

간이해석법을 이용한 폭발강화격벽의 초기 설계법

노인식, 박만재 (충남대학교)

1. 서론

함정 격실 내부의 폭발 압력은 일반적인 수밀 격벽 설계의 주된 고려 대상인 수압보다는 매우 크기 때문에 상당히 큰 소성변형이 발생하게 된다. 이로 인하여 격벽의 기하학적 형상은 심각하게 변화하게 되고 작용하는 압력에 대하여 통상의 굽힘 강성으로 지지하기 보다는 효율적으로 인장하중을 지지할 수 있도록 기하학적 형상이 크게 변화된다. 일반적으로 구조물이 파단될 때 굽힘모멘트 보다는 인장력이 훨씬 큰 변형 에너지를 흡수할 수 있기 때문에 손상의 진행 과정에서 구조물의 기하학적 형상이 인장력을 받을 수 있도록 변형되므로, 궁극적으로 이를 감안하여 격벽의 파손을 방지할 수 있도록 부재를 배치하는 것이 폭발강화격벽(Blast Hardened Bulkhead, BHB) 구조설계의 기본 개념이다.

본 고에서는 폭발강화격벽 구조설계의 초기 단계에 적용 가능한 간이 해석법과 초기 설계법 개발을 위하여 우선 내부 폭발에 의한 충격압력의 전파와 폭발 충격압력의 최대 크기, 지속시간 및 시계열을 간이식으로 추정하고 이를 바탕으로 폭발강화격벽의 구조거동을 간편하게 표현할 수 있는 간이 구조 해석법과 효율적인 폭발강화격벽 및 연결 구조의 초기 설계기법 개발 과정을 기술하고자 한다.

2. 내부폭발 압력의 추정

통상 오픈된 장소와 폐쇄된 공간에서의 폭발 압력은 완전히 다른 양상으로 나타나지만 여기서는 격실 내부의 밀폐된 공간에서 발생하는 내부 폭발 문제만 고찰한다.

폭발 압력은 폭발 즉시 음속으로 작용하는 충격압력(Shock pressure)와 준정적인 형태로 작용하는 가스압력(gas pressure)으로 구분할 수 있다. 충격압력은 격벽의 과도 동적 응답을 유발하며 긴 시간 동안 작용하는 가스압력은 정적 거동으로 격벽에 심각한 변형을 발생시킨다.

밀폐된 격실에서의 폭발 충격 압력과 가스압력의 시간영역 시계열은 Fig. 1에서 보인 바와 같이 복잡한 양상으로 나타나지만 통상 Fig. 2와 같이 2개의 삼각형 impulse가 중첩된 형상으로 간단하게 표현할 수 있다. 통상 짧은 시간에 작용하는 충격력에 대한 구조 응답은 역적(Impulse)이 가장 중요한 인

자로 간주된다. 이와 같이 복잡한 폭발 압력 시계열을 단순화하여 표현한다면 압력의 최대치와 지속시간으로부터 충격압력의 역적을 간략하게 추정할 수 있다.

일반적으로 폭발하중의 평가는 기존의 고폭이론(high explosive theory)이나 실험 결과에 기반한 준 경험적 이론(semi-empirical theory)를 이용한다. 국내에서는 아직 체계화된 연구나 자료축적이 이루어지지 않고 있으나 국외에서는 이미 폭약의 양, 폭발 원점과 구조물과의 거리, 압력파와 구조물의 입사각, 통기구 면적 등의 상관관계에 따라 최대압력의 크기, 준정적 압력의 작용 지속시간 등에 대한 연구가 상당 부분 진행되어 실제 사용 가능한 경험식으로 주어지고 있다. 특히 UFC(2008)(또는 TM5-1300)에서 다양한 경우에 대한 방대한 폭발압력 자료가 정리되어 있어 현재 국내외에서 가장 보편적으로 사용되고 있음을 확인하였기에 본 연구도 이를 기반으로 하였다 [Nho et al. 2013].

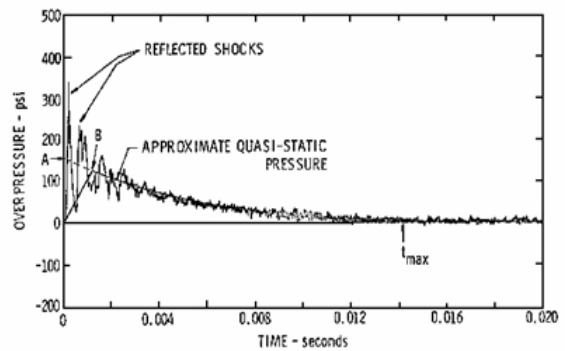


Fig. 1 Pressure time history for confined explosion

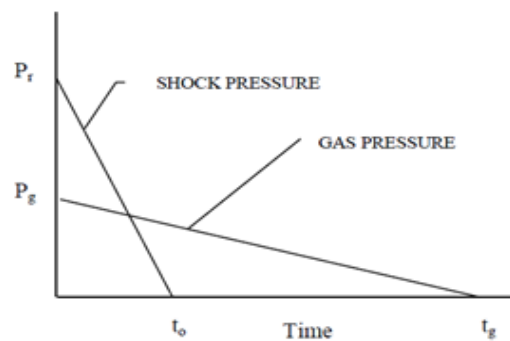


Fig. 2 Simplified pressure time history

3. 폭발강화격벽 구조 거동의 간이 해석법

3.1 보의 최종강도 및 소성설계법

구조물에서 국부적 항복 발생하더라도 즉시 전체 붕괴로 이어지는 경우는 드물다. 이는 구조물이 아직 여유 강성 (redundancy)를 갖고 있기 때문이다. 국부적 항복을 설계기준으로 하는 것은 일반적인 구조물에서 안전계수를 크게 두고 보수적으로 설계하기 위한 방법이지만 폭발강화격벽의 설계는 극한 상태에서의 내하능력을 고려해야 하므로, 최대하중에 대하여 대규모 소성변형의 발생과 전체 구조물에 대한 붕괴를 고려해야 한다.

일반적인 격벽 구조는 Fig. 30에서 보는 바와 같이 평판에 보강재가 부착된 보강판 구조로 되어 있다. 이러한 보강판 구조의 붕괴거동은 매우 복잡하지만 판이나 보의 최종강도 해석법으로 비교적 간단하게 처리할 수 있고 더욱이 격벽과 같이 한 쪽 방향으로 보강재가 일정한 간격으로 배열된 구조에서는 보의 최종강도에 대한 간이 해석법이 많이 적용되고 있다.

통상 보의 최종강도 추정법은 단면의 소성모멘트 (Plastic moment) M_p 를 기준으로 한다. 소성모멘트는 단면이 완전 소성화 되었을 때의 작용 모멘트, 즉 단면이 견딜 수 있는 최대 모멘트이다. 보의 모멘트가 이 값에 도달하면 소성 관절 (plastic hinge)이 생성되어 보의 붕괴로 이어지는 것으로 간주한다. 이때 단면의 소성 단면계수 Z_p 와 M_p 및 재료의 항복 응력 σ_y 와의 상관관계는 다음과 같이 표시된다.

$$M_p = \sigma_y Z_p$$

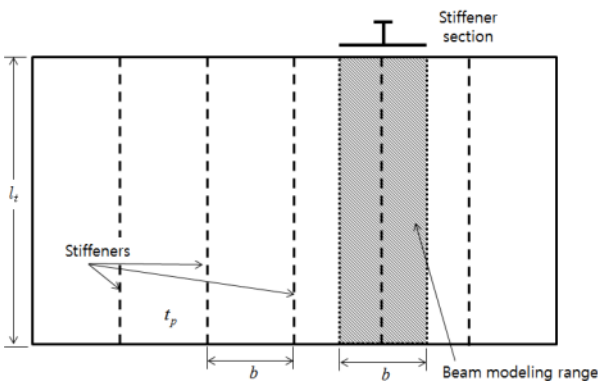


Fig. 3 격벽의 기하학적 형상 및 보 모델링

여기서, plate, web 및 flange 면적을 A_p , A_w , A_f 두면 대부분의 보강판에서는 보강재 면적이 판 면적보다 작으므로 $A_p > A_w + A_f$ 관계가 성립한다. 이때, Fig. 4에서 보는 것처럼 이 단면의 소성 중립축 (plastic neutral axis)은 판 두께 내부에 위치하며, 그 위치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$g = C_1 t_p, \quad C_1 = \frac{A_p - A_w + A_f}{2A_p} \quad (1)$$

그리고 단면 전체의 소성단면계수는 각 구성요소인 plate, flange 및 web 소성단면계수의 합으로 표시 가능하다.

$$Z = Z_p + Z_w + Z_f \quad (2)$$

$$Z_p = A_p t_p (C_1^2 - C_1 + 0.5),$$

$$Z_w = A_w (0.5 h_w + g), \quad Z_f = A_f (h_w + g + 0.5 t_f)$$

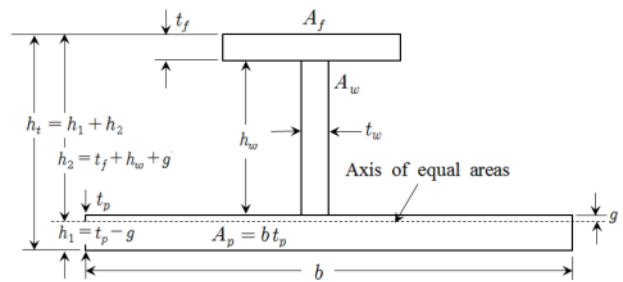


Fig. 4 비대칭 보강재 부착 단면의 특성치

휨 하중을 받는 보의 최대 굽힘모멘트 발생 지점에 소성 힌지 (plastic hinge) 생성되며, 한 경간에서 3점에 힌지(단순지지점 또는 소성힌지)가 존재하면 구조물 전체의 붕괴로 이어진다. 이를 붕괴 기구(collapse mechanism)라고 한다.

휨 하중을 받는 보의 붕괴하중 계산 기법은 통상 가상 변위의 원리를 적용하여, 가정된 붕괴기구에서 외적 가상일과 내적 가상일을 등치시켜 해석한다. 이를 흔히 소성관절법 (plastic hinge method)라고 하며 간단한 보 구조물의 극한강도해석법으로서 상당한 타당성이 인정되고 있다.

3.2 막력을 고려한 보의 최종강도

위에서 설명한 일반적인 보의 최종강도 해석법에서는 일단 보의 1 경간 내에서 핀 지지점 및 소성관절 수의 합이 3개가 되면 그 경간에 작용하는 추가적인 하중에 대한 굽힘 강성이 영이 되어 더 이상의 하중을 견딜 수 없기 때문에 붕괴가 일

어나는 것으로 간주한다. 그러나 양단 지지점에서 축방향 변형이 구속된 경우에는 소성 절점이 발생한 이후에도 압력이 증가하면 처짐 역시 더욱 커지고 대변형에 기인하는 비선형 기하학적 특성에 의해 하중지지 능력이 점차 증가한다. 결국 이에 따른 내부적인 막력의 증가가 동반되므로 이 추가적인 막력이 점차 증가하여 최종적으로 단면의 모든 부분 인장항복으로 소성화된다. Fig. 5에 이 과정을 개념적으로 보였다.

양단이 고정된 Fig. 6와 같은 일반적 단면 형상의 보에서도 위의 양단 단순지지 직사각형 단면 보와 유사한 과정으로부터 하중-처짐 관계식을 유도할 수 있다. 먼저 크기 q 의 균일 분포하중에 의한 외적 가상일, 내적 가상일은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta W_{ext} = \frac{1}{2} q \cdot 2l \cdot \delta w = ql \delta w \quad (3)$$

$$\delta W_{int} = N \delta e + M(2\delta\theta + \delta\phi)$$

여기서, 총 막 신장량은, $e = 2e_{AC} = \frac{w^2}{l}$ 이며, $\theta = w/l$, $\phi = 2\theta$, 이므로,

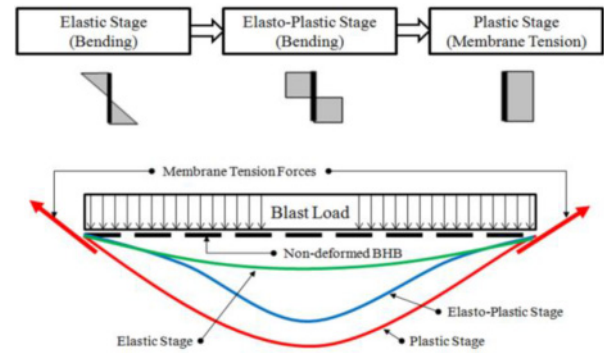


Fig. 5 보의 소성 대변형 거동 진전과정 (소성발생 ⇒ 소성모멘트 ⇒ 완전 막력)

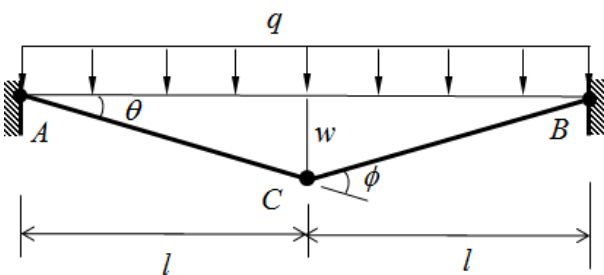


Fig. 6 분포하중을 받는 양단 고정 보

$$\delta W_{int} = N \delta e + 4M \delta \theta = \frac{2}{l} (Nw + 2M) \delta w \quad (4)$$

가 되고, $\delta W_{ext} = \delta W_{int}$ 에서 다음 식이 유도된다.

$$q = q_N + q_M = \frac{2Nw}{l^2} + \frac{4M}{l^2} \quad (5)$$

여기서, q_N 과 q_M 은 각각 분포하중 성분 중 막력과 모멘트 발생에 기여하는 성분을 의미한다.

하중과 변형이 점진적으로 증가됨에 따라 소성굽힘모멘트가 인장력으로 전환되는 과정에서 단면 내부의 응력이 압축(-)에서 인장(+)으로 바뀌는 지점 위치(z)은 계속 변화하며 마침내 단면 바깥으로 나가는 순간 단면 내 모든 위치에서의 응력이 인장 항복상태에 도달하여 막력만 존재하게 된다.

일반적 단면 형상에서 변형이 증가함에 따라 z 가 단면을 벗어나는 경우, 단면의 모멘트 성분이 없어지고 막력만 남게 되므로, 막력은 $N = N_P$ 가 되며, (5)식은 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$q = 2N_P \frac{w}{l^2} \quad (6)$$

따라서 (6), (7)식으로부터 Fig. 7에서 보는 것처럼 다음과 같은 직선식 형태의 하중-처짐 관계식이 유도된다.

$$\frac{q}{q_0} = \frac{N_P h_t}{M_P} \cdot \frac{w}{h_t} = \beta \frac{w}{h_t} \quad (7)$$

여기서, $q_0 = \frac{2M_P}{l^2}$ 는 무차원화를 위해 도입된 양단 단순지지 보에서 순수 굽힘 만에 의한 극한 분포 하중이다. 그리고, 하중이 큰 대변형 영역에서 하중-처짐 관계식의 기울기 β 는 h_1 로 무차원화 하여 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\beta = \frac{N_P h_t}{M_P} = \frac{A h_t}{Z_P} \quad (8)$$

이 식들은 처짐이 커져 보의 전 구간에서 전 단면에 막력만 작용하는 상태가 되면 양단의 경계조건의 영향은 거의 무시될 수 있음을 보여 준다.

(7)식의 하중-처짐 관계를 바탕으로 파단 하중과 이에 대응

되는 설계 단면적을 유도할 수 있다. 먼저, Fig. 6에 보인 보의 AC 요소에 대한 막 신장량과 이에 따른 막 변형도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{AC} = \frac{1}{2} \frac{w^2}{l}, \quad \epsilon = \frac{e_{AC}}{l} = \frac{1}{2} \left(\frac{w}{l} \right)^2, \quad (9)$$

막력에 의한 평균 변형도가 파단 변형도 ϵ_f 에 이를 때, 파단 분포하중 q_f 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$q_f = \beta w_f q_0 / h_t = \beta l \sqrt{2\epsilon_f} q_0 / h_t = 2 \sqrt{2\epsilon_f} \beta M_P / h_t l = \frac{2 \sqrt{2\epsilon_f} \sigma_Y A}{l} \quad (10)$$

상대적으로 변형이 작은 구간의 하중-처짐 거동은 막력과 굽힘모멘트가 연성되어 복합적으로 작용하며 이들의 상관곡선(interaction curve)이 Fig. 7의 초기 곡선 부분이며, 간단한 형태로 쉽게 도출되지는 않는다.

그러나 본 연구에서는 보의 최대 내하 능력을 판단하는데 목적이 있으며, 보가 최종강도에 이르게 하는 큰 하중에서는 변형이 보강재 단면의 치수보다는 상당히 큰 대변형 상태가 되고 단면에 작용하는 내력 역시 거의 막력으로 전환될 것으로 예상되므로 처짐이 작은 구간의 거동은 그다지 중요하지 않은 것으로 판단하여 더 이상의 논의는 생략한다.

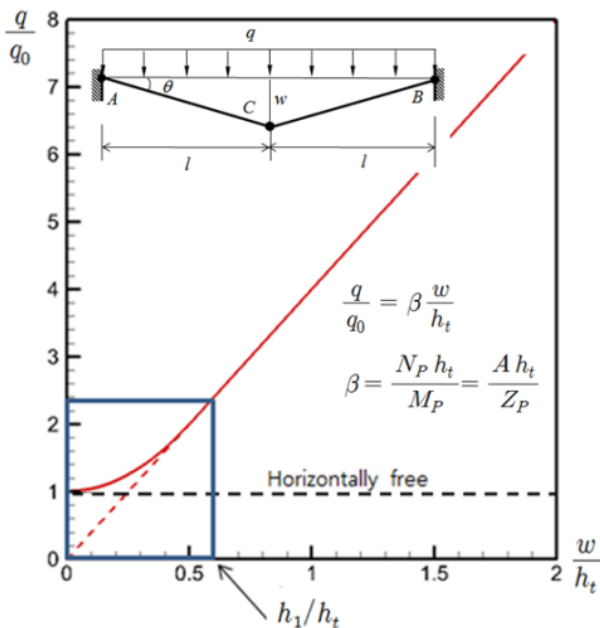


Fig. 7 분포하중을 받는 양단고정지지 보의 하중 처짐 곡선

4. 폭발 강화 격벽 설계

4.1 폭발강화격벽 간이 설계법의 개발 방향

앞서 설명한 보의 전체적인 처짐과 막력을 고려한 최종강도 해석법에 기반한 폭발강화격벽의 기본적인 구조설계 개념은 다음과 같다.

- (가) Fig. 3에서 보는 바와 같이 보강재가 부착된 격벽을 보강재를 포함하는 1-span 간격만 보로 모델링한 다음, 소성관절법을 적용하여 정식화한다.
- (나) 소성관절이 발생한 이후에도 압력이 증가하면 변형도 지속적으로 증가하며, 이러한 기하학적 변화에 따라 추가적인 막력이 발생한다.
- (다) 막력은 점차 증가하여 최종적으로, 단면의 모든 부분이 인장에 의해 소성화되며 모멘트 성분은 소멸된다.
- (라) 단면 전체가 인장 소성화된 이후에도 변형은 재료가 파단 변형도에 이를 때까지 증가하며 이 파단 시점의 압력을 보의 최종 내하능력으로 간주한다.

4.2 격벽의 치수 결정식 유도

(1) 보강재의 단면적 결정

위험무기 종류가 결정되면 폭약의 양과 충격 압력이 계산될 수 있다. 이에 따라 입력 분포하중이 결정되었을 때 이를 견딜 수 있는 설계 단면적 A_D 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_D = \frac{q_D l}{2 \sqrt{2\epsilon_f} \sigma_Y} \quad (11)$$

여기서 A_D 는 보강재 1개와 보강재 사이 폭에 해당되는 격벽 판의 면적의 합을 의미한다. 그런데 여기서 분포하중은 압력에 폭을 곱한 값이므로, 설계압력 p_D 와의 관계는 $q_D = p_D \cdot b$ 와 같고, 최종적으로 최소 설계 단면적 A_D 는 다음과 같이 설계압력 p_D 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$A_D = A_{st} + t_p b = \frac{bl}{2 \sqrt{2\epsilon_f} \sigma_Y} p_D. \quad (12)$$

이때, 각 변수들의 의미는 다음과 같다.

$A_{st} (= A_w + A_f)$: 보강재의 단면적,

b : 격벽 보강재 간격, t_p : 판의 두께
 l : 격벽의 높이(보의 길이),
 ϵ_f : 재료의 파단변형도, σ_Y : 재료의 항복응력

4.3 폭발 강화 격벽 설계 과정

(12)식을 활용하여 격벽의 주판과 보강재의 치수를 결정할 수 있다. 구체적인 구조 설계 공식은 (12)식에 입력되는 재료의 파단변형도와 항복응력, 입력 폭발하중의 크기 등 여러 가지 인자들에 대한 적절한 추정치 우선되어야 하지만 이것은 기존에 이루어진 설계치들과 파라미터 해석결과의 비교분석을 통하여 결정할 수 있다.

폭발강화격벽 설계의 주안점은 기본적으로 폭발 압력에 발생하는 막력을 지탱할 수 있도록 주판과 보강재의 단면적을 확보하는 것이 1차적인 목표이지만, 실제 격벽의 파단의 직접적인 원인은 상하단 지지부 또는 주판과 커튼판(Curtain plate)과의 연결부에서 소성 관절 발생에 따른 국부적인 굽힘과 과도한 변형도 집중현상 때문인 것으로 판단된다. 즉, 국부적인 과도한 압축변형 때문에 단면이 전체적으로 인장 항복 상태로 천이하기 전에 국부적인 좌굴 등의 원인에 의해 파단으로 이어지는 것으로 보인다. 이와 같은 원인으로 단면이 기본적인 내하 능력을 충분히 발휘하지 못하고 강도가 저하되어 파단이 발생할 수 있기 때문에 현재 여러 가지 다양한 구조 개선 안들이 제안되고 있으며, Curvature limiter, 커튼판 등도 이러한 과도한 변형도 집중에 대한 방지책의 하나로 볼 수 있다.

결국, 폭발 강화 격벽 설계의 핵심은 첫째, 전체적인 막력에 대한 보의 강도를 고려한 주판의 및 보강재 구조 설계, 둘째, 국부적 변형 집중 현상을 회피할 수 있는 연결부 설계 안 제시 라는 두 가지 관점에서 다를 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 언

본 연구에서는 폭발강화격벽 초기 구조설계 단계에 적용하기 위한 폭발압력의 추정 방법과 등가 정적압력에 의한 격벽 구조 거동의 간이 해석/설계법을 다루었다.

통상적인 소성모멘트만을 고려하는 보와 최종강도 해석법에 대변형에 기인하는 막력의 영향을 보완하여 새롭게 정식화하였다. 이 해석법을 적용하여 막력을 고려한 주판의 두께 및 보강재 단면적의 결정 과정을 유도하였다.

또한, 실선 폭발강화 격벽을 본 연구에서 개발된 식을 적용

하여 검증하는 연구와 현재 가장 많이 적용되고 있는 폭발강화격벽 구조양식인 커튼판 효과를 고려하는 방안에 대한 연구가 수행 중이다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소 산학연 주관 응용연구의 일환으로 수행 중인 "폭발강화격벽 설계 및 검증기술 연구" 과제 연구 결과의 일부입니다. 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

Nho, IS, Park, MJ and Yoon, YM., (2013). "Estimation of Structural Responses of Bulkhead under Internal Explosion", Proceedings of the Annual Autumn Conference, Society of Naval Architects of Korea, Ulsan, Korea, 7-8 November 2013, pp.115-120.
 RINAMIL, (2007) Rules for the Classification of Naval Ships :Part F Additional Class Notations.
 Søreide, TH. (1981) Ultimate Load Analysis of Marine Structures, Tapir.
 UFC(UNIFIED FACILITIES CRITERIA), (2008) Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, UFC 3-340-02. (TM5-1300).



노 인 식

- 1956년생
- 1992년 서울대학교 박사
- 현 재 : 충남대학교 선박해양공학과 교수
- 관심분야 : 대형구조물의 안전성평가, 비선형 구조해석
- E - mail : isnho@cnu.ac.kr



박 만 재

- 1986년생
- 2013년 충남대학교 선박해양공학과 졸업
- 현 재 : 동 대학원 석사과정
- 관심분야 : 선박해양구조물의 비선형 구조해석
- E - mail : happypark86@daum.net