

낮은 감지 압력신호 값을 가지는 실리콘 족적 센서에 대한 3차원 유한요소 해석 모델 선정 및 검증

성벽경* · 서형규* · 김동환*†

* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Selection and Verification of 3D Finite Element Method Model for Silicone Foot Sensor with Low Detection Pressure

Seong Byuck Kyung*, Seo Hyung Kyu* and Kim Dong Hwan*†

* Dept. Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received March 24, 2014 ; Revised August 28, 2014 ; Accepted September 15, 2014)

Key Words: Foot Sensor(족적 센서), Finite Element Method(유한요소법), 3D Model(3차원 모델), Detection Pressure (감지 압력)

초록: 본 논문은 감도가 낮고 정밀한 족적센서의 특성에 대하여 연구한 논문이다. 이를 위하여 센서의 형상 변수 조절 범위를 낮게 선정하였다. 센서의 감도 해석으로 2차원 해석 모델을 사용할 경우 실험값과 비교한 결과 오차가 많이 나는 것을 확인하였다. 따라서 이 오차를 개선하기 위하여 3D 기반의 새로운 해석 모델을 적용시켜 재해석 하였고, 이를 실험값과 비교한 결과 오차가 개선되었음을 확인할 수 있었다.

Abstract: In this work, an appropriate analysis model of a precise foot sensor with low detection pressure capability under a low range of variation in the dimensional variables was proposed . With a simple two-dimensional model, it was found that a remarkably high error level sometimes occurred between the analysis and experimental results. In order to overcome the error and improve the performance, a three-dimensional model was introduced, and the detection pressure and sensor characteristics were compared with those of the experimental results, which showed its enhanced performance with less error and higher precision.

- 기호설명 -

- U : 변형률 에너지 밀도 함수
- I : 변형률 불변량
- J : 기준 체적과 탄성 변형된 체적의 비
- C : 무니-리블린 재료상수
- d : 비압축성 변수
- E : 탄성계수
- A : Shore-A 경도
- ν : 푸아송 비
- G : 전단계수
- K : 체적탄성계수

1. 서 론

현대에 있어 청소년 및 어린이들, 그리고 노인 및 여성들의 건강은 현대사회에서 중요한 이슈이다. 그러나 아직까지는 이러한 사람들이 자신의 건강을 수시로 점검할 수 있는 시스템이 부족한 것이 사실이다. 현재 자신의 건강을 수시로 점검하기 위해서는 병원에서 이루어지는 건강검진을 수시로 받는 것 밖에는 없는데, 이것은 비용 및 시간 상 불가능한 것이 사실이다. 따라서 건강검진을 대신하여 일상생활 속에서 수시로 간편히 건강을 검진할 수 있는 대체 시스템이 절실히 필요한 상황이다.

이러한 시기에, 발을 이용하여 건강을 점검하

† Corresponding Author, dhkim@seoultech.ac.kr

는 것이 대체방안의 하나로 부각되고 있다. Ben McGraw 등은 비만인 남자아이와 일반 남자아이 사이의 보행과 자세 안정성 차이를 보였으며,⁽¹⁾ 뇌성마비를 갖고 있는 아이들의 치료에 보행 분석이 좋다는 연구 결과도 있다.⁽²⁾ 또한, 소아 만성 관절염 등과 보행과의 관계 또한 연구되어있으며,^(3,4) 보행으로 노인들의 치매를 예측하는 연구 결과도 있다.⁽⁵⁾ 이렇게 단순히 보행 또는 발의 정보를 보는 것만으로 전체적인 건강 및 특정 병에 대한 정보를 알 수 있고, 일상생활 속에서 발의 정보를 측정하는 것은 신발을 이용하면 전혀 문제가 되지 않기 때문에, 발을 이용한 건강점검 시스템은 일상생활 속에서 수시로 건강을 점검하는 시스템으로 발전할 수 있는 가능성이 매우 높다.

본 논문에서는 청소년 및 어린이, 노인, 여성들의 건강 점검을 위한 발 정보 측정 시스템으로 신발 깔창에 센서를 끼워 넣고 이 센서를 이용하여 발의 정보를 측정하는 시스템을 사용할 것이며, 어린이 및 노인, 여성들을 위한 센서 연구를 진행할 것이다.

즉, 낮은 감도(Detection Pressure)를 가지는 센서에 대해 해석 및 실험을 진행하는 것을 통하여 낮은 Detection Pressure를 가지는 센서는 어떠한 특징이 있는지 살펴볼 것이다. 먼저, 해석에는 2D 해석 모델을 사용할 것이며, 이를 실험 결과와 비교하여 오차가 크음을 확인할 것이다. 여기서는 3D 해석 모델로 확장하여 새로운 해석 모델을 세워 낮은 감도에서 적용 가능한 센서모델을 제시할 것이다. 이를 통하여 낮은 Detection pressure에 대한 센서의 특성을 파악할 수 있을 것이며, 따라서 청소년 및 어린이, 노인, 여성들을 위한 족적 센서의 활용 및 상용화에 매우 큰 도움이 될 것이다.

2. 실리콘 센서의 특성

2.1 초 탄성 재료의 해석 이론

초 탄성 재료는 변형률 에너지 밀도 함수로 그 특성을 나타낸다. 그것은 변형률 에너지 밀도 함수를 변형률로 미분하게 되면 응력을 구할 수 있기 때문이다. 변형률 에너지 밀도 함수에는 여러 가지 많은 모델들이 있는데, 그 중 본 논문에서는 보편적이고 실리콘 재질을 비교적 잘 나타낼 수 있는 2-Parameter Mooney-Rivlin 모델을 사용할

것이다. 이 모델은 재료상수 C_{10}, C_{01} 과 비압축성 변수 d 로 이루어진 모델로, 그 식은 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (1)$$

재료상수 C_{10}, C_{01} 과 비압축성 변수 d 중, 먼저 C_{10}, C_{01} 은 Lindemann 식을 이용하여 Shore-A 경도로부터 구할 것이며, 식은 다음과 같다.^(7,8)

$$E(\text{psi}) = 11.427A - 0.4445A^2 + 0.0071A^3 \quad (2)$$

이 식을 이용하여 Shore-A 경도로부터 탄성계수 E 값을 구하고 단위를 MPa로 변환한 후,

$$G = 2(C_{01} + C_{10}) \quad (3)$$

위와 같은 전단계수와 C_{10}, C_{01} 의 관계식⁽⁶⁾ 및

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

전단계수와 탄성계수 간의 관계식을 이용하여 C_{10}, C_{01} 을 구한다. 식 (4)에서 비압축성이라 가정하면 푸아송비 ν 는 0.5라 할 수 있기 때문에,⁽¹⁰⁾

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{E}{3} \quad (5)$$

위와 같이 쓸 수 있다.⁽⁸⁾ 또한 부드러운 재질이 라면 C_{10}, C_{01} 의 관계식은 다음과 같고,⁽⁸⁾

$$C_{01} = 0.25 C_{10} \quad (6)$$

따라서 식 (3), 식 (5), 식 (6)으로부터

$$C_{10} = \frac{E}{7.5} \quad (7)$$

를 얻을 수 있고, C_{10}, C_{01} 을 구할 수 있다.

마지막으로 비압축성 변수 d 값은 체적 탄성계수(K)와 다음과 같은 관계식을 가진다.⁽⁶⁾

$$d = \frac{2}{K} \quad (8)$$

또한 체적 탄성 계수(K)는 탄성 계수와 다음과 같은 관계를 갖는데,

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (9)$$

Table 1 Properties of Silicones

	Base Silicone	Conductive Silicone
Shore-A	20	60
C_{01} (MPa)	0.098861282	0.569063704
C_{10} (MPa)	0.024715320	0.142265926

이때 비압축성이라 가정하면 푸아송비 ν 는 0.5라 할 수 있기 때문에,⁽¹⁰⁾

$$K = \infty \quad (10)$$

이고, 따라서 비압축성 변수 d 는

$$d = \frac{2}{K} = \frac{2}{\infty} \cong 0 \quad (11)$$

위와 같은 값을 갖게 된다.

위 식들을 이용하여 연구에 사용한 Base Silicone 및 Conductive Silicone의 2-Parameter Mooney-Rivlin 상수 값을 아래와 같다.

2.2 센서의 형상 및 작동 방식

센서는 크게 기초 Body를 형성해 주는 Base Silicone과, 센서의 기능적 부분을 담당하는 Conductive Silicone의 두 부분으로 나뉘어져 있다. Base Silicone 하나 당 6개의 Conductive Silicone을 사용하게 되며, 이에 따라 Base Silicone에는 6개의 구멍이 있다. 이 6개의 구멍을 이용하여 Base Silicone과 Conductive Silicone은 결합하게 되고, Fig. 1 및 Fig. 2처럼 Conductive Silicone은 밑바닥, 즉 회로와 일정 거리 높게 위치한다.

센서의 작동 원리는, 압력에 의하여 센서가 눌리게 되면 Conductive Silicone이 아래로 내려가고, 일정수준 이상 내려가면 바닥의 회로와 닿아 작동하게 되는 원리이며, 센서가 작동할 때의 압력 값을 Detection pressure라고 한다. Detection pressure에 대한 자세한 설명은 3.3.2의 실험 방법에서 설명할 것이다.

2.3 센서의 조절 변수

센서의 형상 중 센서의 Detection Pressure 값에 영향을 많이 미치는 부분을 변수로 정하기 위하여 간단한 해석을 진행하였다.

유한요소 프로그램(ANSYS 13)을 이용한 것이며, 본격적인 해석이 아니기 때문에 해석 모델의 간편화를 위하여 Base Silicone으로만 이루어진 센서를

Table 2 Initial values of geometric parameters

	Initial value (mm)
H	0.3
T	0.4
D	0.2
W	1

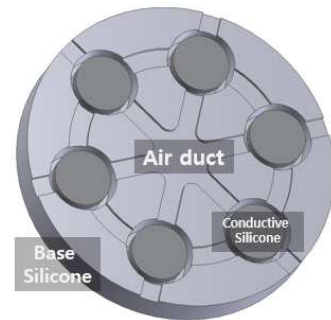


Fig. 1 Shape of the sensor

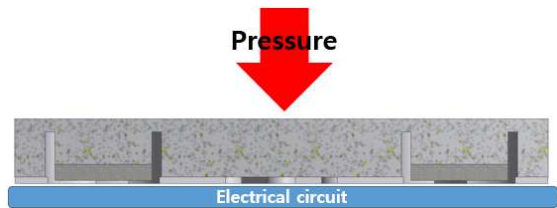


Fig. 2 Operation method of the sensor

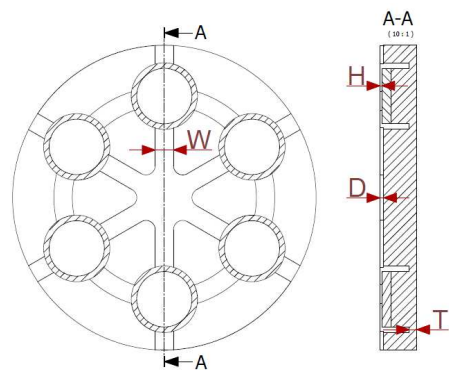


Fig. 3 Geometric parameters of the sensor

해석 모델로 사용하였다. 변수는 총 4가지를 사용할 것이며, Fig. 3과 같다. 변수 조절은 각 변수의 초기 값으로부터 같은 변화량, +0.04mm, +0.08mm, +0.12mm, +0.16mm를 증가시키는 방법을 통하여 행할 것이며, 초기 값은 Table 2와 같다.

해석 결과, H와 T가 D와 W에 비하여 Detection Pressure에 더 많은 영향을 주는 것을 확인할 수 있

였으며, 이는 Detection Pressure 값은 Conductive Silicone이 바닥의 회로와 닿았을 때, 센서에 가한 압력 값이기 때문에 Conductive Silicone이 바닥으로부터 얼마나 떨어져있는지를 나타내는 H값과, Conductive Silicone이 아래로 내려가는데 직접적인 저항으로 작용하는 T값이 매우 중요하기 때문이다. 따라서 변수는 이 두 가지로 결정한다.

3. Case Study

3.1 Case 선정

이번 Case Study의 목적은 낮은 Detection Pressure의 센서를 2D 유한요소 해석을 하였을 경우 그 정확도가 얼마나 되는지 확인하고, 센서의 특성을 파악하는 것이다.

이를 위한 센서 모델은 크게 2종류로 나눌 것이고, 총 6모델을 사용할 것이다. 먼저 Case 1은 H만 변화시키면서 Detection Pressure 값을 보는 경우이며, Case 2는 T만 변화시키는 경우이다. 이를 통하여 H와 T를 변화시키면서 Detection Pressure 값을 측정할 때, 2D 해석과 실험과의 오차를 확인해 볼 것이다. 총 6개 모델의 센서의 변수 값은 Table 4와 같으며, 각 경우에서 사용한 센서의 모델 번호 및 개수는 Table 5와 같다.

Table 3 Result of the analysis of parameters(MPa)

	Initial value	+0.04 (mm)	+0.08 (mm)	+0.12 (mm)	+0.16 (mm)
H	0.02165	0.02475	0.02820	0.03108	0.03424
T	0.02165	0.02350	0.02661	0.02711	0.02920
D	0.02165	0.02170	0.02170	0.02154	0.02158
W	0.02165	0.02180	0.02131	0.02123	0.02125

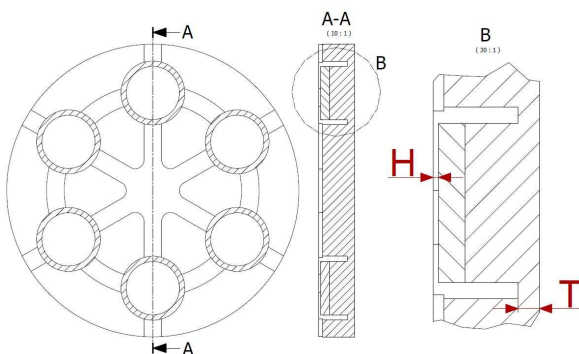


Fig. 4 Geometric parameters - H & T

3.2 해석 모델

해석에는 보편적으로 사용되고 있는 유한요소 해석 프로그램 ANSYS를 사용하였으며, 2D 모델을 사용하였다. 전체적인 모델 구성은 추후에 진행할 실험과 같은 구성을 택했으며, 한 축을 기준으로 자른 단면을 2D 해석 모델로 사용하였다. 여기서 Silicone Sensor 같은 경우에는 실제로는 축을 기준으로 원형대칭인 구조는 아니나, 해석의 편의성을 위해서 대칭이라 가정하였다.

구체적으로 해석 모델에 대하여 살펴보면, 센서는 Ground 위에 놓여 있고, Insole 사이에 끼워져 있다. 또한 센서와 같은 지름을 가지는 Cylinder를 센서 위에 놓은 후, 이 원기둥에 압력을 가해 센서에 압력을 가한다.

Ground와 접촉되는 부분은 모두 Bonded 접촉이며, Base Silicone과 Insole 및 Base Silicone과 Cylinder의 접촉은 Gap 및 Sliding을 허용하였다. 또한, Cylinder가 양옆으로 이동하는 것을 방지하기 위하여 옆면 부분에 수직 방향 지지를 추가하였다. 해석 모델에 사용한 Insole 및 Cylinder의 물성 값은 Table 6과 같으며, Insole의 물성 값은 2-Parameter Mooney-Rivlin 식을 사용하였다.

3.3 제작 및 실험

3.3.1 제작

총 6개 센서를 제작하였으며 센서의 구조는 Fig. 1과 같은 구조로, 두 종류의 실리콘 재질을 사용하였다. 또한, 센서의 중요 형상변수 값은 Table 4와 같다.

Table 4 Sensor models for case study

Model No.	H (mm)	T (mm)
1	0.1	0.4
2	0.2	0.3
3	0.2	0.4
4	0.2	0.5
5	0.2	0.6
6	0.3	0.4

Table 5 The models used in each case

	Case 1	Case 2
Model No.	1, 3, 6	2~5
Number of Model	3	4

Table 6 Properties of insole and cylinder

	Insole		Cylinder
Shore A	12.857	Material	Polyethylene
C_{01} (MPa)	0.081385512	Density (kg/m ³)	950
C_{10} (MPa)	0.020346378	Young's Modulus (Pa)	1.1E+0.9
		Poisson's Ratio	0.42

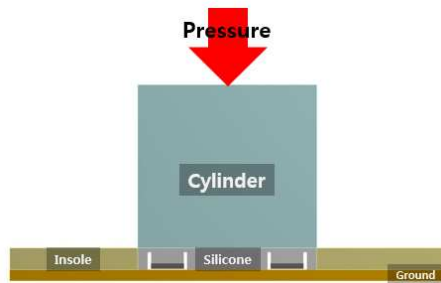


Fig. 5 Analysis model for case study



Fig. 6 Prototypes of silicone sensor



Fig. 7 Test Method

3.3.2 실험 방법

센서를 Insole에 넣고, 센서 위에 Cylinder를 세운 후에 무게 추 등으로 압력을 가하였다. 무게 추의 숫자 및 무게를 늘리며 압력을 가하다 센서가 작동하게 되면, 그 때의 무게를 측정하고, 이 값을 센서 윗면의 면적으로 나누어 센서가 작동될 때의 압력 값, 즉 Detection Pressure 값을 기록하였다. 센서 윗면의 면적은 0.000213825m²이며, 무게 측정에는 1g단위까지 측정 가능한 저울을 사용하였다.

Table 7 2D Analysis result of Case 1

Model No.	H (mm)	T (mm)	Detection Pressure (MPa)
1	0.1	0.4	0.024832000
3	0.2	0.4	0.047265400
6	0.3	0.4	0.072000000

Table 8 Test result of case 1

Model No.	H (mm)	T (mm)	Detection Pressure (MPa)
1	0.1	0.4	0.034832223
3	0.2	0.4	0.062927160
6	0.3	0.4	0.094321992

Table 9 Errors and Relative errors of case 1

Model No.	Detection Pressure (MPa)	
	Error (MPa)	Relative Error (%)
1	0.010000223	28.709688507
3	0.015661760	24.888712673
6	0.022321992	23.665734515

Sensitivity

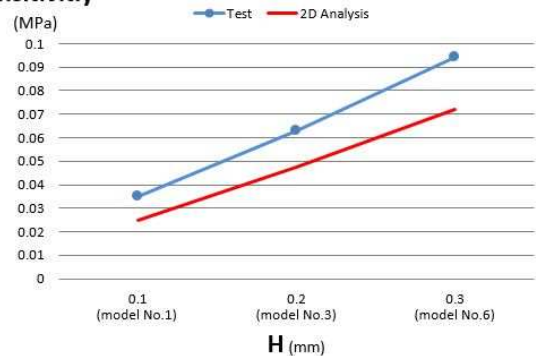


Fig. 8 Test & 2D Analysis graph of case 1

3.4 2D 해석결과와 실험결과와의 비교

3.4.1 Case 1 2D 해석 결과 및 비교

해석 결과 그래프 및 실험 결과 그래프를 보면, H가 0.1mm에서 0.3mm로 선형적으로 증가함에 따라 Detection Pressure 값 또한 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

그러나 실험값을 참값으로 놓았을 때 해석 값과의 오차 및 상대오차를 보면, Table 9에서 확인

Table 10 2D Analysis result of Case 2

Model No.	T (mm)	H (mm)	Detection Pressure (MPa)
2	0.3	0.2	0.045375000
3	0.4	0.2	0.047265400
4	0.5	0.2	0.045682250
5	0.6	0.2	0.047250000

Table 11 Test result of case 2

Model No.	T (mm)	H (mm)	Detection Pressure (MPa)
2	0.3	0.2	0.066960365
3	0.4	0.2	0.062927160
4	0.5	0.2	0.065493745
5	0.6	0.2	0.070993570

Table 12 Errors and Relative errors of case 2

Model No.	Detection Pressure (MPa)	
	Error (MPa)	Relative Error (%)
2	0.021585365	32.236032247
3	0.015661760	24.888712673
4	0.019811495	30.249445836
5	0.023743570	33.444676289

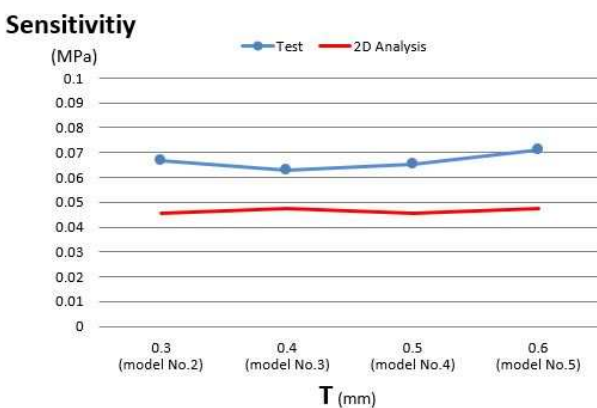


Fig. 9 Test & 2D Analysis graph of case 2

할 수 있듯이 상대오차가 23~28%의 높은 수치를 보이고 있다. 향후 이 데이터를 바탕으로 센서를 제작, 설계하는데 문제가 생길 수 있기 때문에 이러한 오차의 개선은 반드시 필요하다. 따라서 4장에서 이에 대해 논한 후, 결과 해석 및 센서의 특성 파악에 대해서도 논할 것이다.

3.4.1 Case 2 2D 해석 결과 및 비교

결과를 보면, T의 증가에 따른 Detection Pressure 변화가 선형적이거나 규칙적이지 않은 것을 볼 수 있다. 비록 일부 선형적인 형태를 보이고 있는 부분도 있으나 그 변화 폭이 매우 작으며, H와 비교해 보아도 Detection Pressure 값이 선형적으로 증가했다고 보기는 어렵다.

그러나 Case 2에서도 Case 1과 마찬가지로, 이 데이터를 토대로 센서의 특성을 파악하기에는 상대오차가 24%~33%정도로 너무 크기 때문에 제대로 파악하는 것이 어렵다. 따라서 Case 2의 결과에 대한 해석 및 센서 특성 파악은 이러한 오차를 줄인 후에 행할 필요가 있으며, 마찬가지로 이는 4장에서 논할 것이다.

4. 개선 방향

4.1 개선 방안

3장에서 H값이 작은 경우, 해석 값과 실험값의 오차가 큰 것을 알 수 있었다. 이는 H값이 너무 작기 때문에, 2D로 간략히 표현한 해석 모델이 실제 센서의 거동에 저항으로 작용하는 고정 저항 값들을 제대로 표현하기도 전에 센서가 회로에 닿게 되어 실험값보다 현저히 낮은 해석 값이 측정된다고 예측할 수 있다. 즉, Fig. 1에서 볼 수 있는 실제 3D 센서의 경우, 센서에 압력을 가했을 때 센서 밀면의 Airduct 형상 및 실제로는 비대칭인 3D 모델 자체가 일정 고정 저항 값으로 작용하나, 2D 해석 모델의 경우 이러한 Airduct 구조를 제외하였고, 3D 모델을 간략화 한 것이기 때문에, 이러한 곳에서 본래 적용되어야 할 고정 저항 값들이 제대로 적용되지 않아, 실험값과 오차를 내는 것이라 볼 수 있다. 따라서 이러한 오차를 줄이기 위해서 해석 모델을 기존의 2D 해석 모델에서 좀 더 실제에 가까운 3D 해석 모델로 변경할 필요가 있으며, 이렇게 해석한 결과 값을 실험값과 비교하여 개선의 여부를 확인 할 것이다.

4.2 해석 모델링

해석 모델은 기존 2D 해석 모델에서 3D 해석 모델로 변경하였으며, Ground 위에 Sensor가 놓여있고 그 주위를 Insole이 감싸고 있으며, Sensor 위에 Cylinder가 세워져 있고 그 위에 압력을 가하는 형태이다. Ground와 Sensor 및 Insole은 서로 Bonded

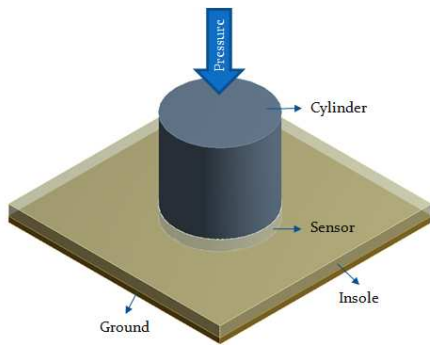


Fig. 10 3D analysis model

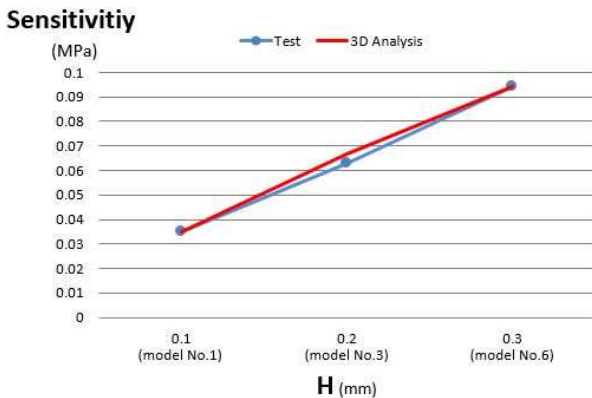


Fig. 11 Test & 3D analysis graph of case 1

접촉으로 고정되어 있으며, Sensor와 Cylinder는 Gap과 Sliding을 허용한 Frictionless 접촉조건을 부여하였다. 또한, Cylinder가 움직이는 것을 방지하기 위하여 Cylinder의 옆면에 Frictionless Support 조건을 주어, 수직방향 자유도를 구속하였다. Cylinder 및 Insole에 사용된 물성 치는 2D 해석 모델에서 사용한 값과 같다.

4.3 해석 결과 및 비교

4.3.1 Case 1 3D 해석 결과 및 비교

Case 1에 대하여 3D 해석 모델을 이용한 해석을 행한 결과, Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 앞서 행한 2D 해석 및 실험과 같이 H가 증가함에 따라 Detection Pressure 또한 선형적으로 증가하는 현상을 보였다. 이는 H가 증가함에 따라, Conductive Silicone이 바닥회로에 닿게 하기 위한 압력 또한 증가해야 한다는 매우 물리적인 결과이며, 또한 H가 Detection Pressure와 선형 비례관계를 갖는다는 것을 뜻한다. 따라서 H를 통한 Detection Pressure 조절은 매우 수월할 것이라고

Table 13 3D analysis result of case 1

Model No.	H (mm)	T (mm)	Detection Pressure (MPa)
1	0.1	0.4	0.035000000
3	0.2	0.4	0.066957000
6	0.3	0.4	0.094320000

Table 14 Errors and Relative errors of case 1

Model No.	Detection Pressure (MPa)	
	Error (MPa)	Relative Error (%)
1	0.000167777	0.481672932
3	0.004029840	6.403975541
6	0.000001992	0.002112215

예측할 수 있다.

또한, 실험값과의 오차 및 상대오차를 봤을 때, Table 14에서 나타나듯이 상대오차가 0~6%로 현저히 줄어든 것을 볼 수 있다. 이는 H라는 변수가 그 크기에 상관없이 Detection Pressure와 선형 비례관계를 갖는다는 것에 대한 검증뿐만 아니라, H가 낮은 경우에는 2D 해석 모델이 실제 센서의 거동을 표현하기도 전에 센서가 회로에 닿아 버려 실험값보다 낮게 해석 값이 측정되고, 이를 3D 해석 모델로 변경하는 것을 통하여 개선할 수 있을 것이라는 예측 또한 검증되었음을 의미한다.

따라서 H가 낮은 경우, H를 조절하며 Detection Pressure를 측정하는 Case 1에 대한 해석은 2D 해석 모델보다는 3D 해석 모델을 사용하여 해석하는 것이 더 정확한 Detection Pressure 값을 측정하는데 도움이 될 것이다.

4.3.2 Case 2 3D 해석 결과 및 비교

Case 2에 대한 3D 해석 결과, T가 0.3~0.6mm로 변하더라도 Detection Pressure 값은 그 차이가 0.01Mpa ~0.02Mpa 이내로 거의 변하지 않는다는 것을 볼 수 있다. 이는 H가 작은 경우에는 Conductive Silicone과 바닥회로와의 거리가 매우 가까워져, 다른 요소에 비하여 H가 Detection Pressure에 주는 영향력이 월등히 커지고, 따라서 상대적으로 T로 인한 저항이 Detection Pressure 값에 미치는 영향이 작아지기 때문이라고 볼 수

있다. 따라서 H가 작은 경우에 T를 통하여 Detection Pressure를 조절하는 것은 비효율적이거나는 것을 알 수 있다.

또한, 실험값과의 오차 및 상대오차를 나타낸 Table 16을 보았을 때, 상대오차가 0~6%로 2D 해석에 비하여 현저히 낮아졌음을 알 수 있다. 이는 곧 Case 2 해석에는 3D 해석이 2D 해석보다 정확하다는 것을 의미하며, 따라서 이번 해석 결과를 통해서 H가 낮은 경우에는 T가 Detection Pressure에 끼치는 영향이 거의 없다는 것과 동시에, 이러한 경우에 대한 해석은 2D 해석보다는 3D 해석 모델을 통한 해석이 더 정확하다고 결론지을 수 있다.

4.3.3 2D 해석 결과와 3D 해석 결과의 비교
이번 논문에서 사용한 센서 모델에 대하여 2D

Table 15 3D analysis result of case 2

Model No.	T (mm)	H (mm)	Detection Pressure (MPa)
2	0.3	0.2	0.067000000
3	0.4	0.2	0.066957000
4	0.5	0.2	0.068975500
5	0.6	0.2	0.070994000

Table 16 Errors and Relative errors of case 2

Model No.	Detection Pressure (MPa)	
	Error (MPa)	Relative Error (%)
2	0.000039635	0.059192055
3	0.004029840	6.403975541
4	0.003481755	5.316164347
5	0.000000430	0.000606382

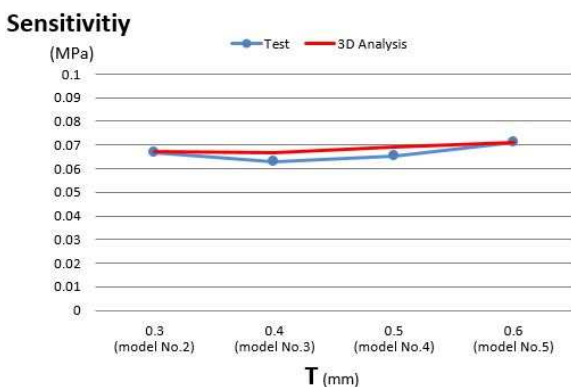


Fig. 12 Test & 3D analysis graph of case 1

해석 결과와 3D 해석 결과 및 실험 결과를 정리하여 비교하여 보면, Fig. 13에서 확인할 수 있듯이 실험 결과와 3D 해석 결과 그래프는 거의 일치하고, 2D 해석 결과 그래프는 전체적인 그래프 형상은 같으나 Detection Pressure 값은 3D 해석 및 실험 값 보다 낮은 수치를 가지는 것을 볼 수 있다.

이는 3D 해석을 진행하기 전 예측한 것과 같은 결과로, 즉 2D 해석이 실제 센서 거동에 작용하고 있는 일정 고정 저항 값들을 제외하였기 때문에 3D 해석 및 실험 결과로부터 일정 수준 offset 되어 있는 현상이 나타나는 것이라고 볼 수 있다. 2D해석에서 3D해석으로의 개선 정도는 Table 17 에서도 볼 수 있는데, 2D 해석에서 3D 해석으로 개선하는 것을 통하여 상대오차 값이 약 20~30% 정도 줄어든 것을 볼 수 있다.

따라서 H가 낮은 경우에는 3D 해석 모델을 이용하여 해석하는 것이 더 정확한 해석 값을 얻는데 도움이 될 것이라 결론지을 수 있다.

Table 17 Errors and Relative errors of 2D analysis and 3D analysis

Model No.	2D Analysis		3D Analysis	
	Error (MPa)	Relative Error(%)	Error (MPa)	Relative Error(%)
1	0.010000223	28.710	0.000167777	0.482
2	0.021585365	32.236	0.000039635	0.059
3	0.015661760	24.889	0.004029840	6.404
4	0.019811495	30.249	0.003481755	5.316
5	0.023743570	33.445	0.000000430	0.001
6	0.022321992	23.666	0.000001992	0.002

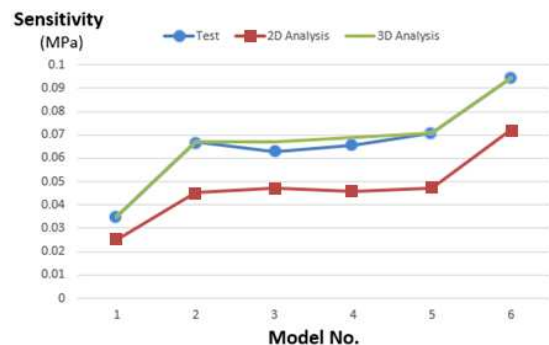


Fig. 13 Comparison graph of 2D analysis and 3D analysis

5. 결 론

H가 낮은 경우에 대하여 해석을 진행한 결과, H는 Detection Pressure와 선형 비례관계를 가진다는 것을 알 수 있었다. 또한, T는 H가 작은 경우에는 Detection Pressure에 영향을 거의 끼치지 않는다는 것 또한 알 수 있었다. H가 작은 경우에 2D 해석 모델을 사용하게 되면 실험값과의 오차가 커져 사용하기 힘들다는 것을 알 수 있었고, 이를 3D 해석 모델로 변경하는 것을 통하여 오차를 크게 개선할 수 있었다.

이번 연구를 통하여 족적 센서의 Detection Pressure 값을 낮은 H에 대해 해석하여 Detection Pressure 값을 예측할 수 있었고, 실험을 통하여 검증한 결과 비교적 높은 정확성을 보이는 것을 볼 수 있었다.

이러한 결과를 바탕으로 H가 낮은 모델을 사용할 시에는 T가 조절변수로서의 기능을 잘 하지 못하기 때문에 H만을 조절하여 Detection Pressure를 조절하는 것이 효율적일 것이라고 예측할 수 있으며, 이러한 방법으로 연구 결과를 활용한다면 족적 센서 시스템을 구성하는데 있어서 구체적인 계획 및 방안을 정하는데 큰 도움이 될 수 있을 것이라 생각된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행 되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) McGraw, B., McClenaghan, B. A., Williams, H. G., Dickerson, J. and Ward, D. S., 2000, "Gait and Postural Stability in Obese and Nonobese Prepubertal Boys," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, Vol. 81, No. 4, pp. 484~489.
- (2) Deluca, P. A., 1991, "Gait Analysis in the Treatment of the Ambulatory Child with Cerebral Palsy," *Clinical Orthopaedics and Related Research*, Vol. 264, pp.65~75.
- (3) Broström, E., Haglund-Åkerlind, Y., Hagelberg, S. and Cresswell, A. G., 2002, "Gait in Children with Juvenile Chronic Arthritis," *Scandinavian Journal of Rheumatology*, Vol. 31, No. 6, pp. 317~323.
- (4) Shah, S. S., 2005, "Abnormal Gait in a Child with Fever: Diagnosing Septic Arthritis of the Hip," *Pediatric Emergency Care*, Vol. 21, No.5, pp. 336~341.
- (5) Verghese, Joe, et al., 2002, "Abnormality of Gait as a Predictor of Non-Alzheimer's Dementia," *New England Journal of Medicine*, Vol. 347, No.22, pp. 1761~1768.
- (6) Cherian, A. T., Sivasubramanian, P. and Rajan, A., 2013, "Analysis of Dynamic Behavior of a Pre-Stretched Circular Hyper Elastic Membrane with Finite Deformation," *International Journal of Innovative Research and Development*, Vol. 2, No. 3, pp. 771~787.
- (7) Paris Altidis, Borg Wraner, Vince Adams, 2005, "Analyzing Hyperelastic Materials/Some Practical Considerations", *Midwest ANSYS Users Group 2005*.
- (8) Gobel, E. F., 1976, "Rubber springs design," *John Wiley, New York*.
- (9) Mc Namara, J., 2011, "Novel Approaches to the Analysis of Localised Stress Concentrations in Deformed Elastomers," *School of Manufacturing and Design Engineering, Unpublished Doctoral Thesis, Dublin Institute of Technology*.
- (10) Destrade, M., Gilchrist, M. D., Motherway, J. and Murphy, J. G., 2012, "Slight Compressibility and Sensitivity to Changes in Poisson's Ratio," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 90, No. 4, pp. 403~411.