수중폭발에 의한 해중철도의 간이 충격 응답 해석

Simplified Shock Response Analysis for Submerged Floating Railway against Underwater Explosion

서승일* · 사공명 · 손승완

Sung-Il Seo · Myung Sa-Gong · Seung-Wan Son

Abstract To design a submerged floating railway that is safe against underwater explosions, railway behavior must be investigated and clarified. In this paper, shock waves and impulse pressures generated by a charge away from the submerged floating railway are expressed using experimental formulas. The submerged floating railway tethered by mooring lines is modeled as a simply supported beam with elastic springs. Finite element analysis for the beam model subjected to impulse loading is conducted so that the response of the submerged floating railway can be investigated. For design purposes, a simplified analysis method combined with dynamic load factor is proposed for the same model. Maximum deformation and internal forces are calculated and compared with the time dependent analysis results. It is shown that the simplified analysis results show good agreement.

Keywords : Dynamic load factor, Shock wave, Simplified analysis, Submerged floating railway, Transient response analysis

초 록 해중철도 부근에서 테러나 사고에 의해 수중폭발이 발생하였을 경우, 함체에 치명적인 손상을 가할 수 있으므로, 충분한 강도를 확보해야 한다. 본 연구에서는 설계 목적으로 해중철도 인근에서 수중폭발이 발생한 경우, 경험에 기초한 공식을 이용하여 충격압을 추정하고, 충격압에 의한 해중철도의 응답을 해석할 수 있는 간이 해석 방법을 제안하였다. 해중철도 함체를 탄성 지지된 보로 이상화하고, 초기 최대 충격압이 작용하는 보에 대해 정적 유한요소해석을 실시한 후, 동하중 계수와 조합함으로 최대 변위 및 굽힘 모멘트를 계산한다. 간이 해석 결과는 상용 유한요소해석 소프트웨어를 이용한, 시간에 따른 과도응답해석 결과와 비교하여 양호한 일치 결과를 보임을 확인하였다.

주요어 : 간이해석, 과도응답해석, 동하중계수, 부유식 해중철도, 수중폭발

1. 서 론

해중터널(Submerged floating tunnel)은 수면 하에서 초과 부력을 계류장치의 장력으로 평형을 이루면서 떠있는 교통 인프라이다. 장거리 부유식 해중터널은 안전성 측면에서 철도에 적합한 구조물이라고 할 수 있는데, 실제 철도가 운행할 수 있는 교통인프라가 되기 위해서는 다양한 하중조건에 대한 안전성 검증이 필요하다.

해중철도에 가해질 수 있는 하중으로는 파도에 의한 하중, 해류에 의한 하중, 지진에 의한 하중 등 다양한 형태가 고려될 수 있는데, 비상 상황에서 발생할 수 있는 하중이 치명적인 손상을 가져올 수 있다[1]. 파도 입자의 운동은 수심에 따라 지수적으로 감소하므로 해수면의 파력은 수심 20m 이하에서 큰 영향력을 발휘하지 못한다[2]. 또한 해류의 영향은 파도에 의한 영향에 비해 부차적이다. 따라서 해중철도는 심해에서 안정적으로 떠있을 수 있다. 그러나 지진, 충

돌, 수중폭발(Underwater explosion) 등 비상 상황이 발생하면 해중철도는 위협에 빠질 수 있다. 특히 수중폭발에 의한 하중의 경우, 4년 전 서해에서 발생한 천안함 사건에서도 볼 수 있듯이 부유식 선체를 완전히 두 동강 낼 수 있을 만한 강력한 위협 요인이 된다[3]. 해중철도가 장래 대륙을 육상 교통수단으로 연결할 수 있는 교통인프라로서 널리 활용되기 위해서는 치명적인 위협 요인에 대한 대비 설계가 필수적이다.

본 연구에서는 해중철도의 개념설계를 수행하고 수중폭발 공격에 대비하여 구조물을 설계할 수 있는 간이 해석법을 개발하고자 한다. 동하중 계수를 이용한 간이 해석 결과를 유한요소해석을 이용한 시간에 따른 과도응답해석 결과와 비교하여 정확성 및 유용성을 검토하고자 한다.

2. 수중폭발 현상

화약이 수중에서 폭발하면 매우 높은 압력의 충격파(Shock wave)가 수중으로 전파되고, 이어서 고압의 폭발생성물에 의해 구체형 버블이 형성된다. Fig. 1은 수중폭발이 발생하여 수면에서 버블이 터지는 장면을 보여준다. 수중폭발에 의해

*Corresponding author.

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

©The Korean Society for Railway 2014

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.2.100>

Fig. 1 Underwater explosion

Fig. 2 Decay of shock pressure

발생된 충격파는 빠르게 구면파로 전파되지만, 폭발지점으로부터 점점 멀어짐에 따라 속도는 급속히 감소되어 음속으로 낮아지게 된다. 또한 충격파가 전파되어 감에 따라 첨두압력(Peak pressure)의 크기는 감소하고 파형은 늘어지게 된다[3]. 따라서 수중충격파의 압력은 경험식으로서 다음 식 (1)과 같이 표현되고[3] 그림으로 표현하면 Fig. 2와 같다.

$$P(R, W, t) = P_m(R, W) \exp \left[\frac{-(t-t_0)}{\theta(R, W)} \right] \quad (1)$$

$$P_m(R, W) = K \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (2)$$

$$\theta(R, W) = W^{1/3} K' \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{a'} \quad (3)$$

여기서, $P(R, W, t)$ 는 충격압력, $P_m(R, W)$ 는 첨두 압력(Peak pressure), $\theta(R, W)$ 는 감쇠시간(Decay time), R 은 물체와 폭약간의 거리, W 는 폭약중량, K, K' 은 폭약상수이고, α, a' 는 폭약지수이다.

3. 해중철도(Submerged Floating Railway)

고속철도의 운영을 위한 해중철도의 개념은 Fig. 3, 4와 같

Fig. 3 Submerged floating railway shaped as tube

Fig. 4 Module of submerged floating railway

Fig. 5 Fixed jacket structure and emergency exit

이, 부력에 의해 상승하려는 튜브형 함체(Tube structure)를 계류장치의 인장력으로 지탱하는 구조와 같다. 함체는 완벽한 방수를 위해 철강 계열의 금속재로 외판을 형성하고, 내부에 부력과 일정한 비율을 유지하기 위하여 콘크리트를 채워 넣는다. 내부에 다시 철강 계열의 금속재로 내판을 구성하여 이중으로 방수가 이루어지도록 한다.

100m 간격의 모듈을 제작하고 수면에서 볼트로 외판을 연결하여 소조립한 후 다시 수중에서 대조립 하는 방식으로 함

체를 제작해 나간다. 일정 간격마다 승객 비상 대피 및 환기를 위해 고정식 자켓(Jacket) 구조물을 설치한다[4]. 계류장치는 해저의 중력식 콘크리트 블록과 연결되어 초과부력에 의한 인장력을 전달하는 역할을 한다. 비상시 승객 대피 및 환기 등을 고려하여 Fig. 5와 같은 고정식 구조물을 10km 구간마다 설치하는 것으로 설계하였다.

4. 수중폭발에 의한 응답해석

4.1 과도 응답 해석

해중에서 사고로 인해 폭발이 일어나거나 테러 리스트들의 고의적인 폭파에 의해 수중폭발이 발생하는 경우, 해중철도는 충격파의 충격압에 의해 치명적인 영향을 받게 된다. 수중폭발에 대비하여 해중철도의 안전성을 확보하기 위해 충격압이 작용하는 해중철도의 구조적인 응답을 수치적인 방법으로 해석할 수 있다.

해중철도 함체는 계류라인으로 지지되는 균일 단면의 튜브가 고정식 구조물 사이에 연속적으로 연결된 형태이다. 함체는 균일 단면이고 고정식 구조물 간격은 함체의 폭에 비해 매우 길기 때문에 함체를 보로, 계류라인은 탄성지지로, 고정식 구조물은 단순지지의 지지점으로 이상화할 수 있다 [5]. Fig. 6과 같이 함체의 하부에서 수중폭발이 발생하는 경우 함체의 응답은 이론적으로, 단순지지(Simply supported)된 탄성 기초의 보에 충격하중이 작용하는 문제로 귀착된다. 따라서 유한요소해석 소프트웨어를 이용하여 수중폭발에 의한 함체의 응답을 탄성 지지된 보의 시간에 따른 과도응답 해석(Transient response analysis)으로부터 구할 수 있다. Fig. 6과 같은 조건으로 수중폭발이 발생하는 경우, 과도응답해석을 위한 자료는 Table 1에 정리되어 있다. 시간에 따

Fig. 6 Finite element analysis model

Fig. 7 Pressure distribution along length

Table 1 Data for analysis

Data	Value	Remarks
Bending stiffness, $EI(N \cdot m^2)$	6.7×10^{12}	Young's modulus of Steel $2.1 \times 10^{11} Pa$, Ellipsoid with wall thick. 40mm,
Mass per unit length(kg/m)	1.4×10^5	
Stiffness of mooring device(N/m^2) per unit length	4.8×10^5	Steel chain(Diameter 122mm) (=Young's modulus of steel times section area of chain divided by length)
Length of structure(m)	2,000	
Diameter of structure(m)	15	
Explosives weight(kg)	5	Charge weight corresponding to shock factor = 0.01 [2]
Natural frequency(rad/sec)	1.852	
Distance between explosive and structure(m)	100	
Explosive constant 1, K	52.5	
Explosive constant 2, K'	0.084	
Explosive exponent 1, α	1.13	
Explosive exponent 2, α'	-0.23	
Max. impulse pressure(Pa)	5.3×10^5	
Max. impulsive load(N/m)	7.93×10^6

Fig. 8 Displacement at center

Fig. 9 Contour of displacement at 1.1sec(peak time)

른 충격압의 변화와 충격압의 함체 길이 방향 분포는 각각 Fig. 2 및 Fig. 7과 같다.

범용 유한요소해석 S/W인 LS-DYNA를 이용하여[6] Fig. 6과 Table 1의 조건에 대해 보요소와 스프링요소를 이용하여 모델링하고 Fig. 2 및 Fig. 7과 같은 변동 하중에 대해 과도응답해석을 수행한 결과, 함체 중앙에서 시간에 따른 변위는 Fig. 8과 같이 얻어졌고, 최대 변위가 발생하는 시각 ($t=1.1\text{sec}$)에서, 변위의 길이 방향 분포는 Fig. 9와 같이 얻어졌다.

4.2 간이 해석

해중철도 함체의 설계는 수중폭발에 의해 발생하는 최대 응답에 의해 결정되므로 최대 응답을 구할 수 있는 단순한 방법을 찾는 것이 설계 목적으로 필요하다. 1 자유도 진동계에서는 동하중 계수(Dynamic Load Factor)의 개념을 활용하여 정적응답 해석 결과를 기초로 최대 동적 응답을 추정할 수 있다. 연속계에 대해서도 정규모드(Normal mode) 이론을 사용하면 1 자유도 진동계와 같은 개념의 동하중 계수를 이용하여 최대 동적 응답을 구할 수 있다. 구조물의 정적 응답은 이론 식으로 간단히 구할 수 있고, 유한요소해석과 같은 수치 해석법을 적용하더라도 신속하게 구할 수 있다. 정규모드 이론을 적용하기 위해, 충격하중을 받는 보의 변위 w 에 대한 지배 운동방정식을 표현해 보면 식 (4)와 같다[7].

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + kw = p(x, t) \quad (4)$$

양단 단순 지지된 보에 대한 식 (4)의 해는 다음과 같이

정규모드의 급수로 표현할 수 있다.

$$w = \sum_{n=1}^{\infty} r_n(t) \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (5)$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하고 정규모드의 직교성 원리를 이용하면 다음 식이 얻어진다[8].

$$\frac{d^2 r_n}{dt^2} + \omega_n^2 r_n = \frac{2f(t) \int_0^l p_1(x) \sin \frac{n\pi}{l} x dx}{ml} \quad (6)$$

여기서,

$$\omega_n^2 = \frac{EI(n\pi)^4}{m} + \frac{k}{m} \quad (7)$$

$$p(x, t) = f(t)p_1(x) \quad (8)$$

EI 는 보의 굽힘 강성, m 은 단위 길이당 보의 중량, k 는 단위 길이당 스프링 강성, l 은 보의 길이이며 n 은 보의 진동 모드 차수 이다.

모드 정적 변위(Modal static deflection) r_{nst} 는 식 (9)와 같이 정의된다.

$$r_{nst} = \frac{2f(t) \int_0^l p_1(x) \sin \frac{n\pi}{l} x dx}{\omega_n^2 ml} \quad (9)$$

정적 변위에 대한 동적 변위 $r_n(t)$ 의 비를 동적 응답 계수 DLF 로 정의하면 모드별 동적 응답은 식 (10)과 같이 표현된다.

$$r_n(t) = r_{nst}(DLF)_n \quad (10)$$

식 (10)을 식 (5)에 대입하면 전체 변위는 식 (11)과 같이 얻어진다.

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (DLF)_n r_{nst} \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (11)$$

각 모드에 대해 1 자유도 진동계에서 구해진 동적 응답 계수를 적용하면 전체 동적 응답은 각 모드의 합으로 구해진다. 식 (9)에서 볼 수 있듯이 각 모드의 정적 변위는 주파수의 제곱에 반비례하므로, 고차모드의 정적 변위는 감소하게 된다. 따라서, 충격하중을 받는 구조물의 동적 응답은 저차 진동 모드에 의한 응답 성분이 대부분을 차지하게 되고 [8], 근사적으로 최저차 모드의 동적 응답 해석 결과를 적용할 수 있다. 지수함수 형태의 충격압을 초기 기울기가 동일한 삼각형 펄스로 Fig. 10과 같이 이상화하고, 1 자유도 진동계에 대해 삼각형 펄스 하중이 가해지는 경우 동적 응답 계수의 최대값을 구해보면 Fig. 11과 같은 결과가 얻어지게 된다[7].

Fig. 10 Triangular pulse

Fig. 11 Dynamic load factor(T_n , natural period)

4.3 해석 결과의 비교

Fig. 6와 동일한 스프링 지지된 보요소 모델에 대해 정적 응답 해석을 수행하여 Fig. 12와 같은 결과가 얻어졌다. 정적 해석을 통해 얻어진 변위와 부재 모멘트는 동하중 계수를 곱하여 최대 변위 및 모멘트가 된다. Fig. 11에서 동하중 계수를 구하기 위해, 스프링 지지된 양단 단순지지 보의 고유주기 T_n 는 식 (7)을 참고하여 이론적인 방법으로 식 (12)로 계산된다[7].

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{EI(n\pi)^4}{m} + \frac{k}{m}}} \quad (12)$$

Fig. 12 Displacement along length caused by static load

Fig. 13 Maximum displacement along length

Fig. 14 Maximum bending moment along length

Table 1에 따르면 보의 최저차 고유주기는 3.39초이고 t_1 은 0.62초가 되어 t_1/T_n 는 0.18이 되고 Fig. 11에서 삼각 파형의 동하중 계수를 구하면 0.57이 된다. 동하중 계수를 고려하여 간이 해석 결과와 과도응답해석 결과를 비교하면 Fig. 13과 Fig. 14가 얻어진다. 정적 해석 결과를 동하중 계수로 보정하여 얻어진 변위와 굽힘 모멘트는 과도응답해석 결과와 6% 이내로 양호한 일치를 보임을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 대륙을 연결할 수 있는 장거리 부유식 해중철도의 안전성 확보를 위해 수중폭발 공격에 의한 해중철도 함체의 전체 응답 해석을 수행하였다. 수중폭발에 의한 충격압을 제안된 식에 의해 계산하고 함체를 탄성 지지된 보요소로 모델링하여 충격하중에 의한 보의 과도응답을 유한요소해석을 통해 구하였다. 또한 충격압을 삼각형의 펄스로 이상화하고 구조물의 고유주기를 이론 식으로 구하여 1차원 진동계에 대한 동하중 계수를 구하고 정적 해석 결과와 조합하는 간이해석 방법도 제안하였다. 간이해석 결과는 과도응답해석 결과와 양호한 일치를 보임을 알 수 있었다. 간이해석 방법을 이용하여 초기설계 시에 설계 변수가 다양하게 변경되는 경우, 신속하게 함체의 수중폭발에의 McGraw-Hill한 응답 거동을 파악할 수 있게 되었다.

References

- [1] Y. Hong, F. Ge (2010) Dynamic response and structural integrity of submerged floating tunnel due to hydrodynamic load and accidental load, *Procedia Engineering*, 4, pp. 35-50.
 - [2] H. O. Berteaux (1976) *Buoy engineering*, A Wiley-Interscience Publication, New York, pp. 14-27.
 - [3] D.Y. Yun, J.I. Park (2010) On the attack against ROK ship Cheonan, Ministry of national defense Republic of Korea.
 - [4] S.I. Seo (2012) Submerged floating tunnel technology for railway, *International seminar for submerged floating railway*, Seoul, pp. 1-27.
 - [5] S.I. Seo, J.S. Kim (2013) Simplified collision analysis method using theory of beam with elastic foundation, *Journal of the Korean Society for Railway*, 16(3), pp. 202-206.
 - [6] Livermore Software Technology Corporation (2003) LS-DYNA User's Manual.
 - [7] R.W. Clough and J. Penzien (1975) *Dynamics of structures*, McGraw-Hill, New York, pp. 87-99.
 - [8] J.M. Biggs (1982) *Introduction to structural dynamics*, McGraw-Hill, New York, pp. 158-169.
- 집수일(2013년 7월 12일), 수정일(2013년 12월 9일),
게재확정일(2014년 3월 19일)
-
- Sung-il, Seo** : siseo@krri.re.kr
New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, #176 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea
- Myung, Sa-Gong**: rockcore@krri.re.kr
Future Transportation System Research Team, Korea Railroad Research Institute, #176 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea
- Seung-Wan, Son** : swson@krri.re.kr
Department of Virtual Engineering, University of Science & Technology, #217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-333, Korea