

# nT-T/n 단면형상을 갖는 프로펠러 뿌리 필렛의 구조 성능 분석과 설계방안에 관한 연구

유원선  
충남대학교 선박해양공학과

## A Study on the Structural Performance and the Design of Propeller Root Fillet Surfaces having nT-T/n section

Won-Sun Ruy  
Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The blade root fillets which have strong influences on the performance of propellers in the both structural and hydrodynamic points of view, are mechanical parts for smooth connection surface with a blade and a hub. A few related researches (Sabot, 1983; Kennedy, 1997) have noted that 3T-T/3 double radius section design would be suitable for reducing Stress Concentration Factor(SCF) and increasing Cavitation Inception Speed(CIS). In this paper, it is confirmed that this compound cross-section design has come close to the optimum solution in the shape optimization standpoint so that it could protect the propeller blade under the frequent and various loading cases. On that basis, we suggest the definite and simple fillet design methodology that has the cross-section with nT-T/n compound radius and elliptic shape which could sustain the given derivatives information as well as the offsets at the boundary and all inner region of the fillet surface. In addition, the result of design is presented in form of IGES file format in order to connect with NC machine seamlessly.

**Keywords** : Fillet surface design(필렛 표면 설계), Cavity Inception Speed(CIS, 캐비티 초생속도), Stress concentration factor(응력 집중 인자), Constrained least squares approximation method(구속된 최소자승 근사법)

### 1. 서론

두 면을 부드럽게 잇는 연결 표면(smooth transition connecting surface)은 많은 공학 제품에서 발생하며 그 연결 형태와 분야에 따라 각각 챔퍼(chamfer), 블랜딩(blending), 혹은 필렛(fillet) 등으로 다양하게 불린다. 프로펠러의 날개(blade)와 허브(hub 혹은 boss, flange, disk)를 연결하는 부분에도 연결 부위가 필요한데 이를 조선 분야에서는 필렛으로 호칭한다 (Carlton, 1994).

비록 프로펠러의 필렛 설계는 일체형 프로펠러의 생산 때문에 어쩔 수 없이 발생하는 부산 부위(by-product)로 여겨지기도 했지만, 최근 구조 역학적 관점에서 해당 부위에 발생하는 응력 집중을 경감(stress relief)시키기 위해 필렛 형상 단면을 규정하는 최소 반경(single radius type)을 허브와 날개가 만들어내는 단면의 최대 두께와 관련된 수치로 규정하거나 타원형(elliptic section type) 혹은 복합 반경(compound radius section type) 등

을 권장하는 규정이 각종 선급 (Lloyd's Register, 2007; Det Norske Veritas, 2015) 등에 등장한다.

한편, 유체역학적으로도 급속한 날개 정밀도의 개선에 따라 성능 관점에서 관심이 필렛 쪽으로 옮겨가고 있는데, Kennedy, et al. (1997)의 연구에서는 다양한 프로펠러 필렛 종류별로 캐비테이션(cavitation) 성능을 평가하였다. 그 결과, 대부분 날개앞날 (blade leading edge) 부근의 날개코드(chord)의 20% 정도의 구간에서 캐비테이션 최초 발생(cavity inception)이 진행되고 앞으로 설명될 3T-T/3 단면이 그 외 제안된 다른 모든 단면들보다 우수함을 제시하고 있다. 다만 간편한 실험을 위해서 평면 허브(planar hub)와 날개형 허브단면(NACA hub section)만을 대상으로 상용 프로그램인 Surfcam을 사용하여 NURBS(Non-uniform Rational B-spline Surface)를 생성한 것이 아쉽다.

본 연구의 시작은 Kennedy가 CIS 측면에서 우수하다고 제안한 표준 3T-T/3 단면 (Kim, et al., 2007)의 필렛 설계가 응력집중인자(stress concentration factor)측면에서 얼마나 우수하며, 실제

로 사용되는 일체형 프로펠러 생산에 적용 가능한 표면을 생성하는 방안에 관해서 알아보려고 함이었다. 참고로 Sabol (1983)은 그의 연구에서 표준 3T-T/3단면 필렛 설계는 Philadelphia Naval Shipyard에서 처음 제안되었다고 밝힌바 있다.

한편, 기계 역학 분야에서 특히 어깨 형상 필렛(shoulder type fillet)은 다단축(steped shaft)의 응력집중 완화를 위해 많은 연구 (Pilkey & Pilkey, 2008)가 진행되었다. 여기서, 응력집중이라는 것은 구조 요소에 외력이 가해졌을 때 형상이 급격하게 변화되는 곳에서 국부적으로 매우 큰 응력이 발생하는 것을 일컫는다. 본 연구에서는 비틀림, 굽힘 혹은 인장 하중에 표준 3T-T/3 단면 형상 어깨 타입 필렛이 응력집중 완화 측면에서 얼마나 효과가 있는지 형상을 변화해 가면서 검증하고자 한다. 또한 표준 3T-T/3을 포함한 다양한 단면형상을 가지면서 날개코드 방향으로 기준 두께를 달리하는 날개 뿌리 필렛을 B-spline으로 생성할 수 있는 방안을 제시한다. 이에 관한 연구로는 Sabol (1983)과 Filkins (1991) 등이 표준 3T-T/3단면을 가지는 B-spline 필렛 표면을 생성하였지만 날개와 필렛이 닿는 부위 그리고 필렛과 허브가 접하는 부위(boundary curves)의 연속성에만 집중된 내삽입법(interpolation)설계안이였다. 본 연구에서는 표면끼리의 접촉 부분은 물론이고 표면 중간 지역에서의 연속성까지 고려한 구속된 최소자승 근사(constrained least square approximation) 기법을 사용하여 경계뿐만이 아닌 표면 어떤 부분도 주어진 단면 설계안에 최대한 가까운 표면을 도출할 수 있는 방안을 제시한다. 더욱이 특징적인 부분은 복합 표면 형상에 필요한 다양한 점들을 최적화 문제로 전환하여 빠르고 정확하게 얻어내는 방안에 대해서도 기술하고자 한다.

## 2. 프로펠러 뿌리 필렛 설계방안

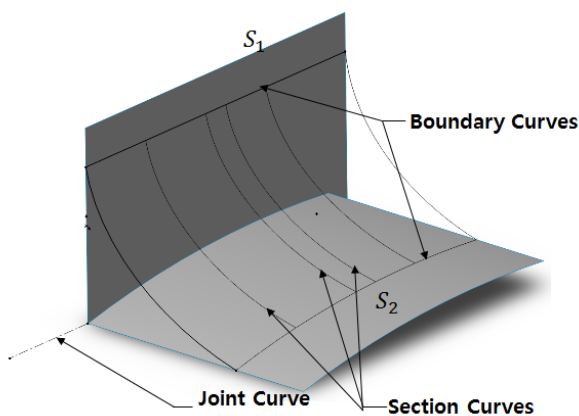


Fig. 1 The illustration fillet surface connecting two adjacent surface

### 2.1 전반적인 설계 방안

날개뿌리 필렛 표면 설계라 함은 보통 단면형상을 생성하고

날개코드 방향으로 기준두께의 변화량을 함수로 나타내는 과정을 거친다. 우선 Fig. 1과 같이 관련 용어를 정리해 본다.  $S_1$ 과  $S_2$ 는 필렛 표면이 분포해야 하는 대상 표면(the related surface, ex. a propeller blade and a hub)을 나타내며, 두 면이 동시에 접하는 이음매 곡선(joint curve)도 Fig. 1과 같이 정의한다. 프로펠러에서 이음매 곡선은 압력면 뒷날(Tailing Edge, T.E.)부터 앞날(Leading Edge, L.E.)을 통해 흡입면 T.E.까지 이어지는 곡선인데 이 곡선이 단면 형상(2.2절)에 시발점의 역할을 하며 두 면이 닿는 부분만 포함한다. 날개가 플랜지 혹은 디스크 위에 설치되는 가변피치 프로펠러(CPP)의 경우에는 특히 이음매 곡선이 프로펠러 뿌리 단면의 일부분만 포함하는 경우가 많으며 이를 꼭 고려해야 한다. 필렛 표면과 대상 표면이 맞닿는 곳을 Filkins (1991)는 연결 곡선(linkage curve)라 정의하고 최우선적으로 근사되고 연속성 유지를 위해 노력하였다. 본 연구에서는 경계 곡선(boundary curve)으로 정의하지만 따로 날개코드 방향으로 근사하거나 설계에 활용하지 않았으며 표면 설계 결과를 통해 확인할 수 있는 평가 과정에만 참여한다. 마지막으로 단면 곡선(section curve)들은 경계에서의 연속성(C0~C2)을 유지하면서 최대한 계획된 형상의 연속성(C0~C1)을 만족시키도록 구속된 최소자승 근사법(2.4절)을 활용한다.

### 2.2 단면 설계 방안

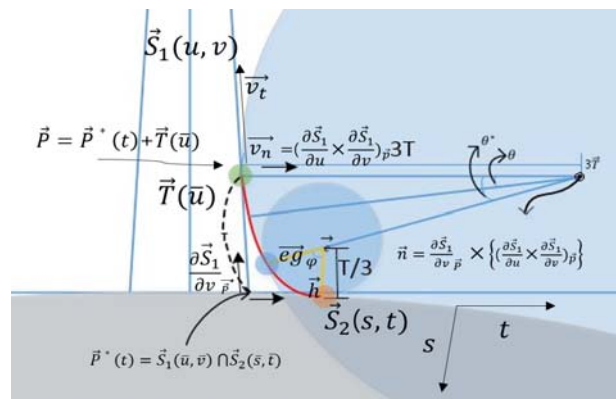


Fig. 2 Conceptual outline of 3T-T/3 fillet section

CIS관점에서 Kennedy et al. (1997)가 권고하였고 응력집중 경감관점에서는 본 연구가 권장하는 프로펠러 표준 뿌리 필렛 단면 형상인 3T-T/3에 관해서 알아본다. 가장 기본적인 필렛 단면은 단일반경(single radius) 타입이다. 설계와 생산이 비교적 쉽지만 비교적 큰 반경을 확보하지 못하면 큰 응력집중이 발생하며, 선박의 운항 기간 동안 반복하중을 받는 프로펠러로서는 피로파괴가 우려된다. 또한 프로펠러의 본연의 추진성능을 방해할 수 있으므로 반경의 크기에는 한계가 있다. 그에 비해 3T-T/3단면은 복합반경(compound radius) 혹은 이중반경(double radius) 단면으로 불리고 nT과 T/n 두 반경으로 단면을 형성한다. 두 반경이 접하는 부분에서는 유체 및 구조역학적 성능을 고려하여

C1 연속성 이상을 확보해야 한다. 여기서 n은 스케일링 비례 상수이고 T는 날개뿌리의 최대 두께에 해당하는 기준값에 해당한다. 날개코드 방향으로 다른 기준값(T)을 가지면 변동반경 단면 타입(variable radius section type), 반대 개념은 고정반경 단면 타입(fixed radius section type)이라 호칭한다. 다음은 단면 형성 과정을 차례대로 정리하고자 한다.

Step 1: 날개와 허브가 공유하는 이음매 곡선을 형성하는 과정이다. 우선 각각 식 (1)과 같이 B-spline surface으로 구축된 날개( $S_1(u, v)$ )와 허브( $S_2(s, t)$ )를 확보한다.

$$S_1(u, v) = \sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{m_1} P_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \quad (1)$$

$$S_2(s, t) = \sum_{i=0}^{n_2} \sum_{j=0}^{m_2} P_{i,j} N_{i,p}(s) N_{j,q}(t)$$

식(1)에서  $N_{i,p}(u)$ 는 p degree의 Nonuniform knot vector위에 정의된 Basis function이고  $P_{i,j}$ 는 제어점이며  $u, v$  방향으로 각각  $n+1, m+1$ 개씩 존재한다. 미리 정해진 분할된 구간  $\bar{u}_i = (u_{max} - u_{min})i/n$  에서 두 표면이 공유하는 점인  $(\bar{u}_i, v_i^*)$ 과  $(s_i^*, t_i^*)$ 를 찾아내는 기법은 Multi-Variate Newton-Raphson 방법을 활용한다. 이를 통해 탐색된  $\vec{P}(\bar{u}_i, v_i^*)$  집합을 통해 최소자승 근사법으로 이음매 곡선을 구축한다. 표면 정밀도를 증가시키기 위해서는 많은 수의 구간 분할이 필요할 수 있는데 이때 이음매 곡선으로 해당하는 점을 근사해서 찾는다. 이 과정에서 분할로 정해진  $\bar{u}_i$ 에서 근사된 점을  $\vec{P}_i$ 라 정의하고 Step 1의 역할은 마무리된다.

Step 2: 이음매 곡선의 매개 변수(t)를 유저가 정한 수로 분할하여 각각의  $\vec{P}_i$ 에서 날개의 v방향(허브에서 날개 끝(blade tip)방향)으로 T만큼 올라가  $\vec{P}$  점을 확보한다. 올라가는 경로설정은 다양한 방법이 있을 수 있겠지만, 본 연구에서는 허브에서 날개끝(blade tip)으로 향하는 날개의 v를 따라 올라가서 곡선 길이가 T가 되는  $\vec{P}(t)$  점을 Gaussian 구적법을 통해 얻는다.

Step 3: 각 단면의 기준면을 형성한다. 기준면 형성을 위해서는 해당 평면을 정의하는 그리고 상호 평행하지 않은 두 방향 벡터가 필요한데 본 연구에서는  $\vec{P}(t)$  점에 해당하는  $\vec{S}_1(\bar{u}_i, v_i^*)$ 에서의 법선방향 벡터  $\vec{v}_n$ 와  $\vec{S}_1(\bar{u}_i, v_i^*)$ 의 v 방향으로의 접선 벡터  $\vec{v}_t$ 와의 외적 연산으로 식 (2,3)과 같이 기준면 형상의 법선 벡터를 얻는다. 기준 면을 설정하는 방법은 다양하게 존재할 수 있지만, 본 연구에서는 되도록이면 날개의 형상을 기준으로 기준 면을 발생시켜 날개 뿌리에서 프로펠러 날개의 성능에 미치는 영향을 최소화시키려 노력하였다. 설계에 필요한 Step 3 이후에 발생하는 모든 점은 해당 평면에만 존재한다.

$$\vec{v}_n = \frac{\partial \vec{S}_1}{\partial u} \times \frac{\partial \vec{S}_1}{\partial v} \Big|_{\vec{P}}, \quad \vec{v}_t = \frac{\partial \vec{S}_1}{\partial v} \Big|_{\vec{P}} \quad (2)$$

$$\vec{n}_{section} = \vec{v}_n \times \vec{v}_t \quad (3)$$

Step 4: nT원의 중심점과 T/n원의 중심점 그리고  $\vec{S}_2$ 과의 접점 등 단면 형성에 필요한 다양한 점들을 찾는다. nT원의 중심점은 Step 2에서 구한  $\vec{P}$ 점에서 Step 3에서 구한  $\vec{v}_n$  방향으로 nT 크기만큼 이동하면 얻을 수 있다. 이점을  $\vec{nT}$ 라 정의한다.

$$\vec{nT} = \vec{P} + (nT)\vec{v}_n \quad (4)$$

$\vec{nT}$ 에서 Step 3에서 구한 평면 법선 벡터인  $\vec{n}_{section}$ 을 회전축으로  $\theta$ 만큼 회전한 점을 찾기 위해서는 식 (5)이 필요하다.

$$\vec{C}_{nT}(\theta) = \vec{nT} + (nT)\{\cos\theta\vec{a} + \sin\theta\vec{b}\} \quad (5)$$

$$\vec{a} = (\vec{P}(t) - \vec{nT}) / |(\vec{P}(t) - \vec{nT})|$$

$$\vec{b} = \vec{n}_{section} \times \vec{a}$$

$\vec{nT}$ 에서 출발하여  $\vec{C}_{nT}(\theta)$ 이르는 벡터를 구하면, 다음과 같은  $\theta$ 함수의 점을 획득할 수 있다.

$$\vec{M}(\theta) = \vec{nT} + \frac{n^2 - 1}{n}(nT)\{\cos\theta\vec{a} + \sin\theta\vec{b}\} \quad (6)$$

$\vec{M}(\theta)$ 은 T/n원의 중심(Fig. 2의  $\vec{c}$ )을 찾고 nT원과 T/n원의 접점( $\vec{e}_g$ )을 찾는데 중요한 역할을 한다.  $\theta$ 의 값을 변화시켜 가면서  $\vec{M}(\theta)$ 과 허브와 유클리안 거리가 T/n가 되는  $\theta^*$ 를 Multi-Variate Newton-Raphson 방법을 이용해서 찾을 수도 있고 이를 통해 원하는 두 점( $\vec{e}_g, \vec{c}$ )을 확보한다. 위 과정은  $\vec{M}(\theta)$ 에서  $\vec{S}_2(s, t)$ 사이의 거리가 T/n이 되는  $\theta, s, t$ 를 찾는 과정이므로 자연스럽게 허브와의 접점( $\vec{h}$ )도 찾을 수 있다. 언급된 일련의 과정에서 요구되는 계산 비용이 과도하여 본 연구에서는 최적화 기법을 활용하여,  $\theta, \phi, s, t$ 를 한 번에 획득할 수 있는 방법을 고안하였으며 평균적으로 50%의 계산 비용 절감 효과를 얻을 수 있었다.

$$\min. f(\vec{x}) = \left| \vec{M}(\theta) + \frac{T}{n}(\vec{v}_n \cos\phi + \vec{v}_t \sin\phi) - \vec{S}_2(s, t) \right| \quad (7)$$

$$DV. \vec{x} = \{\theta, \phi, s, t\} \quad (8)$$

$$st. g_1(\vec{x}) = |\vec{M}(\theta) - \vec{S}_2(s, t)| > \frac{T}{n} \quad (9)$$

$$g_2(\vec{x}) = \{(\vec{eg}-\vec{c}) \times (\vec{h}-\vec{c})\} \cdot \vec{n}_{section} > 0 \quad (10)$$

$$g_3(\vec{x}) = \cos^{-1} \frac{(\vec{eg}-\vec{c}) \cdot (\vec{h}-\vec{c})}{|\vec{eg}-\vec{c}| |\vec{h}-\vec{c}|} - \theta > 0 \quad (11)$$

$\theta$ 가 변화하면서  $\vec{c}$ 와  $\vec{S}_2$ 위의 접점이 Step 3의 정해진 평면을 유지하면서 거리가  $T/n$ (식 (7), 목적함수)이 되는 설계 변수  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $s$ ,  $t$ 를 탐색하는 최적화 문제이다. 이런 조건을 만족하는 점들은 여러 곳에서 발견되는데 이를 배제하기 하고 원하는 형상을 확보하기 위해서 식 (9)~ 식 (11)과 같은 구속조건들이 필요했다. 상술하자면, 식(9)는 설정된 평면에서  $T/n$  원의 반경점과 허브와의 거리가 적어도  $T/n$  크기 이상으로 떨어져야 함을 의미한다. 구속조건 (10)은 점  $\vec{eg}$ 이 허브 아래쪽으로 치지는 현상을 방지하기 위한 식이다. 마지막으로 식 (11)은 각  $\phi$ 이 각  $\theta$ 보다 큰 값을 가지도록 하는 제한 조건이다.

Step 5:  $nT$ 원과  $T/n$ 원에서 매개변수인 각도를 변경해 가며 원하는 개수의 학습점(offset point)과 접선(tangential) 벡터를 획득한다. 접선 벡터를 찾는 과정도 식 (5)로부터 유도된 (12)으로 충분하다. 과정 1~5을 거치면, 필렛 표면을 만들기 위한 모든 학습점과 접선벡터를 획득할 수 있다. 이를 이용하여 구속된 최소자승 근사기법으로 결과 표면을 획득할 수 있다. 식 (12)는 Piegl and Tiller (2003)의 원을 B-spline를 통해 근사하는 법을 참고하였다. 식 (13)에서 Scale factor는 두 원의 연결점에서의 접선 벡터의 값을 일치시키기 위해서 조정된 값이다.

$$\frac{d}{dt} \vec{C}_{nT}(t) = (nT)(\theta_e - \theta_s) \{-\sin\theta \vec{v}_n + \cos\theta \vec{v}_t\} \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} \vec{C}_{T/n}(t) = s(T/n)(\phi_e - \phi_s) \{-\sin\phi \vec{u}_n + \cos\phi \vec{u}_t\} \quad (13)$$

where,  $\vec{u}_n = \frac{\vec{eg}-\vec{c}}{|\vec{eg}-\vec{c}|}$ ,  $\vec{u}_t = \vec{n}_{section} \times \vec{u}_n$ ,  
 $s = \text{scale factor}$

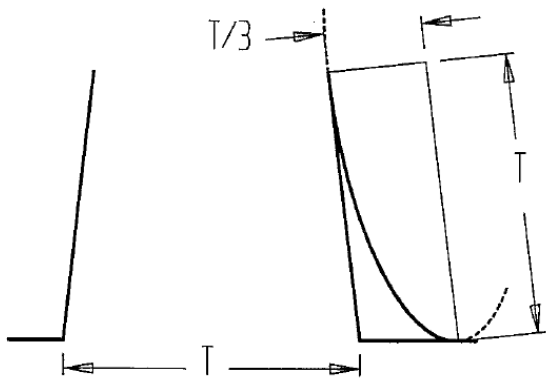


Fig. 3 Elliptical fillet definition (Kennedy, et al., 1997)

한편 위의 과정을 응용하면 타원형 단면(Fig. 3)도 생성할 수 있다. 타원형 단면은 이중 단면과 달리 이음부분의 무한 연속성이 보장되는 장점이 있는 반면, 2번째 대상표면(hub)을 뚫고 지날 수 있는 한계를 극복하지 못한다. 구체적인 설계 방안을 살펴보면, Step 1~3 과정은 동일하고 이중 단면 설계의  $nT$ 의 중심점에 해당하는 점을 구하기 위해서  $T/n$ 만큼  $\vec{v}_t$  방향으로 전진하고 이점을 중심으로 식 (14)과 같이 중간점을 확보한다는 차이점만 존재한다.

$$\vec{C}_{nT}(\theta) = \vec{nT} + (T/n)\cos\theta \vec{v}_n + T\sin\theta \vec{v}_t \quad (14)$$

### 2.3 날개코드 방향의 기준두께 함수 생성

필렛 단면을 완성하기 위해서는 2.2절에서 구했던 스패น(span section)방향의 정보도 필요하지만 날개코드방향의 정보도 필요하다. 날개코드 방향으로 제시되는 기준 두께를 변화시켜주는 형상 함수를 정의할 수 있다면 이를 ‘기준두께 가변 필렛 표면’(variant reference thickness surface)이라 정의한다. 날개코드 방향에 변화가 없는 필렛 단면은 흔히 상선의 고정피치프로펠러 (fixed pitch propeller, FPP)에서 사용되어 왔지만, 점차 필렛 표면 주변의 유체 입력변화에 관심이 증가되면서 변화가 생기고 있다. Sabol (1983)은 코드 중심에서 최대 두께를 가지고 L.E.와 T.E.에서 최대두께의 30%를 가지도록 식 (15)과 Fig. 4과 같이 다항식 형상함수를 제안하였다. 식 (15)의  $x$ 는 날개 압력면 뒷날에서 시작하여 날개 흡입면 뒷날까지 날개코드 방향의 곡선을 따라가는 좌표다. 한편, Patrikalakis and Bardis (1989)의 연구는 날개코드의 윗쪽의 정보만으로 최대 단면 두께를 얻어낼 수 있는 방법을 제시하였다.

$$f(x) = 2.1x^2 - 1.4x^3 + 0.3, 0 \leq x \leq 1, x = x(u) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} u \in [0, 0.25] &\Rightarrow x = 4u \\ u \in [0.25, 0.5] &\Rightarrow x = 4(0.5 - u) \\ u \in [0.5, 0.75] &\Rightarrow x = 4(u - 0.5) \\ u \in [0.75, 1.0] &\Rightarrow x = 4(1 - u) \end{aligned}$$

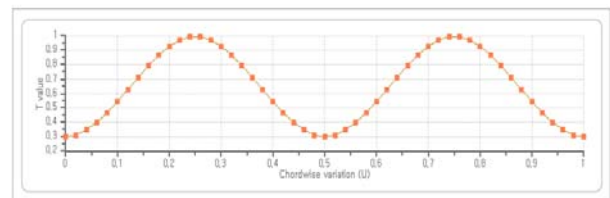


Fig. 4 Shape function suggested by Sabol

기준 두께 가변 필렛 표면의 유체역학적 성능평가가 진행 중이어서 어떤 형상 함수가 우월한지는 아직 미정이지만 본 연구에서는 다항식을 벗어나 무한 연속성을 가지는 다음과 같은 함수를 식 (16)과 Fig. 5와 같이 제안한다. 본 식의 장점은 연속성에 관한 것 이외에도 프로펠러 압력면과 흡입면의 비대칭성을 보장하

기 위해서 특정 구간에서의 기준 두께 값을 달리 설정할 수 있도록 고안된 점이다. 즉 유체성능을 극대화하는 프로펠러 필렛 설계의 설계변수로 흡입면용  $T_{min}$ ,  $T_{max}$ , 압력면용  $T_{max}^*$  등을 따로 설정할 수 있음을 의미한다.

$$f(x) = T_{max} e^{-\frac{(x-0.25)^2}{\sigma^2}} + T_{min} - T_{max} e^{-\frac{-0.25^2}{\sigma^2}}, \quad (16)$$

$$\text{if } x > 0.5, x \leftarrow x - 0.5, T_{max} \leftarrow T_{max}^*$$

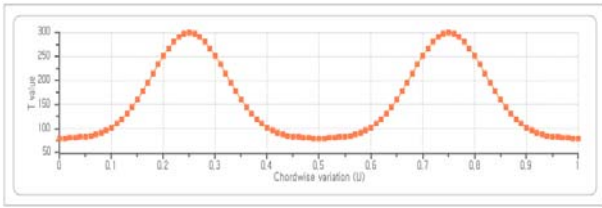


Fig. 5 Shape function of exponential distribution

## 2.4 구속된 최소자승 근사기법을 이용한 필렛 단면 설계 방안

주어진 오피셋 혹은 미분정보를 이용하여 곡선과 표면을 생성하는 방법 중에, 내삽법(interpolation)은 주어진 오피셋들을 정확하게 만족하는 방법 (Filkins, 1991), 즉 수치적으로 연립방정식을 푸는 형식이라면, 근사법(approximation)은 주어진 Basis function set를 통해서 가장 근접한 계수를 정해가는 과정이며 수치적으로 최적화가 필요하다. 본 연구에서는 Pieg and Tiller (1997)에서 자세히 소개된 “Weighted and Constrained Least Squares Curve Fitting”을 표면용으로 확장하여 강제적으로 만족시켜야 하는 단면 양 끝단의 오피셋, 접선벡터, 곡률 그리고 되도록 만족시키려는 표면 중간의 오피셋과 접선벡터를 고려한 필렛 표면 표현법으로 구성된다. Fig. 6과 7은 단면 근사를 날개 코드를 따라 500번수행하고 단면마다 17개의 오피셋과 미분정보를 획득하여 u, v 방향으로 각각 25개, 10개의 제어점들을 확보한 필렛 표면 설계의 결과를 보여준다. Fig. 7의 곡률은 로컬 형상 반경의 역수이며 곡률 반경이 줄어들면 곡률 값은 늘어나고 해당 색상은 검정(0.001)에서 파랑(0.01), 초록(0.1)을 걸쳐 빨강(1.000)으로 변경된다.

## 3. 필렛 설계의 성능평가

### 3.1 CIS관점에서의 필렛 성능 평가

Kennedy, et al. (1997)은 비록 평면 허브(planar hub) 혹은 날개 형상(foil shape) 허브들과 날개단면의 모양이 고정코드(constant chord), 무(無)캠버(uncambered), 꼬임 없는(untwisted) 프로펠러 날개들로 제한되어 있었지만, 다양한 날개 단면 형상을 대상으로 받음각(angle of attack)을 변경시키면서

캐비테이션 초생속도(CIS)에 미치는 영향을 실험하고 분석하였다. 결론적으로 3T-T/3 이중 단면 설계가 CIS 관점에서 상대적으로 가장 우수함을 밝히고 있으며, 이 경우 L.E.부터 0.2 코드 길이만큼 하류로 내려간 부근을 캐비테이션의 발생이 시작되는 곳으로 지목하고 있다.

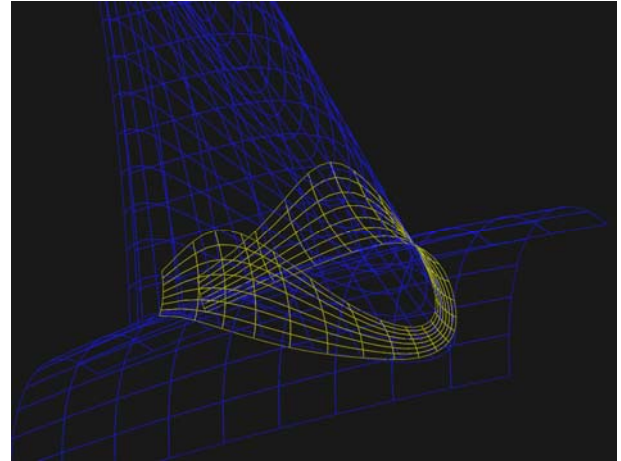


Fig. 6 Fillet surface of 3T-T/3 design

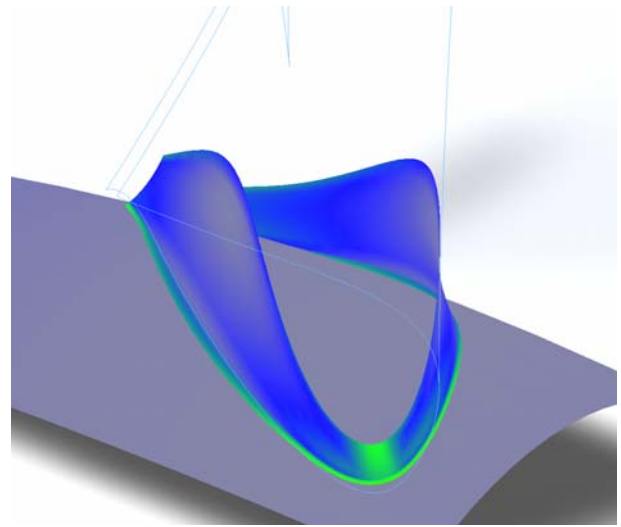


Fig. 7 Curvature distribution on the designed fillet surface

### 3.2 응력집중 경감 차원에서의 필렛 성능 평가

프로펠러 날개 뿌리 부근에 생성되는 필렛 표면의 존재 근거는 원래 CIS를 증가시키려는 것이 아니었고, 구조적 응력 집중 감소를 위해서 시작되었다. 하지만 아직까지 3T-T/3 필렛 단면 설계가 어떤 근거로 제시되었는지 밝힌 연구는 없다. 본 연구에서는 직접적인 프로펠러-필렛-허브의 정밀한 모델링을 통해 구조해석을 수행하지는 않았지만, Sonmez (2009)의 형상 최적화 연구에서 아이디어를 얻어 어깨 타입 필렛(shoulder fillet)의 단면 형상을 변화시켜 가면서 3T-T/3의 단면을 응력집중 관점에서 평가하였다.



프로펠러가 받는 응력이 비록 항복 응력을 충분히 만족한다 하더라도 비정상 하중의 빈도(number of cycles)가 높을 때 생기는 피로파괴를 고려해야 하므로 필렛 설계 시에 반드시 응력집중 인자( $K_t$ , 수식 (17) 참조)를 최소화 할 수 있도록 단면 설계를 수행해야 한다.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \quad (17)$$

여기서  $\sigma_{max}$ 는 관심지역에서의 발생된 최대 응력(maximum stress developed in the region)이고  $\sigma_0$ 는 평상 응력(nominal stress)이다. 필렛 표면에 발생하는 최대 응력을 평상응력 즉 단면 변화가 없는 보(beam), 봉(bar), 축(shaft) 등이 통상적으로 받는 응력과의 비를 의미한다.

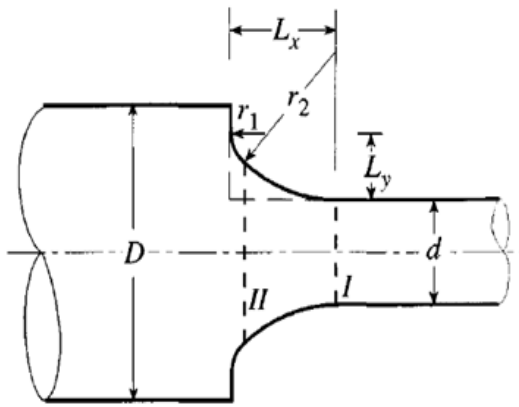


Fig. 8 Shouldered shaft with double radius fillet

어떤 단면을 가지는 필렛 단면이 가장 우수한  $K_t$ 를 가지는지 검증하기 위해서 다음과 같은 2가지 수치 실험을 수행하였다. 첫 번째는 Fig. 8의  $L_x$ 값을 증가시켜 가면서  $K_t$ 의 추이를 조사하였으며(Fig. 9), 두 번째는  $L_x, L_y$ 값을 고정시키고 단면의 형상을 변화시키면서  $K_t$ 의 추이를 조사(Fig. 11)하였다.

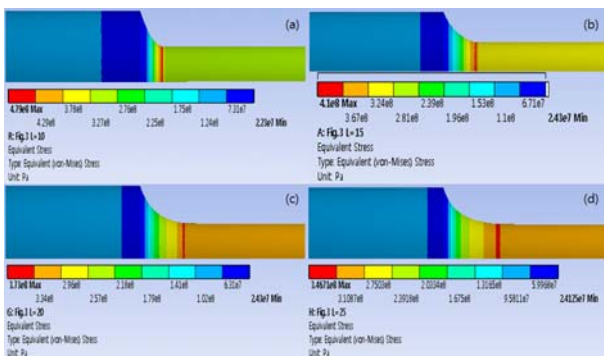


Fig. 9 Numerical experiments for  $L_x$  variation (tensile) (a)  $L_x = 10$  (b)  $L_x = 15$  (c)  $L_x = 20$  (d)  $L_x = 25$  (almost 3T-T/3 case)

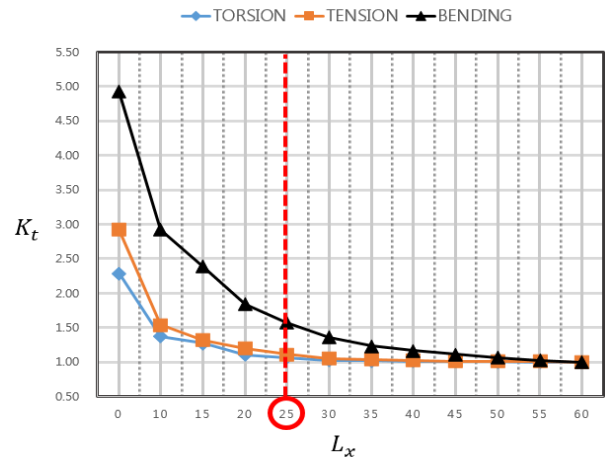


Fig. 10  $K_t$  vs.  $L_x$  for various loadings

\* 수치 실험 1:  $L_y$ 를 10 mm로 고정시키고  $L_x$ 를 0 mm(no fillet)에서 60 mm까지 증가시키면서 필렛 단면에 발생하는 인장(tensile, Fig. 9), 비틀(torsion), 굽힘(bending) 응력을 계산하였다. Fig. 10에서 확인할 수 있듯이, 비틀과 인장 하중이 작용하는 문제의 경우, 응력 집중 인자의 수렴을 1이라고 했을 때, 대략  $L_x = 25$ 에서 값이 수렴함을 볼 수 있다. 3T-T/3 필렛 단면의  $L_y$ 값이 대략 24.55정도에 해당하고 이는 해당 단면 설계가 응력 집중인자 차원에서도 꽤 의미 있음을 확인할 수 있다. 다만 굽힘 하중이 발생하는 경우,  $L_x$ 이 훨씬 큰 값에서 수렴함을 볼 수 있었고, 굽힘이 작용하는 3T-T/3 단면 필렛에 작용하는  $K_t$ 는 1.5 정도 되었다. 참고로 Fig. 9의 (a)가 단일 반경(single radius) 단면에 해당하고  $K_t$ 는 3.0 정도, 필렛이 없는 경우에는 5.0 정도 이므로 이러한 결과와 비교했을 때 충분히 많은 개선이 있었으며 가장 중요한 점은 프로펠러 날개의 성능을 고려하여 지나치게 큰  $L_x$ 를 설정할 수 없음을 인식해야 한다.

\* 수치 실험 2:  $L_x$ 는 25로 고정시키고 필렛 이중 반경 단면(nT-T/n)의 n값을 증가시키면서 인장, 비틀, 굽힘 응력을 계산하였다. 즉 단면의 직선모양에서 시작하여 점점 안으로 깎아 들어가는 단면들을 케이스로 설정하여 수치실험을 시도하였다.

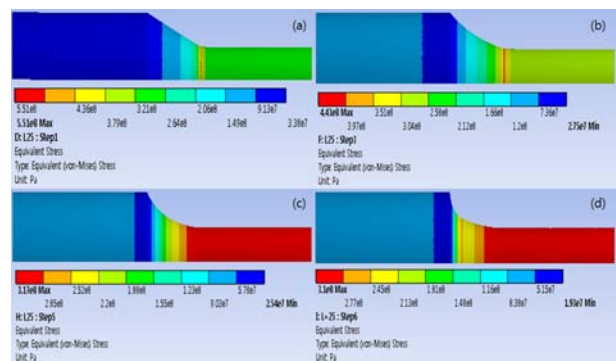


Fig. 11 Numerical experiments for section shape variation (tensile) (a) line, (b) case n = 1, (c) case n = 2, (d) case n=3

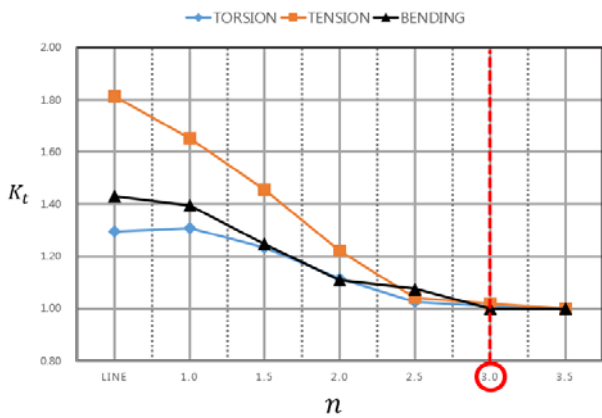


Fig. 12  $K_t$  vs. parameter  $n$  for various loadings

Fig. 9의 Case (d)와 Fig. 11의 Case  $n=3$  (d)가 3T-T/3 단면에 해당하는데 다양한 하중의 응력 집중인자 차원에서 수렴됨을 확인 할 수 있고, 결국 3T-T/3 이중 반경 단면이 구조 역학 측면에서도 우수한 형상임을 확인하였다.

#### 4. 필렛 설계 전용 프로그램 개발

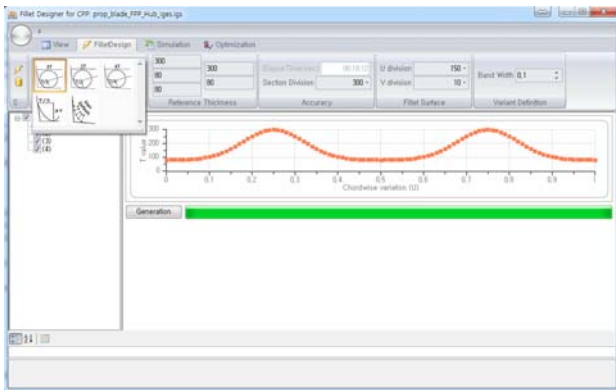


Fig. 13 Several parameters for the fillet design

주어진 프로펠러의 날개와 허브를 이용하여 필렛 표면을 생성 하고자하는 유저가 제시된 프로그램을 통해 결과를 얻기 위한 과정을 설명한다. 참고로 날개와 허브는 IGES 파일 형식으로 B-Spline 혹은 NURBS로 정의되어도 아무런 상관이 없다. IGES 파일 포맷은 다양한 상용 프로그램이 공통으로 지원하고 있으며, 이를 통한 NC 코드의 생성에도 유리한 특징을 가지고 있다. OpenGL, MS C#등으로 구축되었으며 생성된 필렛 표면을 포함한 모든 결과를 IGES로 출력할 수 있게 하였다. 필렛 표면 설계자는 IGES 파일을 통해 2.1절에서 설명된 대상 표면을 확보하고 필렛 단면 형상을 선택한다. 기본적으로 nT-T/n의 이중 반경 단면을 지원하고 타원형과 유저-정의 단면이 가능하다. nT-T/n에서  $n$ 은 2, 3, 4 중에 선택할 수 있게 하였다(Fig. 13). 다음 단계는 2.3절 말미에 설명된 압축면과 흡입면의 최대 기준 두께를 설정한다. 마지막으로 프로펠러 날개코드 방향으로의 분할 개수를 설정하고 근사에 활용될 제어점들의 개수를  $u, v$ 방향으로 지정하

면 모든 준비가 완료 된다(Fig. 13 참조). Fig. 14은 필렛 표면 설계가 종료된 후에 시각적으로 그 결과를 확인한다. 확인 후에 필렛 표면 단독으로 혹은 날개 및 허브 등의 기타 표면을 포함한 IGES 파일 포맷으로 Export가 가능하다.

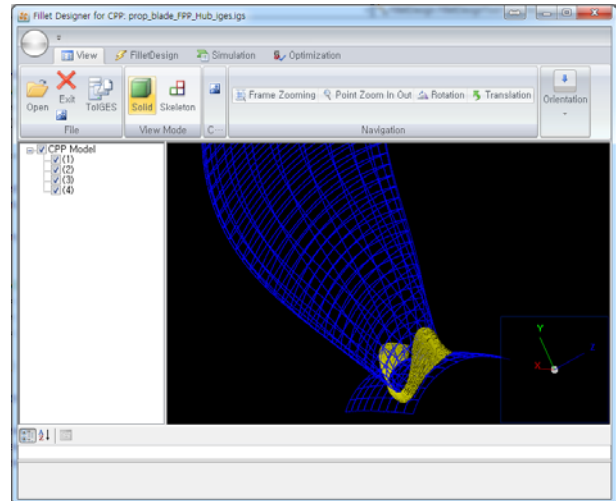


Fig. 14 Overview of the developed program

#### 5. 결론

본 연구에서는 프로펠러 날개의 뿌리 부분에 허브와 맞닿는 부위의 필렛 표면 설계를 위한 간단하고도 실용적인 방안을 제시한다. CIS관점에서 우수하다고 알려진 3T-T/3을 포함한 nT-T/n 단면 형태와 타원형 필렛 단면을 생성하고 날개코드방향의 함수를 설정하여 기준두께를 변화시킬 수 있게끔 하였다. 특히 nT-T/n의 이중 단면 근사를 위해서 양단 경계의 미분정보는 물론이고 곡 내부에서의 연속성도 확보할 수 있도록 하였으며, 단면 설계에 필요한 다양한 파라미터를 적절한 최적 공식화를 통해 짧은 시간에 단면에 획득할 수 있는 설계 절차를 제시했다.

CIS관점에서 우수한 단면으로 증명된 3T-T/3가 응력집중인자 차원에서도 최적점에 가까운 해임을 밝혔으며, 설계를 위해 개발된 SW는 계산에 필요한 모든 정보의 입출력은 IGES 파일 포맷으로 통일화하여 NC를 사용하는 절단 기기와의 연결이 원활토록 구축하였다.

본 연구에서는 필렛을 설계하기 위한 방안을 제시하고 있지만 동시에 설계를 위한 다양한 파라미터들도 소개하고 있다. 단면의 종류, 날개 코드방향으로의 L.E., T.E., Middle 날개코드 중심점에서의 기준 두께 등이 그 대표적인 예가 될 수 있다. 현재 진행되고 있는 연구에는 해당 파라미터의 최적 조합을 통해서 CIS 관점에서의 우수한 설계안을 도출하기 위해서 수치적으로는 고차 패널법의 활용, 실험적으로는 LCT(Large Cavitation Tank)에서의 캐비테이션 실험을 계획하고 있다.

#### 후기

본 연구는 민군기술협력사업 '선박용 CPP 캐비테이션 초생선

속 최적 설계기술 개발(UM14203RD2) 과제 지원으로 수행되었습니다. 마지막으로 본 논문 작성에 큰 도움을 주신 이 창섭 교수님께 감사드립니다.

## References

- Carlton, J.S., 1994. *Marine Propellers and Propulsion*. Butterworth-Heinemann, Ltd: Oxford.
- Det Norske Veritas, 2015. *Rules for Classification of Steel Ships, Part1, Chapter 2, Section 6, C.2.4*. Det Norske Veritas: Hovik, Norway.
- Filkins, P.C. 1991. *Algorithms for Blending Surface Generation*. Master's Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Kennedy, J.L. Walker, D.L. Doucet, J.M. & Randell, T., 1997. Cavitation Performance of Propeller Blade Root Fillets. *Trans. SNAME*,
- Kim, Y.C. Kim, T.W. & Suh, J.C., 2007. Gouging-free Tool-path Generation for Manufacturing Model Propellers. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(2), pp.198-209.
- Lloyd's Register, 2007. *Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 5, Chapter 7, 3.1.2*. Lloyd's Register of Shipping: London, UK.
- Patrikalakis, N.M. & Bardis, L., 1989. Offsets of Curves on Rational B-Spline Surface. *Engineering with Computers*, 5, pp.39-46.
- Piegl, L. & Tiller, W., 1997. *The NURBS Book*. 2nd Edition. Springer-Verlag: Berlin.
- Piegl, L. & Tiller, W., 2003. Circle approximation using integral B-splines. *Computer-Aided Design*, 35, pp. 601-607.
- Pilkey, W.D. & Pilkey D.F., 2008. *Peterson's Stress Concentration Factors*. 3rd. John Wiley & Sons, Inc: Hoboken, New Jersey.
- Sabol, W.J., 1983. *Analytic fillet development for marine propulsors*. *Tech. Memorandum File No. 83-01*. Pennsylvania: Applied Research Laboratory, The Pennsylvania State University.
- Sonmez, F.O., 2009. Optimal Shape design of shoulder fillets for flat and round bars under various loadings. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 223(8), pp.1741-1754.



유원선