

압축수 방식 사출장치 내부 과도압력과 모의를 위한 간이 식

김국현[†]

동명대학교 조선해양공학과 교수

Simplified Formula for Simulating Overpressure Waves in Compressed-Water-Type Launching Device

Kookhyun Kim[†]

Professor, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongmyong University

(Received November 25, 2022 ; Revised December 16, 2022 ; Accepted December 19, 2022)

Abstract – Compressed-water-type launching devices convert the force from compressed water into force-launching underwater structures, such as torpedos and autonomous underwater vehicles. In particular, the overpressure wave in the launching tube is a critical design factor for the launching device. This paper presents a simplified formula for simulating overpressure waves in the launching tube of a compressed-water-type launching device. Scaled model experiments were performed to obtain actual measurement data of overpressure waves in a launching tube with varying piston speeds to examine the practical applicability of the simplified formula. The main factor of the simplified formula was estimated using an optimization technique. The time history of the overpressure waves was satisfactorily simulated using the estimated factor values and showed consistency with the measurement data. In addition, the trend of change by the piston speed of the estimated factors was reviewed, and the practical applicability was demonstrated. A systematic study of the factors influencing the overpressure waves in launching tubes will be possible using experimental data for more various conditions and the proposed simplified formula.



© Korean Tribology Society 2022. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords – Compressed-water-type launching device(압축수방식 사출장치), Overpressure wave(과도압력파), Simplified formula(간이 식), Scaled model experiment(축소모형 실험)

Nomenclature

p : Overpressure (bar) (과도압력파)
 P_0 : Static water gauge pressure (bar) (정수상대압력)

p_1 : 1st kind overpressure (bar) (1종 과도압력)
 p_2 : 2nd kind overpressure (bar) (2종 과도압력)
 t : Time (s) (시간)
 t_1 : 1st kind overpressure wave inception (s) (1종 과도압력과 시작 시간)
 t_2 : 2nd kind overpressure wave inception (s) (2종 과도압력과 시작 시간)
 T : 1st kind overpressure wave duration (s) (1종 과도압력과 지속 시간)

[†]Corresponding author: Kookhyun Kim
Tel: +82-51-629-1658, Fax: +82-51-629-1599
E-mail: kimk@tu.ac.kr
<https://orcid.org/0000-0002-4214-4673>

- A_1 : 1st kind overpressure wave amplitude (bar) (1종 과도압력과 진폭)
- A_2 : 2nd kind overpressure wave amplitude (bar) (2종 과도압력과 진폭)
- c : 2nd kind overpressure wave duration (s) (2종 과도압력과 지속시간)
- α : 1nd kind overpressure wave peakness control coefficient (-) (1종 과도압력과 첨도 조정계수)
- η : 2nd kind overpressure wave damping coefficient (-) (2종 과도압력과 감쇠계수)

1. 서 론

압축수 방식 사출장치는 선형펌프(linear pump) 등의 기구에 의해 생성된 압축수를 수중운동체의 사출력으로 변환하는 장치이며, 일반적으로 유압펌프 (hydraulic pump), 피스톤 (piston), 피스톤관(piston tube), 압축수전달탱크(compressed- water transfer tank), 슬라이딩밸브 (sliding valve), 사출관(launching tube) 등으로 구성된다. 사출관 내부에 형성되는 과도압력파(overpressure wave)는 수중운동체의 사출력에 직접적으로 기여할 뿐 아니라 수중운동체와 사출관 사이에 균일한 압력장을 형성하여 수중운동체가 사출관을 매끄럽게 빠져나가도록 돕는 윤활막 역할을 한다.

한편, 사출관 내부 과도압력파의 크기와 이력은 초기 사출속도, 초기사출가속도 등 수중운동체의 사출성능에 직접적으로 영향을 미치며, 이는 이동경로, 자세 등 사출장치 외부 유동 하 수중운동체 거동 특성을 결정한다. 이에 사출장치 내부 과도압력파를 정량화하기 위한 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 그 결과 실무에 활용 가능한 수치모델링 기법[1]과 축소모형 실험 기법[2,3]이 개발되어 왔으며, 이를 바탕으로 다양한 운용 조건에 대한 사출관 내부 과도압력파에 대한 데이터베이스가 축적되고 있다.

본 연구에서는 압축수 방식 사출장치 내부에 형성되는 과도압력파의 시간이력을 참고하여 사출관 내부 과도압력파 모의를 위한 간이 식을 제안한다. 또한, 축소모형 실험장치를 이용해 피스톤 속도 별로 획득한 과도압력파 데이터를 이용해 간이 식을 구성하는 인자들을 추정하고 그 실무 적용 가능성을 살펴본다.

2. 연구방법 및 내용

Fig. 1은 압축수 방식 사출장치의 사출관 내부에 형성되는 과도압력파를 예시한 것이다. 정수 상대압력(static

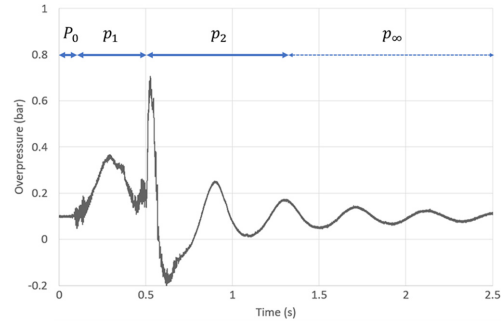


Fig.1. Typical overpressure wave pattern inside launching tube.

water gauge pressure P_0)를 시작으로 완전한 형태를 갖는 1종 과도압력파(1st overpressure wave P_1)가 생성되며, 이어서 급격한 형태를 갖는 2종 과도압력파(2nd overpressure wave, P_2)가 생성된 후 점차 소멸(P_∞)되는 패턴을 갖는다. 1종 과도압력파는 선형 펌프에 의해 피스톤관에 형성된 과도압력파가 압축수전달탱크를 거쳐, 그대로 사출관으로 이송되면서 나타난다. 한편, 2종 과도압력파는 수중운동체 모형 후미부가 압력전달탱크와 사출관을 연결하는 슬라이딩 밸브를 통과할 때, 슬라이딩 밸브가 급격히 개방되면서 발생하는 충격파이다.

본 연구에서는 과도압력파를 정수 상대압력과 1종 과도압력파, 2종 과도압력파로 구분하고 이를 모두 포함하는 간이 식을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$p(t) = P_o + p_1(t) + p_2(t) \tag{1}$$

where,

$$p_1(t) = \begin{cases} A_1 \cos^{2\alpha} \left(\frac{\pi(t-t_1)}{T} \right) & , t_1 \leq t \leq t_1 + T \\ 0 & , otherwise \end{cases}$$

$$p_2(t) = \begin{cases} A_2 e^{-\frac{t-t_2}{c}\eta} \left(1 - \frac{t-t_2}{c} \right) & , t_2 \leq t \leq t_2 + c \\ 0 & , otherwise \end{cases}$$

1종 과도압력파는 Hanning 함수를 기반으로 하되, 과도압력파형의 첨도 조정계수 (peakness control coefficient α)를 추가하였다. 2종 과도압력파는 충격파 모의에 주로 적용되는 Friedlander 근사식[4]을 기반으로 모의하되, 감쇠특성을 반영하기 위해 감쇠계수 (damping coefficient η)를 추가하였다.

제안된 간이 식의 실무 적용 가능성 검토하기 위해 축소모형 실험장치로부터 피스톤 속도 별로 과도압력파 데이터를 획득하고 이를 바탕으로 간이 식을 구성하는 인자들을 추정하였다.

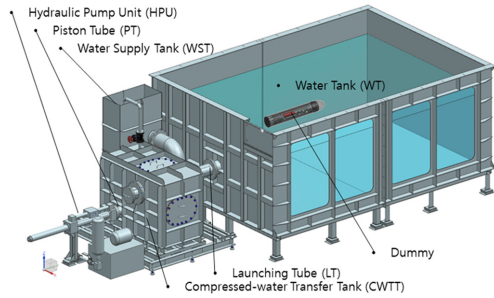


Fig. 2. Scale mode test facility of compressed-water-type launching device[2].

사출관 내부에서의 실제 과도압력파를 획득하기 위해 축소모형실험을 실시하였다. 축소모형 실험장치는 Fig. 2에 보인 바와 같이 선형펌프 구동을 위한 유압장치 (hydraulic pump unit, HPU), 압축수 생성을 위한 피스톤관(piston tube: PT), 사출관(launching tube: LT), 피스톤 관내 형성된 압력을 사출관으로 전달하는 압축수 전달탱크(compressed- water transfer tank: CWTT), 수중운동체 거동관찰을 위한 수조(water tank, WT), 피스톤관 유입수를 공급하는 물공급탱크(water supply tank: WST), 수중운동체 모형(dummy) 등으로 구성되어 있다.

축소모형실험은 총 6개 피스톤 속도에 대해 실시하였다[2]. 이때, 피스톤 속도는 유압펌프와 연결된 LVDT 변위계 실측데이터로부터 산정하였다. 사출관 과도압력파의 시간이력 데이터는 수중운동체 모델 후면에 설치된 압력계를 이용해 상대압력(gauge pressure) 값으로 추출하였으며, 이를 이용해 실측데이터에 부합하는 간이 식의 인자들을 산정하고 그 결과를 검토하였다.

1종 과도압력과 시작시간 t_1 은 피스톤 동작시점과 같다고 가정하였으며, 정수압 상대압력 P_0 는 실험시작부터 피스톤 동작시점까지의 상대압력 이력의 평균값으로 산정하였다. 2종 과도압력과 시작시간 t_2 , 1종 과도압력과 지속시간 T , 1종 과도압력 진폭 A_1 , 2종 과도압력 진폭 A_2 , 2종 과도압력과 지속시간 c , 1종 과도압력과 침도 조정계수 α , 2종 과도압력과 감쇠계수 η 등 총 7종의 인자들에 대해서는 Nelder-Mead simplex method[5]에 기반한 최적화 알고리즘을 적용하여 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 축소모형실험장치에서 추출한 사출관 과도압력과 실측 데이터를 피스톤 속도별로 도시한 것이다. 참고로, 피스톤 속도는 LVDT 데이터를 이용해 0.77 m/s, 1.01 m/s, 1.23 m/s, 1.43 m/s, 1.65 m/s, 1.92 m/s으로 산

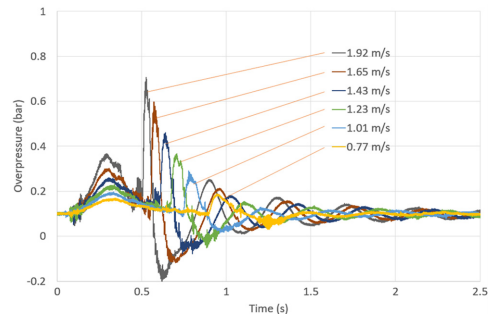
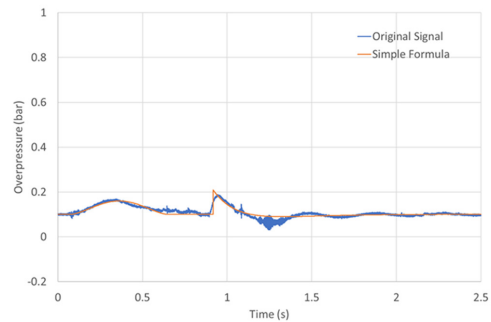
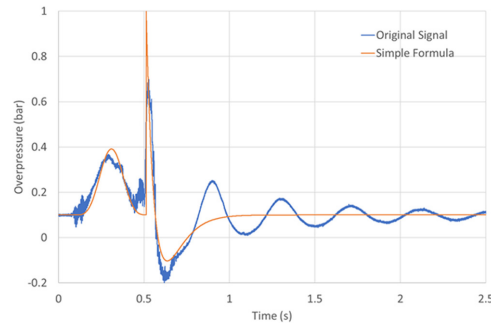


Fig.3. Measured data of overpressure wave inside launching tube.



(a) Piston speed = 0.77 m/s



(b) Piston speed = 1.92 m/s

Fig. 4. Comparison of overpressure wave in launching tube between original and estimated signal by simplified formula.

정하였다. 피스톤 속도가 커질수록, 과도압력파의 크기는 증가하며 1종 및 2종 과도압력파의 피크 발생 시간은 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 피스톤 속도 0.77 m/s와 1.92 m/s에 대한 사출관 내부 과도압력파를 실측 데이터와 간이 식에 의한 추정결과로 비교하여 도시한 것으로써, 제안된 간이 식에 의한 추정데이터가 실측 데이터와 잘 부합함을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 2종 과도압력파의 피크치가 실

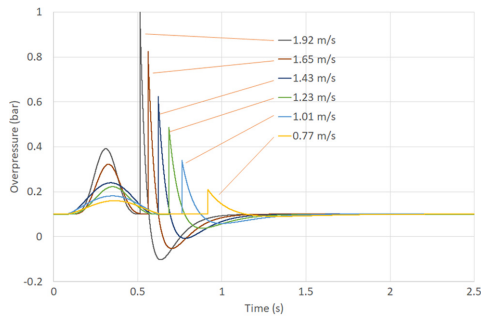


Fig. 5. Comparison of overpressure wave in launching estimated by simplified formula for various piston speeds.

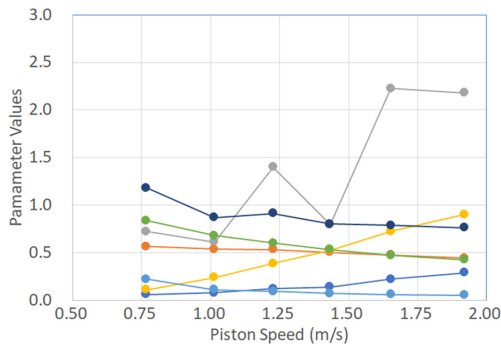


Fig. 6. Estimated parameter values of simplified formula.

측데이터 대비 크게 추정되어 이에 대한 개선 연구가 필요할 것으로 사료된다. 한편, 2중 과도압력과 발생 이후에 조화성분의 파동이 발생하는데 이는 축소모형 실험장치 구성품 중에서 수조와 구조물간의 공진특성에 의한 것이며, 이러한 현상은 실제 사출장치에서는 나타나지 않는 것으로 확인되었다[6].

Fig. 5는 총 6개 피스톤 속도 별로 제안된 간이 식을 이용한 사출관 과도압력과 산정결과를 비교 도시한 것이다. 피스톤 속도에 따른 과도압력과 시간이력을 명확하게 관찰할 수 있다. 피스톤 속도가 증가함에 따라, 1중 및 2중 과도압력의 피크 발생 시간이 감소하고 있으며, 피크 값은 증가하고 있다. Fig. 6은 피스톤 속도에 따라 추정된 간이 식 인자 값을 정리하여 도식화한 것이다. 피스톤 속도가 증가함에 따라 1중 및 2중 과도압력 파 진폭 A_1 과 A_2 는 증가하는 반면, 나머지 인자 값은 점차 감소함을 관찰할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 압축수 방식 사출장치의 사출관 내부

에 형성되는 과도압력파를 모의할 수 있는 간이 식을 제안하였다. 간이 식의 실무 적용성을 검토하기 위해 압축수 방식 사출장치를 모사한 축소모형실험장치를 이용해 피스톤 속도에 따른 사출관 내부 과도압력과 실측데이터를 확보하였으며, 최적화 기법을 적용해 간이 식의 주요 인자를 추정하였다. 추정된 인자 값들을 이용해 복원된 과도압력파의 시간 이력은 실측 데이터와의 부합성이 높게 나타났다. 추정 인자들의 피스톤 속도별 변화 추이를 검토하고 실무 적용성을 확인하였다.

향후 다양한 조건에 대한 실험데이터를 확보하고 제안된 간이 식에 사용된 인자들을 중심으로 데이터베이스 구축이 가능하다. 이를 바탕으로 사출관 내부에서의 과도압력파에 영향을 미치는 요소들에 대한 체계적 연구가 가능할 것으로 기대된다.

Acknowledgements

이 논문은 2021년도 동명대학교 교내학술 연구비 지원에 의하여 연구되었음(과제번호: 2021A034).

References

- [1] Lee, S. J., "Numerical Investigation of Effect of Opening Pattern of Flow Control Valve on Underwater Discharge System using Linear Pump", *The Korea Institute of Military Science and Technology*, 2019, <https://doi.org/10.9766/KIMST.2019.22.2.255>
- [2] Kim, K., Cho, J. Y., Choi, Y. G., Choi, Y. J., Lee, J., Yu, B. S., "Scaled Model Test of Compressed Water Type Ejection System : Part 1 - Dynamic Characteristics," *Proc. The Korean Society of Ocean Engineers Annual Conference*, Gimhae, S. Korea, November 2019.
- [3] Yi, J., Ahn, K. and Sur, J., "A Study on the Experimental Trend Analysis of Underwater Noise Factors in Compressed Water System of the Linear Pump Type," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol.24, No.2. The Korea Institute of Military Science and Technology, 2021, <https://doi.org/10.9766/kimst.2021.24.2.228>
- [4] Stewart, J. B., *Air Blast Calculations*, Report No. ARL-TN-549, Army Research Laboratory, Aberdeen, US, 2013.
- [5] Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., Wright, P. E., "Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions." *SIAM Journal of Optimization*. Vol.9, No.1, pp.112-147, 1998.
- [6] Lanowy, M. J., Sharpe, K. G., Lussier, D. A., Godfrey, D. M., Rodrigues, M. A., Berlam, G. R., *Torpedo launch mechanism and method*, Systems Engineering Associates Corp., US Patent No.6,418,870, 2002.