

Beam形 Load Cell의 FEM Simulation과 그 電氣的特性

朴 贊 元* · 安 光 熙** · 崔 圭 錫**

Electrical Characteristics and FEM Simulations of Beam Type Load Cell

Chan-Won Park * · Kwang-Hee An ** · Gyu-Seok Choi **

ABSTRACT

In this paper, we simulate and calculate the stress and output voltage of the beam structure load cells by using FEM as varying physical structure parameters and loading positions. It is proved that stress enhance as the increase of the notch pitch and radius of the load cell, but decrease as the increase of the notch thickness and beam width. The results are good matched for basic formulas of the single fixed beam, and are verified our simulation is correct. Also, it is found that the stress characteristics of the load cell is varied according to loading positions with structure parameters, and caculated output voltage of the load cell approximate to those of the real manufactured ones. As a result, this study will offer efficient design and analysis technique for making special and variety capacity of load cells.

1. 序 論

급속한 산업의 발전으로 인하여 다수의 질량을 빠르고 정확하게 계속 측정할 필요성이 늘어남에 따라 원료의 절감 및 인건비의 절약을 위해 질량의 자동측정이 요구되었다. 이와같은 추세에 따라 지시방법을 디지털 형태로 할 수 있고 마이크로프로세서와 컴퓨터

에 인터페이스 시킬 수 있도록 전자적인 신호를 내는 여러 가지의 질량측정용 변환기(transducer)가 개발되었다.

변환기 위에 놓여진 물체의 무게에 의하여 변환기에 일어나는 역학적 변화에 비례하여 전기적인 신호를 내는 기구를 기본 원리로 하고 변환기중 접촉저항 스트레인 게이지(strain gauge)¹⁾를 쓴 로드셀(load cell)²⁾은 약 십여년전부터 전자저울용 변환기로 쓰여지기 시작했으며 작은 크기로서 폭넓은 질량

* 강원대학교 공과대학 전기공학과 부교수

** 강원대학교 공과대학 전기공학과 석사과정

측정을 가능케하고 견고하고 충격에 강하며 내구성이 강하고 정밀도가 좋으며 저항변화를 감지하는 방식이므로 응용이 쉬운 장점이 있어 지금에 이르서는 일상생활 및 유통, 공업용, 실험실용에 이르기까지 다양한 전자적 질량측정기는 거의 모두 로드셀을 사용하고 있다.

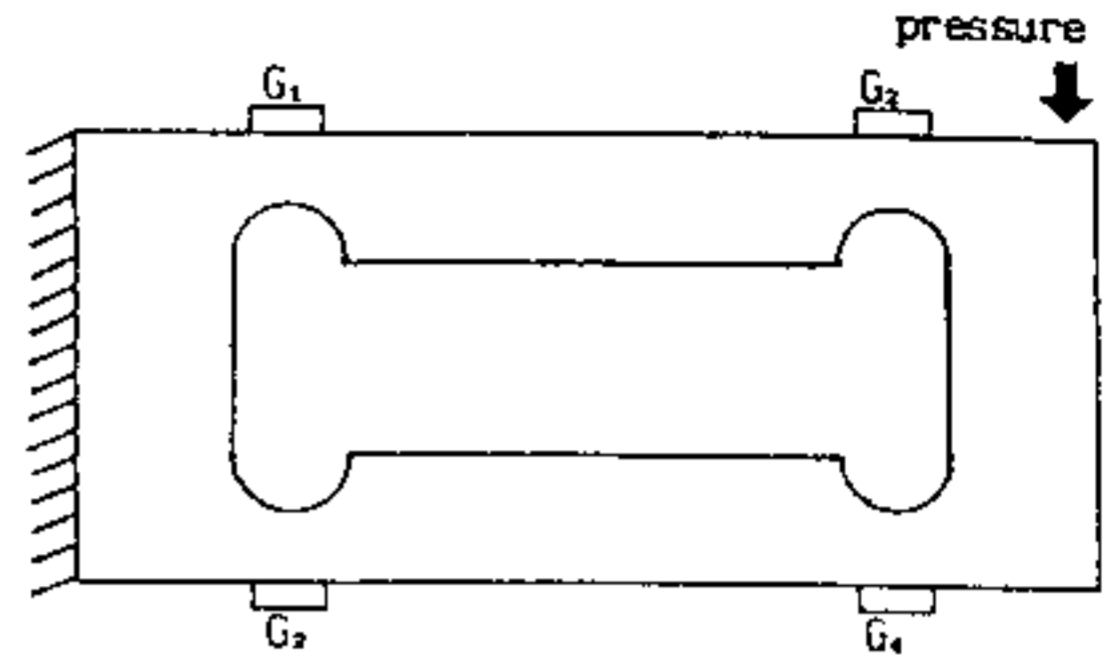
로드셀의 분해능의 정밀도는 삼천분의 일 정도는 쉽게 낼 수 있으며 오천분의 일의 정밀도까지도 그리 어려운 일이 아니어서 다른 어떤 센서들보다도 정밀도 면에서는 으뜸이라 할 수 있다. 우리나라에서도 수년전부터 일부업체에서 로드셀을 생산하고 있으나 대부분 선진기술의 모방에 의한 생산단계에 그쳐 다양한 실험결과를 토대로 한 응용설계 및 시뮬레이션 기법은 아직도 초보적인 단계에 그치고 있다.³⁴⁾

본 연구에서는 현재 디지털 저울 및 자동화 계량 시스템에 가장 많이 이용되고 있는 빔 (beam) 형 로드셀의 물리적 구조의 변화에 의한 응력 특성을 FEM시뮬레이션³⁵⁾을 이용하여 분석하고 전기적 출력을 계산하였으며 아울러 실제 제작한 로드셀과도 비교 검토하였다.

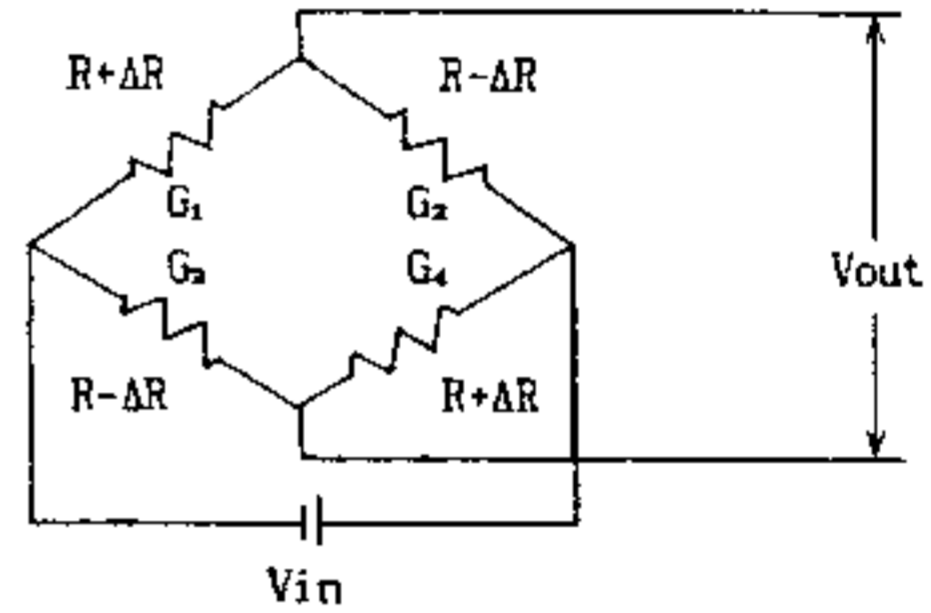
2-1. beam形 로드셀의 基本構造 및 動作原理

본 실험에서 사용한 beam형 로드셀은 그림1(a)와 같이 4각의 beam구조의 금속 탄성체에 4개의 notch부분을 만들고 하중에 대한 응력이 가장 민감한 부분에 4개 ($G_1 \sim G_4$)의 스트레인 게이지를 그림1(b)와 같이 브릿지 형태로 연결하여, 그림과 같은 방향의 압축하중에 대하여 G_1 과 G_4 는 인장, G_2 와 G_3 는 압축되어 각각 그에 따른 저항의 변화로 질량의 측정을 전기적 신호로 변환시키는 구조이다.

이때, 각 스트레인 게이지의 초기저항을 R 이라하고 하중에 대하여 변화한 저항성분을 각각 $\pm\Delta R$ 이라 할 때 나타나는 출력전압



(a)



(b)

Fig.1 Structure and fundamentals of load cell

은 브릿지 형태의 연결이므로 $R_1R_3=R_2R_4$ 를 고려하여 인가전압 V_{in} 에 대하여

$$V_{out} = \frac{R_1R_2}{(R_1+R_2)^2} \cdot \sum_{n=1}^4 \frac{\Delta R_n}{R_n} \cdot V_{in} \quad (1)$$

로 되므로 4개의 스트레인 게이지의 저항치가 모두 같다고 할 때 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ 로 하고 이때 각 미소저항변화분들은 $\Delta R_1=\Delta R_3=+\Delta R$ 로 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.

2-2. 로드셀 parameter의 시뮬레이션 入力

시뮬레이션에 사용한 로드셀의 종류는 최

대하중이 각각 10kg, 25kg, 300kg의 3종류로 각각의 parameter들과 FEM의 element size는 표1과 같이 달리하였으며 이때 10kg type은 각 parameter값을 표준으로부터 대략 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2의 할당치의 변화로 달리한 값을 入力하였다. 또한 로드셀에 가해지는 하중점의 위치를 그림 2와 같이 5개소에서 시뮬레이션하였다.

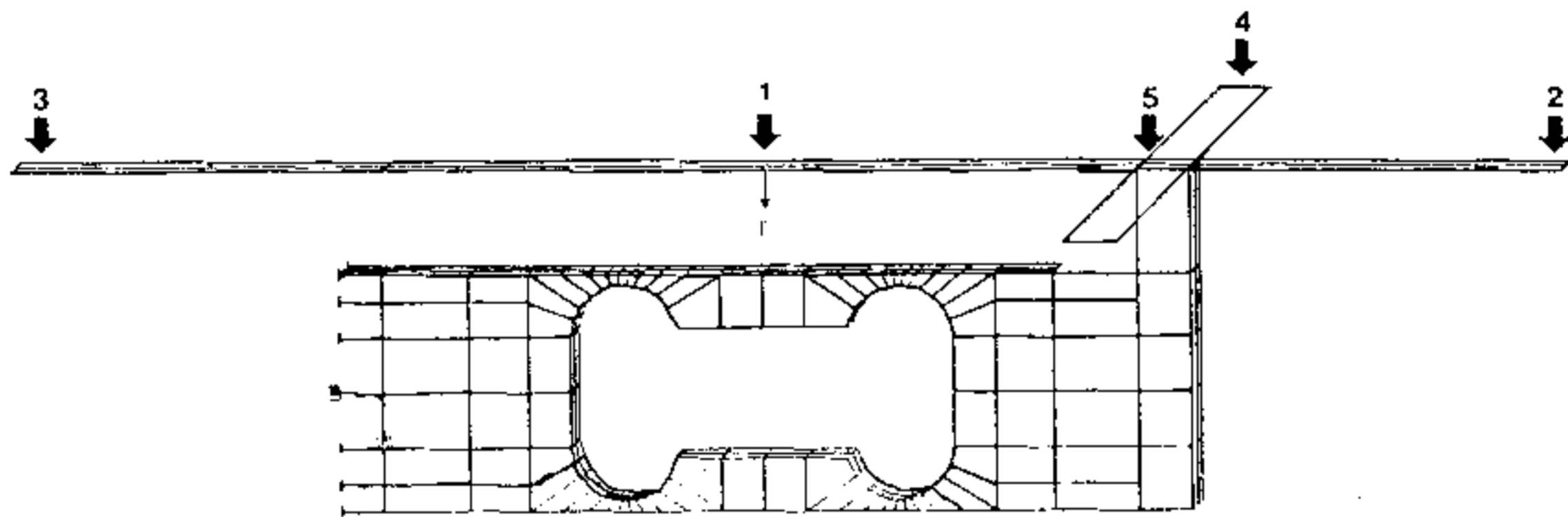


Fig. 2 Loading positions of load cell

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)을 사용하였다. 그림 3은 300kg의 경우의 초기입력 file의 예를 표시한다.

그림 3에서 보는 바와같이 300kg로드셀에서 element size를 2.6mm로 하여 입력하였을 경우 FEM에서 계산된 total node수는 1008개였고 element수는 928개였다.

사진 1과 2는 25kg형 로드셀의 예로 로드셀의 FEM모델과 칼라 그래픽 화면으로 출력된 각 element에서의 응력의 변화를 보여주고 있다.

표 1 시뮬레이션 入力용 parameter

type	A	B	C
capacity	10kg	25kg	300kg
parameter standard	T=2mm L1=51mm B=18mm H1=45mm R=10mm	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 : Thickness of notch, L1 : Length the centers of gauge
B : Width of load cell, H1 : Hight between the gauge faces
R : Radius of notch

```

+1000*n: MAX Node Number/100 (Default=50)
Analysis Mode : (3) ? 3
Element Size (mm/element) : (2.6) ? 2.6
*      Size of LOAD CELL
*
*      -----L2-----\
*      -----L1-----)
*      +=====+=====+-----+
*      |                | T                | ^
*      |                +=====          | |
*      |                =      | /==      | |
*      |                =      | R1 =      | |
*      |                +=====          | |
*      |                ^      | /      | |
*      |                |      +      | |
*      |                H2      |      | |
*      |                |      |      | |
*      |                +-----+-----+
*
Rate Load                W1 (kg) : (6.0) ? 300.
Radius of notch          R1 (mm) : (10.0) ? 7.55
Thickness of notch       T (mm) : (1.4) ? 4.95
Hight between the GAGE faces H1(mm) : (65.0) ? 25
Hight of Pre-hole        H2 (mm) : (40.0) ? 8
Length the centers of GAGE L1 (mm) : (51.0) ? 30
Length of load cell      L2 (mm) : (117.0) ? 210
Width of load cell       B1 (mm) : (30.0) ? 59
N6 = 0 ..... SHORT BEAM
N7 = 0 ..... LOW BODY
total NODE=1008  ELEMENT= 928  SCALE=0.202 (MAXNODE=5000)
$

```

Fig. 3 FEMAS input file of 300kg load cell

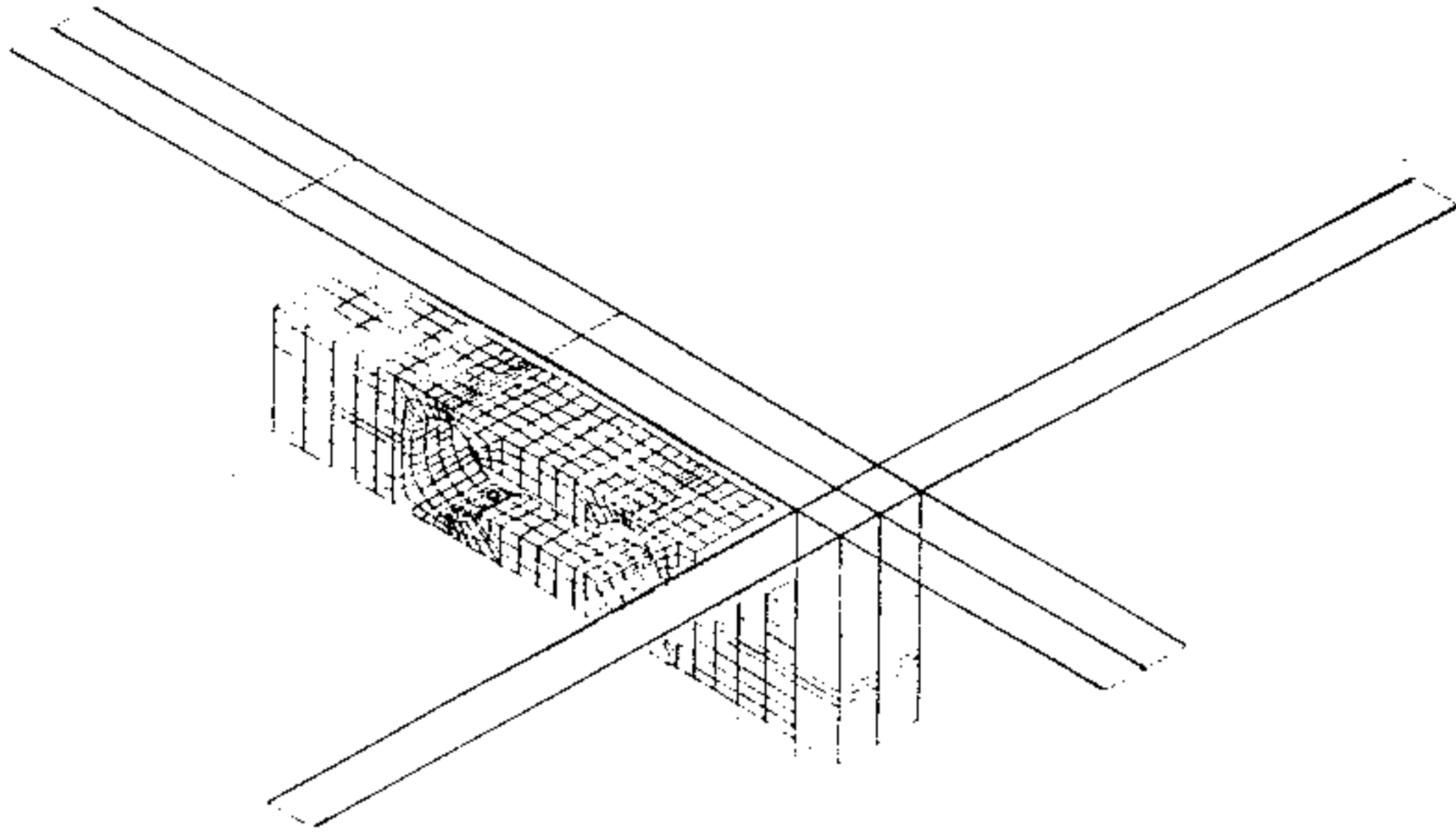


Photo. 1 FEM model of load cell (25kg max)

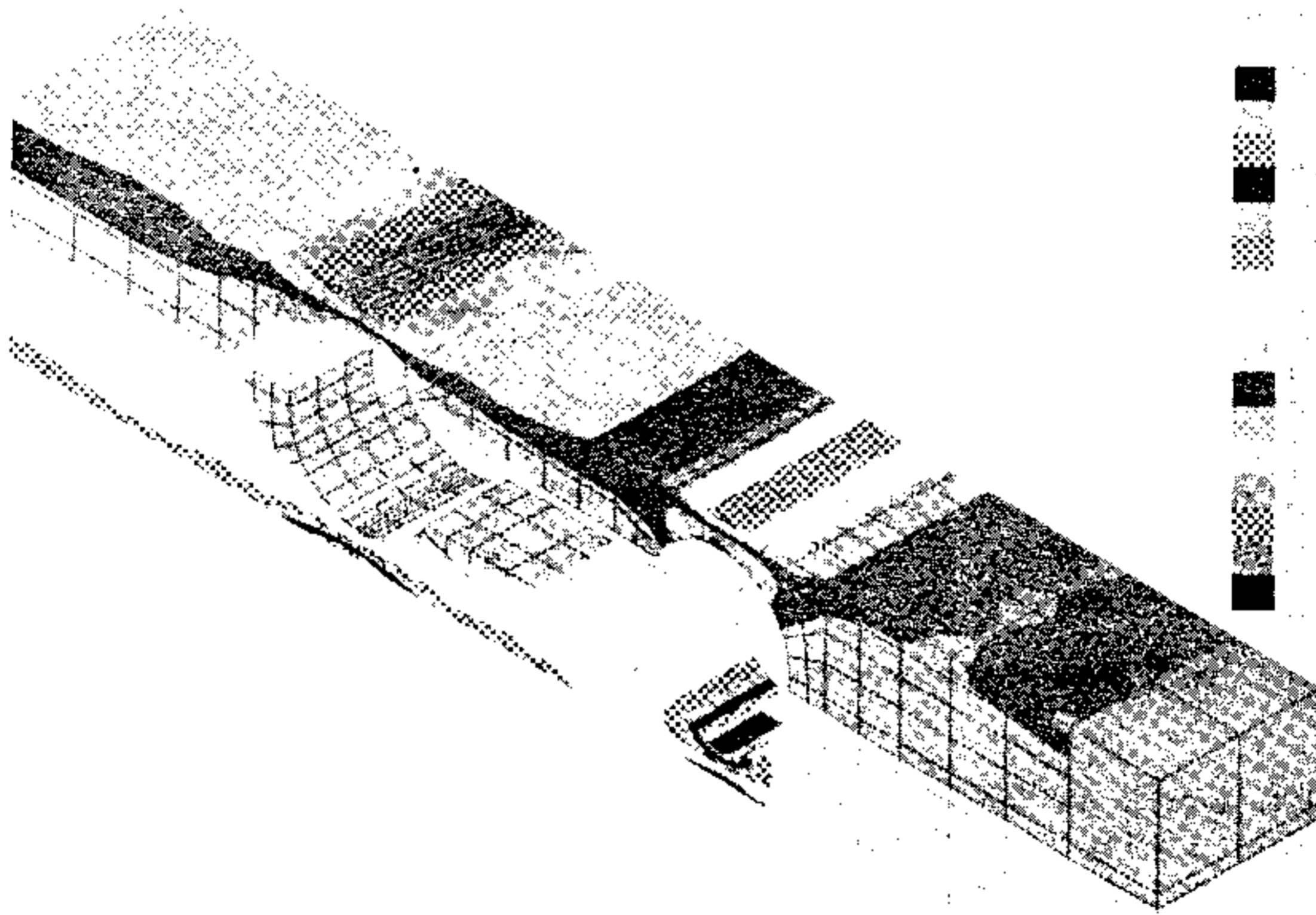


Photo. 2 Graphic stress characteristic of load cell.

3. 結果 및 考察

3-1. load cell 物理的形狀의 變化에 따른 應力의 變化

그림 4는 최대정격 10kg 로드셀의 각 파라미터(표1에서 T, L1, B, H1, R)를 표준값에 대해 각각 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2배의 배율로 변화시켜 入力하였을때 최대應力이 나타나는 notch부분에서의 應力의 變化를 보인 것이다.

그림에서 보는 바와같이 notch 두께(T)와 beam의 폭(B)을 증가함에 따라 應力은 반

비례로 감소함을 보였고 notch pitch(L1)와 notch 반경 R은 그 값을 증가시키에 따라 應力도 증가하였다. 그런데 beam의 높이(H1)는 그 증가에 따른 應力의 變化는 거의 나타나지 않았다. 한편 beam형 로드 셀 구조는 외팔보의 선단에 하중 F가 작용할 경우와 같다고 추론하여 이때 최대 應力점에서의 應力은⁶⁾

$$\sigma_{max} = \frac{6F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (4)$$

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

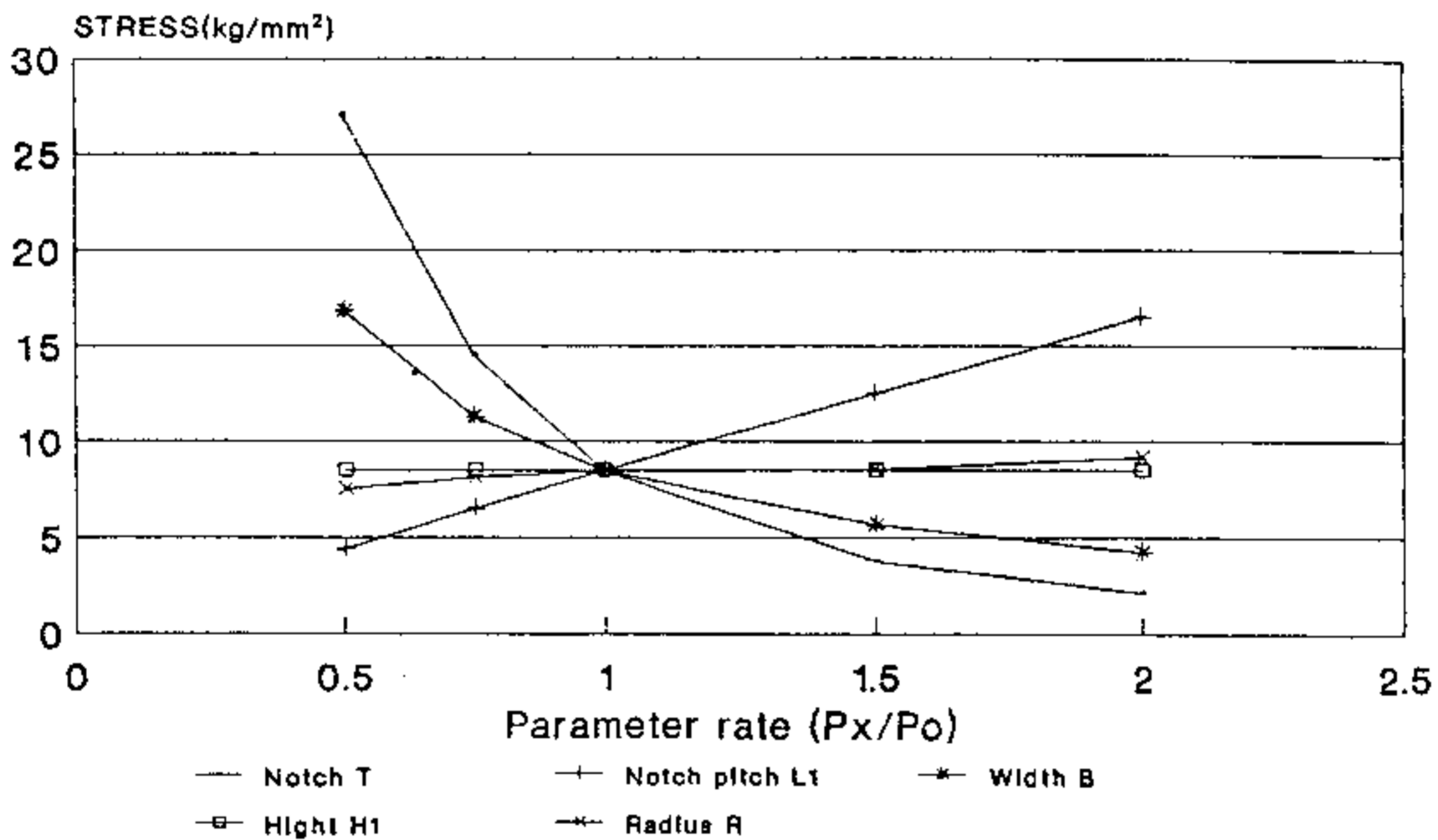


Fig. 4 Stress characteristics of 10kg max. load cell at various parameters

식(4)를 beam형 로드셀구조의 시뮬레이션의 결과에 적용하여 검토하기 위해 그림4에서의 각 두점 사이의 기울기, 예를들어 notch두께 T_1, T_2 의 경우 두점에서의 應力을 δ_1, δ_2 라 할때 $\left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right) = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^n$ 에서

$n = \frac{\log(\delta_1/\delta_2)}{\log(T_1/T_2)}$ 로 기울기를 각각 계산하여 본 결과 notch두께 T는 n의 값이 -1.67, -1.932, -2.02로 나타나 식(4)의 h가 應力에 대해 -2승에 비례한 것과 비슷한 결과를 보였다. 로드셀 beam의 폭 B는 각각 n이

-0.98, -0.98, -1로 나타나 식(4)의 b 가 -1 승에 비례한 것과 근접하였다. 그리고 notch pitch L 은 n 이 0.912, 0.969, 0.956으로 나타나 이는 식(4)의 l 에 해당하므로 이 역시 근접한 것으로 보아 beam형 로드셀의 기계적 응력의 변화는 외팔보의 기본공식에 잘 부합됨으로써 시뮬레이션의 결과가 타당한 것을 입증하였다.

3-2. parameter 變化에 의한 로드셀의 出力電壓

그림 4의 시뮬레이션 결과에서 나타난 응력의 변화로 로드셀이 실제로 하중센서로 사용되었을 때 출력전압을 계산할 수 있는데 식(3)으로부터

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\sigma}{E} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다." 이때 K 는 스트레인 게이지의 저항변화율인데 본 실험에서는 일본 미네베아사의 NMB 48 BM-41을 사용하였으며 이때 메이커로부터의 K 값은 2.0이었고 R 값은 350Ω 이었다. 또한 E 는 beam 금속의 young을인데 여기서는 A2024 알루미늄으로 $7500\text{kg}/\text{mm}^2$ 이다.

식(3)에서 로드셀의 출력전압은 식(5)의 관계를 대입하여

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{4} \left(\frac{K}{E}\sigma_1 - \frac{K}{E}\sigma_2 + \frac{K}{E}\sigma_3 - \frac{K}{E}\sigma_4 \right) \quad (6)$$

로 나타낼 수 있으므로 출력전압과 응력 σ 와의 관계는

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

로 표시할 수 있다.

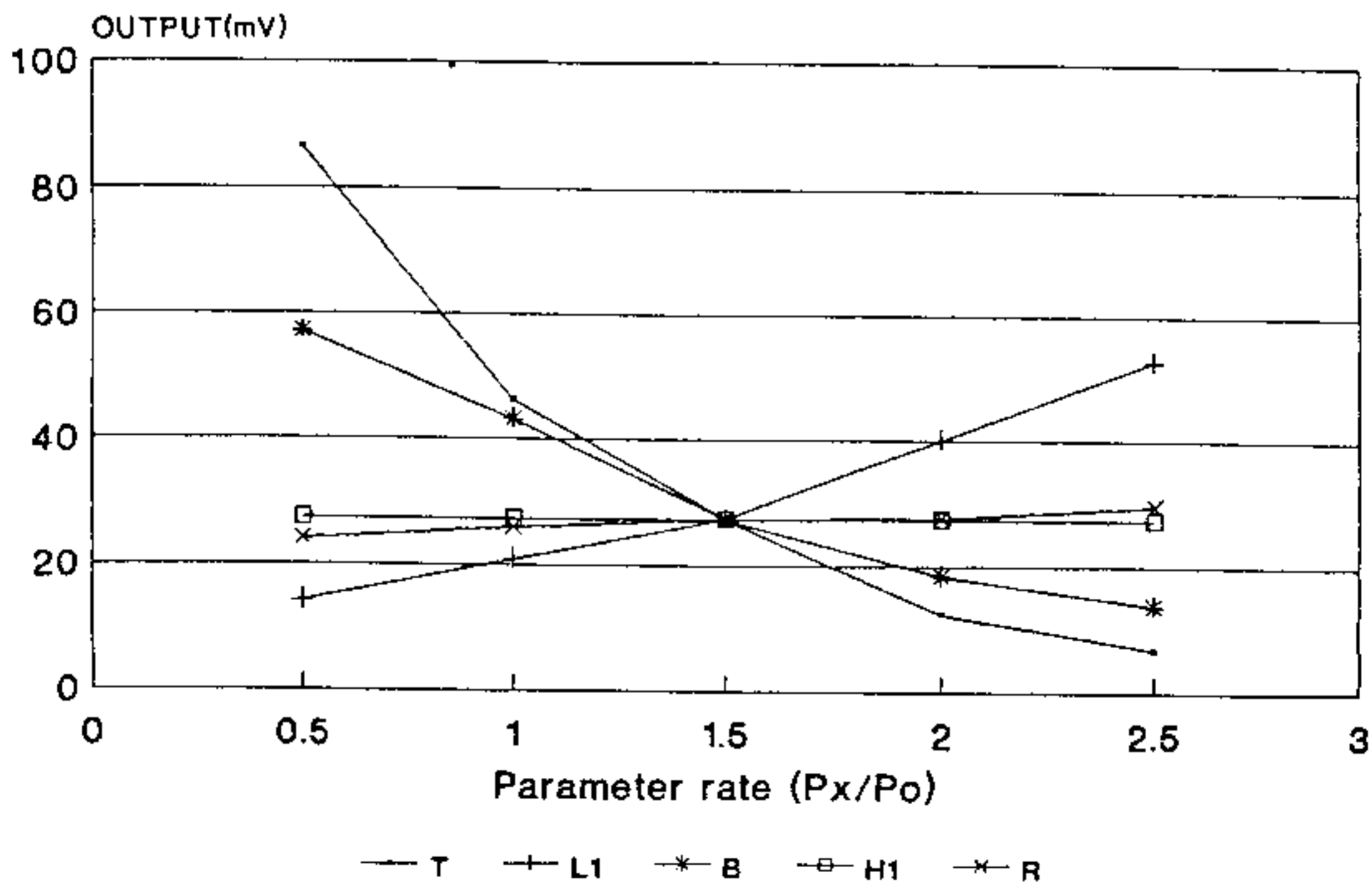


Fig. 5 Output voltage characteristics of load cell at various parameters

이상의 관계에서 각종 파라미터 변화에 의한 로드셀의 최대하중에 대한 최대응력의 결과치를 식 (7)에 대입하여 계산해본 결과 그림 5와 같이 나타났다. 변화의 양상은 응력의 변화와 비슷하였으며 표준치의 출력전압은 27.2mV로 나타났다. 물론 이 값은 실제 로드셀의 제작시 온도보상 저항과 스트레인 게이지의 creep특성 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.

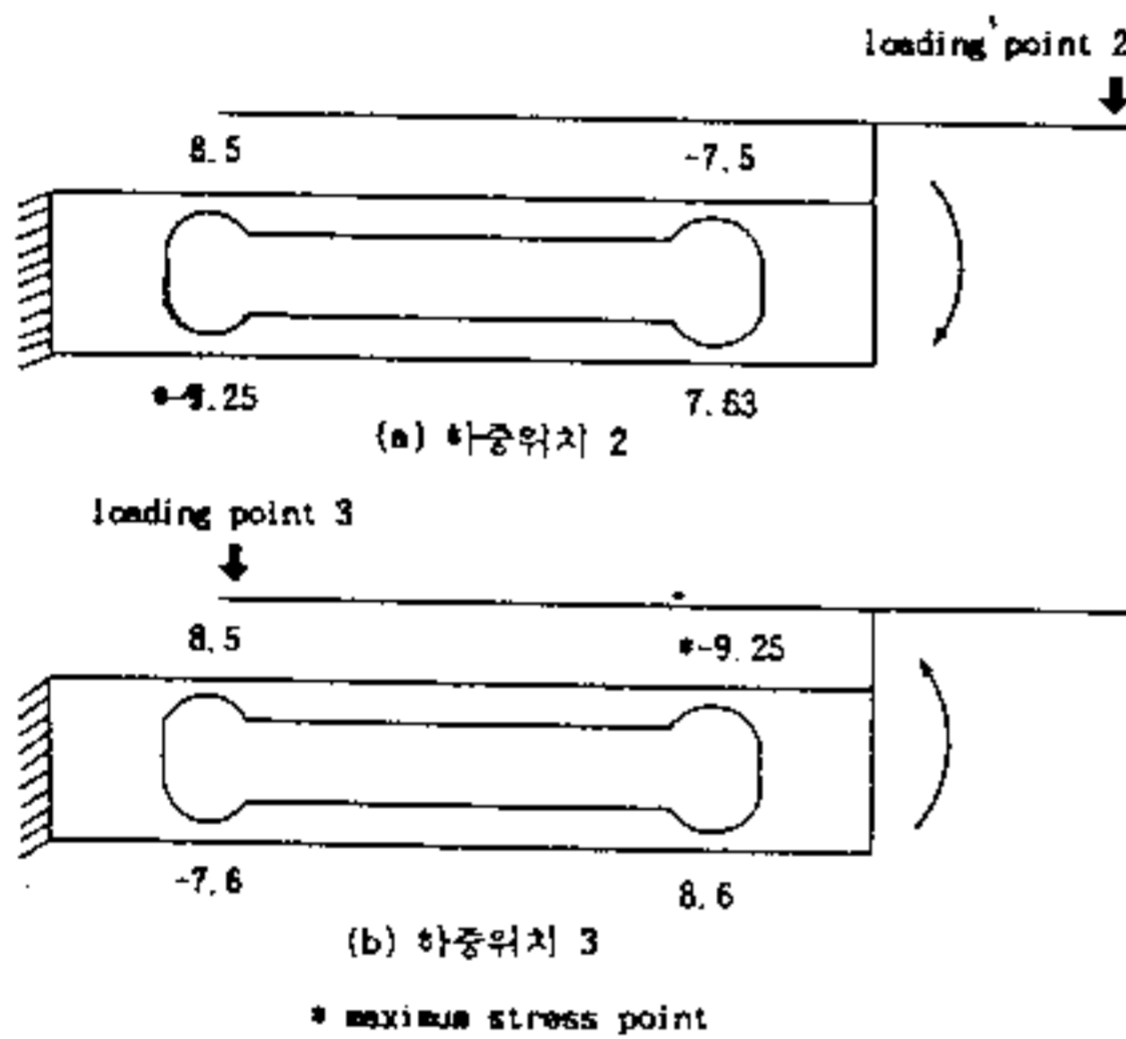


Fig. 6 Stress characteristics of load cell at loading point 2 and 3 (10kg max, H1= 24 mm load cell)

결과로서 알 수 있는 바와 같이 출력의 결과 3가지 타입 공통적으로 하중위치 4에서 다른 위치에서 보다 응력의 변화가 컸는데 이는 beam 자체에 트러스트 하중이 걸림에 의해 대각선의 브릿지 스트레인 게이지의 저항변화분의 차가 크게 나타난 결과로 해석된다. 하중위치변화에 대한 응력변화의 편차는 10kg 타입의 경우가 가장 적었으며 25kg,

300kg으로 갈수록 그 편차가 컸다. 이는 로드셀의 형상에 관한 특성으로 이에 관한 특성을 분석하기전에 그 파라미터 변화에 대해 하중위치점의 변화의 영향을 검토해 보기 위해서 10kg의 로드셀의 각 파라미터를 달리한 것을 각각 하중위치를 변화시켜 시뮬레이션시켜 보았는데, 그 결과 로드셀의 beam의 높이(H1) 이외의 출력결과는 표준치에 대해 거의 편차를 보이지 않았으나 H1의 변화는 눈에 띄게 나타났다. 즉 beam의 높이가 클수록 하중점의 변화에 대한 편차가 적게 나타났다. 특히 하중위치 2, 3에 대해서는 beam의 높이가 가장 작은 H1 = 24mm의 경우 최대응력이 그림 6과 같이 분포하여 대각선의 같은 부호의 응력끼리 다소 큰 편차를 보였는데 이는 그림의 화살표 방향과 같이 로드셀 beam 자체의 구부러짐 현상이 나타난 결과로 분석되며 하중위치에 대해서는 로드셀의 beam의 높이(H1)가 클수록 응력의 편차가 적다는 것을 알 수 있었다. 그러나 이는 최근의 경박단소의 개발추이로 볼 때 그에 역행하는 것으로 이에 대한 연구가 현재 로드셀 생산회사의 가장 큰 know-how이다.

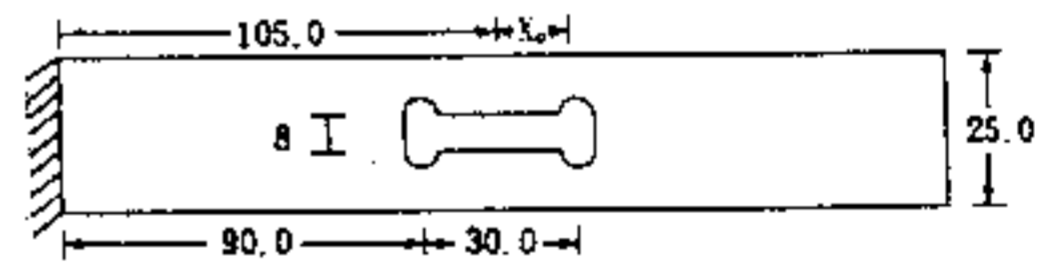


Fig. 7 Structure of 300kg type load cell

그림 7은 300kg 타입의 로드셀로서 종래의 형상으로 설계된 로드셀은 최대하중 용량이 클수록 높이(H1)가 상당히 크게 되어 상업용 저울로 사용시 하중측정 용기의 구조물이 크게 되는 단점이 있어 이를 보완하기 위해 특별히 설계한 것으로 최대응력은 물론 노치부분에 집중적으로 걸리나 beam의 전체에 걸쳐 bending이 작용하게 하여 힘의 분

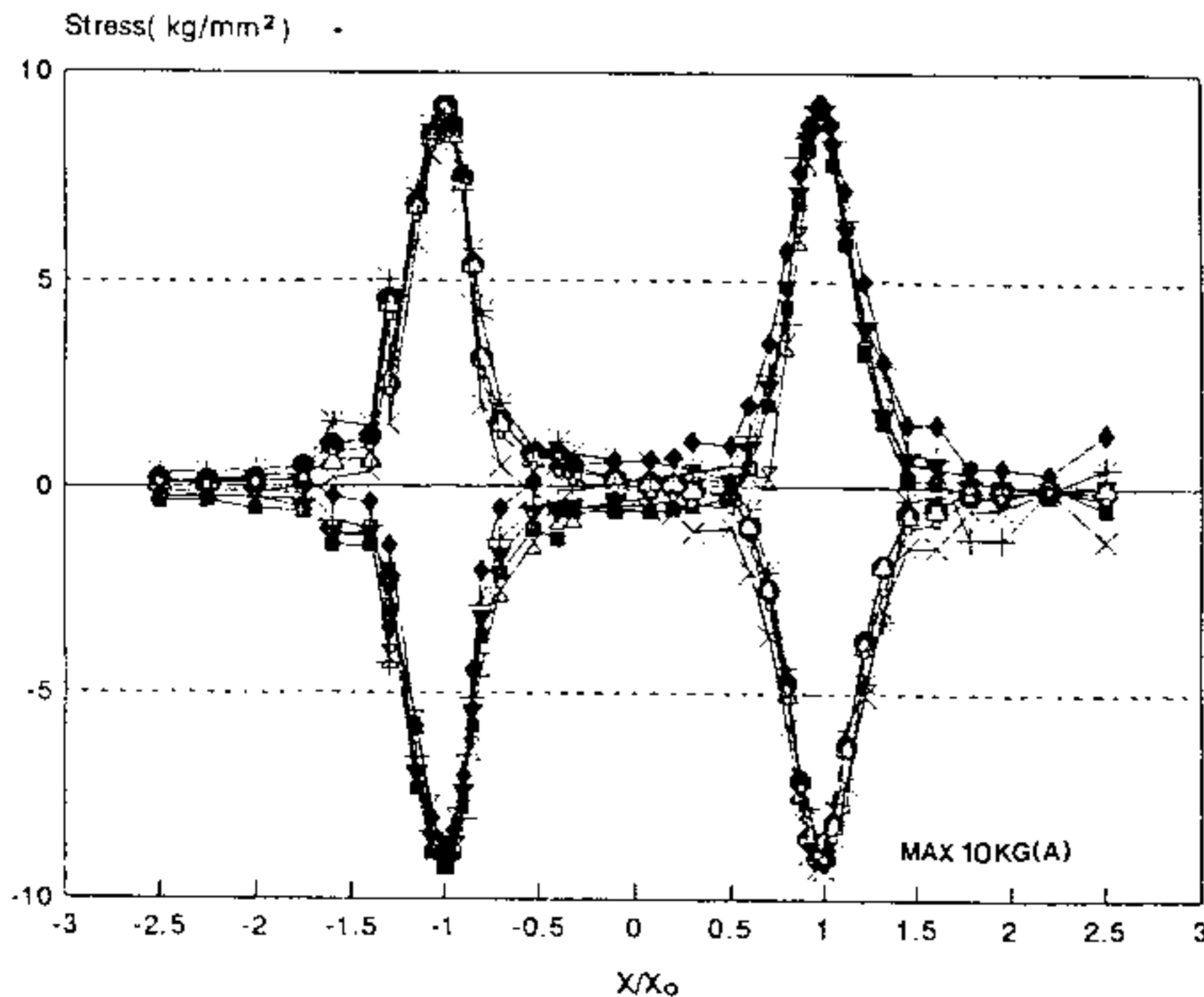
포를 분산시킨 타입이다. 그 결과 역시 시뮬레이션 결과에서도 응력의 분포는 초기 시작점(고정부분)에서 하중점까지 다른 두타입(A, B)과는 색다르게 나타났다.

3-3. 荷重位置의 變化에 따른 로드셀의 特性考察

로드셀에 가해지는 하중점의 위치를 그림 2와 같이 5개소로 나뉘어 각각 최대하중을 가한 결과를 시뮬레이션 해 보았다. 그림 8은 최대하중 10kg (A), 25kg (B), 300kg (C)의 3가지 로드셀에서 하중점 위치를 변화시켰을 때 나타나는 로드셀 아래 위의 beam의 표면에 나타나는 응력의 변화인 컴퓨터 출력을 타입별로 각각 합성한 결과이다. 이때 그림의 x축의 좌표는 그림 7의 x_0 를 1로 하였을 때 로드셀 중심으로 부터의 비로 표시된다.

한편 각 하중점의 위치의 변화에 대한 로드셀 출력전압의 변화는 식 (7)의 계산결과

에 의해 각각 그림 9와 같이 나타났는데 그 출력전압은 10kg (A)형의 경우는 그런데로 차이가 적었으나 300kg (C)형은 편차가 크게 나타났다. 이는 시뮬레이션 자체의 오차로 해석되며 유한요소법계산 용량상 300kg (C)형의 경우는 element의 수를 더 많게 할 수 없어 오차가 크게 나타난 것으로 해석된다. 또한 그림에서 실제 제작한 로드셀(real load cell)의 각 타입의 출력전압의 평균값을 비교로 보여주고 있는데 온도보상 저항과 4귀 오차(4 corner error) 제거 처리를 한후는 거의 24mV범위 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.



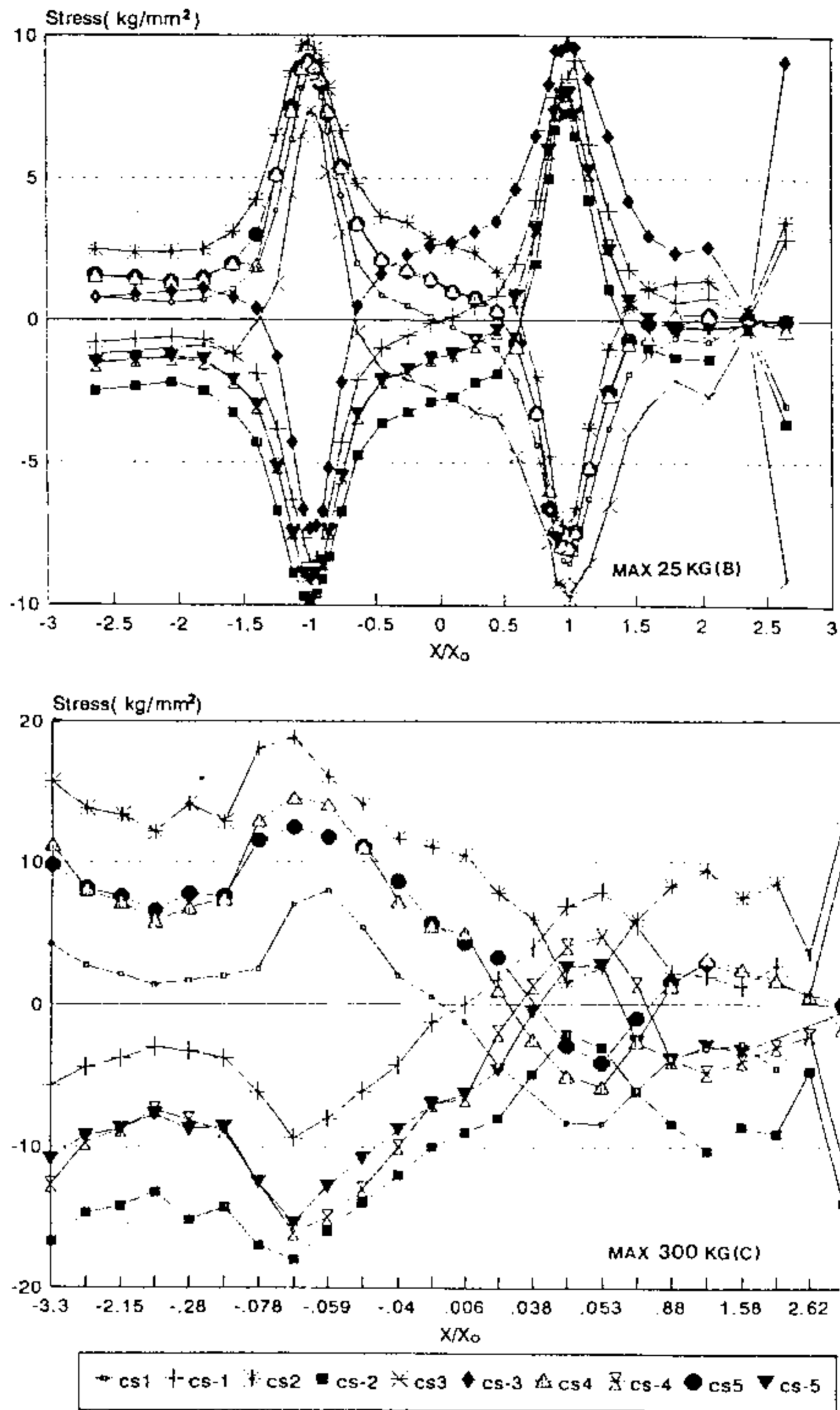


Fig. 8 Stress characteristics of each load cell at various loading points.

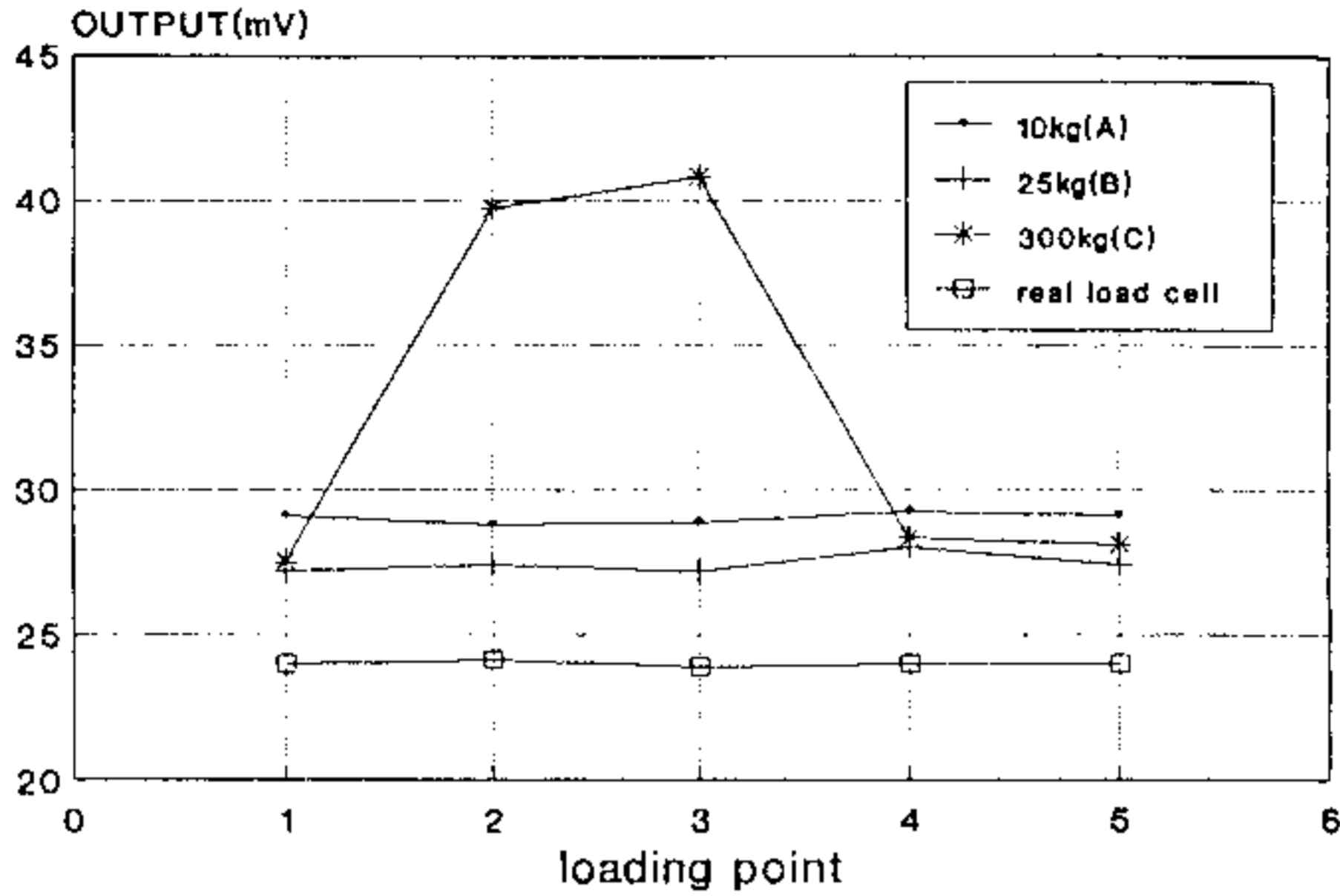


Fig.9 Output voltage characteristics of each load cell at various loading points.

結 果

beam형 구조의 로드셀의 3가지 종류 (최대하중 10kg, 25kg, 300kg)에 대해 형상의 파라미터와 하중점위치를 변화시켜 그 출력의 변화를 시뮬레이션 해 보았으며 또한 그 결과로 로드셀의 출력전압을 계산해 보았다. 로드셀의 형상의 파라미터를 변화시켰을 때 로드셀에 나타나는 출력은 노치피치와 반경에 대해서는 비례하였고, 노치두께와 비입의 폭은 반비례하였으며 그 비례지수는 외팔보의 기본공식과 잘 일치하여 시뮬레이션 결과가 타당함을 입증하였다.

하중 위치 변화에 대한 로드셀의 출력 특성은 그 형상에 따라 특징적인 결과가 나타났으며 계산으로 도출한 전기적 출력특성은 실제 제작한 로드셀의 출력과 근사하였다.

본 연구의 시뮬레이션 결과는 특수제작 로드셀 및 상용의 다양한 정격의 로드셀을

설계하고 특성을 분석하는 데 있어 표준적인 참고자료로서 활용이 기대된다.

Acknowledge

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 advices and simulations of this work.

참 고 문 헌

1. 한용교, "스트레인 게이지 이론과 응용", 보성문화사 (1988)
2. 高橋 清, "센서와 전자공학", p. 241, 昭晃堂 (1984)
3. 小島, 日本 機械學會論文集 51-471, C. p. 2860 (1985)

4. 小島, 日本 機械學會論文集 52 - 483, C, p. 2869 (1986)
5. Zienkiewicz, O. C., "The Finite Element Method", 3rd ed, p. 500, McGraw-Hill (1977)
6. 김규남, "재료역학", 청문각, chp. 5 (1988)