

## 수중폭발 충격파와 가스구체 압력파를 함께 고려한 구조물의 동적응답해석

이상갑<sup>+</sup>, 권정일<sup>\*\*</sup>, 정정훈<sup>\*\*</sup>

한국해양대학교 조선해양시스템공학부<sup>\*</sup>, 한국기계연구원 e-엔지니어링 센터<sup>\*\*</sup>

Integrated Structural Dynamic Response Analysis  
considering the UNDEX Shock Wave and Gas Bubble Pulse

Sang-Gab Lee<sup>+</sup>, Jeong-Il Kwon<sup>\*\*</sup> and Jung-Hoon Chung<sup>\*\*</sup>

Korea Maritime University, Division of Naval Architecture and Ocean System Engineering<sup>\*</sup>  
Korea Institute of machinery & Materials, e-Engineering Research Center<sup>\*\*</sup>

### Abstract

Two typical impact loadings, shock wave and gas bubble pulse, due to UNDEX(UNDERwater EXplosion), should be considered together for the closest response analysis of structure subjected to UNDEX to a reality. Since these two impact loadings have different response time bands, however, their response characteristics of structure are different from each other. It is impossible to consider these effectively under the current computational environment and the mathematical model has not yet been developed. Whereas Hicks model approximates the fluid-structure interaction due to gas bubble pulse as virtual mass effect, treating the flow by the response of gas bubble after shock wave as incompressible ideal fluid contrary to the compressible flow due to shock wave, Geers-Hunter model could make the closest response analysis of structure under UNDEX to a real one as a mathematical model considering the fluid-structure interaction due to shock wave and gas bubble pulse together using acoustic wave theory and DAA(Doubly Asymptotic Approximation). In this study, the application and effectiveness of integrated dynamic response analysis of submerged structure was examined with the analysis of the shock wave and gas bubble pulse together.

※Keywords: UNDERwater EXplosion(수중폭발), Shock wave(충격파), Gas bubble pulse(가스구체 압력파), Hicks model, Geers-Hunter model, Integrated structural dynamic response analysis(통합 구조물 동적응답해석)

### 1. 서론

수중폭발(UNDEX; UNDerwater EXplosion)에 의한 2가지 충격하중 즉, 충격파(shock wave)와 가스구체 압력파(gas bubble pulse)에 대한 선체 구조의 충격응답(shock response) 특성이 매우 다르기 때문에 수중폭발에 의한 함정 선체의 응답 해석은 현재까지는 2가지 충격하중에 대하여 개별적으로 수행되고 있다(권정일 등 2005a, 2005b, 2005c, 2005d, 이상갑 2003). 충격파에 의한 전선(whole ship) 충격응답 해석은 국부구조의 충격 손상 발생여부 검토 및 주요 탑재장비 지지부 위치에서의 충격응답 취득 관점에서, 가스구체 압력파에 의한 선체거더의 휘핑응답해석(whipping response analysis)은 선체거더의 종강도 안전성 검토 관점에서 수행된다(권정일 등 2005c, 2005d). 최근 Geers and Hunter(1996, 2002)가 충격파와 가스구체 압력파를 동시에 고려할 수 있는 가스구체 해석모델인 Geers-Hunter Model을 제시한 바 있지만 아직까지는 이의 유용성의 구조물의 충격응답 관점에서는 검증이 되지 않은 상태이다(정정훈 2003).

본 논문에서는 Geers-Hunter Model에 대하여 기존의 휘핑응답해석에 사용하고 있는 가스구체 거동해석 모델인 Hicks Model(Hicks 1970)과의

가스구체 특성을 비교하고, 동일한 수중 구조물에 대하여 휘핑응답 특성을 비교하였다. 또한 초기 충격파의 영향을 고려하기 위해 기존의 충격응답 해석기법을 사용한 응답결과를 비교하여 수중폭발에 의한 2가지 상이한 충격하중에 대하여 동시에 해석할 수 있는 통합 해석 기법을 제시하고자 한다.

### 2. 해석 조건 및 방법

자유필드(free field)에서의 2가지 가스구체 거동해석 모델에 대한 가스구체의 거동 특성의 파악과 수중 구조물의 충격응답해석 및 휘핑응답해석을 위한 폭발위치는 Fig. 1과 같다. 여기서 가장 큰 충격응답 및 휘핑응답을 유발시키는 경우인 구조물의 중앙 단면 직하에서 폭발이 일어나는 경우만 고려하였다. 본 연구의 2가지 가스구체 거동해석 모델에 대한 휘핑응답 특성과 초기 충격파의 영향을 검토하기 위하여 Fig. 2에서와 같이 대체로 간단한 수중 실린더 구조물을 고려하였다. 2개의 내외 실린더에 종방향과 횡방향으로 보강재가 보강되어 있으며 대칭조건에 의해 오른쪽 절반만 응답해석을 수행하였다. 여기서는 수중폭발 충격응답 해석에 널리 사용되고 있는 상용 프로그램의 하나인 LS-DYNA/USA(Shin and DeRuntz 1996,

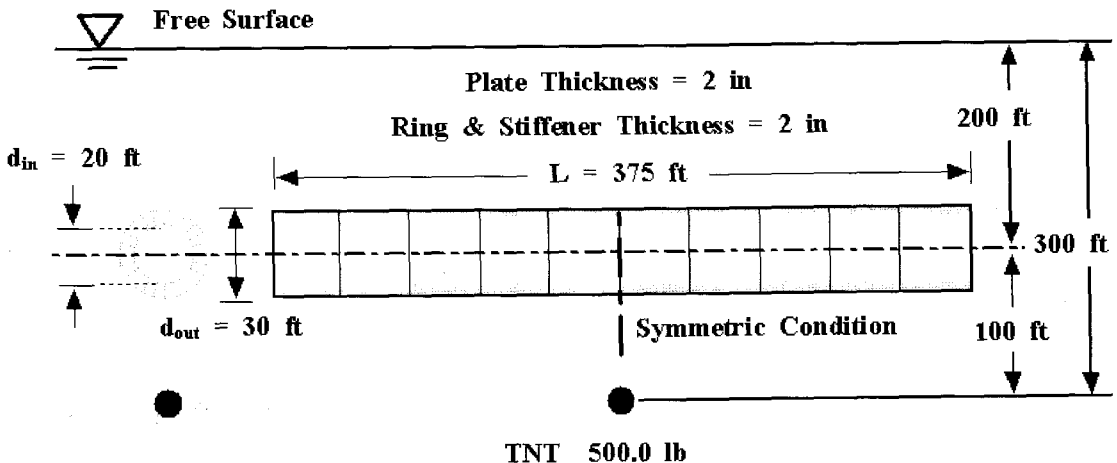
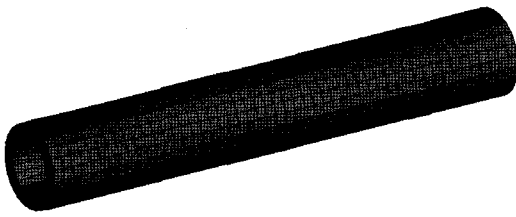


Fig. 1 UNDEX attack geometry



(a) whole F.E. model



(b) inside stiffener F.E. model

Fig. 2 Finite element configuration of half symmetric cylinder structure

이상갑 등 2003)를 사용하였으며, 또한 이 code에 포함된 2가지 가스구체 모델을 사용하였다.

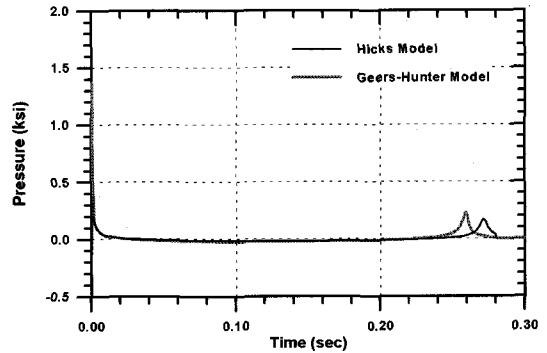
현재 사용되고 있는 Hicks Model은 가스구체의 맥동운동 1차 주기 동안에 대해서만 비교적 정확한 결과를 주는 것으로 알려져 있기 때문에, 본 연구에서도 2개의 모델에 대하여 1차 가스구체 압력파에 의한 충격하중만을 고려하였다. 또한, 본 연구에서 고려중인 폭발조건에 대하여 계산된 가스구체의 1차 맥동주기가 0.3초 이내임을 감안하여 수중 구조물의 휘핑응답 특성을 충분히 파악할 수 있다고 판단되는 2.0초 동안의 휘핑응답만을 계산하였다. 그리고 모든 해석에 있어서 감쇠의 영향은 무시하였다.

### 3. 자유필드에서의 가스구체 거동

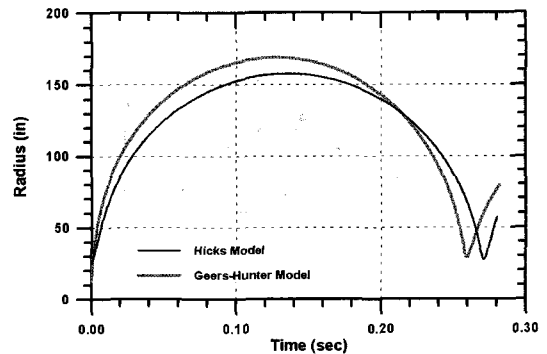
Fig. 3은 수중 구조물을 고려하지 않은 자유필드에서 수중폭발 현상에 있어 2가지 가스구체 모델인 Hicks Model과 Geers-Hunter Model에 대한 가스구체의 1차 맥동운동 동안의 가스구체 거동 특성과 그로 인한 충격파의 이력을 보여주고 있다.

Fig. 3(a)에서와 같이 Geers-Hunter Model은

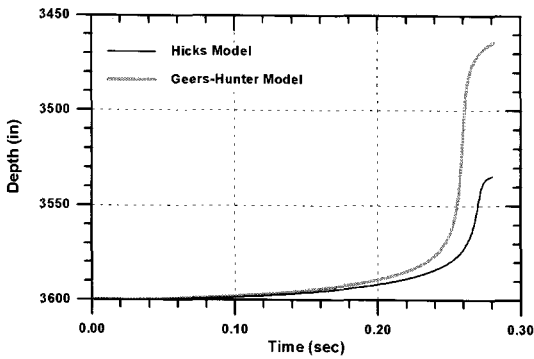
앞에서 언급한 바와 같이 Hicks Model과 달리 초기 충격파를 고려하고 있고 초기 충격파의 최대 압력값(peak pressures)은 경험식에서 계산한 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 맥동운동 1차 주기에서 가스구체가 붕괴되면서 발생하는 가스구체 압력파도 Geers-Hunter Model이 Hicks Model에 비해 약간 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이 Geers-Hunter Model은 Hicks Model에 비하여 맥동운동 1차 주기에서 가스구체의 최대반경과 붕괴 시의 최소반경 모두 약간 더 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 3(c)와 (d)에서 알 수 있듯이 Geers-Hunter Model은 Hicks Model에 비하여 가스구체의 1차 주기에서의 붕괴 시 수직상승 속도와 상승 깊이가 훨씬 더 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 차이는 연속적인 주기에서의 2가지 가스구체 모델에서의 거동에 비해서는 거의 차이가 없다고 볼 수 있다.



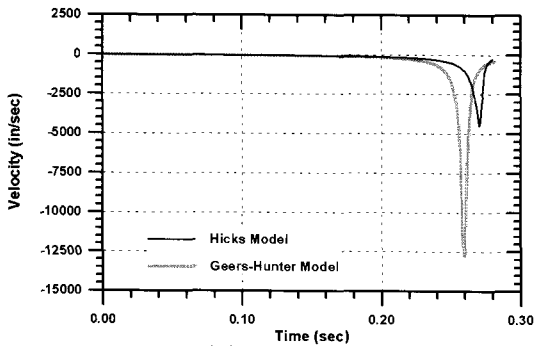
(a) pressure



(b) radius



(c) depth



(d) velocity

Fig. 3 Responses of gas bubbles during the 1st period

4. 구조물의 충격 및 휘핑응답해석

Fig. 4에서와 같이 일반적인 충격응답해석에 사용되는 초기 충격파와 Geers-Hunter Model의 초기 충격파는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 초기 충격파를 Fig. 1에서와 같이 수중 구조물에 가했을 때의 충격하중으로 인한 구조물 중앙 하단부에서의 응력과 수직방향 속도의 시간 이력은 Fig. 5와 6과 같다. 또한 Fig. 7에서의 시간 1.0 msec일 때 각 경우에 대한 구조물 중앙 하단부에서의 응력의 분포에서 알 수 있듯이 Geers-Hunter Model의 초기 충격파에 의한 충격응답은 초기 충격파의 영향만 고려한 충격응답의 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

수중 구조물의 휘핑응답해석을 위해 Fig. 3(a)에서와 같이 2가지 가스구체 모델의 맥동운동 1차 주

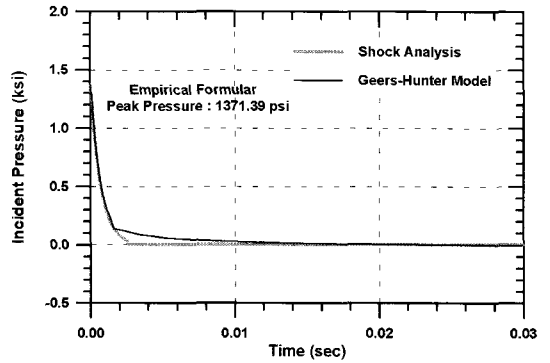


Fig. 4 Time histories of incident shock wave

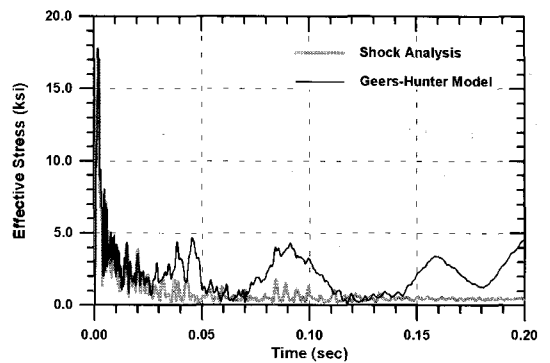


Fig. 5 Stress responses at the center bottom of cylinder

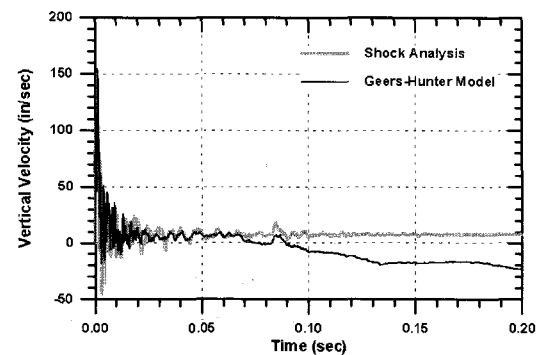


Fig. 6 Vertical velocity responses at the center bottom of cylinder

기 동안의 가스구체 압력파에 의한 충격하중만을 고려하였다. Fig. 8은 2가지 가스구체 모델에 의

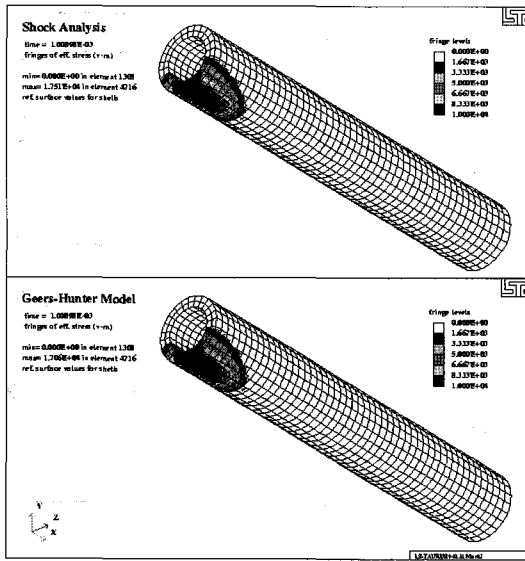


Fig. 7 Stress distribution configurations at the bottom of cylinder( $t = 1.0$  msec)

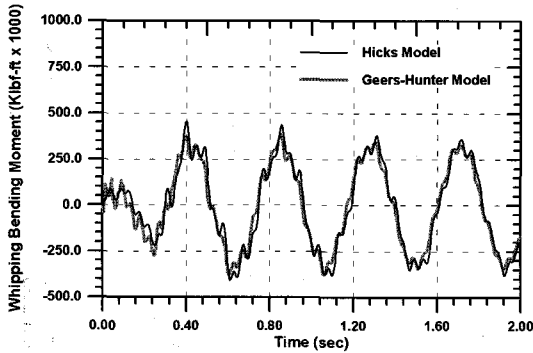


Fig. 8 Whipping moment responses at the center section of cylinder

한 구조물의 중앙부에서의 휘핑 굽힘모멘트의 응답을 보여주고 있다. 이러한 응답 특성은 대표적인 상하방향 1차 고유진동모드인 2절 진동모드를 보여주고 있으며, 맥동운동 1차 주기 동안의 2가지 가스구체 모델에 대한 수중 구조물의 휘핑 응답은 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결론

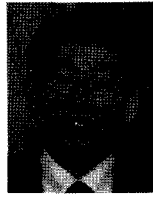
본 연구에서는 충격파와 가스구체 압력파를 동시에 고려할 수 있는 Geers-Hunter Model에 대하여 간략히 검토하고, 현재 수중폭발로 인한 충격해석에 있어 초기 충격파의 영향으로 인한 충격응답해석과 가스구체 압력파로 인한 휘핑응답해석을 나누어 해석하여 오던 것을 통합된 단일 응답 해석만으로도 가능함을 비교적 간단한 수중 구조물을 통해 검증하였다. 하지만 자유수면으로 인한 광역 캐비테이션을 고려해야 하는 부유 구조물의 충격응답해석에 대해 아직 Geers-Hunter Model을 이용한 주변유체를 고려할 수 있는 해석기법이 개발되어 있지 않아서 현재 적용하기 어렵지만 잠수함과 같은 수중 구조물의 충격응답해석에서는 매우 유용한 해석기법이라고 판단된다.

### 참 고 문 헌

- 권정일, 이상갑, 정정훈, 2005a, "MIL-S-901D 부유식 충격시험기의 충격응답해석," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 5호, pp. 493-498.
- 권정일, 이상갑, 정정훈, 2005b, "이중 탄성지지 주기관 모듈의 MIL-S-901D 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 5호, pp. 499-505.
- 권정일, 정정훈, 이상갑, 2005c, "해석모델링 방법에 따른 선체거더의 수중폭발 휘핑응답해석," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 6호, pp. 631-636.
- 권정일, 정정훈, 이상갑, 2005d, "휘핑계수-수중폭발 가스구체 압력파 크기의 척도," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 6호, pp. 637-643.
- 이상갑, 권정일, 정정훈, 2003, "캐비테이션을 고려한 부유구조물의 3차원 수중폭발 충격응답 해석," 대한조선학회 논문집, 제40권, 제 6호, pp. 1-11.
- 정정훈, 2003, "수중폭발 충격하중에 대한 항정 내 충격 강화 지침," 한국기계연구원.
- Geers, T.L. and Hunter, K.S., 1996, "Dilational Dynamics of an Underwater Explosion Bubble," Proceedings of 67th Shock & Vibration Symposium.
- Geers T.L. and Hunter K.S., 2002, "An Integrated Wave-effects Model for an Underwater

Explosion Bubble", J. Accoust. Soc. Am., Vol. 111, No. 4, pp. 1584-1601.

- Hicks. A.N., 1970, "Effect of Bubble Migration on Explosion-induced Whipping in Ships," Technical Report 3301, Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, MD.
- Shin, Y.S. and Derunts, J.A., 1996, "USA/LS-DYNA3D Software Training Course", Vol. V.



< 이상갑 >



< 권정일 >



< 정정훈 >