

선박 상부구조 진동 저감을 위한 능동형 제어장치의 실용화 연구

조대승^{†*}, 최태목^{*}, 김진형^{*}, 정성윤^{**},
백광렬^{**}, 이수목^{***}, 배종국^{***}, 이장우^{***}

부산대학교 조선해양공학과^{*}
부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부^{**}
현대중공업 선박해양연구소^{***}

A Study on the Practical Use of an Active Control System to Reduce Ship Superstructure Vibration

Dae-Seung Cho^{†*}, Tae-Muk Choi^{*}, Jin-Hyeong Kim^{*}, Sung-Yun Jung^{**},
Kwang-Ryul Baek^{**}, Soo-Mok Lee^{***}, Jong-Gug Bae^{***} and Jang-Woo Lee^{***}

Dept. of Naval Architecture and Ocean Eng., Pusan National University^{*}
School of Electrical and Computer Eng., Pusan National University^{**}
Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industry Co., Ltd.^{***}

Abstract

Active control is regarded as one of the most efficient and economic countermeasures to reduce excessive vibration of ship superstructure. However, it is difficult to find its practical application in real ships in spite that many studies on such systems have been done.

In this study, for the practical use of an active control system to reduce ship superstructure vibration, we have developed an active vibration compensator consisting of a mechanical actuator having compact size and expected lifetime over 20 years, its control panel including exclusive signal processing and computing board, sensors to detect phase and vibration, and its operation software providing various user-interface functions.

From the performance verification test of the system at a 5,500 TEU container carrier, we have confirmed the system could reduce ship superstructure vibration of a harmonic component of main engine rotating frequency up to 0.1 mm/s.

※Keywords: Ship superstructure vibration(선박 상부구조 진동), Active control(능동제어), Mechanical actuator(기계식 구동기), DSP board(이산신호처리기), Instant phase(순간위상)

접수일: 2004년 5월 18일, 승인일: 2004년 6월 28일

†주저자, E-mail: daecho@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2482

1. 서론

최근 대형 상선의 자동화, 경량화 및 고속화로 인해 선박 상부 구조의 강성은 상대적으로 저하된 반면에 기진력은 증가하여 설계 단계에서의 방진 대책 적용에도 불구하고 건조 후 허용치를 초과하는 상부구조 진동이 발생할 가능성이 매우 높아졌다. 또한, 선박 건조 후 발견된 상부구조의 과도한 진동은 구조 보강과 같은 종래의 방법으로 저감시키기에는 많은 시간과 비용이 요구될 뿐만 아니라 비용 대비 그 효과도 만족스럽지 못한 경우가 많다.

한편, 선박 건조 후 발견된 허용치를 초과하는 상부구조 진동을 적은 시간과 비용으로 효율적으로 저감할 수 있는 진동 제어 장치 개발에 관한 연구가 1980년대 후반 이후 국내외에서 수행되어 왔다. 이와 같은 연구의 대표적 사례로서는 원심 진자식 동흡진기(Yosida 1989)와 유압식 능동형 동흡진기(Takeda et al. 1992, 정태영 등 1996) 및 불평형 중추식 구동기를 이용한 단일 주파수 성분의 선박 상부구조 진동제어장치(조대승 등 1995) 등이 있다. 상기 장치들은 실선 상부구조 진동 제어에 효과가 있음을 실험적으로 확인되었으나, 실제 운항중인 선박에 장착하기에는 설치성과 내구성 또는 제어알고리즘 등의 보완이 필요하여 현재까지 적화 상태에 따라 변화하는 상부구조 동특성을 고려한 능동 진동제어장치의 실용화 사례는 찾아보기 어렵다.

이에 본 연구에서는 조대승 등(1995, 1998(b))의 연구 결과를 실용화하기 위하여 기 개발 시스템보다 상대적으로 크기가 작으면서도 내구성과 유지보수 성능이 뛰어난 기계식 구동기와 진동 제어 알고리즘 구현에 필요한 신호 입출력과 고속 연산 기능 및 사용자 인터페이스 기능을 갖는 전용 DSP board를 개발하였다. 또한, 상기 board를 이용하여 다양한 구동기 제어 기능과 함께 성능 모니터링과 시스템 유지보수를 효율적으로 수행할 수 있는 제어프로그램을 탑재한 전용 제어반을 개발하였다. 개발된 시스템의 성능과 실용성은 상업 운항중인 5,500 TEU 컨테이너 운반선의 상부구조 종진동 제어 시험을 실시하여 확인하였다.

2. 상부구조 진동 능동제어시스템의 구성

본 연구에서 개발한 주기관 회전수의 특정 조화 성분 선박 상부구조 진동의 능동 제어시스템은 Fig. 1에 보인 바와 같이 제어력을 발생시키는 구동기와 제어알고리즘 연산 및 구동기 동작을 위한 제어반 및 이에 필요한 신호를 취득하기 위한 센서부로 구성되어 있다.

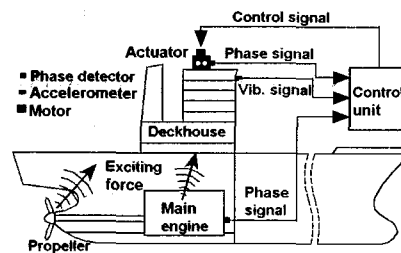


Fig. 1 Conceptual system configuration

2.1 불평형 중추식 구동기

불평형 중추식 구동기는 Fig. 2에 보인 바와 같이 상호 반대 방향으로 회전하는 두 개의 불평형 질량에서 발생하는 원심력의 벡터 합을 이용하여 단일 주파수를 갖는 순수 정현파에 해당하는 힘을 발생시킬 수 있다.

본 연구에서는 불평형 중추식 구동기의 내구성과 선박 상부구조에의 설치성을 향상시키고자 기존의 구동중 제어력 조절 기능(조대승 등 1998(a))을 배제하고, 정지 상태에서 불평형 질량의 수동 가감에 의해 제어력을 조절할 수 있도록 하였다. 또한, 구동 축 베어링은 내구수명을 20년 이상의 테이퍼 롤러 베어링을 사용하였으며, 불평형질량 회전 축은 피로응력을 고려한 축 직경 간이 평가식

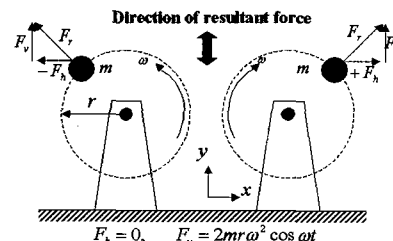


Fig. 2 Control force generating mechanism

Table 1 Specification of mechanical actuator

Dimension (L×B×H)	868×830×893 mm	
Phase control motor	15kW AC induction type	
Main shaft	Material	S45C
	Diameter	130 mm
	Bearing	23222B taper roller
	Speed	70 ~ 650 rpm
Unbalance weight per shaft	25.82 ~ 85.52 kgf	
Eccentric distance	129 mm	
Generating force at 300 rpm	668 ~ 2,236 kgf	
Force direction	Horizontal	
Total weight	1,200 kgf	



Fig. 3 Actuator installed on test ship

(정선모/한동철 1996)을 충분히 만족하도록 급형 모멘트 피로파손 안전율을 6.53으로 설계 제작하였다. 개발된 구동기의 주요 제원과 이의 외형을 Table 1과 Fig. 3에 각각 나타내었다.

2.2 구동기 제어반과 센서부

본 연구에서는 제어부의 단순화와 내구성을 향상시키고자 신호 입출력, 제어 알고리즘 구현 및 사용자 명령 등의 기능을 담당하는 제어기를 하나의 DSP 보드로 구현하였다. 개발된 제어기의 주요 사양과 제작품 외형을 Table 2와 Fig. 4에 각각 나타내었다.

개발된 보드는 제어 알고리즘 구현을 위한 고속 연산과 제어신호 입출력용 TMS320C32 CPU와 LCD 화면 처리를 포함한 사용자 및 시스템 명령을 담당하는 C167 CPU가 dual port RAM을 통하여 데이터 통신을 수행하도록 제작하여 제어 성능에 영향을 미치지 않으면서도 다양한 사용자 편의

환경을 구현할 수 있다(윤덕용 1999, Texas Instruments 1997).

한편, 진동신호 입력용 A/D 소자와 인버터 제어를 위한 D/A 소자는 16-bit로 제작하여 양자화 오차를 최소화하되, 진동 신호는 대역통과 주파수가 0.1Hz ~ 30Hz인 6차 Butterworth 필터를 통과한 후 A/D 변환이 되도록 하였다. 또한, 선박 주기관과 구동기 위상 신호를 취득하기 위한 엔코더 카운터는 최대 3,000 rpm의 펄스 신호 처리가 가능하며, 주전원 입력 후 제어 기능 선택에 따라 인버터 등의 주요 부품의 전원 제어 기능 및 상태 모니터링용으로 각각 8 채널의 DI/DO 소자도 포함하고 있다. 아울러, 상기 보드에는 시스템 운용 및 제어 프로그램 탑재를 위한 serial port 2개와 제어명령 입력을 위한 20개의 key 및 결과 확인을 위한 LCD 구동용 소자들도 포함되어 있다.

Table 2 Specification of DSP board

Item	Specification	Remark
Main Controller	CPU: TMS320C32-60 ROM(Flash): 512 Kbyte SRAM: 2 Mbyte DPRAM: 4 Kbyte	
HMI Controller	CPU: C167 ROM(Flash): 1 Mbyte SRAM: 1 Mbyte	
A/D	Resolution: 16 bit Gain: ×0.25, 0.5, 1, 2.5, 5, 10, 25, 50 MUX: 4:2 (ADC 2EA)	4 Ch
Analog Filter	BPF 0.1 ~ 30Hz (6th Butterworth)	
D/A	Resolution: 16 bit Gain: ×0.5, 1 Output: Unipolar(5V, 10V), 4 ~ 20mA	4 Ch
Digital Output	8V SPST Relay	
Encoder	MAX. 3000 RPM	3 Ch
LCD	320×240 Mono Graphic	
S/W Input	20 Key	
LAN	10 Mbps	1 Port
Serial Port	19,200 bps	2 Port

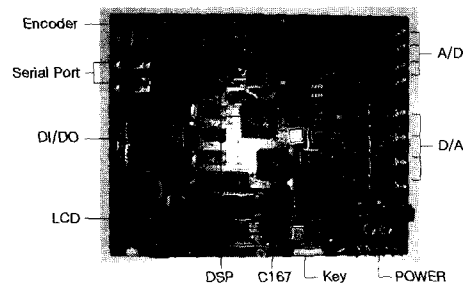


Fig. 4 Developed DSP board

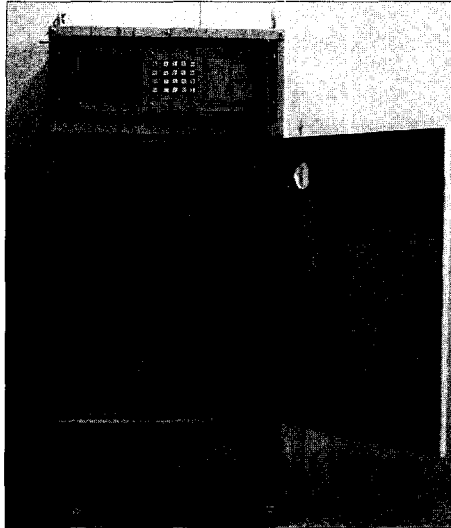


Fig. 5 Developed control panel

한편, 상기 보드와 인버터 등을 내장하여 제작한 구동기 제어반을 Fig. 5에 나타내었다. 또한, 구동기와 주기관 회전위상 계측용 엔코더는 1회전당 2048개의 펄스를 출력하는 Leine & Linde사의 line driver 방식 증분형(incremental type)을 사용하였으며, 가속도계는 최대 측정 가속도가 3g이고, 최대 측정 주파수가 100 Hz인 PCB사의 3701G3FA3G 축전형을 사용하였다.

2.3 제어 및 시스템 운용 프로그램

본 연구에서는 Fig. 6에 보인 바와 같이 구동기를 이용한 임의 차수 상부구조 진동의 능동제어 기능은 물론 동특성 파악을 위한 기진기 기능, 제어 대상 진동 성분과 주기관 운전속도 범위 선정

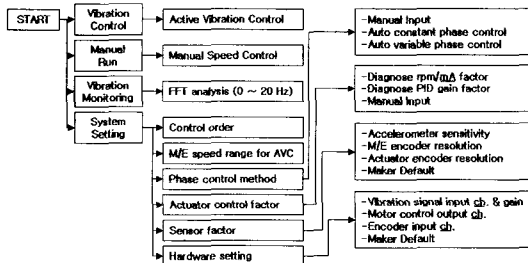


Fig. 6 Configuration of control program

을 위한 상부구조 진동 모니터링 기능 및 시스템의 유지·보수 기능을 제공하는 제어 및 시스템 운용 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 모든 기능은 LCD 모니터 상에 나타난 명령 또는 기능을 key를 이용해서 선택 또는 입력하는 사용자 인터페이스 방식으로 구동된다.

3. 상부구조 진동 제어 알고리즘

적화상태에 따라 진동 특성이 변경되는 선박의 동특성 규명없이 주기관 회전수의 임의 k차 조화 성분 진동 제어를 위한 실시간 신호처리 기법과 최적 제어위상 결정 방법 및 구동기 제어 방법은 기존의 Cho et al.(1999)의 연구를 적용하였다.

다만, 구동기에 대한 PID 위상제어 방법의 적용에 있어서 기존의 주기관과 구동기 누적 위상으로 부터 제어위상 오차를 산정하는 방법은 round-off 오차로 인해 시간이 경과함에 따라 진동제어 성능이 변동하는 현상이 발생하였다. 이에 본 연구에서는 상기의 문제점을 보완하고자 엔코더로부터 취득한 주기관 순간 위상 θ_e 와 구동기의 순간 위상 θ_a 및 제어위상 ϕ 를 이용하되 Fig. 7에 보인 바와 같이 주기관과 구동기의 1회전 완료 시점의 우선 순위에 따라 -1, 0 또는 1의 값을 갖는 위상 보정계수 n을 이용하여 제어위상 오차 $\Delta\theta$ 를

$$\Delta\theta = \text{remainder}(k\theta_e/2\pi) - \theta_a + \phi + 2n\pi \quad (1)$$

와 같이 계산하는 방법을 적용하였다. 상기 순간 위상을 이용한 계산 방법은 round-off 오차의 누적을 원천적으로 예방할 수 있어 장시간 구동시에도 안정적인 구동기 위상제어 성능이 보장된다.

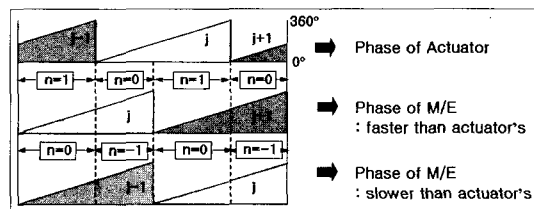


Fig. 7 Evaluation of phase correction factor, n, using instant phases of M/E and actuator

4. 실선 제어 시험

개발된 능동 진동제어 장치의 성능과 실용화 타당성을 검증하기 위하여 Table 3에 주요 요목을 나타낸 5,500 TEU 컨테이너 운반선의 홍콩-싱가폴 운항시 상부구조 종진동 제어 시험을 실시하였다. 제어시험에 있어서 구동기는 E-갑판에 설치하였으며, 진동신호는 항해갑판 중앙부 종방향에서 취득하였다. 또한, 제어 대상 진동은 주기관 운전 속도의 3차 조화성분으로 설정하였다.

Table 3 Main particulars of the test ship

Type	5,500 TEU Container Carrier	
Ship name	Hyundai Confidence	
Length O.A	274.67 m	
Length B.P	263.00 m	
Breadth (mld.)	40.00 m	
Depth (mld.)	24.20 m	
Draft design	12.00 m	
Superstructure height	25.00 m (8 story)	
Loading condition	4,097 TEU	
Main Engine	Type	HYUNDAI-B&W 10K98MC-C
	Power (rpm)	74,520 BHP (104.0) 67,070 BHP (100.4)
Propeller	Blade No.	6
	Diameter	8.5 m

4.1 구동기 제어력과 최적 제어위상 평가

시험대상선의 진동제어에 필요한 구동기의 제어력을 평가하고자 구동기를 최소 제어력 상태로 설정하고, 초기 최적 제어 위상과 제어력 산정 방법(조대승 등 1995)으로 주기관 속도변화에 따른 구동기의 제어력과 최적제어위상을 평가한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

이로부터 시험대상선의 경우 최소 제어력 상태에서 84~96 M/E rpm 구간에서는 필요 용량 대비 제어력이 2 이하로서 진동제어효과를 가질 수 있으나, 그 이외의 구간에서는 잉여 제어력으로 인해 제어 후 진동이 제어 전 진동보다 클 것으로 평가되었다. 이는 시험 당시 제어 전 상부구조 종진동 최대 값이 1.1 mm/s 이하로 본선 진동 특성이 매우 양호하였기 때문인 것으로 사료한다. 한편, 최적제어위상은 동일한 적화상태에서도 주기관 속도별로 달라지는 것으로 평가되었다.

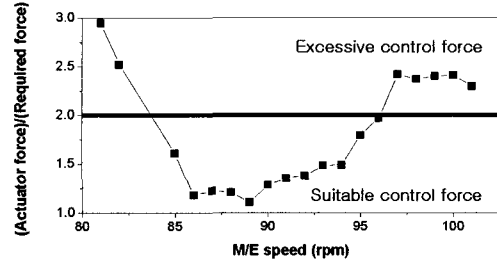


Fig. 8 Evaluated control force capacity

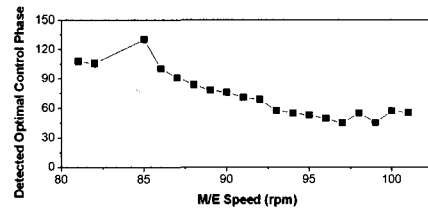


Fig. 9 Evaluated optimal control phase

4.2 수동 위상제어 시험

상부구조 진동 능동제어시스템의 위상제어 성능을 검증하기 위하여 89 M/E rpm에서 제어위상을 10° 간격으로 수동으로 변화시키면서 제어대상 주파수 성분 상부구조 진동을 계측한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이에 는 비교-검토 목적으로 제어 전 진동값 V_b 와 함께 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타낸 제어력비 r 과 최적 제어위상값 ϕ_{opt} ($=76^\circ$)을 이용하여 제어 위상 ϕ 에서의 제어 후 진동값 V_a 를

$$V_a = V_b \sqrt{r^2 - 2r \cos(\phi - \phi_{opt}) + 1} \quad (2)$$

와 같이 이론적으로 산정한 결과도 함께 나타내었다.

이로부터 제어위상 변경에 따른 진동계측 결과는 식(2)로 평가한 결과와 부합성이 매우 높아 개발한 시스템의 구동기 위상 제어성능이 우수하다고 판단한다. 한편, 상기 운항조건에서는 주기관 회전 위상 3차 성분과 구동기 제어위상간의 차가 30° ~ 120°의 범위에 있을 때 진동 제어 효과의 있음을 확인할 수 있다.

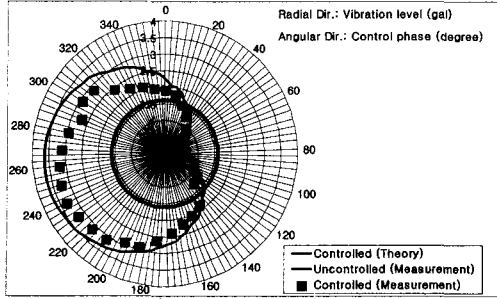


Fig. 10 Controlled vibration in case of the variation of control phase in manual at 89 M/E rpm

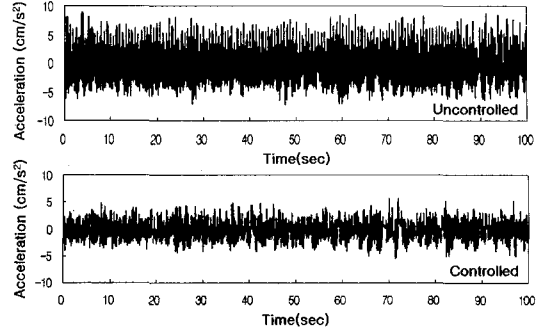
4.3 초기 최적 제어위상 이용 진동 제어 시험

초기 구동기 작동시 서로 다른 2개의 위상으로 제어할 때의 진동값을 이용하여 산정한 초기 최적 제어 위상으로 구동기를 제어한 경우의 89 M/E rpm에서의 제어 전후 진동신호의 시간이력과 주파수 스펙트럼을 Fig. 11에 나타내었다. 또한, 동일한 방법으로 주기관 속도별로 제어시험을 수행한 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

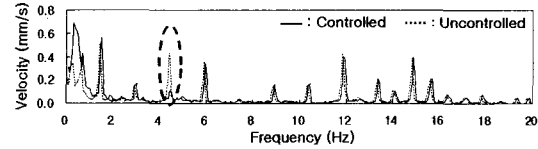
상기 결과로부터 89 M/E rpm에서 제어 대상 주파수 성분인 4.45 Hz에서의 진동값은 제어 전 0.42 mm/s에서 제어 후 0.10 mm/s로 저감되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 84 ~ 96 M/E rpm에서는 진동값이 감소하나 그 외 구간에서는 잉여 제어력으로 인해 제어 후 진동값이 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 한편, Fig. 11에 보듯이 제어 후 1 Hz 미만의 저주파수 영역에서 진동값이 크게 나타난 것은 모터 제어용 인버터로부터 유입된 전기 노이즈 때문인 것으로 판단된다.

4.4 장시간 진동 제어 시험

개발된 시스템의 내구성과 위상 제어 방법에 따른 제어 성능을 평가하고자 제어 초기에 결정된 구동기 위상으로 고정하여 장시간 제어하는 방법과 제어 중 선박의 운항상태 변동에 대비하여 구동기 제어위상 변화시 진동값 변화를 이용하여 최적제어 위상을 추종하는 가변 위상 제어 방법(Cho et al. 1999)을 이용한 제어 시험을 실시하였다.



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 11 Uncontrolled and controlled vibration using constant phase control method at 89 M/E rpm

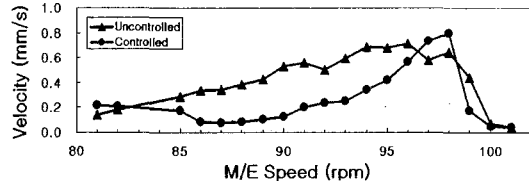


Fig. 12 Uncontrolled and controlled vibration using constant phase control method

주기관 속도가 89 rpm으로 일정한 경우에 상기 2가지 방법에 의한 제어 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 이로부터 제어방법에 관계없이 제어 후 진동이 저감되나 초기 최적 위상으로 제어하는 방법이 가변 위상 제어방법보다 성능이 우수함을 확인할 수 있다. 이는 주기관 속도가 일정한 경우 최적 제어 위상도 일정한 값을 유지하는데 반해 가변 위상제어 방법은 최적 제어 위상값 근방을 끊임없이 탐색하기 때문이다.

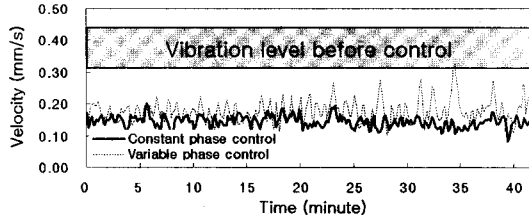


Fig. 13 Controlled vibration in the condition of constant M/E speed (89 rpm)

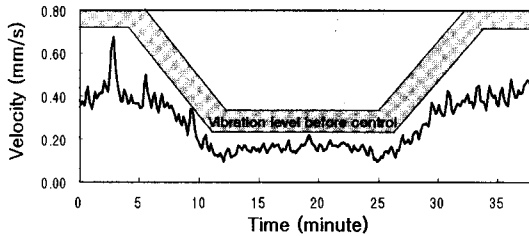


Fig. 14 Controlled vibration using variable phase control method in the condition of variable M/E speed (94 → 84 → 94 rpm)

한편, 주기관 속도를 94 rpm에서 84 rpm까지 감속한 후 약 15분 동안 84 rpm으로 정속 운행하고, 다시 94 rpm으로 증속할 경우에 가변 위상 제어방법을 이용한 장시간 제어 시험 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 이로부터 가변 위상 제어방법을 적용하면 주기관 속도 변동에 따라 최적 제어위상이 변화하는 경우에도 안정적인 진동제어가 가능함을 확인하였다. 다만, 제어후 약 3분이 경과한 시점에서 제어 진동값이 다소 크게 나타난 것은 강풍으로 인해 진동 신호선에 유입된 전기 노이즈로 인해 과부하(overload) 현상이 발생하여 가변위상 제어 알고리즘 적용을 위한 진동값 계산이 적합하게 되지 않았기 때문이라고 판단한다. 이러한 현상은 신호선에 대한 추가적인 고착작업 후에는 발생하지 않았다.

5. 결 론

본 연구에서는 선박 건조 후 확인된 과도한 단일 주파수 성분 선박 상부구조 진동의 능동제어시

스템을 실용화하고자 이의 시제품을 개발하고, 5,500 TEU 컨테이너 운반선의 상부구조 종진동 제어시험을 수행한 결과 제어 차수 성분의 진동을 0.1 mm/s까지 저감할 수 있음을 확인하였다.

개발된 시스템의 불평형 중추식 구동기는 설치성과 내구성을 극대화하기 위해 최대 변의 길이가 0.9m 이내, 내구수명 20년 이상으로 설계제작하였다. 또한, 제어반은 전용 제어기판을 개발적용함으로써 기성품 사용대비 전장부가 단순하면서도 우수한 제어성을 갖도록 하였다. 아울러, 주기관과 구동기의 순간위상을 이용하여 장시간 사용시에도 제어알고리즘 계산상의 round-off 오차 없이 안정적인 제어가 가능하고, 기진기, 진동모니터링, 시스템 유지보수 등의 부대 편의 기능을 지원하는 제어운용 프로그램을 개발하였다.

이에 본 연구에서 개발한 시스템은 실제 운항중인 선박의 상부구조 진동 제어에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

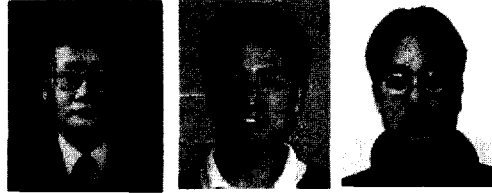
후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 첨단조선공학연구센터와 현대중공업(주)의 지원으로 수행되었으며 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 윤덕용, 1999, TMS320C32 마스터, Ohm사, 서울.
- 정선모, 한동철, 1996, 표준기계설계학, 동명사, 서울.
- 정태영, 문석준, 박희창, 허영철, 한성용, 1996, "선체 상부구조 진동의 능동제어 시스템 실용화 연구," 대한조선학회 논문집, 제33권, 제2호, pp. 119-126.
- 조대승, 이수목, 정균양, 1995, "기계식 구동기를 이용한 선박진동의 능동제어장치 개발," 대한조선학회 논문집, 제 32권, 제 4호, pp. 105-113.
- 조대승, 이수목, 정균양, 1998(a), 힘조절형 기계식 기진기, 실용신안 제 133837호.
- 조대승, 이수목, 정균양, 1998(b), 선박용 진동 제어 방법과 그 장치, 특허 제 182082호.

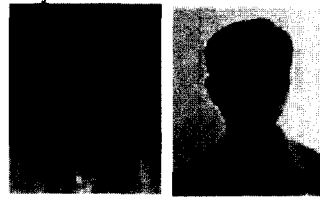
- Cho, D.S., Lee, S.M. and Chung, K.Y., 1999, "Ship Vibration Control Using a Force Adjustable Mechanical Actuator," Journal of Vibration and Control, Vol. 5, No. 5, pp. 779-794.
- Takeda, Y., Sasajima, H., Tanida, K., Koike, Y., Takahashi, N. and Iwanami, T., 1992, "Development of Active Mass Damper for Ships by Hydraulic Control," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 171, pp. 289-298.
- Yoshida, Y., 1989, "Development of Centrifugal Pendulum Absorber for Reducing Ship Structure Vibration," ASME J. of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 111, pp. 404-411.
- Texas Instruments, 1997, TMS320C3x User's Guide, Custom Printing Company, Owensville, Missouri.



< 조 대 승 > < 최 태 욱 > < 김 진 형 >



< 정 성 윤 > < 백 광 렬 > < 이 수 목 >



< 배 종 국 > < 이 장 우 >