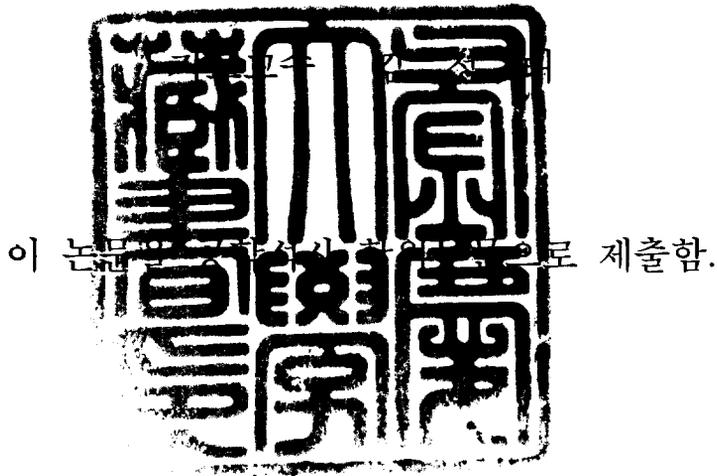


공학석사 학위논문

대형 선박 충돌 시뮬레이션을 통한
사장교 주탑부의 동적 응답에 관한 연구



2006년 2월

부경대학교 대학원

해양공학과

김 주 영

김주영의 공학석사 학위논문을 인준함

2005년 12월 22일

주 심 공학박사 류 연 선 

위 원 공학박사 나 원 배 

위 원 공학박사 김 정 태 

목 차

List of Figures	iii
List of Tables	v
List of Symbols	vi
ABSTRACT	vii
1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적 및 내용	2
2. 충돌 대상 구조물 및 충돌 선박	4
2.1 충돌 대상 구조물의 선정	4
2.2 충돌 대상 구조물의 유한요소 모델	5
2.2.1 주탑부	5
2.2.2 기초 슬래브	6
2.2.3 기초 파일	7
2.2.4 경계조건	8
2.3 충돌 선박의 선정	8
2.4 충돌 선박의 유한요소 모델	9
3. 충돌력 모델링	11
3.1 충돌 모델 1	11
3.2 충돌 모델 2	11
3.3 충돌 모델 3	13
3.4 충돌 모델별 충돌력의 비교	15

4. 사장교 주탑부의 구조거동	17
4.1 충돌 모델 1에 의한 구조거동	17
4.1.1 응력 거동	17
4.1.2 변위 거동	18
4.2 충돌 모델 2에 의한 구조거동	19
4.2.1 응력 거동	20
4.2.2 변위 거동	24
4.3 충돌 모델 3에 의한 구조거동	29
4.3.1 응력 거동	29
4.3.2 변위 거동	31
4.4 충돌 모델별 구조거동의 비교	35
4.4.1 응력 해석 결과 비교	35
4.4.2 변위 해석 결과 비교	35
5. 요약 및 결론	37
참고문헌	39

List of Figures

- Fig. 2.1 Geometric Probability of Bridge–Ship Collision
- Fig. 2.2 Cable–Stayed Bridge Used in Analysis
- Fig. 2.3 Principal Dimensions of Pylon
- Fig. 2.4 Finite Element Model of Pylon
- Fig. 2.5 Finite Element Model of Foundation Slab
- Fig. 2.6 Boundary Condition of Foundation Pile
- Fig. 2.7 Finite Element Model of 8,000TEU Container Ship
- Fig. 3.1 Geometries of Collision Model 2
- Fig. 3.2 Time Histories of Impact Forces for Collision Model 2
- Fig. 3.3 Time Histories of Ship's Bow Geometry for Collision Model 2
- Fig. 3.4 Collision Geometry of Collision Model 3
- Fig. 3.5 Collision Scenarios of Collision Model 3
- Fig. 3.6 Time Histories of Impact Force for Collision Model 3
- Fig. 3.7 Collision Event Histories for Collision Model 3
- Fig. 3.8 Comparison of Impact Force
- Fig. 4.1 Impact Region on Foundation Slab
- Fig. 4.2 Distribution Chart of Impact Force
- Fig. 4.3 Stress of Pylon due to Collision Model 1
- Fig. 4.4 Displacement of Pylon due to Collision Model 1
- Fig. 4.5 Simplifications of Impact Force for Collision Model 2-1
- Fig. 4.6 Simplifications of Impact Force for Collision Model 2-2
- Fig. 4.7 Time Histories of Stress at Foundation Slab for Collision Model 2-1
- Fig. 4.8 Time Histories of Stress for Collision Model 2-1
- Fig. 4.9 Time Histories of Stress at Foundation Slab for Collision Model 2-2
- Fig. 4.10 Time Histories of Stress for Collision Model 2-2
- Fig. 4.11 Time Histories of Displacement at Foundation Slab for Collision

Model 2-1

Fig. 4.12 Time Histories of Displacement at Top-Pylon for Collision Model 2-1

Fig. 4.13 Time Histories of Displacement for Collision Model 2-1

Fig. 4.14 Time Histories of Displacement at Foundation Slab for Collision Model 2-2

Fig. 4.15 Time Histories of Displacement at Top-Pylon for Collision Model 2-2

Fig. 4.16 Time Histories of Displacement for Collision Model 2-2

Fig. 4.17 Time Histories of Stress at Foundation Slab for Collision Model 3-Primary Collision

Fig. 4.18 Time Histories of Stress at Collided-Pylon for Collision Model 3-Secondary Collision

Fig. 4.19 Time Histories of Stress for Collision Model 3

Fig. 4.20 Time Histories of Displacement at Foundation Slab for Collision Model 3-Primary Collision

Fig. 4.21 Time Histories of Displacement at Collided-Pylon for Collision Model 3-Secondary Collision

Fig. 4.22 Time Histories of Displacement at Top-Pylon for Collision Model 3

Fig. 4.23 Time Histories of Displacement for Collision Model 3

Fig. 4.24 Comparison of Stress at Foundation Slab

Fig. 4.25 Comparison of Displacement at Foundation Slab

Fig. 4.26 Comparison of Displacement of Top-Pylon

List of Tables

- Table 2.1 Material Properties of Pylon
- Table 2.2 Material Properties of Foundation Slab
- Table 2.3 Spring Constant on Direction Motion
- Table 2.4 Principal Dimensions of 8,000TEU Container Ship
- Table 2.5 Material Properties of 8,000TEU Container Ship
- Table 4.1 Stress at Foundation Slab for Collision Model 2-1
- Table 4.2 Stress at Foundation Slab for Collision Model 2-2
- Table 4.3 Displacement at Foundation Slab for Collision Model 2-1
- Table 4.4 Displacement at Top-Pylon for Collision Model 2-1
- Table 4.5 Displacement at Foundation Slab for Collision Model 2-2
- Table 4.6 Displacement at Top-Pylon for Collision Model 2-2
- Table 4.7 Stress at Foundation Slab for Collision Model 3
- Table 4.8 Stress at Collided-Pylon for Collision Model 3
- Table 4.9 Displacement at Foundation Slab for Collision Model 3-Primary Collision
- Table 4.10 Displacement at Collided-Pylon for Collision Model 3-Secondary Collision
- Table 4.11 Result of Displacement at Top-Pylon for Collision Model 3

List of Symbols

E	Modulus of Elasticity
ν	Poisson Ratio
ρ	Weight Density
K_x	Spring Constant on x-direction Motion
K_y	Spring Constant on y-direction Motion
K_z	Spring Constant on z-direction Motion
G	Shear Modulus
γ_t	Total Unit Weight
g	Acceleration of Gravity
V_s	Shear Wave Velocity
$\beta_x, \beta_y, \beta_z$	Coefficients of Spring constant for Foundation
LOA	Length Overall
BM	Width Depth
DB	Bow Depth
DL	Fully Draft
DWT	Deadweight Tonnage
TEU	Twenty Foot Equivalent Unit
P_s	Equivalent Static Ship Impact Force
V	Velocity of Ship Impact
\vec{F}	Impact Force
\vec{L}	Linear Momentum

A Study on Dynamic Response Analysis for Pylon of Cable-Stayed Bridge by Collision Simulation of Large Ships

Ju-Young Kim

*Department of Ocean Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze dynamic responses for pylon of cable-stayed bridge by simulating container ship collision. The following approaches are used to achieve the research goal. Firstly, a pylon of cable-stayed bridge and a container ship are selected to analyze dynamic response due to the collision between them. Secondly, three different models are selected to estimate the dynamic impact forces on bridge pylon. The first model (Collision Model 1) is to analyze structural responses statically on the basis of the AASHTO code for collision. The second model (Collision Model 2) is to analyze dynamic responses of the pylon applying impact force that is obtained from collision simulation between the ship and collided plates. The collided plates are one-side (Collision Model 2-1) and four-sides (Collision Model 2-2) fixed plate. The last model (Collision Model 3) is to analyze dynamic response through 3-D collision simulation between real-sized models. Thirdly, the impact force was calculated by using the ANSYS/LS-DYNA program in each collision model. Impact force calculated in Collision Model 1 is the highest among three collision models. Finally, stresses and displacements of the pylon in the each model are computed by applying the each calculated impact force. From the results, the static and dynamic responses for pylon of cable-stayed bridge in all models were compared. The highest stress is obtained near the impact locations in case of Collision Model 2-1. Also, the highest displacement is obtained near the secondary collision location in case of Collision Model 3. For economical and safe design of the bridge in the coastal, dynamic 3-D collision simulation analysis need to be conducted in design process.

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

최근 서해안 및 남해안에는 많은 연륙교, 연도교가 설계 중이거나 시공 중에 있다. 우리나라의 설계 기준(도로교 설계기준, 2003)상에는 구조물 설계시 충돌하중(Impact Force)에 관해 (1) 자동차의 충돌, (2) 유목 등의 충돌, (3)선박의 충돌 등을 고려해야 한다고 명시되어 있다. 일반적으로 교량 구조물 설계시 (1), (2)사항은 고려하고 있지만, 선박충돌하중은 고려하지 않는 경우가 많다. 항로상이나 항로 근처에 교량이 건설되어 선박과 충돌하는 경우, 사회간접자본의 피해는 물론 대규모의 인명 손실, 환경오염 등이 발생할 우려가 크기 때문에 충돌하중에 대한 중요성은 국내·외적으로 부각되고 있다. 선박충돌과 관련된 많은 연구는 주로 선박과 선박과의 충돌이나 선박의 좌초 등을 주요 연구대상으로 하고 있으며, 교량-선박간 충돌에 대해서는 해동시 유빙이나 홍수시 부유물에 의한 충돌하중에 대하여 교량의 하부공을 보호하는 시설의 설계에 대하여 주로 연구되었다 [이계희 등, 2004].

교량과 선박충돌의 대표적인 사례로 1980년 미국 플로리다주의 썬샤인 스카이 웨이교(Sunshine Skyway Bridge)-화물선 서미트 벤처호(Summit Venture)의 충돌사고를 들 수 있다. 강우로 인한 서미트 벤처호의 이상(異狀)운항으로 교량 주경간과 충돌하여 이 사고로 인해 가장 큰 교각이 붕괴되고, 35명이 사망하였으며, 썬샤인 스카이 웨이교는 신설되어졌다. 이 외에도 1983년 러시아 Ulyanovsk 시 부근의 Volga강을 가로지르는 철도교-여객선 충돌사고는 약 150명의 사상자를 냈으며, 1984년 미국 Pontchartrain교-바지선 충돌사고와 1985년 캐나다 St. Louis교-선박 충돌사고는 이 사고로 인해 다시는 교량을 사용할 수 없게 되어 국가적으로 경제적 손실을 가져다주었다[AASHTO, 1991].

1970년대 이전 교량 설계시에는 대부분 선박 충돌하중(Ship Impact Force)을 고려하지 않았다. 1970~1974년 동안 미국에서만 총 811건의 선박충돌 관련 사고가 일어났으며, 약 2,300만 달러의 손실과 14명의 사상자를 내었다. 또한 1960~1970년 동안 연간 0.5개의 교량, 1971~1982년 동안 연간 1.5개의 교량에 대해 1건 이상의 선박충돌사고가 일어났으며, 사상자의 수는 100여명이 넘는 것으로 나타났다. 이후, 교량 설계시 선박충돌하중을 고려하기 위해 “Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges”가 제정되었고, 선박과 교량 구조물의 충돌에 관한 문제는 AASHTO를 중심으로 그 연구가 활발히 진행되었다. 이에 따라 AASHTO는 Woison(1976)의 결과를 바탕으로 선박충돌 모형실험 데이터를 이용한 등가정적하중(Equivalent Static Force) 산정식

을 제시하였다[AASSHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2004]. 이 이후 Petersen 등(1982)은 동역학적 비선형 방정식을 유도하고, 이를 수치적 방법으로 풀어 구조물의 변형을 구하였고, Meir-Dornberg 등(1983)은 교각-바지선의 충돌시 충돌력-선박의 변형 관계를 실험적, 이론적 연구를 바탕으로 등가정적 충돌력 산정식을 제시하였다. 이와 같이 1990년대 이전에는 비교적 충돌 현상을 단순화하여 비선형 방정식을 유도하여 변위를 산정하거나 선박축소 모형실험을 통해 확률·통계적 및 정역학적 개념을 도입하여 충돌에 대한 여러 가지 결과를 도출하였다. 하지만 실제 교량-선박 충돌은 그 조건에 따라 특성이 각기 상이하게 나타나기 때문에 기존의 연구들로는 정확한 구조물의 변형, 충돌 에너지량 등을 산정하기 어렵다.

그렇지만 1990년대부터는 유한요소해석 기술의 발달로 유한요소법을 이용한 선박 충돌 시뮬레이션이 가능해졌다. 이 수치 시뮬레이션은 기존의 하중재하 형태로 표현할 수 없는 부분까지 표현이 가능하여 선박 충돌시 교량의 복잡한 거동을 설명할 수 있게 되었다[Yuan 등 2000]. Wisniewski 등(2001)은 선박-선박 충돌시 운동에너지를 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 산정하였고, Sourne 등(2002)은 해수의 영향을 고려하여 선박-선박 충돌시 충돌력과 운동에너지를 유한요소 해석을 통해 산정하였다. 또한 선박-자켓구조물 충돌에 있어서 Amdahl 등(2001)은 시뮬레이션을 통해 운동에너지에 따른 구조물의 변형과 충돌력에 따른 구조물의 변형과의 관계를 제시하였고, Consolazio 등(2004)은 시간에 따른 충돌력, 선수 변형량에 따라 자켓구조물이 받는 충돌력과 관계를 각각 유한요소 해석을 통해 구하였다. Hendrix (2003)는 바지선-교각의 충돌을 정적·동적 해석 방법을 통해 충돌력과 교각의 변위를 구하였다.

하지만 이들의 연구는 선박과 선박 충돌이나 선수부가 단순한 바지선과 해양 구조물의 충돌에 대해 연구되었으며, 복잡한 거동을 보이는 교량과 bulb를 가지는 대형 선박의 충돌에 대한 연구는 미흡하다. 특히, 현재 많은 해상 교량은 사장교 혹은 현수교 형식으로 건설되고 있으며, 국제 물동량의 증가에 따라 컨테이너선이 십여년 전 보다 대형화 되고 있다. 따라서 이러한 대형 선박의 충돌이 해상 교량에 미치는 영향을 수치 시뮬레이션 기법을 통해 새롭게 분석할 필요가 있다.

1.2 연구 목적 및 내용

본 연구의 목적은 충돌력 산정 방법에 따라 컨테이너선 충돌력의 시간이력을 분석하고, 각각 충돌력에 대한 사장교 주탑부의 동적 응답을 해석 및 비교, 분석하는 것이다. 이와 같은 목적을 달성하기 위해서 첫째, 충돌 대상 구조물과 충돌

선박을 선정하였다. 충돌 대상 구조물로는 선박 충돌이 높을 것으로 예상되는 지간 540m의 사장교 주탑부를 선정하였고, 충돌 선박은 8,000TEU급 컨테이너선을 선정하였다. 둘째, 각각의 대상 구조물은 ANSYS 9.0을 이용하여 유한요소 모델로 모델링하였다. 셋째, 세 가지의 각기 다른 충돌 모델로 충돌력을 산정하였다. 충돌력 산정 방법으로 ① AASHTO규준에 의한 등가정적 충돌력 산정식 이용한 방법, ② AASHTO형 피충돌판과 컨테이너선 충돌 시뮬레이션에 의한 방법, ③ 사장교 주탑부와 컨테이너선 충돌 시뮬레이션에 의한 방법이 사용되어졌다. 특히, 두 번째 방법에서 AASHTO형 피충돌판은 다시 사각형의 4변이 고정인 경우와 1변이 모두 고정인 경우로 나누어 해석하였다. 충돌 시뮬레이션은 충돌과 같은 높은 비선형성을 수반하는 문제를 효율적으로 풀 수 있는 ANSYS 9.0과 LS-DYNA 790을 사용하였다. 마지막으로 산정된 충돌력을 이용하여 사장교 주탑부의 동적 거동을 ANSYS/LS-DYNA를 이용하여 해석하였고, 그 결과를 비교, 분석하였다.

2. 충돌 대상 구조물 및 충돌 선박

2.1 충돌 대상 구조물의 선정

Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)의 “4.8.3.3 Geometry Probability”에서는 교량-선박 충돌의 기하학적 확률분포를 Fig. 2.1과 같이 나타내었다. 이 정규분포곡선의 표준편차를 σ 라 할 때, 1σ 는 68.3%, 2σ 는 95.5%, 3σ 는 99.7%를 나타내는 것으로 선박의 전장(L_{04})을 σ 로 가정한다. 선박통과 항로폭이 $1\sigma \sim 3\sigma$ 의 경우 교량-선박 간 충돌확률이 있을 것으로 보며, 선박통과 항로폭이 3σ 을 초과하는 경우 교량-선박 간 충돌확률은 거의 없는 것으로 본다. 그러므로 본 연구에서는 선박 왕복 통행길이가 충분히 확보될 것으로 예상되는 현수교 형식의 교량보다 지간이 현수교에 비해 짧은 Fig. 2.2와 같이 지간 540m인 사장교 형식의 교량을 충돌 대상 모델로 선정하였다.

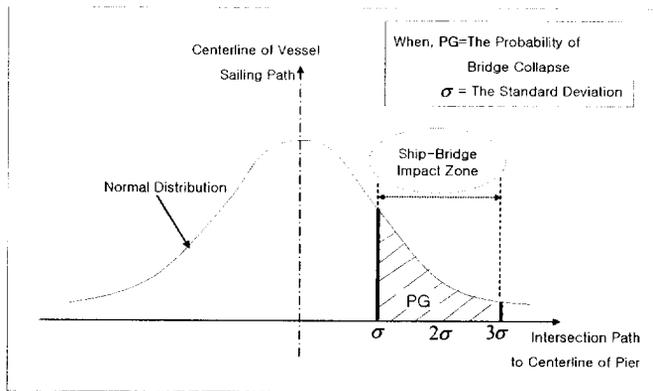


Fig. 2.1 Geometric Probability of Bridge-Ship Collision

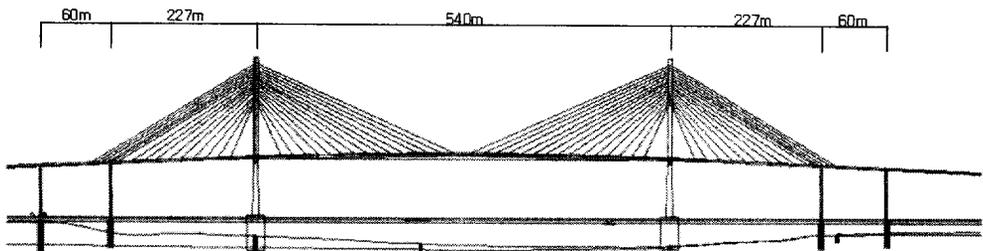


Fig. 2.2 Cable-Stayed Bridge Used in Analysis

2.2 층돌 대상 구조물의 유한요소 모델

본 연구에서는 ANSYS/LS-DYNA를 이용하여 주탑부 높이 190m, 기초 슬래브 8m, 기초 파일 20m인 Fig. 2.3과 같은 사장교 주탑부를 모델링하였다.

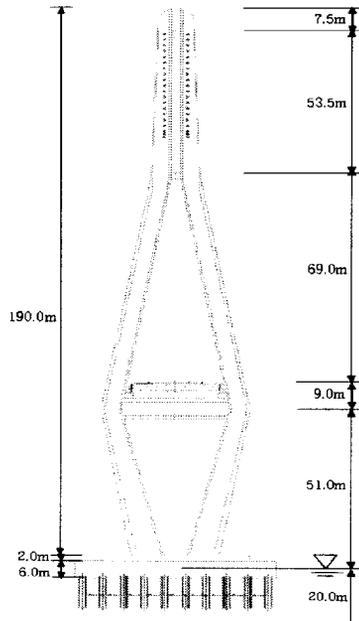


Fig. 2.3 Principal Dimensions of Pylon

2.2.1 주탑부

높이가 190m인 사장교 주탑부의 콘크리트 강도는 40MPa이며, 물성치는 Table 2.1과 같다. 모델링에 사용된 요소는 SOLID164로서, 3차원 솔리드를 모델링하는 경우 사용되며, 8개의 절점을 가진다. 주탑부는 Fig. 2.4와 같이 모델링하였다.

Table 2.1 Material Properties of Pylon

Material Properties	Value
Modulus of Elasticity (E)	22.8GPa
Poisson's Ratio (ν)	0.17
Weight Density (ρ)	2,450 kg/m ³

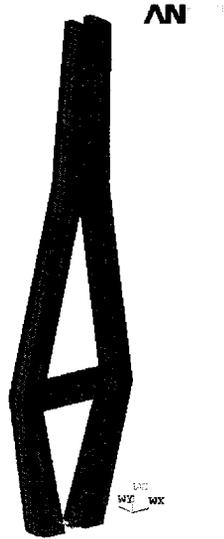


Fig. 2.4 Finite Element Model of Pylon

2.2.2 기초 슬래브

기초 슬래브의 물성치는 Table 2.2와 같으며, 모델링에 사용된 요소는 SOLID164이다. 기초 슬래브는 Fig. 2.5와 같이 모델링하였다.

Table 2.2 Material Properties of Foundation Slab

Material Properties	Value
Modulus of Elasticity (E)	22.8GPa
Poisson's Ratio(ν)	0.17
Weight Density(ρ)	2,450 kg/m ³

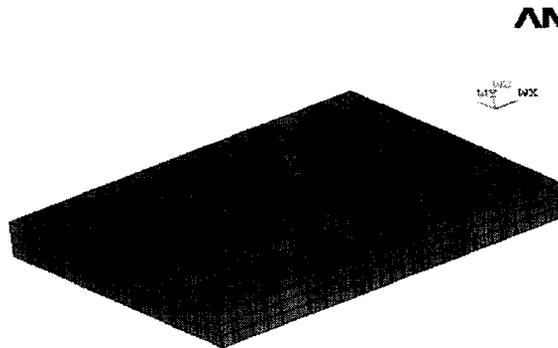


Fig. 2.5 Finite Element Model of Foundation Slab

2.2.3 기초 파일

충돌 대상 교량 구조물의 기초는 파일(pile)형으로서 경계스프링요소(Boundary Spring Element)를 이용하여 모델링하였다. 경계스프링요소는 경계요소를 사용하여 경계를 모델링하는 것으로서, 경계에서 미리 정해진 경계치(근사치)를 가지는 특정 변위로도 모델링이 가능하다. 경계요소로는 1개의 자유도만을 갖는 스프링 요소를 사용하였으며, 파일 모델링에 사용한 요소는 COMB165이다. 이 COMB165는 에너지 흡수 등과 같은 복잡한 메커니즘의 응답을 단순한 Spring이나 Damper System을 모델링하기 위해 주로 사용되는 요소이다.

본 연구에서는 변위를 제한하고자 하는 위치와 방향에 길이 1m인 강성이 매우 큰 경계요소를 만들었다. 이를 위해 spring상수를 이용하였으며, 지반의 기초가 탄성영역 내에서 거동할 수 있도록 하였다. spring상수는 수평방향(Kx, Ky)과 수직방향(Kz)운동에 대해 식 (2.1)~(2.3)을 각각 사용하였고, Table 2.3과 같이 산정되었다.

$$K_x = 2(1+\nu)G\beta_x (BL)^{1/2} \quad (2.1)$$

$$K_y = 2(1+\nu)G\beta_y (BL)^{1/2} \quad (2.2)$$

$$K_z = \frac{G}{1-\nu} \beta_z (BL)^{1/2} \quad (2.3)$$

여기서, ν = 프와송 비

$$G = \text{전단탄성계수} = \frac{V_s^2 \gamma_t}{g}$$

γ_t = 총 단위 중량

g = 중력가속도

V_s = 전단파속도

$\beta_x, \beta_y, \beta_z$ = 기초에 대한 스프링 상수의 계수

Table 2.3 Spring Constant on Direction Motion

Direction Motion	Spring Constant (kgf / m)
Kx	9,980
Ky	9,980
Kz	9,980

2.2.4 경계조건

모델링 과정에서 구조물의 경계 또는 구조물의 표면조건을 정의하기 위해 경계조건을 입력한다. 이때 특정경계는 미리 정해진 변위값(0을 포함)을 가지고, 구조체 내부의 변위는 연속적이다. 본 연구에서 사용된 주탑부 기초 파일의 하단부는 Fig. 2.6과 같이 회전, 변위 자유도를 완전히 구속하여 변위가 발생하지 않는 고정지점으로서 가정하였다.

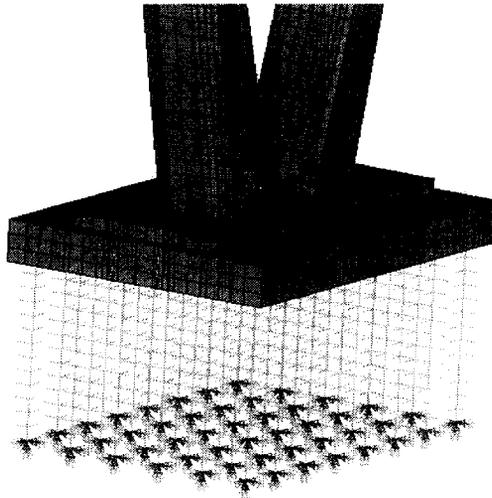


Fig. 2.6 Boundary Condition of Foundation Pile

2.3 충돌 선박의 선정

본 연구에서는 Table 2.4와 같은 주요 치수를 가지는 8,000TEU 컨테이너선을 충돌 선박으로 선정하였다. 이 컨테이너선의 선수부는 구상선수(Bulbous Bow)의 형태를 가지고 있다.

Table 2.4 Principal Dimensions of 8,000TEU Container Ship

Principal Dimensions	Value
Length Overall (L _{OA})	322.00m
Width Depth (B _M)	42.45m
Bow Depth (D _B)	28.50m
Fully Draft (D _L)	12.50m

2.4 충돌 선박의 유한요소 모델

선박은 복잡한 구조를 가지고 있어 모든 부재를 모델링하여 해석하는 것은 비경제적이다. 교량-선박의 정면충돌 경우, 선박의 최대 변형은 선수부에서 발생하므로 선수의 40m까지만 상세 모델링하였다. 선수부를 제외한 부분은 Rigid Body로 이상화 시켜 모델링하였다.

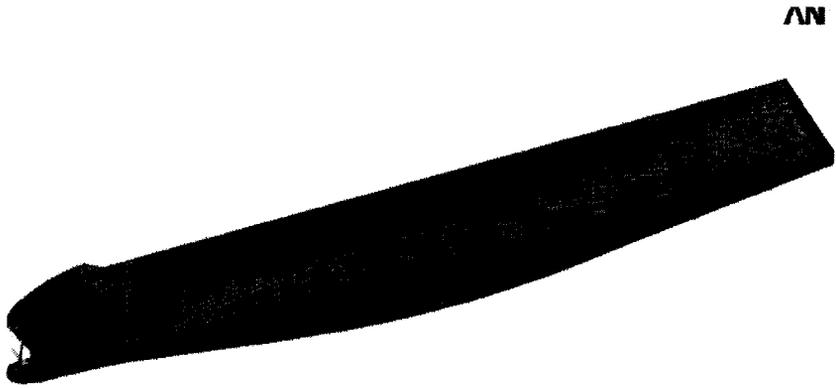
충돌 선박에 사용된 재료의 물성치는 Table 2.5와 같으며, 두께 16mm인 steel을 사용하였다. 모델링에 사용된 요소는 SHELL163으로서, 굽힘 작용(Bending Action)과 막 작용(Membrane Action)의 합동에 의해 하중을 효과적으로 지지하는 동시에 평면요소(In-plane)에 법선하중을 적용시킬 수 있는 4절점 요소이다. 특히, 곡면을 가지는 shell구조물을 모델링 할 때는 중심각이 15도를 넘지 않도록 해야 하며, 대변형을 고려 할 수도 있다. 요소의 4개 절점은 반드시 평면상에 위치해야 하지만 미소한 곡률은 허용된다.

선수부의 모델링은 Nonlinear Inelastic Model중 Bilinear Kinematic Model을 사용하였고, 선미부의 모델링은 Rigid Body를 사용하였다. Bilinear Kinematic Model은 항복 후의 거동에 의해 지배되며, 부재의 온도효과나 건조수축, 중력 및 크리프 등에 의해 미리 균열이 발생할 것이라는 가정에 기인하는 모델이며, Rigid Body는 변형이 없는 것으로 충돌에 의해서 선박 내부 절점이 변하지 않도록 하였다.

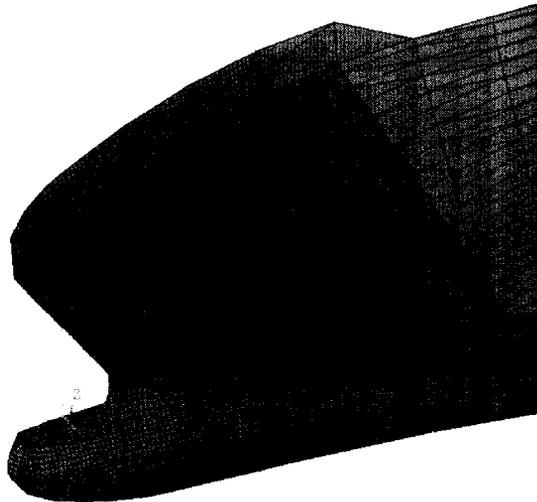
다음의 Fig. 2.7(a)은 선박의 전체 요소, Fig. 2.7(b)은 선수부의 상세도를 나타낸 그림이다.

Table 2.5 Material Properties of 8,000TEU Container Ship

Material Properties	Value
Modulus of Elasticity (E)	200GPa
Poisson's Ratio(ν)	0.29
Weight Density(ρ)	7,850kg/m ³



(a) General View



(b) Detail View

Fig. 2.7 Finite Element Model of 8,000TEU Container Ship

3. 충돌력 모델링

본 연구에서는 선박 충돌에 의한 충돌력을 모델링하기 위해 세 가지의 충돌 모델을 선정하였다. 충돌 모델 1은 AASHTO규준에 의한 등가정적 충돌력 산정식을 이용하여 충돌력을 계산하였고, 충돌 모델 2는 컨테이너선이 AASHT형 피충돌판과 충돌한 경우의 충돌력을 모델링하였다. 마지막으로 충돌 모델 3은 사장교 주탑부와 컨테이너 직접 충돌 시뮬레이션에 의해서 충돌력을 산정하였다.

3.1 충돌 모델 1

충돌 모델 1은 선박 충돌력을 AASHTO규준이 제시한 등가정적 산정식 (3.2)을 이용하여 산정한 것이다. AASHTO규준은 충돌속도 8knots, 최대 40,000DWT의 선박모형을 강체(Rigid Body)에 충돌시켜 실험 결과 데이터를 통계·정역학적 및 확률론적 개념을 이용하였다.

식 (3.2)을 사용하기 위해서는 컨테이너선의 TEU단위를 DWT단위로 변환해야 하며, 변환식은 식 (3.1)과 같다¹⁾. 8,000TEU를 DWT단위로 변환하면 약 116,110tonnes로 나타낼 수 있다. AASHTO규준에 의하면 충돌속도 8knots인 8,000TEU급 컨테이너선의 충돌력은 37,482.4kips(약 166.730MN)이다.

$$DWT = \frac{TEU}{0.0689} \quad (3.1)$$

여기서, DWT = Deadweight Tonnage of Ship(tonnes)

TEU = Twenty Foot Equivalent Unit

$$P_s = 220\sqrt{DWT} \left(\frac{V}{27} \right) \quad (3.2)$$

여기서, Ps = Equivalent Static Ship Impact Force(kips)

V = Ship Impact Velocity(fps), 8knots=13.5fps

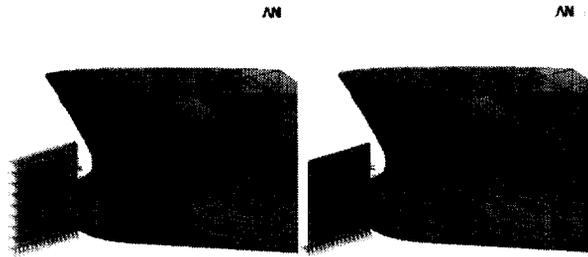
3.2 충돌 모델 2

충돌 모델 2는 AASHTO규준이 채택한 Woisin실험을 모사한 모델이다. Woisin이 사용한 AASHTO형 피충돌판은 Steel plate이며, 강체(Rigid Body)와 유사하게 표현하기 위해 두께 1m인 plate를 사용하였다.

컨테이너선과 충돌하는 피충돌판의 경계조건에 따라 두 가지의 피충돌판으로

1) Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan

나누었다. 첫 번째 피충돌판은 강체에 가까운 피충돌판을 모사하기 위해 피충돌판의 4면 모두를 고정단으로 가정하였고, 두 번째 피충돌판은 캔틸레버에 가까운 피충돌판을 나타내기 위해 피충돌판의 4면 중 1면만을 고정단으로 가정하였다. 그리하여 Fig. 3.1(a)과 같이 컨테이너선이 피충돌판의 4면 모두를 고정단으로 가정한 것과 충돌하는 모델을 충돌 모델 2-1, Fig. 3.1(b)과 같이 컨테이너선이 피충돌판의 4면 중 1면만을 고정단으로 가정한 것과 충돌하는 모델을 충돌 모델 2-2로 각각 정의하였고, 각각의 충돌 모델에 대해 충돌력을 계산하였다.



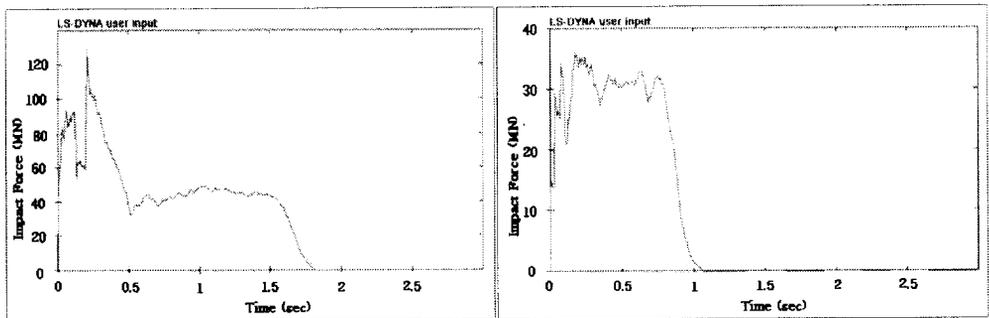
(a) Collision Model 2-1 (b) Collision Model 2-2

Fig. 3.1 Geometries of Collision Model 2

충돌 해석 과정은 크게 ① Part 지정, ② Contact 조건 설정, ③ Velocity 입력의 단계를 가진다. 여기서 Contact Algorithm은 Single Surface Contact Algorithm, Node-to-surface Contact Algorithm, Surface-to-surface Contact Algorithm 세 가지가 있다. 본 연구에서는 Node-to-surface Contact Algorithm을 이용하였다. 이 Node-to-surface Contact Algorithm은 속도를 입력하고, 충돌체와 피충돌체 part를 지정하면 자동적으로 충돌하는 것으로 속도를 입력하는 방법으로 Initial Velocity와 Specify Load 두 가지 방법이 있다. Initial Velocity는 part를 지정하는 경우에 대해 일정한 속도를 입력하는 방법이고, Specify Load는 part를 지정하지 않는 경우에 대해 시간에 대해 변화하는 속도, 가속도, 하중 등을 입력하는 방법이다.

충돌 모델 2의 충돌력 산정 결과를 Fig. 3.2(a), Fig. 3.2(b)에 도시하였다. 최대 충돌력은 충돌 모델 2-1의 경우 0.22초 때 130MN, 충돌 모델 2-2의 경우 0.2초 때 36MN으로 각각 계산되었고, 충돌 지속시간은 충돌 모델 2-1의 경우 1.8초, 충돌 모델 2-2의 경우 1.1초로 나타났다. 충돌 모델 2-1의 경우 충돌력 시간이력은 충돌 직후에는 130MN, 약 0.5초 경과한 후에는 약 40MN으로 69.23%감소하였고, 약 1.8초 후에는 0MN으로 계산되었다. 반면, 충돌 모델 2-2의 경우 충돌력 시간이력은 충돌 직후에는 약 36MN, 약 0.4초가 경과한 후에는 약 30MN으로 16.67% 감소하였고, 약 1.1초 후에는 0MN으로 계산되었다. 이는 피충돌판의 형상에 따라 충돌력 시간이력이 다른 것을 알 수 있었다.

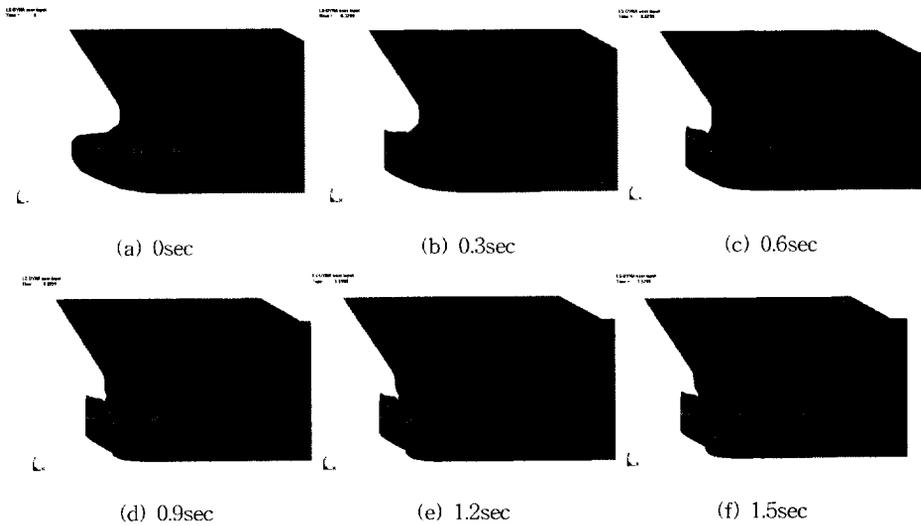
Fig. 3.3(a)~(f)는 충돌 후 시간에 따른 선수부의 충돌형상을 나타낸 그림이다.



(a) Collision Model 2-1

(b) Collision Model 2-2

Fig. 3.2 Time Histories of Impact Forces for Collision Model 2



(a) 0sec

(b) 0.3sec

(c) 0.6sec

(d) 0.9sec

(e) 1.2sec

(f) 1.5sec

Fig. 3.3 Time Histories of Ship's Bow Geometry for Collision Model 2

3.3 충돌 모델 3

충돌 모델 3은 사장교 주탑부와 충돌 속도 8knots인 8,000TEU급 컨테이너선을 직접 충돌시킨 충돌 모델이다. 이 경우 충돌력은 선박 충돌시 선박과 구조물의 흡수에너지를 고려한 값이며, Fig. 3.4와 같이 정면충돌을 모사하였다. 해수의 영향은 고려하지 않았으며, 충돌 해석 시간은 10초이다.

충돌 모델 3의 충돌 해석은 충돌 모델 2와 동일한 Node-to-surface Contact Algorithm을 사용하였으며, Initial Velocity는 8knots를 입력하였다.

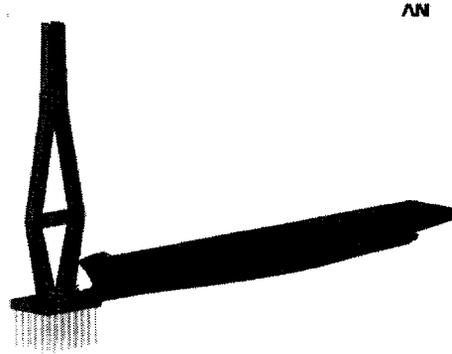
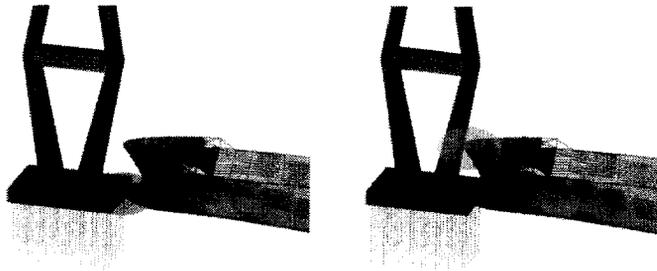


Fig. 3.4 Collision Geometry of Collision Model 3

컨테이너선은 일반적으로 구상선수를 채택하고 있기 때문에 Fig. 3.5(a)와 같이 선수의 하부와 교량 기초 슬래브에서 1차 충돌이 발생하고, Fig. 3.5(b)와 같이 선수의 상부와 주탑부에서 2차 충돌이 발생한다.



(a) Primary Collision

(b) Secondary Collision

Fig. 3.5 Collision Scenarios of Collision Model 3

그 결과, Fig. 3.6과 같이 최대 충돌력은 1차 충돌시 발생하였으며, 충돌 발생 0.53초 경과 후에 27MN으로 계산되었다. 2차 충돌은 약 1.9초 후에 발생하여 5.5초 경과 후에 24MN으로 계산되었다. 선체를 구성하는 각 부재는 선체가 받는 여러 가지 힘에 대항할 수 있는 충분한 강도를 갖도록 설계되어지는데, 부재의 강성 차이로 인해 충돌력은 시간에 따라 계속 변화함을 알 수 있다.

충돌 모델 3의 8,000TEU급 컨테이너선과 사장교 주탑부의 충돌 형상은 Fig. 3.7(a)~(g)와 같다.

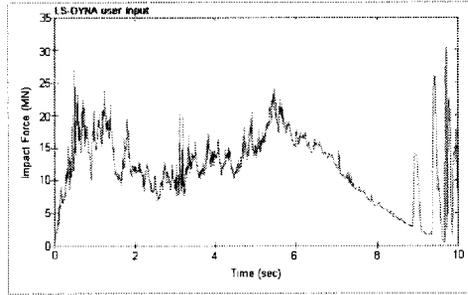


Fig. 3.6 Time Histories of Impact Force for Collision Model 3

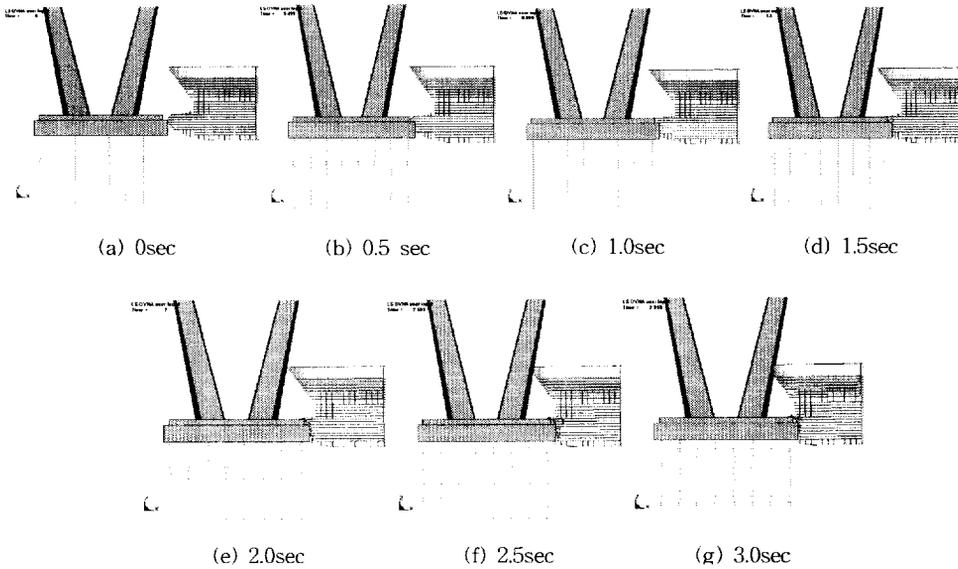


Fig. 3.7 Collision Event Histories for Collision Model 3

3.4 충돌 모델별 충돌력의 비교

전체 3개 충돌 모델의 충돌력 산정 결과를 Fig. 3.8에 도시하였다. 충돌 모델 1은 AASHTO규준의 등가정적 산정식에 의해 산정된 것으로 충돌력은 시간에 따라 변하지 않는 정적 하중 166.73MN으로 계산되었다. 충돌 모델 2는 AASHTO가 채택한 선박모형 충돌실험과 유사한 조건으로 유한요소 해석한 것으로 충돌 후 10초간의 충돌력을 계산하였다. 이때, 최대 충돌력은 충돌 모델 2-1의 경우 충돌 후 0.22초 때 130MN, 충돌 모델 2-2의 경우 충돌 후 0.2초 때 36MN로 나타났다. 충돌 모델 3은 사장교 주탑부와 충돌 선박의 직접 충돌 시뮬레이션을 통해 해석한 경우로서 최대 충돌력은 0.53초 때 27MN으로 계산되었다.

충돌 모델 1의 등가정적 충돌력이 가장 크게 산정되었다. 충돌 모델 1에 비하

여 충돌 모델 2의 최대 충돌력은 작게 산정되었는데, 충돌 모델 2-1의 경우 22.03%, 충돌 모델 2-2는 78.41% 작게 산정되었다. 충돌 모델 1에 비하여 충돌 모델 3의 최대 충돌력 또한 83.81% 작게 산정되었다. 또한 충돌 모델 2의 최대 충돌력과 충돌 모델 3의 최대 충돌력을 비교한 결과, 충돌 모델 3의 충돌력은 충돌 모델 2의 충돌력에 비해 대략 25~79.23% 작게 나타났다.

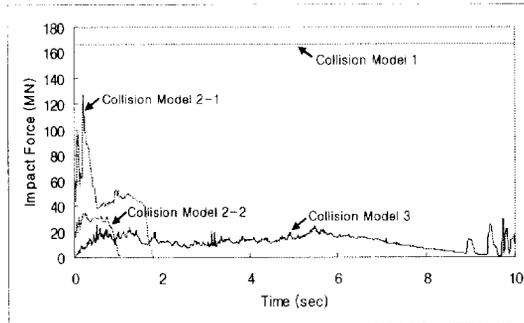


Fig. 3.8 Comparison of Impact Forces

구간 t_1 에서 t_2 의 충돌력의 벡터 합은 선형 운동량으로 식 (3.3)과 같이 표현할 수 있다. 전체 충돌 모델을 10초 동안의 충돌량을 비교한 결과, 충돌 모델 3의 충돌량이 충돌 모델 2에 비해, Fig. 3.8에 보이는 것 같이, 대략 2~5배 정도로 크게 나타났다. 이는 충돌 모델 3의 운동량이 충돌 모델 2의 운동량 보다 2~5배 정도 큰 것을 의미한다.

$$\vec{L} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt \quad (3.3)$$

여기서, \vec{F} 은 충돌력, \vec{L} 은 선형 운동량을 말한다. 충돌 모델 2는 충돌 모델 3에 비해 최대 충돌력은 크게 나타나지만 운동량은 작은 것을 알 수 있다.

충돌 모델 3은 충돌 모델 1과 충돌 모델 2의 경우와는 달리 10초 이상의 충돌력-시간 관계를 모사 할 수 있었다. 즉, 충돌 모델 1과 충돌 모델 2의 충돌력으로는 구조물의 안정성과 거동 파악에 미흡하며, 실제 구조물-선박간의 충돌을 가장 가깝게 모사한 충돌 모델 3의 충돌력으로 구조물의 거동을 파악해야 한다.

4. 사장교 주탑부의 구조거동

4.1 충돌 모델 1에 의한 구조거동

AASHTO규준에서는 식 (3.2)에 의해 산정된 충돌력을 교량 설계시 등가정적 하중을 사용하여 정적해석하도록 명시되어 있다. 충돌 모델 1은 3.1장에서 산정된 최대 충돌력 37,482.4kips(약 166.730MN)를 Fig. 4.1과 같이 충돌이 예상되는 요소에 대해 Fig. 4.2와 같은 비율로 충돌력을 각각 재하하였다. 절점 ①, ③, ④, ⑥에는 15.63MN, 절점 ②, ⑤에는 52.10MN을 입력하고, 정적해석 하였다.

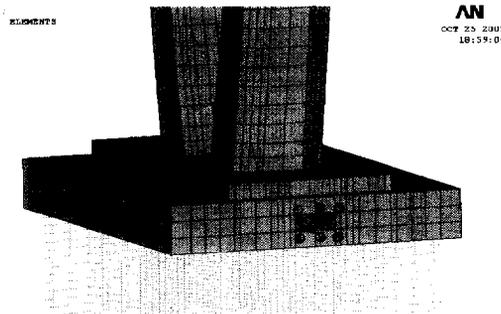


Fig. 4.1 Impact Region on Foundation Slab

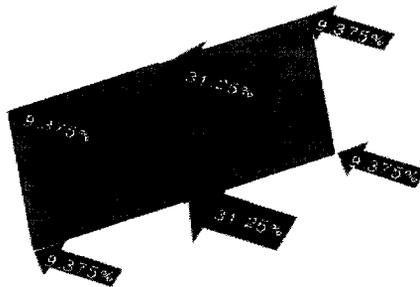


Fig. 4.2 Distribution Chart of Impact Force

4.1.1 응력 거동

충돌 모델 1은 AASHTO규준에 의한 등가정적 충돌력을 이용한 정적해석을 수행한 것으로, 최대 응력은 Fig. 4.3과 같이 92.99MPa로 계산되었고, 충돌 요소부(기초 슬래브)에서 발생하였다.

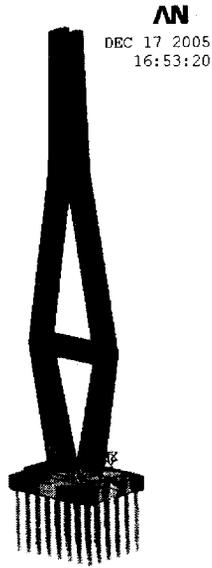


Fig. 4.3 Stress of Pylon due to Collision Model 1

4.1.2 변위 거동

충돌 모델 1은 AASHTO규준에 의한 등가정적 충돌력을 이용한 정적해석 한 것으로, 최대 변위는 Fig. 4.4와 같이 사장교 주탑부 상단에서 18.2cm, 충돌 요소부(기초 슬래브)에서 24.1cm로 각각 계산되었다.

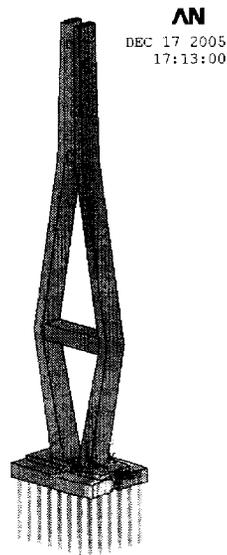
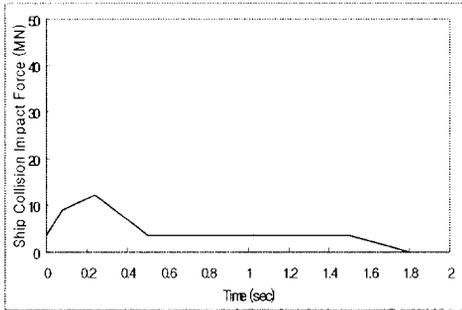


Fig. 4.4 Displacement of Pylon due to Collision Model 1

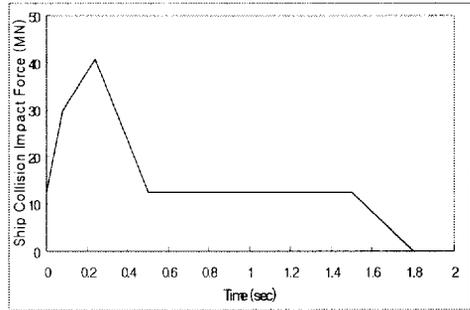
4.2 충돌 모델 2에 의한 구조거동

충돌 모델 2는 3.2장의 Fig. 3.2 결과에 따른 충돌력을 Fig. 4.1과 같이 충돌이 예상되는 요소에 대해 Fig. 4.2와 같은 비율로 충돌력을 각각 입력하여 충돌해석 하였다.

우선, 충돌 모델 2-1의 충돌력(Fig. 3.2(a))과 충돌 모델 2-2의 충돌력(Fig. 3.2(b))을 각각 Fig. 4.5, Fig. 4.6으로 단순화 하였다. 충돌 모델 2-1의 최대 충돌력 130MN을 Fig. 4.1의 절점 ①, ③, ④, ⑥에는 Fig. 4.5(a)와 같은 시간이력 충돌력을 입력하였고, 절점 ②, ⑤에는 Fig. 4.5(b)와 같은 시간이력 충돌력을 입력 하였다. 충돌 모델 2-2의 36MN 최대 충돌력을 Fig. 4.1의 절점 ①, ③, ④, ⑥에는 Fig. 4.6(a)과 같은 시간이력 충돌력을 입력하였고, 절점 ②, ⑤에는 Fig. 4.6(b)과 같은 시간이력 충돌력을 분포하여 재하하였다.

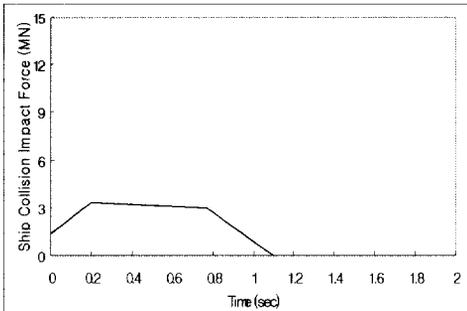


(a) Node ①, ③, ④, ⑥

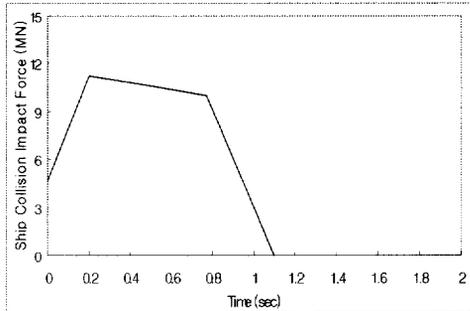


(b) Node ②, ⑤

Fig. 4.5 Simplifications of Impact Force for Collision Model 2-1



(a) Node ①, ③, ④, ⑥



(b) Node ②, ⑤

Fig. 4.6 Simplifications of Impact Force for Collision Model 2-2

4.2.1 응력 거동

① 충돌 모델 2-1의 응력 거동

충돌 모델 2-1의 경우, Fig. 4.7과 같이 기초 슬래브의 최대 응력은 약 0.2초 때 66.65MPa으로 계산되었다. 충돌 직후에 급격하게 응력이 증가하였다가 1초경과 후 급격히 감소하여 0MPa의 값을 보였다.

Fig. 4.8(a)~(k)와 같이 충돌 모델 2-1의 경우 사장교 주탑부의 전체 응력 양상을 시간에 따라 나타내었고, Table 4.1과 같이 표로 나타내었다.

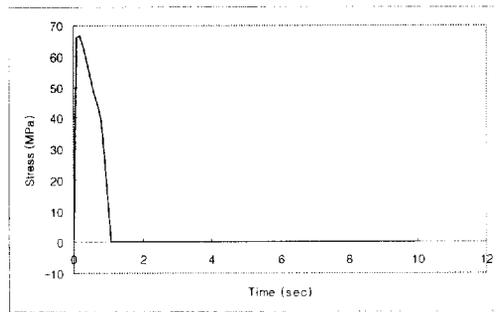
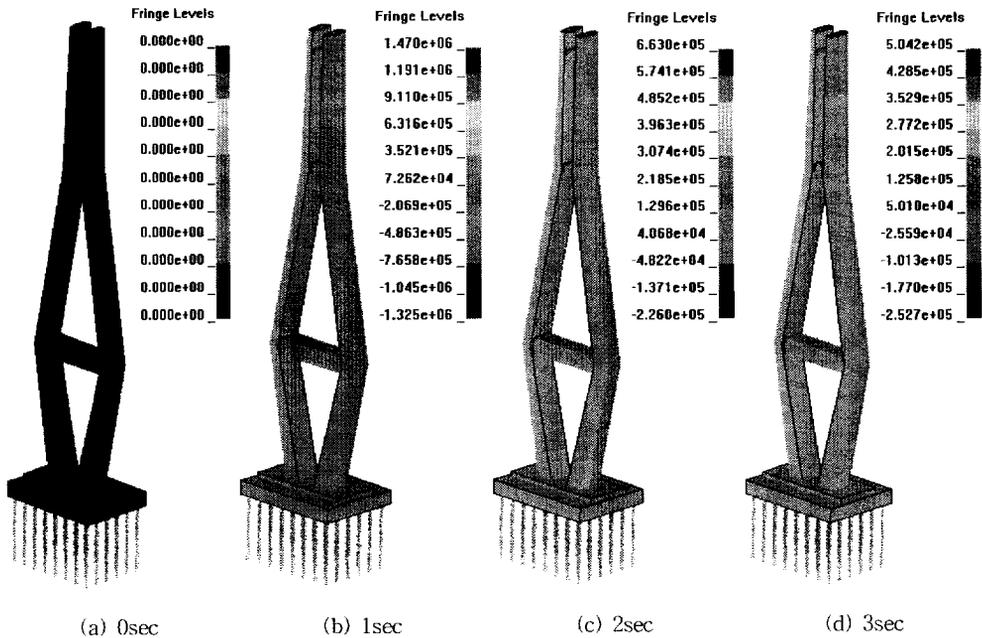


Fig. 4.7 Time Histories of Stress at Foundation Slab for Collision Model 2-1



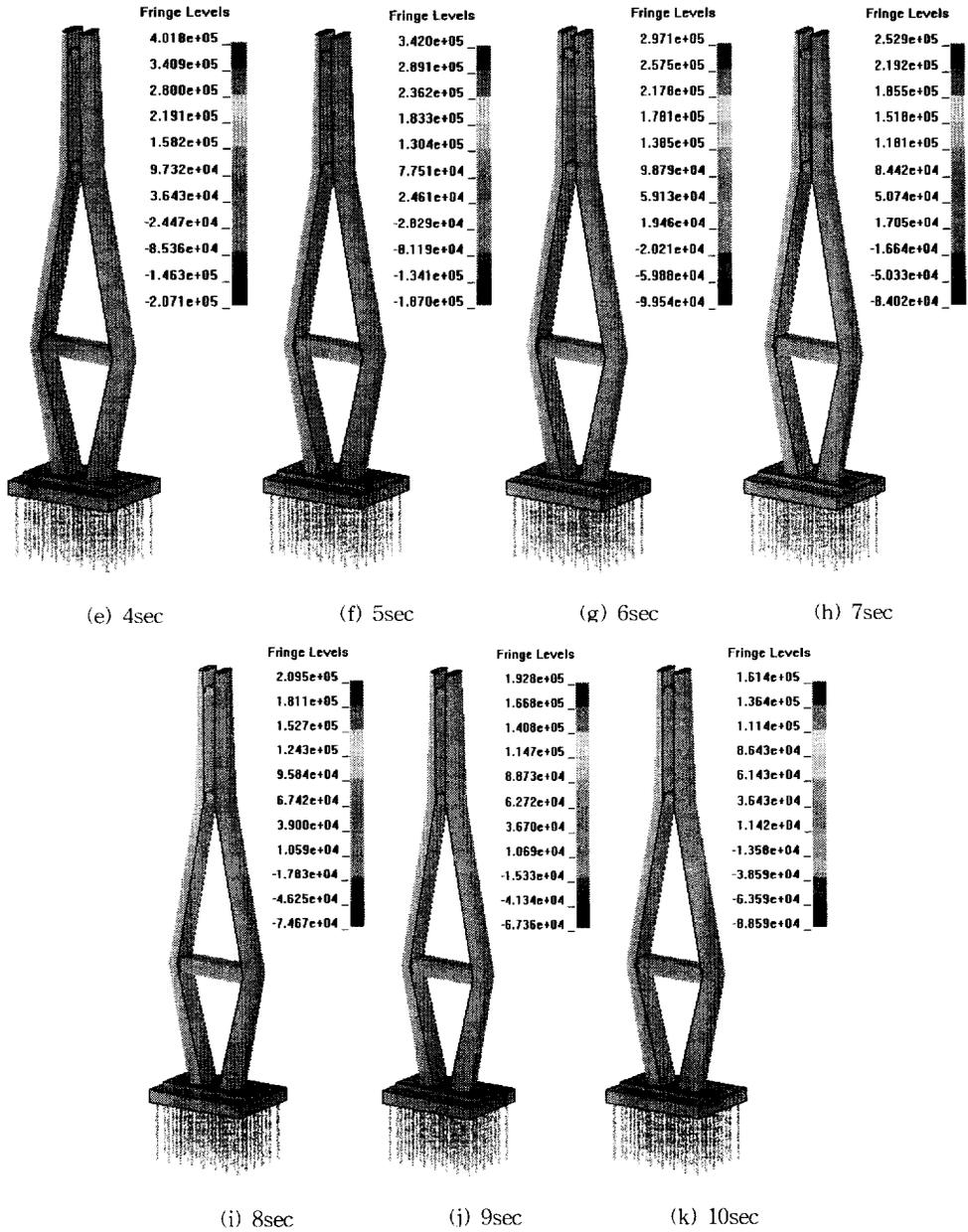


Fig. 4.8 Time Histories of Stress for Collision Model 2-1

Table 4.1 Stress at Foundation Slab for Collision Model 2-1

Location	Stress(MPa)			
	0sec	0.22sec	0.7sec	1sec
Foundation Slab	0	66.65	39	0

② 충돌 모델 2-2의 응력 거동

충돌 모델 2-2의 경우, Fig. 4.9와 같이 기초 슬래브의 최대 응력은 약 0.3초 때 31.41MPa으로 계산되었다. 충돌 직후에 급격하게 응력이 증하였다가 1초경과 후 급격히 감소하여 0MPa의 값을 보였다.

Fig. 4.10(a)~(k)와 같이 충돌 모델 2-2의 경우 사장교 주탑부의 전체 응력 양상을 시간에 따라 나타내었고, Table 4.2와 같이 표로 나타내었다.

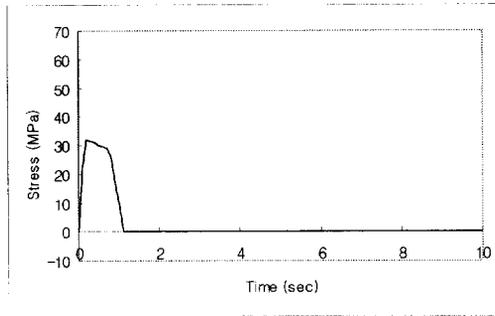
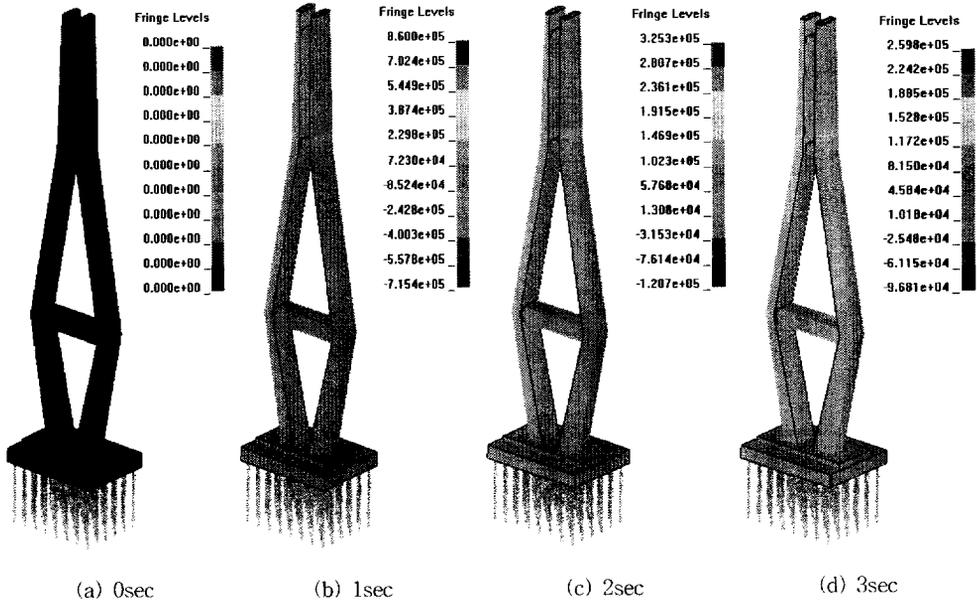


Fig. 4.9 Time Histories of Stress at Foundation Slab for Collision Model 2-2



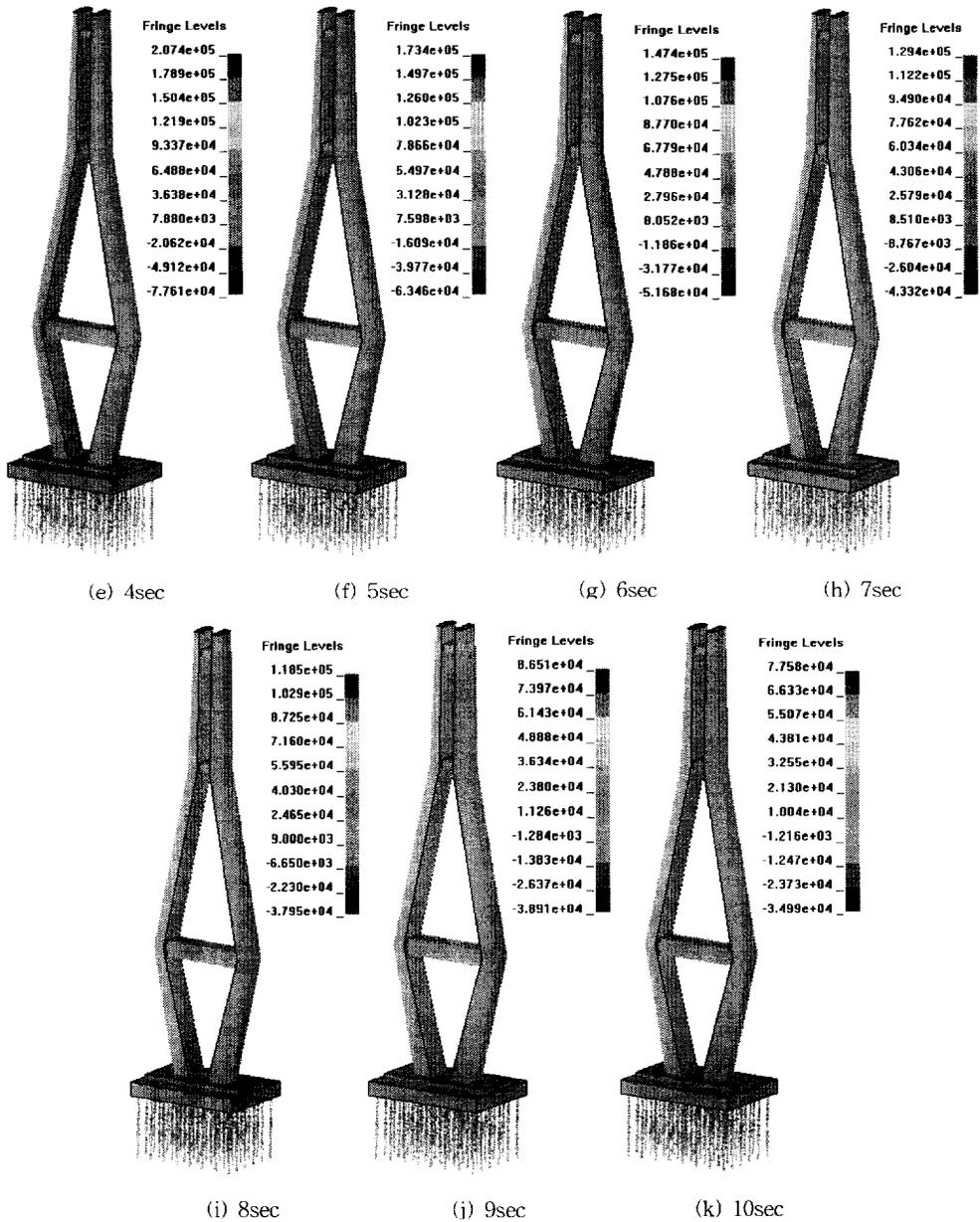


Fig. 4.10 Time Histories of Stress for Collision Model 2-2

Table 4.2 Stress at Foundation Slab for Collision Model 2-2

Location	Stress(MPa)			
	0sec	0.3sec	0.7sec	1sec
Foundation Slab	0	31.41	29.50	0

4.2.2 변위 거동

① 충돌 모델 2-1의 변위 거동

충돌 모델 2-1의 경우, Fig. 4.11과 같이 기초 슬래브의 최대 변위는 약 0.2초에 114.82cm, Fig. 4.12와 같이 주탑부 상단의 최대 변위는 약 4.3초에 22.88cm으로 각각 계산되었다. 주탑부 상단은 충돌 발생 약 0.5초 이후 크고 작은 진동이 발생하였다. 이는 충돌력이 주탑부 상단에 영향을 미치기까지 약 0.5초 정도 소요되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.13(a)~(k)에 충돌 모델 2-1의 경우 시간에 따른 사장교 주탑부의 전체 변위 양상을 나타낸 것이다. Table 4.3과 Table 4.4에 기초 슬래브와 사장교 주탑부 상단에서의 변위 결과를 각각 나타내었다.

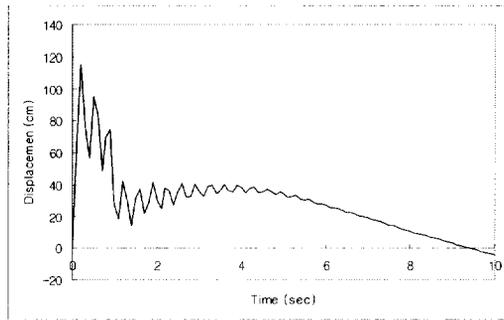


Fig. 4.11 Time Histories of Displacement at Foundation Slab for Collision Model 2-1

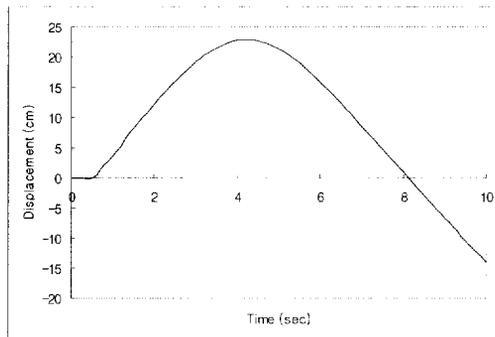
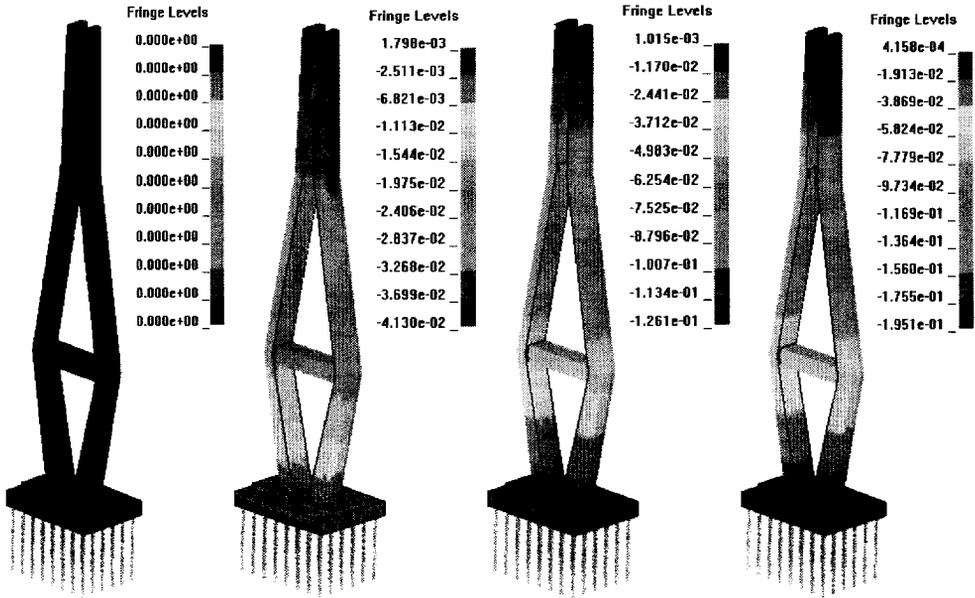


Fig. 4.12 Time Histories of Displacement at Top-Pylon for Collision Model 2-1

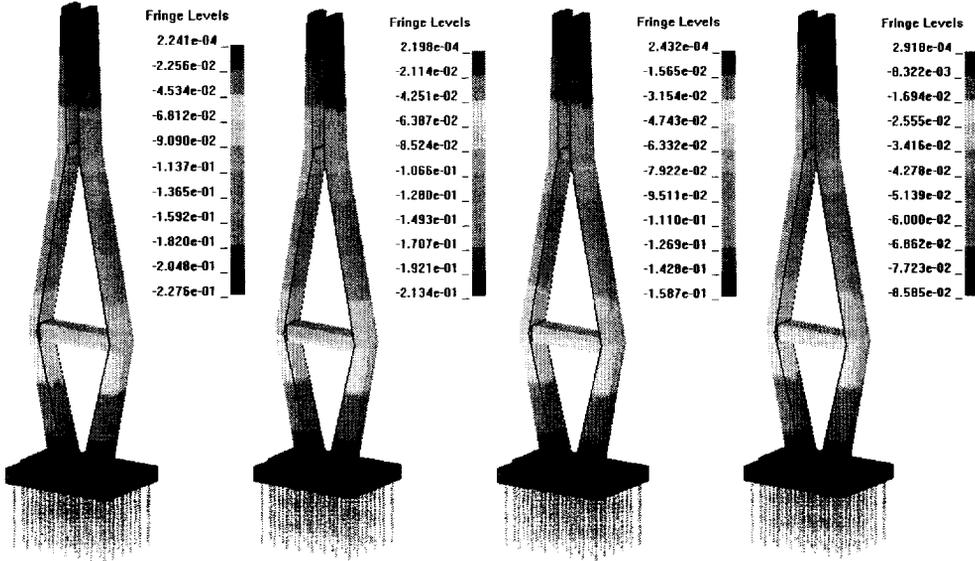


(a) 0sec

(b) 1sec

(c) 2sec

(d) 3sec



(e) 4sec

(f) 5sec

(g) 6sec

(h) 7sec

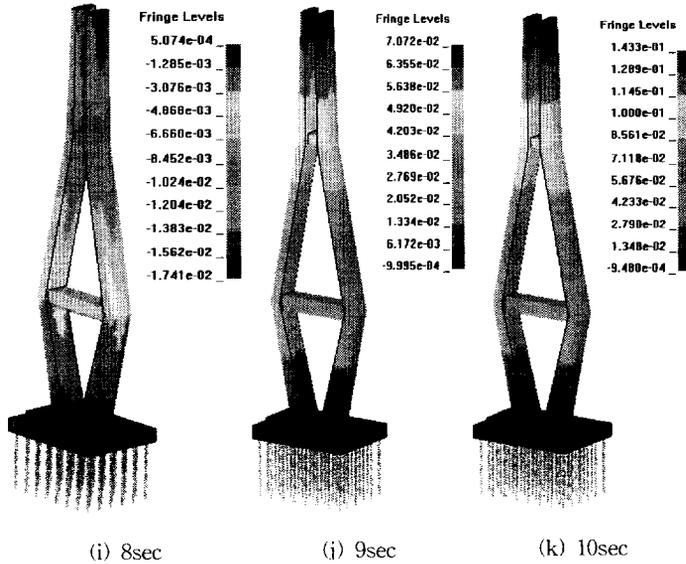


Fig. 4.13 Time Histories of Displacement for Collision Model 2-1

Table 4.3 Displacement at Foundation Slab for Collision Model 2-1

Location	Displacement(cm)				
	0sec	0.2sec	1.07sec	3.21sec	9.45sec
Foundation Slab	0	114.82	30.00	40.00	0

Table 4.4 Displacement at Top-Pylon for Collision Model 2-1

Location	Displacement(cm)			
	0sec	0.54sec	4.3sec	10sec
Top-Pylon	0	0	22.88	-13.20

② 충돌 모델 2-2의 변위 거동

충돌 모델 2-2 경우, Fig. 4.14와 같이 기초 슬래브에서의 최대 변위는 0.8초 때 20cm, Fig. 4.15와 같이 주탑부 상단의 최대 변위는 1.87초 때 1.87cm, 약 1.9초 때 -2.02cm으로 계산되었다. 주탑부 상단은 충돌 발생 약 0.5초 이후 크고 작은 진동을 보였다. 이는 충돌력이 주탑부 상단에 영향을 미치기까지 약 0.5초 정도 소요되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.16(a)~(k)에 충돌 모델 2-2의 시간에 따른 사장교 주탑부의 전체 변위 양상을 나타내었다. Table 4.5와 Table 4.6에 기초 슬래브와 사장교 주탑부 상단에서의 변위 결과를 각각 나타내었다.

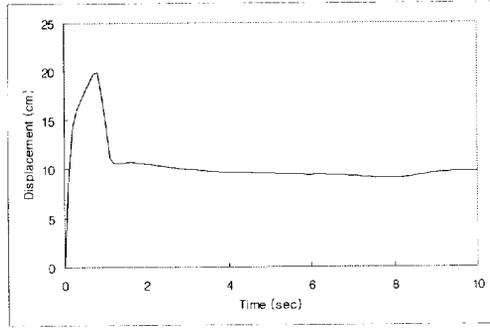


Fig. 4.14 Time Histories of Displacement at Foundation Slab for Collision Model 2-2

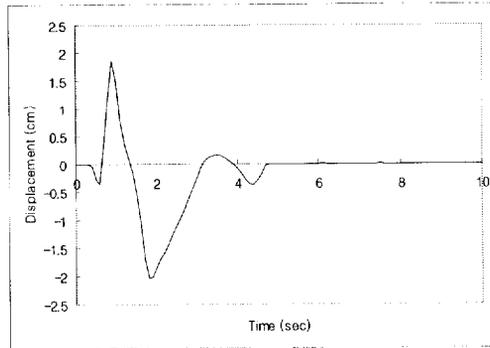
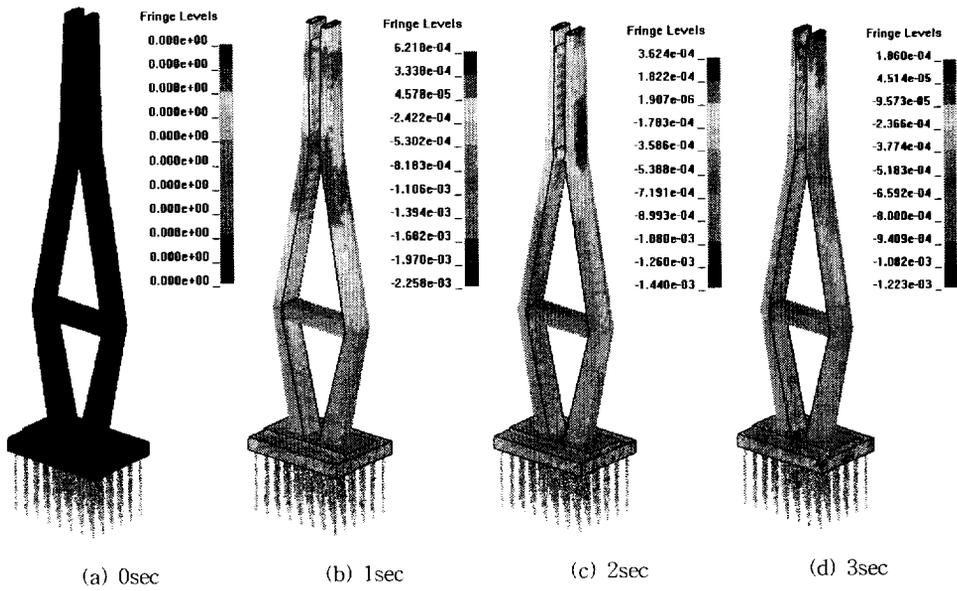


Fig. 4.15 Time Histories of Displacement at Top-Pylon for Collision Model 2-2



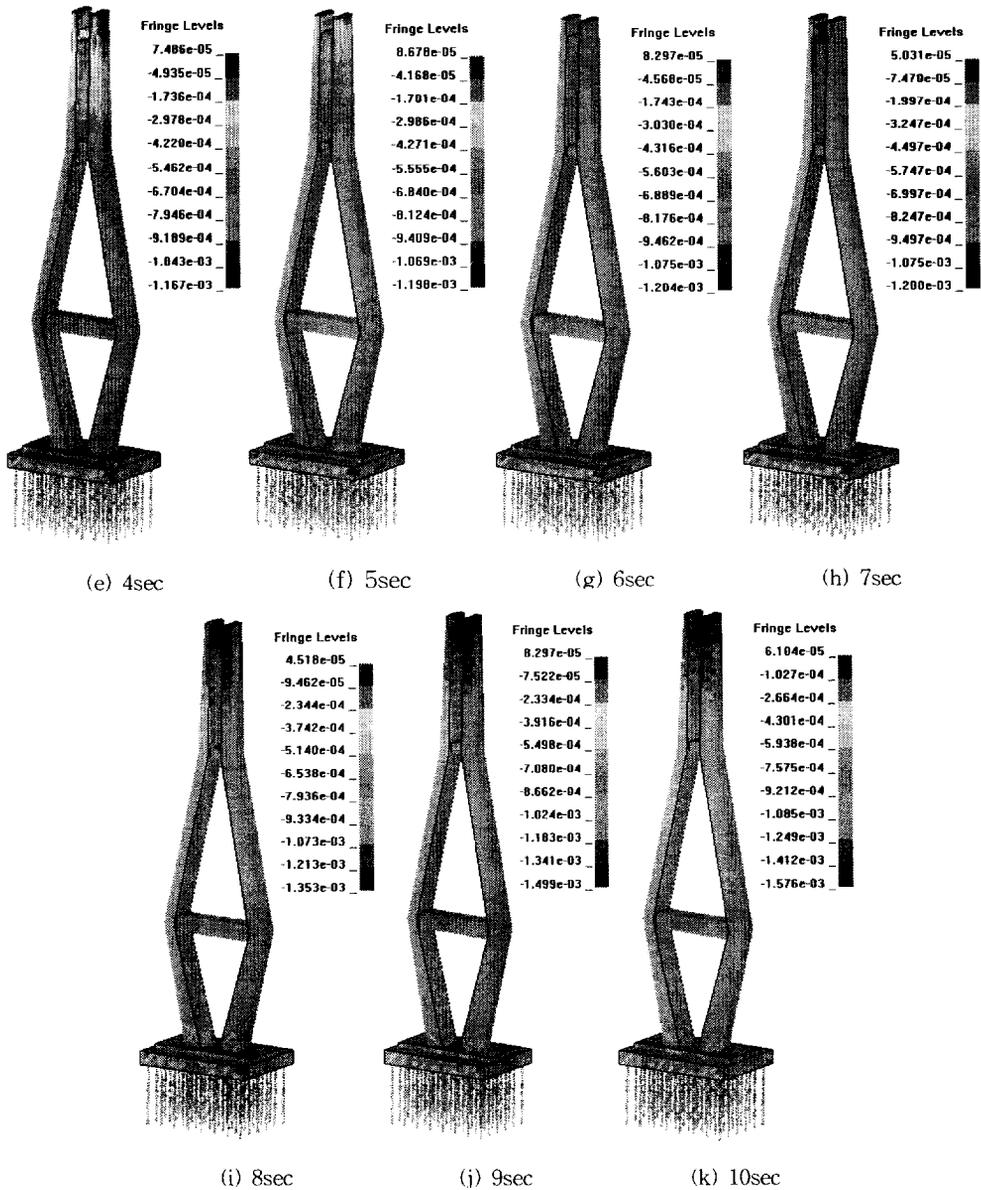


Fig. 4.16 Time Histories of Displacement for Collision Model 2-2

Table 4.5 Displacement at Foundation Slab for Collision Model 2-2

Location	Displacement(cm)					
	0sec	0.8sec	1.09sec	2.91sec	7.82sec	10sec
Foundation Slab	0	20.00	10.94	10.00	9.38	10.00

Table 4.6 Displacement at Top-Pylon for Collision Model 2-2

Location	Displacement(cm)						
	0sec	0.37sec	1.87sec	1.90sec	3.52sec	4.26sec	4.63sec
Top-Pylon	0	0	1.87	-2.02	0.13	0.38	0

4.3 충돌 모델 3에 의한 구조거동

충돌 모델 3은 사장교 주탑부와 8,000TEU급 컨테이너선의 직접 충돌 시뮬레이션을 통해 충돌 해석을 수행한 모델이다. 이 충돌 모델의 경우, Fig. 3.6(a)과 같이 선수와 기초 슬래브의 1차 충돌, Fig. 3.6(b)과 같이 선수와 주탑부의 2차 충돌이 각각 발생하였다.

4.3.1 응력 거동

충돌 모델 3의 응력 해석 결과, Fig. 4.17과 같이 최대 응력은 1차 충돌이 발생한 지점인 사장교 기초 슬래브에서 0.5초 때 18.94MPa, Fig. 4.18과 같이 2차 충돌이 발생한 지점인 사장교 주탑부에서는 2.4초 때 24.13MPa의 값을 나타내었다. 2차 충돌시 더 큰 응력값을 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 4.19(a)~(k)에 충돌 모델 3의 시간에 따른 주탑부의 응력 양상을 나타낸 그림이다. Table 4.7과 Table 4.8에 1차 충돌 위치인 기초 슬래브와 2차 충돌 위치인 사장교 주탑부에서의 응력 결과를 각각 나타내었다.

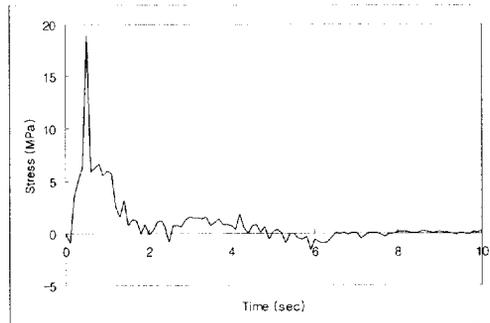


Fig. 4.17 Time Histories of Stress at Foundation Slab for Collision Model 3-Primary Collision

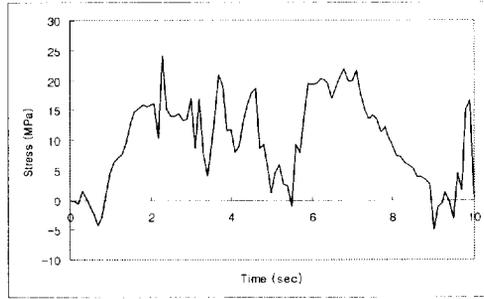
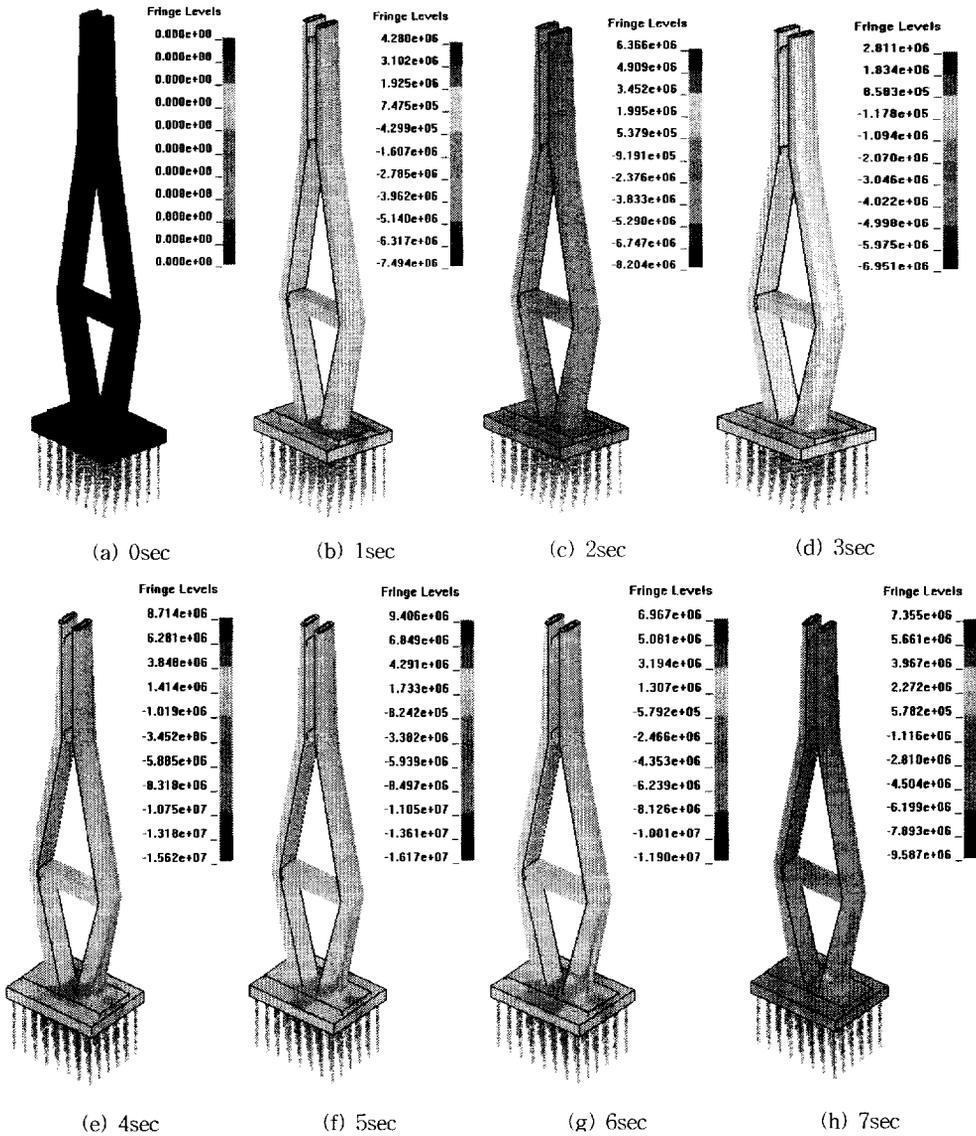


Fig. 4.18 Time Histories of Stress at Collided-Pylon for Collision Model 3-Secondary Collision



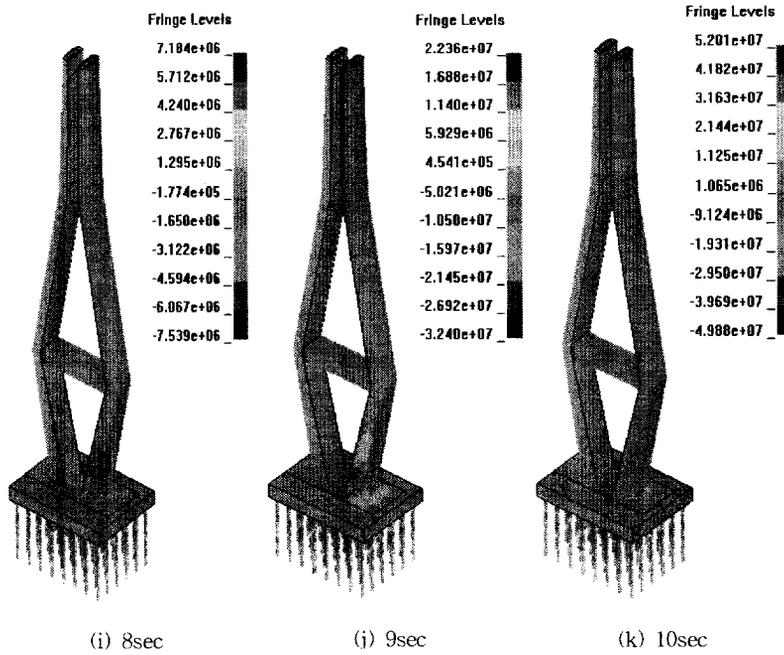


Fig. 4.19 Time Histories of Stress for Collision Model 3

Table 4.7 Stress at Foundation Slab for Collision Model 3

Location	Stress(MPa)				
	0sec	0.50sec	0.73sec	4.18sec	6.55sec
Foundation Slab	0	18.94	6.21	1.38	0

Table 4.8 Stress at Collided-Pylon for Collision Model 3

Location	Stress(MPa)				
	0sec	2.40sec	3.15sec	5.19sec	8.76sec
Collided-Pylon	0	24.13	16.67	5.56	22.22

4.3.2 변위 거동

충돌 모델 3의 시간에 따른 변위 결과를 Fig. 4.20, Fig. 4.21, Fig. 4.22에 각각 나타내었다. 1차 충돌이 발생한 지점인 사장교 기초 슬래브에서의 최대 변위는 1.5초 때 58.89cm로서 Fig. 4.20에 나타내었다. 또한 Fig. 4.21과 같이 2차 충돌이 발생한 지점인 사장교 주탑부에서의 최대 변위는 5.8초 때 120.6cm의 값을 나타내었다. 2차 충돌시 최대 변위는 1차 충돌시 최대 변위가 발생하고 2초가 경과한 후에 나타났으며, 변위의 크기는 약 2배가량 차이를 보였다. 사장교 주탑부 상단

의 최대 변위는 Fig. 4.22와 같이 충돌 직후부터 2초간은 변위를 거의 보이지 않았다. 그러나 4초 이후 변위를 보이다가 6초 이후 선박의 진행 방향과 반대로 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4.23(a)~(k)는 충돌 모델 3의 사장교 주탑부의 시간에 따른 변위 양상을 나타낸 그림이다. Table 4.9는 1차 충돌 위치인 기초 슬래브에서의 변위 결과를 나타낸 것이고, Table 4.10은 2차 충돌 위치인 사장교 주탑부에서의 변위 결과를 나타낸 것이다. Table 4.11은 주탑부 상단에서의 변위 결과이다.

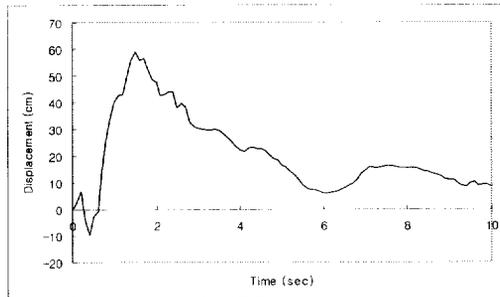


Fig. 4.20 Time Histories of Displacement at Foundation Slab for Collision Model 3
-Primary Collision

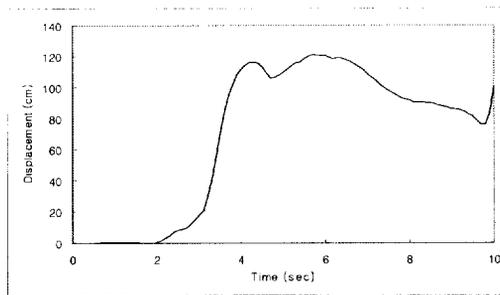


Fig. 4.21 Time Histories of Displacement at Collided-Pylon for Collision Model 3
-Secondary Collision

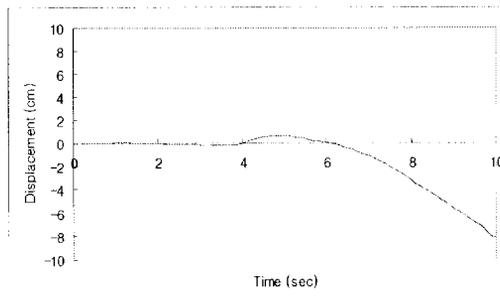
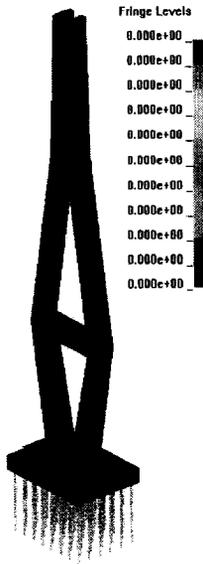
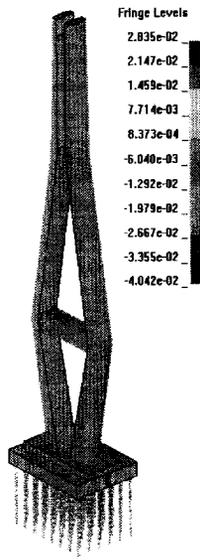


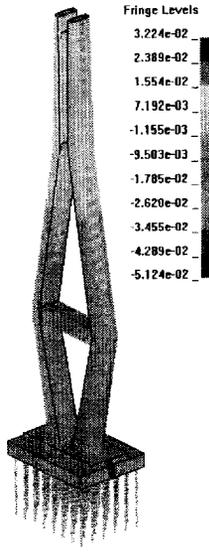
Fig. 4.22 Time Histories of Displacement at Top-Pylon for Collision Model 3



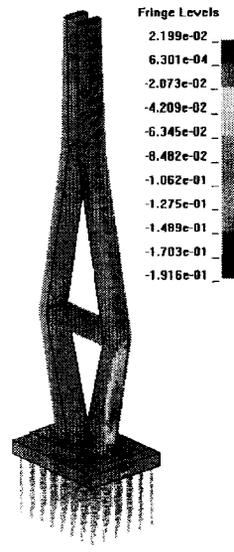
(a) 0sec



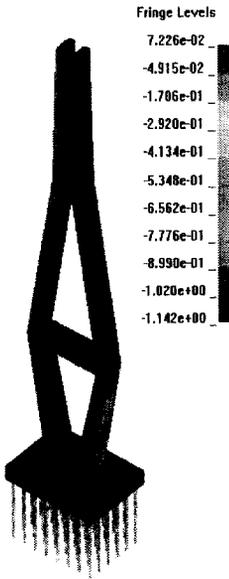
(b) 1sec



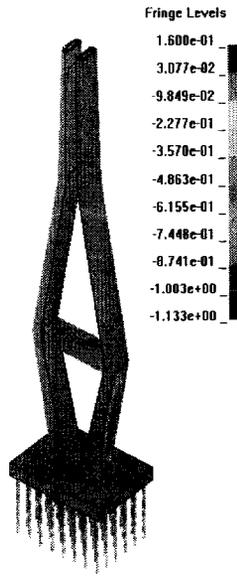
(c) 2sec



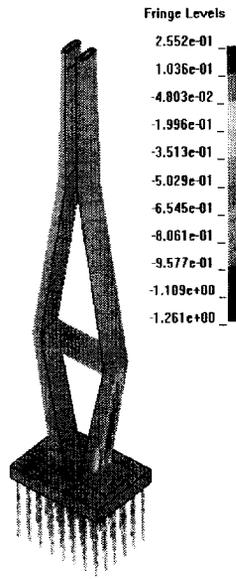
(d) 3sec



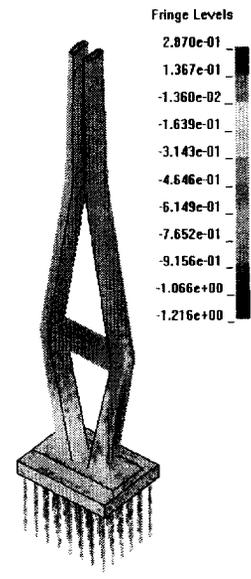
(e) 4sec



(f) 5sec



(g) 6sec



(h) 7sec

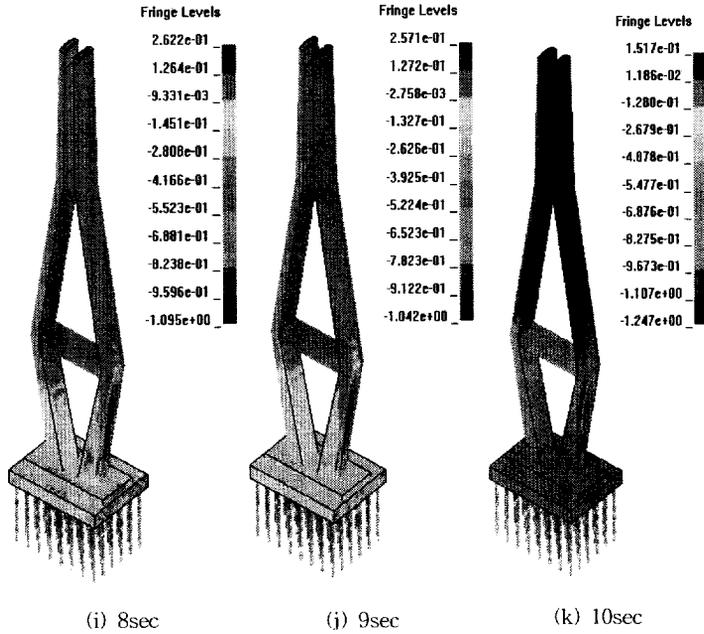


Fig. 4.23 Time Histories of Displacement for Collision Model 3

Table 4.9 Result of Displacement at Foundation Slab for Collision Model 3-Primary Collision

Location	Displacement(cm)					
	0sec	0.18sec	0.36sec	1.50sec	6.00sec	7.09sec
Foundation Slab	0	7.00	-9.33	58.89	9.33	16.33

Table 4.10 Result of Displacement at Collided-Pylon for Collision Model 3-Secondary Collision

Location	Displacement(cm)					
	0sec	1.79sec	3.04sec	4.29sec	4.64sec	5.80sec
Collided-Pylon	0	0	21.21	114.55	84.85	120.60

Table 4.11 Result of Displacement at Top-Pylon for Collision Model 3

Location	Displacement(cm)					
	0sec	3.19sec	3.89sec	4.78sec	6.02sec	9.03sec
Top-Pylon	0	-2.94	0	5.88	0	11.18

4.4 충돌 모델별 구조거동의 비교

4.4.1 응력 해석 결과 비교

전체 충돌 모델별로 사장교 기초 슬래브의 최대 응력을 산정한 결과를 Fig. 4.24에 도시하였다. 충돌 모델 1의 최대 응력은 92.99MPa, 충돌 모델 2-1의 최대 응력은 66.65MPa, 충돌 모델 2-2의 최대 응력은 31.41MPa이었다. 충돌 모델 3은 선박이 직접 충돌한 시뮬레이션 해석의 결과로서, Fig. 4.24와 같이 1차 충돌로 인한 기초 슬래브에서의 최대 응력은 18.94MPa로 계산되었고, Fig. 4.18과 같이 2차 충돌로 인한 주탑부에서의 최대 응력은 24.13MPa로 계산되었다.

Fig. 4.24의 결과로부터 충돌 모델 1의 응력이 가장 크게 발생함을 알 수 있었다. 충돌 모델 1의 최대 응력에 비하여 충돌 모델 2-1의 최대 응력은 28.33%, 충돌 모델 2-2의 최대 응력은 66.22% 작게 발생하였다. 또한, 충돌 모델3의 최대 응력은 충돌 모델 1의 최대 응력에 비하여 74.05~79.63% 작게 산정되었다.

최대 응력이 발생한 시간은 충돌 모델 2와 충돌 모델 3의 1차 충돌 경우에는 충돌 직후 인데 반해 충돌 모델 3의 2차 충돌 경우 충돌 후 약 2.4초가 경과한 후에 최대 응력이 나타난 것을 알 수 있다.

충돌 모델 1과 충돌 모델 2-1은 사장교 주탑부의 콘크리트 설계 강도 40MPa를 초과하였다. 충돌 모델 2-2와 충돌 모델 3의 2차 충돌의 경우에는 각각 31.41MPa, 24.13MPa로 응력이 다소 크게 나타났다.

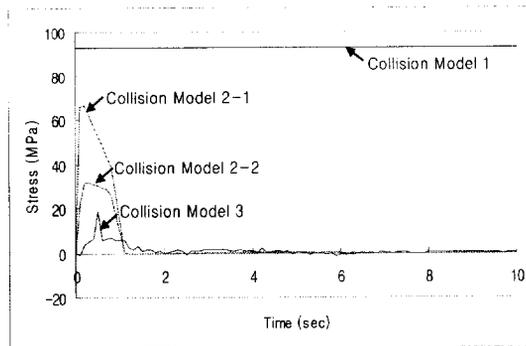


Fig. 4.24 Comparison of Stress at Foundation Slab

4.4.2 변위 해석 결과 비교

사장교 주탑부의 시간에 따른 변위 산정 결과를 Fig. 4.25, Fig. 4.26에 각각 도시하였다. Fig. 4.25와 같이 기초 슬래브에서의 최대 변위는 충돌 모델 1의 경우 24.1cm, 충돌 모델 2-1의 경우 114.82cm, 충돌 모델 2-2의 경우 20cm, 충돌 모델

3은 58.89cm로 계산되었다. 특히, 충돌 모델 3은 선수의 상단이 사장교의 기초 슬래브가 아닌 주탑부에 2차 충돌이 발생하여 Fig. 4.21과 같이 최대 변위 120.60cm가 산정되었다.

Fig. 4.26은 주탑부 상단에서의 시간이력 변위 그래프이다. 충돌 모델 1의 경우 18.2cm, 충돌 모델 2-1의 경우 22.88cm, 충돌 모델 2-2의 경우 1.87cm, -2.02cm로 최대 변위가 산정되었다.

충돌 모델 2-1의 경우는 충돌 후 약 1초가 경과한 후에 변위가 발생하여 약 4초에 최대 변위를 보이면서 탄성회복 하였고, 충돌 모델 2-2의 경우는 최대 약 2cm정도의 작은 진동이 주기적으로 발생하였다. 충돌 모델 3은 실제 충돌 상황과 가장 유사한 것으로 충돌 직후에는 작은 진동을 보이다가 시간이 경과할수록 진동이 증가하였다.

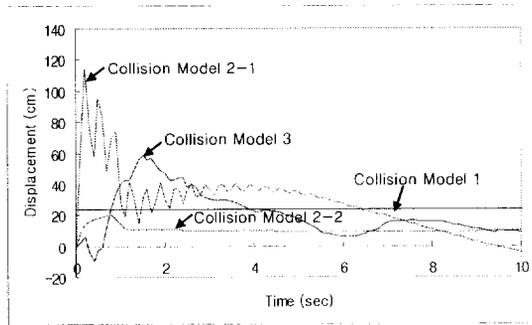


Fig. 4.25 Comparison of Displacement at Foundation Slab

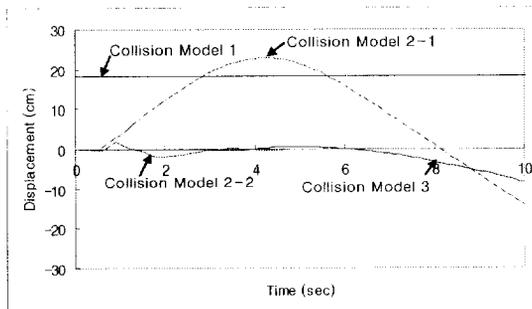


Fig. 4.26 Comparison of Displacement at Top-Pylon

5. 요약 및 결론

전 세계적으로 교량-선박충돌의 대형사고 사례가 증가하여 선박충돌하중의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 선박 충돌에 대하여 AASHTO는 설계시 선박 충돌을 고려하도록 규정하였고, 충돌력 산정식을 제시하고 있다. AASHTO 이외에도 1990년대 이전에는 충돌 현상을 단순화한 모델 또는 선박축소 모형실험을 통해 확률·통계적 및 정역학적 개념을 도입하여 충돌에 대한 여러 가지 결과를 도출되었다. 또한 1990년대 이후 유한요소해석 기술의 발달로 선박 충돌 시뮬레이션이 가능해져 기존의 하중재하 형태로 표현할 수 없는 부분까지 표현이 가능해졌다. 이에 선박-선박의 충돌, 바지선-해양구조물의 충돌 등이 시뮬레이션을 통해 많은 연구가 진행되었다. 하지만 복잡한 거동을 보이는 교량 구조물과 대형 선박 간의 충돌문제에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 충돌력 산정 방법에 따라 컨테이너선 충돌력의 시간이력을 분석하고, 각각 충돌력에 대한 사장교 주탑부의 동적 응답을 해석 및 비교, 분석하고자 한다. 이와 같은 목적을 달성하기 위해서, 먼저 충돌 대상 구조물과 충돌 선박을 선정하였다. 각각 대상 구조물은 ANSYS를 이용하여 유한요소 모델로 모델링하였다. 다음으로 충돌력은 각기 다른 3가지 방법으로 산정되었다. 충돌력 산정 방법으로 ① AASHTO기준에 의한 등가정적 충돌력 산정식 이용한 방법, ② AASHTO형 피 충돌판과 컨테이너선 충돌 시뮬레이션에 의한 방법, ③ 사장교 주탑부와 컨테이너선 3D 충돌 시뮬레이션에 의한 방법이 사용되어졌다. 특히 두 번째 방법에서 AASHTO형 피충돌판은 다시 사각형의 4면이 고정인 경우와 1면이 모두 고정인 경우로 나누어 해석하였다. 마지막으로 산정된 충돌력을 이용하여 사장교 주탑부의 동적 거동을 ANSYS/LS-DYNA를 이용하여 해석하였고, 그 결과를 비교, 분석하였다. 이에 따라 다음과 같은 네 가지의 결론을 도출하였다.

- (1) 세 가지 충돌 모델중에서 AASHTO 기준에 의한 등가정적 충돌력이 가장 크게 산정되었다. 또한 시뮬레이션을 통한 충돌력 산정에 있어, 1면 고정인 Steel Plate-선박 충돌로 산정된 충돌력은 실제 사장교 주탑부-선박 충돌로 산정된 충돌력과 4면 고정인 Steel Plate-선박 충돌에 비해 비교적 유사한 것을 확인 할 수 있었다.
- (2) 3-D 선박 충돌 시뮬레이션을 통한 사장교 주탑부의 동적 거동은 1면 고정인 Steel Plate-선박 충돌로 산정된 충돌력을 적용한 동적 해석결과와 가장 유사한 형태를 보였다. 그러므로 초기설계시 해석시간의 단축을 위하여 1면 고

정인 Steel Plate-선박 충돌로 산정된 충돌력을 이용해도 될 것이라 판단된다.

- (3) 선박 충돌 시뮬레이션 결과, 충돌시 선수의 하부와 충돌하는 기초 슬래브 보다 선수의 상부와 충돌하는 주탑부에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그러므로 구상선수의 형태를 하고 있는 대형 선박의 충돌 위험이 있는 구조물에 대해서는 선박의 형상을 고려한 해석이 필요하다.
- (4) 일반적으로 구조물 설계시 AASHTO규준의 등가정적 충돌력 산정식에 의해 정적해석 수행하여 처짐, 응력을 분석하게 된다. 하지만 사장교와 같이 복잡한 거동을 가지는 구조물에 대해서는 정적해석뿐만 아니라 동적 충돌 시뮬레이션을 통해 동적 처짐 및 응력에 대한 시간이력을 분석할 필요가 있다고 판단된다.

참고 문헌

- 건설교통부(2001) 도로설계편람(III), 한국건설기술연구원.
- 고재용(2003) ANSYS와 유한요소법, 시그마 프레스(주).
- 김성원, 김정수, 황재혁 역(1998) 동역학, 사이텍미디어.
- 김종성, 정현, 고재용(2004) 선박과 해양 구조물의 충돌 해석, 한국전산구조공학 회 봄 학술발표회 논문집, 17(1), pp. 169~176.
- 대한토목학회(2003) 도로교 설계 기준·해설(공통·강교·콘크리트교), 기문당
- 유태성, 신중호, 이인호 역(2001) 토질 역학, 엔지니어즈.
- 이계희, 고재용, 이성로(2004) 방호공을 고려한 선박의 충돌하중, 한국전산구조공 학회 봄 학술발표회 논문집, 17(1), pp. 193~200.
- 이성로, 이계희, 이완수(2004) 교량의 선박충돌 에너지 산정, 대한토목학회 논문 집, 24(5), pp. 951~960.
- 조의경, 고광오, 김종성(2004) 선박과 교량의 충돌 해석, 한국강구조학회지 학술 기사, 16(3), pp. 56~65.
- 최창근(2003) 유한요소법, 테크노 프레스.
- 홍관영, 이계희, 고재용, 이성로(2005) 선박충돌에 의한 선박과 방호공의 에너지 소산 메카니즘, 한국전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집, 18(1), pp. 696~702.
- 홍봉기(1988) 선체 구조, 한국이공학사.
- AASHTO(1991) Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges, Washington, DC.
- AASHTO(2004) AASSHTO LRFD Bridge Design Specifications, Washington, DC.
- Amdahl, J. and Johansen, A.(2001) High-Energy Ship Collision with Jacket Legs, International Society of Offshore and Polar Engineers, pp. 363~372.
- Consolazio, G. R., and Cowan, D. R.(2003) Nonlinear Analysis of Barge Crush Behavior and Its Relationship to Impact Resistant Bridge Design, Computers & Structures, 81(8/11), pp. 547~557.
- Consolazio, G. R., and Cowan, D. R.(2005) Numerically Efficient Dynamic Analysis of Barge Collisions with Bridge Piers, Journal of Structural Engineering, 131(8), pp. 1256~1266.
- Consolazio, G. R., Lehr, G. B., and McVay, M. C.(2004) Dynamic Finite Element Analysis of Vessel-Pier-Soil Interaction During Barge

- Impact Events, Journal of the Transportation Research Board, 1849, pp. 81~90.
- Gu, Y., and Wang, Z. L.(1982) An Inertia Equivalent for Numerical Simulation of Ship-Ship Collisions, International Conference on Collision and Grounding of Ships, pp. 155~160.
- Hajdin, R., and Adey, B. T.(2004) Probable Occurrence of Ship Impact Forces on Bridge Piers in Inland Waterways, 2nd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Maintenance, IABMSE, pp. 19~22.
- Hendrix, J. L.(2003) Dynamic Analysis Techniques for Quantifying Bridge Pier Response to Barge Impact Loads, Unpublished M. S. thesis, the University of Florida, Florida, U.S.A.
- Kenneth Brian Berlin, B. S.(2005) Structural Reliability Analysis for Vessel Impact on Bridges, Unpublished M. S. thesis, the University of Texas at Austin, Texas, U.S.A.
- Larsen, O. D.(1993) Ship Collision with Bridges : The Interaction between Vessel Traffic and Bridge Structures, International Association for Bridge and Structural Engineering.
- Liu, C., and Wang, T. L.(2001) Statewide Vessel Collision Design for Bridges, Journal of Bridge Engineering, 6(3), pp. 213~219.
- Logan, D. L.(2002) A First Course in the Finite Element Method, Brook/Cole.
- Overseas Coastal Area Development Institute of Japan(2002) Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan.
- Pedersen, P. T., and Zhang, S.(1998) On Impact Mechanics in Ship Collisions, Marine Structures, 11(10), pp. 429~449.
- Petersen, M. J.(1982) Dynamic of Ship Collisions, Ocean Engineering, 9(4), pp. 295~329.
- Sourne, H. L., Couty, N., Besnier, F., Kammerer, C., and Legavre, H.(2001) LS-DYNA Applications in Shipbuilding, 4th European LS-DYNA users Conference.
- Sourne, H. L., Donner, R., Besnier, F., and Ferry, M.(2001) External Dynamics of Ship-Submarine Collision, International Conference on Collision and Grounding of Ships, pp. 137~144.
- Wang, M. L., Heo, G., and Satpathi, D.(1997) Dynamic Characterization of a Long Span Bridge : A Finite Element Based Approach, Soil Dynamic and Earthake Engineering, 16, pp. 503~512.

- Wisniewski, K., and Kolakowowski, P.(2002) The Effect of Selected Parameter on Ship Collision Results by Dynamic FE Simulations, *Finite Elements in Analysis and Design*, 39(10), pp. 985~1006.
- Wu, F., Spong, R., and Wang, G.(2004) Using Numerical Simulation to Analyze Ship Collision, *International Conference on Collision and Grounding of Ships*, pp. 217~224.
- Xia, J.(2001) Finite Element Analysis of Ship Collision, Unpublished M. S. thesis, the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, U.S.A.
- Zhang, B.(2004) Influence of Pier Nonlinearity, Impact Angle, and Column Shape on Pier Response to Barge Impact Loading, Unpublished M. S. thesis, the University of Florida, Florida, U.S.A.

감사의 글

해양공학의 의미도 모른 채 마냥 새로운 맘으로 수업을 들었던 게 엇그제 같은데 벌써 졸업을 앞두고 있다는 것이 믿어지지 않습니다. 2년이라는 시간은 제게 놓친 것, 잃은 것도 많은 시간이었지만 그 만큼 제 인생 전체를 볼 때 가장 큰 발전과 발돋움의 기간이었습니다. 이렇게 변화할 수 있게 도와주신 제 주위에 모든 분들께 감사의 말씀을 드립니다.

누구보다 절 먼저 챙겨주시고 항상 걱정해주시는 부모님께 제일 먼저 감사의 말씀을 전합니다. 실수투성인 저에게 가르침과 함께 세상 살아가는 방법을 일깨워주신 제 2의 부모님과 같은 존재인 김정태 교수님, 젠틀한 웃음이 인상적인 류연선 교수님, 그리고 부족한 저에게 항상 자상하게 대해주시고 다시는 잊지 못할 주옥같은 강의를 해주신 나원배 교수님께 진심으로 감사드립니다.

저에게는 대학생살의 반 이상이라고 해도 과언이 아닐 만큼 소중한 SSeL연구실, 그 중에서도 대학생살의 많은 부분을 함께했던 용쓰 용환선배, 들쇠 병준선배께 2년 동안 같이 할 수 있어서 기뻐고 고맙다는 말을 하고 싶습니다. 무슨 일이든 척척 잘해내는 만능박사 호프 재형선배, 동수선배, 한성선배, 민효선배, 국래, 정미, 소영, 막내 송기까지.. 덕분에 마지막 연구실 생활 즐거웠습니다. 언제나 가까이에서 많은 부분을 공유해주고 큰 힘이 되어준 오래갈 인연들 혜진, 민수, 혜정, 의상 협찬 진주, 투은주들(박은주, 서은주), 수다아줌마 미란, 주미, 현경, 서울에서 기다리고 있는 미정, 정은 너무 고맙고 사랑해~ 존재만으로도 큰 힘과 용기가 되어준 우리 00학번 동기들 윤정, 현지, 현아, 현진, 세나, 은애, 보첵 정동이, 밥 많이 사준 조선학도 증현이와 재이, 기쁨조 홍수와 백수, 명종 너무 고마워~ 제 투정도 받아주고 인생의 많은 부분에 조언을 해주는 마음 여린 영임언니, 상담원 홈서선배, 보고픈 금령, 상수, 현석 너무 고마워요~ 또한 좋은 인연으로 논문에 대해서 여러가지 조언을 해주셨던 김종성대리님께도 감사의 말씀 드리고 싶습니다.

제 옆에서 격려해주신 모든 분들께 부족하지만 대학원 생활의 마지막 결실인 이 논문을 바치고 싶습니다. 이제 졸업을 앞두고 사회를 나가는 문턱에 서니 설레임과 두려움이 앞섭니다. 하지만 지금까지 해왔던 것처럼 주위에 모든 분들 실망시키지 않고 후회 없는 삶을 살도록 노력하는 사람이 되겠습니다. 감사합니다.

2006년 1월
김 주 영 올림