소방펌프차에 탑재된 펌프의 수명 결정요인 연구

천창섭 · 김승모^{*†}

세종특별자치시 세종소방서장, *한국기술교육대학교 공과대학원 기계공학과 부교수

A Study on Decisional Factors for Service Life of Fire Trucks

Chang-Sub Chun · Seung-Mo Kim^{*†}

Chief of Sejong Fire Station,

^{*}Professor, School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology & Education

(Received August 31, 2021; Revised August 31, 2021; Accepted September 13, 2021)

요 약

화재 장소에 물을 보내 진화하는 소방펌프차의 본질적 역할을 고려할 때, 기능적 수명을 결정하는 것은 탑재된 펌프의 성능이다. 소방펌프차의 사용시간이 증가함에 따라 펌프의 구성요소인 케이싱과 임펠러에서 발생하는 노화로 인하여 상대적 틈새가 증가하고 이를 통해 펌프 내 누설량이 허용치를 초과하면 핵심적 기능을 수행할 수 없는 고장에 이르게 되는 것이다. 소방펌프의 고장 메커니즘(mechanism)을 피로, 마모, 부식으로 제한하고 각 기구가 소방펌프의 고장에 미치는 영향을 해석하였다. 그 결과, 피로는 임펠러나 케이싱에 가해지는 압력의 평균값과 변동폭이 작아 파괴요인으로 작용하기 어렵고, 유체에 혼입되는 입자에 의한 침식의 해석에서는 임펠러의 흡입부에서 높은 침식률을 보였고, 케이싱은 침식률이 낮았다. 부식을 유발하는 주요 메커니즘으로 분석한 캐비테이션은 펌프로부터 흡입 깊이 7 m에서 나타나며 7.1 m로 가면 그 범위가 확대됨을 확인하였다. 즉, 소방펌프차의 유효수명을 결정하는 소방펌프의 경년에 따른 고장은 물에 혼입된 입자에 의한 침식과 캐비테이션으로 인한 부식에 큰 영향을 받게 됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The lifetime of fire trucks depends on their built-in pumps. A fire truck delivers water to the site of a fire accident via its pump that is composed of an impeller and a casing. As its service time increases, the clearance between the two elements increases. This causes leakage in the pump to increase beyond its limit and the pump can no longer fulfill its principal role. In general, fatigue, erosion, and corrosion are considered to be the major mechanisms for pump failure. From this study, it has been observed that fatigue is not the main factor for failure because of the small magnitude of stress it induces. Erosion by particles shows a high erosion rate of the suction area of the impeller. Cavitation, which is a key mechanism of corrosion, is observed at a suction depth of 7 m and is observed to widen at 7.1 m depth. Finally, the lifetime of the fire trucks is found to be affected by the motion of sucking the natural water of ponds, rivers, etc.

Keywords : Fire trucks lifetime, Decisional factors of pump failure, Pump erosion, Pump cavitation

1. 서 론

소방펌프차의 본질적 역할을 고려할 때, 기능적 수명을 결정하는 것은 탑재된 소방펌프의 수명이다⁽¹⁾. 화재 진화를 물에 일을 가해 연소가 진행 중인 지점에 보내 화학반응을 통제하는 것이라고 정의한다면 연소 지점에 물을 보내는 핵심기능을 수행하는 것이 소방펌프이기 때문이다. 소방펌프차에 탑재된 펌프는 원심펌프로 구동축에 연결된 임펠러가

원심력을 이용해 물에 운동량을 제공하는 동역학식이다⁽²⁾. 주요 구성품은 케이싱과 임펠러이다. 본 연구의 주제가 되는 소방펌프의 고장은 소방펌프차의 사용시간이 증가함에 따라 기인하는 케이싱과 임펠러 두 기계요소 간에 발생하는 노화와 관련된다.

두 요소의 노화로 상대적 틈새가 증가하고 이로 인해 펌프 내 누설량이 허용치를 초과하여 핵심적 기능을 수행할 수 없는 고장에 이르게 되는 것이다.

[†] Corresponding Author, TEL: +82-41-560-1253, FAX: +82-41-560-1253, E-Mail: smkim@koreatech.ac.kr

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

Figure 1. Performance curve of centrifugal pump.

본 연구는 소방펌프차의 사용시간 경과에 따라 탑재된 펌프의 두 요소 간 틈새를 증가시키는 데 영향을 미치는 주요한 요인이 무엇인지에 대하여 해석프로그램을 통해 분석한다.

2. 소방펌프

2.1 소방펌프의 성능

소방펌프의 성능은 Figure 1의 성능곡선으로 나타내는 데, 축으로부터 유체로 전달되는 에너지의 효율과 펌프를 지나는 유체의 유량(Q)과 압력(p) 간의 관계를 나타낸다.

유체에 전달되는 동력(P_w)은

$$P_w = \Delta p Q = \rho g H Q \quad (1)$$

식(1)과 같고, 여기서 ρ 는 유체의 밀도, H 는 수두(head)로 Figure 2에서 입구①과 출구② 간에 Bernoulli 식을 이용하여 구하는데 식(2)와 같다.

$$H \approx \frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (2)$$

펌프 구동을 위해 제공되는 동력(bhp)은

$$bhp = \omega T \quad (3)$$

식(3)과 같으므로 펌프의 효율(η)은 식(4)를 이용해 구할 수 있다. 여기서 ω 는 각속도, T 는 토크를 나타낸다.

$$\eta = \frac{P_w}{bhp} = \frac{\rho g H Q}{\omega T} \quad (4)$$

펌프의 효율(η)은 3가지 부분, 즉 체적효율(η_v), 수력효율(η_h) 및 기계효율(η_m)로 되어 있다.

$$\eta = \eta_v \eta_w \eta_m \quad (5)$$

Figure 2. Standard cross-section of centrifugal pump⁽²⁾.

여기서 체적효율 η_v 는 펌프의 임펠러와 케이싱 사이 틈새로 누설되는 유체손실과 관련된 효율이며 다음 식(6)으로 구한다.

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + Q_L} \quad (6)$$

여기서 Q_L 은 손실되는 유체의 부피이다.

실제 펌프의 성능을 측정하면 Figure 1의 이론적 성능곡선과 이탈한 성능이 나타난다. 특히, 고압에서 $Q=0$ 로 접근할 때 p_{max} 는 이론치의 약 60% 수준으로 저하된다⁽²⁾.

이러한 저하는 펌프 토출구의 유체가 흡입구로 재순환되는 임펠러 재순환 손실, 날개와 유로에서의 마찰손실, 날개 각도와 물 유입 방향의 불일치로 인한 충격 손실에서 기인한 것으로 알려져 있다.

마지막 두 가지는 펌프와 임펠러의 구조적 특성에 기인하는 손실이고 재순환 손실은 임펠러의 구조 외에도 노후로 인한 누설을 증가가 주된 원인이다. 이러한 누설로 펌프는 고압에서 체적효율의 급격한 손실이 나타나고 이는 고층 화재에 대한 소방펌프차의 전술 실패를 유발하는 것으로 소방펌프차의 경제적 가치를 떠나 그 수명을 다한 것으로 보아야 하는 이유이다.

2.2 소방펌프의 주요치수

원심펌프의 세부 사양은 필요 사양과 성능에 대한 구속조건을 만족하는 최적 설계 방식으로 결정한다.

Table 1은 소방펌프차에 주로 사용하는 A-2펌프의 설계값을 결정하는 구속조건이다.

본 연구의 해석을 위해 원심펌프 전용설계 프로그램 PumpON으로 Table 1의 설계 조건을 만족하는 펌프 설계하고 이를 모델링하여 사용하였다.

3. 소방펌프의 고장요인 분석

기계적 파손의 일반 원인으로 피로, 마모, 부식 3가지를 들 수 있다⁽³⁾.

Table 1. Design Conditions of Pump

Design Point	Coefficient
Power (P)	43.5 kW
Flow rate (Q)	2 m ³ /min
Head (H)	85 m
Angular velocity (n)	2760 rpm
Efficiency (η)	65% G
Specific velocity (N_s)	$N_s = N \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} = 139 \text{ rpm, m}^3/\text{min, m}$

Figure 3. Stress variation with time.

3.1 피로

응력 상태가 Figure 3과 같이 시간에 따라 변화하는 경우, 평균응력 σ_m 을 기준으로 반복하는 응력진폭 σ_a 는 피로 파괴에 중요한 인자가 된다.

소방펌프 내 작용하는 압력변동의 피로파괴 해석을 위해서 Figure 4의 Goodman-Soderberg 선도를 이용한다.

해석에 사용된 소방펌프 케이싱의 재료인 회주철의 최대 인장강도(σ_{ult})가 98 MPa이므로 내구한도(σ_e)는 39.2 MPa이다.

소방펌프의 설계압력(σ_m)이 0.85 MPa이고 변동압력(σ_a)은 벌류트펌프의 압력변동에 관한 기존연구⁽⁴⁾에서 평균압력의 4% 이하인 점을 고려하여 본 연구대상의 소방펌프에서 0.03 MPa 정도로 가정하면 Figure 4 선도의 $\overline{AB}$ 선 아래 놓이게 되므로 피로에 의한 펌프의 기계적 파손은 무시할 만하다.

3.2 마모

펌프 내 임펠러와 케이싱은 비접촉 상태로 상대운동을 한다. 따라서 기계적 마찰에 의한 마모는 고려하지 않는다.

유체는 흡입과정과 토출과정에서 배관과 펌프의 임펠러와 케이싱과 충돌하고 이 과정에서 마모가 발생한다. 이러한 마모는 유동 내 입자의 유무에 따라 입자 침식(particle erosion)과 유체에 의한 마찰 침식(abrasive erosion)으로 구별할 수 있다.

유체 유동의 경계조건으로 케이싱이나 임펠러의 접촉지점에서 유체의 속도는 0 이므로 유체와 기계요소간 상대운동은 무시한다. 결국 펌프의 마모에 기여하는 상대운동은 유체 속에 포함된 입자의 운동으로 국한되고 입자가 기

Figure 4. Goodman-Soderberg diagram.

계요소의 표면에 가하는 힘에 의한 기계요소의 침식이 가장 핵심적인 마모 메커니즘이다.

입자에 의한 침식은 3단계 과정으로 설명될 수 있다. 먼저 펌프 내 유체 유동을 Reynolds averaged Navier-Stokes 방정식과 $k-\epsilon$ 난류모델로 가정하여 해석하였다. 두 번째 입자 운동은 고체 입자에 미치는 하중을 고려하여 Lagrangian 관점으로 해석하였다. 마지막으로 유동해석으로부터 예측된 입자의 충돌 경로 및 충돌 속도를 이용하여 표면의 침식률 분포를 예측하였다.

해석은 ANSYS CFX 2020 R1버전을 사용하였다.

펌프의 임펠러 주변과 케이싱 내 유동과 압력분포는 Figures 5~7에서 볼 수 있다. 유체의 속도는 임펠러 외곽에서 케이싱으로 들어갈 때 최고가 되고, 속도가 느려지는 토출부에서 최대 압력이 나타난다.

유체 내 고체 입자에 작용하는 힘은 Basset, Boussinesq and Ossen (BBO) 방정식을 따른다고 가정하였다.

실제 소방펌프차의 자연수 흡수 시 모래, 실트, 점토 등 여러 입자가 혼입되나, 본 연구에서는 편의를 위해 모래에 포함된 석영을 대표적인 침식 입자로 보고 석영의 물성치를 이용하였다.

입자의 밀도는 2650 kg/m³이고 입자의 크기는 평균값으로 0.1 mm이며 해석의 편의를 위해 완전한 구형으로 가정하였다.

본 연구에서는 침식이 소방펌프의 고장에 기여하는 정도를 파악하는 것으로 입자의 유입량과 운전조건은 고정한다. 입자의 유입량은 물의 유입량의 0.2%에 해당하는 0.06 kg/s로 가정하고 운전조건은 최고 효율점으로 한다.

해석모델의 모든 벽면은 점착조건(no slip wall)을 적용하였다. 유체와 입자의 운동은 물에 포함된 입자의 양이 많지 않기 때문에 한 방향 연성(one-way coupled)으로 수행하였다.

입자의 궤적을 나타낸 Figure 8에서 입자가 압력면보다는 부압면쪽으로 흐르는 것을 확인할 수 있다. 날개와 날개 사이의 입자는 압력이 높은 압력면에서 압력이 낮은 부압면으로 밀리면서 흐르기 때문에 부압면 쪽으로 흐르게 되고, 부압면에 부딪히는 현상을 확인할 수 있다.

입자 침식은 주로 모래의 물성치(경도, 탄성 계수), 입자의 충돌 각도와 속력에 의해 결정된다. 입자의 궤적과 속력은 앞의 유동해석에서 구한 값을 이용하였다. 입자 침식량은 충돌 각도(θ)와 속력(U_p)을 달리한 실험으로 얻을 수밖

Figure 5. Relative velocity vector.

Figure 6. Absolute velocity vector.

Figure 7. Pressure.

에 없으며, 본 연구에서는 Grant and Tabakoff (1973)⁽⁵⁾이 제시한 침식률(E) 식(7)을 적용하였다.

$$E = f(\theta) \left(\frac{|\vec{U}_P|}{V_1} \right)^2 \cos^2 \theta \left[1 - \left(1 - \frac{|\vec{U}_P|}{V_3} \sin \theta \right)^2 \right] + \left(\frac{|\vec{U}_P|}{V_2} \sin \theta \right)^4$$

$$f(\theta) = \left[1 + k_2 k_{12} \sin \left(\theta \frac{\pi}{2a} \right) \right]^2 \quad (7)$$

여기서 $\theta = 2a$ 일 때 $k_2 = 1$ 이고, $\theta > 2a$ 일 때 $k_2 = 0$ 이다. a, V_1, V_2, V_3, k_{12} 는 모재 실험을 통해 결정되는 재료 상수이

Figure 8. Trajectory of particles.

Table 2. Constants of Grant and Tabakoff

Material	Steel
k_{12} Constant	0.293328
V_1 Ref. Velocity 1	123.72
V_2 Ref. Velocity 2	352.99
V_3 Ref. Velocity 3	179.29
a Angle of Max.	30°

Figure 9. Erosion rate on impeller.

Figure 10. Erosion rate on casing.

며 Table 2와 같이 석영(quartz)-강(steel)에 관한 계수를 사용하였다.

이에 의해 임펠러의 침식을 나타낸 Figure 9를 보면 부압면의 허브와 쉬라우드 근처에 최대 침식률을 보이는 붉은색 영역이 나타나, 침식입자에 의한 침식이 집중되는 것을 확인할 수 있다. 입자의 궤적과 케이싱의 침식 그림 Figure 10을 같이 검토하면 임펠러에서 나온 유체의 흐름을 타고 입자가 움직이기 때문에 케이싱에 침식이 집중되는 부분은 보이지 않으며 침식률이 낮은 하늘색 영역만 확인된다.

임펠러에서의 최대침식률을 곱힘배관을 지나는 가스에

Table 3. Comparison of Max. Erosion Rate

Category	CFX data	Present study	
		Pipe elbow ⁽⁶⁾	Axial pump ⁽⁷⁾
Erosion rate $\times 10^{-6} \text{ kg/m}^2\text{s}$	5	0.115	0.0265

포함된 모래에 의한 침식과 축류 원심펌프를 지나는 물에 포함된 모래의 침식에 대한 두 선행 연구결과와 비교하면 Table 3과 같다. 두 연구에 비해 침식률이 큰 것을 알 수 있으며, 이는 원심펌프의 복잡한 형상과 유속의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

3.3 부식

부식에 영향을 미치는 대표적인 환경으로 pH, 용존산소, 온도, 캐비테이션(cavitation) 등이 있다⁽⁸⁾.

특히 캐비테이션은 임펠러, 팬과 같은 유체기계나 관련 설비에 충격 압력으로 표면손상 및 파괴를 일으키며 특히 부식성 액체에 사용되는 기계장치의 금속재료에는 침식과 부식이 중첩되어 상호 간에 가속되는 상승효과를 유발하므로 본 연구에서는 이를 해석하였다.

캐비테이션을 동반한 원심펌프의 유동은 이상류의 유체로 해석하고, 기타 지배방정식은 단상류로 해석하는 Rayleigh Plesset 캐비테이션 모델로 해석한다. 증기의 연속방정식 식(8)과 액체의 연속방정식 식(9)에서 상변환 시 발생하는 질량 교환을 나타내는 R 은 식(10)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{V}) = R \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1 - \alpha_v)\rho_l] + \nabla \cdot [(1 - \alpha_v)\rho_l \vec{V}] = -R \quad (9)$$

$$R = \begin{cases} \frac{3\alpha_v}{R_B} \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_B - p}{\rho_l}} & p < p_B \\ -\frac{3\alpha_v}{R_B} \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_B}{\rho_l}} & p > p_B \end{cases} \quad (10)$$

여기서 α_v 는 증기의 부피분율, 밀도(ρ)의 첨자는 액체(l)와 증기(v)를 나타내고, R_B 는 기포의 반지름을, 기포압력 p_B 는 주어진 온도에서 증기압력으로 가정한다.

원심펌프의 캐비테이션 현상을 연구한 기존연구에서 식(11)의 net positive suction head (NPSH)가 2 m 이하로 내려갈 때 캐비테이션이 관찰되는 점⁽⁹⁾을 고려하여 NPSH가 2 m 이하로 내려가는 지점까지 흡입 깊이를 변화시키며 수두의 변화를 살펴보았다.

$$NPSH = \frac{p_{m,i} - p_{sat}}{\rho_l g} \quad (11)$$

Table 4. NPSH & Head

Depth	7.2	7.1	7	6.0	0.0
NPSH (m)	1.89	1.99	2.09	3.09	9.09
H (m)	< 69	86.25	88.99	89.23	89.44

Figure 11. Head curve for NPSH.

$p_{m,i}$ 는 흡입측 평균압력이고 p_{sat} 는 주어진 온도에서의 포화 증기압력이다.

자연수의 온도는 20 °C이고 수면의 대기압은 1 기압으로 가정하고 흡입구 측 마찰 등으로 인한 압력손실수두는 1 m로 가정하였다.

Table 4에서 깊이 7 m 지점부터 인 7.1 m, 7.2 m로 갈수록 수두 변화가 현저해지는데, 이는 Figure 11의 도표에서 잘 나타난다.

흡입 깊이 7 m에 시작된 캐비테이션이 확대되는 경향을 보기 위해 7 m와 7.1 m의 흡입 깊이에서의 케이싱 내 압력 분포와 증기의 부피분율(volume fraction)에 대한 해석을 수행하였고, 그 결과는 Figures 12 및 13과 같다.

즉, 7 m에서 임펠러 흡입부의 최저 압력이 0.02 atm으로 20 °C 물의 포화수증기압 0.0231 atm보다 낮아지면서 캐비테이션이 나타나고, 7.1 m에서는 그 범위가 확대됨을 알 수 있다.

실제 자연 수원의 환경에 따라 더 깊은 흡입 깊이가 필요한 경우도 있다. 신속한 의사결정과 조치가 요구되는 화재 현장의 특수성을 고려한다면 더 열악한 흡입 조건을 예상할 수 있으며 이 경우 캐비테이션의 영향은 더욱 커질 것이다.

4. 결 론

소방펌프차의 기능적 수명을 결정하는 소방펌프의 고장 기구를 피로, 마모, 부식으로 제한하고 각 기구가 소방펌프의 고장에 미치는 영향을 해석해 보았다.

그 결과, 피로는 임펠러나 케이싱에 가해지는 압력의 평균값과 변동폭이 작아 파괴요인으로 작용하기 어렵고, 유체에 혼입되는 입자에 의한 침식의 해석에 있어서는 임펠

Figure 12. Pressure and vapour at 7 m.

Figure 13. Pressure and vapour at 7.1 m.

러의 흡입구 부근에 높은 침식률을 보여주었으며, 케이싱은 입자의 속도가 낮아 침식효과는 무시할 수준이었다. 부식을 유발하는 주요 메커니즘(mechanism)으로 분석한 캐비테이션은 펌프로부터 흡입 깊이 7 m에서 나타나며 7.1 m로

가면 급격히 그 범위가 확대됨을 확인하였다.

소방펌프차의 유효수명을 결정하는 소방펌프의 경년에 따른 고장은 물에 혼입된 입자에 의한 임펠러의 침식과 캐비테이션으로 인한 부식에 큰 영향을 받게 되어, 소화전 등의 시설로부터 물을 공급받는 환경보다 자연수를 흡입하는 환경에서 소방활동을 하는 소방펌프차의 수명이 낮을 것으로 예측할 수 있다.

향후, 자연수를 흡입하는 환경에서의 수명저하에 대한 통계적 해석을 통해 소방펌프차의 내용연수를 보정하는 기준을 만드는 것을 제안한다.

후 기

본 논문은 2021년도 한국기술교육대학교 교육연구진흥 과제와 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(20013958)으로 연구되었음.

References

1. C. S. Chun, "A Study on Statistical Methods for Prediction of Service Life of Fire Trucks", Fire Science and Engineering, Vol. 35, No. 2, pp. 39-44 (2021). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.7d557484>
2. K. R. Cho, C. R. Rue and S. H. Kang, "Fluid Mechanics 3rd edition", Hee Jung Dang, p. 746 (1995).
3. K. W. Eom, "Mechanics of Solids 2nd edition", Hee Jung Dang, p. 300 (1996).
4. J. M. Jin, "Effects of Impeller Configurations on a Pressure Fluctuation in Double-Suction Pump", master of science in engineering, Sungkyunkwan University (2019).
5. Grant. G., Tabakoff. W., "Erosion Prediction in Turbomachinery Resulting from Environmental Solid Particles", Journal of Aircraft, Vol. 12, pp. 471-478 (1975).
6. H S. Jang, H. W. Lee, S. Y. Hwang and J. H. Lee, "Numerical Simulation of Erosion Rate on Pipe Elbow Using Coupled Behavior of Fluid and Particle", J. Ocean Eng. Technol., Vol. 31, No. 1, pp. 14-21 (2017). <https://doi.org/10.5574/KSOE.2017.31.1.014>
7. J. H. Kim, "Pump Performance Study in Forward and Backward Swept Axial-Flow Impeller", master of science in engineering, Kangwon National University (2014).
8. J. W. Kim, "Study on the Erosion-Corrosion Damages of Pump Impeller", master of science in engineering, Pukyong University (2007).
9. J. P. Jo, "The Study of Flow in the Centrifugal Pump by Cavitation Analysis", master of science in engineering, University of the Ulsan (2012).