

도로구조물 경량화를 위한 복합재료 샌드위치 패널에 관한 연구

The Advanced Composite Sandwich Panels for Light Weight of Road Structures

한 봉 구 Han, Bong Koo | 정회원 · 서울과학기술대학교 교수 · 교신저자 (Email: bkhan@seoultech.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this paper is to demonstrate to the practicing engineers, how to apply the advanced composite materials theory to the road structures. For general construction material used, there is certain theoretical limit in sizes. For super road structure construction, the reduction in panel weight is the first step to take in order to break such size limits.

METHODS : For a typical road structures panel, both concrete and advanced composite sandwich panels are considered. The concrete panel is treated as a special orthotropic plate.

RESULTS : All types of advanced composite sandwich panels are considered as a self-weights less than one tenth of that of concrete panel. The concrete panel is treated as a special orthotropic plate to obtain more accurate result.

CONCLUSIONS : Advanced composite sandwich panels are considered as a self-weights less than one tenth (10%) of that of concrete panel, with deflections less than that of the concrete panel. This conclusion gives good guide line for design of the light weight of road structures.

Keywords

advanced composite materials, sandwich panel, specially orthotropic plates, finite difference method

Corresponding Author : Han, Bong Koo, Professor
Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and
Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Korea
Tel : +82.2.970.6577 Fax : +82.2.948.0043
E-mail : bkhan@seoultech.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Apr. 18, 2013 Revised Apr. 23, 2013 Accepted May. 27, 2013

1. 서론

오늘날까지 토목, 건축 구조물은 그 당시에 사용 가능한 재료와 응용 가능한 이론에 의해 개발되어 왔다. 역사적으로 제5의 건설재료라고 할 수 있는 복합재료는 모든 구조물의 설계, 건설에 사용되게 될 것이라는 것은 결코 우연한 것이 아니며 역사적인 필연성에 의한 결과라고 말할 수 있다. 21세기는 강재나 철근콘크리트 등의 건설재료와 더불어 모든 구조물에서 복합재료를 사용하게 될 것이며, 이러한 결과는 인류의 기술 관련 및 소재 관련 지식이 발달한데 따른 역사적 필연성에 의한

결과이다. 지금까지 인류가 사용 가능한 재료와 응용 가능한 기술로 구조형식을 발전시켜 왔듯이 우리에게 새로운 소재를 사용하는데 적합한 새로운 구조의 개발이 필요한 것이다. 제5의 건설재료인 복합재료에 적합한 구조형식의 개발이야말로 이 시대에 가장 중요한 과제가 아닐 수 없다.

복합재료는 기존의 건설 재료에 비하여 부식에 대한 저항성이 크고 경량이면서 고강도일 뿐만 아니라 공장 제작이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이와 같은 우수한 성질을 갖는 복합재료를 실제적으로 이용

하기 위해서는 해결해야 할 문제점들이 허다하다. 복합재료는 가격문제로 우주항공과 같은 “고성능·소량” 산업 부문에만 주로 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 복합재료의 기술개발과 대량생산 등에 힘입어 원가를 줄이기 시작했고, 효율적인 제작방법이 출현하면서 더욱더 경쟁력이 있는 구조물로 각광을 받기 시작하고 있다.

현재 주로 사용되고 있는 건설재료인 강재나 철근콘크리트는 부식, 산화, 중성화, 염해 등에 의한 열화손상이 불가피하다. 미국 표준국 조사 보고서에 의하면, 부식과 관련된 손실은 연간 약 820억 불에 달하며 GNP의 4.9%에 해당된다고 보고하고 있다. 건설관련 세계시장 규모는 연간 2조 4천억 달러로 추정되고 있고, 미국만의 향후 20년간의 사회간접분야의 보수·보강을 위한 투자는 3조~4조 달러로 추산되고 있다. 미국은 교량구조물만 해도 575,000개 중에서 230,000개는 구조적인 결함이 있거나 기능에 결함이 있으며 이중 143,000개는 50년 이상 된 것이다. 교통체증으로 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.

이러한 거대한 시장에 대하여 미국은 세계에서 30년 내지 40년 앞선 첨단군사기술을 응용하기 위한 기술재투자사업(Technology Reinvestment Program: TRP)을 민수분야에 착실히 진행하고 있다. 특히 미국 토목학회 연차 총회에서는 새로운 1000년의 건설재료(Materials for the New Millennium)로 복합재료를 지목하여 커다란 관심을 끌고 있다. 전 세계적으로 일고 있는 건설재료의 혁명을 외면한다면, 기하급수적으로 증가하는 도시 시설물 유지보수비용은 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 복합재료를 우리 건설시장에 적용하기 위한 연구가 매우 시급히 요청된다. 유지보수 및 재생의 경우, 기존 구조물의 철거, 재시공은 엄청난 공기를 필요로 한다. 기존 구조물의 보수나 재생에는 복합재료의 사용을 절대적으로 필요로 한다. 이러한 견지에서 정부에서 추진하고 있는 저탄소 녹색성장 정책과도 부합하는 내구성이 뛰어난 복합재료를 활용하기 위한 기술개발이야말로 학회가 중점을 두

고 개발해야 할 과제가 아닐 수 없다.

한편 국내에서도 초장대교량과 초고층건물에 대해 수많은 연구가 진행 중에 있으나 놀라운 사실은 대형구조물 건설에 가장 중요한 구조물의 경량화, 경량화를 위한 신소재의 사용 등에 대한 연구는 찾아보기 힘들다는 것이다. 주목할 만한 것은 교량구조물의 경우, 이미 1984년에 강재 현수교나 사장교의 “이론적” 최대지간이 5,000m~7,000m이고 유리섬유보강 복합재료는 이의 2배, 탄소섬유보강 복합재료는 이의 3배가 가능하다는 것이 발표되었고(Meier, 1984), 세계 여러 나라에서는 첨단복합재료의 활용을 계속 발전시켜 왔으며, 전통적 제강회사인 신일본제철에서도 현수교(사장교)용 복합재료인 건설자재를 체계적으로 시판하고 있는 실정인 것이다.

본 연구에서는 도로구조물 경량화를 위한 설계 기초 이론을 발전시키고 이론의 재정비, 가격을 고려한 최적 설계 및 제작방법, 설계지침서 작성, 설계자를 확신시키기 위한 실험을 실시하여서 철근콘크리트의 10% 무게인데도 훨씬 경제적인 여러 가지 형태의 복합재료 샌드위치 패널에 대해 연구하였으며 더 경제적이고 효율적인 제작방법에 대해 연구를 진행하고 있다. 복합재료는 경량이어서 중장비가 필요 없고, 부식이 없다는 것을 감안한다면 중·장기적으로 더욱 경제적인 도로구조물의 건설이 가능해진다.

성능이 우수하고 경제적인 건설을 가능하게 하는 첨단복합재료의 사용이 늦어지는 데는 다음과 같은 세 가지 원인이 있다. 즉 복합재료 이론이 일반 건설기술자에게는 너무 어렵다는 것과 가격이 고가라는 점 그리고 모든 재료에는 치수효과가 있다는 점이다. 이중 복합재료 이론이 어렵다는 점에 대해서는 그동안 저자가 주도적으로 복합재료에 대한 간단한 해석방법을 제시하여 어느 정도 어려움은 극복하였다 볼 수 있으며 이에 관련된 수십 편의 논문이 발표된바 있다(Han & Kim 2001, 2003, 2010, Kim 1992, 1993, 1995).

다음으로 가격의 문제는 적절한 설계 및 제작방법의 최적화로 해결이 가능하다. 복합재료는 가격문제로 우주항공과 같은 “고성능·소량” 산업 부문에만 주로 사용되어 왔으나 21세기에 들어오면서 복합재료는 기술개발과 대량생산 등에 힘입어 가격을 내리기 시작했고, 효율적인 제작방법이 출현하면서 더욱더 경쟁력이 있는 구조물로 각광을 받기 시작했다. 사실상 1964년부터 탄소 섬유가 대량 생산되면서 가격이 내려가기 시작하여 이제는 가격면에서도 경쟁력 있는 건설재료로 자리 잡고

있다.

마지막으로 모든 재료에게는 치수가 커지면 강도가 낮아지는 특성이 있어서 사용해본 경험이 적은 재료의 활용을 주저하게 되는 것이 통례이다. 이러한 점을 극복하기 위하여 치수효과(size effect) 문제에 대해서도 저자에 의해서 연구가 계속 진행 중에 있다(Han & Kim 2003, 2010, Tsai, 1988).

본 논문에서는 64kg/m³의 무게를 갖는 폼코어(form core)를 선택하였으며 face sheet는 일반적으로 많이 사용하고 있는 1800kg/m³ 탄소섬유를 택하였다. 본 논문에서는 복잡한 여러 가지 상세한 내용을 피하고 건설 기술자들에게 복합재료 샌드위치 패널의 자중이 철근콘크리트 자중의 10%로 가능함을 밝히는데 본 논문의 연구 목적이 있다.

2. 복합재료 기본이론

2.1. 복합재료 적층판의 강성 계산

일반적인 구조부재의 강성(stiffnesses)은 다음 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \end{aligned} \quad (1)$$

위의 강성 항 중에서 특별직교이방성 판의 경우는 $B_{ij}=0, ()_{16}, ()_{26}$ 항이 0이 되므로 오직 휨 강성의 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-연계 강성 값을 사용한다.

2.2. 판 이론에 의한 해석

등분포 수직하중과 축방향 등분포하중을 동시에 받는 특별직교이방성 복합적층판의 평형방정식은 다음 Eq. (2)와 같다^{2-4,9,10}.

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

이 때 단면력과 처짐과의 관계는 다음 Eq. (3), Eq. (4), Eq. (5)와 같다.

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

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

$$M_{xy} = -2D_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (5)$$

Eq. (5)을 Eq. (2)에 대입하여 정리하면 다음 Eq. (6)이 된다.

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} - 4D_{66} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -q(x, y) \quad (6)$$

Eq. (6)에서 유한차분법을 이용하여 처짐과 모멘트의 값을 산출할 수 있다.

2.3. 보 이론에 의한 해석

보 이론에 의하여 해석하기 위한 자유물체도는 Fig. 1과 같다.

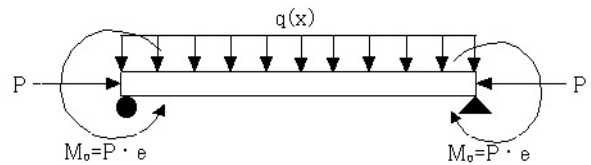


Fig. 1 Free Body Diagram of Doubly Reinforced Beam

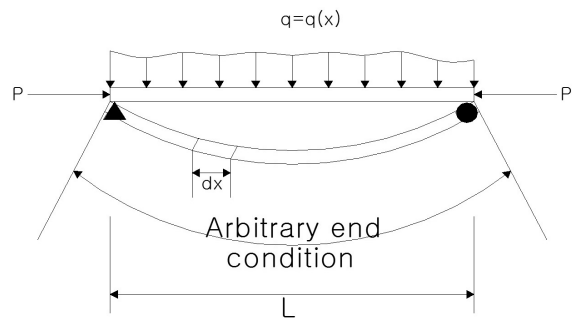


Fig. 2 Deflection Shape of Doubly Reinforced Beam

Fig. 2는 축방향력이 있고 등분포하중을 받는 철근콘크리트보의 처짐상태를 나타낸다. 사용될 보 이론은 철근콘크리트 슬래브를 단위폭을 갖는 보로 고려한 것이다. 미소구간 dx 를 확대하여 dx 에 작용중인 상태를 나

타내면 Fig. 3과 같은 상태가 된다.

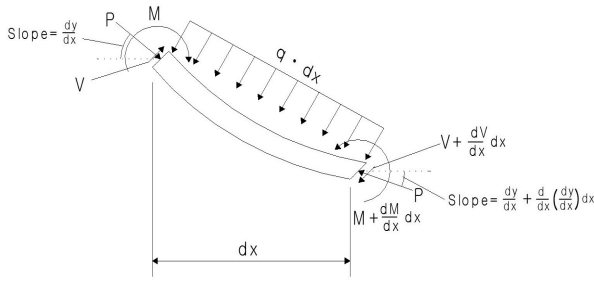


Fig. 3 Differential Segment of the Distance dx

위의 Fig. 3에서

$$\frac{dV}{dx} - P \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = -q \text{ 라는 평형방정식이 성립한다.}$$

$$\text{이때 } V = \frac{dM}{dx} \text{ 이므로 } \frac{d^2M}{dx^2} - P \frac{d^2y}{dx^2} = -q$$

$$\text{여기서 } M = -EI \frac{d^2y}{dx^2} \text{ 이므로}$$

$$\frac{d^2M}{dx^2} - P \frac{d^2y}{dx^2} = -q \quad (7)$$

Eq. (7)에서 처짐 방정식을 다음과 같이 산출한다.

경계조건 :

- 1) 경계조건 $x=0, M = -P \cdot e$
- 2) 경계조건 $x=0, y=0$
- 3) 경계조건 $x=l, M = -P \cdot e$
- 4) 경계조건 $x=l, y=0$

위의 경계조건에 의해서 아래의 처짐 방정식과 모멘트 방정식이 산출된다.

$$y = \frac{e(1 - \cosh kl)}{2 \sinh kl} \sinh kx + \frac{e}{2} \cosh kx + \frac{e(\cos kl - 1)}{2 \sin kl} \sin kx - \frac{e}{2} \cos kx + \frac{1}{D} \left(\frac{1}{24} qx^4 - \frac{1}{12} qlx^3 + \frac{1}{24} ql^3x \right) \quad (8)$$

$$M = -D_{11} y'' = -\frac{Pe(1 - \cosh kl)}{2 \sinh kl} \sinh kx - \frac{Pe}{2} \cosh kx + \frac{Pe(\cos kl - 1)}{2 \sin kl} \sin kx - \frac{Pe}{2} \cos kx - \left(\frac{1}{2} qx^2 - \frac{1}{2} qlx \right) \quad (9)$$

여기서, D 는 복합재료의 적층판에서 구한 D_{11} 값이다.

2.4. 단순지지된 특별직교이방성 복합적층판의 해법

4변이 단순지지된 특별직교이방성 복합적층판의 처짐에 대한 미분방정식을 직각 좌표로 나타내면 Eq. (10)로 나타낼 수 있다.

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q(x, y) \quad (10)$$

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

판의 4변이 단순 지지된 경우 Navier 해법을 적용할 수 있다(Timoshenko, 1989). 좌표축은 Fig. 4에 나타난 바와 같다.

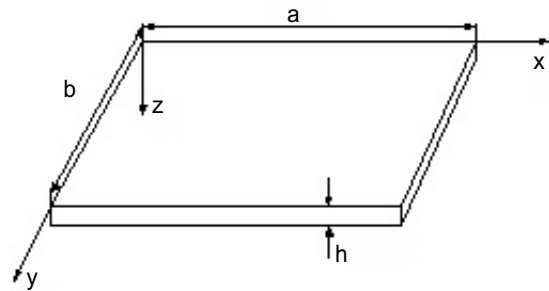


Fig. 4 Coordinate Axis of Plate

Navier 해법에서 수직 처짐 $w(x, y)$ 와 작용 수직하중 $q(x, y)$ 는 이중 Fourier 급수를 사용하면 Eq. (11)과 Eq. (12)로 나타낼 수 있다.

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (11)$$

$$q(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (12)$$

탄성지지된 경우에 $P = kw$ 로 가정하면 탄성지지에 의한 반력은 Eq. (13)과 같이 나타난다.

$$P = kw = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} kw_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (13)$$

그러므로 Eq. (11)과 Eq. (12)를 Eq. (10)에 대입하면 주어진 m, n 에 대하여 다음 Eq. (14)가 된다.

$$w_{mn} = \frac{\left(\frac{q_{mn}}{\pi^4}\right)}{D_1\left(\frac{m}{a}\right)^4 + 2D_3\left(\frac{m}{a}\right)^2\left(\frac{n}{b}\right)^2 + D_2\left(\frac{n}{b}\right)^4} \quad (14)$$

Eq. (14)의 우변에 있는 하중의 진폭 q_{mn} 은 함수의 직교성(orthogonality)을 이용하여 Eq. (12)로부터 다음 Eq. (15)와 같이 구할 수 있다. 즉, Eq. (12)의 양변에 $\sin(n\pi y/a)dy$ 를 곱하여 0에서 b 까지 적분된 방정식에 $\sin(m\pi x/a)dx$ 를 양변에 곱하여 0에서 a 까지 적분하면 된다. Fourier 급수로 전개하여 다음 Eq. (15)을 얻는다.

$$q_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b q(x,y) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy dx \quad (15)$$

그러므로 m, n 에 대한 q_{mn} 은 주어진 하중 $q(x,y)$ 에 대하여 Eq. (18)를 적분하면 구할 수 있다. 단순지지된 특별직교이방성 적층판의 임의 점에서 수직치짐은 Eq. (12)와 Eq. (14)를 이용하여 계산할 수 있다.

등분포하중 q 와 집중하중 P 가 작용할 때의 경우에 대해서 살펴보면 다음과 같다.

하중 $q(x,y)$ 가 전단면에 걸쳐 등분포하중 q_0 로 재하되는 경우를 고려하면 다음 Eq. (16)을 얻을 수 있다.

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

그러므로 Eq. (12)에 Eq. (15)를 대입하면 등분포하중 q_0 가 전단면에 재하된 경우의 처짐 $w(x,y)$ 는 다음 Eq. (17)이 된다.

$$w(x,y) = \frac{16q_0}{\pi^6} \sum_{m=1,3,5..}^{\infty} \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) / DEN \quad (17)$$

여기서,

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

단순지지된 특별직교이방성 복합적층판에 집중하중 P 가 재하되는 경우를 고려해 보자. 이때 집중하중 P 는 미소 직사각형 면적 uv 에 등분포하중이 재하된 경우로 정의한다. Eq. (16)에서 q_{mn} 을 다음 Eq. (18)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} q_{mn} &= \frac{4P}{abuv} \int_{\xi-u/2}^{\xi+u/2} \int_{\eta-v/2}^{\eta+v/2} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy dx \\ &= \frac{16P}{\pi^2 mn uv} \sin\left(\frac{m\pi \xi}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi \eta}{b}\right) \sin\left(\frac{m\pi u}{2a}\right) \sin\left(\frac{n\pi v}{2b}\right) \end{aligned} \quad (18)$$

앞에서 정의된 집중 하중의 개념($u \rightarrow 0, v \rightarrow 0$)을 이용하면, Eq. (18)은 다음 Eq. (19)이 된다.

$$q_{mn} = \frac{4P}{ab} \sin\left(\frac{m\pi \xi}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi \eta}{b}\right) \quad (19)$$

그러므로 Eq. (12), Eq. (14) 그리고 Eq. (19)을 정리하면 집중하중이 재하되어 있는 탄성 지지도나 특별직교이방성 복합적층판의 처짐 $w(x,y)$ 를 구할 수 있는 Eq. (20)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} w(x,y) &= \frac{4P}{\pi^4 ab} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{DEN+k} \sin\left(\frac{m\pi \xi}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi \eta}{b}\right) \right. \\ &\quad \left. \times \sin\left(\frac{m\pi x}{2a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{2b}\right) \right] \quad (20) \end{aligned}$$

처짐 값을 알면 Eq. (20)로부터 곧바로 응력을 구할 수 있다.

3. 수치해석

3.1. 특별직교이방성 복합적층판 패널

고려된 특별직교이방성 복합적층판의 물성값은 다음과 같다.

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

$$\nu_{12} = 0.272, \nu_{21} = 0.0328, h_0 = 0.000125 \text{ m}, r = 1$$

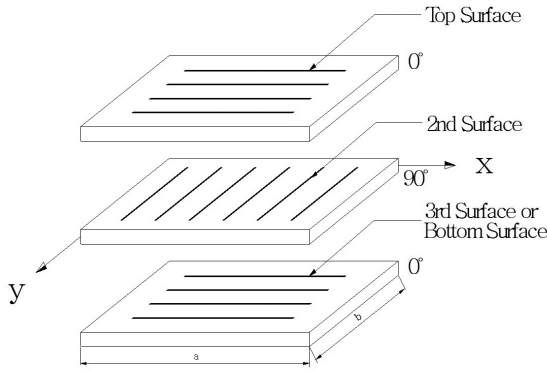


Fig. 5 Configuration of [a/b/a]r Laminated Plate

3.2. 프로그램 오차 비교

임의의 경계조건을 갖는 판에 대한 해석 해가 없기 때문에 부득이하게 4변이 모두 단순지지되었을 경우의 Navier 해와 비교하였다(Ashton, Pagano, Whitney, 1970, Timoshenko, 1989).

여기에 등분포하중 $1N/m^2$ 을 재하하여 각 점의 처짐값을 구하여 Navier 해와 F.D.M 결과와 비교하여 Table 1에 나타내었다. 한 개의 ply두께는 0.000125m, 판의 형상은 $7.5m \times 6.0m$ 로 하였다. 요소의 수는 10×10 으로 분할하여 mesh 중앙점의 처짐 값을 Table 1과 같이 비교한 결과 본 연구에서 사용한 F.D.M의 결과의 정확도를 입증하였다.

Table 1. Deflection Ratio of F.D.M to Navier Solution

		F.D.M. / Navier				
X(m)	Y(m)	0.75	2.25	3.75	5.25	6.75
	0.6		1.0050	1.0030	1.0030	1.0030
1.8		1.0010	0.9989	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

3.3. 도로구조물 샌드위치 패널 모델링

본 논문에서 고려된 도로구조물 샌드위치 패널은 Fig. 6과 같이 4변이 단순지지되어 있는 구조로 모델링 하였다.

본 논문에서 고려된 철근콘크리트 패널의 두께는 140mm로 하였으며 철근은 인장측에 배근된 단철근 단면으로 고려하였으며 철근콘크리트 패널의 단면 형상은 Fig. 7과 같다.

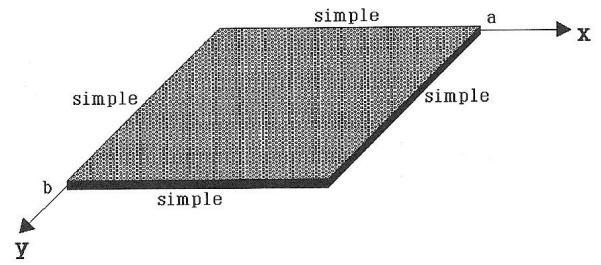


Fig. 6 Panel with All Edges are Simple Supported

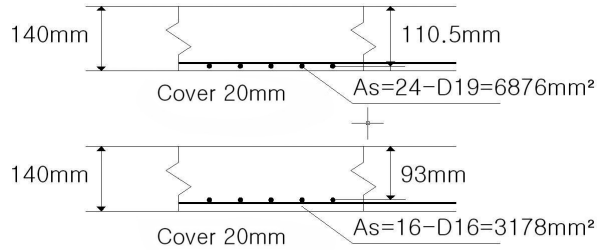


Fig. 7 Cross Section of the RC Panel

본 논문에서 제안된 복합재료 샌드위치 패널의 형상은 Fig. 8과 같다.

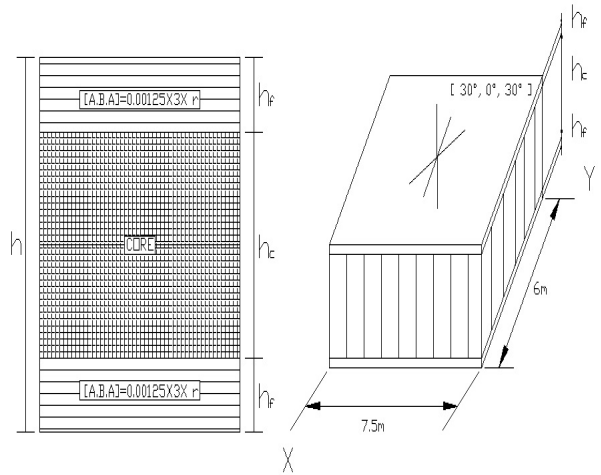


Fig. 8 Cross Section of the Composite Sandwich Panel

3.4. 수치해석 결과

복합재료의 인장강도는 철근콘크리트나 강재보다 훨씬 높으므로 비교대상은 처짐으로 하였다. 즉, 철근콘크리트 패널과 동일하거나 작은 처짐을 일으키는 몇 가지 유형의 샌드위치 패널을 고려하였다. 도로구조물 샌드위치 패널을 철근콘크리트 패널을 사용할 경우와 복합재료 샌드위치 패널을 사용할 경우에 거의 동일한 처짐을 기준으로 비교하였다. 본 논문에서는 $64kg/m^3$ 의 무게를 갖는 폼코어(form core)를 선택하였으며 face

sheet는 일반적으로 많이 사용하고 있는 탄소섬유를 택하였다.

도로구조물에 대한 철근콘크리트 패널과 복합재료 샌드위치 패널을 특별직교이방성 적층판으로 모델링하여 해석한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Self-weight Ratio Concrete Panel to Composite Sandwich Panel

Type	R.C. panel	Comp. Panel 1	Comp. Panel 2	Comp. Panel 3	Comp. Panel 4
h (m)	0.14	0.321	0.2722	0.2417	0.2202
h_c (m)	0.14	0.318	0.2670	0.2350	0.2120
h_f (m)	-	0.0080	0.0026	0.0033	0.0041
h_o (m)	-	0.000125	0.000125	0.000125	0.000125
D (N/m ²)	3430	340.57	245.31	257.66	271.77
Maximum deflection (mm)	95.34	94.66	95.05	94.88	94.93
Deflection ratio	1	0.9920	0.9969	0.9951	0.9957
Self-weight ratio	1	10.07	13.98	13.31	12.62

Table 2에서 알 수 있듯이 철근콘크리트 처짐을 1로 하였을 때 복합재료 샌드위치 패널의 처짐비가 0.992~0.9969로 거의 동일한 처짐을 기준으로 비교하였다. 철근콘크리트 패널과 복합재료 샌드위치 패널의 처짐을 거의 동일하게 할 경우 복합재료 샌드위치 패널의 자중은 철근콘크리트 패널 자중의 1/10.07~1/13.98 (약 10%) 정도임을 알 수 있다.

4. 결론

모든 건설재료는 치수에 대한 이론적 한계를 갖고 있다. 도로구조물의 경우 이러한 치수의 한계를 벗어나는 대형구조로 간주되며, 치수의 한계를 줄일 수 있는 한 가지 방법은 패널의 자중을 줄이는 것이다. 패널의 자중을 줄이게 되면 도로구조물을 대형화 하는 것은 그만큼 손쉬워진다. 본 논문에는 패널의 자중을 줄이기 위해서 여러 가지 형태에 대한 복합재료 샌드위치 패널에 대하여 연구를 수행하였다. 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 철근콘크리트 패널을 복합재료 이론으로 해석할 수 있음을 보였다.
2. 복합재료 샌드위치 패널의 처짐을 F.D.M에 의해 계

산하였으며, Tri-diagonal 해법을 사용하여 계산시간을 단축하였다.

3. 본 논문에서 사용한 F.D.M의 신뢰성을 Navier해와 비교해 본 결과 본 논문에서 사용한 F.D.M의 정확도를 입증하였다.
4. 도로구조물에 대해 철근콘크리트 패널을 사용할 경우와 복합재료 샌드위치 패널을 사용할 경우에 대한 수치해석 결과 복합재료 샌드위치 패널을 사용할 경우 철근콘크리트 패널의 자중을 1/10.07~1/13.98(약 10%)로 줄일 수 있음을 알 수 있었다.
5. 도로구조물을 복합재료 샌드위치 패널을 사용하는 경우 치수효과를 고려하지 않는다면 자중 감소비 만큼 도로구조물의 크기를 증대시킬 수 있다.
6. 주어진 하중 하에서 철근콘크리트 패널의 자중비가 10%인 복합재료 샌드위치 패널이 얼마든지 가능함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비(일부) 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ashton, J.E., 1970, "Anisotropic Plate Analysis-Boundary Condition", J. of Composite Materials. pp. 162-171
- Goldberg, John E., and Kim, D.H., 1967, "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
- Han, B. K, Kim, D. H, Lee Y. H, 2003, "Size/Scale Effects in the Failure of Simply Supported Sandwich Bridge", Proc. of Korean Society of Civil Engineers, Vol.1, pp.333-338
- Han, B. K., Kim, D. H., 2004, "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, pp. 23-28
- Han, B. K, Kim, D. H., 2001, "Analysis of Steel Bridges by Means of Specially Orthotropic Plate Theory", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 13, No. 1, pp. 61-69.
- Han, B. K, Kim, D. H, 2010 "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, pp. 23-30.
- Han, B. K., Suk, J. H., 2011, "Advanced Composite Material Slab for Light Weight of Tall Building" Proc. of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 1, No. 1, pp. 301-304
- Kim, D. H., 1993, "Simple Method of Analysis for Preliminary

- Design of Certain Composite Laminated Primary for Civil Construction II” Journal of Material Technology, Elsevier, London
- Kim, D. H., 1995, “Composite Structures for Civil and Architectural Engineering”, E&FN SPON, Chapman & Hall, London
- Kim, D.H., Han, B.K., Lee, J.H., Hong, C.W., 1999, “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, pp. 1279-1284
- Kim D. H., 1992, “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, 23-25.
- Meier, U, 1984, “Proposal for a CFRP Bridge across the Straight of Gibraltar at its narrowest Site”, Proc. 14th Reinforced Plastics Congress
- Pagano, N.J., 1970, “Exact Solution for Rectangular Bidirectional Composites and Sandwich Plates”, Journal of Composites Materials, Vol. 4, No. 1, pp 20-34
- Stephen P. Timoshenko and S. Woinowsky-krieger, 1989, “Theory of Plates and Shells, Second Edition”, McGraw Hill Book Co.
- Tsai, S.S.W., 1988, “Composite Design”, Think Composite, Dayton, OH
- Whitney, J.M. and Leissa, A.W., 1970, “Analysis of a Simply Supported Laminated Anisotropic Rectangular Plate”, J. of AIAA, Vol. 8, No. 1 pp. 28-33