

선박충돌 시 돌핀 구조물의 거동에 대한 원심모형실험

Centrifugal Test on Behavior of the Dolphin Structure under Ship Collision

오 승 탁¹⁾ · 배 우 석²⁾ · 조 성 민³⁾ · 허 열[†]

Oh, SeungTak · Bae, WooSeok · Cho, SungMin · Heo, Yol

ABSTRACT : The impact protection system consists of an arrangement of circular sheet pile cofferdams-denoted dolphin structure-deeply embedded in the seabed, filled with crushed rock and closed at the top with a robust concrete cap. Centrifuge model tests were performed to investigation the behaviors of dolphins in this study. Total 7 quasi-model tests and 11 dynamic model tests were performed. The main experimental results can be summarized as follows. Firstly, The experimental force-displacement results for quasi-static tests show a limited influence on the initial stiffness of the structure from the change in fill density and the related change in the stiffness of the fill. And by comparing the dissipation at the same dolphin displacement it was found that the denser fill increase the dissipation by 16% for the 20m dolphin and by 23% for the 30m dolphin. The larger sensitivity for the large dolphin is explained by a larger contribution to the dissipation from strain in the fill. In low level impacts the dynamic force-response is up to 26~58% larger than the quasi-static and the dissipation response is showed larger in small displacement. Hence, it is concluded conservative to use the quasi-static response characteristics in the approximation of the response, and it is further concluded that the dolphin resistance to low level impacts is demonstrated to be equivalent and even superior to the high level impacts.

Keywords : Dolphin structure, Centrifuge model test, Fill density, Dissipation

요 지 : 충돌보호공은 해저지반에 깊게 근입되어 있으며 돌핀을 의미하는 상부는 단단한 콘크리트 뚜껑으로 막혀지고 쇄석으로 채워진 원형의 속채움 시트파일의 배열로 구성된다. 본 연구에서는 돌핀의 거동을 규명하기 위해 총 7회의 준정적실험과 11회의 동적 원심모형실험을 수행하였다. 주요한 실험적 결과는 다음과 같다. 우선, 준정적실험의 실험적인 힘-변위 결과는 채움재 강성과 관련된 채움 밀도의 변화로부터 구조물의 초기 강성에 대한 영향을 보여준다. 그리고 동일한 변위에서의 에너지 소산을 비교해보면 더 조밀한 채움에서 직경 20m 돌핀은 16%, 직경 30m 돌핀은 23% 정도 소산율이 증가하는 것으로 나타났다. 30m 직경의 돌핀이 더 큰 민감도를 갖는 것은 채움재의 변형률이 에너지소산에 대해 보다 크게 기여하기 때문이다. 동·정적 충돌실험결과, 일반적으로 동적 응답이 준정적 응답보다 26~58%까지 크고 더 작은 변위에서 에너지 소산이 발생되고 있음을 알 수 있다. 따라서 돌핀 구조물의 거동에측 시 준정적 응답특성을 사용하는 것이 보수적이라는 것을 알 수 있으며, 허부충돌 시 돌핀 저항력은 상부충돌 시와 동일하거나 더 우세한 것으로 나타났다.

주요어 : 돌핀 구조물, 원심모형실험, 채움밀도, 소산

1. 서 론

1980년 미국 플로리다의 Sunshine Skyway 교량이 35,000 DWT 화물선과 충돌하여 교량이 붕괴되는 사고가 발생하였으며, 이를 계기로 선박-교량 충돌에 대한 연구가 본격화되었으며, 1988년 미국 전역에 적용하는 선박 충돌 대책 설계방법을 개발하기 위해 도로국과 11개 주가 후원한 공동 연구가 진행되어 1991년 선박 충돌 설계 전문시방서로 AASHTO에 의해 채택되었다(Knott 등, 1990; AASHTO, 1991). 그리고 AASHTO(1994)는 교량설계 기준에서 필수적인 선박충돌 규정이 포함된 LRFD 교량 설계 시방서를 채택하였다.

국내에서는 서석구 등(2007)이 2006년 8월 해상조사를 위한 작업선이 조류에 밀려 진도대교의 중앙 경간부에 충돌하는 사고를 기록한 이후 충돌로 인한 구조물의 안전에 대해 관심이 증대되고 있는 상황이다. 또한 현재까지도 이러한 해양사고는 매년 1회 이상 발생되고 있는 것으로 보고되고 있으며(Gucma, 2009), 해상 교량 건설이 늘어남에 따라 교량 아래를 항해하는 선박과 교량의 직접적인 충돌을 방지하기 위한 방법에 대한 관심이 높아지고 있다.

현재 도로교설계기준해설(대한토목학회, 2008)에서는 충돌하중에 관하여 자동차의 충돌, 유목 등의 충돌, 선박의 충돌을 고려하여야 한다고 명시되어 있다. 교량의 선박충돌설

1) 정회원, 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

2) 정회원, (주)나노지오이엔씨 기술연구소장

3) 비회원, 한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원

† 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수(E-mail : heoyol@yahoo.co.kr)

계에 대해 상세하게 기술하고 있는 AASHTO(1991) 설계기준에서도 세 가지의 설계방법 즉, Method I, Method II, Method III에 의하여 선박에 의한 충돌이 예상되는 항로상에 건설되는 교량 구조물은 선박에 의한 충돌하중에 견딜 수 있게 설계되거나, 방호물, 계선말뚝, 통로 또는 다른 안전을 위한 시설에 의해서 적절히 보호되도록 하고 있다.

선박과 구조물의 충돌 시 발생하는 충격력은 다양한 인자에 의해 영향을 받게 되므로 각각의 영향인자의 변동이 어떠한 영향을 미치는가에 대한 판단이 요구된다. 특히 March 등(1963)은 strain-hardening 효과 때문에 충격력은 충돌 속도에 의해 결정되며, 이것은 충돌부하에 대한 몇 가지 경험식에서도 설명된다고 Knott 등(1990)과 Pedersen 등(1993)이 주장하였다. 또한 Pedersen 등(1993)은 폭이 일정한 교각이나 충을 이루거나 오목한 교각과 충돌할 경우 선수부분의 전체 철재 면적에 대한 교각과 접촉하여 변형된 철재 면적의 비를 곱해 충돌력을 조정한다고 주장하였으며, 이외에도 선박의 선수형상이나 적화상태, 편향도, 수심 등이 충돌에너지와 연관이 있는 것으로 알려져 있다.

Pedersen 등(1993), Wang 등(1998), Chen(2000) 등은 설계에 적합하도록 내부역학에 대한 간편해석법을 발전시켰다. 이로부터 선박충돌에 대한 문제를 선박-선박 충돌뿐만 아니라 선박-플랫폼 충돌, 선박-교량 충돌 등에 대한 적용을 수월하게 하였다.

국내에서 선박충돌에 관련된 연구는 주로 선박과 선박과의 충돌, 선박의 좌초 등이 주요 연구 대상이었으며, 선박과 교량구조물과의 충돌에 대해서는 해동 시 유빙이나 홍수 시 부유물에 의한 충돌하중에 대하여 교량의 하부를 보호하는 시설의 설계에 대하여 연구되었다(이계희 등, 2003). 지금까지 교량과 선박충돌에 관련된 연구는 거의 이루어지지 않았으나, 최근 선박과 충돌 방호공에 대한 해석 등의 연구가 수행되고 있으며(이성로 등(2004a, 2004b)), 김주영 등(2005)의 연구결과에 의하면 강돌핀 충돌 방호공은 속체움재와 충돌 높이 및 위치에 따라 충돌에너지 흡수의 차이가 나타났으며, 속체움재가 Sand의 경우가 가장 많이 흡수되는 것으로 나타났다.

지금까지의 연구동향을 살펴보면 많은 교량들이 설계 시 배의 크기와 용량이 빠르게 성장하는 것을 충분히 반영하지 못하고 있다(Proske 등, 2003)는 것을 알 수 있으며, 국내의 경우도 마찬가지인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구와 같이 대형화된 배의 크기를 고려한 방호구조물의 거동에 대한 연구가 반드시 필요한 시점이다. 그러나 지금까지 선박충돌은 물론 방호구조물의 설계를 위한 실험적 접근은 전무한 실정이며 특히 충돌 시 돌핀형 방호구조물의 상호거동에 대한 연구는 미진한 상황이다. 특히 방호구조물이 해저지반내

에 근입된 시트파일 형태의 골재 속채움 구조물임에도 불구하고 대부분 교각과 같은 콘크리트 구조물의 거동으로 고려되고 있는 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 대형선박 충돌 시 돌핀구조물의 거동을 규명하기 위해 시트파일 내부 채움재의 밀도특성과 돌핀직경, 충돌하중 속도를 변경하여 원심모형실험을 실시하고 지반에 근입된 구조물의 상호 변형과 에너지의 소산 경향을 측정하고 분석하였다.

2. 원형 셀 돌핀 구조물의 원심모형실험

2.1 원심모형실험

지반공학 분야에 대한 실험적 방법은 원형실험, 또는 축소모형실험이 사용되고 있다. 그러나 지반공학과 관련된 연구 또는 토류구조물의 거동을 조사하기 위하여 실험크기의 원형을 사용하기에는 일반적으로 규모가 매우 크기 때문에 토류구조물의 설치, 계측장비 설치 및 관리를 위한 비용 등 경제적인 어려움이 상당하여 제한적으로 실시할 수밖에 없는 실정이다. 따라서 이와 같은 어려움을 극복하기 위하여 축소된 모형을 사용하여 간편하고 경제적으로 실험을 수행할 수 있으며, 다양한 매개변수의 영향에 대하여 분석이 가능하다. 그러나 기존의 실내 축소모형 실험은 현장의 응력수준 상태에 비해 훨씬 작은 상태에서 수행되고 있으며, 흙의 역학적 거동이 응력수준에 의한 구속응력의 크기에 따라서 결정되므로 실내 축소모형실험 결과의 유효성에 대하여 회의적일 수밖에 없다. 한편, 흙의 거동은 구속응력의 크기에 따라 결정되며, 대부분의 지반공학적 문제는 흙의 자중이 응력조건을 지배한다. 실험실 또는 현장에서 수행하는 축소된 모형의 지반공학적 거동과 그에 대응하는 실험의 원형 구조물의 거동사이의 상사성을 유지하기 위하여 흙의 자중에 의한 응력구배가 모형실험에서 재현되어야 한다. 이와 같은 응력조건을 재현시키기 위하여 원심모형실험기를 이용하여 인위적으로 높은 중력가속도장을 형성하는 것이다. 원심모형실험에 의한 모델링에서는 모형의 축척을 원형의 크기에 대하여 n 배만큼 축소시키는 동시에 인위적 가속도장을 중력의 n 배만큼 형성시켜준다.

2.2 실험장치 및 기구

2.2.1 원심모형실험기

원심모형실험 장치는 실험목적, 설치장소, 경제성 등에 따라 차이가 있으나 기본적으로 회전상자(swing basket), 회전팔과 수직축, 균형추, 미끌링, 회전조인트 등으로 구성

된다.

본 연구에 사용한 원심모형실험기 중량이 800kN으로 질량 5,500kg에서 300g로 가속할 수 있고 220rpm의 회전속도를 최소 10분에서 최대 100분 가량 지속시킬 수 있다. 원심모형실험의 원리와 활용에 대해서는 이치근(2001) 등에 의해 자세히 설명되어 있다.

2.2.2 모형박스

원심모형실험은 차원 해석을 기초로 인위적인 중력장에서 1/n의 축소비로 실험을 위한 상사 법칙을 적용하였으며, 기하학적 축척을 1:200으로 하고 200배의 중력가속도를 가하여 실험을 수행하였다. 따라서 상사원칙에 따라 지반 입경을 130 μ m로 하고, 강널말뚝은 두께 13mm의 알루미늄시트로 물성을 제어하였으며, 1기의 단독 돌핀 구조물을 대상으로 모사하였고 돌핀의 실제 직경 20m, 30m에 대한 모형으로 직경 0.1m, 0.15m인 모형을 제작하였다. 돌핀은 강널말뚝 벽체를 모사하는 금속 시트, 상단의 콘크리트 덮개를 모사하는 단단한 알루미늄 링(직경 0.1m 및 0.15m)으로 구성하였다.

실험에 사용한 모형박스는 그림 2와 같으며 돌핀 모형은 사질토로 채워진 직경 60cm의 원형 컨테이너 내부에 설치

하는데 용기 안에는 완전히 포화된 조밀한 모래층을 구성하였으며, 돌핀을 모래층 위에 놓고, 돌핀 내부에 필요한 밀도에 따라 중량을 최적함수비에 맞추어 조성하는 다짐법에 의해 중간 조밀과 매우 조밀 조건의 모래층을 조성하였다.

돌핀에 충격을 가하는 선박은 대형 선박의 구상선수(bulb)를 모사한 돌출된 실린더형 고체질량체로 끝이 구형인 18.1kg의 청동으로 제작하였는데, 실제 중량 145,000 tonf에 상응한다. 실험 중 실린더 이동체는 마운트 위에서 액추에이터(actuator)의 유압시스템으로 작동한다. 준정적 실험에서는 선박을 일정하게 느린 속도(원형의 최대변위 10m에 맞추어 변위속도를 300mm/h로 함)로 전진시키며, 동적 충돌 실험에서는 선박의 속도를 순간적으로 3.7m/sec까지 증가시키고 속도 증가 후 선박은 유압시스템의 작용 없이 계속 전진하도록 하였다.

구상선수의 충돌에 의한 돌핀의 변형은 용기위에 탑재된 마운트의 상부에 연결된 가이드 레일에 설치되어 있는 LVDT를 이용하여 측정하였으며, 돌핀에 충돌과 동시에 발생하는 충격력은 구상선수를 가동하는 액추에이터에 연결된 가압장치를 통해 측정하였다.

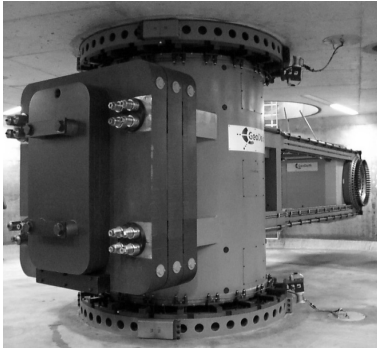
| | | |
|---|-------------------------|--|
|  | Acceleration | Max. 300g(at 220rpm) |
| | Capacity | 16.5MN |
| | Arm length | 5.5m from the centre |
| | Vacuum in chamber | 5mbar(vacuum in the chamber reached within 15min.) |
| | Drive system | Max. 22rpm per minute Min. 2.2rpm per minute |
| | Hydraulic slippings | Water : 30bar, Oil : 280bar, Air : 30bar |
| | Data Acquisition system | Total channel : 150 Serial data transmission : 350,000 samples per second |

그림 1. 원심모형실험기와 제원

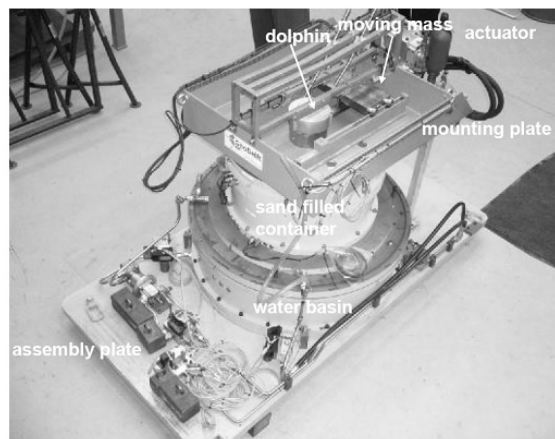
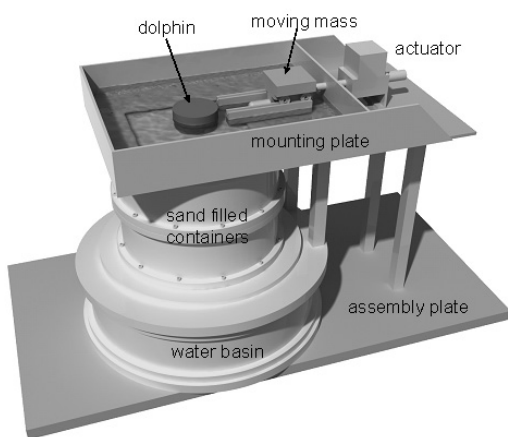
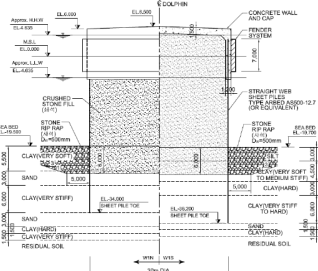
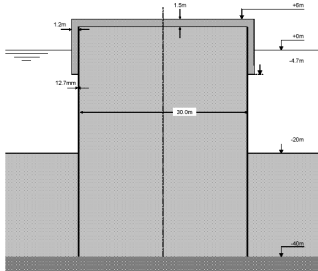


그림 2. 선박충돌방지 돌핀의 모형박스 장치

표 1. 실제 조건 대비 원심모형실험 조건

| 항 목 | 원형(기본설계 구상) | 이상화된 모델 | 실험 모델 |
|-----------|--|---|--|
| 형상 |  |  | <ul style="list-style-type: none"> ○ 1기의 단독돌핀 대상 ○ 기하축척 : 1/200 ○ 중력축척 : 200/1 ○ 모사직경 : 20m→0.1m 30m→0.15m |
| 지반조건 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 널말뚝은 사질토층에 관입 ○ 일부는 N>40 이상지층 관입 | ○ 널말뚝은 균질한 조립토층에 근입 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 기초층 : 조밀한 모래 ○ 상부층 : 중간-느슨 모래 |
| 널말뚝 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 두께 12.7mm, 길이 500mm ○ 항복강도 $f_y=335\text{MPa}$ | ○ 실물과 같은 휨과 축강성을 가진 원형 강재 셀 | ○ 0.3mm 알루미늄 쉬트 |
| 콘크리트 벽체/캡 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 벽체 : 프리캐스트(포스트텐션) ○ 전단연결재로 널말뚝 고정 ○ 캡 : 현장타설 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 널말뚝과 미결림 없이 고정 ○ 캡의 실제 경사는 무시함 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 벽체 : 알루미늄 쉬트로 널말뚝에 정착 ○ 캡은 무변형 재료(재사용) |
| 채움재 | ○ 쇄석(평균 15cm) | | ○ 모래($d_{50}=130\mu\text{m}$) |
| 충돌 시나리오 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 설계선박의 충돌속도, 각도, 위치가 달라지므로 다양한 시나리오 발생 ○ 예상변위 : 10m 이내 | | <ul style="list-style-type: none"> ○ 정적실험 : 변형률 30cm/hr ○ 동적실험: 18.1kg, 3.7m/sec ○ 충돌위치 : EL0m, EL(-)9m |

2.2.3 실험 방법

선박충돌방지용 돌핀 구조물에 대한 지반원심모형실험의 목적은 정적하중, 충격하중에 의한 돌핀 응답을 지배하는 임계파괴모드를 평가하고 변위 제어에 의한 정적하중-변위 거동 평가, 선박의 충돌 속도를 시뮬레이션하는 충격하중-변위 거동을 평가하는데 있다.

이러한 목적을 위하여 본 연구에서 수행된 원심모형실험의 일반적인 절차는 다음과 같다. 우선, 지반구조물의 형식이나 대표 단면 및 단면구성도를 작성하였으며, 구조물을 이루는 구성 재료의 재료특성 자료를 획득하여 실험 시 유사 재료 선정을 위한 사전 준비를 수행하였다. 다음으로, 원형을 모형화하는데 요구되는 길이 상사계수를 우선적으로 결정하며, 길이 상사계수를 이용하여 시간, 가속도, 변위, 응력/간극수압, 힘 등과 같은 구조물의 특성을 반영할 수 있는 물리량에 대한 상사계수를 계산하고 선정된 길이상사계수로부터 모델링될 단면도를 작성하였다. 구조물의 실제 조건과 대비하여 원심모형실험을 수행한 조건을 표 1에 정리하였다.

모형 지반은 한 종류의 모래를 밀도만 다르게 하여 조성하였는데, 원지반 상층부는 중간-매우 조밀한 상태로 하고, 하층부는 매우 조밀한 상태로 하였다. 모형실험은 직경별(20m, 30m)로 채움재의 상대밀도를 조절하여, 각각 준정적(quasi-static)과 동적(dynamic) 조건에 대하여 충돌위치를 변경하면서 반복하였다. 충돌 구현 조건을 달리하여 준정적시험 시에는 일정한 변위속도(300mm/h)로 배수조건을 전반

파괴 실험을 수행하였으며, 동적시험에서는 18.1kg의 이동 질량체(moving mass)를 1, 2, 3.7m/sec의 속도로 충격하여 설계선박의 충돌을 모사하였다. 충돌 위치는 2개 지점으로 구분하였는데, 수면 높이(EL 0m)에서는 전반파괴 조건, 수면 아래 9m(EL -9m)에서는 국부편칭파괴 조건을 모사하였다.

표 2. 원심모형실험 유형

| 실험번호 | 직경 (m) | 채움재밀도 | 충돌위치 (GL, m) | 충돌속도 (m/sec) |
|---------|--------|-------|--------------|--------------|
| Test 1 | 30 | 중간 조밀 | +0 | 0.0 |
| Test 2 | 30 | 중간 조밀 | +0 | 3.7 |
| Test 3 | 20 | 매우 조밀 | +0 | 3.7 |
| Test 4 | 30 | 매우 조밀 | -9 | 3.7 |
| Test 5 | 20 | 중간 조밀 | +0 | 0.0 |
| Test 6 | 20 | 매우 조밀 | +0 | 0.0 |
| Test 7 | 30 | 중간 조밀 | +0 | 0.0 |
| Test 8 | 30 | 매우 조밀 | +0 | 0.0 |
| Test 9 | 20 | 중간 조밀 | +0 | 3.7 |
| Test 10 | 20 | 매우 조밀 | +0 | 3.7 |
| Test 11 | 30 | 중간 조밀 | +0 | 3.7 |
| Test 12 | 30 | 매우 조밀 | +0 | 3.7 |
| Test 13 | 30 | 매우 조밀 | +0 | 2.0 |
| Test 14 | 30 | 매우 조밀 | +0 | 1.0 |
| Test 15 | 30 | 중간 조밀 | -9 | 0.0 |
| Test 16 | 30 | 매우 조밀 | -9 | 0.0 |
| Test 17 | 30 | 중간 조밀 | -9 | 3.7 |
| Test 18 | 30 | 매우 조밀 | -9 | 3.7 |

본 연구에서는 충돌보호공의 직경, 채움재 밀도 및 충돌 속도 등을 달리하여 표 2와 같이 18회의 원심모형실험을 수행하였으며, 실험은 목적에 따라 실험장치를 검증하기 위한 초기실험(실험 1~4)과 수위와 같은 높이에서 힘을 작용시키며, 2개의 돌핀크기와 두 종류의 채움재 밀도에 대한 준정적실험(실험 5~8), 2개의 돌핀크기 및 두 종류의 채움재 밀도에 대해 최대 충돌속도일 때의 수면높이 충돌에 대한 동적실험(실험 9~12), 가장 강성이 큰 돌핀에 대한 낮은 속도에서의 동적실험(실험 13~14), 조밀한 채움재의 직경 30m의 돌핀에 대한 하부 충돌(-9m)을 모사한 준정적실험(실험 15~16), 조밀한 채움재가 사용된 30m 직경 돌핀의 하부충돌에 대한 동적실험(실험 17~18)으로 수행하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 준정적실험

Test 1~4는 돌핀 모형의 상사성 및 충돌속도의 유효성을 평가하기 위해 수행되었으며, 준정적(Quasi-static) 실험(Test 5~8)은 돌핀의 에너지 소산량에 대한 돌핀 구조물의 직경

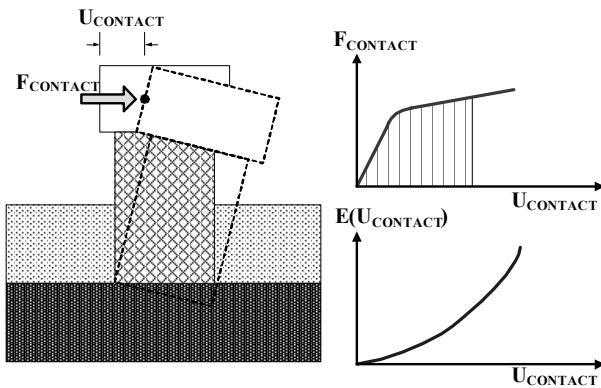


그림 3. 힘-변위 및 에너지소산-변위 곡선을 통한 돌핀의 거동

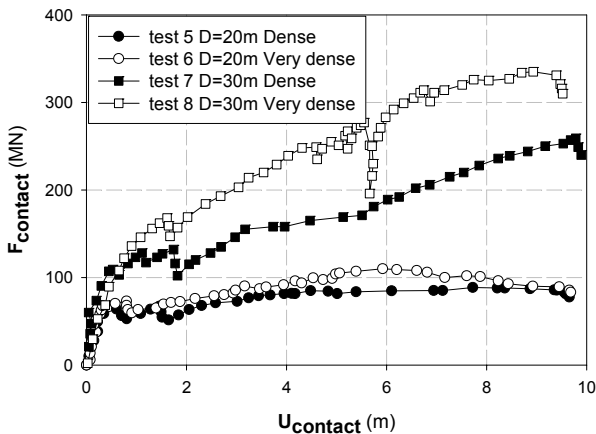


그림 4. 돌핀 직경에 따른 힘-변위 곡선

과 밀도의 영향을 평가하기 위해 계획되었다. 본 연구에서는 힘 및 변형에 대한 기준점으로 접촉점을 사용하여 비교를 수행하였으며 비교된 응답 특성은 그림 3과 같다.

3.1.1 채움재 밀도에 따른 충돌보호공 거동특성

중간 조밀(test 5, 7)부터 매우 조밀(test 6, 8)에 이르는 채움재의 밀도 변화에 대한 돌핀의 응답특성을 그림 4에 나타내었다. 힘-변위 실험결과는 채움재 밀도와 채움재의 강성 변화가 구조물의 초기 강성에 대해 극히 제한된 영향만을 미친다는 것을 보여주며, 수평변위가 증가하면서 밀도변화에 따른 구조물의 강성차이가 발생되었는데 중간 조밀보다 매우 조밀한 경우가 최대 약 1.3배까지 큰 것으로 나타났다.

또한 직경 30m의 돌핀에서 초기변위는 직경 20m와 전반적으로 유사한 거동을 나타내었으나 수평변위가 점점 증가하면서 밀도변화에 따라 최대 1.5배까지 강성차이를 보이고 있다.

3.1.2 돌핀 직경에 따른 충돌보호공 거동특성

그림 5, 6은 돌핀직경에 따른 힘-변위 특성을 정규화한 것으로 Test 5는 직경 20m의 돌핀에 대한 실험으로 Test 7(직

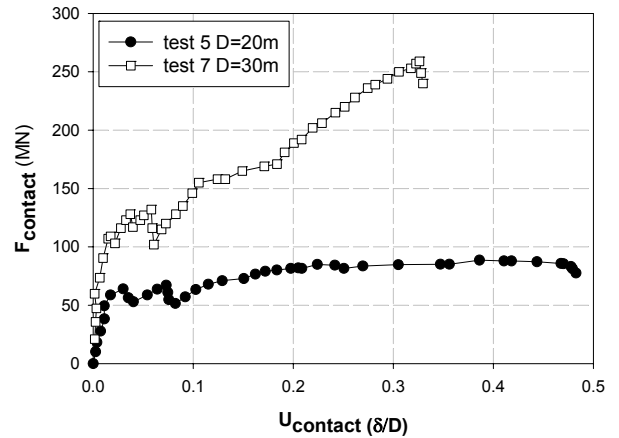


그림 5. 중간 조밀한 채움재 돌핀의 힘-변위 곡선

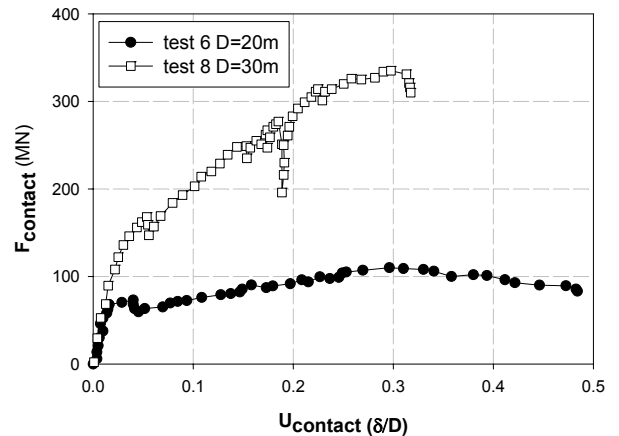


그림 6. 매우 조밀한 채움재 돌핀의 힘-변위 곡선

경 30m)과 초기변위 시는 유사한 거동을 보이거나 수평변위가 점점 증가하면서 돌핀직경에 따른 강성차이가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 수평변위비 0.18 이후로는 직경이 클수록 강성이 선형적으로 증가하며 강성차이가 110~170MN으로 비교적 크게 발생하는 것으로 나타났다.

Test 6은 직경 20m의 돌핀에 대한 실험으로 Test 8(직경 30m)과 초기변위 시는 유사한 거동을 보이거나 수평변위가 점점 증가하면서 돌핀직경에 따른 강성차이가 크게 발생하는 것으로 나타나 중간 조밀 채움재 돌핀과 유사한 경향을 나타냈다. 수평변위비가 0.05 이후로는 강성차이가 100~230MN으로 중간 조밀의 채움재 보다는 비교적 작은 수평변위에서 강성차이가 크게 발생됨을 알 수 있었다.

실험결과와 중간 조밀과 매우 조밀한 경우의 강성차가 각각 약 2.9, 3.1배로 조밀할수록 직경에 따른 강성차이가 두드러지는 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다.

그림 7은 돌핀직경에 따른 에너지소산 변화를 나타낸 것으로 돌핀직경 20m인 경우 수평변위비(δ/D) 0.48에서 대부분의 에너지가 소산되었으며, 약 3m의 수평변위에서 채움재 밀도의 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 돌핀직경 30m인 경우는 수평변위비(δ/D) 0.33에서 대부분의 에너지가 소산되었으며, 약 2m의 수평변위에서 채움재 밀도의 영향을 받는 것으로 나타났다.

표 3은 직경 20m와 30m인 돌핀의 채움재 밀도 변화에 따른 상대적인 영향으로 동일한 변형(9.5m)에서의 에너지소

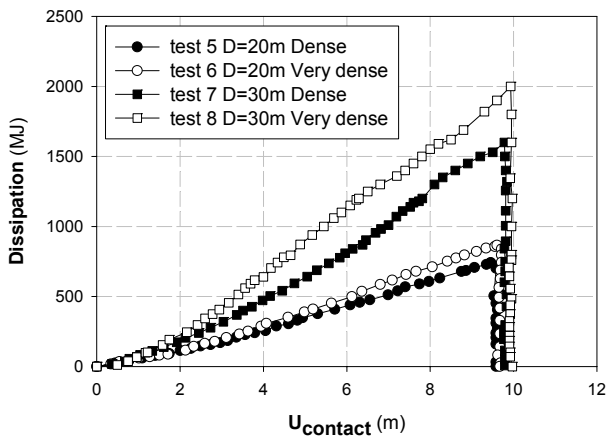


그림 7. 직경 및 채움밀도에 따른 정적에너지소산-변위 곡선

표 3. 채움재 밀도변화에 의한 에너지 소산 증가비교

| 실험 | 직경 (m) | 채움재밀도 | 에너지소산 (U=9.5m) | 상대적 증가도 |
|--------|--------|-------|----------------|---------|
| Test 5 | 20 | 중간 조밀 | 741 MJ | +16.3% |
| Test 6 | 20 | 매우 조밀 | 862 MJ | |
| Test 7 | 30 | 중간 조밀 | 1,646MJ | +22.6% |
| Test 8 | 30 | 매우 조밀 | 2,018MJ | |

산을 비교해보면, 매우 조밀한 채움재가 직경 20m 돌핀에 대해서는 16%, 30m 직경의 돌핀에 대해서는 23% 만큼 에너지소산을 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

즉, 30m 직경의 돌핀이 더 큰 민감도를 갖는 것은 채움재의 변형률이 에너지소산에 대해 보다 크게 기여하기 때문인 것으로 판단되며, 이러한 기여도는 직경이 증가할수록 더 밀접한 관계를 갖는 것으로 나타났다.

3.2 동적실험

그림 8은 채움재 밀도와 돌핀직경에 따른 충돌보호공의 거동을 측정된 것으로 변위에 따른 동적에너지 소산 결과를 나타낸 것이다. 직경 20m인 경우 채움재 밀도에 따른 동적 에너지소산은 채움재 밀도가 높을수록 작은 변위에서 에너지 소산정도가 큰 것으로 나타났다. 또한 직경 30m인 경우 변형에 따른 에너지 소산 경향은 돌핀직경 20m와 유사한 경향을 보이고 있으나, 돌핀직경이 클수록 동일한 에너지소산이 발생하는 수평변위가 감소하므로 작은 변위에도 동적인 충격을 크게 흡수할 수 있음을 알 수 있다.

채움상태와 직경에 따른 에너지 소산을 분석한 결과 채움재 밀도상태에 상관없이 수평변위가 증가함에 따라 에너지소산정도의 차이가 최대 400~500MJ로 발생하는 것으로 나타났다. 중간 조밀한 경우에는 직경이 증가함에 따라 동일한 에너지 소산이 발생하는 수평변위가 50% 정도로 감소하는 경향을 보이며, 매우 조밀한 경우에도 유사한 경향을 보여 동적하중에 의한 에너지 소산도 채움재의 밀도에 비해 구조물의 직경에 의한 영향에 더욱 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다.

3.3 충돌속도 비교

Test 8(v=0m/sec), Test 12(v=3.7m/sec), Test 13(v=2.0m/sec)

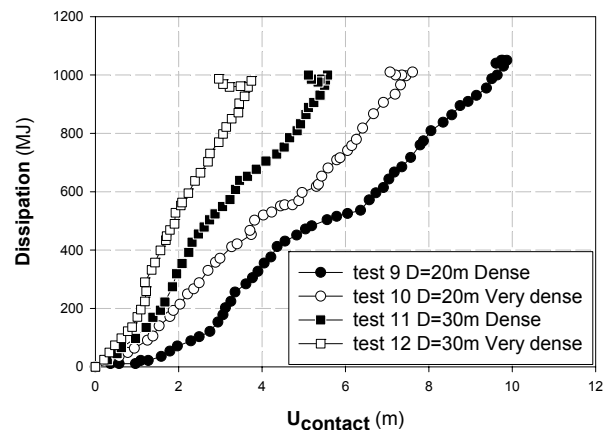


그림 8. 직경과 채움밀도에 따른 동적에너지소산-변위 곡선

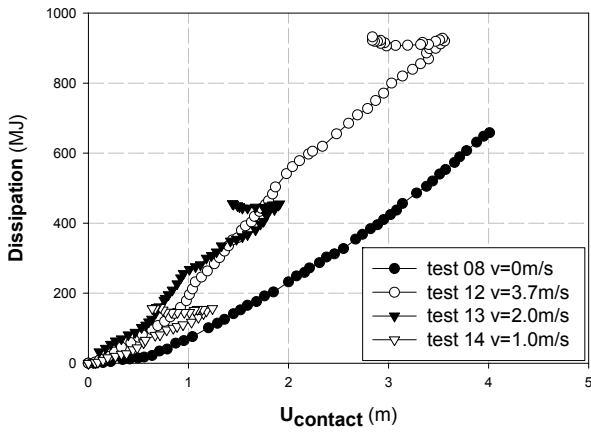


그림 9. 충돌속도에 따른 에너지소산-변위 곡선

표 4. 정적과 동적실험에서의 에너지 소산비교

| 실험번호 | 충돌속도 | 수평변위 | 에너지소산 | 차이 |
|---------|----------|-------|---------|-------|
| Test 08 | 0 | 3.56m | 540.0MJ | +71% |
| Test 12 | 3.7m/sec | 3.56m | 924.9MJ | |
| Test 08 | 0 | 1.91m | 200.0MJ | +128% |
| Test 13 | 2.0m/sec | 1.91m | 456.2MJ | |
| Test 08 | 0 | 1.25m | 100.0MJ | +57% |
| Test 14 | 1.0m/sec | 1.25m | 156.5MJ | |

및 Test 14(v=1.0m/sec)는 충돌속도와 에너지소산의 관계를 측정하기 위한 실험으로 비교결과는 그림 9와 같다.

에너지소산 곡선을 살펴보면 3.7m/sec에서 관측된 소산력의 증가가 2.0m/sec에서도 관측되었고 최저 충돌속도인 1.0 m/sec에서는 낮은 속도로 인해 동적 강도증가가 크게 나타나지 않아 소산력 증가효과가 미미하며 낮은 변형률이 나타났다.

표 4는 최대 변위가 동일할 때의 동적실험의 에너지소산과 준정적실험의 에너지소산을 비교한 것으로 Test 8(v=0m/sec)이 적용된 이유는 이 실험이 가장 높은 에너지소산을 제공하므로 동적효과의 영향이 가장 작게 반영될 수 있기 때문이다. 실험결과, 중간 충돌속도 2.0m/sec에 대한 상대적 증가가 128%로 가장 크다는 것을 보여주고 있으며, 에너지소산에서의 절대값 증가는 2.0m/sec와 3.7m/sec에 대해 비슷하게 나타났다.

3.4 하부충돌

하부충돌실험은 채움재에 의해 안정화된 슈트파일에 대하여 특정 높이에서 국부적으로 큰 손상이 발생하는 힘을 구하는데 그 목적이 있다. 본 연구에서는 30m 돌핀을 적용하고 구형 구상선수 모양이 해수면 아래쪽 9m지점에 충돌하는 것으로 실험하였다. 두 가지 채움재가 적용되며 충돌은 준정적 상태 및 최대속도에서 발생하는 것으로 하였으며, 실험개념은 그림 10에 나타내었다.

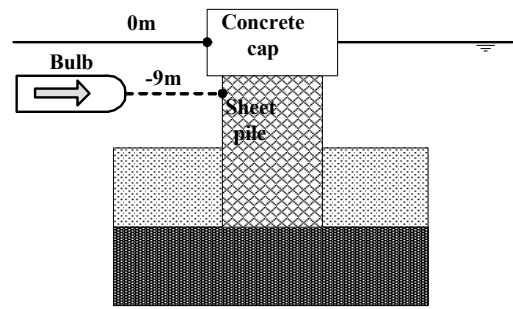


그림 10. 하부충돌의 구조도

돌핀변위는 신뢰할만한 측정치가 불충분하여, 선박구상선수의 이동량으로만 표현하였고 이러한 변형 측정법은 선박구상선수가 돌핀측으로 파고 들어간 국부적 압입과 돌핀의 전체적인 전도를 포함하고 있다. 선박구상선수는 돌핀의 에너지소산을 목적으로 구현하였으므로 변형이 일어나지 않도록 구형충동으로 제작하였으나 실제 충돌상황에서는 구상선수의 변형이 허용되므로 발생력이 감소할 것으로 판단된다.

선박충돌보호공의 설계를 검증하기 위해 적용된 최대선박크기는 100,000DWT이며, 충돌힘에 대한 AASHTO 식에 의하면 최대속도 5.14m/sec로 운항할 때 충돌힘은 식 (1)과 같이 발생된다.

$$0.12 \times 5.14 \sqrt{100,000} \text{ MN} = 195 \text{ MN} \quad (1)$$

3.4.1 준정적실험

준정적 충돌(Test 15:중간 조밀, Test 16:매우 조밀) 결과는 그림 11~12에 나타난 바와 같다. 그림 11에 나타난 바와 같이 힘-변위 응답은 국부적으로 감소를 보이기는 해도, 저항력은 지속적인 증가를 나타냈다. 중요한 점은 중간 조밀 채움재가 쓰인 경우 변형이 4.1m 이내일 때, 그리고 매우 조밀한 채움재가 쓰인 경우 변형이 1.9m 이내일 때, 힘이 최대 선박 충돌 힘(195MN) 이상으로 증가한다는 것이다.

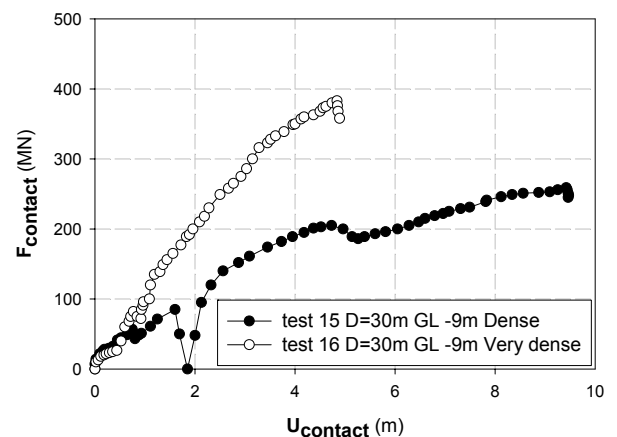


그림 11. 정적 하부충돌에 따른 힘-변위곡선

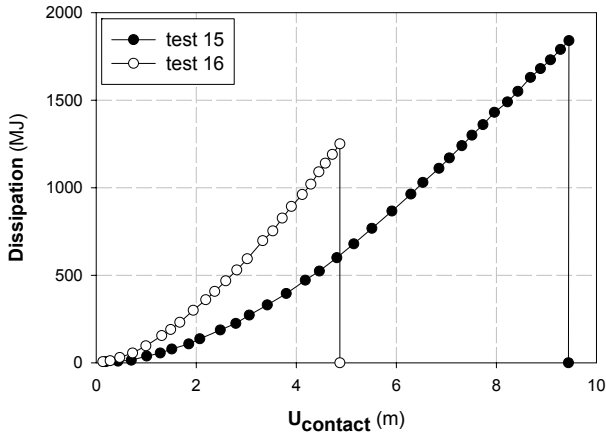


그림 12. 정적 하부충돌에 따른 에너지소산-변위곡선

따라서 선박의 충돌 힘은 빠르게 소진됨을 알 수 있다.

그림 12의 에너지 소산곡선은 변위에 따라 꾸준한 증가를 보여주며, 일반적으로 4.5m/sec의 100,000DWT 선박에 의한 충돌에 대해 설계되어야 하며, 이는 충돌 에너지 1,200 MJ와 일치한다. 에너지소산 특성을 살펴보면, 중간 조밀한 채움재의 돌핀인 경우 선박의 10m 이내의 변위 내에서 에너지가 소산되고 매우 조밀한 채움재일 경우 5m 이내의 변위에서 에너지가 소산된다는 것을 알 수 있다.

3.4.2 동적실험

그림 13~14는 돌핀직경 30m에 대한 채움재 밀도(Test 17: 중간 조밀, Test 18: 매우 조밀)에 따른 힘과 에너지 소산결과를 나타낸 것이다.

그림 13은 채움재 밀도에 따른 힘응답특성을 나타낸 것으로 전체적으로 밀도가 큰 채움재 돌핀일수록 동적인 힘응답이 큰 것으로 나타났다. 수평변위가 1m 이내로 비교적 작은 경우에는 밀도변화에 따른 영향을 적게 받는 것으로 나타났고 수평변위가 점점 증가함에 따라 동적인 힘응답의 크기 차이가 발생되면서 3m 변위에서는 최대 220MN 정도 차이를 보였으며, 2.6배 정도의 응답차를 보이는 것으로 나타났다.

또한 최대 힘응답이 발생하는 변위는 각각 4.2m와 3m로 1.4배의 차이를 보이고 있어 조밀할수록 작은 변위에서 큰 힘응답을 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 14는 채움재 밀도에 따른 에너지소산특성을 나타낸 것으로 전체적으로 밀도가 큰 채움재 돌핀일수록 에너지 소산응답이 더 큰 것으로 나타났다. 수평변위가 1m 이내로 비교적 작은 경우에는 밀도변화에 따른 영향을 적게 받는 것으로 나타났으며, 수평변위가 점점 증가함에 따라 에너지 소산응답의 크기 차이가 발생되었다. 4m 변위에서는 최대 460MJ 정도의 에너지소산 차이가 발생되었는데 이는 중간 조밀채움재에 대비하여 76.7% 정도 더 큰 것으로 나타났다.

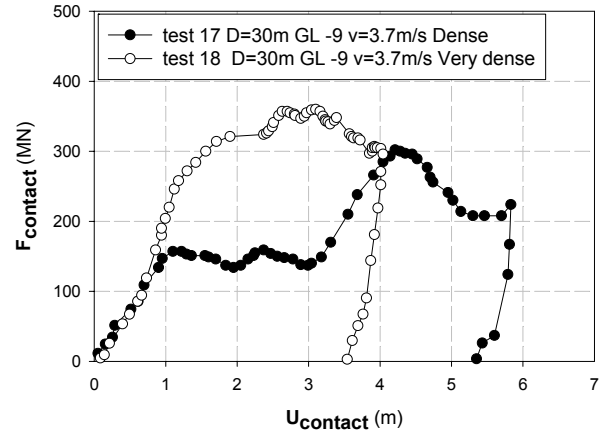


그림 13. 고속 충돌 시 밀도에 따른 힘-변위 곡선

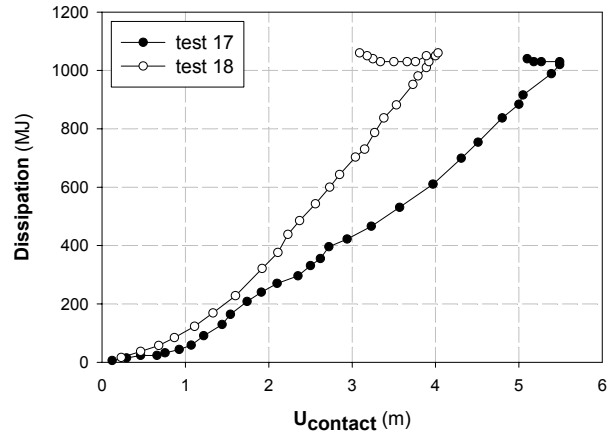


그림 14. 고속 충돌 시 밀도에 따른 에너지소산 곡선

3.4.3 상부 하부 충돌비교

그림 15~16에서는 상부충돌(Test 7: 중간 조밀, Test 8: 매우 조밀)과 하부충돌(Test 15: 중간 조밀, Test 16: 매우 조밀)의 힘-변위 응답을 비교하였다. 중간 조밀 채움재상태에서 하부충돌 시 초기에는 적은 힘이 발생되지만, 3m 이상의 변형에서 상부충돌 시의 힘에 이르거나 이를 능가한다. 따라서 하부충돌 하중이 매우 얇은 쉬트파일에 작용하더라도, 전체적인 저항은 동일하거나 혹은 그 하중이 상부 캡 구조물에 작용할 때보다 저항이 더 큰 것으로 나타났다.

그림 16과 같이 매우 조밀한 채움재 돌핀의 경우에는 약 2m 이내의 변형에서는 상부충돌 시의 힘이 하부충돌보다 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 변형이 증가함에 따라 하부충돌 시 힘응답이 증가하는 경향을 보이고 있으며 중간 조밀채움재 돌핀과 달리 하중차이가 크게 발생되면서 하부충돌이 더 큰 저항력을 나타내었다.

큰 변위발생 시 하부 충돌이 상부 충돌 시보다 더 큰 힘을 발생시키는 것은 하부 충돌 시 발생하는 전도 모멘트가 더 작기 때문으로 이러한 사실은 수평활동과피가 더 많이 발생하고 전도가 더 적게 발생하여 전체적 저항력이 더 커

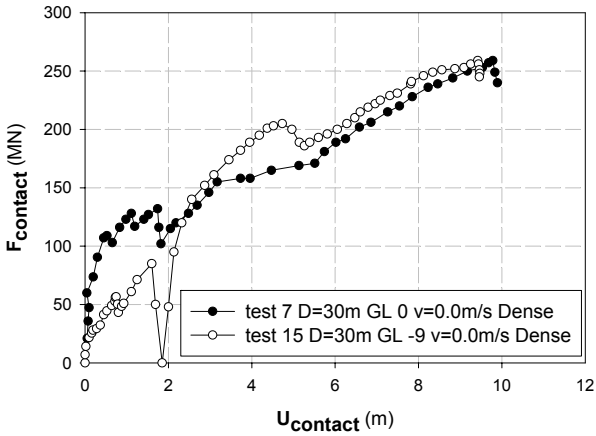


그림 15. 중간 조밀한 상태에서의 힘-변위곡선

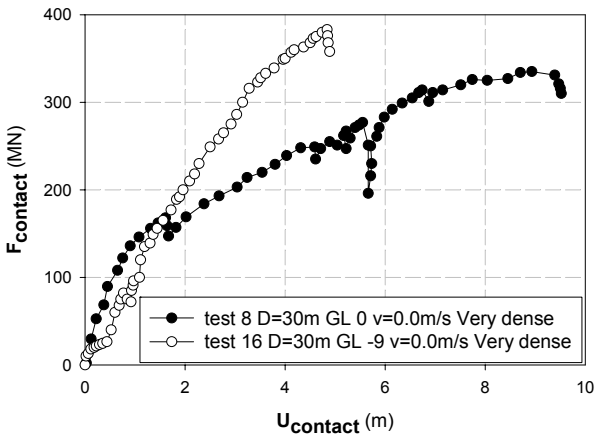


그림 16. 매우 조밀한 상태에서의 힘-변위곡선

지는 파괴 메커니즘으로 나타나는 것으로 판단된다.

3.4.4 정적, 동적 비교

그림 17~20는 이전에서 언급된 준정적 실험(Test 15:중간 조밀, Test 16:매우 조밀)에 상응하는 동적 충돌실험(Test 17:중간 조밀, Test 18:매우 조밀)의 응답을 비교하였다.

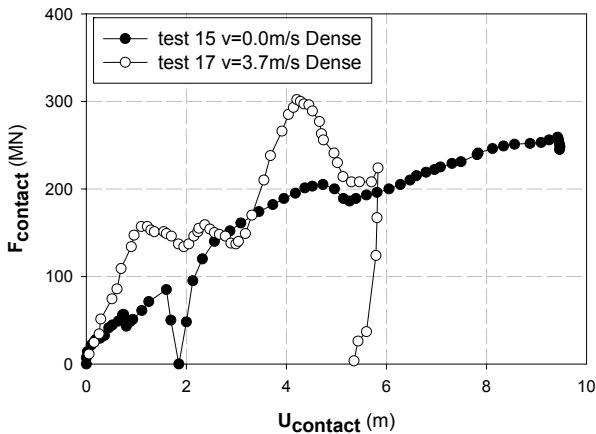


그림 17. 정·동적 충돌방식에 따른 힘-변위곡선(중간 조밀)

실험결과 일반적으로 동적 응답이 준정적 응답보다 큰 것으로 나타났으며, 더 작은 변위에서 에너지소산이 발생되고 있음을 알 수 있다. 가장 큰 차이는 중간 조밀채움재를 사용한 돌핀에서 관찰되었는데, 이 돌핀에서는 동적 힘 응답이 준정적 응답보다 50% 까지 더 크며 에너지소산 응답은 33% 정도 더 크게 나타났다. 또한 매우 조밀한 채움재 일 때 에너지소산은 10% 정도 큰 것으로 나타났다.

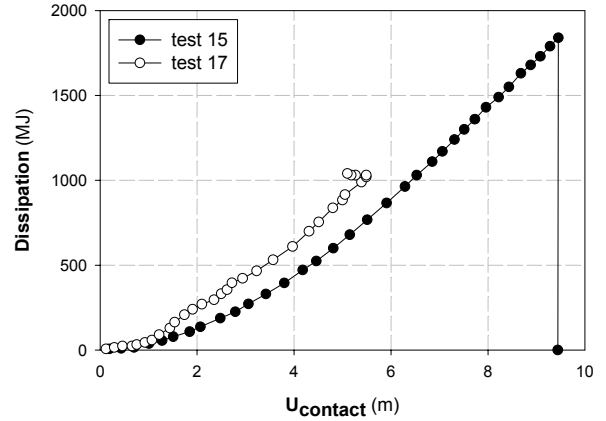


그림 18. 정·동적 충돌방식에 따른 에너지소산-변위곡선(중간 조밀)

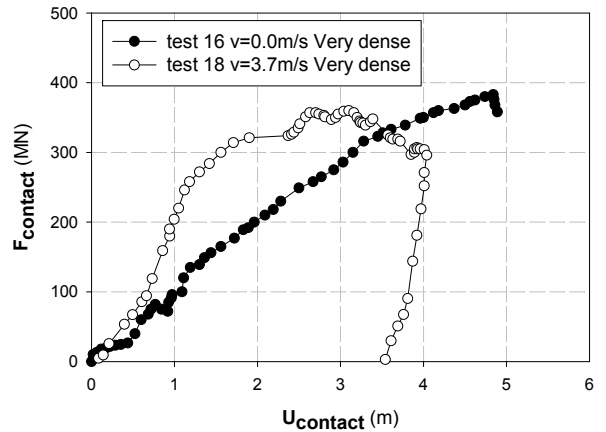


그림 19. 정·동적 충돌방식에 따른 힘-변위곡선(매우 조밀)

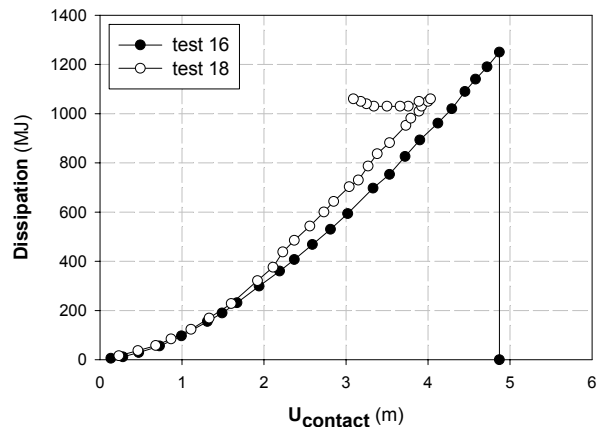


그림 20. 정·동적 충돌방식에 따른 에너지소산-변위곡선(매우 조밀)

따라서 돌핀 구조물의 거동예측 시 준정적 응답특성을 사용하는 것이 보수적이라는 것을 알 수 있으며, 하부충돌 시 돌핀 저항력은 상부충돌 시(콘크리트 캡이 국부적 충돌 하중을 분배)와 동일하거나 더 우세함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 대형선박과 돌핀구조물간의 상호충돌거동을 분석하여 교각의 안정성이 확보되는지를 규명하고자 원심모형실험을 실시하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 원심모형실험에 의한 준정적실험 결과, 해저면에 근접시킨 돌핀의 힘-변위 거동은 강널말뚝 내부 채움재인 쇠석 골재의 밀도변화가 구조물의 초기 강성에 대해 비교적 제한된 영향만을 미치고 있으며, 돌핀의 직경에 따라 비교한 결과 초기 변위 시는 유사한 거동이 나타났으나 수평변위가 증가하면서 직경에 따라 강성차이가 점점 커지는 경향을 보이고 이러한 경향은 조밀할수록 두드러지는 것으로 나타났다.
- (2) 준정적실험에서 돌핀의 변형에 대한 에너지소산을 비교해 보면 직경에 따라 각각 수평변위비(δ/D) 0.48, 0.33에서 소산되었으며, 더 조밀한 채움재가 직경 20m에서 16%, 30m 직경에서 23% 만큼 증가시켜 직경이 클수록 민감한 것으로 나타나 채움재의 변형률이 에너지 소산에 크게 기여하고 직경이 증가할수록 더 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있다.
- (3) 원심모형실험에 의한 동적실험 결과, 채움재 밀도가 높을수록 에너지 소산정도가 크며 돌핀직경이 클수록 동일한 에너지소산이 발생하는 수평변위가 감소하므로 작은 변위에도 동적인 충격을 흡수할 수 있다는 것을 알 수 있으며, 동적하중에 의한 에너지 소산도 채움재의 밀도에 비해 구조물의 직경에 의한 영향에 더욱 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다.
- (4) 해수면 아래의 선박 선수부의 이동량을 통해 돌핀 하부충돌을 모사한 결과, 채움재 밀도에 따라 각각 수평변위비(δ/D) 0.15, 0.05 이내에서 힘이 최대 선박 충돌 힘(195MN) 이상으로 증가하므로 하부 충돌 시 선박의 충돌 힘이 빠르게 소진되고 있음을 알 수 있으며, 동적실험 결과 밀도가 큰 채움재 돌핀일수록 작은 변위에서 더 큰 에너지 소산응답을 보이는 것으로 나타났다. 또한 하부충돌 하중이 매우 얇은 슈트파일에 작용하더라도, 전체적인 저항은 동일하거나 혹은 그 하중이 상부 캡 구조물에 작용할 때보다 저항이 더 클 수 있음을 알 수 있다.
- (5) 동·정적 충돌실험결과, 일반적으로 동적 응답이 준정적 응답보다 26~58%까지 크고 더 작은 변위에서 에너지

소산이 발생되고 있음을 알 수 있다. 따라서 돌핀 구조물의 거동예측 시 준정적 응답특성을 사용하는 것이 보수적이라는 것을 알 수 있다.

“이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2010)”

참 고 문 헌

1. 대한토목학회, 교량설계핵심기술연구단(2008), *도로교설계기준해설*, 기문당, pp. 63~64.
2. 김주영, 김정태, 류연선, 나원배, 박재형(2005), 선박충돌시 교각 및 충돌 방지 시스템의 거동해석, *한국해양과학기술협의회 공동학술대회*, pp. 1728~1733.
3. 서석구, 이석용, 양병홍, 홍석주(2007), 섬식 충돌보호공의 계획과 설계, *대한토목학회지*, Vol. 55, No. 8, pp. 39~49.
4. 이계희, 홍현석, 백종균(2003), 강재 충돌 방호공의 선박충돌해석, *2003년도 학술발표회 논문집*, 한국전산구조공학회, pp. 71~78.
5. 이성로, 이계희, 이완수(2004a), 교량의 선박충돌 에너지산정, *대한토목학회논문집*, Vol. 24, No. 5A, pp. 951~960.
6. 이성로, 이계희, 이완수(2004b), 선박의 교각충돌에 대한 해석, *2004년도 학술발표회 논문집*, 한국구조물진단유지관리공학회, Vol. 8, No. 1, pp. 81~86.
7. 이처근(2001), 원심 및 수치모델링에 의한 화강토 지반상 Diaphragm Wall의 거동, 박사학위논문, 충북대학교, pp. 70~93.
8. AASHTO(1991), *Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., pp. 1~190.
9. AASHTO(1994), *LRFD Bridge Design Specifications and Commentary*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., pp. 1~244.
10. Chen, D.(2000), *Simplified Ship Collision Model*, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, pp. 1~99.
11. Guema, L.(2009), *Methods of Ship-bridge Collision Safety Evaluation*, R&RATA #2(13) Part 1, Vol. 2, pp. 50~63.
12. Knott, M.A. and Larsen, O.D.(1990), *Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges*, No. FHWA-RD-91-006, US Department of Transportation, Federal Highway Bridges, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, U.S.A., pp. 1~190.
13. March, K. J. and Cambell, J. D.(1963), The Effect of Strain rate on the Post Yield Flow of Mild Steel, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 11, No. 1, pp. 49~63.
14. Pedersen, P. T., Valsgrad, S., Oisen, D. and Spangenberg, S. (1993), Ship Impacts: Bow Collisions, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 163~187.
15. Proske, D. and Curbach, M.(2003), Risk to Old Bridges due to Ship Impact on German Inland Waterways, *Safety and Reliability*, Bedford and Van Gelde, Balkema, Rotterdam, pp. 1263~1270.
16. Wang, G., Ohtsubo, H. and Arita, K.(1998), Inner Dynamics of Side Collision to Bridge Piers, Gluver, H, Olsen, D., *International Symposium on Advances in Ship Collision Analysis*, pp. 53~60.

(접수일: 2010. 10. 8 심사일: 2010. 11. 8 심사완료일: 2010. 12. 7)