

복합재료 유연 프로펠러의 제작 및 성능 평가

이상갑^{†*}, 변준형^{**}, 백부근^{***}, 현범수^{*}

한국해양대학교 조선해양시스템공학부^{*}

한국기계연구원 부설 재료연구소^{**}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{***}

Production & Performance Assessment of Composite Material Flexible Propeller

Sang-Gab Lee^{†*}, Joon-Hyung Byun^{**}, Bu-Geun Paik^{***} and Beom-Soo Hyun^{*}

Div. of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University^{*}

Department of Materials Processing, Korea Institute of Materials Science^{**}

Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI^{***}

Abstract

The researches on the development of composite material underwater vehicle propeller have been actively attempted for the reduction of radiation noise with outstanding damping effects. Composite material propellers have almost been designed and produced by the foreign experts, and it is difficult to obtain the related informations about their flow, vibration, material characteristics because they are treated as the secrets with close relationship to the military technology, especially in the case of underwater vehicles. For the security of domestic manufacture of composite material propeller and the comparison and examination of its performance and radiation noise characteristics with those of German CONTUR composite material propeller, two propellers were self-produced according to the fiber weaving and array using compressible molding process and their self performances and radiation noise characteristics were measured. The mean fluctuations of blade tip of self-produced composite material propeller were increased and the radiation noises in the low frequency band were reduced compared to those of CONTUR, which could be estimated as the change of material characteristics and also be thought to be used for the future research informations.

※Keywords: Composite material(복합재료), Flexible propeller(유연 프로펠러), Reduction of radiated noise(방사소음 감소), Compressible molding process(압축성형기법)

접수일: 2009년 11월 16일, 승인일: 2009년 12월 4일

†교신저자: sglee@hhu.ac.kr, 010-3344-4306

1. 서 론

수중추진기의 설계 기준으로서 우수한 속도/효율과 낮은 방사소음을 들 수 있다. 미국, 영국 및 독일 등에서는 고강쇠 재질의 복합재료를 사용한 것으로 판단되나 특히 수중운동체의 경우 군사 기술과 밀접한 관련이 있기 때문에 재질이나 방사소음 등의 정보는 구하기 어려운 실정이다.

독일 AIR사에 설계·제작을 의뢰한 CONTUR 복합재료 유연 프로펠러(앞으로 'Flex 01'로 지칭, Figs. 1 및 2)를 MOERI의 공동수조(cavitation tunnel)에서 성능시험(Fig. 3)을 수행하였다(Hyun et al. 2008, Lee et al. 2009). 프로펠러의 날개 수는 3개, 직경은 250mm, 평균 피치비는 0.89, 전개면적비(Ae/Ao)는 0.340, 질량은 651.94g이었으나 정확한 형상 정보를 얻을 수가 없었다.



Fig. 1 CONTUR propeller Flex 01 (Hyun et al. 2008, Lee et al. 2009)

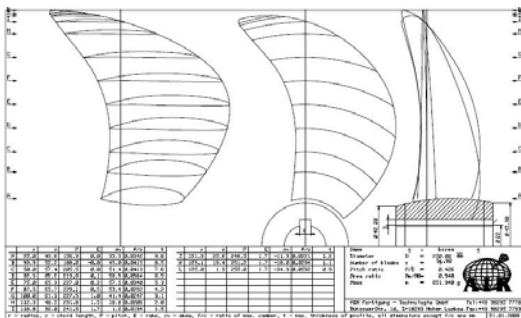


Fig. 2 Particulars and drawing of Flex 01 (Hyun et al. 2008, Lee et al. 2009)

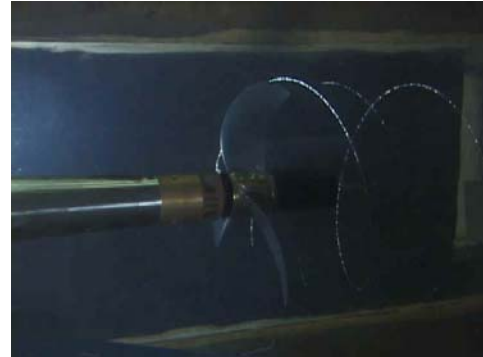


Fig. 3 Performance test of Flex 01 (Hyun et al. 2008, Lee et al. 2009)

복합재료 유연 프로펠러의 국내 제작 기술을 확보하고 CONTUR 복합재료 프로펠러(Flex 01)와의 성능 및 소음 특성을 비교 검토하기 위하여, 프리프레그(prepreg)를 재단하고 금형에 적층하는 압축성형 기법(Gutowski 1997, Mallick and Newman 1990)을 사용하여 직조 및 배열에 따른 프로펠러 2개를 자체 제작하여 단독성능 및 방사소음을 계측하였다. 본 논문에서는 제작 과정과 성능 평가에 대한 결과를 요약하였다.

2. 복합재료 유연 프로펠러 제작

CONTUR 복합재료 유연 프로펠러는 탄소 섬유강화(Carbon/Epoxy) 복합재료로 제작되었다고 알고 있었으나 일부 손상된 날개의 분석 결과 유리 섬유강화(Glass/Epoxy) 복합재료이었다. 평직 및 일방향 유리 섬유강화 복합재료 프리프레그를 직조 및 배열에 따라 2가지 종류의 복합재료 프로펠러는 자체 제작하였다. CONTUR 복합재료 프로펠러와의 성능 비교를 위하여 같은 형상을 갖도록 하였으나 날개단면에 대한 형상 정보를 구할 수 없어 Fig. 4에서와 같이 NACA66을 사용하였다.

Fig. 5에서와 같이 평직 및 일방향 유리 섬유강화 복합재료 프리프레그를 날개 단면의 두께 방향에 따라 재단하고 Fig. 6의 금형에 적층하는 압축성형 기법을 사용하였다. 0° 방향으로 평직 프리프레그를 배열한 경우의 Flex 02와 날개 양쪽 바깥은 평직 프리프레그를, 안쪽은 일방향 프리프레

그를 모두 0° 방향으로 배열한 Flex 03의 2가지 종류의 프로펠러 날개를 제작하였다(Figs. 7 및 8). Fig. 9에서와 같이 RP(rapid prototype)를 사용하여 프로펠러 허브와 날개 뿌리의 상호간섭을 점검하였으며 5축 NC 제어로 허브를 제작하였다 (Fig. 10).



Fig. 6 Molds for blade production

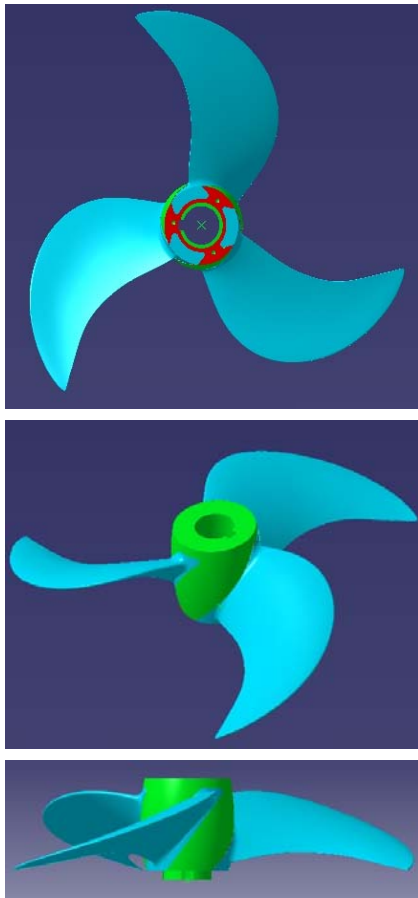


Fig. 4 Configuration of composite propeller design



Fig. 7 Blades produced by Glass/Epoxy composite materials



(a) Flex 02



(b) Flex 03

Fig. 8 Composite propellers Flex 02 and Flex 03

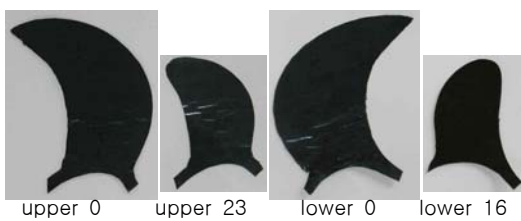


Fig. 5 Blade section cuttings using prepreg

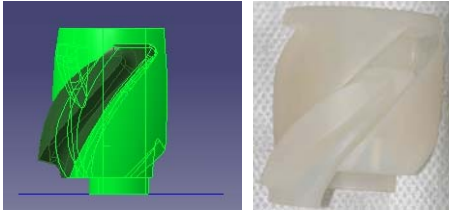


Fig. 9 Configuration and RP of propeller hub



Fig. 10 Configuration of hub

3. 복합재료 유연 프로펠러 성능 평가

자체 제작 복합재료 프로펠러 2개(Flex 02 및 Flex 03)를 MOERI의 공동수조에서 가시화, 효율 및 수중방사 소음 계측시험을 수행하였다. 균일 유입류 조건에서 고속카메라 및 실루엣 기법을 이용하여 날개 측면의 평균 변동량을 계측하고 Hydrophone를 사용하여 소음특성을 계측하여 이미 CONTUR 복합재료 프로펠러(Flex 01)에 대하여 수행한 결과와 비교 검토 하였다. 이미 MOERI에서는 MOERI 공동수조에 대한 배경 소음 및 BPF(blade passage frequency) 소음을 정량적으로 계측하는 기법을 정립한 바 있다(Seol et al. 2007).

앞에서 언급한 바와 같이 MOERI 공동수조에서 수행한 CONTUR 복합재료 프로펠러(Flex 01)의 프로펠러 단독시험(propeller open water test) 결과와 2개의 프로펠러(Flex 02 및 Flex 03)의 단독 시험 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 여기에 사용된 계수로서 추력 계수($K_T = T/\rho n^2 D^4$), 토크 계수($K_Q = Q/\rho n^2 D^5$), 프로펠러 단독효율($\eta_o = JK_T/2\pi K_Q$) 및 전진비(advance ratio, $J = V/nD$)이고, T , Q , V , n 및 D 는 각각 추력, 토크, 프로펠러 유입류 속도, 프로펠러 회전수(rps) 및 프로펠러 직경이다.

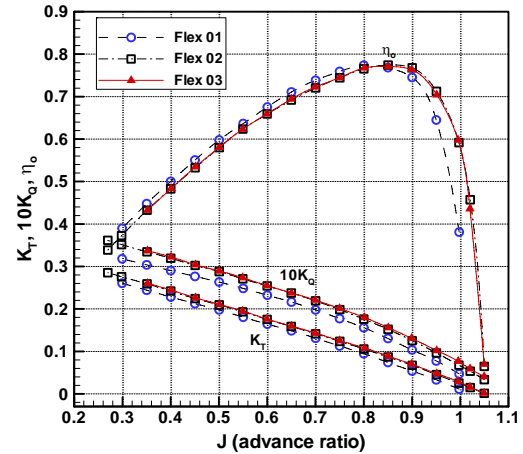


Fig. 11 Results of propeller open water test

결과에서 보는 바와 같이 프로펠러의 전진비(J)가 1에 가까워짐에 따라 3개의 프로펠러의 추력 계수는 거의 유사한 값을 보이고 있으나 전진비가 작아질수록 그 차이가 점차 커져가는 것을 알 수 있다. 토크 계수도 비슷한 경향을 보이고 있으며 전진비가 0.8 이하 영역에서는 Flex 02와 Flex 03의 토크 계수의 증가율(Flex 01의 값 기준)이 추력 계수의 증가율(Flex 01의 값 기준) 보다 커서 그 효율이 Flex 01에 비해 다소 감소하였다. 그러나 전진비가 0.8 ~ 0.9 사이에 오게 되면 추력 계수와 토크 계수 증가율이 유사하게 되어 모든 유연 프로펠러의 효율이 비슷한 값을 갖는다. 전진비가 0.9 이상의 영역에서는 Flex 02와 Flex 03의 토크 계수 증가율이 크게 감소하여 추진기 효율이 Flex 01에 비해 증가하는 경향을 보인다. 프로펠러에 미치는 부하가 크게 나타나는 낮은 전진비 영역($J < 0.5$)에서 Flex 02와 03에 미치는 부하가 Flex 01에 비해 커지게 되어 유연 프로펠러 날개의 평균 변동량(rake 변화)이 더 증가한 것으로 사료된다(토크계수 값 참조).

복합재료 유연 프로펠러에 대한 향후 연구 시 프로펠러의 작동 범위에 해당하는 전진비에서 토크와 추력 계수의 변화량이 적절히 조절되어 프로펠러의 효율을 극대화시키는 복합재료 유연 프로펠러 설계 방안 및 제조 방법을 심도 있게 고려하는 작업이 필요하다고 사료된다.

CONTUR 복합재료 프로펠러(Flex 01)의 가시화 시험은 프로펠러의 전진비를 변화시켜 프로펠러 날개에 걸리는 부하를 Fig. 12에서와 같이 0N에서 1,000N까지 변화시켰다. 평균 변동량은 Fig. 13에서와 같이 날개의 끝에서 가장 크게 나타났으며 최대 $3.43 \pm 0.14 \text{mm}$ 의 변동량이 날개의 끝에서 측정되었다(Hyun et al. 2008, Lee et al. 2009). 자체 제작 프로펠러 Flex 02 및 Flex 03도 프로펠러 날개에 걸리는 부하를 0N에서 1,000N까지 변화시켜 가시화 시험을 수행하였으며 각 프로펠러 날개 끝에서의 최대 변동량은 Fig. 14에서와 같이 각각 $4.79 \pm 0.11 \text{mm}$ (Flex 02) 및 $5.01 \pm 0.11 \text{mm}$ (Flex 03)으로 측정되었다.



(a) thrust = 0 N (b) thrust = 1,000 N

Fig. 12 Blade image of propeller Flex 01 with thrust variation in uniform flow (upper part) (Hyun et al. 2008, Lee et al. 2009)

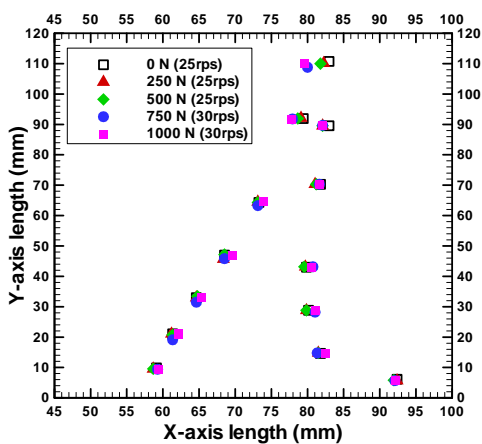


Fig. 13 Mean fluctuation of blade of propeller Flex 01 (upper part) (Hyun et al. 2008, Lee et al. 2009)

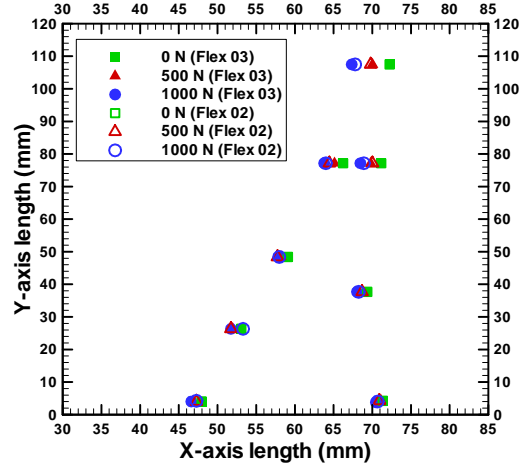


Fig. 14 Mean fluctuation of blade of propeller Flex 02 & Flex 03 (upper part)

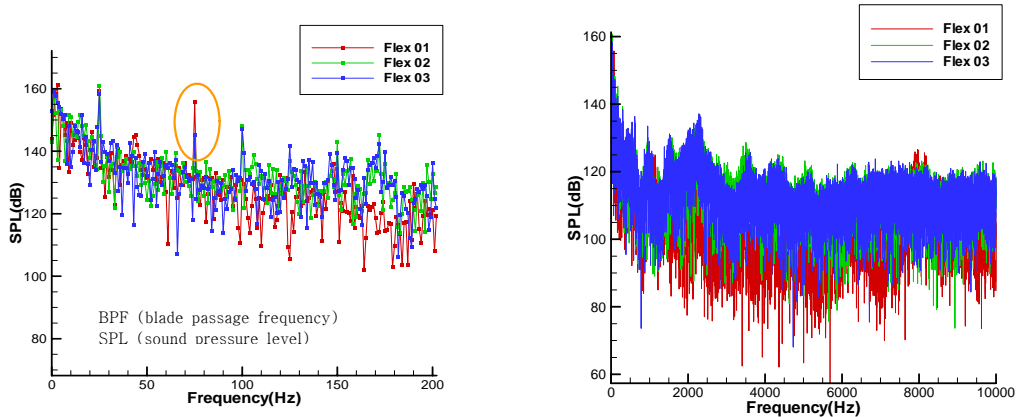
자체 제작 프로펠러 Flex 03의 경우 날개 끝에서 Flex 02 보다 0.2mm, CONTUR 복합재료 프로펠러(Flex 01)보다 1.6mm 정도 평균 변동량이 증가하였음을 알 수 있었다.

3개의 복합재료 프로펠러 Flex 01, Flex 02 및 Flex 03의 수중방사 소음계측은 Fig. 15에서와 같이 프로펠러 날개에 걸리는 부하 500N 및 1,000N에서 수행하였다. 추력 500N에서 1차 BPF(75Hz) noise는 Flex 01이 Flex 02와 Flex 03 보다 약 10dB 크게 나타났고, Flex 02와 Flex 03은 유사한 크기로 측정되었다. Broadband noise는 전체적으로 Flex 02와 Flex 03이 Flex 01 보다 높게 보였다. 추력 1,000N에서 1차 BPF(75Hz) noise는 추력 500N에서와 같이 Flex 01이 Flex 02와 Flex 03 보다 약 10dB 크게 나타났고, Flex 02와 Flex 03은 유사한 크기가 측정되었다. Broadband noise는 추력 500N에서와는 달리 3개의 프로펠러가 전체적으로 유사하게 보였다.

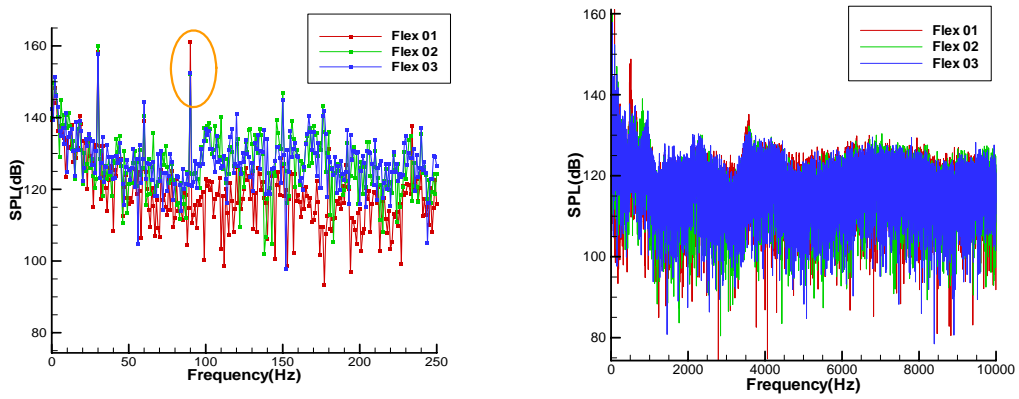
Fig. 16에서와 같이 3가지 복합재료 프로펠러의 각 날개 끝에서의 와류(vortex)에 의한 캐비테이션 강도를 비교하였다. 프로펠러 날개 끝에서의 와류에 의한 캐비테이션 강도는 Flex 03의 하류에서 상대적으로 약하게 나타났다. 복합재료 프로펠러 제작 시 직조 및 배열방식에 따라 캐비테이션 및 날개 끝에서의 와류성 캐비테이션 강도에 영향을

줄 수 있음을 확인할 수 있었다. 다양한 직조방식에 따라 복합재료 추진기 성능변화 및 소음특성

변화에 대한 체계적 연구에 응용할 수 있다는 가능성을 보여주었고, 검증자료로 부분적으로 사용

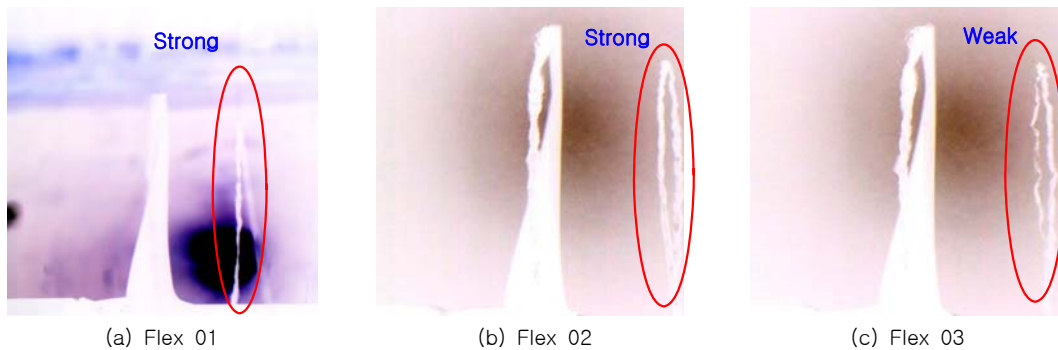


(a) T = 500 N, rps = 25



(b) T = 1,000 N, rps = 30

Fig. 15 Measurement results of radiation noise



(a) Flex 01

(b) Flex 02

(c) Flex 03

Fig. 16 Comparison of cavitation strength due to tip vortex

할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

복합재료 프로펠러에 대한 실험 자료를 구축하기 위하여 독일 AIR사에 설계·제작을 의뢰한 CONTUR 복합재료 유연 프로펠러를 구매하여 성능을 파악하였고, 2가지 종류의 유리 섬유강화 복합재료 프리프레그를 재단하고 금형에 적층하는 압축성형 기법을 사용하여 제작하였으며, 자체 제작한 2가지 종류의 복합재료 프로펠러를 사용하여 성능을 평가하고 상호 비교하였다.

- 자체 제작 프로펠러 Flex 03의 경우 날개 끝에서 Flex 02보다 0.2mm, CONTUR 프로펠러 Flex 01보다 1.6mm 정도 평균 변동량이 증가하였다.
- 프로펠러 후류영역에서 날개 끝 외류에 의한 캐비테이션의 강도가 Flex 02>Flex 01>Flex 03의 순으로 나타났다.
- 수중방사 소음은 Flex 02와 Flex 03의 1차 BPF noise가 약 10dB 정도 Flex 01보다 작게 측정되었다. 저주파 대역에서 소음이 감소한 것은 프로펠러 재료의 특성 변화에 기인한다는 것을 확인하였다.
- 본 연구진에 의해 제작된 2개의 복합재료 유연 프로펠러는 압축성형 기법으로 국내에서 처음으로 제작하였는데 큰 의의가 있으나 날개의 유연성을 고려한 역설계 과정을 거치지 않았으므로 추후 연구에서는 이러한 과정을 고려하여 제작하고자 한다.
- 본 연구에서의 결과들은 RANS 방정식을 사용한 유연 프로펠러의 성능해석 결과, Panel Method 등을 이용한 자체 해석 결과 및 자체 설계 프로펠러와의 비교를 위한 검증자료로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.
- 복합재료 유연 프로펠러 날개의 섬유 방향 및 배치에 따른 최적구조설계를 위하여 추후 연구에서 적층시편의 기계적 특성시험 및 충격시험과 더불어 손상을 고려한 수치 시뮬레이션 기법을 개발하고자 한다.

후 기

본 연구는 방위사업청/국방과학연구소에 의해 한국해양대학교에 설치된 수중운동체 특화연구센터(Underwater Vehicle Research Center)의 '탄성변형을 고려한 복합재 추진기 설계기법 연구' 과제(SM-42)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. KCA(Koera Composite Application)에서 복합재료 프로펠러를 제작하였습니다.

참 고 문 헌

- Gutowski, T.G., 1997, Advanced Composite Manufacturing, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Hyun, B.S., Nho, I.S., Shin, S.M., Lee S.G. and Paik, B.G., 2008, Investigation of the Performance Characteristics of the Flexible Propeller, MOERI Report.
- Lee, S.G., Hwang, J.O. and Byun J.H., 2009, "Material & Structural Characteristics of Composite Material Flexible Propeller," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 2, pp. 203-217.
- Mallick, P.K. and Newman, S., 1990, Composite Materials Technology: Processes and Properties, Oxford University Press, New York.
- Seol, H.S., Park, C.S., Kim, K.S. and Cho, Y.J., 2007, "Background Noise Analysis of the MOERI Cavitation Tunnel & Propeller BPF Noise Measurement," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 4, pp. 408-416.



< 이상갑 > < 변준형 >



< 백부근 > < 현범수 >