

Load Cell 중량센서의 FEM Simulation

논문
7-3-2

FEM Simulations of Load Cell Weighing Sensor

박 찬 원*
(Chan-won Park)

Abstract

The FEM technique was applied to simulate the change of stress characteristics for various structural parameters and loading positions of the load cell. The output voltage of the load cell was then computed to compare with the manufactured load cell. The tendency of the stress variations of the load cell was well agreed with the basic formula of the single fixed beam. Also, the stress characteristics according to the change of loading positions showed respective featured results as different structure. The calculated output voltages of the load cell were very close to those of the real manufactured ones.

Key Words(중요용어) : Load cell(로드 셀), Strain gauge(스트레인 게이지), FEM simulation(FEM 시뮬레이션), Weighing sensor(중량 센서),

1. 서 론

변환기 위에 놓여진 물체의 무게에 의하여 변환기에 일어나는 역학적 변화에 비례하여 전기적인 신호를 내는 기구^{1,2)}를 기본 원리로 하는 변환기 중에서 접착저항 스트레인 게이지(strain gauge)³⁾를 쓴 로드셀(load cell)⁴⁾은 약 십여년전부터 중량 측정센서로 쓰여지기 시작했으며 작은 크기로서 폭넓은 질량측정을 가능케 하고 내구성이 강하고 정밀도가 좋으며 저항변화를 감지하는 방식이므로 디지털화의 응용이 쉬운 장점이 있어 다양한 전자적 질량측정기는 거의 모두 로드셀을 사용하고 있다.

로드셀의 분해능의 정밀도는 삼천 분의 일 정도는 쉽게 낼수 있으며 오천 분의 일의 정밀도 까지 그리 어려운 일이 아니어서 다른 어떤 센서들 보다는 정밀도 면에서는 으뜸이라 할 수 있다. 우리 나라에서도 수년전부터 일부업체에서 로드셀을 생산하고 있으나 대부분 선진기술의 모방에 의한 생산단계에 그쳐 다양한 실험결과를 토대로 한 응용설계 및 시뮬레이션 기법⁵⁾은 아직도 초보적인 단계에 그치고 있다.

본 연구에서는 현재 디지털 저울 및 자동화 계량 시스템에 가장 많이 이용되고 있는 빔(beam)형 로드셀의 물리적 구조의 변화에 의한 응력 특성을 FEM 시뮬레이션⁶⁾을 이용하여 분석하고 전기적 출력을 계산하였으며 아울러 실제 제작한 로드셀 과도 비교 검토하였다.

2. 로드셀의 시뮬레이션과 제작

2.1 빔형 로드셀의 기본구조 및 동작원리

본 실험에서 사용한 빔형 로드셀은 그림 1(a)와 같이 4각의 빔구조의 금속 탄성체에 4개의 notch 부분을 만들고 하중에 대한 응력이 가장 민감한 부분에 4개(G₁~G₄)의 스트레인 게이지를 그림 1(b)와 같이 브릿지 형태로 연결하여 그림과 같은 방향의 압축하중에 대하여 G₁과 G₃는 인장, G₂와 G₄는 압축되어 각각 그에 따른 저항의 변화로 질량의 측정을 전기적 신호로 변환시키는 구조이다. 이때, 각 스트레인 게이지의 초기저항을 R이라 하고 하중에 대하여 변화한 저항성분을 각각±ΔR이라 할 때 나타나는 출력전압은 브릿지 형태의 연결이므로 R₁R₃=R₂R₄를 고려하여 인가전압 Vin에 대하여

$$V_{out} = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot \sum_{n=1}^4 \frac{\Delta R_n}{R_n} \cdot V_{in} \quad (1)$$

* : 강원대학교 공과대학 전기공학과
접수일자 : 1993년 11월 11일
심사완료 : 1994년 2월 22일

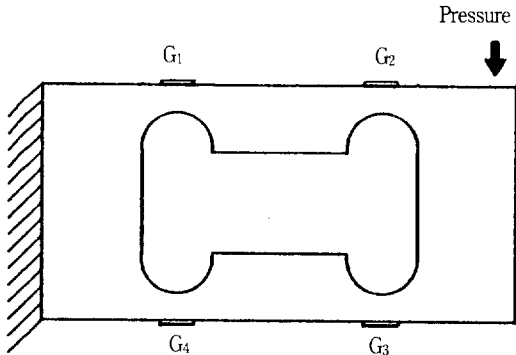
로 되므로⁷⁾ 4개의 스트레인 게이지의 저항치가 모두 같다고 할때 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ 로 하고 이때 각 미소저항변화분들은 $\Delta R_1=\Delta R_3=+\Delta R$ 은 인장, $\Delta R_2=\Delta R_4=-\Delta R$ 로 압축력을 각각 받아 변화하므로 식 (1)은 다시

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{4R} (\Delta R_1 - (-\Delta R_2) + \Delta R_3 - (-\Delta R_4)) \quad (2)$$

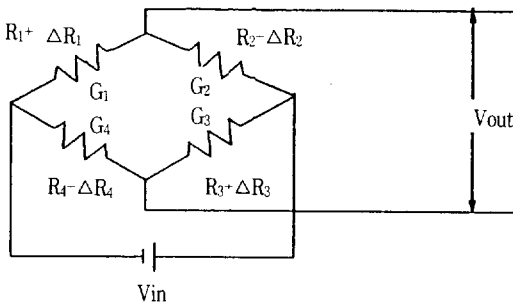
로 나타낼 수 있다. 따라서 로드셀의 출력전압은

$$V_{out} = \frac{\Delta R}{R} V_{in} \quad (3)$$

으로 계산된다.



(a) 기본구조



(b) 등가회로

그림 1 빔형 로드셀의 기본구조와 등가회로

Fig. 1 Fundamental Structure and equivalent circuit of beam type load cell.

2.2 로드셀 Parameter의 시뮬레이션 입력

시뮬레이션에 사용한 로드셀의 종류는 최대하중이 각각 10kg, 25kg, 300kg의 3종류로 각각의 parameter들과 FEM의 element size는 표 1과 같이 달리하였으며 이때 10kg type은 각 parameter값을 표준으로부터 대략 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2의 할당치의

표 1 시뮬레이션 입력용 파라미터

Table 1 Input parameters of FEM simulation.

type	A	B	C
capacity	10kg	25kg	300kg
parameter standard	T=2mm L1=51. B=18. H1=45. R=10.	3.0 40. 18. 25. 8.0	4.95 30. 59. 25. 7.55
parameter variations	각 PARAMETER에 대해 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2배씩		
荷重位置變化	5개소	5	5
element size	2.6mm 1.0mm	1.0	2.6mm

T : 노치의 두께 L1 : 스트레인게이지 중심간의 거리

B : 로드셀 빔의 폭 H1 : 게이지면 사이의 높이

R : 노치의 반경

변화로 달리한 값을 입력하였다. 또한 로드셀에 가해지는 하중점의 위치를 그림 2와 같이 5개소에서 시뮬레이션하였다.

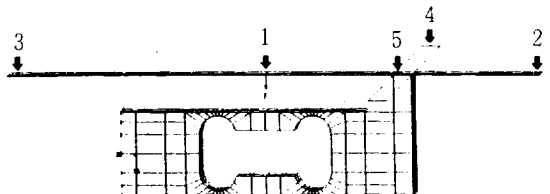


그림 2 로드셀의 하중점 위치

Fig. 2 Loading positions of load cell.

한편 시뮬레이션에 사용한 computer는 미국 Digital Equipment Co.(DEC)의 VAX6340 기종으로 32bit/4CPU로써 OS는 VAX/VMS이고 FEM software는 일본 TOYO INTELLIGENCE Co. LTD의 FEMAS(Finite Element Method Assist System)와 SAP(Structural Analyze Program for Static & Dynamic Response of Linear System)를 사용하였다. 본 FEM 패키지 프로그램에 사용된 식은 응력해석의 기본 평형 방정식으로

$$KU = R \quad (4)$$

로 표시되는 수식이 기본적으로 이용되었으며 이때 K는 강성행렬(stiffness matrix)이고 U는 절점 변위벡터(nodal displacement vector) 그리고 R은 하중벡터(load vector)이다. 또한 boundary condition으로는 그림 2에서 로드셀의 맨 좌측 node들 즉, 빔이 고정되어 있는 부분을 X, Y, Z 방향으로의 변위를 모두 구속한 상태를 경계조건으로 하였다.

2.3 로드셀의 제작

시뮬레이션의 결과와 실제 제작한 로드셀과의 특성비교를 위하여 기준이 되는 파라미터 값을 설계치로 하여 용량별 로드셀을 제작하였다.

빔의 소재는 A2024계열의 T81 알루미늄으로 먼저 이를 NC선반으로 프로그램된 형상대로 가공한 후, 스트레인 게이지가 접착되는 부분은 흡착력이 좋게 400번 알루미늄 분말을 사용한 BS-2 blaster로 표면 가공처리를 행하였다. 그리고 노치부분에 에폭시 접착제 EPY-500을 사용하여 스트레인 게이지를 정확하게 접착시키고 5kg/cm² 압력의 접착 지그를 장치한 채로 130℃의 항온조에서 8시간 건조시켰다.

접착된 4개의 스트레인 게이지의 단자선을 적절한 온도보상저항과 영점보상용저항을 평형브릿지로 조절하여 부착시키고 시일드된 케이블로 외부 단자선을 연결하였다. 최종적으로 습기 방지를 위한 실리콘 코팅제를 발라 흡습에 의한 특성의 드리프트를 최소화 시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 로드셀 물리적형상의 변화에 따른 응력의 변화

그림 3은 최대정격 10kg 로드셀의 각 파라미터 (표 1에서 T, L1, B, H1, R)를 표준값에 대해 각각 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2배의 비율로 변화시켜 입력하였을때 최대응력이 나타나는 notch 부분에서의 응력의 변화를 보인 것이다.

그림에서 보는 바와같이 notch 두께(T)와 빔의 폭(B)을 증가함에 따라 응력은 반비례로 감소함을 보였고 notch pitch(L1)와 notch 반경 R은 그 값을 증가시킴에 따라 응력도 증가하였다. 그런데 빔의 높이(H1)는 그 증가에 따른 응력의 변화는 거의 나타나지 않았다. 한편 빔형 로드셀 구조는 외팔보의 선단에 하중 F가 작용할 경우와 같다고 추론하여 이때 최대 응력점에서의 응력은⁸⁾

$$\sigma_{max} = \frac{6F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (5)$$

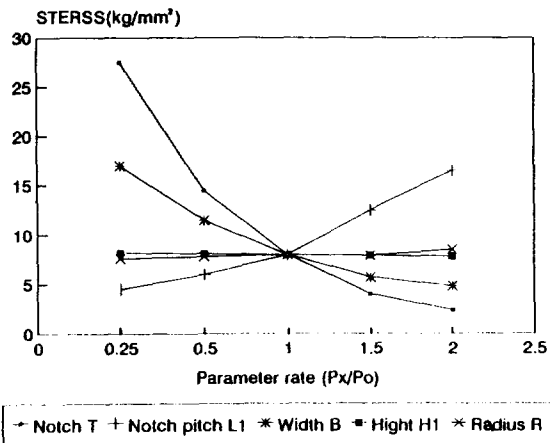


그림 3 파라미터 변화에 의한 10kg 로드셀의 응력 특성

Fig. 3 Stress characteristics of 10kg max. load cell at various parameters.

로 표시된다. 이때 l은 보의길이, h는 두께, b는 폭을 의미한다.

식 (5)를 빔형 로드셀 구조의 시뮬레이션의 결과에 적용하여 검토하기 위해 그림 3에서의 각 두점 사이의 기울기, 예를들어 notch두께 T₁, T₂의 경우

두점에서의 응력을 δ₁, δ₂라 할때 $(\frac{\delta_1}{\delta_2}) =$

$$(\frac{T_1}{T_2})^2 \text{에서 } n = \frac{\log(\delta_1/\delta_2)}{\log(T_1/T_2)} \text{로 기울기를 각}$$

각 계산하여 본 결과 notch두께 T는 n의 값이 -1.67, -1.932, -2.02로 나타나 식(5)의 h가 응력에 대해 -2승에 비례한 것과 비슷한 결과를 보였다. 로드셀 빔의 폭 B는 각각 n이 -0.98, -0.98, -1로 나타나 식(5)의 b가 -1승에 비례한 것과 근접하였다. 그리고 notch pitch L1은 n이 0.912, 0.969, 0.956으로 나타나 이는 식(5)의 l에 해당되므로 이 역시 근접한 것으로 보아 빔형 로드셀의 기계적 응력의 변화는 외팔보의 기본공식에 잘 부합됨을 보여준다.

3.2 Parameter 변화에 의한 로드셀의 출력전압

그림 3의 시뮬레이션 결과에서 나타난 응력의 변화로 로드셀이 실제로 하중센서로 사용되었을 때 출력전압을 계산 할 수 있는데 식(3)으로부터

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\sigma}{E} \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다³⁾. 이때 K는 스트레인 게이지의 저항변화율인데 본 실험에서는 일본 미네베아사의 NMB 48 BM-41을 사용하였으며 이때 메이커로부터의 k값은 2.0이었고 R값은 350Ω이었다. 또한 E는 빔금속의 young을 인데 여기서는 A2024 알루미늄으로 7500kg/mm²이다.

식(3)에서 로드셀의 출력전압은 식(6)의 관계를 대입하여

$$V_{out} = \frac{Vin}{4} \left(\frac{K}{E} \sigma_1 - \frac{K}{E} \sigma_2 + \frac{K}{E} \sigma_3 - \frac{K}{E} \sigma_4 \right) \quad (7)$$

로 나타낼 수 있으므로 출력전압과 응력 δ와의 관계는

$$V_{out} = \frac{VinK}{4E} (\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3 - \sigma_4) \quad (8)$$

로 표시 할 수 있다.

이상의 관계에서 각종 파라미터 변화에 의한 로드셀의 최대하중에 대한 최대응력의 결과치를 식(8)에 대입하여 계산해본 결과 변화의 양상은 응력의 변화와 비슷하였으며 표준치의 출력전압은 27.2mV로 나타났다. 물론 이 값은 실제 로드셀의 제작시 온도보상 저항과 스트레인 게이지의 creep 특성³⁾ 그리고 로드셀 브릿지의 초기 불균형에 의하여 달라질 수 있으나 실제 제작한 최대하중 10kg 로드셀이 최대하중시 24mV의 출력(입력 12V시)으로 조정되어 나타남을 볼 때 시뮬레이션의 결과는 충분히 타당성을 갖는다고 볼 수 있다.

3.3 하중위치의 변화에 따른 로드셀의 특성과찰

로드셀에 가해지는 하중점의 위치를 그림 2와 같이 5개소로 나누어 각각 최대하중을 가한 결과를 시뮬레이션 해 보았다. 그림 4는 최대하중 10kg(A), 25kg(B), 300kg(C)의 3가지 로드셀에서 하중점 위치를 변화시켰을 때 나타나는 로드셀 아래 위의 빔의 표면에 나타나는 응력의 변화인 컴퓨터 출력을 타입별로 각각 합성한 결과이다. 이때 그림의 횡축의 좌표는 표 1의 L1을 x₀=1로 하였을 때 로드셀 중심으로 부터의 비로 표시된다.

결과로서 알 수 있는 바와 같이 출력의 결과 3가지 타입 공통적으로 하중위치 4의 아래 위(CS4, CS-4)에서 다른 위치에서 보다 응력의 변화가 컸는데 이는 빔 자체에 트러스트 하중이 걸림에 의해 대각선의 브릿지 스트레인 게이지의 저항변화분의 차가 크게 나타난 결과로 해석된다. 하중위치 변화에 대한 응력변화의 편차는 10kg타입의 경우가 가장 적었으며 25kg, 300kg으로 갈수록 그 편

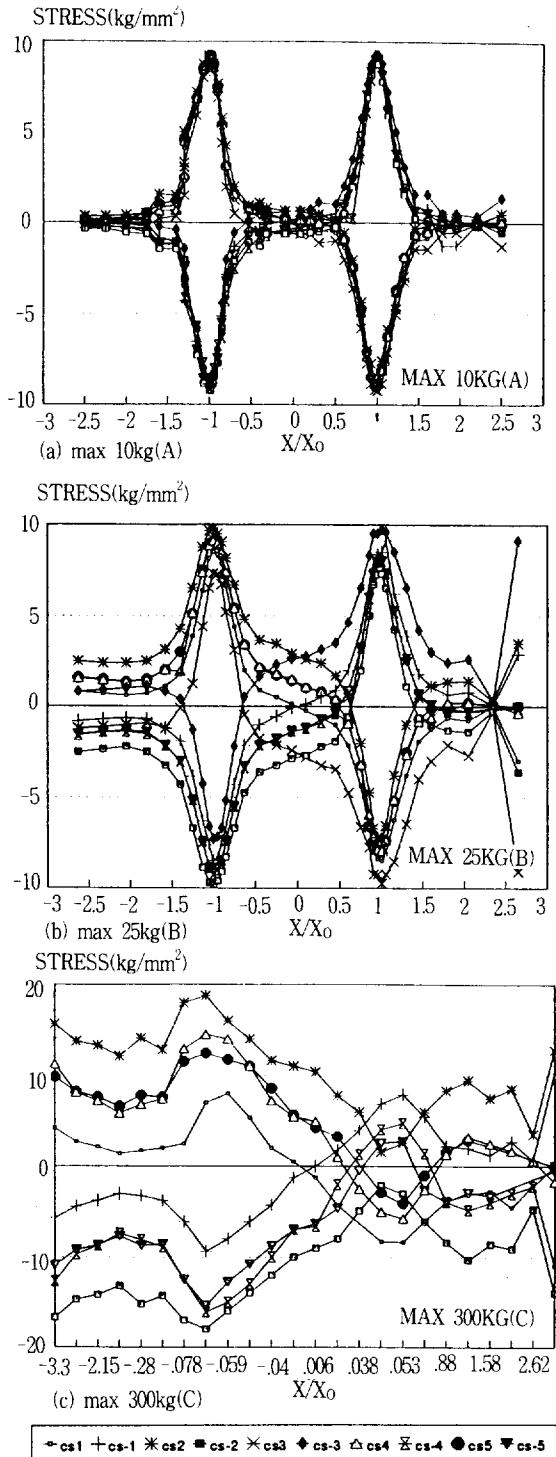


그림 4 하중점 위치의 변화에 대한 각 로드셀의 응력특성

Fig. 4 Stress characteristics of each load cell at various loading points.

차가 컸다. 이는 로드셀의 형상에 관한 특성으로 이에 관한 특성을 분석하기전에 각 파라미터 변화에 대해 하중위치점의 변화의 영향을 검토해 보기 위해서 10kg의 로드셀의 각 파라미터를 달리한 것을 각각 하중위치를 변화시켜 시뮬레이션 시켜 보았는데, 그 결과 로드셀의 빔의 높이(H1) 이외의 출력결과는 표준치에 대해 거의 편차를 보이지 않았으나 H1의 변화는 눈에 띄게 나타났다. 즉 빔의 높이가 클수록 하중점의 변화에 대한 편차가 적게 나타났다. 특히 하중위치 2, 3에 대해서는 빔의 높이가 가장 작은 H1=24mm의 경우 최대응력이 그림 5와 같이 분포하여 대각선의 같은 부호의 응력끼리 다소 큰 편차를 보였는데 이는 그림의 화살표 방향과 같이 로드셀 빔 자체의 구부러짐 현상이 나타난 결과로 분석되며 하중위치에 대해서는 로드셀의 빔의 높이(H1)가 클수록 응력의 편차가 적다는 것을 알 수 있었다. 그러나 이는 최근의 경박단소의 개발추이로 볼때 그에 역행하는 것으로 이에 대한 연구가 현재 로드셀 생산회사의 가장 큰 과제이다.

그림 6은 300kg타입의 로드셀로서 종래의 형상으로 설계된 로드셀은 최대하중 용량이 클수록 높이(H1)가 상당히 크게되어 상업용 저울로 사용시 하중측정 용기의 구조물이 크게되는 단점이 있어 이를 보완하기 위해 특별히 본 연구에서 설계한 것으로 최대응력은 노치부분에 집중적으로 걸리나 빔의 전체에 걸쳐 bending이 작음하게 하여 힘의 분포를 분산시킨 타입이다. 그 결과 역시 시뮬레이션 결과에서도 응력의 분포는 초기 시작점(고정부)에서 하중점까지 다른 두타입 (a), (b)와는 색다르게 나타났다. 즉 그림 4의 (c)의 결과에서 나타난 바와 같이 (a), (b)의 기존의 구조처럼 노치 부분에 집중적인 최대응력이 나타나지 않고 빔의 전체에 걸쳐 응력이 분산되어 있음을 보여준다. 이는 상당히 무거운 하중에 대해 노치부분에 보다 적은 응력의 변화를 나타나게 하여 로드셀의 수명이나 기계적 충격에 대해 우수한 장점이 있다. 그러나 빔의 재질에 민감하게 특성이 변하기 쉬우므로 대량생산시 특성의 균일화를 맞추는 것이 새로운 과제이다.

한편 각 하중점의 위치의 변화에 대한 로드셀 출력전압의 변화는 식(8)의 계산결과에 의해 각각 그림 7과 같이 나타났는데 그 출력전압은 10kg(A)형의 경우는 그런대로 차이가 적었으나 300kg(c)형은 편차가 크게 나타났다. 이는 시뮬레이션 자체의 오차로 해석되며 유한요소법계산 용량상 300kg(c)형의 경우는 형상이 큰 관계로 element의 수를 더 많게 할 수 없어 오차가 크게 나타난 것으로

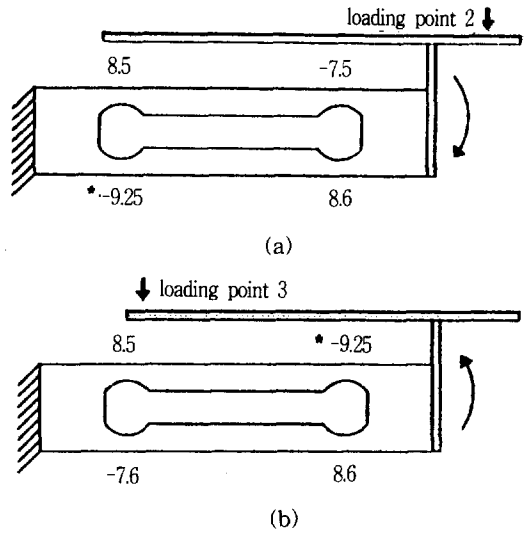


그림 5 하중점 2와 3에서의 로드셀의 응력특성
Fig. 5 Stress characteristics of load cell at loading point 2 and 3(10kg max, H1=24mm load cell)

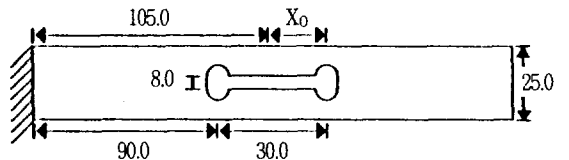


그림 6 고안된 300kg 로드셀의 구조
Fig. 6 Structure of 300kg type load cell.

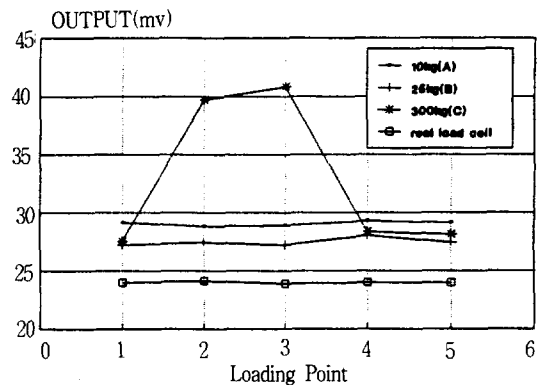


그림 7 하중점 위치의 변화에 대한 각 로드셀의 출력전압특성
Fig. 7 Output voltage characteristics of each load cell at various loading points.

해석된다. 또한 그림에서 실제 제작한 로드셀(real load cell)의 각 타입의 출력전압의 평균값을 비교

로 보여주고 있는데 온도보상 저항과 4귀 오차(4 corner error) 제거 처리를 한 후는 거의 24mV 범위 이내의 출력전압 특성을 보이고 있다. 4귀 오차의 제거는 실험적으로 로드셀 생산시 오차가 나는 부분의 반대편의 노치 부분을 연마공구로 깎는 방법으로 해결하고 있는데 현재 상용 로드셀의 경우 3000분의 1디지트 이내의 범위에서 그 오차를 제거할 수 있으며 이는 각 제조회사의 know-how에 해당된다.

4. 결 론

FEM 시뮬레이션을 이용하여 로드셀의 3가지 종류(최대하중 10kg, 25kg, 300kg)에 대해 형상의 파라미터와 하중점위치를 변화시켜 그 응력의 변화를 시뮬레이션하고 로드셀의 출력전압을 계산해 보았으며 또한 그 결과로 실제 로드셀을 제작해 보았다. 로드셀의 형상의 파라미터를 변화시켰을 때 로드셀에 나타나는 응력은 노치피치와 반경에 대해서는 비례하였고, 노치두께와 빔의 폭은 반비례하였으며 그 비례지수는 외팔보의 기본공식과 잘 일치하였다.

로드셀의 하중 위치 변화에 대한 응력 특성은 각각 특징적인 결과가 나타났으며 계산으로 도출한 전기적 출력특성은 실제 제작한 로드셀의 출력과 근사하게 나타났다.

본 연구의 시뮬레이션 결과는 특수제작 로드셀 및 상용의 다양한 정격의 로드셀을 설계하고 특성을 분석하는데 있어 표준적인 참고자료로서 활용이 기대된다.

Acknowledgement

We would like to thank Mr. K. Naito, Mr. Y. Nakamura and Dr. M. Utsunomiya at Institute of R & D center, ISHIDA Scales MFG. Co., Ltd. in Japan for their generous technical advice and simulations of this work.

참 고 문 헌

1. M. Utsunomiya, A. Yoshida, "Hydrogenated Amorphous Silicon p-i-n Junction Type Strain Gauge", Technical Digest of the 7th Sensor Symposium, pp.59~62, 1988
2. M. Utsunomiya, A. Yoshida, "Effect of mechanical strain on electrical characteristics of hydrogenated amorphous silicon junctions", J. Appl. Phys. 66(1), pp. 308~311, 1989
3. 韓應教, straingauge 理論과 應用, 普成文化社, p.18, 1988
4. 高橋 清, 센サエレクトロニクス, p.241, 昭晃堂, 1984
5. 小島之夫, "빔形 로드셀의 非線形特性", 日本機械學會論文集 57卷 540號, pp.2764~2769, 1991
6. Zienkiewicz, O.C., The Finite Element Method, 3rd ed., p.500, McGraw-Hill, 1977
7. 渡邊 理, ひずみ ゲージと その應用, 日刊工業社, 1987
8. 金奎南, 材料力學, 淸文閣, chp. 5, 1988

저자소개



박찬원

1955년 7월 10일생. 1978년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1982년 고려대학교 대학원 전기공학과 석사. 1987년 고려대학교 대학원 전기공학과 박사. 1991년-92년 일본 ISHIDA SCALES CO. MFG. R&D center, invited engineer. 1987년-

현재 강원대학교 공과대학 전기공학과 부교수.