<응용논문>

DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.1.121

ISSN 1226-4873(Print) 2288-5226(Online)

# 선박용 프로펠러 후란주형 설계 및 가공 시스템 개발

박정환\*\*·정창욱\*\*·권용섭\*\*·강성필\*\* \* 영남대학교 기계공학부, \*\* 현대중공업 중앙기술원

# Development of Furan Mold Design and Machining System for Marine Propeller Casting

Jung Whan Park\*\*, Chang Wook Jung\*\*, Yong Seop Kwon\*\* and Sung Pil Kang\*\*

- \* School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.,
- \*\* Corporate Technology Institute, Hyundai Heavy Industries.

(Received October 12, 2015; Revised October 20, 2015; Accepted October 21, 2015)

Key Words: Marine Propeller(선박용 프로펠러), Furan Mold(후란 주형), Design(설계), Machining(가공)

초록: 본 연구는 선박용 프로펠러 주물 생산을 위한 후란주형 설계 및 가공 시스템을 개발하였다. 대형 선박용 프로펠러는 시멘트 혹은 후란 소재로 상형 및 하형 주형을 제작하고, 주조를 통해 소재를 제작한다. 이후 주물소재에 대한 일련의 기계가공 및 사상을 거쳐 제품을 완성한다. 기존 후란주형은 수작업을 통한 조형을 통해 제작되므로 세부 공정이 많아질뿐더러, 상당한 소재여유가 존재함으로써 기계가공 및 사상 공수가 증가한다. 이에 따라 후란주형의 제작 정밀도를 향상하고, 생산과정의 표준화 및 생산성 향상을 위해 설계 소프트웨어 및 6축 로봇을 이용한 후란주형 제작 시스템을 개발하였다.

**Abstract**: A furan mold design and machining system for marine propeller casting was developed. In general, a large marine propeller is produced by casting in a foundry, where the upper and lower molds are constructed of cement or other materials like furan. Then, the cast workpiece is machined and manually ground. Currently, furan mold construction requires a series of manual tasks. This introduces a fairly large amount of stock allowances, which require a considerable number of man-hours for later machining and grinding, and also increase the work processes. A mold design and off-line robot programming software tool with a six-axis robot hardware system was developed to enhance the shape accuracy and productivity. This system will be applied in a Korean ship building company.

# 1. 서 론

대형 선박용 프로펠러는 일반적으로 상형 및 하형 주형(mold)을 이용한 주조(casting)를 통해소재(workpiece)를 제작한다. Fig. 1은 합판 게이지 (gauge)를 설치하여 시멘트 또는 후란 주형(furan mold)(1)을 제작하고 주조를 통해 주물을 만드는 개략적인 과정을 보이고 있다. 이후 주물소재에 대한 일련의 기계가공(machining) 및 사상(grinding)

† Corresponding Author, jwpark@yu.ac.kr © 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers 을 거쳐 제품을 완성한다.<sup>(2)</sup>

기존 후란주형은 게이지로 목형을 설치하고 수 작업을 통한 조형을 통해 제작됨으로써 상당한 소재여유(machining allowance)가 존재함으로써 기 계가공 및 사상 공수가 증가한다. 또한 게이지 재단, 목형 제작, 조형 등 세부 공정이 많은 상황 이다. 이에 따라 후란주형의 제작 정밀도를 향상 하고, 생산과정의 표준화 및 생산성의 한계를 극 복하기 위한 후란주형 설계 및 가공 시스템 개발 이 필요하게 되었다.

본 연구는 로봇을 이용하여 후란주형을 직접 가공하는 자동화 시스템을 구축하였다. 선박용 프로펠러 가공과 관련한 기존 연구로는 로봇을 활용한 프로펠러 사상 및 가공,<sup>(7,8)</sup> 다축 NC 가공 (3~5축)의 공구자세 최적화<sup>(9~13)</sup> 등을 찾아볼 수 있으며, 후란 주형의 가공과 관련된 연구는 찾아보기 힘들다.

2장에서는 시스템의 구성과 전반적 과정을 살펴보고, 3장과 4장에서 주형 설계와 주형 가공을 다루고자 한다.

#### 2. 시스템 구성 및 개요

본 연구에서는 후란주형 상하형(upper and lower mold) 형상 설계 및 가공 자동화를 위한 시스템을 개발하였으며, 본 시스템의 개발에 따른후란주형 제작 방식의 차이점을 Fig. 2에 나타내었다. 기존 과정은 게이지 제작과 설치, 목형 제작, 조형 및 발형 과정을 거치는 반면[Fig. 2(a)], 제안된 과정은 표준 후란 피삭재(furan dummy block)를 가공하는 방식으로서[Fig. 2(b)], 수작업 및 세부공정 감소와 정밀도 향상이 가능하다.

본 연구에서 구축한 후란주형 설계 및 가공 시스템 구성을 Fig. 3에 보이고 있다. 6축 다관절로봇, 연장바(extension bar), 주축 스핀들(spindle), 절삭공구로 하드웨어를 구성하였다. 또한 주형설계 및 모델링, 로봇 가공 프로그램 생성 및 시뮬레이션(OLP: off-line programming)을 수행하는

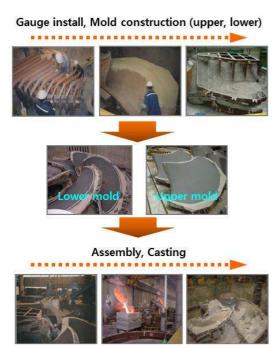


Fig. 1 Overall procedure of propeller casting construction

별도의 소프트웨어를 구현하였다. 참고로 Fig. 4는 스핀들 및 절삭공구 스펙을 나타내고 있다. 절삭공구는 황삭, 정삭, 잔삭 용도로 볼엔드밀(D100), 필렛엔드밀(D160R5), 평엔드밀(D40), 보스(boss)부위 가공용 공구(forming cutter, D520)로 구성된다.

주형 모델링 및 로봇 OLP 소프트웨어의 경우, Fig. 5에 주요 입력 데이터 및 작업 절차를 나타내었으며, Fig. 6은 각 모듈의 세부 기능을 보이고 있다. 프로펠러 CAD 모델과 주형 피삭재 모델을 입력으로 받아 프로펠러 필렛 형상 생성 및 주형 모델을 생성한다. 또한 공정계획 데이터(엑셀파일)를 입력으로 가공 프로그램 생성 과정을 거친다. 주형 설계와 가공 데이터 생성에 대한 상세한 절차는 3~4절에서 다루고 있다.

## 3. 주형 설계 및 모델링

3.1 피삭재 및 주형 설계 표준화 후란주형 제작과정을 표준화하기 위해 각 프로

# Pattern construction, Mold shaping, Molding (a) Standard dummy block Machining Lower Upper (b)

Fig. 2 Current and proposed method

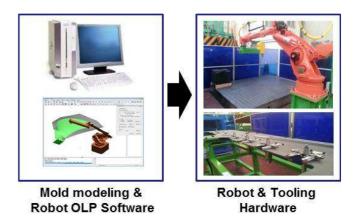


Fig. 3 System components for furan mold manufacturing

펠러 직경에 따라 3가지 형식의 피삭재(dummy block) 모델을 지원한다. 참고로 후란주형 공법을 지원하는 프로펠러 직경의 범위는 대략 6,000~

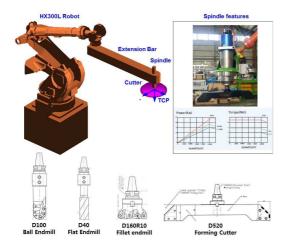


Fig. 4 Robot and tooling

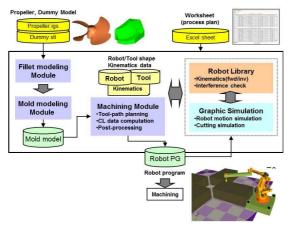


Fig. 5 Work flow of mold modeling and machining program generation

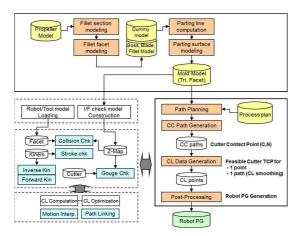


Fig. 6 Information flow of modeling & machining data generation

8,000mm이다. 선박용 프로펠러에 대한 주형 피삭재 모델의 위치선정 과정 및 피삭재 모델의 예를 Fig. 7에 보이고 있다.

주형모델의 경우, 상형의 압탕(riser), 하형의 스커트(skirt), 익탕로(runner), 다월(dowel)에 대해 표준 형상 및 수치를 지원한다. 참고로 Fig. 8은 주형의 압탕, 스커트 부위 표준화 수치에 따른 주형모델 일부를 프로펠러 모델과 함께 보이고 있다

#### 3.2 주형 모델링

■ 프로펠러 필렛 곡면 모델링

주형 모델을 만들기 위해서는 CATIA<sup>(3)</sup>에서 모 델링한 프로펠러 모델을 IGES<sup>(4)</sup> 파일로 변환하

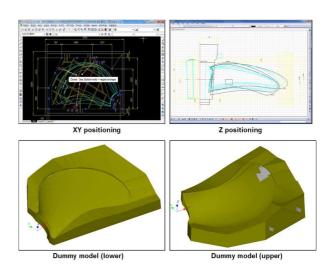


Fig. 7 Design and modeling of furan mold dummy block(raw stock)

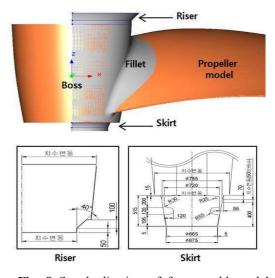


Fig. 8 Standardization of furan mold model

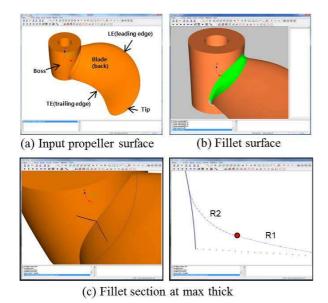


Fig. 9 Input propeller surface and fillet surface construction

여 읽어 들인다. 입력된 프로펠러 곡면은 보스 (boss)와 날개(blade) 단면경계 부위에 필렛 곡면 이 없는 상태이므로, 도면에서 지정한 필렛 반경 에 따라 필렛 곡면을 생성하여야 한다.

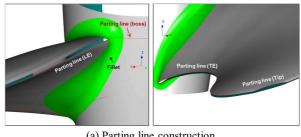
Fig. 9에 입력된 프로펠러 곡면과, 추가로 생성 된 필렛 곡면을 보이고 있다. 그림에 보이는 프 로펠러는 보스(boss)와 후진면(back side) 날개 (blade) 곡면이며, 전진면(face side) 날개 곡면은 아래쪽에 위치해 있다. 날개 곡면 경계곡선은 회 전방향에 따라 LE(leading edge), TE(trailing edge) 로 구분하며, 날개 바깥쪽 경계는 Tip 부위로 칭 하다.

Fig. 9(b)는 생성된 필렛 곡면을 보이고 있다. 선박용 프로펠러의 경우 각 필렛 단면이 두 개의 필렛 반경(R<sub>1</sub>>R<sub>2</sub>)으로 구성되는 경우가 있으며 Fig. 9(c)에 예를 보이고 있다.

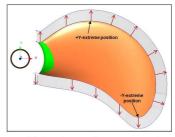
#### ■ 주형 분할면 생성 및 주형 모델링

상하형 주형 모델을 생성하기 위해 프로펠러 곡면 상에 분할 경계인 분할선(parting line)을 생 성하고, 분할선을 연장하여 분할면(parting surface) 을 생성한다. 본 연구에서는 Fig. 10(a)에서 보이 는 것과 같이 분할선을 생성하였는데, 필렛 곡면 위에서는 실루엣곡선(silhouette line(5))을 계산하였 다.

분할면은 분할선의 각 점을 ±Y 또는 법선 방 향으로 일정한 높이에서 피삭재 측면과의 경계까



(a) Parting line construction



(b) Parting surface construction

Fig. 10 Parting line and parting surface construction

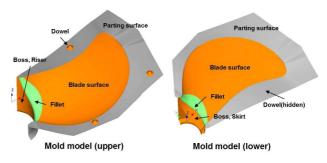


Fig. 11 Complete mold model (upper and lower parts)

지 연장하여 생성하였으며, Fig. 10(b)에 나타내었 다. 이와 같은 방법으로 생성된 주형 모델을 Fig. 11에 보이고 있다. 날개 면, 분할면, 보스, 압탕, 스커트, 필렛, 다월로 구성된다. 다월(dowel)은 상 하형 합형 과정에서 맞춤쇠 역할을 하며, 상형이 볼록한 형상을 가진다.

# 4. 주형 가공

#### 4.1 가공 공정계획

본 연구에서는 Fig. 11에 보인 영역에 대해 4가 지 절삭공구(Fig. 4)를 이용하여 후란 가공을 수 행한다. 가공공정은 크게 황삭가공(rough-cut), 정 삭가공(finish-cut), 잔삭가공(clean-up cut)으로 구분 하였으며, Fig. 12에 영역 별 적용공구, 가공방식, 가공방향 등의 특징을 정리하였다. 세부 공정 별 가공데이터 생성 방식은 4.2절에서 살펴보도록 한다.

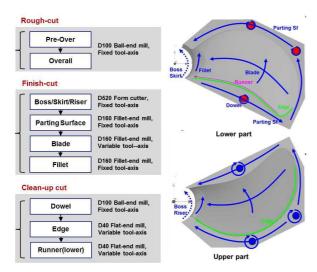


Fig. 12 Process plan for furan mold machining

공구경로(tool-path) 방향은 황삭의 경우 직선경로(Cartesian)이며, 에지(Edge) 및 익탕로(Runner)는 곡선 가공(curve cut), 이외에는 등매개변수형 (iso-parametric) 가공경로를 적용하였다.

절삭가공 중 공구축(cutter-axis) 방향은 고정축 (fixed-axis)와 변동축(variable-axis)로 구분하여 적용하였다. 고정축의 경우 공구축 벡터가 z축에 평행하거나(보스부위, 분할면, 다월), 일정한 고도 각(α)과 방위각(β)<sup>(6)</sup>을 가지는 경우(필렛부위), 또는 혼합형(황삭가공)으로 구분할 수 있다. 날개면의 경우는 전형적인 5축 가공을 적용함으로써 가공면의 커습 높이<sup>(5)</sup>를 최소화하였다. 에지 및 익탕로 가공 또한 5축 곡선 가공을 적용하였다.

공구이송속도(feed-rate)의 경우, 후란 재질의 절 삭성이 우수하기 때문에 100~250mm/sec 범위로 비교적 빠른 속도를 적용하였다. 이때 주축회전 속도(spindle RPM)는 2,000RPM(단, D520 forming cutter의 경우는 600RPM)으로 적용하였다.

#### 4.2 가공데이터 생성

## ■ 황삭 가공영역 계산

황삭가공은 전체 영역에 대해 여러 번에 걸쳐 일정한 절삭깊이(예: 50mm)로 가공을 수행한 후 지정된 가공여유(uncut allowance)를 남기도록 한 다. 이때 단계 별로 가공이 필요한 영역을 추출 하는 것이 필요하다.

Fig. 13(a)에 주형 모델(master model)과 피삭재 모델(dummy block)을 보이고 있으며, 주형 모델을 볼 엔드밀 공구 반경(R) 만큼씩 볼옵셋(ball-offset)한 단계 별 옵셋 곡면<sup>(7)</sup>을 계산한다(MO[k], k=0,1,2,...]).

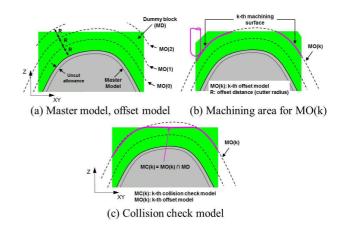


Fig. 13 Rough-cut machining area, collision model

MO[k]는 k번째 옵셋곡면을 의미한다. 이때 옵셋 곡면이 피삭재 모델을 완전히 포함하면 계산을 정지한다. 이제 k번째 단계의 가공영역은 Fig. 13(b)에보이듯이 해당 옵셋 곡면 MO[k] 중 피삭재에 포함되는 영역이 된다.

또한 k번째 단계에서 사용하는 충돌검사(collision check) 모델은 옵셋 곡면과 피삭재 모델의 교집합 (intersection), 즉 MC[k] = MO[k] ∩ MD로 계산할 수 있는데, Fig. 13(c)에 나타내었다. 여기서 MC[k]는 k번째 충돌검사 모델이며, MD는 주형 초기 피삭재 모델이다. 정삭가공에서는 가공여유가 더해진 주형 모델을 충돌검사 모델로 사용한다.

참고로 본 연구에서는 Z-Map 모델을 이용하여 Fig. 13의 방법을 구현하였으며, 가공 중 연장바및 로봇 기구부와 작업물 간의 충돌검사를 실시하였다.<sup>(7)</sup>

#### ■ 황삭 가공

황삭의 경우 경사가 급격한 보스, 필렛 부위일부분에 대한 Pre-Over 가공과, 전 영역에 대한 Overall 가공으로 구성된다. Fig. 14에 하형 주형 황삭 가공을 위한 공구경로 생성 예를 보이고 있다. Pre-Over의 경우 해당 부위 급경사를 고려하여 +X 방향의 상향가공(upward cutting)을 적용하였다. 가공 중 공구축 방향은 z축 또는 지정된고도각/방위각 (α,β)을 유지하도록 하였다. 또한 Overall 가공의 경우 절삭 깊이에 따른 가공영역 차이를 Fig. 14에 나타내었다.

#### ■ 정삭 가공

황삭가공이 완료되면 보스, 분할면, 날개면, 필 렛 곡면에 대한 정삭가공을 수행한다. Fig. 15에 해당 가공경로 예를 보이고 있다.

보스, 스커트(하형) 가공은 Fig. 4에 보인 D520 forming cutter를 사용하며, 공구축은 z축 방향으로 일정하게 유지하며 상향절삭을 적용하였다. 분할면의 경우, 3절에서 계산한 분할선( $CV_1$ )과 연장경계곡선( $CV_2$ )을 룰드곡면(ruled surface)로 계산하여 가공데이터를 계산한다. D160R5 공구로 3축가공을 적용하였다.

날개면 가공은 D160R5 공구로 5축 가공을 적용하였다. 가공경로는 날개면 형상곡면의 등매개 변수곡선을 따라가는 등매개변수형 가공이다. 필 렛 가공은 D160R5 공구로 상향절삭을 적용하였다.

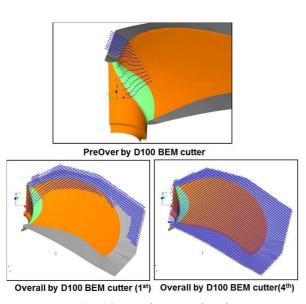


Fig. 14 Rough-cut tool-paths

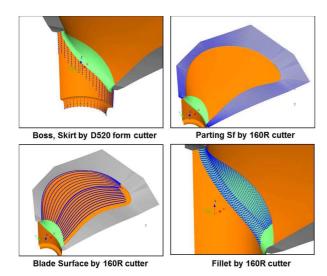


Fig. 15 Finish-cut tool-paths

참고로 5축 가공의 경우 가공데이터 생성 시 충돌 검사, 공구간섭 검사를 통해 간섭이 없는 최적 공구자세를 계산하도록 하였다.<sup>(2)</sup>

#### ■ 잔삭 가공

정삭가공이 완료되면 다월(dowel), 에지, 익탕로 가공을 수행하며, Fig. 16에 공구경로를 보이고 있다. 다월은 상하형 합형 과정에서 맞춤쇠 역할 을 하는 형상 부위로서 직경 120mm의 반구 형상 이다. D100 볼엔드밀을 이용하여 나선형(spiral)으로 가공하는 가공경로를 적용하였다.

에지 가공은 프로펠러 Tip 부위에서 보스까지 TE(trailing edge)를 따라가며 오목한 에지 부위를 가공하는 5축 곡선 가공이다. 필렛 반경이 없기 때문에 D40 평엔드밀을 사용한다. 익탕로는 주조 과정에서 주물의 이동에 중요한 역할을 하는 부위로서 하형 주형에만 적용한다. 가공경로는 에

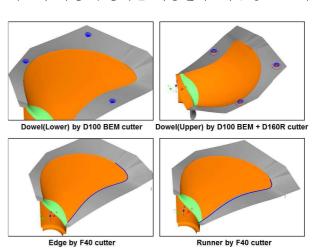


Fig. 16 Clean-up cut tool-paths

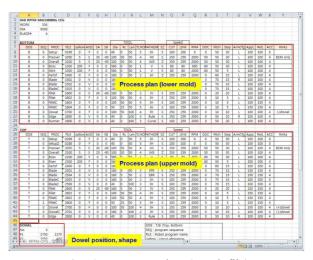


Fig. 17 Process plan (excel file)



Fig. 18 Machining result (lower part)

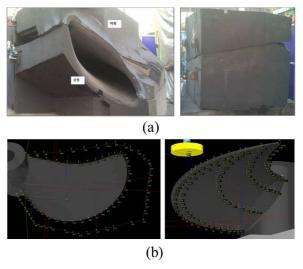


Fig. 19 Mold combination checking, coordinate measuring

지 가공과 유사하며, 보스 부위 쪽을 50mm 가량 과절삭함으로써 기능에 충실하도록 하였다.

#### 4.3 가공 및 합형 테스트

본 연구에서 구현한 소프트웨어 및 하드웨어 시스템을 활용하여 가공데이터를 생성하고 실 가공을 수행하였다. Fig. 17은 가공데이터 생성을 위한 공정계획 데이터(엑셀파일)를 보이고 있으며, Fig. 18에 실가공 결과를 나타내었다. 해당 주형의 경우 피삭재세팅 등의 준비시간을 제외한 순수 가공시간은 대략100min 가량으로 측정되었다.

상하형 가공 후 합형 테스트 및 로봇을 이용한 가공면 좌표값 측정 테스트를 수행하였으며, 계 측오차 및 가공여유를 고려하였을 때 문제가 없 는 것으로 판단되었다. Fig. 19에 합형 테스트 및 측정 테스트를 보이고 있다.

#### 5. 결 론

본 연구는 선박용 프로펠러 주물 생산을 위한

후란주형 설계 및 가공 시스템을 개발하고 적용하였다. 본 시스템 구축을 통하여, 목형제작과 설치에 필요한 비용 및 시간절약, 주형 설계 및 후란 피삭재 표준화를 통한 생산과정 표준화 및 관련 작업 간소화, 자동화된 가공을 통한 제작 정밀도 향상 등의 효과를 기대하게 되었다.

주형 제작공정 중 게이지 절단, 게이지 조립, 조형 및 게이지 분해 등의 목형 제작 세부 공정이 생략됨으로써 공정을 단순화 시켰으며, 주형제작 시간의 경우 대략 15% 정도 공수절감이 기대된다. 또한 주형 제작 오차를 감소시킴으로써 프로펠러 주물 기계가공 및 사상 공수 절감이 가능하게 되었다.

#### 후 기

본 논문은 현대중공업의 지원으로 수행된 연 구결과입니다.

# 참고문헌 (References)

- (1) Furan molding propeller construction, <a href="http://www.hhi.co.kr/">http://www.hhi.co.kr/</a>.
- (2) Park, J. W., Lee, J. G. and Jun, C. S., 2009, "Near Net-Shape Five-Axis Face Milling of Marine Propellers," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10 No. 4, pp. 5~12.
- (3) CATIA, http://www.3ds.com/.
- (4) Initial Graphics Exchange Specification, <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/IGES/">https://en.wikipedia.org/wiki/IGES/</a>.
- (5) Lee, K., 1999, Principles of CAD/CAM/CAE Systems, Addison Wesley, pp. 67~68.
- (6) Cho, H. U., Park, J. W. and Chung, Y. C., 2012, "Computation of Optimal Tool Length for 5-Axis Ball-Ended Milling of Molding Die," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 10, pp. 3097~3101.
- (7) Park, J. W., Cho, H. U., Chung, C. W., Lee, Y. S. and Jeon, D. J., 2012, "Modeling and Grinding Large Sculptured Surface by Robotic Digitization," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 7, pp. 2087~2091.
- (8) Lee, M. K., Choi, B. O. and Park, K. W., 1997, "Study on Propeller Grinding Applied by a

- High Stiffness Robot, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 14 No. 12, pp. 56~65.
- (9) Choi, B. K., Park, J. W. and Jun, C. S., 1993, "Cutter-Location Data Optimization in 5-Axis Surface Machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 6, pp. 377~386.
- (10) Vickers, G. W., 1977, "Computer-Aided Manufacture of Marine Propellers," *Computer-Aided Design*, Vol. 9, No. 4, pp. 267~274.
- (11) Lee, J. H. and Lee, C. S., 2002, "A Study on Geometric Modeling and Generation of 4-Axis NC Data for Single Setup of Small Marine

- Propeller," Korean Journal of Society of CAD/CAM Engineers, Vol. 7, No. 4, pp. 254~261.
- (12) Kuo, H. C. and Dzan, W. Y., 2002, "The Analysis of NC Machining Efficiency for Marine Propellers," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 124, pp. 389~395.
- (13) Ramos, A. M., Relvas, C. and Simoes, J. A., 2003, "The Influence of Finishing Milling Strategies on Texture, Roughness and Dimensional Deviations on the Machining of Complex Surfaces," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 136, pp. 209~216.