

## 2차원 곡면형 전극에서 정전기 흡착력의 아이소-지오메트릭 해석

오명훈<sup>1</sup>·김재현<sup>2</sup>·김현석<sup>3†</sup>·조선희<sup>4</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 조선해양공학과 박사과정, <sup>2</sup>삼성전자 DIT센터 연구원,  
<sup>3</sup>한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 친환경연료추진연구센터 선임연구원, <sup>4</sup>서울대학교 조선해양공학과 교수

### Isogeometric Analysis of Electrostatic Adhesive Forces in Two-Dimensional Curved Electrodes

Myung-Hoon Oh<sup>1</sup>, Jae-Hyun Kim<sup>2</sup>, Hyun-Seok Kim<sup>3†</sup> and Seonho Cho<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

<sup>2</sup>Staff Engineer, DIT Center, Samsung Electronics, Hwaseong, 54150, Korea

<sup>3</sup>Senior Researcher, Alternative Fuels and Power System Research Center, KRISO, Daejeon, 34103, Korea

<sup>4</sup>Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

#### Abstract

In this study, an isogeometric analysis (IGA) method that uses NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) basis functions in computer-aided design (CAD) systems is employed to account for the geometric exactness of curved electrodes constituting an electro-adhesive pad in electrostatic problems. The IGA is advantageous for obtaining precise normal vectors when computing the electro-adhesive forces on curved surfaces. By performing parametric studies using numerical examples, we demonstrate the superior performance of the curved electrodes, which is attributed to the increase in the normal component of the electro-adhesive forces. In addition, concave curved electrodes exhibit better performance than their convex counterparts.

**Keywords** : NURBS basis, maxwell stress tensor, electrostatics, isogeometric analysis, electro-adhesive force

#### 1. 서론

정전기 흡착력(electro-adhesion)은 전기장을 통한 재료 사이의 정전기 인력효과(electrostatic attractive effect)를 의미한다. 정전기 흡착력은 실리콘, 목재, 유리, 콘크리트, 철, 플라스틱 등 다양한 기질(substrate)의 재료에 적용된다. 또한 기계적, 화학적 흡착에 비해서 기질에 손상을 거의 입히지 않는 파지가 가능하고, 가벼울 뿐만 아니라 적은 에너지로 작동하는 뚜렷한 이점들을 지니고 있다. 이러한 많은 이점들로 인하여 정전기 흡착장치는 다양한 분야에 활용되고 있다.

깎지형(interdigitated) 혹은 양극형(Bipolar type) 전극을 갖는 정전기 흡착장치는 일반적으로 가장 많이 활용되는 형태이다. 이 장치는 두 전극이 일정 거리를 두고 교차되어 배열되어 있는 형태로 구성된다. 이 형태는 하나의 전극을 가지는 단극형(mono-polar type)에 비하여 높은 출력을 가지고 있어서 현재까

지 다양한 분야에 활용되고 있다(Kanno and Usui, 2003). 양극형의 전극과 전극 사이의 공간은 전기 절연체로 채워지고, 전극의 윗면도 유전 물질층(dielectric layer)으로 절연된다. 그리고 정전기 흡착력은 정전기 흡착패드에 포함되어 있는 전극에 전압이 걸리면서 발생한다. 흡착패드와 기질이 가까이 붙을 때, 전도성 기질(conductive substrate)의 경우, 기질의 표면에서 전극의 전하와는 반대방향의 유도전하(induced charge)가 생기면서 인력이 발생한다. 또한 비전도성 기질(non-conductive substrate)의 경우 기질 내부에서 전기장에 의한 분극(polarization)이 형성되면서 이로 인한 흡착력이 발생하게 된다.

정전기 흡착력의 활용 가능성이 넓어짐에 따라 최근까지 실험, 해석, 설계까지 다양한 연구들이 이루어져 왔다. 실험적으로 구동 전압, 다양한 재료 등 여러 조건에 따른 흡착력이 연구되었다(Téllez *et al.*, 2011; Koh *et al.*, 2014). 그러나 이 연구들은 간단한 이론 모델에 기반하여 평행판 축전지로 근사하여 정

<sup>†</sup>Corresponding author:

Tel: +82-42-866-3977; E-mail: hskim85@kriso.re.kr

Received May 28 2021; Revised June 7 2021;

Accepted June 7 2021

© 2021 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

전기 흡착력을 추정하는 방식이었다. 맥스웰 방정식을 직접 풀어서 정전기 포텐셜(electrostatic potential)을 계산하고, 이를 활용하여 다양하게 정전기 흡착력을 계산하는 방법들이 개발되었다. 이 중에서 유한요소법은 다양한 정전기 흡착패드 설계에 대해서 해석이 가능하고, 엄밀성이 높은 해석방법이다. 더 나아가, 최근에는 정전기 흡착 응력을 높일 수 있는 최적의 정전기 흡착패드의 설계를 찾는 연구가 발표되었다. Sabermard 등(2014)은 전극의 1배치가 다른 몇 가지의 제시된 설계에 대하여 수치해석을 통해서 성능을 비교하고, 전극 사이의 간격이나 전극 폭과 같은 몇 가지 파라미터를 변화시켜 최적의 설계인자를 찾는 성과를 얻었다(Guo *et al.*, 2016). 그러나 이러한 연구들은 다양한 전극의 설계를 반영하지 못하는 한계를 극복하지 못하였다.

아이소-지오메트릭 해석법(Isogeometric analysis)은 근래에 활발히 연구되는 수치해석 방법들 중에서 기존의 유한요소 해석을 대체할 수 있는 잠재력을 지닌 기법으로 제안되었다(Hughes *et al.*, 2005). 이 방법에서는 수학적 모델을 해석하기 위하여 유한요소의 노드와 형상함수를 사용하지 않고, CAD에서 사용된 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 기저함수와 조정점을 응답해석에 그대로 적용하기 때문에 기하학적으로 엄밀한 형상 표현이 가능하며, 법선 벡터나 곡률과 같은 고차의 기하 정보를 정확하게 계산할 수 있다. 기존의 유한요소법은 요소들 사이에서  $C^0$  연속성을 가지고 있는 반면에 아이소-지오메트릭 기법은  $p$ 차 NURBS 기저함수에 대해  $C^{p-1}$  연속성을 가지고 있다. 그리고 아이소-지오메트릭 해석은 해석할 모델을 정확하게 표현할 수 있지만 기존의 유한요소법은 구분적 선형 보간법을 사용하여 모델을 나타낸다. 이러한 사실 때문에 기존의 유한요소법에서는 정확한 법선벡터와 곡률을 계산하기 어려운 반면 아이소-지오메트릭 기법은 이러한 항들을 정확하게 계산할 수 있다(Lee and Cho, 2013). 이것뿐만 아니라 아이소-지오메트릭 기법은 간단한 정밀화 기술과 기저함수의 차수를 쉽게 올리는 것 등의 여러 가지 장점들을 가지고 있다. 본 논문에서는 정전기 흡착패드를 구성하는 곡면형 전극의 엄밀한 해석을 위하여 아이소-지오메트릭 해석 기법을 도입한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 아이소-지오메트릭 기법의 NURBS 기저함수의 유도를 소개하고 3장에서는 정전기학 문제의 정식화와 맥스웰 응력 텐서를 다루며, 4장에서는 곡면형 전극의 모델링과 수치 해석을 통한 성능 분석을 다룬다.

## 2. 아이소-지오메트릭 기법의 NURBS 기저함수

NURBS는 B-spline 기저함수에 의해 구성되며 사용되는 노트 집합(set of knots)은 다음과 같이 정의된다.

$$\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+p+1}\} \quad (1)$$

이때,  $n$ 은 조정점(control point)의 개수이며,  $p$ 는 기저함수의 차수(degree)를 의미한다. B-spline 기저함수는 다음과 같이 재귀적(recursive) 방법에 의해 얻어진다.

$$N_{i,0}(\xi) = \begin{cases} 1 & \text{if } \xi_i \leq \xi \leq \xi_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (p=0) \quad (2)$$

$$N_{i,p}(\xi) = \frac{\xi - \xi_i}{\xi_{i+p} - \xi_i} N_{i,p-1}(\xi) + \frac{\xi_{i+p+1} - \xi}{\xi_{i+p+1} - \xi_{i+1}} N_{i+1,p-1}(\xi) \quad (3)$$

$p$ 차 기저함수를 이용하여  $p$ 차 B-Spline 곡선은 다음과 같이 선형 결합식으로 구성할 수 있다.

$$C(\xi) = \sum_{i=1}^n N_{i,p}(\xi) \mathbf{P}_i, \mathbf{P}_i \in R^d \quad (4)$$

여기서,  $\mathbf{P}_i$ 는  $d$  차원 실수 공간에서의 조정점을 나타낸다. 노트 집합을 2개로 구성하여 위의 과정을 반복하면 B-Spline 곡면을 만들 수 있다. 노트 집합을  $H = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{m+q+1}\}$ 로 사용하여 B-Spline 기저함수  $M_{j,q}$ 를 구성할 수 있으며, 이때 B-spline 곡면 식은 다음과 같다.

$$S(\xi, \eta) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(\xi) M_{j,q}(\eta) \mathbf{P}_{ij} \quad (5)$$

B-spline 곡면 기저함수를 이용하여 다음과 같이 NURBS 곡면 기저함수를 구성할 수 있다.

$$R_{i,j}(\xi, \eta) = \frac{N_{i,p}(\xi) M_{j,q}(\eta) w_{ij}}{\sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m N_{k,p}(\xi) M_{l,q}(\eta) w_{kl}} \quad (6)$$

$w_{ij}$ 는 가중치로서, 이것을 이용하여 곡선이나 곡면을 보다 더 다양하고 정밀하게 나타낼 수 있다. 이와 같이 NURBS 기저함수를 이용해서 NURBS 곡면을 만들 수 있다.

$$S(\xi, \eta) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(\xi, \eta) \mathbf{P}_{ij} \quad (7)$$

## 3. 정전기학(Electrostatics)의 정식화

Fig. 1의 정전기 시스템의 전체 영역  $\Omega$ 는 열린 영역  $\Omega_1$ (유전율  $\epsilon_1$ )과  $\Omega_2$ (유전율  $\epsilon_2$ )로 구성된다.  $E, \phi, \mathbf{n}$ 은 전기장 강도, 전기 포텐셜, 법선 벡터를 나타낸다.

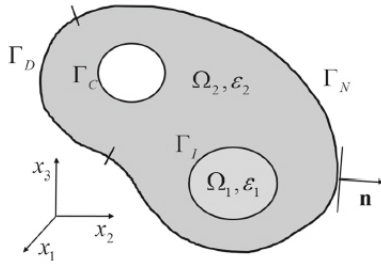


Fig. 1 Electrostatic system

전체 경계는 Dirichlet 경계  $\Gamma_D$ , Neumann 경계  $\Gamma_N$ , 전도체 (conductor) 경계  $\Gamma_C$ , 그리고 영역  $\Omega_1$ 과  $\Omega_2$  사이의 유전체 계면 경계  $\Gamma_I$ 로 구성되며 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = p \quad \text{on } \Gamma_N, \quad (8)$$

$$\phi = \xi \quad \text{on } \Gamma_D, \quad (9)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0 \quad \text{on } \Gamma_C, \quad (10)$$

$$\phi_1 = \phi_2, \quad \varepsilon_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} \quad \text{on } \Gamma_I, \quad (11)$$

여기서,  $p$ 와  $\xi$ 는 경계에서 지정된 값이며 정전기 문제에서  $p$ 는 대개 0으로 지정된다. 전도체 경계를 따라서 전기장은 사라지며 또한 전기 포텐셜은 일정하지만 특정값으로 지정되지는 않는다(floating 포텐셜 경계).

$$\phi = \hat{\phi} \quad \text{on } \Gamma_C, \quad (12)$$

자유전하가 존재하지 않고 유전율이 전체 영역에서 일정한 가정에서 지배 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \phi) = 0 \quad \text{on } \Omega, \quad (13)$$

제차 Dirichlet 경계조건을 만족하는 시험 함수  $\eta$ 를 사용하여 약 형식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_{\Omega} \varepsilon \nabla \phi \cdot \nabla \eta d\Omega = \int_{\Gamma} \varepsilon \nabla \phi \cdot \mathbf{n} d\Gamma, \quad \forall \eta \in \bar{W}, \quad (14)$$

여기서, 사용되는 해 공간 및 변분 공간은 다음과 같다.

$$W = \{ \phi \in H^1(\Omega) : \phi|_{\Gamma_D} = \xi \text{ on } \Gamma_D, \phi|_{\Gamma_C} = \hat{\phi} \text{ on } \Gamma_C \}, \quad (15)$$

$$\bar{W} = \{ \eta \in H^1(\Omega) : \eta = 0 \text{ on } \Gamma_D \} \quad (16)$$

제차 Dirichlet 경계조건과 전도체 경계조건 ( $\hat{\phi} \in W$ )을 만족하는  $\varphi \equiv \phi - \xi$ 에 대해서 식 (14)는 주어진  $\xi \in W$ 에 대해 다

음을 만족하는 해  $\varphi \in \bar{W}$ 를 구하는 문제로 쓸 수 있다.

$$a(\varphi, \eta) = l(\eta) - a(\xi, \eta) \equiv L(\eta), \quad \forall \eta \in \bar{W}, \quad (17)$$

여기서, 전기적 에너지 형식  $a(\varphi, \eta)$ 과 하중 형식  $L(\eta)$ 은 다음과 같다.

$$a(\varphi, \eta) \equiv \int_{\Omega} \varepsilon \nabla \varphi \cdot \nabla \eta d\Omega, \quad (18)$$

$$L(\eta) \equiv \int_{\Gamma} \varepsilon \nabla \phi \cdot \mathbf{n} \eta d\Gamma - \int_{\Omega} \varepsilon \nabla \xi \cdot \nabla \eta d\Omega. \quad (19)$$

식 (19)의 경계 적분항은 식 (15)-(16)의 경계조건을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} \varepsilon \nabla \phi \cdot \mathbf{n} \eta d\Gamma &= \int_{\Gamma_N} \varepsilon \eta \frac{\partial \phi}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Gamma_D} \varepsilon \eta \frac{\partial \phi}{\partial n} d\Gamma \\ &+ \int_{\Gamma_C} \varepsilon \eta \frac{\partial \phi}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Gamma_I} \varepsilon \eta \frac{\partial \phi}{\partial n} d\Gamma \\ &= \int_{\Gamma_C} \varepsilon \eta \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Gamma_I} \varepsilon \eta \frac{\partial \phi}{\partial n} d\Gamma, \end{aligned} \quad (20)$$

전도체 경계에서 포텐셜  $\hat{\phi}$ 을 결정하기 위하여 전도체 경계에서 전체 표면 전하  $q$ 는 0이 되어야 하는 전하 보존법칙(Delfino and Rossi, 2002)을 도입한다.

$$C = \int_{\Gamma_C} q d\Gamma_C = \int_{\Gamma_C} \varepsilon \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial n} d\Gamma_C = 0. \quad (21)$$

정전기학에서 맥스웰 응력텐서는 다음과 같이 유도된다.

$$\mathbf{T} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \otimes \mathbf{E} - \frac{1}{2} \varepsilon_0 (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{I}. \quad (22)$$

유전체의 물질이 바뀌는 경계에서, 경계의 법선방향 전기장의 변화가 상대 유전율만큼 발생하는데, 이는 분극된 전하량이 유전체의 경계에 분포하기 때문이다. 즉, 유전체의 경계에서는 전하가 존재하고, 전기력이 작용한다. 이것을 유전체의 표면에서 적분하여 물체가 받는 전기력을 계산할 수 있다.

$$\mathbf{F} = \iiint_{\Omega} \mathbf{f} dV = \iint_{\Gamma} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS. \quad (23)$$

## 4. 수치 예제

### 4.1 곡면형 전극의 모델링

Fig. 2와 같이 정전기 흡착패드(electro-adhesive pad)가 원통형

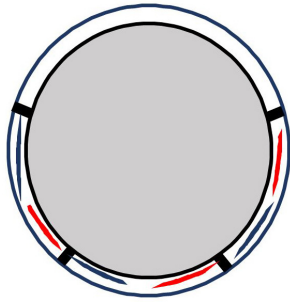


Fig. 2 Curved electrodes

물체 주위를 감싸는 문제를 생각하자. 흡착패드는 실리콘으로 +/- 전극을 감싼 형태로 설계되었다. 모든 예제에서 공기, 실리콘, 물체의 유전율은 각각 1.0, 4.2, 11.7로 구성되어 있으며, 구 동전압은 1000V이다.

원통형 물체 주위로 +/- 전극으로 이루어진 단위 셀의 수에 원통형 물체의 반지름  $r$ 이 결정된다.  $n$ 은 원주에 들어가는 단위 셀의 개수,  $\theta$ 는 한 단위 셀이 차지하는 중심각,  $l$ 은 단위 셀의 길이라고 할 때 다음의 관계를 갖는다.

$$r \frac{2\pi}{n} = r\theta = l \quad \text{즉} \quad r = \frac{l}{2\pi} n. \quad (24)$$

$r$ 이  $n$ 에 비례하므로  $n$ 을 증가시키며 반지름의 크기에 따라 흡착력의 변화를 살펴본다. 정전기 흡착력은 곡선 접촉면에서 구하는데, 법선 벡터의 영향이 크므로 엄밀한 기하형상을 고려하는 아이소-지오메트릭 해석이 강점을 갖는다.

#### 4.2 곡면형 및 평면 전극의 비교

정전기 흡착패드를 다룬 지금까지의 논문들은 무한 반복구조를 가정한 경우만 다루었으나 본 예제에서는 원통형 물체에서의 정전기 흡착력에 대한 엄밀한 기하 형상을 고려할 수 있는 아이소-지오메트릭 해석법을 도입한다. 정전기장 해석은 두개의 전극으로 구성된 정전기 흡착패드를 사용하였다. 흡착패드를 구성하는 +/- 전극의 길이와 간격은 1.1mm, 물체와 흡착패드 사이 공극은 0.1mm이다. 성능함수는 맥스웰 응력텐서  $\mathbf{T}_{ij}$ 를 사용한 식 (23)의 전기력으로 하였고, Fig. 3의 평면형 패드에서는 주기성을 이용하여 물체의 밑면에서만 적분을 하였지만, Fig. 4에서는 무한반복 구조가 아니므로 곡면을 따라 폐곡면에서의 적분으로 구하였다.

곡면형에서 전기력은  $15.6 \times 10^3 \text{N/m}$ 로서 평면형의  $13.2 \times 10^3 \text{N/m}$ 와 비교하여 약 18% 더 강하게 나타났음을 알 수 있다.

추가로 Fig. 5의 위로 볼록한 곡면형 전극에 대해 흡착력을 성분별로 분석한 결과, 이전 결과와 동일하게 전단 성분(녹색)

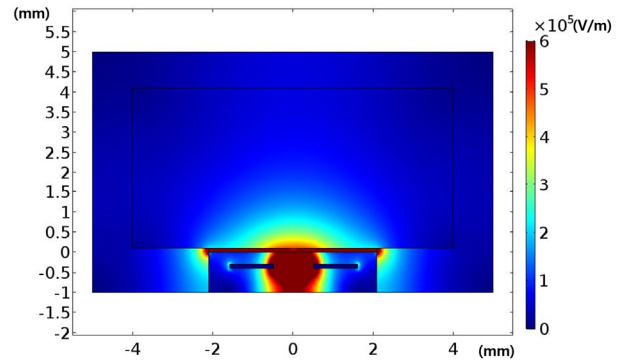


Fig. 3 Planar electrode

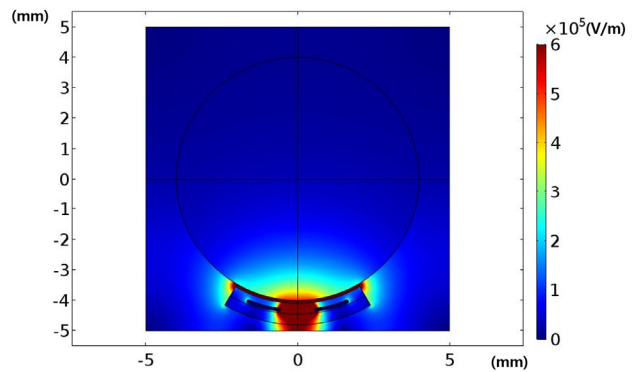


Fig. 4 Curved electrode

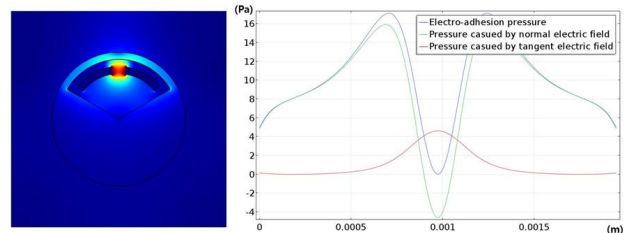


Fig. 5 Electro-adhesive force distribution and component analysis of convex type curved electrode

Table 1 Comparison of electro-adhesive force by electrode shape

	concave type	planar type	convex type
average adhesion force : $P = \left( \int_{\mathbf{r}} f_{dl} \right) / L$	26.15Pa	14.89Pa	9.24Pa
adhesion force per unit length : $\int_{\mathbf{r}} f_{dl}$	0.02908N/m	0.02308N/m	0.01801N/m
length : $L$	1.112mm	1.551mm	1.945mm

은 크지 않고, 법선 성분(청색)은 전기장의 크기 차이가 크고 거의 대부분의 적분 값을 차지함을 알 수 있다.

이상의 결과를 정리한 Table 1에서 전극 사이 거리가 가까워지는 아래로 볼록인 경우가 가장 성능이 좋고, 위로 볼록인 경우에는 성능이 가장 낮음을 알 수 있다.

4.3 곡면형 전극의 성능 분석

전극 사이의 간격 0.2mm, 전극의 폭 0.56mm, 전극이 곡면인 경우 식 (24)에서  $n$ 은 3으로 설정하고 반지름을 변경하면서 Fig. 6와 같이 성능을 분석하였다. 평균 흡착력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$P = \left( \int_{\mathbf{r}} f dl \right) / L = \left( \int_{\mathbf{r}} \frac{1}{2} (\mathbf{E}_n^2 - \mathbf{E}_t^2) dl \right) / L, \quad (25)$$

여기서,  $L$ 은 적분경계의 길이를 나타낸다. 반지름이 줄어들수록 단위 길이 당 정전기 흡착력이 급격히 증가하는데 이는 흡착패드와 물체 사이의 간격이 감소한 효과에 기인한다.

Fig. 7에서는 곡면과 평면에서 반복 구조의 유무에 따라 다음의 총 4가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

- (a) 곡면( $n=3$ ), 단위 셀
- (b) 평면, 단위 셀
- (c) 곡면( $n=3$ ), 전체 모델
- (d) 평면, 주기성 경계조건

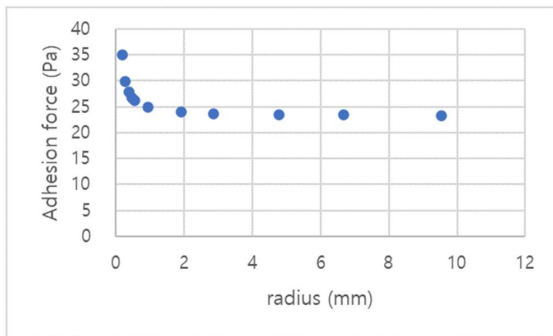


Fig. 6 Comparison of electro-adhesive force with different radius

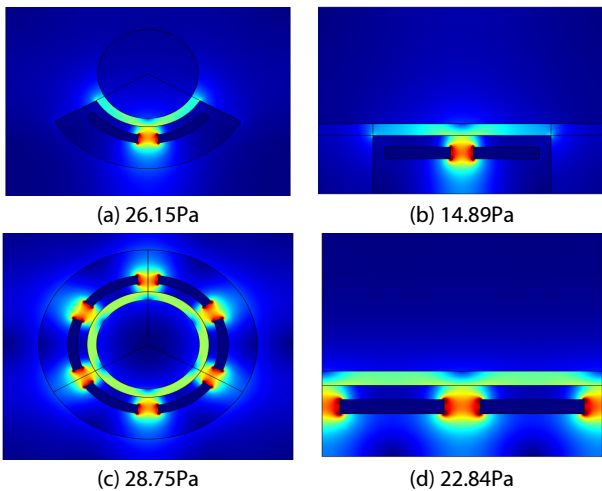


Fig. 7 Electro-adhesive force distribution comparison of four different cases

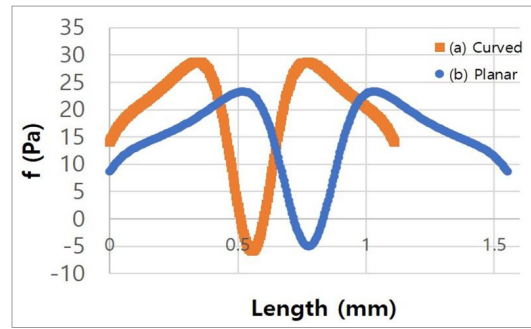


Fig. 8 Unit cell electro-adhesive force comparison

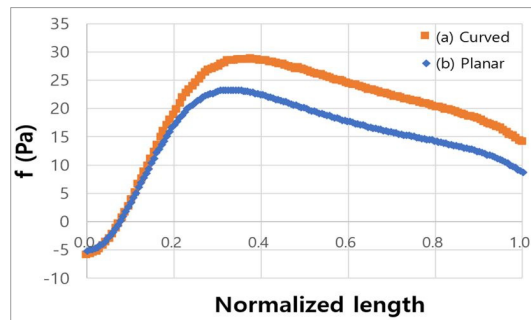


Fig. 9 Electro-adhesive force comparison with normalized length

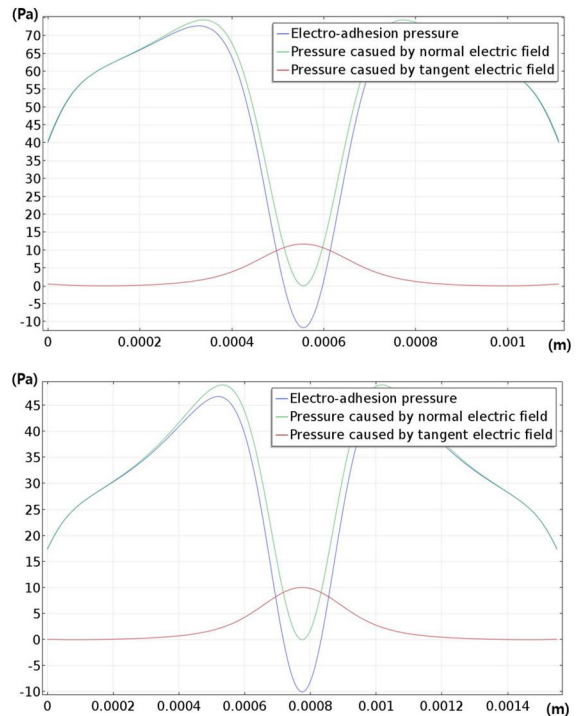


Fig. 10 Analysis of electro-adhesive force by component (Top: curved electrode, Bottom: planar electrode)

단위 셀의 경우 (a), (b)보다 반복구조 (c), (d)에서 더 큰 힘이 발생됨을 알 수 있다. (a)와 (b) 경우, 단위 길이 당 정전기 흡착력  $f$ 가 26.15Pa와 14.89Pa로 많은 차이가 나는 것을 확인하였고, 곡면형(a)는 평면형 (b)에 비해 75.6% 증가하였음을 알 수 있다. 여기서,  $f$ 를 전극 근처 구간에서 도시하면 Fig. 8의 그래프를

얻을 수 있다. (a)의 경우에는 구간이 짧고, 최고값이 더 큰 분포를 나타낸다.

단위 길이 당 정전기 흡착력  $f$ 는 식 (25)와 같이 적분값을 전체 길이  $L$ 로 나눈 평균값을 의미한다. 대칭인 구간을 반으로 자르고, 그래프  $x$ 축의 길이를 1로 정규화해서 다시 비교하면 Fig. 9와 같다. 곡면형 (a)의 힘이 거의 모든 구간에서 평면형 (b)보다 큰 값을 가지며, 곡면형 (a)는 평면형을 등갈게 만들면서 접촉면의 길이  $L$ 도 작아지며, 또한 두 전극 사이의 거리가 가까워지면서 곡면형 (a)의 전기장 세기도 더 커진 원인이 있는 것으로 보인다.

정전기 흡착력의 성분을 Fig. 10에서 일반적으로 분석하였다. 전단 성분(적색)의 경우, 전체 적분에서 유의미한 크기가 되지 않고 최고치의 차이도 크지 않지만, 법선 성분(녹색)은 전기장의 크기 차이가 크고 거의 대부분의 적분값을 차지하므로 정전기 흡착력의 차이는 법선 성분 전기장의 증가로 인한 것이라고 볼 수 있다.

## 5. 결론

곡면형 전극의 정전기 흡착력을 구하는데 법선 벡터의 영향이 크므로 엄밀한 기하형상을 고려하는 아이소-지오메트릭 해석을 채택하였다. 수치 예제를 통한 파라미터 연구를 수행하여 평면형보다 곡면형 전극의 흡착력이 더 좋은 성능을 가짐을 알 수 있다. 정전기 흡착력의 성분 중 법선 성분은 곡면 형상에 따른 전기장의 증가로 인한 것으로 파악되었다. 곡면형 전극에서도 전극과 물체 사이의 거리가 가까워지는 아래로 볼록인 경우가 가장 성능이 좋고, 위로 볼록인 경우에는 평면형보다 성능이 낮음을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부 국가R&D사업 “전기추진 차도선 및 이동식 전원공급시스템개발(2/5)”로 수행된 연구결과입니다(PMS4700).

## 요 지

본 논문에서는 정전기 흡착패드를 구성하는 곡면형 전극의 기하학적 엄밀성을 고려하기 위해 정전기 문제에 대하여 CAD에서 사용하는 NURBS 기저함수를 직접 사용하는 아이소-지오메트릭 해석 기법을 도입하였다. 정전기 흡착력을 곡선 접촉면에서 구하는데 법선 벡터의 영향이 크므로 엄밀한 기하형상을 고려하는 아이소-지오메트릭 해석이 강점을 갖는다. 수치 예제를 통해 곡면과 평면에서 반복 구조의 유무에 따른 파라미터 연구를 수행하여 곡면형 전극의 흡착력이 좋은 성능을 가짐을 보였다. 정전기 흡착력의 성분을 분석하였을 때 정전기 흡착력의 차이는 법선 성분 전기장의 증가로 인한 것으로 파악되었다. 결론적으로 곡면형 전극에서도 전극 사이 거리가 가까워지는 아래로 볼록인 경우가 가장 성능이 좋고, 위로 볼록인 경우에는 성능이 가장 낮음을 보였다.

**핵심용어** : NURBS 기저함수, 맥스웰 응력텐서, 정전기학, 아이소-지오메트릭 해석, 정전기 흡착력

## References

- Delfino, F., Rossi, M.** (2002) A New FEM Approach for Field and Torque Simulation of Electrostatic Microactuators, *J. Microelectromechanical Syst.*, 11(4), pp.362~371.
- Guo, J., Bamber, T., Chamberlain, M., Justham, L., Jackson, M.** (2016) Optimization and Experimental Verification of Coplanar Interdigital Electroadhesives, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 49(41), p.415304.
- Hughes, T.J.R., Cottrell, J.A., Bazilevs, Y.** (2005) Isogeometric Analysis: CAD, Finite Elements NURBS, Exact Geometry and Mesh Refinement, *Comput. Method Appl. Mech. & Eng.*, 194, pp.4135~4195.
- Kanno, S., Usui, T.** (2003) Generation Mechanism of Residual Clamping Force in a Bipolar Electrostatic Chuck, *J. Vac. Sci. & Technol. B: Microelectron. & Nanometer Struct. Process., Measurement, & Phenom.*, 21(6), pp.2371~2377.
- Koh, K., Sreekumar, M., Ponnambalam, S.** (2014) Experimental Investigation of the Effect of the Driving Voltage of an Electroadhesion Actuator, *Mater.*, 7(7), pp.4963~4981.
- Lee, S.-W., Cho, S.** (2013) Isogeometric Shape Design Sensitivity Analysis of Mindlin Plates, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 26(4), pp.255~262.
- Sabermad, V., Hojjat, Y., Hasanzadeh, H.** (2014) Study of Parameters Affecting the Electrostatic Attractions Force, *Int. J. Electr. Comput. Electron. Commun. Eng.*, 8(11), pp.1628~1631.
- Télez, J.P., Díaz, J.K., Menon, C.** (2011) Characterization of Electro-Adhesives for Robotic Applications, *2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, IEEE.