

# 교각에 작용하는 설계선박충돌력 산정에 관한 연구 I : 평균충돌력

## A Study for the Evaluation of Ship Collision Forces for the Design of Bridge Pier I : Mean Collision Force

이계희\* · 홍관영\*\*

Lee, Gye Hee · Hong, Kwan Young

### Abstract

In Korea, the current design codes for the bridge vessel collision load are based on AASHTO LRFD code which derived from the mean collision forces of the Woisin's test. To estimate the conservativeness of the code, in this study, the mean forces of head on collisions were evaluated from the mass-acceleration relationship of vessel and the deformation-kinetic energy relationship of bow those obtained from the series of nonlinear finite element analysis, and the mean forces were compared to that in AASHTO design code. As results, the variations of the mean forces versus the sizes of vessels were represented similar tendency, even those of the code are very conservative. However, the variations of mean collision force versus those of collision speeds were dominated by the plastic deformation of bow and it was differ from those of the code that have linear relationship with the collision speeds.

**Keywords :** AASHTO LRFD, collision speed, Mean collision force, mass-acceleration, bow indentation, nonlinear collision analysis.

### 요 지

현재 국내에서 사용되고 있는 교량의 선박충돌력에 대한 설계기준은 Woisin의 실험으로부터 제안된 평균충돌력을 적용한 AASHTO LRFD에 기반을 두고 있다. 이러한 평균충돌력의 보수성을 평가하기 위하여, 본 연구에서는 비선형 유한요소해석을 토대로 선박의 질량-가속도의 관계, 선수의 변형-운동에너지의 관계를 이용하여 선수충돌시 발생하는 평균충돌력을 산정하고 이를 AASHTO 설계기준과 비교하였다. 그 결과, 선박의 크기에 따른 평균충돌력의 변화는 해석에서 얻어진 평균충돌력에 비해 매우 보수적이지만 경향은 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 속도에 따른 평균충돌력의 변화는 충돌속도에 비례하는 설계기준의 값과는 달리 선수의 소성거동에 지배를 받는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** AASHTO LRFD, 충돌속도, 평균충돌력, 질량-가속도, 선수변형, 비선형 충돌해석

### 1. 서 론

해상교량 및 항로를 횡단하는 장대교량이 속속 계획, 설계, 시공되고 있는 현 시점에서 선박의 충돌하중은 이러한 교량들의 중요한 하중조건이 되고 있다. 국내에서는 선박의 충돌하중 산정을 위해 미국의 AASHTO LRFD 기준(AASHTO, 1991; AASHTO, 2004)을 주로 사용하고 있으며(건설교통부, 2005; 대한토목학회, 2006) 대형교량의 경우에는 컴퓨터수치해석에서 얻은 충돌력이 교량하부구조의 구조적 안전성에 영향을 미치는지를 추가적으로 검토하여 설계하고 있다. 이러한 과정에서 대부분의 경우 선박충돌에 대한 이해부족과 보수적인 설계로 인해 설계기준의 충돌력과 수치해석에서 얻

은 충돌력간의 상관관계가 불명확해지고, 설계결과물이 하중에 대하여 과다설계되는 경향이 있다. 특히 해상교량의 경우 하부구조의 건설비용이 매우 높다는 점을 고려한다면 선박충돌력에 대한 정확한 이해와 적용은 전체교량의 경제성 증진으로 이어질 것이다.

선박의 충돌력에 대한 연구는 기본적으로 조선공학의 영역에서 처음 시도되었다. Minorsky는 원자력선의 원자로보호를 위하여 26개의 충돌사고를 분석하여 충돌에너지와 변형된 강재의 부피와의 관계를 산정하였다(Larsen, 1993). 이후 이탈리아에서 원자력선의 설계를 위하여 비탈에서 선수모형을 미끄러뜨려 방호공의 충돌거동을 연구하였다. 현재 설계충돌력 산정의 기초가 된 Woison의 실험은 1970년대에 수

\*정회원 · 교신저자 · 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수 · 공학박사 (E-mail : lghisk@mmu.ac.kr)  
\*\*오션스페이스(주) 과장 · 공학박사 (E-mail : kyhong@oceanspace.com)

행되었으며 역시 비탈에서 선수모형을 미끄러뜨리는 형태였다.(Woisin, 1977) Nagasawa (1977) 등은 연안을 항행하는 소형선박이 교각에 충돌할 때 선체 파손모드와 충돌시 받는 하중 및 흡수 에너지를 계산할 목적으로 선체부분모형과 교각모형을 이용하여 준정적으로 압괴실험을 수행하였다(Nagasawa 등, 1977). 일본의 세토대교의 설계시에는 일련의 모델시험을 통해 충돌피해를 예측하는 방법을 제안하였다. 선수의 형상과 보강재의 배치에 따라 선수의 압괴하중을 산정하는 수치적인 방법들도 제안되었다. 이들 방법에서는 선수를 판재로 이루어진 격자모양의 통으로 보고 이러한 형태를 가진 부재의 소성좌굴거동을 산정한 후 이의 조합으로 선수의 충돌강도를 정의하였다(Amdahl, 1983; Yang and Caldwell, 1988). 이후 수치해석기법의 발달에 따라 구조해석을 통하여 다양한 충돌시물레이션이 수행되었다. Kuroiwa (1995) 등은 선측 충돌실험과 실선 충돌 실험 및 이중저 구조 모형에 대한 결과를 수치 시물레이션하였는데 범용 비선형 유한요소 프로그램 코드인 LS-DYNA3D를 이용하였다. 그리고 그들은 실제 충돌 및 좌초사고에 대한 수치 시물레이션을 수행하기도 하였다(Kuroiwa 등, 1995).

국내의 토목분야에서도 2000년대 초 해상교량의 급격한 증가와 더불어 교량에 대한 선박의 충돌하중에 대한 연구가 수행되었으며 주로 구조해석을 통한 접근이 이루어졌다(이계희 등, 2004; 이계희 등, 2005; 이성로 등, 2006; 이성로 등, 2007).

위와 같은 실험 및 연구에서 얻어진 충돌력은 선박의 크기, 선박의 속도, 선수의 손상량이 주요 매개변수가 된다. 그러나 설계단계에서는 실제적으로 선박의 크기나 속도가 이용할 수 있는 매개변수로 한정된다. 현재 사용하고 있는 설계기준에서는 이들 매개변수의 영향에 대하여 각각 1차식과 제곱근의 형태로 충돌하중을 정의하고 있다. 이러한 선박의 충돌력에 대한 실제 정밀한 충돌해석을 통해 얻어진 충돌력과의 상관관계를 고찰한 연구결과는 찾아보기 힘들다. 본 연구에서는 교량설계시 선박충돌력을 산정하는 주요 매개변수인 선박의 크기와 충돌속도에 대하여 수치해석을 수행하고 다양한 방법으로 평균충돌력을 산정하여 현 설계기준이 가진 보수성을 평가하고자 하였다.

## 2. 선박충돌력의 산정

### 2.1 AASHTO

이 AASHTO LRFD 기준서에서 제안하는 충돌력은 Woisin의 평균충돌력 개념에 바탕을 두고 있으며, Woisin의 충돌 모형시험에서 최대충돌력이 발생하는 0.1~0.2초의 시간은 구조물에 치명적인 영향을 미치지 못한다는 가정하에 평균충돌력을 계산하였다. 이러한 Woisin의 평균충돌력 개념을 이용하여 Saul과 Svensson은 40,000DWT급 이상의 벌크선이 16 knot로 강제와 충돌할 때에 선박충돌력 산정식을 제안하였으며, 이 제안식은 “40,000DWT와 160,000DWT급 사이의 선박충돌력이 선박재하톤수(DWT)의 제곱근에 비례한다”는 가정에 근거하고 있다(Saul and Svensson, 1983). 실험에서는 속도에 따른 변화를 고려하지 못했기 때문에 8 knot에서 16 knot 사이의 충돌속도를 고려하기 위하여

AASHTO에서는 비례적인 환산계수를 적용하였다. 이 식은 다시 “비교적 큰 강도를 가진 비교적 작은 선박의 수와 비교적 작은 강도를 가진 비교적 큰 선박의 수가 통계적인 하중 분포 70% 구간에서 거의 같아진다”는 가정하에 평균충돌력의 11%가 증가된 선박충돌력 산정식이 최종적으로 AASHTO LRFD 기준서의 선박충돌력 산정식으로 채택되었다.

### 2.2 에너지-변위관계를 이용한 충돌력

충돌전 선박이 가진 운동에너지는 다음과 같이 표시된다.

$$KE = \frac{1}{2}mV_{imp}^2 \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 선박의 충돌질량이고,  $V_{imp}$ 는 선박의 충돌속도이다. 이 운동에너지는 선박의 충돌과정에서 소산되는데 주로 선수의 소성변형에 의해서 소산되며 그 밖에도 마찰이나 열탄성변형에너지로 소산된다. 만일 모든 운동에너지가 선수의 변형에너지에 의해서 소산된다고 가정하면 소산된 운동에너지의 시간이력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$KE_{disp} = P_{bow} \delta_{bow} \quad (2)$$

여기서  $KE_{disp}$ 는 충돌중 소산된 운동에너지이고,  $P_{bow}$ 는 선박의 선수충돌력이고,  $\delta_{bow}$ 는 선수의 최대변형이다. 따라서 충돌중 발생하는 선박의 평균충돌력은 간단히 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$P_{bow} = \frac{KE_{disp}}{\delta_{bow}} \quad (3)$$

이 식에 따라 얻어진 선박의 충돌력은 선박의 탄성변형을 포함하고 있으므로 선박이 충돌을 끝내고 반동하면서 구조물에 포함된 탄성변형에너지를 운동에너지로 전환하면 충돌력이 최대값에서 다시 감소한다. 그러나 우리가 관심있는 충돌력은 충돌과정에서 얻어지는 충돌력이므로 이러한 반동에 의한 충돌력의 변화는 무시한다. 이와 같은 가정은 기존의 연구결과중 선수의 손상량을 매개변수로 하여 선박의 충돌력을 산정하는 방법들과 같이 선박의 모든 운동에너지가 소성변형으로 소산된다고 가정하는 것이다. 이러한 가정은 다른 메커니즘에 의해서 소산되는 에너지를 선박의 소성에너지로 모두 부담하므로 실제로는 큰 선박충돌력을 가정하게 되어 보수적인 산정방법이 된다.

### 2.3 평균가속도와 질량을 이용한 충돌력

큰 요소수를 가진 대형 선박해석모델을 이용하여 시간이력 해석을 수행하면 많은 자유도에 대한 응답을 얻을 수 있다. 이러한 응답은 국부적인 거동을 파악하는 데 유리하나 전체적인 거동을 파악하는 목적에서는 너무 많은 정보 때문에 얻고자 하는 응답을 원활하게 얻을 수 없는 경우가 발생한다. 예를 들어 진동모드해석을 수행하는데 있어 필요이상의 자유도로 구조물을 모델링하면 국부진동모드 때문에 주 진동모드를 파악하기 힘든 것과 같은 이유이다. 선박충돌설계에 있어서도 설계단계에서 필요한 정보는 선박에 의한 충돌력의 평균적인 크기가 주 관심사항이고, 충돌력의 시간이력은 부차적인 관심사항이 될 것이다. 물론 충돌중 발생하는 다양한 거동이나 에너지 소산구조를 알기 위해서는 큰 자유도를 가진 유한 요소모델이 필요하나 설계실무적으로는 이

러한 충돌력의 시간보다 설계에 사용할 평균적인 충돌력이 유용하다. 이러한 점에서 기존의 설계기준인 AASHTO도 시간이력에서 발생하는 최대 충돌력이 아닌 평균충돌력을 제시하였다. 유한요소해석에서 얻는 충돌력 시간이력은 해석의 1차변수인 변위에 대한 2차도함수이기 때문에 수치적인 진동성향이 크다. 따라서 이러한 가속도를 이용한 시간이력의 최대값을 설계에 사용하는 경우는 지나치게 보수적인 설계가 도출될 수 있다. 따라서 이러한 국부적인 가속도의 진동현상을 소거하고 평균적인 가속도를 얻기 위해서는 충돌시 선박의 속도 시간이력으로부터 얻는 방법을 사용하였다. 이 때 얻어진 가속도에 선박의 질량을 곱하여 평균적인 충돌력을 산정하였다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 충돌 시나리오

AASHTO의 선박충돌력 산정식은 40,000DWT급 이상의 벌크선, 8 knot 이상의 충돌속도를 기준으로 제안하고 있으며, 40,000DWT급 이하, 벌크선 이외의 선박, 8 knot 이하의 충돌속도에 대해서는 설계자의 적절한 판단에 따라 사용하기를 권하고 있다. 따라서 AASHTO의 선박충돌력과 비교뿐만 아니라 그 이하의 조건에 대해서도 검토하기 위하여 벌크선(Bulk Carrier)을 충돌선박의 선종으로 선정하고, 선박의 규모는 20,000~160,000DWT 중 20,000, 40,000, 70,000, 100,000, 130,000, 160,000DWT로 선박의 규모를 6등급으로 구분하였다. 충돌속도는 4~16 knot 중 4, 8, 12, 16 knot로 4가지 경우에 대해서 적용하였다.

AASHTO의 선박충돌력 산정식 기본형인 Saul과 Svensson의 제안식은 40,000DWT급 이상의 벌크선이 16 knot에서 강제벽에 정면으로 충돌하는 경우에 대해서 제안되었다. 따라서 본 연구에서 선박의 충돌은 강제벽에 정면으로 충돌하는 경

표 1. 충돌해석 Case

선박규모 (DWT)	충돌속도			
	4 knot (2.06 m/s)	8 knot (4.12 m/s)	12 knot (6.18 m/s)	16 knot (8.24 m/s)
20,000	Case-1-1	Case-1-2	Case-1-3	Case-1-4
40,000	Case-2-1	Case-2-2	Case-2-3	Case-2-4
70,000	Case-3-1	Case-3-2	Case-3-3	Case-3-4
100,000	Case-4-1	Case-4-2	Case-4-3	Case-4-4
130,000	Case-5-1	Case-5-2	Case-5-3	Case-5-4
160,000	Case-6-1	Case-6-2	Case-6-3	Case-6-4

벌크선이 강제벽에 정면충돌

표 2. 선박규모별 기본제원(벌크선)

선박규모 (DWT)	선박규모			
	전장(m)	폭(m)	민재흘수(m)	배수톤수(톤)
20,000	165	24.25	9.83	27,406
40,000	200	29.9	11.8	51,604
70,000	233	32.3	13.7	86,015
100,000	256	39.3	15.1	119,124
130,000	274	42.3	16.18	151,367
160,000	292	45.3	17.3	182,962

표 3. 선박규모별 강판두께

선박규모 (DWT)	강판두께(m)		
	Out Hull	In Hull	내부 구성부재
20,000	0.0110	0.0105	0.0075~0.0100
40,000	0.0120	0.0115	0.0085~0.0110
70,000	0.0140	0.0135	0.0105~0.0130
100,000	0.0150	0.0145	0.0115~0.0140
130,000	0.0165	0.0160	0.0130~0.0155
160,000	0.0170	0.0165	0.0135~0.0160

우로 고려하여 다음의 표 1과 같이 총 24 Case의 충돌 해석 조건을 고려하였다.

#### 3.2 대상선박 모델링

본 논문에서 고려된 대상선박은 벌크선이며, 규모에 따른 기본제원은 표 2와 같다.

대상선박 20,000, 40,000, 70,000, 100,000, 130,000, 160,000 DWT급 벌크선은 AASHTO LRFD의 수리동적질량계수 1.05를 적용하여 선박의 기존 배수톤수(Displacement Tonnage)에 수리동적질량의 영향을 고려한 수정배수톤수를 적용하였다. 또한 선박규모에 따른 강성변화를 고려하기 위하여 선박을 구성하는 강판의 두께를 표 3과 같이 고려하였다.

강판의 재료물성은 SS400을 적용하여 인장강도까지 고려하였다. 항복점 240 MPa 이후의 거동은 표 4의 응력-변형률 관계에 따라 거동하도록 하여 재료비선형을 고려하였고, 변형률 0.3에서 파단에 이르는 것으로 고려하였다. 실제 강재의 경우 각 규격간 인장강도의 범위가 정확히 규정되어 있지 않으며, 어느 정도 오차가 존재한다. 따라서 KS에서는 SS400의 인장강도 400 MPa를 하한치로 하여 범위를

표 4. SS400 응력-변형률

변형률	0.0000	0.0158	0.1980	0.3000
응력(MPa)	235	245	445	445

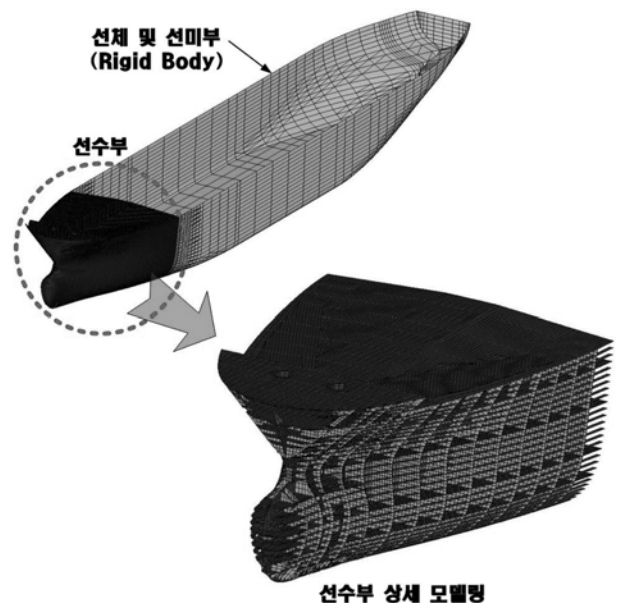


그림 1. 대상선박 모델링

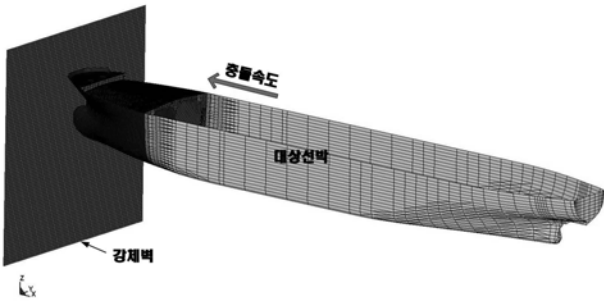


그림 2. 충돌형상

400~510 MPa로 정하고 있다. 본 논문에서는 SS400의 인장 강도를 445 MPa로 적용하였다.

대상선박은 일반적인 선박도면을 참조하여 선형과 내부구조를 고려하였다. 또한 충돌시 선수부에서만 손상이 발생하는 것으로 가정하여 선박의 선수부는 화물창의 일부를 포함한 165,676개의 쉘(Shell)요소로 그림 1과 같이 상세모델링 하였으며, 선미부는 4,430개의 강체(Rigid Body)요소로 모델링하였다. 쉘(Shell)요소와 강체(Rigid Body)요소의 경계면은 노드(Node)를 서로 공유함으로써 일체 거동이 되도록 고려하였다.

충돌형상은 대상선박이 강체벽에 정면으로 충돌하는 조건을 그림 2와 같이 고려하여 모델링하였으며, Solver로는 LS-DYNA를 활용하여 총 24Case의 비선형 충돌시뮬레이션을 수행하였다.

#### 4. 해석결과

##### 4.1 선박의 충돌속도 시간이력

강체벽과 선박의 충돌시 선박의 속도변화는 그림 3에서 보

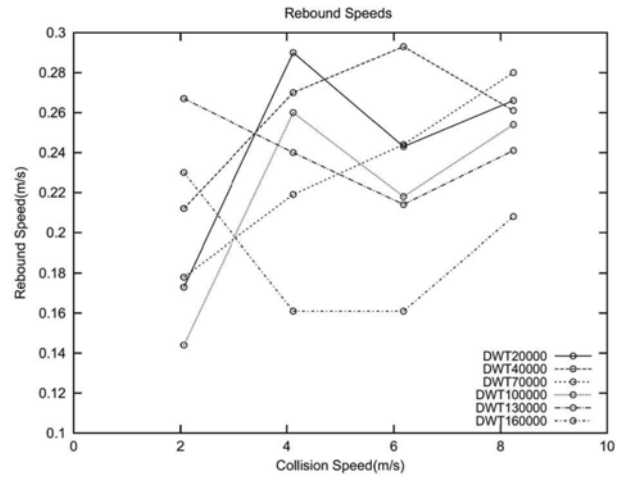


그림 4. 반동속도의 비교

이는 바와 같다. 산정된 선박의 속도는 선수부 변형의 영향을 무시할 수 있는 선체 중심부에서 얻어진 속도이다. 모든 경우에 충돌속도는 초기속도에서 선형적인 변화를 보이며 감소한다(속도의 방향 때문에 그래프에서는 음수에서 양수로 증가하는 것으로 표현됨). 각 그래프의 속도시간이력은 0을 지나 부호가 바뀌는 현상을 보여주는데 이는 선박이 충돌후 반동하는 것을 나타낸다.

그림 3에서 각 속도시간이력의 반동시점은 반동속도가 일정한 값에 도달하는 점을 기준으로 하였다. 이 점에서 가속도는 0이 되므로 선박에 의한 충돌력이 작용하지 않는 시점이다. 실제 산정에서는 수치적인 오차로 인하여 일정한 평균 속도에 도달하는 점을 정확히 판별하기가 쉽지 않으므로 초기 충돌속도와 그래프의 꼬리부분의 평균으로 산정된 최종

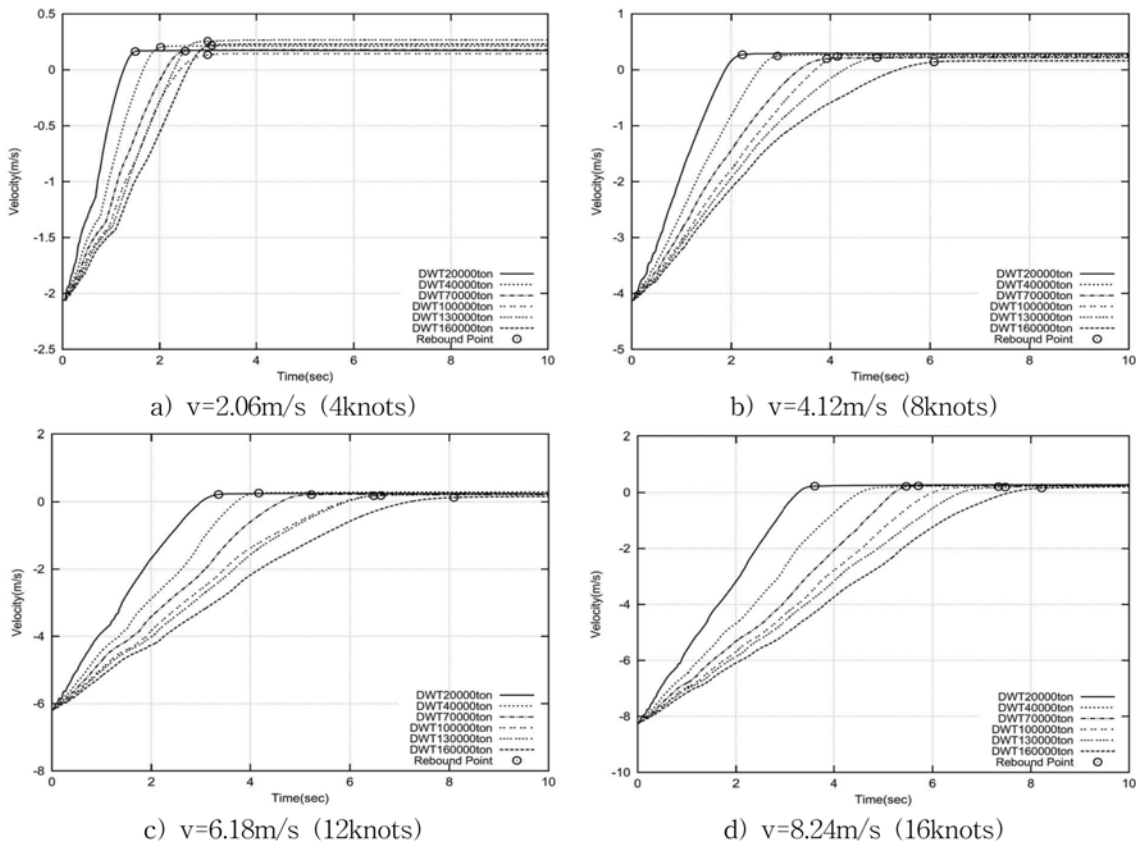


그림 3. 충돌속도 시간이력

반동속도간의 속도변화의 99.5%인 점을 반동점으로 선택하였다. 이 값은 실제 충돌시간을 짧게 산정하므로 다음 절에서 산정되는 충돌력을 보수적으로 평가한다. 그러나 이러한 오차는 공학적으로 무시할 정도의 크기로 판단된다.

이들 선박의 반동후 이탈속도는 그림 4에서 볼 수 있다. 반동속도는 충돌속도와 선박의 크기에 무관하게 대략 0.15-0.3 m/s 정도의 값을 보인다. 따라서 반동속도 자체에는 공학적인 의미를 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.2 충돌력 시간이력

2장에서 언급한 방법들로 산정한 선박충돌력의 시간이력은 그림 5~7에서 보이는 바와 같다. 각 경우 모두 수치해석에 의한 충돌력의 시간이력이 가장 큰 침투값을 보이는 것을 나타내고 있다. 이러한 진폭의 개략적인 중간쯤에 가속도-질량에 의한 평균충돌력과 에너지-변위방법에 의한 평균충돌력이 위치하고 있다. 충돌력의 시간이력은 몇 개의 진폭으로 이루어져 있는데 이는 선수의 압괴시, 격벽부와 격벽부 사이

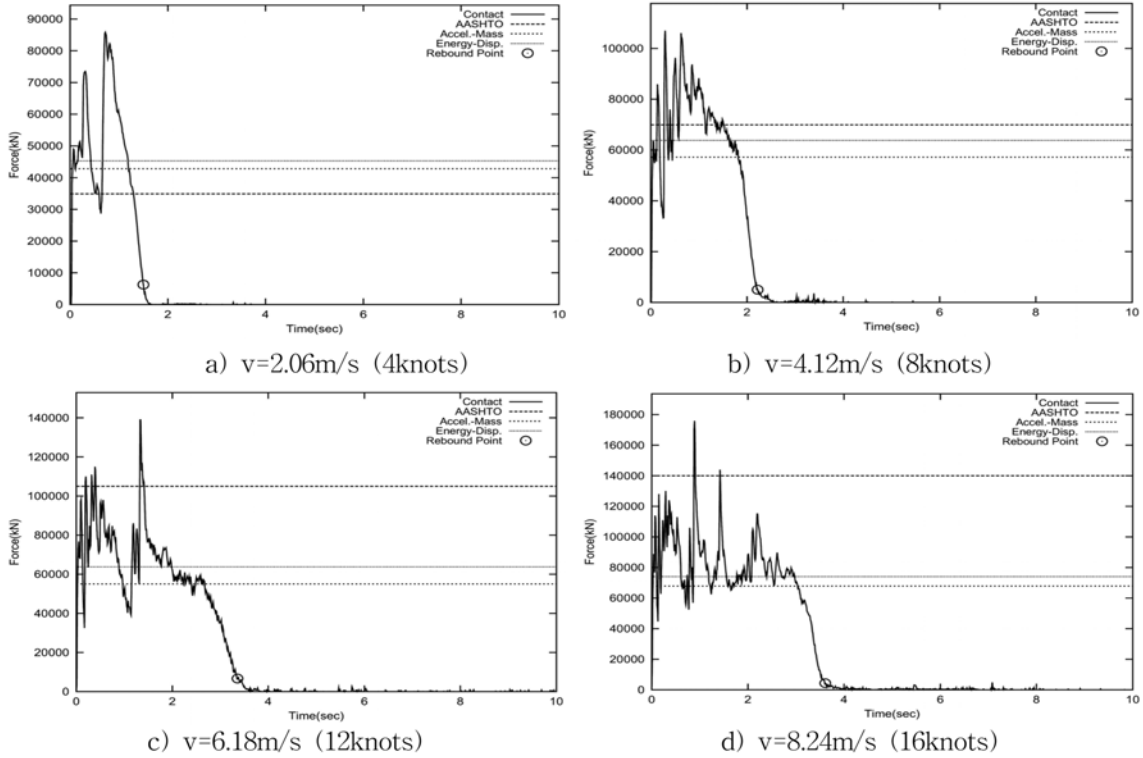


그림 5. DWT20,000 선박의 충돌력 비교

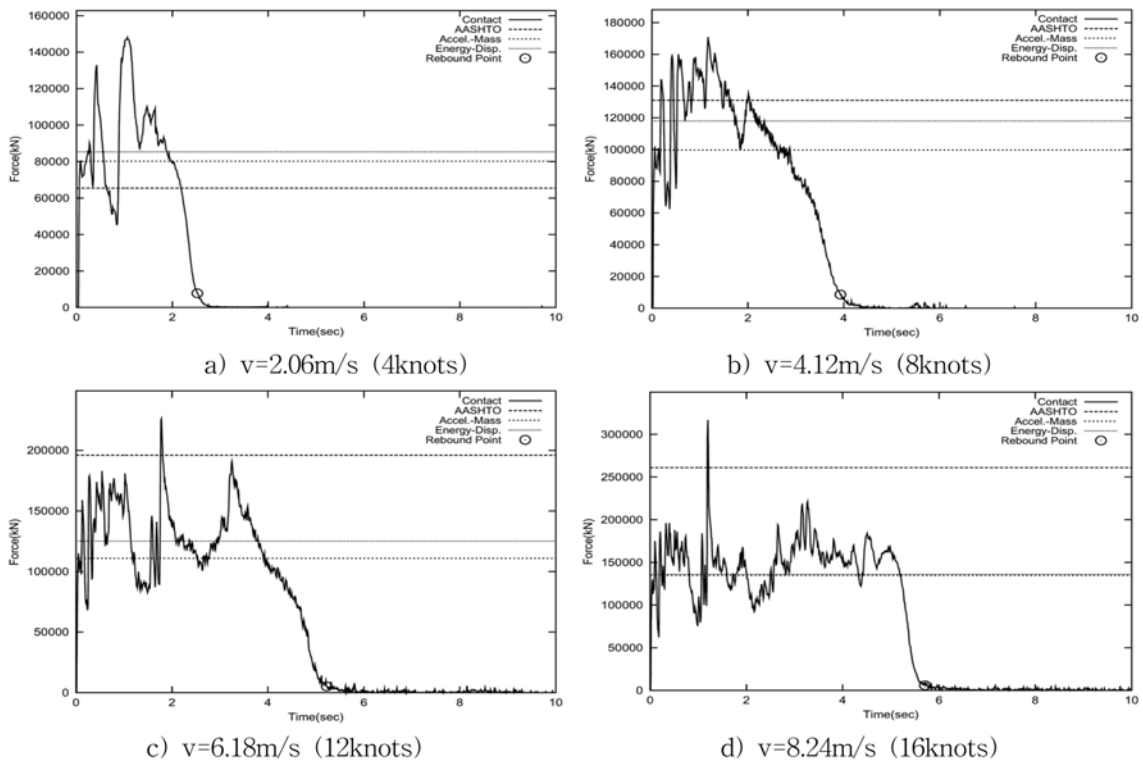


그림 6. DWT70,000 선박의 충돌력 비교

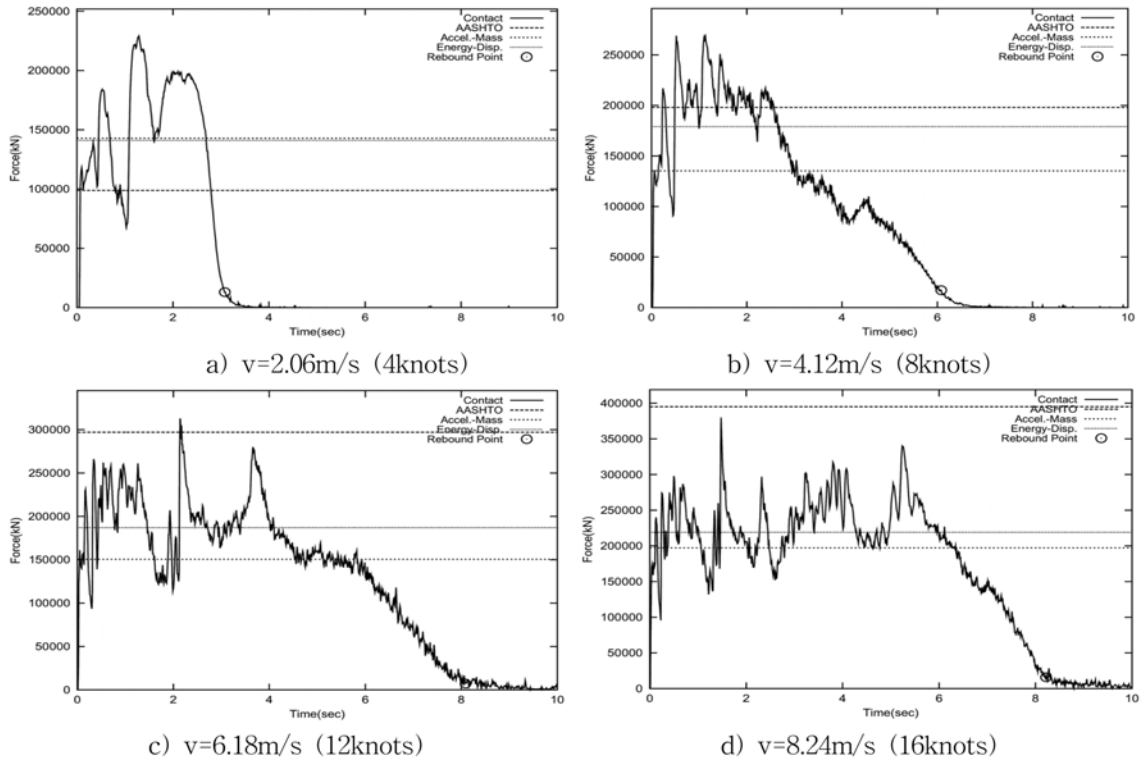


그림 7. DWT160,000 선박의 충돌력 비교

표 5. 가속도-질량 방법에 대한 각 해석방법의 충돌력 비

선박크기 (DWT)	v=2.06 m/s (4 knots)			v=4.12 m/s (8 knots)		
	AASHTO	ED*	TH**	AASHTO	ED*	TH**
20,000	0.815	1.058	2.004	1.223	1.116	1.872
40,000	0.810	1.045	1.788	1.217	1.075	1.528
70,000	0.815	1.063	1.845	1.314	1.183	1.715
100,000	0.847	1.128	1.876	1.179	1.081	1.587
130,000	0.720	1.075	1.714	1.269	1.191	1.733
160,000	0.692	0.987	1.603	1.464	1.323	1.989
Average	0.783	1.059	1.805	1.278	1.162	1.737
선박크기 (DWT)	v=6.18 m/s (12 knots)			v=8.24 m/s (16 knots)		
	AASHTO	ED*	TH**	AASHTO	ED*	TH**
20,000	1.907	1.159	2.525	2.064	1.091	2.595
40,000	1.760	1.067	2.224	2.352	1.200	2.613
70,000	1.767	1.127	2.037	1.937	1.009	2.352
100,000	1.936	1.208	2.259	2.163	1.168	2.343
130,000	1.703	1.129	1.958	1.977	1.105	2.282
160,000	1.974	1.243	2.080	2.002	1.110	1.926
Average	1.841	1.155	2.180	2.082	1.114	2.352

\*에너지-변위방법

\*\*충돌력 시간이력에 의한 최대 충돌력

의 압괴거동과 관련이 있는 것으로 판단된다. AASHTO의 충돌력식은 낮은 속도에서는 이러한 경향을 보이고 있으나 속도가 증가할수록 침투부에 가까운 값을 보인다. 또한 낮은 충돌속도(4 knot)에 있어서는 가속도-질량에 의한 방법이나 에너지-변위 방법보다 작은 충돌력을 보인다. 가속도-질량에 의한 충돌력과 에너지-변위에 의한 충돌력은 유사한 경향을

보이나 방법의 특징상 에너지-변위에 의한 충돌력이 약간 더 큰 값을 보인다.

각 방법에서 얻어진 충돌력을 가장 낮은 값을 보이는 가속도-질량방법에 대한 비로 나타낸 값을 표 5에 정리하였다. 여기서 충돌력의 시간이력의 대표값은 전체 충돌력의 시간이력에서 최대값을 사용하였다. 이렇게 산정된 가속도-질량방법에 의한 평균충돌력의 비를 선박의 크기에 대해 평균하였다. 이 평균충돌력의 비에서 현재 사용되고 있는 설계기준인 AASHTO 식의 경우 낮은 속도에서는 가속도-질량 방법에 의한 충돌력의 약 80%정도 값을 보이다가 속도가 증가할수록 충돌력의 차이가 커져 해석에서 고려된 최대 충돌속도시에는 가속도-질량 방법에 의한 평균충돌력보다 2배 이상의 값이 산정된다. 반면 충돌력의 시간이력에서 얻어진 최대 충돌력은 1.8배에서 2.3배 정도로 AASHTO방법에 비하여 일관성 있는 충돌력 비를 나타내고 있다. 에너지-변위에 의한 평균충돌력은 약 1.06배에서 1.15배 정도로 속도에 무관하게 가속도-질량방법에 의한 평균충돌력과 일관성 있는 값을 보여주고 있다.

#### 4.3 크기에 따른 충돌력의 변화

해석에 사용된 각 충돌속도에서 선박의 크기에 따른 충돌력의 변화를 그림 8에 나타내었다. 충돌력 시간이력의 최대값은 다른 평균충돌력과는 달리 최대값이기 때문에 가장 큰 값을 보인다. 앞에서 언급하였듯이 낮은 충돌속도에서 설계 기준인 AASHTO의 평균충돌력은 가속도-질량방법이나 에너지-변위방법에 의한 평균충돌력보다 오히려 낮은 값을 보인다. 충돌속도가 커질수록 AASHTO의 평균충돌력은 다른 방법들에 비해 급속히 커져 시간이력의 최대값보다 커지는 경우도 발생한다. 그러나 선박크기의 변화에 따른 충돌력의 증가속도는 모두 유사하다.

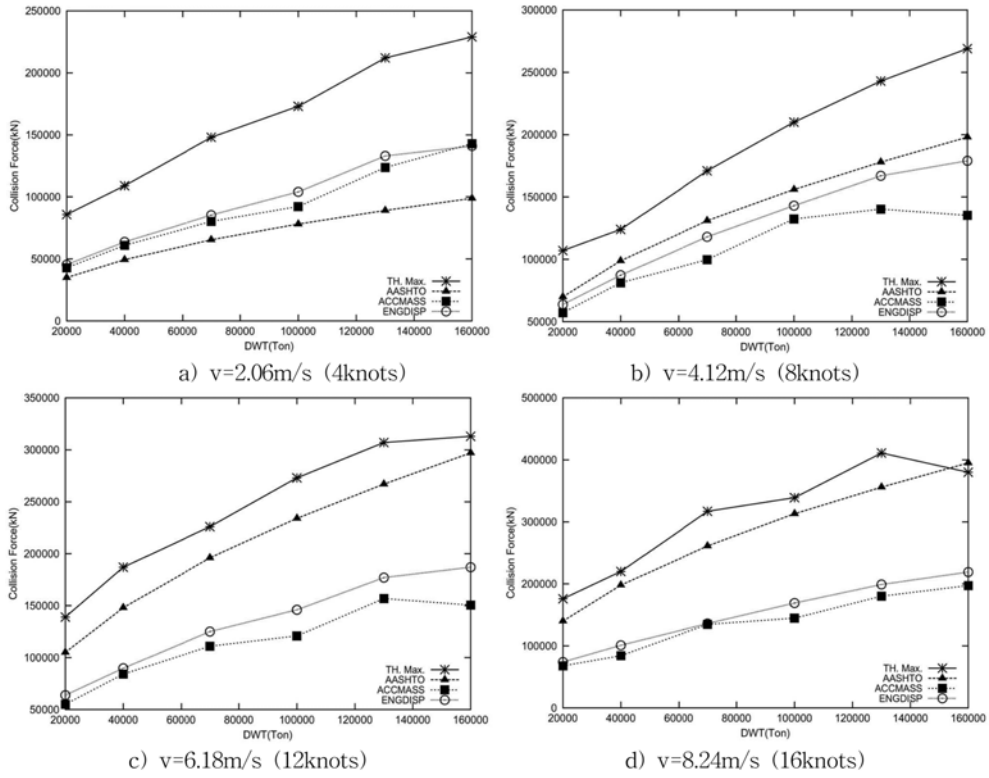


그림 8. 선박의 크기에 따른 충돌력의 변화

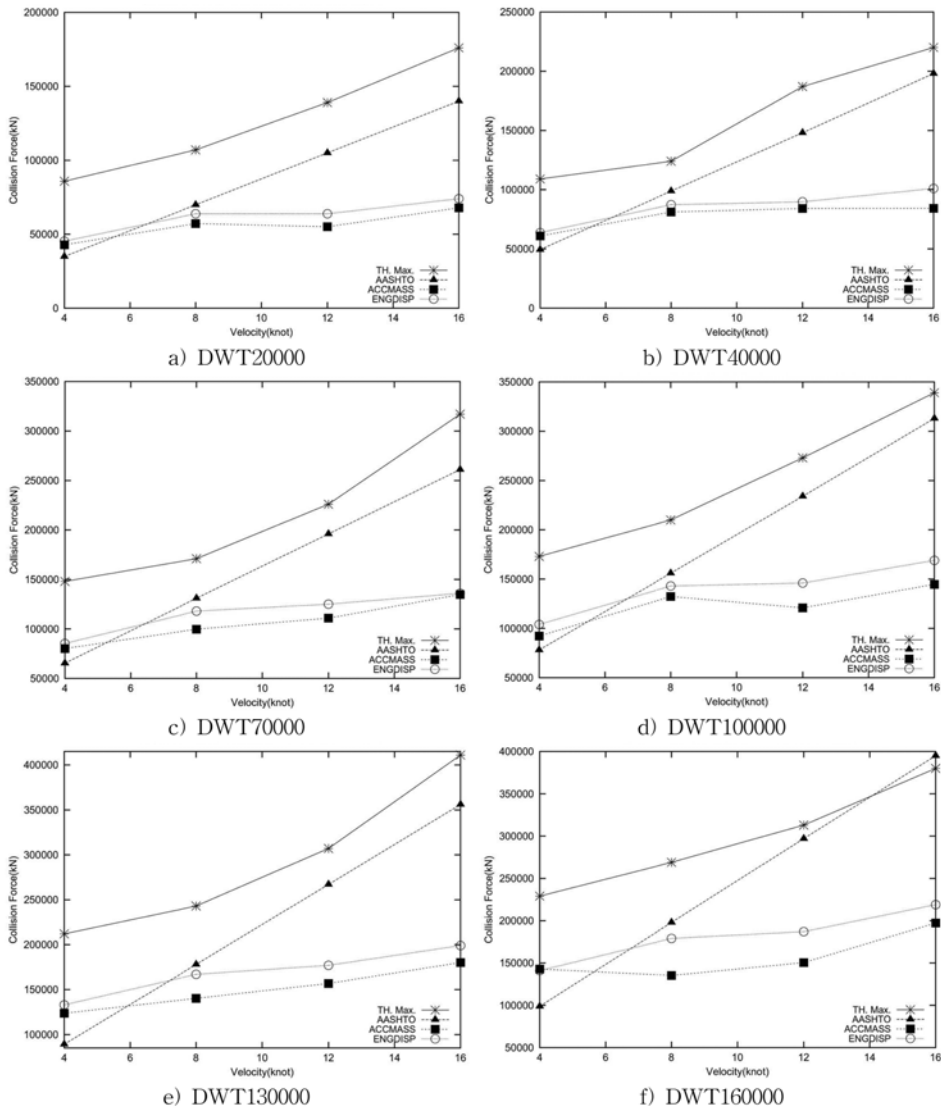


그림 9. 선박의 속도에 따른 충돌력의 변화

#### 4.4 충돌속도에 따른 충돌력의 변화

선박의 충돌력은 선박의 크기와 상관없이 충돌속도에 따라 증가하는 경향을 보이거나 이 증가량은 설계기준의 값과 비교하여 매우 작은 거동을 보여주고 있다. 개략적으로 충돌속도가 4 knot에서 16 knot로 4배 증가하는 동안 평균충돌력은 50%정도 증가하는 경향을 보인다. 이는 설계기준에 의한 충돌력이 400%의 증가를 보이는 것과 확연히 대비된다. 전반적으로 약 8 knot부근에서 본 연구에서 산정한 평균충돌력과 설계기준의 충돌력이 유사한 값을 보이고 이보다 큰 속력에서는 설계기준의 충돌력이 산정된 충돌력에 비해 급격히 증가하는 양상을 보여주고 있다. 반면에 이보다 작은 충돌속도에 대해서는 오히려 산정된 평균충돌력보다 낮은 충돌력을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 설계기준 제정의 기준이 된 Woisin의 실험이 다양한 속도에 대해서 수행되지 않았고, AASHTO에 적용시 속도에 따른 충돌력을 선형변화로 가정한 것에 기인한 것으로 보인다. 반면 해석에서 얻어진 최대 충돌력은 설계기준의 평균력보다 큰 값을 보이지만 그 경향이 거의 유사함을 알 수 있다.

이러한 평균충돌력의 경향은 선수구조가 압괴에 이를 때까지는 증가하지만 그 이후부터 소성거동에 의해 선수변형은 증가하고 충돌력의 증가는 거의 없는 상태에 도달하기 때문에 판단된다. 따라서 충돌속도에 따라 선형적으로 충돌력이 증가하는 것이 아니라 “동일 규모의 선박은 충돌속도가 변하더라도 평균충돌력은 같다.”라고 가정하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

그러나 그림 9에서 충돌해석 결과 충돌속도가 증가할수록 충돌력이 미미하게 증가하는 것은 선수부 횡단면의 구조적인 강성이 충돌에 의한 선수의 관입량에 따라 변하기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서 산정한 충돌속도에 따른 평균충돌력의 증가는 선수가 관입함에 따른 선수부 횡단면의 강성이 커지기 때문인 것으로 판단되며, 이러한 현상을 정확하게 고려하려면 충돌력 산정식은 선수부 변형에 기인한 관입위치에서 선수부 횡단면 강성의 영향에 주목하여 산정되어야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 다양한 충돌조건을 고려하여 비선형 해석을 수행하여 얻어진 충돌력 시간이력을 바탕으로 평균충돌력을 산정하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기존의 설계기준에서 사용되는 충돌력 산정식이 충돌속도에 지나치게 의존적이다.
2. 실제적인 충돌력은 압괴가 발생한 후 소성거동시 선수단면의 변화에 따른 증가만 발생한다.

3. 현 설계기준을 사용한 선수충돌력은 일정속도 이상시 지나치게 보수적인 값을 보인다.

## 참고문헌

- 건설교통부(2005) 도로교설계기준.  
대한토목학회(2006) 케이블강교량설계지침.  
이계희, 고재용, 이성로(2004) 방호공을 고려한 선박의 충돌하중, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 한국전산구조공학회, 제17권 제32호, pp. 193-200.  
이계희, 홍관영, 고재용(2005) 중형 충돌시 선박과 방호공의 충돌거동, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제25권 제6A호, pp. 1133-1141.  
이성로, 배용귀, 이계희(2006) 구조물의 선박충돌해석, 한국구조물진단학회논문집, 한국구조물진단학회, 제10권 제4호, pp. 87-96.  
이성로, 배용귀(2007) 소형선박충돌에 의한 독립수직파일 방호구조물의 구조특성분석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제27권 제2A호, pp. 201-207.  
Larsen, O.D. (1993) Ship collision with bridges: the interaction between vessel traffic and bridge structures, IABSE Structural Engineering Document 4, IASBE-AIPC-IVBH, Zurich, Switzerland.  
AASHTO. (1991) Guide specification and commentary for vessel collision design of highway bridge, american association of state highway and transportation officials, Washington, D.C.  
AASHTO. (2004) AASHTO LRFD Bridge Design Specification and Commentary.  
Amdahl, J. (1983) Energy absorption in ship-platform impacts. Dr. Thess, The Norwegian Inst. of Techn., Trondheim  
Kuroiwa, T., Kawamoto, Y., Kasuba, S., and Stillman, D., *Numerical Simulation of Collision and Grounding of Ships*, Proc. of Int. Conference on Technologies for Marine Environment Preservation (MARIENV'95), Vol. 1, Tokyo, pp. 66-70, Sept. 1995.  
LS-DYNA (2003) LS-DYNA Keyword User's Manual: Version 970, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.  
Nagasawa, H., Arita, K., Tani, M., and Oka, S. (1977) *A Study on the Collapse of Ship Structure in Collision with Bridge Piers*, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 142, pp. 323-332.  
Saul, R. and Svensson, H. (1983) *Means of Reducing Consequences of Ship Collisions with Bridges and Offshore Structures*, IABSE Colloquium on Ship Collision with Bridges and Offshore Structures, Copenhagen.  
Woisin, G. (1977) "Die Kollisionsversuche der GKSS." Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Vol. 70, pp. 465-487, Berlin.  
Yang, P.D.C. and Caldwell, J.B. (1988) Collision energy absorption of ship's bow structures, International J. of Impact Engineering, N2, pp. 181-196.

(접수일: 2011.3.2/심사일: 2011.4.6/심사완료일: 2011.4.6)