

휘핑계수-수중폭발 가스구체 압력파 크기의 척도

권정일^{†*}, 정정훈^{**}, 이상갑^{*}

한국해양대학교 해양시스템공학부^{*}
한국기계연구원 e-엔지니어링 센터^{**}

Whipping Factor - a Measure of Damage Potential of an UNDEX Bubble Pulse

Jeong-Il Kwon^{†*}, Jung-Hoon Chung^{**} and Sang-Gab Lee^{*}

Korea Maritime University, Division of Ocean System Engineering^{*}
Korea Institute of machinery & Materials, e-Engineering Research Center^{**}

Abstract

A new novel Whipping Factor is proposed as a measure of the ship damage potential due to an underwater explosion bubble pulse. The factor was derived from the relationships among the charge weight, its depth and the fluid acceleration due to pulsating gas bubble. From the whipping response analyses for three uniform Timoshenko beams with similar characteristics of real naval surface ships, we have confirmed the maximum bending moment responses of beams due to whipping are almost same if the applied whipping factor is constant regardless of the charge weights and depths, which could validate the proposed whipping factor.

※Keywords: UNDerwater eXplosion(UNDEX, 수중폭발), Keel shock factor(KSF, 용골충격계수), Shock wave(충격파), Whipping factor(WF, 휘핑계수), Bubble pulse(가스구체 압력파)

1. 서론

일반적으로 수중폭발에 대한 수상함의 내충격 강화(shock hardening) 기준 충격하중의 세기는 용골충격계수 값이 널리 활용된다. 식 (1)과 같이 정의되는 용골충격계수는 수중폭발 충격파에 의해

선체 외판에 가해지는 충격 에너지밀도의 제곱근에 근사적으로 비례하는 물리량으로서, 충격파가 전선(whole ship)에 가할 수 있는 손상 잠재력(damage potential)의 크기를 나타내는 척도이다(STANAG 4137 1976).

$$KSF = \frac{\sqrt{W}}{R} \frac{(1 + \sin\theta)}{2} \quad (1)$$

접수일: 2005년 6월 27일, 승인일: 2005년 9월 23일

† 주저자, E-mail: jikweon@bada.hhu.ac.kr

Tel: 051-410-4306

여기서 W 는 폭약중량, R 은 폭약으로부터 용골

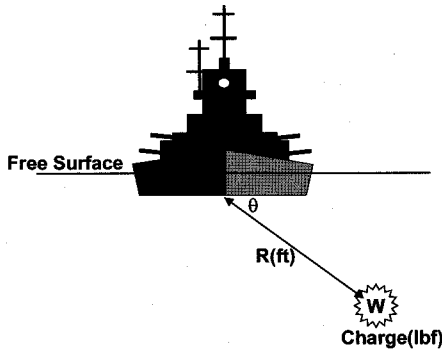


Fig. 1 Attack geometry of UNDEX

까지의 거리, 입사각 θ 는 Fig. 1에 보인 바와 같다. 일반적으로 용골충격계수의 계산에 있어서 폭약중량과 폭발거리의 단위는 각각 lb 및 ft가 사용된다.

일반적으로 상기 용골충격계수 값이 동일한 수중폭발조건인 경우 폭약중량(이에 따른 폭발거리 또는 입사각)이 달라도 충격파에 의한 선체구조의 충격응답 크기가 거의 대등하게 나타난다. 따라서, 용골충격계수 값은 수상함의 내충격 강화기준을 위한 수중폭발 충격파의 세기를 대표할 수 있다. 그러나 수중폭발로 인한 또 다른 충격하중인 가스구체 압력파로 인한 선체거더의 상하방향 보 거동 (beam-like behavior) 응답 즉, 휘핑 응답은 용골충격계수 값이 동일하더라도 폭약중량과 폭발거리 및 입사각에 따라 매우 달라진다(정정훈 등 2003). 따라서, 용골충격계수는 선체 휘핑응답 (whipping response) 세기의 척도로 사용되기에는 적합하지 않고, 또한 이를 대체할 수 있는 물리량을 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는 수중폭발 휘핑에 대한 선체거더의 종강도 안전성 평가를 위하여 실제 수상함들과 매우 유사한 제원과 경계조건(양단자유)을 갖는 3종의 균일단면 Timoshenko 보들에 대해 휘핑응답 해석을 수행하였다. 이로부터 수중폭발 휘핑에 대한 내충격 강화기준으로 용골충격계수 값을 이용할 경우의 문제점을 제시하였다. 또한, 이와 같은 문제점을 해결하고자 폭약 중량과 깊이 및 가스구체의 맥동으로 인한 유체 가속도를 고려한 휘핑계수(whipping factor: WF)를 정의하고, 이를 수중

폭발 휘핑응답에 대한 선체거더의 종강도 안전성 평가 물리량으로 사용할 것을 제안하고자 한다. 제안된 휘핑계수의 타당성은 다양한 수중폭발조건에 대한 상기 3종의 Timoshenko 보들의 휘핑으로 인한 최대 굽힘모멘트 응답을 비교하여 검증하였다.

2. 용골충격계수 적용 시 휘핑응답 평가의 문제점

수중폭발 휘핑으로 인한 함정 선체거더의 종강도 안전성 평가시 용골충격계수를 기준으로 할 경우의 문제점을 예시하고자 Table 1에 나타난 실제 수상함과 유사한 제원을 갖는 3종의 양단 자유 균일 Timoshenko 보를 대상으로 용골충격계수 값이 동일한 수중폭발 조건 하에서 폭약중량과 폭발거리를 달리 한 휘핑응답해석을 수행하였다.

수치해석에 있어서 Timoshenko 보들은 21개의 절점을 이용하여 20개의 보요소로 유한요소 모델링 하였다. 또한, 구조질량과 부가수질량(added mass)은 각 절점의 집중질량으로 고려하였다. 휘핑응답해석은 한국기계연구원에서 모드중첩법의 거하여 개발한 선체거더 보 유추 휘핑응답 해

Table 1 Principle dimensions of uniform Timoshenko's beams

Item	Type 1	Type 2	Type 3
LOA (m)	50.0	150.0	200.0
LBP (m)	50.0	150.0	200.0
Breadth (m)	9.1	21.0	31.4
Depth (m)	5.0	12.8	20.0
Draft (m)	2.5	6.3	6.6
D.W.T (ton)	717.0	14,798.0	31,654.0
Effective shear area (m ²)	0.064	0.246	0.851
Moment of inertia (m ⁴)	0.678	41.0	221.3
Young's modulus(N/m ²)	2.07*10 ¹¹		
Poisson ratio	0.3		

석프로그램인 UNDEXWHIP(정정훈 등 1997)을 이용하여 수행하였다. 이때, Table 2에 고유진동수를 나타낸 5차까지의 상하방향 점수진동 고유모드를 사용하되 감쇠를 무시하고 2초 동안의 휘핑응답을 계산하였다. 한편, 가스구체 압력과 시간이력은 자유수면과 가스구체의 수직상승(migration) 효과를 고려한 Hicks의 가스구체 운동방정식(정정훈 등 1997)으로 계산하되, 1차 가스구체 압력파만을 고려하였다.

해석을 위한 수중폭발 위치는 가장 큰 휘핑응답을 유발하는 보의 중앙부 직하(Fig. 1에서 인 경우)로 설정하였다(정정훈 등 2003). 또한, 폭약으로부터 용골까지의 거리는 TNT인 폭약 중량이 270 kg에서 2,700 kg까지 270 kg 간격으로 변화할 때 lb, ft 단위로 적용시의 용골충격계수 값이 0.1에서부터 0.4까지 0.05 간격으로 변화하도록 설정하였다. 한편, 상기 총 70개의 수중폭발 조건에 대한 휘핑응답해석을 효율적으로 수행하기 위하여 UNDEXWHIP 프로그램을 Fig. 2에 나타낸 공학 프로세스의 통합 및 최적화용 프로그램인 ModelCenter™ (Phoenix Integration 1998)와 연계하여 수행하였다.

상기 수중폭발조건에서의 휘핑으로 인한 수치계산 대상 보들의 최대 굽힘모멘트는 모두 보의 중앙부에서 발생하였으며, 그 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 이로부터 용골충격계수 값이 동일할 경우 폭약중량이 작을수록 즉, 폭발거리가 짧을수록 최대 굽힘모멘트가 크고, 용골충격계수 값이 클수록 폭약 중량 크기에 따른 최대 굽힘모멘트의 변화가 심함을 확인할 수 있다.

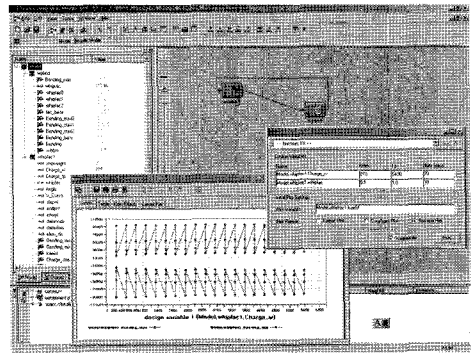


Fig. 2 Integrated screen of whipping response analysis process coupled with ModelCenter™ and UNDEXWHIP

이상의 수치계산 결과로부터 용골충격계수 값을 기준으로 폭약중량 또는 폭발거리를 임의로 선정하여 도출한 휘핑응답해석 결과를 이용해서 선체 거더의 수중폭발 휘핑에 대한 종강도 안전성을 평가하는 것은 부적합하다고 판단한다. 따라서 휘핑응답에 대한 항정 선체거더의 종강도 안전성을 위한 설계기준으로 용골충격계수를 사용할 경우 용골충격계수 값뿐만 아니라 구체적인 폭약 종류와 중량(또는 폭발거리)도 함께 제시되어야 한다. 그러나 실제 전투상황을 고려한 구체적인 폭발조건을 사전에 설정한다는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 하나의 용골충격계수 값으로 내충격 강화기준 충격파의 세기를 대표할 수 있듯이 하나의 값으로써 가스구체 압력파의 세기를 대표하여 선체거더 종강도 안전성 설계기준으로 사용할 수 있는 새로운 물리량의 도출이 필요하다.

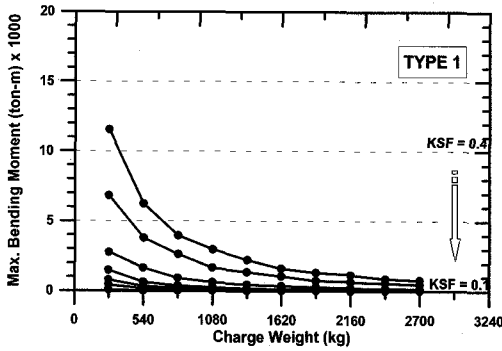
Table 2 Vertical wetted natural frequencies of the beams

Mode	Natural Frequency[Hz]		
	Type1	Type2	Type3
1(2-node)	2.654	0.862	0.843
2(3-node)	6.563	1.981	1.976
3(4-node)	11.289	3.216	3.256
4(5-node)	16.273	4.453	4.564
5(6-node)	21.293	5.670	5.855

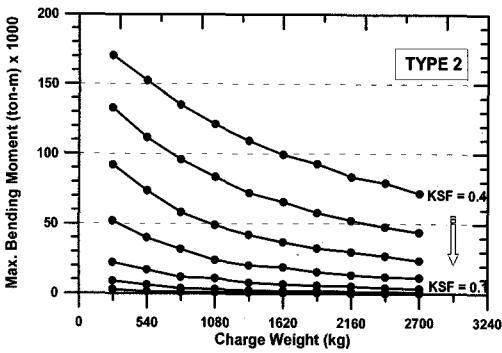
3. 휘핑계수의 제안 및 타당성 검토

3.1 수중폭발시 가스구체 $R_{max} \propto \frac{W^{1/3}}{P^{1/3}}$, $T_1 \propto \frac{W^{1/3}}{P^{3/8}}$ 로 인한 유체 거동

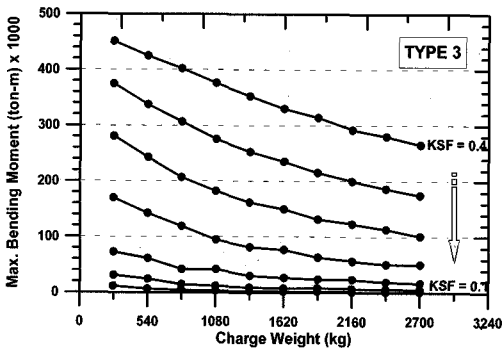
수중폭발 시 선체거더의 휘핑응답을 유발하는 직접적인 원인은 가스구체 압력파에 의한 유체의 가속도 운동으로 발생하는 유체관성력이다. 가스구체 거동에 의한 유동이 이상유체 유동이고 가스구체는 구의 형상을 유지한다고 가정하고, 자유수면과 가스구체의 수직상승을 무시하면 가스구체의



(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3

Fig. 3 Maximum whipping bending moment response according to KSF

맥동운동으로 인해 가스구체 중심으로부터 거리 r 만큼 떨어진 지점에서 발생하는 유체가속도는 다음과 같이 표현된다(Cole 1965).

$$u_r = \frac{V'(t)}{4\pi r^2} = \frac{R^2}{r^2} (\ddot{R} + 2\frac{\dot{R}^2}{R}) \quad (2)$$

여기서 u_r 는 가스구체 반경방향 유체가속도, $\dot{V}(t)$ 는 가스구체의 체적가속도이며, R , \dot{R} 는 각각 가스구체의 반경, 반경속도 및 반경가속도이다. 그리고 가스구체의 최대반경 R_{max} 및 1차 맥동주기 T_1 는 다음과 같이 표현된다(Shin and Geers 1995).

$$R_{max} \propto \frac{W^{1/3}}{P^{1/3}}, \quad T_1 \propto \frac{W^{1/3}}{P^{5/6}} \quad (3)$$

여기서 W 는 폭발중량이며, P 는 정수압 수두로서 폭발깊이 D 가 ft 단위를 갖는 경우 $P=D+330$ 이다. 한편, 1차 맥동주기 동안의 가스구체 평균 반경속도 R_{avg} 및 평균 반경가속도 R_{avg}'' 는 근사적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{avg}' \approx \frac{2R_{max}}{T_1} \propto P^{1/2} \quad (4-a)$$

$$R_{avg}'' \approx \frac{2R_{max}}{T_1^2} \propto \frac{P^{4/3}}{W^{1/3}} \quad (4-b)$$

1차 맥동주기 동안 가스구체의 평균 반경은 최대반경에 비례하며 가스구체 중심으로부터의 거리 r 은 정수압 P 에 비례함을 주목하면, 가스구체 1차 맥동주기 동안의 평균 유체가속도 $(\dot{u}_r)_{avg}$ 는 식 (2), (3) 및 (4)로부터 다음과 같이 식 (5)로 표현된다.

$$(\dot{u}_r)_{avg} \propto \frac{W^{1/3}}{P^{1/3}} \propto \frac{1}{R_{avg}''} \quad (5)$$

3.2 휘핑계수 제안

저자들은 가스구체 압력파의 세기를 나타내는 물리량은 선체거더의 휘핑응답을 유발하는 하중 즉, 가스구체의 맥동운동에 의한 유체가속도와 직접적인 관계를 가질 것이라는 판단 하에 식 (5)의 평균 유체가속도와 폭발중량 및 정수압 수두의 관계로부터 선체거더의 종강도 안전성 평가를 위한 휘핑계수 WF 를 다음과 같이 정의하였다.

$$WF = 3 \sqrt{\frac{10^6 W}{2(D+33)^4}} \quad (6)$$

여기서 폭약중량 W와 폭발깊이 D의 단위는 각각 lb 및 ft이다.

상기 제안된 휘핑계수는 수중폭발시 가스구체 압력파의 입사각 영향을 배제한 것이다. 이는 항정과 같은 구조물의 가장 큰 휘핑응답은 일반적으로 중앙부 직하에서 폭발이 일어나는 경우에 발생하기 때문이다.

3.3 제안된 휘핑계수의 타당성 검토

본 연구에서 제안한 휘핑계수의 타당성을 검토하기 위해 2장에서 고려한 3종의 균일단면 Timoshenko 보들에 대해 휘핑응답해석을 수행하였다. 휘핑응답 해석방법과 폭약종류 및 폭약중량 조건은 2장에서 기술한 내용과 동일하게 설정하였다. 다만, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 휘핑계수 값을 0.4부터 1.0까지 0.1간격으로 변화시켜 이를 용골충격계수 값으로 환산할 경우 0.1~0.4의 범위를 가지도록 하였다.

Fig. 5에는 3종의 Timoshenko 보들 각각에 대해 휘핑계수 값과 폭약중량 크기의 변화에 따른 최대 휘핑 굽힘모멘트(maximum whipping bending moment)의 변화를 도시하였다. 이 경우에도 최대 굽힘모멘트는 모든 폭발조건에 대해 보 중앙부에서 발생한다. 이로부터 Type 2 및 Type 3

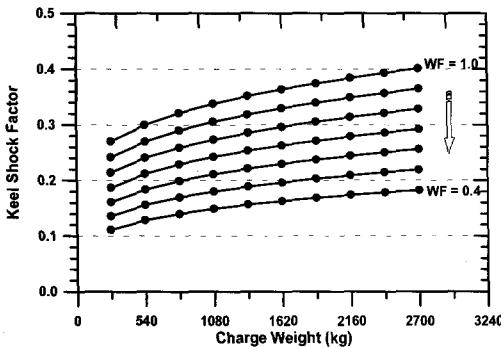
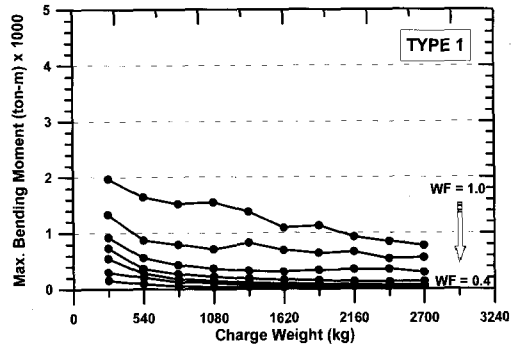
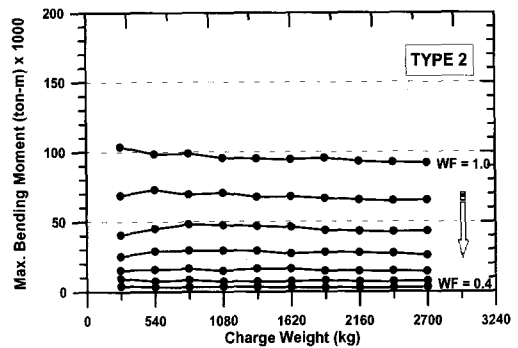


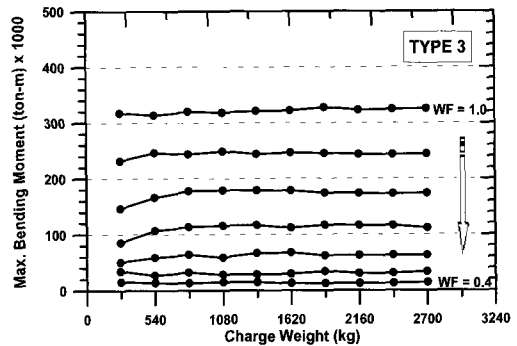
Fig. 4 Relationship between WF and KSF according to charge weights



(a) Type 1



(b) Type 2

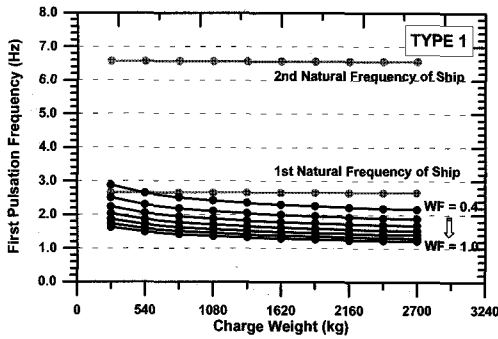


(c) Type 3

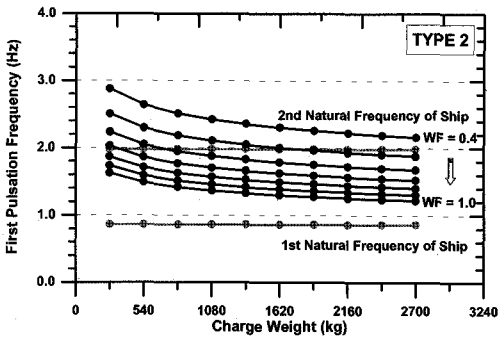
Fig. 5 Whipping maximum bending moment response according to WF

보에서는 폭약중량에 상관없이 휘핑계수 값이 동일하면 최대 굽힘모멘트가 거의 일정함을 알 수 있다.

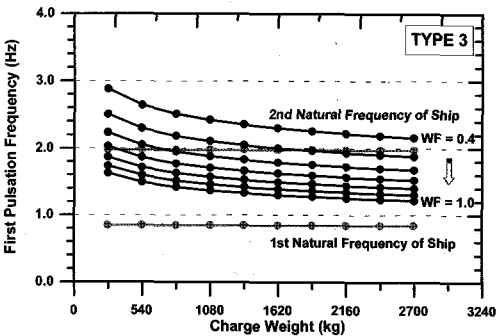
그러나 Type 1 보의 경우에는 용골충격계수를 기준으로 한 경우와 마찬가지로 동일한 휘핑계수



(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3

Fig. 6 Vertical wetted natural frequency of beams and the 1st bubble pulsation frequency

에 대해 폭약중량이 작을수록(폭발깊이가 얕을수록) 최대 굽힘모멘트가 커짐을 확인할 수 있다. 이는 Type 2 및 Type 3 보들과 비교하여 상대적으로 길이와 배수량이 작은 Type 1 보의 경우

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 1, 2차 상하방향 고유진동수가 실험식으로 계산한 가스구체 1차 맥동진동수 보다 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단한다.

상기의 결과로부터 따라서 가스구체 압력파로 인한 선체 거더의 휘핑 손상잠재력은 폭발조건 뿐만 아니라 휘핑응답을 지배하는 선체거더의 상하방향 접수진동 저차 고유진동수와 가스구체 1차 맥동진동수에 매우 밀접한 상관관계를 가지고 있다고 판단한다.

그러나 실제 함정 선체거더의 수중폭발 휘핑에 대한 종강도 안전성 문제는 Type 1 보와 유사한 소형 함정보다는 휘핑응답이 매우 큰 Type 2 및 Type의 3 보들과 유사한 대형 함정에 있어서 더욱 중요하다. 또한, 실제 대형 함정들의 상하방향 접수진동 저차 고유진동수 값들은 Type 2 및 Type 3 보들의 고유진동수와 매우 유사하리라 판단된다.

이에 본 연구에서 제시한 휘핑계수는 대형 함정 선체거더의 휘핑으로 인한 손상잠재력 척도로 유용하게 적용될 수 있다고 판단한다.

4. 결론

본 연구에서는 수중폭발 가스구체 압력파로 인한 함정 선체 거더의 휘핑응답 시 손상잠재력의 크기를 나타내기 위한 새로운 척도로서 휘핑계수를 제안하였다. 제안된 휘핑계수는 선체거더의 휘핑응답을 유발하는 하중 즉, 가스구체의 맥동운동에 의한 유체가속도와 폭약중량 및 폭발깊이의 관계식으로부터 도출하였으며, 이의 타당성은 실제 함정과 유사한 제원을 갖는 3종의 양단자유 균일 단면 Timoshenko 보들의 휘핑응답 수치해석을 통해 확인하였다.

향후 제안된 휘핑계수를 수중폭발 휘핑에 대한 수상함 선체거더의 종강도 안전성 설계기준으로 활용하기 위해서는 실제 함정들을 대상으로 선체 거더 손상을 유발하는 휘핑계수 값의 크기에 관한 연구가 요구된다. 아울러, 잠수함과 같은 몰수 구조물(submerged structure)에 대해서도 제시된 휘핑계수의 유용성을 확인하기 위한 추가적인 연구

가 필요하다고 판단한다.

참 고 문 헌

- 정정훈, 김병현, 김영중, 문석준, 허영철, 정종안, 권정일, 2003, KDX-III 수중폭발 충격응답 수치 시뮬레이션, 한국기계연구원 연구보고서 BSI599-1041.M.
- 정정훈, 허영철, 김병현, 1997, "수중폭발 휘핑응답 해석을 통한 선체거더 종강도 평가," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 429-433.
- Cole, R.H., 1965, Underwater Explosion, Dover Publications Inc.
- Phoenix Integration, 1998, "Next Generation Design Environment for the Integrated Enterprise," Enterprise Engineering Solutions: White Paper, pp. 1-11.

- Shin, Y.S. and Geers, T.L., 1995, Response of Marine Structures to Underwater Explosion, Lecture Note.
- STANAG 4137, 1976, "Standard Underwater Explosion Test for Operational Surface Ships and Craft," NATO Standardization Agreement.



< 권 정 일 >



< 정 정 훈 >



< 이 상 갑 >