

재료모델에 따른 유연 콘크리트 매트리스의 충돌 거동 평가

류연선* · 조현만* · 김서현*

*부경대학교 해양공학과

Collision Behavior Evaluation of Flexible Concrete Mattress Depending on Material Models

Yeon-Sun Ryu*, Hyun-Man Cho* and Seo-Hyun Kim*

*Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Collision simulation 충돌 시뮬레이션, Submarine cable protector 해저케이블 보호공, Flexible concrete mattress 유연 콘크리트 매트리스, Material model 재료모델, Drucker-Prager model Drucker-Prager 모델, RHT concrete model RHT 콘크리트 모델

ABSTRACT: The purpose of this study was to provide fundamental data for an anchor collision simulation of an FCM (flexible concrete mattress). Numerical material models (elastic-perfectly plastic model, Drucker-Prager model, and RHT concrete model) were compared. ANSYS Explicit Dynamics was used for collision analyses. An FE model was used for the anchor, FCM, and reinforcement bars. The results showed that the behavior of the FCM was very different than those of the material models. In particular, the effect of the pressure dependent strength was most noticeable among the properties of concrete.

1. 서 론

해저케이블은 전원 및 통신설비 등의 연결을 위해 다수가 설치되어 있고, 향후에도 많은 시공이 예상된다. 하지만 이는 앵커 등과 같은 조업도구의 낙하 및 끌림으로 인한 손상위험에 처해있으며, 실제 사고사례도 보고되고 있다. 따라서 해저케이블의 손상방지를 위해 다양한 보호공이 시공되고 있는데, 대표적인 방법으로는 주철관(Cast iron pipe) 공법, 콘크리트 커버(U-duct) 공법, 스톤 백(Stone bag) 공법, 콘크리트 매트리스(Concrete mattress) 공법, 유연 콘크리트 매트리스(Flexible concrete mattress, FCM) 공법 등이 있다(Ahn and Kim, 2009). 이 중 FCM 공법(Fig. 1)은 해저케이블의 위해요소에 대한 손상위험이 상대적으로 적고, 타 공법에 비해 경제성 및 시공성이 확보된 가장 진보된 형태의 해저케이블 보호공법으로 평가된다.

해저케이블 보호공의 케이블 보호성능 평가를 위해 일반적으로 현장 실증시험이 수행된다. 본 연구에서 고려한 FCM 또한 2006년에 한국전력공사에서 주관한 공인 실증시험을 수행하였고, 앵커의 수직 충돌시험 및 끌림 시험, 로켓포 시험에서 그 성능을 입증하였다(New Technology of Electric Power, 2007). 위

의 시험 종목 가운데, 앵커의 수직낙하가 해저케이블의 안정성에 가장 치명적일 것으로 사료되며, 해저케이블 보호공 설계 시 주된 외력조건으로 고려되어야 한다고 본다. 하지만 이러한 현장 실증시험의 경우 많은 시간 및 비용이 소요될 뿐 아니라, 앵커의 충돌각도 등과 같은 다양한 하중조건에 대한 고려가 용이하지 않다. 따라서 해저케이블 보호공의 성능평가를 위한 수치 시뮬레이션이 불가피하며, 이미 몇몇 종류의 보호공에 대한 앵커 충돌 시뮬레이션이 수행된 바 있으나(Kim, 2013; Ahn et al., 2012; Woo, 2009; Woo and Na, 2010; Woo and Na, 2011; Cho et al., 2012), 관련된 연구가 아직 미흡한 실정이다.

일반적으로 콘크리트의 충돌해석은 콘크리트 방호벽에 대한 탄두와 같은 고속 발사체의 관통성능을 평가하기 위해 주로 수행되었으며(Clegg et al., 2002; Rempling, 2004; Tham, 2005), 개발된 콘크리트의 고급 재료모델 또한 이와 관련한 것이다(Riedel et al., 1999; Riedel et al., 2009). 하지만 탄두와 같은 고속 충돌체에 비해 자유 낙하하는 앵커는 상대적으로 저속이며, 주된 관심의 대상이 충돌체의 성능이 아닌 피충돌체의 안정성에 있다. 따라서 해저케이블 보호공의 앵커 충돌 시뮬레이션을 위해서는 앵커와 같은 저속의 충돌체에 대한 콘크리트 구조물

Received 25 June 2014, revised 16 February 2015, accepted 16 February 2015

Corresponding author Hyun-Man Cho: +82-51-629-7382, oldsea@nate.com

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers



(a) Rope integrated FCM in Singapore



(b) S-FCM (Steel forced-FCM)



(c) AS-FCM (Anchor resistant Steel forced-FCM)

Fig. 1 A Variety of FCMs

의 거동을 해석하기 위한 연구가 필요하다.

본 논문의 목적은 재료모델에 따른 FCM 보호공의 앵커 충돌 시뮬레이션을 통해, 현장 실증시험을 대체할 수 있는 수치 시뮬레이션에 대한 기초자료를 제공하는 것이다. 해석을 위해 사용한 프로그램은 ANSYS Explicit Dynamics로, 이는 충돌과 같은 순간적으로 발생하는 동적거동에 대한 비선형 해석에 적합하다. 피충돌체인 케이블 보호공은 철근 콘크리트 구조물이며, 충돌체는 선박용 앵커 가운데 스톡 앵커로 고려한다. 본 연구에서 고려한 재료모델은 탄성-완전소성모델, Drucker-Prager 모델, RHT (Riedel-Hiermaier-Thomas) 콘크리트 모델이다. 앵커의 낙하높이에 대한 영향을 알아보기 위해 6m와 9m의 두 가지 낙하높이를 고려한다.

2. 시뮬레이션 모델링

2.1 앵커 모델링

해저케이블 및 해저케이블 보호공의 주된 위해요소 중 하나인 앵커를 유한요소모델로 구성하였다. 본 연구에서는 FCM 보호공의 앵커 충돌에 대한 가장 치명적인 상황을 묘사하기 위하여 한국표준협회(KSA)에서 규정하는 선박용 앵커 가운데 스톡 앵커(2.16ton)를 충돌체로 고려하였다. 스톡 앵커는 절점당 3개

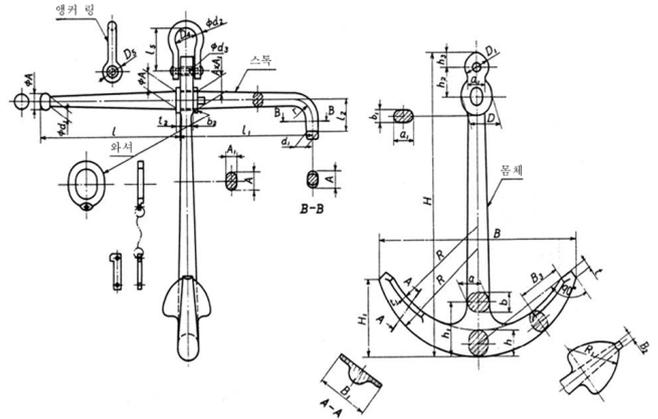


Fig. 2 Shape of a stock anchor (KSSN, 2012)

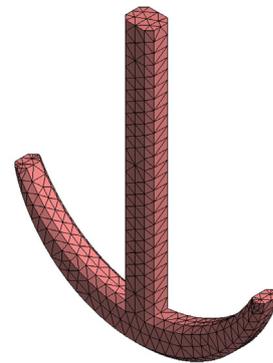


Fig. 3 FE model of the stock anchor

의 자유도를 가진 4절점 사면체 요소로 모델링하였고, 피충돌체인 FCM 보호공에 비해 앵커의 손상은 미비하므로 강체로 취급하여 앵커의 파손이나 변형은 고려하지 않았다. 스톡 앵커의 형상 및 유한요소모델을 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 도시하였다.

본 연구에서 고려한 앵커의 낙하높이는 현장 실증시험에서 사용한 낙하높이와 동일한 6m, 9m의 두 가지 케이스이다. Woo and Na(2010)가 수행한 앵커충돌 시뮬레이션에서는 2ton 스톡 앵커의 종단속도로부터 구한 지상에서의 낙하높이가 4.32m로 산정된 바 있다. 따라서 낙하높이 6m와 여러 불확실성을 고려하여 안전율 1.5를 적용한 낙하높이 9m는 비교적 합리적인 값이라고 사료된다. 하지만 실제 낙하높이를 시뮬레이션에서 그대로 구현하는 경우 계산시간이 과도해지므로 여기서는 앵커가 FCM 보호공의 최상단으로부터 50mm 떨어진 위치에서 에너지 보존법칙으로부터 산정된 초기속도를 가지고 낙하하도록 모델링하였다. 앵커의 운동에너지와 위치에너지의 총량이 보존된다는 조건에서 운동에너지항의 낙하초기속도를 산정하였고, 낙하높이별 앵커의 초기속도를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Initial velocities with respect to the falling distance

Falling distance [m]	Initial velocity [m/s]
6.00	10.144
9.00	12.716

2.2 FCM 모델링

본 시뮬레이션에서 피충돌체로 고려한 케이블 보호공은 AS-FCM을 기초로 모델링하였다(New Technology of Electric Power, 2007). AS-FCM은 가운데에 위치한 중앙블록과 그 좌우의 날개블록으로 구성되며, 중앙블록 하부의 홈에 해저케이블이 위치하도록 배치한다(Fig. 4). 여기서 날개블록은 단지 앵커 등의 끌림에 대한 유연성을 갖기 위한 부재이며, 앵커 또는 로켓포의 낙하에 의한 충격력은 케이블 상단에 위치한 중앙블록에서 대응하므로, 시뮬레이션 시에는 중앙블록만을 모델링하였다. 중앙블록은 재령 28일에 70MPa 이상의 압축강도를 발현하며, 본 연구에서는 압축강도의 80%인 56MPa를 항복강도로 간주하였다. 절점당 3개의 자유도를 가지는 8절점 육면체 요소로 모델링하였고, 모서리 등과 같은 육면체 요소로 구성하기가 곤란한 부분에 한해서는 부둑이 4절점 사면체 요소를 사용하였다. FCM 보호공의 유한요소모델을 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 중앙블록의 치수는 1000×1005×700mm이며, 케이블 부근의 저면부에 발생한 손상이 주된 관심의 대상이 되는 해저케이블 보호공의 특성상, 중앙블록을 임의로 상, 하부로 구분하였다. 앵커의 충돌은 블록이 지면과 접하는 곳까지 그 영향이 없거나 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서 블록하단의 지지면은 모든 자유도를 구속하여 경계조건을 설정하였다. 철근은 보 요소를 사용하여 모델링하였으며, 콘크리트와 완전히 부착된 것으로 가정하여 모델링 시에 콘크리트와 철근의 절점을 공유하여 유한요소망을 구성하였다. 철근의 직경은 모두 16mm로 가정하였다. 철근은 매입깊이가 충분히 깊고 앵커로 인한 충돌부의 변형이 철근까지 미치지 않으므로 탄성체로 가정하여 일반구조용 강재의 물성치를 적용하였다. 철근의 배치형상은 Fig. 6과 같다.

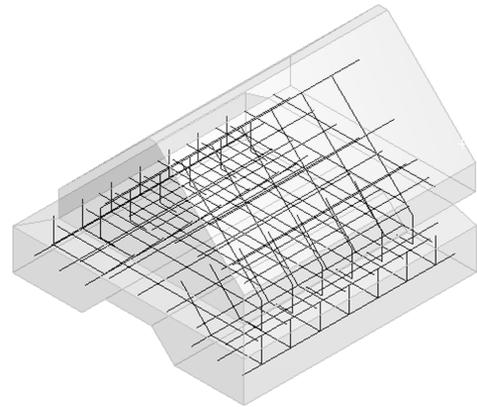


Fig. 6 Arrangement of reinforcement bars

3. 콘크리트 재료모델

3.1 탄성-완전소성 모델

탄성-완전소성(E-PP) 모델은 다양한 소성모델 가운데 가장 단순한 형태의 모델이다. 본 모델의 응력-변형률 선도는 항복강도까지 일정한 기울기를 가진 직선과, 이 이후의 평행한 선으로 이루어진다. 콘크리트는 파괴 시까지 변형을 거의 유발시키지 않는 취성재료이다. 따라서 항복응력 이후의 변형을 경하는 없다고 보는 E-PP모델이 정적하중을 받는 콘크리트의 거동 묘사에 주로 사용되고 있다. 항복응력은 압력에 관계없이 항상 일정하며, 콘크리트 특유의 성질을 묘사하고 있는 나머지 두 재료모델과의 비교를 위해 본 연구에서 고려하였다. E-PP 모델의 물성치를 Table 2에 나타내었다.

3.2 Drucker-Prager 모델

콘크리트의 거동을 해석하기 위해 다양한 종류의 재료모델이 제안되고 있다. 그 중 Drucker-Prager(D-P) 모델은 요구하는 매개변수가 비교적 적고, 압력의 증가에 따라 재료의 전단강도도 증가하는 현상을 묘사할 수 있기 때문에 널리 사용된다(ANSYS, 2010; Yu et al., 2010).

D-P 모델에서는 항복응력이 압력의 함수이다. D-P 항복규준과 압력변동에 무관한 재료모델(예를들면, von-Mises의 항복규준)과의 차이는 $I_1 - \sqrt{J_2}$ 평면에서 확연하게 들어난다(Fig. 7). 여기서, I_1 과 J_2 는 각각 1차 응력불변량, 2차 편차응력불변량이다. 본 모델의 항복면(Yield surface)은 다음과 같은 식으로 나타낸다.

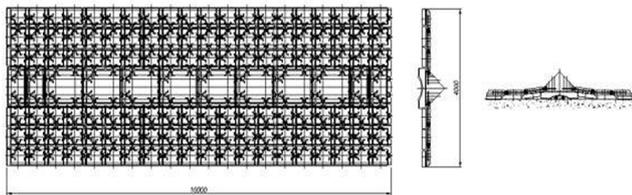


Fig. 4 Overall shape of the AS-FCM (1 set)

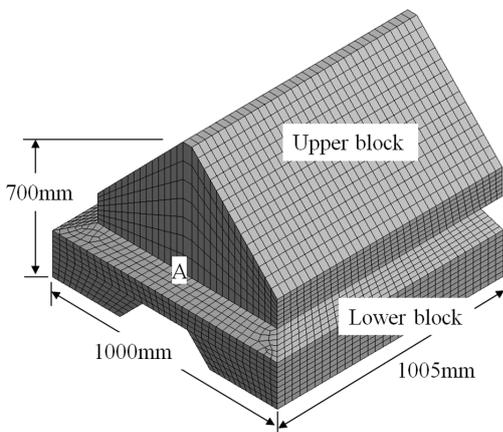


Fig. 5 Finite element model of the FCM

Table 2 Material properties of E-PP model

Parameter	Value
Density [kg/m ³]	2,300
Young's modulus [GPa]	34
Poisson's ratio	0.18
Yield strength [MPa]	56
Maximum tensile pressure [MPa]	-5.6
Erosion strain	1.5

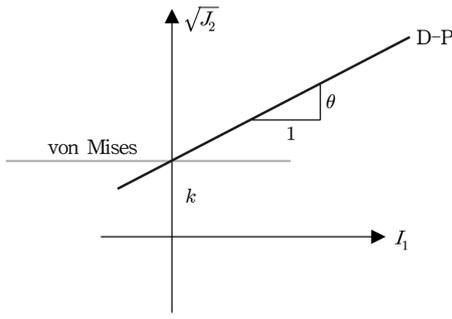


Fig. 7 Drucker-Prager yield surface in $I_1 - \sqrt{J_2}$ plane

Table 3 Material properties of the Drucker-Prager model

Parameter	Value		
Density [kg/m ³]	2,300		
Young's modulus [GPa]	34		
Poisson's ratio	0.18		
Maximum tensile pressure [MPa]	-5.6		
Erosion strain	1.5		
Drucker-Prager strength [MPa]			
Pressure #1	-5.60	Yield stress #1	0.00
Pressure #2	0.00	Yield stress #2	11.20
Pressure #3	16.00	Yield stress #3	56.00
Pressure #4	154.50	Yield stress #4	186.70
Pressure #5	267.00	Yield stress #5	256.00
Pressure #6	519.30	Yield stress #6	372.60
Pressure #7	613.60	Yield stress #7	372.60

$$F_{D-P} = \sqrt{J_2} - \theta I_1 - k \quad (1)$$

여기서, θ 와 k 는 항복면의 정의에 필요한 매개변수이다. Tham(2005)의 연구에서 사용한 D-P 모델의 물성치를 본 FCM의 강도에 맞게 수정하여 사용하였으며, 이를 Table 3에 나타내었다.

3.3 RHT 콘크리트 모델

RHT 콘크리트(RHTC) 모델은 취성재료에 적합한 고급 소성 모델로 Riedel et al.(1999)과 Riedel et al.(2009)에 의해 개발되었다. 본 모델은 동적하중을 받는 콘크리트의 모델링에 특히 유용하며, 암석이나 세라믹 등 콘크리트 이외의 취성재료를 모델링하는데도 사용된다. RHTC 모델의 파괴면(Failure surface) F_{RHTC} 은 다음과 같은 식으로 나타내며, 이는 압력 경화, 변형률 경화, 변형률속도 경화, 손상에 따른 변형률 연화 및 전단강도 감소의 영향을 고려하고 있다.

$$F_{RHTC} = \sigma_{eq} - Y_{TXC} * F_{CAP(P)} * R_3(\theta) * F_{RATE}(\dot{\epsilon}) \quad (2)$$

식 (2)에서 σ_{eq} 는 등가응력이고, R_3 는 인장, 압축 상태에 따른 기준

면의 차이를 나타내기 위한 항이며, Y_{TXC} 는 다음식과 같다.

$$Y_{TXC} = f_c \{ A (P^* - P_{spall}^* F_{RATE})^n \} \quad (3)$$

여기서, f_c 는 공시체의 압축강도, A 와 n 은 각각 파단면을 정의하기 위한 상수와 지수, P^* 와 P_{spall}^* 은 각각 압축강도에 의해 정규화된 압력과 동적파괴강도(Spall strength)이다. 그리고 F_{RATE} 는 변형률속도 계수이며, 압력(P)의 크기에 따라 다음과 같은 두 개의 식으로 표현된다.

$$F_{RATE} = \begin{cases} 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^\alpha & \text{for } P > \frac{1}{3} f_c \quad ; \text{ compression} \\ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^\delta & \text{for } P < \frac{1}{3} f_c \quad ; \text{ tension} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $\dot{\epsilon}_0$ 는 인장일 때 3×10^{-6} , 압축일 때 3×10^{-7} 이다.

식 (2)의 R_3 는 다음 식과 같이 정의되고, 삼축압축상태에 비해 삼축인장상태에서 감소하는 재료의 강도를 표현한다.

$$R_3 = \frac{2(1 - Q_2^2) \cos \theta + (2Q_2 - 1) \sqrt{4(1 - Q_2^2) \cos^2 \theta - 4Q_2}}{4(1 - Q_2^2) \cos^2 \theta + (1 - Q_2)^2} \quad (5)$$

$$\cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3} J_3}{2^{3/2} \sqrt{J_2}} \quad (6)$$

$$Q_2 = Q_{2,0} + BQ P^* \quad (7)$$

여기서 $Q_{2,0}$ 은 압력이 0일 때의 강도비, BQ 는 압력의 증가에 따른 파단면의 변화를 나타내는 계수이다.

RHTC 모델에서 손상은 소성변형률의 축적에 의해 발생하며, 다음 식으로 정의된다.

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^{failure}} \quad (8)$$

$$\epsilon_p^{failure} = D_1 (P^* - P_{spall}^*)^{D_2} \quad (9)$$

여기서, D_1 , D_2 는 재료상수로, 압력의 함수로 표현되는 재료 고유의 파괴 변형률을 정의하기 위해 사용된다. 손상은 재료에 변형률 연화 및 전단강도의 감소를 유발한다. 파단면 및 전단강도는 다음 식에 의해 감소된다.

$$Y_{fractures}^* = (1 - D) Y_{failure}^* + D Y_{residual}^* \quad (10)$$

$$Y_{residual}^* = \min [B(P^*)^M, Y_{TXC} * SFMAX] \quad (11)$$

여기서, B 와 M 은 각각 압력에 따른 잔류강도면을 정의하기 위한 상수와 지수, $SFMAX$ 는 잔류강도면의 한계를 설정하기 위한 파단면과의 비이다. 본 모델에서 정의된 재료의 파괴면, 탄

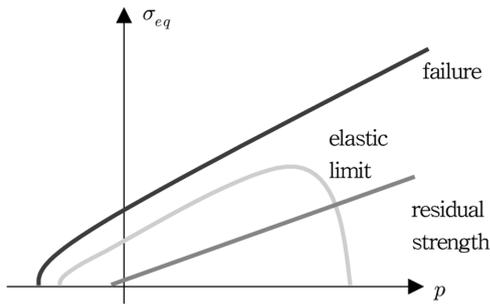


Fig. 8 Concept of three limit surfaces in RHTC model

성한계면 및 잔류강도면을 압력과 등가응력에 관한 형태로 도시하면 Fig. 8과 같다.

Table 4 Material properties of the RHT concrete strength model

Parameter	Symbol	Value
Compressive strength	f_c	56 MPa
Tensile strength	f/f_c	0.1
Shear strength	f_s/f_c	0.18
Intact failure surface constant	A	1.6
Intact failure surface exponent	n	0.61
Tension/compression meridian ratio	$Q2.0$	0.6805
Brittle to ductile transition	BQ	0.0105
Hardening slope		2
Elastic strength/ f_t		0.7
Elastic strength/ f_c		0.53
Fracture strength constant	B	1.6
Fracture strength exponent	m	0.61
Compressive strain rate exponent	α	0.032
Tensile strain rate exponent	δ	0.036
Maximum fracture strength ratio	$SFMAX$	1E+20
Damage constant	$D1$	0.04
Damage constant	$D2$	1
Minimum strain to failure		0.01
Residual shear modulus fraction		0.13

Table 5 Stress results with the material models.

Material Model	Falling distance	Principal stress [MPa]		Equivalent stress [MPa]		R_{eq}
		Maximum	Minimum	Upper block	Lower block	
E-PP	6m	35.72	-146.65	56.00	46.32	82.71
	9m	35.97	-147.07	56.00	47.61	85.02
D-P	6m	8.74	-286.00	189.53	55.28	29.16
	9m	10.47	-288.22	193.03	58.28	30.19
RHT	6m	10.83	-308.24	207.28	40.47	19.52
	9m	12.43	-316.04	208.81	43.29	20.73

RHTC 모델에서 사용되는 재료의 매개변수는 압축강도와 이와 의 비로 요구되는 인장강도 및 전단강도, 그리고 콘크리트의 거동특성을 묘사하는 다양한 계수들을 정의하기 위한 상수 및 지수로 이루어져 있다. 이러한 매개변수를 결정하기 위해서는 많은 실험(정적재하시험, 관통 및 친공시험, 폭발하중시험 등)이 요구된다. 아직까지 RHTC 모델의 매개변수를 결정하기 위한 실험은 압축강도 35MPa와 140MPa에 대해서만 수행되어, 현재 위 두 가지의 강도의 콘크리트에 대한 매개변수만이 Riedel et al.(1999)과 Riedel et al.(2009)에 의해 제안되고 있다. 결정된 두 종류의 매개변수군을 비교해 보면, 단지 압축강도와 변형률속도 계수를 정의하기 위한 지수만이 다를 뿐, 나머지는 동일하다. 따라서 압축강도가 35MPa에서 140MPa 사이인 콘크리트의 경우는, 제안된 매개변수 중 압축강도 및 변형률속도 계수를 제외한 나머지를 그대로 사용해도 무방할 것으로 사료된다. 본 연구에서 사용한 RHTC 모델의 물성치는 콘크리트 강도 35MPa에 대한 실험을 바탕으로 산정된 값을 사용하였고 Table 4와 같다.

4. 시뮬레이션 결과

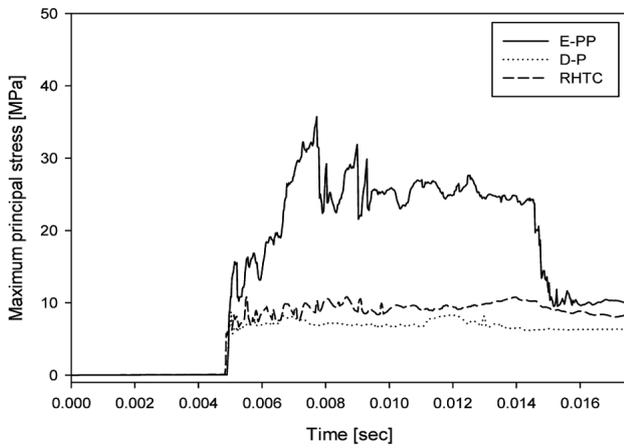
콘크리트 재료모델에 따른 앵커충돌 시뮬레이션 결과를 본 장에 나타내었다. 해저케이블 보호공은 앵커 및 로켓포의 낙하로부터 케이블을 보호하기 위한 구조물로, 충돌부 자체보다는 저면부의 안정성에 초점을 맞추고 있다. 따라서 상부블록의 최대 등가응력에 대한 하부블록의 최대 등가응력의 비 R_{eq} 를 다음 식과 같이 정의하여, 재료모델에 따라 충돌부에서의 응력이 얼마만큼 하부에 영향을 미치는지 알아보았다.

$$R_{eq} = \frac{\text{max. equivalent stress of lower block}}{\text{max. equivalent stress of upper block}} \times 100 \quad (12)$$

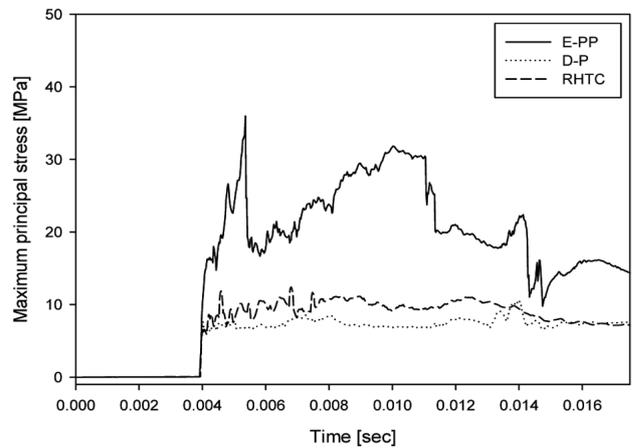
Table 5에는 재료모델 및 낙하높이 별 최대, 최소주응력과 상·하부블록 각각에 발생한 등가응력의 최대값 및 등가응력비를 나타내었다. 상부블록에서는 앵커와의 충돌지점에서 최대응력이 발생하였고, 하부블록에서는 상부블록과의 접촉면에서 (Fig. 5에서 A지점) 최대응력이 발생하였으며, 케이블이 위치하는 하부블록의 하단면에서는 상당히 작은 수준의 응력이 발생하였다. Fig. 9 ~ Fig. 11에는 재료모델 및 낙하높이 별 최대, 최

소주응력과 등가응력을 시간에 따라 도시하였고, Fig. 12 ~ Fig. 15에는 해석 결과를 막대그래프로 표시하였다.

해석 결과를 보면, 낙하높이가 높을 수록 주응력의 최대값이 크게 산정되었다. 이는 모든 재료모델에서 동일하게 나타나는

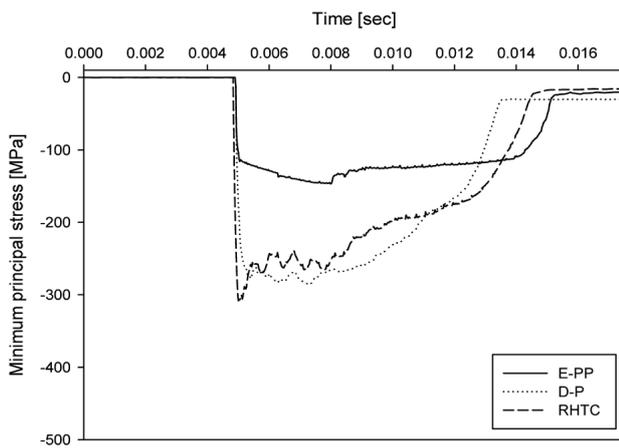


(a) Falling distance 6m

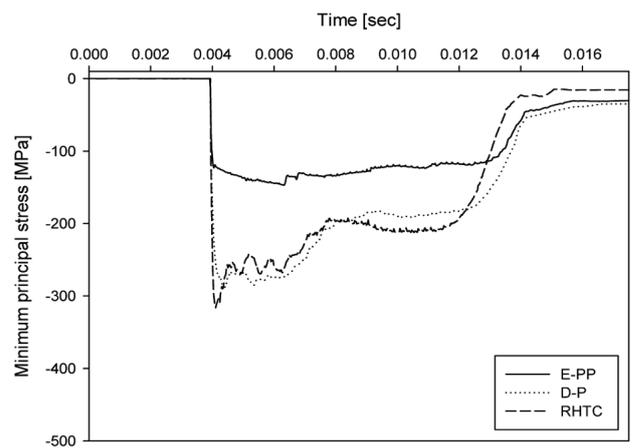


(b) Falling distance 9m

Fig. 9 Maximum principal stress variation on time with material models

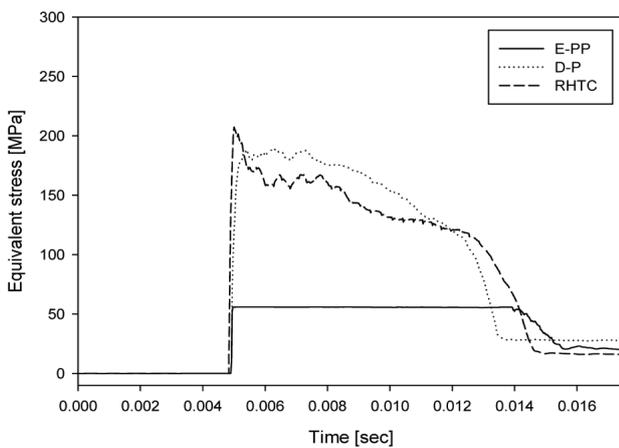


(a) Falling distance 6m

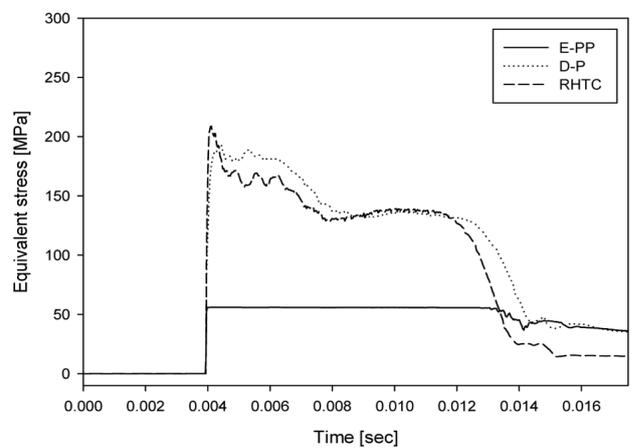


(b) Falling distance 9m

Fig. 10 Minimum principal stress variation on time with material models



(a) Falling distance 6m



(b) Falling distance 9m

Fig. 11 Equivalent stresses variation on time with material models

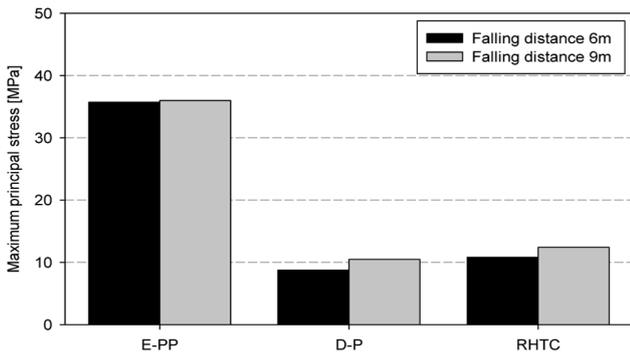


Fig. 12 Maximum principal stresses depending on the material models

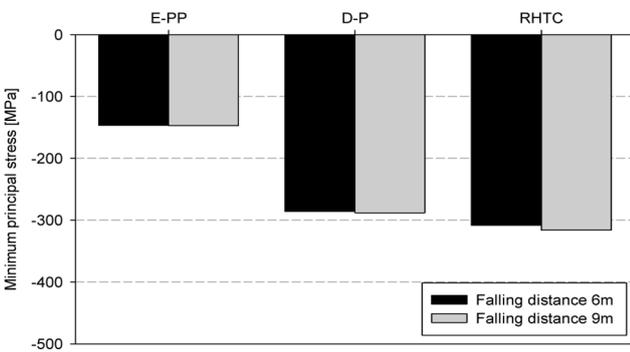


Fig. 13 Minimum principal stresses depending on the material models

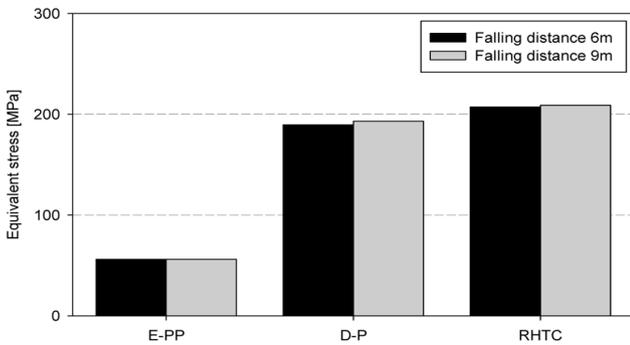


Fig. 14 Equivalent stresses depending on the material models

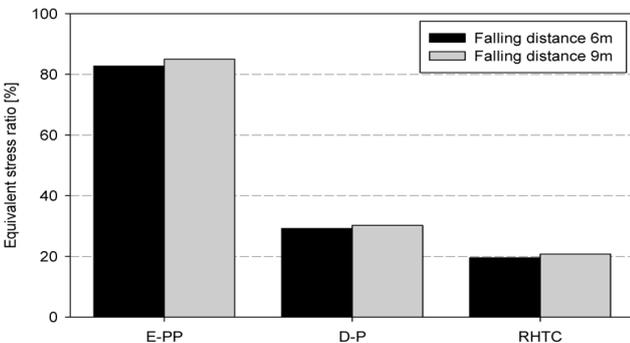


Fig. 15 Equivalent stress ratios depending on the material models

경향이며, 각각의 재료모델에 따른 응력 증가비율은 0.72% ~19.80% 이다. D-P 모델과 RHTC 모델은 E-PP 모델과 비교했을 때, 최대주응력은 작게, 최소주응력은 크게 산정되었다. E-PP 모델에서 발생한 최대 등가응력은 6m, 9m의 두 가지 낙하높이에서 모두 56MPa이며, 압력에 의존적인 항복강도를 갖는 다른 두 모델에서는 56MPa 이상의 값이 산정되었다. 이는 충돌 시뮬레이션 시, 압력의존적인 항복강도를 고려한 재료모델과 단순히 상수로 정의된 강도를 갖는 중 어떤 것을 사용하는가에 따라 FCM 보호공의 충돌거동에 상당한 차이를 보임을 나타낸다. RHTC 모델의 경우 주응력과 등가응력의 최대값이 D-P 모델보다 크게 산정되었으며, 이 결과는 RHTC 모델에서 추가적으로 고려한 변형을 속도경화에 의한 것으로 사료된다. 등가응력비는 E-PP 모델, RHTC 모델의 순으로 크게 산정되었고, 모든 재료모델에서 앵커의 낙하높이가 높을수록 크게 나타났다. 이는 일차적으로 충돌 시 발생한 큰 압력으로 인해 압력에 따라 강도가 증가되는 D-P 모델 및 RHTC 콘크리트 강도모델이 E-PP 모델에 비해 발생응력이 충돌부에 집중되며, 이차적으로 변형률속도 경화에 의해 RHTC 콘크리트 강도모델이 D-P 모델에 비해 저면부로 응력이 덜 전달됨을 나타낸다.

5. 결 론

본 논문에서는 콘크리트 케이블 보호구조물의 현장 실증시험을 대체할 수 있는 수치모델의 기초자료를 제공하기 위해 FCM의 앵커충돌 시뮬레이션을 수행하였다. 재료모델에 따른 거동의 차이를 알아보기 위해, 탄성-완전소성 모델, Drucker-Prager 모델, RHT 콘크리트 모델의 세 가지 재료모델을 고려하였다. 그리고 앵커의 낙하높이에 대한 영향을 알아보기 위해 두가지 낙하높이에 대한 해석을 수행하였다. 수치 시뮬레이션을 통해 얻은 결과 및 결론을 아래에 요약하였다.

- (1) 낙하높이가 높을수록 주응력의 최대값이 크게 산정되었다.
 - (2) Drucker-Prager 모델과 RHT 콘크리트 모델은 탄성-완전소성 모델과 비교했을 때, 최대주응력은 작게, 최소주응력은 크게 산정되었다.
 - (3) 탄성-완전소성 모델에서 발생한 최대 등가응력은 6m, 9m의 두 가지 낙하높이에서 모두 동일하였으며, 압력의존적인 항복강도를 갖는 다른 두 모델에서는 초기의 항복강도이상의 응력이 산정되었다.
 - (4) RHT 콘크리트 모델에서는 최대주응력, 최소주응력 및 등가응력의 최대값이 Drucker-Prager 모델보다 크게 산정되었다.
 - (5) 상부블록에 대한 하부블록의 응력비는 탄성-완전소성 모델, Drucker-Prager 모델, RHT 콘크리트 모델의 순으로 크게 산정되었고, 또한 모든 재료모델에서 낙하높이가 클수록 크게 나타났다.
- 모든 재료모델에서 낙하높이가 클수록 큰 주응력이 발생하였으나, 낙하높이에 따른 충격에너지의 변화는 재료모델에 따라 어떤 특정한 경향을 보이지는 않았다. 일반적인 정적해석에 주로 사용되는 탄성-완전소성 모델과 압력의존적인 항복강도를 갖는 취성재료의 해석에 주로 사용되는 Drucker-Prager 모델

및 고속충돌시의 콘크리트 구조물의 해석에 적합한 RHT 콘크리트 모델의 응력거동은 판이하게 다르게 산정되었다. RHT 콘크리트 모델에서 추가적으로 고려한 변형률속도 경화 및 재료의 손상에 의한 강도 감소 등의 영향으로 인해 Drucker-Prager 모델과 RHT 콘크리트 모델의 응력거동 또한 다르게 산정되었으나, 압력의존적 항복강도의 고려 유무에 비해서는 그 영향이 상대적으로 미미하였다. 따라서 본 연구에서 수행한 충돌 시뮬레이션에서는 압력의존적인 항복강도의 고려가 해석결과에 일차적으로, 변형률속도 경화 및 재료의 손상에 의한 강도 감소 등 고속충돌의 묘사를 위해 개발된 모델에서 고려된 요소들이 이차적으로 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 기존의 현장 실증 시험 결과와 비교해 보면 상·하부 등가응력비가 80% 이상의 값을 갖는 탄성-완전소성 모델은 본 FCM의 충돌 시뮬레이션에 적합하지 못하며, 압력의존적인 재료의 항복강도는 충돌 시뮬레이션 시 필히 고려되어야 할 특성이라 사료된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

References

- Ahn, S.H., Hue, H.K., Park, G.W., Hwang, S.B., Shim, W.I., 2012. Analysis of Echo-friendly Submarine Protection Duct. Proceedings of Joint Conference with Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, Daegu Korea, 2383-2389.
- Ahn, S.H., Kim D.S., 2009. Submarine Cable Installation and Protection Methods according as Characteristics of Ocean Environment. Journal of the Korean Society of Marine Environmental & Safety, 15(1), 25-32.
- ANSYS, 2010. ANSYS Workbench Training Manual. TSNE, Seoul.
- Cho, H.M., Kim, S.H., Ryu, Y.S., Kim, J.T., 2012. Numerical Simulation of Burial Submarine Cable Protector under Anchor Collision. Proceedings of Joint Conference with Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, Daegu Korea, 1766-1770.
- Clegg, R.A., Hayhurst, C.J., Robertson, L., 2002. Development and Application of a Rankine Plasticity Model for Improved Prediction of Tensile Cracking in Ceramic and Concrete Materials under Impact. 14th DYMAT Technical Meeting, Sevilla, Spain.
- Kim, S.H., 2013. A Fundamental Study for Numerical Simulation of a Flexible Concrete Mattress Submarine Cable Protector under Anchor Collision, Master Thesis. Department Ocean Engineering, Pukyong National University.
- Korean Standards Service Network, 2012. KS V3311. [Online] (Updated January 2012) Available at: <<http://www.kssn.net>> [Accessed Jan. 2015].
- New Technology of Electric Power, 2007. Assemble Type FCM(Flexible Concrete Mattress) for Submarine Cable Protection. [Online] (Updated August 2007) Available at: <<http://www.electricity.or.kr/>> [Accessed Jan. 2015].
- Rempling, R., 2004. Concrete Wall Subjected to Fragment Impacts: Numerical Analyses of Perforation and Scabbing. Master Thesis, Department of Structural Engineering and Mechanics Concrete Structures, Chalmers University of Technology.
- Riedel, W., Thomas, K., Hiermaier, S., Schmolinske, E., 1999. Penetration of Reinforced Concrete by BETA-B-500 Numerical Analysis using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes. 9th International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Berlin-Strausberg, Germany, 315-322.
- Riedel, W., Kawai, N., Kondo, K., 2009. Numerical Assessment for Impact Strength Measurements in Concrete Materials. International Journal of Impact Engineering, 36, 283-293.
- Tham, C.Y., 2005. Reinforced Concrete Perforation and Penetration Simulation using AUTODYN-3D. Finite Elements in Analysis and Design, 41, 1401-1410.
- Woo, J., 2009. Numerical Simulation of Submarine Cable Protector under Anchor Collision, Master Thesis. Department Ocean Engineering, Pukyong National University.
- Woo, J., Na, W.B., 2010. Analysis of Maximum Response of Cylinders-connected Protector under Anchor Colliding and Dragging. Journal of Ocean Engineering and Technology, 24(5), 81-87.
- Woo, J., Na, W.B., 2011. Collision Characteristics of Arch-type Submarine Cable Protector- Effect of Material Models. Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea, 24(6), 609-616.
- Yu, T., Teng, J.G., Wong, Y.L., Dong, S.L., 2010. Finite Element Modeling of Confined Concrete- I : Drucker-Prager Type Plasticity Model. Engineering Structures, 32, 665-679.