부적합한 재료가 되었지만 하중-저항 계수 설계법에서는 마루의 활하중과 설하중 간의 시간 효과 계수가 동일하므로 여전히 1.094의 값이 유지되어 ASD에서는 부적절 하였던 재료가 LRFD에서는 사용 가능하게 된다는 장점이 있다.</p>

### 5. 접합부에 대한 PBD의 특징

위의 예제 3을 보면 ASD와 PBD의 유사성이 존재한다. 이는 약식변환(soft conversion)을 통한 ASD에서의 PBD로의 변환 때문이다. 하지만 약식변환이 아니고 코드간에 완전한 변환을 실시하면 접합부에 대한 설계 기준은 다른 부분과 달리 LRFD와 ASD의 차이가 많다. 그 이유는

전체적으로 세척들을 일관성 있게 하는 ASD-to-LRFD의 형식 전환의 결과에 기인하며 또한 접합부 강도에 대한 새로운 거동 방정식 즉 항복이론 등의 반영과 기존의 관습에다 새로운 거동 방정식으로부터의 강도 보정 등이 주 요인이고 기타 여러 가지 개선 사항들의 반영 때문이다. (McLain et al, 1991) Rammer(2006)는, 여러 목구조 시공에 대한 세척들이 끊임없이 수정되고 갱신되지만, 개정의 가장 중요한 분야가 파스너를 다루는 설계 기준이라고 하였다. 1991년부터, 목리에 평행하게 하중을 받는 다중 볼트 결합부의 성능( $Z$ )은 관계적인 간격 요건과  $Z' = nC_D C_M C_g Z$  로 표현되어왔다. 여기서,  $Z$ =단일 파스너 접합부의 항복 수치,  $C_D$ = 하중 지속 계수,  $C_M$ = 습윤 사용 계수,  $C_g$ = 그룹 작용 계수,  $n$ = 접합부내의 볼트의 개수이다. 다중 볼트 접합부의 설계 시에는 단일 파스너의 항복 성능과 그룹 작용 혹은 하중 분포 계수 그리고 관계적인 간격 요건 등에 주의해야 하는데, 우선 단일 파스너의 항복 성능에 영향 하는 인자들로는 접합부의 형상(주 부재와 측면 부재의 두께), 볼트 직경, 다우얼의 휨-항복 강도, 다우얼의 내력 강도, 목리에 대한 하중 부하 방향 등이며 이들 변수들과 관련된 항복 방정식은 목재와 볼트 모두가 철저히 소성을 띠는 가정하에 정적 해석을 통해 Johansen에 의해서 개발된 것이다. 항복 모델 이론은 목재의 내력과 볼트의 휨에 관련된 여러 다른 가능성 중 더 불리한 항복 모드를 선정하는 것으로서, Mode I은 주 부재나 측면 부재중 목재의 내력이 초과되어 파괴되는 것이고 ModeII는 접합부내의 파스너가 휘어지지 않고 회전하는 것이며 ModeIII와 ModeIV는 목재의 내력이 초과되어 파괴되면서 파스너가 하나 혹은 그이상의 소성 힌지 항복이 되는 것이다(모드 4는 부재 내에서는 파스너가 휘지 않고 곧은 형태를 유지하고 모드3은 부재 내에서도 파스너가 휘다. 접경지역에서는 모드3과4 모두 파스너가 휘다) Rammer(2006)에 항복 모드에 대한 자세한 그림이 제시되어있다.

둘째 하중 분포에 영향 하는 인자들로는 접합부 부재의 팽창 강성, 파스너의 간격, 파스너의 개수, 단일 파스너의 하중 변형 특성 등이 있으며, 한 열에 배치된 여러 볼트는 각각의 볼트에 부하되는 하중이 차이가 있다. 이론적으로는 양끝 파스너 두 개에 가장 많은 하중이 부하되어야 하고(예를 들어 한 열에 6개의 볼트가 있으면 양끝 2개에 전체 접합부 하중의 50% 이상이 부하됨), 파스너의 간격을 넓히면 양끝 파스너에 더 많은 하중이 부하되며, 파스너의 강성이 늘어나면 하중 분포는 더 불규칙해진다. 이론보다 실제 현장에서의 하중 분포 예측이 더 어려운 이유는 파스너의 미세한 정렬의 불량, 측면 부재와 주 부재 사이의 간격의 변이, 단일 파스너 하중 변형 특성내의 변이 등이 원인이다. 마지막으로 관계적인 간격 요건이 충족이 안 되었을 때, 파스너의 성능은 전체 설계 간격 대 실제 간격의 비율에 비례하여 감소하며 최소 배치 간격 등은 표 2를 따라야 한다.(Rammer, 2006)

Table 2. Requirement for minimum spacing for design value

Requirement for		Minimum spacing for design value	
		Reduced	Full
End distance	Softwoods	3.5D	7D
	Hardwoods	2D	4D
Spacing in a row		3.0D	4D
Spacing between rows		-	1.5D

McLain 등(1993)에 의하면 단순접합부에서 안전성 점검 방정식은 LRFD의 기준에서  $\lambda \phi Z_n \geq Z_u$ 이며 여기서  $Z_u$  은 구조물에 가해지는 계수화된 하중들(예를 들어 1.2D + 1.6L)에 대해 구조해석을 실시하여 결정되는 요구 강도이며,  $Z_n$  는 모든 사용 조건이 보정된 공칭 단기 접

합강도이다. 또한  $\Phi$  는 0.65이며,  $\lambda$ 는 시간 효과 계수이다. 보정 저항  $Z_n$  은  $Z_n = n_f C_p Z$  이며 여기서  $n_f$  는 접합부내의 파스너의 개수이고,  $C_p$  는 강도를 참고 조건에서 최종 사용조건에 대해 보정하는데 사용되는 모든 계수들의積이며  $Z$ 는 참고 저항으로서 참고조건에서 단일 파스너 접합부의 평균 단기 강도이다. 전체적인 참고조건이 있고 각 파스너에 따른 특정 참고조건이 있다. 접합부에 대한 참고조건들은 제조시 19%이하의 함수율을 가진 비처리 목재나 목질 재료이며 그 수종이나 재료의 대표 밀도를 가진 것이다. 변수  $Z$ 는 단기 지속 하중이다. 못이나 스크류, 볼트, 또는 래그 나사못 같은 각 형식의 접합부는 접합형상(침투 깊이나 간격)에 따른 추가적인 참고조건을 가지며, 최종 사용조건이 참고 수준과 다르면 참고저항  $Z$ 는 보정계수를 곱해 주어야 한다. 예를 들어 최종 사용 온도( $C_{ct}$ ), 함수율( $C_{cm}$ ), 다중 파스너( $C_{cc}$ ), 기하( $C_{cg}$ ), 기타 등이 있다. 표 3에는 여러 파스너의 다우얼 내력 강도를 제시하였다.

실험에 기초한 ASD기준과 항복이론사이의 주요한 한 가지 차이는 특성 하중의 정의이다. ASD에서는 비례한계나 한계 변형량에서의 하중을 기준으로 사용하여 왔다. 항복이론은 접합부의 비례한계 강도와 최대 강도 사이에 위치하는 특성 하중,  $Z_y$  를 예측한다. 항복은 하중-처짐량 곡선에서 초기의 선형 부분에 대해 파스너 직경의 5%에 해당하는 변형량에서의 평행한 선을 그은 후 만나는 지점으로 정의한다.

Table 3. Dowel bearing values for fasteners

파스너	목리에 대한 각도	방정식
못, 스파이크, 목재 스크류	모든 목리각	$F_e = 16,600 G^{1.84}$
볼트, 래그 스크류, 큰 다우얼 볼트, 래그 스크류, 큰 다우얼	목리에 평행	$F_e = 11,200 G$
	목리에 수직	$F_e = 6,100 G^{1.45} D^{-0.5}$

파스너의 항복강도  $F_y$ (5% 감쇠 기초)는 휨실험을 통해 결정할 수 있으며, 충분한 자료가 없는 상황에서는 보통 강철 볼트의 휨  $F_y$ 경우 310MPa(45ksi)으로 가정한다. 이것은 ASD에서 50년 내구연한을 의미하며 최근의 여러 연구들에 의하면 타당한 것으로 여겨지고 있다. 일반 철사못 (common wire nail)의 경우 평균 휨  $F_y$  는  $F_y = 896 - 58(D)$  이며 여기서  $D$ 는 직경으로 mm단위를 사용하며  $F_y$ 는 MPa단위를 사용한다. 예를 들어 공칭 치수 16d못의 경우 직경이 4.1mm일 경우  $F_y$ 는 657MPa가 되며,  $F_y$ 는 직경에 대해 5% 감쇠한 값에 대해 정의된 것임을 주목해야 한다. 최종 사용조건에 따른 접합부의 강도를 보정하기 위한 대부분의 계수는 연구결과에 따라 직접적으로 얻어진다. LRFD 개발 효과의 일부분으로 이런 기준을 지원하는 자료를 재검토한 결과 관행을 바꾸어야 할 타당한 이유가 발견되었다. 주요한 예외는 침투에 따른 기하학적 계수의 약간의 변화 그리고 수분과 온도 효과 계수의 간소화이며, 추가적으로 그룹작용, 다중 파스너 계수 등은 전통적인 것 보다는 좀더 보정되어야 할 필요성이 제기되었다. 여러 접합부 형태에 있어서 축하중과 측면 하중의 혼합 조건이 일반적이지만, ASD에서는 래그 스크류의 경우에만 정식으로 상호작용이 인정되고 있다. LRFD에서는 못, 스파이크, 그리고 스크류에 대해 다음과 같은 상호작용 기준이 제정되었다.  $(Z_{n,\theta} \sin \theta)/Z_{n,lateral} + (Z_{n,\theta} \cos \theta)/Z_{n,axial} \leq 1$ . 여기서,  $Z_{n,\theta}$  는 파스너의 축에 대해  $\theta$ 의 각도로 하중을 받는 접합부의 공칭 강도로서  $0^\circ$ 는 측면하중을 의미하며,  $90^\circ$ 는 축하중을 나타낸다.;  $Z_{n,lateral}$  ,  $Z_{n,axial}$ 은 각각 모든 최종 조건에 대해 보정된 측면하중과 축하중에 대한 접합부의 공칭 강도를 나타낸다. 못, 스파이크, 그리고 목재 스크류의 경우에는  $n$  은 1이다. 위 식에서  $n$ 이 2일 경우 이 식은 잘 알려진 헨킨슨 식으로 재정리될 수 있다. 설계값

(design value)은 거동방정식을 이용한 단기강도의 예측치 에서부터 유도되는데, 접합부에 대해서는 다른 구조 부위와 여러 가지 측면에서 일반적인 접근방법과 저항의 유도과정이 달라진다. 우선 공칭 저항을 유도하는데 사용되는 간결한 신뢰성 해석법이 없다. 즉, 신뢰성 표준화 계수,  $K_r$  는 접합부에 대해서는 단위값으로 고정되어 있다. 이런 편차는 부분적이지만 광범위한 접합부 형식에 대한 자료의 부족과  $K_r$ 의 다양한 기하학적 외향 때문이다. 접합부에 대한 참고 공칭 저항의 유도는 다음의 형태를 가진다.  $Z = \frac{\sum \gamma_i Q_i}{\sum Q_i} \cdot \frac{DOL}{\lambda \Phi_Z} \cdot \frac{c}{C_P} \cdot Z^*$ . 여기서,  $\gamma_i Q_i$ ,  $Q_i$  는 계수화된 하중과 비계수화된 하중을 각각 나타내며; DOL은 하중계수의 ASD지속을 나타낸다.; c,  $C_P$ 는 각각 ASD와 LRFD 보정계수의 누적곱을 나타내며;  $\Phi_Z$ 은 접합부의 경우 0.65를;  $Z^*$  은 접합부의 공칭 ASD 또는 등가의 성능을 나타낸다. 저항계수  $\Phi_Z$  는 부재의 강도에 대해 저항계수로 일관적으로 고정된다. 위 식  $Z^*$  를 ASD 접합부 강도나 혹은 그것의 등가로 정의하는데 있어 ASD규정 내의 안전도 수준은 LRFD기준에 대해 만족할 만한 수준이다. Z를 유도하는 것은 두 단계의 과정으로 이루어지는데, 단계1은 새로운 거동방정식을 ASD의 안전도 수준으로 정하고  $Z^*$ 를 결정하는 것이다. 두 번째 단계는 위 식을 통해 Z로 도달하도록 형식 전환을 하는 것이다. ASD에서 접합부 강도는 기초성능을 접합부 표준화 계수  $K_C$  에 의해 나눈 예측 값이다. 기초강도는 파스너의 형태에 의해 변하며 이는 비례한게 하중이고, 계수  $K_C$ 는 5분 지속 하중 실험에서 10년 지속 허용하중으로 보정하기 위해 필요로 하는 모든 계수들을 총합한 것이다. 측면 하중을 받는 다우얼 형태의 접합부에 대한  $Z^*$ 는  $Z_Y / K_C$ 이며 여기서,  $Z_Y$  는 예측된 항복 하중이다. 결과적인  $Z^*$ 는 ASD 하중들과 일치한다. 변수  $K_C$  는 현행 관습내의 변화를 최소화하기 위해 설계된 전환율이다. 설하중, 지붕 활하중, 풍하중을 지원하는 접합부에 대한 LRFD의 접합부 성능은 ASD 기준으로 볼 때의 접합부 성능의  $\pm 8\%$ 내에 해당한다. 거주 활하중을 지원하는 접합부는 LRFD규정 하에서 성능이 10~15% 증가된다. ANSI/ASCE 7-88하중 규정 때문에 100psf 이상의 저장 활하중을 지원하는 접합부는 이전의 경우보다 LRFD 규정 하에서 32% 증가된다. 지진 하중에 저항하는 접합부는 LRFD 규정 하에서 11% 감소된다.(Mclain 등, 1993)

## 6. 결 론

Gromala(1996)는 PBD의 대표적인 LRFD를 검토한 결과 형식상으로는 ASD와 차이가 있지만 현재 사용되고 있는 설계법과 유사한 점이 많기 때문에 배우기가 무척 쉽다는 사실을 강조하였다. 또한 실제 구조설계를 실시해보면 두 방법 사이에 차이점도 있지만 상당한 유사성도 있어서 호환성이 있다는 사실도 강조하였다. 하지만 PBD의 경우 스패의 길이가 매우 작거나 큰 부재에 적용할 경우의 상당한 이점이 있고, 하중이나 강도항에 부분적인 안전계수를 적용함으로써 설계의 source를 확실히 보여주며 변이를 설명할 수 있다는 점은 기존의 설계법들이 갖추지 못한 장점을 강조하였다. 또한 LRFD는 실제로 신뢰한계를 좁히며 결과적으로 안전을 위한 낭비부분을 줄여 경제적인 이익을 얻을 수 있으며, 가장 주목할 것은 가르치기가 쉽다는 사실에 주목하였고 이것이 결국 목재 설계를 공학의 한 과목으로 만들고 결국에는 건축에서의 목재의 사용을 늘리는데 기여할 것이라고 하였다.(Gromala,1996)

PBD가 기존의 설계법들과 비교할 때 가지는 장점으로는 구조물의 안전이나 성능여부를 정량화 할 수 있다는 점 즉, 신뢰성 지수  $\beta$ 를 사용하여 구조물의 안전도를 수치적으로 나타냄으로써 설계자나 사용자에게 관련 구조물에 대한 확실성을 심어주고 좀 더 폭 넓은 고찰을 가능하게 했다는 점과 목표 신뢰성 지수를 산정 하는 과정에서 확실성 있는 기간을 부여함으로써 내구연한을 정량화 할 수 있다는 점, 그리고 동일한 재료를 가지고도 기존의 확정론적 설계법들에 비해 사용할 수 있는 용도가 다양해지고, 더불어 재료 사용량이 줄어들기 때문에 부수적인 경제성도 기대할 수 있다는 점이다. 특히 기존의 확정론적 방법들이 사용했던 무결점 소시편의 강도값을 기초로 하는 게 아니라 실대재 시편의 강도값을 적용하여 설계 시에 실제 환경이 반영된다는 것이 가장 중요한 장점이라 할 수 있겠다.

미국과 캐나다 유럽 그리고 호주, 뉴질랜드 등 목조건축 선진국들은 이미 80년대말부터 90년대 사이에 목조건축 설계규준을 모두 기존의 허용 응력 설계법에서 확률 기반 설계법으로 전환하여 사용하고 있다. 국내의 경우에도 강구조나 콘크리트구조는 이미 확률에 기반을 둔 구조설계법을 채택하여 사용하고 있다. 확률 기반 구조설계라는 세계적 흐름에 발맞추기 위해, 목구조의 경우에도 확정론적 방법인 허용 응력 설계법을 지양하고 확률 기반 설계법인 하중 저항 인자 설계법으로 전환해야 할 필요성은 절실하다.

## 7. 참고문헌

- 조효남, 장동일, 신재철. 1986. 확률이론에 기초한 철근콘크리트 강도설계규준. 대한토목학회논문집. 6(4):53-60.
- Ayyub, B.M., and White, G.J., 1987. Reliability conditioned partial safety factors. J. of the Structural Div., ASCE, 113(2):279-294
- Bruce R. Ellingwood. Status of reliability-based design in North America: Impact for engineered wood construction.
- Canadian Wood Council. 2005. Introduction to wood design. Ch. 2
- Chen Wai-Fah. 1999. Structural Engineering Handbook. CRC Press LLC. Ch. 26
- David W. Green and Roland Hernandez. 2000. Codes and standards for structural wood products and their use in the United States. Proceedings of the Forest Products Study Group Workshop. 3-16.
- David S. Gromala. 1994. Wood Design Focus Vol.5(2).
- David S. Gromala, P. E. 1996. Implementation of Load and Resistance Factor Design in the United States. Proceeding of the International Wood Engineering Conference. New Orleans, Louisiana, USA. 1996. Oct. Vol. 3:40-47.
- Douglas R Rammer. 2006. Wood Construction Codes Issues in the United States. 39-49. Biohousing symposium.
- Jozsef Bodig. 1991. Reliability-based design of engineered wood structures. Kluwer Academic Publishers.

- Keith Crews and Michael Ritter. 1996. Development of Limit States Design Procedures for Timber Bridges. National conference on wood transportation structures. 292-300.
- Keith F. Faherty & Thomas G. Williamson. 1989. Wood Engineering and construction handbook. Chapter. 12. McGraw-Hill, Inc.
- Kenneth J. Fridley. 1997. Wood Engineering in the 21st century: research needs and goals. ASCE. 109-113.
- Robert G. Sexsmith. 1978. Limit stats design concepts for timber engineering. FPJ. 28(5):49-54
- Sven Thelandersson and Hans J. Larsen. 2003. Timber Engineering. John Wiley & Sons, LTD. 169-30
- T. E. McLain, L. A. Soltis, D. G. Pollock, Jr., P. J. Pellicane. 1991. Timber connection design in the U.S. converting to LRFD format. Proceedings of the 1991 International timber engineering conference. 277-285.
- Thomas E. McLain, Lawrence A. Soltis, David G. Pollock Jr. 1993. LRFD for engineered wood structures - Connention behavioral equations. Journal of Structural Engineering. Vol. 119, No. 10.
- The building center of Japan. 2004. The building standard law of Japan.

## 논문 제출 안내

한국가구학회지 (vol.20/no.5)의 논문을 국문 규정 및 요령에 의거하여  
**2009년 7월 31일(금)까지** 제출 바랍니다.

한국가구학회 편집위원장