Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 25(6) : 414~419, 2015
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2015.25.6.414

한국소음진동공학회논문집 제 25 권 제 6 호, pp. 414~419, 2015
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

가변 속도 유도 전동기에서 발생한 펄스 토크에 의한 회전축계의 비틀림진동 현상

Torsional Vibration Phenomenon due to Pulse Torque of Variable Speed Induction Motor on Rotating Systems

이 돈 출†·버 광 다 오*·남 택 근*
Donchool Lee, QuangDao Vuong and Taekkun Nam

(Received March 24, 2015 ; Revised June 2, 2015 ; Accepted June 2, 2015)

Key Words : Pulse Torque(펄스 토크), Rotating Systems(회전축계), Torsional Vibration(비틀림진동), Variable Speed Induction Motor(가변 속도 유도 전동기)

ABSTRACT

Recently, commercial ships and other specialized vessels with electric propulsion system employ variable speed induction motor as its prime mover. The wide application of electrical motors also includes being the main drive system in most industrial machineries. However, during its start-up, shutdown, and brake switch operation, excessive torque variation are generated. As such, flexible coupling are installed in order to reduce the transmitted torque fluctuation to the driven side. In this paper, the pulse torque generated by an variable speed induction motor was analyzed theoretically and through measurement of torsional vibration. Induction motor with inverter on marine propulsion system and industrial compressor were used as experimental subjects. The study confirmed that pulse torque are generated regardless of motor speed and interpreted as a vibration source of the whole system. Results presented herein can be adopted as the basis in future amendment of inspection classifying body regulations.

1. 서 론

최근 선박에서 LNG선, 특수선박, 해양구조물, 군함 등에서 PWM(pulse width modulation) 방식의 가변 속도 유도 전동기를 원동기로 한 전기추진시스템이 많이 이용되고 있다. 또한 일반 산업기계도 대부분 전동기를 이용한 구동 시스템을 채택하고 있다. 이 회전체는 시동, 정지, 단락(short circuit), 제동 개폐기(breaker re-closure) 작동 시 과도한 토크 변동이 발생한다. 그리고 이 시스템은 피동 축에 전달되는 진동토크를 줄이기 위하여 전동기와 피동 축 사이에 탄성커플링을 설치하게 된다.

이 논문에서는 이러한 회전축계에서 회전속도를 제어하기 위하여 PWM 방식의 인버터를 사용한 유도 전동기에서 발생하는 펄스 토크에 의해서 일어나는 과도비틀림진동의 이론해석과 다양한 비틀림진동 계측장비를 동시에 사용하여 그 결과를 확인하였다. 실험 대상의 모델은 선박용 저속 추진시스템과 산업용 고속다단 압축기가 이용되었다.

† Corresponding Author ; Member, National Maritime University
E-mail : ldcvib@mmu.ac.kr
* National Maritime University

A part of this paper was presented at the KSNVE 2015 Annual Spring Conference
‡ Recommended by Editor Heung Soo Kim

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

2. 비틀림진동의 실험 및 대책

2.1 선박용 저속 추진시스템

실험 대상은 PWM 방식의 인버터를 이용하여 회전속도를 제어하는 가변 속도 유도전동기가 적용된 선박용 추진시스템(2,800 kW×183 rpm)이다. 비틀림진동에 대한 질량-강성계는 Fig. 1과 같고 비틀림진동의 이론 해석상 고유진동수는 Table 1에 보인다. 여기서 50 Hz 대역의 3절 비틀림진동이 크게 발생하였고 이로 인하여 선체에 2차적으로 구조진동이 발생하였다. 비틀림진동에 대한 원인 및 대책을 세우기 위하여 Fig. 2와 같이 장비를 배치하고, 비틀림진동을 포함하여 종합적인 진동 계측을 수행하였다. 계측결과에 의하면 Figs. 3~4와 같이 전동기 회전수가 30 rpm이하에서 회전수와 무관하게 3절 비틀림진동 대역인 49 Hz를 중심으로 비틀림진동을 포함하여 각종 구조진동과 소음이 동시에 발생하였다. 수차에 걸쳐서 탄성커플링의 개선 작업을 하여 진동진폭과 발생 영역은 상당히 개선되었으나 이 진동의 주파수는 거의 변하지 않고 완전하게 사라지지는 않았다. 이 진동의 원인을 확인하기 위하여 기진토크로 PWM 방식의 진동 및 인버터 설계에 대한 문헌과[1~3] 실제 설계 자료를[4] 검토한 결과, 속도 제어를 위해 파형을 만드는 과정에서 이론적으로 충격토크가 존재할 수밖에 없다는 것을 확인하였다. 그리고 기진 주파수를 바꾸어 가면서 자체 개발한 S/W를[5,6] 이용 과도비틀림진동에 대한 이론적 시뮬레이션을 수행한 결과 감쇠가 아주 작을 경우 충격토크가 존재하면 50 Hz 대역의 3절 비틀림진동이 발생하고 계속 지속됨을 확인하였다. 이는 마치 가진 해머에 의해서 철 구조물에 충격을 가하면 낮은 감쇠와 함께 진동이 상당기간 지속되어 고유진동수를 확인할 수 있는 원리와 유사하다. 시뮬레이션 과정에서 30~120 Hz, 그리고 120 Hz이상의 고주파 등 다양한 충격 토크를 가하여 해석하였다. 이 논문에서는 이중 시스템에 공급되는 교류 라인인 60 Hz 성분이 PWM 변환 중 조화함수 성분으로 일부 남아 있다고 가정하여 기진원으로 Fig. 5와 같이 1회의 충격 토크만을 가하여 해석한 결과를 Fig. 6에 보인다. 그 결과 기진원은 60 Hz이지만 이 비틀림진동계는 3절 고유진동수의 50 Hz로 계속해서 진동하였다. 특히 압축기의 비틀림진동과 관련된 연구보고서에[7] 따르면, 이 주파수 영역은 Fig. 7과 같이 감쇠가 영보다 적어(마이너스 값) 자려진동의 가능성을 보여 주고 있다. 이때 진동이 점차 성장하여 전동기측이 아닌 피동 측 다른 요소의 진동 감쇠에 의해서 진동성장이 멈추는 수준까지 자려 비틀림진동으로 확대되었다. Fig. 8은 Fig. 5와 동일한 크기의 120 Hz의 사각파를 기진토크로 가한 해석결과이다. 여기서 장주기는 1절 진동을, 단주기는 3절 진동인 50 Hz 대역의 비틀림진동이 발생하며, Fig. 6과 동일한 양상을 보인다. 또한 진폭의 크기는 기진 주파수가 짧아 상대적으로 진동계에 가한 기진에너지가 Fig. 5보다 작으므로 낮다.

이 해석 및 실험 결과들로부터 전동기를 원동기로 추진축계를 설계할 때 비틀림진동의 고유진동수가 40~70 Hz 내에 존재하면 기진토크와 함께 방진대책을 세우는 것이 바람직하며, 탄성커플링 강성과 축의 직경을 변경하여 고유진동수를 피하거나, 비틀림진동 댐퍼 등을 사전에 검토하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Table 1 Natural frequencies of torsional vibration for marine propulsion system(unit : cycles/min)

Node	Natural frequency	Remarks
1st	242.53(4.04 Hz)	
2nd	1495.07(24.92 Hz)	
3rd	3054.33(50.91 Hz)	Resonance

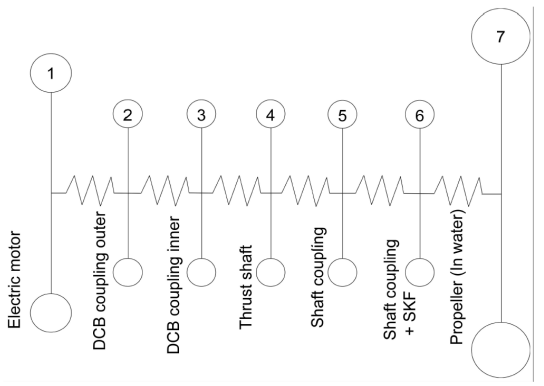

Fig. 1 Mass-spring system for marine electric propulsion system with inverter

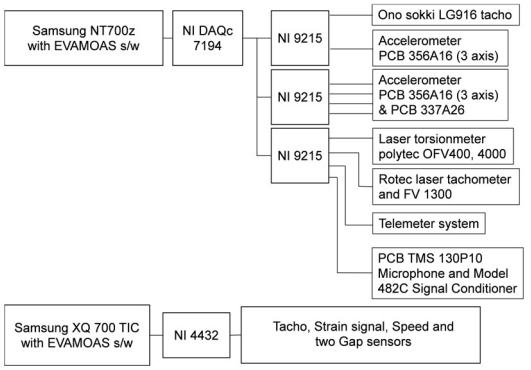

Fig. 2 Measuring equipment arrangement for marine propulsion system

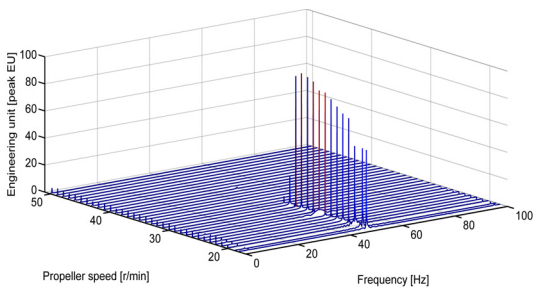

Fig. 3 Measured vibratory torque of intermediate shaft

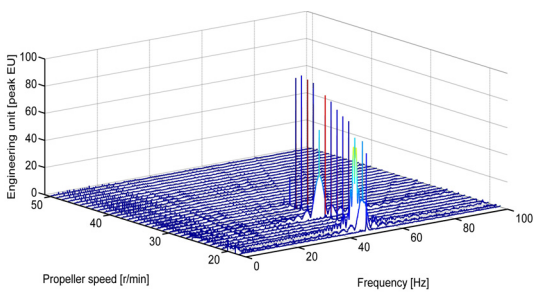

Fig. 4 Angular velocity of intermediate shaft at flexible coupling propeller side

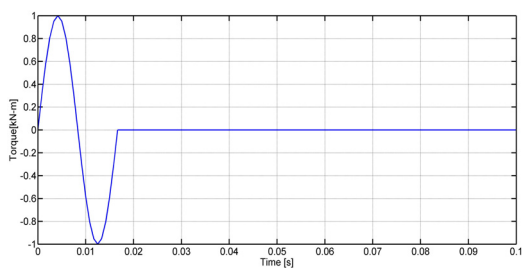

Fig. 5 Impulse torque of motor for transient torsional vibration analysis

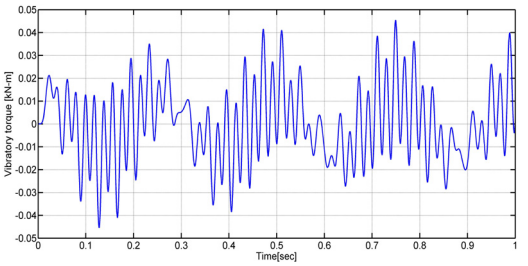

Fig. 6 Calculated vibratory torque of intermediate shaft excited by impulse torque of 60 Hz sin wave(Fig. 5)

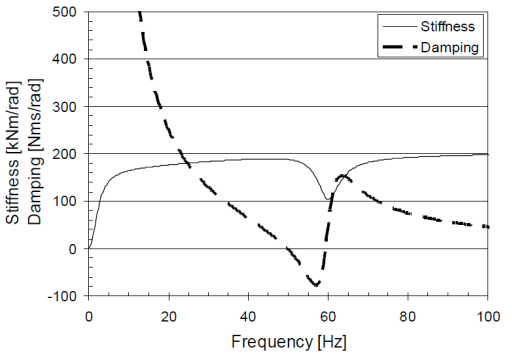

Fig. 7 Torsional stiffness and damping of a 1250 hp induction motor with supply frequency 60 Hz[7]

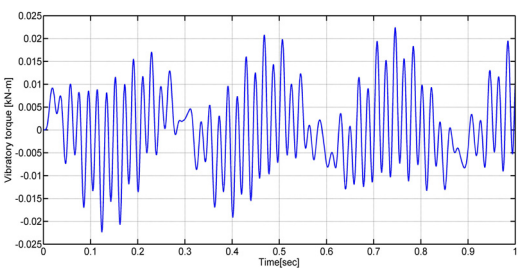

Fig. 8 Calculated vibratory torque of intermediate shaft excited by impulse torque of 120 Hz rectangular wave

2.2 산업용 고속고압 압축기

실험 대상은 산업용 고압다단 압축기(735 kW× 3,600 rpm)로 간략화된 비틀림진동의 질량-강성계는 Fig. 9에 보인다. 고유진동수 해석은 4개의 분지계를 갖는 총 질점 수 119개로 구성하여 수행하였으며 그 결과를 Table 2에 보인다. 비틀림진동을 포함한 종합적인 진동계측을 수행하기 위한 장비 배치는 Fig. 10에 보인다. 그리고 비틀림진동의 고유진동수

를 확인하기 위하여 압축기의 회전수를 천천히 올리면서 계측한 결과를 Fig. 11에 보인다. 압축기에서도 앞의 추진축계 사례와 유사하게 압축기의 회전수와 무관하게 43 Hz 대역의 비틀림진동이 발생하였다. 이 결과는 Table 2의 계산된 1절 고유진동수와 상당히 떨어져 있다. 43 Hz 성분의 진동 원인을 찾기 위하여 비틀림진동의 고유진동수가 높은 방향으로 검토하였다. 우선 압축기의 피니언 기어와 불(bull) 기어 사이가 유격(back-lash)에 의한 비선형으로 가정하여, 일정한 수준 이하의 각진폭에 대해서는 피니언 기어의 관성모멘트를 무시할 수 있으며 이를 적용하면 고유진동수는 37 Hz로 올라가게 된다. 해석결과와는 여전히 6 Hz정도의 차이가 나며, 아직까지 원인이 명확하지 않다. 주 저자의 판단으로는 회전수가 매우 높고 비틀림진동이 발생한다 하더라도 이때 발생하는 상대 각 각속도 변동이 전동기의 회전속도와 비교하여 매우 작을 경우 시스템 분석이 필요할 것으로 판단된다. 일반적으로 관성링(I_d)과 케이싱(I_c)으로 구성된 점성 댐퍼의 비틀림진동 모델로 가정하면 유연한 탄성 커플링을 중심으로 어느 한쪽 또는 양쪽 모두 진동계의 유효관성모멘트($I_{eff} = I_d/2 + I_c$) 로 검토할 수 있고 이 값은 원래 관성질량보다 작아진다. 아무튼 비틀림진동 계측결과에 따르면 진동토크는 확인되었지만, 이 토크와 동일한 성분의 각속도 변동은 계측을 통해서 확인이 되지 않았고 오직 회전축의 런아웃(run-out) 성분인 1차만 계측되었다. 또한 실험 중 갑작스럽게 순간적으로 전동기에 과도한 전류가 흐르면서 비상정지를 하게 되었다. 다행히 이 때 연속적으로 진동 신호를 받아 저장하였으며 시간 영역의 과도비틀림진동 토크를 선별한 신호는 Fig. 12에 보인다. 이 신호를 중첩되게 주파수 분석을 하면 해석 결과와 거의 동일한 30 Hz의 비틀림진동이 발생됨을 확인할 수 있다. 이때 계측된 불(bull) 기어 축의 각속도 변동을 Fig. 13에 보이며, 이를 분석하면 축계 비틀림진동의 고유진동과 무관한 축의 배치불량에 의해서 발생하는 축의 회전수에 대한 2차 횡진동 성분만이 확인된다. 앞에서 언급한 바와 같이 피니언 기어의 관성을 무시하고 추진축계와 동일한 60 Hz의 충격토크를 가한 과도비틀림진동 해석결과는 Fig. 14에 보인다. PWM방식의 인버터를 통해서 유도 전동기에 공급된 전류와 전압을 초단위로 계측하여 순간 토크 변동은 계측할 수 있는 기회는 없었지만 인버터에서 충격토크가 발생한다고 가정하여 비틀림진동의 고유진동수를 중심으로 진동이 발생함을 확인할 수 있었다. Fig. 15는 피니언의 관성모멘트와 일부 회전체의 관성모멘트를 조정한 유효관성모멘트를 적용하여 계측결과와 해석결과의 주파수가 일치하도록 이론적으로 시뮬레이션 한 결과이다. 그리고 이러한 진동토크가 존재하게 되면 축과 시스템의 수명단축과 더불어 에너지 손실을 초래할 것으로 판단된다.

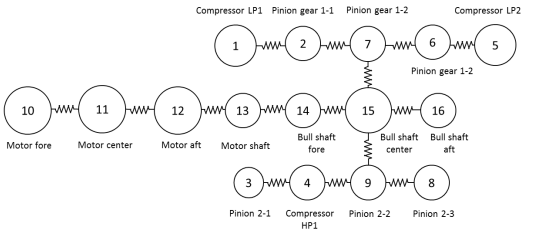

Fig. 9 Mass system for industrial electric compressor system with variable speed induction motor

Table 2 Natural frequencies of torsional vibration for industrial compressor(Unit : cycles/min)

Node	Natural frequency	Remarks
1st	1799.70(30.0 Hz)	
2nd	16915.13(281.9 Hz)	
3rd	25113.39(418.6 Hz)	

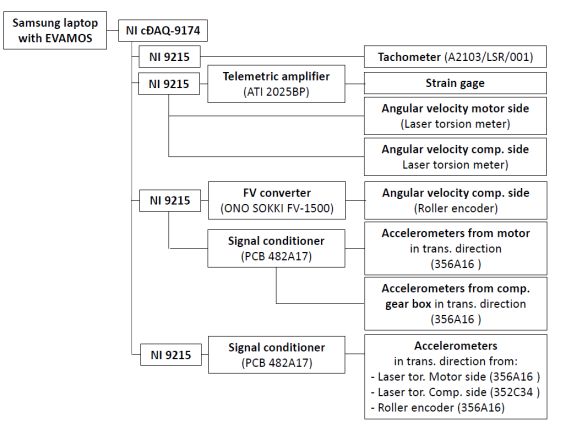

Fig. 10 Measuring equipment arrangement for industrial electric driven compressor

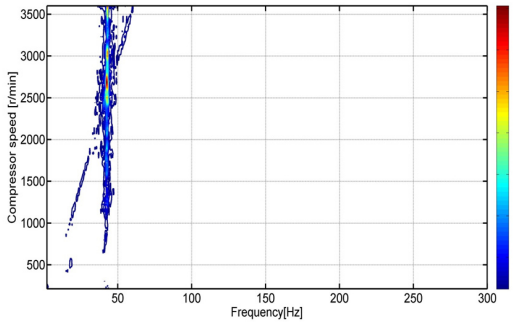

Fig. 11 Measured vibratory torque of coupling shaft during run-up

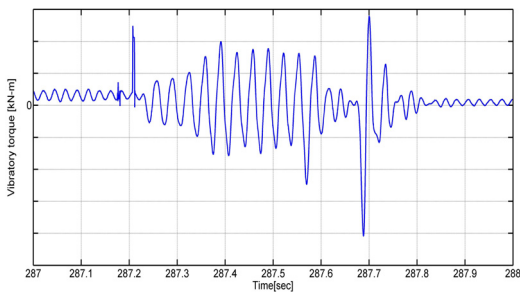

Fig. 12 Measured vibratory torque of coupling shaft by excessive motor current

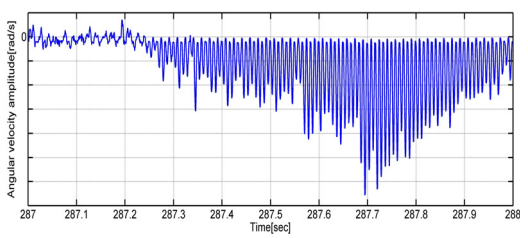

Fig. 13 Measured angular velocity of bull shaft by excessive motor current

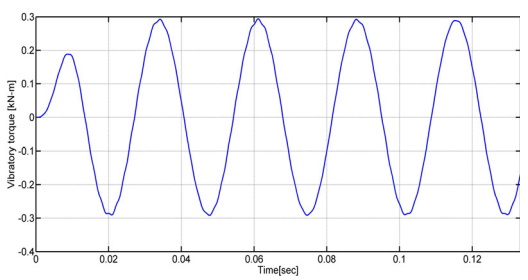

Fig. 14 Calculated vibratory torque of coupling shaft without pinion gear system by impulse torque

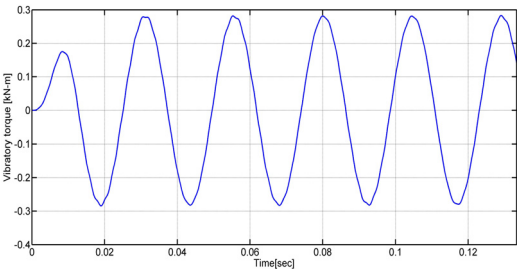

Fig. 15 Calculated vibratory torque of coupling shaft with effective inertia system by impulse torque

3. 결 론

이 연구에서는 선박용 추진시스템과 산업용 압축기에서 PWM 방식의 인버터를 이용한 가변 속도 유도 전동기에서 전류와 전압 측정을 통한 기진력을 확인할 수는 없었지만, 펄스 토크를 기진력으로 한 비틀림진동 발생현상을 과도비틀림진동의 이론 해석과 진동실험 결과를 통해서 확인하였으며 이를 정리 요약하면 다음과 같다.

(1) 회전속도를 제어하기 위하여 PWM방식의 인버터를 이용한 가변 속도 유도 전동기에서 발생하는 펄스 토크는 축의 회전수에 무관하게 진동계 내의 특정 진동 모드의 공진주파수로 비틀림진동이 발생하였으며, 이 진동으로 인하여 기계적인 손상과 동력손실을 가져올 수 있었다. 그리고 선박 추진용 전동기의 회전속도가 낮은 영역에서 감쇠가 적은 40~60 Hz대역의 자려 비틀림진동으로 성장하는 것을 실험을 통해서 확인하였다. 또한 탄성커플링의 강성 변경을 통해서 이 진동은 상당히 개선되었지만, 다른 진동요소의 설계 변경이 어려워 공진영역은 운전을 피하도록 하였다.

(2) 산업용 압축기에서 순간적인 과부하로부터 시스템을 보호하기 위한 전기적인 단락 과정을 통해서 비틀림진동의 고유진동수를 확인할 수 있었다. 이 경우 과도한 토크변동을 줄이고 피동축 간의 원활한 축계배치를 위하여 탄성커플링이 필요하다. 비틀림진동 계측과 관련하여 과도 비틀림진동 토크가 크게 발생하는 순간에 비틀림진동이 기계적으로 축의 배치상의 불균형성분인 2차와 1차의 런 아웃 성

분으로 전환되어, 각속도 측정에서는 순수한 비틀림 진동 성분이 거의 확인되지 않았다. 따라서 비틀림 진동이 작은 고속 회전축에서 계측을 통한 시스템의 검증은 계측 장비의 설치 상 어려움이 많지만 반드시 스트레인 게이지를 이용한 원격측정장치로 확인해야만 한다. 그리고 회전 각속도 측정에 의한 간접적인 방법은 보조적인 수단으로 사용할 수 있으나 이 연구에서는 부적합하였다. 또한 과도상태가 아닌 정상상태에서도 동일하게 각속도 측정에 의한 방법으로 비틀림진동은 관찰되지 않았고, 회전축 또는 계측장비의 1차 성분의 런 아웃 성분만 측정되었다.

(3) 전동기를 원동기로 하는 선박용 전기 추진시스템과 산업용 기계에서도, 디젤엔진과 동일하게 비틀림진동의 해석과 계측을 통해서 검증이 필요함을 확인하였다. 따라서 관련 검사 기관에서 이를 반영한 규정 개정이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 목포해양대학교 친환경 녹색해양기자재 RIS 사업단에 의해 지원되었습니다.

References

(1) Freese, T. and Maxfield, R., 2008, Torsional Vibration Problems with Motor/ID Fan due to PWM Variable Frequency Drive, Proceeding of the 37th Turbomachinery Symposium, pp. 45~56.

(2) Lim, H.-J. and Cha, H. J., 20124, Design and Simulation of High Efficiency PWM Modulation Method for Three-phase Matrix Converter, The Transaction of the Korean Institute of Power Electrics, Vol. 17, No. 4, pp. 337~344.

(3) Freese, T. and Hill, C., 2009, Prevention of Torsional Vibration Problems in Reciprocating Machinery, Proceeding of the 38th Turbomachinery Symposium, pp. 213~237.

(4) ABB Korea, 2007, Drive IT High Voltage Drive ACS1000, Manual.

(5) Lee, D. C. and Yu, J. D., 2003, Transient and Unstable Torsional Vibration on a 4-Stroke Marine Diesel Engine, 2003 Spring Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division, Salzburg Austria.

(6) Barro, R. D. and Lee, D. C., 2014, Transient Torsional Vibration Analysis for Ice-class Propulsion Shafting System driven by Electric Motor, Transactions of the Korean Society Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 9, pp. 667~674.

(7) Timo, P. H. et. al, 2013, Electric Motors and Drives in Torsional Vibration Analysis and Design, 2013, Proceedings of the 42nd Turbomachinery Symposium.

Donchool Lee received his Dr. Eng. from Mechanical Engineering department at Korea Maritime University in 1995. He worked at Hyundai Heavy Industries from 1983 to 1999. He is now a professor of Mokpo National Maritime University.

Quang Dao Vuong received his B. Eng. form Vietnam Maritime University and his M. Eng. from Mokpo National Maritime University. Now he is studying Doctor course at Dynamics Lab. of Mokpo National Maritime University.

Taekkun Nam received the B.S. and the M.S. degrees, both in engine engineering, from Korea Maritime University, Pusan, Korea, in 1990 and 1996, respectively. He received the Dr. Eng. degree in control system engineering from the Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, in 2001. In 2002, he joined the Machine Control and Application Group, Korea Electrotechnology Research Institute, as a Senior Researcher. Since 2003, he has been an Professor in the Department of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University.