

설계된 구조물을 사용한 건설의 필요성

Necessity of Construction Using Designed Structure

김 덕 현* · 한 봉 구**

ABSTRACT

Almost all buildings/infrastructures made of composite materials are fabricated without proper design. Unlike airplane or automobile parts, prototype test is impossible. One cannot destroy 10 story buildings or 100 meter-long bridges. In order to realize "composites in construction", the following subjects must be studied in detail, for his design: Concept optimization, Simple method of analysis, Folded plate theory, Size effects in failure, and Critical frequency. Unlike the design procedures with conventional materials, his design should include material design, selection of manufacturing method, and quality control methods, in addition to the fabrication method.

1. 구조물 개념의 최적화

건설에 복합재료를 사용할 때, 반드시, 필자가 구조물의 제5기본 개념이라고 이름붙인 새로운 개념에 근거한 최적설계를 실시해야 한다는 것은 그 간의 여러 학술회의에서 강조한 바와 같다.

토목, 건축 구조물의 거의 대부분은, 1차원 구조요소의 뼈대(framework)로 생각하고 해석될 수 있다. 복합재료는, 일반적으로, 인장에 강하다. 어느 구조요소가 인장하중에 대해서 설계되면, 얇은 단면을 갖게되고, 면내의 축방향 인장하중이 아닌 다른 형태의 하중에 대해서는 매우 취약하게 된다. 이것은, 얇은 판들의 결합을 통하여 단면계수를 증가시킬 것을 필요하게 한다.

구조물 뼈대가 1차원의 보와 기둥으로 해석되더라도 이들 1차원 구조요소들은 얇은 벽의 모임으로 이루어진 3차원 구조물로서 FOLDED PLATES(shells)라 불리운다. 결국, 복합재료로 만들어지는 건설용 구조물의 해석은 등방성(prismatic)이던 비등방성(nonprismatic)이던 FOLDED PLATES의 해석이 된다.

2. 토목 건축건설의 주요 구조물해석을 위한 간편한 방법

건설용 복합재료 구조부재의 효율적인 형태 가운데 가장 중요한 것은 상형(box)단면인데, 이런 단면의 각 요소(element)면은 탄성지지 된 적층판으로 이루어진다. 적층판의 설계와 해석은 너무 복잡해서 상당한 수의 구조 기술자들은 복합재료설계에 대해 알레르기 증세까지 보인다. 전체구조물의 최초 기본설계시부터, 각 판

* 책임저자, 정회원 · 코리아컴포지트
** 정회원 · 서울산업대학교 구조공학과, 교수

의 재료선택 및 섬유배향등을 결정한다는 것은 상당히 어려운 일이다. 경계조건은 탄성지지 되었으며, 지지 조건은 아직 미지의 함수로 되어있다. 일반적으로 복합재료 적층판의 해석에 있어 경계조건은 고전적 역학이나 탄성론의 경우와 같이 단순하지가 않다. 가장 단순한 경우인 단순지지 및 고정지지인 경우라 해도 다음과 같이 여덟가지 형태(types)가 있다.

$$\begin{aligned} \text{단순지지 : Type 1 : } w = 0, \quad M_n = 0, \quad u_n = \overline{u_n}, \quad u_t = \overline{u_t} \\ \text{Type 2 : } w = 0, \quad M_n = 0, \quad N_n = \overline{N_n}, \quad u_t = \overline{u_t} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Type 3 : } w = 0, \quad M_n = 0, \quad u_n = \overline{u_n}, \quad N_{nt} = \overline{N_{nt}} \\ \text{Type 4 : } w = 0, \quad M_n = 0, \quad N_n = \overline{N_n}, \quad N_{nt} = \overline{N_{nt}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{고정단 : Type 1 : } w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial n} = 0, \quad u_n = \overline{u_n}, \quad u_t = \overline{u_t} \\ \text{Type 2 : } w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial n} = 0, \quad N_n = \overline{N_n}, \quad u_t = \overline{u_t} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Type 3 : } w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial n} = 0, \quad u_n = \overline{u_n}, \quad N_{nt} = \overline{N_{nt}} \\ \text{Type 4 : } w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial n} = 0, \quad N_n = \overline{N_n}, \quad N_{nt} = \overline{N_{nt}} \end{aligned}$$

횡방향 전단변형이 무시된 간단한 경우에도 판의 휨 지배 방정식은 다음 세개의 연립편미분 방정식이다.

$$\begin{aligned} A_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2A_{16} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + A_{66} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + A_{16} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + (A_{12} + A_{66}) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + A_{26} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \\ - B_{11} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - 3B_{16} \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} - B_{26} \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A_{16} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (A_{12} + A_{66}) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + A_{26} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + A_{66} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + 2A_{26} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + A_{22} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \\ - B_{16} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} - 3B_{26} \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} - B_{22} \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + 4D_{26} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \\ - B_{16} \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} - B_{11} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} - 3B_{16} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial y} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} - B_{26} \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} \\ - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} - 3B_{26} \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y^2} - B_{22} \frac{\partial^3 v}{\partial y^3} = q(x, y). \end{aligned} \quad (5)$$

좌굴의 경우 (5)식은 다음과 같이 되고

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + 4D_{26} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - B_{11} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}$$

$$\begin{aligned}
& -3B_{16} \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} - B_{26} \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} - B_{16} \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} \\
& -3B_{26} \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y^2} - B_{22} \frac{\partial^3 v}{\partial y^3} = q(x, y) + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} . \quad (6)
\end{aligned}$$

진동의 경우 (5)식은

$$\begin{aligned}
& D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + 4D_{26} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} \\
& + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - B_{11} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} - 3B_{16} \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} \\
& - B_{26} \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} - B_{16} \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} - (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial y} - 3B_{26} \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y^2} - B_{22} \frac{\partial^3 v}{\partial y^3} \\
& = q(x, y, t) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} . \quad (7)
\end{aligned}$$

다음과 같은 경우가 성립한다면, 계산은 상당히 간단해진다.

이 과정은, 필자가 쓴 책[1]의 7장9절에 상세히 설명되어 있다. 특정한 방향성을 갖는 많은 적층들은 층의 수가 증가함에 따라 B_{16} , B_{26} , D_{16} 와 D_{26} 의 값이 감소한다. 이러한 적층판들은, 변위의 세 성분 u, v, w 를 종속변수로 갖는 세 개의 연립편미분 방정식 대신, 종속변수 한 개, w 를 갖는 특별직교 이방성판의 지배 방정식 한 개로 완전한 해석이 가능해진다.

다음은 그러한 적층판들의 일부이다.

$$[AB]r, A = -B.$$

$$[ABBAAB]r, A = -B.$$

$$[ABBCAAB]r, C = 0^\circ \text{ or } 90^\circ, A = -B.$$

3. FOLDED PLATE 이론

모든 곡면은 적절한 모양의 삼각형 판의 연속으로 고려될 수 있다. 그러므로, nonprismatic folded plates 이론은 모든 형태의 셸 구조에 적용될 수 있다 [34, 58, 59, 60, 61]. 모든 삼차원 구조물은, sectorial판으로 구성된 “nonprismatic” folded plates로 상당히 정확하게 표시될 수 있다. 면내, 또는 면에 수직인 힘들의 영향을 받는, sectorial판 문제는 유한 차분법, 유한요소법, 또는 다른 방법들로 해석될 수 있다. 그러면 문제는 두 인접하는 sector의 경계문제로 종착된다. 각 sector는 경사 될 수 있다.

접선의 적합 및 평형조건 형태는 어떤 종속변수가 선택되느냐에 달려있다. 예를 들어, 횡모멘트(transverse), M_t 와 변위의 세 성분, u, v, w , 가 미지수로 택해지면, 경사의 접합조건과 세 개의 힘의 평형조건이 각 절선(fold line)에서 만족되어야 한다. “힘”의 표현이 변위로 표시되므로, 적합조건은 자동적으로 충족된다. 지배적인 미분방정식이 적분될 때 각 절선에서, 이 조건들이 충족되어야 한다.

위에 설명한 해석 방법이 있으므로 문제는 “prismatic”이던 “nonprismatic”이던 임의의 경계조건을 가진 판을 해석하는 문제로 축소된다.

4. 복합재료 구조의 파괴에 대한 치수효과

치수효과는 콘크리트나 암석과 같은 quasi-brittle재료들의 물리적 특성에 영향을 미친다.

모든 재료의 경우에 체적이 크면 흠이 클 수 있다. 복합재료 구조의 파괴역학에 대한 치수 효과의 적당한 이론이 아직까지 없었다. 구조물의 섬유 묶음 크기가 증가하면, 섬유 강도가 감소하는 현상을 흔히 경험해 왔다. 복합재료내의 강도 분배와 치수사이의 관계를 특성짓는 효과적인 방법은 아직 완전하지 않다. 대형 복합구조가 일반적으로 작은 복합구조보다 약하다는 사실은 상당기간 알려져 왔다.

이런 현상에 대한 여러 가지 이유가 있을 수 있다. 가장 중요한 이유는 brittle한 보강 섬유의 치수 효과가 크다. brittle한 섬유는 일반적으로 강하고 지름이 균일하지만 다른 강도를 가진 흠을 포함하고 있을 수 있다. 긴 섬유는 짧은 섬유보다 그러할 가능성이 더 많다.

Tasi[42]에 따르면 상호작용하는 파괴영역을 구체화하는 쉬운 방법은 quadratic criterion을 사용하는 것이다. 이것은 Maxwell에 의해 제안되어진 비틀림 에너지, 또는 응력의 일반화이고, 그 후에 Huber에 의해 더욱 개발되었다. 이러한 영역을 사용함에 따라 우리는 파괴모드의 정의에 의한 파괴영역에 의존하는 대신에 사용 가능한 데이터를 설계도구로서 사용한 파괴영역을 찾아낼 수 있다.

현재의 이용 가능한 지식으로 에폭시 모재에 유리섬유로 보강된 복합재료에 대해서 다음과 같은 강도-파괴 해석을 추천한다.

- 1) 그림 1에서 감소된 X값을 얻는다.
- 2) 크기효과는 인장과 압축이 같다고 가정한다.(이 가정은 상세한 연구가 이루어진 다음에 수정되어질 것이다.)
- 3) $Y'=Y$ 라고 가정한다.

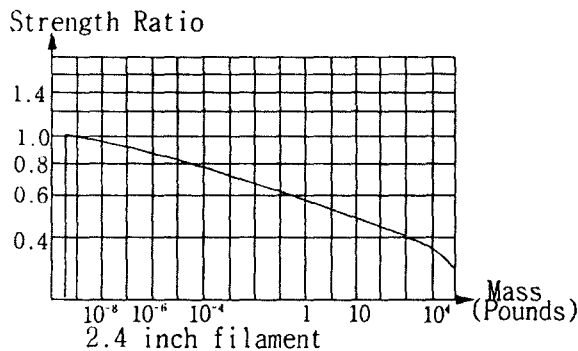


그림1. 질량증가에 따른 유리섬유 인장강도 감소율

- 4) $S=S$ (시험편강도)으로 가정한다.
- 5) 응력공간에 대한 Tsai-Wu 파괴영역을 사용한다.

필자는, 이전에 발표된 논문들에서, 치수효과를 고려한 복합재료 강도-파괴 해석 과정을 제안하고, 강도비

(즉 안전계수)는 다음의 다섯 가지 요인에 의해 좌우된다고 결론지었다.

이 다섯 요인은 시편 강도의 감소에 관한 두 경우인

- A) 감소를 인장과 압력 두 강도에 대해서 고려할 때와
- B) 감소를 인장 강도에 대해서만 고려할 경우,

두 개의 F_{xy}^* 에 대한 가정치, $F_{xy}^*=0$ 과 $F_{xy}^*=-1/2$, 그리고 작용 응력 상태 등이다.

제안된 size/scale 효과의 연구-개발 방향은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- A. 대형구조물에 사용 가능한 재료의 각각에 대하여 질량에 기초한 섬유강도의 감쇠율을 구한다.
- B. matrix에 대해서 A와 같이 한다.
- C. 설계에 사용될 여러 가지 적층판의 각 형태에 대해서, 작용 응력의 가능한 모든 조합하여 실험을 수행한다.
- D. 위의 A, B, C의 결과로 각각의 응력조합에 대해 $F_{xy}^* = 0$ 과 $F_{xy}^* = -1/2$ 중 어느 가정치가 실험결과와 가까운가를 찾아낸다.
- E. A, B, C, 의 결과로 각각의 응력상태에서, 횡방향 강도의 감소가 중요한지 아닌지를 알아낸다.
- F. 각 응력상태하에서 감소가 인장과 압축강도에 대해 적용되어야 하는지 아니면 인장강도에만 적용되어야 하는지를 알아낸다.

5. 진동해석

부식되는 공로교상의 콘크리트 슬래브나 건물의 문제는 전 세계에서 심각한 문제로 되어있다. 보수공사에 대한 결심을 하려면 믿을만한 비파괴 평가가 필요하다. 또 공사완료 후 설계대로 시공되었는지도 평가 해야 하는데 이것은 거의 불가능하다.

믿을만한 방법의 하나가 현장에서 슬래브의 고유진동수를 구하는 것이다. 현장에서의 측정값과 설계단계 또는 도면에서 구한 값을 비교하면, 파손의 정도를 비교적 정확하게 측정할수 있다. 그러나 판이 경계에서 단 순지지되고 균등균질 단면을 갖고 등분포 하중을 받고 있지 않으면 믿을 만한 답을 구하는 것은 아주 어렵다.

자유도가 하나인 체계의 진동해석의 가장 인기있는 해석 방법인 Rayleigh 방법은 에너지 보존의 원칙이다 : 자유진동체계의 에너지는 이것을 흡수하려는 감쇠힘이 작용하지 않으면 상수로 남아 있어야 한다.

자유도가 무한개인 보의 경우 , 이 보를 단일 자유도 체계로 축소하기 위하여 형태함수를 가정해야 한다. 진동의 주파수는 운동중 발생한 최대 변형률에너지가 최대 운동에너지와 갖게 노아서 구해질 수 있다. 그러나 이 방법은, 특별한 경우를 제외하고는 실제 값보다 큰 값을 제공해준다. 복잡한 보의 경우, 정확한 형태함수를 가정하는 것은 불가능하다. 이런 경우 얻어진 값은 실제 값보다 크다. Rayleigh비율(quotient) ≥ 1 [1,PP189~191] 인 것을 상기하자.

건물이나 공장의 바닥, 교량등에는 자중에 추가해서 집중하중을 받는다.

설계기술자는 이러한 구조요소의 고유진동수를 구해야 하는데 이런 문제를 정확히 해결하는 것은 거의 불가능하다. Pretlove[13]는, 유효질량의 개념을 사용하여 부착된 질량이 있는 보의 해석방법을 발표했다. 그러나, 이방법은 특정한 간단한 형태의 보와 하중의 경우에만, 그나마, 근사치를 구할수 있게한다.

불규칙한 단면을 갖고, 부착된 질량들이 있는 보나 탑 구조물의 좌굴하중과 진동의 고유주파수를 구하는 간

단하면서 정확한 방법이 남산의 “서울타워”를 설계하던 필자에 의해서 개발되고 고유진동수를 계산하는 방법은, 그 후, 1974년에 발표되었다[12]. 그 후에 이 방법은 복합재료 적층을 포함하는 2차원의 문제로 확장 적용되고, 횡 방향 전단 변형률의 영향이 있는 경우와 없는 경우를 포함한 여러 가지 하중조건, 경계조건, 변 단면 경우 등의 복합재료 판 해석에 응용되고 미국 토목학회의 8차 구조물 Congress[14] 4차 재료 Congress[15]등을 포함하는 국내외 회의에서 발표되어왔다.

이 해석 방법은 참고문헌[14,16,17] 및 여러 출판물에서 자세히 설명되었으므로 여기서는 반복하지 않는다.

참고 문헌

1. Kim, D. H., Composite Structures for Civil and Architectural Engineering, E & FNSPON, Chapman & Hall, London, 1995.
2. Kim, D. H., "The Importance of Concept Optimization in Design And Scale/Size Effects In the Failure of Composite Structures," Proc. of International Symposium on Public Infrastructure Systems Research, Seoul Korea, 1995. 9. 25-27.
3. Kim, D. H., "Importance of Concept Optimization in Design and Size/Scale Effect in The Failure of Composite Structures," EUROMECH 334, Lyon, 1995. 5. 15-17.
4. Kim, D. H., "The Importance of Concept Optimization in Design And Scale/Size Effects In the Failure of Composite Structures," Invited Speaker, The Wilson Forum on Existing & Potential Application of Composite Materials in the Infrastructure, Alexandria, Virginia, October 28-29, 1996.
5. Kim, D. H., "The Importance of Concept Optimization in Design And Scale/Size Effects In the Failure of Composite Structures," The Third International Symposium on TEXTILE Composites In Building Construction, Seoul, Korea, November 7-9, 1996.
6. Kim, D. H., "Analysis of Triangularly Folded Plate Roofs of Umbrella Type," 16th Congress of Applied Mechanics, Tokyo, Japan, 1996. 10. 19.
7. Duk-Hyun Kim, "Theory of Nonprismatic Folded Plate Structures", Analysis of Triangularly Folded Plate Roofs of Umbrella Type, Thesis Submitted as a Partial Fulfillment for the Degree of Doctor of Philosophy, Purdue University, 1965, PP 114~132.
8. Duk-Hyun Kim, "Theory of Non-prismatic Folded Plate Structures", Trans.Korea Military Academy (ed.Lee,S.H.), 5, 1967, PP 182~268.
9. Duk-Hyun Kim, et al, "Analysis of Three Dimensional Structures by Folded Plate Theory", Proc. Spring Conference, The Korea Society for Composite Materials, 1999, PP 152~167.
10. Duk-Hyun Kim, et al, "Analysis of Folded Plate Structures Composed of [45/-45/-45/90/45/45/-45] Type Laminated Composite Plates, Proc. Spring Conference The Korea Society for Composite Materials, 2000, PP 93~96.
11. Chong, K. P. and Kim, D. H., "Size/Scale Effect in the Failure of Brittle Materials and Composite Structure," Invited Lecture, International Union of Theoretical and Applied Mechanics Symposium on Size-Scale Effects in the Failure Mechanisms of Materials and Structures, Torino, Italy, 1994. 10.
12. 김 덕현, "Size-Scale Effects in the Failure of Composite Structures," 한국복합재료학회, 1994. 11. 25.

13. A.J. Pretlove, "A Simple and Accurate Method for Calculating the Fundamental Natural Frequencies of Beams with Attached Masses", *International J. of Mechanical Engineering Education*, Vol. 15, No.4, Ellis Horwood LTD., England, 1987, PP 257-266.
14. Kim, D. H., "Vibration Analysis of Irregularly Shaped Composite Structural Members," 1990 Structures Congress, American Society of Civil Engineers, Baltimore, MD., U.S.A., 1990. 5.
15. Kim, D. H., "Vibration Analysis of Special Orthotropic Plate with Variable Cross-Section, and with a Pair of Opposite Edges Simple Supported and the Other Pair of Opposite Edges Free," American Society of Civil Engineers, Washington, DC, November 10-14, 1996.
16. Kim, D. H., "A Simplified Method of Vibration Analysis of Irregularly Shaped Composite Structural Elements," First International Society for the Advancement of Material and Process Engineering Symposium (JISSE 1), Tokyo, 1989. 12.
17. Kim, D. H., "Vibration Analysis of Irregularly Shaped Laminated Thick Composite Plates," ICCM 8, Honolulu, Hawaii, July 1991.