

하이브리드 프로토타입 듀얼 로드 셀 구조 개발

함주혁†
한라대학교 메카트로닉스공학과

Development of Hybrid Prototype Dual Load Cell Structure

Juh-Hyeok Ham†
Department of Mechatronics Engineering, Halla University

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.

We have developed the hybrid prototype load cell structures. These developed load cell structures may increase the reliability of the load sensing by deriving the load values through the double sensing method through the vertical maximum deflection and bending stress of the simple beams. For this purpose, the structure design was performed so that the load value, the deflection and stress value could be output to the same value through the optimal structure design. The structurally designed dimensions reaffirmed the accuracy of the design through the structural analysis program and the matching of the load value and the deflection value. Based on the designed structural dimension, the prototype form was constructed through laser cutting and production using hot rolled steel materials. The developed prototype load cell structure can be used as good educational material in various subjects such as material mechanics, steel structure design, measurement engineering, and mechatronics engineering. It is also believed that the measurement system ideas can inform the occurrence of errors in the event of a problem, and if a major accident caused by a sensing error is predicted, it will show good utilization to prevent accidents.

Keywords : Development of load cell structure(로드 셀 구조 개발), Hybrid dual load cell(하이브리드 듀얼 로드 셀), Optimal structural design(최적 구조 설계), Structural analysis(구조 해석)

1. 서론

저자는 본래 강구조의 구조 강도학이 전공이며, 요즘 들어서는 제4차 산업혁명 시대에 걸맞거나 연관 지어지는 연구를 위해 노력 중에 있다.

특히 인공지능과 본인의 전공과의 연계에 노력하고 있으나 전공 관련 D/B가 잘 구축 되어있지 않아 전공과 관련한 내용을 제4차 산업분야로의 융합이나 확장에 어려움이 있어, 우선 일반 인공지능과 요즘 각광을 받고 있는 딥러닝의 다양한 분야로의 응용 (Andreas & Seragado, 2017)과 활용 (Kujira, 2017; Min, 2017)에 관심을 가지고 있다.

그리고, 본 학회의 추계발표회에 인공지능과 딥러닝 관련하여 저자의 세부전공과 직접적 관련성은 적으나, 비교적 D/B가 잘 구축 되어있고 조선 산업과 관련성이 깊은 유가 및 대형조선소 주가 예측을 수행한 바 있다 (Ham, 2019a & Ham, 2019b).

그러던 중 본 연구에서 다루고자 하는 서로 다른 독립된 계측시스템을 사용한 듀얼 로드 셀 개념은, 특히 최근 테슬라 자율주행 차의 센싱 오류에 의해 컨테이너 수송차량의 컨테이너의 넓은 벽면을 하늘로 인식하는 등과 같은 계측오류의 불상사 (Green Economic Daily, 2018)를 최소화하는 아이디어 차원에서 센싱은 센서의 안전성과 신뢰성 확보를 위해 복수개의 서로 독립되고, 서로 다른 성격의 센싱과 그에 따른 독립된 계측시스템을 사용한 하이브리드 듀얼 센싱의 다양한 형태를 적용하는 추세가 앞으로는 필요해 보인다.

이에 대한 기계(대한기계학회) 및 조선분야(대한조선학회, 한국해양공학회) 등의 저널에서 이중 로드 셀 혹은 듀얼 로드 셀 관련 논문을 검색하였으나 유사내용을 찾아볼 수 없어, 그 첫 예로 로드 셀을 하이브리드 듀얼 로드 셀로 구축해 봄이 어떨까 하는 저자의 아이디어로 추진한 연구임을 밝히는 바이다.

로드 셀은 하중 변환기로 그 재료비에 비해 콤팩트함과 정교성이 요구 되므로 가격이 매우 고가이다.

따라서 대체할 수 있는 보다 단순하고 저렴한 로드 셀 혹은 4차 산업혁명 시대에 발맞추어 보다 효율적인 특징을 가진 다양한 로드 셀이 요구될 것으로 사료된다.

이의 첫 연구로 정동적 측정 장치의 점검 및 교육 등에 많이 활용되는 캔틸레버 보와 단순지지 보 형태의 하중을 감지하는 하이브리드 듀얼 로드 셀 구조를 프로토타입의 구조로 생각해 보았다.

본 연구에서는 센서의 안전성과 신뢰성 확보를 위해 두 가지 서로 독립된 서로 다른 성격의 센싱과 그에 따른 독립된 계측시스템을 사용한 하이브리드 형태를 적용하였다. 이 목적을 위한 로드 셀 구조치수 설정을 위해 최적 구조 설계 시스템을 개발하였다. 설계결과를 해석프로그램을 통해 캔틸레버 구조의 하중센서 구조에 대한 두 가지 구조해석을 수행하여 하중, 응력과 처짐 간의 적합성을 향상시켜 보았다.

마지막으로, 대부분 지역 인근에서 제작하여 구축한 듀얼 로드 셀 구조 개요를 제시하면서, 집중하중부에 하중용 사물을 매달아 놓으면 처짐과 응력 값으로 사물의 하중 값을 알 수 있고 처짐과 응력 값이 다르면 계측시스템이 정상적으로 작동하지 않음을 자동으로 인지가 가능한, 듀얼 로드 셀로서 그리고 집중하중부에 특정 값의 하중을 작용시켜 처짐과 응력의 계측값을 구하면 처짐(mm)과 응력(kgf/cm²) 그리고 특정 하중값(kgf)이 kgf, mm단위로 지정한 오차 범위에 있으면 측정의 신뢰성을 확인할 수 있는 스마트 계측시스템의 역할을 수행코자 한다.

2. 로드 셀 구조설계 정식화

본 연구에서는 구조설계 정식화를 위해 GRG(Generalized reduced gradient) 알고리즘(Lasdon & Waren, 1978)을 사용하였으며, 최적화를 위한 정식화의 내용은 다음과 같다. 최적화를 위한 기본적 정식화는 목적함수 $f(X)$ 는, 구조해석에서 추가 검토하겠지만 지지부가 충분히 강하다고 보고 수평으로 놓인 단일 직사각형 형상의 판으로 구성된다. 단부에 수직하방 집중하중을 받는 캔틸레버 판 혹은 중앙부 수직하방 집중하중을 받는 단순지지 판의 최소 체적을 요구 조건으로 하는 두 경우에 집중하중 대신 분포하중을 받는 두 경우를 합해 총 네 개 하중 경우에 대하여 설계를 수행하려 하였으나 구조해석 등 추가 내용이 많아져, 본 연구는 집중하중을 받는 두 경우로 국한하였다. 간단한 1차 변수의 곱인 식 (1)의 세 변수, 즉 식 (1)은 차례대로 판의 두께, 길이 그리고 폭의 세 개 변수의 곱 형태이며 그 아래는 각종 제약조건식들인 $g(X)$ 로 구성된다. 이들 제약조건을 만족하는 최적 사각단면 캔틸레버 보 혹은 단순지지 보 형태의 하이브리드 듀얼 로드 셀 구조의 치수가 다음 식들로 도출된다.

$$f(X) = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \tag{1}$$

$$g_1(X) = \left\{ \frac{X_2}{X_3 X_1^2} \right\} - 16.67 = 0 \tag{2}$$

$$g_2(X) = \left\{ \frac{X_2^3}{X_3 X_1^3} \right\} - 52,500 = 0 \tag{3}$$

$$g_3(X) = \left\{ \frac{3X_2}{2X_3 X_1^2} \right\} - 100 = 0 \tag{4}$$

$$g_4(X) = \left\{ \frac{X_2^3}{4X_3 X_1^3} \right\} - 2.1 \cdot 10^7 = 0 \tag{5}$$

$$g_5(X) = X_2 \leq 100, X_2 \geq 20 \tag{6}$$

$$g_6(X) = X_3 \leq 10, X_3 \geq 1 \tag{7}$$

$$g_7(X) = X_1 \leq 1, X_1 \geq 0.1 \tag{8}$$

여기서,

$g_1(X)$: 단부 집중하중을 받는 캔틸레버 보 형태의 하중센서 구조의 굽힘 관련 제약조건

$g_2(X)$: 단부 집중하중을 받는 캔틸레버 보 형태의 하중센서 구조의 처짐 관련 제약조건

$g_3(X)$: 중앙 집중하중을 받는 단순지지 보 형태의 하중센서 구조의 굽힘 관련 제약조건

$g_4(X)$: 중앙 집중하중을 받는 단순지지 보 형태의 하중센서 구조의 처짐 관련 제약조건

$g_5(X)$: 보의 길이관련 제약조건

$g_6(X)$: 보의 폭 관련 제약조건

$g_7(X)$: 보의 두께 관련 제약조건

제약조건식의 식 (2)부터 식 (8)까지는 전통적 재료역학 방식의 처짐과 굽힘 응력 식 (Timoshenko & Young, 1971)에 대한 캔틸레버 보와 단순지지 보 형태의 집중하중을 받는 센서 구조의 제약조건들이며 관련 상수 변수들은 다음 3 장에서 개발할 설계 시스템 내에 재료 역학적 친숙한 부호를 사용하여 설명을 추가하였다.

3. 설계 시스템 구축

판부재의 강도평가 및 최적 설계를 손쉽게 추정할 수 있는 시스템 개발을 저자가 수행한 바가 있다 (Ham & Kim, 1997). 개요는 개인용 컴퓨터 윈도우 환경 하에서 비주얼 프로그래밍을 이용하였으며, 간단한 입력으로 설계 검토 및 판부재의 개선 치수를 손쉽게 도출할 수 있는 설계 및 강도평가 시스템을 구축하는 내용이다.

이러한 개발 경험을 근간으로 본 연구인 하중을 감지하는 로드 셀 구조 개발에 대해서도 유사한 방법으로 새롭게 구축할 설계시스템을 Fig. 1부터 Fig. 3까지 제시하였다.

Fig. 1은 로드 셀 구조설계 시스템의 표제화면으로 화면 맨 위쪽에 시스템 제목이 제시되고 아래에 2개의 버튼이 준비되어

있다. 본 연구에서는 좌측의 단부집중하중을 받는 캔틸레버 보와 중앙 집중하중을 받는 단순지지 보 형태의 두 가지 로드 셀 개발에 한정한다.

로드 셀 구조설계 시스템의 표제화면에서 두 버튼을 각각 누르면 Fig. 2 및 Fig. 3에서와 같이 단부집중하중을 받는 캔틸레버 보와 중앙 집중하중을 받는 단순지지 보 형태의 두 가지 로드 셀 개발 부시스템을 각각 접할 수 있다.

먼저 Fig. 2는 단부 수직하방하중을 받는 캔틸레버 보 형태의 로드 셀의 구조설계 부시스템으로 그 제목이 화면 최상부에 위치하고 있다. 바로 아래는 캔틸레버 보 형태에 대한 목적함수 항목으로 캔틸레버 보 형태의 체적으로 판의 높이와 길이 그리고 폭의 곱으로 주어진다. 그 바로 아래는 설계변수 항목으로 각각 총 3개의 기본 입력 자료인 판의 높이, 길이와 폭의 최적화를 위한 초기 입력치를 제공해 줄 수 있으며 최적설계를 수행하면 제약조건을 만족하는 최적의 치수로 설계변수가 변경되어 제시된다.

그 바로 아래 항목은 최적화 과정에서 만족되어야 하는 제약 조건 항목들이다. 처음 두 항목은 처짐과 굽힘 응력에 대한 센서에서 필요한 상관관계의 제약조건들이다.

마지막으로 본 시스템의 맨 마지막 두 항목은 설계된 결과 값에 대한 재료 역학적 정확도를 간이식을 통해 제시해 주어 어느 정도 그 초기설계의 정확도를 판단할 수 있다.

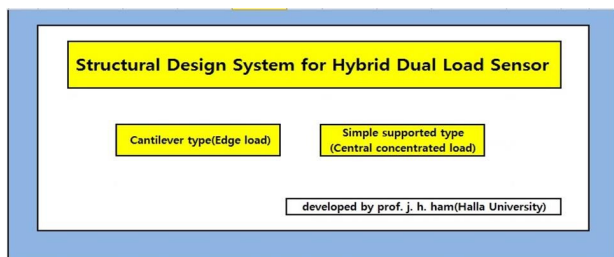


Fig. 1 Structural design system for hybrid dual load cell structure

Structural Design subsystem of Cantilever Beam Type Dual Hybrid Load Sensor Subjected to End Vertical Downward Load		
Object function	Beam volume(V)	189
Design variables	Beam height(h)	0.5
	Beam length(L)	39.69
	Beam breadth(b)	9.52
Constraints	$(L/bh^2) \cdot (100/6) = 0$	0.00
	$((L^3)/(b \cdot h^3)) \cdot (0.1^3 \cdot 2.1e6)/12 = 0$	0.00
	$20 \leq L$	39.69
	$L \leq 100$	39.69
	$1 \leq b$	9.52
	$b \leq 10$	9.52
Theoretical verification 1	Max. vertical deflection($\delta = (Pl^3)/(3EI)$)	0.10
	Elastic modulus(E)	2100000
	Secondary cross section moment(I)	0.10
Theoretical verification 2	Bending stress($\sigma = My/I$)	100
	Bending moment(M)	39.69
	Vertical distance from N.A.(y)	0.25

Fig. 2 Structural design subsystem of cantilever beam type dual hybrid load cell structure subjected to end vertical downward load

Structural Design Subsystem of Simple Supported Beam Type Dual Hybrid Load Sensor subjected to Central Vertical Downward Load		
Object function	Beam volume(V)	189.00
Design variables	Beam height(h)	0.40
	Beam length(L)	70.99
	Beam breadth(b)	6.66
Constraints	$(3L/2bh^2) \cdot (100) = 0$	0.00
	$(L^3)/(48EI) \cdot 0.1 = 0 = 0$	0.00
	$20 \leq L$	70.99
	$L \leq 100$	70.99
	$1 \leq b$	6.66
	$b \leq 10$	6.66
Theoretical verification 1	Max. vertical deflection($\delta = (PL^3)/(48EI)$)	0.10
	Elastic modulus(E)	2100000.00
	Secondary cross section moment(I)	0.04
Theoretical verification 2	Bending stress($\sigma = My/I$)	100.00
	Bending moment(M)	17.75
	Vertical distance from N.A.(y)	0.20

Fig. 3 Structural design subsystem of simple supported beam type dual hybrid load cell structure subjected to central vertical downward Load

본 시스템을 통해 현재 제시된 입력항목에 대한 설계적합의 판단이나 설계초기단계에서 최소 설계치수를 제시해 주어 보다 적합한 로드 셀 구조설계 치수가 도출될 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 2은 중앙 집중하중을 받는 단순지지 보 형태의 로드 셀 구조와 균일 분포하중을 받는 단순지지 보 형태의 로드 셀 구조의 설계 부 시스템이며 각 경우에 대한 내용 설명은 앞선 설명과 그 내용이 크게 다르지 않아 생각한다.

Fig. 3은 캔틸레버 보 형태 단부 집중하중 로드 셀 구조로 하부 베이스 판에 수직지지부가 부착되어 수평의 판형 보를 견고하게 지지해주는 캔틸레버 보 형태의 구조로 단부수직하중을 받는 3차원 하중센서 구조이다.

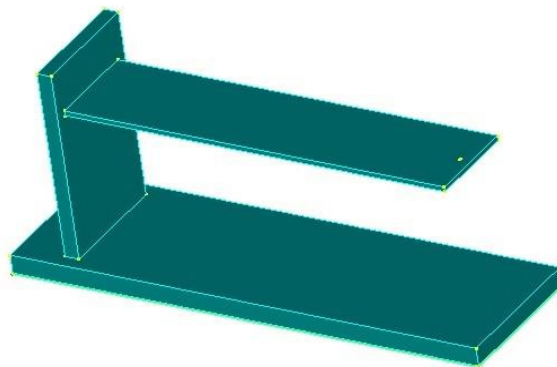


Fig. 4 Load cell 3D-CAD of cantilever beam type structure subjected to end vertical downward load

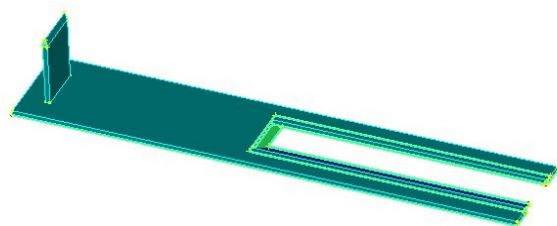


Fig. 5 Load cell 3D-CAD of simply supported beam type structure

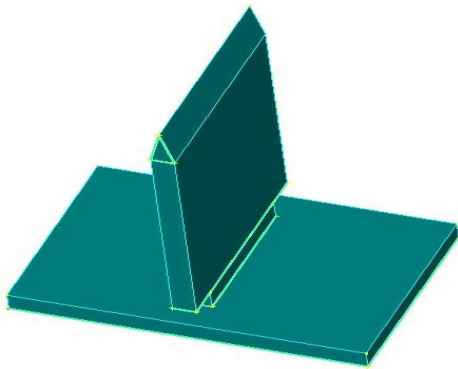


Fig. 6 Load cell sliding supported part 3D-CAD of simply supported beam type structure

Fig. 5는 단순지지 판형 보의 좌측 부를 지지하는 3차원 지지구조로 Fig. 6이 Fig. 5의 우측하부의 베이스 판에 끼워져 슬라이딩하며 단순지지 판의 다양한 스펠길이에 적합토록 설계하였다(Fig. 12의 제작 모델 참조).

Fig. 5의 하부 ㄷ자 베이스 판의 치수는 가로 110 cm 세로 20 cm 이며 두께는 1 cm이다. Fig. 5의 총 높이는 16 cm 이다. Fig. 6의 슬라이딩 하부 판은 가로 15 cm 세로 10 cm 두께 1cm 이며 구조의 총 높이는 16 cm 이며 자세한 치수는 3D CAD 상 배치와 같으며 두 수직 지지부재 상부에 설계된 단순지지 판이 놓여진다. 이 또한 중앙 수직하중을 받는 로드 셀 구조이다.

4. 설계 검증 구조해석

본 연구에서는 1차 설계된 각종 하중센서에서 상부 수평직사 각판 구조의 보가 1차 하중을 받게 되며 이 부재와 함께 수직지지 부를 포함하여 작용하중에 대한 처짐과 응력의 응답을 로드 셀 구조에 대해 구조 해석적 차원에서 상용프로그램 (MSC/Nastran, 2005)을 이용하여 간략히 보요소를 사용하여 설계 거동을 검증하여 보았다. 해석 결과는 다음의 네 가지 그림인 Fig. 7부터 Fig. 10과 같다.

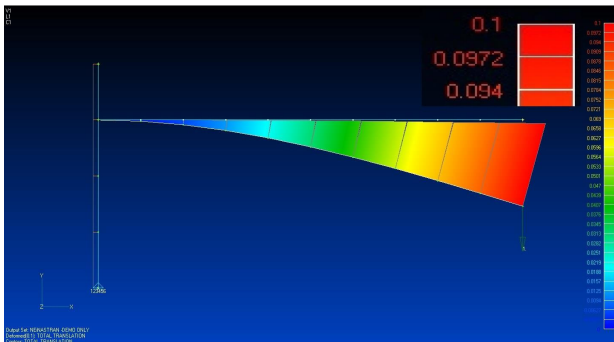


Fig. 7 Structural analysis of vertical deflection results of cantilever beam type load cell structure subjected to 1kgf vertical downward load(Max. vertical deflection = 1.00 mm(= 0.10 cm in Fig.7)

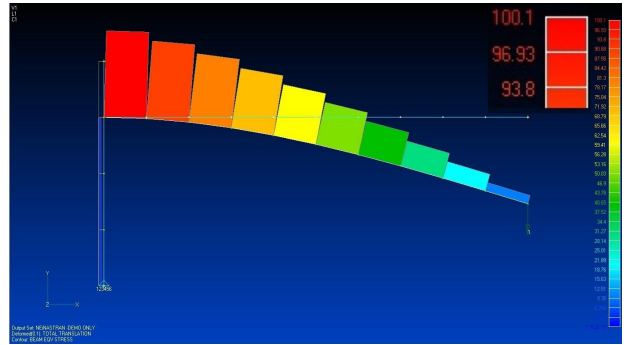


Fig. 8 Structural analysis of bending stress results of cantilever beam type load cell structure subjected to 1kgf vertical downward load(Max. bending stress = 1.00 kgf/mm² (= 100 kgf/cm² in Fig. 8)

먼저 저자가 구조해석에서 kgf와 cm 단위를 수십 년간 사용하다보니 해석에서의 착오가 없기 위해 이 단위를 사용하여 논문에서 언급한 mm 단위와 달라 응력과 길이 필요한 그림 등에 단위를 병행 표시함을 양해 바란다.

Fig. 7과 Fig. 8은 단부집중하중 1 kgf이 작용하는 캔틸레버 보 형태의 로드 셀 검증용 구조해석이다. 단부집중하중을 받는 캔틸레버 보 형태 모델에서 보의 길이 39.69(cm), 단면 폭 9.52(cm) 그리고 단면 높이 0.5(cm)이며 수직지지 보 모델은 높이 20(cm), 폭 12(cm) 그리고 두께 1.5(cm)를 판형 보 모델링 하였다.

구조해석결과 최대 굽힘 응력 1.03 kgf/mm²으로 최대 굽힘 응력이 0.03 kgf/mm² 정도의 오차가 발생하였다. 수직평판을 같은 두께의 양쪽 5 cm높이로 보강한 ㄷ자 단면으로 보강한 최종 수직 보 모델에서는 단부 수직 처짐 1.00 mm(=0.1cm)(Fig. 7 참조)와 최대 굽힘 응력 1.00 kgf/mm² (=100 kgf/cm²)(Fig. 8 참조)으로 비교적 적합한 결과를 주었다.

Fig. 9와 Fig. 10은 중앙 집중하중 1 kgf이 작용하는 단순지지 보의 검증용 구조해석이다. 중앙 집중하중을 받는 단순지지 보 모델에서 보의 길이 70.99(cm), 단면 폭 6.66(cm) 그리고 단면 높이 0.4(cm)로 모델링하였다. 구조해석결과 중앙 최대 굽힘 응력 1.00 kgf/mm² 과 중앙 수직 처짐 1.00 mm으로 중앙 최대 굽힘 응력과 수직 처짐의 두 응답이 양호한 결과를 제시하고 있다.

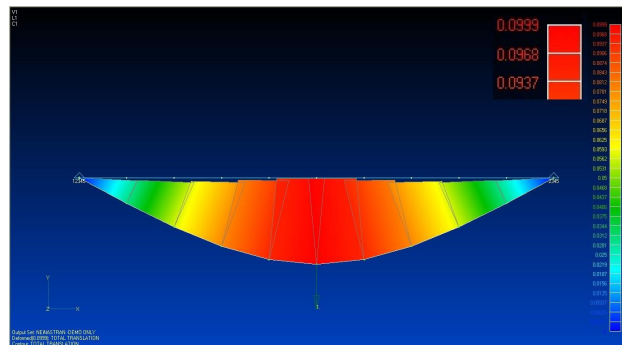


Fig. 9 Structural analysis of vertical deformation results of simply supported beam type load cell structure subjected to 1kgf vertical downward load(Max. vertical deflection = 1.00 mm (= 0.1cm in Fig. 9)

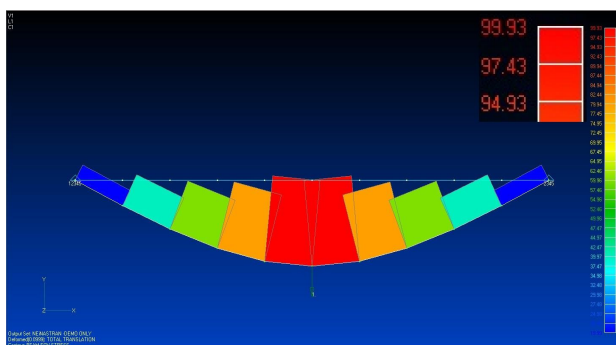


Fig. 10 Structural analysis of bending stress results of simply supported beam type load cell structure subjected to 1 kgf vertical downward load(Max. bending stress = 1.00 kgf/mm² (= 100 kgf/cm² in Fig. 10)

두 가지 형태의 듀얼 로드 셀 구조는 탄성 범위 내에서 같은 크기의 kgf 단위의 하중에 대해 최대 처짐 mm 단위와 최대 응력 kgf/mm² 단위로 같은 값의 응답을 주므로 최대 처짐 부의 수직 최대 처짐량이나 최대 굽힘 응력을 처짐 게이지나 스트레인게이지로 파악하면 같은 하중 값을 얻을 수 있는 듀얼 로드 셀 구조가 될 수 있다.

즉 하중, 최대처짐과 최대응력 3개의 값이 kgf, mm 단위로 같으므로 어느 하나로부터 나머지 두 값을 얻을 수도 있는 경우는 간편성 측면에서 유리하며 두 값으로부터 나머지 한 경우의 값을 취하는 경우는 신뢰성 측면에서 강점이 있다고 볼 수 있으므로 독립된 서로 다른 하이브리드 계측법과 듀얼 센서를 통해 얻은 결과가 한계범위 내로 유사하다면 계측 값이 크게 오류가 없다는 신뢰도를 보이므로 하이브리드 듀얼 로드 셀로서 다방면으로 신뢰성 있게 충분한 역할을 수행할 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 특정한 상관관계가 있는 로드 셀 구조는 교육기자재 크기로 제작되어, 재료역학에서 가장 중요한 기본 하중조건인 단순지지 보와 캔틸레버 보 형태의 집중하중 경우에 대한 이론과 실험을 통한 재료역학적 계측관련 학습 도구 및 보 설계 및 구조 최적화 기술 숙지훈련과 더불어 높은 효율성이 있는 스마트 교육기자재 개발 효과도, 부수적이지만 크다고 사료된다.

5. 로드 셀 구조 제작

캔틸레버 보와 단순지지 보 형태의 로드 셀 구조는 대학주변의 강재 제작업체를 이용하였다. 초기에 설계한 치수에서 판의 두께 및 폭은 일반 구조용 강판을 현장에서 사용 가능한 두께의 치수들로 가능한 변경하여 이용하였다. 그리고 캔틸레버 보 및 단순지지 보 형태의 주판의 폭과 길이를 가능한 최적화하였다. 즉 초기 설계된 치수에서 특히 철판두께 등의 제한을 받아 폭과 길이를 몇 차례 수정하면서 최적설계를 시도하여 설계치수를 도출하였다.

정확도 높은 결과를 주기 위해 대학 인근지역에서 레이저커팅이 불가하여 캔틸레버 보 형태 및 단순지지 보 형태의 주판(Main plate) 자체는 서울인근의 지역으로 원주의 제작업체가 치수 주문을 통해 받아서 제작하였다.



Fig. 11 Load cell structure of cantilever beam type subjected to end vertical downward Load



Fig. 12 Load cell structure of simply supported beam type subjected to end vertical downward load

제작된 캔틸레버 보와 단순지지 보 형태의 로드 셀 구조부의 1차 설계치수는 각각 Fig. 2과 Fig. 3의 최적설계 부시스템들로부터 도출된 설계변수들의 값을 받아 제작된 집중하중용 로드 셀 구조는 캔틸레버와 단순지지 2형태의 보로 각각 Fig. 11부터 Fig. 12까지 제시하였다

6. 로드 셀 구조 계측

로드 셀에 스트레인게이지가 부착되어 스트레인 인디케이터와 스위치 박스로 연결되어 응력을 측정할 수 있는 응력측정 시스템(Beckwith et al., 2007)을 활용하면 바람직하나, 이번 여름의 지독한 장마로 인한 접착체의 습도 문제만이 아니라 온도 변화에도 취약하고, 캔틸레버 보의 최대응력 발생부의 게이지부착 불가에 의한 최대변형을 계측 위치로의 값 보정 문제 등과 로드 셀 전용 에폭시 접착제로 내구성을 높여야하고 접착 시 후공정이 필요하는 등의 스트레인게이지 접착제 관련한 추가 필요 연구는 제 관심분야가 아니라 본 연구에서는 센싱의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 하이브리드 듀얼 로드 셀의 개념 제시와 합리적 구조 제시에 국한한다.

따라서, 개발한 로드 셀 구조의 검증에 위한 최소한의 계측을 통한 검증 작업을 위해, 제작한 각종 웨이트(Fig. 13 참조)는 1 kgf 1개, 0.5 kgf 2개 그리고 0.1 kgf 3개 총 6 개로 이들의

웨이트의 조합으로 0 ~ 2.3 kgf 영역에서, 탄성적 안정적 처짐을 위해 수평판 형상 판의 보에서 가능한 판 두께 보다 작은 처짐을 보이게 각각 총 10 단계의 계측하중(Table 1, Table 2 참조)을 설정하였다. 각 하중에 대한 캔틸레버 보와 단순지지 보 형태의 열연강판(Hot rolled steel plate, 탄성계수(E): 2.1E6 kgf/cm²)의 두 로드 셀 구조의 최대 수직 처짐을 디지털 변위측정기(Fig. 14)를 이용하여, 웨이트의 조합을 통해 가해지는 집중하중과 로드 셀 모델을 달리하며 측정한 계측 결과를 Table 1 과 Table 2에 요약하였다.



Fig. 13 Various weights



Fig. 14 Digital displacement indicator

Table 1 Measurement results of cantilever beam type load cell structure

Test no.	Vertical end load (unit:kgf)	Vertical end deflection (Measurement value) (unit:mm)	Standard deviation (σ)	Variance (σ^2)
C1	0.00	0.00	9.37E-03	8.78E-05
C2	0.10	0.09		
C3	0.20	0.19		
C4	0.30	0.29		
C5	0.50	0.49		
C6	0.70	0.69		
C7	1.00	0.99		
C8	1.50	1.51		
C9	2.00	2.01		
C10	2.30	2.29		

그리고 상기 두 Table을 그래프로 정리한 내역은 각각 Fig. 15 및 Fig. 16와 같다. 두 그래프에서 횡축은 각각 캔틸레버 보 형태의 로드 셀 구조의 수직단부하중(단위:kgf)과 단순지지 보 형태의 로드 셀의 중앙 집중하중(단위:kgf)으로 앞서 구조해석을 통해 확인한 바와 같이 최대응력(단위:kgf/mm²), 처짐량(단위:mm) 그리고 웨이트 중량으로 대체시켜 종축의 측정치와 비교하여도 달라지지 않으므로 총 8가지의 그래프를 제시한 바와 같으며 표준편차(Standard deviation)와 분산(Variance)은 캔틸레버 보 형태의 로드 셀 구조에서 각각 9.37E-3와 8.78E-5 그리고 단순지지 형태의 로드 셀 구조에서 각각 8.65E-3와 7.49E-5임을 총 20단계 계측값을 근거로 제시하였다.

Table 2 Measurement results of simply supported beam type load cell structure

Test no.	Central vertical load (unit: kgf)	Central vertical deflection (Measurement value) (unit:mm)	Standard deviation (σ)	Variance (σ^2)
S1	0.00	0.00	8.65E-03	7.49E-05
S2	0.10	0.10		
S3	0.20	0.21		
S4	0.30	0.31		
S5	0.50	0.51		
S6	0.70	0.71		
S7	1.00	1.00		
S8	1.50	1.49		
S9	2.00	2.01		
S10	2.30	2.31		

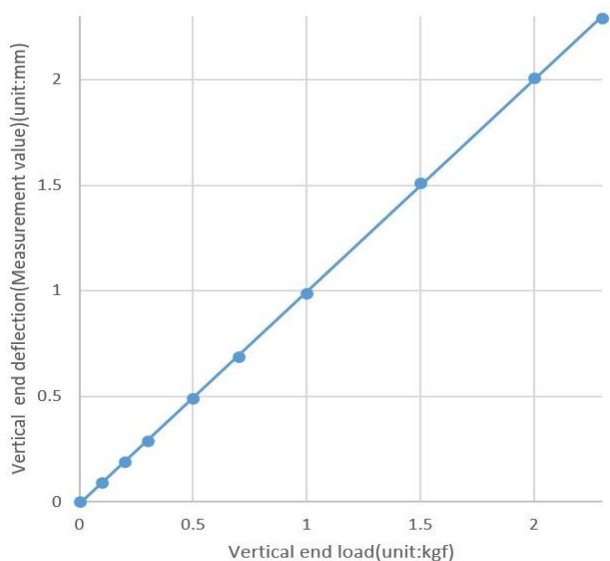


Fig. 15 Vertical end deflection(Measurement value) according to the variation of vertical end load(Cantilever beam type load sell structure)

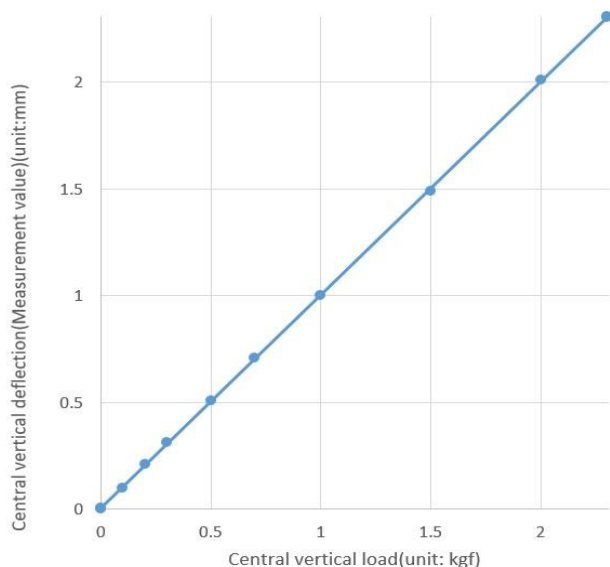


Fig. 16 Central vertical deflection(Measurement value) according to the variation of vertical end load(Simply supported beam type load sell structure)

7. 결론

본 연구에서는 구조의 기본적인 형태인 캔틸레버 보와 단순 지지 보 형태로 각각 단부와 중앙에 수직 하방향 집중하중을 받는 하이브리드 듀얼 로드 셀의 강구조 형상을 프로토타입으로 제시하여 보았다.

센싱은 하중에 대해 두 가지 즉 최대 수직 처짐과 최대 굽힘 응력을 독립된 두 처짐과 응력의 센싱 응답을 사용하여 계측치

의 초정밀성 보다는 신뢰성과 안전성에 중점을 둔 하이브리드 듀얼 로드 셀 형태의 구조를 지향하였다.

입력하중에 따른 출력응답의 간편성을 위해 단위하중(1.00 kgf)의 작용에 대해 단위 수직방향 최대 처짐(1.00 mm)과 단위 최대 굽힘 응력(1.00 kgf/mm²)의 값이 출력되게 설계하여 최대 수직 처짐과 최대 굽힘 응력 값이 바로 작용하중치가 될 수 있게 수직적 상관관계를 제약조건으로 하여 구조설계를 위한 정식화를 제시하였다. 그리고 개인용 컴퓨터 윈도우 환경 하에서 비주얼 프로그래밍을 이용하여 하이브리드 듀얼 로드 셀 구조 설계 시스템을 구축하였다. 이 시스템들을 통해 단부 집중 하중을 받는 캔틸레버 보 형태 그리고 중앙 집중 하중을 받는 단순 지지 보 형태의 하이브리드 듀얼 로드 셀의 다양한 크기의 구조를 용이하게 제시할 수 있게 하였다.

상기의 설계시스템의 초기설계결과를 기반으로 구조해석 과정을 통해 캔틸레버 보와 단순지지 보 형태의 하이브리드 듀얼 로드 셀 구조의 설계응답을 재확인하고 각 구조 모델의 하중과 처짐 및 응력이 구조해석 상 1.00 : 1.00 : 1.00 이 될 수 있게 거동을 확보하였다. 이러한 특정한 상관관계가 있는 로드 셀 구조는 교육기자재 크기로 제작되어, 재료역학에서 가장 중요한 기본 하중조건인 단순지지 보와 캔틸레버 보 형태의 집중하중 경우에 대한 이론과 실험을 통한 재료역학적 계측관련 학습 도구 및 보 설계 및 구조 최적화 기술 숙지훈련과 더불어 거의 완벽성을 줄 수 있는 스마트 교육기자재 개발 효과도, 부수적 효과지만 크다고 사료된다.

마지막으로 제작된 두 가지 로드 셀 구조의 10 단계 수직 처짐 계측, 즉 총 20 가지 계측을 통해 표준편차(Standard deviation)와 분산(Variance)은 캔틸레버 보 형태의 로드 셀 구조에서 각각 9.37E-3와 8.78E-5 그리고 단순지지 보 형태의 로드 셀 구조에서 각각 8.65E-3와 7.49E-5임을 총 20단계 계측 값을 근거로 제시하여 비교적 안정적인 거동을 확인하였으므로, 캔틸레버 보와 단순지지 보 형태의 하이브리드 듀얼 로드 셀 구조의 합리적인 프로토타입 개발연구로 사료된다. 차후 본 연구를 발판으로 보다 다양한 하이브리드 듀얼 센싱이 시도되고 각종 하이브리드 듀얼 센싱 구조에 콤팩트한 전자계측 시스템이 연결된 다양한 용도의 하이브리드 듀얼 센싱 장치 개발의 밑거름이 될 것을 기대해본다.

후 기

이 연구는 논문발행일 기준으로 2019~2020학년도 한라대학교 자율형 학술연구비의 지원에 의해 연구되었기에 이에 관련한 관계자 여러분께 감사드립니다.

Referencne

Andreas, M., & Seragado, M., 2017. *Introductory to Machine Learning with Python*, Hanbit Media.

- Beckwith, T.G., Marangoni, R.D., & Lienhard, J.H., 2007. *Mechanical Measurements*, Young.
- Green Economic Daily, 2018. "Walker death." *Uber autonomous car crash shock. Why?*, URL: <http://www.greened.kr> [Accessed 01 April 2018].
- Ham, J.H. 2019a. A study on the prediction of major prices in the shipbuilding industry using artificial intelligence. *Autumn Conference of the Society of Naval Architects of Korea*, Kyungju.
- Ham, J.H. 2019b. A study on the prediction of stock price of large shipyards using deep learning. *Autumn Conference of the Society of Naval Architects of Korea*, Kyungju.
- Ham, J.H. & Kim, U.N., 1997. The development of advanced buckling strength estimation system. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 34(3), pp.53-60.
- Kujira, H., 2017. *Introduction to machine learning, deep learning practical development using python*, Wikibooks.
- Lasdon, L.S. & Waren, A.D., 1978. Generalized reduced gradient software for linearly and nonlinearly constrained problems. *in : Greenberg, H.J. (Ed.) Design and implementation of optimization software*, Sijthoff and Noordhoff: holland.
- Min, H. K., 2017. *Touching Data with Python*, BJ Public.
- MSC/Nastran, 2005. *Nastran commercial manual & technical note*, The MacNeal-Schwendler Corporation.
- Timoshenko, S & Young, D.H., 1971. *Element of strength of material*, 5th Edition MARUZEN co., LTD Tokyo, Japan.



함 주 혁