

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(9), 807-815(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.9.807

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## EDISON 프로그램을 사용한 3차원 팽창 피라미드 구조의 최적화 연구

김규영\*, 김수호\*, 윤기원\*, 김현규\*\*

## A study on the optimization of three-dimensional auxetic pyramid structure by using EDISON program

Gyu-Young Kim\*, Soo-ho Kim\*, Gi-Won Yun\* and Hyun-Gyu Kim\*\*

Department of Mechanical and Automotive Engineering

Seoul National University of Science and Technology\*,\*\*

## ABSTRACT

Auxetic structures with negative Poisson's ratio can be used to achieve high mechanical properties in energy absorption and destruction toughness. In this paper, we aim to design an auxetic structure which has a high negative Poisson's ratio and a stiffness over 50N/mm by using an optimization method. Length(L), thickness(t) and angle( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ) of an auxetic pyramid are the design parameters, and also stress, Poisson's ratio and stiffness are the reaction factors. We used Box-Behnken method and conducted 4 factors - 3 levels experiment design. Finite element models are analyzed by using Edison program CSD\_EPLAST.

## 초 록

팽창(auxetic) 구조물은 음의 프와송 비로 거동하는 구조체로, 에너지 흡수 및 파괴 인성 등이 높은 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 최적화의 목적을 음의 프와송비가 높으며 50 N/mm 이상의 강성을 갖는 팽창 구조를 설계하고자한다. 길이, 두께, 각도를 설계 인자로 정의하였고, 응력, 프와송 비 그리고 강성을 반응 요소로서 정의하였다. Box-Behnken 방법을 사용하여 4인자, 3수준 실험 설계를 수행하였고, Edison 프로그램 중 CSD\_EPLAST를 사용하여 유한요소 해석을 수행하였다.

**Key Words** : Auxetic structure(팽창 구조), Negative Poisson's ration(음의 프와송 비), Optimization(최적화), Experiment design(실험 계획법)

## 1. 서 론

프와송 비(Poisson's Ratio)는 물질이 가지는 대표적인 물성 중 하나로 보통 0~0.5의 양의 값을 가진다. 하지만 팽창(auxetic) 구조는 일반적

인 재료와 달리 특별한 내부구조를 통해 인장 시에는 횡 방향으로 팽창하고 압축 시에는 횡 방향으로 압축하여 음의 프와송 값을 가지게 된다[1]. 이렇게 음의 값을 가지는 프와송 비를 Negative Poisson's Ratio (NPR)라 정의한다.

† Received : June 12, 2017      Revised : August 22, 2017      Accepted : August 8, 2017

\*\* Corresponding author, E-mail : khg@seoultech.ac.kr

음의 프아송 비를 가지는 팽창 구조에 대한 연구는 1987년에 Lakes[2]에 의해 최초로 알려졌다. 이후 2차원 팽창 구조에 대한 연구를 통해 팽창 구조가 에너지 흡수율 및 파괴저항과 같은 기계적 성질이 우수하다는 것이 밝혀져 팽창 구조의 형상과 성능에 관한 많은 연구가 진행되었다[3-5]. 음의 프아송 비를 갖는 구조물은 에너지 흡수 구조, 혼합 복합 재료, 의료 기구 등의 설계에서 유용하게 활용이 될 수 있다[6]. 최근에 와서 3차원 팽창 구조에 대한 연구가 진행되고 있지만 2차원 팽창 구조에 비해서는 그 형상과 성능에 관한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 3차원 팽창 구조를 가지는 모델 중 피라미드 형태를 가지는 구조에 대하여 제한조건을 만족하면서 높은 성능을 보일 수 있도록 최적화 설계를 수행하였다.

## II. 본 론

### 2.1 팽창(auxetic) 구조의 특징 및 거동

팽창 구조의 음의 프와송 비는 Fig. 1과 같이 압축 하중을 받을 때 하중 인가방향에 수직인 모든 방향으로 수축이 일어나는 독특한 거동을 보인다. 이러한 Negative Poisson's Ratio의 거동을

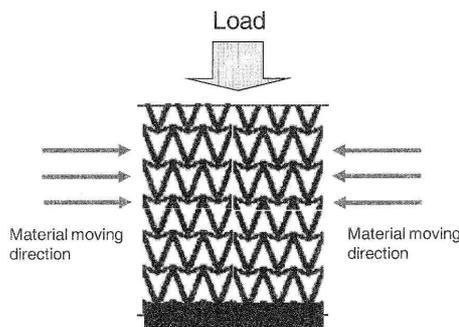


Fig. 1. Shrink mechanism of loaded auxetic structure

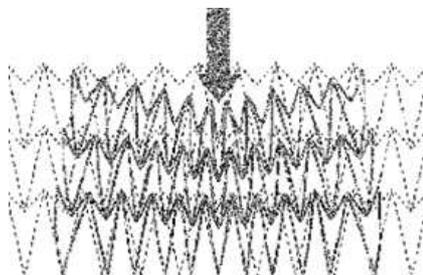


Fig. 2. Behavior of center loaded auxetic structure

보이는 구조를 팽창 구조(auxetic structure)이라 한다. Fig. 2는 팽창 구조에 국부적으로 집중하중이 가해질 때 하중이 가해지는 부분으로 조밀해짐을 알 수 있으며, 이를 통해 구조는 더 견고해지고 하중에 더 잘 견딜 수 있게 된다[1,5].

### 2.2 재료 선정 및 실험설계

#### 2.2.1 반응표면 분석법

반응표면 분석법이란 여러 개의 반응변수와 실험 변수 또는 실험인자들 사이의 관계를 규명하는데 쓰이는 실험계획방법으로, 반응변수가 목표치에 가장 적합한 실험인자를 찾고자 한다[8].

반응표면 분석법에는 크게 중심 합성계획법과 Box-Behnken법이 있는데, Box-Behnken법이 상대적으로 적은 실험횟수로 최적화를 수행할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 Box-Behnken법을 이용하여 반응변수와 독립변수 사이의 2차 회귀 모형식을 도출하고 이들의 관계를 규명하여 3차원 팽창 피라미드 구조를 최적화 수행하였다..

본 논문에서는 MKP Structure Design Associates, Inc. 에서 출원한 US 7910193 B2 특허를 기준으로 MINITAB 사에서 제공하는 실험계획 및 통계프로그램인 MINITAB 17 소프트웨어를 사용하여 실험을 설계하였다. 프로그램 상의 설정에 따라 4인자 3수준의 실험을 계획하여 총 27회의 실험데이터를 얻었다. 또한 실험설계의 정확성을 높이기 위해 2회의 실험을 추가하여 총 81회의 해석을 수행하였다.

#### 2.2.2 재료 선정

본 논문에서는 금속재료를 사용했을 때 3차원 팽창 피라미드 구조의 특징을 알아보기 위해 항복응력이 높은 스프링강의 종류 중 하나인 AISI6145 alloy steel을 재료로 선정하였다. 해석에 사용된 AISI6145의 물성치 및 화학 조성치는 Table 1, 2에 나타냈다.

Table 1. Material properties of AISI 6145

AISI6145	
Density	7850 kg/m <sup>3</sup>
Elastic modulus	201 GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield stress	1165 Mpa

Table 2. Chemical composition of AISI 6145(wt%)

C	Mn	P	S	Si	Cr	V
0.43	0.70	0.04	0.04	0.20	0.80	0.15

2.2.3 설계 인자 및 목표 설정

3차원 팽창 피라미드 구조의 기본형상은 Fig. 3과에 나타난 것과 같으며 이를 바탕으로 3차원 팽창 피라미드 구조의 기본 단위 구조는 Fig. 4와 같다[5]. 설계인자는 Fig. 4에 나타난 것과 같이 길이 L, 두께 t, 각도  $\theta_1, \theta_2$ 로 설정하였고, 반응변수는 von-Mises stress, NPR, 강성(K)값으로 선정하였다.

본 논문에서는 설계인자의 변화를 통해 NPR을 최대화 하여 구조효율을 최적화 하는 동시에 구조에 작용하는 von-Mises stress 값은 재료의

항복응력인 1165 MPa를 넘지 않으면서 최소값을 갖는 구조를 찾도록 목표치를 선정하였다. 구조물이 충분한 강성을 가질 수 있도록 50 N/mm 이상의 값을 목표치로 하였으며, 이는 Table 3에 정리하여 나타내었다.

반응변수로 선정한 NPR, von-Mises stress, 강성을 도출하기 위한 계산식은 다음과 같다.

$$\epsilon_{zy} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} = \frac{\Delta y/y}{\Delta z/z} \tag{1}$$

$$K_{z_{auxetic}} = K_{z_{eq}} = \frac{\sum F_{z_{reaction}}}{\Delta z} \tag{2}$$

Table 3. Optimization objectives and constraints

Objectives and constraints	Target values
Negative Poisson's Ratio	maximize
von-Mises stress	minimize (< 1165 MPa)
Stiffness (K)	50 ≤ K ( N/mm )

여기서 z는 압축 인가방향의 축,  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 는 축 방향 변화량의 비,  $\Delta y, \Delta z$ 는 각 축 방향의 변화량을 나타내고  $K_{z_{eq}}$ 는 등가 강성을  $\sum F_{z_{reaction}}$ 는 하중점에 작용하는 반력의 합을 나타낸다.

2.2.4 실험계획표

실험은 4인자 3수준으로 계획하였다. 여기서 4인자는 설계변수로 설정한 길이(L), 두께(t), 각도( $\theta_1, \theta_2$ )이며, 3수준은 인자별 설계범위를 나타낸다. 인자-수준별 각 설계 변수들의 값을 Table 4에 나타냈다.

길이(L)와 두께(t)의 수준값은 honeycomb 판넬구조의 길이를 기준으로 선정하였다. 각도( $\theta_1, \theta_2$ )의 경우 피라미드 구조에 부합하기 위해  $\theta_1 < \theta_2$ 의 조건을 만족할 수 있도록 설정하였다. 이때  $\theta_1$ 은 예각 범위에서  $\theta_2$ 는 둔각 범위에서 해석 할 수 있도록 수준값을 부여하여  $\theta_1 > \theta_2$ 이 되는 경우의 수는 배제 하였다. 이에 대해 MINITAB 17을 통해 얻어진 실험계획표는 Table 5에 정리하여 나타내었다.

2.3 유한요소모델 및 경계조건

본 연구에서 모델링과 해석에 사용된 프로그램은 각각 CATIA V5, EDISON(첨단사이언스교육허브 개발사업, csd.edison.re.kr)의 Elastic - Plastic Analysis Program SW (CSD\_EPLAST)를 사용하였으며 선형 탄성 해석을 기본으로 하여 유한 요소 해석을 수행하였다.

해석 모델은 2차 사면체 요소인 C3D10을 사용하였으며, 격자(mesh)의 크기는 0.3 mm로 구성하였다. Fig. 5는 해석에 사용된 3차원 팽창 피라미드 구조의 형상과 경계조건을 나타내고 있다. 해석에 사용되는 형상은 Figs. 1-2에서 나타나는

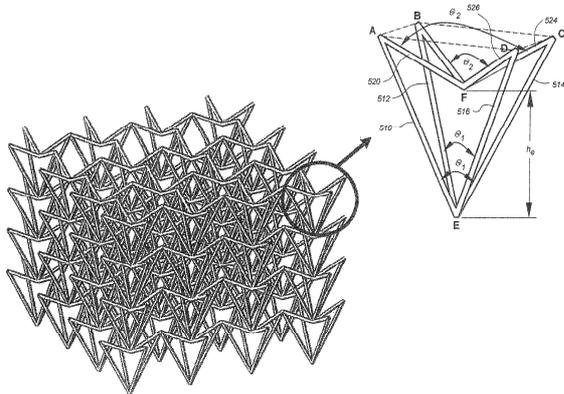


Fig. 3. 3D Auxetic pyramid structure (patent US 7910193 B2)

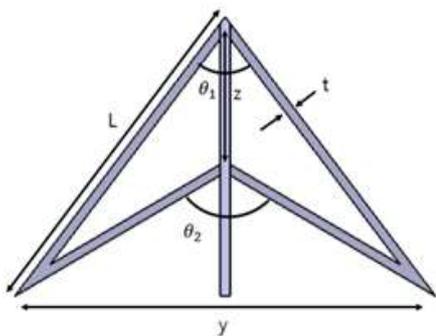


Fig. 4. Unit model of 3D auxetic pyramid structure and design parameters

Table 4. Design parameters and levels

Symbol	Specification	Min	Mid	Max
L	length(mm)	30	45	60
t	width(mm)	0.8	1.0	1.2
$\theta_1$	degree	30	60	90
$\theta_2$	degree	105	135	165

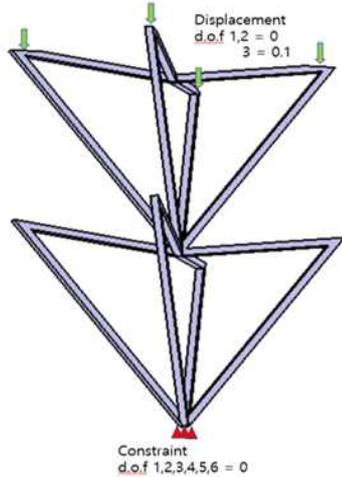


Fig. 5. Boundary conditions of finite element analysis model

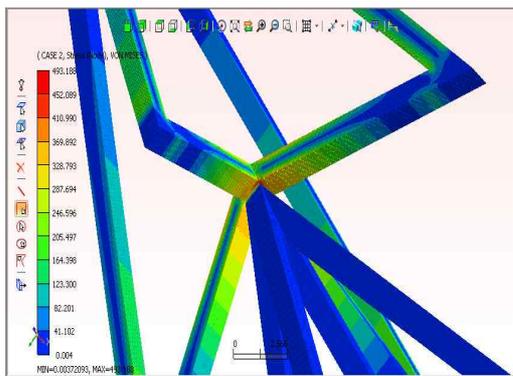


Fig. 6. Singular stress point at notch

것처럼 팽창 거동을 하지 않는 하중을 받는 부분과 가장 큰 팽창 거동을 보이는 부분으로 구성하여 2층 구조로 모델링 하였다. 경계조건의 경우 실제 하중이 가해지는 부위에는 1, 2, 3번 방향 자유도를 구속하고 3번 방향 자유도에 0.1 mm의 변위를 부여하였다. 고정단의 경우 1, 2, 3번 방향 자유도와 4, 5, 6번 회전 자유도를 구속하였다.

von-Mises stress 해석의 경우 Fig. 6과 같이 노치부분에서 특이점이 발생하기 때문에 Fig. 7과 같이 EDISON 가시화(viewer) 프로그램인

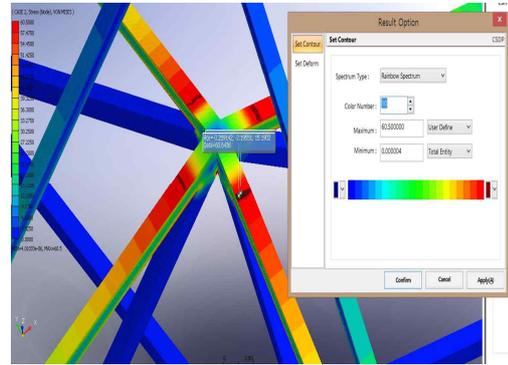


Fig. 7. Distribution of von-Mises stress

Table 5. Experimental design by using Box-Behnken method

No	L(mm)	t(mm)	$\theta_1$ (Deg)	$\theta_2$ (Deg)
1	60	1	30	135
2	60	1	60	165
3	45	1	90	165
4	45	0.8	60	105
5	45	0.8	60	165
6	45	1	60	135
7	30	1	90	135
8	45	0.8	90	135
9	60	1	90	135
10	30	1.2	60	135
11	45	1	60	135
12	45	1.2	60	105
13	45	1	90	105
14	30	1	60	165
15	30	1	30	135
16	30	0.8	60	135
17	30	1	60	105
18	45	1.2	90	135
19	45	1.2	30	135
20	60	1.2	60	135
21	45	1.2	60	160
22	45	1	30	105
23	60	1	60	105
24	45	1	30	165
25	45	1	60	135
26	60	0.8	60	135
27	45	0.8	30	135

CSD-POST의 Result Option Spectrum의 범위를 조절하여 노치 부분을 제외한 부분 중에서 von-Mises 응력이 가장 큰 값을 유효값으로 선정하였다. 특이점을 포함한 응력은 실제적인 응력이 아닌 해석 모델의 노치(notch)로 인하여 발생한 응력이므로 응력 특이점을 제외하고 평가하였다.

## 2.4 유한요소 해석 결과 및 실험인자 분석

### 2.4.1 실험계획표와 유한요소 해석에 따른 반응표면 분석 결과

Table 5의 실험계획표를 통해 만들어진 유한요소 모델들의 해석 결과를 토대로 얻은 반응변수 값은 Table 6에 정리하여 나타내었다.

### 2.4.2 실험인자 별 분석

Table 5와 Table 6의 실험계획표와 실험결과를 토대로 MINITAB 프로그램을 이용하여 반응변수에 대한 완전 2차 회귀 모형식을 구한 뒤 회귀 모형식의 적합성판단 및 유효 실험인자에 따른 반응변수의 변화에 대해 나타냈다.

#### (1) 회귀모형식의 적합성 판단

실험인자의 영향력과 회귀모형식의 적합성을 알아보기 위해 인자의 적합치(P-Value)를 확인한 후 0.05이상의 적합치를 나타내는 인자는 배제하여 반응변수별로 영향력이 있는 인자들을 토대로 완전 2차 회귀 모형식을 구했다. 회귀 모형식의 정규 확률도, 대순서, 적합치 그래프를 근거로 회귀 모형식의 적합성을 판단하였다.

먼저 von-Mises stress의 실험인자에 따른 2차 회귀 모형 출력 결과는 Fig. 8과 같다. 밑줄 친 부분과 같이 적합치(P-Value)가 넘는 인자는 배제하여 완전 2차 회귀 모형식을 구하였으며, 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 (-\sigma_{von-Mises})^{-0.5} = & -0.0227 - 0.000711L & (3) \\
 & + 0.000604\theta_1 - 0.000342\theta_2 \\
 & - 0.051t^2 + 0.000013\theta_1^2 \\
 & + 0.000005\theta_2^2 + 0.001158Lt \\
 & - 0.000025L\theta_1 - 0.000008L\theta_2 \\
 & + 0.000617t\theta_1 - 0.000019\theta_1\theta_2
 \end{aligned}$$

정규 확률도, 대순서, 대 적합치와 같은 잔차 Figs. 9-11에 나타냈다. Fig. 9는 정규성을 확인할 수 있는 그래프로 잔차들이 대체로 직선으로 나타나므로 근사적으로 정규분포를 따른다고 볼 수 있다. Fig. 10을 통해서서는 차수(order) 별로 독립성을 확인할 수 있다. 점 들이 랜덤하게 나타나므로 독립적이라고 할 수 있다. Fig. 11은 불편성, 등분산성을 나타내는 그래프로 0을 중심으로 위 아래로 고르게 분포되어 있으므로 불편성은 만족한다고 볼 수 있으며 분산 정도가 x축을 따라서 비슷하므로 등분산성도 만족한다고 판단할 수 있다.

Table 6. Results of reaction parameters

No	Negative Poisson's Ratio	von-Mises stress (MPa)	Stiffness (K) (N/mm)
1	0.884	183.246	119.258
2	0.157	50.736	18.867
3	0.076	52.430	20.642
4	0.733	125.080	39.269
5	0.487	113.154	61.225
6	0.401	113.135	61.237
7	0.243	198.990	165.847
8	0.227	60.984	14.966
9	0.225	42.369	16.453
10	0.430	331.956	536.593
11	0.401	112.869	61.202
12	0.764	207.043	239.024
13	0.469	272.439	401.818
14	0.164	218.291	176.146
15	0.945	761.708	1137.877
16	0.409	206.649	89.763
17	0.784	416.916	449.501
18	-0.236	99.271	89.361
19	-0.926	402.515	653.458
20	-0.397	75.633	52.008
21	-0.161	112.229	101.793
22	-1.631	388.037	335.871
23	-0.729	86.851	39.473
24	-1.007	290.769	274.336
25	-0.401	113.042	61.204
26	-0.384	48.335	9.455
27	-0.889	252.705	117.740

Section	Coefficient	SE Coefficient	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-0.09392	0.00132	-71.16	0.000	
block					
1	-0.000281	0.000622	-0.45	0.653	1.33
2	-0.000265	0.000622	-0.43	0.672	1.33
L	-0.031908	0.000660	-48.35	0.000	1.00
t	0.010537	0.000660	15.97	0.000	1.00
T1	-0.026397	0.000660	-40.00	0.000	1.00
T2	-0.015775	0.000660	-23.90	0.000	1.00
L*L	-0.000525	0.000990	-0.53	0.598	1.25
t*t	-0.002213	0.000990	-2.24	0.029	1.25
T1*T1	0.011693	0.000990	11.81	0.000	1.25
T2*T2	0.004250	0.000990	4.29	0.000	1.25
L*t	0.00348	0.00114	3.04	0.003	1.00
L*T1	-0.01106	0.00114	-9.68	0.000	1.00
L*T2	-0.00366	0.00114	-3.21	0.002	1.00
t*T1	0.00370	0.00114	3.24	0.002	1.00
t*T2	0.00070	0.00114	0.61	0.542	1.00

Fig. 8. Session window of second order regression model analysis result (von-Mises stress)

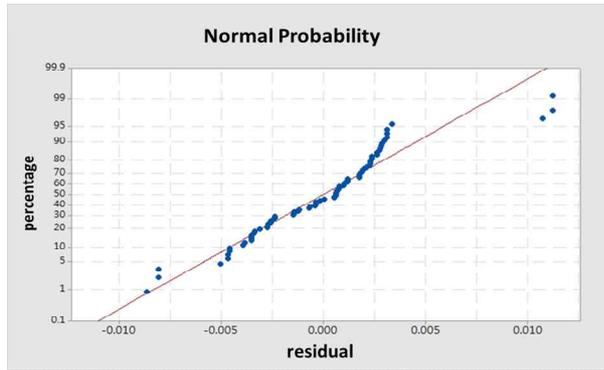


Fig. 9. Normal probability(von-Mises stress)

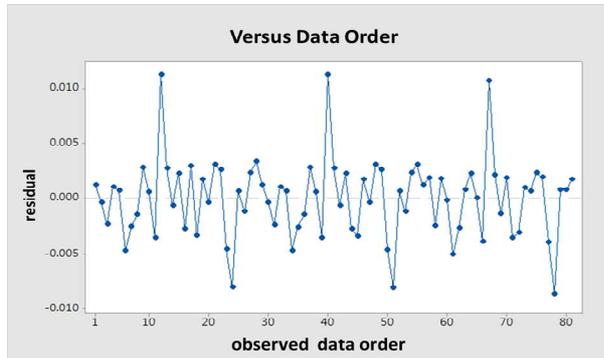


Fig. 10. Residuals vs. data order (von-Mises stress)

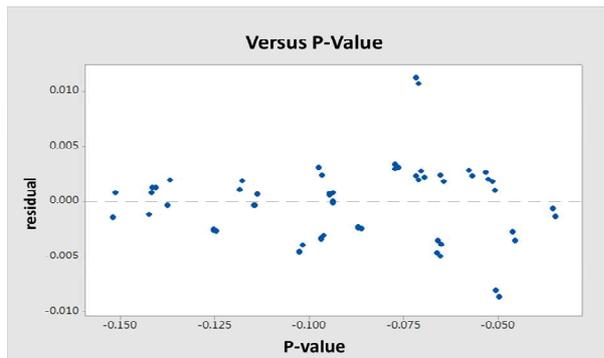


Fig. 11. Residuals vs. P-values (von-Mises stress)

분석을 통해 회귀모형식의 타당성을 확인하여 위 세 가지 잔차 분석을 모두 만족하여 해석에 사용되는 von-Mises 응력의 회귀 모형식은 적합함을 알 수 있다[8].

von-Mises 응력과 마찬가지로 NPR과 강성 역시 출력결과를 토대로 적합치가 0.05가 넘는 값은 배제한 후 2차 회귀 모형식을 구했으며, 잔차 분석을 통해 회귀모형식의 적합성을 판단하였다. 구해진 2차 회귀 모형식은 아래의 식과 같다.

$$NPR^{0.291292} = -1.98 - 0.00919\theta_1 - 0.00657\theta_2 + 0.000079\theta_1^2 + 0.000017\theta_2^2 - 0.000045\theta_1\theta_2 \quad (4)$$

$$(-K)^{-0.214549} = -0.383 - 0.00878L + 0.885t + 0.00055\theta_1 - 0.00191\theta_2 - 0.4509t^2 + 0.000049\theta_1^2 + 0.000016\theta_2^2 + 0.00494Lt - 0.00004L\theta_1 - 0.002787t\theta_1 - 0.000064\theta_1\theta_2 \quad (5)$$

(2) 실험인자에 따른 반응변수의 경향

회귀모형식의 정의에 의해 1차 항 계수의 절대값이 상대적으로 작을수록 특정 반응변수에 대한 인자의 영향이 작다. 또한 교호작용을 나타내는 2차 항의 계수가 양수이면 서로 상승작용을 하거나 보완한다는 것을 의미하고, 반대로 음수이면 두 변수가 서로 상극임을 나타낸다[8]. 식 (1)에서 나타난 반응변수별 완전 2차 회귀 모형식을 토대로 MATLAB을 이용하여 상대적으로 영향이 큰 인자에 의한 반응변수의 경향을 분석하였다.

von-Mises 응력의 경우 L, t,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 의 일차 항 계수가 각각 -0.000711, +0.0654, +0.000604, -0.000342로 L과 t가 상대적으로 큰 영향을 미쳤

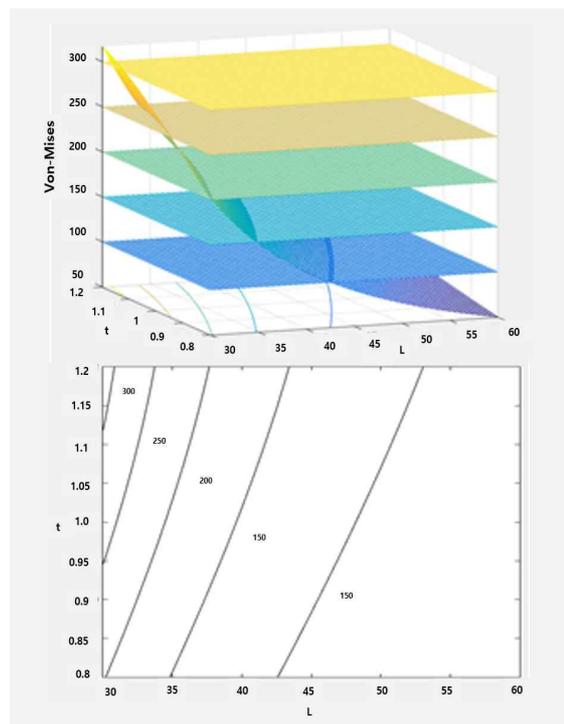


Fig. 12. Trend of contour lines (von-Mises stress vs. L, t)

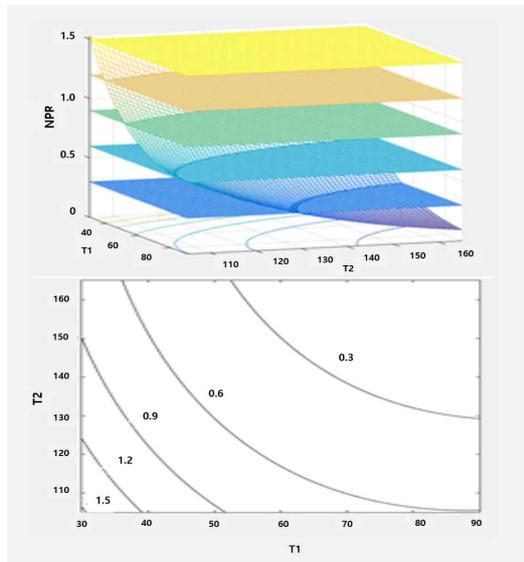


Fig. 13. Trend of contour lines (NPR vs.  $\theta_1, \theta_2$ )

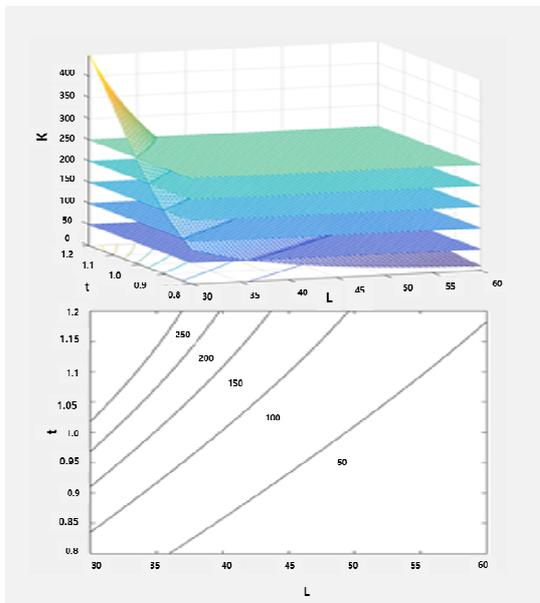


Fig. 14. Trend of contour lines (stiffness(K) vs. L, t)

다. Fig. 12는 von-Mises 응력과 L, t 관계를 나타낸다. L과 t는 비례형상인 것을 확인 할 수 있으며 L은 작아지고 t는 커질수록 von-Mises 응력이 커지는 것을 확인 할 수 있다.

NPR의 경우 L, t는 적합성 판단에 의해 배제 되었으므로  $\theta_1$ 보다 영향력이 작음을 확인할 수 있다. Fig. 13은 NPR과  $\theta_1, \theta_2$ 사이의 관계를 나타낸다. T1( $\theta_1$ ), T2( $\theta_2$ )가 반비례 형상인 것을 확인할 수 있으며  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 가 작아질수록 NPR값이 커지는 것을 확인 할 수 있다.

마지막으로 강성(K)의 경우 L, t,  $\theta_1, \theta_2$ 의 일차 항 계수가 각각 -0.00878, 0.844, 0.00055, 0.00191로 L과 t가 상대적으로 큰 영향을 미쳤다. Fig. 14는 강성(K)과 L, t 사이의 관계를 나타낸다. L과 t가 비례 형상인 것을 확인 할 수 있으며 L은 작아지고 t가 커질수록 K의 값이 커지는 것을 확인 할 수 있다.

### 2.5 최적 모델 선정 및 검증

Table 3에서 나타낸 것과 같이 von-Mises 응력과 NPR의 목표값을 MINITAB 프로그램의 반응 최적화 도구에 입력하여 최적화된 모델의 설계인자와 반응변수의 결과값을 도출 하였다. 그 후 강성(K)이 50 N/mm이상의 값을 만족하는지 확인하여 구조가 목표치를 만족하는지 검증하였다.

Figure 15와 Table 7은 MINITAB 을 통해 도출된 최적화 모델의 설계인자와 von-Mises 응력 및 NPR 값을 나타내었다. 이를 토대로 EDISON 프로그램을 이용하여 해석한 결과값과 최적화된 3차원 팽창 피라미드 구조의 형상을 Table 8과 Fig. 16에 나타내었다.

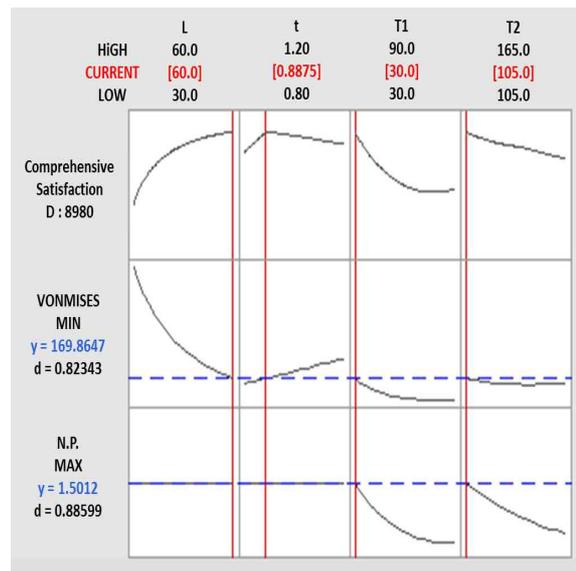


Fig. 15. The predicted optimization results

Table 7. Results of optimized design factors

Design factor	Optimized values
L(mm)	60
t(mm)	0.8875
$\theta_1$ (degree)	30
$\theta_2$ (degree)	105

Table 8. Results of optimized parameters and errors

	Predicted values	Optimized values	Error(%)
von-Mises stress (MPa)	169.865	175.615	3.39
NPR	-1.501	-1.574	4.88

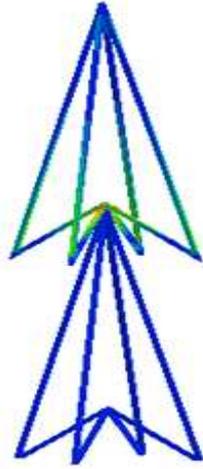


Fig. 16. Shape of the optimized model

실제 해석결과 값과 회귀모형식을 통해 도출된 반응변수 값의 오차가 5% 이하로 나타난다. 최적화된 모델이 50N/mm 이상의 강성 값을 가지는지 검증하기 위하여 EDISON 프로그램의 OUTPUT 파일을 확인하였다.

경계조건부분에서 확인된 반력값을 이용하여 식 (2)를 통해 강성을 구하였다.

$$K_{z_{auxetic}} = K_{z_{eq}} = \frac{\sum F_{z_{reaction}}}{\Delta z} = \frac{6.66201 N}{0.1 mm} = 66.62 N/mm$$

구해진 강성은 66.62 N/mm로 목표치인 50 N/mm 보다 큰 것을 확인 할 수 있었다. 최적 모델의 강성이 목표치 이상의 값을 가지고 최적 모델을 구하기 위해 사용된 2차 회귀 모형식의 신뢰도 구간이 95%임을 감안하면 최적설계가 성공적으로 수행되었음을 알 수 있다.

### III. 결 론

본 연구에서는 반응표면분석법을 이용하여 von-Mises 응력은 최소로 하면서 Negative Poisson's ratio는 최대를 하는 3차원 팽창 구조

의 최적화 설계를 수행하였으며 기능성 경량화 복합 구조물을 설계하는데 유용하게 활용이 될 수 있을 것이다.

- (1) 3차원 팽창 피라미드 구조를 기준으로 4개의 설계 인자를 선정하였고, 단위 구조를 z방향으로 2개를 연속으로 배열하여 현실에 가까운 경계조건을 부여하였다.
- (2) Box-Behnken법을 이용하여 4인자 3수준의 27회 실험을 3회 반복 실험하여 총 81 회의 해석을 수행하여 실험설계의 정확성을 높였다.
- (3) 회귀분석모델의 적합치 분석을 통해 2차 완전회귀모형식의 적합성을 검증하였고 그 결과 회귀모형식의 타당성을 입증하였다. 또한 해석모델의 인자별 해석을 통해 반응변수의 경향성을 분석하였다.
- (4) 해석결과를 종합적으로 만족하는 최적 형상을 도출하였고 해석결과 von-Mises 응력은 3.39%, Negative Poisson's Ratio는 4.88%의 오차가 발생하여 신뢰구간 95%이내의 최적설계가 성공적으로 수행되었음을 알 수 있다.

### 후 기

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2014M3C1A6038854).

### References

- 1) Liu, Y., and Ma, Z.-D., 2007, Nonlinear analysis and design investigation of a negative Poisson's ratio material, *ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Vol.10, pp.965-973.
- 2) Lakes, R., 1993, Advances in negative Poisson's ratio materials, *Advanced Materials*, Vol.5, pp.293-296.
- 3) Elipe, J.C.Á., and Lantada, A.D., 2012, Comparative study of auxetic geometries by means of computer-aided design and engineering, *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, pp.12-24.
- 4) Kang, D. S., Han, S. C., Park, J. W., Ban, N. D., and Kang, K., 2016, A wire-woven Kagome transformed to have a negative

Poisson's ratio, *Transactions of Korean Society of Mechanical Engineering A*, Vol.40, pp.827-833.

5) Ma, Z. D., 2011, Three-dimensional auxetic structures and applications thereof, *U.S. Patent No. 7,910,193*.

6) HexWeb., Honeycomb Attributes and Properties, *Hexcel Composites*. 1999.

7) Kim, K. and Kim, D.-M., 2011, Contact pressure of non-pneumatic tires with auxetic spokes, *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.39, No.8, pp.719-724.

8) Lee, S., Analysis of engineering statistical data using Minitab, *Eretech*, 2008.