

# 임펄스 가진에 의한 근해역 통합채광시험 양광시스템의 파이프 동적 과도응답 해석

## Analysis of the Transient Dynamic Response of Ocean Mining Pipe System Due to Impulse

조 규 남\*      김 민\*      윤 치 호\*\*      박 용 찬\*\*  
Cho, Kyu-Nam      Kim, Min      Yoon, Chi-Ho      Park, Yong-Chan  
(논문접수일 : 2006년 3월 22일 ; 심사종료일 : 2007년 2월 9일)

### 요 지

본 논문에서는 극한 해상상태나 돌발적인 환경하중에서 양광시스템의 진수와 인양이 이루어질 때 발생할 수 있는 파이프의 점핑현상과 이에 의해 유발되는 파이프의 장력변화 및 위해도를 위한 해석기법을 제시하였다.

동적 과도응답 해석은 본 논문에서 제시된 기법에 의하여 여러 가지 형식의 임펄스에 대해 수행되어졌으며, 해석을 위한 모델로 KT-Submarine에서 사용하고 있는 '세계로호' 양광시스템의 진수, 인양 시스템을 선정하였다. 결과적으로 양광시스템관련 해상작업을 위한 지침이 제시되었다. 정성적인 해석기법의 검증과 비교를 위하여 ROV진수 시 발생 가능한 케이블 장력 과도응답을 해석하였으며 이를 통하여, 본 연구에서 시도한 수학적 모델링과 이상화된 임펄스에 대한 파이프의 과도응답과정이 충분한 정성적인 기초자료를 제공해 줄 수 있다는 점을 파악하였다.

**핵심용어** : 양광시스템, 임펄스 가진, 동적과도응답해석, 파이프 장력

### Abstract

A finite element analysis scheme is proposed to assess the dynamic response due to impulse excitation of ocean mining pipe system. Transient dynamic response analysis based on the proposed scheme was carried out for various types of impulses, and the magnitude of cable tension induced by impulse was discussed by using a model of 'Segero', a special purpose ship of KT-Submarine as well as ROV carrier 'Onnuri'. A qualitative, prospective guideline for the relevant marine operation is obtained.

**Keywords** : ocean mining pipe system, impulse excitation, transient dynamic response analysis, pipe tension

## 1. 서 론

해상 부유식 구조물 기술 개발은 21세기 신해양시대의 해상 공간 개발 분야에서 가장 중요한 기술 분야중 하나가 되고 있으며, 이와 관련된 해상 작업 기법, Marine Operation 기술은 우리나라의 경우, 시작 단계라 할 수 있다.

해상 작업과 관련된 통합제어 기술개발의 주된 내용은 다음과 같이 분류될 수 있겠다. 첫째, 해상작업 시의 해상구조물과 유의파고와의 공진 위험성 분석 기법이며, 내용은 해상 작업시스템의 정규모드진동해석 및 조화응답 해석을 통한 공

진현상 확인과 위해도 판단기술, 그리고 해상작업 시 유의파고와의 공진 회피 방법과 대처기술이다.

둘째, 높은 파고 시 조화응답해석에 근거한 작업 위해도 분석 기법이며, 내용은 해상 작업시스템 운용 시 주요 부재의 위치변화와 파랑하중의 주파수에 따른 부재응력의 조화응답 해석, 선수파와 횡파 그리고 경사파에 의해 유발되는 하중 성분별 연성 조화응답 특성 평가 기법, 해상구조물의 조화응답과 정규모드 진동 결과의 비교 분석 기법, 높은 파고 시 연성 조화응답해석에 근거한 해상 작업 가이드라인이다. 셋째, 하중 임펄스 특성 변화에 따른 해상작업 영향 분석

† 책임저자, 정회원 · 홍익대학교 조선해양공학과 교수  
Tel: 041-860-2530 ; Fax: 041-862-9681  
E-mail: kncho@hongik.ac.kr

\* 홍익대학교 조선해양공학과 석사과정

\*\* 교신저자 · 한국지질자원연구원 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

기법이며, 내용은 가속도의 크기, 주요부재의 위치 및 임펄스 가진 시간별 응답 특성 평가기법, 임펄스 관련 구조 동력학적 해석 고도화 기법이다.

이와 관련된 해외 연구를 살펴보면, Chung *et al.*(1999)은 Miner에 이용되는 pin-joint 파이프와 선체 운동의 연성 운동 해석을 수행하고, 이와 관련된 유한요소해석 모델을 제시하였다. 일본에서는 JAMSTEC의 개발 프로젝트와 관련하여, Kawaguchi *et al.*(1999)이 submarine cable을 이용한 대양저 탐사 운용 기법에 대한 연구를 수행하였고, Nagatomi *et al.*(2002)은 해저 케이블 부설 시, 파랑 하중에 의해 유발되는 케이블 장력 산정을 위한 동적 거동 해석을 수행한 바 있다.

국내의 경우, 케이블에 대한 동력학 해석에 대한 연구는 최근 까지 많이 수행되어 왔으나(Jung 등, 2002; Kim 등, 2001; Cho 등, 2002), Marine Operation과 관련된 연구는 매우 드문 실정이다. 이와 관련된 대표적인 발표논문을 살펴보면, 해저에서 ROV가 운용될 때의 케이블 장력 변화 산정을 위한 운동 해석에 대한 연구(해양수산부, 2000) 및 ROV 운용을 위한 A-프레임 설계연구와(조규남 등, 2002), 파랑하중에 의한 케이블의 조화응답 해석 기법 개발에 대한 연구, 심해 무인 잠수정의 원치, 장력조절장치 설계가 있는 바, A-프레임 등 ROV 선상지원시스템에 대해 초기 설계에 필요한 구조 해석을 들 수 있다(조규남 등, 2003).

특히 채광시스템을 원활하게 작동시키고 안전성을 유지하기 위해서는 수상 지원선에서의 판련 작업이 매우 중요하게 되는데, 이는 채광선은 물론, A-프레임, 펌프, 버퍼, 파이프, 원치 및 램 텐서너(ram tensioner) 등이 포함되게 된 동적 해석에 근거하게 된다.

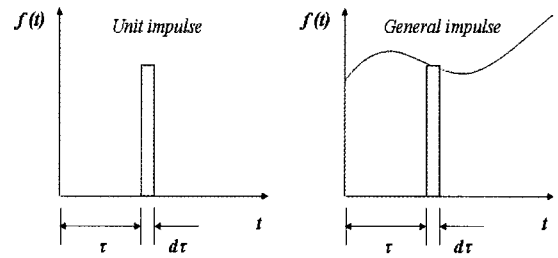
본 논문은 위에서 언급한 내용 중 극한 해상 상태나 돌발적인 환경하중 하에서, 진수와 인양이 이루어질 때 발생할 수 있는, 파이프의 점핑(jumping) 현상에 의해 유발되는 파이프의 장력 변화에 대한 것이다.

파이프 점핑 현상은 극한 해상 환경에서 A-프레임과 파이프 간의 매우 큰 상대운동에 의해 발생하는 것으로 보고 되어지고 있는 바, 점핑이 이루어진 후 서로 다시 맞닿게 되는 순간에 파이프에 작용하는 하중은 임펄스(impulse)로 모델링될 수 있다. 이러한 임펄스 가진에 의한 응답 특성은 파이프 시스템의 동적 과도응답 해석을 통하여 구할 수 있는 바, 본 논문에서는 이상화된 임펄스에 대한 파이프의 과도응답 특성을 평가할 수 있는 유한요소해석 기법을 정립하여 파이프의 동적 구조안전성을 검토하였다(김인학 등, 1997 ; 신수봉 등, 2000).

2. 문제의 정식화 및 모델링

시간 이력을 갖는 일반적인 가진력(general forcing)에 의한 과도응답 해석은 단위 임펄스에 대한 과도응답을 중첩하여 구하게 된다(Beer, 2000).

Fig. 1(a)와 같이 시간  $\tau$ 에 단위 임펄스가 가해졌을 때, 이에 대한 응답은 식 (1)과 같이 그린 함수(Green function) 형태로 주어지게 된다. Fig. 1(b)와 같은 가진력이 들어왔을 때,  $d\tau$  시간동안 가해진 임펄스 요소는  $f(\tau)d\tau$  이므로, 이에 대한 응답은 식 (2)와 같이 단위 임펄스에 대한 응답에  $f(\tau)d\tau$ 를 곱하여 구하며, 임의 시간 동안의 가진력에 대한 응답은 그 시간 구간에 있어서 임펄스 요소에 대한 응답을 적분하여 구하게 된다(식 (3)).



(a) Unit impulse (b) General impulse  
Fig. 1 Description of impulse and general forcing

본 연구의 대상인 파이프 점핑에 의한 가진은 Fig. 2와 같이 A-프레임과 파이프간의 상호 접촉에 의해 발생하는 것으로, 가진력은 A-프레임 상단의 법선 방향으로 작용하는 것으로 가정하였으며, 직각좌표계의 세 방향 모두 가진력 성분을 입력할 수 있도록 모델링하였다(조규남 등, 2002).

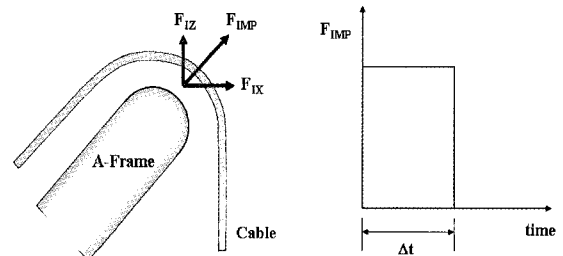


Fig. 2 Description of cable jumping problem

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t \leq \tau \\ h(t-\tau) & t > \tau \end{cases} \quad (1)$$

Response due to elemental impulse

$$= h(t-\tau)f(\tau)d\tau \quad (2)$$

$$u(t) = \int_0^t h(t-\tau)f(\tau)d\tau \quad (3)$$

Ansys Verification Manual에 근거하면, 자유낙하한 질량  $m$ 의 강체가 일정높이에서 떨어진 후 탄성체 바닥에 충돌하는 경우, 탄성체 바닥의 변형이 최대 변위를 일으키는 시간은 0.001초로부터 0.11초 사이인 것으로, 이론적으로나 실험적으로 판명되었다. 따라서 중력가속도 1G 상황하에서 0.001초를 임펄스 지속시간으로 추정하여 기준으로 정하였으며, 이 경우 충돌 주기는 0.11초의 1/100인 0.001초가 된다. 따라서 임펄스 산정에 필요한 임펄스 지속 시간(impulse duration)은 참고 문헌(ANSYS)에 기술된 자유 낙하한 탄성체와 탄성체 표면과의 접촉 시간을 참조하여 0.001초를 기준으로 하였으며, 임펄스 힘의 크기,  $F_{IMP}$ 는 A-프레임과 케이블간의 상대 가속도와 양광시스템의 관성 질량을 곱하는 것으로 가정하였다. 이때 기준이 되는 상대 가속도는 두 배의 중력가속도(2G)로 하였다. 이러한 상대가속도는 실제 해상 상태에서는 나타나기 어려운 수치이나, 설계의 관점에서 보다 가혹한 하중 조건에 대한 구조 안전성을 평가하기 위해 이와 같이 가정하였으며, 추후 실제 선박의 운동에 대한 자료의 확보와 이들의 분석 및 과도응답 특성 평가를 통하여 보완할 수 있을 것으로 판단된다(Chung 등, 1999). 유한요소해석에는 상용프로그램인 ANSYS 5.7을 사용하였으며, 링크요소와 집중질량 요소를 사용하였다.

KT-Submarine에서 사용하는 '세계로호'의 선상 지원시스템을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 세계로호의 주요 제원(Fig. 4, Table 1)을 살펴보면 전장이 115.8m, 선폭 20.0m, 흘수 7.8m, 순항속도 17knots, 승선 인원은 62명이다. 세계로호의 주 A-프레임은 main deck 뒤쪽 선미부에 설치되어 있으며, 이

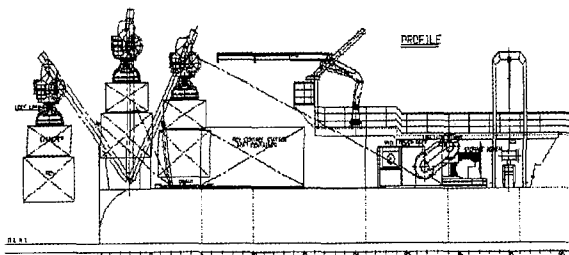


Fig. 3 Description of UUV carrier, 'Onnuri'

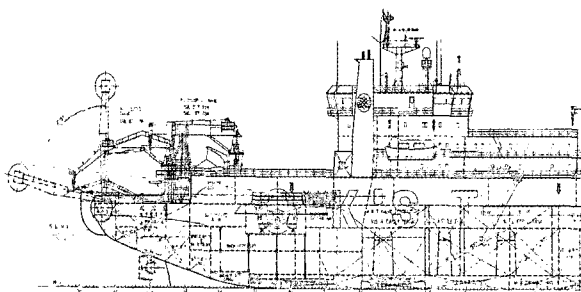


Fig. 4 Description of carrier, 'Segero'

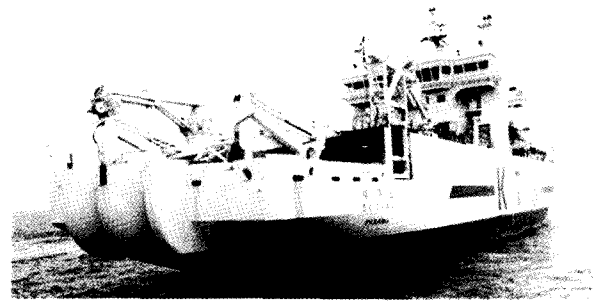


Fig. 5 Description of support system of carrier

Table 1 Principal dimensions of 'Segero'

Items	Dimensions
Length over all	115.8m
Breadth	20.0m
Depth	11.3m
Draft	7.8m
Speed	17.0kts
Crews	62

Table 2 Mass of pump and buffer system

Items	Mass
Pump	750kg
Buffer	4590kg

Table 3 Characteristics of primary pipe

Items	Value
Length	30m
Breaking strength	7208kg

를 이용하기 위한 윈치는 선미부에서 약 9m 떨어진 갑판에 설치되어 있다. 현재 버퍼, 펌프 및 파이프 시스템의 주요 특성은 Table 2와 Table 3에 정리하였으며, 해석에 사용된 유한요소의 주요 기계적 성질들은 이를 토대로 산정되었다. 해석에 사용된 선박과 파이프 시스템은 Fig. 3~5에 나타났다.

선상지원 시스템의 유한요소해석을 위해 사용된 요소는 파이프 요소(PIPE16)가 쓰였다. Fig. 6에 보인 것과 같이 4개의 자유도를 가지고 있으며, 각각의 자유도에 대한 형상함수는 식 (4)부터 식 (7)과 같다.

$$u = \frac{1}{2}(u_I(1-s) + u_J(1+s)) \tag{4}$$

$$v = \frac{1}{2}(v_I(1 - \frac{s}{2}(3-s^2)) + v_J(1 + \frac{s}{2}(3-s^2))) + \frac{L}{8}(\theta_{z,I}(1-s^2)(1-s) - \theta_{z,J}(1-s^2)(1+s)) \tag{5}$$

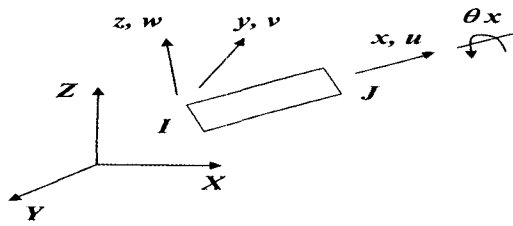


Fig. 6 Beam element (BEAM188)

$$w = \frac{1}{2} (w_I(1 - \frac{s}{2}(3 - s^2)) + w_J(1 + \frac{s}{2}(3 - s^2))) - \frac{L}{8} (\theta_{y,I}(1 - s^2)(1 - s) - \theta_{y,J}(1 - s^2)(1 + s)) \quad (6)$$

$$\theta_x = \frac{1}{2} (\theta_{x,I}(1 - s) + \theta_{x,J}(1 + s)) \quad (7)$$

해석에 사용된 링크 요소와 질량 요소의 자유도 및 형상 함수 등은 다음의 Fig. 7과 Fig. 8, 식 (8)부터 식 (11)에 나타내었다(Beer 2000).

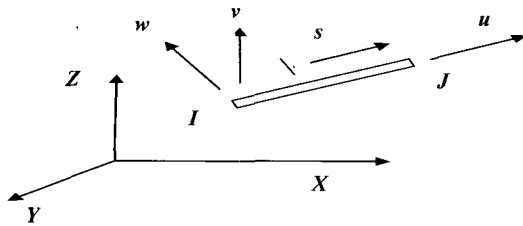


Fig. 7 Link element (LINK8)

$$u = \frac{1}{2} (u_I(1 - s) + u_J(1 + s)) \quad (8)$$

$$v = \frac{1}{2} (v_I(1 - s) + v_J(1 + s)) \quad (9)$$

$$w = \frac{1}{2} (w_I(1 - s) + w_J(1 + s)) \quad (10)$$

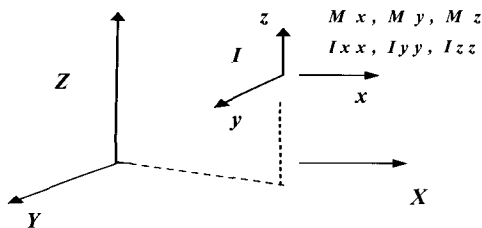


Fig. 8 Mass element (MASS21)

$$[M_e] = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 3. 해석의 대상 및 해석 결과

선상지원선 및 선상지원시스템의 주요 제원은 실제 선박과 동일하게 적용하였다(Cho 등, 2003; G.A. of Segero, 1998).

Fig. 9 이하는 케이블 접핑에 의한 케이블 장력의 과도응답에 대한 해석 결과를 보여주고 있다. 다양한 임펄스 특성에 대한 과도응답 특성의 정성적인 분석을 위해 다음과 같은 해석 조건에 대해 동적 과도응답 해석을 수행하였으며, 각각의 해석 결과를 해석 조건별로 상술하면 다음과 같다.

#### 3.1 동일한 임펄스 지속 시간에 대해 힘의 크기 변화에 따른 케이블 장력의 과도응답 특성 평가(Fig. 9, Table 4)

동일한 임펄스 지속 시간을 갖는 경우, 장력의 최대치가 발생하는 시간은 동일한 결과를 주었고, 힘의 크기가 변하게 되면 케이블의 최대 장력이 힘의 크기에 비례하는 경향을 보여주고 있다. 해석 조건 중 최대 장력의 크기는 가장 큰 임펄스(힘의 크기가 3G 조건)에 대해 5.54 ton 정도의 장력이 유발되는 것으로 평가되었다.

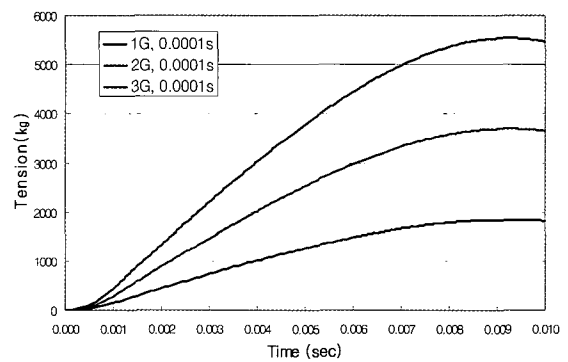


Fig. 9 Transient dynamic response of cable tension according to force level at same impulse duration, 0.0001sec.

Table 4 Transient dynamic response of pipe tension according to force level at same impulse duration, 0.0001sec.

Time interval (sec.)	$F_{IMP}$	Max. pipe tension (kg)	Time of max. pipe tension (sec.)
0.0001	1 G	1850.9	0.00922
0.0001	2 G	3697.3	0.00922
0.0001	3 G	5539.1	0.00922

1G = gravitational force of launcher

#### 3.2 동일한 힘의 크기에 대해 임펄스 지속 시간의 변화에 따른 케이블 장력의 과도응답 특성 평가(Fig. 10, Table 5)

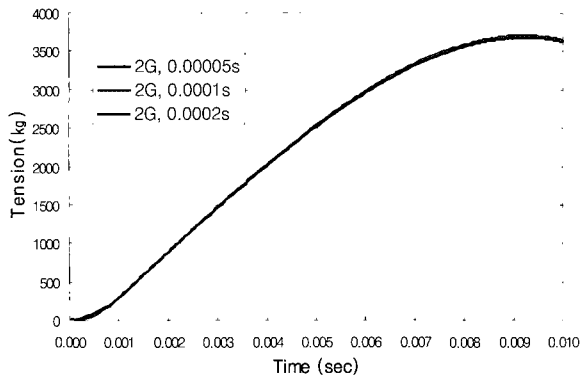


Fig. 10 Transient dynamic response of pipe tension according to impulse duration at same force level

Table 5 Transient dynamic response of pipe tension according to impulse duration at same force level

Time interval (sec.)	$F_{IMP}$	Max. pipe tension (kg)	Time of max. pipe tension(sec.)
0.00005	2G	3706.2	0.00922
0.0001	2G	3697.3	0.00922
0.0002	2G	3679.6	0.00922

1G = gravitational force of launcher

동일한 힘의 크기를 갖는 임펄스의 경우, 최대 장력이 유발되는 시간은 임펄스 지속 시간과 관계없이 일정하게 나타나는 것으로 평가되었으며, 해석 조건에 있어 최대 장력은 가장 짧게 임펄스가 부가된 조건(임펄스 지속시간이 0.00005sec. 조건)에 대해 3.706ton 정도의 장력이 유발되었다.

이들의 결과를 종합하여 볼 때, 해석 조건 중 펌프 및 버퍼의 질량의 두배의 관성력을 가지며 2배의 중력가속도를 갖는 임펄스에 대해 3.706ton 수준의 최대 파이프 장력이 발생하였으며, 이는 파이프 파단 강도에 비해 상당히 작은 수준으로 판단되어 파이프의 구조 안전성에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 여겨진다. 다만, 전술한 바와 같이, 해석에 적용된 하중 조건이 실 해상 상태에서 나타나기 어려운 가혹한 조건이기는 하나, 임펄스 특성이 실제 선박 운동의 데이터에 기초한 것은 아니므로, 개발된 파이프 점핑에 대한 과도응답 해석 기법을 바탕으로, 추후 실 선박 운동에 대한 자료가 확보되는 대로 실제 조건에 대해 보다 엄밀한 파이프 응답 특성 평가가 이루어져야 할 것이다.

**3.3 임펄스 지속 시간이 0.001초와 0.002초인 경우에 있어서 펌프 및 버퍼의 위치에 따라 1G, 2G 및 3G의 가속도가 작용하는 경우에 대한 특성 평가 (Fig. 11, Table 6, Table 7)**

정성적인 경향을 살펴보면, 펌프 및 버퍼가 수면 가까이 있을 때 임펄스 가진에 의한 파이프 장력이 보다 크게 유발되는 것으로 나타난다.

파이프 장력은 임펄스 지속시간에 큰 영향 없이 비슷한 결과가 유발되는 것을 알 수 있으며, 가속도의 크기에 따른 파이프의 장력은 거의 비례 관계에 있으나, 3G 정도의 매우 큰 가속도를 갖는 경우에는 유발되는 파이프 장력의 크기가 7.65ton으로 나타나 파이프의 파단 강도가 7.2ton임을 감안할 때 파이프 위해도 가능성이 있다는 판단을 내릴 수 있었다. 다만, 실질적으로 3G의 충격하중이 작용하지 않을 것으로 판단된다.

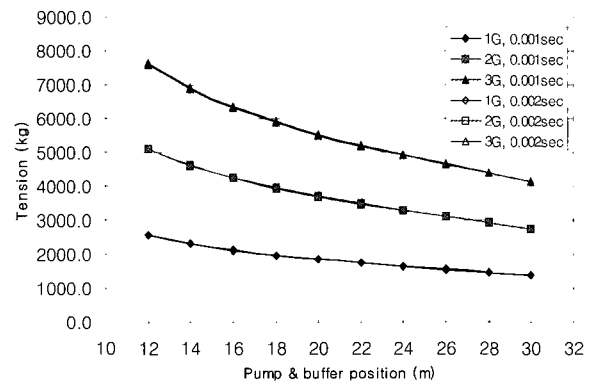


Fig. 11 Impulse response due to acceleration and duration of impulse

Table 6 Impulse response due to acceleration (duration : 1/1000 sec.)

Accel.	Tension (kg)									
	12m	14m	16m	18m	20m	22m	24m	26m	28m	30m
1G	2569.7	2322.3	2131.2	1977.8	1850.9	1743.4	1649.9	1559.0	1469.8	1384.0
2G	5116.8	4629.9	4252.8	3949.1	3697.3	3483.6	3297.4	3115.9	2937.7	2766.2
3G	7641.3	6923.2	6364.6	5913.8	5539.1	5220.6	4942.3	4670.6	4403.7	4146.8

Table 7 Impulse response due to acceleration (duration : 2/1000 sec.)

Accel.	Tension (kg)									
	12m	14m	16m	18m	20m	22m	24m	26m	28m	30m
1G	2557.4	2311.2	2121.0	1968.3	1842.0	1735.0	1642.0	1551.5	1462.6	1377.2
2G	5092.5	4607.8	4232.4	3911.4	3679.6	3466.9	3281.5	3100.8	2923.4	2752.6
3G	7605.2	6890.3	6334.3	5885.6	5512.6	5195.6	4918.6	4647.9	4382.2	4126.4

제한적이기는 하나, 임펄스 가능성을 검토하기 위한 수학적 모델링을 시도하였으며, 이에 따라 이상화된 임펄스에 대한 파이프의 과도 응답 특성치를 산출하였다.

임펄스 지속시간을 0.001초와 0.002초로 가정하였고 펌

프 및 버퍼에 작용하는 가속도는 상황변화에 따라 1G에서 3G까지 작용하는 것으로 생각하였다.

Table 6, Table 7 등에서 요약된 바와 같이 가상 충격하중이 3G가 될 경우 최대 파이프 장력이 7.6ton 정도로 산출되어 임펄스 가진에 의한 파이프 위해도는 충분히 존재할 가능성이 있다는 판단을 내릴 수 있었다.

정성적인 해석기법의 검증과 비교를 위하여, 유사한 해상 작업 시스템에 대한 동적과도응답해석을 수행하였다. 이 경우에는 ROV의 진수시 발생가능한 케이블 점핑에 의한 케이블 장력 과도응답에 대한 해석이다. 사용된 선박은 Fig. 3에 보여지고 있다(Cho, 2003). 이 경우도 파이프 장력 해석 시와 같은 임펄스 지속시간과 하중조건을 부여하였다. 해석 결과와 검토사항은 다음과 같다.

임펄스 지속 시간이 0.001초와 0.002초인 경우에 있어, 진수 과정에서의 구조물의 위치에 따라 1G, 2G 및 3G(여기서 G는 중력가속도의 크기)의 가속도가 작용하는 경우에 대한 해석을 각각 수행하여 Table 8~11, Fig. 12에 정리하였다.

정성적인 경향을 살펴보면, 구조물이 막 진수되는 순간에 임펄스 가진에 의한 케이블 장력이 보다 크게 유발되는 것으로 나타난다.

A-프레임으로부터의 위치가 2m가 넘는 위치에서는 임펄스 지속시간과 거의 비례하여 케이블 장력이 유발되는 것을 알 수 있으나, 진수가 막 시작되는 1m이하의 지점에서는, 임펄스 지속시간이 케이블의 장력 변화에 미치는 영향이 작은 것으로 나타났다.

가속도의 크기는 케이블의 장력과 비례 관계에 있으나, 3G 정도의 매우 큰 가속도를 갖는 경우에도 유발되는 케이블 장력의 크기는 4.7ton이하로 나타나 케이블의 파단 강도가 20.5ton임을 감안할 때 우려할 수준은 아닌 것으로 나타났다.

Table 8 Impulse response due to acceleration (duration : 1/1000 sec.)

Accel.	Tension (kg)					
	0.1m	0.2m	0.5m	1m	2m	3m
1G	1544.3	1565.1	1458	1167.3	866.4	711.6
2G	3114.4	3134	2918.4	2335.7	1733.4	1423.5
3G	4680.3	4706.9	4381.2	3505.3	2600.9	2135.7

Table 9 Impulse response due to acceleration (duration : 1/1000 sec.)

Accel.	Tension (kg)						
	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
1G	613.5	544.1	491.7	450.2	416.2	387.8	363.6
2G	1227.2	1088.4	983.5	900.4	832.6	775.7	727.2
3G	1841.1	1632.9	1475.4	1350.9	1249	1163.7	1090.9

Table 10 Impulse response due to acceleration (duration : 1/1000 sec.)

Accel.	Tension (kg)					
	0.1m	0.2m	0.5m	1m	2m	3m
1G	1544.1	1566.1	1547.9	1549.9	1427	1252.1
2G	3115.2	3136.8	3101.4	3103.3	2856.3	2505.6
3G	4683.3	4712.4	4660.6	4660.2	4287.7	3760.6

Table 11 Impulse response due to acceleration (duration : 1/1000 sec.)

Accel.	Tension (kg)						
	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
1G	1114.8	1007.8	922.1	851.8	792.9	742.5	698.9
2G	2230.6	2016.3	1844.8	1704.1	1586.1	1485.4	1398.1
3G	3347.5	3025.6	2768.2	2556.9	2379.8	2228.6	2097.6

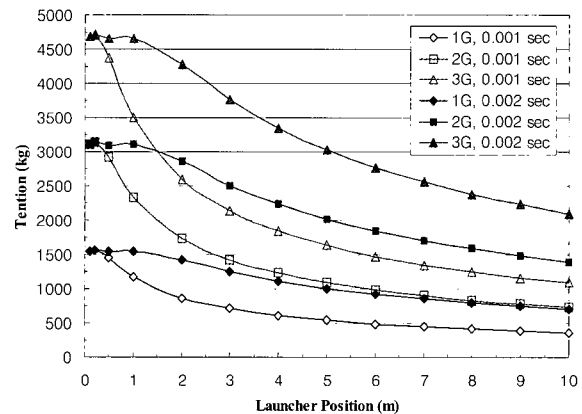


Fig. 12 Impulse response due to acceleration and duration of impulse

이 케이스 검토로 알 수 있는 것은, 본 연구에서 시도한 수학적 모델링과 이상화된 임펄스에 대한 파이프의 과도응답 과정이 충분한 정성적인 기초자료를 제공해 줄 수 있다는 점이다. 또한 경우에 따라서는 같은 조건 하에서도 시스템의 위해도 경중을 가려낼 수 있는 지침을 제시할 수 있다는 점이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 극한 해상상태에서 나타날 수 있는 파이프 점핑으로부터 유발되는 파이프 장력 변화를 산정하기 위해, 임펄스 가진에 대한 파이프의 과도응답해석을 수행할 수 있는 유한요소해석 기법을 정립하였다. 제한적이기는 하나, 임펄스 가능성을 검토하기 위한 수학적 모델링을 시도하였으며, 임펄스 가진에 의한 파이프 위해도 가능성 여부 판단을 내릴 수 있었다. 본 연구를 통하여 얻은 내용은 다음과 같이

요약될 수 있겠다.

(1) 동일한 임펄스 지속 시간을 갖는 경우 힘의 크기가 변화하는 경우에도 장력의 최대치가 나타나는 시간은 같은 시간이 흐른 뒤이며, 최대 장력은 주어진 힘의 크기에 비례하는 경향을 보여준다.

(2) 동일한 힘의 크기를 갖는 임펄스의 경우 최대 장력이 유발되는 시간은 임펄스 지속시간과는 관계가 없는 것으로 나타났다.

(3) 제한적인 경우이긴 하나 케이블을 이용하여 구조물을 선박에서 진수시켜 수면에 내릴 시 진수되는 순간에 임펄스가 가진에 의한 케이블 장력이 가장 크게 유발되는 것으로 나타났다.

(4) 본 논문에서 제시된 파이프 점핑에 대한 과도응답해석은 파이프 구조 안전성 판단에 경우에 따른 정성적 지침을 줄 수 있다.

본 연구에서 수행된 과도응답해석 결과의 정량적인 이용을 위해서는, 사용되는 선박의 종류에 따른 사례연구를 추가하고 여기에서 수행된 결과를 포함한 종합화한 데이터베이스를 구축, 향후 유사한 선박의 경우 이를 근거로 하여 활용하는 추가 연구가 필요하다고 하겠다. 또한 해석기술의 개선은 필요하며, 이를 위한 방법은 실제 해상에서의 대상선박 운동에 따른 직접 구한 운동가속도 값을 사용하는 일이 될 수 있겠다. 향후 연구 내용은 위와 같은 두 가지 사항이 우선시 되는 방향으로 나갈 것을 제안한다.

### 감사의 글

본 논문의 내용은 한국지질자원연구원 2005년도 "태평양 심해저 광물자원 개발" 사업의 과제로 수행된 연구 결과의 일부로, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

김인학, 독고옥(1997) 확률론적 특성을 갖는 선형 동적계의 과도 응답 해석, 한국전산구조공학회논문집, 10(3), pp. 125~131.  
신수봉, 오성호, 박임중, 고현무(2000) 동적과도응답을 사용한 구조물의 손상진단, 한국전산구조공학회논문집, 13(4), pp.395~404.

조규남, 송하철, 이억재(2002) ROV 설계를 위한 A-Frame 설계 연구, 한국해양공학회 추계학술대회논문집, pp.186~190.  
조규남, 송하철, 홍도천(2003) 선체 운동을 고려한 ROV 케이블의 연성 동력학해석, 대한조선학회 춘계학술대회논문집.  
해양수산부(2000) 차세대 심해저 무인잠수정 개발을 위한 기획, 조사 연구, 한국해양연구소 보고서.  
ANSYS *Verification Manual 65*, Transient Response of a Ball Impacting a Flexible Surface.  
Beer, J.(2000) *Vector Mechanics for Engineers - Dynamics*, Mc Graw Hill, pp.210~215.  
Chung, J.S., Cheng, B.(1999) 3-D Responses of Vertical Pipe Bottom Pin-Jointed to a Horizontal Pipe to Ship Motion and Thrust on Pipe - Part I: MSE and FEM Modeling, *Proceed. of Ninth Int. Offshore and Polar Eng. Conference*, Brest, France.  
Jung, D.H., Park, H.I., Koteratama, W.(2002) A Numerical and Experimental Study on Dynamics of A Towed Low-Tension Cable, *Proceed. of Twelfth Int. Offshore and Polar Eng. Conference*, Kitakushu, Japan.  
General Arrangement of Sergero(1988) KT Submarine Co.  
Kim, J.W., Chang, S.P.(2001) *Dynamic Stiffness Matrix of an Inclined Cable*, *Engineering Structures*, 23, pp.1614~1621.  
Kawaguchi, K., Iwase, R., Momma, H.(1999) Underwater Operation for Complex Deep Seafloor Observatory Using Demission Submarine Cable, *Proceed. of Ninth Int. Offshore and Polar Eng. Conference*, Brest, France.  
Cho, K.N., Yi, W.S.(2002) Development of a Dynamic Analysis Scheme of Cable for ROV Operation, *Proceed. of Twelfth Int. Offshore and Polar Eng. Conference*, Kitakushu, Japan.  
Nagatomi, O. Nakamura, M., Koterayama W. (2002) Dynamic Simulation and Field Experience of Submarine Cable during Laying and Recovery, *Proceed. of Twelfth Int. Offshore and Polar Eng. Conference*, Kitakushu, Japan.