

재료모델 변화에 따른 아치형 해저 케이블 보호구조물의 충돌 특성

Collision Characteristics of Arch-Type Submarine Cable Protector - Effect of Material Models

우 진 호* 나 원 배†
Woo, Jinho Na, Won-Bae

요 지

콘크리트와 철근의 재료모델 그리고 스톡앵커의 낙하거리 변화에 따른 아치형 해저 케이블 보호구조물의 충돌특성을 분석하였다. 콘크리트의 재료모델로는 plastic kinematic모델과 Johnson-Holmquist Concrete모델이, 철근의 재료모델은 선형 탄성모델과 plastic kinematic모델이 고려되었다. 스톡앵커의 무게는 2ton이며 낙하거리는 3, 5, 8.83m로 선정되었다. 충돌 해석을 위해 유한요소해석 프로그램 ANSYS가 사용되었고, 해석시간 단축을 위해 낙하거리를 초기속도로 변화하는 기법을 사용하였다. 낙하거리 변화에 따른 재료모델의 민감성을 분석한 결과, 콘크리트의 충돌응답은 콘크리트모델에 민감하고 철근의 충돌응답은 일차적으로 철근모델에 이차적으로 콘크리트모델에 민감함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 앵커충돌, Johnson-Holmquist Concrete모델, plastic kinematic모델, 해저 콘크리트 보호구조물, 동적 유한요소 해석

Abstract

In the study, we analyzed the collision characteristics of a so-called arch-type submarine cable protector by considering the changes in drop heights of a stock anchor and material models for concrete and steel reinforcing bars. We considered plastic kinematics model and Johnson-Holmquist Concrete model for the concrete and linear elastic model and plastic kinematics model for the reinforcing bars. The drop heights of 2-ton stock anchor were selected as 3, 5, and 8.83m, respectively. ANSYS, a finite element analysis program, was used for the collision analysis. To save computational time, we converted those drop heights into initial velocities by the principle of energy conservation. From the sensitivity of the material models on the drop height changes, it is shown that the collision response of the reinforcing bars is sensitive firstly on the steel models and secondly on the concrete models, while the collision response of the concrete is sensitive only on the concrete models.

Keywords : anchor collision, Johnson-Holmquist Concrete model, plastic kinematic model, submarine cable protector, dynamic finite element analysis

1. 서 론

2006년 발생한 제주도 전역에 전력이 끊기는 정전사태는 제주도와 해남을 잇는 해저 전력케이블이 외력에 의해 손상을 입으면서 발생하였다. 전력케이블 시공업체는 선박의 앵커와 연안 인근 양식장의 쇠말뚝에 의해 해저 케이블의 손상이 발생한 것으로 추정하였다(안승환 등, 2007). 실질적으로 사고 지역은 양식업, 자망 통발의 조업, 안강망 조업이 행

해지며 선박의 항행이 많아 이들 선박으로부터 투하되는 쇠말뚝 및 앵커에 의한 해저 케이블의 손상위험이 큰 지역으로 알려져 있다.

제주도 정전사태는 해저 전력케이블의 안정성과 이에 전적으로 의존하는 도서지역의 전력공급체계에 문제점을 나타내었다. 따라서 이들 문제점을 해결하기 위해 다양한 정책 및 연구가 고려되었다. 먼저, 해저 전력케이블의 손상을 방지하기 위해 해저 케이블의 위치와 선박의 위치를 모니터링하고

† 책임저자, 정회원 · 부경대학교 해양공학과 부교수
Tel: 051-629-6588 ; Fax: 051-629-6590
E-mail: wna@pknu.ac.kr

* 부경대학교 해양공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 2월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

사고발생 위험을 경보하는 시스템의 도입이다. 이와 같은 시스템은 국제적으로 통용되고 있으나 사고지역에서는 운용되지 않았으며 일정 톤수 이하의 작은 선박에는 시스템을 설치하고 운용하는데 여전히 문제점을 안고 있다. 둘째, 도서 자체에서 전력을 생산하는 시스템의 도입이다. 과거에 디젤을 이용한 자체 전력생산시스템은 작은 도서에서 일시적으로 전력을 공급하는데는 유용하나 제주도과 같은 규모의 도서에서 운용하기에는 문제점이 많았다. 따라서 현재 해상풍력 등 신재생에너지를 생산하고 공급하는데 많은 연구개발이 진행되고 있다. 셋째, 해저 전력케이블의 안정성을 향상시키는 것이다. 기존의 케이블 보호구조물은 폭 2m, 높이 20cm의 콘크리트 매트리스 형태로 1990년대 조류에 의한 해저 케이블의 이탈방지와 외부 충격 및 끌림에 의한 파손을 막기 위하여 설치되었다. 그러나 사고 당시 매트리스의 압축강도가 감소하여 보호구조물의 기능을 상실한 것으로 판단된다. 따라서 이들 매트리스 보호구조물을 대체할 수 있는 보호구조물의 개발이 필요하다.

대체 보호구조물의 개발과 관련하여 일련의 연구가 수행되었다. 이들 연구는 제한된 보호구조물의 외부 충돌에 의한 안정성을 제고하는데 초점을 두고 있다. 즉, 외부 인자의 충돌에 의한 보호구조물 거동을 분석하는 연구로서 컴퓨터를 이용한 충돌 시뮬레이션과 실지 충돌시험으로 구성된다. 충돌 시뮬레이션은 유한요소법을 이용하여 수행되었는데 아치형 해저 케이블 보호구조물의 앵커 충돌해석(우진호 등, 2009)과 원통연결 보호구조물의 앵커 충돌 및 끌림해석(우진호 등, 2010)이 수행된 바 있다. 특히, 우진호 등(2009)은 철근 콘크리트 보호구조물의 앵커 충돌해석에서 철근의 배근방향, 철근간격, 그리고 콘크리트 재료모델(Mohr-Coulomb 모델, RHT모델)이 충돌해석 결과에 미치는 영향을 정성적으로 분석하였다.

여기서 주목할 것은 기존의 유한요소 시뮬레이션을 이용한 콘크리트의 충격해석에 관한 연구는 대부분 방탄과 방폭 등의 군사적 목적에 집중되어 있다는 것이다(Tham, 2005; Gran 등, 1997; Berg 등, 2004; Zhou 등, 2008). 이들 연구의 대부분은 고속충돌에 의한 콘크리트의 손상에 초점을 맞추고 있다. 또한 최근 새로운 콘크리트 재료의 파괴역학적 해석(귀이홍 등, 2010)과 실험을 바탕으로 하는 수치 해석적 연구(김홍택 등, 2011) 등이 수행되었으나 재료의 휨 또는 압축시험과 같이 재료 자체의 저속변형에 초점을 맞추고 있다. 따라서 저속으로 자유낙하 하는 이형 충돌체의 콘크리트 충돌해석에 관한 연구는 앞에서 소개한 2편의 논문에서 국한된 실정이다.

본 연구에서는 우진호 등(2009)이 수행한 아치형 해저 케

이블의 충격해석에서 가정된 철근의 선형탄성 거동을 소성거동으로 확장시켜 보다 면밀한 충격해석을 수행하고자 한다. 또한 콘크리트 재료모델과 철근모델의 조합이 충돌해석에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 이를 위해 사용된 콘크리트의 재료모델은 Plastic Kinematic(PK)모델과 Johnson-Helmquist Concrete(JHC)모델이며, 내부 철근의 재료모델은 선형탄성(LE)모델과 Plastic Kinematic모델이다. 또한 우진호 등(2009)은 충돌 높이를 고정하였으나 본 연구에서는 충돌 높이를 변화시켜 재료모델과 충돌응답의 민감성을 분석하였다.

2. 유한요소 모델링

모델링에 사용된 유한요소해석 프로그램은 ANSYS v.11(2008)이다. 이는 비선형 동역학 문제의 해석이 가능한 프로그램으로 재료간의 접촉, 충돌, 폭발처럼 일반 유한요소해석 프로그램으로는 처리하기 어려운 비선형성 역학 문제의 해결에 사용된다.

2.1 앵커 모델링

일반적으로 선박의 계류를 목적으로 사용되는 앵커는 사용 목적과 해당선박의 크기에 따라 다양한 형태와 종류가 사용되고 있다. 그 중 스톡앵커(stock anchor)의 경우 하부면적이 작아서 충돌 시 파괴력이 크고 선박에서 주로 사용되기 때문에 충돌체로 고려되었다. 해저 케이블이 설치된 제주-해남 간 해역의 경우 항행선박의 크기가 제한되고 있으며, 항행하는 선박에서 주로 사용되는 앵커의 무게는 2ton이며, 모델링에서도 동일하게 적용되었다.

앵커의 형상은 한국산업규격(KS)의 V3311(2006)의 스톡앵커를 기준으로 한다. 한국산업규격의 앵커 형상은 그림 1과 같다. 유한요소 시뮬레이션 상에서 앵커의 경우 4개의

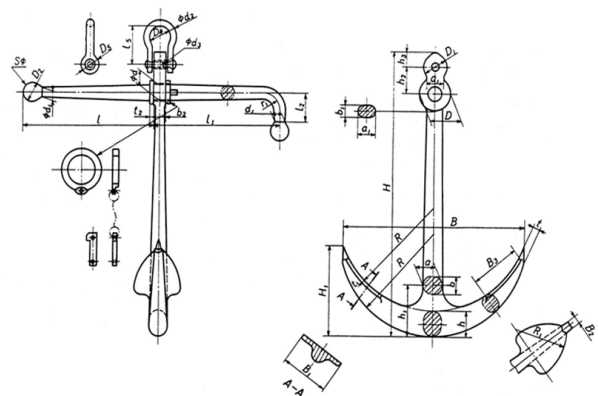


그림 1 한국산업규격(KS)의 V3311에 제시된 앵커의 형상

표 1 구조용 강재의 물성치

밀도(kg/m ³)	탄성계수(GPa)	프아송 비
7850	210	0.292

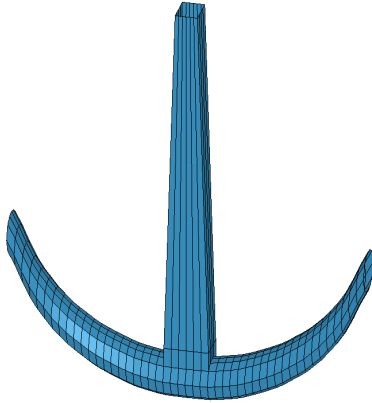


그림 2 스톡앵커 모델링

노드를 가지는 셸(shell) 요소로 모델링되었다. 일반적인 구조용 강재의 물성치를 고려하여 모델링되었으며, 강체로 가정하였다. 이는 충돌 시 피충돌체인 콘크리트의 손상에 비해 앵커의 손상은 미비하기 때문이다. 사용된 물성치는 표 1에 나타내었다. 그리고 그림 2는 앵커의 시뮬레이션 상에 사용된 3차원모델을 나타낸다.

수중에서의 항력을 고려하여 앵커의 종단속도를 계산하고 스톡앵커의 대기 중 낙하높이를 5m로 결정하여 충돌시뮬레이션을 수행하였다. 또한 충돌거리에 따른 응답을 비교하기 위해 3m와 8.83m를 추가적으로 선정하였는데, 여기서 8.83m는 우진호 등(2010)의 연구에서 산정된 스톡리스 앵커(stockless anchor)의 낙하거리이다. 실제 시뮬레이션 상에서 위에서 가정한 실제 낙하높이를 고려하는 경우 해석시간이 과도해진다. 따라서 유한요소 모델링 상에서 아치형 해저 케이블 보호구조물의 최상단으로부터 5cm 떨어진 높이에서 앵커가 낙하하도록 모델링하고 에너지 보존 법칙에 입각하여 계산된 앵커의 낙하속도를 앵커의 초기속도로 입력하여 충돌해석을 수행하였다. 낙하높이별 앵커의 초기속도는 표 2와 같다.

표 2 앵커의 낙하거리와 초기속도

	낙하거리(m)	초기 속도(mm/sec)
Case 1	3.00	7604
Case 2	5.00	9850
Case 3	8.83	13118

2.2 아치형 보호구조물 모델링

본 연구에서는 피 충돌체로 고려된 아치형 보호구조물은 특히 등록된 해저 케이블 보호용 덕트(한국해양기술, 2007)를 기준하여 그림 3과 같이 모델링되었으며 본 연구에서는 아치형 보호구조물이라 명명하였다. 8개의 노드를 가지는 솔리드 요소로 모델링을 수행하였다. 아치형 보호구조물의 치수는 그림 3에 나타내었다. 아치형 보호구조물의 경우 기존의 콘크리트 매트와 달리 해저 케이블과 이격되어 있어 외부의 앵커 충돌에 의해 발생하는 해저 케이블의 직접적인 손상을 방지하는 구조이다. 따라서 본 연구에서는 해저 케이블의 손상을 고려하지 않고 앵커 충돌에 의해 아치형 보호구조물의 응답만을 알아보았다.

콘크리트 재료모델은 Plastic Kinematic(PK)모델과 Johnson-Holmquist Concrete(JHC)모델을 고려하였다. 아치형 보호구조물에 사용된 콘크리트 압축강도(f_{ck})는 35MPa이다. 경계조건으로 아치형 보호구조물의 하부 면에 수직방향의 변위를 구속하였다.

내부 철근의 경우 아치형 보호구조물 내부에 상하150mm의

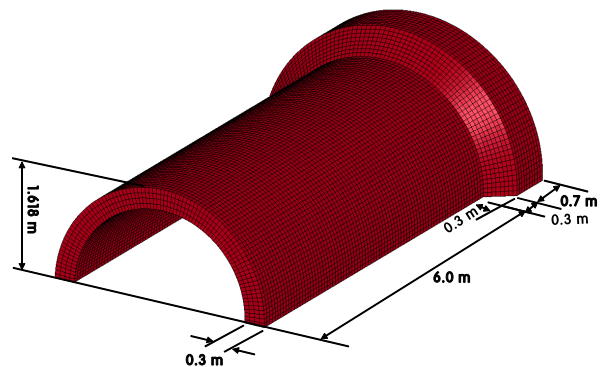


그림 3 아치형 보호구조물의 치수와 모델링 형상

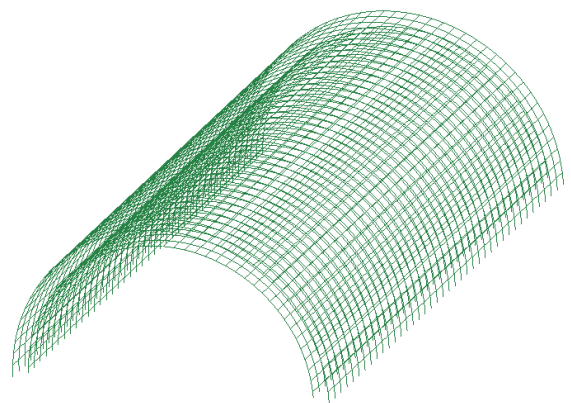


그림 4 내부 철근의 배치 형상

간격으로 두 개의 철근망이 배근되어 있는 것으로 가정하였다. 대상 철근은 직경이 20mm인 H20을 고려하였으며 철근의 재료모델은 선형탄성(LE)모델과 Plastic Kinematic(PK)모델을 고려하였다. 철근은 2개의 노드를 가지는 보요소로 모델링되었으며 콘크리트를 구성하는 요소와 노드를 공유하도록 모델링되었다. 상하부 철근망의 배근 간격은 150mm이고 모델링을 용이하게 하기 위해서 보호공의 돌출부를 제외하고 모델링하였다. 그림 4는 철근의 배치 형상을 나타낸다.

3. 재료모델

3.1 선형탄성 모델

내부 철근의 모델링에 사용된 재료모델 중의 하나인 선형탄성 모델은 일반적으로 금속 재료의 모델링에 사용되는 재료모델이다. 선형탄성 모델의 철근은 구조용강재로서 표 1에 물성치를 나타내었다.

3.2 Plastic Kinematic(PK)모델

PK모델은 비선형 비탄성 재료모델의 하나로서 등방성과 변형경화 모델의 조합에서 사용되는 재료모델이다. 재료모델에 요구되는 물성치의 수가 많지 않으면서 비선형 비탄성 재료모델을 묘사하기 때문에 다양한 재료의 모델링에 주로 사용된다. 본 연구에서는 철근과 콘크리트의 재료모델에 각각 사용하였다.

PK모델은 Cowper-Symonds모델을 기반으로 변형률 속도 종속 인자와 항복응력의 관계를 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (1)$$

여기서, σ_0 는 초기 항복강도, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도, C 와 P 는 Cowper-Symonds의 변형률 속도 매개변수, ϵ_p^{eff} 는 유효 소성 변형률이고 β 는 경화 인자, E_p 는 소성 경화 인수로 다음의 탄성계수 E 와 tangent 탄성계수 E_{tan} 의 식으로 나타낸다.

$$E_p = \frac{E_{tan} \times E}{E - E_{tan}} \quad (2)$$

그림 5는 PK모델의 응력 변형률 관계를 나타낸 그림이다. PK모델에 사용된 철근과 콘크리트의 물성치는 표 3에 나타

표 3 PK모델에 사용된 재료별 물성치

	콘크리트	철근
밀도(kg/m ³)	2400	7850
탄성계수(GPa)	22.5	210
포아송 비	0.17	0.292
항복강도(MPa)	35.0	316
tangent 탄성계수(MPa)	20.0	763

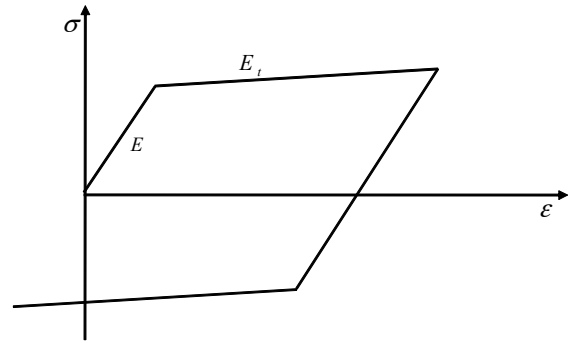


그림 5 PK모델의 응력 변형률 그래프

내었다. 일반적으로 tangent 탄성계수의 계측은 용이치 않으므로 본 연구에서는 ANSYS v.11(2008)에서 제시된 1018 steel의 tangent 탄성계수를 사용하였다.

3.3 Johnson-Holmquist Concrete(JHC)모델

JHC모델은 큰 변형률과 큰 변형률 속도가 고려되는 충돌 해석에 주로 사용되는 콘크리트 재료모델이다. JHC모델에서 등가응력 σ^* 은 정규 압력 P^* , 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 와 손상 매개변수 D 의 식으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*M}] \times [1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (3)$$

$$P^* = P/f_c' \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0 \quad (5)$$

여기서, A, B, C, N 은 재료상수, $\dot{\epsilon}^*$ 는 무차원변형률 속도, f_c' 는 준정적 단축 압축강도(quasi-static uniaxial compressive strength)이다. 그림 6은 등가응력과 등가압력의 관계를 나타낸다.

손상 매개변수 D 는 그림 7과 다음 식으로 정의된다.

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1 (P^* + T^*)^{D_2}} \quad (6)$$

여기서, $\Delta \epsilon_p$ 와 $\Delta \mu_p$ 는 등가 소성 변형률과 소성 체적 변형

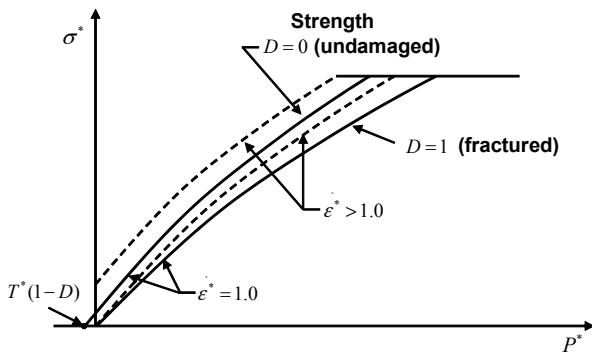


그림 6 JHC모델의 등가 응력과 등가압력의 그래프

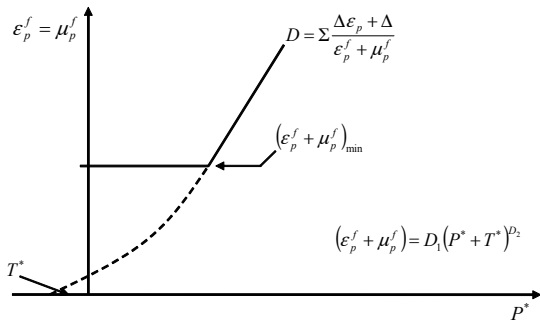


그림 7 JHC모델의 누적 손상 파괴 그래프

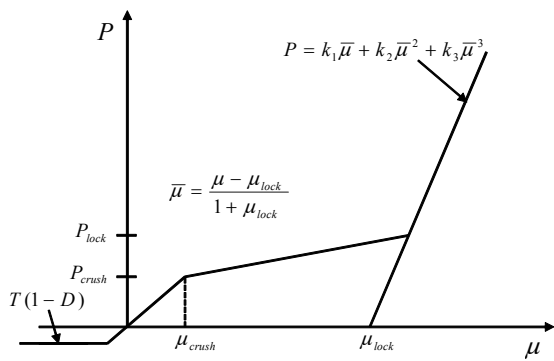


그림 8 JHC모델의 압력-체적 관계

표 4 JHC모델에 사용된 콘크리트의 물성치

밀도(kg/m ³)	2400	A(MPa)	0.75
전단탄성계수(GPa)	8.34	B(MPa)	1.65
프아송비	0.17	N(MPa)	0.76
P _{crush} (MPa)	13.6	C(MPa)	0.007
P _{lock} (MPa)	1050	K ₁ (GPa)	17.4
μ _{crush}	0.0058	K ₂ (GPa)	38.8
μ _{lock}	0.1	K ₃ (GPa)	29.8

를 나타내고, D₁와 D₂는 재료상수이며, T*는 정규 최대 인장 정수압을 나타낸다.

정수압과 체적의 관계는 그림 8과 같다. 콘크리트가 압축에 의해 변형하는 경우 체적변형률의 크기에 따라 다음의 3

가지 조건식에 따라 상태가 결정된다(Wang 등, 2006).

첫 번째로 체적변형률이 $0 \leq \mu \leq \mu_{crush}$ 인 경우 탄성 영역에 속한다. μ_{crush} 는 crushing 체적 변형률이다. 두 번째로 $\mu_{crush} \leq \mu \leq \mu_{lock}$ 인 경우 손상이 발생한다. 여기서, μ_{lock} 는 locking 체적 변형률이다. 세 번째 $\mu > \mu_{lock}$ 인 경우 압축(compact) 단계로 압력 P와 수정 체적 변형률은 다음의 관계식으로 정의된다.

$$P = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3 \quad (7)$$

$$\bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}} \quad (8)$$

여기서, K₁, K₂와 K₃은 재료 상수이다. JHC모델에 사용된 콘크리트의 물성치는 표 4와 같다.

4. 결 과

본 연구에서는 앵커의 충돌 낙하거리, 콘크리트와 내부 철근의 재료모델을 변화시켜 앵커 충돌해석을 수행하였다. 따라서 앵커 충돌에 의해 아치형 보호구조물에 발생하는 동적 응답을 콘크리트와 철근의 재료모델 그리고 앵커의 낙하속도 별로 비교하였다.

표 5, 6, 7과 8은 각 재료모델 별 아치형 보호구조물의 응답을 나타내고 있다. 즉, 아치형 보호구조물에 발생하는 최대 von-Mises 응력, 충돌부의 최대 압축응력과 최대 Y-방향 변위, 내부 철근에 발생하는 최대 인장응력을 각각 나타내었다. 여기서 콘크리트와 철근의 재료모델을 조합하여 PK-LE와 같은 형식으로 나타내었는데, 전자는 콘크리트의 재료모델을 후자는 철근의 재료모델을 나타낸다. 또한 Case 1, 2, 3은 표 2에 나타낸 앵커의 낙하속도를 각각 의미한다.

표 5 콘크리트의 최대 von-Mises응력(MPa)

재료모델	Case 1	Case 2	Case 3
PK-LE	31.76	32.36	32.47
PK-PK	31.76	32.46	32.62
JHC-LE	99.50	122.80	152.40
JHC-PK	97.63	118.50	147.00

표 6 앵커 충돌부의 최대 압축응력(MPa)

재료모델	Case 1	Case 2	Case 3
PK-LE	-115.20	-116.80	-117.30
PK-PK	-115.10	-116.40	-117.20
JHC-LE	-149.90	-182.80	-225.50
JHC-PK	-147.30	-177.70	-218.70

표 7 앵커 충돌부의 Y-방향 변위(mm)

재료모델	Case 1	Case 2	Case 3
PK-LE	-22.10	-29.50	-43.83
PK-PK	-22.10	-29.62	-44.29
JHC-LE	-17.59	-22.75	-30.12
JHC-PK	-17.76	-23.04	-30.66

표 8 내부 철근의 최대 인장응력(MPa)

	Case 1	Case 2	Case 3
PK-LE	385.89	564.11	1037.40
PK-PK	285.82	290.12	303.69
JHC-LE	538.60	730.99	1012.60
JHC-PK	287.04	288.50	290.49

4.1 콘크리트 재료모델의 변화

표 5~8의 결과를 그림으로 나타내었다. 그림 9는 낙하속도와 모델조합 변화에 따른 콘크리트에 발생한 최대 von-Mises 응력을 나타낸다. 충돌거리가 증가함에 따라 콘크리트를 PK로 모델링한 경우 최대 von-Mises 응력 변화가 미소하나, JHC로 모델링한 경우 최대 von-Mises 응력이 민감하게 증가함을 알 수 있다. 또한, PK모델보다 JHC모델에서 최대 von-Mises 응력이 크게 발생한다. 이와 같은 양상은 콘크리트 충돌부에 발생한 최대 압축응력(그림 10)에도 나타난다. 즉, 콘크리트를 JHC로 모델링한 경우, 충돌거리가 증가함에 따라 충돌부의 최대 압축응력이 민감하게 증가하고 응답도 크음을 알 수 있다. 반면에 충돌부의 Y-방향 변위(그림 11)는 PK모델과 JHC모델이 동일하게 낙하거리 변화에 민감하게 응답함을 알 수 있고 PK모델의 변위응답이 JHC모델보다 크음을 알 수 있다.

여기서 주목할 것은 콘크리트모델의 변화가 콘크리트 응답의 변화에 지대한 영향을 미치는 반면에 철근모델의 변화는 콘크리트 응답의 변화에 주목할 만한 영향을 미치지 못한다는 것이다. 예를 들면, 그림 9에서 나타낸 최대 von-Mises 응력의 경우 PK-LE는 PK-PK와 유사한 거동을 나타내고 JHC-LE는 JHC-PK와 유사한 거동을 나타낸다. 이와 같은 양상은 충돌부의 최대 압축응력과 Y-방향 변위에도 동일하게 찾아 볼 수 있다.

앞서 나타낸 각 응답의 변화 폭을 보다 면밀히 관찰하기 위해 각 응답을 각 응답의 최소응답으로 무차원하여 그림 12에 나타내었다. 그림 12에서 처음 네 개의 막대군은 콘크리트의 최대 von-Mises 응력을 다음 네 개의 막대군은 충돌부에서의 최대 압축응력을 그리고 마지막 네 개의 막대군은 충돌부의 최대 Y-방향변위를 나타낸다. 그림 12로부터 최대 von-Mises응력은 충돌거리가 증가함에 따라 최대 1.5배가

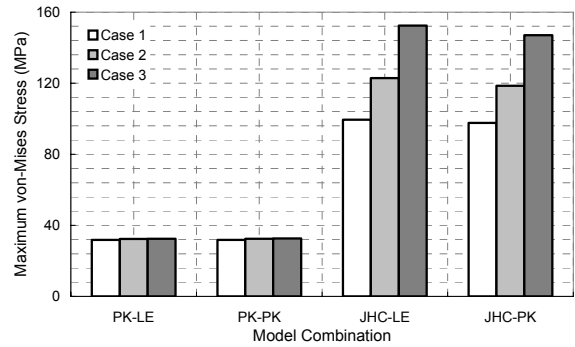


그림 9 낙하속도별 모델조합별 최대 von-Mises응력

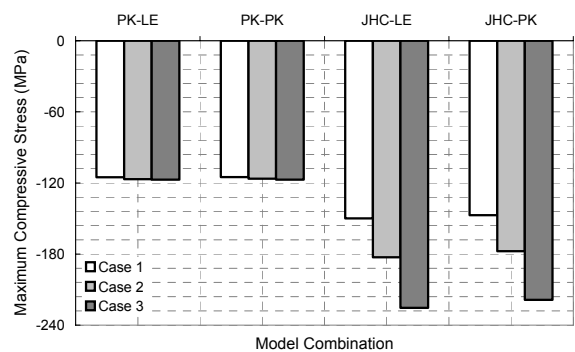


그림 10 낙하속도별 모델조합별 최대압축응력

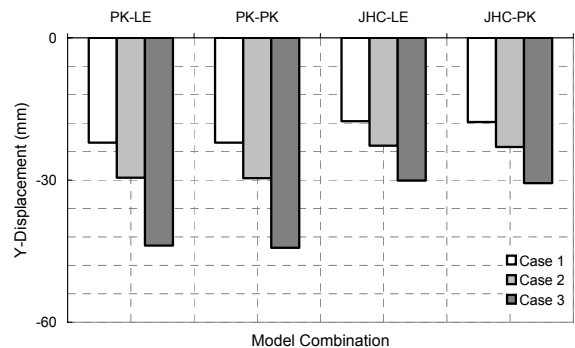


그림 11 낙하속도별 모델조합별 최대 수직변위

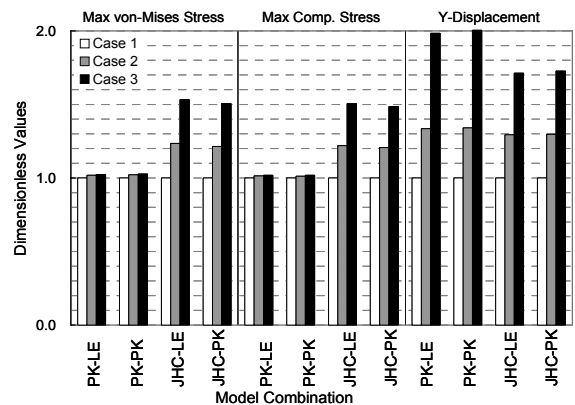


그림 12 각 응답의 무차원 값

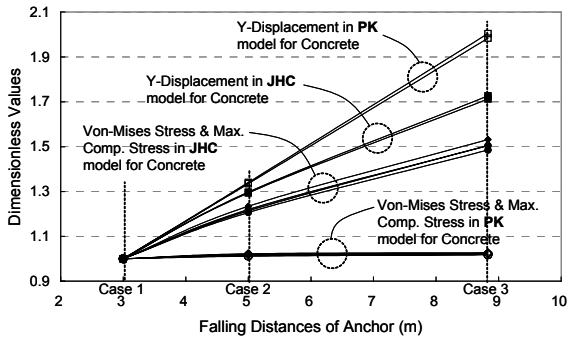


그림 13 충돌거리에 따른 응답변화의 무차원 값

지 증가함을 알 수 있다. 최대 압축응력도 최대 1.5배까지 증가하며 Y-방향 변위는 2.0배까지 증가함을 알 수 있다.

이들 변화의 선형성을 알아보기 위해 그림 13에 충돌거리에 따른 응답변화를 그림 12와 같이 무차원화 하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 충돌거리와 충돌응답의 관계는 사용된 모델에 따라 다소 차이가 있지만 비교적 선형에 가깝다.

4.2 내부 철근 재료모델의 변화

앞서 설명한대로 콘크리트의 최대 von-Mises응력, 충돌부의 최대 변위와 최대 압축응력은 콘크리트의 재료모델의 변화에 민감하고 내부 철근의 재료모델의 변화에 민감하지 않다.

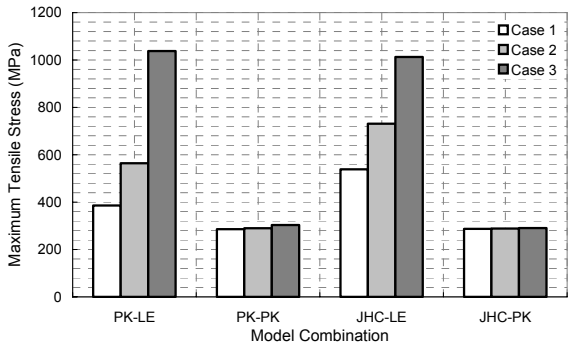


그림 14 낙하속도별 모델조합별 최대 인장응력

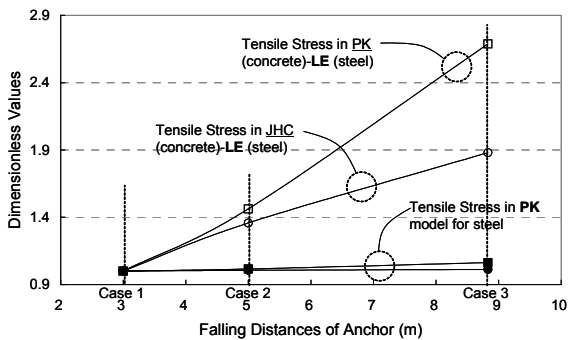


그림 15 충돌거리에 따른 철근의 최대 인장응력의 무차원 값

그러나 그림 14로부터 내부철근에 발생한 최대 인장력은 철근 모델에 민감함을 알 수 있다. 즉, 충돌거리가 증가함에 따라 철근을 LE로 모델링한 경우 최대 인장력이 증가하는 반면 PK로 모델링한 경우 최대 인장력 변화가 미소하다. 여기서 주목할 것은 철근을 LE모델로 모델링한 경우 콘크리트모델에 따라 철근의 최대 인장력이 다소 변화한다는 것이다.

이를 보다 면밀하게 살펴보기 위해 그림 15에 충돌거리에 따른 응답변화를 그림 13과 같은 방법으로 무차원화하여 나타내었다. 충돌거리가 증가함에 따라 철근의 최대 인장응력은 1.9배(JHC-LE 조합)에서 2.7배(PK-LE 조합)까지 증가함을 알 수 있다. 또한 충돌거리와 최대 인장응력의 관계는 모델에 따라 다소 차이가 있지만 비교적 선형에 가깝다.

5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트와 내부철근의 재료모델 변화에 따른 아치형 해저 케이블 보호구조물의 충격 특성을 유한요소 시뮬레이션을 이용하여 분석하였다. 콘크리트는 모델링에는 Plastic Kinematic모델과 Johnson-Helmquist Concrete 모델이, 내부철근 모델링에는 선형탄성 모델과 Plastic Kinematic모델이 사용되었다. 또한 충돌체인 앵커의 충돌거리를 변화하여 이들 모델과 구조물의 동적응답의 민감성을 분석하였다. 구조 동적응답은 아치형 보호구조물에 발생하는 최대 von-Mises응력, 콘크리트 충돌부의 최대 압축응력과 최대 변위, 내부 철근에 발생하는 최대 인장응력으로 선정하였다. 이상의 해석으로 얻어진 결론은 다음과 같다.

콘크리트에 발생한 충돌응답(von-Mises 응력, 충돌부의 최대 압축응력 및 최대 수직변위)은 콘크리트 재료모델의 변화에 민감하게 응답한다. 즉 충돌거리가 증가함에 따라 콘크리트를 JHC로 모델링한 경우 콘크리트의 충돌응답이 증가하지만, PK로 모델링한 경우에는 최대 수직변위만 충돌거리 변화에 민감하다. 반면에 콘크리트의 충돌응답은 철근 재료 모델의 변화에 민감하게 응답하지 않는다.

내부 철근에 발생한 충돌응답(최대 인장응력)은 철근의 재료모델에 일차적으로 민감하게 반응한다. 즉 충돌거리가 증가함에 따라 철근을 LE로 모델링한 경우 철근의 최대 인장력은 증가하지만 PK로 모델링한 경우에는 변화가 미소하다. 여기서 주목할 것은 철근을 LE로 모델링한 경우 콘크리트의 모델에 따라 철근의 최대 인장력이 다소 변화한다는 것이다. 다시 말하면 철근을 선형탄성체로 가정했을 경우 철근의 충돌응답은 콘크리트모델에 이차적으로 민감하게 반응한다.

이와 같은 양상은 앵커가 콘크리트에 직접 충돌하기 때문에 발생한다. 즉, 아치형 해저 케이블 보호구조물의 충돌해석

에서는 앵커의 충돌 에너지를 직접적으로 받는 피충돌체인 콘크리트의 재료모델의 선택이 매우 중요하며, 충돌 에너지를 콘크리트로부터 전달받는 내부 철근의 해석에는 일차적으로는 대상체인 철근의 재료모델이 이차적으로 충격을 철근에 전달하는 콘크리트의 재료모델이 중요한 인자임을 알 수 있다.

또한 무차원 해석으로부터 앵커의 낙하거리 변화에 따른 콘크리트 응답은 사용된 모델에 따라 미소한 차이가 있지만 비교적 선형에 가까운 것을 알 수 있다. 낙하거리 변화에 따른 철근의 응답도 사용된 모델에 따라 미소한 차이가 있지만 비교적 선형의 양상을 나타낸다.

본 연구에서 고려한 콘크리트와 철근 재료모델의 적용성은 차후 보다 면밀한 고찰에 의해 검증될 필요가 있다. 특히, 충돌거리 변화에 따른 충돌응답 특성이 콘크리트의 재료모델에 따라 급격하게 달라짐으로 향후 실증 충돌시험을 통한 콘크리트 재료모델의 검증 및 제안이 요구된다.

참 고 문 헌

귀이홍, 한상목 (2010) 경계형 모델을 사용한 초고강도 섬유보강 콘크리트거더의 파괴역학적 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 23(1), pp.81~94.

김홍택, 이명재, 박지웅, 윤순중, 한연진 (2010) 경계형 모델을 사용한 초고강도 섬유보강 콘크리트거더의 파괴역학적 해석, 한국지반환경공학회 논문집, 12(8), pp.59~67.

안승환, 김동선, 박경원 (2007) 해양환경특성에 따른 해저케이블 설치 및 보호방안, 해양환경안전학회 춘계학술발표대회, pp.51~56.

우진호, 나원배, 김헌태 (2009) 아치형 해저 케이블 보호 구조물의 앵커 충돌 수치 시뮬레이션, 한국해양공학회지, 23(1), pp. 96~103.

우진호, 나원배 (2010) 앵커 충돌 및 끌림에 의한 원통연결 보호구조물의 최대 응답 해석, 한국해양공학회지, 24(5), pp.81~87.

한국해양기술 (2007) 해저케이블 보호용 덕트, 대한민국 특허청 등록번호 10-0773953-0000.

ANSYS v.11 (2008) ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA.

Berg, V.S., Preece, D.S. (2004) Shaped Charge Induced Concrete Damage Predictions using RHT Constitutive Modeling, *International Society of Explosives Engineers*, 2(in CD).

Gran, J.K., Frew, D.J. (1997) In-target Radial Stress Measurements for Penetration Experiments into Concrete by Ogive-nise Steel Projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, 19(8), pp.715~726.

KS V3311 (2006) 앵커, 한국표준협회.

Tham, C.Y. (2005) Reinforced Concrete Perforation and Penetration Simulation using AUTODYN-3D, *Finite Elements in Analysis and Design*, 41, pp.1401~1410.

Wang, Z., Wang, J.G., Li, Y., Leung, C.F. (2006) Attenuation Effect of Artificial Cavity on Air-blast Waves in an Intelligent Defense Layer, *Computers and Geotechnics*, 33, pp.132~141.

Zhou, X.Q., Kuznetsov, V.A., Hao, H., Waschl, J. (2008) Numerical Prediction of Concrete Slab Response to Blast Loading, *International Journal of Impact Engineering*, 35, pp.1186~1200.

- 논문접수일 2011년 10월 25일
- 논문심사일
 - 1차 2011년 11월 8일
 - 2차 2011년 11월 21일
- 게재확정일 2011년 11월 28일