

고층 건물 경량화를 위한 첨단 복합재료 상판

Advanced Composite Material Slabs for Tall Buildings

김 덕현¹⁾

Kim, Duk-Hyun

심 도식²⁾

Shim, Do-Sik

김 성환³⁾

Kim, Seong-Whan

ABSTRACT

For each construction material used, there is certain theoretical limit in sizes. For tall building construction, the reduction in slab weight is the first step to take in order to break such size limits. In this paper, the feasibility of such objective is proven and given by numerical analysis result. For a typical building slab, both concrete and advanced composite sandwich panels are considered. The concrete slab is treated as a special orthotropic plate to obtain more accurate result. For each panel, the deflection under the dead and live loads is compared, since both tensile and compressive strengths of the composites are far more higher than those of concrete. All types of sandwich panels considered, except one case, have weights less than one tenth of that of reinforced concrete slab, with deflections less than that of the concrete slab. The cost analysis result and manufacturing methods will be reported later.

1. 서론

최근 국내에서 개최된 한 국제회의에서 고층건물에 대한 포럼(Forum)이 열렸었다. 그런데 놀라운 사실은 대형구조물 건설에 가장 중요한 구조물 경량화의 필요성, 경량화를 위한 새 소재의 사용, 이와 관련된 연구 방향 등에 대해서는 전혀 언급이 없었다는 것이다. 주목할 것은 교량의 경우, 이미 1984년에 강재 현수교나 사장교의 “이론적” 최대 시간이 5000m~7000m이고 유리섬유보강 복합재료는 이의 2배, 탄소섬유보강 복합재료는 이의 3배가 가능하다는 것이 발표되었고[1], 세계 여러 나라에서 첨단복합재료의 활용을 계속 발전 시켜 왔으며, 전통적 재강회사인 신일본 제철에서도 현수교(사장교)용 복합재료 건설자재를 체계적으로 시판하고 있는 실정인 것이다. 건물의 경우도 마찬가지로 여러 가지 건물에 실제로 신소재가 사용되어 왔다[2,3,4,25,26].

지난 2년간[1995,1996] 필자는 한양대학교 초대형 구조 시스템 연구센터(STRESS)의 일부 지

* KOREA COMPOSITES

** 강원대학교 토목공학과 시간강사

*** 강원대학교 토목공학과 석사과정

원으로 건물의 경량화를 위한 설계 기초이론의 발전을 진행해 왔고[5,6,7], 금년부터는 단독으로 이론의 재정비, 가격을 고려한 최적 설계 및 제작방법 발전, 설계지침 작성, 건축 설계자를 확신시키기 위한 실험 실시 등을 단계적으로 추진하고 있다.

현재 콘크리트의 1/10무게인데 훨씬 경제적인 판들은 여려가지가 있으며 필자는 이들 보다 더 경제적이고 효율적인 제작방법의 연구를 진행하고 있다. 경량이어서 중장비가 필요 없고, 부식이 없다는 사실들을 감안하면 단·장기적으로 훨씬 경제적인 건축물의 건설이 가능해진다. 기초지반 문제 등으로 충고에 한계가 있다는 등의 협소리는 이제 옛말이 된다. 기둥과 보도 물론 복합재료로 제작 될 것이다. 이 경우 기둥과 보도 거의 완전한 수작업으로 신속하게 건설 될 수 있을 것이다.

성능이 우수하고 경제적인 건설을 가능하게 하는 첨단 복합재료의 사용이 늦어진데는 다음 세 가지 원인에 있다고 본다.

- 가. 이론이 보통 설계 기술자에게는 너무 어렵다.
- 나. 적당한 참고서적이 없다.
- 다. 값이 비싸다는 편견이 있었다.

이중 ‘가’와 ‘나’는 필자에 의해 해결되었다고 보면 값의 문제는 적절한 설계 및 제작방법의 최적화로 해결 가능하다. 모든 재료에게는 치수가 커지면 강도가 낮아지는 특성이 있어서 사용해 본 경험이 적은 재료의 활용은 주저하게 되는 것이 통례이다. 결국 남은 문제는 설계의 최적화와 치수(scale/size)효과를 고려한 강도/파워 이론의 두 가지이다.

필자는 이 두 가지 문제에 대해서 50여편의 논문을 발표하면서 국제학계에 어느 정도의 방향을 제시한 바 있다.

본 논문은 복잡한 여러 가지 상세한 내용을 피하고 기술자들에게 콘크리트 무게의 1/10이 되는 바닥재가 있다는 확신을 주는 것만을 목적으로 하고 있다.

여러 가지 확보되었거나 개발중인 것은 아직 발표단계가 아니어서 항공산업등에서 이미 사용하고 있는 64 kg/m³의 무게를 갖는 Form 코아를 택했다. 가격문제는, 본 논문에서는 검토대상이 아니다. Face sheet는 가장 경제적인 유리섬유보강 복합재료로 택하였다.

2. 이 논문에 사용된 이론

2.1. 유한 차분법

특별직교 이방성 판의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q(x, y) \quad (1)$$

여기서 $D_1 = D_{11}$, $D_2 = D_{22}$, $D_3 = D_{12} + 2D_{66}$ 이다.

위의식 (1)은 4차의 단일 미분항을 갖기 때문에 중앙 차분식을 사용하여도 소요되는 단일 독립변수 방향의 격점의수가 5개가 되어 경계조건 적용시 어려움을 일으킨다. 그러한 어려움을 피하기 위해서 (1)식은 다음과 같이 세 개의 종속변수 w , M_x , M_y 를 가진 세 개의 2차 연립 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 4D_{66} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial M_y}{\partial y^2} = -q(x, y) \quad (2)$$

$$M_x = -D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (3)$$

$$M_y = -D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - D_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (4)$$

이들 식에 유한 차분법을 적용하면 매우 큰 matrix 방정식이 얻어 지는데 이것은 필자가 사용한 tridiagonal scheme으로 용이하게 해결이 가능하다[27, 28, 29].

2.2. 프로그램의 오차 계산

임의의 경계조건을 갖는 판에 대한 해석해가 없기 때문에 부득이하게 네변이 모두 단순지지 되었을 경우의 Navier해법과 비교하였다.

고려된 특별직교이방성 적층판의 물성은 다음과 같다.

$$E_1 = 67.36 \text{ Gpa}, \quad E_2 = 8.12 \text{ Gpa}, \quad G_{12} = 3.0217 \text{ Gpa}, \\ \nu_{12} = 0.272, \quad \nu_{21} = 0.0328 \quad r = 1.$$

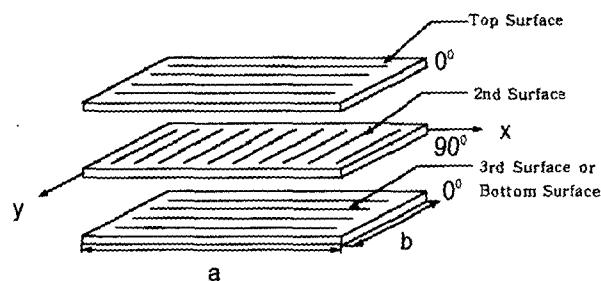


그림 1. [0°, 90°, 0°], Special orthotropic laminated plate

여기에 등분포 하중 $1N/m^2$ 를 재하하여 각 점의 처짐값을 구하여 Navier 해와 비교하여 표 1.에 나타내었다. 한 개의 ply두께는 $0.00125m$, 판의 형상은 $7.5m \times 6m$ 로 하였다. 요소의 수는 10×10 으로 분할하여 mesh중央점의 처짐값을 비교하였다.

표 1. Navier의 해와 유한차분법과의 처짐비(10×10 mesh size)

		F. D. M/NAVIER				
X(m)	Y(m)	0.75	2.25	3.75	5.25	6.75
0.6	0.1005+01	0.1003+01	0.1003+01	0.1003+01	0.1005+01	
1.8	0.1001+01	0.9998+00	0.9994+00	0.9998+00	0.1001+01	
3.0	0.1001+01	0.9993+00	0.9989+00	0.9993+00	0.1001+01	
4.2	0.1001+01	0.9998+00	0.9994+00	0.9998+00	0.1001+01	
5.4	0.1005+01	0.1003+01	0.1003+01	0.1003+01	0.1005+01	

3. 수치 해석

고려된 빌딩 슬래브는 그림 2와 같고 철근 콘크리트 단면과 샌드위치 판의 형상은 각각 그림 3. 과 그림 4.와 같다.

복합재료의 인장 강도는 콘크리트나 강재보다 훨씬 높으므로 비교대상은 처짐으로 하였다. 즉 철근 콘크리트와 동일하거나 작은 처짐을 일으키는 몇 가지 샌드위치판을 선택하여 고려하였다. 그 결과는 표 2에 주어져 있다. 샌드위치 판의 변위는 콘크리트 상판의 것 보다 적으며 자중은 엄청나게 감소했음을 알 수 있다.

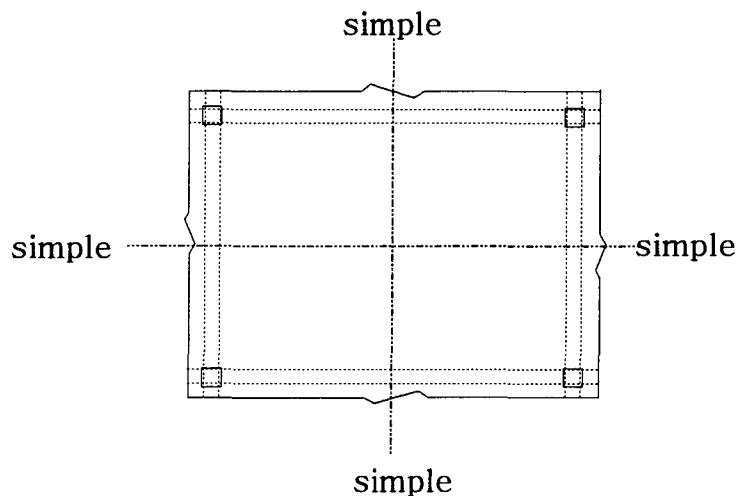


그림 2. 대상 빌딩 슬래브

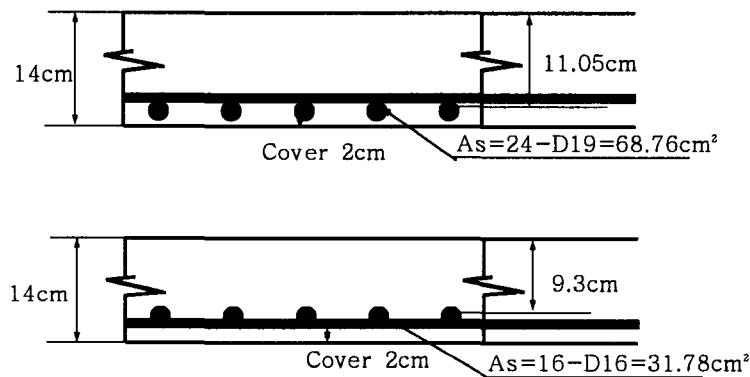


그림 3. Cross section of the slab with unit width

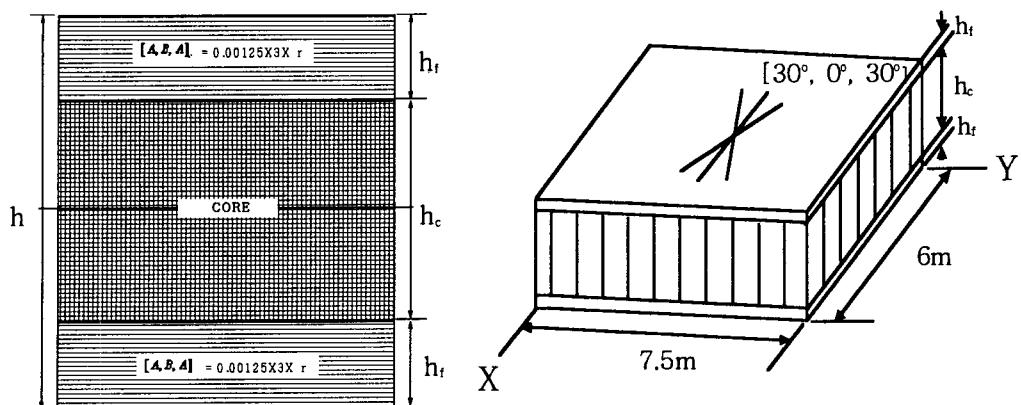


그림 4 .대상 샌드위치의 형상

표 2. 계산 결과 요약

Type \	Concrete	Sandwich 1	Sandwich 2	Sandwich 3	Sandwich 4	Sandwich 5
h		0.3217	0.2722	0.2417	0.2202	0.1428
h _c	0.14	0.3180	0.2670	0.2350	0.2120	0.118
h _f		0.00185	0.0026	0.00335	0.0041	0.0248
D ₁₁	5381013.50	2945750.902	2930167.914	2944783.644	2958801.736	3239405.017
D ₂₂	2155713.75	977622.824	972451.247	977301.887	981954.185	1075079.952
D ₁₂	906163.38	528667.198	525870.593	528493.682	531009.514	581369.153
D ₆₆	2064038.75	716509.984	712719.697	716274.798	719684.531	787937.548
자중 (D)	N/m ²	3430	271.112	267.79	276.385	290.624
	kg/m ²	350	27.66	27.33	28.20	29.66
하중 (L+D)	N/m ²	5830	2671.112	2667.790	2676.385	2690.624
	kg/m ²	594.90	272.56	272.22	273.10	274.55
최대처짐 (중앙점, m)		0.9534E-2	0.9466E-2	0.9505E-2	0.9488E-2	0.9493E-2
처짐비		1	0.9929	0.9969	0.9951	0.9957
자중비		1	12.65	12.81	12.41	11.80
						6.27

* 자중비=콘크리트 자중/샌드위치 자중

* 처짐비=샌드위치 처짐/콘크리트 처짐 [하중(L+D) 작용시 중앙점]

* 하중 = $6.4\text{kg}/\text{m}^3 \times 9.8\text{m/sec}^2 \times 0.318\text{m} + 1950\text{kg}/\text{m}^3 \times 9.8\text{m/sec}^2 \times 0.00185\text{m} + 2400 \text{ N/m}^2$

= $2455.298\text{N}/\text{m}^2$ [Sandwich 1의 하중 계산 예]

4. 결론

사용되는 모든 건설재료는 치수(크기)에 대한 이론적 한계를 갖고 있다. 고층 건물의 경우 이러한 치수의 한계를 벗어나는 최초의 방법이 상판의 무게를 줄이는 일이다. 이 논문에는 이러한 목적이 가능함을 보여주는 연구 결과가 실려 있다. 대표적인 건물 상판에 대해서 수치해석을 해본 결과 콘크리트 상판의 무게의 1/10이면서 더 강한 첨단 복합재료 샌드위치 상판이 얼마든지 가능함이 표 2에 주어져 있다. 복합재료의 인장 압축강도는 콘크리트의 것보다 월등히 강하므로 변위의 크기를 비교하였다. 즉, 주어진 하중하의 콘크리트 변위보다 샌드위치 판들의 변위가 작을 때, 자중비가 $\pm 10\%$ 인 복합재료 판이 얼마든지 가능한 것이 나타나 있다. 변위의 계산을 더 정확히 하고자 콘크리트 상판은 special orthotropic plate로 취급되었다. 이러한 무게비를 갖고 더 경제적인 재료와 제작방법이 여러 가지 확인되었으나 이 논문에는 무게의 감소가 가능함을 확인하는데 그쳤다.

5. 참고 문헌

1. Meier, U., "Proposal for a CFRP Bridge across the Strait of Gibraltar at its narrowest Site", Proc. 14th Reinforced Plastics Congress, 1984.
2. 김덕현, "構造工學에 대한 新素材의 應用," 大韓土木學會 構造分科委員會, 1987. 10. 22.
3. 김덕현, "土木構造物을 위한 新素材의 應用," 大韓土木學會, 年次總會 特別講演, 1988. 4. 30.
4. 김덕현, "Composite의 素材特性, 設計, 解析 및 製作過程에 대한 總整理 研究," 報告書 12卷 및 Computer Program 5卷, (주) 鮮京, 1988. 12.
5. 김덕현외 9명, "필라멘트 와운드된 상판 시스템 개발", 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터 제출 연구보고서, 1996. 4.
6. 김덕현외 9명, "필라멘트 와운드된 상판 시스템 개발", 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터 제출 연구 보고서, 1997. 3.
7. Kim D. H., "A Simple Method of Vibration Analysis of Laminated Plates with A Pair of Opposite Edges Fixed and The Other Pair of Opposite Edges Simple Supported," Proc. of Advances in Materials and Processing Technology-95 (AMPT-95), Dublin, Ireland, 1995. 8. 7-11.
8. Kim D. H. and et al, "Geometric Nonlinear Analysis of Underground Laminated Composite Pipes," 7th International Conference on Composite Materials, Guangzhou, 1989. 8.
9. Kim D. H., "Invited to EHM/BCS/NSF Research Grantee Meeting, August 5-6, 1991, and Lectured on "Composite Structures in Civil and Architectural Engineering."
10. Kim D. H., "Design of Composite Material Structures for Civil Construction," Seminar Lecture, University of California, Davis, 1992. 2. 24.

11. Kim D. H., "A Simple Method of Obtaining 'Exact' Values of the Natural Frequencies of Vibration for Some Composite Laminated Structures for Civil Construction," Proc. of the Second International Symposium on Textile Composites in Building Construction, Lyon, France, 1992. 6. 23-25.
12. Kim D. H., "A SIMPLE METHOD OF OBTAINING 'EXACT' VALUES OF THE BUCKLING STRENGTH FOR SOME LAMINATED STRUCTURES FOR CIVIL CONSTRUCTION," Proc. of Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Sherbrook, Canada, 1992. 10. 7-9.
13. Kim D. H., "Composite in Construction-Considerations for Design," Summary Speech, The First Wilson Forum on Existing and Potential Applications of Composite Materials in the Infrastructure, San Francisco, 1993. 5.
14. Kim D. H., "A Simple Method of Analysis for Preliminary Design of the Composite Laminated Primary Structures for Civil Construction," 3rd Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, 1993. 12.
15. 김덕현, "21세기의 건설재료 및 구조개념," 대한토목학회지, 제 41권 제5호, 1993. 10.
16. Kim D. H., "Cement Problems - Applications of Composite Materials for the Infrastructure," The Second Annual Wilson Forum : Existing & Potential Applications of Composite Materials in the Infrastructure, Santa Ana, California, 1994. 4. 18-19.
17. Kim D. H., Composite Structures for Civil and Architectural Engineering, E&FN SPON, Chapman & Hall, London, 1995.
18. 김덕현, "Composite 프로젝트에 대한 사업성," 생산기술, 6권 6호, 1995. 6.
19. Kim D. H., "Size/Scale Effects in the Failure of Brittle Materials and Composite Structures," Invited Lecture, International Union of Theoretical and Applied Mechanics Symposium on SIZE-SCALE EFFECTS IN THE FAILURE MECHANISMS OF MATERIALS AND STRUCTURES, Torino, Italy, October 1994.
20. Kim D. H., "The Importance of Size/Scale Effects in The Failure of Composite Structures," 4th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, Tokyo, 1995. 9. 25-28.
21. Kim D. H., "A simple method of analysis for the preliminary design of particular composite laminated primary structures for civil construction," Journal of Materials Processing Technology Vol. 55, Elsevier, London, 1995, pp 242-248.
22. Kim D. H., "Proposed R/D Direction of Advanced Composite Materials Application for Civil Construction," The Third Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics, Sheraton Hotel, Seoul, Korea, September 16-18, 1996.
23. Kim D. H., "Composite Materials for Repair and Rehabilitation of Buildings and

Infrastructures", Planery Lecture at The Third International Symposium on TEXTILE Composites In Building Construction, Seoul, Korea, November 7-9, 1996.

24. Kim D. H., "The Importance of Concept Optimization," Keynote Speech, 3rd Pacific Rim Forum on Advanced Composites, Honolulu, 1993. 11. 2~4.
25. 김덕현, "토목건축공학을 위한 섬유복합재료", 섬유기술과산업, 제1권 제1호, 한국섬유공학회, 1997. 3.
26. 김덕현, "새로운 1000년의 건설재료(건설을 위한 복합재료)", 새로운 건설재료에 대한 강연회, 강원대학교, 1997. 6. 20.
27. Kim D. H., "Analysis of Triangularly Folded Plate Roofs of Umbrella Type," 16th Congress of Applied Mechanics, Tokyo, Japan, 1966. 10. 19.
28. Kim D. H., "The Effect of Neglecting the Radial Moment Terms in Analyzing a Finite Sectorial Plate by Means of Finite Differences," International Symposium on Space Technology and Sciences, Tokyo, Japan, 1967. 5.
29. 김덕현, "電子計算器에 의한 超大型 Matrix의 解法," 大韓土木學會誌, 15卷 1號, 1967
30. Kim D. H., "A Method of Vibration Analysis of Irregularly Shaped Structural Members," 제 1 차 産業基地 建設을 위한 國際會議, 1974. 10.
31. Kim D. H., "A Simple Method of 'Exact' Analysis of some Composite Laminated Structures for Civil Construction," Seminar Lecture, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992. 3. 3.