

건조 선박 배관 내의 새로운 유세정 시스템에 관한 연구

노진철* · 김민식** · 손영득****

*, ** 한국기술교육대학교 기계설비제어공학과 석사과정, *** 한국기술교육대학교 기계설비제어공학과 교수

A Study on a Novel Pipe Flushing System within Dry Dock Ship Pipelines

Jin-Cheol Noh* · Min-Sik Kim** · Yung-Deug Son****

*, ** M.S. Candidates, Dept. of Mechanical Facility Control Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam, 31253, Korea

*** Professor, Dept. of Mechanical Facility Control Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam, 31253, Korea

요약 : 배관 세정 공정은 조선소 선박 건조과정에서 배관 설치 후 장비를 시운전하는 단계로 넘어가기 전에 최종적으로 배관 내부의 이물질을 제거하는 매우 중요한 공정이다. 만약에 배관 내에 이물질이 있는 상태에서 장비를 시운전하는 단계로 넘어갈 경우 이물질이 고가의 장비에 유입되어 펌프 및 기어, 베어링 등이 파손되는 요인이 된다. 특히 펌프나 유압 밸브 같은 경우는 아주 작은 이물질이라도 장비 속으로 유입이 되면 대형 사고로 이어지며, 이런 장비 사고는 주변에 장비 운전을 하는 작업자의 인명사고까지 연계되어 중대 재해의 잠재 원인이 되므로 조선소 고객인 선주들도 매우 집중적으로 확인하고 관리하는 공정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서 기존의 배관 세정 공법에서 유세정 효과를 증가시킬 수 있도록 배관 내 세정 유체의 흐름을 증가할 수 있는 시스템을 제안한다.

핵심용어 : 세정시스템, 레이놀즈수, 임펄스 장비, 배관, 유속

Abstract : The pipe cleaning process is a crucial step in the shipbuilding process of a shipyard. It involves removing foreign substances from the inside of the pipes before moving on to the stage of testing equipment after installing the pipes. If there are foreign substances inside the pipes and the equipment is tested, the foreign substances can enter the high-priced equipment and become a factor in the breakdown of pumps, gears, bearings, and other components. Especially in the case of pumps or hydraulic valves, even small foreign substances can lead to major accidents if they enter the equipment, and such equipment accidents can be a potential cause of major disasters, leading to accidents involving workers operating the equipment in the vicinity. Therefore, it is a process that shipyard customers, who are shipowners, also focus on and manage very intensively. To solve these problems, this study developed a system that can increase the cleaning effect of the cleaning fluid inside the pipes by increasing the flow of the cleaning fluid inside the pipes in the existing pipe cleaning method.

Key Words : Flushing system, Reynolds number, Impulse equipment, Pipe line, Flow velocity

1. 서론

조선소 건조 선박의 유압 라인으로 사용 될 배관은 제조업체와 사용자가 합의한 절차에 따라 가공 부산물(부스러기)을 제거해야 한다. 껍질 및/또는 부식이 있는 튜브나 배관은 제조업체와 합의된 절차에 따라 처리해야 한다(KS B ISO23309, 2019). 그러나 최근 조선 산업의 인력 부족과 특히 배관 공정 경력자의 이탈은 배관 내부 이물질 유입 등 품질

저하로 나타났고, 그 결과 시운전 전 배관 내부의 이물질 유입이 없는지 최종적으로 확인하여 선주에게 검사를 받는 과정에서 배관 품질 저하에 따른 추가 작업 및 재검사 등이 진행되고 있다(Park et al., 2019). 특히 한번 실추된 배관 품질에 대한 신뢰는 고객인 선주들에게 강하게 각인 되어 더 많은 요구를 배관 세정 공정 단계에 하고 있다. 이는 결국 선박 건조 단계에서 절점 준수를 위해 야간작업과 추가 인력 투입 등 능률 하락과 비용 증가로 이어지고 있다. 특히, 야간작업은 안전사고 및 위험 요소가 항상 존재한다. Lee and Choi(2017)는 오일-질소 가스 혼합 유체를 이용한 고온

* First Author : icenohh74@hanwhaoceanpartners.com, 055-733-5020

† Corresponding Author : ydson@koreatech.ac.kr, 041-640-8613

오일 유세정 시스템에 대해 제시하고 있으며 실제 건조과정의 유세정에서는 질소가 질식 및 사용상 불편함으로 잘 사용되지는 않고 있으며, Jeong and Kim(2018), Kim et al.(2018)은 공기-오일 이상 유동의 마찰 압력 강화와 슬러그 유동 특성에 대해 제시하고 있다. Hong et al.(2022)는 마이크로 버블 장치와 결합된 오일 유세정 장치를 제시하고 있지만, 마이크로 버블이 플러싱 유니트로 회수 될 때 버블에 의한 캐비테이션의 문제가 나타나고 있다. 그리고 Park et al.(2019)는 해양플랜트의 배관 내부 유세정 중 오일 속에서 수분 제거를 위한 일렉트릭 히터 변경을 제시하고 있지만, 오일 온도의 상승은 점도 저하의 원인이 되며, 플러싱 펌프의 사양에서 규정하고 있는 점도를 유지해야 하기에 온도 상승에 대해 한계가 있다. Kim and Oh(2015)은 전기 필터에 대해 제시하고 있지만 전기 필터의 경우는 오일 속에 수분이 있을 때 통전 되는 단점이 있다. 그리고 Choi(2022)는 초음파의 캐비테이션을 이용한 배관 내부 이물질 제거를 제시하고 있는데, 초음파의 경우는 배관이 길고 큰 경우에는 효과를 보기 힘든 단점이 있다. 본 논문은 기존의 배관세정 공법의 유세정 효과를 보다 극대화하는 방법으로 배관 내 세정 유체의 흐름을 증가시킬 수 있는 임펄스 장치가 구성된 시스템을 제안하며 그 유효성에 대해 시뮬레이션과 실험으로 검증한다.

2. 본 론

2.1 조선소 건조 선박 배관 유세정 방법

Fig. 1은 조선소 건조 선박에서 Deck Mach. System을 유세정하는 개략도이다. 조선소에서 배관 제작 및 설치 중에 배관으로 유입된 이물질을 제거하기 위해, Maker 장비인 Mooring Winch 및 Hydro Power Unit를 배관과 분리한다. 그리고 플러싱 유니트와 배관을 가배관 호스를 사용하여 Fig. 1의 빨간색으로 표시한 Pipe Line(Supply)와 파란색으로 표시한 Pipe Line(Return)에 연결하고 배관이 장비와 접하는 부분은 가배관 호스(Temporary hose)를 사용하여 분리한다. 분리된 배관 시스템에 플러싱 유니트 펌프를 가동하여 유세정 오일을 순환시킨다(Hong et al., 2022). 이때 순환되어서 유세정 장비로 돌아오는 이물질을 필터를 이용하여 제거하는 방법을 사용한다(Hong et al., 2023). 이 방법에서 Fig. 2와 같이 배관의 유속이 낮은 상태에서는 층류가 형성되어 이물질을 배관에서 분리하기 어려운 조건이다.

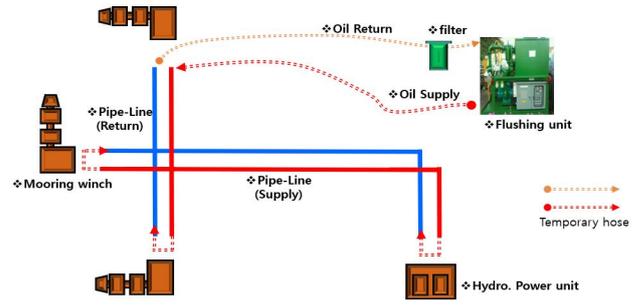


Fig. 1. Deck Machinery Flushing System for Existing Construction Vessels.

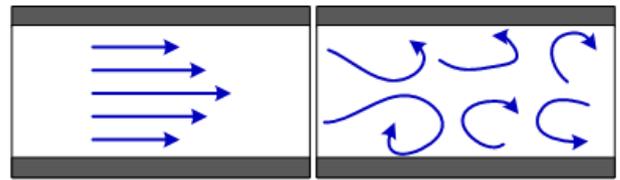


Fig. 2. laminar and turbulent flows.

그러나 높은 유속으로 유체가 흐를 때는 난류가 형성되어 층류의 경우보다 이물질 분리가 용이하다. 난류는 유체의 이동 방향이 불안정하게 되어, 배관 내부의 이물질을 국부적으로 동요시키게 된다. 이로 인해 배관 벽면에 밀착되지 않고 흔들리거나 이동할 수 있게 한다. 또한, 높은 유속은 유체 배관 벽면에 대해 전단 응력을 생성하게 되며 이 응력은 이물질의 결합력을 깨뜨리는 역할로 인해 이물질이 벽면에 고정되지 않고 배출하는 데 큰 효과를 나타낸다. 따라서, 가장 효과적인 플러싱은 유속이 상대적으로 높거나 점도가 상대적으로 낮을 때 이루어지는데, 유세정을 하는 동안 파이프 시스템 내 난류가 형성된다. White(2011)은 원관에서의 층류-천이에 대한 레이놀즈 수(Re) 범위를 2300~4000으로 제시하고 있다. Nagendra(2020)은 파이프에서의 난류 흐름이 발생하는 Re를 4000 이상으로 제시하고 있다. 이에 배관의 흐름을 난류로 만들기 위해 식(1)의 Re를 이용하였다.

$$Re = v \frac{d}{\nu} \quad (1)$$

여기서 ν 는 유체의 평균속도(m/s)이며, d 는 관의 직경(m), ν 는 동점성계수(m²/s)이다. 선박에 설치된 배관의 d 와 ν 는 고정값으로 Re을 높여 난류를 만들기 위해서는 ν 를 조정해야 한다. 즉, 배관 내부의 흐름을 난류로 만들기 위해서 ν 유체의 평균속도에 대한 증가가 필요하다.

2.2 임펄스 발생기를 이용한 제안하는 유세정 방법

배관 유세정 시 유체의 유속 증가를 위해 기존의 배관에 Fig. 3과 같이 유속 증가를 위한 임펄스 발생 장치와 배관 내 주요 부분에 대해 임펄스 노즐을 설치하였다. 본 논문에서 제안하는 방법에 대한 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 실험에 적용되는 플러싱 오일의 조성을 Aspen HYSYS 프로그램을 사용하였고 원유 공정에서 플러싱 오일을 생산하는 모사 공정을 구현하였다. Fig. 4와 같이 Initial Boiling Point는 30°C이며, 10°C 간격에 따른 밀도(Liquid Density), 임계온도(Tc), 분자량(Molecular Weight) 등의 계산된 결과의 오일 조성을 시뮬레이션의 플러싱 오일 조성 값으로 사용하였다. Fig. 5는 기존에 배관 유세정 시스템에 임펄스 발생기를 추가하여 구성한 공정프로그램이다. 공정프로그램에 적용한 배관의 길이는 2m, 높이는 1m로 적용하였다. 또한 외부 조건은 대기온도 20°C이며, Include Pipe Wall과 Include Inner HTC(Heat Transfer Coefficient) 적용 하였고 배관의 Insulation은 적용하지 않은 것으로 실제 선박 건조 환경과 유사하게 구현하였다.

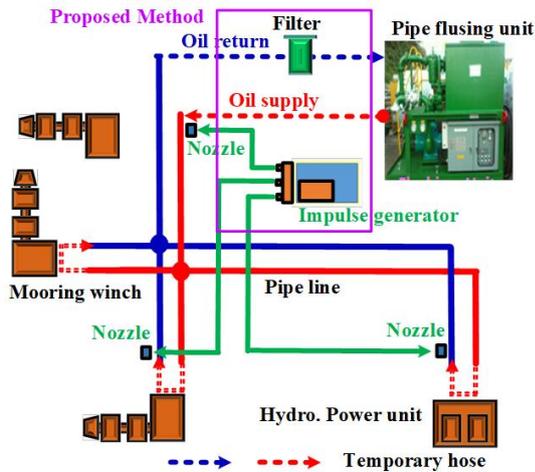


Fig. 3. Piping System for Proposed Construction Vessels.

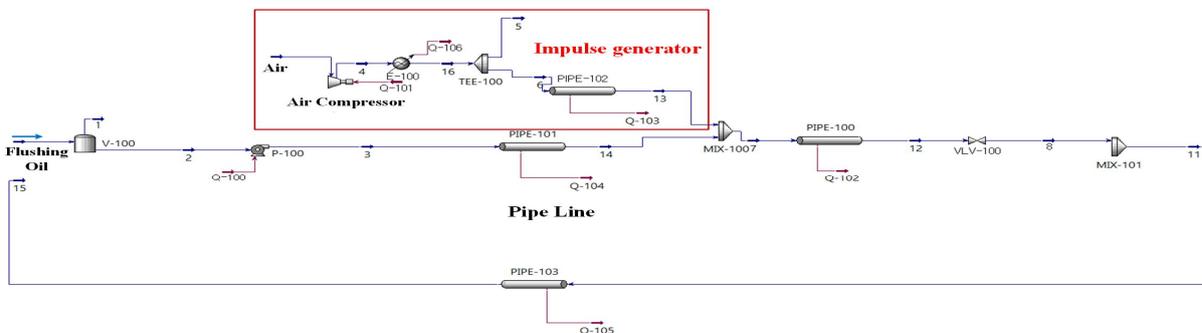


Fig. 5. Process program with an additional impulse generator in the piping oil flushing process

Name	Normal Boiling Point [C]	Molecular Weight	Liquid Density [kg/m ³]	Tc [C]
NBP[0]30*	30.00	69.87	602.12	182.54
NBP[0]40*	40.00	73.88	628.50	199.10
NBP[0]50*	50.00	77.87	651.60	214.58
NBP[0]60*	60.00	81.93	671.76	229.13
NBP[0]70*	70.00	85.84	695.10	244.55
NBP[0]80*	80.00	90.33	706.55	256.76

Fig. 4. Boiling Point Range Based Calculation Results.

상기 조건으로 공정프로그램을 시뮬레이션으로 진행하였다. Fig. 6은 임펄스 발생기 동작 후의 레이놀즈 넘버 값이다. 5,400에서 11,500까지 상승하는 결과를 확인할 수 있고 이후 일정 시간 동안 감소가 진행 후 원래의 레이놀즈 넘버로 복귀됨을 알 수 있다. Fig. 7은 임펄스 발생기 작동 후 오일 속도의 변화로 시간 경과에 따라 유속이 증가하며, 증가된 오일의 유속은 일정 시간이 지난 후에 다시 원래 유속으로 돌아가는 것을 시뮬레이션의 결과로 확인할 수 있다.

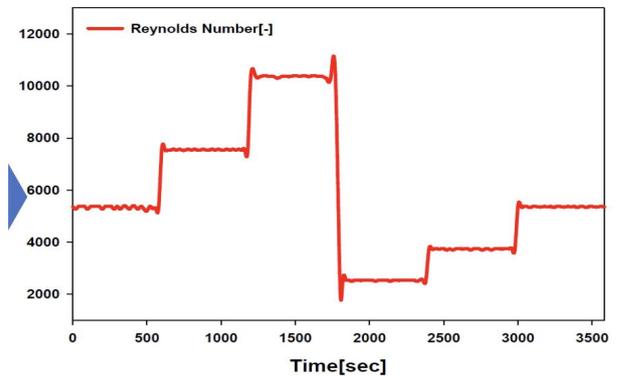


Fig. 6. Changes in Reynolds number after the activation of the impulse generator.

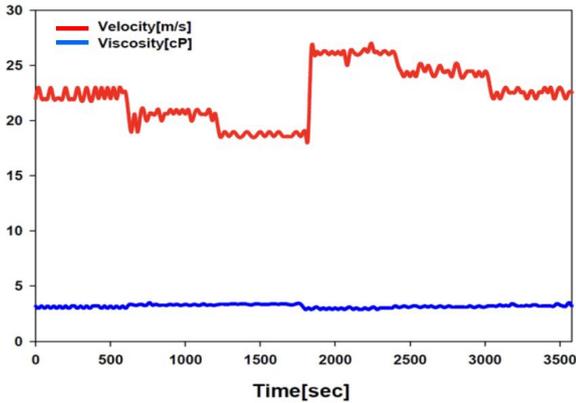


Fig. 7. Changes in oil velocity after the operation of the impulse generator.

이상 유체의 유동 패턴은 Slug flow로 확인 되었으며 Fig. 8은 수평배관의 유동패턴 모습으로 수평배관에서 상부로 에어버블이 형성되어 흘러가는 것을 확인 할 수 있다.

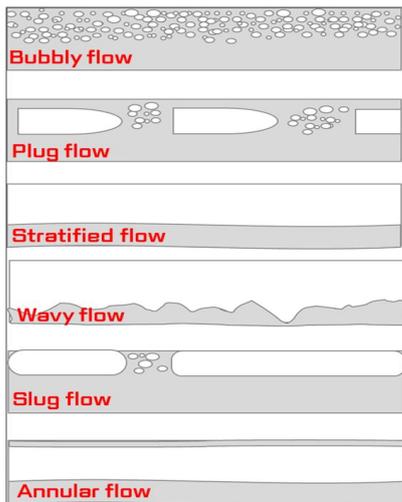


Fig. 8. Flow pattern of horizontal pipe of fluids in two phases, gas and liquid.

상기 시뮬레이션을 통해 유량이 증가 된 것을 확인했으며, 에어 주입으로 액체의 체적이 증가하고 이는 배관 내 유체 유량 증가로 이어지며, 그리고 배관 내 에어 가압으로 인해 배관 내 압력이 상승하고, 이는 유체 속도 증가로 이어진다. 하지만 에어 주입량과 배관의 길이, 배관의 형태, 액체 물성에 따라 유량 및 속도의 변화에 영향을 주는 변수로 작용한다. 그리고 에어 가압은 기체-액체 2상 유동 패턴에 영향을 미치며, 기체-액체 2상 유동에서 기체가 차지하는 부피 비율에 따라 유동 패턴의 변화에 영향을 준다.

2.3 배관 유세정 시 유속 증가 시스템 실험 구성

배관 유세정 시 유체의 유속 증가에 대한 유효성을 검증하기 위해 기존의 배관 유세정 공법과 유속을 증가시키는 임펄스 발생기 방식을 비교 실험하였다. 임펄스 발생기는 Fig. 9와 같이 Air Compressor에서 압축 공기를 13bar로 공급하고 임펄스 박스는 내부에 Solenoid valve를 구성하여 일정한 시간 간격으로 open 신호를 제어하여 임펄스 노즐로 일정 시간 압축 공기를 배관 내부로 유입될 수 있도록 구성하였다. Fig. 10은 임펄스 발생기를 Pipe line에 적용한 것으로 임펄스 노즐 전단의 오일 흐름은 기존 공법의 흐름으로 유체가 흘러가고 임펄스 노즐 후단에는 임펄스 제어 신호에 따라 일정한 간격으로 압축 공기가 임펄스 노즐을 통해 분사한다. 이로 인해, 유체의 이동 속도를 증가시켜 난류가 형성되게 구성하였다. 임펄스 발생 장치를 이용한 실험 조건에서 배관 플러싱 유니트의 펌프 출구 압력은 5bar, 배관은 실제 선박의 배관과 유사하게 구성하기 위해 40a size의 호스를 30m로 가설하였다. 임펄스 노즐은 Oil Supply측에 1개 설치하고 Fig. 11과 같이 30M 호스 끝단인 Oil Return 측에 실제 이물질이 배관에서 이동되는 것과 임펄스 발생기에서 유입된 압축 공기와 오일의 흐름을 확인하기 위해 Flow meter의 후단에 투명 Hose 및 필터를 설치하여 실험하였다. 그리고 임펄스 발생기에 유입되는 압축 공기 압력은 13bar로 setting 하고, 임펄스 작동 시간은 5초 open되는 것으로 설정한 상태에서 실험을 진행하였다.

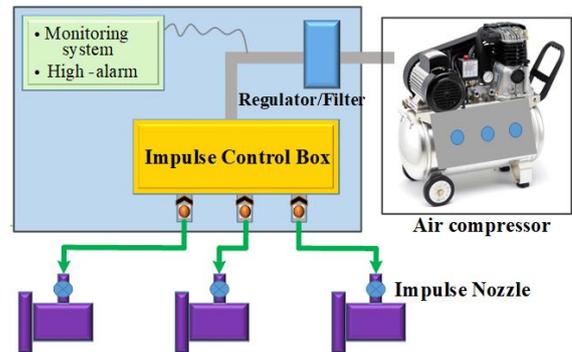


Fig. 9. Composition of impulse Generator.

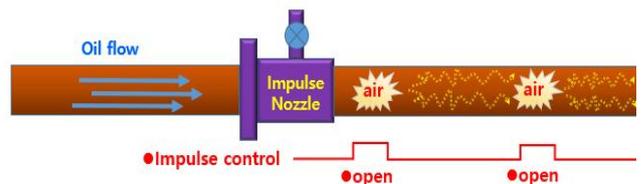


Fig. 10. Changes in Fluid Flow by Operation of Impulse Generator.



Fig. 11. Flow meter and transparent hose to Oil Return.

2.4 배관 유세정 시 유속 증가 시스템 실험

유세정 시스템은 우선 유세정을 위한 가배관을 설치하고, 임펄스 발생 장치의 임펄스 노즐을 배관 플러싱 유니트 펌프 출구 측에 설치하고, Return 측은 Flowmeter를 설치한 상태에서 플러싱 유니트의 펌프를 가동하여 정상시의 유세정 공정일 때의 유량을 계측하였다. 정상시 펌프 압력은 5bar, 배관 size는 40a일 때 유량은 17.5m³/h이며, 레이놀즈 넘버 6349.1로 확인되었고, 이 상태에서 임펄스 발생기를 작동하여 5초 동안 Solenoid valve가 open 되도록 제어하고, 이때 13bar의 압축 공기가 임펄스 노즐을 통해서 배관 유세정 시스템으로 유입된다.

Table 1과 같이 임펄스 작동 후 유량은 35.5m³/h로 약 2배가 증가되었으며, 레이놀즈 넘버도 12876.7로 약 2배가 증가되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 12와 같이 임펄스가 5초간 open된 후 약 14sec까지 유량의 변화는 open된 후 즉시 35.5 m³/h 유량으로 증가 되며 약 9sec까지는 증가 된 유량으로 유지되었다. 이때 Oil Return 측의 투명호스에서 Oil 상태를 확인 결과 Oil만 회수되는 것을 알 수 있다. 그리고 14~32sec까지는 하부는 Oil 층이 상부는 Air 층으로 분리되어서 회수되며, 유량은 임펄스 작동 전 17.5m³/h에서 7m³/h까지 감소되었다.

Table 1. Change before/after the impulse operation

Impulse operation	32 cSt/15°C	
	Before	After
Flow coefficient	21200	21200
Flow rate	17.5	35.5
Viscosity	24.35	24.35
Diameter	40	40
Coefficient of velocity	1000	1000
Reynolds number	6349.1	12876.7
Flow velocity	3.9	7.8

그리고 32~38sec에는 Oil과 Air가 MIX 된 상태로 회수되면서 서서히 유량은 임펄스 작동 전으로 회복되는 것을 알 수 있다. 38~42sec은 Oil 속에 기포방울이 보이는 상태가 되며, 유량은 임펄스 작동 전과 동일하게 유지되었으며 그 이후는 기존의 임펄스 작동 전과 같이 Oil만 흐르는 상태로 돌아가는 것을 알 수 있다.

실제 볼트를 이물질 투입구에 투입한 상태에서 임펄스 발생기 작동 전·후의 변화를 실험하였다. 플러싱 유니트를 운전할 때 임펄스 발생기를 작동하지 않은 경우에는 투입된 이물질인 볼트가 회수되지 않고 배관 내부에 그냥 유입된 상태로 있었다. 그러나 임펄스 발생기 작동 후 Oil Return 측의 Filter를 확인 결과로 Fig. 13와 같이 이물질로 투입된 볼트가 실제 회수되는 것을 확인할 수 있었다.

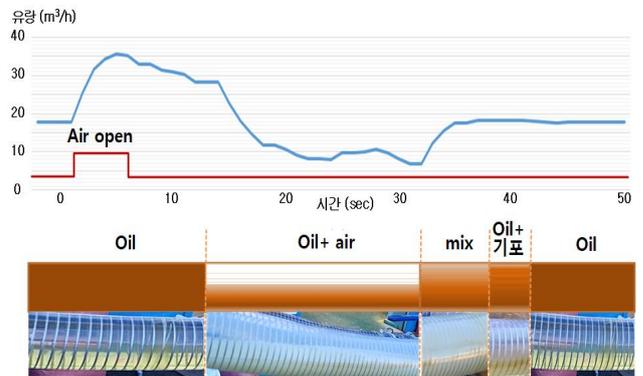


Fig. 12. Changes in flow rate and fluid condition over time after impulse operation.



Fig. 13. Foreign substance bolt recovering from the filter after the impulsive operation.

3. 결론

본 논문은 조선소 건조 선박의 배관 유세정 작업 시 유세정 효과를 높이기 위해 압축 공기를 배관 시스템에 인입하여 유속을 증가시키는 임펄스 발생기를 적용하여 유속을 증가시키는 방법을 검증하였다. 기존에 사용하는 유세정 방식의 단순 순환식의 방식보다 압축 공기를 이용한 임펄스를 적용할 경우 Aspen HYSYS 프로그램으로 시뮬레이션한 결과와 실제 임펄스 발생기를 구성하여 실험한 결과가 유량이 증가하고 레이놀즈 넘버가 Table 2와 같이 시뮬레이션을 통한 예측할 경우 임펄스 발생기를 작동 전에는 레이놀즈 넘버 값이 5400이었으며, 작동 후 예측 값은 11500으로 나왔으며, 실제 실험을 통해 확인한 결과는 임펄스 작동 전은 레이놀즈 넘버 값이 6349이었으며, 작동 후 확인한 결과는 12876으로 증가하였다. 그리고 Oil Return 측의 투명호스를 통해 임펄스 적용 후 시간의 변화에 따라 Oil과 Air의 상태 변화를 알 수 있었다. 그리고 실제 이물질 제거 유입하여 임펄스 발생기의 이물질 제거 유효성을 확인하였다. 상기 실험을 통해 유량이 증가 된 것을 확인했으며, 에어 주입으로 액체의 체적이 증가하고 이는 배관 내 유체 유량 증가로 이어지며, 그리고 배관 내 에어 가압으로 인해 배관 내 압력이 상승하고, 이는 유체 속도 증가로 이어진다. 유체의 속도가 증가하면 전단 응력이 증가하고 이는 점도 감소를 초래하며, 이로 인해 유체의 층류 유동에서 난류 유동으로 변화를 유발한다. 이후 연구에서는 유체의 유속, 압력 및 점도 변화와 주입되는 압축 공기와의 상관관계, 그리고 유입되는 방향과 그 반대 방향에 미치는 변화에 관해서도 추가 연구가 필요하다. 그리고 향후 임펄스 발생기의 시간과 압력을 조정하여 유세정 효과를 더욱 증가시킬 수 있는 유동 패턴에 관한 연구가 필요하다.

Table 2. Comparison of simulation and experimental results

Item	Reynolds number	
	Before impulse	After impulse
Simulation results	5400	11500
Experimental results	6349	12876

References

[1] Choi, W. G.(2022), A Study on the Removal of Foreign Substances in Piping Using Ultrasonic Cavitation, Spring and Autumn Conference of the Korean Society of Mechanics, pp. 1378-1380.

[2] Hong, S. H., K. H. Lee, and N. W. Jeong(2022), Development of Oil Flushing System with Microbubble Generator, Tribology and Lubricants, Vol. 38, No. 4, pp. 109-114.

[3] Hong, S. H., J. Y. Shin, T. S. Park and S. H. Lee(2023), Types and Characteristics of Lubricant Filters, Tribology and Lubricants, Vol. 39, No. 4, pp. 133-138.

[4] Jeong, J. H. and S. M. Kim(2018), Numerical Study on Slug Flow Characteristics of Adiabatic Air-Oil Two-Phase Flow in a Macro-Channel, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 42, No. 11, pp. 745-752.

[5] KS B ISO 23309:2020(2019), Hydraulic fluid power systems Assembled systems Methods of cleaning lines by flushing, p. 3.

[6] KS V ISO28521:2009(2021), Ships and marine technology Hydraulic oil systems Guidance for grades of cleanliness and flushing, p. 7.

[7] Kim, M. B. and K. K. Oh(2015), Resonant DC-DC Converter for High Voltage Supply of Electric Desiccant Oil Flushing System, Power Electronics Conference, pp. 151-152.

[8] Kim, S. H., H. G. Kim, and S. M. Kim(2018), Experimental Investigation of Air-Oil Two-Phase Flow Regime and Frictional Pressure Drop in a Horizontal Circular Pipe, The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 5, pp. 43-49.

[9] Lee, Y. H. and B. H. Choi(2017), A Study on Process Design of Hot Oil Flushing System Using Oil-Nitrogen Gas Mixing Fluid, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 23, No. 5, pp. 541-548.

[10] Nagendra, J.(2020), Modern Fluid Dynamics, 5th edition, Prentice-Hall, p. 485.

[11] Park, C. S., K. Y. Sung, and S. J. Han(2019), Experimental Quality Characteristics for Water Removal in Inner Flushing Oil in Process Piping of Offshore Plant, Journal of the Korean Society of Industry Convergence, Vol. 22, No. 6, pp. 797-805.

[11] White, F. M.(2011), Fluid Mechanics, 7th edition, McGraw-Hill, p. 621.

Received : 2024. 01. 30.

Revised : 2024. 04. 12.

Accepted : 2024. 04. 26.