단순지지된 샌드위치 슬래브교량의 파괴시 치수효과

Size Effects in the Failure of Simple Supported Sandwich Slab Bridges

한 봉 구[1)] 김 덕 현[2)]

Han, Bong Koo Kim, Duck Hyun

Abstract

Composite materials can be used economically and efficiently in civil engineering applications when standards and procedure for analysis, design, construction and quality control are to be established. Bridge systems, including the girders and cross-beams, and concrete decks behave as the specially orthotropic plates. For such systems with sections, boundary conditions other than Navier solution types, it is very difficult to obtain its analytical solution. To design the bridge made by the composite materials, cross-section was used as the form-core shape for economical reason and finite difference method was used for output of the stress value. The Tsai-Wu failure criterion for stress space is used. In this paper, the rate of tensile strength reduction due to increased size was considered. And also numerical study is made for these cases.

Keywords : Size effect, Composite materials, Specially orthotropic plate, Strength reduction, Slab bridges

1. 서 론

21세기에 들어오면서 토목, 건축, 기계, 조선, 항공 등의 분야에서 콘크리트, 강재, 알루미늄 및 그의 합금 등이 주된 소재로 이용되고 있고, 근래에는 재료 및 금속 화학 공학의 눈부신 발달로 각종 구조용 신소재들이 많이 개발되고 있다. 토목, 건축 분야의 건설에는 주로 콘크리트 및 강재 등이 구조용 재료로 사용되어져 왔다. 그러나 최근 산업이 발전함에 따라 구조물이 대형화되고, 중량과 부식, 내구성 문제 및 경과년수의 증가로 인한 유지 보수가 중요한 문제로 대두됨에 따라 복합신소재를 건설분야에 응용하기 위한 노력들이 활발하게 진행되고 있다.

현재 연구가 활발히 진행되고 있는 복합신소재의 대표적인 것 중 박판 적층 구조로 이루어진 매우 고강도 이면서 경량인 복합신소재가 있다. 이는 원래 우주, 항공 분야에서 개발되어 인공위성이나 항공 분야에 이용되어 오던 것인데, 최근의 건설기술 개발과 초대형 구조물의 건설에 있어서 기존 재료의 한계성 때문에 건설 분야에 적절히 응용하기 위한 구조적 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

복합신소재는 기존의 건설재료에 비하여 부식에 대한 저항성이 크고 경량이면서 고강도일 뿐만 아니라 공장 제작이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

그러나 이와 같은 우수한 성질을 갖는 복합신소재를 실제적으로 이용하기 위해서는 해결해야 할 문제점들이 허다하다. 그 중에서 한 가지는 복합신소재 이론은 구조설계 및 진동해석을 수행하는데 있어서 일반 등방성 재료의 이론에 비하여 다루기가 쉽지 않다는 점이 있다. 복합신소재는 이방성이므로 휨-인장, 인장-전단 및 휨-비틀림의 연계효과의 발생으로 고전이론에 비해 너무 어렵다는 단점이 있으므로 일반기술자들이 건설 분야에 응용하기에는 많은 어려움이 있다. 이러한 문제점들은 건설구조물처럼 단면이 커질 경우 특별직교이방성이론으로 해석이 가능하다는 결과가 제시됨에 따라 해석에 따른 어려움이 점차 해결되고 있다(Kim, 1995; Han & Kim, 2001, 2004).

탄성론의 대부로 간주되는 Navier는 휨강성을 포함한 판의 정확한 차분방정식을 유도하였으며, 대수 방정식으로부터 변형된 차분방정식을 유도함으로써 모든 지점이 단순지지 된 형태의 판을 해석하여 정확한 값을 얻는 데 성공했다. 그러나 경계조건이 다른 구조물에까지는 그 해석 방법을 확장 시키지는 못하였다. 이에 대해 저자는 유한차분법을 통한 경계조건이 다양하고 강성이 변하는 구조물의 해석적 방법을 찾았으며, 적층판의 적층수가 증가함에 따라 특별직교이방성 복합적층판 이론의 사용이 가

1) 정회원, 서울산업대학교 건설공학부 교수

2) 명예회원, 서울산업대학교 건설공학부 겸임교수

* Corresponding author : bkhan@snut.ac.kr 02-970-6577

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2010년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

능한 적층형태 및 배향각에 관해 연구하고 그 타당성을 밝힌바 있다(Kim, 1992, 1993).

또한 파괴응력해석에 대해서는 Maxwell에 의해 제안되어진 비틀림 에너지, 또는 응력의 일반화이고, 그 후에 Huber에 의해 더욱 개발 되어진 비틀림 에너지를 이용한 해석법을 가지고 발전을 시킨 Tasi는 상호 작용하는 파괴영역을 구체화하는 쉬운 방법으로 quadratic criterion을 사용하였다(Tsai, 1988). 이러한 영역을 사용함에 따라 파괴모드의 정의에 의한 파괴영역에 의존하는 대신에 사용 가능한 데이터를 설계도구로서 사용한 파괴영역을 찾아낼 수 있었다.

본 논문에서는 치수가 커지면 강도가 떨어진다는 치수효과 이론을 접목시켜 교량의 파괴강도를 찾는 방법을 연구해 보고자 한다. 유한차분방정식을 이용한 유한차분매트릭스를 구성하고, 이에 따른 처짐의 값을 산출하여 응력해석을 하고 치수효과를 고려한 파괴강도해석을 하고자 한다.

복합신소재로 이루어진 구조물의 파괴강도를 추정 설계하는 방법에는 재료에 대한 파괴곡선이 필요하나 이에 대한 파괴곡선이 부족한 현실이다. 본 논문의 연구자에 의해 치수가 커지면 강도가 떨어진다는 치수효과 이론이 발표되었으며, 이를 응용 토목구조물인 교량에 적용하여 해석해 보고자 하였다. 교량의 형태상 특별직교 이방성 적층판으로 구성되어지고, 가운데는 폼코아 형태가 가장 적절하고 경제적이므로 본 연구에서는 가장 단순한 양단이 단순지지 된 샌드위치 슬래브 교량을 모델링 하고 이에 대한 응력과 처짐을 산출하였으며, 프로그램의 정확도를 검증하기 위하여 Navier의 해와 비교 하였으며, 치수효과를 고려한 파괴강도해석을 수행하였다.

2. 기본이론

특별직교이방성인 적층판의 처짐 및 응력을 구하기 위해 강성 및 복합적층판의 지배방정식을 구하고 복합적층판의 처짐과 응력에 대한 관계식을 유도하였다.

복합적층판의 처짐 및 응력에 대한 해석과 관련 된 기본적인 이론을 기술하면 다음과 같다.

2.1 단순지지된 특별직교이방성 복합적층판의 해법

네 변이 단순지지 된 특별직교이방성 복합적층판의 처짐에 대한 미분 방정식을 직각 좌표로 나타내면 식(1)로 나타낼 수 있다.

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

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

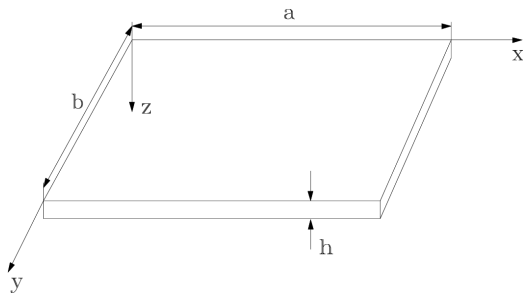

Fig. 1 좌표축

판의 네 변이 단순지지 된 경우 Navier 해법을 적용할 수 있다(Kim, 1995). 좌표축은 Fig. 1에 나타난 바와 같다.

Navier 해법에서 수직처짐 w(x,y)와 작용 수직하중 q(x,y)는 이중 half-range sine Fourier series를 사용하면 식(2)과 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$w(x,y)=\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}w_{mn}\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \qquad (2)$$

$$q(x,y)=\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}q_{mn}\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \qquad (3)$$

탄성지지된 경우에 $P=kw$로 가정하면 탄성지지에 의한 반력은 식(4)와 같다.

$$P=kw=\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}kw_{mn}\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \qquad (4)$$

식(2)~식(4)을 식(1)에 대입하면 식(5)를 얻을 수 있다.

$$w_{mn}=\frac{q_{mn}}{\pi^4(D_1(m/a)^4+2D_3(m/a)^2(n/b)^2+D_2(n/b)^4)+k} \qquad (5)$$

식(5)의 우변에 있는 하중의 진폭 q_{mn}은 함수의 직교성(orthogonality)을 이용하여 식(3)으로부터 다음 식(6)과 같이 구할 수 있다. 즉, 식(3)의 양변에 sin(nπy/a)dy를 곱하여 0에서 b까지 적분된 방정식에 sin(mπx/a)dx를 양변에 곱하여 0에서 a까지 적분하면 된다.

$$q_{mn}=\frac{4}{ab}\int_0^a\int_0^b q(x,y)\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)dydx \qquad (6)$$

그러므로 m, n에 대한 q_{mn}은 주어진 하중 q(x,y)에 대하여 식(6)을 적분하면 구할 수 있다. 단순지지된 특별직교이방성 복합적층판의 임의 점에서 수직처짐은 식(2)과 식(3)를 이용하여 계산할 수 있다.

등분포하중 q_0와 집중하중 P가 작용할 경우 다음과 같다.

첫째로 하중 q(x,y)가 전단면에 걸쳐 등분포하중 q_0로 재하 되는 경우를 고려하면 다음 식(7)을 얻을 수 있다.

$$q_{mn} = \frac{4q_0}{ab}\int_0^a\int_0^b \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)dydx = \frac{16q_0}{\pi^2 mn} \quad (7)$$

그러므로 식(2)에 식(7)을 대입하면 등분포하중 q_0가 전단면에 재하 된 경우의 처짐 w(x,y)는 다음 식(8)로 된다.

$$w(x,y) = \frac{16q_0}{\pi^6}\times \sum_{m=1,3,5..}^{\infty}\sum_{n=1,3,5..}^{\infty}\frac{\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)}{mn(DEN+k)} \quad (8)$$

여기서

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

앞의 경우와는 달리 단순지지된 특별직교 이방성 복합적층판이 집중하중 P를 받는다고 하자. 이때 집중하중 P는 미소 직사각형 면적 uv에 등분포하중이 재하된 경우로 정의한다.

식(7)에서 q_{mn}을 다음 식(9)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} q_{mn} &= \frac{4P}{abuv}\int_{\xi-u/2}^{\xi+u/2}\int_{\eta-v/2}^{\eta+v/2}\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)dydx \\ &= \frac{16P}{\pi^2 mnuv}sin\left(\frac{m\pi\xi}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi\eta}{b}\right)\sin\left(\frac{m\pi u}{2a}\right)\sin\left(\frac{n\pi v}{2b}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

앞에서 정의된 집중하중의 개념($u\to 0$, $v\to 0$)을 이용하면, 식(9)은 다음 식(10)이 된다.

$$q_{mn} = \frac{4P}{ab}sin\left(\frac{m\pi\xi}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi\eta}{b}\right) \quad (10)$$

그러므로 식(3), 식(5) 그리고 식(10)을 정리하면 집중하중이 재하되어 있는 탄성지지된 특별직교이방성 복합적층판의 처짐 w(x,y)를 구할 수 있는 식(11)를 얻을 수 있다.

$$\sin\left(\frac{m\pi\xi}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi\eta}{b}\right)\times \sin\left(\frac{m\pi x}{2a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{2b}\right)\Big] \quad (11)$$

2.2 Tsai–Wu의 파괴이론

Tsai와 Wu는 응력장내에서 파손면을 다음 식 (12)과 같이 가정하였다(Tsai, 1988).

$$F_{ij}\sigma_i\sigma_j + F_i\sigma_i = 1 \qquad (i,j = 1,2,\cdots,6) \quad (12)$$

여기서 F_i와 F_j는 2차와 4차 강도텐서 이고 $\sigma_4 = \sigma_{23}$, $\sigma_5 = \sigma_{31}$, $\sigma_6 = \sigma_{12}$를 각각 나타낸다.

대칭축 X–Y에 관하여 평면응력상태에 있는 얇은 직교이방성에 대해서 이 파괴영역은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} &F_{xx}\sigma_x^2 + F_{yy}\sigma_y^2 + 2F_{xy}\sigma_x\sigma_y + F_{ss}\sigma_s^2 \\ &+ F_x\sigma_x + F_y\sigma_y + F_s\sigma_s = 1 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 F는 강도 변수이고 다음 식(14)으로부터 얻어진다.

$$\begin{aligned} &F_{xx} = \frac{1}{XX'}, F_{yy} = \frac{1}{YY'}, F_{ss} = \frac{1}{S^2} \\ &F_x = \frac{1}{X} - \frac{1}{X'}, F_y = \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'}, F_s = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

이러한 강도들은 실험에 의해서 얻어진다. 4차 텐서 항목인 σ_x와 σ_y의 계수인 X, X', Y, Y' 및 이축 파손응력 σ의 함수로 표현되는 F_{xy}는 신뢰성 있는 2축 실험을 수행하는 것이 항상 쉽지는 않기 때문에 Tsai는 다음과 같은 경험식을 제시했다.

$$F_{xy} = F^*_{\sqrt{F_{xx}F_{yy}}xy} \quad (15)$$

여기서 F^*_{xy}는 일반화된 상호작용 항목으로서 믿을만한 실험 데이타가 없을 때 경험적인 상수로서 식(16)를 사용한다.

$$-\frac{1}{2} \leqq F^*_{\leqq 0xy} \quad (16)$$

여기서 $-\frac{1}{2}$을 일반화된 von Mises의 값이고, 0은 Hill's의 값이다.

2.3 강도비의 정의

강도비 R은 적용된 하중에 대한 극한강도 또는 최대강도의 비율이다. 강도비의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{\sigma\}_{max} &= R\{\sigma\}_{applied} \\ \{\epsilon\}_{max} &= R\{\epsilon\}_{applied} \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 R은 강도비로서 일종의 안전계수 또는 하중계

수와 유사하다. 파괴는 R=1일 때 일어난다.

R<1 일 때 1/R의 계수에 의한 강도보다 작용하중이 더 커진다. 이것은 물리적으로 불가능하지만 설계에 있어서 매우 중요한 정보를 제공해 준다. 예들 들어 (R-1) 비율만큼 작용하중을 감소시키면 된다.

Tsai에 따르면 상호작용하는 파괴영역을 구체화하는 쉬운 방법은 quadratic criterion을 사용하는 것이다[6] 이것은 Maxwell에 의해 제안되어진 비틀림 에너지 또는 응력의 일반화이고, 그 후에 Huber에 의해 더욱 발전되었다.

이러한 영역을 사용함에 따라 우리는 파괴모드의 정의에 의한 파괴영역에 의존하는 대신에 사용 가능한 데이터를 설계도구로서 사용한 파괴영역을 알 수 있다. 식(12)을 식(17)에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$[F_{ij}\sigma_i\sigma_j]R^2 + [F_i\sigma_i]R - 1 = 0 \qquad (18)$$

식(13)의 응력성분들은 적용된 응력들이다. 어떤 재료가 주어지면 F_s' 강도변수를 구할 수 있다.

3. 파괴시 치수효과

본 논문에서의 강도계산은 Maxwell과 Huber가 제안한 강도이론을 적용하였고, 구조물의 치수가 커지면 강도가 감소한다는 치수효과 이론을 적용하였다(Kim, 1994, 1995; Han & Kim, 2003).

3.1 E-glass 섬유의 인장강도 감소율

Filament Wound에 사용되는 유리섬유의 인장강도 감소비율은 Fig. 2와 같으며, 아래 식(19)와 같이 표현할 수 있다(Kim, 1994).

$$Y = 0.465\ X^{-0.0377} \qquad (19)$$

여기서 X는 질량, Y는 인장강도 감소율을 나타낸다.

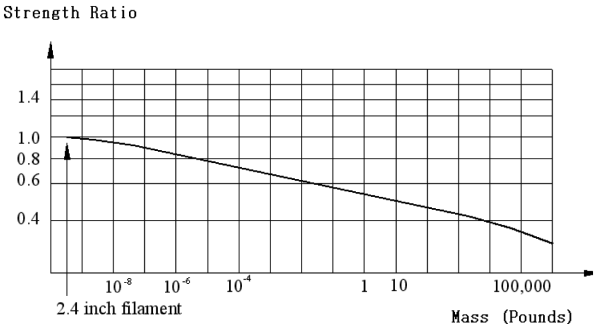

Fig. 2 질량증가에 따른 유리섬유 인장강도 감소율

3.2 에폭시 모재의 인장강도 감소율

Crasto와 Kim에 의한 실험결과로부터 90° 방향에 대한 인장강도 감소비율 Y와 일방향으로 보강된 복합재료 AS4/501-6에 대한 관계로부터 다음과 같은 회귀분석 식을 구하였다(Kim, 1994).

$$Y = -0.00003054\ n^2 - 0.00268\ n + 1.01065 \qquad (20)$$

여기서 n은 층수를 나타낸다.

이를 그래프로 나타내면 Fig. 3과 같다.

같은 모재를 사용한 결과가 아니라도 에폭시에 대한 이 방정식은 90° 인장강도 감소비를 측정하는데 사용할 수 있다. 보강섬유와 구성 재료들 마다 질량이 커짐에 따른 X, X', Y, Y' 그리고 S의 강도 감소비가 점차로 반드시 얻어져야 한다. 제조방법과 다른 가능한 요인들도 마찬가지로 고려되어야 한다.

4. 수치해석

4.1 대상교량의 모델링

본 논문에서는 F.D.M 프로그램을 가지고 샌드위치 슬래브 교량의 해석을 수행하였다. 샌드위치 슬래브 교량은 유한차분법을 사용 해석할 수 있고 계산에 사용된 유리섬유와 에폭시로 형성된 복합재료의 적층 배향각은 Fig. 4와 같으며 물성치는 Table 1과 같다.

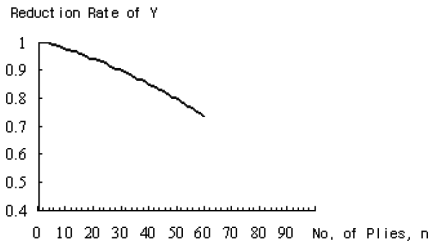

Fig. 3 질량증가에 따른 에폭시 모재의 인장강도 감소율

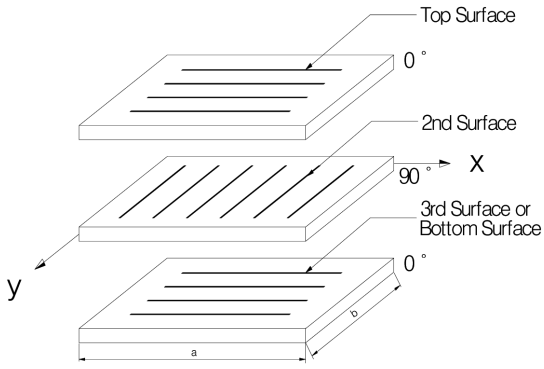

Fig. 4 [a/b/a]r인 적층 배향각 형상

본 논문에서 적용한 폼코아의 형상과 치수는 Fig. 5와 같다.

양단단순, 타단자유인 슬래브 교량의 mesh형상과 하중재하 형태는 Fig. 6과 같다. r=20이고 face의 두께가 0.025mm 일 때 재하 된 하중은 Table 2와 같다.

Table 3의 강성을 구하여 F.D.M의 프로그램에 대입한 후 tri-diagonal 매트릭스 해법을 이용하여 처짐 해석을 한다. F.D.M 프로그램을 이용 응력해석을 r=20이고 폼코아 높이 h=0.1~0.3m까지 수행하였다.

Table 1 유리섬유보강 복합재료의 물성치

E_1	E_2	υ_{12}	υ_{21}	G	h_0	V_f
38.6GPa	8.27GPa	0.26	0.0557	4.14GPa	0.000125m	0.45

E_1 : 종방향 탄성계수, E_2 : 횡방향 탄성계수, υ : Poisson 비, G : 전단계수, h_0 : 플라이 한 개의 두께, V_f : 섬유의 체적률.

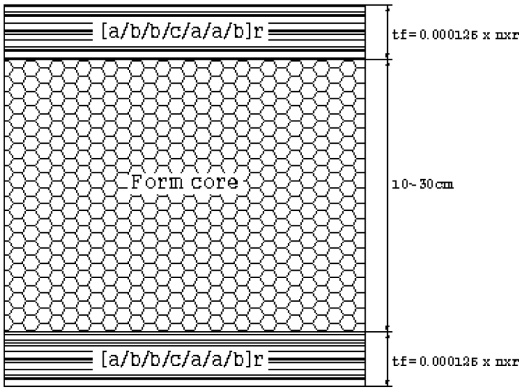

Fig. 5 폼 코아의 형상과 치수

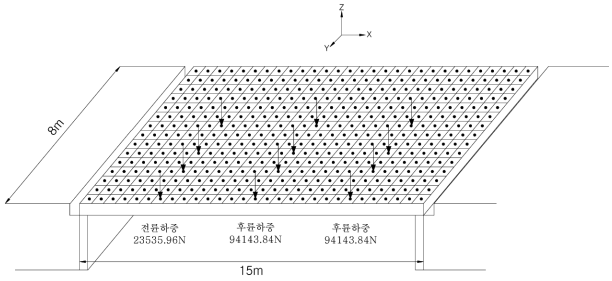

Fig. 6 양단단순 타단자유인 슬래브교량의 하중재하 형상

Table 2 샌드위치 슬래브교량에 재하된 하중

구분	하중 (N)	
차량하중 (DB-24)	전륜	23,535.96
	후륜	94,143.84
자중	core	47.04
	face	11.025
	asphalt	563.5
	계	621.565

Table 3 폼 코아 높이에 따른 강성 (N·m)

h (m) / 강성	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
D_{11}	3848140	12298100	28362931	54490583	93129023
$D_{12}=D_{21}$	225851	710294	1624243	3104048	5286060
D_{22}	1075366	3186174	7045237	13177026	22106014
D_{66}	428592	1347910	3082289	5890481	10031237

4.2 샌드위치 슬래브 교량의 응력 해석

폼 코아 높이 h=0.3m이고 적층수 r=20인 적층판의

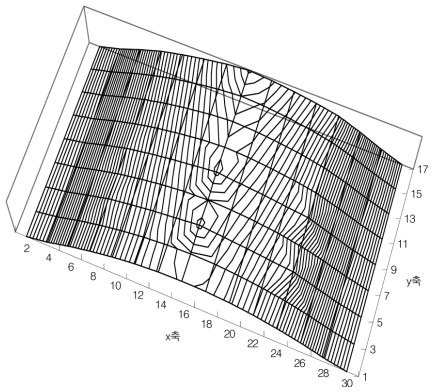

Fig. 7 샌드위치 슬래브 교량의 σ_x형상 (Case of SSFF)

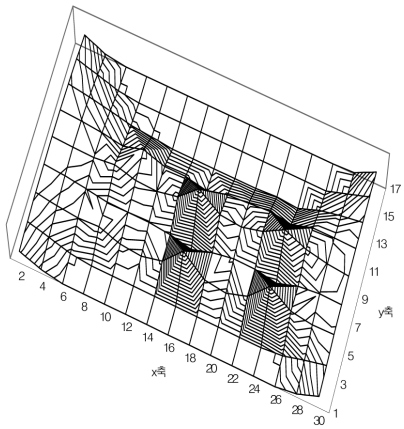

Fig. 8 샌드위치 슬래브 교량의 σ_y형상 (Case of SSFF)

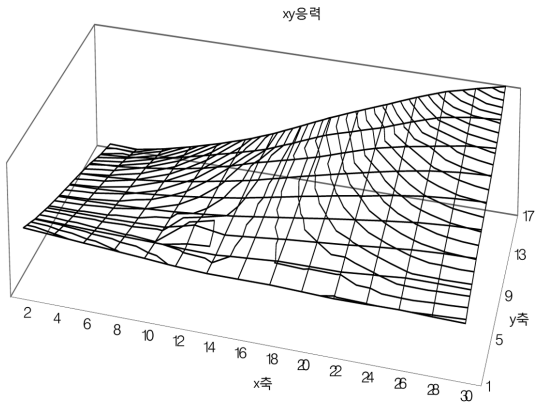

Fig. 9 샌드위치 슬래브 교량의 σ_{xy}형상 (Case of SSFF)

응력 σ_x를 계산하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다.

차량후륜하중이 재하되는 시점의 응력이 제일 크며, 차량하중을 2차선 정적재하 시킬 때 중심점에서 약간 떨어진 점에 재하 시키기 때문에 응력의 최고점은 중앙에서 약간 벗어나 있다.

다음으로 샌드위치 슬래브 교량의 응력 σ_y를 계산하였으며 그 결과는 Fig. 8과 같다.

슬래브 교량의 응력 σ_{xy}에 대해서도 계산 하였으며 그 결과는 Fig. 9와 같다.

지금까지 세 가지 응력의 경우에 대한 응력의 형상을 살펴보면 집중하중의 편심재하 영향으로 비틀림응력 σ_{xy}이 커졌음을 알 수 있고, D_{11}의 강성이 커서 교축방향의 응력 σ_x가 가장 크게 나타나 있다. 또한 D_{12}와 D_{66}의 강성은 교량에서는 무시해도 되기 때문에 D_{11}과 D_{22}의 강성비를 잘 결정해야한다.

폼코아의 두께를 증가시켜 가면서 즉 강성을 증가시키면서 응력을 산출하였고, 여기서는 그 최대값을 사용한 파괴강도를 해석하였다.

4.3 치수효과를 고려한 샌드위치 슬래브교량의 해석

유리섬유 한 개의 시험편의 강도는 Table 4와 같다.

배향각이 [0/90/0] 이기 때문에 Table 5에서 X, X', Y, Y' 을 배향각 비율에 맞게 산정하면 다음과 같다.

섬유의 지름을 Table 6에서 J로 한다면, $h_0 = 5$mm을 갖는 한 개의 플라이는 대략 394개의 섬유지름이 두께가 되고, 섬유의 체적률 $V_f = 0.45$이므로 대략 177개의 섬유를 포함하고 있다.

단일방향의 복합재료가 L=15m, 폭 b=8m 라면, 60mm 길이를 갖고, 3,449 MPa의 인장강도를 갖는 한 개의 섬유에 대해 다음 Table 7과 같은 질량과 강도 감소비를 갖는다.

파괴응력은 다음 세 가지 경우에 대해 계산하였다.

(A) 인장과 압축 모두 강도감소를 시킨 경우

(B) 단지 인장만 감소를 시킨 경우

(C) 인장, 압축 모두 감소하지 않는 경우

Table 4 유리섬유 보강 복합재료의 강도 (MPa)

X	X'	Y	Y'	S
1062	610	31	118	72

X, X' : 종방향의 인장강도, 압축강도

Y, Y': 횡방향의 인장강도, 압축강도

S : 전단강도

Table 5 [0/90/0]r 인 유리섬유 보강 복합 재료의 강도 (MPa)

X	X'	Y	Y'	S
708	406.67	385	321.3	72

각각의 경우에 대하여 수정된 Hill's ($F^*_{xy} = 0$)와 일반화된 Von Mises 영역($F^*_{xy} = -1/2$)을 고려하였다.

작용응력은 응력해석에서 얻은 값을 사용하였고, 최대응력을 선택 사용하였다.

Table 6 섬유의 굵기에 따른 명칭

명칭	섬유의 굵기 in (μm)
A	.00006 (1.50mi.) ~ .00010 (2.50mi.)
B	.00010 (2.51mi.) ~ .00015 (3.81mi.)
C	.00015 (3.81mi.) ~ .00020 (5.08mi.)
D	.00020 (5.08mi.) ~ .00025 (6.35mi.)
E	.00025 (6.35mi.) ~ .00030 (7.62mi.)
F	.00030 (7.62mi.) ~ .00035 (8.89mi.)
G	.00035 (8.89mi.) ~ .00040 (10.12mi.)
H	.00040 (10.12mi.) ~ .00045 (11.43mi.)
J	.00045 (11.43mi.) ~ .00050 (12.70mi.)
K	.00050 (12.70mi.) ~ .00055 (13.97mi.)
L	.00055 (13.91mi.) ~ .00060 (15.24mi.)
M	.00060 (15.24mi.) ~ .00065 (16.51mi.)
N	.00065 (16.51mi.) ~ .00070 (17.78mi.)
P	.00070 (17.78mi.) ~ .00075 (19.05mi.)
Q	.00075 (19.05mi.) ~ .00080 (20.32mi.)
R	.00080 (20.32mi.) ~ .00085 (21.59mi.)
S	.00085 (21.59mi.) ~ .00090 (22.86mi.)
T	.00090 (22.86mi.) ~ .00095 (24.13mi.)
U	.00095 (24.13mi.) ~ .00100 (25.40mi.)

Table 7 질량에 따른 강도 감소비의 결과

종류 / 폼코어높이	섬유질량	유리섬유 인장강도 감소비	모재의 인장강도 감소비
h=0.10~0.30(m)	3.013	0.53	0.71

Table 8 강도 감소를 시킨 압축, 인장강도

강도 \ type	A	B	C
X	375.24	375.24	708
X'	215.5351	406.67	406.67
Y	273.35	273.35	385
Y'	228.123	321.3	321.3
S	72	72	72
Fxx	1.236×10^{-17}	6.553×10^{-18}	3.473×10^{-18}
Fyy	1.604×10^{-17}	1.137×10^{-17}	8.084×10^{-18}
Fx	-1.975×10^{-9}	$2..0597\times10^{-10}$	-1.047×10^{-18}
Fy	-7.253×10^{-10}	5.459×10^{-10}	-5.150×10^{-18}
Fss	1.929×10^{-16}	1.929×10^{-16}	1.929×10^{-18}
Fs	0	0	0

h : 폼코어 높이 (m)

A type - 인장, 압축 모두감소

B type - 인장만 감소

C type - 인장, 압축감소 안함.

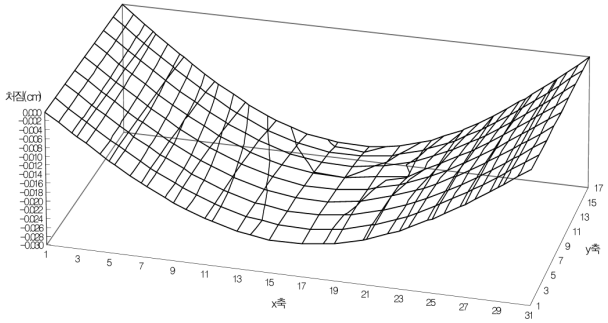

Fig. 10 샌드위치 슬래브 교량의 처짐 형상 (Case of SSFF)

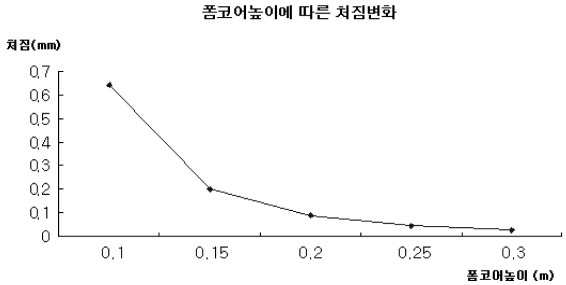

Fig. 11 폼코어 높이에 따른 샌드위치 슬래브교량의 처짐

4.4 샌드위치 슬래브교량의 처짐

폼 코아 높이 h=0.3m이고 적층수 r=20인 적층판의 처짐을 계산하였으며 그 결과는 Fig. 10과 같다.

적층수 r=20이고 폼코아의 높이 h= 0.3m 일 때 처짐을 보면 차량하중이 재하된 부분의 처짐이 제일 큰 것으로 보이며, 최대 처짐이 0.0277mm 을 보이고 있다.

사용성을 고려해서 대상 샌드위치 슬래브 교량을 폼코아를 변화시키면서 최대 처짐을 계산한 결과 Fig. 11과 같다.

Fig. 11에서 보면 폼코아 높이 h=0.1m일 때 최대 처짐이 0.6429mm, h=0.2m일 때 최대 처짐이 0.088mm, 폼코아 높이 h=0.3m일 때 최대 처짐이 0.0277mm로 나타났으며 이는 도시지역 교량의 경우 허용 처짐은 l/1000 =15mm이므로 처짐에 대해 만족함을 보이고 있다.

5. 결 론

교량에서의 치수효과를 고려한 파괴강도를 해석하기 위해 응력을 산출하였으며 F.D.M 프로그램을 완성하였다. 본 프로그램의 정확도는 Navier의 해를 이용하여 확인 할 수 있었다. 본 논문에서는 Tsai-Wu의 파괴영역을 고려하여 복합재료 교량의 강도에 대한 치수효과를 고려하여 해석해보았다. 변형공간을 사용하면 탄성계수의 감소율을 모르기 때문에 응력 공간에서 Von Mises와 Hill's의 파괴영역을 사용하였다. 이러한 일련의 검증과정과 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 치수효과를 고려한 복합재료 샌드위치 슬래브 교량의 처짐 및 응력해석을 수행하기 위하여 F.D.M. 프로그램을 완성하였다. 유한차분법에 의해 단순지지된 슬래브교량의 처짐을 계산해본 결과 Navier해의 결과와 거의 일치함을 보여주고 있어 본 논문에서 사용한 이론의 정확도를 검증할 수 있었다.

2) 매트릭스 해석시 Block Tri-diagonal 해법을 사용함으로써, 대형 매트릭스의 반복수행을 빠른 시간에 효과적으로 수행할 수 있는 차분모형을 완성 할 수 있었다.

3) 샌드위치 폼코아의 높이를 0.1m, 0.2m, 0.3m로 증가시켜 가면서 처짐을 고찰해본 결과 처짐은 0.6429mm, 0.088mm, 0.0277mm로 현저히 줄어드는 것을 알 수 있었다.

4) 강도를 감소시킨 압축 인장강도인 X, X', Y, Y', F_{xx}, F_{yy}, F_x, F_y는 원래 섬유의 강도에서 감소비를 곱하여 산출한 값이기 때문에 감소비에 따라 변경됨을 알 수 있었다.

5) 본 논문에서 제시한 해석방법은 유리섬유와 에폭시 모재에 기본을 두고 있다. 이 과정은 다른 성분 재료들을 갖는 복합재료에도 사용할 수 있을 것으로 판단되며 본 논문에서 얻은 데이터는 구조물 유지 및 보수, 보강 실무에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Kim, D. H., “Composite Structures for Civil and Architectural Engineering”, E&FN SPON, Chapman & Hall, London, 1995.
2. Kim, D. H., “A Simple Method of ‘Exact’ Analysis of some Composite Laminated Structures for Civil Construction”, Seminar, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992.
3. Kim, D. H., “Simple Method of Analysis for Preliminary Design of Certain Composite Laminated Primary for Civil Construction II”, Journal of Material Technology, 55, Elsevier, London, 1993.
4. 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, Torino, Italy, October 1994.
5. Kim, D. H., “The Importance of Size/Scale Effects in the Failure of Composite Structures”, 4th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, Tokyo, 1995, pp. 25-28.
6. Kim D. H., Han, B. K. “Simple Method of Vibration Analysis of Three Span Continuous Reinforced Concrete Bridge with Elastic Intermediate Supports”, Journal of Korean Society for Composite Materials, Vol 17, No. 3, 2004, pp. 23-28.
7. Han, B. K, Kim D. H., “Analysis of Steel Bridges by Means of Specially Orthotropic Plate Theory”, Journal of KSSC, Vol 13 , No. 1, 2001, pp. 61-69.
8. 한봉구, 김세원, “복합재료로 만들어진 단순지지 샌드위치 슬래브 교량의 파괴강도해석”, 구조물진단학회논문집, Vol. 11,

No. 1, 2007, pp. 77-84.
9. Tsai, S. S. W., "Composite Design", Think Composite, Dayton, OH, 1988.

(접수일자 : 2009년 8월 31일)
(심사완료일자 : 2010년 2월 17일)

요 지

구조물의 해석, 설계, 시공, 품질관리 등을 수립할 때 토목기술자는 경제적이며 효율적인 복합재료를 사용할 수 있다. 거더, 가로보, 콘크리트 상판으로 이루어진 교량시스템은 특별직교이방성 판으로 거동한다. 이러한 경계조건을 갖는 단면을 Navier 해 형태의 해석적 해를 구하기가 매우 어렵다. 복합재료로 이루어진 교량을 설계하기위하여, 단면은 가장 경제적이면서 응력에 유리한 폼코어 형태를 채택하였고, 응력을 산출함에 있어서는 유한차분법 프로그램을 사용하였다. 응력영역은 Tasi-Wu 파괴영역 기준을 이용하였다. 본 논문에서는 치수가 증가됨에 따른 인장강도 감소율을 고려하였다. 또한 이러한 경우에 대한 수치해석을 수행하였다.

핵심 용어 : 치수효과, 복합재료, 특별직교이방성판, 강도감소, 슬래브교량