### 대한기계확회 주최

### 제12회 전국학생설계경진대회(2022년)

# 설계 최종 보고서

참가부	대학부 ( O )				
참가분야	공모주제 ( O ) / 자유주제 ( )				
참가팀명	MED				
설계제목	공진을 활용한 유체 유발 현진동 하베스팅 시스템				
지도교수/교사	(소속)부산대학교 (성명) 정철웅				
대표자	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
(신청인)	권혁성	부산대학교 기계공학부			

### 참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	권혁성	부산대학교 기계공학부 / 3학년	
2	김규현	부산대학교 기계공학부 / 3학년	
3	김재만	부산대학교 기계공학부 / 3학년	
4	정형준	부산대학교 기계공학부 / 3학년	
5			
6			

# 설계 요약문

참가분야	공모주제 ( O ) / 자유주제 ( )			
참가팀명	MED			
설계제목	공진을 활용한 유체 유발 에너지 하베스팅 시스템			
대표자명	권혁성			
요약문	환경문제가 여러 분야에서 대두되는 현 시점에서 버려지는 에너지를 하베스팅하는 방법의 연구는 필연적일 것이다. 지속적인 유동의 흐름이 존재하며 활용되지 못하고 있는 에너지를 활용한다면 충분한 양의 에너지를 생산할수 있을 것이다. 이를 위해 본 설계에서는 지속적이며 거의 일정한 유동이 존재하는 터널 내의 터널풍을 하베스팅하여 터널 내부에 필요한 전력원으로 사용할 수 있는 시스템을 개발 하는 것을 목적으로 한다. 빠르지 않은 유속의 터널풍을 극대화하여 하베스팅 하기 위해 공진을 이용하여 터널풍의 에너지를 증폭시킬 것이며, 증폭된 에너지 또한 동흡진기를 이용하여 효과적으로 수집하여 발전에 사용하는 구조를 설계한다.			
설계프로젝트의 입상 이력	無			

### 공진을 활용한 유체 유발 에너지 하베스팅 시스템 개발

권혁성\* 김규현\* 김재만\* 정형준\* 정철웅\*<sup>†</sup>
\*<sup>부산대학교</sup> 기계공학부

## Development of fluid-Induced energy harvesting system using resonance

Hyucksung Gwon\*, Gyuhyun Kim\* Jaeman Kim\* Hyungjun Jung\* and Cheolung Cheong\*

\* School of Mechanical Engineering, Pusan Natational University

Key Words: String-Vibration(현진동), Resonance(공진), Harvesting(하베스팅), Stockbridge Damper(스톡브릿 지 댐퍼)

초록: 본 설계는 지속적인 유동이 발생하는 터널내 터널풍의 에너지를 증폭, 하베스팅하는 시스템을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 터낼 내부에 현을 설치한다. 터널풍에 의해 와류진동이 발생하고 현의 고유진동수와 일치하여 공진이 발생한다. 이를 동흡진기의 한 종류인 Stockbridge Damper를 통해 효과적으로 수집하기 위해 적절한 파라미터들로 설계한다. 또한 효과적인 발전량 계산을 위해 ANSYS를 이용한 FEM해석을 진행한다. 나날이 환경에 관한 관심이 증가하는 이 시점에서 본 논문이에너지 절약에 도움을 줄 수 있기를 기대한다.

**Abstract**: The purpose of this design is to develop a system EL that amplifies and harves the energy of tunnel wind in a tunnel where continuous flow occurs. To do this, a string is installed inside the burrow. Vortical vibration is generated by the tunnel wind, and resonance is generated in accordance with the natural frequency of the prefecture. It is designed with appropriate parameters to effectively collect this through Stockbridge Damper, a type of dynamic absorber. In addition, FEM analysis using ANSYS is performed for effective power generation calculation

#### 1. 서론

세계적으로 환경문제가 가장 중요한 문제가 되는 현 상황에서, 탄소 배출량을 줄이기 위해 세계적으로 정책적, 기술적인 노력이 이어지고 있다. 화석연료 사용 감소를 위한 다양한 재생에너지(태양광, 풍력 등)에 많은 투자가 이루어지고 있다. 공학을 전공하는 학생으로 세계적 흐름인 친환경 문제에 동참하고자 한다.

주변 환경에서 우리는 공장 폐열 등 에너지가 버려지는 모습을 확인할 수 있고, 이러한 에너지를 활용 하는 방법이 여러 방면으로 이루어지고 있다. 이런 방법으로 버려지는 에너지를 재사용하는 것만으로도 환경문제 개선에 영항을 줄 수 있을 것이라 생각한다. 우리나라에 2021년 기준 3645개소가 존재하는 국내 터널에서 많은

<sup>†</sup> Corresponding Author, ccheong@pusan.ac.kr

<sup>© 2022</sup> The Korean Society of Mechanical Engineers

양의 에너지가 발생하고 버려진다.

이처럼 버려지는 에너지를 하베스팅 하는 시스템을 개발한다면 새로운 에너지를 활용할 수 있을 것이다. 그 중 우리는 터널풍에 의한 에너지를 활용할 방안에 대해 생각해 보았다. 따라서 우리는 이렇게 버려지는 터널 내 유체 에너지를 하베스팅 하는 시스템을 개발하고자 한다.

#### 2. 설계핵심내용

#### 2.1 문제 정의

터널 내에서 버려지는 에너지를 효과적으로 하베스팅 하기 위해, 기존의 선풍기형 발전 시스템이 아닌 공진을 이용하여 에너지를 하베스팅 하는 시스템을 설계한다. 기존의 방식에 비해 단순한 구조로 설계하여 비용을 절 감하고, 유지보수를 쉽게 하고자 한다. 현재 풍력 발전기의 문제점을 파악하고 새로운 방법으로 개발하고자 하였다.



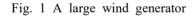




Fig. 2 A small wind generator

먼저, 100kw 소형풍력발전기 설치에 필요한 면적은 약 30평이며 Fig. 2참조, 발전기 설치 비용은 3억~3억5천 만원이다. 이렇게 소형 풍력 발전기만 하더라도 일정 규모 이상의 면적이 필요하며, 초기 설치 비용 또한 크다는 단점이 있다. 또한 기상 상태에 따라 발전량이 일정하지 않고, 지속적인 풍속이 유지되는 장소는 제한적이다.

이러한 풍력발전기의 문제점을 보완하며 새로운 형태의 에너지 하베스팅 시스템을 개발하고자 한다. 이에 따른 핵심 설계 문제는 다음과 같다.

첫째, 발전 메커니즘을 구현한다.

효율적이고, 에너지를 극대화 할 수 있는 발전 매커니즘이 필요하다. 따라서 터널 풍에 의한 현 진동을 현의고유 진동수와 일치시켜 공진현상을 유발하고, 공진현상에 의하여 증폭된 진동에너지를 하베스팅하는 매커니즘을 설계한다.

둘째, 효과적인 압전소자 발전 구조를 설계한다.

공진현상으로 증폭된 에너지가 구조물에 주는 문제점들을 효과적으로 예방하면서 압전소자를 활용한 발전을 위한 구조를 설계한다. 셋째, Ansys를 활용한 시뮬레이션

Ansys Workbench를 사용하여 적절한 진동환경에서 설계 모델의 진동특성을 파악하고 문제점을 확인 및 피드백하다.

#### 2.2 설계 이론

터널 내에는 터널풍이라는 지속적인 유체 유동이 발생한다. 해당 에너지를 효율적으로 하베스팅하기 위해서 본 연구에서는 공진현상을 활용한다. Karman Vortex Shedding에 의한 현의 진동수와 현의 고유진 동수를 일치시킴으로써 의도적으로 공진현상을 유발한다. 공진현상을 통해 적은 에너지를 증폭하여 발전량을 증가시키는 목적이 있다.

공진을 이용하게 되면 에너지 증폭효과가 있을 수 있으나, 현의 안전성에 큰 문제가 발생할 수 있다. 현의 안전성을 확보하기 위해 동흡진기의 한 종류인 Stockbridge Damper를 사용하고자 한다. 또한 현의 진동을 모두 흡수한 Damper에서 에너지를 효과적으로 하베스팅 할 수 있을 것이다.

앞서 언급한 핵심 설계 문제를 충족시키는 설계를 위하여, Damper 및 압전 소자 설치 위치를 결정해야 한다. 터널 내 에너지 하베스팅 메커니즘을 구현하는 시스템을 구상하고 이를 토대로 PTC CREO 등 3D 모델링 툴을 사용하여 모델링한다. Ansys Workbench를 사용하여 Harmonic Resoponse 해석을 진행하여 진동 특성을 파악하여 피드백한다. 해당 설계의 진행방식에 기초하여 구체적으로 제안된 설계 문제를 해결하기 위한 방법은 다음과 같다.

첫째, Karman Vortex shedding을 이용한 발전 메커니즘을 구현한다.

터널 내 지속적인 유동에 의해 현은 와류에 의해 진동하게 된다. 이때 발생하는 진동의 진동수와 현의 고유진 동수를 일치하게 설계한다. 공진이 발생하여 에너지는 증폭될 것이며, 그 에너지를 효율적으로 하베스팅 하고 자 한다.

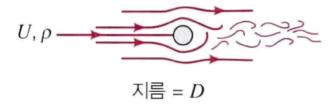


Fig. 3 Karman Vortex Shedding in Fluid

둘째, 효과적인 압전소자 발전을 위해 Stockbridge Damper를 설계한다.

공진에 의해 증폭된 진동 에너지는 현의 안정성을 해치며, 긴 현의 구조상 효과적인 에너지 하베스팅이 어렵다. 따라서 Stockbridge Damper를 사용하여 현의 안정성을 확보함과 동시에 에너지를 Damper을 통해 흡수하며 효과적인 에너지 하베스팅이 가능할 것이다. 따라서 현의 에너지를 효과적으로 흡수하는 Damper형상의 최적설계가 필요하다.

#### 2.3 제약 조건

첫째, Karman Vortex shedding을 이용한 발전 메커니즘을 구현의 제약조건은 다음과 같다.

Karman Vortex Shedding에 의한 진동을 하베스팅 함에 있어 큰 진동이 요구된다. 이에 따라 주어진 환경에서 큰 진동이 이뤄지기 위해 적절한 현의 치수 설정이 필요할 것이다.

둘째, Stockbridge Damper를 설계 시의 제약조건은 다음과 같다.

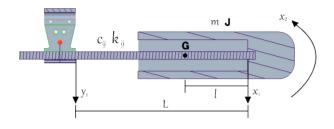


Fig. 4 A schematic diagram of Stockbridge Damper

김찬중의 연구 $^{(3)}$ 결과에 따라 Stockbridge Damper 설계 파라미터는 메신저 케이블의 길이 L, 질량중심과 균형추 연결사이의 거리 l, 질량 m, 균형추 연결부위 위치에서의 질량관성모멘트 J 등이 있다. 해당 파라미터들을 기반으로 목표 진동수 $\alpha$ ,  $\beta$ 에서 최적의 Stockbridge Damper를 설계하여야 한다.

김찬중의 연구<sup>(3)</sup> 결과를 토대로 다음 목적함수 식이 제안된다.

$$J_{ob} = \min_{l,I_G,L,l} \left[ (\alpha - \lambda_1)^2 + (\beta - \lambda_2)^m + \left( \frac{L_{\min}}{L} \right)^n \right] \tag{1}$$

(1)번식 은 Stockbridge Damper의 진동 흡수 성능을 파악할 수 있는 식으로 값이 작을수록 성능이 높은 것을 의미한다. 따라서 본 연구 또한 설계함에 있어 위 (1)식을 통해 파라미터 선정에 사용하고자 한다.

#### 2.4 터널 내 유속 산정 및 Karman Vortex Shedding 진동수 계산

위에서 소개한 목적함수에 필요한 수치인 터널내 유속, Karman Vortex Shedding 진동수를 계산한다.

#### 2.4.1 터널내 유속

Fig. 5 은 이창우 등의 연구<sup>(4)</sup>내용이며 대구-포항 고속도로 임고 4터널 내의 풍속을 약 24시간 동안 35분 간 격으로 측정한 풍속을 도사한 그래프이다. 풍속이 감소하는 6일 00:15~ 6일 06:40을 제외한 시간대에서는 주로 3.5m/s ~ 4.5m/s으로 풍속이 유지되는 것을 확인할 수 있다.

본 연구의 경우 계산 편의를 위해 풍속은 3.5m/s와 4.5m/s로 가정하여 진행한다.

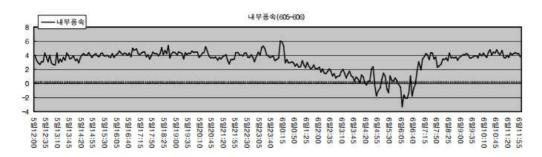


Fig. 5 Results of Wind Speed Measurement in Imgo4 Tunnel of Daegu-Pohang Expressway(2006)

#### 2.4.2 Karman Vortex Shedding 진동수

Karman Vortex Shedding 전동수 $N_{vs} = S_t \frac{V}{D}$ 는 원형단면의 현을 가정하면 Strouhal Number  $S_t$ =0.2이다.

터널 내 풍속 범위 3.5 m/s, 4.5 m/s 일반적인 송전선 단면 직경 D=0.011 m을 사용하며 (1)번식의 목표 진동수는  $\alpha=10.13 Hz$ ,  $\beta=13.02 Hz$ 로 선정한다.

현 공진을 위한 유속은 4m/s일 때의 Karman Vortex Shedding 진동수 11.58Hz로 선정한다.

#### 2.5 혐 설계

#### 2.5.1 현 재료 선정

현의 재료는 기본적으로, 반복되는 진동에 내구성이 좋으며 가볍고, 가격 또한 합리적이어야 한다. 초기 현설계 방향은 발전되는 전기를 송전하는 송전선과 유체에 의하여 진동하는 현을 독립적으로 구성하였으나 현 자체가 송전이 가능하도록 하는 것이 설계상 바람직하다고 판단하였다.

일반적으로 송전선의 재료로 알루미늄과 구리합금을 사용한다. 알루미늄은 가격 효율이 좋고 가벼우나 송전 효율이 좋지 못하고 구리합금의 경우 송전 효율은 좋으나 높은 밀도로 인해 과도한 이도(처짐)가 발생하는 단점이 존재한다.

본 연구에서는 터널 내 설치되는 시스템이므로 일반적인 경우와 비교하였을 때 요구되는 송전선의 길이가 일 반적 송전선과 비교하여 매우 짧은 점을 근거로 구리합금을 최종 현 재료로 선정하였다.

#### 2.5.2 현 지름

현의 지름은 일반적인 송전선 지름으로 사용되는 11mm를 채택하였다. 새로운 규격이 아닌 현재 활용되는 규격을 사용함으로써 추가적인 생산비용을 절약할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 2.5.3 고유진동수 설계

현의 1차 모드 고유 진동수는  $\omega_1=\frac{\pi}{l}\sqrt{\frac{T}{\rho}}$ 이다. 본 연구에서는 효과적인 발전을 위해 현의 고유 진동수와 유속에 의한 진동수가 일치시켜 공진현상을 유도하는 것이 목적이므로, 현의 고유 진동수는 터널 내 풍속  $4\mathrm{m/s}$  의한 진동수  $11.58\mathrm{Hz}$ 와 일치해야한다.

앞선 재료 선정을 통해 현의 단위 길이당 밀도는  $\rho$  =0.674kg/m, 현 자중에 의한 장력 T는 현의 길이 l에 비례한다. 이에 현 길이 l과 장력 T를 변경해가며 목표 진동수 11.58Hz에 맞춘다.

최종 현 길이 l = 3.4m일때 장력 T = 4154N가 되며 공진을 발생시킬 수 있는 현 설계가 이루어진다.

#### 2.6 Stockbridge Damper 파라미터 선정

#### 2.6.1 Stockbridge Damper

김찬중의 연구 $^{(3)}$ 에서 사용한 식 (2),(3),(4)를 통해 Stockbridge Damper의 고유 진동수를 계산할 수 있다. (1)식 목적함수가 가장 작은 값을 갖는 Storckbridge Damper의 Parameter 질량 m, 무게중심으로부터의 거리 l, 균형추 연결부위 위치에서의 질량관성 모멘트  $I_G$ , 균형추 연결부위까지의 거리 L 을 정한다. 구한 파라미터들을 토대로 Damper를 설계한다.

$$\lambda_{1,2} = \left(\frac{ml^2}{I_G + ml^2}\right)^{0.5} \left(\frac{h \pm a}{2m}\right)^{0.5} \tag{2}$$

$$h = 4k \left( 1 + \frac{I_G + ml^2}{ml^2} \right) + \frac{4kL^2}{3l^2} - \frac{4kL}{l}$$
(3)

$$a^{2} = h^{2} - \frac{16k^{2}L^{2}}{3l^{4}} \left( \frac{I_{G} + ml^{2}}{m} \right)$$
 (4)

위 설계 파라마터 선정을 위해 앞서 소개한 목적함수 계산이 필요하다. 우리의 경우 Matlab을 이용하여 목적함수 반복 계산을 진행하였다. 그 중 가장 적절한 파라미터들을 설계 치수로 결정하고 진행한다.

#### 2.6.2 Stockbridge Damper 강성

강성				
케이블 길이(m)	Young's M	odulus(Gpa)		
0.276	알루미늄	69		
지름(m)	주철	105		
0.0025				
2차 단면 모멘트				
0.0038		19.2891		

Fig. 6 Sheet for calculation of Stiffness

Damper의 강성은 Claren 등의 연구 $^{(4)}$ 의 식 $k=rac{3E_{m}J_{m}}{L^{3}}$ 을 그대로 활용하였다.

#### 2.6.3 Stockbridge Damper 최종 파라미터 결정

초기에 메신저 케이블 질량을  $2.45kg\sim4.55kg$ , 균형추 연결부위로부터 무게중심 G까지의 거리 l은  $0.011m\sim0.02m$ , 균형추의 질량 관성 모멘트  $I_G$ 는 0.015kg •  $m^2\sim0.023kg$  •  $m^2$ , 메신저 케이블 길이L은  $0.18m\sim0.49m$   $m,l,I_G,L$  각각을  $\pm30\%$  변경해가며 최적의 파라미터를 조사하였으나, 질량이 상당히 무겁기 때문에 현에 과도한 장력이 작용하게 되어 진동 발생에 방해요소가 된다고 판단하였다.

이에 질량의 범위를 최대 1kg으로 수정하여 재산정하였다.

우선 각각의 파라미터들을 통하여  $\lambda_{1,2}$ 를 계산한다.

참고문헌(3) 근거하여 목적함수 가중치 m은 두 개의 공진점의 기여도를 동일하게 하기 위해 2로 설정하고, 메 신저 길이에 대한 항목의 가중치 n 또한 동일하게 하기 위해 2로 설정한다.

따라서 목적함수
$$J_{ob}$$
는  $J_{ob}=\min_{l,I_G,L,l}\left[(\alpha-\lambda_1)^2+(\beta-\lambda_2)^{m-2}+\left(\frac{0.7L}{L}\right)^{n-2}\right]$ 으로 정리된다.

상기된 수식을 통해 각 파라미터별 목적함수를 구하게 되면 목적함수는

 $m = 0.45kg, l = 0.08m, I_G = 0.038kg \cdot m^2, L = 0.276m$ 인 경우에 최솟값 12.2774을 갖는다.

Table 1 Determined final parameters

L(m)	l(m)	m(kg)	$J(kgm^2)$	k(N/m)	d(m)	$J_{ob}$
0.276	0.08	0.45	0.0038	19.2891	0.0025	12.2774

#### 2.7 3D 모델링

#### 2.7.1 터널 내 설치시의 예상 간략도

대구-포항 고속도로 임고 4터널을 예시로 대표 직경 11.35m 및 차량 최대높이 3m, 여유 높이 1.5m에서 길이는 약 $\sqrt{5.675^2-4.5^2}=3.46m$  3.46 $m\times 2=6.92m$ 으로 2.5.3절에서 선정한 길이 3.4m 현 두 개가 설치될 것으로 예상된다.

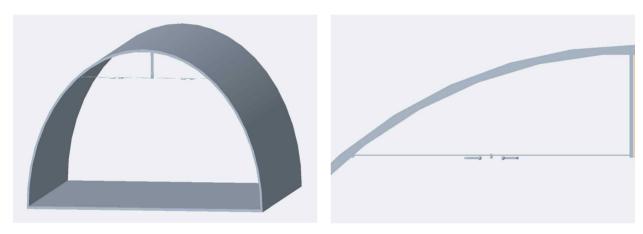


Fig. 7 Overview of Installation in Tunnels

Fig. 8 An enlarged photograph

Fig. 7~8 은 터널에 하베스팅 장치를 설치한 모습을 간략하게 모델링한 것이다. 이해를 돕기 위하여 현과 Stockbridge Damper의 크기를 과장하여 모델링하였기에 실측과는 설치 위치 등 다른 부분이 존재한다.

#### 2.7.2 Stockbridge Damper 모델링

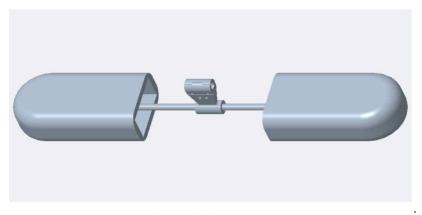


Fig. 9 An early model of Stockbridge Damper

Fig. 9은 가장 기본적인 형태의 Stockbridge Damper의 형상을 모사하여 모델링한 모습이다. 이 형상에서는 앞서 정한 설계 파라미터들을 모두 충족시키기 어려운 형상이다. 특히 형상의 무게중심이 중심과 근접해야하는 본 연구에 적합하지 않음을 알 수 있다. 따라서 다른 형태의 Damper의 설계가 필요하다.

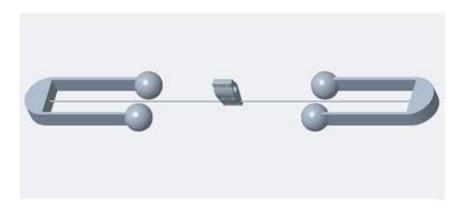


Fig. 10 The final model of Stockbridge Damper

Fig. 10은 최종 채택된 Stockbridge Damper의 형상이다. Fig. 10의 경우 추의 무게중심이 Damper 중심에 가까워야하는 우리의 경우를 충족할 수 있는 형상이다. Damper 형상의 끝부분에 구 형태의 형상을 추가함으로 앞서 결정한 Damper 파라미터를 충족할 수 있는 최종 형상이 모델링 되었다.

#### 2.8 발전 메커니즘 구현

#### 2.8.1 Piezoelectric 선정

Fig. 11과 같이 상하면의 인장 압축을 통해 발전하는 piezoelectric filament를 사용한다. 진동하는 Stockbridge Damper의 경우에는 직접적인 충돌이 어려운 구조이다. 따라서 직접적인 충돌 없이도 에너지 하베스팅이 가능한 piezoelectric filament를 사용하는 것이 적합한 판단일 것이다.

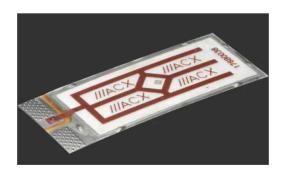


Fig. 11 Piezoelectric filament

#### 2.9 Ansys Workbench를 통한 진동특성 해석

앞서 진행된 과정의 많은 부분이 이상화, 단순화 된 계산이 이어졌다. 따라서 현실과 이질적인 부분이 많이 나타난다. 본 연구의 경우 와류 진동수, 현의 고유진동수를 일치시키고 김찬중 등<sup>(3)</sup>의 연구결과를 토대로 Damper 파라미터를 설계하였다. 하지만, 전체 시스템의 해석 결과가 이상화된 계산 결과인 만

큼 해석 결과와 큰 차이를 나타낸다. 설계 형상들은 앞서 수행한 결과를 모두 채용하였고, 전체 시스템의 고유진동수가 1.65Hz로 변하였다. 이에 따른 응답으로 연구를 진행한다. 분명 이 결과는 많은 오류를 가지고 있음을 인지하며 앞으로의 연구에서는 새로운 방식의 모델이 필요할 것으로 판단된다.

해석은 양단 고정된 현에 Lift, Drag에 의한 힘을 가하여 진행하였다. 여기서 공기의 밀도는  $\rho=1.225\,kg/m^3$ , 유속  $U=4\,m/s$ , 면적 $A=2d\times L=2(0.011\,m)(3.4m)=0.0374\,m^2$ 로 계산한다.

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho U^2 A = 0.0926 N$$
,  $D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A = 0.222264 N$ 

합력  $F = \sqrt{L^2 + D^2} = 0.2408N$ 으로 계산하여 해석 진행하였다.

공진을 통한 에너지 증폭을 측정하기 위해 Ansys Workbench를 통하여 Stockbridge Damper의 무게추 부착점의 변위를 측정하여 그래프로 나타냈다.

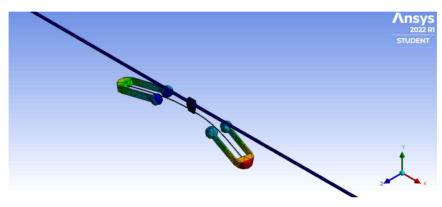


Fig. 12 Damper deformation figure

#### 2.9.1 공진에 의한 진폭 비교 (only y-direction)

#### Case - I 최종 공진 모델

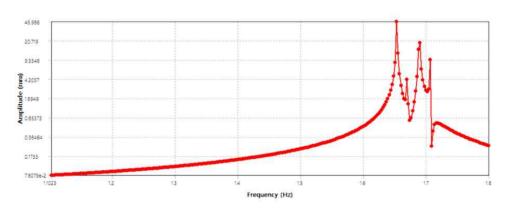


Fig. 13 y-direction deformation of the final vibration model

Fig. 13 은 최종 결정된 진동모델의 Ansys Workbench의 Harmonic response 해석 결과이다. 해당 모델의 고유 진동수는 1.65Hz이고 공진현상에 의하여 최대진폭 45.986mm로 진폭이 크게 증가하는 모양을 띈다.

해당 분석에서는 공진 유무 및 Stockbridge Damper의 파라미터 변화에 따른 에너지 차이를 비교하는데 의의를 둔다.

#### Case - II Cast-Iron Damper 모델

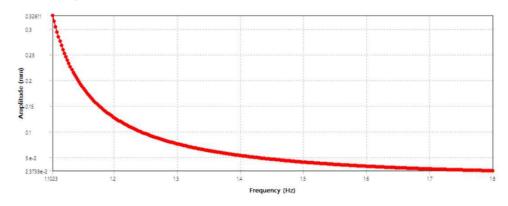


Fig. 14 y-direction deformation with cast-iron Stockbridge Damper

Fig. 14은 Stockbridge Damper의 재료를 주철로 변경하였을 때의 진동특성 해석 결과이다. Damper의 재료가 변경되면서 목적함수의 값이 변경되고 진동흡수에서 차이를 보인다.

#### Case - III Non-optimal Stockbridge Damper

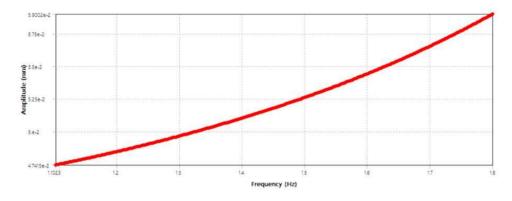


Fig. 15 y-direction deformation with non-optimal Stockbridge Damper

Fig. 15은 기존 케이블 길이 582mm에서 400mm로 축소함으로써 최적 파라미터를 만족하지 않았을 때의 변위 그래프를 나타낸 그림이다.

고유 진동수가 변화하면서 목표 진동수에서 진동흡수가 미미함을 알 수 있다.

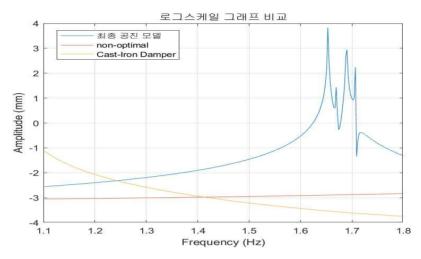


Fig. 16 Case I ~ III Comparison of Log-Scale Displacement Graphs

Fig. 16은 각 케이스 별 y방향 변위 그래프를 로그스케일 비교하는 그래프이다. 최종 공진 모델은 Case - II, III과 비교하여 모델링 상의 공진점 1.65Hz에서 큰 Amplitude를 보여준다. 해당 그래프를 통하여 공진현상과 최적 설계된 파라미터들을 통하여 에너지 증폭이 효과적으로 이루어 짐을 확인할 수 있었다.

#### 2.9.2 Stockbridge Damper의 변위 진폭

앞선 내용들은 여러 모델들의 단순 비교를 위해 y 방향의 변위만을 고려, 비교하였다. Stockbridge Damper의 진동은 y 방향 뿐 아니라 z 방향 또한 고려되어야 바람직하다.

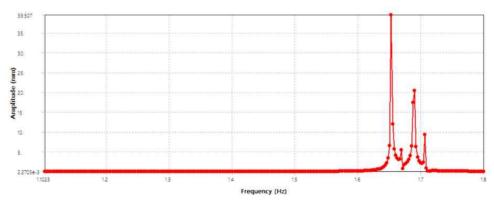


Fig. 17 z-direction deformation of the final vibration model

Fig. 17은 최종 공진 모델의 z방향 변위를 나타낸 그래프이다. 최대 변위 39.507mm로 나타났다. Damper의 진폭은  $A=\sqrt{A_y^2+A_z^2}$ 으로 계산되며,  $A=\sqrt{45.986^2+39.507^2}=60.626$ mm이다. 즉, 우리 설계의 최대 진동 진폭은 60.626mm로 발생한다.

#### 2.10 예상 발전량

#### 2.10.1 발전량

본 연구의 경우 앞선 해석의 결과를 바탕으로 앞으로의 계산을 진행한다. 압전소자의 발전량은 Yang등의 연구 $^{(7)}$ 결과를 통해 다음 식을 통해 한 주기당 발전되는 일의 양을 확인할 수 있다.

$$W = \int_{0}^{\frac{2\pi}{2\omega}} P_{\iota n} dt = \frac{\pi}{2} m \omega_{n}^{2} A X_{ap} \sin(\phi_{x})$$

m=0.45kg, k=19.2891N/m  $w_n=1.65Hz=10.367\,rad/s$ , 진폭 A=60.626mm,  $\phi_x$ 는 위상각이며 공진인 경우  $90\,^\circ$ 이다.  $X_{ap}$ 는 기저 가진 시스템의 진폭이며 다음과 같다. 본 상황에서 기저 진폭은 A이다.

$$X_{ap} = A \left( \frac{k^2 + c^2 w^2}{(k - mw^2)^2 + c^2 w^2} \right)^{1/2} = 0.0430m$$

따라서 본 연구의 한 주기당 발전되는 일의 양은  $W=0.1980\sin\phi_x J$ 이며, 모든 상황에서 공진이 일어나 최대 발전한다면, 0.1980J이 발전 됨을 알 수 있다. 주기당 발전량을 주기로 나누어 일률을 계산한다면  $P=0.4955\sin\phi_x$  W 만큼 발생함을 확인했다.

#### 2.10.2 압전소자 효율

압전소자의 효율은 Yang 등의 연구<sup>(7)</sup>를 통해 (5)식을 따름을 확인하였다.

$$\eta = \frac{k_p^2}{2\frac{\xi}{\alpha}\tilde{w}^2 + 2\xi\alpha + k_p^2} \tag{5}$$

Table. 2 Specifications of piezoelectric adopted

Piezoelectric specifications				
W (Width)	23.44mm	e	$-12.73 \ \text{C/m}^2$	
L	55.4mm	$C_p$	$100 \cdot 10^{-9} F$	
$t_p$	0.267mm	R	15700 Ω	

앞서 선정한 압전소자의 스펙은 Table 2와 같다.

압전소자 효율 계산에 필요한 parameter들은 Yang 등 $^{(7)}$ 의 연구결과와 Shafer 등 $^{(8)}$ 의 연구결과에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \left( natural \ frequency \right) \ \ , \ \ \tilde{w} = \frac{w}{w_n} = 1 (resonance)$$

$$\begin{split} \xi &= \frac{c}{2mw_n} \left( damping \ ratio \right) \ , \ \frac{\alpha}{\tilde{w}} = \frac{1}{RC_pw} (resistance \ ratio) \\ k_e &= \frac{2t_p}{t} \left( the \ piezoelectric \ material's \ thickness \ ratio \right) \\ \Theta^2 &= \ W^2 t^2 e^2 (-1k_e)^2 \left( \frac{3}{2L} \right)^2 \left( coupling \ factor \right) , \\ k_p^2 &= \frac{\Theta^2}{kC_p} (coupling \ coefficient) \end{split}$$

본 연구에서는 각 parameter의 값들은 다음과 같다.

$$\begin{split} w_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} = 6.5471 \,, \quad \xi = \frac{c}{2mw_n} = 0.1697 \,, \quad \alpha = \frac{1}{RC_pw_n} = 61.4379 \\ \Theta^2 &= W^2t^2e^2(-1k_e)^2\bigg(\frac{3}{2L}\bigg)^2 = 5.5247 \times 10^{-5} \,, \quad k_e = 0.1780 \\ k_p^2 &= \frac{\Theta^2}{kC_p} = 28.6417 \end{split}$$

따라서, 본 연구의 경우 압전소자 효율 
$$\eta=\dfrac{k_p^2}{2\dfrac{\xi}{\alpha}\widetilde{w}^2+2\xi\alpha+k_p^2}=0.2261~(22.61\%)$$
으로 계산된다.

#### 2.10.3 최종 발전량

2.10.1의 발전량, 2.10.2의 압전소자 발전효율을 고려하면

 $P = (0.2261)(0.4955)\sin\phi_x = 0.11203\sin\phi_x$ W이다.

위상각  $\phi_x$ 에 따라 발전량이 크게 변화하며 공진일 때  $\phi_x=90\degree \Rightarrow \sin\phi_x=1$  을 만족하며 최대 발전량은  $P=0.11203\,W$ 이 된다.

본 연구의 경우 터널풍이 존재하는 시간동안에는 지속적으로 발전가능하다. Fig. 4를 통해 6시간을 제외하고 약 18시간동안 지속적으로 유동이 존재한다. 따라서 일일 발전 가능 시간을 18시간 일 것이다. 위의 조건으로 연간발전량을 산출하게 되면 0.45kg의 질량체 하나 당 2.6MWh가 발전될 것으로 예상된다.

하지만 해당 결과는 발전가능시간 18시간동안 끊임없이 공진현상이 발생해야하는 조건이므로 현실성이 떨어지며 실제 발전량은 낮을 것이다. 다만 하나의 Stockbridge Damper의 질량체가 두 개, 전체 시스템의 사이즈가 현이므로 길이 3.4m이고 폭이 매우 좁아 작은 공간에 여러 하베스팅 시스템을 설치할 수 있으므로 의미가 크다.

#### 2.11 경제성 분석

본 연구의 최종 설계에 필요로 하는 재료들은 3.4m의 구리 합금 전선, 약 1kg 인 Stockbridge Damper의 알루미늄 합금이다.

구리 합금 전선의 경우 코리아테크케이블의 직경 11mm인 F-CV 1.5SQ 2C 제품을 기준으로 1m당 1,180 원에 판매되고 있다. 3.4m의 케이블의 경우 약 4,000원이다.



Fig. 18 Power cable price

알루미늄 합금은 2022년 9월 9일 런던금속거래소 가격 기준으로 1톤당 1,760달러이다. 즉 1kg 당 약 1.76달러, 2,500원 정도이다. 또한 알루미늄 합금의 주조 비용이 추가로 들어갈 것이다.

# 알루미늄 합금 현물(USD/TONNE) > 1,760.00 - 0.00 (0.00%)



Fig. 19 Aluminium alloy price

최종적으로 1세트의 하베스팅 시스템을 제작하기 위해 약 6,500 + α원이 필요할 것으로 예상된다.

초기 설치비용이 3억원이 필요한 소형 풍력 발전기에 비해 초기 비용이 매우 저렴하다. 따라서 본 연구는 기존의 발전 방식에 비해 매우 저렴한 초기비용과 단순한 구조로 경제성이 우수할 것이다.

#### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 발전 원리 및 흐름

#### 3.1.1 발전 원리

인장과 압축의 반복으로 에너지를 하베스팅 가능한 압전소자를 이용한다. 지속적이며 큰 에너지가 발생 가능하도록 꾸준한 유동이 있는 장소에 공진을 활용하여 진동을 발생시킨다. 공진의 발생으로 에너지는 증폭되고 압전소자를 통해 효과적으로 수집된다.

#### 3.1.2 발전 흐름

첫째. 와류진동으로 터널 내부에 설치된 현이 진동한다.

둘째. 현의 고유진동수와 와류진동수를 일치시켜 공진을 발생시킨다.

셋째. 공진으로 증폭된 에너지를 Stockbridge Damper가 효과적으로 흡수한다.

넷째. 흡수된 에너지를 Damper에 장착된 압전소자를 이용하여 하베스팅 한다.

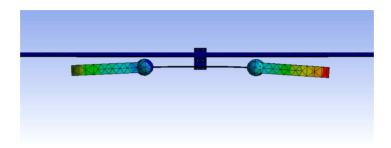


Fig. 20 y-direction deformation of Stockbridge Damper

#### 3.2 설계 의의

#### 3.2.1 실현 가능성

현재 본 연구에서 설계한 시스템의 경우, 4m/s의 풍속을 기준으로 파라미터를 선정하여 설계하였다. 이 경우 메신저 케이블의 직격이 2.5mm로 매우 작다.이 때문에 케이블의 강성은 낮아지고, 시스템의 실현 가능성이 낮은 것으로 예상된다.

시스템의 수명을 늘리고 내구성을 높이기 위해 메신저 케이블의 강성을 증가시킬 필요가 있다. 메신저 케이블의 강성은 직경이 증가할수록 커지며 시스템의 고유진동수도 함께 증가한다. 공진을 활용한 발전 이기 때문에, 높아진 고유진동수에 맞춰 공진이 이뤄지기 위해서는 더 빠른 풍속이 필요하다는 결론에 도달한다. 다시 말해, 메신저 케이블의 직경을 증가시켜 강성과 내구성, 수명을 확보한 경우, 더 빠른 속도의 유동이 필요하며 이 경우 실현 가능성이 더 높아질 것으로 예상된다.



Fig. 21 3D printed Stockbridge Damper

#### 3.2.2 장단점

본 연구에서 설계한 시스템의 경우 터널 상단에 설치된 기존의 제트팬식 발전 환기 시스템에 비해 상당히 저렴한 가격으로 제작가능하다. 또한 작은 크기와 단순한 구조에서 비롯된 쉬운 유지 보수가 가능하다. 기존의 시스템과 비교했을 때, 같은 공간 내에 더 많이 설치할 수가 있어 더 많은 전기를 생산할수 있을 것으로 예상된다. 마지막으로 공진을 활용한다는 점에서 적은 에너지를 증폭하여 큰 에너지를 하베스팅 할 수 있다.

그러나 기존의 시스템의 기능 중, "터널 내 공기 순환 및 배기" 기능을 구현할 수 없다. 따라서 추가적인 장비를 설치하거나 구조물을 제작할 필요가 있다. 또한, 각각의 발전기는 하나의 풍속을 기준으로 설계되었기 때문에, 풍속이 바뀔 경우 공진이 발생하지 않고, 풍속에 맞춰 다양한 크기와 길이의 발전기를 제작해야한다. 하지만, 발전기 제작 비용이 저렴하기 때문에 다양한 크기와 길이의 발전기를 저렴한 가격에 제작할 수 있기 때문에 다양한 유속에서도 사용할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구의 목표는 효과적인 에너지 하베스팅 시스템 개발이다. 본 연구의 차별성은 다음과 같다.

- 1. 기존의 경우 꺼려지는 상황인 공진을 적극 이용하여 더욱 증대된 에너지를 발전할 수 있다는 점이다.
- 2. 유동이 있는 거의 모든 장소에서 저렴한 가격으로 설치, 발전이 가능하다는 점이다.

물론 본 연구의 분명한 오류가 존재함을 인지한다. 하지만, 앞으로 진행될 연구에서 밝혀진 오류를 충분히 개선한다면 새로운 에너지원으로 충분히 사용할 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구를 진행함에 도움을 주신 정철웅 교수님에게 감사 말씀 드립니다. 본 연구를 진행할 기회를 만들어 주신 대한기계학회에 감사 말씀 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) https://www.mk.co.kr/news/business/view/2016/05/331814/
- (2) 이창우, 박홍채, 2009, 터널형 지하공간내의 자연환기력 분석, 터널과 지하공간, 제19권 제3호, pp. 226~235
- (3) Chan-Jung Kim. 2016. "Determination of Design Parameters of Stockbridge Damper." *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* 26(7): 814–19. https://doi.org/10.5050/KSNVE.2016.26.7.814 (May 24, 2022).
- (4) Claren, R. and Diana, G., 1969, Mathematical Analysis of Transmission Line Vibration, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-88, No. 2, pp. 1741~1771.
- (5) Phillip M. Gerhart, Andrew L. Gerhart, John I. Hochstein, 2018, Munson's Fluid Mechanics, SI Version 8th Edition
- (6)https://piezo.com/collections/piezoelectric-actuators-motors/products/piezoelectric-bending-transducer-s118-j1ss-18 08b
- (7) Yang, Zhengbao, Alper Erturk, and Jean Zu. 2017. "On the Efficiency of Piezoelectric Energy Harvesters." *Extreme Mechanics Letters* 15: 26–37.
- (8) Shafer, Michael W, Matthew Bryant, and Ephrahim Garcia. 2012. "Designing Maximum Power Output into Piezoelectric Energy Harvesters." *Smart Materials and Structures* 21(8): 085008. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/21/8/085008.