

선형펌프방식 압축수 시스템의 실험적 수중소음인자별 경향분석 연구

이종주^{*,1)} · 안강수¹⁾ · 서종무¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 해양기술연구원

A Study on the Experimental Trend Analysis of Underwater Noise Factors in Compressed Water System of the Linear Pump Type

Jong-ju Yi^{*,1)} · Kang-su Ahn¹⁾ · Jong-mu Sur¹⁾

¹⁾ Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 4 January 2021 / Revised 24 February 2021 / Accepted 12 March 2021)

Abstract

In order to understand the underwater noise source factor of the linear pump type forced ejection system, a reduced-model compressed water experiment device was developed. The reduced-model compressed water experiment device consists of a reverberation tank, a linear pump type forced ejection device, and an underwater vehicle. The underwater noise source was selected from the hydraulic ram moving speed, the hydraulic ram/piston pipe spacing, the ejection pipe inlet/water ram area ratio, and the number of water ram inlets. The underwater vehicle was ejected into the reverberation tank by the device. The source level was derived from the measured sound pressure. The source level tends to increase as the hydraulic ram/piston tube spacing and the hydraulic ram moving speed increase. The source level tended to increase as the area ratio was increased, but the level was weak. The number of water ram inlet did not affect the source level.

Key Words : Underwater Noise Source(수중소음원), Linear Pump Type Ejection System(선형펌프방식 강제사출시스템), Reverberation Tank(잔향수조), Underwater Vehicle(수중운동체)

기 호 설 명

α : Absorption coefficient	[-]	T_{60} : Reverberant Time	[s]
V : Water tank Volume	[m ³]	S : Reverberant tank surface area	[m ²]
		f_s : Schroeder frequency	[Hz]
		c : Sound speed	[m/s]
		p_d : Direct acoustic pressure	[Pa]
		p_0 : dB reference pressure	[Pa]
		r : Distance the source and hydrophone	[m]

* Corresponding author, E-mail: leongreal@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

r_0 : dB reference distance [m]
 S_0 : Source output [Pa m]

1. 서론

수중운동체를 수중에서 사출하는 방법은 수중운동체 자체 추진력을 이용하는 방법과 강제사출시스템을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 강제사출시스템은 별도의 사출시스템을 구축하여 수중운동체를 강제로 사출시키는 방법으로 사출력을 생성하는 방법에 따라 선형펌프방식, 터빈펌프방식으로 나눌 수 있다. 선형펌프방식은 유압램과 수압램이 연결되어 유압램 이동에 따라 수압램이 구동되면서 압축수를 생성시킨다. 압축수는 사출관에 짧은 시간내에 공급되면서 사출관 내부의 수중운동체를 밀어내게 된다. 터빈펌프방식은 압축공기를 이용하여 터빈을 회전시키고, 터빈축에 연결된 수차가 회전하여 압축수를 생성시키는 방식이다.

수중운동체가 사출되면서 발생하는 소음은 수중운동체가 사출되는 동안 수중운동체/주변 유체간 상호작용에 의한 소음과 강제사출시스템 자체에서 생성되는 소음으로 나눌 수 있다. 수중운동체/주변 유체간 상호작용에 의한 소음이 커지기 위해서는 수중운동체 속도가 상당히 빨라야 될 것으로 예상되는데, 사출 초기에 수중운동체 속도가 상대적으로 느리기 때문에 강제사출시스템 운용중 발생 소음이 더 강하게 나타날 것으로 판단된다. 본 논문은 강제사출시스템 구성요소에서 소음유발 원인으로 판단되는 요소에 대한 인자별 경향성을 분석하고, 강제사출시스템의 저소음화를 위한 설계인자를 도출하기 위한 논문이다.

2. 수중소음인자 분석 및 실험장치 구성

2.1 선형펌프방식 압축수 시스템

본 논문에서 분석한 강제사출시스템은 선형펌프방식으로 Fig. 1과 같이 사출관(Ejection Tube), 청수이송부(Water Transfer Tank), 워터램관(Water Ram Tube), 청수공급탱크(Water Supply Tank)으로 구성되어있다. 유압램과 수압램은 로드로 연결되어 같이 움직인다. 유압램에 유압이 공급되면 유압램과 수압램은 왼쪽으로 움직인다. 이때 수압램헤드 좌측에 있는 청수는 워터램 출구로 흐르게 되는데 워터램 출구 면적에 비해

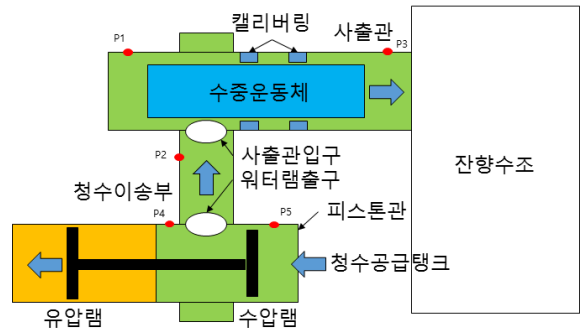


Fig. 1. The compressed water system diagram

Table 1. Discharge test system size

Part	Dimension
Ejection Tube	2.1 m × φ216.3 mm(OD)
Water Transfer Tank	1.68 × 0.87 × 1.2 m
Water Ram Tube	1.28 m × φ406.4 mm(OD)
Water Supply tank	0.98 × 0.5 × 1.0 m

많은 유량이 짧은 시간내에 흐르게 되어 고압 압축수가 생성된다. 고압 압축수는 청수이송부를 거쳐 사출관입구로 유입된다. 유입된 압축수는 사출관의 캘리버링에 의해 수중운동체 전방보다는 후방으로 유입된다. 유입된 압축수에 의해 수중운동체 후방압력이 상승하면서 수중운동체가 전진한다. 수중운동체는 압축수에 의한 압력에 의해 잔향수조로 사출된다. 실험장치 크기는 Table 1과 같다.

2.2 수중소음인자 분석

선형펌프방식 실험장치 운용중 소음은 고압 압축수의 생성 및 이송시 일어난다고 판단되었다. 고압 압축수가 만들어지는 과정에 따라 소음인자를 아래와 같이 선정하였다.

- 수압램 이동속도(PV)
- 수압램/피스톤관 간격(WRC)
- 사출관입구/워터램출구 면적비(SV)
- 워터램입구 개수(SVH)

수압램 이동속도(PV) 형태에 따라 수중사출체 이동속도가 결정된다. 수압램 작동 초기에 천천히 움직이면 수중사출체에 가해지는 압력이 작아 초기 가속도가

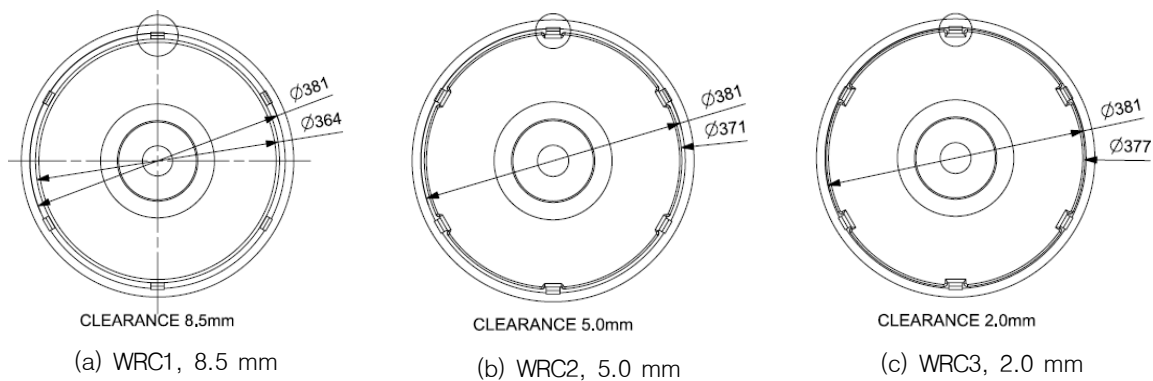


Fig. 2. The test case – WRC

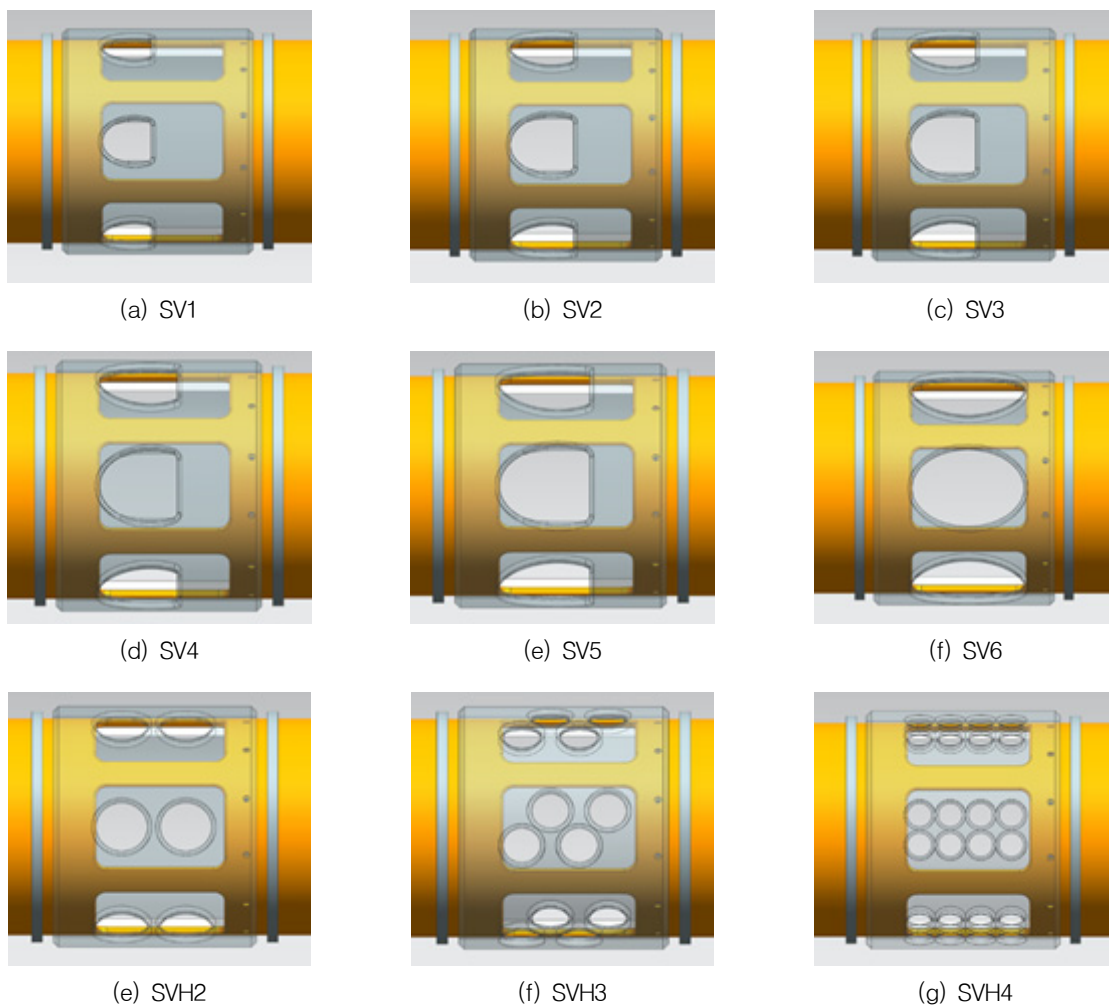


Fig. 3. The test case – SV, SVH

Table 2. The test case

Noise source	Case	Factor
수압램 이동속도 (PV)	PV1	0.75 m/s
	PV2	1.00 m/s
	PV3	1.25 m/s
	PV4	1.50 m/s
	PV5	1.75 m/s
	PV6	2.00 m/s
수압램/ 피스톤관 간격 (WRC)	WRC1	간극 8.5 mm
	WRC2	간극 5.0 mm
	WRC3	간극 2.0 mm
사출관입구/ 워터램출구 면적비 (SV)	SV1	면적비 0.18
	SV2	면적비 0.30
	SV3	면적비 0.35
	SV4	면적비 0.40
	SV5	면적비 0.50
	SV6	면적비 0.70
사출관입구 형상 (SVH)	SVH2	타공홀 2개
	SVH3	타공홀 4개
	SVH4	타공홀 8개

낮고 수압램/피스톤관 간격, 사출관/수중운동체 간격 등에 의한 압축수유출이 많아 사출관 이탈속도가 낮아질 것으로 예상된다. 따라서 수압램 이동속도는 강제사출시스템 성능을 결정하는 중요한 인자라고 판단하였다. 수압램/피스톤관 간격(WRC)은 압축수유출에 가장 큰 영향을 줄 것으로 판단하였다. 사출관/수중운동체의 전방에는 캘리버링을 2개 설치하여 유출량을 최소화했기 때문이다. 사출관입구/워터램출구 면적비(SV)는 고압 압축수에 영향을 줄 것으로 판단하였다. 그리고 워터램입구 개수(SVH)은 사출관 내부로 유입되는 고압 압축수 흐름에 변화를 주기 위해 설정하였다. 사출관 입구 면적은 SV3와 동일하며, 타공홀 직경을 변화시켰다. 수중소음인 4가지에 따라 Table 2와 같이 실험인자를 정하였고 실험인자 형상은 Fig. 2, 3과 같이 제작하여 워터램출구에 교체가능하도록 설계하였다. Fig. 2는 수압피스톤 헤드직경을 증가시켜서 수압피스톤관까지의 거리를 각 8.5 mm, 5.0 mm, 2.0 mm가 되도록 설계된 피스톤헤드 그림이다. Fig. 3은 워터램

출구 면적을 고정된 상태에서 사출관의 해수입구 면적을 달리하여 면적비를 변경시킬 수 있도록 설계한 사출관 입구부 형상이다. Table 2에 언급된 각 실험인자를 조합하여 동일 조건시험을 총 3회씩 반복하여 획득한 시계열 수중음향데이터를 1/3 Octave Band를 구하였고 이를 DB평균한 뒤 Overall값으로 표현하였다.

2.3 수중운동체

수중운동체는 Fig. 4와 같이 헤드부분이 유선형이며, 후방은 평판 형태로 선정하였다. 수중운동체는 내부에 계측기, 배터리, 센서를 탑재하고 있어 수중운동체 자체 운동 및 주변유체 압력계측이 가능하다. 압력센서는 수중운동체 후방압력을 계측하며, 수중운동체 무게 중심에는 속도측정용 가속도센서를 설치하였다.



Fig. 4. Dummy shape and internal structure

2.4 잔향수조

수중운동체가 사출되는 공간은 잔향수조이다 잔향수조는 Fig. 5와 같이 직육면체 형상이며, 제원은 Table 3에 정리하였다. 잔향수조는 연강재 보강판 구조로 되어 있으며, 내부 관측이 용이하도록 잔향수조의 한쪽 면을 강화유리로 구성하였다. 또한 잔향수조 지지부와 바닥면 사이에는 탄성마운트를 설치하여 실험실에서 잔향수조로 전달 될 수 있는 왜란을 최소화하였다. 잔향수조 크기는 ISO3741에서 제시하는 기준을 준용하여 결정하였다.

Table 3. The dimension of reverberant water tank

Part	값
Length	5.00 m
Width	3.50 m
Height	1.96 m
Water depth	1.47 m

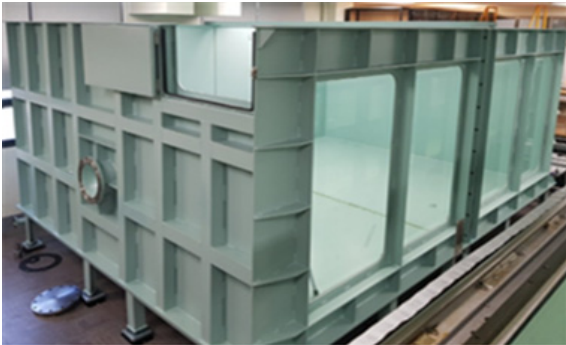


Fig. 5. The reverberant water tank

2.5 실험장치 계측시스템

실험장치 계측시스템은 수중운동체 내부 계측시스템과 주파수 분석기, 압력센서, 수중청음기로 구성하였다. 계측 데이터는 수중운동체에 설치된 센서 데이터를 포함하여 총 19채널로, 수중사출실험이 종료된 후 수중운동체 내부에서 저장된 4개 채널 데이터와 잔향수조에서 계측된 데이터를 동기화 하였다. 수중음향 계측시 수중운동체 운동에 의한 유체교란으로 수중청음기가 흔들릴 수 있기 때문에 Fig. 6과 같은 구조물에 수중청음기는 고정하였고, 구조물을 잔향수조에 설치할 때 구조물 하부에 탄성마운트를 설치하여 수중운동체 사출시 충격에 의한 수중청음기 영향을 최소화 하였다. Fig. 6에서 H1~H4는 수중운동체 사출관 출구중심에서 200 mm 이격된 위치에서 10도 간격으로 설치하고, 20도 위치부터 사출관 출구 중심 반경 방향으로 H5~H9를 각기 250, 300, 360, 480, 1000 mm 지점에 설치하였다.

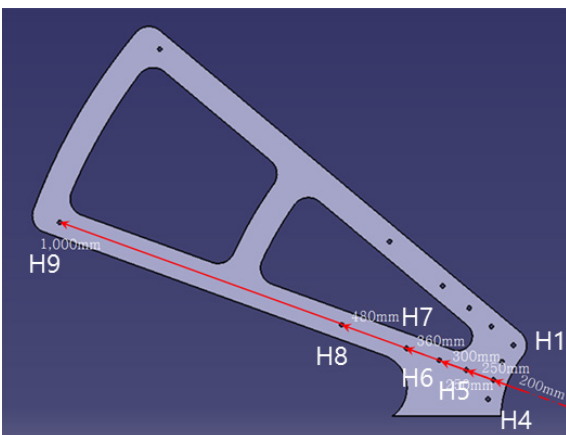


Fig. 6. Jig design for hydrophone arrangement

Table 4. The measurement point and sensor type

측정위치	센서	계측
잔향수조	H1~H9	수중음압
실험장치	P1~P5	위치별 수중압력
	L	수압램 이동거리
수중운동체	ACC	가속도
	V.P1~V.P3	수중압력

3. 잔향수조 음향특성 및 음원산출기법

3.1 잔향수조 음향특성 분석

잔향수조 음향학적 특성을 분석하기 위해 잔향시간을 실험적으로 계측하였다. 잔향공간에서의 평균 흡음률(Average Absorption Coefficient, α)은 식 (1)을 이용해 산정할 수 있다^[1].

$$\alpha = \frac{24 \ln 10}{c} \frac{V}{T_{60} S} \quad (1)$$

식 (1)에서 c 는 음속, V , S 는 잔향공간의 부피 및 표면적이며, T_{60} 은 잔향시간이다. Schroeder 주파수 f_s 는 식 (2)와 같이 정의되며, 음장의 확산음장(Diffused Acoustic field) 생성 여부를 판단할 수 있는 기준주파수이다. 잔향시간은 잔향수조내에 수중음원을 통한 수중청음기 계측데이터를 분석하여 선정할 수 있다. 잔향수조내에 수중청음기를 설치한 뒤 수중음원을 이용하여 주파수별 음원을 발생시켜 계측하였다. 주파수별 음원은 시간에 따라 주파수를 증가시키는 Chirp 신호방식 중 Logarithmic-chirp, Linear-chirp 방법과 White Noise를 사용하였다. Table 5는 수중음원 신호에 따라 수중청음기 9개에서 계측된 잔향시간의 평균값이다. Table 6은 평균 흡음계수 및 Schroeder 주파수 계산결과이다. White Noise인 경우 5 kHz 이하에 충분한 에너지가 공급되지 않아 계측이 안되어 평균 잔향시간 계산에서 제외하였다. 잔향공간 부피는 25.73 m³, 표면적은 59.99 m², 음속은 1430 m/s이다.

$$f_s = 0.6 \sqrt{\frac{c^3 T_{60}}{V}} \quad (2)$$

Table 5. The reverberation time for different method

1/3 Oct. Band Center Fre.(Hz)	Reverberation Time(s)		
	Log	Linear	White
2,500	0.29	0.29	-
3,150	0.27	0.27	-
4,000	0.27	0.28	-
5,000	0.27	0.27	-
6,300	0.28	0.28	0.32
8,000	0.31	0.30	0.35
10,000	0.33	0.33	0.36
12,500	0.35	0.36	0.38
16,000	0.39	0.40	0.40
20,000	0.44	0.44	0.43

Table 6. The result of reverberant tank characteristic

1/3 Oct. Center Fre.(Hz)	Average Reverberation Time(s)	Average Absorption Coefficient	Schroeder Frequency (Hz)
2,500	0.29	0.057	3445
3,150	0.27	0.061	3324
4,000	0.28	0.060	3355
5,000	0.27	0.061	3324
6,300	0.29	0.056	3465
8,000	0.32	0.052	3619
10,000	0.34	0.049	3730
12,500	0.36	0.046	3856
16,000	0.40	0.042	4029
20,000	0.44	0.038	4227

3.2 음원수준 산출 기법

실험인자별 실험을 통해 측정한 음압을 이용하여 음원수준(Source Level, SL, dB Ref. 1 μPa)을 산정하였다. 본 연구에서는 수중소음원의 특성을 파악하기 위해 잔향시간을 기반으로 한 음원수준 산정 기법을 사용하였다. 잔향수조에서는 수중 소음원으로부터의 직접음과 반사와 확산에 의한 잔향음이 합쳐서 전체 음장을 형성한다. 잔향수조에서 측정한 잔향시간을 활용

하면 식 (3)을 이용해 미지의 수중소음원의 음원수준을 산정할 수 있다²⁾.

$$SL = 20\log_{10} \frac{p_r}{p_0} + 10\log_{10} \frac{V}{T_{60}c} + 0.4 \quad (3)$$

식 (3)에서 p_r 은 확산음장에서 측정된 음압(Pa), V 는 잔향수조의 체적, T_{60} 은 잔향시간, c 는 음속, p_0 는 기준음압이다.

3.3 소음계측결과와 데이터 분석

잔향수조에서 측정한 수중소음은 Fig. 7과 같은 형태이다. 수중운동체는 사출관 내부에서 압축수 사출관 입구, 캘리버링을 거쳐 사출관 출구를 통해 잔향수조로 사출되고, 잔향수조 내부의 안전 그물에 걸려 멈추게 된다. 각 과정에서 특이소음이 발생되는데, 이때 발생하는 소음은 잔향수조 음향학적 특성, 강제사출장치 구조적 특성이 동시에 계측된다. 따라서 강제사출장치에 의해서만 발생하는 소음을 구별해야 된다. 계측된 원신호에서 안전그물에 의한 착지신호 등과 같은 이상신호를 파악한 후 Time-Window를 적용하여 해당 신호를 제거하고 High-Pass Filter를 이용하여 강제사출장치와 잔향수조의 구조적 신호를 제거하였다. 그리고 1/3 Octave Band Filter를 이용하여 주파수 밴드별 음압수준(Sound Pressure Level)을 도출할 수 있다. 수중음향은 사출관에서 일정거리만큼 떨어진 곳에서 계측되는데, 잔향공간이 형성되는 것으로 확인된 H7, H8, H9의 평균 음압수준과 Table 6의 잔향시간, 잔향수조 부피, 음속을 식 (3)에 대입하여 주파수밴드별 음원수준(Source Level)을 도출하였다. 본 논문에서는 주파수 밴드별 음원수준보다는 총 음원수준(Overall Source Level)을 이용하여 수중인자별 수중소음 경향을 분석하였다.

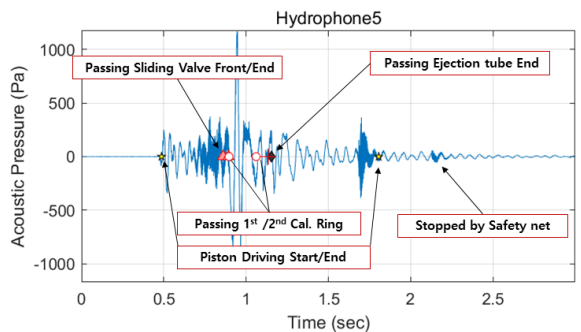


Fig. 7. Measurement data from hydrophone

4. 실험인자별 음원수준 경향성 분석 결과

4.1 소음인자별 실험

수압램 이동속도 형태(profile) 및 최종 도달 속도 크기에 따라 수중운동체 사출속도가 결정된다. 잔향수조 내부로 사출된 수중운동체는 안전그물에 걸려 멈추게 된다. 그러나 사출속도 빠른 경우 안전그물을 파손하는 사례가 발생되어 WRC2의 2 m/s, WRC3의 1.75, 2.00 m/s 실험은 안전을 위해 실시하지 않았다. 수압램 이동속도 계측결과는 유압램과 연동하여 움직이는 LVDT 이동거리를 분석하여 Fig. 8과 같이 도출되었다. 각 실험인자별 SV2~SV6, SVH2~4의 수압램 이동속도는 모두 유사함을 확인하였다. Fig. 8에서 WRC1의 1.50 m/s 속도 형태와 WRC2, 3의 1.50, 1.75 m/s 속도형태가 다소 차이가 발생하였으나 수중운동체 사출속도/가속도 분석에서 WRC에 따른 수중운동체 사출속도에는 큰 변화가 없음을 확인하였다.

4.2 실험결과 분석

Fig. 9에서 가로축은 수압램 이동속도(PV), 세로축은 음원수준(Ref. 1 μ Pa)인 수압램/피스톤관 간격(WRC)에 따른 사출관입구/워터램출구 면적비(SV)별 음원수준 산출결과이다. WRC1은 PV 증가에 따른 음원수준 증가 경향이 1.25 m/s까지는 불분명하나 1.50 m/s 이상에서는 대체적으로 PV증가에 따른 음원수준 증가 경향이 있는 것으로 판단된다. WRC2는 PV가 상대적으로 작은 0.75 m/s에서 SV2의 증가경향 불분명하였지만, 나머지 면적비에 대해서는 PV와 음원수준이 비례적 관계를 보이고 있다. WRC3에서는 PV와 음원수준 간의 비례관계를 분명히 볼 수 있었다. 이는 수압램 이동속도(PV)가 음원수준을 결정하는데 있어 가장 큰 역할을 하며, WRC는 PV와 음원수준이 비례적 관계를 보이기 시작하는 PV크기를 결정하는데 관계하는 것으로 판단된다.

Fig. 9에서 특이한 점은 면적비에 따른 음원수준 차이가 그리 크지 않다는 것이다. SV가 클수록 사출관 내부로 유입이 상대적으로 쉬울 것으로 판단되어 SV가 클수록 음원수준이 작아질 것으로 예상하였으나, PV만큼 확실한 비례관계를 보여주지 않았다. SV와 음원수준간의 비례관계가 나타나기 위해서는 앞서 경우와 마찬가지로 WRC가 중요한 역할을 한 것으로 판단된다. 간격이 가장 큰 WRC1에서는 SV와 음원수준 관계가 거의 나타나지 않았다. 그러나 WRC2에서는 피

스톤 속도 1.50 m/s 이상부터는 면적비가 가장 작은 SV1이 면적비가 가장 큰 SV6에 비해 약 3~4 dB 정도 큰 것으로 나타났다. WRC3도 WRC2와 유사하게 SV1이 SV6보다 4 dB 정도 큰 음원수준을 보이고 있다. 수압램/피스톤관 간격이 작아야 수압램/피스톤관 간격으로 빠져나가는 유량이 줄어들어 사출관으로 흘러들어가는 유량이 증가하게 되며, 이로 인해 SV가 클수록 압축수가 워터램 출구를 쉽게 통과하는 유동구조가 생성되어 소음수준이 작아진 것으로 추측된다.

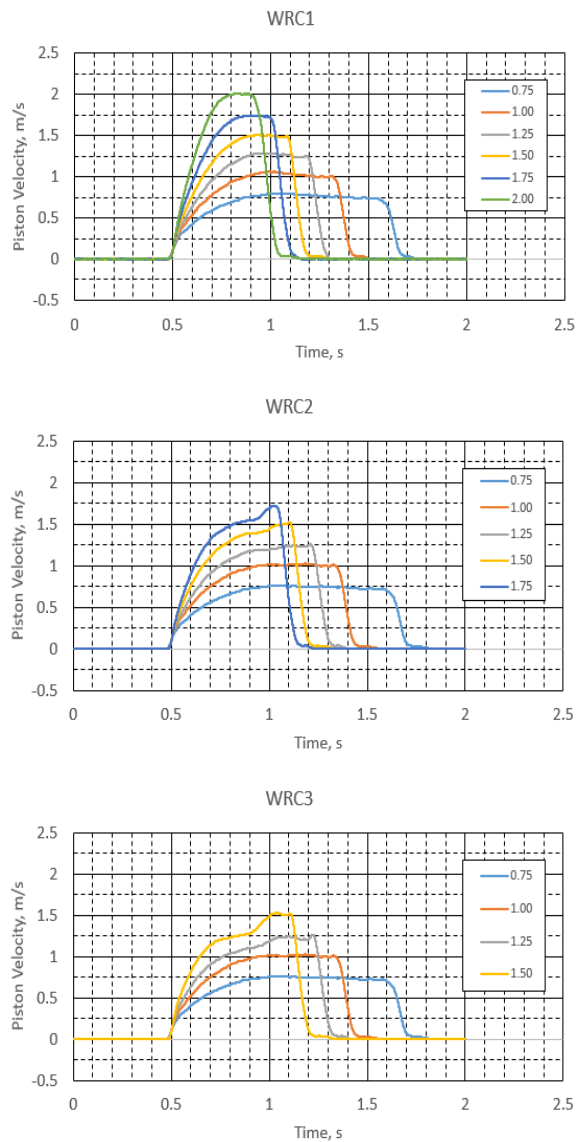


Fig. 8. Water ram velocity profile

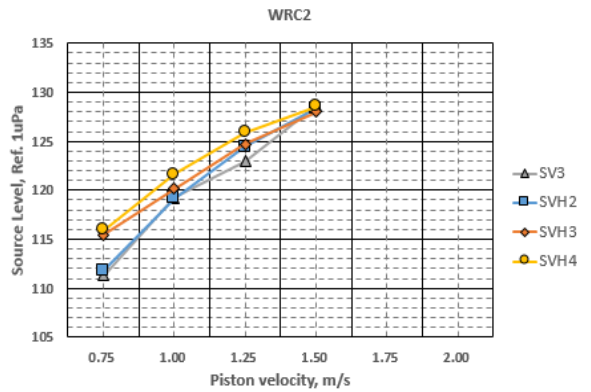
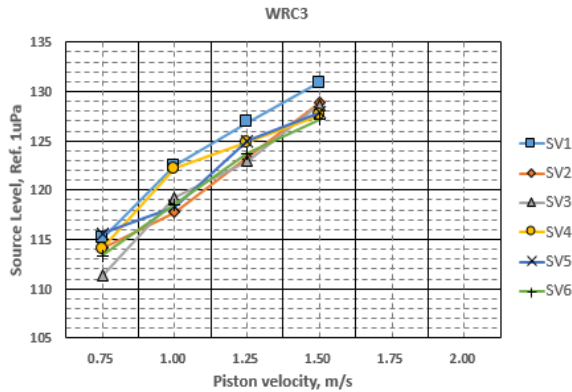
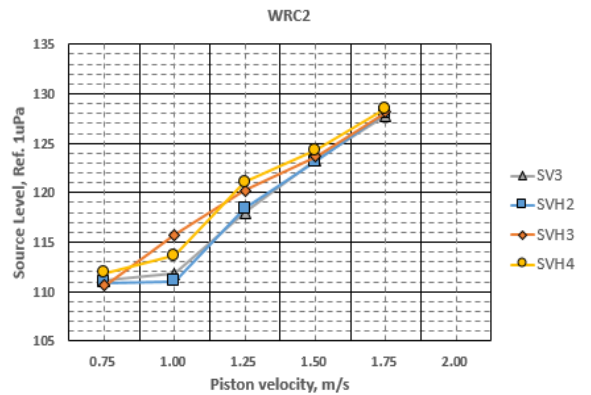
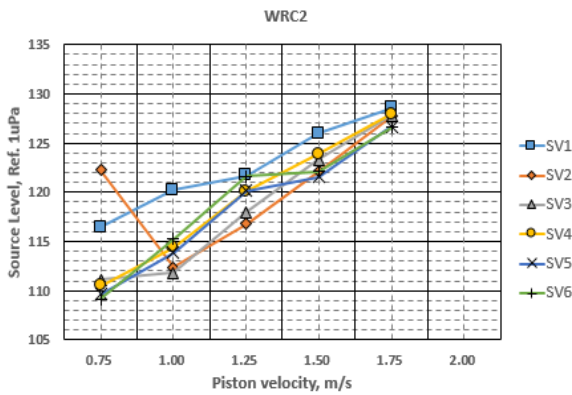
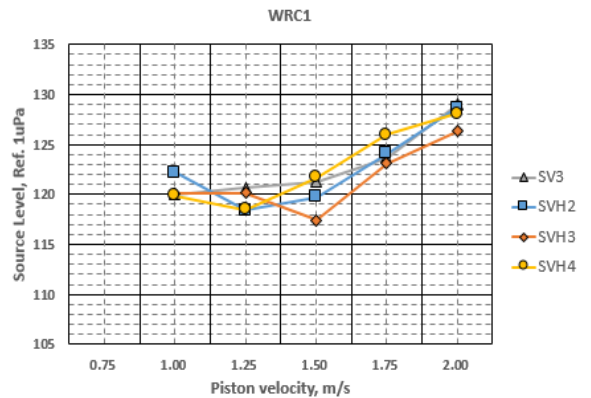
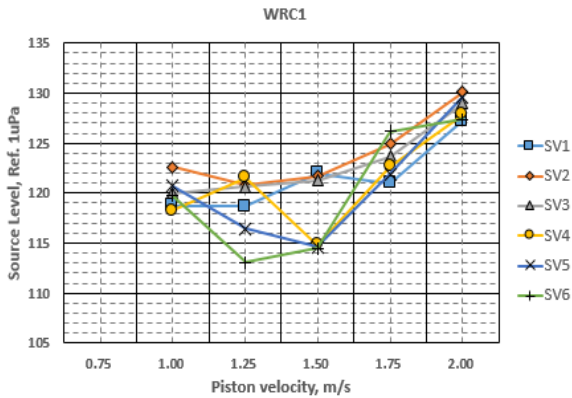


Fig. 9. Source level with water ram cleanness

Fig. 10. Source level with water ram cleanness

Fig. 10은 워터램입구 개수(SVH)에 따른 음원수준 산출 결과이다. SV 실험결과와 마찬가지로 수압램/피스톤관 간격이 가장 큰 WRC1에서는 PV가 1.50 m/s 이상이 되어야 음원수준이 비례적 관계를 보이는 것으로 판단된다. 또한, SV와 마찬가지로 WRC2와 WRC3에서는 수압 램 이동속도에 따른 음원수준 증가를 볼

수 있다. 사출관입구/워터램 출구 면적비와 달리 홀 개수 차이로 인한 음원수준은 의미있는 수준으로 변화하지 않았고, WRC가 작고 PV가 빨라질수록 홀 개수와 상관없이 동일한 수준의 음원수준을 보여주고 있다. 이는 SVH가 음원수준을 결정하는데 있어서 중요한 인자가 아니라는 것을 보여주고 있다.

5. 결 론

선형펌프방식 강제사출장치 소음유발원인을 파악하기 위하여 실험장치를 구축하였다. 선형펌프방식 작동 순서에 따라 소음유발인자를 선별하였고 인자별 경향성 분석을 위한 수중사출실험을 실시하였다. 주요 소음유발 원인은 수압램/피스톤관 간격(WRC)와 수압램 이동속도(PV)임을 확인하였다. 특히 수압램/피스톤관 간격이 일정수준 이하일 때, 수압램 이동속도 증가에 따른 음원수준 증가를 확인하였다. 사출관입구/위터램 출구 면적비(SV)는 음원수준에 큰 영향이 없으며, 특히 위터램입구 개수(SVH)는 음원수준 증가에 기여하지 못함을 확인하였다.

References

- [1] Takahashi, S., Kikuchi, T. and Ogura, A., "Measurements of Underwater Absorption Coefficient by the Reverberation Method, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 25, Supplement 25-1, pp. 112-114, 1986.
- [2] Cochard, N., Lamcoume, J. L., Arzelies, P., and Gabillet, Y., "Underwater Acoustic Noise Measurement in Test Tanks," IEEE Journal of Oceanic Eng., Vol. 25, No. 4, pp. 516-522, 2000.
- [3] Yong Park, Kookhyun Kim, Dae-Seung Cho, Jong-Ju Lee, "Numerical and Experimental Investigation on Structure-acoustic Coupling Effect in a Reverberant Water Tank," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 56, No. 1, pp. 94-101, 2019.
- [4] Kookhyun Kim, Ju-Young Cho, Yong-Gyu Choi, Yong-Ju Choi, Jongju Lee and Byeng-Seok Yu, "Scaled Model Test of Compressed Water Type Ejection System : Part 1 - Dynamic Characteristics," The Korean Society of Ocean Engineers Annual Conference Proceedings, pp. 151-153, 2019.
- [5] Kookhyun Kim, Jang-Yeon Hwang, Dae-Seung Cho, Jongju Lee, "Scaled Model Test of Compressed Water Type Ejection System : Part 2 - Dynamic Characteristics," The Korean Society of Ocean Engineers Annual Conference Proceedings, pp. 154-156, 2019.
- [6] Sunjoo Lee, "Numerical Investigation of Effect of Opening Pattern of Flow Control Valve on Underwater Discharge System Using Linear Pump," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 22, No. 2, pp. 255-265, 2019.