

화재 발생 시 열응력에 의한 복합재료 교량 시스템의 거동에 관한 연구

Numerical Study of Lightweight FRP Bridge Deck System
Induced by Thermal Stress by Fire

정우영* 박희광** 박문호*** 이형길****
Jung, Woo-Young Park, Hee-Kwang Park, Moon-Ho Lee, Hyung-Kil

Abstract

This analysis evaluated small and large temperature gradient effects on the FRP deck considering lightweight of FRP deck and ply orientations at the interface between steel girders and FRP deck. Finally, the analytical results shows the possible failure mechanism of FRP deck under various temperature changes and its corresponding index is suddenly varied depending on the rapid change of temperature on the deck plate.

요 지

본 연구는 복합재료 교량의 온도변화에 따른 정밀해석과 이를 통한 복합재료 교량의 파괴거동을 조사하였다. 그 결과 매우 높은 주변 온도에서 복합재료 상·하부 표면의 파괴지표가 Core 요소의 파괴지표에 비하여 상대적으로 작은 값을 나타내어 충분한 온도 수용력이 있음이 나타났으며, 화재로 인해 급격한 온도변화 발생 할 경우 vinyl ester resin의 유리변화 온도 즉, 504°C에 근접함에 따라 국부적인 지역의 큰 온도경사가 발생하여 Tsai-Hill 파괴지표 또한 크게 변함을 나타냈다.

Keywords : FRP Bridge, Heat transfer analysis, Failure Mechanism

핵심 용어 : 복합재료 교량, 열전달 해석, 파괴 메커니즘

* 정회원, 강릉대학교 공과대학 토목공학과 조교수

** 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

*** 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

**** 강릉대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

E-mail : woojung@kangnung.ac.kr 033-640-2421

•본 논문에 대한 토의를 2006년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2007년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 연구 배경 및 목적

최근 많은 토목공학자들 사이에서 신소재 복합재료인 FRP(Fiber glass Reinforced Plastics)를 이용한 구조물 보수·보강에 많은 관심을 일으키고 있다. 이는 토목구조물 내에서의 복합재료가 가지는 구조적 장점, 즉 단위중량에 대한 높은 강도와 비탄성계수, 그리고 내부식 및 내구성이 우수한 재료적 특성 때문에 특히, 최근에 유럽이나 미국, 캐나다 등 선진국에서는 복합재료를 사용한 교량 바닥판 형식을 개발하여 연구 및 시공하고 있으며 국내에서는 2002년 5월에 ㈜원창엔텍에 의하여 '영월'에 최초로 설치된바 있다.

특히, 국내의 경우 복합재료가 건설재료로서 사용되기 시작한 것은 최근으로 현재까지 대부분 탄소섬유 쉬트(sheet)를 이용한 열화 손상된 콘크리트 구조물의 보수 및 보강의 적용과 철근 대용으로 FRP Rebar 또는 FRP 텐던에 관한 연구가 주를 이루고 있으나 이 또한 초기단계 연구로서 실용화를 위해 많은 연구가 요구되어지고 있다. 국내의 복합재료 바닥판의 연구를 살펴보면 국민대학교와 건설기술연구원의 공동 연구가 진행되어 (주)국민 CI에 의해 복합재료 바닥판을 이용한 교량이 시공되었으며, 건설기술연구원의 장수명 합리와 교량바닥판 개발의 일환으로 복합재료·콘크리트 합성교량 바닥판의 연구가 현재 진행 중에 있다. 그러나 국내의 복합재료 교량구조물의 실무 적용 및 연구는 시작 단계에 있는 실정이다. 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 할 수 있다. 그러나 이러한 대체 공법의 실무에서의 대중적 활용을 위해서는 무엇보다도 먼저 일반 건설 기술자들이 쉽게 활용할 수 있는 설계, 제작, 시공 및 유지관리를 위한 기준이나 지침 등이 반드시 필요하고, 이런 규정의 제작이 요구되어지는데 현재 국내에서도 많은 연구가 수행되어지고 있다.

본 연구는 복합재료 교량시스템의 실용화를 위한 초기단계 연구로서 과거 본 연구자가 수행한 Bentley Creek 복합재료 교량상판구조물(Fig. 1)의 정적하중



Fig. 1 Bentley Creek 복합재료 교량상판 구조물(New York, USA)

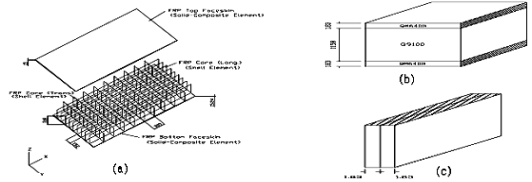


Fig. 2 Bentley Creek 복합재료 교량상판 단면

하의 거동 분석을 토대로 복합재료 교량 바닥판의 상용화에 있어 가장 중요한 문제점으로 지적되고 있는 온도에 관계된 재료 특성을 고려한 구조물 거동들, 특히 화재나 극한 온도변화에 따른 복합재료의 내구성 감소에 따른 복합재료 교량상판구조물의 파괴거동을 조사하는데 그 목적이 있다.

2. 복합재료의 역학적 Mechanism

일반적인 복합재료의 구성은 하층의 대부분을 견디는 fiber와 각각의 섬유를 제자리에 고정시키고 보호하는 matrix로 구성되며 둘 또는 그 이상의 단층(lamina)들을 적층하여 만들기 때문에 1방향과 2방향의 기계적 성질이 다른 이방성 재료의 특성을 가진다.⁽¹⁾ 즉, 각 방향에 따라 탄성계수뿐만 아니라 전단탄성계수 및 열팽창계수 등 또한 섬유방향에 따라 다르게 나타난다. 본 연구에서는 보다 간단한 해석을 위하여 다음과 같은 가정하에 해석을 수행 하였다.

- a. 각 layer간의 접촉은 완벽하다.
- b. 접촉층은 매우 얇아서 전단 변형이 없고 층과 층 사이의 변위는 연속적이다.
- c. 각층은 균질한 직교이방성 재료이다.
- d. 온도 변화에 따른 재료의 성질은 무시한다.
- e. 2방향과 3방향의 재료 성질은 동일하다.
- f. 모든 방향에서의 열팽창계수는 동일하다.

적층형 복합재료에서의 온도 영향에 의한 응력·변형률 관계는 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$\sigma_i = Q_{ij}(\epsilon_j - \alpha_j \Delta T) \quad (1)$$

식 (1)에서의 α_j 는 j 방향의 열팽창계수이며, ΔT 는 온도 변화를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x - \alpha_x \Delta T \\ \epsilon_y - \alpha_y \Delta T \\ \gamma_{xy} - \alpha_{xy} \Delta T \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Q_{11} &= E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32})/\Delta, & Q_{22} &= E_2(1 - \nu_{31}\nu_{13})/\Delta \\ & & Q_{33} &= E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21})/\Delta \\ Q_{12} &= E_1(\nu_{21} - \nu_{31}\nu_{23})/\Delta = E_2(\nu_{12} - \nu_{32}\nu_{13})/\Delta \\ Q_{13} &= E_1(\nu_{31} - \nu_{21}\nu_{32})/\Delta = E_3(\nu_{13} - \nu_{12}\nu_{23})/\Delta \\ Q_{23} &= E_2(\nu_{32} - \nu_{12}\nu_{31})/\Delta = E_3(\nu_{23} - \nu_{21}\nu_{13})/\Delta \\ Q_{44} &= G_{23}, & Q_{44} &= G_{23}, & Q_{44} &= G_{23} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)는 매트릭스 형태로 나타내어 진 형태이다. 식 (3)에서의 E_{11} , E_{22} , E_{33} 는 1, 2, 3 방향의 탄성계수이며 ν_{ij} 는 i 방향으로 응력이 작용 할 때 j 방향으로 발생하는 변형도를 나타내는 Poisson's ratio이다. G_{12} , G_{13} , G_{23} 는 각각 1-2, 1-3, 2-3평면에서의 전단계수이다.

3. Bentley Creek FRP Bridge의 재원 및 특징

본 연구에서 모델로 삼은 Bentley Creek 교량에 대하여 간단히 설명하면 Fig. 1에서 보이듯이 Bentley Creek 교량은 단순지지 된 하나의 스패를 가진 복합재료 교량 상판을 가진 스틸 트러스 구조로 바닥판은 폭 3.8m, 길이가 12.8m에서 16.2m까지 변하는 총 6개의 복합재료 패널들로 구성되어 있으며 끝 패널은 27도 각도를 가진다. 복합재료 바닥판과 보의 플랜지와 접속부위는 22mm 직경의 높은 강도의 볼트로 부착

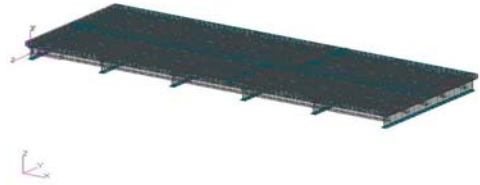


Fig. 3 FRP DECK의 3차원 유한요소 모델

되어 있으며 25mm의 볼트 구멍들은 무수축 그라우팅으로 가득 채워져 있어 복합재료 상판과 횡축 보의 상부 플랜지 사이는 약간의 복합적 거동을 보이고 있다.

본 연구에서는 유한 요소 해석 프로그램으로 ABAQUS를 사용하였으며, 전·후처리 프로그램으로는 Msc. patran을 사용하였다. Fig. 3에서 보이듯이 총 44782개 Element와 46548개 Node 들로 복합재료 상판을 모델링 하였으며 복합재료의 성질을 효과적으로 표현하기 위하여 직교 이방성의 재료 성질 및 Fiber 배열 방향을 고려하여 복합재료 교량의 거동을 해석하였다.

유한요소 모델의 검증을 위해 사용된 Bentley Creek 교량의 정적 하중 현장실험은 New York 주 교통부로부터 1999년 11월 17일에 행해졌다. 현장 실험에서 사용된 하중은 Table 1에 나타나 있는 표준 H-20 AASHTO 활하중을 사용 하였으며, 본 연구에서는 현장 실험의 Load Case 1(Fig. 4)의 변형률 데이터를 토대로 유한 요소 모델을 확인하였으며, 실험에서 재하된 H-20 AASHTO 활하중을 모든 지정된 실험 위치와 동일하게 복합재료 바닥판 위에 재하하였고 타이어 접촉면의 형태의 표현의 어려움 때문에 균일하게 분배된 타이어 압력을 집중하중으로 재하 하였다.

Fig. 6에서 보이듯이 Gage 1~5는 남쪽 교대로부터 세 번째 횡축 보에 설치 된 것으로 Gage 2와 3은 웹 부분에 설치되어 있다.

Table 1 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

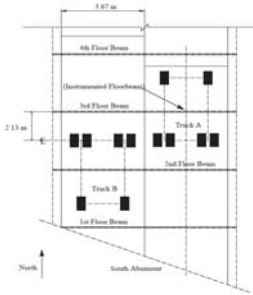


Fig. 4 Load Case 1의 트럭 하중 위치

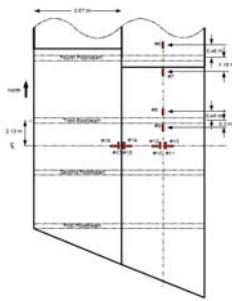


Fig. 5 FRP DECK의 Strain Gage 위치

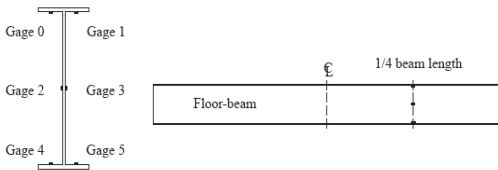


Fig. 6 Floor Beam의 Strain Gage 위치

하중 재하 실험 결과 웹의 중심축 변형률이 0에 근접하였으며 이는 교량의 중립축의 깊이가 Steel 횡축 보만의 중립축의 위치와 일치함을 나타낸다. 이는, 즉 교량이 휨의 지배를 받을 때 Noncomposite 거동을 보임을 의미한다.

본 연구의 유한요소 모델의 해석에서 얻어진 각 위치에서의 변형률은 Bentley Creek 교량의 하중시험에서 측정된 변형률들과 Fig. 7에서 보이듯이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 유한요소 해석에서 얻어진 변형률 값이 하중 시험에서 측정된 변형률 값과 약간의 오차가 있는 것은 interface 성질 및 실험 시

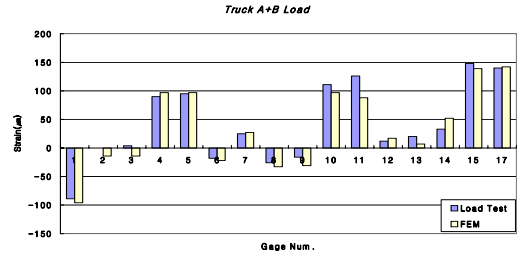


Fig. 7 유한요소 해석 결과와 현장 시험 결과 비교(Load Case 1)

온도 및 주변 상황에 대하여 해석적으로 고려할 수 없기 때문이다.

4. 열응력 해석

4.1 복합재료(FRP) 교량시스템의 파괴 Mechanism

직교이방성(orthotropic) 재료는 탄성계수와 같은 그 재료의 강도가 방향에 의존적이라는 사실로부터 응력범위가 매우 복잡해진다. 따라서 재료의 파괴 응력을 알기 위해서는 가능한 모든 방향의 강도 값들이 필요하게 되나 이는 물리학적으로 불가능하다. 따라서 단축 변형률 값을 기초로 주축 방향을 결정하고 직교이방성 재료의 주축 방향에 따른 실제 응력범위 변화와 적절한 강도와의 비교를 통한 파괴 응력 예측이 필요하다(Agawal and Broutman 1990). Hill(1950)에 의해 제안된 직교이방성 재료에 대한 항복기준은 일반적으로 복합재료의 파괴를 예측할 때 사용되며, 본 연구에서도 Tsai-Hill 파괴기준 식(4)을 사용하여 복합재료상판의 파괴를 예측하였다.

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (4)$$

4.2 열응력 해석 및 온도 경계조건

본 연구에서 열응력 해석 시 사용된 모든 재료의 재료 성질은 1997년 Hyer에 의해서 판명된 값들을 사

용하였다. 열응력 해석은 ABAQUS의 “Heat Transfer” 함수를 이용한 해석 후 그 결과를 정적 해석의 “Temperature” 함수에 적용시키는 두 단계로 접근하였다. 온도 변화에 따른 복합재료 교량의 거동을 해석적으로 연구하는데 있어서의 온도 경계 조건은 매우 중요하다 할 수 있다. 온도 경계를 어느 위치로 하는가에 따라 교량의 거동이 확연히 다른 양상을 나타내기 때문이다.

본 연구에서는 보다 정확한 온도 경계의 위치를 조사하기 위하여 시간에 따른 복합재료의 열전도를 우선적으로 연구하였다. 그 결과 본 연구에서 극한 하중으로 고려한 vinyl ester resin의 유리 변화 온도 500°C의 온도 경사가 주어질 경우 Fig. 8과 10에서 보듯이 약 다섯 시간이 지났을 때 복합재료의 열전도 값



Fig. 8 FRP 열전도 분포도

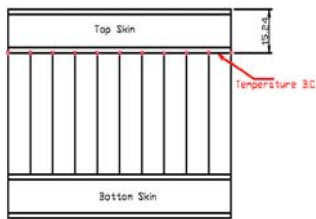


Fig. 9 FRP Deck 단면도

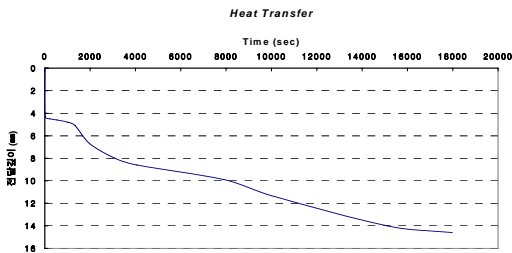


Fig. 10 시간에 따른 복합재료의 열전도 (500°C)

이 15mm로 나타났으며 따라서 본 연구의 온도경계 위치를 상부 복합재료 패널의 상부와 하부를 온도경계 조건 대상으로 고려하였다.

4.3 극서 기후 아래에서의 복합재료 상판의 거동

높은 주변 온도 상황 즉, 극서 기후에서의 차량 하중의 증가에 따른 복합재료 바닥판의 Tsai-Hill 파괴 지표를 Fig. 11에서 보이고 있다. 차량 하중은 DB-18 활하중으로 그 증가는 “차륜하중지표”를 도입하여 표시하였으며, 차륜하중지표란 초기 차륜하중에 대한 적용된 차륜하중의 비로 정의된다. 예를 들어, 두 번째 하중 지표의 경우 초기 차륜 하중의 두 배의 하중이 증가 하는 것을 의미한다.

Fig. 11의 차륜 하중 지표 0일 때를 살펴보면 상부와 하부표면의 Tsai-Hill의 파괴 지표는 Core 부분에 비하여 상대적으로 작은 값을 나타내고 이때의 최대 Tsai-Hill 파괴 지표는 복합재료 Core(횡축 방향)에서 발생함을 보이고 있다. 이는 극도로 뜨거운 날에 비축된 온도의 양에 대해 지적한다. 이는 매우 더운 날 복합재료상부 구조물이 충분한 양의 온도를 수용할 수 있음을 나타내고, 주변 열응력이 교량 거동에 영향을 거의 안 미친다는 것들 나타낸다.

Fig. 11에서 보이듯이 차륜 하중의 증가에 따라 복합재료 바닥판의 구성요소 중, Faceskins에 비하여 Core 요소의 Tsai-Hill 파괴지표의 증가가 크며 약 6.7의 차륜 하중 지표에서 복합재료 상판의 횡 방향 Core 요소의 복합재료가 파괴에 이를 것으로 예측되고 있다.

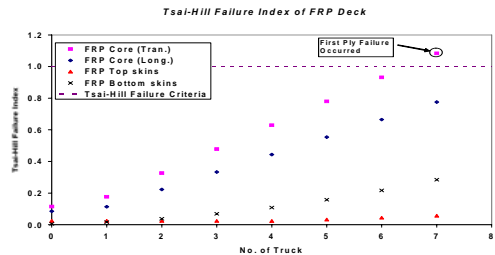


Fig. 11 FRP 상판의 Tsai-Hill 파괴 지표

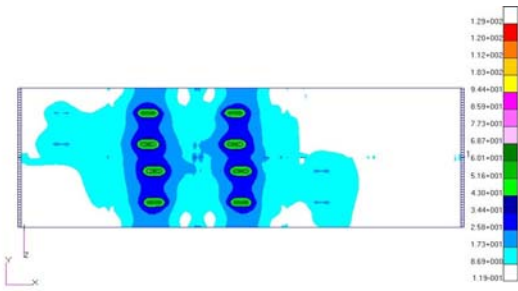


Fig. 12 Stress of Top Skin (Wheel Load Index = 7)

이는 극서 기후 상황 아래에서 복합재료 바닥판의 구성 요소 중 Faceskin 요소는 Core 요소가 파괴에 이르기 전 즉, 차륜 하중 지표 6.7에 준하는 활하중을 전달 하는데 있어 충분한 여력을 가진다는 것을 의미한다.

4.4 국부지역 화재에 의한 복합재료 상판의 거동

온도 증가에 따른 Tsai-Hill 파괴지표가 Fig. 13에 나타나 있다.

화재에 의해 국부적인 지역에 온도가 증가함에 따라 상부표면의 Tsai-Hill 파괴 지표가 Core 부분과 하부 표면에 비하여 더욱 증가함을 보여주고 있다. 즉, vinyl ester resin의 유리 변화 온도 504°C에 근접함에 따라 국부적인 지역의 큰 온도 경사로 인하여 Tsai-Hill 파괴 지표 또한 크게 변함을 나타낸다. Fig. 14는 화재에 의한 복합재료 상부 패널의 응력 분포를 보이고 있다.

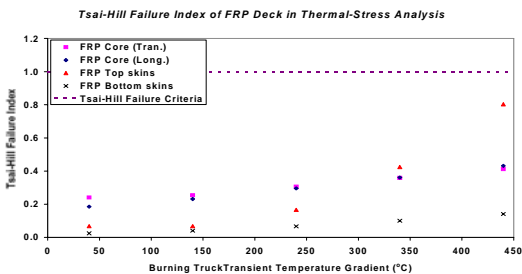


Fig. 13 온도에 따른 Tsai-Hill Failure Index

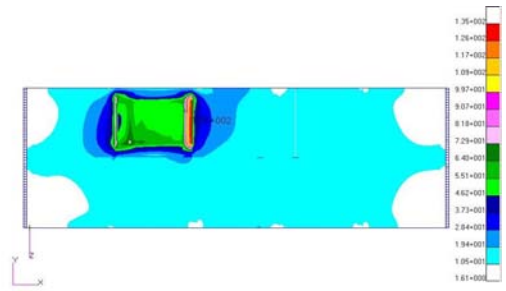


Fig. 14 화재 발생(500°C)으로 인한 상부표면 응력 분포도(MPa)

4.5 적층 방향에 따른 복합재료 상판의 거동

복합재료는 적층 방향에 따라 거동이 변하는 구조물로 최적 설계를 위해서는 적층방향에 따른 구조물의 거동 변화를 살펴야 한다. 정적 하중 아래에서의 복합재료 교량 구조물의 주 적층 방향은 일반적으로 차량 진행방향에 일치한다.

본 연구에서는 화재 시 복합재료 구조물의 최적 적층방향을 연구하였다. 그 결과 Fig. 15에서 Fig. 16에 나타나 있듯이 적층방향이 90°C에 가까워질수록 Tsai-Hill 파괴지표 및 처짐이 감소함을 알 수 있다. 이는 급격한 온도변화로 인한 복합재료 바닥판의 거동 변화가 정적하중 상태에서의 변화와 다르다는 것을 나타내며, 이는 바닥판의 종 방향에 비하여 크기가 작은 횡 방향으로 복합재료 바닥판의 변형이 이루어지기 때문으로 사료된다. 향후 복합재료 교량의 적층방향 설계 시 정적하중 뿐만 아니라 화재 등 급격한 온도 변화에 따른 거동 변화를 고려한 연구가 진행되어야 한다.

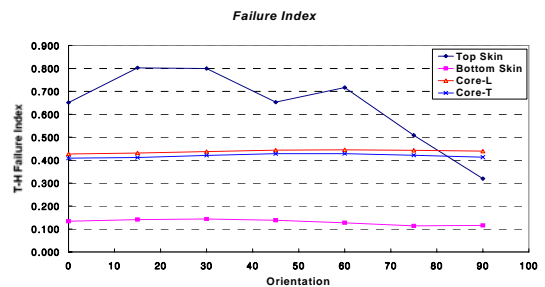


Fig. 15 Orientation에 따른 Failure Index (QM6408)

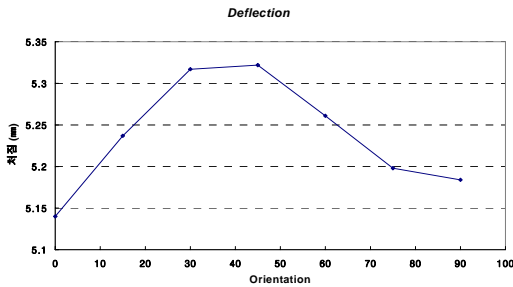


Fig. 16 Orientation에 따른 처짐 (QM6408)

5. 결론

본 연구에서는 실제 미국 뉴욕 주에 설계, 시공되어진 여러 가지 복합재료 상판교량구조물 중 실험결과가 잘 정리된 Bentley Creek 교량 구조물을 대상으로 연구된 유한 요소모델을 이용하여 여러 가지 실제 환경 중 온도변화 아래에서의 복합재료 바닥판의 거동을 연구하였다. 그 결과 온도 변화에 따른 복합재료의 Delamination이 없다는 가정 아래 매우 높은 주변 온도에서 복합재료 바닥판이 충분한 양의 온도를 수용할 수 있고 그 영향이 거의 없다고 나타났다. 또한, 높은 온도아래에서의 하중의 증가로 인한 복합재료 교량의 거동은 복합재료 바닥판의 구성 요소 중 Faceskin 요소가 Core 요소가 파괴에 이르기 전 활하중을 전달하는데 있어 충분한 여력을 가진다고 나타났다. 마지막으로 트럭 화재에 의해서는 복합재료 상부 표면의 Tsai-Hill 파괴 지표가 Core 부분과 하부 표면에 비하여 더욱 증가하는 것으로 나타났고, 이는 vinyl ester resin의 유리 변화 온도 즉, 504°C에 근접함에 따라 국부적인 지역의 큰 온도 경사가 발생하기 때문으로 사료된다.

본 연구에서는 복합재료 교량 바닥판의 상용화에 있어 가장 중요한 문제점으로 지적되고 있는 온도에 관계된 재료 특성을 고려한 구조물 거동, 특히 화재나 온도변화에 따른 복합재료의 내구성 감소에 따른 복합

재료 교량상판구조물의 파괴거동을 조사하여 복합재료를 이용한 구조물의 시방규준 제작을 위하여 수행되어야 할 많은 학문적인 연구 중 그 초기 작업을 수행하고자 하였다. 향후 온도 변화에 따른 단면 감소를 고려한 거동, 경제적 설계를 위한 Fiber의 최적방향 설계 및 국제적 추세에 맞는 Hybrid System의 적용 등이 연구되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2004년도 한국 학술 진흥재단 신진교수 연구지원 사업(D00397)의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 문창권, 타카꾸 아끼라 “고분자 복합재료”, 시그마프레스, 2003, pp358.
2. Amjad J. Aref and Methee Chiewani-chakorn “The Analytical Study of Fiber Reinforced Polymer Deck on an Old Truss Bridge”, NYDOTS, New York, 2001.
3. Alampalli, S. and J.Kunin “Load Testing of an FRP Bridge Deck on a Truss Bridge”, NYSDOT, New York, 2001.
4. Hibbitt, Karlsson and Sorensen. “ABAQUS/Standard User’s Manual-Version 6.5”, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 2000.
5. Hill, R. (1950), “The Mathematical Theory of Plasticity”, Oxford University Press, London, p318.
6. Hyer, M.W. (1997), “Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials”, McGraw-Hill, p627.
7. Jones, R.M. (1990), “Mechanics of Composite Materials”, 2nd Edition, Taylor & Francis, p519.

(접수일자 : 2006년 4월 14일)