

ANSYS를 이용한 항공기 탑승교 안전에 관한 연구

- A Study on Safety of Air Bridge by Using ANSYS -

채 수 현 *

Chae Soo Hyun

정 수 일 **

Jung Soo Il

Abstract

The air bridge that connects an airplane with air terminal is important facilities that help people get in and out an airplane safely and conveniently. As the number of people who takes airplane has been increasing, an unexpected accident or a disorder on an air bridge can lead to the loss of passenger's lives or a great damage of airplane. This paper suggests a method to secure the safety of an air bridge.

Keyword : ANSYS, Air Bridge

1. 서 론

최근 국내 A국제공항 여객터미널에서 탑승교의 구멍 난 타이어를 교체하던 2명의 공항 시설 점검 근로자가 사상되었고, B공항에 설치돼 있는 4기의 탑승교 가운데 1기가 일주일 이상 고장 나 이용객들이 불편을 겪었고, C국제공항에서도 탑승교 가동 중 항공기 외부에 부착 된 온도 및 풍량센서를 파손시켜 항공기가 이륙하지 못하는 등의 탑승교의 이상에 따른 인명피해 및 막대한 경제적 손실이 발생하고 있다.

공항 청사와 항공기를 연결하는 탑승교는 승객이 안전하고 편리하게 이동할 수 있도록 하는 중요한 장비이며, 항공 교통을 이용하는 탑승객의 수요가 증가함에 따라 예상

* 인하대학교 산업공학과 박사과정

** 인하대학교 산업공학과 교수

치 않은 고장이나 사고로 인하여 탑승객의 인명 피해와 항공기에 심각한 손상을 일으킬 수 있으므로 이에 대한 대책이 시급한 실정이다. 따라서 국내의 탑승교 설계 및 제작, 유지보수 기술은 아직 초기 단계이므로 설계 및 제작 시에는 중량대비 강도가 높은 소재 선택도 중요하지만 기본 설계 단계에서부터 해석을 통한 경량구조 설계가 이루어져야 할 것이며, 설치되어 사용 중인 탑승교는 성능시험을 통하여 평가 및 검사기 사전에 이루어져 보수할 수 있어야 할 것이다.

본 연구에서는 국내 C국제공항의 국내선 탑승교 8기와 국제선 탑승교 4기 < 표 1 >에 대한 해석을 통한 형상의 변위 및 응력을 토출하여 안전성을 검토할 수 있는 수치해석방법인 유한요소해석법(Finite Element Method)을 이용하여 탑승교 각 부분의 안전성 입증에 위한 근거확보와 탑승교의 안전성 및 신뢰성을 확인하고자 한다.

< 표 1 > C공항의 탑승교 현황

시설명	구동방식	단위	수량	설치년도	비고
C공항 탑승교	고정유압식	기	8	1980	국내선(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)
	고정전동식	기	4	1988	국제선(9, 10, 11, 12)
	소계	기	12	-	-

유한요소해석 과정은 시설물의 총 사용 기간에 걸친 제반 성능을 확인하기 위하여 부품 또는 조립품 등을 분석하는 방법이다. 우선 형상 모델을 만들고, 유한요소 모델을 형상 모델과 관련하여 생성하고 사용 환경(경계조건, 하중조건)을 정의하여 구조물의 응답(변형, 응력, 온도 등)을 계산하여 이를 도시한다.

현재 유한요소해석의 주된 경향은 과거처럼 대형컴퓨터를 사용한 전문 프로그램 보다는 개인용 PC에서도 해석이 가능한 ANSYS, SAP2000, ABAQUS, ADINA, NISA 등의 범용 프로그램을 사용하는 추세이며, 본 연구에서는 많은 범용 유한요소해석 프로그램 중 ANSYS를 사용하여 해석을 수행하였다.[1],[2],[6]

2. 이론적 고찰

2.1 유한요소해석법(FEA : Finite Element Analysis)

유한요소해석법(Finite Element Method)은 1930년대에 개발된 Matrix이론을 사용하여 1960년대에 영국과 미국에서 개발되었지만 이론화 및 상용화가 이루어진 것은 컴퓨터의 발전이 이루어진 1970년대 이후이다. 이러한 유한요소해석법은 공학과 물리학에서 많이 사용되었으며 컴퓨터 하드웨어의 발전과 더불어 급속히 발전하였다. 유한요소해석법은 초기에는 복잡한 구조물의 응력해석을 위해 개발되었으나, 그 후 발전을

거듭하여 연속체 역학(Continuum Mechanics)분야 등 광범위한 분야에서 사용되고 있다. 구조물에 대해 요소의 공통되는 점, 선 및 면 등에서 여러 가지 경계조건을 사용하여 수식을 만들고, 이를 이용해 구조물 전체에 대한 연립 대수 방정식을 만들어 해를 구한다. 공통되는 점이나, 선, 면이 많아질수록 연립방정식이 커지게 되어 해를 구하는 데에 많은 계산이 필요하게 되었고, 이러한 특징으로 인하여 유한요소해석법은 컴퓨터의 발전 속도와 비례하여 발전하였다. 유한요소해석법은 여러 가지 엔지니어링 분야에 적용이 가능하지만, 구조분야에서 가장 먼저 적용이 되었고, 현재는 다양한 분야에서 적용이 되고 있다. 유한요소해석법은 공학과 수리 물리학의 문제들(구조해석, 열전달, 유동장, 물질 이동, 전자기장 해석 등)을 풀기 위한 하나의 수치 기법이다. 유한요소해석법은 전체 물체에 대한 문제를 한 번에 풀지 않고, 각각의 유한요소에 대한 방정식을 세우고, 그들을 조합하여 전체물체에 대한 방정식을 구한다. 간단한 예로, 구조문제의 해는 대개 주어진 하중에 대해 각 절점에서의 변위와 그 구조물을 구성하고 있는 각 요소 안에서의 응력을 계산하는 것을 뜻한다.

이러한 유한요소해석법은 '분석자 도구'로 사용되어 왔으나 사용상의 급격한 발전에 의해 설계 과정에서 중요한 위치를 차지하게 되었고, 오늘날은 컴퓨터상에서 실제 사용 환경을 시뮬레이션 하는 데에 이용되고 있다. 제품이 복잡해짐에 따라 실제 사용 환경의 영역은 점차 확장되고 있으나 컴퓨터를 이용하여 세련된 해석을 수행할 수 있는 가능성도 비례하여 증대하고 있다.

유한요소해석법의 주요 목적은 주어진 환경 조건에 대하여 부품이나 조립품이 어떻게 반응하는지를 결정하는 것이다. 해석 결과는 성능을 검증하는 데에 사용될 수 있고, 설계를 향상시키거나 최적화하는 데에 이용될 수도 있다. 물론 이 모든 것은 설계하고자 하는 형상이 정확하게 모델링되고, 사용 환경이 적절하게 정의되고, 유한요소해석 프로그램이 계산을 정확하게 수행한다는 가정에 바탕을 둔 것이다. 유한요소해석의 결과를 이야기할 때 정밀도(Accuracy)라는 용어를 자주 사용한다. 여기서 정밀도는 시스템이 실제 사용 환경에 대한 성능을 얼마나 잘 모델링했는가의 정도를 의미하는 것이 아니며, 유한요소해석 프로그램이 특정한 해석을 수행한 결과에 대한 신뢰 정도를 의미한다. 부품이나 사용 환경을 모델링하는 과정의 에러와 프로그램 자체의 에러로 인하여 해석 결과 자체가 완전히 잘못된 것이라 할 수도 있다. 해석 결과가 정확한 것인지의 여부를 어떻게 결정할 것인가는 엔지니어의 공학적인 판단(Engineering Judgement)에 따라 행해진다.[1],[5]

2.2 ANSYS

ANSYS는 1970년 공학 분야의 제반 문제를 컴퓨터를 이용하여 해석하기 위해 John Swanson이 개발한 범용 유한요소해석 프로그램으로 지금은 업계 최초이자, 현재까지는 유일하게 ISO인증을 획득한 CAE 전문기업인 ANSYS, Inc.에서 개발과 유지보수를 계속하고 있다. 최초에는 주로 전력 산업과 기계 산업에 이용하기 위해 개발된 제품이었으나, 현재에는 자동차, 전자, 조선, 항공우주, 화학, 의학에 이르는 거의 모든 분야에서 요구되는 유한요소해석에 사용되고 있다.

ANSYS는 이러한 광범위한 용도에 부응하기 위하여 구조, 열전달, 유체, 전자기장, 압전, 음향, 연성해석 등의 해석기능뿐만 아니라 솔리드 모델링 등을 포함한 전처리기, 후처리기, 최적설계 등의 기능을 보유하고 있어 완벽한 MCAE(Mechanical Computer Aided Engineering)프로그램 체계를 구축하고 있다. 또한, 풍부한 기능으로 초보자로부터 전문가에 이르는 광범위한 사용자층의 요구를 만족시키는 프로그램으로 세계적으로 인정을 받으며 사용자 수에 있어서 굳건히 선두 자리를 지키고 있다.

지금까지 10,000개 이상의 기업체 및 연구기관에서 이용하고 있으며, 12,000개 이상의 대학에서 교육용으로 활용되고 있는 등 전 세계적으로 수만 명의 엔지니어가 ANSYS를 사용하고 있고 특히, 국내 대다수의 대학, 대학원에서 교육용 소프트웨어로 ANSYSTM이 채택되어 사용되고 있으며, 초보자도 쉽게 따라 할 수 있는 한글판 ANSYS 활용 안내서 시리즈가 출간됨으로써 국내 사용자층이 급격하게 늘어나고 있는 실정이다.[1],[5],[7]

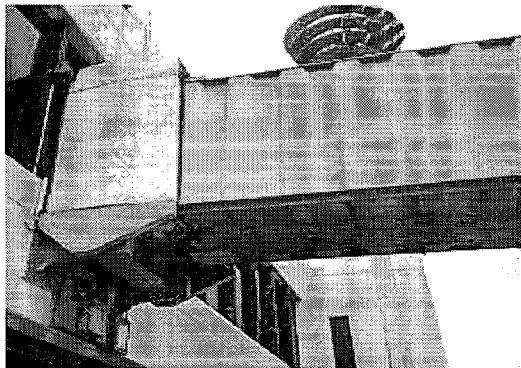
3. 유한요소해석법을 이용한 탑승교 안전성 분석

3.1 구조적 형상

탑승교의 주요 구조 형태는 크게 터널(Tunnel), 리프트 칼럼(LIFT Column), 지지칼럼(Support Column), 서비스 계단(Service Stair)등으로 구성되어 있다. 지지칼럼< 그림 1, 2 >은 공항 터미널과 탑승교의 터널을 연결하고 있으며, 지지칼럼은 터널을 지지하는 역할을 하고 동시에 중요한 터널 축 힌지(Hinge) 역할을 한다. 또한 터널은 승객의 탑승 및 하차 시 통로 역할을 수행하며, 노출 부분을 감싸기 위한 사각 형상으로 이루어져 있다.

리프트 칼럼은 탑승교가 항공기 출입구 높이 변화에 적절하게 사용할 수 있도록 상승 또는 하강 작용을 하며, 모든 탑승교의 하중이 집중되는 곳으로서 완벽한 안전장치와 탑승교의 전체 하중을 유지할 수 있는 가장 중요한 구조물이다.< 그림 1, 2 >

본 연구에서 해석하고자 하는 모델은 유압전동식 구조(8기)와 전동기계식 구조(4기)이다.< 그림 3, 4 >

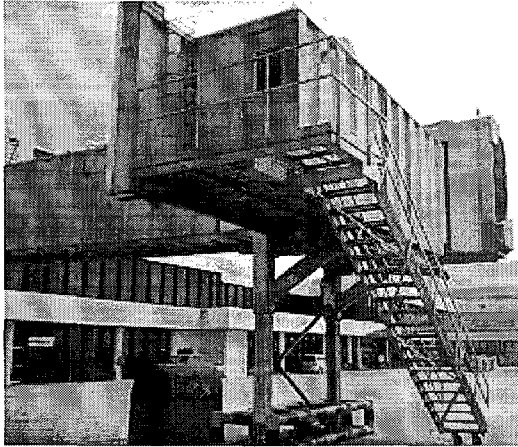


< 그림 1 > 지지칼럼 B Type

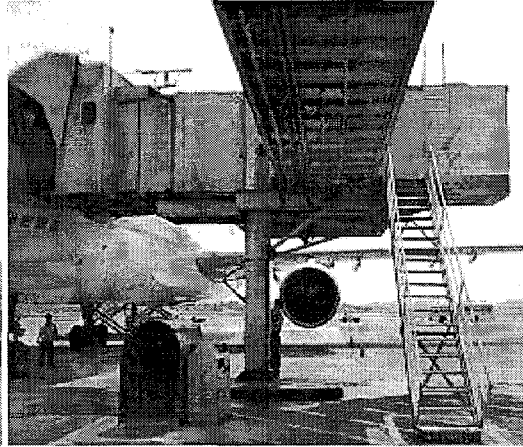


< 그림 2 > 지지칼럼 A Type

해석의 주요 관점은 하중조건에 따른 각 지지칼럼의 반력 및 응력, 탑승객의 터널 통과 시 터널의 연결부 처짐 및 최대응력을 평가하고 각 Frame의 안전성을 평가하고자



< 그림 3 > 전동기계식



< 그림 4 > 유압전동식

한다. 따라서 각 부분의 형상을 보다 상세히 모델링에 포함시켜야 하며, 강성이 큰 프레임은 모두 요소분할을 수행하여 해석에 고려되어야 한다. 그 밖의 강성이 작은 내부 목재나 편의장치 등은 모델을 단순화하기 위해 해석모델에서 제외시켜 평가하도록 한다. [2],[3]

3.2 유한요소 모델링 및 물성치

3.2.1 요소형상

본 연구에서 해석을 위한 ANSYS 소프트웨어의 요소형태는 지지칼럼과 같은 강성이 큰 프레임 등은 국부적인 응력집중이 생길 수 있으므로 반력 및 최대응력을 구하고자 하므로 Beam44요소를 사용하였으며, 가로 세로 비율에 비하여 두께가 얇은 형상의 터널형상은 Shell63에 해당하는 요소를 사용하였다. 따라서 유한요소 모델의 절점은 병진방향과 회전방향의 최대 6-자유도를 가지며, Bending 및 Moment등을 모두 고려하여 결과를 도출하고 아래와 같이 그 요소 수는 최소 30,000개 이상을 사용하였다.[1],[2]

< 표 3 >전동기계식 국제선 탑승교의 절점 및 요소 수

	Node Number	Element Number
Beam 요소	650	632
Shell 요소	31,480	31,230
Total 요소	32,130	31,862

3.2.2 물성치(Material Properties)

해석에 사용된 물성치는 아래와 같으며, 탄성체로 모든 모델에 동일한 물성값을 사용하였다.< 표 4 >

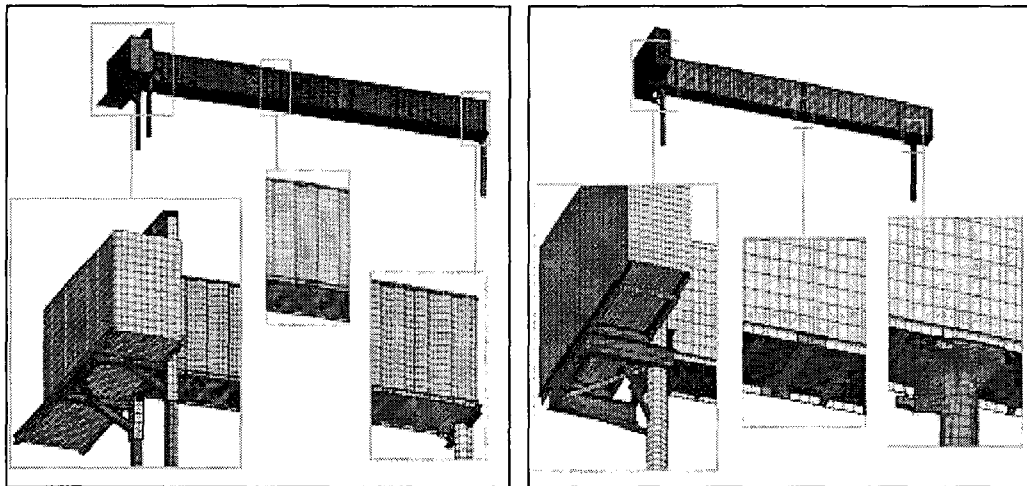
< 표 4 > 해석에 사용된 입력 물성

Elastic Modulus (EX)	$2.1 \times 10^{11}[\text{N/m}^2]$
Poisson's Ratio (NUXY)	0.3
Density (DENS)	76,440 $[\text{N/m}^3]$

3.2.3 유한요소해석 모델링

유한요소해석에 있어서 첫 번째 과정으로 실제 해석 대상의 형상을 정확하게 모델링해야 한다. 이를 위해서 유한요소 모델은 각 보강재(Stiffener)의 두께 및 크기를 도면의 치수에 따라 입력하여 형상화하였다.< 그림 5, 6 >

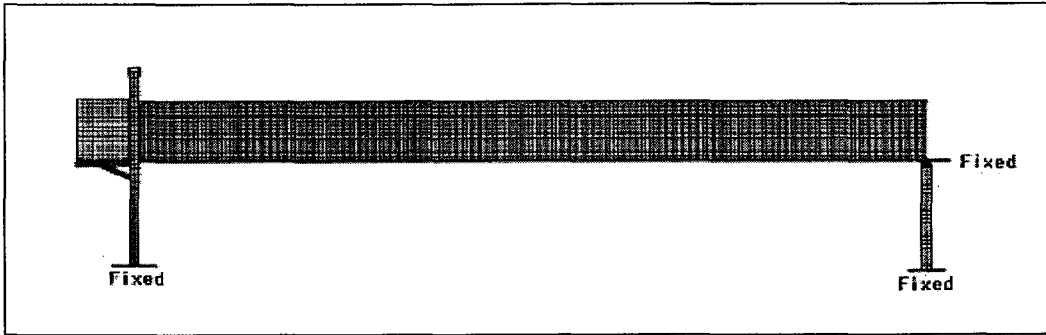
위의 유압전동식 탑승교의 유한요소모델은 보다 상세한 해석을 위해 Lift Column에 연결된 보강재와 Roller부분의 선-접촉을 가정하여 그림에서와 같이 수직방향으로 약 95,060[N]에 해당하는 하중을 가하여 부재의 항복응력을 초과하였을 경우의 보강재에 대한 최적형상 및 효과적인 보수 방안을 검토하였다.



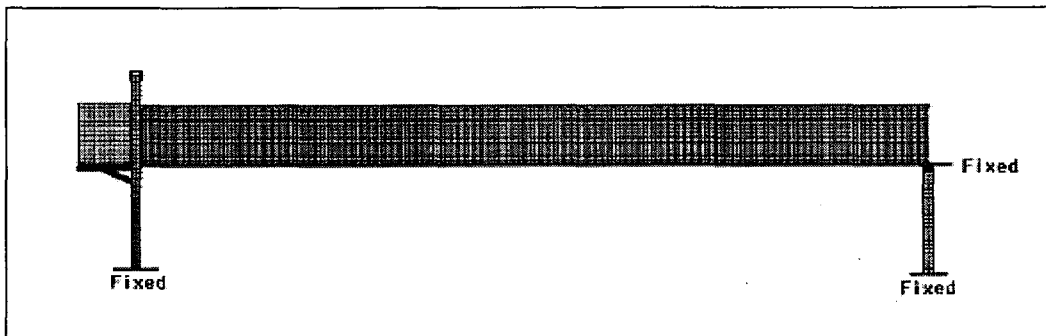
< 그림 5 > 전동기계식 탑승교 유한요소모델 < 그림 6 > 유압전동식 탑승교 유한요소모델

3.2.4 경계조건

경계조건은 Support Column 및 Lift Column 하부의 변위를 고정시켰으며, Support Column 상부의 콘크리트 접촉부의 변위를 고정시켰다.< 그림 8, 9 >[1],[2],[5]



< 그림 8 > 전동기계식 탑승교의 경계조건



< 그림 10 > 전동기계식 탑승교의 경계조건

3.2.5 해석과정

전동기계식 탑승교는 자중과 터널바닥의 탑승하중 및 풍하중을 고려하여 터널의 연결부와 각 보강재의 응력을 파악하고 각 하중 조합에 따른 터널 및 보강재의 최대응력을 재료의 항복응력과 비교 평가하여 그 건전성을 평가하고,

유압전동식 탑승교는 전동기계식 탑승교와 동일한 구조기준을 적용하여 자중, 터널바닥의 탑승하중 및 풍하중을 하중으로 입력하여 수치해석을 수행하고, 비교적 하나의 Lift Column만으로 이루어져 비대칭적 구조형상에 의한 각 보강재의 최대응력을 재료의 항복강도와 비교 평가하였다. 또한, 앞에서 언급하였듯이 Lift Column에 연결된 보강재와 Roller부분의 선-접촉부의 최대 처짐 및 응력을 분석하고 보강재의 개선대책을 해석하였다.

4. ANSYS를 이용한 해석 결과

각 탑승교에 대한 하중은 아래 5가지로 정의하며, A, B, C항의 구조기준에 따른 하중에 대한 조합하중으로써 D항 및 E항에 대한 각각의 상당응력(von Mises Equivalent Stress)을 구하여 내진에 대한 건전성을 평가하였다.

- A. 자중(Gravity)
- B. 터널 바닥에 대한 탑승하중($1\ 911\text{N/m}^2$)
- C. 풍하중($1\ 225\text{N/m}^2$)
- D. 자중(A) + 탑승하중(B)
- E. 자중(A) + 탑승하중(B) + 풍하중(C)

ANSYS(부록 참조) 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 전동기계식 탑승교에 대한 해석결과는 Support Column의 지지형태에 따라 큰 차이는 없지만, 콘크리트 벽면의 수평지지를 위한 볼트 체결형태는 수직 Support Column의 구조형상에 비하여 하중조합에 따른 최대응력은 다소 높은 것으로 평가되고 자중(Gravity)에 의한 터널의 끝 부분에서 최대변위가 약 0.011[m] , 터널 양 끝단의 터널 및 보강재 접촉부위에서 최대응력이 $0.462\text{E}+8\text{ [Pa]}$ 로 가장 높음을 알 수 있다.

(2) 또한 Lift Column의 보강재에서 최대응력은 $0.429\text{E}+8\text{ [Pa]}$ 이다. 탑승교 자체의 자중, 탑승하중 및 풍하중에 대한 3가지 조합하중에 대한 결과로 재료의 항복응력 값이 $6.2\text{E}+8\text{ [Pa]}$ 에 비하여 각각 $2.31\text{E}+8\text{[Pa]}$, $2.49\text{E}+8\text{[Pa]}$ 로 비교적 높은 안전율의 구조설계가 이루어져 있다.

(3) 유압전동식 탑승교는 비대칭 형상으로 인하여 자중에 의한 최대변위가 0.014[m] 로 전동기계식 탑승교에 비하여 더 크게 나타나며, Support Column의 Roller 연결부위의 응력이 3가지 하중조합에 의하여 $2.18\text{E}+8\text{[Pa]}$ 로 다소 응력집중 현상이 발생된다. 앞의 결과에서 알 수 있듯이 집중응력을 최소화하기 위하여 보강재의 국부적인 지지 방식보다는 넓은 면적의 형상 지지를 이용하여 응력을 분산시킬 수 있는 지지 방식이 응력을 감소하기 위하여 보다 효율적이다.

(4) Lift Column의 보강재의 해석결과에서 알 수 있듯이 유지보수 측면에서는 Beam의 양쪽 면에 수직형상의 Rib를 추가하여 변위 및 응력을 감소시킬 수 있으며, 보다 근본적인 방법으로 Roller의 수직하중에 의한 변위 및 응력을 감소하기 위하여 0.06[m] 사이의 Rib를 보강재로 추가하는 방법보다 단면의 곡률 및 두께를 최적화하여 설계에 반영하고 이를 제작에 이용하여야 한다. Roller의 수직하중으로 인한 최대변위는 Rib의 보강재를 추가하는 방법보다 약간 크지만, 전자보다 후자가 응력은 2배 이상 감소됨을 알 수 있고 이러한 응력집중 현상이나 용접부의 충격하중은 보다 큰 결함과 피로균열의 원인이 될 수 있다.

(5) 탑승교는 탑승교 주요 부품 및 보강재의 구조 전체가 부식 환경에 노출되어 있고 사용 중 국부적인 충격하중으로 인한 용접부의 균열 및 피로하중에 의한 피로 파괴가 생길 수 있으므로 정기적인 유지보수 및 비파괴 검사가 선행 되어 안전성 여부를 확인하여야 할 것이다.[1],[2],[6],[7]

5. 결 론

유압전동식 탑승교는 비대칭 형상으로 인하여 자중에 의한 최대변위가 전동기계식 탑승교에 비하여 더 크게 나타나며, Support Column의 Roller 연결부위의 응력이 3가지 하중조합에 의하여 다소 응력집중 현상이 발생된다. 따라서 집중응력을 최소화하기 위하여 보강재의 국부적인 지지 방식 보다는 넓은 면적의 형상 지지를 이용하여 응력을 분산시킬 수 있는 지지 방식이 응력을 감소하기 위한 방법이며,

Lift Column의 보강재의 해석결과에서 알 수 있듯이 유지보수 측면에서는 Beam의 양쪽 면에 수직형상의 Rib를 추가하여 변위 및 응력을 감소시킬 수 있으며, 보다 근본적인 방법으로 Roller의 수직하중에 의한 변위 및 응력을 감소하기 위하여 0.06[m] 마다 Rib를 보강재로 추가하는 방법보다 단면의 곡률 및 두께를 최적화하여 설계에 반영하고 이를 제작에 이용하여야 한다.

Roller의 수직하중으로 인한 최대변위는 Rib의 보강재를 추가하는 방법보다 약간 크지만, Rib 보강방법보다 단면의 곡률 및 두께를 최적화하는 것이 응력은 2배 이상 감소됨을 알 수 있고 이러한 응력집중 현상이나 용접부의 충격하중은 보다 큰 결함과 피로균열의 원인이 될 수 있다.

탑승교는 탑승교 주요 부품 및 보강재의 구조 전체가 부식 환경에 노출되어 있고 장기사용에 따른 마모나 피로, 국부적인 충격하중으로 인한 용접부의 균열 파괴가 생길 수 있으므로 승강기 등과 같이 정기적인 검사/진단제도 도입이 필요할 것이다.

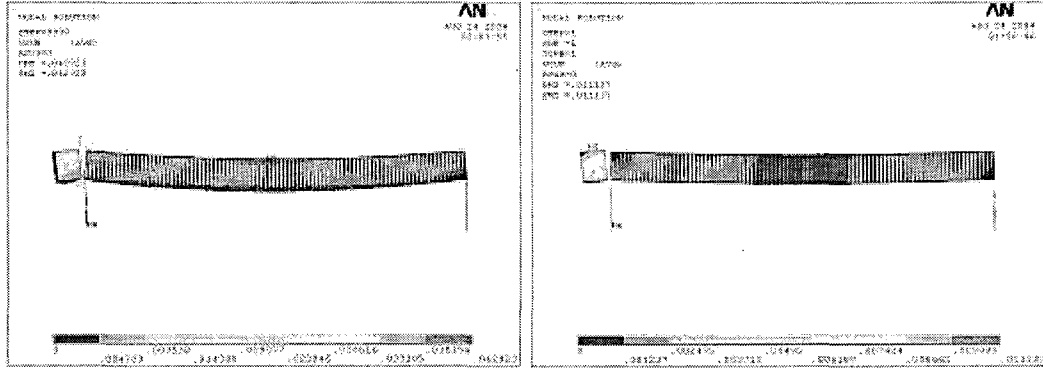
6. 참 고 문 헌

- [1] 고재용, "ANSYS와 유한요소법(제2판), 시그마프레스, 2003
- [2] 기술표준원, "KS B 0140 : 나사의 조임 통칙", 한국표준협회, 1991
- [3] 김희남 외2, "유한요소법을 이용한 비계의 구조해석 및 그에 따른 안전대책", 명지대학교 산업기술연구논문집 제 15집, pp.377~383, 1996
- [4] 박형진, "(ANSYS를 이용한) 유한요소해석", 광문각, 2001
- [5] 정성진, "건물 구조해석 및 구조설계 프로그램의 기능에 대한 요구조사", 영동대학교 연구논단 제 7집, pp.221~233, 2001
- [6] (주)태성에스엔이, "유한요소해석 입문과 선형해석(제3편), 도서출판 계림, 2003.
- [7] ANSYS Inc., "ANSYS Manual, 3rd Edition (Release 5.5). 1998

부 록

[지면관계로 일부만 발췌]

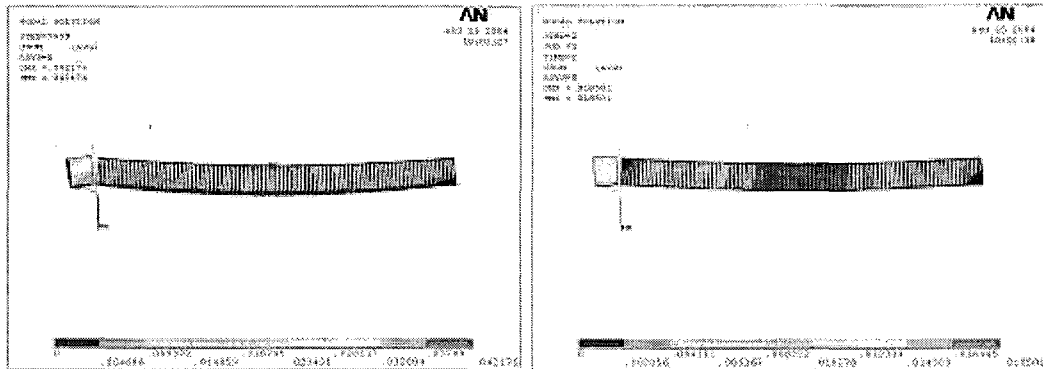
(1) 전동기계식 탑승교 (with Support Column형)



자중(A)+탑승하중(B)+풍하중(C)에 의한 변위(m) 및 응력(N/m²)

자중(Gravity)에 의한 변위(m) 및 응력(N/m²)

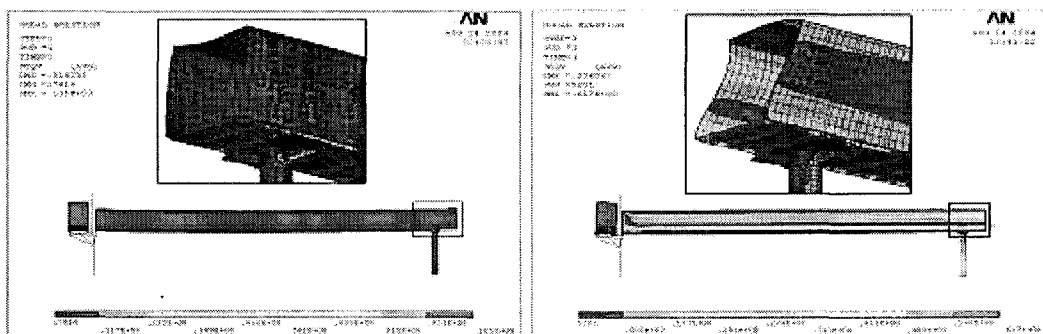
(2) 전동기계식 탑승교 (without Support Column형)



자중(A)+탑승하중(B)+풍하중(C)에 의한 변위(m) 및 응력(N/m²)

탑승하중에 의한 변위(m) 및 응력(N/m²)

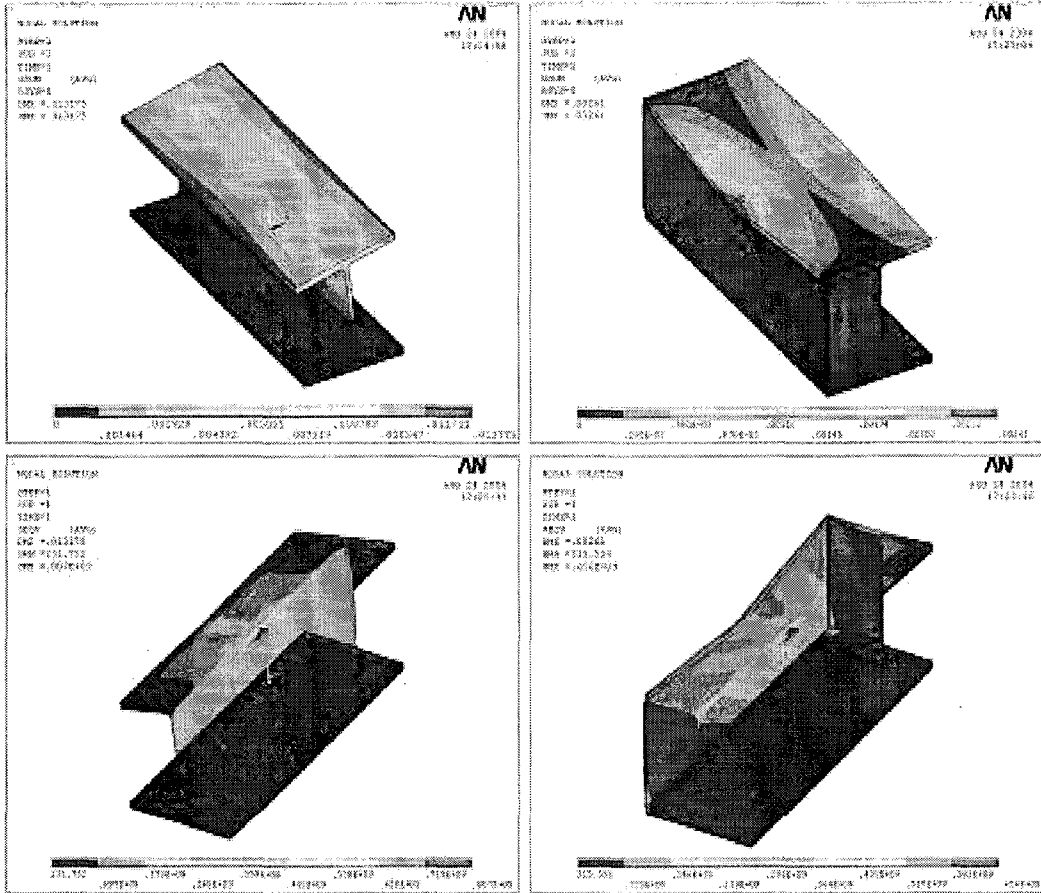
(3) 유압전동식 탑승교



자중(Gravity)에 의한 변위(m) 및 응력(N/m²)

풍하중에 의한 변위(m) 및 응력(N/m²)

(4) 유압전동식 보강재



기본형상에 대한 변위(m) 및 응력(N/m²)

Rib추가 형상에 대한 변위(m) 및 응력(N/m²)

저 자 소 개

채수현 : 서울산업대학교에서 안전공학석사를 취득하고 인하대학교에서 산업공학과 박사과정에 재학 중이며 현재 대한산업안전협회 중앙회 총무국장으로 재직하고 있다. 관심분야는 안전공학, 신뢰성공학, 화재폭발방지 등이다.

정수일 : 인하대학교 산업공학과 교수로 재직 중이고 서울대학교 화학공학과를 졸업, 동대학 교대학원에서 공학석사, 미국 Minnesota대학에서 공학석사, 홍익대학교에서 경영학박사를 취득하였다. 주요 관심분야는 품질관리, 신뢰성공학, 표준(화), 측정학 등이다.