

## 선박용 전자식 수평진동감쇠장치의 진동감쇠제어

양현숙<sup>1</sup> · 윤경국<sup>2</sup> · 김윤식<sup>1</sup> · 서동환<sup>1</sup> · 김성환<sup>3</sup> · 권영괄<sup>4</sup> · 이성근<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2010년 8월 25일, 원고수정일 : 2010년 10월 6일, 심사완료일 : 2010년 10월 15일)

### Vibration Reduction Control of Marine Electronic Horizontal Balancer

Hyun-Suk Yang<sup>1</sup> · Kyoung-Kuk Yoon<sup>2</sup> · Yoon-Sik Kim<sup>1</sup> · Dong-Hoan Seo<sup>1</sup> ·  
Sung-Hwan Kim<sup>3</sup> · Yeong-Gwal Kwon<sup>4</sup> · Sung-Geun Lee<sup>†</sup>

**요약** : 본 논문은 수평진동감쇠기를 제작하여 수평진동의 감쇠실험을 통해 선박에 적용될 수 있는 가능성을 확인한다. 시뮬레이션 툴은 매트랩을 사용하며, 실험장비는 축에 캠형의 불평형부하를 장착한 두 대의 유도전동기와 DSP 그리고 인버터 부로 구성된다. 유도전동기는 가진기와 감쇠기의 역할을 하고, DSP보드는 속도와 위상 및 벡터제어 등의 소프트웨어를 제어한다. 감쇠기의 속도와 위상각을 제어한 결과 가진기에서 발생한 수평진동의 감쇠가 양호함을 확인하였다.

**주제어** : 수평진동감쇠기, 가진기, 벡터제어

**Abstract**: In this paper, We make horizontal balancer (HB) and confirm a possibility of the technique that can be applied to ship through horizontal vibration reduction experiment. We use MATLAB as the simulator tool and experimental equipment consists of two induction motors shafts of which cam type unbalanced loads are fixed to, DSP and inverter circuit. Two induction motors perform roles as vibrator and balancer respectively, DSP control softwares such as speed, phase and vector control program. The simulation and experimental results show that the balancer characterizes good vibration reduction by phase control.

**Key words**: Horizontal balancer (HB), Vibrator, Vector control

## 1. 서 론

진동은 인간에게 생리적 장애와 심리적 불쾌감을 주고, 쾌적한 생활환경을 파괴할 뿐만 아니라 기계자체의 수명과 건축구조물 수명에 나쁜 영향을 준다.

선박의 진동은 프로펠러, 디젤기관의 왕복동 기구, 추진축계 등의 운동에 의해 발생되거나 주기적인 파랑에 의해서도 발생된다. 프로펠러에 의한 기진력의 진동수는 회전진동수와 같거나 날개진동수

또는 그의 정수배와 같고, 디젤기관의 왕복동 기구에 의하여 불평형력이 발생하며 크랭크 축의 회전진동수와 같은 1차를 비롯하여 2, 3, 4, 6차 등의 고차 기진 진동수가 발생하는 데 기진력의 크기는 1차가 가장 크다.

선박의 진동은 기진원이 위와 같이 복잡 다양하기 때문에 진동이 없는 선박을 건조한다는 것은 거의 불가능하다. 선체진동은 그 형태와 방향에 따라 선체 굽힘진동, 선체 비틀림 진동, 선체 중진동으

<sup>†</sup> 교신저자(한국해양대학교 전기전자공학부, E-mail:sglee48@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4821)

1 한국해양대학교 전기전자공학부

2 헬스스트립한국연락사무소 근무

3 한국해양대학교 선박전자기계공학부

4 (주)펜타텍

로 분류되고, 선체 굽힘진동의 하나인 선체 상하진동은 선체가 중립축을 기준으로 하여 상하로 굽는 진동이며, 선체 수평진동은 선체가 중심선을 기준으로 하여 좌우로 굽는 진동을 하는 것이다. 또한, 선체 비틀림 진동은 수평방향의 기진력으로 인하여 선체 단면이 좌우로 회전하는 것으로서, 왕복동 기관의 우력에 의해 기관 전체에 비틀림 모멘트로 작용하는 진동이다[1-2].

선박진동을 감쇠시키는 방법으로는 기진력의 진동수를 변화시켜 공진을 회피하거나, 프로펠러와 선체사이의 틈이나 선미형상 및 축계 베어링 위치 등의 변경과 구조보강에 의한 고유진동수 변화, 기진력의 발생부와 선체사이에 감쇠장치를 설치하는 방법 등이 있으나, 이 중에서 감쇠장치(Balancer)를 이용하는 방법을 많이 사용하고 있다. 선박진동의 감쇠장치는 유체식 동흡진기, 기계식 동흡진기, 점성유체 교반형 동흡진기와 전기식진동감쇠 등이 있다.

전자식감쇠장치로는 (주)펜타텍에서 개발된 수직진동형 제품이 현재 선박에 많이 적용되고 있으며, 수평형도 개발이 진행되고 있다.

전기식은 속도제어기나 위상제어기에서 자동추적이나 수동조작으로 선체진동의 저감효과를 유지할 수 있으나, 제어기의 속도제어를 브레이크의 마찰력을 이용하기 때문에 주기적인 부품교체 뿐 아니라 위상추종 특성이 매우 느리므로 위상추종 특성과 가격경쟁력이 우수한 전자식감쇠장치의 개발이 필요하다.

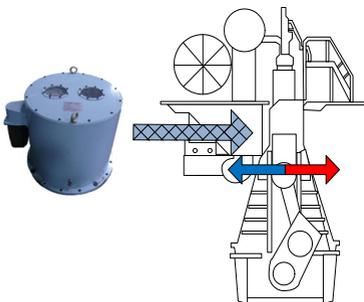


Figure 1: Horizontal vibration of a marine engine

본 논문에서는 Figure 1과 같이 왕복동 기관의 우력에 의해 기관 전체에 비틀림 모멘트로 작용하

는 수평진동을 감쇠시키기 위하여 DSP를 이용한 고속의 위상제어가 가능한 전자식 수평진동감쇠기를 제작하여 모의실험을 통해 선박에 적용될 수 있는 가능성을 확인하고자 한다.

## 2. 시스템 구성

### 2.1 왕복동 기관의 불평형력

#### 2.1.1 왕복동 기관의 진동발생

Figure 2는 단일 실린더기관의 불평형력과 그 우력의 발생과정을 이해하기 위한 그림이다.

Figure 2에서  $x$ 축상의 A점에 힘 P가 작용하면 P는 연접봉에 미치는 힘 Q와 피스톤의 축압 R로 분해되고 Q는 연접봉을 거쳐 B에 작용한다. 지금 베어링 O에서 Q에 평행하고 방향이 반대의 두 힘 Q, -Q가 작용한다고 할 때, B점의 Q와 O점의 -Q를 조합하면 모멘트 Qd를 갖는 우력을 형성하므로 B점의 Q의 작용은 베어링 O둘레의 회전모멘트 Qd와 O를 미는힘 Q로 나눌 수 있다. 이 Q를 P와 -R로 분해하면 -R과 A점의 R은 또한 하나의 우력이 되고 그의 모멘트는 Rh로 되어 기관 전체를 넘어뜨리려 한다.

또한 힘 P는  $Ox$  방향으로 미는 가스압력과 왕복질량에 의한 관성압력의 합으로 나타내고, 이 힘은 연접봉을 거쳐서 크랭크에 Qd의 회전모멘트를 주는 동시에 베어링 O를 P로 밀고 또한 Qd의 반작용으로 Rh의 모멘트를 기관에 미치게 된다. 이와 같은 왕복질량에 의한 관성력으로 인해 크랭크 1회전마다 상하수직방향의 충격력을 받고 심한 진동을 발생하게 된다.

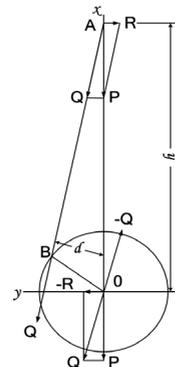
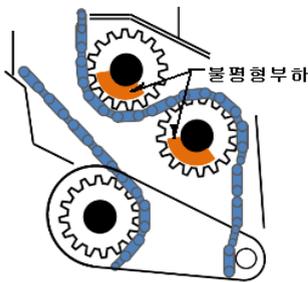


Figure 2: Unbalanced load of reciprocating engine

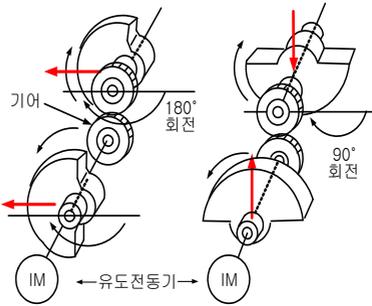
한편, 왕복동기관의 연결봉은 피스톤과 함께 왕복운동하는 질량과 크랭크핀과 함께 회전운동하는 질량으로 구분되고, 이들 질량에 의해 왕복질량에 의한 관성력과 회전질량에 의한 관성력이 발생되며, 이들의 주기적인 힘은 베어링을 거쳐서 기관의 기초에 전달되어 진동을 발생시킨다. 관성력 성분은 연결봉의 회전각 위치  $\theta$ 에 따라 여러 성분으로 발생되고, 그 중에서 연결봉과 직각성분은 연결봉에 굽힘 작용을 일으켜 횡진동으로 이어져 위험한 상황을 초래하게 된다[1-2].

2.1.2 왕복동 기관의 진동감쇠 원리

Figure 3은 캠형의 불평형부하가 부착된 진동감쇠기의 불평형부하의 회전위치에 따라 기진원의 진동위상을 억제할 수 있는 장치들이다.



(a) Mechanical balancer



(b) Electric balancer

Figure 3: Principle of vibration reduction

Figure 3(a)는 선박엔진에서 발생하는 진동성분을 감쇠시키기 위하여 엔진의 축계와 연동하여 사용하고 있는 캠형의 기계식 진동감쇠기를 보여주고 있다. 진동의 폭 크기는 불평형부하의 크기로

조정하고 진동의 위치는 불평형부하의 회전위치로 조정한다. Figure 3(b)는 불평형부하의 회전위치에 따라 진동이 발생하는 원리를 보여주고 있는 것으로 불평형부하를 기어를 통해 연결하여 수평력이 발생되도록 하고, 유도전동기 제어프로그램에 의해 불평형부하의 회전위치가 선박진동의 위치를 추종하도록 한다. 이러한 방식은 전기식 또는 전자식진동감쇠기에서 이용하는 방식이다.

앞으로는 전자식 추진 장치가 부착된 선박이 출현함에 따라 대다수의 감쇠장치는 전자식으로 교체될 것으로 전망된다.

2.2 진동억제시스템 구성

Figure 4는 본 연구에서 수평진동을 상쇄하기 위하여 사용한 모의 실험장치의 원리를 설명하기 위한 그림이다.

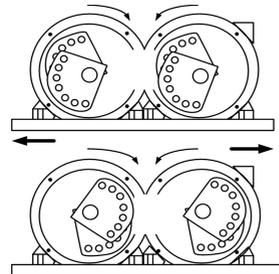


Figure 4: Principle of HB system

Figure 3(b)의 동작원리를 적용한 것이며, 위의 장치는 진동을 일으키는 가진기용이고, 아래의 장치는 진동을 억제하기 위한 진동감쇠기이다.

가진기와 진동감쇠기 모두 두 개의 불평형부하로서 하나는 유도전동기의 축에 장착되어 있고, 다른 쪽은 기어로 맞물려 회전하고 있으므로 상하의 힘은 상쇄되어 수평력을 발생하게 된다. 따라서 가진기와 감쇠기의 수평력은 서로 상쇄될 수 있으며, 전자식감쇠기에서는 가진기의 최대진동이 일어나는 위치를 검출하여 감쇠기의 역 최대위상을 일치시키는 속응성이 진동억제 제어에 가장 중요한 관건이 된다. 유도전동기의 속도제어를 위하여 벡터 제어를 적용하고, 속응성을 고려한 위상제어를 위하여 DSP를 사용한다.

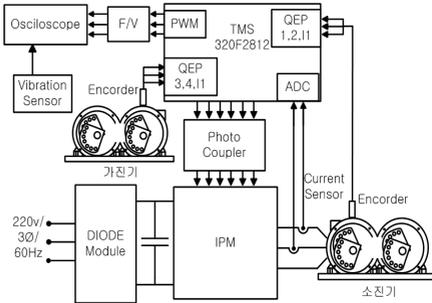


Figure 5: Control diagram of HB

Figure 5는 수평진동 감쇠장치의 제어블록도이다. 시스템은 전원부, 인버터부, 제어부로 이루어져 있고, 인버터부는 IGBT 모듈인 IPM (PS21867-AP 제조사 MITSUBISHI)으로 구성되어 있으며, 제어부는 데이터 연산 및 게이트 펄스 발생을 위하여 32비트 고속연산이 가능한 DSP 및 EPLD와 피드백 변수를 받기 위한 컨버터부로 이루어져 있다.

가진기에서 발생하는 속도와 위상을 기준으로, 속도제어기는 엔코더와 전류센서를 이용하여 공간 벡터제어를 수행하고, 진동억제를 위한 위상제어기 (Phase Controller)에서 가진기와 감쇠기의 엔코더들로부터 얻은 위상각 정보를 이용하여 서로 역위상이 되도록 제어한다[3-5].

### 3. 실험 및 결과고찰

#### 3.1 시뮬레이션

Figure 6은 위상제어 시뮬레이션 블록도이다.

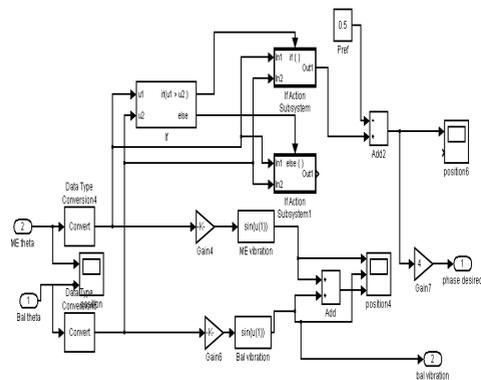


Figure 6: Block diagram of phase controller

시뮬레이션 틀은 MATLAB을 사용하였다. 가진기 역할을 하는 주 엔진, 위상제어기, 속도제어기, 감쇠기로 구성되고, 주 엔진과 감쇠기는 유도전동기 모듈로 이루어져 있고, 두 장치 모두 속도와 위상각 정보를 받아 속도제어기에서 비교하며, 비교된 결과에 따라 PWM 펄스를 출력하여 감쇠기를 제어하게 된다.

위상제어기는 주 엔진과 감쇠기로부터 위상각을 입력받아 이를 비교하여 출력된 값에 따라 감쇠기의 속도를 변화시켜 목표위상에 추종되도록 한다. 시뮬레이션의 위상각은 유도전동기 모듈에서 360°를 1pu로 한다. 또한 위상각이 180°(0.5pu)차이가 날 때 진동이 역위상이 되므로 위상목표치 (Pref)를 0.5pu로 설정하였다.

Figure 7은 역위상 제어 알고리즘을 추가한 경우의 파형이다. 진동이 매우 감쇠됨(맨 아래 파형)을 볼 수 있다.

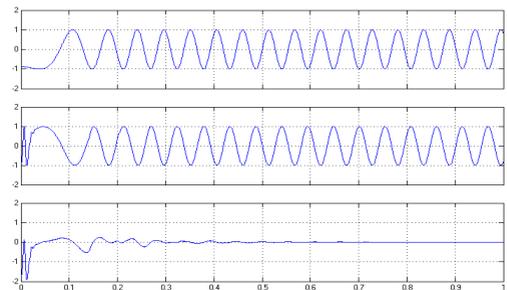


Figure 7: Simulation result of phase control

#### 3.2 실험 결과

Figure 8은 가진기와 감쇠기로 구성된 실험장치로서 각각은 불평형 부하를 장착하고 있으며 부하량의 조정은 캠 각도로 조정하며, 수평력을 발생하기 위해 불평형부하는 서로 기어에 의해 맞물려서 회전한다.

감쇠기의 속도 및 위상제어용 유도전동기 (1/10hp, 전압 220V)를 제어하기 위하여 TMS320F2812 CPU로 구성된 DSP와 인버터 회로, 속도 및 위상에 대한 정보를 실시간으로 수신 받고 프로그램의 디버깅을 수행하기 위하여 컴퓨터와 통신프로그램을 사용하고 있다[6-7].

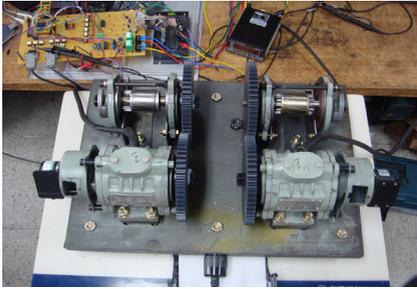
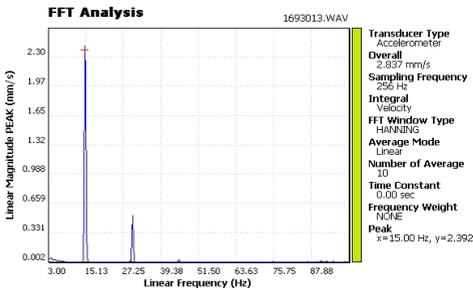
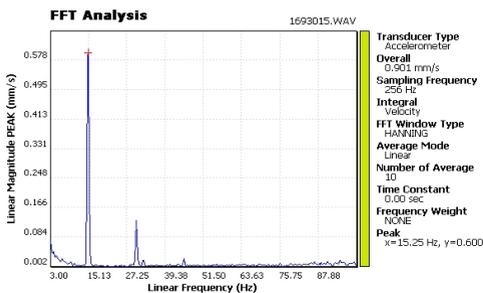


Figure 8: Experimental equipments

Figure 9와 Figure 10은 각각 900rpm과 1200rpm에서 에스브이(주)의 진동계측장비 RealWave Pocket Analyzer를 사용하여 진동의 FFT를 분석한 파형이다. 그림(a)는 감쇠기는 동작하지 않고 가진기만 작동할 때의 진동파형이며, 그림(b)는 감쇠기가 가진기의 진동과 역위상으로 작동할 때의 진동파형이다. 가진기와 감쇠기 모두 진동의 최대점에 엔코더의 Z상을 맞추는 것은 프로그램 제어를 수행하면서 최대점이 되었을 때 유도진동기 축을 조정하였다.



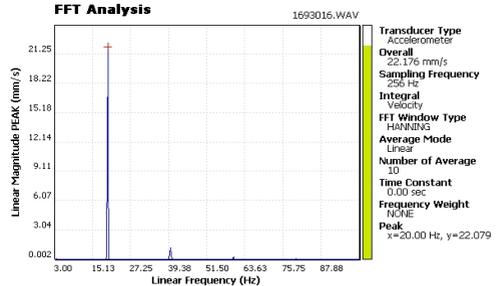
(a) Without balancer



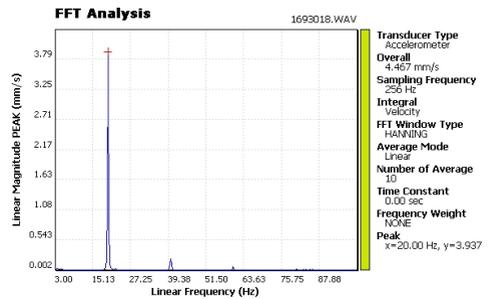
(b) With balancer

Figure 9: Vibration FFT waveform (900rpm)

진동은 900rpm에서 2.392 mm/s에서 0.5 mm/s로 80% 감소하였고, 1200rpm에서는 22.079 mm/s에서 3.937 mm/s로 82% 감소하였으며, 회전속도가 증가함에 따라 감소율이 다소 커지는 것을 알 수 있다. 이는 고속의 프로세서와 제어기술을 적용하면 진동감쇠기의 크기를 상대적으로 줄일 수 있음을 의미한다.



(a) Without balancer



(b) With balancer

Figure 10: Vibration FFT waveform (1200rpm)

#### 4. 결 론

본 논문에서는 선박기관에서 발생하는 수평진동의 억제를 위하여 모의 실험장치를 시제작하였고, 가진기로부터 발생하는 진동을 억제하기 위하여 전자식감쇠기의 진동위상과 속도를 제어하였다.

고속의 위상제어와 속도제어를 위하여 TMS320F2812 마이크로프로세서를 이용하였으며, 실험결과 가진기의 속도변동에도 감쇠기의 속도와 위상제어가 잘 수행되었고, 80% 이상의 진동감쇠를 확인하였으며, 고속의 프로세서 사용에 따라서 고차의 진동감쇠기를 제작할 수 있음을 확인하였으며, 향후 선박엔진의 수평진동의 억제에 유

용할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- [1] 김영주, "디젤 주기관들의 불평형력으로 인한 선체 진동 저감 대책", 한국박용기관학회지, 제13권, 제1호, 1989.
- [2] 전효중, 김의간, 기계역학, 효성출판사, 1999.
- [3] 이성근, "상태관측기를 이용한 유도전동기의 속도 제어 특성개선에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원, 공학박사학위논문, 1998.
- [4] 강철구, 현대제어공학, 사이텍 미디어.
- [5] 양현숙, 김건우, 임현정, 백영진, 이성근, 김윤식, "불평형부하 구동용 유도전동기 속도제어", 2006년도 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, 2006.
- [6] 백종철, TMS320F28X CPU 핸드북, 도서출판 싱크웍스, 2006.
- [7] 백종철, TMS320C24계열을 이용한 DSP 하드웨어 설계, 도서출판 싱크웍스, 2005.

## 저 자 소 개



### 양현숙(梁鉉淑)

2005년 한국해양대학교 전기전자공학부(공학사), 2007년 동 대학원(공학석사), 2005년 - 2008년 (주)펜타텍(연구원), 2007 - 현재 한국해양대학교 전기전자공학부(공학박사수료)



### 윤경국(尹璟國)

1993년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1997년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사), 2010년 한국해양대학교 기관시스템공학과 졸업(박사), 2002-현재 헬스스트림한국연락사무소 근무



### 김윤식(金潤植)

1977년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1979년 동 대학원 졸업(석사), 1986년 동경공업대학 대학원 졸업(석사), 1989년 동경공업대학 대학원 졸업(박사), 1978년 5월-현재 한국해양대학교 전기전자공학부 교수



### 서동환(金潤植)

1996년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1999년 동 대학원 졸업(석사), 2003년 동 대학원 졸업(박사), 2004년 3월-현재 한국해양대학교 전기전자공학부 교수



### 김성환(김성환)

1979년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1990년 부경대학교 대학원 졸업(석사), 1998년 부산대학교 대학원 졸업(박사), 현재 한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수



### 권영팔(權寧佶)

1983년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 2006년 동 대학원 졸업(석사), 1983년 - 1987년 범양상선주식회사, 1987년 - 2000년 오양공조기 부장, 2000년 3월 - 현재 (주)펜타텍 대표이사.



### 이성근(李成根)

1983년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1990년 동 대학원 졸업(석사), 1998년 동 대학원 졸업(박사), 1992년 3월 - 1998년 8월 대덕대학 제어계측과 조교수, 1998년 9월-현재 한국해양대학교 전기전자공학부 교수