

탄성지지 보이론을 이용한 해중철도 간이 충돌해석법

Simplified Collision Analysis Method for Submerged Floating Railway Using the Theory of a Beam with an Elastic Foundation

서승일* · 김진성

Sung-il Seo · Jin Sung Kim

Abstract A submerged floating railway is an innovative tunnel infrastructure passing through the deep sea independent of wave and wind so that high speed trains can run on it. It doesn't depend on water depth and is cost effective due to modular construction on land. The construction period can be reduced drastically. This paper introduces the concept design of a submerged floating railway, and for securing safety, proposes a method to analyze the structural behavior of the body in case of collision with a submarine. The theory of a beam with an elastic foundation was used to calculate the equivalent mass of the body so that the perfect elastic collision could be applied to calculate the collision velocity. The maximum deformation and bending moment was analyzed based on energy conservation. To verify the results, a collision analysis using a finite element analysis code was made. Comparing the results confirmed that this simplified collision analysis method gives enough accurate deformation and bending moment to be used for actual estimation in the initial design stage.

Keywords : Collision, Elastic foundation, Energy conservation, Equivalent mass, Submerged floating railway

초 록 해중철도는 파도와 바람의 영향을 크게 받지 않는 해중을 통과하는 터널내에 고속열차가 운행하는 철도시스템으로 수심에 관계없이 설치할 수 있고, 모듈별 육상 제작후 해상 대조립으로 건설이 가능하기 때문에 건설비용이 획기적으로 절감될 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 해중철도의 개념설계안을 소개하고 안전성 확보를 위해 해중에서 잠수함과 충돌하는 경우를 대상으로 해중철도의 구조적 거동을 해석할 수 있는 기법을 제시하고자 한다. 탄성지지된 보이론을 활용하여 해중철도 합체의 등가 질량을 계산하고 잠수함과 완전탄성 충돌 시 속도를 계산하고 에너지 보존의 원리에 따라 합체의 변형량과 최대굽힘모멘트를 계산하였다. 결과의 검증은 위해 보요소를 사용하여 충돌 유한요소해석을 실시하였고, 비교를 통해 타당성을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 충돌 이론 해법은 간편하게 합체의 변형량과 최대굽힘모멘트를 계산할 수 있어 초기 설계시에 효과적으로 활용될 수 있다.

주요어 : 충돌, 탄성지지, 에너지 보존, 등가질량, 해중철도

1. 서 론

해중철도는 물속에서 부력에 의해 지지되는 부유식 터널 내에 열차가 운행하는 철도시스템으로서 수심에 크게 상관없이 건설할 수 있고, 육상에서 모듈별로 제작한 후에 해상에서 조립하여 터널을 완성할 수 있으므로 건설비 및 기간이 단축되는 이점이 있다[1]. 물속으로 깊이 들어갈수록 파도나 바람의 영향이 급속히 줄어드는 효과가 있으므로 해중철도는 외부 교란을 받지 않고 안정적으로 떠 있을 수 있다. 침매터널은 중력으로 터널 합체를 가라앉히고 해저면에 합체를 고정시키는 형식인 데 비하여[2], 해중철도는 통상 터널 합체의 부력이 중력보다 더 커서 물위로 떠오르려는 성

질을 계류선으로 억제하여 평형을 이루고 있는 구조이다.

해중철도의 개념은 이미 오래 전부터 제안되어 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 이태리나 일본 등에서는 기본설계까지 진행된 상태이나 아직 세계적으로 건설이 실현된 사례는 없다[3]. 중국은 최근 내륙 호수를 관통하는 수중터널 건설 프로젝트를 추진하고 있으나 아직 본격적인 건설을 착수하지는 못한 상태이다[4]. 해중철도의 실현이 지연되고 있는 것은 다양한 이유가 있으나, 기술적인 문제보다는 깊은 물속에서 떠있어서 비상시에 생존이 어려울 수 있다는 승객들의 불안감이 첫번째 이유라 할 수 있다. 따라서 비상 상황에서 합체의 안전성을 검증하고 승객의 안전을 확보하는 것은 해중철도의 실현을 위한 우선 과업이라 할 수 있다[5].

수중에서 해중철도의 안전에 영향을 줄 수 있는 비상 상황은 여러 가지가 있을 수 있으나, 우리나라의 근해와 같이 군사력이 집중된 바다에서 수중 운행 잠수함은 해중철도와 충돌을 발생시킬 가능성이 있는 요인이 된다. 수상에서 운

*Corresponding author:

Tel.: +82-31-460-5623, E-mail : siseo@krii.re.kr

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.3.202>

행하는 선박과의 충돌도 생각할 수 있으나 해중철도의 수심이 20m를 넘는다면 크게 우려할 상황은 아니다. 잠수함과 충돌은 음파를 이용한 경보장치를 통해 사전에 방지할 수 있으나 경보장치의 고장 등 비상 상황을 고려하여 충돌에 대한 안전성을 검증할 필요가 있다. 본 연구에서는 해중철도의 개념설계안을 제시하고, 해중철도의 함체가 잠수함과 충돌하는 경우에 대비하여 내충돌 설계의 기반 기술을 제안하고자 한다. 함체 구조설계 결과의 신속한 검증을 위해 간략화된 충돌 해석 방법을 제시하고 수치해석 결과와 비교 검토하여 유용성을 입증하고자 한다.

2. 해중철도의 설계 개요

수중에서 열차가 운행할 수 있는 부력과 강도를 지닌 구조물의 형태로서는 Fig. 1, 2와 같은 파이프 라인형 복합체가 적합하다. 본 연구에서는 호남-제주의 최대 수심(120m) 구간을 대상으로 해중철도 개념설계를 수행하고 안전성 및

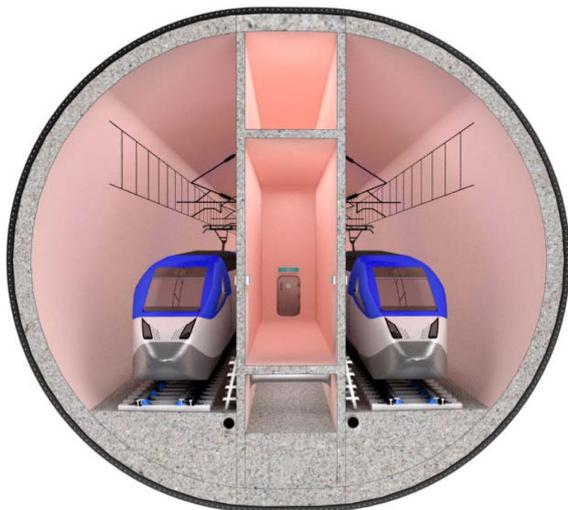


Fig. 1 Section of the submerged floating railway



Fig. 2 Submerged floating railway shaped as a pipeline

타당성을 검토하였다. 완벽한 방수를 위해 철강 계열의 금속재로 외관을 형성하고 내부에 부력과 일정한 비율을 유지하기 위하여 콘크리트를 채워 넣는다. 내부에 다시 철강 계열의 금속재로 내관을 구성하여 이중으로 방수가 이루어지도록 한다. 100m 간격의 모듈을 제작하고 수면에서 볼트로 외관을 연결하여 소조립한 후 다시 수중에서 대조립하는 방식으로 함체를 제작해 나간다. 일정 간격마다 승객 비상 대피 및 환기를 위해 고정식 자켓(jacket)구조물을 설치한다[1].

부력이 중력을 초과하는 구조이므로 초과 부력에 대해서는 계류장치(mooring)의 장력으로 평형을 이루도록 한다. 계류장치는 다양한 재질과 구조를 고려할 수 있으나 해양구조물의 계류에 많이 사용하는 체인(chain)을 이용하여 해저면에 고정하도록 한다. 계류 체인은 초과 부력에 따른 장력을 해저면에 전달하는데 해저면과 다양한 방법으로 고정할 수 있다. 전통적으로 파일을 해저면에 박아서 체인을 연결할 수 있고, 대형 콘크리트 블록을 이용하여 중력으로 장력을 상쇄하는 방법을 적용할 수 있다. 최신 기술로서 흡입 파일(suction pile)을 활용할 수 있다. 해저면 앵커링 방법은 수심에 따른 공사의 난이도와 해저 지형, 비용 등을 고려하여 선정할 수 있는데, 콘크리트 블록을 이용한 중력식 앵커링 방법이 비용과 시공성 면에서 유리하다. 호남-제주 구간 해중철도 개념설계 결과에 따라, 함체의 부력과 중력의 비율을 고려하여 100m 모듈 하나당 계류라인이 4줄 있고, 비상시 승객 대피 및 환기 등을 고려하여 고정식 구조물이 10km 구간마다 설치되어 있다 [1].

3. 충돌해석 모델

Fig. 3와 같이 잠수함과 충돌이 발생하는 경우, 해석을 간략히 수행하기 위해서 1차원 완전탄성 충돌해석을 실시한다. 이를 위해 먼저 잠수함을 집중질량으로 모델링하고 해중철도도 등가질량과 등가강성의 개념을 활용하여 간략히 모델링한다. 초과 부력을 초기장력으로 평형을 이루고 있는 계류라인은 함체의 하중 변동에 대해 인장(초기장력의 증가)과 압축(초기장력의 감소)으로 저항할 수 있고, 선형 탄성 특성을 보이는 스틸(steel) 재질의 체인으로 설계하였으므로 탄성지지 스프링으로 이상화할 수 있다.

일정 간격의 계류라인이 연속적으로 함체의 부력을 지탱하는 해중철도의 구조적 거동은 탄성지지 위에 놓인 무한 길이의 보로서 이상화할 수 있다. 탄성지지된 연속 보에 집중

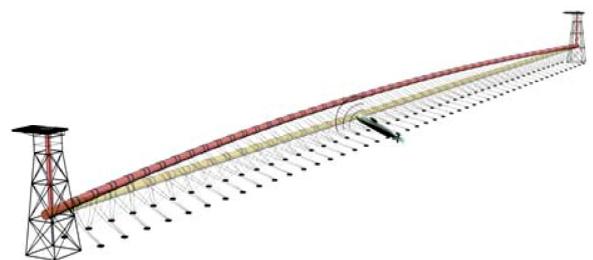


Fig. 3 Collision with a submarine in deep water

하중이 작용하는 경우 보의 처짐은 다음 식으로 계산된다[6].

$$w(x) = \frac{PB}{2k} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (1)$$

여기서,

$$\beta = \left(\frac{k}{4EI} \right)^{1/4}$$

$w(x)$ = 보의 처짐

P = 집중하중

k = 단위길이당 탄성지지의 스프링계수

EI = 보의 굽힘강성

충돌 후 합체 최대속도의 길이에 따른 변화도 변수 분리의 개념에 따라 식 (1)을 참고로 다음 같이 가정할 수 있다.

$$v = V_0 e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (2)$$

여기서,

v = 합체의 이동 속도

V_0 = 합체의 최대 이동 속도

등가질량은 합체의 운동에너지를 계산함으로 얻어진다. 즉,

$$E_t = \frac{1}{2} M_t V_0^2 = \frac{1}{2} \int_0^\infty 2m_t \{ V_0 e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \}^2 dx \quad (3)$$

여기서,

E_t = 합체의 운동에너지

M_t = 합체의 등가질량

m_t = 합체의 단위길이당 질량

수중에서 합체와 잠수함의 거동을 표현하므로 질량에는 부가수 질량(added mass)이 모두 포함된다. 식 (3)으로부터 등가질량은 다음 식과 같이 얻어진다.

$$M_t = \frac{3}{2\beta} m_t \quad (4)$$

합체와 잠수함이 충돌할 경우, 탄성충돌을 한다면 운동량 보존법칙은 다음 식과 같이 표현된다.

$$M_s v_{si} = M_s v_{sf} + M_t V_0 \quad (5)$$

여기서,

M_s = 잠수함의 질량

v_{si} = 충돌 전 잠수함의 속도

v_{sf} = 충돌 후 잠수함의 속도

에너지 보존법칙을 적용하면 다음 식이 성립한다.

$$\frac{1}{2} M_s v_{si}^2 = \frac{1}{2} M_s v_{sf}^2 + \frac{1}{2} M_t V_0^2 \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)으로부터 잠수함 충돌 후 합체의 속도는 다음과 같이 계산된다.

$$V_0 = \frac{M_s}{\frac{M_s}{2} + M_t} v_{si} \quad (7)$$

잠수함과 충돌하는 지점에서 합체 전체를 탄성스프링으로 이상화하면 스프링의 등가 강성계수는 다음 식과 같은 관계를 갖는다.

$$w(0) = \delta = \frac{PB}{2k} = \frac{P}{K_{eq}} \quad (8)$$

여기서,

δ = 합체의 최대 변위

K_{eq} = 충돌 지점에서 합체의 등가강성

식 (8)로부터 등가강성은 다음 식으로 표현된다.

$$K_{eq} = \frac{2k}{\beta} \quad (9)$$

에너지 보존 원리에 따라 충돌 후 합체의 운동에너지가 합체의 탄성에너지로 저장된다고 가정하면 다음과 같이 변형량이 계산된다.

$$\delta = \sqrt{\frac{3m_t}{k} \frac{1}{1 + \frac{3m_t}{M_s \beta}} v_{si}} \quad (10)$$

합체 단면의 굽힘모멘트는 다음 식으로 계산된다.

$$M_B = Elw(x)'' = 2EI\delta\beta^2 e^{-\beta x} (-\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (11)$$

여기서,

M_B = 합체의 굽힘모멘트

4. 유한요소법을 이용한 충돌 시뮬레이션

비선형 해석에 앞서 탄성지지된 보에 집중하중이 작용하는 경우의 이론해인 식 (1)의 타당성을 검증한다. 무한 보에 작용하는 집중하중에 의한 변위를 계산하고 유한요소법 해석 결과와 비교한다. 탄성상태에 있는 합체를 Fig. 4와 같이 보요소로 모델링하고 계류라인은 스프링요소로 모델링한다. 고정구조물 사이의 합체를 모두 모델링하였는데, 단면 특성치 및 주요 데이터는 Table 1에 제시되어 있다. 충돌 대상 잠수함은 해군의 주력 잠수함이 손원일급(배수량 1,800ton, 최대속도 20knots=10m/s)으로 하였다. 선형 및 비선형 유한요소해석 소프트웨어 LS-DYNA를 이용하여 해석을 수행한다 [7].

탄성해석 이후 식 (10)의 타당성을 검증하기 위하여 충돌 시뮬레이션을 실시 한다. 일정한 속도로 움직이는 잠수함이 합체와 충돌하였을 경우, 합체의 거동에 대해 비선형 유한요소해석을 통해 시뮬레이션한다. 잠수함과 충돌하는 부분은 해석의 정확도를 높이기 위해 강체로 모델링하였다. 부

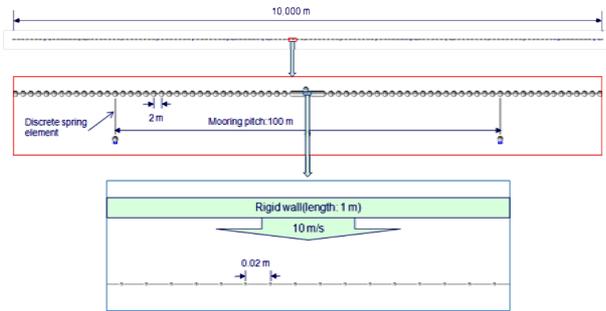


Fig. 4 Finite element model for collision analysis

Table 1 Data for collision analysis

Item	Value
Beam cross-section geometry	Outer diameter of a tube: 14,800mm
	Inner diameter of a tube : 14,722mm
	Young's modulus: 210GPa
	Equivalent density: 44,092kg/m ³
Beam element type	Hughes-liu with cross section integration
Bending stiffness	10,429×10 ⁹ Nm ²
Spring constant for mooring chains	48.3MN/m
No. of beam elements	10,992
No. of nodes	10,998
Mass and added mass	Mass of a impacting barrier 50% up: 2,700ton
	Equivalent density of a beam: added the water mass inside a tube: 139,188.4kg/m ³

가수 질량은 원형 단면임을 고려하여 배수량의 50%로 가정하였다[8].

소성변형을 고려한 비선형 충돌해석법은 실제 현상을 반영할 수 있는 효과적인 수치해석 기법이나, 세부 모델링과 해석을 위해 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 본 연구에서 해중철도 함체를 탄성지지 보로 이상화한 가정은 실제 충돌 상황에서 발생할 수 있는 충격하중에 의한 국부소성변형 및 파괴거동을 모사할 수 없으며, 잠수함 선수 강구조의 소성 변형거동에 의한 충돌에너지소산을 고려할 수 없어서, 실제 충돌 거동을 예측하는 데에는 한계가 있다. 이러한 제한 사항에도 불구하고 간이 충돌해석법은 개념설계 단계에서 핵심적인 자료만으로 간편한 이론식을 통해 함체의 충돌 응답을 신속하고 어느 정도 정확하게 예측할 수 있으므로, 유용한 기법이 될 수 있다. 해중철도의 설계 초기 단계에서 설계변수의 변화가 빈번한 경우, 함체의 충돌 성능이 바로 평가될 수 있으므로 본 연구의 결과는 의미 있는 기여를 할 수 있다.

향후 해중철도의 함체의 상세설계가 진행되고 잠수함의 구조설계안을 입수하면 비선형 소성변형거동을 포함한 보다 상세한 충돌해석을 수행할 예정이다.

5. 해석 결과의 비교

정하중 상태에서 유한요소해석을 수행한 결과, 이론 해석 결과인 식 (1)과 비교해 보면 Fig. 5와 같다. 정하중 상태에서 변위는 1.1% 이내의 오차를 보이고 있다. 함체 지지점이 상당히 떨어져 있는 경우, 경계조건의 효과는 거의 나타나지 않고 있으며, 무한길이의 보에 대한 해석 결과를 활용하더라도 양호한 결과가 얻어질 수 있음을 확인할 수 있다.

충돌의 경우, 상세 유한요소해석을 통해 얻어진 함체의 변위 분포는 Fig. 6과 같이 얻어졌다. 식 (11)의 간이 해석 결과와 유한요소 해석 결과로 얻어진 변위 분포를 비교해 보

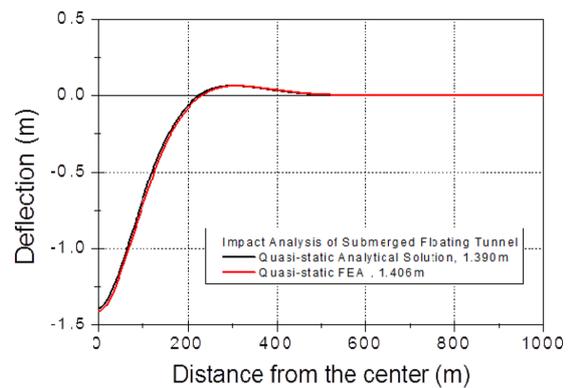


Fig. 5 Quasi-static deflection of the body of the tunnel

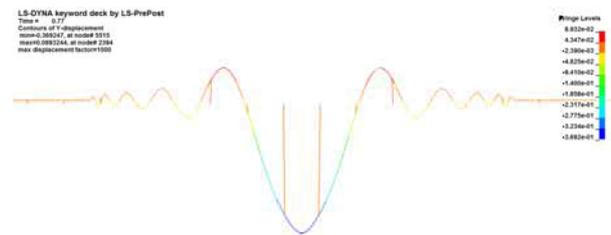


Fig. 6 Contour of deformation by finite element analysis

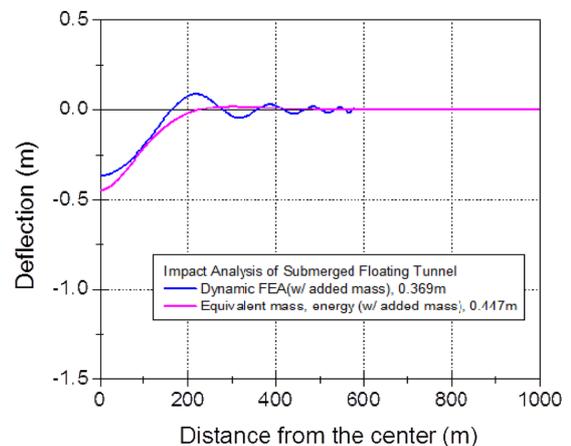


Fig. 7 Comparison of deflections in the body of the tunnel after a collision

Table 2 Comparison of bending moments at the center of the body after a collision

BM at center by analytic solution	BM at center by FEM	Difference
1.003×10^9 N-m	1.227×10^9 N-m	18.2 %

면 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 중앙의 최대 변위가 21% 오차 이내의 양호한 일치치를 보이고 있다. 이론해석에 식 (12)의 굽힘모멘트를 충돌 시뮬레이션 결과와 비교해 보면 Table 2와 같다. 충돌지점의 모멘트는 18%의 오차를 보이고 있다. 오차는 함체를 1차원 집중질량으로 단순화한 데서 기인한 것과 이론 해석을 위한 변위 함수가 실제 충돌에 따르는 파형 진동 현상을 완벽히 구현하지 못하는 데에 기인한 것으로 볼 수 있다. 그러나, 실제 초기설계시 변위와 굽힘모멘트를 신속히 추정하는데 사용할 수 있을 만큼 양호한 결과를 보여주고 있다.

6. 결 론

해중철도는 해저터널에 비해 수심에 좌우되지 않고 저렴한 건설비용으로 단기간에 건설될 수 있는 장점이 있는 혁신적인 교통인프라이다. 본 연구에서는 해중철도의 위험요인인 잠수함이나 기타 낙하물과의 충돌에 대비하기 위해 탄성지지 보이론을 이용하여 충돌시 함체의 안전성을 검증할 수 있는 방법을 제시하였다. 탄성지지된 보이론을 활용하여 해중철도 함체의 등가 질량을 계산하고 1차원 모델에 대해 잠수함과 완전탄성 충돌시 속도를 계산하고 에너지 보존의 원리에 따라 함체의 변형량과 최대굽힘모멘트를 계산하였다. 보요소를 사용하여 유한요소해석을 실시한 결과, 본 연구에서 제시한 간이해석 결과와 정하중 변위의 경우 1.1% 이내, 충돌하중 변위의 경우 21%, 굽힘모멘트의 경우 18% 이내의 오차를 보였다. 정하중 변위의 경우, 함체 지지점이 상당히 떨어져 있으므로, 경계조건의 효과는 거의 나타나지 않았으며, 무한길이의 보에 대한 해석 결과를 활용하더라도 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 충돌 하중시의 오차는 충돌 후 발생하는 파형 진동 현상을 간이모델에서 완벽히 반영하지 못하는 데에 그 원인이 있을 것으로 추정된다. 그러나, 실제 초기설계 시에 신속히 함체의 변형량과 최대굽힘모멘트를 예

측하는 데에 본 연구에서 제안한 간이식을 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

충돌에 따른 소성변형이 고려되지 못한 점이 본 연구의 제한 사항이나 설계 변수 변화에 따른 반복적인 해석을 신속히 처리할 수 있다는 점은 본 연구의 장점이다. 본 연구의 제한 사항을 보완하기 위해 향후 해중철도 함체 상세설계가 확정되고, 잠수함의 세부정보가 입수되면 상세모델링을 통하여 비선형 소성변형거동을 고려한 충돌해석을 수행할 예정이다.

References

- [1] S.I. Seo (2012) Submerged floating railway connecting continents, *Proceedings of International Seminar, KRRRI*, 1-27.
- [2] S.J. Lee, S.C. Yoon, S.H. Lee (2007) Design and construction of immersed tunnel connecting Busan to Geoje, *Technical Review of Yooshin*, 13, 242-263.
- [3] H. Østlid (2010) When is SFT competitive, *Procedia Engineering*, 4, 3-11.
- [4] Y. Hong, F. Ge (2010) Dynamic response and structural integrity of submerged floating tunnel due to hydrodynamic load and accidental load, *Procedia Engineering*, 4, 35-50.
- [5] S. Zhang, L. Wang, Y. Hong (2010) Vibration behavior and response to an accidental collision of SFT prototype in Qian-dao Lake(China), *Procedia Engineering*, 4, 189-197.
- [6] A.C. Ugural, S.K. Fenster (1977) *Advanced strength and applied elasticity*, Elsevier, New York, 283-300.
- [7] Livermore Software Technology Corporation (2003) LS-DYNA User's Manual.
- [8] M. Kawakami, et-al (1984) *Guide to ship vibration*, Nippon Kaiji Kyoka, Tokyo, 9-14.

접수일(2012년 12월 20일), 수정일(2013년 1월 22일),
게재확정일(2013년 4월 24일)

Sung-il Seo: siseo@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo Bangmulgwanro, Uiwon-City, Gyeonggi-Do 437-757, Korea

Jin-sung Kim: kjs@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo Bangmulgwanro, Uiwon-City, Gyeonggi-Do 437-757, Korea