

철골 및 섬유보강 폴리머(FRP) 복합 기둥의 설계강도식에 관한 비교 연구

A Comparison of Design Strength Equations between Steel and Fiber Reinforced Polymer Composites Columns

최 열* 편 해 완**
Choi, Yeol Pyeon, Hae-Wan

Abstract

Steel, concrete and their combination materials are the most commonly used materials for civil engineering structural systems such as buildings, bridge structures and other structures. Recently, however, fiber reinforced polymer (FRP) composites, a relatively new composite material made of fibers and polymer resins, have been gradually used in structural systems as an alternative structural material. This paper describes a comparison of design strength equations for steel column and FRP composite column based on design philosophies. The safety factors used in allowable stress design (ASD) are relatively higher in FRP structural design than steel structural design. Column critical stress equations of FRP composites column from an experimental study can be represented by Euler elastic buckling equation at the long-range of slenderness, and an exponential form at the short-range of slenderness as defined in Load and Resistance Factor Design (LRFD) of steel column. The column strength of steel and FRP composite columns in large slenderness is independent of material strength, this result verified the elastic buckling equation as derived by Eq. (15) and Eq. (5).

keywords : fiber-reinforced polymer composites, safety factor, column critical stress equation, allowable stress design, load and resistance factor design

1. 서 론

일반적으로 구조설계의 궁극적 목표는 구조물의 안전성, 원활한 기능확보 및 경제성을 고려한 최적의 구조부재들을 설계하는데 있다고 말할 수 있다. 지금까지 철골, 콘크리트 및 이의 조합 재료들이 구조물의 구조재료들로 보편적으로 사용되어져 왔다. 그리고 최근들어 섬유보강폴리머 복합재료들(fiber-reinforced polymer composites, FRP)이 구조재료로써 활발히 연구 및 적용이 되고 있는 실정이다.

섬유보강폴리머 복합재료는 섬유(fibers)와 폴리머(polymer)의 조합으로 이루어진 복합재료이며, 대체로 구조적 적용에 사용되는 조합은 부재의 경제

성과 강도의 특성을 고려하여 유리섬유(glass fibers)와 폴리에스터(polyester) 혹은 바이날에스터(vinylester)의 조합들이 사용되고 있는 실정이다. 이 재료의 특성은 높은 단위강도(high strength to weight ratio), 경량화, 부식에 대한 강한 저항(high corrosion-resistance), 비전도성(non-conductivity), 보다 자유로운 단면형상 설계(flexible design of cross-sectional shapes), 공사장비의 경량화 및 저렴한 유지비등의 장점이 있다. <표 1>에서 섬유보강 폴리머복합구조재료의 특성들을 기존의 재료들과 비교 요약하였다.

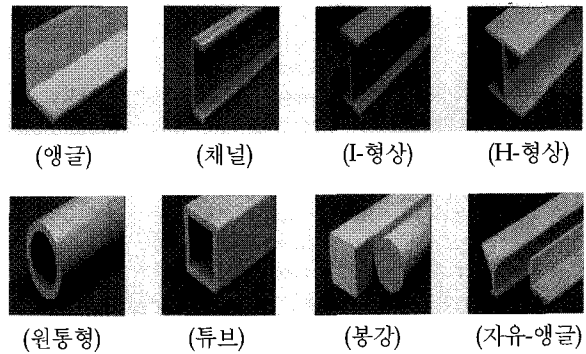
섬유보강 폴리머 복합재료의 구조적 적용에 있어서, 구조부재(structural members)들은 자동화된 인발성형(pultrusion) 방법에 의해서 생산되며, 이 방법은 보다 자유로운 구조부재의 단면형상, 길이 및

* 비회원, Univ. of Texas at Arlington, 공학박사

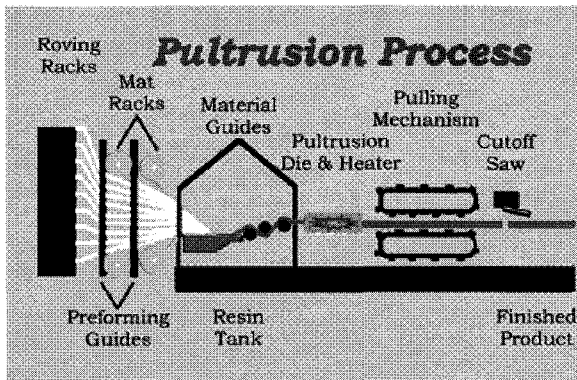
** 정회원 · NTRAS구조연구소 소장, 공학박사

〈표 1〉 섬유보강폴리머 복합구조 재료의 특성비교

특성	비교사양	장점
단위강도 (unit strength)	철골의 약 20배-단위무게	원하는 방향으로의 강도선택 가능 높은 충격흡수 강도
무게	철골의 20%, 알루미늄의 60%	부재 운반비, 조립비용 및 설치장비의 절감
부식	화학적 및 환경에 대한 부식 저항	최소 유지비, 부재의 교체 및 관리비 저렴
전도성	비 전도성	첨단 기계설비실 등에 유리, 크린룸



〈그림 2〉 인발성형 섬유보강 폴리머 구조부재의 단면 형상



〈그림 1〉 단순화된 인발성형 구조부재 제작과정

두께의 설계를 가능하게 하며, 부재의 대량생산의 가능케 하여 기존의 구조재료들과의 가격 경쟁이 가능하게 해 준다. <그림 1>에서 일반적인 단순화된 인발성형 섬유보강 폴리머복합(pultruded fiber reinforced polymer composites) 구조부재의 제작과정을 나타냈다.^[10]

인발성형 FRP 구조부재의 단면형상은 철골구조 부재의 단면형상과 같이 열린(opened) 혹은 닫힌 단면형상 (closed thin-walled cross-sections) 을 가지고 있다. 그림 2에서 일반적으로 사용되는 인발성형 FRP 구조부재들을 나타내었다. 구조물에 있어서 기둥부재는 수직부재로써 압축하중을 구조물의 한 부분에서 다른부분으로 전달하는 중요한 구실을 담당하는 주요부재의 하나이다. 따라서 기둥

부재의 거동은 기둥의 재료, 단면형상 및 크기, 기둥의 지지조건, 길이 및 제작방법등 여러가지 복합적인 요인의 상호작용에 의해서 결정된다고 할 수 있다.

현재까지 수많은 연구가 인발성형 섬유보강 폴리머 복합기둥의 구조적 적용에 대하여 진행되고 있다. 일반적으로, 인발성형 FRP 기둥의 거동은 장주에서는 전체좌굴(overall buckling) 이 어떤 불안정을 유발하는 요인보다도 먼저 일어나며, 좌굴 방정식(buckling equation)은 장주에서 기둥의 실험값과 잘 일치함을 보여준다. 단주에서는 먼저 국부좌굴(local buckling)이 일어나고, 계속해서 전체 좌굴이 일어나거나 혹은 크리핑(cripping)으로 인한 재료파괴(material failure) 현상이 먼저 일어남을 보여준다. 또한, 단주와 장주사이의 기둥 거동은 전체 좌굴과 국부좌굴의 상호작용 혹은 재료분리 현상에 의해서 지배됨을 밝혀내었다.^[12] 그리고, 섬유보강 폴리머의 구조부재에서 파괴시, 보강된 섬유와 폴리머의 큰 연장 (large elongation)으로 인하여 섬유보강 폴리머 구조부재는 큰 처짐에 도달하기까지 선형적 탄성적 파괴 모드를 보여준다.^[13] 그러므로, 좌굴현상이 섬유보강 폴리머 복합기둥의 강도를 좌우하는 모델이라고 말 할수 있으며, 임계 좌굴하중(critical buckling load)은 기둥의 하중저항 능력과 직접적인 관계가 있다고 생각할 수 있다.

본 논문에서는 현재 사용되고 있는 철골과 인발성형 보강섬유 폴리머 복합기둥의 구조설계에 사용되는 허용응력 설계법에 따른 안전계수(safety factor)의 값을 비교 검토하였으며, 유리섬유보강 폴리머(glass fiber reinforced polymer, GFRP) 복합기둥의 실험자료에 의해서 얻어진 기둥의 극한 강도 설계식을 기존의 철골 극한 강도설계식과 비교 검토해 보고자 한다.

2. 일반적인 기둥설계방법들

합리적인 구조물의 구조설계시 최우선적으로 고려해야 할 사항들은 사용자들에게 구조물에 대한 안전성을 부여하고, 예상되는 구조물의 생명 기간 동안 각 부재들의 단면에 발생하는 응력이 어떤 한계응력을 초과하지 않고, 과다변형(처짐)이 일어나지 않는 상태에서 재하된 설계하중들을 담당하도록 설계하는 것이다. 다시말하면, 구조설계란 구조물에 있는 구조부재의 크기와 각 부재사이의 관계를 결정하는 것이며, 따라서 재하된 여러 하중들의 영향에 견디도록 구조물의 저항성을 갖도록 설계하는 것이라고 말할 수 있다. 일반적으로 여러가지 구조설계 방법들이 기둥설계에 사용되어지고 있다. 각각의 방법들은 서로다른 절차와 공식들을 가지고 있지만, 결과적으로 앞에서 언급한 구조설계의 목적을 달성하도록 되어 있다고 본다. 본 논문에서는 철골 및 인발성형 섬유보강 폴리머 기둥설계에 일반적으로 이용 및 활발히 연구되고 있는 두 가지 방법들, 즉, 허용 응력 설계법(Allowable Stress Design, ASD) 과 극한 강도 설계법(Load and Resistance Factor Design) 들에 대하여 비교 검토하고자 한다.

2.1 허용응력 설계법(Allowable Stress Design)

허용응력 설계법은 가장 오래전부터 사용되어온 구조설계법이며, 철근콘크리트 및 철골구조설계에 성공적으로 사용되고 있는 방법이다. 최근에는 나무 재료의 구조설계에도 적용할 수 있도록 발전된 방법이다. 이 방법의 기본 개념은 정상적인 하중을 받는 부재에 발생하는 최대응력(maximum stress)은 그 부재에 허용된 허용응력(allowable stress)을 초과할 수 없다는 개념에 근거한 설계법이며, 허용응력은 안전계수를 고려한 값으로 아래의 일반적인 식으로 표현 된다.^[4]

$$\text{허용-응력} = \frac{\text{지배한계응력 (Governing Lim Stress)}}{\text{안전계수 (Safety Factor)}}$$

하나의 구조부재에 있어서, 지배 한계응력은 부재의 종류, 응력조건등에 따라서 결정되며, 동일부재

내에서 여러 다른 한계응력들이 발생할수 있으며, 따라서 모든 한계응력에 대한 검토가 있어야 한다. 그리고 안전계수는 구조부재의 길이, 하중 종류, 부재의 거동 및 작업의 난이도등에 따라서 영향을 받으며, 구조물에 일정한도의 안전률을 부여한다. 하지만, 허용응력설계에서의 안전계수는 경험 및 실험에 의하여 얻어진 값이며, 따라서 구조물 및 구조부재의 실질적인 안전계수의 수준이 알려져 있지 않은 단점이 있다.

일반적으로 인발 성형 섬유보강 폴리머 복합재료 산업에서 이용되는 섬유보강 폴리머 복합기둥의 허용하중(allowable load)은 기둥의 길이, 단면 및 처짐 조건을 고려하고, 기둥의 양단 조건을 핀-핀(pinned-pinned configuration) 조건 하에서 얻어진 최대 축하중 (maximum axial load)을 안전계수의 값으로 나누어서 얻어진 값을 사용하고 있다. <표 2>에서 일반적으로 섬유보강 폴리머 복합 재료의 구조설계에 사용되고 있는 안전계수의 값을 철골에 사용되고 있는 값과 비교하였다.^[4,10]

<표 2>에서 보듯이, 현재 인발성형 FRP 부재의 구조설계에 사용되는 안전계수의 값이 철골에서 사용되어지는 값보다 전반적으로 크다는 것을 알 수 있다. 특히 기둥설계에 사용되는 안전계수의 값은 철골기둥설계에 사용되는 값보다 약 1.5배가 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 섬유보강 폴리머 복합재료가 철골에 비해서 비교적 낮은 탄성계수, 전단계수 및 축강도로 인한 부재에 발생하는 큰 처짐, 전단 변형 및 재료적 파괴를 고려한 것이라고 말할 수 있다. 또한 환경에 대한 영향 및 장기하중에 대한 고려 등의 더 많은 연구가 필요함을 요구한다.

<표 2> 허용응력 설계법의 안전 계수의 비교

부재 종류	인발 성형 FRP	철 골
보(Beams)	2.50	1.67
기둥(Columns)	3.00	1.92
접합부(Connections)	4.00	2.5 - 3.0

2.2 극한 강도 설계법(Load and Resistance Factor Design)

한계상태 설계법 (limit state design) 라고도 불리

는 극한강도 설계법은 구조물에 작용하는 하중과 구조부재의 하중에 대한 강도(resistance ; strength) 등의 임의적인 변화(random variability)를 각각의 독립변수로 고려한 확률적 접근방법을 이용하였으므로, 구조물과 각각의 구조요소에 대하여 일정한 수준(uniform level)의 안전성을 구조설계시 반영할 수 있도록 고려한 방법이다.^[8] 극한강도 설계법의 설계 기준은 아래의 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$R = \Phi R_n \geq \sum_{i=1}^k \gamma_i Q_{mi} \quad (1)$$

여기서, R은 요소화된 구조요소의 저항 혹은 강도 (factored resistance)이라 불리며, Φ 는 저항계수 (resistance factor)이며, 구조물 혹은 구조요소의 일생동안의 강도변화를 반영하는 계수이다. R_n 은 공칭저항 혹은 강도(nominal resistance)이며, 일반적으로 주어진 구조재료의 특성들과 부재의 형상 및 치수에 따라서 얻어지는 값이며, 저항계수값이 곱하여지면 설계강도(design strength) 값을 나타낸다.

또한, $\sum_{i=1}^k \gamma_i Q_{mi}$ 은 구조물에 예상되는 모든 하중들의 조합이며, 요소화된 하중 (factored loads)라고 한다.^[5,7,9]

2.2.1 철골 기둥 극한 강도 설계식(Column Design Equation)

철골 기둥설계에 대한 극한 강도 설계법(LRFD)은 1986년에 American Institute of Steel Construction (AISC)에 의해서 처음으로 규정되어졌으며, 철골 기둥의 설계식은 탄성기둥의 거동에서는 오일러 좌굴식(Euler buckling equation)으로, 비탄성 거동영역에서는 지수식 (exponential equation) 으로 나타내어졌다. AISC 극한강도 설계규정 및 코드에 표현된 휨 좌굴의 압축부재의 설계강도식을 다음과 같이 표현 된다.^[1]

기둥의 설계강도:

$$P_R = \Phi_c P_n \quad (2)$$

여기서, $c = 0.85$, 그리고 기둥의 공칭강도 P_n 은 아래의 식으로 표현된다.

$$P_n = A_g F_{cr} \quad (3)$$

여기서, A_g 는 기둥의 전 단면적이며, F_{cr} 은 기둥 단면의 임계응력(critical stress)이며, 기둥의 무차원적 세장비 값에 따라서 다음과 같은 두 식들로 표현된다.^[3]

$$F_{cr} = (0.658 \lambda_c^2) F_y, \lambda_c \leq 1.5 \quad (4)$$

$$F_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y, \lambda_c > 1.5 \quad (5)$$

여기서, $\lambda_c = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y}{E}}$, F_y =철골의 항복강도

2.2.2 섬유 보강폴리머 복합 기둥의 강도식

지난 10여년간 인발성형 섬유보강 폴리머 구조부재의 구조적 적용을 위한 수 많은 연구가 활발히 진행되어져 왔다.^[13,14] 하지만, 현재까지 섬유보강 폴리머의 구조부재의 사용에 대한 표준 설계식, 제작방법 및 설치방법에 대한 통일된 규정이 없는 실정이다. 그리고 현재 ASCE(American Society of Civil Engineers) 산하 PIC(Pultrusion Industry Council)에서 극한강도 설계법에 의한 설계표준(ASCE/PIC-LRFD)을 정하는 노력이 진행중에 있는 실정이다.^[12] 본 논문에서는 유리섬유와 폴리에스터의(GFRP) 복합재료의 인발성형 구조부재들에 대한 압축 실험결과를 바탕으로 인발성형 GFRP 기둥부재에 대한 극한 강도식을 유도하고, 철골에서 사용되는 기둥강도식과 비교 검토하고자 한다.

2.2.2.1 시험체(Test Specimens)

일반적으로 기둥의 단면형상으로 주로 이용되고 있는 세가지 형상, 박스, H 및 I-형상의 가진 유리섬유 폴리에스터(GFRP) 복합기둥들에 대하여 실험하였다. <표 3>에서 실험된 기둥의 단면의 치수, 길이,

<표 3> 인발성형 GFRP 복합기둥의 실험내용

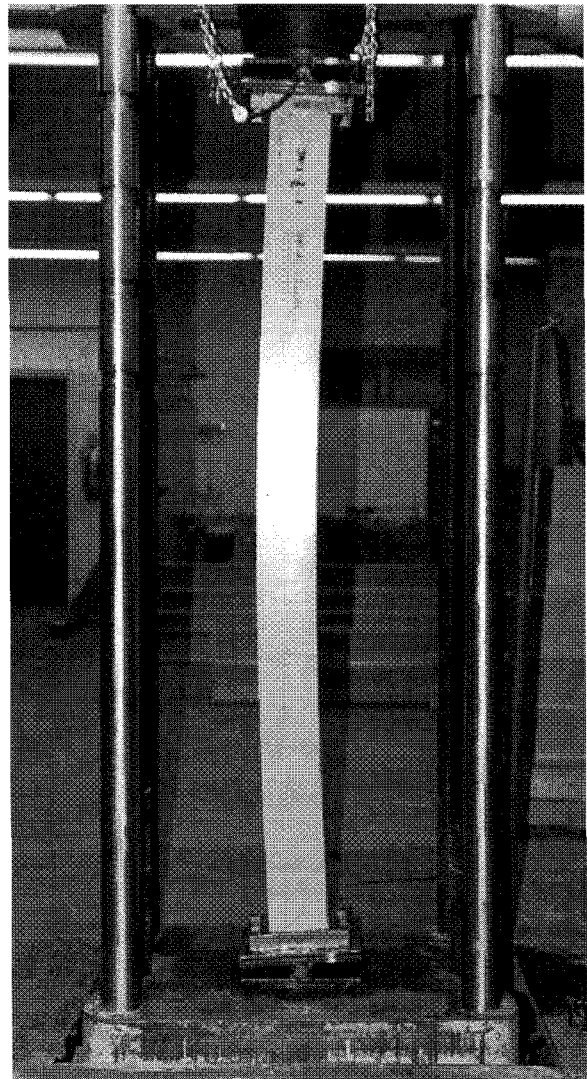
단면형상	단면치수	기둥 길이, m (세장비)	실험된 기둥의 수
튜브(박스)	50x50x6.4, 76x76x6.4	0.3 - 2.7 (20 - 150)	29
I-형상	100x50x6.4, 152x76x9.5, 200x100x9.5	0.3 - 3.6 (30 - 200)	35
H-형상	100x100x6.4, 152x152x9.5, 200x200x9.5	0.9 - 3.9 (40 - 120)	26

세장비 및 실험된 기둥수를 나타 내었다.

또한, 해석에 필요한 기둥의 재료적 특성을 얻기 위하여, 전단면적(full section testing) 단주에 대한 실험을 행하였으며, 이 실험으로부터 기둥길이방향(longitudinal)의 재료 압축강도 $FLC = 2300 \text{ kg/cm}^2$ (33 ksi) 값을 얻었으며, 응력-변형도 곡선으로부터 기둥재료의 길이방향 탄성계수 $EL = 200,000 \text{ kg/cm}^2$ ($3.0 \times 10^6 \text{ psi}$) 의 값을 얻었다.

2.2.2.2 시험방법(Test Procedures)

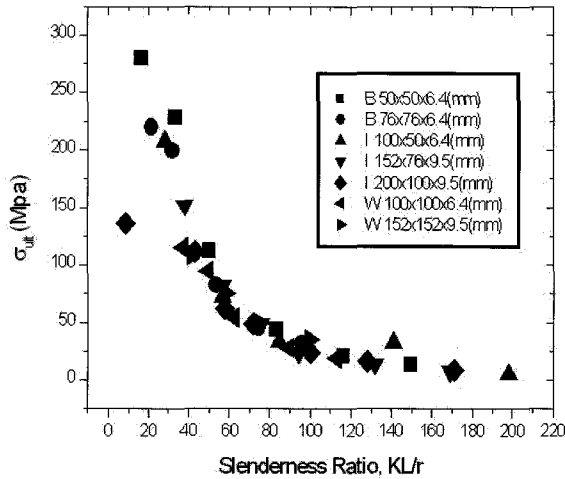
실험에 사용된 모든 기둥들은 양단이 핀-핀(pinned-pinned)의 지지조건하에서 단면의 중심에 축하중이 작용되도록 실험이 행하여졌다. 이와같은 지지조건은 구조물에 있는 기둥의 실제적인 지지조건은 아니지만, 일반적으로 행해지는 기둥실험의 지지조건 중에 하나이다. 이같은 지지조건하에서, 열린단면(opened section)인 경우에는 기둥의 좌굴이 약축(minor axis)에서 일어나도록 유도하며, 닫힌 단면(closed section)의 경우에는 대칭되는 하나의 축으로 기둥의 좌굴이 일어나도록 유도한다. 유리섬유보강폴리머 기둥의 실험은 단주 와 중간 길이의 기둥(2m)들은 총 재하능력이 180톤인 MTS(material testing system)에서 행하여 졌으며, 기둥의 길이가 2미터 이상인 기둥들은 약 9미터 높이의 반력 프레임에서 실험하였으며, 압축하중의 재하속도는 0.03 mm/sec 으로 재하하였으며, 기둥의 극한 하중(ultimate load)은 기둥의 국부 혹은 전체좌굴 그리고 재료적 파괴에 의해서 더 이상 증가하지 않는 기둥의 축하중을 택하였다. <그림 3>에서 인발성형 GFRP 기둥의 실험장면을 나타내었다.



<그림 3> 섬유보강폴리머 기둥의 압축실험

2.2.2.3 실험 결과(Test Results)

유리섬유 보강폴리머(GFRP) 기둥부재의 압축실험을 통해서 기둥의 단면형상 및 길이등에 따른 3가지 형태의 거동들을 발견 할 수 있었다. 박스형 단면의 기둥에서는, 기둥의 세장비가 30 이하에서는 재료적 파괴(brooming, bearing failure) 거동이, 세장비 30 이상에서는 전체 좌굴에 의해서 기둥의 압축강도가 결정되며, 열린단면(WF 및 I-형상)에서는 기둥의 세장비가 40 이하에서는 재료적 파괴 거동이, 60 이상에서는 전체 좌굴 거동이, 그리고 40-60 사이에서는 국부좌굴 및 크리핑(cripping) 거동에 의해서 기둥의 강도가 결정됨을 알 수 있었다. 이러한 결과에 따라서, 본 논문에서는 이들 세장비의 값에 따라서 단주 및 장주를 구분하여 사용한다. <그림 4>



<그림 4> GFRP 기둥의 압축강도 실험결과

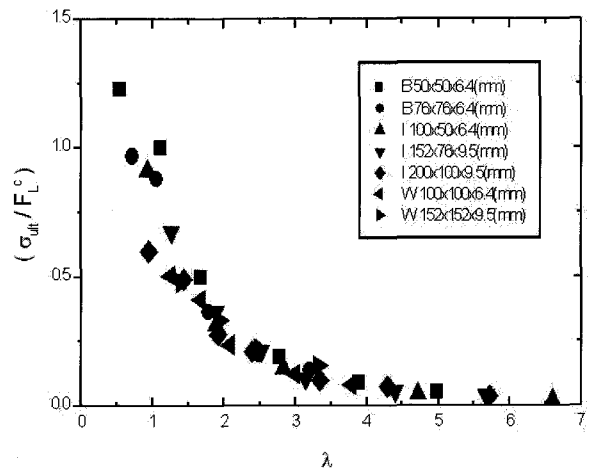
에서 실험된 GFRP 기둥 실험결과를 기둥의 세장비 (KL/r)와 평균압축 강도(average compressive stress)의 관계로 나타내었다. 또한, 유도된 기둥의 강도식은 기둥의 극부좌굴, 전체좌굴 및 재료적 파괴등을 반영한다고 볼 수 있다.

2.2.2.4 인발성형 GFRP 기둥의 강도식 유도

일반적으로 서로 단면형상을 가지는 기둥을 비교하기 위하여 기둥의 강도와 세장비를 기둥 재료의 항복강도를 이용하여 무차원의 값으로 변형할 수 있다. 본 논문에서는 유리섬유보강 폴리머 기둥의 단주실험에서 얻어진 기둥길이방향의 재료압축강도 FLC(longitudinal compressive stress)를 재료의 항복강도로 사용하였으며, 실험에서 얻어진 기둥의 평균 압축강도 (σult)를 이 값으로 나누어 무차원의 값으로 변형하였다. 또한 기둥의 세장비는 새로운 λ2의 향으로 나타낼 수 있다.

$$\lambda^2 = \left(\frac{KL}{r}\right)^2 \frac{F_L^c}{\pi^2 E_L} \quad (6)$$

여기서 새로운 항 λ2은 기둥의 재료 항복강도 FLC에 대한 GFRP 기둥의 탄성좌굴 응력 σE(elastic buckling stress)의 값으로 규정된다. 본 연구에서는 참고문헌^[15]에서 발표된 섬유보강 폴리머 복합기둥의 탄성좌굴 강도식을 이용하였다. 이 식을 이용하여 비교한 섬유보강 폴리머 복합기둥의 강도는 대체



<그림 5> 무차원 값으로 변형된 기둥의 실험값

로 오차 범위내에서 실질적 기둥의 강도를 잘 나타내어 주었으며, 아래와 같이 변형된 오일러 좌굴 강도식을 사용하였다.

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 EL}{L^2 r^2} \quad (7)$$

여기서, EL 은 기둥 길이방향의 탄성 계수, r 단면 반경계수 이며, $r = \sqrt{I/A}$, L 은 기둥의 길이, 그리고 A 기둥의 단면적이다. 따라서 기둥의 세장비는 무차원의 세장비 λ값으로 표현되며, 아래의 식으로 표현된다.

$$\lambda = \left(\frac{KL}{r}\right) \left(\sqrt{\frac{F_L^c}{\pi^2 E_L}}\right) \quad (8)$$

이와 같이 무차원의 값들로 나타낸 기둥의 압축강도의 실험결과를 <그림 5>에서 보여준다.

인발성형 GFRP 기둥의 극한강도 설계식을 얻기 위하여, 본 논문에서는 이 무차원의 기둥강도 실험 결과 값을 이용한 회귀분석기법(regression analysis)을 이용하였다. 우선 보다 적절한 강도식을 얻기 위하여, λ값 2.55를 기준으로해서 두가지 형태의 방정식을 유도하였다. 즉, λ값이 2.55 이하에서는 다항식(polynomial)으로, λ값이 2.55 이상에서는 기둥의 거동이 오일러 좌굴식을 가지는 탄성거동을 한다는 가정하에 쌍곡선(hyperbola) 형태의 방정식으

로 유도 하였다. 이 회귀분석의 결과로 얻어진 인발 성형 GFRP 기둥의 극한 강도식은 다음과 같다.

$$(0.89) \frac{\sigma_{ult}}{F_L^c} = 1.763 - 1.176\lambda + 0.2206\lambda^2, \lambda \leq 2.55 \quad (9)$$

$$(0.92) \frac{\sigma_{ult}}{F_L^c} = \frac{1.291}{\lambda^2}, \lambda > 2.55 \quad (10)$$

위의 두 방정식에서, 유도된 강도식의 적합성을 검토하기 위하여 결정계수 R²(coefficient of determination)의 값을 구하였다. 결정계수의 값은 회귀 분석에서 얻어진 방정식과 입력된 데이터 사이의 연관성을 나타내며, 결정계수의 값이 1일때는 방정식과 데이터 값이 일치됨을, 그리고 결정계수의 값이 0일때는 연관성이 없는 것으로 설명되어진다. 본 연구에서 얻어진 결정계수의 값이 위 식의 처음에 보여져 있으며, 각각의 식에 대하여 0.89 와 0.92 의 값이 얻어졌다. 따라서 얻어진 식들은 실험값과 비교적 밀접한 관계가 있으며, 대체로 실험값을 잘 반영하고 있다고 말할 수 있다. 그리고 식(9)에서, λ값이 0 에 접근할때, 기둥의 극한강도는 기둥재료의 항복 강도(FLC)의 1.76배의 강도를 가지는 것으로 나타난다. 이런 현상을 극히 드문경우이며, 일반적인 기둥의 강도를 나타낸다고 할 수 없으므로, 이러한 것을 보정하기 위해서 식(9)를 지수식(exponential)으로 표현하여 일반적 기둥의 극한강도가 기둥재료의 항복 강도가 되도록 유도한다. 매우 짧은 단주의 극한강도를 기둥재료의 극한강도로 나타내기 위하여 지수 식을 이용한다.

$$1.763 - 1.176\lambda + 0.2206\lambda^2 = \exp(-0.289\lambda^2);$$

따라서, $\frac{\sigma_{ult}}{F_L^c} = \exp(-0.289\lambda^2)$

그러므로, 기둥의 극한강도는

$$\therefore \sigma_{ult} = \exp(-0.289\lambda^2) F_L^c, \lambda \leq 2.55 \quad (11)$$

그리고 λ값 2.55 에서 식(11)에 맞는 식(10)의 쌍

곡선 식을 다음의 식으로 변형될 수 있다.

$$\frac{\sigma_{ult}}{F_L^c} = \frac{0.995}{\lambda^2}, \lambda > 2.55$$

그러므로, 기둥의 극한강도는

$$\therefore \sigma_{ult} = \left(\frac{0.995}{\lambda^2}\right) F_L^c, \lambda > 2.55 \quad (12)$$

위의 식(11)과 (12)에서 σ_{ult} 는 실험된 인발성형 GFRP 기둥의 극한강도를 나타내며, 일반적으로 다음의 식으로 표현된다.

$$\sigma_{ult} = \Phi_c A_g F_{cr} \quad (13)$$

여기서, Φ_c 는 기둥의 저항계수(resistance factor)이며, F_{cr} 은 기둥의 임계응력(critical stress)를 나타낸다. 따라서 GFRP 기둥의 임계강도는 다음의 변형식을 이용하여 철골기둥의 극한 강도 설계법에서 사용되는 기둥의 일반식으로 표현 될 수 있다.

$$\text{Exp}(x) = e^x$$

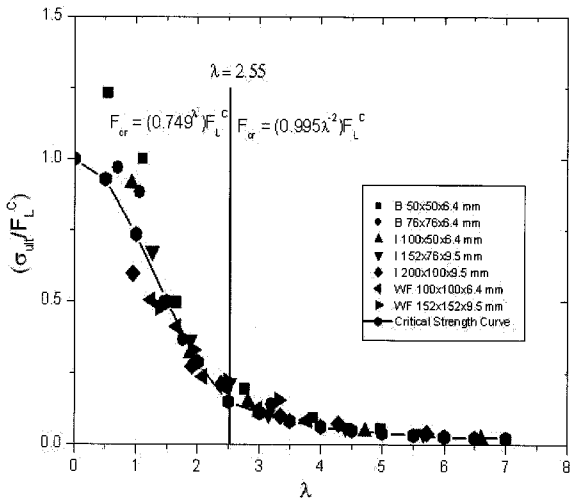
$$\text{Exp}(-0.289\lambda^2) = 0.749\lambda^2$$

$$F_{cr} = (0.749\lambda^2) F_L^c, \lambda \leq 2.55 \quad (14)$$

$$F_{cr} = \left(\frac{0.995}{\lambda^2}\right) F_L^c, \lambda > 2.55 \quad (15)$$

위의 식(14)와 (15)를 본 논문에서는 인발성형 GFRP 기둥의 임계강도(critical stress)로 유도하였으며, <그림 6>에 이 강도식들을 기둥실험의 데이터와 비교 하였다.

<그림 6>에서 보듯이, 식(14)와 (15)는 실험에서 얻어진 데이터 값들과 매우 잘 일치됨을 볼 수 있다. 하지만, λ값이 작은 영역에서 몇개의 실험 데이터값이 강도식 아래에 있음을 볼때, 더 많은 실험을 통하여 이와 같은 경향이 발생되는지를 검토해야 한다. 이상에서, 인발성형 FRP 복합기둥의 극한 강도식을



〈그림 6〉 유도된 섬유보강 폴리머 기둥의 임계강도식과 실험 데이터

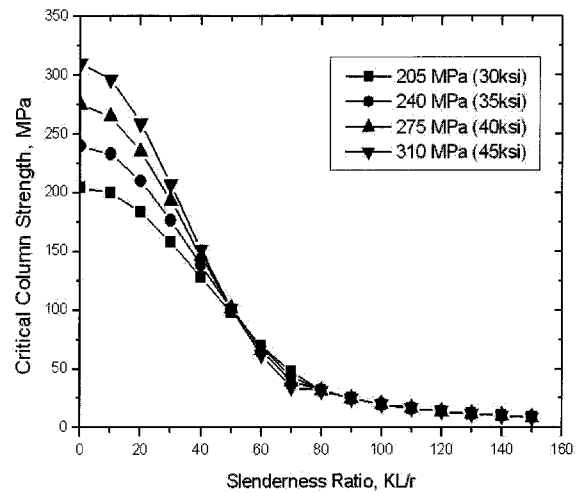
철골에서 사용되는 무차원의 세장비로 나타내었으며, 극한 강도설계법하의 철골기둥 강도식과 유사한 경향을 나타냄을 알았다. 또한, 인발성형 FRP 기둥의 강도는 철골기둥에 비해 비교적 큰 λ값 (2.55)에서 오일러 쌍곡선(Euler hyperbola)으로 나타내어짐을 알 수 있었다.

3. 극한 강도식의 비교 검토

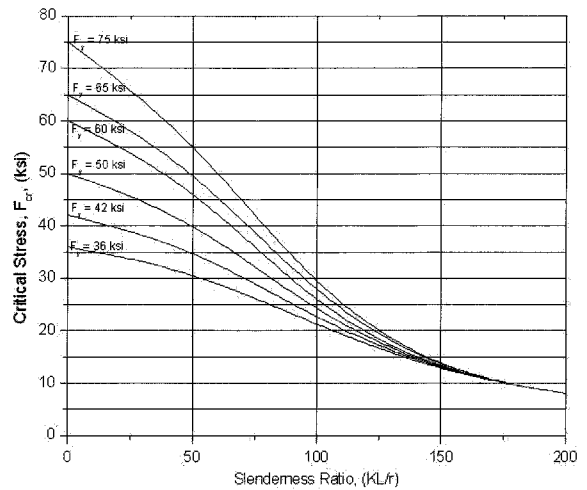
지금까지 유리섬유보강 폴리머 기둥들의 압축강도 실험결과를 바탕으로하여, 섬유보강 폴리머 기둥의 극한강도식을 유도하였다. 〈그림 7〉은 유도된 식(14)와 (15)에 근거하여 기둥의 길이방향의 서로다른 섬유보강 복합재료의 압축항복강도(FLC)를 가지는 값에 대하여 임계강도를 나타내었다.

그리고 〈그림 8〉에서는 현재 철골 기둥의 극한강도 설계식에 따른 임계강도의 값을 서로다른 철골의 항복강도에 따라서 도표화 하였다.

위의 두 그림에서 보듯이, 철골 및 섬유보강 폴리머 복합기둥의 임계 설계강도는 각각의 재료항복강도에 대하여 비슷한 경향을 나타내며, 비교적 큰 세장비의 철골기둥과 섬유보강 폴리머 기둥의 강도(strength)는 기둥재료의 항복강도에 상관없이 일정한 값이 됨을 보여준다. 이러한 결과는 비교적 큰 세장비를 갖은 철골과 섬유보강 폴리머 기둥들은 탄성적 좌굴에 의해서 기둥의 강도가 지배되며, 이러한



〈그림 7〉 섬유보강 폴리머 기둥의 임계강도



〈그림 8〉 철골기둥의 임계강도

결과는 철골의 극한 강도설계식에서 사용되는 식(4)와 (5) 그리고 유도된 섬유보강 폴리머의 극한강도식(14)와 (15)에 일치함을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 현재 철골 기둥의 구조설계에 사용되고 있는 설계법과 섬유보강 폴리머 복합재료의 기둥설계에 적용되고 있는 설계식들을 비교 검토 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기둥의 허용응력 설계법에서, 섬유보강 폴리머 복합재료 기둥의 설계에 사용되고 있는 안전계수의 값들은 철골기둥 설계에 사용되는 값보다 비교적

- 높은 값을 사용하고 있음을 알 수 있었다.
2. 인발성형 유리섬유보강 폴리머(pultruded glass fiber reinforced polymer) 복합기둥의 실험 데이터로부터 얻어진 극한강도 설계식은 철골 기둥의 극한강도 설계식과 유사한 식으로, 즉 단주에서는 지수식(exponential equation)으로, 장주에서는 오일러 방정식(hyperbola)으로, 나타낼 수 있었다. 특히 비교적 세장비가 큰 기둥에서 기둥강도는 철골 및 FRP 재료의 항복강도와는 무관하며, 기둥의 탄성적 좌굴(elastic buckling)에 의해서 좌우됨을 알 수 있었다.
 3. 이상과 같이, 실험에서 유도된 인발성형 섬유보강 폴리머 복합 기둥의 강도식은 철골 강도식과 유사하며, 특히 장주에서는 기둥의 강도식(column strength)은 오일러 식으로 표현될 수가 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Bjorhovde, R., The Safety of Steel Columns, J. of the Structural Division, ASCE, Vol.104, pp.463-477, March 1978.
2. Beedle, L. S. and Tall, L., Basic Column Strength, J. of the Structural Division, ASCE, Vol.,86, pp.139-73, July 1960.
3. Tide, R. H. R., Reasonable Column Design equations, Annual Technical Session of Structural Stability Research Council, 16-17, pp.47-56, April 1985.
4. Geschwindner, L. F., Disque, R. O. and Bjorhovde, R., Load and Resistance Factor Design of Steel Structures, Prentice Hall, 1994.
5. Galambos, T. V. and Ravindra, M. K., Tentative Load and Resistance Factor Design Criteria for Steel Buildings, Research Report NO.18, Civil Eng., Washington University, St. Louis, MO, September 1973.
6. Bjohoved R., Deterministic and Probabilistic Approaches to the Strength of Steel Columns, Thesis, Lehigh University, Bethlehem, PA, May 1972.
7. Ravindra, M. K. and Galambos, T. V., Load and Resistance Factor Design for Steel, J. of the Structural Division, ASCE, 104, pp.1337-1353, September 1978.
8. Galambos, T. V., Ellingwood, B., Macgregor, J.G. and Cornell, C. A., Probability Based Load Criteria: Assesment of Current Design Practice, J. of the Structural Division, ASCE, 108, pp. 959-977, May 1982.
9. Heger, F. J., Proposed AISC LRFD Design Criteria, J. of the Structural Division, ASCE, 106, pp.729-734, March 1980.
10. Creative Pultrusions, Inc. Pultrusion Design Manual, 1999.
11. Strongwell, Inc., Design manual, 1999
12. Chambers, R. E., ASCE Design Standard for Pultruded Fiber-Reinforced Plastic(FRP) Structures, J. of Composites for Construction, Vol.1, No.1, pp.26-38, February 1997.
13. Barbero, E. and Tomblin, J., Euler Buckling of Thin-walled Composite Columns, J. of Thin-Walled Structures, Vol.17, pp.237-258, 1993.
14. Barbero, E. and Tomblin, J., Local Buckling Experiments on FRP Columns, J. of Thin-Walled Structures, Vol.18, pp.97-106, 1994.
15. Hashem, Z.A., Structural Behavior of Plastic Composite Columns, PhD dissertation, The University of Texas at Arlington, Texas 1993.