

초고층빌딩 경량화를 위한 복합신소재 슬래브에 관한 연구

한봉구[†]

A Study of the Advanced Composite Material Slab for Light Weight of Tall Building

Bong-Koo Han[†]

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 self-weights less than one tenth of that of the reinforced concrete slab, with deflections less than that of the reinforced concrete slab.

초 록: 대형구조물 설계 건설시 가장 큰 제약은 모든 건설재료에는 치수의 한계가 있다. 본 논문에서는 고전적인 보이론에 의하여 단순 지지된 비등방성 슬래브의 처짐값을 구한 후 그 값을 비교하였고, 특별 직교이방성 판이론에 의하여 콘크리트와 샌드위치 교량의 물성을 비교하여 그 결과에 따른 처짐비와 강성값을 비교하였다. 경계조건은 임의의 경계조건을 갖는 판에 대한 해석해가 없기 때문에 부득이하게 네변이 모두 단순지지 되었을 경우로 해석을 하였고 복합재료의 인장강도는 콘크리트나 강재보다 훨씬 높으므로 비교대상은 처짐으로 하였다. 즉, 철근콘크리트 슬래브보다 자중이 1/10이면서 처짐이 작은 몇 가지 형태의 샌드위치패널을 고려하였다.

Key Words: 복합신소재슬래브(advanced composite material slab), 특별직교이방성(specially orthotropic plates), 유한차분법(finite difference method), 샌드위치패널(sandwich panels)

1. 서 론

건설재료 특히 토목재료로서의 철근콘크리트는 구조용 재료로서 지금까지 독보적인 길을 걸어 왔다. 철근콘크리트는 목재나 석재로 구조물을 만들던 시대보다는 구조물 설계에 있어서 경이적인 발전을 가져왔다. 철근 콘크리트는 토목, 건축 구조물 등에 널리 사용되며 전체 구조물의 70% 이상을 차지하는 가장 보편적인 건설용 재료이다. 그러나 최근 철근 콘크리트의 내구성 저하라는 문제점이 나타나

면서 강재를 이용한 구조물의 건설이 이루어지고 있다. 하지만, 강재 또한 산화작용으로 인한 내구성의 저하라는 문제점을 배제 할 수 없는 실정이다. 이러한 문제를 극복하기 위한 복합신소재의 요구가 날로 증가되고 있다.

21세기는 강재나 콘크리트 등의 건설재료와 더불어 모든 구조물에서 복합신소재를 사용하게 될 전망이다. 이러한 결과는 인류의 기술 관련 및 소재 관련 지식이 발달한데 따른 결과이다. 역사적으로 제5의 건설재료라고 할 수 있는 복합신소재는 모든 건설 분야에서 점차 영역을 확대해

나가고 있다. 제5의 건설재료인 복합신소재에 적합한 구조형식의 개발이야말로 이 시대에 가장 중요한 과제가 아닐 수 없다.

이러한 복합신소재는 가격문제로 우주, 항공과 같은 “고성능/소량” 산업 부문에만 주로 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 복합신소재의 기술개발과 대량생산 등에 힘입어 원가를 줄이기 시작했고, 효율적인 제작 방법이 출현하면서 더욱더 경쟁력이 있는 구조물로 각광을 받기 시작하고 있다.

고도의 경제성장과 더불어 건설구조물 또한 급속하게 발전하고 있으나, 현재 사용되고 있는 건설재료인 강재나 콘크리트는 부식, 산화, 중성화, 염해 등에 의한 열화손상이 불가피하다. 미국 표준국 조사 보고서에 의하면, 부식과 관련된 손실은 연간 약 820억불에 달하며 GNP의 4.9%에 해당된다고 보고하고 있다. 건설관련 세계시장 규모는 연간 2조4천억 달러로 추정되고 있고, 미국만의 향후 20년간의 사회간접분야의 보수/보강을 위한 투자는 3조~4조 달러로 추산되고 있다. 미국은 교량만 해도 575,000개 중에서 230,000개는 구조적인 결함이 있거나 기능에 결함이 있으며 이중 143,000개는 50년 이상된 것이다. 교통 체증으로 인해 연료 및 시간 손실은 연간 500억 달러로 추정되고 있다. 이러한 비용 중의 높은 비중을 차지하는 것이 유지관리비용이다. 유지관리비용은 최근 급등하고 있어 도시재정의 관심과 우려를 낳고 있다. 일본 도쿄의 경우 구조물의 유지수리비는 신규 건설투자액의 35%에 달하고 있으며, 2010년에는 50%를 상회 할 것으로 추정되어 내구성이 뛰어난 구조물에 대한 관심이 점차 증대되고 있다.

미국에서는 이러한 구조적이고 환경적인 문제를 해결하는 방법은 부식이나 열화가 거의 없는 친환경소재인 복합신소재를 건설시장에 활용토록 하는 것이며, 우주/항공 분야를 중심으로 발전된 복합신소재 기술을 건설분야에 적용하는 기술인 기술재투자사업(Technology Reinvestment Program : TRP)에 막대한 예산을 투자하여 연구한 결과 실용성이 점차 가시화되고 있다.

이러한 전 세계적으로 일고 있는 건설재료의 혁명을 외면한다면, 기하급수적으로 증가하는 도시시설물 유지보수 비용은 후손의 지속적인 발전을 저해할 것이며, 개방된 한국의 건설시장은 더욱 피폐해질 것이며, 세계 시장 진출은 꿈도 꾸지 못할 것이다. 한국의 건설시장을 보호하고 세계 시장으로 진출하고, 더 나아가 후손에게 도시 시설물의 유지보수비라는 막대한 부담을 상속하지 않기 위해서는 복합신소재를 우리 건설시장에 적용하기 위한 연구가 매우 시급히 요청된다. 유지보수 및 재생의 경우, 기존 구조물의 철거, 재시공은 엄청난 공기를 필요로 한다. 기존 구조물의 보수나 재생에는 복합신소재의 사용을 절대적으로 필요로 한다. 이러한 견지에서 정부에서 추진하고 있는 저탄소 녹색성장 정책과도 부합하는 내구성이 뛰어난 복합신소재를 활용하기 위한 기술개발이야말로 학회가 중점을 두고 개

발해야 할 과제가 아닐 수 없다.

국내에서 개최된 한 국제회의에서 초고층건물에 대한 심포지엄이 있었다. 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 지간이 5000~7000 m 이고 유리섬유보강 복합재료는 이의 2배, 탄소섬유보강 복합재료는 이의 3배가 가능하다는 것이 발표되었고[1], 세계 여러 나라에서 첨단복합재료의 활용을 계속 발전시켜 왔으며, 전통적 제강 회사인 신일본 제철에서도 현수교(사장교)용 복합재료인 건설자재를 체계적으로 시판하고 있는 실정인 것이다. 건물의 경우도 마찬가지로 여러 가지 건물에 실제로 신소재가 사용되어왔다.

본 연구에서는 초고층빌딩의 경량화를 위한 설계 기초 이론의 발전을 진행해 왔고, 이론의 재정비, 가격을 고려한 최적설계 및 제작방법 발전, 설계지침 작성, 설계자를 혁신시키기 위한 실험을 실시하여서 철근콘크리트의 1/10 무게 인데도 훨씬 경제적인 여러 가지 형태의 샌드위치 패널에 대해 연구하였으며 더 경제적이고 효율적인 제작방법에 대해 연구하였다. 경량이어서 중장비가 필요 없고, 부식이 없다는 사실들을 감안하면 중·장기적으로 더욱 경제적인 건축물의 건설이 가능해진다.

성능이 우수하고 경제적인 건설을 가능하게 하는 첨단 복합신소재의 사용이 늦어진 데는 다음 세가지 원인이 있다. 즉 ① 이론이 보통설계 기술자에게는 너무 어렵다. ② 가격이 너무 비싸다. ③ 모든 재료는 치수효과가 있다. 이중 ①은 이 분야에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 어느 정도 가시적인 성과를 보이고 있으며 다수의 논문을 발표하였다[2-8]. 가격의 문제는 적절한 설계 및 제작방법의 최적화로 해결 가능하다. 모든 재료에는 치수가 커지면 강도가 낮아지는 특성이 있어서 사용해본 경험이 적은 재료의 활용은 주저하게 되는 것이 통례이다. 결국 남은 문제는 설계의 최적화와 치수효과(size effect) 문제로서 연구가 계속 진행 중에 있다[9,10].

본 논문은 복잡한 여러 가지 상세한 내용을 피하고 기술자들에게 콘크리트 무게의 1/10로 가능한 첨단 복합신소재 슬래브가 가능함을 밝히는데 본 논문의 목적이 있다.

여러 가지가 확보되어 있거나 개발 중인 것은 아직 발표 단계가 아니어서 항공 산업 등에서 이미 사용하고 있는 64 kg/m³의 무게를 갖는 폼코어를 택했다. Face sheet는 가장 경제적인 유리섬유보강 복합신소재를 택하였다.

2. 본 논문에 사용된 이론

2.1 철근콘크리트 슬래브 모델링

단순지지된 철근콘크리트 슬래브를 Fig. 1~Fig. 3과 같이

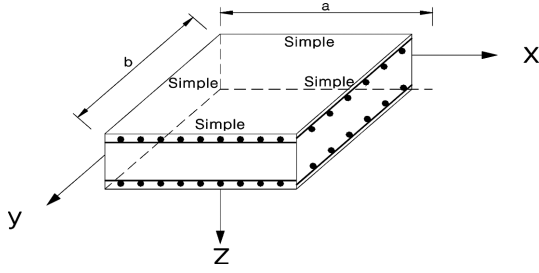


Fig. 1. Simple supported RC slab bridge

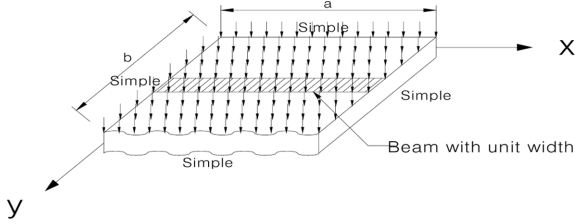


Fig. 2. Simple supported RC slab bridge with unit width

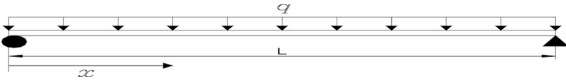


Fig. 3. Free body diagram with unit width

모델링하였다.

단순지지된 슬래브를 단위 폭을 가진 보요소로 모델링 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

Fig. 3에서

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = \frac{q}{EI}, \text{ 이때 } EI = D_{11} \text{이라 하면}$$

$$D_{11} \frac{d^3 y}{dx^3} = qx + C_1$$

$$D_{11} \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{2}qx^2 + C_1x + C_2$$

$$D_{11} \frac{dy}{dx} = \frac{1}{6}qx^3 + \frac{1}{2}C_1x^2 + C_2x + C_3$$

$$D_{11}y = \frac{1}{24}qx^4 + \frac{1}{6}C_1x^3 + \frac{1}{2}C_2x^2 + C_3x + C_4$$

1) 초기 경계 조건 $x = 0, M = 0$

$$\therefore C_2 = 0$$

2) 초기 경계 조건 $x = l, M = 0$

$$\frac{1}{2}ql^2 + C_1l = 0$$

$$\therefore C_1 = -\frac{1}{2}ql$$

3) 초기 경계 조건 $x = 0, y = 0$

$$\therefore C_4 = 0$$

4) 초기 경계 조건 $x = l, y = 0$

$$\frac{1}{24}ql^4 + \frac{1}{6}C_1l^3 + C_3l = 0$$

$$\frac{1}{24}ql^4 - \frac{1}{12}ql^3 + C_3l = 0$$

$$\therefore C_3 = \frac{1}{12}ql^3 - \frac{1}{24}ql^3 = \frac{1}{24}ql^3$$

C_1, C_2, C_3, C_4 를 대입하면

$$D_{11}y = \frac{1}{24}qx^4 - \frac{1}{12}qlx^3 + \frac{1}{24}ql^3x$$

그러므로 y 는

$$\therefore y = \frac{ql^4}{24D_{11}} \left[\left(\frac{x}{l} \right)^4 - 2 \left(\frac{x}{l} \right)^3 + \left(\frac{x}{l} \right) \right] \quad (1)$$

와 같다.

2.2 철근콘크리트 슬래브의 강성

일반적인 구조부재의 강성(stiffnesses)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (2)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3)$$

위의 강성 항 중에서 특별직교이방성 판의 경우는 $B_{ij} = 0, ()_{16}, ()_{26}$ 항이 0이 되므로 오직 휨강성의 항인 $D_{11}, D_{22}, D_{12} = D_{21}$ 그리고 D_{66} 만이 존재하게 된다. 여기서, 조합된 휨-연계강성 D_{11} 값을 찾아 보 이론에 적용하고 적층판 이론의 강성의 값은 전체의 휨-연계강성 값을 사용한다.

식 (2)에서 변환된 축소된 강성계수는 다음과 같다.

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 + Q_{12}(m^4 + n^4) = Q_{21}$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \quad (3)$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12})m^2n^2 + Q_{66}(m^2 - n^2)^2$$

m 과 n 은 방향여현이고 특별직교 이방성인 경우

$$m = \cos 0^\circ = 1 \text{ and } n = \cos 90^\circ = 0,$$

$\bar{Q}_{11} = Q_{11}, \bar{Q}_{12} = Q_{12}, \bar{Q}_{22} = Q_{22},$ and $\bar{Q}_{66} = Q_{66}$ 이다.

식 (3)의 축소된 강성계수는 식 (4)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} v_{12}/E_1 &= v_{21}/E_2 \\ Q_{11} &= \frac{E_1}{1-v_{12}v_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{v_{12}E_2}{1-v_{12}v_{21}} = \frac{v_{21}E_1}{1-v_{12}v_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1-v_{12}v_{21}} \\ Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} E_1 &= E_m V_m + E_f V_f, \quad E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \\ G_{12} &= \frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f}, \quad v_{12} = v_m V_m + v_f V_f \text{ 이다.} \end{aligned}$$

2.3 특별직교이방성 복합적층판의 지배방정식

표면에 전단응력이 존재하지 않고 열이나 습도의 영향을 무시한 경우의 복합적층판의 지배방정식은 다음의 식으로 나타낼 수 있다[2].

$$\partial^2 \frac{M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -q(x, y) \quad (5)$$

특별직교이방성 적층판의 경우

$B_{ij} = 0, A_{16} = A_{26} = D_{16} = D_{26} = 0$ 이 되므로 이에 대한 구성 방정식은 식 (5), 식 (6)~식 (8)과 같다.

$$M_x = D_{11}x_x + D_{12}x_x \quad (6)$$

$$M_y = D_{12}x_x + D_{22}x_y \quad (7)$$

$$M_{xy} = 2D_{66}x_{xy} \quad (8)$$

횡방향 전단변형률이 무시될 경우

$$M_x = -D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (9)$$

$$M_y = -D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - D_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (10)$$

$$M_{xy} = -2D_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (11)$$

식 (9)~식 (11)를 식 (5)에 대입하면 다음 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q(x, y) \quad (12)$$

식 (12)에서 $D_1 = D_{11}, D_2 = D_{22}$

그리고 $D_3 = (D_{12} + 2D_{66})$ 로 정의하면 다음 식 (13)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q(x, y) \quad (13)$$

2.4 단순지지된 복합적층판의 처짐

판의 네 변에 대한 경계조건이 단순지지인 경우 Navier의 해석 방법이 매우 효과적으로 적용될 수 있다[12]. 즉, 경계조건을 만족시키는 횡처짐, $w(x, y)$ 와 재하된 횡하중 $q(x, y)$ 는 다음 식 (14)과 식 (15)와 같이 Fourier 급수로 나타낼 수 있다.

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (14)$$

$$q(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (15)$$

그러므로 식 (14)와 식 (15)를 식 (13)에 대입하면 주어진 m, n 에 대하여 다음 식 (16)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \pi^4 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(D_1 \left(\frac{m}{a}\right)^4 + 2D_3 \left(\frac{m}{a}\right)^2 \left(\frac{n}{b}\right)^2 + D_2 \left(\frac{n}{b}\right)^4 \right) \\ \times \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \\ = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)에서 양변의 각 항을 비교하여 정리하면 다음 식 (17)을 얻을 수 있다.

$$w_{mn} = \frac{\left(\frac{q_{mn}}{\pi^4}\right)}{D_1 \left(\frac{m}{a}\right)^4 + 2D_3 \left(\frac{m}{a}\right)^2 \left(\frac{n}{b}\right)^2 + D_2 \left(\frac{n}{b}\right)^4} \quad (17)$$

식 (17)의 우변에 있는 하중의 진폭, q_{mn} 은 Fourier 급수로 전개하여 다음 식을 얻는다.

$$q_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b q(x, y) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy dx \quad (18)$$

그러므로 m, n 에 대한 q_{mn} 은 주어진 하중 $q(x, y)$ 에 대하여 식 (18)를 적분하면 구할 수 있다. 단순지지된 특별직교이방성 적층판의 임의 점에서 횡처짐은 식 (14)와 식 (17)을 이용하여 계산할 수 있다.

본 연구에서는 두 가지의 하중 조건, 등분포하중과 집중하중에 대하여 실제로 적용하여 보았다. 첫째로 하중 $q(x, y)$ 가 전단면에 걸쳐 등분포하중 q_0 로 재하되는 경우를 고려하면 다음 식 (19)을 얻을 수 있다.

$$q_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b q_0 \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right) dy dx = \frac{16q_0}{\pi^2 mn} \quad (19)$$

그러므로 식 (14)에 식 (19)를 대입하면 등분포하중 q_0 가 전단면에 재하된 경우의 처짐 $w(x, y)$ 는 다음 식 (20)이 된다.

$$w(x, y) = \frac{16q_0}{\pi^6} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{mn} \times \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) / DEN \quad (20)$$

여기서

$$DEN = D_1 \left(\frac{m}{a}\right)^4 + 2D_3 \left(\frac{m}{a}\right)^2 \left(\frac{n}{b}\right)^2 + D_2 \left(\frac{n}{b}\right)^4 \text{ 이다.}$$

2.5 유한차분법(Finite Difference Method)

특별직교이방성 판의 지배방정식은 다음과 같다.

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q(x, y) \quad (21)$$

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

위의 식 (21)은 4차의 단일 미분항을 갖기 때문에 중앙 차분식을 사용하여도 소요되는 단일 독립변수 방향의 격점의 수가 5개가 되어 경계조건 적용시 계산상 혼잡을 일으킨다. 그러한 어려움을 피하기 위해서 식 (21)은 다음과 같이 세 개의 종속변수를 가진 세 개의 2차연립 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 4D_{66} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial M_y}{\partial y^2} = -q(x, y) \quad (22)$$

$$M_x = -D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (23)$$

$$M_y = -D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - D_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (24)$$

첫 번째 식 (22)의 $4D_{66} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2}$ 항은 4차 편미분 방정식

이지만 2차 차분식으로 표기되므로 가상 경계 조건을 줄일 수 있다. 이들 식에 유한차분법을 적용하면 매우 큰 matrix 방정식이 얻어 지는데 이것은 tridiagonal scheme으로 용이하게 해결이 가능하다[11].

3. 수치해석

3.1 특별직교이방성 복합적층판 패널

고려된 특별직교이방성 적층판의 물성은 다음과 같다.

$$E_1 = 67.36 \text{ GPa}, E_2 = 8.12 \text{ GPa}, G_{12} = 3.0217 \text{ GPa}$$

$$\nu_{12} = 0.272, \nu_{21} = 0.0328, r = 1$$

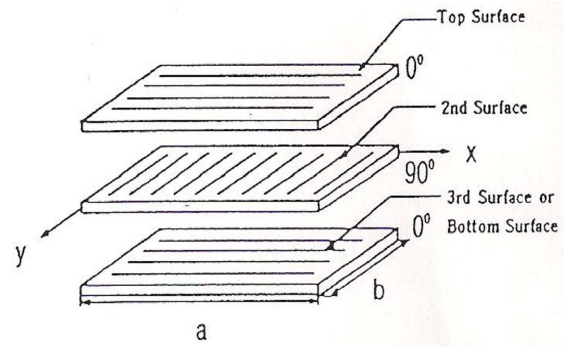


Fig. 4. Specially orthotropic laminate

Table 1. Deflection ratio of F.D.M to Navier solution

		F.D.M. / Navier solution				
Y(m)		0.75	2.25	3.75	5.25	6.75
X(m)	0.6	1.0050	1.0030	1.0030	1.0030	1.0050
	1.8	1.0010	9.9989	0.9994	0.9998	1.0010
	3.0	1.0010	0.9989	0.9989	0.9993	1.0010
	4.2	1.0010	0.9998	0.9994	0.9998	1.0010
	5.4	1.0050	1.0030	1.0030	1.0030	1.0050

3.2 프로그램 오차 검토

임의의 경계조건을 갖는 판에 대한 해석해가 없기 때문에 부득이하게 4변이 모두 단순지지 되었을 경우의 Navier 해와 비교하였다[12-15].

여기에 등분포하중 1 N/m^2 을 재하 하여 각 점의 처짐값을 구하여 Navier해와 비교하여 Table 1에 나타내었다. 한 개의 ply두께는 0.00125 m , 판의 형상은 $7.5 \times 6.0 \text{ m}$ 로 하였다. 요소의 수는 10×10 으로 분할하여 mesh 중앙점의 처짐 값을 위의 Table 1과 같이 비교하였다.

3.3 초고층빌딩 슬래브 모델링

고려된 초고층빌딩 슬래브는 Fig. 5와 같고 철근콘크리트 슬래브 단면과 샌드위치 패널의 형상은 각각 Fig. 6과 Fig. 7과 같다.

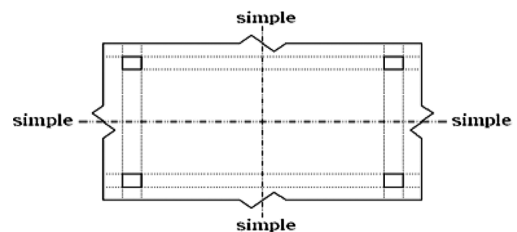


Fig. 5. Slab with all edges are simple supported

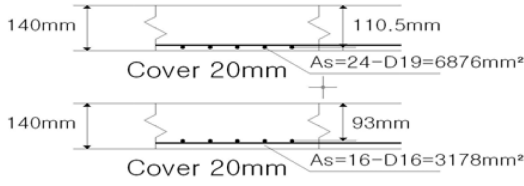


Fig. 6. Cross section of the RC slab

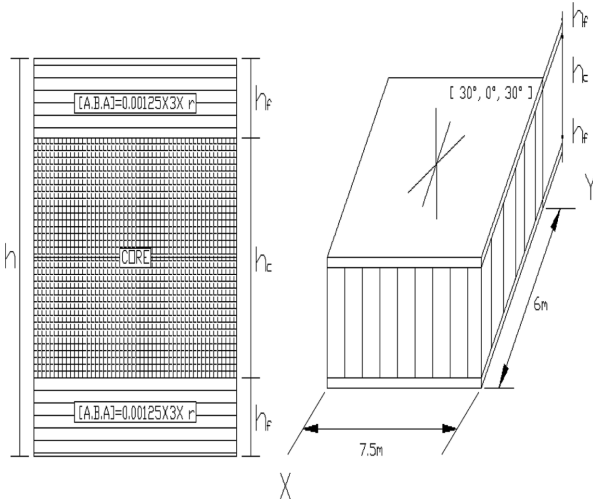


Fig. 7. Cross section of the composite sandwich panel

3.4 수치해석 결과

복합신소재의 인장강도는 콘크리트나 강재보다 훨씬 높으므로 비교 대상은 처짐으로 하였다. 즉, 철근콘크리트와 동일하거나 작은 처짐을 일으키는 몇 가지 유형의 샌드위치 패널을 고려하였다.

초고층빌딩에 대한 철근콘크리트 슬래브와 샌드위치 패

널을 특별직교이방성 적층판으로 모델링하여 해석한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에서 알 수 있듯이 샌드위치 패널의 변위는 철근 콘크리트 슬래브의 변위보다 적으며 자중은 약 1/10로 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

모든 건설재료는 치수에 대한 이론적 한계를 갖고 있다. 초고층빌딩의 경우 이러한 치수의 한계를 벗어나는 대형 구조로 간주되며, 치수의 한계를 줄일 수 있는 한 가지 방법은 슬래브의 자중을 줄이는 것이다. 초고층빌딩 슬래브의 자중을 줄이게 되면 층수를 늘리는 것은 그 만큼 손쉬워진다. 본 논문에는 슬래브의 자중을 줄이기 위해서 여러 가지 형상의 복합신소재 샌드위치 패널에 대하여 연구를 수행하였다. 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 철근콘크리트 슬래브는 특별직교이방성 적층판으로 모델링하여 해석할 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) 4변 단순지지된 복합적층판의 처짐을 유한차분법에 의해 계산하였으며, 매트릭스 계산시 Tri-diagonal 해법을 사용함으로써, 대형 매트릭스의 반복수행을 빠른 시간에 효과적으로 수행할 수 있는 유한차분모형을 완성할 수 있었다.
- (3) 초고층빌딩 슬래브를 철근콘크리트 슬래브와 복합신소재 샌드위치 패널에 대하여 수치해석을 해본 결과 철근 콘크리트 슬래브 자중의 1/10인 복합신소재 샌드위치 패널이 가능함을 밝혔다.
- (4) 초고층빌딩에 복합신소재 샌드위치 패널을 사용할 경우 자중 감소비 만큼 초고층빌딩의 층수를 늘릴 수 있을 것으로 사료된다.

Table 2. Self-weight ratio R.C. slab to composite sandwich panel

Type	R.C. Slab	Comp. Panel 1	Comp. Panel 2	Comp. Panel 3	Comp. Panel 4	Comp. Panel 5
h		0.321	0.2722	0.2417	0.2202	0.1428
h_c	0.14	0.318	0.2670	0.2350	0.2120	0.118
h_f		0.008	0.0026	0.0033	0.0041	0.0248
D_{11}	5.3810 E+6	2.9457E+6	2.9301E+6	2.9447E+6	2.9588E+6	3.2394E+6
D_{22}	2.1557E+5	9.7762E+5	9.7245E+5	9.7730E+5	9.8195E+5	1.0750E+6
D_{11}	9.0616E+5	5.2866E+5	5.2587E+5	5.2849E+5	5.3100E+5	5.8136E+5
D_{66}	2.0640E+6	7.1650E+6	7.1271E+5	7.1627E+5	7.1968E+5	7.8793E+5
$D(N/m^2)$	3430	271.1	267.79	276.38	290.62	546.98
$D+L(N/m^2)$	5830	2671.1	2667.7	2676.4	2690.6	2946.9
Maximum deflection	95.34	94.66	95.05	94.88	94.93	94.97
Deflection ratio	1	0.9920	0.9969	0.9951	0.9957	0.9961
Self-weight ratio	1	12.65	12.81	12.41	11.80	6.27

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Meier, U., "Proposal for a CFRP Bridge Across the Strait of Gibraltar at Its Narrowest Site", *Proc. 14th Reinforced Plastics Congress*, 1984.
2. Kim, D.H., "Simple Method of Analysis for Preliminary Design of Certain Composite Laminated Primary for Civil Construction II," *Journal of Material Technology*, Elsevier, London, 1993.
3. Kim, D.H., "Composite Structures for Civil and Architectural Engineering," E&FN SPON, Chapman & Hall, London, 1995.
4. Han, B.K., and Kim, D.H., "Simple Method of Vibration Analysis of Three Span Continuous Reinforced Concrete Bridge with Elastic Intermediate Supportm," *Journal of Korean Society for Composite Materials*, Vol. 17, No. 3, 2004, pp. 23-28.
5. Han, B.K., and Kim, D.H., "Analysis of Steel Bridges by Means of Specially Orthotropic Plate Theory," *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 13, No. 1, 2001, pp. 61-69.
6. Han, B.K., and Kim, D.H., "A Study on Size/Scale Effects in the Failure of Specially Orthotropic Slab Bridges," *Journal of Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 1, 2010, pp. 23-30.
7. Kim, D.H., Han, B.K., Lee, J.H., and Hong, C.W., "Simple Methods of Vibration Analysis of Three Span Continuous Reinforced Concrete Bridge with Elastic Intermediate Supports," *Proceeding of the Advances in Structural Engineering and Mechanics*, Seoul, Vol. 2, 1999, pp. 1279-1284.
8. 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.
9. Han, B.K., Kim, D.H., and Lee, Y.H., "Size/Scale Effects in the Failure of Simply Supported Sandwich Bridge," *Proc. of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 1, 2003, pp. 333-338.
10. Tsai, S.S.W., "Composite Design," Think Composite, Dayton, OH, 1988.
11. Goldberg, John E., and Kim, D.H., "The Effect of Neglecting the Radial Moment Term in Analyzing a Sectorial Plate by Means of Finite Differences," *Proc. of the Seventh International Symposium on Space Technology and Sciences*, Tokyo, Japan, 1967.
12. Stephen P. Timoshenko, and S. Woinowsky-krieger, "Theory of Plates and Shells, Second Edition", McGraw Hill Book Co, 1989.
13. Ashton, J.E., "Anisotropic Plate Analysis-Boundary Condition," *Journal of Composite Materials*, April, 1970, pp. 162-171.
14. Whitney, J.M., and Leissa, A.W., "Analysis of a Simply Supported Laminated Anisotropic Rectangular Plate," *Journal of AIAA*, Vol. 8, No. 1, 1970, pp. 28-33.
15. Pagano, N.J., "Exact Solution for Rectangular Bidirectional Composites and Sandwich Plates," *Journal of Composites Materials*, Vol. 4, No. 1, Jan, 1970, pp. 20-34.