

# 화재 발생시 열응력에 의한 복합재료 교량 시스템의 거동에 관한 연구

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

정우영\* · 이형길\*\* · 박희광\*\*\* · 심인섭\*\*\*\* · 송영진\*\*\*\*\*

Jung, Woo-Young · Lee, Hyung-Kil · Park, Hui-Kwang, · Shim, In-Seob · Song, Young-Jin

### ABSTRACT

Due to their light weight, high stiffness-to-weight and strength-to-weight ratios, and potentially high resistance to environmental degradation, resulting in lower life-cycle costs, polymer composites are increasingly being considered for use in civil infrastructure applications. Recently, an FRP deck has been installed on a state highway, located in New York State. In this study, a thermal stress analysis was conducted using finite element method to study failure mechanisms of the superstructure. 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. Finite element model was verified using the load tests of the bridge 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.

**Keywords:** FRP Bridge, Failure Mechanism, Heat Transfer Analysis

### 1. 서 론

현재 토목·건축 구조물에 사용되고 있는 주재료는 강재와 콘크리트이다. 최근 여러 연구결과와 현장점검 보고서에 따르면 주변 환경의 성능저하 작용에 따른 이들 재료에서 발생하는 구조적 문제점들은 기존에 시공되어진 토목 구조물들에 대한 끊임없는 보수 및 보강을 요구하고 있으며 그 비용에 관한 부담이 적지 않다고 보고되고 있다. 특히, 해수에 의한 콘크리트 구조물의 부식이나 열악한 환경의 노출에 의한 강재의 부식등과 연관된 재료적인 문제점들은 아직까지 완전한 해결이 쉽지 않기 때문에 최근에 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 때문으로 특히, 최근에 유럽이나 미국, 캐

\* 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 교수 E-mail: woojung@kangnung.ac.kr

\*\* 강릉대학교 토목공학과 석사과정 E-mail: leeki137@hanmail.net

\*\*\* 강릉대학교 토목공학과 석사과정 E-mail: phk3388@mail.posec.co.kr

\*\*\*\* 강릉대학교 토목공학과 석사과정 E-mail: insuby@hate.com

\*\*\*\*\* 강릉대학교 토목공학과 석사과정 E-mail: potatosong@hanmail.net

나타 등 선진국에서는 복합재료를 사용한 교량 바닥판 형식을 개발하여 연구 및 시공하고 있으며 국내에서는 2002년 5월에 ㈜원창엔텍에 의하여 '영월'에 최초로 설치된바 있다.

그러나 국외의 활발한 복합재료 교량구조물의 실무 적용 및 연구에 비하여 국내의 경우 실무 적용뿐만 아니라 학문적 연구 또한 거의 미미한 상태이다. 현재 국내에서 복합재료의 관한 연구는 주로 탄소섬유 쉬트(sheet)를 이용한 열화 손상된 콘크리트 구조물의 보수 및 보강의 적용에 관한 연구가 집중되어져 왔으며 최근 들어 복합재료 교량 바닥판의 적용에 대한 연구가 시작 단계에 있는 실정이다.

본 연구는 복합재료 교량시스템의 실용화를 위한 초기단계 연구로서 과거 본 연구자가 수행한 복합재료 교량상판구조물의 정적하중하의 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. 본 연구의 효율적인 해석적 연구를 위하여 과거 본 연구자에 의해 미국 New York주 내에 실제 섬유강화 복합재료(FRP)로 시공되어진 Bentley Creek 교량의 실제 정적 재하 실험데이터를 이용, 산출된 해석적 결과와 비교하여 개발된 정밀유한요소 모델을 이용하였다. 특히 본 모델은 보다 실질적이고 정확한 파괴모드의 조사 및 분석을 위하여 기존의 해석적 연구에서 무시되는 자중의 영향과 각 layer에 따른 ply orientation을 고려하여 해석하였다.

## 2. 유한 요소 모델링

본 연구에서는 보다 실무적인 해석적 연구를 위하여 이미 대중적으로 널리 활용되고 있는 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 유한요소해석의 전·후처리 해석프로그램으로는 MSC patran을 사용하였다. 그림 1에서 보여지 듯 본 연구의 유한요소해석에서는 총 44782개 Elements와 46548개 Nodes 들로 복합재료 상판을 3-D모델링 하였으며 유한요소모델의 확인을 위하여 1999년 뉴욕 교통부 주관 하에 시행된 Bentley Creek 교량의 하중 실험 결과를 해석 결과와 비교하였다. 유한요소 해석에서 얻어진 각 위치에서의 변형률은 Bentley Creek 교량의 하중시험에서 측정된 변형률들과 그림 2에서 보이듯이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

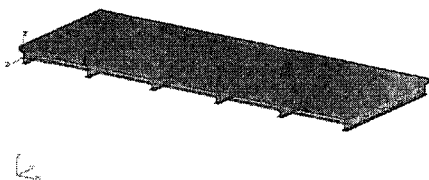


그림 1 FRP DECK의 3차원 유한요소 모델

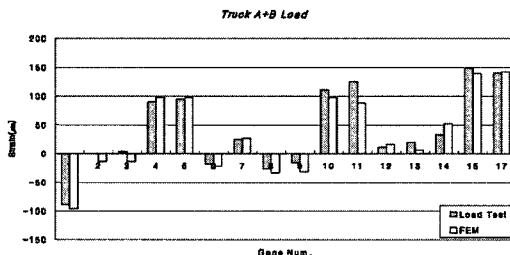


그림 2 유한요소 해석 결과와 현장 시험 결과 비교 (Load Case 1)

## 3. 열응력 해석

### 3.1 열응력 해석

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

하였다. 열응력 해석은 ABAQUS의 "Heat Transfer" 함수를 이용한 해석 후 그 결과를 정적 해석의 "Temperature" 함수에 적용시키는 두 단계로 접근 하였다. "Heat Transfer" 함수를 이용한 해석 시 Element Type은 DS4와 DC3D8 요소 형태를 사용하여 해석을 수행 하였다. 이 요소들은 선형 열 방정식을 해석하기 위하여 node 당 하나의 열 이동이 주어지며 열전달 해석 결과는 응력 해석 시 각 node의 온도 조건이 된다.

본 연구에서는 열응력 해석을 수행하는 데 있어 크게 두 가지 Type의 온도 변화에 따른 정밀 해석을 수행 하였다. 즉, 극서 기후에서의 차량 증가에 따른 교량의 거동과 교량의 화재 발생에 따른 거동이다. 극서 기후는 복합재료 상부 패널의 표면과 하부 표면의 온도 경사를 60℃로 하여 표현하였으며 트럭의 폭발로 인한 화재 상황은 국부적인 지역에 500℃를 적용시켜 해석을 수행하였다. 단, 트럭의 화재에 의한 총 온도와 주변 온도는 vinyl ester resin의 유리 변화 온도 즉, 504℃ 보다 작은 상태로 해석을 수행하였다.

### 3.2 극서 기후 아래에서의 복합재료 상판의 거동

높은 주변 온도 상황 즉, 극서 기후에서의 경우 그림 3과 그림 4에서 보이듯이 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 것을 나타낸다.

그림 3은 높은 주변 온도 상황에서의 차량 하중의 증가에 따른 복합재료 바닥판의 Tsai-Hill 파괴지표를 보이고 있다. 차량 하중의 증가는 "차륜 하중 지표"를 도입하여 표시하였으며, 차륜 하중 지표란 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 증가됨을 의미한다.

그림 3에서 보이듯이 차륜 하중의 증가에 따라 복합재료 바닥판의 구성요소 중, Faceskin 요소에 비하여 Core 요소의 Tsai-Hill 파괴지표의 증가가 크며 약 6.5의 차륜 하중 지표에서 복합재료 상판의 횡 방향 Core 요소의 복합재료가 파괴에 이를 것으로 예측되고 있다. 이는 극서 기후 상황 아래에서 복합재료 바닥판의 구성 요소 중 Faceskin 요소는 Core 요소가 파괴에 이르기 전 즉, 차륜 하중 지표 6.5에 준하는 활하중을 전달 하는데 있어 충분한 여력을 가진다는 것을 의미한다.

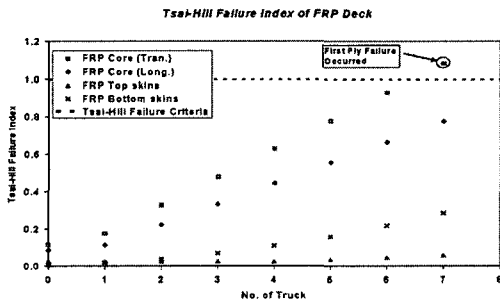


그림 3 FRP 상판의 Tsai-Hill 파괴 지표

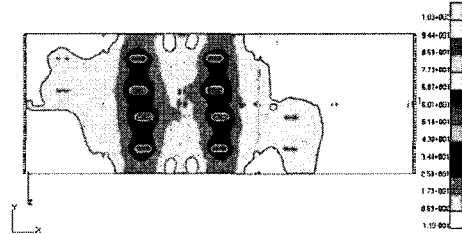


그림 4 Stress of Top Skin (Wheel Load Index = 7)

### 3.3 국부지역 화재에 의한 복합재료 상판의 거동

활하중 즉, 트럭하중 없이 순수 온도에 의한 Tsai-Hill 파괴지표가 그림 5에 나타나 있다. 화재에 의해 국부적인 지역에 온도가 증가함에 따라 상부표면의 Tsai-Hill 파괴 지표가 Core 부분과 하부표면에 비하여 더

속 증가함을 보여주고 있다. 즉, vinyl ester resin의 유리 변화 온도 즉, 504°C에 근접함에 따라 국부적인 지역의 큰 온도 경사로 인하여 Tsai-Hill 파괴 지표 또한 크게 변함을 나타낸다. 그림 6은 화재에 의한 복합 재료 상부 패널의 응력 분포를 보이고 있다.

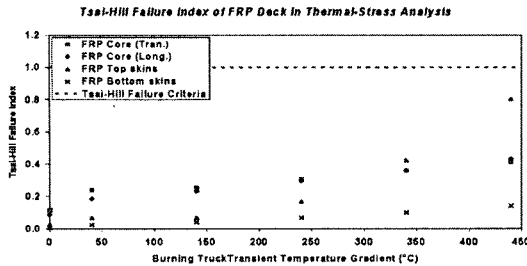


그림 5 온도에 따른 Tsai-Hill Failure Index

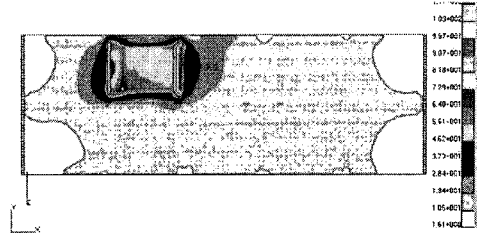


그림 6 화재 발생(500°C)으로 인한 상부표면 응력 분포도(MPa)

### 5. 결론

본 연구에서는 실제 미국 뉴욕 주에 설계, 시공되어진 여러 가지 복합재료 상판교량구조물 중 실험결과가 잘 정리된 Bentley Creek 교량 구조물을 대상으로 개발된 유한 요소모델을 이용하여 여러 가지 실제 환경 중 온도변화 아래에서의 복합재료 바닥판의 거동을 연구하였다. 그 결과 매우 높은 주변 온도에서 복합재료 상·하부 표면의 파괴지표가 Core 부분의 파괴지표에 비하여 상대적으로 작은 값을 나타내었고 이는 복합재료 바닥판이 충분한 양의 온도를 수용할 수 있음이 나타낸다. 트럭 화재에 의해서는 복합재료 상부 표면의 Tsai-Hill 파괴 지표가 Core 부분과 하부 표면에 비하여 더욱 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 vinyl ester resin의 유리 변화 온도 즉, 504°C에 근접함에 따라 국부적인 지역의 큰 온도 경사가 발생하기 때문이다. 트럭 하중이 존재하고 있는 상황과 동시에 복합재료 바닥판에 화재로 인한 급격한 온도변화가 발생 할 경우 파괴에 이를 수도 있을 것으로 사료된다. 극서 기후 상황 아래에서의 하중의 증가로 인한 복합재료 교량의 거동은 주변 온도의 변화가 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 즉, 차륜 하중 지표 6.5에 준하는 활하중을 전달하는데 있어 충분한 여력을 가지는 것으로 나타났다.

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 복합재료 교량상판구조물의 파괴거동을 조사하여 복합재료를 이용한 구조물의 시방기준 제약을 위하여 수행되어야 할 많은 학문적인 연구 중 그 초기 작업을 수행하고자 하였다. 향후 토목 분야에 적용된 복합재료교량과 관련하여 경제적 설계를 위한 Fiber의 최적방향 설계 및 두께, 단면 변환 및 국제적 추세에 맞는 Hybrid System의 적용 등이 연구되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 2005년 전력산업 연구개발 지원 사업으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능케한 한국전력 당국에 감사드립니다.

### 참고문헌

Amjad J. Aref and Methee Chiewanichakorn(2001) "The Analytical Study of Fiber Reinforced Polymer Deck on an Old Truss Bridge", NYDOTS, New York