

복합재료 트러스 교량시스템의 정적거동 및 파괴모드에 관한 해석적 연구

Study of Failure Mode and Static Behavior of Lightweight FRP Truss Bridge Deck System

정우영* 이형길*

Jung, Woo-Young Lee, Hyung-Kil

(논문접수일 : 2006년 5월 30일 ; 심사종료일 : 2007년 3월 30일)

요지

본 연구는 복합재료 교량시스템의 규준 정립을 위한 연구로서 실제 설계·시공되어진 복합재료 교량의 정밀해석수행과 이를 통한 복합재료 교량의 파괴거동 및 설계기준 등을 조사하는데 그 목적이 있다. 본 연구의 효율적인 연구를 위하여 실제 미국 NEW YORK주 내에 설계·시공되어있는 Noncomposite-FRP 복합재료 교량을 대상으로 해석적 연구를 수행하였으며 본 연구에서 사용된 해석적 모델을 토대로 실제 미국에서 기 수행되어진 교량 거동에 관한 해석 및 실험하중 평가와 그 결과를 비교하였다. 특히 국내 복합재료 교량의 해석적 설계기준 평가를 위하여 보다 실질적이고 정확한 파괴모드의 조사 및 분석이 요구되어지므로 본 연구에서는 이를 위하여 기존의 해석적 연구에서 가벼운 중량으로 인하여 무시되었던 자중의 영향과 각 적층 layer에 설계된 ply orientation을 고려하여 해석하였다. 그 결과 자중을 고려한 복합재료 패널들의 경우, 제작 결함에 따른 이음부 파괴가 없을 경우 교량 상부 구조 중 횡측 보에서의 국부 좌굴 파괴가 교량의 파괴를 지배할 것으로 본 연구결과에서 예측되었다. 이는 복합재료 교량 제작 시 복합재료 상판 패널과 보의 이음부가 Noncomposite로 제작되는 경우 실제 제작되어진 복합재료 상판의 고 강성에 의하여 재하 하중에 의한 하부 강재 거더 좌굴이 선행되는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 복합재료교량, 유한요소해석, 버클링 해석, 복합재료 파괴 메커니즘

Abstract

There is a concern with worldwide deterioration of highway bridges, particularly reinforced concrete. The advantages of fibre reinforced plastic(FRP) composites over conventional materials motivate their use in highway bridges for replacement of structures. Recently, an FRP deck has been installed on a state highway, located in New York State, as an experimental project. In this paper, a systematic approach for analysis of this FRP deck bridge is presented. Multi-step linear numerical analyses have been performed using the finite element method to study the structural behavior and the possible failure mechanism of the FRP deck-superstructure system. Deck's self-weight and ply orientations at the interface between steel girders and FRP deck are considered in this study. From this research, the results of the numerical analyses were corroborated with field test results. Analytical results reveal several potential failure mechanism for the FRP deck and truss bridge system. The results presented in this study may be used to propose engineering design guideline for new and replacement FRP bridge deck structure.

Keywords : FRP bridge, failure mechanism, buckling analysis

1. 연구 배경 및 목적

교량을 구성하는 부재중에서 바닥판은 반복적 차량하중을

직접적으로 받으며, 겨울철 도로 결빙 시 염화칼슘 살포로 인한 염분 침투에 따른 내구성 저하 등 열악한 사용 환경에 놓여 있어 교량을 구성하는 부재 중 손상에 가장 취약한 부재이다.

† 책임저자, 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 교수
Tel: 033-640-2421 ; Fax: 033-640-1391
E-mail: woojung@kangnung.ac.kr

* 강릉대학교 대학원 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

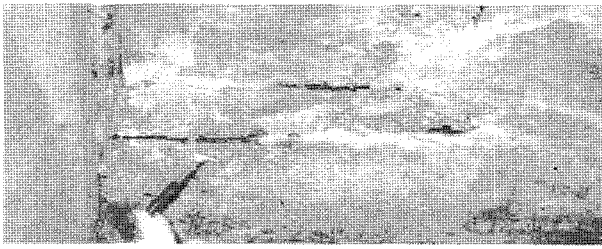


Fig. 1 철근 콘크리트 교량 상판의 철근이 노출된 모습

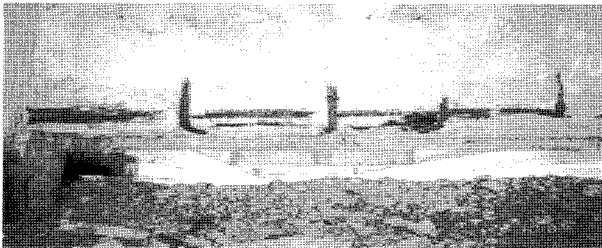


Fig. 2 교량 가로보의 철근이 노출된 모습

따라서 바닥판은 높은 하중 저항성능과 피로내구성을 필요로 한다(Fig. 1, 2). 그러나 현재 주로 사용되는 철근 콘크리트 바닥판의 경우 자동차의 반복하중에 의한 손상과 염화칼슘 침투로 인한 철근 부식 등 유지관리에 많은 문제점이 있어 최근에 높은 하중 저항성능과 피로 내구성을 갖추며 합리적 시공성, 건설비 절감 등의 조건을 충족할 수 있는 새로운 교량바닥판 형식이 세계적으로 많은 토목공학자 사이에서 연구되어 개발되고 있다. 이 중에서 Glass, Aramid 또는 Carbon 같은 Fiber들과 Polyester, Epoxy 또는 Vinylester 같은 Resin들의 매트릭스로 이루어진 복합재료 교량상판의 경우, 상판에 설치하는 단열 복합재료의 무게가 가볍고 시공시간이 짧기 때문에 교통 혼잡으로 인한 간접비용을 대폭 절감할 수 있으며 간단한 장비와 인력으로 설치할 수 있는 시공적 장점으로 인하여 중·소 교량 상부 구조물로서 전 세계적으로 각광 받고 있다.

최근에 국내에서도 국민씨아씨(주)에 의하여 연구되어진 복합재료 교량바닥판(Fig. 3)이 국내 최초로 현장 적용성을 검증하는 차원에서 시범 시공된 바 있으며, 한국건설기술연구원에서 장수명 합리화 교량 바닥판의 개발 중 일부로서 복합재료 바닥판의 연구가 진행되고 있다. 그러나 1990년대 초반부터 시작된 국외의 활발한 복합재료 교량구조물의 연구에 비하여 국내의 복합재료 교량에 관한 연구 및 적용은 다소 미흡하다 할 수 있다. 현재까지 국내에서 복합재료의 관한 연구는 주로 탄소섬유 쉬트(sheet)를 이용한 열화 손상된 콘크리트 구조물의 보수 및 보강의 적용에 관한 연구가 집중되어져 왔다. 기존 교량의 노후화에 따른 보수, 보강공사에 소모되는 막대한 비용과 복합재료 교량이 갖는 경량성, 시공성, 내구성 등의 장점을 고려할 때 복합재료를 이용한 기존 교량의 바닥판을 대체하는 공법은 향후 그 활용성이 무한하다고

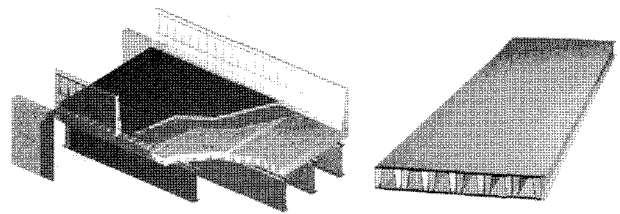


Fig. 3 복합재료 교량 바닥판(델타테크, 국민 씨아씨(주))

할 수 있다. 그러나 이러한 대체 공법이 실무에서의 대중적 활용을 위해서는 무엇보다도 우선적으로 일반 건설 기술자들이 쉽게 활용하고 신뢰할 수 있는 설계, 제작, 시공 및 유지관리를 위한 기준이나 지침 등이 반드시 필요하고, 이런 규정의 제작을 위해서는 국내에서도 앞으로 많은 해석 및 실험적 연구가 수행되어져야 할 것이다.

본 연구는 국내 복합재료 교량시스템의 기준 정립 및 실용화를 위한 초기단계 연구로서 미국 뉴욕 주 내 실제 시공되어 버클리 대학에서 이에 관한 연구가 수행된 자료를 토대로 교량의 정밀해석과 이를 통한 복합재료 교량의 정적 파괴거동 복합재료 바닥판의 설계 타당성을 검토하는데 그 목적이 있다. 본 연구의 효율적인 해석적 연구를 위하여 미국 New York주 내의 Bentley Creek 교량을 연구대상으로 고려하였으며, 본 연구에서 사용된 정밀 유한요소해석 모델의 검증을 위하여 미국에서 수행되어진 본 교량의 실제 정적 재하 실험데이터를 이용, 산출된 해석적 결과와 비교하였다. 특히 보다 실질적이고 정확한 파괴모드의 조사 및 분석을 위하여 기존의 해석적 연구에서 복합재료의 가벼운 중량으로 인하여 무시되는 자중의 영향과 각 layer에 따른 ply orientation을 고려하여 정밀 해석하였다. 실제적으로 과거 복합재료 교량구조물의 해석적 연구의 경우, 복합재료의 가벼운 자중으로 인한 영향과 복합재료 구성에 따른 ply stacking sequence에 관한 재료 모델링의 경우, 일반적으로 근사화된 등방성 물성치를 이용·해석하였다(NYDOT Technical Report, 2002; Mathee et al, 2002).

일반적으로 복합재료 교량시스템의 경우 하부의 강재 거더와 복합재료 상판 플레이트로 구성되는데, 이들 구조에 관한 상호 복합적인 파괴모드에 관한 조사는 향후 복합재료 구조물의 명확한 시방규정 및 설계기준 제작을 위하여 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 이들 복합재료 교량 시스템의 하중재하에 따른 각 요소의 하중분담 역할 및 실제 파괴에 도달 시 발생하는 파괴모드에 관하여 알아보고 이를 통하여 현재 시공되고 있는 복합재료 교량구조물의 설계기준(예를 들면, 안전률)에 관하여 조사하고자 한다.

부가적으로, 복합재료 교량시스템의 정밀 해석적 연구의

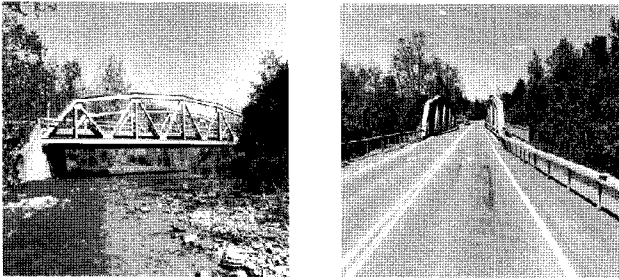


Fig. 4 Bentley Creek 복합재료 교량상판 구조물 (New York, USA)

경우 기존에 제안되어진 많은 연구들이 대부분 국의 설계규정에 따라 시공되어진 교량 형태에 관하여 하중재하 및 거동 분석이 이루어졌으므로 본 연구에서는 실제 국내 하중환경 하에서의 Bentley Creek교량 구조물의 거동 분석 및 평가를 수행하여 실제 국내 설계기준에 따른 구조물의 거동특성 및 기준에 관하여도 본 연구에서 언급하고자 한다.

2. 섬유강화 복합재료의 정의 및 역학적 Mechanism

복합재료란 성분이나 형태가 다른 두 종류 이상의 소재가 거시적으로 조합되어 유효한 기능을 갖는 재료를 일컫는 것으로 일반적으로 토목 분야에 적용되고 있는 복합재료는 유리섬유강화 복합재료(GFRP)가 대부분을 차지하고 있다. 유리섬유 강화 복합재료는 내수, 내약, 내열성이 좋은 수지와 항장력에 우수한 성능을 가지는 유리섬유를 사용하여 우수한 내식성과 높은 강도를 동시에 갖는 재료로 특히 단위중량에 대한 강도와 단위중량에 대한 탄성계수가 크고 내부식 및 내구성이 우수하기 때문에 최근에는 많은 토목구조물의 대체 구조물 제작 및 보수 및 보강 재료로서 활발히 이용하려는 움직임이 두드러지고 있다.

일반적인 복합재료의 구성은 Fig. 5(a)에서 보듯이 하중의 대부분을 견디는 fiber와 각각의 섬유를 제자리에 고정시키고 보호하는 matrix로 구성되며, 둘 또는 그 이상의 단층(lamina)들을 적층하여 만들기 때문에 Fig. 5(b)에서 보듯

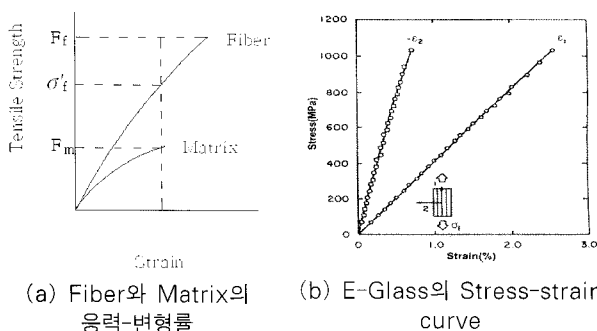


Fig. 5 복합재료의 구성

이 1방향과 2방향의 기계적 성질이 다른 이방성재료의 특성을 가진다.

복합재료의 역학적 특성을 간단히 살펴보면, 한 개의 적층판(laminate)은 서로 부착된 여러 개의 lamina 또는 ply로 만들어져 있다. n 개의 lamina로 구성된 laminate를 고려할 때 k 번째 lamina에 대한 구성 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, σ_{ij} 는 i 면에서 j 방향으로의 응력, ϵ_{ij} 는 i 면에서 j 방향으로의 변형 그리고 $[\bar{Q}]$ 는 축소된 강성 matrix이다. 또한 변위와 변형의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u_0}{\partial x} + z \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial x}, \epsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} + z \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial y}, \epsilon_z = 0 \\ \epsilon_{yz} &= \frac{1}{2}(\bar{\beta} + \frac{\partial w}{\partial x}), \epsilon_{zx} = \frac{1}{2}(\bar{\alpha} + \frac{\partial w}{\partial x}) \\ \epsilon_{xy} &= \frac{1}{2}(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x}) + \frac{z}{2}(\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x}) \end{aligned} \quad (2)$$

중립면으로부터 임의의 거리 z 만큼 떨어져 있는 곳에서 laminate의 변형은 다음과 같이 주어진다.

$$[\epsilon] = [\epsilon_0] + z[k] \quad (3)$$

따라서 중립면에서의 변형과 곡률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{x0} &= \frac{\partial u_0}{\partial x}, \epsilon_{y0} = \frac{\partial v_0}{\partial y}, \epsilon_{xy0} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x}) \\ \kappa_x &= \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial x}, \kappa_y = \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial y}, \kappa_{xy} = \frac{1}{2}(\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x}) \end{aligned} \quad (4)$$

복합 적층판에서 모든 lamina가 서로 부착되어 있기 때문에 lamina의 두께 방향으로 변형과 변위는 연속성을 유지한다. 그러나 각각의 lamina가 서로 다른 방향성을 가짐에 따라 서로 다른 강성을 가지게 되고, 이에 따라 응력은 불연속을 띄게 된다. 얇은 복합판에 대하여 σ_{zz} 와 ϵ_{zz} 는 무시된다 고 가정하면 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \epsilon_{x0} + z\kappa_x \\ \epsilon_{y0} + z\kappa_y \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy0} + z\kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

일반적인 복합판에서 합응력 N , 모멘트 M 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} [N] &= [A][\epsilon_0] + [B][k] \\ [M] &= [B][\epsilon_0] + [D][k] \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 \bar{Q}_{ij} 는 아래 주어진 바와 같이 평면 응력의 경우에 대한 축소된 강성 matrix이다($m = \cos\theta$, $n = \sin\theta$).

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4 \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 + Q_{12}(m^4 + n^4) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m^3n + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})mn^3 \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})mn^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})m^3n \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} - 2Q_{12} + Q_{22} - 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{66}(m^4 + n^4) \end{aligned} \quad (8)$$

Q_{ij} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12} \end{aligned} \quad (9)$$

적층판에 대한 면내 합응력은 균질인 보, 판, 셸 등에서와 같이 중립면의 변형에 대한 함수일 뿐만 아니라 곡률, 뒤틀림에 대한 함수이다. 따라서 열 및 습열 효과를 무시한 구성 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 2A_{16} & B_{11} & B_{12} & 2B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & 2A_{26} & B_{12} & B_{22} & 2B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & 2A_{66} & B_{16} & B_{26} & 2B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & 2B_{16} & D_{11} & D_{12} & 2D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & 2B_{26} & D_{12} & D_{22} & 2D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & 2B_{66} & D_{16} & D_{26} & 2D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{x0} \\ \epsilon_{y0} \\ \epsilon_{xy0} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 $[A]$ 는 인장 강성도 matrix로서 힘 N_i 가 적층평판에 가해졌을 때 $x-y$ 평면에서 변형이 얼마만큼 발생했는가를 말해주는 척도이며, $[D]$ 는 굴곡 강성도 matrix로서 모멘트 M_{ij} 가 적층평판에 가해졌을 때 $x-y$ 평면에서 얼마만큼 굴곡 되는가를 나타내는 척도이다. 또한, $[B]$ 는 연계 강성도 matrix로서 $x-y$ 평면 방향으로 힘을 받을 때 생기는 휨과 비틀림 변형의 정도를 나타낸다. 만일, 복합 적층평판이 중간면에 대해 대칭이라면 $B_{ij} = 0$ 이 되며, 토목공사의 주요 구조물의 경우 두꺼운 적층을 필요로 하므로 적층수의 증가로 B matrix는 감소한다.

3. Bentley Creek FRP Bridge의 재원 및 특징

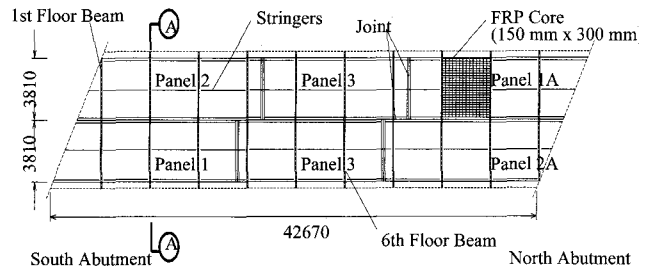


Fig. 6 Bentley Creek 복합재료 교량상판 구조물 (New York, USA)

본 연구에서 모델로 삼은 Bentley Creek 교량에 대하여 간단히 설명하면 Fig. 4에서 보이듯이 Bentley Creek 교량은 단순지지 된 하나의 스패를 가진 복합재료 상판-강재 트러스 교량 구조이다. 교량의 길이는 42.7m이고, 폭은 7.3m, 27도의 Skew로 되어 있으며, 하부 구조는 보의 횡축 중심간 간격이 4.72m이고, H 형강으로 구성되어 있고, 인도는 동쪽 트러스 밖으로 1.85m의 폭을 가지고 위치하고 있다. 교량 상판은 Fig. 6에서 보듯이 폭 3.8m, 길이가 12.8m에서 16.2m까지 변하는 총 6개의 복합재료 패널들로 구성되어 있으며 끝 패널은 27도 각도를 가진다. 복합재료 패널들의 중심구조는 Fig. 7에서 보이듯이 E-Glass fiber로, 152mm×305mm×350mm의 일정한 블록 형태로 구성되어 있으며 진공상태를 위해 비닐 에스테르가 resin으로 주입되어 사용되었다. 복합재료 패널들은 교통 방향의 횡축 방향 보 사이 폭으로

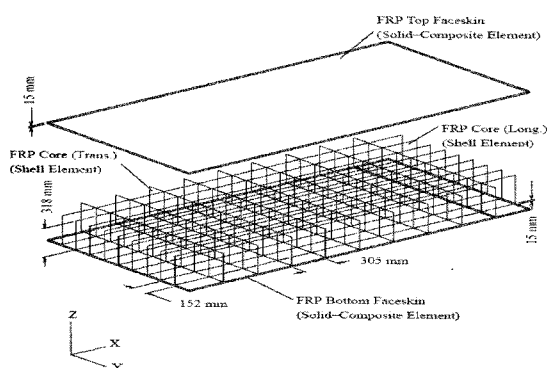


Fig. 7 Bentley Creek 복합재료 교량 상판의 모습

설계되었고 종축 보들은 비록 그들이 다른 하중 목적에 부합하지 않더라도 횡축 구조에 저항하기 위하여 만들어졌다. 복합재료 상판과 보의 플랜지와 접속부위는 22mm 직경의 높은 강도의 볼트로 부착되어 있으며, 25mm의 볼트 구멍들은 무수축 그라우팅으로 가득 채워져 있어 복합재료 상판과 횡축 보의 상부 플랜지 사이는 약간의 복합적 거동을 보이고 있다.

모델이 된 Bentley Creek 교량은 AASHTO MS23 활하중에 의해 설계되었으며, 본 연구에서는 복합재료의 성질을 효과적으로 표현하기 위하여 직교 이방성의 재료 성질 및 Fiber 배열 방향을 고려하여 복합재료 교량의 거동을 해석하였다. 본 연구에 사용된 응력은 복합재료 극한강도의 29%로 제한하였고 처짐은 길이/800으로 제한하여 해석을 수행하였다.

3.1 3차원 유한요소 모델링

본 연구에서는 보다 실무적인 해석적 연구를 위하여 이미 대중적으로 널리 활용되고 있는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 유한요소해석의 전·후처리 해석프로그램으로는 MSC. patran을 사용하였다. Fig. 8에서 보여지 듯 본 연구의 유한요소해석에서는 총 44782개 Elements와 46548개 Nodes들로 복합재료 상판을 3-D 모델링 하였으며, Table 1에서 보이듯이 Element Type으로는 일반적으로 Shell Model에서 사용되는 4개의 Node를 가진 S4R5와 Solid Model에서 사용되는 8개의 Node를 지

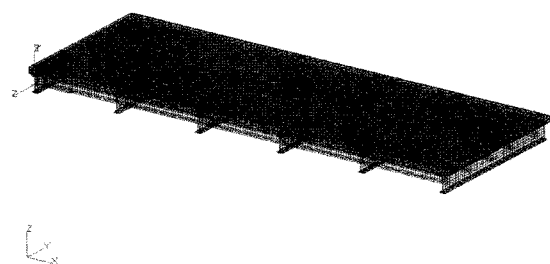


Fig. 8 FRP DECK의 3차원 유한요소 모델

Table 1 정적 해석 시 Element Type (ABAQUS)

Name	Element Type	Element Description
Web	S4R5	4-node doubly curved thin shell, reduced integration with hourglass control, using five degrees of freedom per node
FRP Core		
Flange	C3D8	8-node linear brick element
Interface		
Neoprene Shim		
FRP Faceskin		
Epoxy Joint		
Acrylic Adhesive		
FRP Splice Plate		

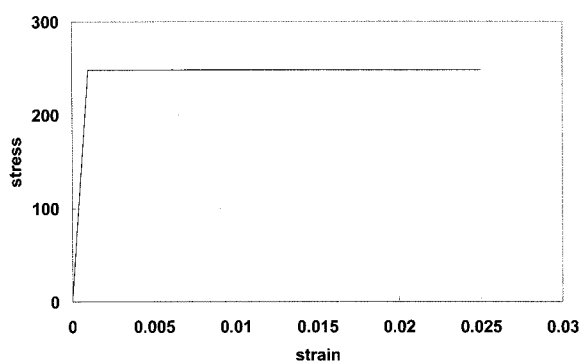


Fig. 9 Stress-Strain relationship of Steel (AASHTO-M270)

닌 Continuum Element인 C3D8을 사용하여 해석을 수행하였다. 특히 적층에 따른 모델을 표현하기 위하여 복합재료 바닥판은 8개의 Node를 지닌 Composite Continuum Element를 사용하였다.

본 연구에서는 대상교량의 기하학적 형상을 토대로 유한요소 모델링의 간략화 및 파괴 해석 절차의 단순화를 위하여 Bentley Creek의 교량의 일부분, 즉, 남쪽 교대에서 가까운 첫 번째 횡축 보부터 여섯 번째 횡축 보 사이 구간을 모델화 하였다. 횡축 보는 단순히 주 트러스에 의해 지탱되고 있는 만큼 단순 지지 상태로 설정하였다. 즉, 힌지 지점에서는 X, Y, Z축의 모든 움직임과 Y, Z축의 회전을 아래쪽 플랜지의 가장자리를 따라 제한하였고 롤러 지점에서는 X, Z축의 움직임과 Y, Z축 회전을 아래쪽 플랜지의 가장자리를 따라 제한하였다. 횡축 보와 종축 보의 재료인 Steel은 Grade 36으로 그 관계도가 Fig. 9에 나타나 있다. 또한 복합재료 패널의 물성 값은 Failure Analysis of Fiber-Reinforced Polymer Bridge Deck System(Mathee et al, 2002)을 참고하여 사용하였으며 그 성질은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2 FRP Mechanical Properties

Name	Properties	Value
Lamina 1	탄성계수 E_{11}	25000MPa
	탄성계수 E_{22}	19500MPa
	전단 탄성계수, G_{12}	7500MPa
	Poisson 비	0.20
	극한 인장 응력 X_t	310MPa
	극한 압축 응력 X_c	221MPa
	극한 전단 응력 X_s	114MPa
Lamina 2	탄성계수 E_{11}	31500MPa
	탄성계수 E_{22}	20000MPa
	전단 탄성계수,	7000MPa
	Poisson 비	0.22
	극한 인장 응력 X_t	621MPa
	극한 압축 응력 X_c	476MPa
	극한 전단 응력 X_s	121MPa

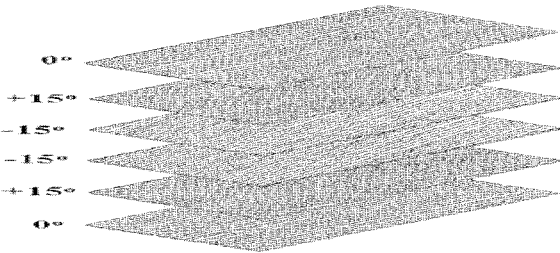


Fig. 10 ply orientation

또한 본 연구에서는 적층구조인 복합재료의 보다 정밀한 해석을 위하여 Fig. 10과 같이 각 층의 fiber 배열 방향 및 두께를 고려한 교량 시스템을 모델화하였고, 1999년 뉴욕 교통부 주관 하에 시행된 Bentley Creek 교량의 하중 실험 결과를 살펴보면 Truck하중이 재하 되었을 때 교량이 Non-composite거동을 보였다. 따라서 복합재료 패널들과 Shim, Shim과 횡축 보 사이의 interface를 매우 낮은 중축 강성과 높은 횡축 강성의 직교 이방성 물성 값을 부과하여 교량 시스템을 모델화 하였다.

3.2 3차원 비선형 유한요소해석

본 연구의 유한요소 모델의 검증을 위해 사용된 Bentley Creek 교량의 정적 하중 현장실험은 New York주 교통부로부터 1999년 11월 17일에 행해졌다. 이 실험의 목적은 크게 복합재료 바닥판과 횡축 보 사이의 복합적 거동의 존재 여부와 복합재료 바닥판의 하중 등급 및 유한요소 모델 개발을 위한 변형률 데이터를 획득하는데 있었으며, 현장 실험에서 사용된 하중은 Table 2에 나타나 있는 표준 H-20 AASHTO 활하중을 사용 하였다. 표준 H-20 AASHTO 활

Table 3 표준 H-20 AASHTO 활하중 (단위 kN)

Truck	Front Axle		Rear Axle		총 하중
	Left	Right	Left	Right	
A	44	41	64	65	214
B	45	42	66	68	211

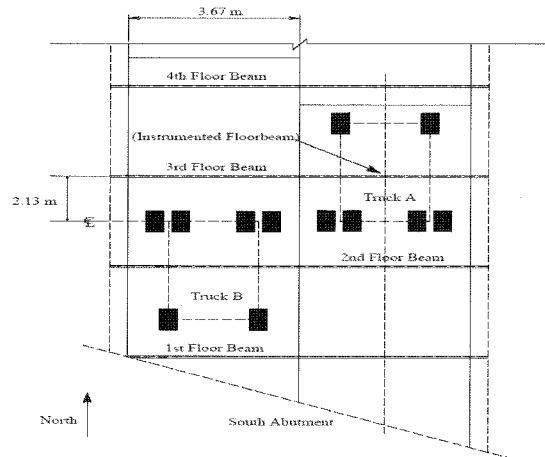


Fig. 11 Load Case 1의 트럭 하중 위치

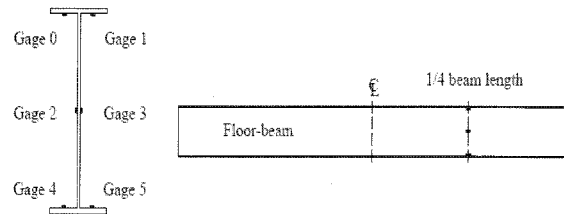


Fig. 12 Floor Beam의 Strain Gage 위치

하중은 미국 내 거의 모든 교량의 설계하중인 HS-20 AASHTO 활하중에서 제일 뒤축이 없는 하중으로 일반 덤프트럭과 거의 유사한 형태이다. 본 연구에서는 현장 실험의 Load Case 1(Fig. 11)의 변형률 데이터를 토대로 유한요소 모델을 확인하였다.

유한요소 모델의 확인을 위하여 실험에서 재하된 H-20 AASHTO 활하중을 모든 지정된 실험 위치와 동일하게 복합재료 바닥판 위에 재하하였고, 타이어 접촉면 형태 표현의 어려움 때문에 균일하게 분배된 타이어 압력을 집중하중으로 재하하였다.

Fig. 12에서 보이듯이 Gage 1~5는 남쪽 교대로부터 세 번째 횡축 보에 설치 된 것으로 Gage 1은 상부 플랜지에 설치되어 압축응력을 나타내는 음의 변형률을 읽도록 하였다. 마찬가지로 Gage 4와 5는 하부 플랜지에 설치되어 인장력을 나타내는 양의 변형률을 읽도록 하였다. Gage 2와 3은 웹 부분에 설치되어 있으며 하중 재하 실험결과 웹의 중심축 변형률이 0에 근접하였으며, 이는 교량의 중립축의 깊이가

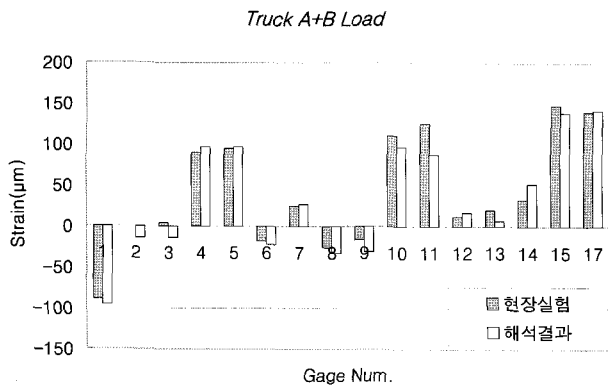


Fig. 13 유한요소 해석 결과와 현장 시험 결과 비교 (Load Case 1)

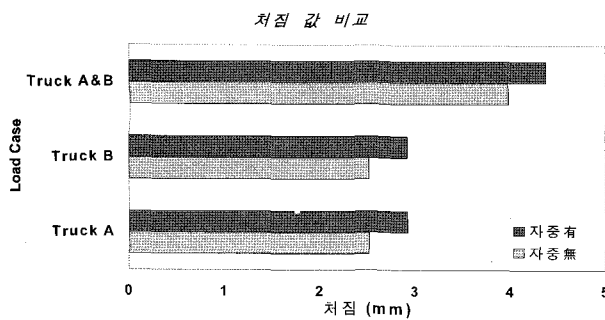


Fig. 14 자중고려로 인한 각 하중 case 별 처짐 값 비교

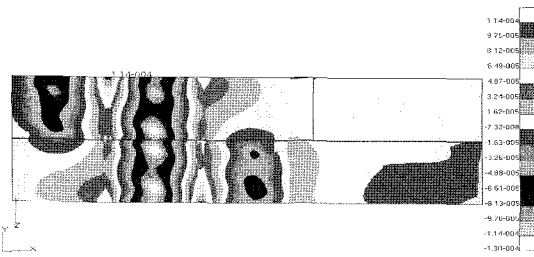


Fig. 15 x방향 strain(Load case1)

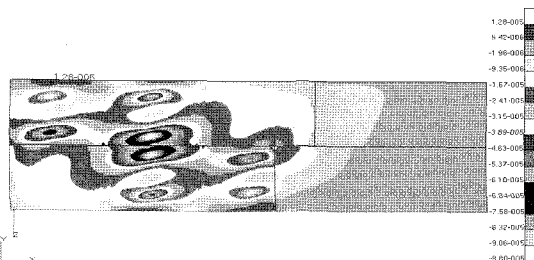


Fig. 16 y방향 strain(Load case1)

Steel 횡축 보만의 중립축의 위치와 일치함을 나타낸다. 이는, 즉 교량이 힘의 지배를 받을 때 Noncomposite 거동을 보임을 의미한다.

본 연구에서는 실제 교량의 거동 및 파괴모드 분석에 앞서 본 연구에서 제안한 해석적 모델링의 검증을 위하여 3차원

유한요소해석에서 얻어지는 결과와 현장 시험 결과를 비교하였다. 또한 미국 뉴욕 주 교통부에서 수행되어진 유한요소해석 결과와의 비교를 위하여 각 하중 case별 처짐 결과도 살펴보았다. 본 연구의 유한요소해석에서 얻어진 각 측정 위치에서의 변형률은 Bentley Creek 교량의 하중시험에서 측정된 결과와 비교한 Fig. 13에서 보이듯이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 실제적으로 해석치와 실험치의 결과 비교에서 약간의 오차들이 발생하는데, 이는 복합재료 교량상판과 강재 거더 사이의 interface에서 발생하는 friction의 영향과 이에 관한 정확한 데이터 부족, 복합재료 제작 시 고려되어진 적층 fiber의 배열 및 물성치의 변화, 실험 시 발생하는 실험적 오차 및 주변 상황에 의한 영향 등에 의한 영향으로 판단되며 이들 영향요소가 실제적으로 해석적 연구에서는 정확하게 고려할 수 없었다. Fig. 14는 각 하중 case 별 자중의 고려 유무에 따른 처짐 값의 비교를 나타낸 것으로 자중의 고려로 처짐 값이 약간 증가함을 볼 수 있지만 대체적으로 그 영향이 극히 미소한 것을 알 수 있다. 이는 복합재료 바닥판의 사용으로 기존 설계교량의 역할에서 자중의 감소로 인한 활하중의 증가를 가져올 수 있음을 의미하기도 한다.

4. 복합재료(FRP) 교량시스템의 파괴 매카니즘

4.1 섬유강화 복합재료(FRP)의 파괴 이론

Tsai-Hill 파괴기준은 등방성 재료의 파괴기준으로 널리 사용되고 있는 Von Mises 항복이론에 대해 Hill이 비등방성의 연성재료에 관한 파괴기준으로 수정한 것을 기초로 하여 Azzi와 Tsai에 의해 횡등방성인 직교성 복합재료의 파괴기준으로 재 수정한 이론이다. 섬유가 한 방향으로 놓인 단일방향 단층(lamina)의 1-2평면에 대한 평면응력에서, 단층의 주요강도 X , Y 와 S 범위 내에서 지배적인 파괴특징은 식 (11)에서 보여준다.

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (11)$$

여기서, S 는 직교성 복합재료의 극한 전단강도이고, X 와 Y 는 직교성 복합재료의 섬유방향과 횡방향에 대한 극한 인장 및 압축강도로서 압축응력과 인장응력에 대해 다음과 같이 다르게 적용된다.

$$X = \begin{cases} X_t & \text{when } \sigma_1 > 0 \\ X_c & \text{when } \sigma_1 < 0 \end{cases}, Y = \begin{cases} Y_t & \text{when } \sigma_2 > 0 \\ Y_c & \text{when } \sigma_2 < 0 \end{cases} \quad (12)$$

여기서,

X_t : 섬유방향 극한 인장강도,

X_c : 섬유방향 극한 압축강도

Y_t : 횡방향 극한 인장강도,

Y_c : 횡방향 극한 압축강도

직교 이방성 재료의 파괴를 예측하는 또 다른 파괴기준인 최대응력 파괴이론은 식 (13)에서 보여준다.

$$Max\left(\frac{\sigma_{11}}{X}, \frac{\sigma_{22}}{Y}, \left|\frac{\sigma_{12}}{S}\right|\right) \leq 1 \quad (13)$$

본 연구에서는 Bentley Creek교의 파괴형태를 예측하기 위해 부가하중 정적해석과 좌굴해석을 별도로 실시했다. 앞서 언급된 바와 같이 트럭 A와 B가 동시에 재하 되었을 때 복합재료 바닥판에 최대수직 변형을 일으켰다. 따라서 본 연구에서는 같은 트럭 하중 형상을 부가하중 정적해석과 좌굴 해석에 이용하였다.

4.2 국내 설계하중에 의한 복합재료 상판의 파괴 예측

Bentley Creek 교량은 앞서 언급한 바와 같이 H-20 AASHTO 활하중에 충분한 강도를 지니도록 설계된 교량으로 국내 설계 기준으로 볼 때 DB-18하중에 준하는 2등급 교량으로 본 연구에서는 차량 재하 실험 결과와 비교하여 검증된 Bentley Creek 교량 모델에 국내 설계 하중인 DB-18하중을 재하 하여 복합재료 바닥판의 거동을 연구하였다.

본 연구에서는 복합재료 바닥판의 차량 하중 증가에 따른 거동을 연구하기 위하여 “차륜 하중 지표”를 정의하여 복합재료 바닥판의 파괴 예측을 연구하였다. 차륜 하중 지표는 초기 차륜 하중에 대한 적용된 차륜하중의 비로 정의된다. 예를 들어, 두 번째 하중 지표의 경우 초기 차륜 하중의 두 배의 하중이 증가 하는 것을 의미한다. 즉, 트럭의 좌·후 축 하중이 약 141kN으로 증가하는 동안 트럭의 좌·전축 하중은 약 35kN으로 증가 될 것이다.

각각의 하중 증가에 따른 Tsai-Hill 파괴기준지표는 Fig. 17에서 보이고 있다. 복합재료 바닥판이 두 부분 즉, Faceskin과 Core요소로 이루어 졌으므로, 모든 단층의 “첫 번째 층 파괴”의 위치를 면밀히 관찰하였다. 또한 각 층의 파괴에 따른 감소 및 재료 강성의 증가에 따른 점진적인 파괴 대신에 한 층의 최초 파괴가 모든 적층판(laminate)의 파괴를 나타낸다고 가정하였다. 그러나 Matrix에 균열이 가는 형태의 최초파괴가 적층판 파괴를 가져오게 하지 않을지도 모르므로 “첫 번째 층 파괴 표준”은 적층판 파괴 하중이 매우

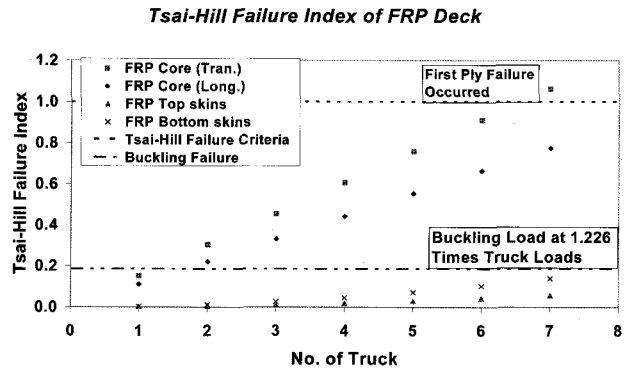


Fig. 17 FRP 상판의 Tsai-Hill 파괴 지표

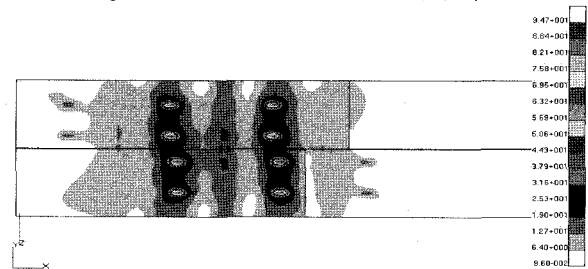


Fig. 18 Stress of Top Skin(Wheel Load Index=7)

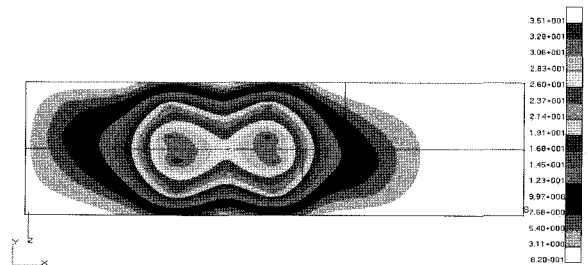


Fig. 19 차륜하중지표 7에서의 처짐 분포도(단위:mm)

보수적임을 의미한다고 할 수 있다(Aref and He 2001).

복합재료 바닥판의 각 요소에 대한 Tsai-Hill 파괴지표는 식 (12)와 ABAQUS의 “TSAIH” 함수를 이용하여 계산하였다. 그 결과 Fig. 17에서 보듯이 여러 가지 차륜 하중 지표에서 복합재료 바닥판의 구성요소 중 Faceskins에 비하여 Core요소의 Tsai-Hill 파괴지표의 증가가 크며 약 6.8의 차륜 하중 지표에서 복합재료 상판의 횡 방향 Core요소의 복합재료가 파괴에 이를 것으로 예측되고 있다. 이는 복합재료 바닥판의 구성 요소 중 Faceskin요소는 Core요소가 파괴에 이르기 전 즉, 차륜 하중 지표 6.8에 준하는 활하중을 전달 하는데 있어 충분한 여력을 가진다는 것을 의미한다.

4.3 보의 파괴 예측

본 연구에서는 교량의 전체적인 파괴 예측을 위하여 복합

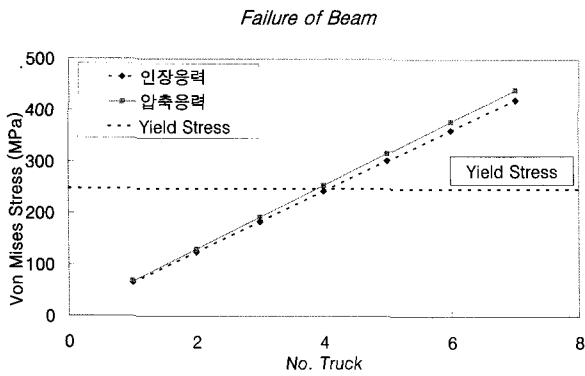


Fig. 20 Beam의 Von-Mises 응력

재료 바닥판의 파괴 예측뿐만 아니라 강재 보의 파괴 예측 또한 연구하였다. 보에서 일어날 수 있는 파괴모드는 크게 두 가지 형태가 있는데 휨과 전단응력에 의한 국부 좌굴 파괴와 부재 강도 파괴가 그것이다.

부재 강도 파괴의 경우, 등방성 재료의 응력상태를 고려하는 Von Mises 파괴기준을 사용하여 파괴를 예측하였다. Fig. 20은 차륜 하중 지표에 따른 보의 인장응력 및 압축응력의 변화를 보여준다. Fig. 20에서 보듯이 차륜 하중 지표 4.0에서 횡 방향 보의 Von Mises 응력은 강재의 항복 강도 248MPa보다 약간 큰 255MPa 보여준다. 그러므로 복합재료 바닥판이 파괴에 이르기 전에 보의 항복응력을 초과하므로 파괴에 이른다 고 볼 수 있다.

두 번째 파괴 모드인 국부 좌굴 파괴 모드는 ABAQUS의 "BUCKLE" 함수를 사용하여 좌굴 해석을 실행·예측하였다. 차륜 하중 지표와 동일한 트럭 축 형상의 DB-18 하중을 복합재료 바닥판 위에 재하 하여 총 10개의 파괴 모드 값을 계산, 초기 5개의 파괴 모드만을 좌굴모드로 표현하였다(Table 4). 첫 번째 좌굴 모드는 복합재료 바닥판의 파괴 하중 지표인 6.8 과 보강도 파괴 지표인 4.0에 비하여 매우 작은 1.226 차륜 하중 지표를 받을 때 발생할 것을 나타냈다. 차륜 하중 지표 1.226은 각 위치에 약 389kN(40tf)의 하중을 가지는 트럭이 재하 되었을 때를 의미하며 첫 번째 좌굴 모드 형상을 Fig. 20에서 보이고 있다. Table 4와 Fig. 21에서 표현 되었듯이 좌굴 파괴가 이 교량의 전체 구조적 파괴를 지배할 것으로 예측되었다. 이는 실제 제작되어진 복합재료 바닥판의 고 강성에

Table 4 Buckling Mode

Mode	Eigenvalues	위치
1	1.2273	상부 플랜지 세 번째 보, 서쪽 끝
2	1.2535	상부 플랜지 세 번째 보, 동쪽 끝
3	1.4202	상부 플랜지 세 번째 보, 중앙
4	1.4427	상부 플랜지 세 번째 보, 중앙
5	1.6954	상부 플랜지 세 번째 보, 중앙

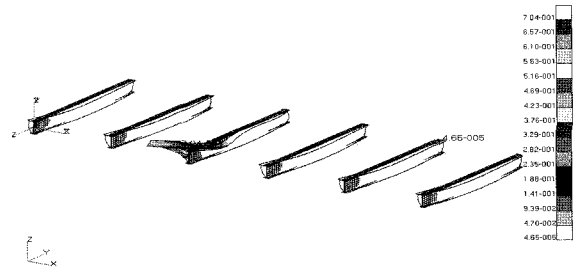


Fig. 21 첫 번째 모드 좌굴 하중에서의 Von-Mises 응력 분포도

의하여 재하 하중에 의한 하부 보의 좌굴이 선행되는 것으로 판단되며, Noncomposite 거동 일 경우 복합재료 바닥판이 과다 설계되었음을 의미한다. 그러나 이는 복합재료 패널들의 이음부의 접착제의 강도가 충분히 커 이음부 파괴가 일어나지 않았음을 가정으로 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 실제 미국 뉴욕 주에 설계, 시공되어진 여러 가지 복합재료 상판교량구조물 중 비교적 실험결과가 잘 정리된 Bentley Creek 트러스 교량 구조물을 대상으로 유한요소해석 모델을 제안하여 그 결과를 비교, 검증하였다. 본 연구에서 제안된 해석모델링의 경우 해석 및 실험결과 비교를 통하여 그 신뢰성을 증명하였고 실제 복합재료 교량시스템의 설계 및 제작환경을 고려하여 국내 설계 하중아래에서의 복합재료 바닥판의 거동변화 및 파괴 메커니즘을 조사, 분석하였다. 해석적 거동평가에 있어 대상구조물의 복합재료 패널 이음부 모델링의 경우 그 강성이 견고하여 일체화된 구조체로서 충분한 하중 전달 능력을 가지는 것으로 가정, 해석적 연구를 수행하였다.

본 연구에서 나타난 결론으로는 실제 복합재료 바닥판의 경우, 주형 보와 바닥판이 Noncomposite 거동하는 경우 복합재료 바닥판의 파괴가 일어나기 전 횡축 보에서의 국부 좌굴 파괴가 교량의 파괴를 선행하여 지배하는 것으로 예측되었다. 이는 실제 제작되어진 고 강성 복합재료 바닥판에 의하여 재하 하중에 의한 하부 보의 좌굴이 선행되는 것으로 판단되며, Noncomposite 보-바닥판 설계에 있어 복합재료 바닥판이 과다 설계되었음을 의미한다. 실제적으로 복합재료 바닥판들과 보의 Composite 거동을 고려한 설계의 경우, 이에 대한 설계 기준과 평가가 더 엄격히 적용되어야 할 것이며 이를 위한 연구가 수행되어야 할 것이다. 본 연구에서 제안된 실제 기 시공된 복합재료 교량의 설계 및 제작기준에 대한 거동평가 결과들은 향후 토목분야에서 점진적으로 수요증가가 기대되는 복합재료 교량의 표준시방 기준 및 설계지침 수립에 도움이 되리라 기대하며 향후 화재나 열에 의

한 거동변화와 재료의 경량성에 따른 진동특성 조사에 대한 연구도 복합재료 교량의 안정성 및 경제적 설계를 위하여 부가적으로 연구되어질 필요성이 있다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2005년도 전력선행기술연구 지원사업(R-2005-7-010)과 2004년 한국학술진흥재단 신진교수 연구지원사업(2004-D00397)의 공동지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 문창권, 타카꾸 아끼라** (2001) 고분자 복합재료, 시그마프레스, p.358.
- 최영민, 황운국** (2002) 섬유보강 복합재(FRP) 활용 교량의 기술동향, 한국강구조학회지, 14(3) pp.126~133.
- Agarwal, B.D., L.J. Broutman** (1990) Analysis and Performance of Fiber Composites, *John Wiley & Sons, Inc.*, p.449.
- Alampalli, S., J.Kunin** (2001) Load Testing of an FRP Bridge Deck on a Truss Bridge, Special Report 137, Transportation Research and Development Bureau, NYSDOT, Albany, New York
- Amjad J. Aref, Methee Chiewanichakorn** (2001) The Analytical Study of Fiber Reinforced Polymer Deck on an Old Truss Bridge, NYDOTS, New York
- Aref, A.J., He Y.** (2001) Finite Element Analysis of A Fiber Reinforced Polymer Bridge Superstructure, Report submitted to New York State Department of Transportation, Transportation Research Development Bureau, and Transportation Infrastructure Research Consortium, p.151.
- Harik, I.E., Szak, P.J., Robson, B.N., Hopwood, T.H., Witcher, D., Brailsford, B.** (1996) Hybrid Composite I-Girder Pedestrian Bridge, Int. SAMPE Tech. Conference, SAMPE Symp. Exhibit, Evolving Technologies for the Competitive Edge, Book 1, 42, pp.99~108.
- Hibbitt, Karlsson, Sorensen** (2000) ABAQUS/Standard User's Manual-Version 6.5, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- Hill, R.** The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, London, p.318.
- Hill, R.** (1950) The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, London, p.318.
- Hyer, M.W.** (1997) Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials, *McGraw-Hill*, p.627.
- Jones, R.M.** (1990) Mechanics of Composite Materials, 2nd Edition, *Taylor & Francis*, p.519.
- Klaiber, F.W., Dunker, K.F., Wipf T.J., Snader W.W.** (1987) Methods of Strengthening Existing Highway Bridges, NCHRP Rep 293, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- MSC/Patran 2003-User's Guide**, MSC. Software Corporation.
- Robert M. Jones** (1998) Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis, USA, p.519.