대한기계확회 주최

제11회 전국학생설계경진대회(2021년)

설계 최종 보고서

참가부	대학부 (○)							
참가분야	공모주제 (○) / 자유주제 ()							
참가팀명		팀 캐드						
설계제목		모듈형 기계식 절수시스템						
지도교수/교사	1 '	(소속) 부산대학교 기계공학부 기계시스템 설계 (성명) 김송길 (연락처) 010-4783-8183 (이메일) songkil.kim@pusan.ac.kr						
대표자	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소			
(신청인)	권선호	부산대학교 기계공학부	010-6438-2387	akiwi03@naver.com	부산진구 양연로 10빈걸 9			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	권선호	부산대학교 기계공학부 / 4학년	akiwi03@naver.com
2	김홍민	부산대학교 기계공학부 / 4학년	s5710259@naver.com
3	민경석	부산대학교 기계공학부 / 4학년	201721422@pusan.ac.kr
4	이효준	부산대학교 기계공학부 / 4학년	dlgywns0829@naver.com
5	김지환	부산대학교 기계공학부 / 3학년	kjh98313@naver.com

설계 요약문

참가분야	공모주제 (○) / 자유주제 ()						
참가팀명	팀 캐드						
설계제목	모듈형 기계식 절수시스템						
대표자명	권 선 호						
요약문	현재 사용되는 절수형 제품에는 센서식이나 푸시형이 주로 사용되고 있다. 그러나 모듈형 센서식 절수 제품은 센서 인식의 문제와 배터리를 주기적으로 교체해야 하는 단점이 있다. 푸시형 절수 제품은 물 사용 시간을 조절할 수 없어 적은 사용량이 요구되는 경우에는 절수 효과를 거두기 어렵다. 기존의 제품들의 단점을 보완할 수 있고, 효율적으로 물을 절약하고 이와 관련된 에너지 낭비를 줄이기 위해, 본 설계에서는 모듈형 기계식 절수시스템을 개발하였다. 아래 그림은 개발된 모듈형 기계식 절수시스템을 나타낸다. 레버-원동기어-중간기어-종동기어-볼 밸브로 힘이 전달되어 사용자가 밸브를 열 수 있고, 탈진기를 통해 충분한 급수 시간을 확보한다. 사용자가 원하는 만큼 레버를 돌리면 볼 밸브가 열려 스프링이 다 풀리기 전까지 급수가 이루어지고 스프링이 풀리며 중간기어2에 의해 볼 밸브가 다시 닫히는 메커니즘으로 작동한다.						
설계프로젝트의 입상 이력	-						

모듈형 기계식 절수 시스템 개발

권선호*·김홍민*·민경석*·이효준*·김지환*·김송길**
*부산대학교 기계공학부

Development of a modular mechanical water-saving system

Seon-Ho Kwon*, Hong-Min Kim*, Kyng-Seok Min*, Hyo-Jun Lee*, Ji-Hwan Kim* and Song Kil Kim*†

* School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received January 9, 2021; Revised September 13, 2021; Accepted January 3, 2013)

Key Words: Water-saving System(절수시스템), Saving Energy(에너지 절약), 3D Print(3D 프린트), Module (모듈), Bevel Gear(베벨기어), Ball Valve(볼밸브), Escapement(탈진기), Multiple Gear(다단기어), Torsion Spring(회전 스프링) Quantitative Torque Measurement(정량적 토크 측정기)

초록: 본 개발은 모듈식으로 설치할 수 있고 별도의 전원 없이 완전 기계식으로 작동하는 절수 시스템을 제작하여 에너지 절약을 실천할 수 있도록 하는 것을 목표로 한다. 기존 제품의 단점인 사용자 인식문제와 최적의 시간만큼 물을 사용할 수 없었던 단점을 보완하여 더 효율적으로 절수 기능을 하도록개발 및 제작하였다. 제품은 크게 하우징, 원동기어, 중간기어, 종동기어, 탈진기로 이루어져 있으며, 다단기어 와 탈진기에 의해 급수 시간을 확보한다. 본 시스템은 공공장소에 큰 비용 및 시간 필요 없이설치되어 사용자의 인식 개선 및 물 절약을 실천할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: In this work, we aim to develop and fabricate a water-saving mechanical system that can be installed to various types of facets in a modular way and operates in a fully mechanical manner without any power supply so as to ultimately save the energy usage. The developed water-saving system can provide more efficient water saving functions than the existing products, enabling the controlled water usage for the optimal time. In addition, this system allows for people to recognize how much water they use. The water-saving system is mainly composed of a housing, a drive-gear, middle gears, a driven-gear, and a escapement, and the water supply time is secured by a multi-stage gear and a escapement. This system can be installed in public places without the need for large costs and time and it is expected to contribute to save water and energy as well as to improve users' awareness for water-saving.

1. 서론

1.1 문제 정의

깨끗한 물을 사용하기 위한 하수처리 비용은 1년에 약 8조 7천억원, 수돗물 정제비용은 연 약 7조원에 달한다.(1) 또한, 새로운 수자원 확보를 위해서는 자연환경 훼손 및 개발비용이 발생되며, 새로운 에너지를 개발하기 위한 비용도 매우 크다. 이 모든 과정에서 사용되는 물과 에너지의 양은 막대하다. 그렇기 때문에, 일상생활에서 사용되고 있는 에너지와 물을 절약하는 것은 전세계적으로 해결해야 할 에너지・환경 문제와 수자원 문제를 해결하는데 있어 매우 중요하며, 새로운 청정 에너지를 개발하는 것보다 우선시 되어야 한다.

[†] Corresponding Author, songkil.kim@pusan.ac.kr

^{© 2021} The Korean Society of Mechanical Engineers

한국의 1인당 일 평균 물 사용량은 2000년대 중반 이후 270~295 L (평균 282 L) 수준을 유지하고 있다. 환경부에 따르면 2000년 물 절약 중합 대책 (2000-2006)을 수립 및 시행하였는데, 그 결과 2006년까지 1인당 급수량은 감소 추세를 보였으나 1인당 물 사용량에 대한 절감 효과가 나타나지 않았다. 이후 환경부는 국가 물 수요관리 종합 대책 (2007-2016)을 수립하고 물 낭비요소 해결과 물 절약 인프라 확충을 위한 정책을 추진하였으나 Table 1에서 알 수 있듯이, 1인당 급수량과 1인당 물 사용량 모두 눈에 띄는 절감 효과가 나타나지 않아 다른 방안이 필요한 실정이다.

Table 1 Average daily water usage per person in Korea⁽²⁾

[단위:백만 m³, L]

	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
연간 총급수량(백만 ㎡)	5,812	6,002	5,910	6,021	6,029	6,159	6,214	6,279	6,419	6,492	6,656	6,666
1인당 일평균 물사용량(L)	12	272	277	279	278	282	280	282	287	289	295	295

1.2 설계의 필요성 및 목표

인구가 늘어나 1인당 사용 가능한 수자원의 양이 감소하더라도 사람들의 물 사용량이 적어지거나 물을 이용할 수 있는 기반 시설이 제대로 설치, 관리되고 있다면 물 부족 문제가 해결될 수 있다. 수도 처리 시설의 지속적인 증축에는 한계가 있기 때문에 물 부족 문제를 해결하기 위해서는 물을 담는 시설용량을 키우는 것보다 누수되는 물을 막거나 물 사용량을 줄이는 것이 더 효과적이다. 이러한 물 사용량을 줄이기 위한 방법 중 하나는 절수 제품을 설치하는 것이다. 수전별로 절수 부속을 설치하거나 절수수전을 교체하는 방식만으로도 기존의 물 사용량에 비해 20%~50%의 절수 효과를 가져올 수 있다.(3)

따라서 본 설계에서는, 물 사용량 절감 문제를 해결하기 위해 기계식으로 작동하는 모듈식 탈부착 절수 제품을 만들어 사용자로 하여금 물의 사용량을 인지하게 함과 동시에 낭비되는 물의 양을 효과적으로 줄이고 이를 통해 에너지 낭비 및 수자원 문제를 해결하는데 기여하고자 한다.

2. 설계핵심내용

2.1 시장제품 분석

공공장소에서 낭비되는 물을 절감하는 효과를 거두기 위해, 단순히 일정 시간 후 절수되는 기계 시스템을 개발하는 것이 아니라 사용자가 물을 얼마만큼 사용하는지 인식 가능하도록 설계한다. 전자식이아닌 순수 기계식으로 구동하도록 설계하여 높은 설치비용과 전자식 센서 인지 문제를 보완하도록 한다. 또한 모듈형으로 개발하여 별도의 설치비 없이 기존 시스템에 바로 적용할 수 있는 제품을 개발하고자 한다. 현재 공공시설에서 사용되고 있는 푸시형 절수 시스템과 시중에 판매되는 전자식 수도꼭지를 분석하고 이에 대한 문제점을 찾아보았다.

Fig. 1(a)의 전자식 센서 모듈의 경우 세면대에 부착하여 사용자의 손을 갖다 대면 센서로 인식하여 물이 나오는 방식이다. 모듈형으로 설계되어 기존 세면대에 바로 부착할 수 있지만, 센서의 감지 범위 및 오작동 등의 한계가 있다. 또한 주기적으로 충전을 해줘야 하는 불편한 점이 있다. Fig. 1(b)는 공중목욕탕에 사용되는 푸시형 제품의 경우로 기계식으로 작동된다. 푸시바를 누르면 바가 수축한 후 다시 팽창할 때까지 물이 나오는 구조로 소량의 물을 사용하고 싶을 때에도 사용량보다 물이 더 많이 나오는 경우가 많아 오히려 물이 낭비되는 경우가 있다. Fig. 1(c)의 고급 푸시형 자폐식 수도꼭지는 실제 판매되고 있는 목욕탕에서 사용되는 푸시형 자폐식 수도를 가정용 수도꼭지 형태로 제작한 제품이다. 목욕탕수도와 마찬가지로 물이 나오는 시간을 조절할 수 없다.



Fig. 1 (a) Electronic water saving module, (b) push-type water saver in bath house and (c) push-type water saver

2.2 특허 조사 및 분석

기계식 절수 시스템과 유사한 원리와 기능을 갖는 특허를 조사하였다. 아래는 가장 유사한 2건의 유효 특허를 나타낸 것이다.

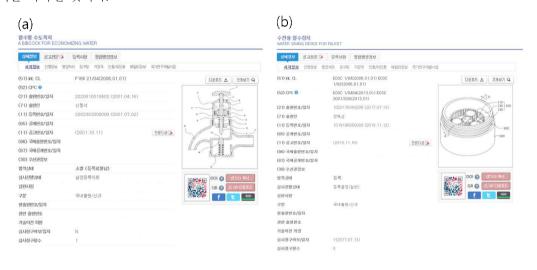


Fig. 2 (a) Water-saving faucet(4) and (b) water-saving device(5)

Fig. 2 (a)는 특허출원번호 2020010010602의 절수형 수도꼭지이며 모듈형 물 절약 시스템과 비슷한 기능을 하는 제품이다. 특허는 절수형 수도꼭지에 관한 것으로, 누름 버튼을 눌러 물을 공급하되, 사용자가 사용할 만큼의 충분한 물이 공급된 후 자동적으로 물의 공급이 차단되도록 구성되어 물의 낭비를 방지할 수 있는 절수형 수도꼭지에 관한 것이다. 본 제품은 모듈식이 아니므로 설치 시 수도꼭지를 전부바꾸어야 하는 단점이 있다.

Fig. 2 (b)은 특허출원번호 1020170089205의 수전용 절수장치로 유성기어를 사용한 모듈식 절수장치를 수전에 부착하여 물 절약을 할 수 있게 한 제품이다. 그러나 본 제품을 사용할 시 토수와 지수가 반복적으로 이루어져 일반적인 수도 사용 시에 불편함이 있을 수 있다. 그에 비해 본 설계에서 개발하는 모듈형 물 절약 시스템은 사용자가 원하는 시간만큼만 물이 나오고 그 후에는 자동으로 물이 잠겨 사용자가 제품을 사용하는데 더 편리함을 느낄 수 있다.

2.3 설계 문제 정의

기존의 기계식 및 전자식 절수 시스템의 단점을 보완하고, 가정집, 공공 화장실 등 다양한 장소에서 설치가 용이하도록 하기 위한 절수 시스템 설계 요구 조건을 아래와 같이 4가지로 정의한다. 그리고, Table 2에서는 정의된 설계 요구 조건에 대한 구체적인 구현 방법을 요약하고 있다.

- (1) **절수 메커니즘 구현:** 공공장소에서 사용자의 실수로 물이 잠기지 않은 경우 발생하는 물 낭비를 막기 위해 절수되는 메커니즘이 필요하다. 이는 기존의 푸시형 기계식 절수 샤워기와 전자식 수도꼭 지 모두 가지고 있는 기능으로 반드시 갖춰야 하는 요건이다.
- (2) 기계식 작동 메커니즘 구현: 기계요소를 사용하여 별도의 전원없이 자동으로 동작하도록 한다. 기존 전자식 수도꼭지는 센서 인식의 문제로 세면대 이용 시 불편함이 발생할 수 있다. 이를 해결하기위해 센서가 아닌 기계식으로 설계한다.
- (3) 모듈형 절수 시스템 구현: 이용 및 장착의 편의를 위해 설계품을 소형화 및 모듈화한다. 모듈형으로 개발하여 기존 푸시형 샤워기와 전자식 수도꼭지와 차별화시키며, 저비용으로 설치 가능하도록 한다.
- (4) 사용자 물 소비량 인지 기능 구현: 제품 외형 디자인을 통해 사용자의 물 사용량을 인지하게 한다. 세면대 이용 시 물 낭비를 줄여야 한다는 것은 이미 많은 사람이 공감하고 있는 부분이다. 하지만 공 공 목욕탕에서 흔히 볼 수 있는 푸시형 기계식 절수 샤워기는 물이 끊길 때마다 사용자가 버튼을 누르기만 하면 된다. 이는 사용자가 물을 얼마나 많이 사용하는지 인지시킬 수 없으며, 물 낭비 절감에 효과적이지 않다. 이를 보완하기 위해 사용자가 물을 얼마만큼 쓰는지 인지할 수 있도록 설계한다.(6)

Table 2 Design considerations

핵심 설계 고려 사항	구현 방법
절수 메커니즘 구현	볼 밸브를 이용한 절수
기계식 설계	기어와 태엽스프링 등을 이용하여 개발
모듈형 개발	공공장소 세면대 관의 규격 조사를 통한 접합부 개발
사용자 물 사용량 인식 가능	레버를 회전시키는 각도에 비례하는 시간동안 물이 나오도록 설계

2.4 각 구성품의 설계방법

2.4.1 제품의 전체적인 구조 및 작동 메커니즘

Fig. 3는 설계된 모듈형 기계식 절수 시스템의 개략도를 나타낸다. 본 시스템은 사용자로부터 동력을 전달받는 레버 부, 동력을 밸브로 전달하는 구동기어 부, 기어의 회전속도를 조절하는 탈진기 부, 물을 개폐시키는 밸브 부로 구성된다.

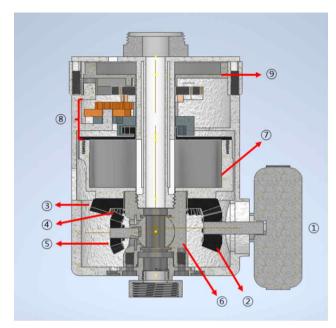


Fig. 3 Modeling of modular mechanical water saving system

① 레버 ② 원동기어 ③ 중간기어1 ④ 중간기어2 ⑤ 종동기어 ⑥ 볼 밸브 ⑦ 스프링 케이스 ⑧ 다단기어 ⑨ 탈진기

- 1) 레버 부: 레버 부는 레버(①)와 원동기어(②)로 구성되어 있다. 사용자가 물을 사용하기 위해 레버를 돌리면 축과 결합된 원동기어가 동시에 회전한다.
- 2) 구동기어 부: 구동기어 부는 한 원판에서 외부 이를 가지는 중간기어1(③)과 내부 이를 가지는 중 간기어2(④)로 구성되어 있다. 중간기어1의 상단에 있는 스프링 케이스(⑦) 내부에 태엽 스프링이 설치되어 있다. 레버의 축에 결합된 원동기어가 동력을 전달받아 회전하고, 이에 맞물려 중간기어1이 회전하면 태엽 스프링에 탄성에너지가 저장된다. 동시에 부분적으로 이가 나있는 중간기어2도 회전하면서 종동기어(⑤)가 맞물려 회전하게 된다. 이때 중간기어2는 피치원 전체에 이(teeth)가 분포된 것이 아니고, 일부 각도에만 이를 형성하였기 때문에 종동기어는 90°만 회전한다.
- 3) 밸브 부: 밸브 부는 종동기어와 볼 밸브(⑥)로 구성되어 있다. 종동기어가 회전함에 따라 기어 축과 연결되어 있는 볼 밸브도 회전한다. 볼 밸브는 평상시에는 구멍이 내부 관과 수직이어서 물이 흐르지 않는다. 하지만 레버를 돌리고, 최종적으로 종동기어가 90°회전하면 볼 밸브도 회전하여 관과 밸브의 구멍이 일치하여 물이 흐르게 된다.
- 4) 탈진기 부: Fig. 3에서 ⑨부분으로, wheel, pallet으로 구성된다. 왕복운동하는 pallet으로 wheel의 회전 운동에 간섭을 준다. 이때 회전운동의 간섭이 다단기어(⑧)를 통해 중간기어로 전달된다. 이를 통해 main spring에 의해 장치가 한 번에 풀리는 것을 방지하고 일정한 각속도를 가지게 한다.

2.4.2 레버부 설계

(1) 원동기어 육각 축의 변 길이 선정

원동기어 축은 정육각형의 단면을 가지며 모서리 길이를 결정하기 위해 원동기어에 걸리는 토크를 결정할 필요가 있다. 사람의 손으로 결정되는 토크를 측정하는 것은 정량화 될 수 없기에 원동기어에 걸리는 토크를 결정하기 위해서는 토크측정기를 제작하여 스프링에서 발생하는 토크를 측정한다. 아래 Fig. 4(a)는 로드셀에서의 신호를 amp에서 전압값으로 처리하여 나타낼 수 있는 회로이고 Fig. 4(b)는

labview를 이용한 토크측정기 프로그램이다. 스프링에 의한 토크 측정에 있어서 오차를 줄이기 위해 회전수 별로 5번씩 측정하여 평균값을 구했다. 아래 Table 3는 측정된 토크이다. 실제 제품 사용 시 중간기어1과 회전 스프링은 최대 1바퀴만 감기게 된다. 하지만 안전을 고려해 Table 3의 스프링이 10바퀴 감겼을 때 토크 130 N·mm를 계산식에 사용했다.

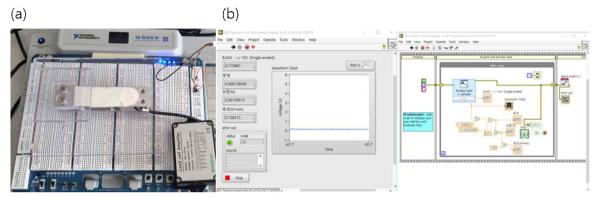


Fig. 4 (a) Torque measurement system and (b) Labview software and block diagram

	1회(N·mm)	2회(N·mm)	3회(N·mm)	4회(N·mm)	5회(N·mm)	평균(N·mm)
1바퀴	82.7356	80.8652	79.7657	83.0663	82.3333	81.75322
3바퀴	92.9725	90.4027	90.0362	94.4384	89.7356	91.58224
5바퀴	108.747	104.711	102.876	101.410	101.777	103.9042
10바퀴	131.493	132,959	131.860	127.458	130.758	130.9056

Table 3 Torque measured depending on the number of rotations

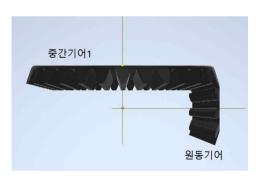


Fig. 5 Bevel gear set 1

Fig. 5에서 중간기어1에 걸리는 토크는 회전 스프링의 토크와 동일한 T=130 N·mm이며 중간기어1을 통해서 원동기어로 전달되는 전달력을 F, 중간기어1의 상당 피치원 지름을 D_{em1} , 원동기어의 평균 피치원 지름을 D_{e1} 이라고 하면 토크 T와 전달력 F사이는 다음의 식을 만족한다.

$$T = F \times \frac{D_{em1}}{2}$$

이를 전달력 F에 관해 나타내면 다음과 같다.

$$F = \frac{2T}{D_{em1}} \cdots (1)$$

Table 4 The characteristic of bevel gear set 1

	원동기어	중간기어 1
모듈 $m(mm)$	2	2
잇수 Z (개)	$Z_1 = 9$	$Z_{m1} = 27$
피치원 지름 <i>D</i> (mm)	$D_1 = 18$	$D_{m1} = 54$
피치 원추각 δ (°)	$\delta_1 = 18.4349$	$\delta_{m1} = 71.5651$

위 Table 4에 의해 중간기어1의 상당 피치원 지름은 아래와 같다.

$$D_{em1} = \frac{D_{m1}}{\cos \delta_{m1}} = \frac{54}{\cos 71.5651}$$
 = 170.76 mm

따라서 식 (1)에 의해 두 베벨기어 사이의 전달력 F를 구하면

$$F = \frac{2T}{D_{em1}} = \frac{2 \times 130}{170.76} = 1.52 \text{ N}$$

원동기어에 발생하는 토크 T_1 는 다음과 같다.

$$T_1 = F \times \frac{D_{e1}}{2} \cdots (2)$$

여기서 D_{e1} 은 원동기어의 상당 피치원 지름이며 다음과 같다.

$$D_{e1} = \frac{D_1}{\cos \delta_1} = \frac{18}{\cos 18.4349}$$
 = 18.97 mm

따라서 원동기어에 발생하는 토크 T_1 은 식 (2)에 의해

$$T_1 = F \times \frac{D_{e1}}{2} = 1.52 \times \frac{18.97}{2} = 14.42 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

원동기어 축의 자중과 원동기어의 질량에 의한 굽힘 모멘트는 토크 T_1 에 비해 매우 작으므로 무시하면 원동 축에 걸리는 토크는 T_1 과 같다. 축의 단면 형상이 정육각형이므로 정육각형의 극관성 모멘트 I_{p1} 식은 다음과 같다.

$$I_{p1} = \frac{nb^4}{96} \left(\cot \frac{\beta}{2} \right) \left(3\cot^2 \frac{\beta}{2} + 1 \right) \cdots (3)$$

(n은 모서리의 수, b는 한 변의 길이, β 는 한 변이 이루는 각)

비틀림 응력 7는

$$\tau = \frac{T_1 \times r_{\text{max}}}{I_p} = \frac{T_1 \times b}{\frac{nb^4}{96} \left(\cot \frac{\beta}{2}\right) \left(3\cot^2 \frac{\beta}{2} + 1\right)} \cdots (4)$$

Structure steel의 경우 항복강도는 250 MPa이며(7) 이상적인 경우, 전단응력은 인장 응력의 절반이므로 $\tau=125$ MPa로 하였다. 식 (4)를 한 변의 길이 b에 관해 나타내면

$$b = \sqrt[3]{\frac{T_1}{\frac{n\tau}{96}\left(\cot\frac{\beta}{2}\right)\left(3\cot^2\frac{\beta}{2} + 1\right)}}$$

b ≥ 0.474 mm 안전 및 조립의 편의성을 고려하여 3 mm로 선정한다.

설계의 타당성을 입증하기 위해 Ansys Workbench 프로그램을 이용하여(8) 원동 축의 구조해석을 진행하였다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 원동기어 축의 최대 응력이 0.77733 Mpa로 structural steel의 최대 인장강도인 250 Mpa를 넘지 않아 안전한 것으로 판단된다. 토크가 작용하는 방향은 Fig. 6(b)과 같으며 구조해석 결과값에 영향을 주는 mesh의 크기는 Table 5에 정리하였다.

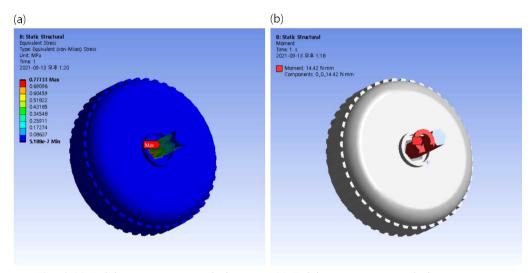


Fig. 6 (a) Driving gear ansys analysis stress, (a) Driving gear ansys analysis moment

Table 5 Mesh of drive shaft

mesh size	4.1041 mm (default)
control mesh size	0.1 mm
nodes	122,270
elements	81,713

(2) 종동기어 축의 변 길이 선정

볼밸브 측 육각 축의 변 길이를 결정하기 위하여 위와 동일한 과정을 반복하여야 하나 볼밸브 축 종 동기어가 중간기어2와 맞물릴 때는 원동기어와 중간기어1이 맞물리고 있는 상태이므로 스프링 토크 130 N·mm은 서로 분산되어 전달된다. 하지만, 최악의 조건을 고려해 종동기어가 온전한 토크 130 N·mm 모두 받는다고 가정하여 계산하였다.

Table 6 The characteristic of bevel gear set 2

	중간기어 2	종동 기어
모듈 m		2
잇수 Z (개)	$Z_{m2} = 2$	$Z_2 = 8$
피치원 지름 <i>D</i> (mm)	$D_{m2} = 36$	$D_2 = 16$
피치 원추각 δ (°)	$\delta_{m2} = 66.0375$	$\delta_2 = 23.9625$

식 (1)에 의해 종동기어가 받는 전달력은 다음과 같다.

$$F = \frac{2T}{D_{em2}} \cdots (5)$$

 D_{em2} 는 중간기어2의 상당 피치원 지름으로 다음과 같다.

$$D_{em2} = \frac{D_{m2}}{\cos \delta_{m2}} = \frac{36}{\cos 66.0375} = 88.64 \text{ mm}$$

식 (5)에 의해 전달력 F는

$$F = \frac{2T}{D_{em2}} = \frac{2 \times 130}{88.64} = 2.93 \text{ N}$$

종동기어에 발생하는 토크 T_2 는

$$T_2 = F \times \frac{D_{e2}}{2} \cdots (6)$$

종동기어의 상당 피치원 지름 D_{e2} 은 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$D_{e2} = \frac{D_2}{\cos \delta_2} = \frac{16}{\cos 23.9625} = 17.51 \text{ mm}$$

따라서 종동기어에 발생하는 토크 T_2 는 아래와 같다.

$$T_2 = F \times \frac{D_{e2}}{2} = 2.93 \times \frac{17.51}{2} = 25.65 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

마찬가지로 축의 단면 형상이 정육각형이므로 정육각형의 극관성 모멘트 I_{p2} 는 식 (3)과 동일하다.

축에 걸리는 비틀림 응력도 식 (4)와 같으므로 한 변의 길이 b에 관해 나타내면

$$b = \sqrt[3]{\frac{T_2}{\frac{n\tau}{96} \left(\cot\frac{\beta}{2}\right) \left(3\cot^2\frac{\beta}{2} + 1\right)}} = 0.574 \text{ mm}$$

따라서 $b \ge 0.574$ mm 이며 육각 축의 한 모서리 길이는 최소 0.574 mm가 되어야 한다. 이는 회전 스프링의 모든 토크가 종동기어에 가해질 때이므로 실제로는 원동기어와 나눠 힘을 받으므로 더 작다고 생각할 수 있다. 이를 고려하여 종동기어의 육각 축 한 변의 길이를 조립의 편이성으로 고려하여 2.4 mm로 선정하였다.

마찬가지로 설계의 타당성을 입증하기 위해 Ansys Workbench 프로그램을 이용하여 원동 축의 구조해석을 진행하였다. Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 레버부분의 최대 응력이 8.0659 MPa로 structural steel의 최대 인장강도인 250 MPa를 넘지 않아 안전한 것으로 판단된다. 토크가 작용하는 방향은 Fig. 7(b)와 같으며 구조해석 결과값에 영향을 주는 mesh의 크기는 Table 7에 정리하였다.

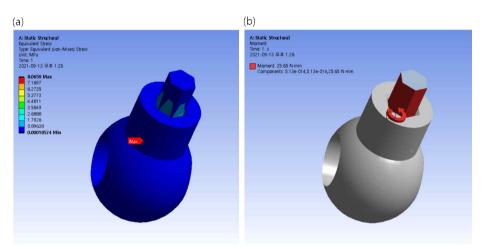


Fig. 7 (a) Driven gear ansys analysis stress, (b) Driven gear ansys analysis moment

Table 7 Mesh of driven shaft

mesh size	1.6951 mm (default)
control mesh size	0.1 mm
nodes	125,617
elements	84,681

2.4.2 구동 기어부 설계

수전 밑에 소규모로 설치된다는 특성이 있으므로 기어 배치가 공간상의 한계가 뚜렷하여 스퍼기어가 아닌 베벨기어로 구성하였다.

(1) 원동기어-중간기어1 설계

사용 시 레버를 너무 적게 돌리면 물 사용량 인식 효과가 떨어지고 너무 과도한 회전을 요구하면 사용에 큰 불편이 생긴다. 레버와 연결된 중간기어1과 원동기어 사이의 기어비를 1:3으로 설계하였다.

(2) 중간기어2-종동기어 설계

볼밸브가 완전히 열렸을 때 볼밸브 유관과 모듈의 유관이 동일 축 상에 위치해야 한다.(9) 베벨기어로 밸브를 개폐하기 위해, 종동기어가 볼밸브를 90도 회전시켜야 한다. 또한, 베벨기어가 회전함에 따라 밸브가 닫히는데, 종동기어가 중간기어2의 이에 맞물리는 동안은 물의 유량이 변화한다. 중간기어2의 이가 난 각도를 θ , 중간기어가 회전하는 속도를 ω 로 두면, 유량이 변화하는 구간의 시간 t는

$$t = \frac{\theta}{\omega}$$

즉, 중간기어2의 이가 난 각도 θ 가 작을수록 유량이 변화하는 구간은 짧아진다. 따라서 Fig. 8(a)와 같이 중간기어2의 이가 난 각도 θ 를 줄이는 방향으로 설계하였다. Fig. 8(b)는 중간기어2의 이(teeth)가 생성된 각도를 표시하고 있으며 중간기어2 설계에 관련한 치수는 Table 8에 정리하였다. 그리고, 중간기어가 360도 이상 회전하게 될 경우 중간기어2가 종동기어와 다시 맞물려 돌아가서 제품에 결함이 생길 수 있으므로 Fig. 9와 같이 최대 회전각을 제한하는 설계를 추가하였다.

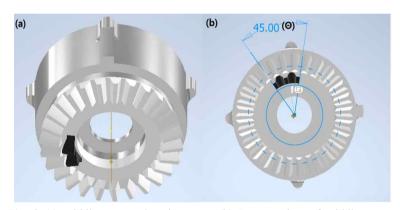


Fig. 8 (a) middle gear and spring case, (b) Bottom view of middle gear

Table 8 Gear specifications in Fig. 8

종동기어의 잇수	중간기어2 피치원 전체 이	부분기어	중간기어2 잇수	종동기어 회전각 (볼 밸브 회전각)
8	16	45°/360° (=1/8)	2	90°

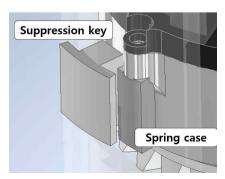


Fig. 9 Suppression key

2.4.3 밸브부 설계

(1) 파이프 형상 및 볼 밸브 설계

볼 밸브는 파이프에 끼워 넣어져야 하므로 조립의 용이성을 고려하면 파이프는 일체형이 아닌 Fig. 10과 같이 두 부분으로 나누어 설계했다. 볼 밸브의 축은 Fig. 10과 같이 파이프와 종동기어를 체결하는 형태로 철제 재질을 가진 축으로 구성된다.

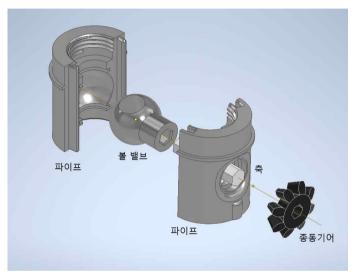


Fig. 10 Structure of ball valve pipe

2.4.4 탈진기 설계

(1) Wheel and Pallet 설계

탈진기는 Fig. 11(a)와 같이 모듈 내에서 가장 상단에 위치해 있다. 탈진기는 아래 Fig. 11(b)와 같이 wheel, pallet으로 구성되어 있고, wheel의 아래에는 기어5가 결합되어 있다. pallet이 왕복운동 함에 따라 wheel의 이가 하나씩 지나갈 수 있도록 설계하였다. Fig. 11(c)은 pallet의 설계도이며, Table 9에 pallet의 치수를 명시하였다.

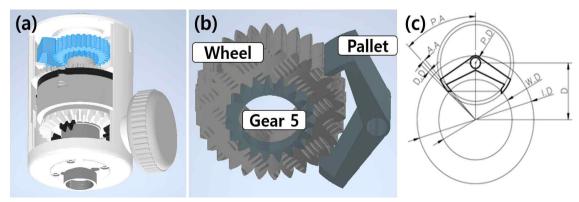


Fig. 11 (a) Location of escapement, (b) Wheel & pallet and (c) Pallet design

Table 9 Dimensions of pallet

I.D	Module inner diameter (mm)	62
W.D	Wheel diameter (mm)	38.891
D	Pallet - Wheel distance (mm)	27.5
P.D	Pendulum diameter (mm)	7.0
P.A	Pitch angle (°)	45
A.A , D.A	Adendum angle & Dedendum angle (°)	2.4

아래 Fig. 13(a)~(d)는 wheel의 회전에 pallet이 간섭하는 모습을 순차적으로 나타낸 것이다. Fig. 13(a)에서 pallet의 왼쪽 돌출부가 wheel에 물려있다. wheel이 곡선 이를 가지므로 wheel이 회전함에 따라 wheel의 이가 pallet을 밀어 올려 pallet이 Fig. 13(b)(c)와 같이 시계방향으로 회전한다. 그리고 Fig. 13(d)와 같이 pallet의 오른쪽 돌출부가 wheel에 물리게 되면 회전은 다시 멈춘다. 그 후 (d)→(a)의 과정이 일어나며 회전이 다시 진행된다.

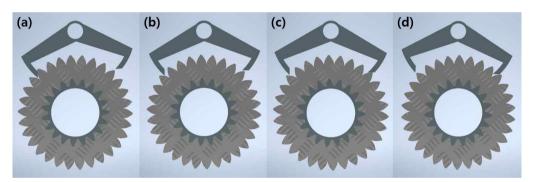


Fig. 13 The operation of the escapement

(2) 다단기어 설계

아래 Fig. 14(a)는 모듈 내 스프링 케이스와 중간기어1 사이의 동력전달을 위한 5단 기어기구를 나타 낸 것이다. 이때 회전하는 wheel의 운동은 wheel에 접합된 기어5[Fig. 14.(b)의 초록색], 그리고 이와 맞물리는 다단기어[Fig. 14.(b)의 파란색]를 통해 중간기어로 전달된다. 다단기어는 기어1, 기어2, 기어3, 기어4, 기어5로 구성되며 각각의 기어비는 Table 10과 같다.

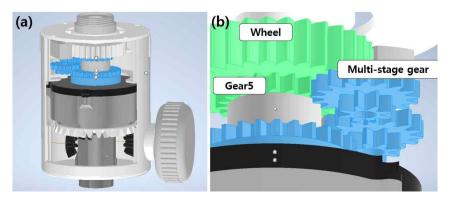


Fig. 14 (a) location of multi-stage gears, (b) wheel, gear5 and multi-stage

Table 10 Gear ratio

번호	부품명	잇수	기어비
4	기어5 - 기어4-2	19:17	0.895
3	기어4-1 - 기어 3-2	8:15	1.875
2	기어3-1 - 기어 2-2	8:15	1.875
1	기어2-1 - 기어1	9:27	3

이때 다단기어 전체 속도비 i는

이므로 escape wheel이 9.439바퀴를 돌 때마다 기어1이 한 바퀴 돌게 된다.



Fig. 15 Five pairs of gears

(3) Main spring 설계

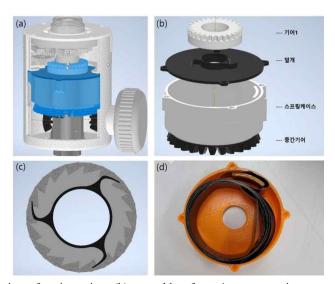


Fig. 16 (a) Location of main spring, (b) assemble of gear1, cover, spring case, middle gear, (c) modeling of ratchet gear and (d) torsion spring & spring case

회전스프링은 Fig. 16(b)와 같이 스프링케이스에 결합되어 있고, 스프링케이스는 위로는 덮개, 아래로는 중간기어와 결합된다. 덮개 상단의 구조물과 기어1 아래는 Fig. 16(c)와 같이 내치래칫 형태로 맞물린다. 이는 Fig. 15의 기어 1~5, wheel의 역회전을 방지하기 위함이다. 따라서 스프링을 감을 때는 기어1이회전하지 않지만, 스프링이 풀릴 때는 래칫이 맞물려 기어1~5와 wheel도 함께 회전한다. Fig 16(c)는 스프링케이스에 감긴 스프링을 평면에서 본 사진이다.

2.5.1 제약조건

- 1) 제한된 모듈의 내부 공간에서 최적의 원동, 종동기어 설계가 필요했다. 각 기어가 너무 작으면 중 간기어와 이의 간섭이 발생하여 언더 컷 현상이 발생할 수 있다. 3D프린터의 출력 정밀도의 한계 에 영향을 받지 않는 이 크기 설계를 해야 했다.
- 2) 모듈을 이용해 밸브를 연 후 태엽 스프링의 강성이 너무 작으면 밸브를 다시 잠그는 복원력이 작용하지 않아 물이 계속 나오게 되는 반면, 스프링의 강성이 너무 큰 경우 밸브 개방 후 바로 닫히는 문제점이 있다.
- 3) 원동 축 및 종동 축 프린트 시, 공차를 작게 한 경우 과도한 마찰이 발생했다. 반면 공차를 크게 준 경우, 부품 간 유격 때문에 요소 사이의 결합 및 작동이 원활하지 않았다.

2.5.2 해결방안

- 1) 제약조건 1 해결 방안: 3D 모델링 tool인 Inventor를 활용하여 원동, 종동기어와 중간기어가 그리는 인벌류트 곡선의 함수를 사용하였다. 정밀한 모델링과 3D 프린터 출력을 반복적으로 시행하는 trial&error 방식으로 최적의 기어비와 형상을 설계하였다.
- 2) 제약조건 2 해결 방안: 시중에서 여러 태엽 스프링을 구해 토크를 측정하고 그 중 하나를 선정하여, 해당 스프링의 복원 토크 기준으로 탈진기부 기어 비를 적절히 설계해 해당 문제를 해결하였다.
- 3) 제약조건 3 해결 방안. lmin과 레버 시아에 형번 60kz 그리스 베아링을 시용하여 마찰이 없어도 되는 부분의 마찰을 획기적으로 줄였다.

3. 결과 및 토의

3.1 최종 시제품 및 작동 원리

3D프린팅을 통해 최종 시제품을 다음의 Fig. 17(a)와 같이 제작하였다. Fig. 17(b)는 실제 공공 화장실수도에 장착한 사진이다.

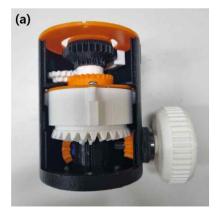




Fig. 17 (a) Product, (b) Fastening product to the faucet

권선호 · 김홍민 · 민경석 · 이효준 · 김지환

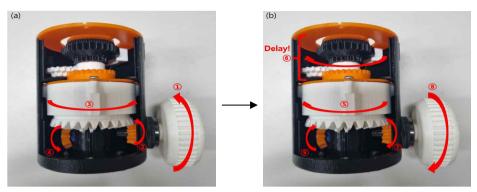


Fig. 18 (a) valve opening process, (b) valve closing process

Fig. 18(a)에서 사용자가 사용할 만큼 레버(①)를 돌려서 원동기어(②)가 중간기어1(③)과 맞물려 회전하면 스프링 케이스가 같이 회전을 하고 그와 동시에 종동기어(④)와 연결된 밸브가 개방된다. Fig. 18(b)에서 레버(⑤)에 손을 떼면 감겼던 스프링이 풀리며 역회전한다. 이때 스프링 케이스 위의 래칫에 맞물려다단기어와 탈진기(⑥) wheel이 회전한다. pallet이 wheel의 회전운동에 간섭을 일으켜 충분한 작동시간을 확보한다. 결국 중간기어가 초기 각도로 돌아오며 중간기어2에 종동기어(⑨)가 맞물려 밸브가 닫힌다.

결과적으로, 최종 시제품은 모듈식으로 설치할 수 있어 설치비용 및 시간을 줄일 수 있다. 완전 기계식으로 별도의 전원 없이 사용할 수 있어 에너지 절약에 효과적이며 사용자가 사용할 물의 양을 인식시켜 사용자의 에너지 절약 의식을 높일 수 있다. 그리고, 다른 유사 절수형 제품과 달리 사용자가 사용할 시간을 직접 조절할 수 있다.

3.2 개선 방향 제시

시제품의 대부분은 PLA 필라멘트를 이용한 3D프린팅으로 제작되었다. PLA는 습기에 약해(10) 누수가 쉽게 발생하고, 낮은 인장강도로 인한 약한 내구성, 매끄럽지 못한 표면이라는 단점이 있다(11). PLA가 아닌 고강도의 소재를 사용하거나, 플라스틱 사출성형 등을 이용하여 제품을 제작한다면 누수문제 해결 및 내구성을 높일 수 있을 것이다. 그리고, 중간기어 및 기어5의 형상이 일반적인 기어의 형상이 아니다. 실제 제품으로 제작 시 특수 제작해야 하므로 비용 증가가 발생할 수 있다.

3.3 제품 활용방안 및 기대효과

모듈형 기계식 절수 시스템의 활용방안과 기대효과는 아래와 같다.

- 1) 모듈형 기계식 절수 시스템 규격화 데이터는 향후 다양한 참고 자료로 활용 가능하다.
- 2) 모듈형 기계식 절수 시스템이 상용화되어 수돗물 절약에 기여한다면 환경 변화의 중요성 인식을 향상시킬 수 있다.
- 3) 비틀림 스프링을 활용한 유체 흐름 차단 기술은 다양한 관로 형상에 효율적으로 사용할 수 있다.
- 4) 제품의 스프링의 강성, 기어비 시뮬레이션을 통해 얻은 데이터는 새로운 규격이 되어 유사 제품의 기술적 기반이 될 것이다.
- 5) 본 제품은 물 사용에 시간 개념을 주입시켜 물 사용량 인식 효과를 가져올 수 있다. 본 제품이 상용화 되어 사용되면 국민의 물 사용 습관 개선에 기여가 가능하다.
- 6) 모듈형 기계식 절수 시스템 개발을 통해 낭비되던 물을 하수처리장에서 복구하는 비용을 절감할 수 있으며, 공공 수도시설과 가정의 수도세를 절감하는 효과가 기대된다.

4. 결론

기존에 물 절약을 위해 사용되던 제품들은 센서식이나 푸시형 제품이 주로 사용되었다. 그러나 센서식 제품은 사용자를 잘 인식하지 못하고 별도의 전원이 필요하다는 단점이 있고, 푸시형 제품은 사용자가 사용 시간을 조절할 수 없다는 단점이 있었다. 이러한 단점들을 해결하기 위해 모듈형 물 절약 시스템을 고안하였고, 공공장소에 손쉽게 설치 가능한 효과적인 물 절약 시스템을 개발하였다. 시스템 개발을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 정부의 물 절약을 위한 정책들이 눈에 띄는 효과를 보이지 못하는 상황에서 정책 외에 다른 방안 이 필요하다. 이를 해결하기 위해 수전에 모듈식으로 부착할 수 있는 모듈형 기계식 절수 시스템을 개발하여 사용자가 원하는 만큼만 사용 후 자동으로 물이 잠기는 제품을 제작하였다.
- 2) 본 제품은 공공장소에 큰 비용 및 시간이 필요 없이 설치되어 사용자의 인식 개선 및 물 절약을 실천할 수 있을 것으로 기대된다. 이로 인해 하수 처리 및 정화에 들어가는 비용이 줄어 결과적으로 각종 수도시설에 사용되는 에너지 절약에도 효과적일 것으로 기대된다.
- 3) 본 제품을 더욱 발전시키기 위해 소재나 제작방식 등을 효과적으로 바꾼다면 앞서 언급한 단점들을 극복할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

우선 "제11회 전국학생설계경진대회"라는 큰 대회에 저희 '팀 캐드'가 출전하게 되어 감사하고 기쁜 마음이 가장 큽니다. 팀원들과 함께 아이디어를 도출하고 설계하는 과정에서 팀원 각자의 역량이 극대화되도록 역할을 분담하고 수행했던 부분에서 진정 'Team'이라는 것임을 크게 느꼈습니다. 문제 해결 과정에 있어 학부 커리큘럼이 헛되지 않음을 느꼈고, 섬세한 조언과 격려 아끼지 않고 계속 독려해주신 부산대학교 기계공학부 김송길 지도교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 끝으로 장기화되는 코로나19로인해 팀 모임에 있어 조금의 난관이 있었지만 포기하지 않고, 최종결과물을 낼 수 있음에 기쁩니다. 본팀의 아이디어가 향후 에너지 절약에 작게나마 도움이 되기를 바랍니다.

참고문헌

- (1) 안일만, 이그린 News, 2018, 하수도요금 국민 부담 급증, "하수처리비 연 9조원 육박"
- (2) 통계청 국가지표체계, 2021, 1인당 물사용량
- (3) 김정인, 오창수, 2017, 절수기기 보급에 따른 소비자의 비용절약과 이산화탄소 저감효과 pp.60~62
- (4) 신동석, 2001, 특허등록 출원번호 2020010010602, 절수형 수도꼭지 (A BIBCOCK FOR ECONOMIZING WATER)
- (5) 정혜성, 2018, 특허등록 출원번호 1019195650000, 수전용 절수장치
- (6) 최태월, 서기원, 2016, A Study on the Effect of Water Saving Awareness on Purchasing Intention of Water Saving Product at Home
- (7) James M. Gere, Barry J. Goodno, Material of mechanics, p 1078
- (8) 이택성, 심관보, ANSYS Workbench를 이용한 구조해석
- (9) 안태원, 한근조, 한동섭, 이성욱, 볼밸브의 개폐각도에 따른 유동특성 분석
- (10) PLA 필라멘트 특성, https://m.all3dp.com/2/how-to-dry-filament-pla-abs-and-nylon/
- (11) 김종준, 한유정 3D 프린팅을 이용한 편성물의 역학적 특성 연구