

가정 자로법에 의한 전자기 흡입력의 촉각궤환장치의 최적 설계

An Optimum Design of the Tactile Feedback Device using the Electromagnetic Attractive Force by the Probable Flux Paths Method

이정훈, 장건희, 최동훈, 박종오, 이종원

(Jung Hoon Lee, Kun Hee Jang, Dong Hoon Choi, Jong Oh Park and Jong Won Lee)

Abstract : In teleoperation, it is important for an operator to feel as if he really were in a distant place. To realize this objective, the various information from a remote site must be presented to the operator. Even though tactile information is very important to efficiently execute a task, it is not yet sufficiently provided for the operator. In this paper, we propose the new mechanism that can provide the more dexterous tactile information to the operator. This device utilizing the electromagnetic force is designed to be compact and light enough to be attached to the fingerpad, and designed to be controlled continuously. The magnetic circuit is derived by the probable flux paths method in order to take forces at any given dimension. An optimization technique is also proposed to maximize the tactile force that humans can perceive under the same conditions. The objective function is formulated as maximizing displacements indented on the fingerpad, considering the mechanism of human tactile perception. The optimization formulation is subject to the geometric and rising temperature constraints in the coil. It is demonstrated that, by optimization, the tactile force increases by 24%, compared with that obtained from the initial design.

Keywords : telerobot, optimum design, electromagnet, virtual reality, tactile feedback device, probable flux paths method

I 서론

방사능환경, 화학환경, 심해산업, 폐기물처리, 우주공간 등의 극한환경 등에 사용되는 원격조종로봇(teleoperation robot)은 생산 현장에 있는 산업로봇과는 달리 인간이 직접 능동적으로 제어하기 때문에 변화하는 외부환경에 효과적으로 대처하며, 복잡한 작업을 수행할 수 있다. 따라서 작업 수행 능력의 우수성 때문에 인간이 직접 수행하기에는 위험이 따르는 극한 환경에서의 작업이나 작업이 수행되는 장소와 작업자의 위치가 떨어져 있는 원격환경에서의 임무 수행에 세계적으로 널리 쓰이고 있다[1].

그 구체적인 작업 예를 들어보면, 원자로에서 방사선 물질을 다루는 작업, 인간이 견딜 수 없는 수압 이상의 심해에서 탐사, 채취, 실험하는 작업, 우주에서 고장난 위성을 수리 혹은 새 위성을 띄우는 작업, 전장과 같은 장소적인 특수성과, 시간적인 특수성에 의해 전문 의사가 투입되기가 곤란한 경우에서의 원격 진료(tele-surgery) 등을 꼽을 수 있다. 이와 같은 작업을 수행하는 원격조종로봇은 인류의 활동 영역이 더욱 확대되어 가고, 복지를 더욱 우선시함에 따라 앞으로 더욱 많아질 것이고 더욱 발전되어갈 전망이다. 원격로봇조종자가 로봇을 효과적으로 조종하여 주어진 임무를 효율적으로 수행하기 위

해서는 조종자 자신이 마치 실제 작업이 이루어지고 있는 원격지(remote site)에 있는 것 같은 원격현존감(tele-presence)을 느끼도록 하는 것이 중요하다. 가상현실감을 구현하기 위하여 원격 환경간의 감각정보를 수용하여, 조종자에게 현실감있게 재현(再現)해주어야 한다. 원격조종로봇은 일반적으로 주위 환경으로 부터의 시각, 청각 정보(현장음) 및 역각정보에 의존하여 조종되어지고 있으나 손가락으로 물체를 잡았을 때 느껴지는 촉감과 질감등 촉각에 관한 정보는 그 중요성에도 불구하고 현재 까지 효과적으로 제공되어지고 있지 않다. 이 때문에 보다 섬세한 작업을 수행하는 데 커다란 장애가 되고 있다. 그래서 근래에 촉각정보를 조종자에게 나타내주는 촉각궤환장치(tactile feedback device)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

기존의 촉각궤환장치는 주로 시각표현방식(visual display), 공압자극방식(pneumatic stimulation), 진동자극방식(vibrotactile stimulation), 전기자극방식(electro-tactile stimulation)으로 구분되어진다[2]. 현재까지의 공압자극방식의 촉각궤환장치로는 Sato(1991)가 개발한 에어링(air ring)방식의 장치와 ARRC/Airmuscle사(1992)의 TeletactII 그리고 Cohn(1992)의 5×5 어레이(array)의 공압방식의 촉각궤환장치를 대표적으로 들 수 있다. 에어링(air ring)방식의 장치는 직경 8mm의 작은 고무풍선을 손 끝에 끼워 사용하며, 대역폭이 5Hz이고, 0.294N/mm^2 압력을 낼 수 있다[3]. ARRC/Airmuscle사(영국)의 TeletactII는 비례적으로 팽창할 수 있는 29개의 작은 공기 주머니와 손바닥용 큰 공기 주머니 1개가 장갑안쪽에 부착되어,

접수일자 : 1997. 8. 4., 수정완료 : 1998. 7. 8.

이정훈 : 한라공조 기술연구소

장건희 : 한양대학교 정밀기계공학과

최동훈 : 한양대학교 기계설계공학과

이종원, 박종오 : 한국과학기술연구원

각각 0.083N/mm^2 , 0.207N/mm^2 의 압력을 표현할 수 있다 [4]. UC Berkeley대 Medical Robotics Lab의 Cohn는 5×5 어레이(array)의 공압방식의 촉각궤환장치를 개발하였다[5]. 이 장치는 최대 0.3N 의 힘을 낼 수 있고, 힘의 크기를 8등분으로 나누어 나타낼 수 있고, 공간 해상도(spatial resolution)는 0.3mm 이고, 대역폭은 8Hz 이다. 공압선때문에 실제 부착하여 작업을 할 때 운동에 간섭을 일으킨다는 단점을 갖고 있다.

진동자극방식은 현재 가장 연구가 활발하게 이루어지고 있는 방식으로서 엑츄에이터에 따라 보이스 코일 혹은 소형 확성기(miniature loudspeakers)방식과 소형핀 엑츄에이터 방식으로 구분할 수 있다. 보이스 코일 혹은 소형 확성기(miniature loudspeakers)방식의 경우는 EXOS사(1993)의 Touch Master와 Harvard Robotics Lab의 Howe(1995)팀이 개발한 진동구현장치등이 있다. Touch master는 250Hz 의 고정 주파수에 촉각세기에 비례한 실시간 진폭제어를 통해 촉각을 표현하고 있다. Howe의 장치는 운동영역이 3mm 이고, 250Hz 에서 0.25N 을 낼 수 있다. 이 장치는 베어링 검사, 편침 그리고 흠에 물체를 삽입하는 작업(peg in slot)을 통해 작업에 도움이 됨을 검증하였다[6]. 진동방식은 파지물체의 진동을 표현하는데는 적합하지만, 질감 혹은 단단함과 같은 압축력 내지 압력형태의 촉각 정보를 진동으로 변화시켜 표현해야 하므로 현실감이 떨어지고, 피로하기 쉽다. 단소자의 소형핀 엑츄에이터 방식은 Akamatsu(1994)등이 개발한 그래픽 사용자 상호작용을 향상시킨 마우스를 들 수 있다[7]. 이 장치는 왼쪽 클릭위에 하나의 핀 엑츄에이터를 장착 진폭 1mm 로 80Hz 까지 진동하게 하였다. 이로서 모니터화면상의 정보를 촉각과 더불어 나타내어 작업성을 향상시킬 수 있다. 기하학적 접촉정보를 나타낼 수 있는 어레이 형태의 장치로서는 크게 형상기억합금(SMA)를 이용한 경우와 피에조소자를 사용한 경우로 나눌 수 있다. 먼저 형상기억합금(SMA)를 이용한 경우는 Harvard Robotics Lab의 Howe (1995)팀에 의해 개발된 촉각궤환장치를 들 수 있다. 이 장치는 6×4 어레이형이고, 모형을 기초로한 제어기(model based controller)를 통해 형상기억합금의 단점인 응답성을 개선하여 대역폭을 $6\sim7\text{Hz}$ 로 확장하였다. 그리고 독일의 Forschungszentrum Karlsruhe 연구소의 Fischer가 1996년에 개발한 장치는 스프링 형태의 형상기억합금을 이용하여 최대 0.5N 까지 낼 수 있고, 이동변위가 3.5mm 이며, 0.1mm 의 위치 정밀도를 갖고 있는 8×8 어레이의 장치이다. 이 장치는 힘이 뛰어나고, 우수한 촉각정보를 나타낼 수 있는 장점이 있으나, 대역폭이 냉각시 0.4Hz , 상온에서 0.1Hz 이므로, 실시간의 촉각정보를 표현할 수 없다는 단점을 갖고 있다. 상용화된 경우는 Xtensory사(미국)의 Tactools XTT1가 있다. 이는 출력을 연속적으로 제어할 수 없는 스위칭 형태로 구동되고, 텍터 1개의 크기는 $9 \times 20 \times 5\text{mm}^3$ 로 사람의 손가락에 1개씩 장착하여 사용한다. 각 텍터당 1개씩 부착된 직경 1mm 의 전달부가 손가락 끝마디의 피부에 출력을 내게 되어 있다[8]. 피에조를 이용한 어레이형 장치로

서는 미국에서 개발된 맹인용 문자인식장치인 Optacon이 있다. 1970년대 초에 처음 개발되어져, 지금은 개량된 Optacon II가 시판되어지고 있는데, 이것은 $25.4 \times 12.7\text{mm}^2$ 의 면적에 5×20 어레이의 피에조(piezo electric bimorph)소자가 작동하여 읽혀진 문자를 점자로 변환시켜주어 이를 검지 손가락을 통해 인식하는 장치이다[9].

전기자극방식의 촉각궤환장치는 시각, 청각장애자의 대체감각장치 개발에서 유래되었다. 대표적으로 Kaczmarek (1995)는 피부와 화학적인 작용이 없는 접촉영역 1mm^2 의 전기자극자를 개발하여 촉각인식에 적합한 전류제어를 하여 촉각을 구현하였다. 이 장치는 가장 소형, 경량으로 제작이 가능하나, 피로를 쉽게 느끼며, 촉각구현시 현실감이 떨어지는 단점이 있다[10].

앞에서 살펴본 것같이 현재까지 개발되어진 촉각궤환장치는 직접 손가락 끝마디 피부(fingerpad)에 부착이 용이하지 못하며, 연속적인 선형제어가 어렵고, 낮은 응답속도와 피로에 의한 감각 둔화(numbness)등의 문제점 때문에 효과적인 촉각궤환이 이루어 지고 있지 못한 상황이다. 작업상 촉각궤환장치가 충분한 역할을 수행하기 위해서는 물체 접촉이나, 파지시 물체의 질감이나, 파지상태 즉 손가락 표면 영역별 촉각력 인식 정도를 실제 촉각처럼 제공해 줄 수 있는 장치가 개발되어야 한다. 그래야만 그 정보를 토대로 섬세한 제어를 하여 효율적인 작업이 이루어질 수 있기 때문이다. 그러기 위해서는 촉각 특성을 한 어레이형 장치가 꼭 필요하다. 본 논문에서는 기존의 구동방법과 다른, 어레이형 부착이 가능한 소형, 경량 구조의 전자기 흡인력을 이용한 촉각궤환장치를 제안하였다. 전자식의 흡인력을 사용하게 되면 전기적 제어를 통해 촉각력을 연속적으로 제어할 수 있으며, 기존의 방식들이 연속적인 촉각신호를 전동이나 압력의 형태 혹은 시각정보로 변환하여 전달하는데 비하여 직접 힘방식 전달이 가능하다는 장점을 가질 수 있다. 또한 본 방식은 소형, 경량화 할 수 있어 기존의 장치들에 비하여, 운동에 간섭이 적고, 손가락 끝마디 피부(fingerpad)에 촘촘한 어레이 형태로 부착이 가능해진다. 본 연구에서는 원격지에 있는 로봇팔에 달린 그리퍼(gripper)와 그리퍼에 접촉되는 작업대상물 사이의 촉각정보를 중앙제어실에 있는 조종자에게 전달하여 더욱 정교하고 효과적인 작업을 할 수 있도록 하는 원격조종로봇용 촉각궤환장치를 기존의 단점을 개선할 수 있도록 새롭게 제안하고, 최적화 기법을 적용하여 설계하였다.

II. 촉각궤환의 필요기능

피부에 있는 감각수용기가 균등치 못한 자극이나 압력이 가해질 때 그것에 대한 순응 및 반사활동으로 느껴지는 감각을 촉각이라 한다. Loomis와 Lederman(1986)는 피부 정보(cutaneous information)에 관한 작용을 촉각(tactile)이라고 하고, 근육, 건(tendon)과 관절을 포함한 수용기로 부터의 입력에 대한 작용을 역각(kinesthetic)이라고 하며, 촉각과 역각에 관한 작용을 햅틱(haptic)이라고 정의하였다[11]. 촉각 수용기의 분포 및 밀도는 얼굴과 사지 말단 부위에 조밀하며, 특히 손가락 끝, 입술 그

리고 혀에서 가장 예민하게 느낄 수 있으며, 촉각이 심해지면 압각이 되는 성질을 가지고 있다[12].

사람의 촉각 수용기는 다음의 4가지, 마이스너소체(Meissner's Corpuscles, MC), 머켈디스크(Merkel's Disks, M), 파치니소체(Pacinian Corpuscles, P), 루피니소체(Ruffini Endings, R)로 분류할 수 있다. 표 1은 각 촉각 수용기의 특징을 정리한 것이다. 이 4가지 수용기의 분포 비율은 각각 43%, 25%, 13% 그리고 19%이며, 이들은 계속적인 동일 자극에 대하여 반응이 줄어드는 특성을 가진다. 이러한 특성을 순응(adaptation)이라 하고, 그 일시적인 순응속도와 수용 면적에 따라 촉각 수용기를 4개부로 구분하기도 한다[13]. 이에 따르면 빠른 순응(Fast Adapting)을 FA, 느린 순응(Slow Adapting)을 SA, 수용 영역이 작고, 영역이 잘 구분되면 Type I, 영역이 넓고, 경계가 모호하면 Type II이라고 정의한다. 각 수용기의 특성을 Table 1에 나타냈다. 손끝마디 피부(fingerpad)인 경우 두 개의 이웃한 자극을 분간할 수 있는 최소 거리인 공간 분해능(spatial resolution)은 보통 2.5mm이고, 최소의 경우 약 1mm 정도이다. 자극이 새로운 위치에 가해졌을 때 자극 위치의 이동을 인식할 수 있는 능력을 위치감지능력(spatial localization)이라 하고 약 1.6mm이다[14]. 손끝피부에서의 공간분해능과 위치감지능력을 그림 1에 도시하였다. 거리로 표시된 치수는 도시된 지점에서의 공간분해능이고, 색칠된 원표시는 자극의 위치를 인식하는 데 있어서의 위치 오차 영역을 뜻한다. 피부의 변위를 감지할 수 있는 범위인 절대정적역(absolute static threshold)은 직경 0.45mm의 반구 촉침에 대해 0.01mm 변위이다[15].

표 1. 촉각 수용기의 특징.

Table 1. Mechanoreceptors characteristics.
(adapted Sherrick & Cholewiak, 1986, Johansson & Vallbo, 1979, and Roy S. Kalawsky, 1993)

Mechano-receptor	Merkel cell-related endings	Ruffini endings	Meissner corpuscle	Pacinian corpuscle
Dimension (mm)	0.007 × 0.001	(<0.2) × (0.5~3.0)	0.03 × 0.08	1 × 4
Depth (mm)	1~2	1.5~2.5	0.5	2~3
Innervation (mm ⁻²)	0.70	0.09	1.40	0.21
Probable afferent class	SA I	SA II	FA I	FA II
Frequency of stimulation (Hz)	0~10	0~10	20~50	100~300
Stimulus	Shape, edges, texture	Lateral skin stretch	Shape, normal force	Vibration

손가락이 감지할 수 있는 최소 자극의 크기인 절대역 (absolute thresholds)은 0.2N/cm²의 압력과 2gf의 힘이고[15], 감지할 수 있는 최소 자극차인 차등역(difference thresholds)은 2gf 정도이며, 차등역과 자극 강도와의 관계는 베버 법칙(Webers law)으로 표현된다[16]. 촉각의 경우 베버 분수(Weber fraction)는 정적 압력(static pressure)일 때 0.14이고, 비교적 큰 질량과 정적인 힘(static force)의 경우 0.02이고, 160Hz의 진동의 경우 0.2이고, 20~300Hz의 범위에서 0.20~0.25내에서 변화한다. 피부와 접촉하는 면적 또한 중요한 역할을 한다[17]. 인지 할 수 있는 진동의 최소 진폭은 접촉 단면적이 작으면 작을수록 커진다고 알려졌다. 하지만 0.02cm² 이하 혹은 8cm² 이상의 단면적은 영향을 끼치지 못한다. 따라서 접촉 단면적은 0.02~8cm² 사이가 적당하다.

손가락은 일시적으로 30~50N의 힘을 견딜 수 있고, 4~7N 이내에서는 힘의 크기와 변화를 인식하는 능력에 영향을 미치지 않고 지속적으로 촉각을 느낄 수 있다. 보통 물체를 잡을 때 0~3N 사이의 동적인 힘이 작용된다. 또한 인간이 진동의 정도를 구분할 수 있는 대역폭은 320Hz 정도이다[18].

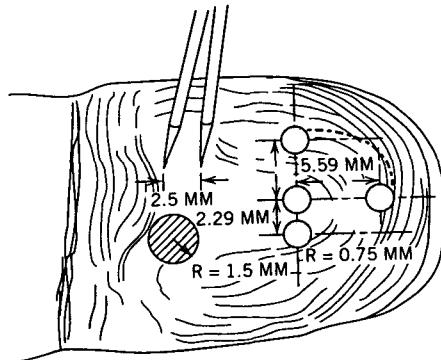


그림 1. 손끝의 공간분해능과 위치감지능력.

Fig. 1. Two-point spatial discrimination and spatial localization for the fingertip.
(Adapted Sherrick and Craig [1982])

위의 촉각인식기구 특징을 토대로 섬세한 원격 조종을 위해서 촉각 케환 장치는 다음과 같은 요건들을 만족하여야 한다.

- 촉각 케환 장치는 촉각을 발생시키는 소자들이 어레이 형태로 분포해야 한다. 즉 인간에게 실제와 유사한 촉감을 재연하기 위해서는, 공간 분해능인 약 2mm에 최대한 근접하게 촉각 케환 소자가 조밀하게 분포되어져야 한다.
- 접촉면의 질감이나, 미끄러짐을 작업자에게 제공하기 위해 촉각 케환 소자간에 어레이 단위의 케환 제어가 적절히 이루어져야 한다.
- 베버의 법칙에 의해 촉각의 힘 분해능(force resolution ; sensitivity)은 불연속적있지만, 가해지는 힘이 연속적으로 분포하므로 촉각 케환 장치는 0~3N 범위내에서 촉각력의 연속적인 선형 제어가 이루어져야 한다.
- 촉각 케환 장치의 작용이 용이해야 한다. 그러기 위

해 소형, 경량화 되어야 한다.

- 촉각 쿠환 장치 작용에 따른 부작용이 없거나, 적어야 하고 작용시 임무 수행에 장애나 간섭을 일으키지 말아야 한다.
- 원형 촉침의 경우 직경을 너무 작게 하는 것보다 1.4 mm 이상이 적당하다.
- 물체를 잡거나, 질감을 인지할 때, 주로 촉각이 예민한 손가락 끝마다 피부를 사용하므로 손끝에 부착하는 것을 기본으로 한다.

III 전자기 흡인력을 이용한 촉각케환장치

1. 전자기 흡인력을 이용한 촉각케환장치의 개요

본 연구에서는 촉각센서로부터 전달되는 힘 정보를 효과적으로 조종자에게 쿠환시키기 위하여 전자식의 흡인력을 이용한 새로운 방식의 촉각케환장치를 제안한다.

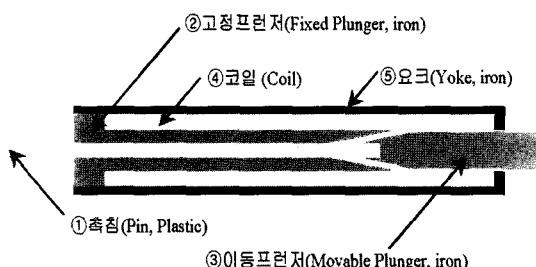


그림 2. 전자기 흡인력을 이용한 촉각케환장치 구성도.
Fig. 2. Configuration of tactile feedback device(TFD) using electromagnetic attractive force.

그림 2는 본 논문에서 제안한 촉각케환장치 모형의 구조도로서, 이에 도시한 바와 같이 촉각케환장치는 촉침(pin, ①)이 이동할 수 있도록 내부가 둘린 파이프형의 고정 프런저(fixed plunger, ②) 위에 코일(coil, ④)을 조밀하게 감아 단단하게 고정하여, 권선 코일(④) 외곽을 요크(yoke, ⑤)로 감싼 구조를 갖고 있다. 이 때 이동 프런저(movable plunger, ③)와 그에 부착된 촉침(①)은 고정 프런저(②)를 따라 운동하게 된다.

작동 원리는 구동회로부로부터 전류가 권선코일(④)에 인가되어지면, 자속(magnetic flux)은 고정 프런저(②)를 관통, 요크(⑤) 표면을 타고 유도되어 고정 프런저(②)와 소정 거리 떨어져 있는 이동 프런저(③)로 되돌아오게 되어, 고정 프런저(②)의 하단면과 이동 프런저(③)의 상단면은 자기 위치 에너지(magnetic potential energy)의 차이가 생겨 양부재에 인력이 발생하여, 결국 이동 프런저(③)가 미끄러져 이동해 고정 프런저(②)에 붙게 된다. 이에 이동 프런저(③)에 부착되어 있는 촉침(①)은 고정 프런저(②)의 내부를 관통하여, 촉침(①) 끝에 위치한 피부를 때리거나, 밀어준다. 실제 제작되어진, 각각의 부품은 그림 3에 나열되어 있고, 이 부품들을 조립한 촉각케환장치의 외형은 그림 4에 도시되어 있다. 그리고 이 촉각케환장치를 4×5 어레이로 집적하여, 손가락 끝마다에 부착할 수 있도록 만든 4×5 어레이형 촉각케환장치가 그림 5이고, 이 장치를 손가락에 부착한 모습이 그림 6이다.

2. 촉각케환장치의 촉각력 해석

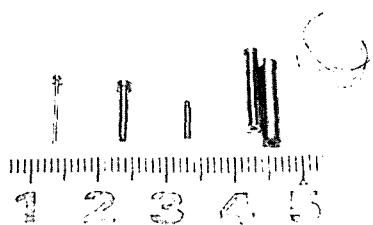


그림 3. 촉각케환장치 부품.

Fig. 3. Elements of tactile feedback device.



그림 4. 촉각케환장치.

Fig. 4. Tactile feedback device (TFD).

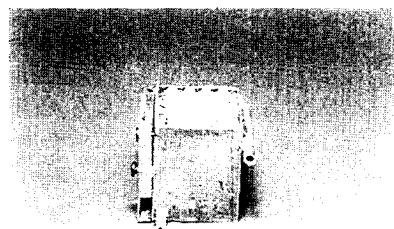


그림 5. 어레이형 촉각케환장치.

Fig. 5. 4×5 array type integrated tactile feedback device (TFD).

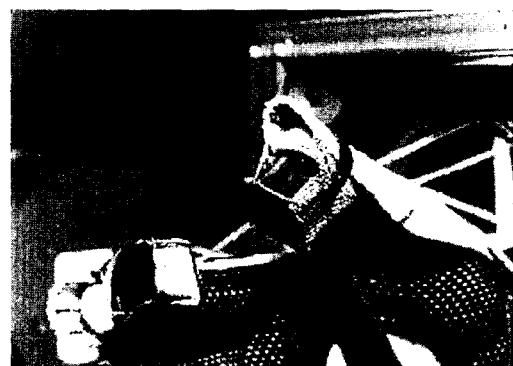


그림 6. 촉각케환장치가 부착된 장갑.

Fig. 6. Glove attached the integrated TFD.

자체내의 자속은 매체의 자기적 성질에 무관하게 반드

시 폐곡선을 이루고 있으면 이 자속의 통로를 자기회로 또는 자로라 한다. 코일이 N 회 감긴 솔레노이드에 전류 I 가 흐르는 경우, 암페어의 법칙에 의해 기자력(magneto-motive force, F_m)은 NI 이다. 강자성체의 투자율은 주위 공간의 투자율에 비해서 매우 크므로 자속은 외부로 새나가지 않고, 거의 전부가 강자성체를 관통한다. 따라서 자속이 일정한 자기회로를 이루게 된다. 자성체의 투자율을 μ , 미소자로의 길이를 dl , 자속이 흐르는 면적을 A 라고 하면 (1)과 같이 리력턴스(reluctance, R)를 정의할 수 있다. 이 리력턴스는 전기회로의 전기저항과 같은 의미로 자기회로의 자기저항을 뜻한다[19].

$$R = \oint \frac{dl}{\mu A} = \frac{l}{\mu A} \quad (1)$$

각 부재를 관통하는 폐곡선의 자로를 가정하여 이에 따라 각각의 자기저항을 (1)과 같이 계산하고, 이를 직렬 혹은 병렬 연결하여 총 자기저항을 구하여 (2)와 같이 기자력(F_m)을 구해진 자기저항으로 나누면 자기회로를 흐르는 자속(ϕ)을 구할 수 있다. 이와같은 방법을 가정자로법(Probable Flux Paths Method, PFPM)이라고 한다[20].

$$\phi = \frac{NI}{R} \quad (2)$$

본 논문에서 제안된 흡인력방식의 촉각궤환장치에서 전자기장에 가해진 일(net work, W_m)은 전기회로에서 한 일(eidt)과 기계시스템에서의 한 일, 즉 촉첨을 흡인력(f_e)으로 미소변위($-dx$)만큼 이동시킬 때 한 일($-fedx$)의 합과 같다. 기전력(e)는 Faraday 법칙에 의해 쇄교자속(flux linkage : λ)의 미소시간에 따른 변화에 의해 발생되어지므로 전자기장내의 미소 에너지는 $id\lambda$ 로 나타낼 수 있다. 그리고 자속과 일은 두 개의 독립 변수 전류(i)와 변위(x)에 따라 변화한다. 따라서 두 변수의 편미분으로 나타낼 수 있고, 이 때 흡인력(f_e)은 기계시스템에서의 에너지인 공액 에너지(co-energy, W_c)의 미분으로 나타낼 수 있다, 즉 흡인력은 (3)과 같이 표현되어진다.

$$dW_m = eidt - f_e dx = id \frac{\lambda}{dt} dt - f_e dx = id\lambda - f_e dx$$

$$f_e = i \frac{\partial \lambda}{\partial x} - \frac{\partial W_m}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (i\lambda - W_m) = \frac{\partial W_c}{\partial x} \quad (3)$$

그림 7에서 알 수 있듯이 이동프런저를 끌어 당기는 전자기력은 주어진 변위(x)에 대해 반대방향으로 작용한다. 자속과 전류의 관계가 선형적이라고 하면, 공액 에너지(W_c)와 에너지(W_m)는 같아진다. 이 가정은 실제적으로 사실과 다르지만 전자기 장치에서 전류와 힘의 방향, 크기에 대한 분석을 할 때 중요한 정보를 제공한다. 따라서 전자기 흡인력은 (4)처럼 자기회로에 저장되어진 에너지(W_m)를 변위에 대해 미분하여 구할 수 있다.

$$f = -f_e = -\frac{\partial}{\partial x} (W_m) = -\frac{\partial W_m}{\partial x} \quad (4)$$

선형의 가정에서 저장되어진 에너지는 (5)와 같고, 여기서 자속은 (2)와 같으므로, 전자기 흡인력은 자속과 자

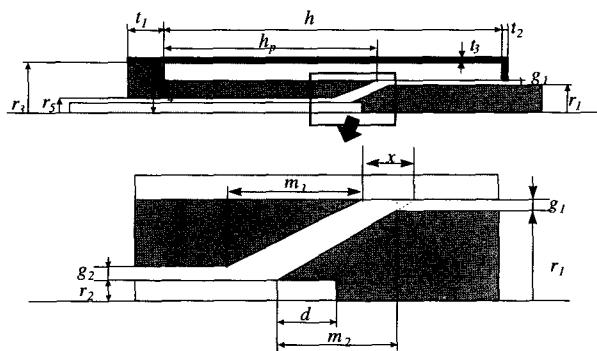
기저항의 항으로 표시할 수 있다. 즉 (5)를 변위에 대해 미분한 (6)과 같이 유도할 수 있다.

$$W_m = \frac{\phi F_m}{2} = \frac{\phi^2 R(x)}{2} \quad (5)$$

$$f = -\frac{dW_m}{dx} = -\frac{\phi^2}{2} \frac{dR(x)}{dx} \quad (6)$$

촉각궤환장치의 촉각력을 유도하기 위해, 먼저 촉각궤환장치의 치수 기호를 그림 7과 같이 정의하였다. 그리고 가정자로법에 의해 자기회로를 분석할 때 다음과 같이 가정한다.

1. 자속과 전류의 관계가 선형적이다.
2. 평균자속은 단면의 도심을 지난다.
3. 자속이 지나는 단면이 변화할때는 부재를 부분별로 나누어 병렬, 혹은 직렬의 조합으로 계산한다.
4. 부재의 단면이 급격히 변화할 때는 자속은 부드러운 원호(2차 곡선)를 그리면 지나간다.



t_1 : Fixed plunger와 Yoke의 접합 두께, t_2 : Yoke 하단부 두께, t_3 : Yoke 두께, r_1 : Movable plunger 반경, r_2 : 촉첨 반경, r_3 : Yoke 내반경, r_4 : Fixed plunger 권선부 반경, r_5 : Fixed plunger 중공 반경, h : 권선 길이, h_p : Fixed plunger 권선길이, g_1 : Yoke와 Movable plunger사이의 공극, a : Plunger 경사각, t_c : 권선 두께 g_2 : 촉첨과 Fixed plunger사이의 공극, d : 촉첨 삽입길이, m_1 : Fixed plunger 경사부 길이 m_2 : Movable plunger 경사부 길이, x : Fixed, movable plunger간 공극

그림 7. 촉각궤환장치의 기호.

Fig. 7. Configuration of the TFD.

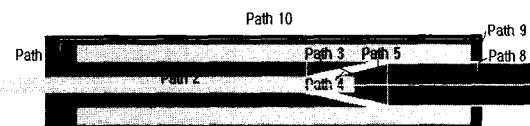


그림 8. 촉각궤환장치내 가정 자로.

Fig. 8. Probable flux paths in TFD.

먼저 그림 8과 같이 정밀한 자기분석을 위해 부재를 세분화하여 자로를 가정한다. 다음의 (7)~(12)는 중요 자로들의 자로의 길이와 자속이 흐르는 단면적을 계산한 것이다. 이것으로 각 가정자로에서의 자기저항을 계산할 수 있다. 나머지 자로들도 이와 같은 방식으로 계산되어지기 때문에 지면상 생략한다.

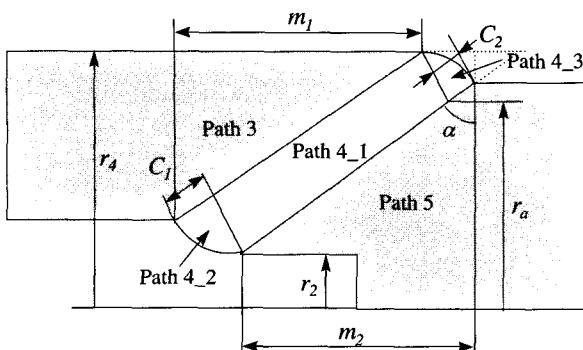


그림 9. 공극에서의 자로 분석(자로 4).

Fig. 9. Analysis of magnetic path on air gap(path 4).

Path 4는 공극(air-gap)를 지나는 자로로서 철의 상대 투자율이 공기의 투자율(μ_{air})에 비해 약 4000배이므로 공극에서의 자기저항은 철의 자기저항에 비해 상당히 크다. 따라서 공극에서의 자기저항이 총자기저항에 지배적인 역할을 한다. 그러므로 공극을 지나는 자로를 그림 9처럼 세분할 필요가 있다. 여기서 누설자속을 표현한 Path 4_2와 Path 4_3의 자로는 2차 곡선을 그리며 지나간다고 가정한다. 식을 유도한 방법은 다음과 같다. 먼저 정해진 영역을 지나는 자속선의 평균길이를 구한다. 각각의 자속선이 2차 곡선을 따라 지난다면 최단 자속길이와 최장 자속길이의 조화평균값을 평균 자속길이로 삼는다. 그 다음 자속선이 관통하는 자속면적을 구한다. 자속선에 수직인 자속면이 자속경로에 따라 동일하다면 자속선이 지나는 면적을 쉽게 구할 수 있다. 하지만 자속경로에 따라 자속면이 변화한다면 자속들이 지나는 영역의 총체적이 평균자속길이에 평균자속면적을 곱해서 얻은 값과 같다는 가정하에 평균 자속면적을 구한다. 마지막으로 자기저항은 앞에서 구한 평균 자속길이, 평균 자속면적, 그리고 투자체의 투자율을 (1)에 대입, 계산하여 구한다. 이 방법에 의해 얻어진 각 Path에서의 자기저항은 (7)~(9)와 같다.

Path 4_1

$$\begin{aligned} l_{4_1} &= x \cos \alpha \\ A_{4_1} &= 2\pi \left(\frac{r_1 + r_2}{2} + \frac{x \cos \alpha \sin \alpha}{2} \right) \left(\frac{r_a - r_2}{\cos \alpha} \right) \\ r_a &= r_1 + g_1 - x \cos \alpha \sin \alpha \\ R_{4_1} &= \frac{l_{4_1}}{\mu_{air} A_{4_1}} \end{aligned} \quad (7)$$

Path 4_2

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{r_4 - g_2 - r_a}{\cos \alpha} \\ l_{4_2a} &= \int_0^{c_1} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} dx \\ &= \frac{c_1}{2} \sqrt{\left(\frac{2l_{4_1}}{c_1} \right)^2 + 1} + \frac{c_1^2}{4l_{4_1}} \ln \left(\frac{2l_{4_1}}{c_1} + \sqrt{\left(\frac{2l_{4_1}}{c_1} \right)^2 + 1} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_{4_2} &= \frac{2l_{4_2a} l_{4_1}}{(l_{4_1} + l_{4_2a})} \\ A_{4_2} &= \frac{\frac{2}{3} l_{4_1} c_1 \times 2\pi \left(r_2 + \frac{2}{5} l_{4_1} \sin \alpha - \frac{3}{8} c_1 \cos \alpha \right)}{l_{4_2}} \\ R_{4_2} &= \frac{l_{4_2}}{\mu_{air} A_{4_2}} \end{aligned} \quad (8)$$

Path 4_3

$$\begin{aligned} c_2 &= \frac{r_4 - g_1 - r_a}{\cos \alpha} \\ l_{4_3a} &= \int_0^{c_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} dx \\ &= \frac{c_2}{2} \sqrt{\left(\frac{2l_{4_1}}{c_2} \right)^2 + 1} + I + \frac{c_2^2}{4l_{4_1}} \ln \left(\frac{2l_{4_1}}{c_2} + \sqrt{\left(\frac{2l_{4_1}}{c_2} \right)^2 + 1} \right) \\ l_{4_3} &= \frac{2l_{4_3a} l_{4_1}}{(l_{4_1} + l_{4_3a})} \\ A_{4_3} &= \frac{\frac{2}{3} l_{4_1} c_2 \times 2\pi \left(r_4 - \frac{3}{5} l_{4_1} \sin \alpha + \frac{3}{8} c_2 \cos \alpha \right)}{l_{4_3}} \\ R_{4_3} &= \frac{l_{4_3}}{\mu_{air} A_{4_3}} \end{aligned} \quad (9)$$

Path 8의 경우는 yoke와 movable plunger의 공극을 지나는 구간이므로 총자기저항에 미치는 영향이 크다. 따라서, Path 4처럼 보다 자세하게 자로를 검토할 필요가 있다. 그림 10은 이를 도시한 것으로 누설자속을 고려한 것이다. 누설자로 8_3의 최외곽 자로는 적어도 movable plunger와 yoke간의 최단 거리보다는 짧아야 한다. 그렇지 않으면 자속은 바로 movable plunger에서 yoke로 흐르게 된다. 여기서 yoke끝단에서 가능한 누설자로 8_3의 최외곽 자로가 yoke와 만나는 점까지의 길이를 t_4 라 정의한다. Path 8_2의 평균자속길이는 최단, 최장 자속조화평균값이고 Path 8_3의 자기저항은 그림10에 도시된 것처럼 r 만큼 떨어진 자속의 자속길이는 $r\theta$ 이고, 이때의 미소 자속면적은 ldr 이다. 이 미소영역을 θ 는 0에서 $\pi/2$ 까지, dr 는 g_1 에서 g_1+t_4 까지 적분하면 자기저항을 얻을 수 있다. 여기서 l 은 도넛형의 자속영역을 끊어 펼쳤을 때, 길이변화가 없는 중립 원주길이이다. (10)~(12)는 Path 8의 자로에 대한 자기저항 계산식들이다.

Path 8_1

$$\begin{aligned} l_{8_1} &= g_1 \\ A_{8_1} &= 2\pi \left(r_1 + \frac{g_1}{2} \right) t_2 \\ R_{8_1} &= \frac{l_{8_1}}{\mu_{air} A_{8_1}} \end{aligned} \quad (10)$$

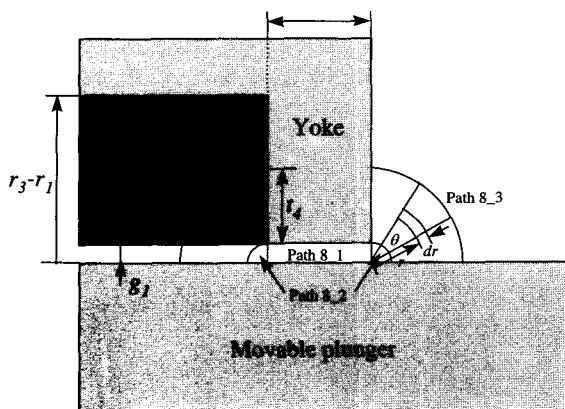


그림 10. 공극에서의 자로 분석 (자로 8).

Fig. 10. Analysis of magnetic path on air gap(path8).

Path 8_2

$$l_{8_1} = 1.22g_1$$

$$A_{8_2} = \frac{2 \times \frac{\pi g_1^2}{4} \times 2\pi(r_1 + \frac{g_1}{2})}{l_{8_2}} = \frac{\pi^2 g_1^2 (r_1 + \frac{g_1}{2})}{1.22g_1}$$

$$R_{8_2} = \frac{l_{8_2}}{\mu_{air} A_{8_2}}$$
(11)

Path 8_3

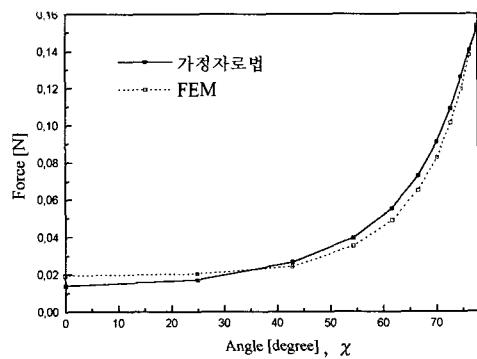
$$r_3 - r_1 = \frac{2\pi(g_1 + t_4)}{4} \Rightarrow t_4 = \frac{2(r_3 - r_1)}{\pi} - g_1$$

$$l_{8_3} = 2\pi(r_1 + \sqrt{g_1(g_1 + t_4)})$$

$$R_{8_3} = \frac{\pi}{4\mu_{air} l_{8_3} \ln(1 + \frac{t_4}{r_1 + g_1})}$$
(12)

주어진 변위(x)방향으로 작용하는 촉각력을 구하기 위해서는 (10)에서 알 수 있듯이 자기회로의 자속과 변위(x)에 대한 자기저항의 1차 미분값을 알아야 한다. 우선, 앞에서 구한 자기저항을 직렬 혹은 병렬로 연결하여 계산하면 총 자기저항을 알 수 있다. 자로는 1~10 까지 모두 직렬 연결되어 있으나, Path 3, 4, 5, 8의 경우는 부재를 자속의 흐름에 대해 병렬로 세분화하였기 때문에 이에 따른 고려를 해주어야 한다. 자속은 기자력을 자기저항으로 나눈 것이므로 총자기저항의 1차 미분값은 복잡하기 때문에 직접 미분하여 구하기가 매우 힘들다. 따라서 본 경우에는 수치계산적으로 구한다. 중앙차분법(central difference)을 사용하며, 허용한계오차(ϵ^s)는 Scarborough 가 제안한 방법을 이용한다.

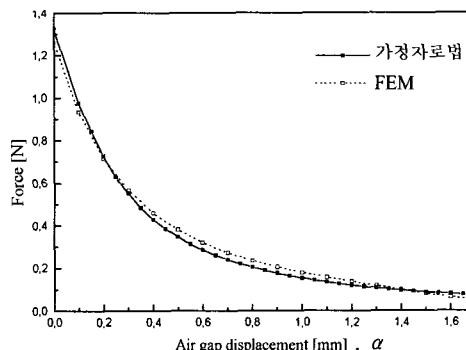
3. 가정자로법과 유한요소법(FEM)간의 비교
가정자로법을 통해 자기분석을 하여, 가상일법으로 유도되어진 촉각력식을 주어진 외형의 촉각궤환장치에 적용해 힘을 구해보았다. 본 해석법인 가정자로법(PFPM)의 타당성은 유한요소법(FEM)을 통해 검증하였다. 주어진 동일치수에서의 비교 그래프가 그림 11~15에 도시되어



$t_1 = 1.0, t_2 = 0.3, t_3 = 0.2, r_1 = 0.675, r_2 = 0.325$
 $r_3 = 1.15, r_4 = 0.7 h = 12.9, h_t = 8.495, g_1 = 0.025$
 $g_2 = 0.025, d = 0.0, \alpha = 1.325 (\text{rad}), \mu_{air} = 4\pi$
 $\mu_{iron} = 4000 \mu_{air}, NI = 150 (\text{A} \cdot \text{turn})$ (단위 : mm)

그림 11. 공극변위-촉각력간 비교 결과.

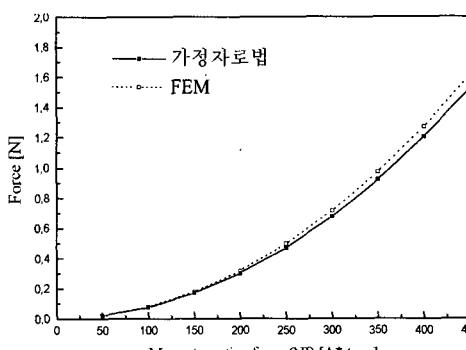
Fig. 11. Results of relation between force and air gap displacement.



$t_1 = 1.0, t_2 = 0.3, t_3 = 0.2, r_1 = 0.675, r_2 = 0.325$
 $r_3 = 1.15, r_4 = 0.7 h = 12.9, h_t = 8.495, g_1 = 0.025$
 $g_2 = 0.025, d = 1.0, \mu_{air} = 4\pi, \mu_{iron} = 4000 \mu_{air}$
 $NI = 150 (\text{A} \cdot \text{turn}), x = 1.0$ (단위 : mm)

그림 12. 프런저각도-촉각력간 비교 결과.

Fig. 12. Results of relation between force and plunger angle.



$t_1 = 1.0, t_2 = 0.3, t_3 = 0.2, r_1 = 0.675, r_2 = 0.325$
 $r_3 = 1.15, r_4 = 0.7 h = 12.9, h_t = 8.495, g_1 = 0.025$
 $g_2 = 0.025, d = 0.0, \alpha = 1.325 (\text{rad}), \mu_{air} = 4\pi$
 $\mu_{iron} = 4000 \mu_{air}, x = 1.0$ (단위 : mm)

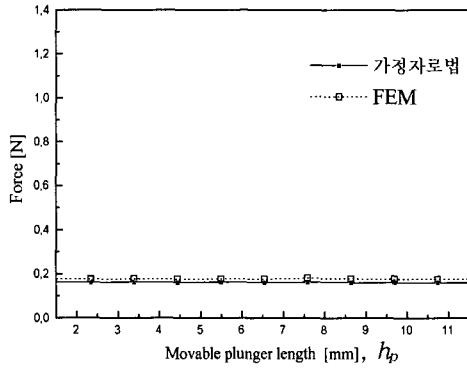
그림 13. 기자력-촉각력간 비교 결과(선형).

Fig. 13. Results of relation between force and magnetomotive force (linear).

져 있다. 여기에서 알 수 있듯이 선형가정에서는 오차가 5% 이내로 매우 유사하다는 것을 알 수 있다. 그러나 자속밀도가 포화되어 선형영역에서 벗어나면 그림 15와 같이 점점 오차가 커진다.

IV 최적설계 정식화

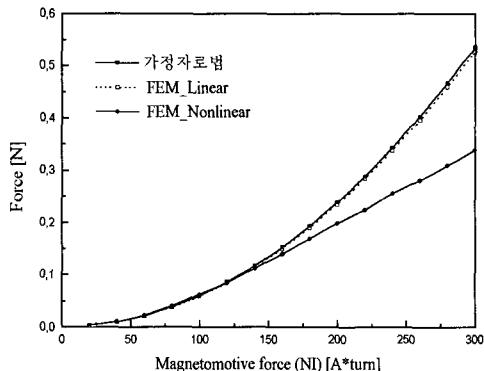
1. 피부특성을 고려한 인식 촉각력의 고찰



$$\begin{aligned} t_1 &= 1.0, \quad t_2 = 0.3, \quad t_3 = 0.2, \quad r_1 = 0.675, \quad r_2 = 0.325 \\ r_3 &= 1.15, \quad r_4 = 0.7 \quad h = 12.9, \quad g_1 = 0.025, \quad g_2 = 0.025 \\ d &= 0.0, \quad \alpha = 1.325 \text{ (rad)}, \quad \mu_{air} = 4\pi, \quad \mu_{iron} = 4000 \mu_{air}, \\ NI &= 150 \text{ (A · turn)}, \quad x = 1.0 \quad (\text{단위 : mm}) \end{aligned}$$

그림 14. 프런저길이비-촉각력간 비교 결과.

Fig. 14. Results of relation between force and plunger length.



$$\begin{aligned} t_1 &= 1.0, \quad t_2 = 0.3, \quad t_3 = 0.2, \quad r_1 = 0.675, \quad r_2 = 0.325 \\ r_3 &= 1.15, \quad r_4 = 0.7 \quad h = 12.9, \quad h_p = 8.495, \quad g_1 = 0.025 \\ g_2 &= 0.025, \quad d = 0.0, \quad \alpha = 1.325 \text{ (rad)}, \quad \mu_{air} = 4\pi \\ \mu_{iron} &= 4000 \mu_{air}, \quad x = 1.0 \quad (\text{단위 : mm}) \end{aligned}$$

그림 15. 기자력-촉각력간 비교 결과 (비선형).

Fig. 15. Results of relation between force and magnetomotive force (nonlinear).

이동변위는 작으면서 촉각력이 큰 촉각재환장치는 이동변위 이상에 대해서는 힘을 발생시킬 수 없으므로 설계시 촉각력과 이동변위(stroke)와의 관계도 고려하여야 한다. 본 장치의 촉침은 피부에 직접 접촉해 있다. 인간 피부는 가해지는 자극세기에 대해 변위가 선형적으로 변하지 않는다. 그러므로 촉각력과 변위에 대한 검토가 이루어져야 한다. 본 논문에서는 촉각력과 변위와의 관계를 기준에 이루어진 연구를 토대로 하였다.

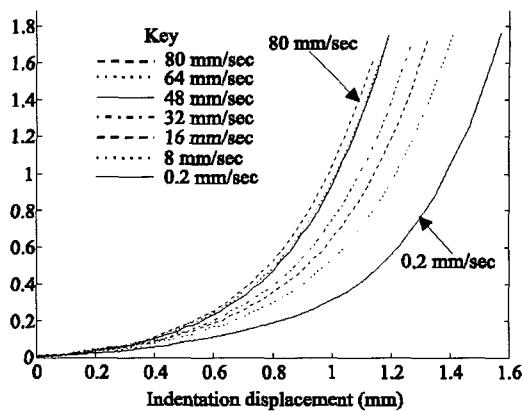


그림 16. 피부의 변위와 촉각력간의 관계.

Fig. 16. Response of the fingerpad of a typical subject to indentations of constant velocities.
(adapted from D.T.V. Pawluk and R.D. Howe, 1996).

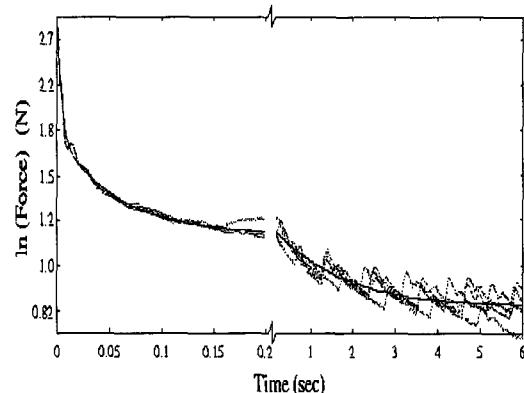


그림 17. 시간에 대한 촉각력 이완.

Fig. 17. Force relaxation of the fingerpad.
(adapted from D.T.V. Pawluk and R.D. Howe, 1996)

1996년 미국 하버드(Harvard)의 Howe와 Pawluk은 인간 손끝마디 피부의 동적 접촉 기구 Part 1 : 접촉 응답(Dynamic Contact Mechanics of the Human Fingerpad, Part 1 : Lumped Response)의 논문에서 변위-속도-촉각력에 대한 실험적 자료를 제시하고 있다[21]. 그림 16은 실험으로 얻어진 결과를 나타낸 그래프이다. 그림 16에서 알 수 있듯이 인간이 느끼는 촉각력은 변위와 촉침의 속도에 따라 변화한다. 큰촉각력을 내기 위해서는 촉침이 빨리 움직이며 피부의 변형 변위도 커야 한다. 본래 원격조종로봇은 알지 못하는 환경에서 작업을 하므로 임무 수행속도가 그다지 빠르지 못하다. 더욱이 손가락으로 물체를 쥐는 동작은 임무수행에서 매우 중요한 작업이기 때문에 신중을 기해서 진행속도가 느린다. 따라서 물체가 진동하는 경우를 제외하고 일반적으로 촉각자극이 가해지는 속도가 느린다. 또한 인간의 촉각 인식기구는 접촉후 시간이 흐름에 따라 촉각력이 작아지는 이완 특성을 갖고 있다. 시간에 따른 촉각력 이완관계를 그림 17에 제시하였다. 위의 사실로 본 연구에서는 자극속도가 느린 준정적상태에서 변위를 크게 하여 촉각력을 향

상시키는 것을 목적으로 삼았다. 촉침이 이동되어지는 변위의 전영역에서 흡인력에 의해 발생된 촉각력이 피부의 저항력보다 항상 커야 한다. 최적설계과정에서 일정 변위에서의 발생 촉각력은 준정적시 변위-촉각력(F_{qs})관계식인 (13)에 의해 구해진 촉각력보다 반드시 같거나 커야 한다.

$$F_{qs}(x) = 0.7157x^4 - 1.2235x^3 + 0.8629x^2 - 0.0501x \quad (13)$$

2. 전류인가에 따른 온도상승의 구속조건

인가된 에너지는 촉각력을 발생시키는 전자기 에너지로 쓰이고 나머지 에너지는 철손실(iron loss), 마찰손실, 열손실 등으로 소모되어진다. 이중 열손실이 대부분을 차지한다. 과도한 온도 상승은 성능을 저하시키고, 또는 소자를 파괴시킬 수도 있다. 따라서 적당한 온도이하로 유지되도록, 소자내의 온도를 유지시켜주어야 한다. 그러기 위해서는 온도 결정 인자인 기하학적 형상과 인가 전류를 제한해야 한다. 그러므로 온도조건은 최적화 문제의 구속조건으로 정식화 되어야 한다. 본 촉각궤환장치는 온도 상승 때문에 촉각궤환소자들을 에워싸는 water jacket을 구성, 수냉시키고 있다. 따라서 수냉조건하에서 코일피복의 내열온도이하가 되도록 온도 구속 조건식을 만족해야 한다. 수냉장치는 장착성을 고려하여, 외경 약 2mm 의 유연한 호스로 그림 5에 도시된 water jacket 좌측하단 입구와 우측상단 출구에 각각 연결하여 수조에 있는 차가운 냉각수를 펌프로 강제 순환시켜주는 구조로 되어 있다.

본 촉각궤환장치는 소자 크기가 작아서, 부품내부의 온도가 균일하다고 가정할 수 있고, 물로 강제 수냉시키고 있으므로 내부 열저항이 외부 열저항에 비해 무시할 정도로 작다고 가정할 수 있다. 따라서 주어진 정상 열전달 문제는 집중 열용량계 (lumped-heat-capacity system)로 가정하였다. 집중열용량계의 적용범위는 (14)와 같고, 정상상태에서의 온도 상승을 (15)로 유도할 수 있다[22].

$$\text{Biot 수} = \frac{h(V/A)}{k} < 0.1 \quad (14)$$

h : convection heat transfer coefficient

V : volume

A : cross sectional area happened convection heat transfer

k : conduction heat transfer coefficient

$$\theta = \frac{P}{hA} \quad (15)$$

p : supplied power

h : convection heat transfer coefficient

θ : difference between the average coil temperature and the surrounding air

2.1 전류에 의해 인가되어지는 열량

기자력과 촉각궤환소자의 외형에 따른 최종 온도 상승식을 유도하기 위해 먼저 전기적으로 코일에 가해지는 열원을 계산하여야 한다. 인가열량은 저항에 비례하고, 저항은 권선의 길이와 코일온도에 따라 변화한다. 권선

코일의 총길이(l)는 다음 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} l &= 2\pi n_i h_c \left\{ \left(r_4 + \frac{d'}{2}\right) + \left(r_4 + \frac{3d'}{2}\right) + \dots + \right. \\ &\quad \left. \left(r_4 + \frac{(2n-l)d'}{2}\right) \right\} \\ &= 2\pi n_i h_c n \left(r_4 + \frac{nd'}{2}\right) = 2\pi N \left(r_4 + \frac{nd'}{2}\right) \quad (16) \end{aligned}$$

N : total turns on coil [turns],

n_i : turns per meter [turns/m]

d' : insulated coil diameter [m], h_c : overall coil length [m]

n : the number of coil layers

저항은 온도상승과 비례적으로 증가되어 진다. 따라서 기준이 되는 20°C에서의 저항과 저항의 온도 계수의 합으로 전기저항을 나타내는 것이 타당하다. 20°C에서의 저항은 (17)로 나타낼 수 있고[24], 코일내 온도 상승에 따른 저항의 변화는 space factor (f : $N \frac{\pi d^2}{4} = h_c t_c f$)를 이용하여 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{20} = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{4l}{\pi d^2} = \frac{4\rho N(2r_4 + nd')}{d^2} \quad (17)$$

ρ : resistivity (Ωm)

N : the number of total coil turns

$$\begin{aligned} R(T) &= R_{20} \{1 + \alpha_{20}(T-20)\} \quad (18) \\ &= 4.71 \times 10^{-8} (0.0039t + 0.922) \frac{2r_4 + nd'}{h_c t_c f} (NI)^2 \end{aligned}$$

α_{20} : Temperature coefficient of resistance at 20°C
(0.0039 in case of copper)

R_{20} : Resistance at 20°C
(1.50×10^{-8} in case of copper)

온도에 따른 저항을 알 수 있으므로 코일 인가 열량(Q_{elec})은 (19)와 같다.

$$\begin{aligned} Q_{elec} &= I^2 R(t) \\ &= I^2 [R_{20} \{1 + \alpha_{20}(T-20)\}] \quad (19) \\ &= 4.71 \times 10^{-8} (0.0039 T + 0.922) \frac{2r_4 + nd'}{h_c t_c f} (NI)^2 \end{aligned}$$

본 장치에서는 코일 온도(T_c)를 최대 100°C로 설정하였다. 이는 coil 내열온도가 120°C이므로 실제 작동에 무리없이 충분히 견딜 수 있는 온도범위이다.

2) 실험을 통한 대류 열전달계수 계산

전기적으로 가해진 열량(Q_{elec})이 코일온도가 일정해진 정상상태에서 얼마나 물에 의해 냉각되어지고(Q_{water}), 얼마나 공기중으로 전달되어지는지(Q_{air})를 여러번의 실험을 토대로 계산하였다. 이 관계식은 (20)에 나타나 있다. 실험 결과 작동 영역에서 $Q_{water}/Q_{elec} = 0.74$ 임을 알 수 있었다.

$$Q_{elec} = Q_{water} + Q_{air} \quad (20)$$

$$Q_{water} = 0.74 Q_{elec}$$

다음으로 물로 냉각되어지는 열량(Q_{water})은 (21)와 같이 Newton의 냉각법칙을 이용하여 표현할 수 있다.

$$Q_{water} = hA(T_c - T_{wa})$$

A : Heat transfer area

T_c : Temperature of coil (21)

T_{wa} : Mean water temperature of in water jacket

이 (21)에서 대류 열전달계수(h)를 계산할 수 있다. 인가 열량에 대한 대류열전달계수의 관계는 그림 18과 같다. 실험결과 대류 열전달계수(h)의 산포가 비교적 크다는 것을 알 수 있었다. 이것은 실험상 오차에 기인한 것으로, 데이터 분석시 최대, 최소 영역을 제거하여 90% 범위안의 값을 평균하여 대류 열전달계수가 $555.4 \text{ W/m}^2\text{C}$ 임을 알 수 있었다. 측각궤환장치는 직경 2.7mm, 길이 13.3mm의 원통형의 소자가 20개 어레이로 배열되어 있다. 따라서 단면적(A)이 $2.256 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 이고, 체적(V)이 $1.523 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 이므로 (14)에 정의되어 있는 Biot수는 0.00514로서 0.1보다 크게 작다. 이로서 집중 열용량계로 가정할 수 있음이 검증되었다.

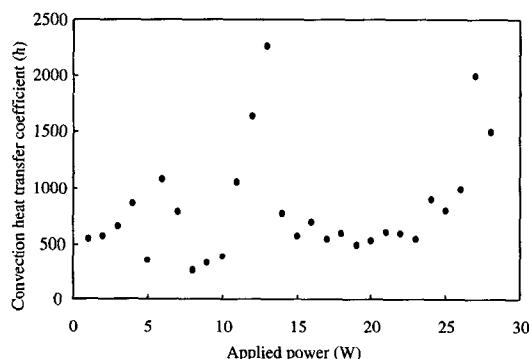


그림 18. 인가 전력과 대류열전달계수간의 관계.

Fig. 18. Relation between convection heat transfer coefficient and applied powers.

3) 온도구속조건식 유도

(19),(20),(21)에 h , A 를 대입, 정리하면 (22)와 같은 코일 온도식을 얻을 수 있다.

$$T_c - T_{wa} = 7.60 \times 10^{-8} \frac{2r_4 + nd}{h_c t_c} (NI)^2 \quad (22)$$

여기서 T_{wa} 는 냉각수 입구 온도와 출구 온도의 평균값이다. T_{in} 과 T_{out} 은 물의 입구온도와 출구온도를 나타낸다. 측각궤환장치가 냉각수에 빠진 열량은 냉각수에 흡수된 열량과 같으므로, 이 관계를 T_{out} 의 항으로 정리하여 계산하면 (23)과 같다. 본 냉각시스템의 유량(\dot{m})은 0.67 g/s , 입구 온도(T_{in})는 5°C 이고, 물 온도 $10\sim90^\circ\text{C}$ 범위에서 비열(C)은 $4.18 \text{ kJ/kg}\text{C}$ 로 잡았다.

$$T_{out} = \frac{0.74 Q_{elec}}{\dot{m}C} + T_{in} = 0.26 Q_{elec} + 5 \quad (23)$$

(23)을 (22)에 대입하여 코일온도(T_c)의 항으로 정리하면 측각궤환장치의 외형과 인가 전류에 대한 관계식을 얻을 수 있다. 본 측각궤환장치는 온도상승에 의한 코

일의 파손을 반드시 방지해야 하므로 실험 결과의 오차를 고려하여 100°C 를 최대 코일 상승 온도로 설정하였다. 즉 상승 코일온도는 100°C 이하가 되어야 한다. 이를 수식화한 온도 구속조건식은 (24)와 같다.

$$\frac{2r_4 + nd}{h_c t_c} (NI)^2 < 1.03 \times 10^7 \quad (24)$$

3. 최적설계 정식화

본 논문에서 다루는 최적설계는 총외형을 직경 2.7mm, 측침을 제외한 길이를 13.3mm로 고정하였을 때, 구속조건을 만족시키는 범위에서 인간이 측각궤환장치를 통해 인식할 수 있는 측각력을 최대로 하는 것이 목적이다. 전자기 장치에서 발생하는 흡인력을 최대로 하는 것이 적절한 목적함수 선정이 아님을 IV.1절의 인간의 측각인식 특성에 대한 고찰을 통해 알 수 있었다. 따라서 최적설계 목적함수를 측침의 이동 범위가 최대가 되도록 잡았다. 그렇게 하므로서 변형 범위를 크게 하는 것이 바로 측각력을 크게 하는 셈이 된다. 최적설계의 구속조건으로서는 다음의 것들을 들 수 있다. 첫째, 외형의 기하학적 구속조건. 둘째, 온도 구속조건. 인가되어지는 전류는 코일의 온도 상승을 고려하여 어느 한도 이상으로 가해져서는 절대로 안된다. 세째, 변위에 대한 측각력 관계식이다. 임의 변위에서 발생되어진 측각력은 피부의 준정적 상태에서의 변위에 따른 저항력보다는 커야 한다. 이것은 발생되어지는 측각력은 피부를 변형시키는 데 필요한 최소 힘보다는 커야 피부의 저항력을 이겨내며 진행될 수 있다는 의미이다. 이 관계식은 최대 변위를 구할 때와 측침의 변위 진행시 측각력의 검토에 사용되어진다. 목적함수인 최대변위를 구하기 위해서는 그림 19의 순서도의 왼쪽에 나와 있는 것과 같은 연산이 필요하다. III장에서 유도되어진 가정자료법에 의한 측각력 유도식은 임의 외형에 대한 치수가 입력되어지면 그 외형에서 발생되어질 측각력을 출력해낸다. FEM을 통해서 구할 때에도 같은 입출력형태로 측각력을 구해낸다. 즉 최대 변위를 바로 얻을 수는 없다. 그래서 다음과 같은 함수 Air_Gap_Function(X)을 고안하였다. 먼저 대략적인 이동 변위를 얻기 위해 측각궤환장치의 공극(air gap, x)이 0일 때, 달리 말해서 고정 프런저에 이동 프런저가 흡인, 접촉되는 순간의 발생 측각력을 구하여, 이 힘이 (13)에서 얼마만큼 피부를 누를 때인지 측침의 초기 이동변위를 알아본다. 그 다음 이 과정에서 구해진 변위를 초기 공극으로 삼아 공극을 줄여 가면서 발생 측각력이 피부 저항력보다 큰지를 검토한다. 만약 대략적으로 구한 최대 변위의 전 영역에서 구속조건을 만족한다면 바로 이 변위가 최대 변위가 되고, 그렇지 못한다면 초기 공극을 감소시켜가면서 같은 방법으로 주어진 조건을 만족할 때까지 검토하여 최대 변위를 구한다.

측각력에 지배적인 설계치수를 설계변수로 잡았다. 최적설계에서 프런저의 각도(X_1 , V_a), 측침의 반경(X_2 , r_2), 측침의 이동 프런저내로의 삽입 깊이(X_3 , d), 고정 프런저의 길이(X_4 , h_b), 인가 전류(X_5 , I)를 설계변수(X)로 잡았다. 이는 사전 실험과 분석을 통해 얻어진 사실을 토

대로 선정한 것이다. 또한 치수 할당 및 변수 범위 선정 시는 정밀 가공상의 제한을 고려하여 표 2와 같이 할당하였다. 여기서 int(a) 표기는 실수 a의 소수점 이하 범위에 의한 정수화를 나타낸다. 본 논문의 최적설계는 다음과 같이 정식화되어 진다.

목적함수 (Objective function)

Maximize Air_Gap_Function (X)

설계 변수 (design variable , 단위: mm)

$X[1] = \alpha$ (plunger 경사각, rad)

$X[2] = r_2$ (촉침의 외경)

$X[3] = d$ (촉침의 삽입깊이)

$X[4] = h_p$ (권선 코일내 fixed plunger 길이)

$X[5] = I$ (인가 전류, 단위: A)

Constraint

1. Geometrical Constraint (단위: mm)

$$0 \leq X[1] \leq 1.346 \quad (77.12^\circ), \quad 0.3 \leq X[2] \leq 0.6$$

$$0 \leq X[3] \leq 3, \quad (r_1 - X[2]) \tan(X[1]) \leq X[4] \leq 13.3$$

$$0 < X[5] \leq 1 \quad (\text{단위: A})$$

2. Temperature Constraint (N: turn수, I: A)

$$\frac{2r_4 + nd}{h_c t_c} (NI)^2 < 1.03 \times 10^7$$

3. Force Constraint (단위: mm)

$$F(x) \geq F_{qs}(x)$$

$F(x)$: 전자기력에 의한 촉각제환장치 발생 촉각력

$$F_{qs}(x) = 0.7157 x^4 - 1.2235 x^3 + 0.8629 x^2 - 0.0501 x$$

표 2. 설계변수와 매개변수 (단위:mm).

Table 2. Design variables and parameters(unit: mm).

Variable	Value & Range
프런저 각도 (α)	X_1
이동 프런저의 반경 (r_1)	$r_1 = r_3$ $0.575 \leq r_1 \leq 0.875$
촉침 반경 (r_2)	X_2
요크(yoke)의 내반경 (r_3)	$1.15 \quad (r_3 = 1.35 - t_3)$
고정 프런저의 권선부 반경 (r_4)	$r_1 + 0.025$
고정 프런저의 중공 반경 (r_5)	$X_2 + g_2$
고정 프런저와 요크(yoke)의 접합두께 (t_1)	0.5
요크(yoke)의 하단부 두께 (t_2)	0.3
요크(yoke) 두께 (t_3)	0.2
요크(yoke)와 이동 프런저간의 간극 (g_1)	0.025
촉침과 고정 프런저간의 간극 (g_2)	0.025
촉침의 삽입 깊이 (d)	X_3
고정 프런저 권선길이 (h_p)	$0 < X_4 < h$
권선두께 (t_c)	$r_3 - r_4$
인가 전류 (I , 단위 A)	X_5
코일 직경 (d_c)	d_c
코일의 권선 수 (N)	$\text{int} (4t_c h_f / \pi d_c^2)$
코일의 권선 층 수 (Layer)	$\text{int} (t_c / \sqrt{fd_c})$

피부특성을 고려한 촉각력-변위 구속조건은 변위를 구하는 함수 Air_Gap_Function(X)내에서 적용되어진다. 본 최적설계의 최적알고리즘은 SQP(Sequential Quadratic

Programming)를 사용하였다. 상용 최적화 프로그램인 Vanderplaats의 ADS(Automated Design Synthesis)에서 SQP를 선택하여 사용하였다[23].

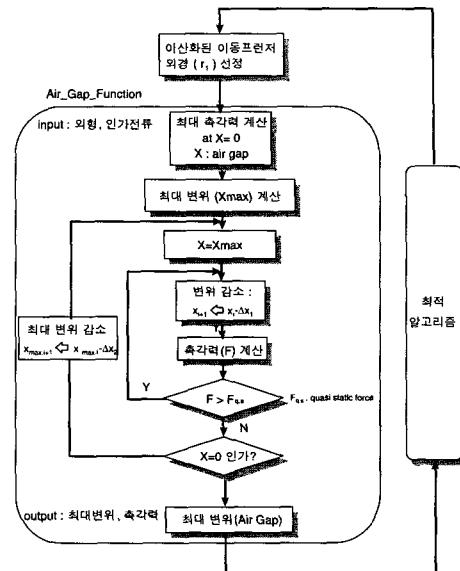


그림 19. 최적화 순서도.

Fig. 19. Flow chart for the design optimization.

4. 최적설계 결론

이동 프런저 반경(r_1)은 설계변수중 매우 중요한 지배요소이다. 그러므로 이동 프런저 반경(r_1)변화에 따른 최적 설계 결과에서 변수들간의 상호관계를 파악하기 위해 각 설계변수별로 추출, 정리하여 그림 20~24에 도시하였다. 이 결과는 가정자료법과 FEM을 통해 각각 구해졌다. 인가 기자력이 선형인 영역에서 많이 벗어나지 않아 선형 가정으로 유도된 가정자료법의 최적치와 FEM을 통한 최적치가 유사함을 알 수 있었다. 하지만 기자력이 커질수록 자속이 포화되어져 점점 오차가 커지게 된다.

그림 20에서 이동프런저 반경(r_1)이 커질수록 프런저의 경사각(α)이 작아짐을 알 수 있다. 이는 경사면이 점점 급해짐을 뜻한다. 이동프런저 반경이 작은 경우에는 코일 권선수 증대로 기자력은 커지지만 단면적이 작아, 흡인력 증대에 제한이 된다. 따라서 이동프런저 반경에 따른 최적설계치는 흡인력을 증대시키고자 프런저 경사각을 완만히 하여 변위변화에 대한 단면적을 크게 하는 경향을 갖게 된다. 펀의 삽입깊이(d)와 이동프런저 반경(r_1) 간의 관계는 그림 21과 같다. 이는 프런저 경사각(α)과 함께 고려하여 고찰해야 한다. 자속은 투자율이 큰 물질에서 작은 물질로 지나갈 때 굴절각이 입사각보다 작아진다. 하지만 본 경우처럼 프런저의 외경이 작고, 경사면이 완만한 경우에는 실제 자속선을 살펴 보면 입사각과 굴절각의 변화가 완만하게 변화함을 알 수 있다. 만일 삽입길이가 0이 되면 공극으로 나가는 자속선이 프런저의 경사면의 법선에 가까워지는 경향이 나타난다. 이는 경사면 고정프런저와 이동프런저 양단간에 주자속선이 지나는 단면적을 감소시키는 결과를 초래하여 흡인력

이 작아지게 된다. 그러므로 이동프런저의 외경이 작을 수록 삽입깊이가 커지는 경향이 나타난다. 또한 그림 22에서 보듯 본 장치와 같은 소형 구조에서는 이동프런저의 반경(r_I)에 대한 고정프런저의 길이(h_P)는 별 변화가 없음을 알 수 있다. 그리고 기자력(NI)이 온도조건과 자속포화한계로 일정한도로 제한되어 있기 때문에 권선수와 전류는 반비례관계이다. 즉 권선수가 많아지면 인가 할 수 있는 전류가 작아지고, 권선수가 작으면 더 많은 전류를 인가 할 수 있다. 이는 권선수가 작으면 권선길이도 짧아져 저항이 작아지기 때문이다.

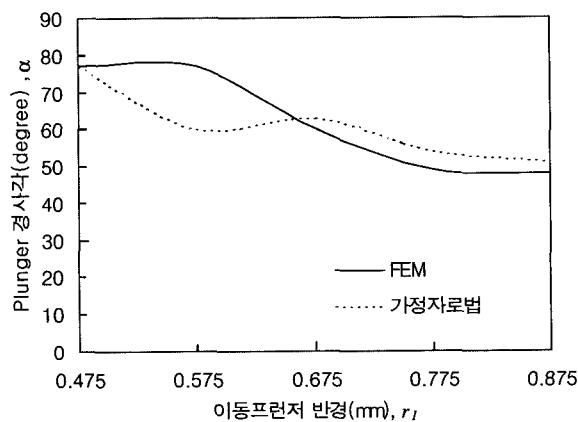


그림 20. 이동 프런저 반경에 따른 프런저각 결과 비교.
Fig. 20. Comparison of the plunger angle along the movable plunger radius.

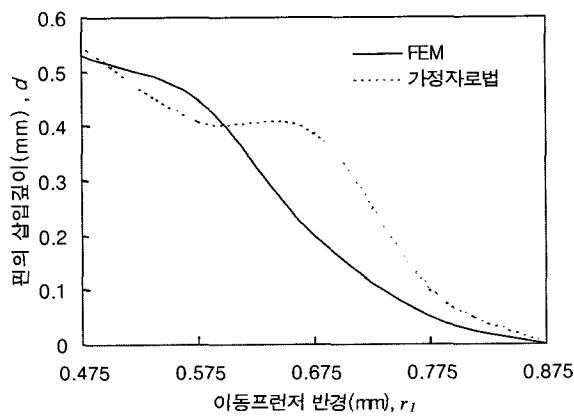


그림 21. 이동 프런저 반경에 따른 핀의 삽입깊이 결과비교.
Fig. 21. Comparison of the pin depth along the movable plunger radius.

그러나 그림 23의 그래프를 통해 알 수 있듯이 일반적으로 이동프런저의 반경이 작아지면 그만큼 권선수를 증가시킬 수 있고, 권선수가 많을 수록 자속세기가 커져 기자력이 커지게 된다. 이는 온도구속조건의 외형에 관련된 계수가 권선 총수가 클수록 작아지므로 같은 온도 조건에서도 기자력(NI)이 커질 수 있기 때문이다. 하지만 그림 24에서 알 수 있듯이 이동프런저 반경이 0.575 mm인 경우를 살펴보면, 이 때가 최대 기자력은 아니

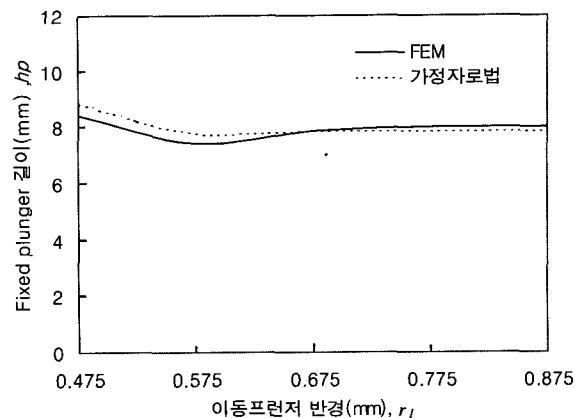


그림 22. 이동 프런저 반경에 따른 고정 프런저 길이 결과 비교.
Fig. 22. Comparison of the fixed plunger length along the movable plunger radius.

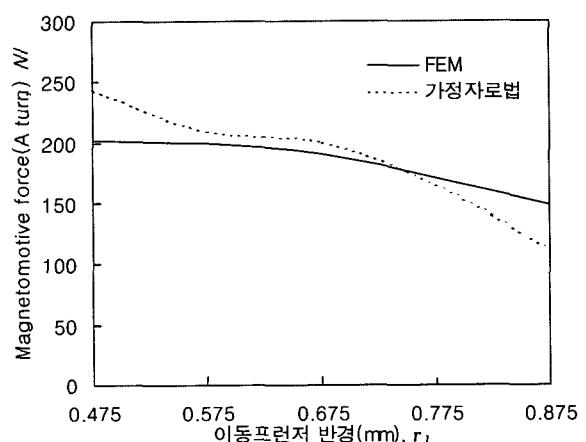


그림 23. 이동 프런저 반경 대한 자기력 비교.
Fig. 23. Comparison of the magnetomotive force along the movable plunger radius.

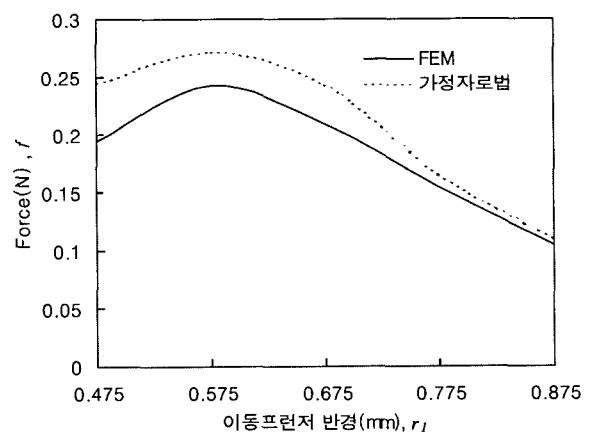


그림 24. 이동 프런저 반경에 따른 가정자로법과 FEM에 의한 힘 비교.
Fig. 24. Comparison of the force solutions between by probable flux paths method and by FEM along the movable plunger radius.

지만 외형이 가장 효율적이어서 최대 변위 즉 최대 촉각력을 낸다는 것을 알 수 있다. 이동 프런저가 0.475mm인 경우는 실제 가공하기가 힘드나, 촉각력 비교를 위해 고려하였다. 이 경우는 기자력에서는 약간의 상승이 있으나, 프런저의 단면적이 작아지기 때문에 촉각력에 중대에 효율적이지 못하다는 것을 알 수 있었다. 이전 제작되어진 샘플(초기 설계)의 설계치수와 본 최적 설계치수를 가정자로법과 FEM결과와 비교하여 표 3에 정리하였다. 그럼 25에서 볼 수 있듯이 최적설계 결과가 약 1.24배 향상이 있음을 알 수 있었다.

표 3. 최적설계결과 ($r_1=0.575\text{mm}$, $N=569$ 권선수).
Table 3. Optimum result in case of $r_1=0.575\text{mm}$ (turn number, $N=569$).

설계변수	초기치(전제 작 Sample)	최적치 (FEM)	최적치 (가정자로법)
X[1], α	1.35(rad) [77.3°]	1.34(rad) [76.8°]	1.04(rad) [59.6°]
X[2], r_2	0.33	0.30	0.30
X[3], d	1	0.45	0.41
X[4], h_p	8.50	7.45	7.81
X[5], l	0.5	0.35	0.35
Coil layer	5	5	5
Force (N)	0.19	0.24	0.27
Air gap	0.82	0.92	0.97

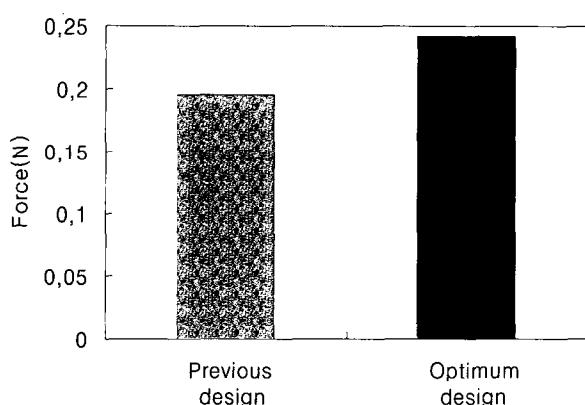


그림 25. 기존의 값과 최적값의 비교.

Fig. 25. Comparison between previous sample and optimum design.

V. 결론

원격조종로봇은 주위 환경의 시각, 청각정보와 팔과 손의 역각 정보등 다양한 정보를 통해 제어되어지고 있다. 하지만 손가락으로 물체를 잡았을 때 느껴지는 촉감과 질감(texture)등 촉각에 관한 정보는 그 중요성에도 불구하고 현재까지 효과적으로 제공되어 지지 않아 보다 섬세한 작업을 수행하는 데 장애가 되고 있다. 그래서 근래에 촉각정보를 조종자에게 나타내주는 촉각 케환 장치(tactile feedback device)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 현재까지의 촉각 케환 장치는 부

착이 용이하지 못하고, 연속적인 제어가 어렵고, 피로해지기 쉽다는 단점을 가지고 있다. 이 단점을 극복하기 위해 본 논문에서는 체적에 비해 촉각력이 크고, 부착성, 제어성이 우수한 전자기 흡인력 방식의 촉각케환장치를 제안하였다.

본 장치는 고정 프런저에 코일이 감겨져 있고, 이 코일에 전류가 인가되어지면 일정 공극만큼 떨어져 있던 이동프런저가 흡인되어 움직임에 따라 촉침이 피부를 자극하는 원리로 작동되어진다. 발생 흡인력은 인가되어지는 전류에 의해 비례적으로 제어되어 진다. 본 장치의 전자기 흡인력을 가정자로법과 가상일법에 의해 유도하였다. 또한 본 해석법의 적용가능성을 유한요소법(FEM) 해석 결과와 비교하여 검증하였다. 그 결과 자속의 미포화 구간에서 가정자로법이 5%이내의 오차를 보임을 알 수 있었다. 이 구해진 흡인력식을 토대로 새로 제안된 촉각케환장치의 최적설계를 수행하였다. 최적설계는 주어진 외형과 조건에서 사람이 인식할 수 있는 촉각력을 최대로 하는 촉각케환장치를 설계하는 것을 목적으로 하였다. 목적함수를 정식화하기 위해 인간의 촉각인식기구를 고찰하여 원격조종로봇의 촉각케환장치에서는 촉침에 의해 변형되어지는 피부 변위가 촉각력 증대에 중요한 역할을 한다는 것을 알았다. 이를 근거로 하여 본 최적설계의 목적함수를 촉침 이동 변위 최대화로 잡았다. 그리고 구속조건으로 구성요소의 기하학적 관계, 인가전류에 의한 코일의 온도 관계, 피부 변위와 촉각력간의 관계를 정식화하여 구속조건식으로 삼았다. 기하학적 구속조건은 구성요소 상호간의 치수관계를 정식화한 것이다. 인가 전류에 의한 코일의 온도관계는 작동하는 동안 내열 온도이하로 유지하기 위해 필요한 구속조건으로, 코일의 온도를 수식화하기 위해 주어진 냉각조건에서의 열전달 계수를 실험을 통해 구하고, 인가되어진 열량은 권선코일의 저항과 전류를 통해 구하여, 이 열전달 계수와 인가열량간의 관계를 뉴우턴의 냉각법칙을 적용, 정식하였다. 피부의 변형변위와 촉각력간 관계에 대한 구속조건은 촉각 케환 장치의 임의 변위에서 발생되어진 촉각력이 상당 변위만큼 피부를 변형시키기 위해 필요한 준정적 촉각력보다 크거나 같도록 규제해주는 조건이다. 이상과 같은 목적함수와 구속조건식을 정식화하고, 이전 설계치수를 초기값으로 입력, 최적화 알고리즘(SQP)을 적용하였다. 그 결과 이전 설계치수에서의 촉각력보다 24%의 향상이 있음을 알 수 있었다.

본 최적설계를 위한 촉각 케환 장치는 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 첫째, 기존의 구동방식(공압, 형상기억 합금등)과는 다른 전자기 흡인력을 이용하였다. 둘째, 이로서 기존 압력이나 진동에 의한 촉각 케환이 아닌 인식 형태와 동일한 힘의 직접적인 묘사가 가능하다. 세째, 전자기 흡인력 구동방식으로 소형, 경량의 설계가 이루어져 4×5 의 어레이를 손끝마디에 부착하여 촉각을 케환할 수 있다. 넷째, 전류제어로 전자기력을 조절할 수 있으므로 연속적인 힘제어가 가능하다. 앞으로는 효율적인 제어가 이루어지도록 촉각 케환 장치의 동특성을 고려한 제어기법에 대한 연구가 진행되어야 하겠다.

참고문헌

- [1] 안인석, 이정훈외 4인, “자석의 반발력을 이용한 원격조종용 촉각체환장치,” *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 3, no 1, pp. 67-75, Feb., 1997.
- [2] K. B. Shimoga, “Finger force and touch feed-back issues in dexterous telemanipulation,” CIRSSE, pp. 159-178, 1992.
- [3] K. Sato, E. Igarashi & M. Kimura, “Development of non-constrained arm with tactile feedback device,” *Proc. of the International Conference on Advanced Robotics (ICAR '91)*, pp. 226-227, 1991.
- [4] R. J. Stone, “Advanced human-system interfaces for teelrobotics using virtual reality & telepresence technologies,” *ICAR'91*, pp. 168-173, 1991.
- [5] M. B. Cohn, M. Lam & R. S. Fearing, “Tactile feedback for teleoperation,” *Proc. of Telemanipulator Technology SPIE*, Nov 15-16, pp. 240-254, 1992.
- [6] D. Kontarinis & R. Howe, “Tactile display of vibrator information in teleoperation and virtual environments,” *Presence-Teloperators and Virtual Environments*, vol. 4, no. 4, MIT Press, Cambridge, MA, pp. 387-402, 1995.
- [7] M. Akamatsu, S. MacKenzie & T. Hasbroucq, “A comparison of tactile, auditory, and visual feedback in a pointing task using a mouse-type device,” *Ergonomics*, vol. 38, no. 4, Taylor & Francis, Basingstoke, Hants, pp. 816-827, 1995.
- [8] R. D. Howe, D. A. Kontarinis & W. J. Peine, “Shape memory alloy actuator controller design for tactile displays,” *34th IEEE Conference on Decision and Control*, 1995.
- [9] K. Pimentelk & K. Teixeira, *Virtual Reality: Through the New Looking Glass*, Windcrest/McGraw-Hill, 1992.
- [10] Bliss, Katcher, Rogers & Shepard, “Optical-to-tactile image conversion for the blind,” *IEEE Trans. Man-Machine System*, MMS-11(1), pp. 58-65, 1970.
- [11] H. R. Nicholls, *Advanced Tactile Sensing for Robotics*, World Scientific, Singapore, 1992.
- [12] W. F. Ganong, *Review of Medical Physiology*, Prentice-Hall, 1989.
- [13] R. S. Johansson and A. B. Vallbo, “Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand,” *Trends in NeuroSciences* 6(1), pp. 27-32, 1983.
- [14] R. A. Russell, *Robot Tactile Sensing*, Prentice Hall Inc, New York, pp. 10, 1990.
- [15] H. R. Nicholls, *Advanced tactile sensing for robotics*, World Scientific, Singapore, 1992.
- [16] E. H. Weber, *The Sense of Touch*, Academic Press, New York, (De Tactu, H. E. Ross, trans. and Der Tastsinn, D. J. Murray, trans. originally published in 1826), 1978.
- [17] R. T. Verrillo, “Effect of contactor area on the vibrotactile threshold,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 35, no. 12, pp. 1962-1966, 1963.
- [18] T. L. Brooks, *Telerobot Response Requirements*, STX Corporation, Report No. STX/ROB/90-03, 1990.
- [19] 강형부, 이종악, 전기자기학, 문운당, 서울, 1990.
- [20] H. C. Roters, *Electromagnetic Devices*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1955.
- [21] D. T.V. Pawluk and R. D. Howe, “Dynamic contact mechanics of the human fingerpad Part I : Lumped response,” *Journal of Biomechanical Engineering*, 1996.
- [22] J. P. Holman, *Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1992.
- [23] G. N. Vanderplaats, *ADS-a Fortran Program for Automated Design Synthesis*, Engineering Design Optimization, Inc, 1985.
- [24] E. S. Hamdi, *Design of Small Electrical Machines*, John Wiley & Sons, 1994.

이정훈



1995년 한양대 기계공학과 졸업. 동대학원 기계설계학과 석사(1997년). 1997년~현재 (주) 한라공조 기술연구소 부품개발 1팀 근무. 주관심분야는 Virtual Reality 및 Control.

박종오



1978년 연세대학교 공대 기계공학과 졸업. 1981년 KAIST 기계공학과(석사). 1987년 독일 Stuttgart대 기계공학과(박사). 1987년~현재 KIST 기전연구부 책임연구원. 주관심분야는 지능형 가공/조립시스템, 서비스로봇, 원격제어로봇, 의료용 로봇.



장 건 희

1984년 한양대학교 기계공학과 졸업.
1986년 한국과학기술원 석사. 1993년
University of California, Berkeley 박
사. 1993년~1994년 Quantum Corpo
ration(USA) 연구원. 1994년~현재
한양대학교 정밀기계공학과 조교수.

관심분야는 Actuator, BLDC Motor 등의 Electro
mechanical System의 해석 및 설계.



이 종 원

1976년 미국 미네소타대 기계공학과
(박사). 1988년~1991년 과학기술처
연구개발조정실 기계연구조정관. 1991
년~1993년 동연구개발조정실장. 1995
년~현재 KIST 휴먼로봇연구 센터
센타장. 주관심분야는 CAD/CAM,
Robotics & Control, Rapid Prototyping.

최 동 훈



1975년 서울대학교 기계공학과 졸업.
1977년 한국과학기술원 석사. 1986년
Univ. of Wisconsin-Madison 박사.
1990년~1991년 Univ. of California,
Berkeley 객원교수. 1986년~현재 한
양대학교 기계설계학과 교수. 관심분

야는 Control, 응용수학.