

수중폭발로 인한 파이프의 동적 응답해석

김성범* · 이경재** · 정동호*** · 박대효****

Kim, Seongbeom* , Lee, Kyungjae** , Jung, Dongho*** , Park, Taehyo****

Dynamic Response Analysis of Pipe Subjected to Underwater Explosion

ABSTRACT

In recent years, the structural shock response to UNDEX (UNDERwater EXplosion) has been studied as much, or more, through numerical simulations than through testing for several reasons. Very high costs and sensitive environmental concerns have kept destructive underwater explosion testing to a minimum. Increase of simulation capabilities and sophisticated simulation tools has made numerical simulations more efficient analysis methods as well as more reliable testing aids. In this study, the main issue is the fluid-structure interaction. Here, appropriate relations between the acoustic pressure on the fluid surface and displacements on the structure surface are formed internally. The analysis was carried out using ABAQUS/Explicit and the results have been visualized in ABAQUS CAE. The shock loading history, acoustic pressure, stress of stand-off point, the velocity and strain energy time histories were presented.

Key words : Underwater explosion, FSI, Acoustic pressure, Shock wave, Shock response

초 록

최근 수중폭발로 인한 구조물의 충격응답에 대한 연구는 매우 높은 비용과 소요시간, 민감한 환경문제 등으로 인하여 실제 시험보다는 컴퓨터를 통한 수치해석적 연구가 활발히 진행되어 왔다. 또한 시뮬레이션의 기술 향상과 더욱 정교해진 기능들로 수치 시뮬레이션의 효율성이 증가되었을 뿐 아니라 그 신뢰성까지 증가하였다. 본 연구에서는 유체 표면의 Acoustic Pressure와 구조물 표면 변위의 적절한 관계를 다루는 구조-유체 상호작용(FSI : Fluid-Structure Interaction), 수중폭과 형태를 결정하는 유체의 깊이와 폭발물과 구조물 사이의 거리에 대한 파라미터를 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS에 적용한 시뮬레이션 값과 실험적 이론 값 비교에 중점을 두었다. 수중폭발로 인한 파이프의 충격테스트 응답 분석은 ABAQUS/Explicit을 사용하여 수행되었고, 시간이력에 따른 충격하중, Acoustic Pressure, 타격지점의 응력, 속도, 변형에너지 등 ABAQUS CAE에서 결과를 나타내었다.

검색어 : 수중폭발, 구조-유체 상호작용, 음압, 충격파, 충격응답

1. 서론

수중폭발 시뮬레이션은 무한한 유체에서 폭발하중을 받는 구조물이 수상-수중에 있을 때 이에 대한 응답을 얻어내어 실제와 같이 모사해 내는 것에 있다. 이것은 무한 유체를 사용하기 때문에 많은 연구자들은 경계요소와 유한요소법의 이점을 조합(Kwon and Fox,

* 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (sbkim@umilt.net)

** 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (htriplehh@hanyang.ac.kr)

*** 한국해양과학기술원 내덕분원 선임연구원 (dhjung@kiost.ac)

**** 정회원 · 교신저자 · 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Corresponding Author · Hanyang University · cepark@hanyang.ac.kr)

Received December 17, 2012/ revised February 12, 2013/ accepted October 28, 2013

1993, 1998; McCoy et al., 1997; Shin et al., 2004)하여 기술을 개발해왔다. 특히, 근사경계 적분 기법인 DAA (Doubly Asymptotic Approximation)는 입사파(Incident Wave) 문제와 같은 종류에 널리 사용되어 왔으며 다양한 경계 적분 프로그램이 개발되어 왔다.

FSI 효과를 접목시키기 위해서 DAA기법 등 경계요소를 적용한 유한요소 코드 개발은 Arden (1995), Hooker and Shin (1996)에 의해 연구가 수행되어 졌으며, DAA를 기반으로 한 상용 유한요소 패키지인 ABAQUS와 구조-유체 연성(FSI)을 조합한 복합재 실린더의 수중폭발 해석은 McCoy and Sun (1997)에 의해 수행되어 졌다. 또한 상용 유한요소 패키지인 ABAQUS를 이용하여 구조-유체 연성작용 현상, 압력 파 분포, 복사 경계 조건에 대한 해석이 Adamczyk (1997) and Cichocki (1994)에 의해 수행되어 졌다.

본 연구에서는 구조-유체 연성작용, 압력 파 분포 등 경계조건과 상용유한요소 프로그램인 ABAQUS/Explicit을 이용하여 수중폭발 현상 해석을 수행하였다. 이를 위해 먼저 수중 충격해석 이론 및 구조-유체 상호작용을 이용한 해석 기법에 대하여 살펴보았으며, 이를 바탕으로 유체의 깊이와 폭발물과 구조물 사이의 거리에 따른 각 케이스 별 수중폭발 충격응답해석을 수행하였고 이에 따른 비교 검증이 수행되어 졌다.

2. 수중 폭발 현상

수중폭발은 전형적으로 2가지 형태인 충격파(Shock Wave)와 가스버블 펄스(Gas Bubble Pulse)로 나뉜다. 이 2가지 충격하중 형태에 대한 수중 구조물의 충격응답(Shock Response) 특성이 매우 다르고, 또 충격하중을 동시에 고려한 구조물의 충격응답 해석은 매우 복잡하고 어렵기 때문에 일반적으로 2가지 형태의 충격하중에 대하여 개별적으로 해석이 수행되어진다. 이를 수행하기 위해서는 먼저 구조-유체 상호작용, Acoustic-유체 모델링, 폭발 하중, 공동현상 등을 자세하게 이해하고 있어야 한다.

수중폭발은 TNT나 HVX-1 (어뢰)와 같은 폭발성 물질에 의해서 일어나며 많은 양의 가스와 에너지를 발생시키고 그 결과로 충격파가 발생한다. 수중폭발 반응이 시작되면 충격파는 압력파의 형태로 폭발적으로 확산 한다. 폭발을 통해 이 압력 파동이 커지기 때문에 충격파는 더 큰 압력파를 형성하기 위해서 화학적 반응을 일으킨다. 폭발 현상은 초기 고체상에서 매우 높은 온도와 압력(약 3,000°C와 5,000MPa)에서 가스로 폭발성 물질을 변환 한다. 압력 증가는 폭발성 물질에서 파동 속도가 Acoustic 속도를 넘어설 것 이기 때문에 폭발 과정은 급속히 나타난다. Fig. 1은 폭발 후 충격파의 증가율이 급격하게 증가한 후 압력이 유체의 매질을 통해 확산 함으로써 초기 압력의 최대값이 줄어들게 되어 기하

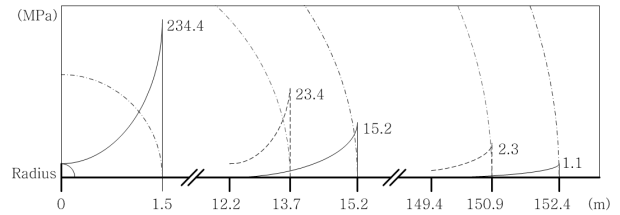


Fig. 1. Shock Wave Profiles From a 136kg TNT Charge

급수적으로 감소하는 것을 나타내고 있다(Coles, 1948).

2.1 압력-시간 유사관계

수상 혹은 수중에서의 구조물에 가해지는 수중폭발의 하중 산정을 위해서는 구조물과 폭발원(Source Point) 사이에 임의의 한 점에서 충격파의 압력-시간 이력이 반드시 필요하다. 이 점을 "타격점(Stand-off Point)이라 부르고, 이 점과 폭발원 사이의 거리를 "이격거리(Stand-off Distance)"라 한다. 해석시간을 단축하기 위해서는 Stand-off Point는 입사파가 처음으로 반응하는 구조물의 표면 또는 그 근처에 두는 것이 일반적이다(Kwon and Fox, 1993). 폭발시 압력의 감소는 아래 지수함수를 따른다.

$$P(t) = P_{max} e^{-(t/\lambda)} \quad t \geq t_1 \quad (1)$$

여기서, t 는 충격파 도착 이후의 경과 시간, λ 는 지수함수형 시간 감소 상수이다. P_{max} 와 λ 는 폭발원의 이격거리와 크기에 따라서 달라진다.

$$P_{max} = K_1 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_1} \quad (MPa) \quad (2)$$

$$\lambda = K_2 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_2} \quad (ms) \quad (3)$$

여기서, K_1, K_2, A_1, A_2 는 폭발물 재료에 대한 상수, W 는 폭발물의 질량(kg), R 은 폭발물과 폭발하중을 받는 구조물 표면 사이의 거리를 나타낸다(Coles, 1948).

2.2 폭발성 가스 버블

수중에서의 폭발 발생시 가장 먼저 폭발 자체의 충격파가 발생하고 충격파가 구조물에 처음 충격을 가한 것과 거의 동시에 물속에서 고온 고압의 버블형태로 이루어진 가스가 발생하여 뒤따른다. 이 원형 가스 버블은 내부 압력이 그 주변 유체의 정수압 아래로 떨어질 때까지 계속 팽창 한다. 이 기간 동안 실제로 버블은 그

팽창의 탄력으로 인해서 평행상태보다 더욱 팽창하게 된다(Geers et al., 2002). 아래 Eqs. (4) and (5)를 통해서 가스 버블 기간과 최대 버블 반경을 계산 할 수 있다.

$$T = K_5 \frac{m_c^{1/3}}{(D+10.06)^{5/6}} \quad (s) \quad (4)$$

$$a_{max} = K_6 \frac{m_c^{1/3}}{(D+10.06)^{1/3}} \quad (m) \quad (5)$$

여기서, T 는 가스 버블 주기(sec), a_{max} 는 버블이 도달 할 수 있는 최대 반경(meter), m_c 는 폭발물의 질량(kg), D 는 폭발물의 깊이(meter), K_5 와 K_6 은 폭발물 종류에 따른 고유 상수이다(Shin et al., 2004).

이 가스버블은 Cavity 또는 Steam Void라고 하며 폭발로 생성된 공기 방울의 일종으로서 온도와 압력이 매우 높은 상태이다. 이 가스 버블이 높은 압력으로 물을 밀어내면서 커지면 그 물이 구조물에 빠른 속도로 부딪치며 유체에 의한 압력파를 구조물에 가하게 된다. 일단 생성된 버블은 팽창과 수축을 반복하며 각 반복 과정에서 버블 파동이 발생한다.

또한 버블의 팽창과 수축이 반복되어 일어나면 물 속에서 0에 가까운 절대 압력(대략 206.8 Pa)의 영역이 생성되고, 이때 캐비테이션이 발생한다. 캐비테이션이란 수중에서 유체의 속도가 증가할 때 유체에 접촉해 있는 구조물 표면 주변의 압력이 낮아지게 되고 이에 따라 유체가 밀도가 낮은 수증기로 바뀌게 된다. 이러한 현상에 의해 수중에 빈 공간이 만들어진 것과 같아지는 물리적 변화 현상을 말한다. 이것은 크게 저압의 큰 영역을 이루는 ‘광역 캐비테이션’과 보통 FSI 표면에서 관찰되는 저압의 작은 영역을 이루는 ‘국부 캐비테이션’ 2가지 타입으로 나뉜다.

ABAQUS는 UNDEX 하중을 해결 하기 위해서 Geers-Hunter 를 이용한 내부 역학적 모델을 포함하고 있다. 그것은 해석에 앞서 Stand-off Point에 압력 변화율을 규정하는데 Fourth-Order Runge-Kutta 적분 연산을 사용한 후 압력 변화율을 해석에 사용한다. 이러한 과정을 통해서 버블의 진동 효과를 분석할 수 있다.

2.3 수중폭발 매개변수

수중폭발은 유체 표면의 국부적 소란과 방사형으로 확산되는 표면충격파를 발생시킨다. 폭발시 발생하는 유체 파동의 특성은 폭발성 물질과 유체 매질에 매개변수 수에 따라서 매우 다른 양상을 보인다. 첫 번째 매개변수는 폭발성 물질의 질량(W)이다. 수중폭발의 경우 폭발성 물질의 질량에 따라서 구조물에 매우 다양한 영향을

끼친다. 또한 TNT, 핵 등 폭발성 물질은 각각 다른 질량 계수를 가지고 있으며, 실제 실험을 목적으로 하는 경우 보통 질량 계수로 0.8을 사용한다. 두 번째 중요한 매개변수는 폭발성 물질 중앙에서 자유표면까지의 거리를 나타내는 폭발 깊이(Z)이다. 폭발 매개변수의 깊이는 $Z = z / W^{1/3}$ 으로 보통 정의하며, $Z = z / W^{1/4}$ 과 $Z = z / W^{0.3}$ 또한 사용된다. 여기서, W 는 폭발물의 질량을 나타낸다. 세 번째 매개변수는 파동생성 과정의 효율성에 영향을 미치는 유체의 깊이(d)이다. 만약 유체의 깊이가 얕다면, 유체바닥 면에서 폭발작용으로 인해 가스버블이 발생한 경우 파동 영역 생성에 영향을 줄 수도 있다. 앞에서 언급한 폭발물의 질량과 폭발 깊이, 유체의 깊이 등 깊이 매개변수의 관점에서 아래와 같이 분류할 수 있다.

$$D = \frac{d}{W^{1/3}}$$

1. Deep Water Explosion

$$D > 14$$

2. Intermediate Depth Explosion

$$1 < D < 14$$

3. Shallow Water Explosion

$$D < 1$$

Deep water explosions의 경우 연못에 자갈을 던져서 생성된 파동과 유사하게 유체 깊이에 비해 유체 표면의 폭발 분화구는 작다. 이것은 해저 면으로부터 특정 거리의 선형 이론으로 나타낼 수 있다. 과거 deep water explosion의 기준은 $D > 6$ 으로 간주되었다. 과거에 비해 최근 deep water explosion의 기준이 바뀐 것은, 파동 생성 메커니즘이 처음에 생각했던 것보다 유체 깊이에 대한 매개변수 값이 더 크게 영향을 끼치기 때문이다. Shallow water explosions의 경우 유체의 깊이가 폭발 분화구의 크기에 비해 작고, 바닥면의 노출, 파동 생성 메커니즘의 비선형, 높은 소산률 등 deep water explosion과는 매우 다르다. 위에서 언급한 것 이외에 폭발물 중심에서 구조물까지의 이격거리(R)도 매우 중요한 매개변수 중 하나이고, 이외에도 폭발에 관한 여러 다른 매개변수들이 존재한다.

2.4 Acoustic-구조 결합

수중폭발 해석시 ALE 기법이나 Acoustic 기법을 사용하여 유체영역을 무한요소로 만들어 주는 것이 일반적이다. 본 논문에서

는 유체영역에 Acoustic 기법을 사용하여 파이프와 결합된 구조로 해석이 진행 되었다. 아래 Fig. 2는 Acoustic 경계요소에 대해서 나타내고 있다.

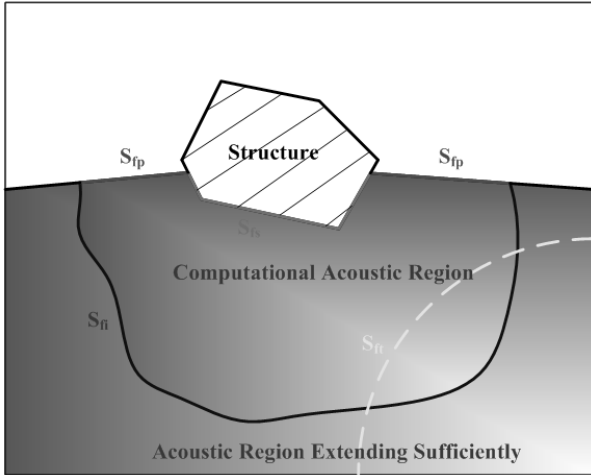


Fig. 2. Acoustic-Structural Boundary Elements

여기서, S_{fp} 는 수중폭발에서 이미 규정된 Acoustic Pressure 값 P 위에 존재하는 표면을 나타낸다. 이 표면은 자유표면으로 Acoustic Pressure 값은 대기압과 같다. S_n 는 유체 입자의 움직임을 미리 규정하여 폭발물의 폭발로 인한 구면 충격파를 모델링 하는데 사용된다. 또한 Acoustic Sources, 방음벽, Incident Wave 분야에서 주로 적용된다. S_n 는 'Radiating Acoustic Boundary'라고도 하며, 수중폭발 현상의 경우 종종 무한요소에서 Acoustic Medium 은 해석 영역을 불필요하게 크게 확장한다. 이런 경우 계산 영역을 자르고 경계 조건을 줄여서 적용 가능하도록 한다. S_n 는 Acoustic Medium의 거동과 구조물의 거동이 직접적으로 결합한 위치를

나타낸다. Acoustic-구조물 경계에서 Acoustic과 구조물은 동일한 수직변위를 갖지만 접선방향 거동은 결합되지 않는다.

3. 수중 폭발 시뮬레이션

본 논문에서는 수중에 있는 파이프를 대상으로 해석이 진행 되어졌으며, Fig. 3는 해석 대상 모델의 모습을 보여주고 있다. 파이프는 보다 정확한 값을 얻기 위해서 실제 크기로 모델링 하였고 유체 영역은 파이프 모델을 충분히 포함할 수 있도록 크게 모델링 하였다. 수중폭발 후 폭발압력은 유체를 매개체로 압력이 파이프에 전달되므로 유체요소는 Acoustic Elements를 사용하였고 파이프는 Lagrangian Elements를 사용하였다.

본 논문에서는 Shallow 수중폭발과 Deep 수중폭발현상을 구별 하는 가장 큰 요소인 유체의 깊이(d m), 폭발원과 구조물 사이의 거리(R)를 매개변수로 두고 총 9개의 경우에 대해서만 고려하였고, 각각에 대한 매개변수는 아래 Table 1과 같다. 즉, 유체의 깊이

Table 1. The Parameter of the Underwater Explosion Event Model

Water Depth (m)	D	Stand-off Distance (m)
1	0.96	1
		10
		30
10	9.56	1
		10
		30
50	47.82	1
		10
		30

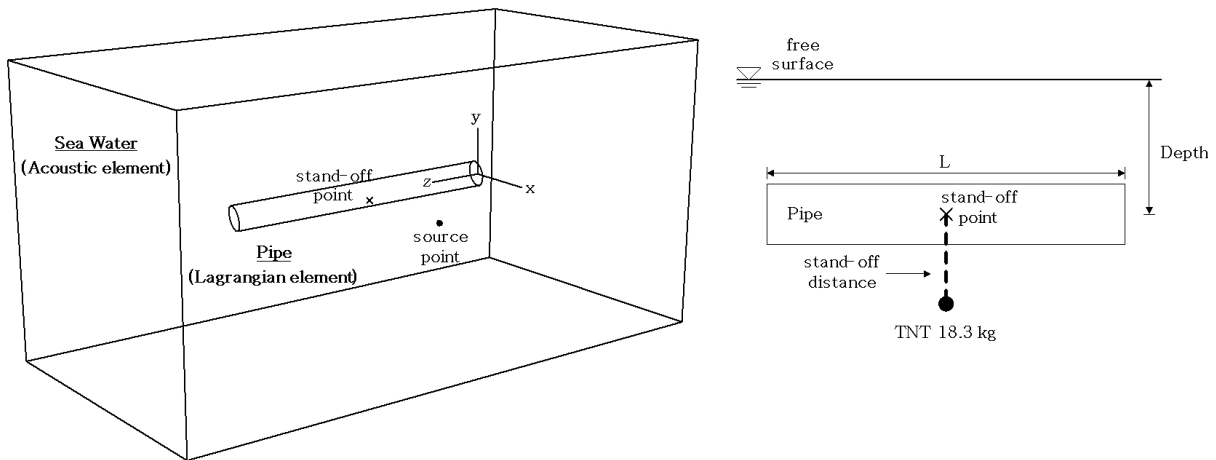


Fig. 3. Arrangement of Cylindrical Shell under Underwater Explosion

Table 2. TNT Underwater Explosion Parameters

Variable	Value
K_1	52.12
K_2	0.0895
A_1	1.180
A_2	-0.185
W	18.3 kg

1m, 10m, 50m 각 경우에 대해서 이격거리는 1m, 10m, 30m를 설정하였고, TNT의 질량 18.3kg과 유체 바닥에서 파이프까지의 거리는 0.5m로 동일하다. 본 연구에서는 TNT가 폭발한 후 압력과 파이프가 발생했을 때 파이프주변 유체와 파이프에 미치는 영향에 대해서만 고려 하였다.

Table 1의 이격거리와 TNT에 대한 파라미터(Table 2)를 Eqs. (1)-(3)에 적용하면 타격점에 도달하는 압력프로파일(P_{max} 와 λ)을 케이스별로 각각 얻을 수 있다.

3.1 유체 및 파이프 모델

본 논문에서는 수중에 있는 파이프를 대상으로 해석이 진행 되었다. 파이프 모델은 심층수 파이프에 사용되는 규격인 두께 45mm, 길이 30m의 실제 크기로 모델링 하였고, 유체 영역은 매개변수인 유체의 깊이와 Stand-off Distance에 따라서 각 케이스 별 모델링 하여 파이프 모델을 충분히 포함할 수 있도록 크게 모델링 하였다. 수중폭발 후 폭발압력은 유체를 매개체로 압력이 파이프에 전달되므로 유체요소는 Acoustic Element를 사용하였고 파이프는 Lagrangian Element를 사용하였다.

파이프의 경우 Fig. 4와 같이 4-Noded S4 Shell Elements Type과 12,390개의 Elements를 사용 하였고 파이프의 길이 L은 30m, 직경 D는 0.34m이다.

유체의 유한요소 모델은 4-Noded AC3D4 Acoustic Tetrahedral Elements를 사용하였다. 유체에 Acoustic Elements를 사용한 이유는 ABAQUS에서는 유체 모델 바깥쪽 표면으로 반사되는 압력파를 방지하기 위한 것으로 이 표면을 따라 무반사 경계 조건을 구현 할 수 있기 때문이다. 이 무반사 경계조건은 Fig. 5와 같이 유한한 크기의 유체모델이 실제로 무한한 유체 영역에 거의 가까운 조건이 되도록 허용 한다.

ABAQUS에서 본 연구에 사용된 파이프와 유체 물성치는 Table 3 and 4와 같다.

3.2 수중 폭파 모델 해석

파이프는 Fig. 6에서 나타나듯이 유체의 깊이 d m에서 표면으로부터 Z m에 위치해 있고, 이격거리 R m의 위치에서 폭약(18.3

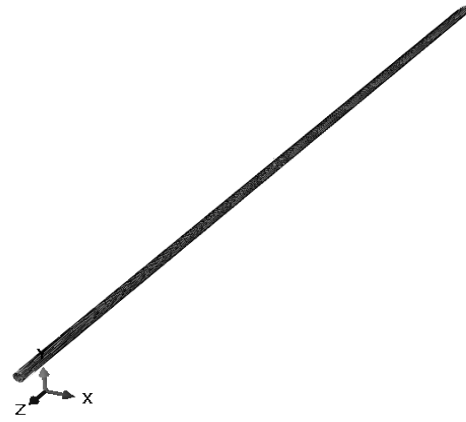


Fig. 4. Finite Element Model of Pipe Structure

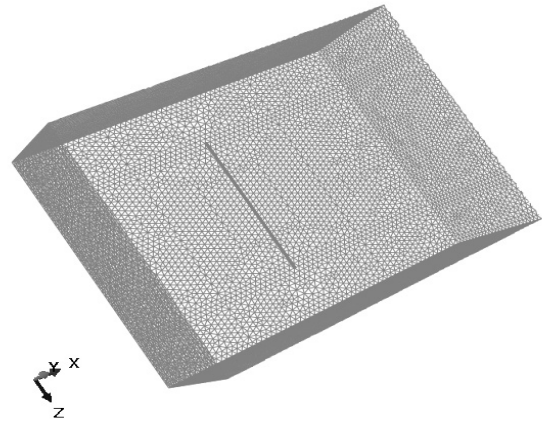


Fig. 5. Cutaway View of Fluid Surrounding Pipe (Finite Element Model)

Table 3. Properties of Steel

Density (ρ)	7,860 kg/m ³
Modulus of elasticity (E)	210 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.24
Yield stress (σ_y)	276 MPa
Ultimate stress (σ_u)	758 MPa

Table 4. Properties of Water

Property	Value
Fluid Density (ρ_f)	1,027 kg/m ³
Fluid Speed (c)	1,533 m/s
Bulk Modulus ($K_f = \rho_f c^2$)	2.414 GPa

kg of TNT)이 폭발하는 것으로 가정한다. 본 연구에서는 TNT가 폭발한 후 압력 파가 발생했을 때 파이프주변 유체와 파이프에 미치는 영향에 대해서만 고려하였다.

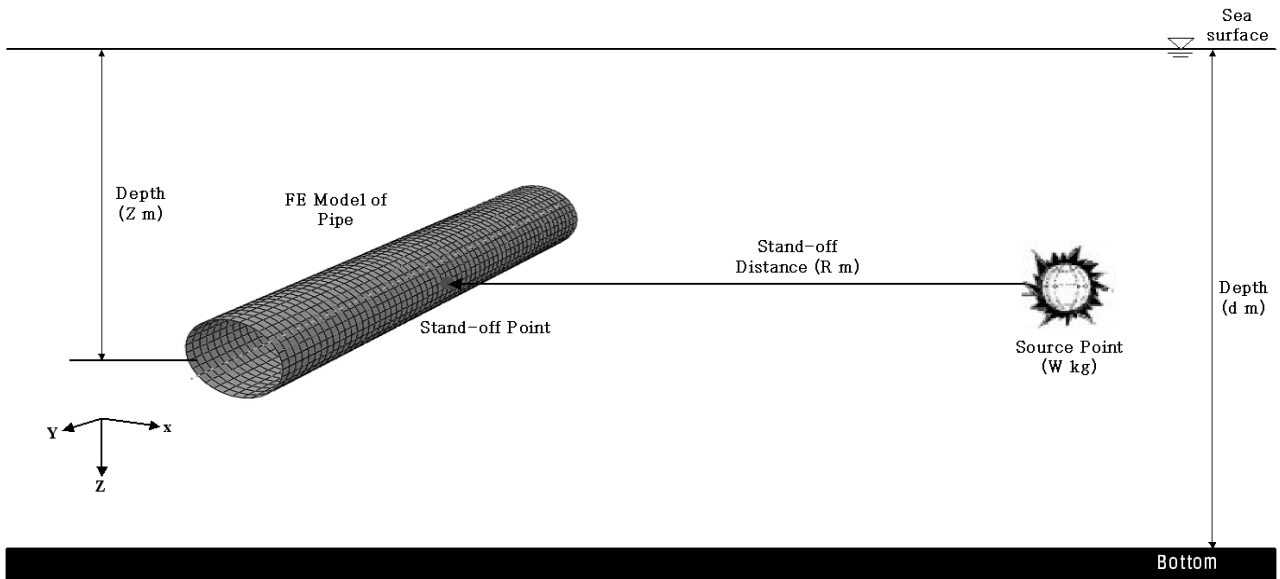


Fig. 6. Design Underwater Explosion Event

Table 5. TNT Underwater Explosion Parameters

Variable	Value
K_1	52.12
K_2	0.0895
A_1	1.180
A_2	-0.185
W	18.3 kg

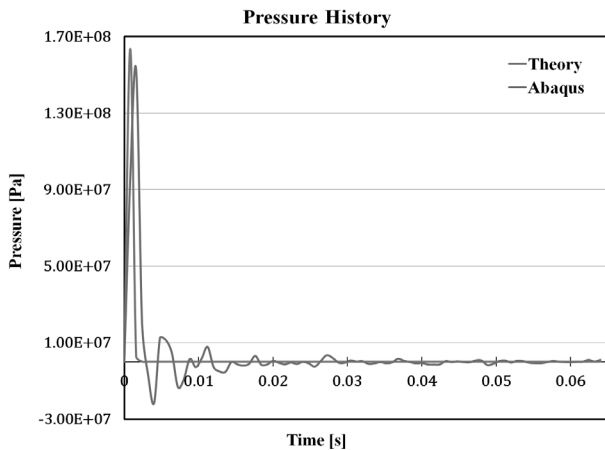
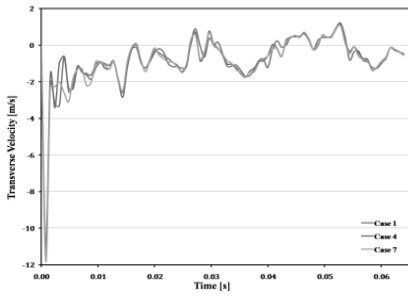


Fig. 7. Comparison of Pressure Profile about one meter of Stand-off Distance (Theory vs. ABAQUS)

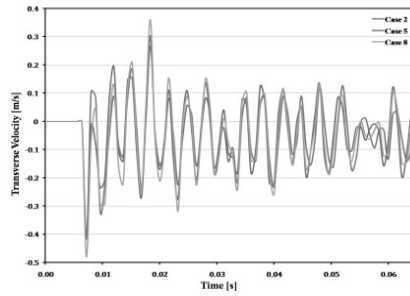
TNT에 대한 파라미터(Table 5)를 Eqs. (1)~(3)에 적용하면 타격점에 도달하는 압력프로 파일 P_{max} 와 λ 을 얻을 수 있다. 위 방법을 본 문제에 적용하면, 이격거리 1m에 대해서 $P_{max} =$

163.52Mpa와 $\lambda = 0.1971ms$, 이격거리 10m에 대해서 $P_{max} = 10.8Mpa$ 와 $\lambda = 0.3018ms$ 그리고 이격거리 30m에 대해서는 $P_{max} = 2.96Mpa$ 와 $\lambda = 0.3699ms$ 을 얻을 수 있다. Fig. 7은 이격거리 1m에 대해서 Stand-off Point와 Source Point 사이에서 시간에 대한 압력 비로 이론적 값과 ABAQUS상의 값을 비교한 것이다. 이론적 값의 최대 입력 값($P_{max} = 163.52Mpa$)이 ABAQUS상의 최대 입력 값($P_{max} = 152.45Mpa$)보다 크게 나타났다. 또한, 해석 중간에 더미값이 나타났다. 이것은 파이프의 위치가 유체 바닥 면에 가깝기 때문에 폭발과정에서 유체 바닥 면에 가스버블이 발생을 했고, 그로 인해 파동 영역 생성에 영향을 주었기 때문이다. 파이프와 유체 바닥 면의 인접함으로 인한 파동 영향은 아래 결과값 들로부터 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 7은 ABAQUS를 이용해서 수중폭과 시뮬레이션을 충분히 수행할 수 있다는 것을 나타낸다.

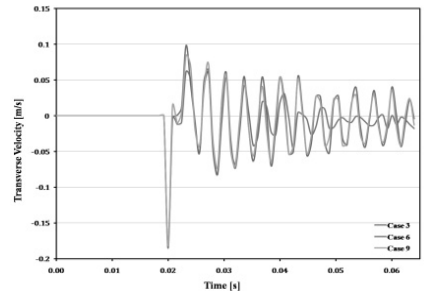
Fig. 8(a)-(d), (e)-(h), (i)-(l)은 shallow, intermediate, deep UNDEX 케이스의 이격거리에서 축방향과 횡방향에 대한 속도와 변위를 나타낸다. 이것은 횡모드와 축모드에 관련된 주기적 응답과 파이프 거동의 대부분이 초기 폭발 현상에서 발생한다는 것을 나타낸다. 또한 이 그래프를 통해 최대응력 값을 얻을 때 까지 시뮬레이션이 되었는가를 판단할 수 있다. Fig. 8(a)-(d)의 경우, 충격파가 파이프에 처음 도달했을 때 케이스 1과 케이스 4는 대체로 시간에 따라서 유사한 거동을 하나, 케이스 7의 경우 폭발 초기에는 앞에 두 케이스와 다른 거동을 하다가 시간이 지남에 따라 유체 깊이와 무관하게 유사한 거동을 하는 것이 나타난다. 종축에 대해서 거동은 매우 미세하기 때문에 전체적인 구조물의 거동에는 큰 영향을 끼치지 않는 것이 나타난다. 케이스 2, 5, 8의 거동을



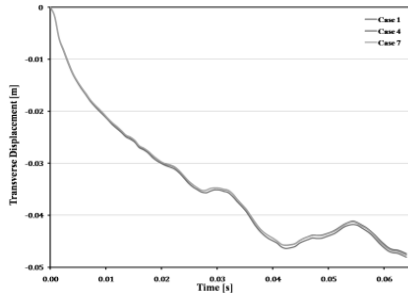
(a) Transverse Velocity at Stand-off Point (Cases 1, 4, 7)



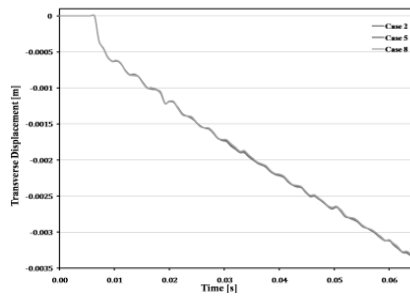
(e) Transverse Velocity at Stand-off Point (Cases 2, 5, 8)



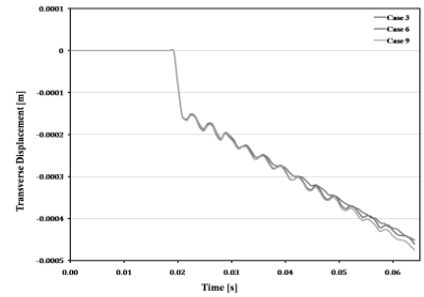
(i) Transverse Velocity at Stand-off Point (Cases 3, 6, 9)



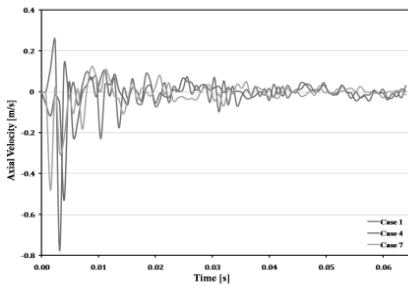
(b) Transverse Displacement at Stand-off Point (Cases 1, 4, 7)



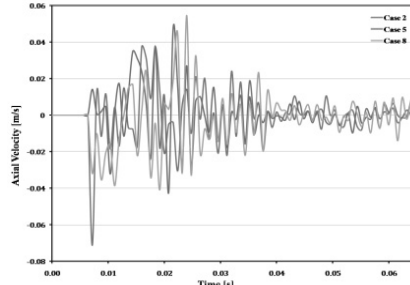
(f) Transverse Displacement at Stand-off Point (Cases 2, 5, 8)



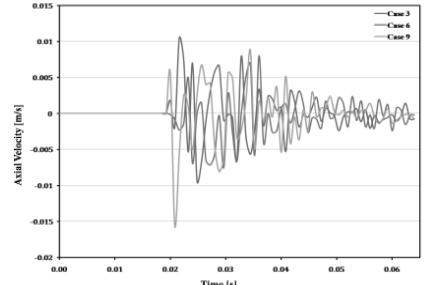
(j) Transverse Displacement at Stand-off Point (Cases 3, 6, 9)



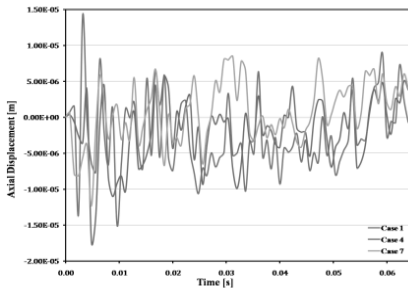
(c) Axial Velocity at Stand-off Point (Cases 1, 4, 7)



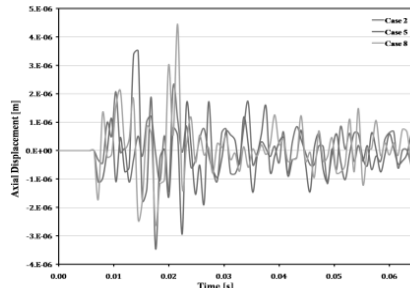
(g) Axial Velocity at Stand-off Point (Cases 2, 5, 8)



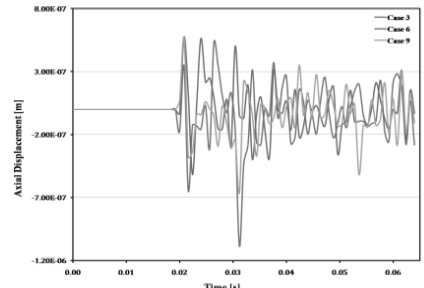
(k) Axial Velocity at Stand-off Point (Cases 3, 6, 9)



(d) Axial Displacement at Stand-off Point (Cases 1, 4, 7)



(h) Axial Displacement at Stand-off Point (Cases 2, 5, 8)



(l) Axial Displacement at Stand-off Point (Cases 3, 6, 9)

Fig. 8. Behavior of the Pipe Center subjected to UNDEX

나타내는 Fig. 8(e)-(h)의 경우, 횡/종축에 대해서 매우 유사한 거동이 나타난다. 케이스 3, 6, 9의 거동을 나타내는 Fig. 8(i)-(l)의 경우, 횡/종축에 대해서 초기에는 매우 유사한 거동을 하다가 케이스 3의 거동이 다른 케이스에 비해 작아지는 것을 나타낸다.

4. 결론

본 논문에서는 UNDEX 이론에 대해서 설명하였고, 이를 바탕으로 UNDEX 하중을 받는 강제파이프의 실제 사이즈 모델에 대해서

매개변수법을 이용하여 거동응답해석을 수행하였다.

이론식에 따른 충격과의 경우 ABAQUS에 비해 시간에 따른 압력이 매우 부드러운 곡선을 그리지만, ABAQUS에서는 최초 폭발직후 더미 값이 발생하는 것이 나타난다. 이것은 파이프가 유체 바닥면이나 유체 표면과 가까운 경우에 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 폭발원과 구조물 사이의 거리가 가까운 경우 이론값과 유사한 거동을 하나, 이격거리가 10m 이상, 폭발 깊이가 깊은 경우 압력이 이론값보다 대체로 크게 발생하는 것이 나타난다. 또한 바닥면의 영향으로 인해서 폭발 후 압력과 거동의 변화가 심하게 나타난다. 위 결과로 보아 이격거리가 짧을 수록 이론 값과 매우 유사한 결과를 얻을 수 있다는 것을 나타낸다.

향후 Acoustic Element 뿐 아니라 ALE (Arbitrary Eulerian-Lagrangian) 기법을 적용하여 두 기법의 경계조건에 따른 UNDEX 현상에 대해서 비교분석 하여 충격파와 가스버블이 구조물에 끼치는 다양한 영향을 고려한 비교분석을 수행 할 것이다. 또한 ABAQUS 프로그램의 장점인 재료정의 즉, UMAT (User Material Subroutine) Code 개발로 폭발하중을 받는 재료특성을 고려 함으로써 실제 UNDEX 현상에 가까운 거동응답 모사를 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 지원하는 “해양심층수의 에너지 이용기술 개발”성과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

References

ABAQUS, *Example Problems Manual*, Version 6.11.
ABAQUS, *Theory Manual*, Version 6.11.

- Adamczyk, R. and Cichocki, K. (1997). “Analysis of the shock response of an underwater structure subjected to a far-field explosion.” *Proceedings of ABAQUS Users' Conference*, Milan, Italy, pp. 73-87.
- Arden, K. E. (1995). “Use of MSC/NASTRAN in predicting structural response to an underwater explosion.” *MSC 1995 World Users' Conference Proceedings*, California, p. 51.
- Cichocki, K. (1994). “Computer analysis of dynamic response due to underwater explosion on hybrid structure.” *Proceedings of ABAQUS Users' Conference*, Newport, pp. 207-220.
- Coles, R. H. (1948). *Underwater explosions*, Princeton University Press, Princeton.
- Geers, T. L. and Hunter, L. S. (2002). “An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble.” *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 111, pp. 1548-1601.
- Kwon, Y. W. and Cunningham, R. E. (1998). “Comparison of USA-Dyna finite element models for a stiffened shell subject to underwater shock.” *Computers and Structures*, Vol. 66, pp. 127-144.
- Kwon, Y. W. and Fox, P. K. (1993). “Underwater shock response of a cylinder subjected to a side-on explosion.” *Computers and Structures*, Vol. 48, pp. 637-646.
- McCoy, R. W. and Sun, C. T. (1997). “Fluid-structure interaction analysis of a thick section composite cylinder subjected to underwater blast loading.” *Composite Structures*, Vol. 37, pp. 45-55.
- Shin Y. S. (2004). “Ship shock modeling and simulation for far-field underwater explosion.” *Computers and Structures*, Vol. 82, pp. 2211-2219.
- Shin, Y. S. and Hooker, D. T. (1996). “Damage response of submerged imperfect cylindrical structures to underwater explosion.” *Computers and Structures*, Vol. 60, pp. 683-693.