

2차원 평판 내 구멍-모서리 및 구멍간의 응력 집중 효과를 고려한 리벳 배치 최적화 기법 검증 및 제안

이 상 구¹ · 공 두 현¹ · 심 지 수¹ · 신 상 준^{1*}

¹서울대학교 기계항공공학부

Verification and Suggestion of Optimization Method for Rivet Arrangement with Regard to Stress Concentration between Hole-Edge and Hole-Hole on a 2-D Plate

Sang Gu Lee¹, Du Hyun Gong¹, Ji Soo Sim¹ and Sang Joon Shin^{1*}

¹Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ., Seoul, 08826, Korea

Abstract

Stress on plates may increase in the neighborhood the edges or the holes for rivets or bolts. Excessive stress concentration may lead to severe breakage of the plates. Thus, it is important to conduct optimization of arrangement of holes at the design stage. In this paper, accuracy of FEM analysis was examined for such stress concentration. By changing the hole size on a narrow plate, change of the stress concentration factor(K) was investigated. Additionally, the same experiment was conducted about series of multiple holes on plate to investigate interaction between the adjacent holes. Then, the FEM results were compared to the reference predictions respectively. Finally, a method by which simple stress concentrating situations can be optimized, will be suggested. This method was examined by FEM, and showed similar tendency with the expectation. Therefore, this method can be valuable when arranging the holes on a plate.

Keywords : 2D plate, stress concentration factor, single hole, multiple hole, optimization

1. 서 론

항공기와 대형 선박에서 판과 리벳의 결합을 이용한 제작은 필수적이며, 볼트와 너트를 이용한 결합 또한 널리 쓰인다. 이러한 체결을 위해 판에 구멍 형상이 포함될 경우, 그 구멍 주위에서 응력 집중이 발생된다. 응력 집중 현상에 대한 해석이 올바로 이루어지지 않으면, 허용 하중 하에서도 항복 및 파단이 일어날 수 있으며, 피로 파괴가 심각해질 수 있다. 따라서 설계 단계에서의 응력 집중 분석이 중요하다.

Isida(1953; 1955)는 유한한 너비의 판에서 단일 구멍과 판의 경계에 의한 응력 집중 계수를 수학적으로 예측하였고, Schulz(1941)은 무한한 판 위에 일렬로 나열된 3개의 구멍에

대해 응력 집중 계수를 수식으로 나타내었다. 이 외에도 다양한 형상에 대한 수학적 분석이 이루어졌으며, Peterson과 Rudolf (1953)는 이러한 내용들을 수집해 정리하였다. 최근에는 컴퓨터를 이용한 FEM으로 복잡한 응력 집중 현상을 빠르게 분석할 수 있게 되었다. Woo 등(2010)은 판재에 존재하는 다양한 정삼각형 및 정사각형 구멍 주변에서의 응력집중을 유한요소 해석으로 분석하였다.

본 연구에서는 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업(EDISON)의 프로그램 중, 판의 구조 해석이 가능한 2D Continuum linear analysis program을 이용하여 판재 위의 여러 원형 구멍간의 응력 집중을 분석하고 구멍 배치의 최적화를 진행하였다.

* Corresponding author:

Tel: +82-2-880-1901; E-mail: ssjoon@snu.ac.kr
Received May 10 2016; Revised October 7 2016;
Accepted October 8 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

우선, FEM 구조 해석의 응력 집중 현상에서의 정확도와 응력에 대한 분석을 수행하였다. 유한한 너비의 판에 하나의 구멍이 있는 형상에 대해서 응력 집중 현상을 해석한 후, 수학적·실험적으로 검증된 문헌의 자료와 비교하였다. 그 다음, 넓은 판에 일렬로 나열된 3개의 구멍이 있는 형상에서 나타나는 응력 집중 현상을 해석하였다. 이 응력 집중 계수 또한 이론값과 비교하여 정확도를 분석하였으며, 오차 원인을 추론해 보았다.

다음으로 판재위에 구멍이 일렬로 나열될 때, 최대 응력 값이 최소가 되는 최적화 배치 방법을 구상하고 확인하였다. 앞의 두 응력 집중 원인이 서로 영향을 미치지 않는다는 가정 하에 최적화된 구멍 간격을 수학적으로 찾는 방법이 제안 되었으며, FEM 분석을 통해 최적화 방법의 타당성을 확인 하였다.

2. 본 론

이 장에서는 응력 집중 계수 해석을 위한 배경 이론을 먼저 소개한 뒤, 단일 구멍이 존재하는 유한한 너비의 판과 3개의 일렬로 나열된 구멍이 존재하는 무한한 판에서의 응력 집중 계수 변화를 FEM을 통해 계산하여 이론값과 비교하였다. 마지막으로 두 응력 집중 효과를 고려한 최적화 방법을 제시하고 검증하였다.

2.1 배경 이론

2.1.1 응력 집중 계수

재료에 존재하는 구배, 구멍, 흠집 등은 국부적으로 높은 응력을 유발한다. 이러한 현상을 응력 집중이라고 하며, Fig. 1은 응력 집중의 한 예시이다. 응력 집중의 정도는 응력 집중 계수 K 로 설명한다. 인장 응력 집중 계수는 K_t , 전단 응력 집중 계수는 K_s 로 구분한다.

응력 집중 계수는 응력 집중 현상에 의해 발생한 최대

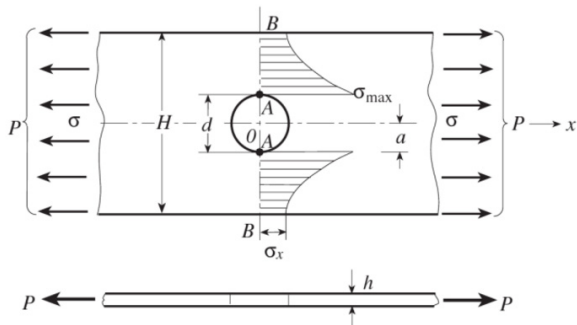


Fig. 1 Tensed finite width plate with a hole (Walter, D. P., 2008)

응력을 기준 응력으로 나눈 수이며, 기준 응력은 종류에 따라 계산하는 방식이 2가지로 나뉜다. 멀리서 작용되는 응력을 기준 응력으로 보아 반력을 총 단면적으로 나누는 방법 (σ_{nom})이 있으며, 응력 집중이 일어나는 곳의 단면적으로 나누는 방법(σ_n)도 있다. 응력 집중 계수는 각 방법에 따라 K_g , K_n 으로 쓴다. 식 (1)은 Fig. 1에 대해서 계산한 응력 집중 계수이다.

응력 집중에 의한 최대 응력은 재료의 파단을 알아볼 수 있도록 Von Mises 응력으로 계산하기도 한다. 본 논문에서는 Von Mises 응력으로 응력 집중 계수를 계산하였다.

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{Hh} \quad \sigma_n = \frac{P}{(H-d)h} \quad (1)$$

$$K_{tg} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad K_{tn} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}$$

2.1.2 단일 구멍에 의한 응력 집중

Fig. 2와 같이 넓은 평판에 구멍이 존재할 때 응력 집중이 발생한다. Timoshenko와 Goodier(1951)가 제시한 평면 응력 이론에 따라 식 (2)가 성립한다.

$$\sigma_r = \frac{1}{2}\sigma\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}\sigma\left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}\sigma\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}\sigma\left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}\sigma\left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right)\sin 2\theta$$

$r = a$ 일 때,

$$\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0 \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \sigma - 2\sigma\cos 2\theta$$

$\theta = 90^\circ$ 일 때,

$$\sigma_\theta = 3\sigma \quad (4)$$

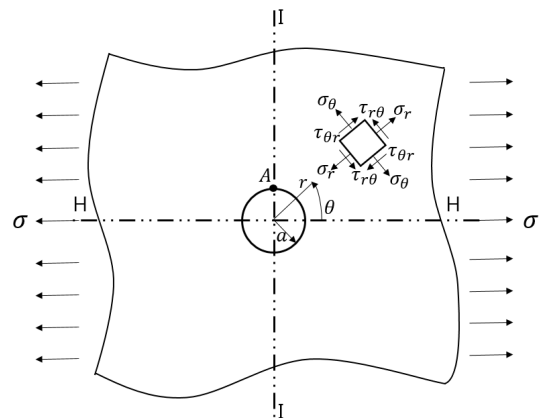


Fig. 2 Tensed infinite width plate with a hole

로 집중된 응력이 최대가 된다. 따라서 넓은 평판에서 단일 구멍에 의한 응력 집중 계수는 3이다.

2.1.3 구멍과 모서리 사이에서의 응력 집중 계수

Isida(1953)는 Fig. 3과 같이 유한한 너비를 갖는 평판에 존재하는 구멍에 의해 발생하는 응력 집중 계수를 식 (5)와 같이 근사하였다.

$$K_{tm} = 3.007 - 2.861\left(\frac{2a}{H}\right) + 2.944\left(\frac{2a}{H}\right)^2 - 1.079\left(\frac{2a}{H}\right)^3 \quad (5)$$

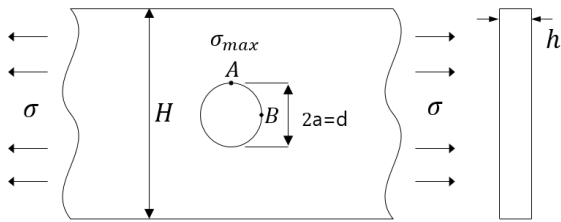


Fig. 3 Finite width plate with a hole (Walter, D. P., 2008)

2.1.4 두 구멍 사이에서의 응력 집중 계수

Schulz(1941)는 Fig. 4와 같이 여러 개의 구멍이 일렬로 나열되어 있는 평판에 인장력이 가해졌을 때의 응력 집중 계수를 식 (6)으로 근사하였다.

$$K_{tm} = 3 - 3.095\frac{d}{l} + 0.309\left(\frac{d}{l}\right)^2 + 0.786\left(\frac{d}{l}\right)^3 \quad (6)$$

$$K_{tg} = 3 + 0.1347\frac{d}{l} + 0.3076\left(\frac{d}{l}\right)^2 - 1.3095\left(\frac{d}{l}\right)^3 + 4.0035\left(\frac{d}{l}\right)^4 - 2.1271\left(\frac{d}{l}\right)^5$$

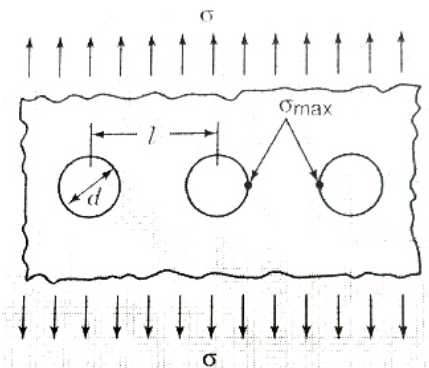


Fig. 4 Tensed Infinite width plate with three holes

2.2 구멍과 모서리 사이에서의 응력 집중 해석

EDISON 2D Continuum linear analysis program으로 K_{tm} 을 구한 후, 식 (5)와 비교하여 해석의 정확도를

검증하였다.

Fig. 5는 EDISON 2D Continuum linear analysis program에서 너비가 유한한 평판 위의 구멍에 의한 응력 집중 현상을 구현할 해석 대상물이다. 이는 2차원 요소인 shell로 모델링되었고, 형상 및 물성치 정보는 Table 1에 나타내었다. 또한 Fig. 6과 같이 구멍 반지름의 3배에 해당하는 원과 구멍 사이에 절점을 더 많이 배치하여 격자를 생성하였다. 사용되는 프로그램이 선형범위 이내의 변형만을 옳게 예측하므로 판의 크기에 비해 가해지는 하중을 많이 감소시켰다.

집중하중이 작용된다는 상황을 고려하여 평판의 길이방향

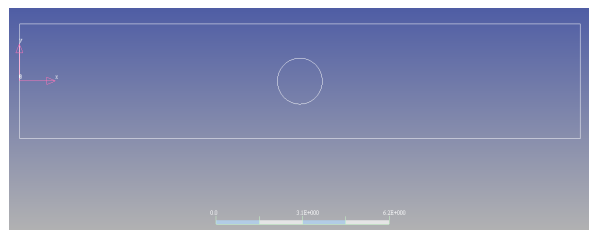


Fig. 5 Geometry of finite width plate with a hole

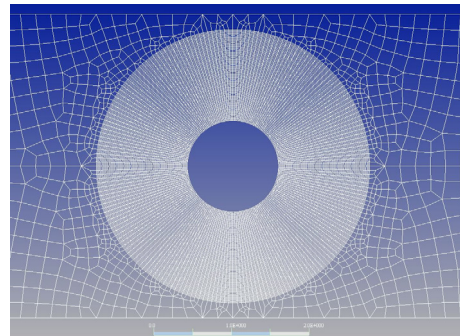


Fig. 6 Mesh distribution of plate with finite width

Table 1 Parameters of analytical model

Length(L)	20m	Load(F)	1N
Width(H)	4m	Young's modulus	70GPa
Thickness(h)	0.01m	Poisson's ratio	0.33
Density	2710kg/m ³		

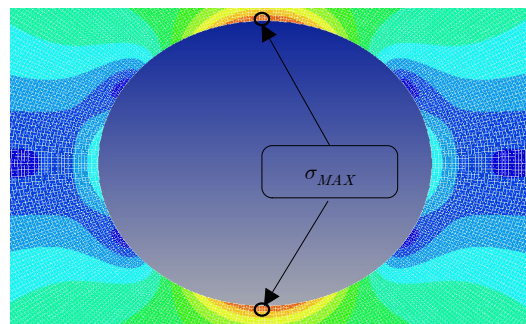


Fig. 7 Location of maximum von Mises stress

Table 2 σ_{max} and K_{tm} in result of a/H

a/H	$\sigma_{max} (N/m^2)$	K_{tm}		
		Ref.[1]	Result	Error(%)
0.00		3.000		
0.05	75.376	2.749	2.714	1.30
0.10	78.263	2.544	2.504	1.55
0.15	83.731	2.385	2.344	1.68
0.20	92.564	2.265	2.222	1.90
0.25	107.373	2.178	2.147	1.39
0.30	130.977	2.117	2.096	1.02
0.35	172.183	2.077	2.066	0.51
0.40	253.742	2.050	2.030	0.97
0.45	494.604	2.030	1.978	2.55

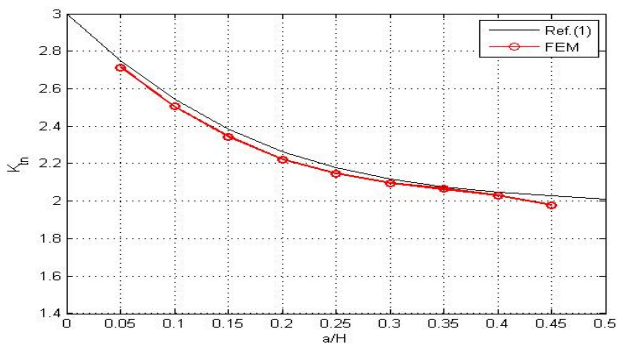


Fig. 8 Comparison of K_{tm} between analytic and FEM result

양 끝단 절점에 각각 고정 경계 조건과 집중 하중 1N을 설정하였다. Fig. 7에서는 배경 이론에서 설명한 것과 같이 구멍의 상단과 하단에 최대응력 σ_{max} 가 발생함을 확인하였다.

Table 2는 a/H 값에 따른 σ_{max} 및 K_{tm} 의 이론값과 수치적 해석 값을 요약한 표이다. 표에서 a/H 가 증가할수록 σ_{max} 값이 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 구멍과 벽 사이의 거리가 점차 가까워지면서 벽면이 구멍 주위의 응력분포에 영향을 주기 때문이다.

해석적 K_{tm} 값은 반지름이 매우 작을 때 즉, a/H 가 0으로 수렴할 때 3이 된다는 것이 앞서 2.1.2의 식 (4)에서 설명되었다. 따라서 수치적 K_{tm} 값 또한 a/H 가 작을 때 3에 가까운 값을 가질 것으로 예상된다. Fig. 8에서도 이러한 경향을 살펴볼 수 있다.

또한 오차율을 살펴보았을 때, 전체적으로 3%이내로 매우 정확한 해석 결과를 도출하였다. 따라서 수치적인 해가 Isida가 제시한 이론값과 매우 근사함을 확인할 수 있다.

2.3 구멍 간의 응력 집중 해석

Fig. 4와 같이 3개의 구멍이 일렬로 나열되어 있는 평판에 구멍이 나열된 방향에 수직으로 인장력이 가해졌을 때의 응력

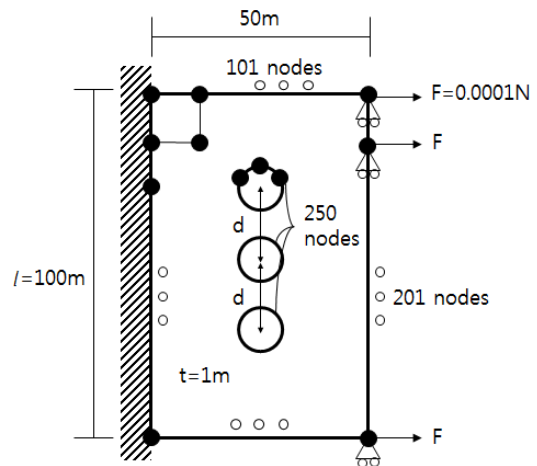


Fig. 9 Scheme of plate with three holes

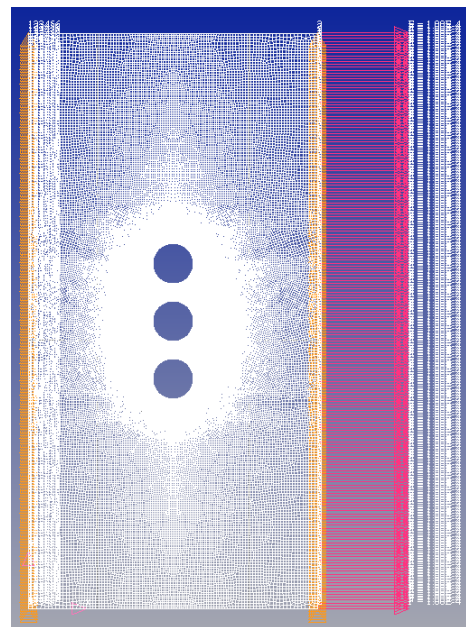


Fig. 10 FEM model of plate with three holes

집중 현상을 분석하였다. EDISON 2D Continuum linear analysis program으로 계산된 응력 분포에서 최대 응력을 찾아 2.1.1 식 (1)의 방법으로 두 응력 집중 계수를 구하였고, 그 결과를 이론값과 비교하였다.

EDISON 2D Continuum linear analysis program에 사용된 형상, 격자, 경계조건 및 힘의 분포는 Fig. 9와 같다. 전체적인 길이 500m, 너비 1000m, 두께 1m에서 l 을 100m로 고정하였다. d/l 값을 0.1, 0.2, 0.3, ..., 0.7로, 즉 d 를 10m, 20m, 30m, ..., 70m로 바꿔가며 해석하였다. 왼쪽과 오른쪽 가장자리의 node들은 201개, 위와 아래쪽 가장자리의 node들은 101개이며, 구멍의 테두리에 격자를 250개씩 배치하였다. 왼쪽 가장자리 node들을 고정시키고, 오른쪽 가장자리 node들은 Y축 방향자유도만 억제하였다.

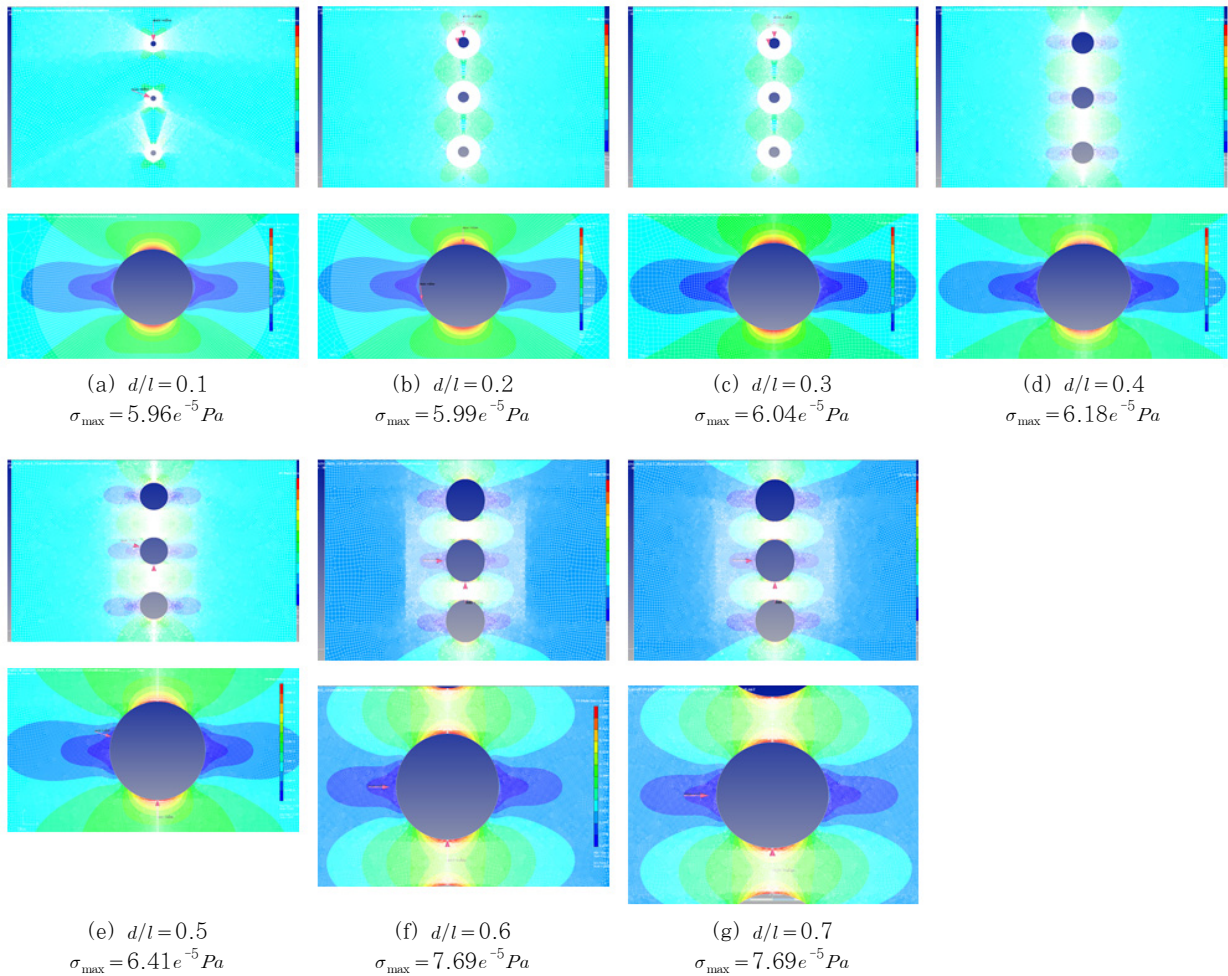


Fig. 11 Stress distribution of two-dimensional plate with three holes

오른쪽 가장자리 node들에 각각 0.0001N의 집중 하중을 가하였다. 입력 파일 제작 및 후처리는 한국과학기술원 전산구조해석 및 설계 연구실에서 개발 제공한 전후처리기로 수행하였다. Fig. 10은 이를 이용한 이산화 형상이다. 이번 해석도 2.2와 마찬가지로 선형 범위 이내의 변형을 위해서 판의 크기에 비해 하중을 다소 감소시켜 해석하였다.

우선 응력 분포 결과인 Fig. 11을 살펴보면, 구멍 크기에 따른 응력 집중 효과의 변화를 알 수 있다. Fig. 11(a)는 구멍이 작아 응력 집중 효과가 일어나는 면적 또한 작다. 각 구멍 근처에서 독립적으로 응력 집중이 일어나 앞에서 본 단일 구멍에 의한 응력 집중 분포와 비슷함을 알 수 있다. Fig. 11(b)부터는 구멍들 사이에서 응력 등고선의 변화가 보이기 시작한다. 구멍이 커질수록 구멍들 사이의 등고선이 높아지며, 응력이 더 많이 집중된다.

d/l 값에 따른 최대 응력의 변화는 Fig. 12에 나타내었다. 구멍은 주변의 응력을 높이는 역할을 하여 구멍들 사이에서 응력 등고선을 높이며, 다른 구멍의 테두리가 그 영향력 안에 포함되면 최대 응력 또한 상승하게 된다.

마지막으로 최대 응력으로부터 응력 집중 계수를 계산하여 이론값과 비교하였다. 이론값으로는 식 (6)을 사용하였다. Table 3은 FEM을 통해 구한 응력 집중 계수와 이론값을 비교하는 표이며, Fig. 13은 Table 3의 내용을 시각적으로 나타낸 것이다.

전체적인 경향성이 잘 맞으며, d/l < 0.6일 때 오차가 3% 이내로 높은 정확도를 보인다. d/l이 작을 때는, 2.1.2와 같이

Table 3 Change of stress concentration factor according to hole size

d/l	K_{ly}			K_m		
	Ref(3)	Result	Error(%)	Ref(3)	Result	Error(%)
0	2.944			3.000		
0.1	3.042	2.965	2.53	2.694	2.669	0.95
0.2	3.040	2.980	1.98	2.400	2.384	0.65
0.3	3.016	3.005	0.37	2.120	2.104	0.80
0.4	3.048	3.075	-0.86	1.862	1.845	0.91
0.5	3.215	3.189	0.82	1.628	1.594	2.06
0.6	3.596	3.826	-6.40	1.424	1.530	-7.47
0.7	4.268	3.826	10.35	1.254	1.148	8.51

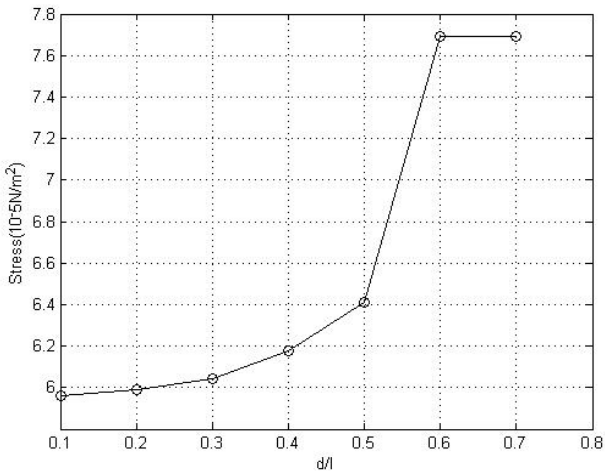


Fig. 12 Maximum stress value around the holes with d/l value

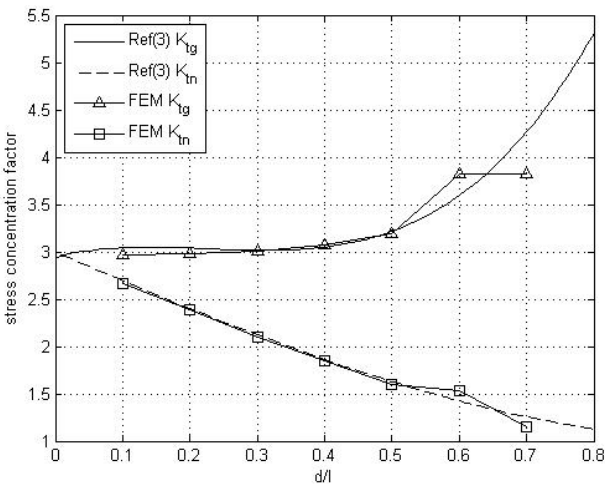


Fig. 13 Stress concentration factor comparison between FEM and analytical result

넓은 평판 위의 단일 구멍이 있는 형상과 비슷한 성질을 갖게 되어 응력 집중 계수가 3으로 수렴하게 된다. d/l이 커질수록 오차가 커지는 것은 구멍 근처의 mesh가 커지기 때문이다. EDISON 2D Continuum linear analysis program에서는 격자 수가 많아지면 요소의 aspect ratio가 지나치게 커져 계산이 진행되지 않는 경우가 있었다. Hole의 크기가 커질수록 격자를 더 많이 배치해야 하지만 그러지 못하였고, 응력이 집중되는 부분을 덮는 격자의 수가 적어져 오차가 증가하게 되었다.

2.4 두 응력 집중 현상을 고려한 구멍 배치 최적화

판재 위에 결함을 위한 구멍을 여러 개 배치하는 경우, 경계면과 구멍, 그리고 구멍들 사이에서 응력이 상승하여 판재의 안정성을 낮추게 되므로 이에 대한 최적화가 필요하다.

앞의 두 응력 집중 현상 해석을 통해, 구멍과 경계면의 거리나 두 구멍 간의 거리가 짧을수록 응력이 더 많이 집중됨을 알 수 있었다.

2.4.1 최적화 방법

Fig. 14는 너비가 H인 판재 위에 N개의 구멍을 배치한 그림이다. 각 구멍의 지름은 d이고, 등간격 l만큼 떨어져 있다. 그러면 구멍과 경계면간의 거리 c는 식 (7)로 표현되며 구멍 간격 l과는 음의 상관관계를 갖는다.

$$c = (H - (N - 1)l) / 2 \quad (7)$$

2.2와 2.3에서의 응력 집중 현상을 고려하면, l이 작을 때는 구멍들 사이에서 응력이 많이 집중되고, l이 커지면 c가 작아져 구멍과 경계면 사이에서 응력이 커질 것으로 예상된다. 따라서 최적화의 목적함수는 판의 최대 응력 $\sigma_{max}(l)$ 이 되고, 이 값을 최소로 하는 l에서 최적의 구멍 배치가 된다.

구멍간의 응력 집중이나 구멍과 경계면 사이의 응력 집중 현상이 독립적이라고 가정하면 목적함수는 다음과 같이 쓸 수 있다. 식 (9)는 식 (5)의 K_{tn}을 K_{tg}로 변환한 것이며, 식 (10)은

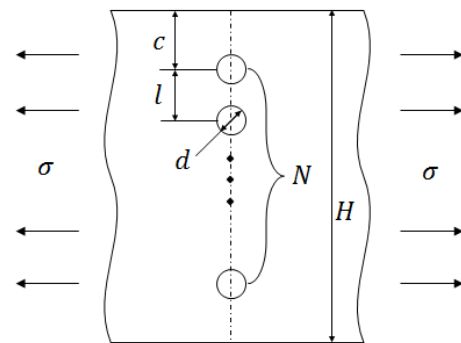


Fig. 14 Shape of plate with multiple holes

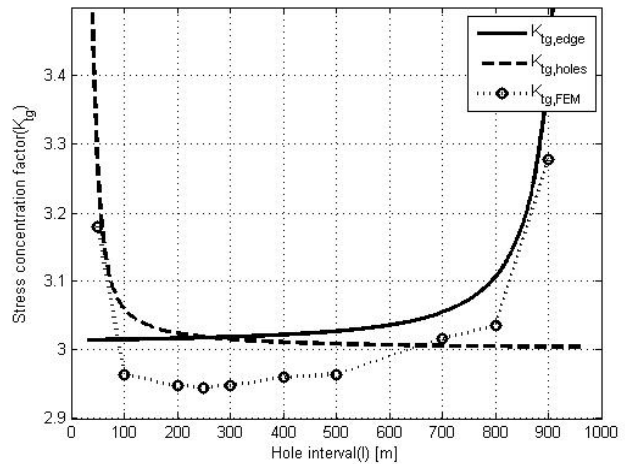


Fig. 15 Comparison of FEM and analytical result

식 (6)의 K_{tg} 이다.

$$\sigma_{\max}(l) = \max(K_{tg,holes}, K_{tg,edge}) \quad (8)$$

$$K_{tg,edge} = \frac{3.007 - 2.861\frac{a}{c} + 2.944(\frac{a}{c})^2 - 1.079(\frac{a}{c})^3}{1 - \frac{a}{c}} \quad (9)$$

$$K_{tg,holes} = 3 + 0.1347\frac{d}{l} + 0.3076(\frac{d}{l})^2 - 1.3095(\frac{d}{l})^3 + 4.0035(\frac{d}{l})^4 - 2.1271(\frac{d}{l})^5 \quad (10)$$

Fig. 15의 실선과 파선은 각각 식 (9)와 식 (10)을 나타낸다. 판에 가해지는 응력(σ)가 구멍 근처까지 균등하게 분포한다고 가정하면, 구멍간의 거리가 작을 때는 파선을 따르다가 거리가 멀어지면서 실선을 따르게 된다. 전체적인 응력 집중 계수가 최소가 되는 지점은 두 응력 집중 계수가 같을 때이므로, 그 형상에서 판의 최대 응력 값이 최소가 된다고 예상할 수 있다.

2.4.2 FEM 해석 결과

두 응력 집중 현상을 독립적으로 생각할 수 있는지 알아보기 위해 FEM 해석을 수행하였다.

Fig. 14와 같은 형상에서 너비(H)는 1000m, 길이는 500m, 두께는 0.01m, 구멍 지름(d)은 30m로 고정하였고, 나머지 물성치는 2.3과 같다. 구멍 간격(l)을 100m부터 100m씩 늘려가며 수치 해석을 하였으며, 최대 응력 값으로 응력 집중 계수를 계산하였다. 앞의 2.2와 2.3에서는 구멍의 반경을 바뀌가며 FEM 해석을 진행하였지만 응력 집중 계수는 형상의 비율에 의해 결정되므로 식 (9)와 식 (10)을 계속 사용할 수 있다. 경향성을 더 관찰하기 위해 $l=50m, 250m$ 에서도 FEM 해석을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 15에 나타내었다.

실선과 파선은 식 (9)와 식 (10)로 그려진 그래프이며, 두 응력 집중 효과가 독립적으로 나타날 때의 응력 집중 계수이다. 이 둘이 교차하는 지점이 응력 집중이 가장 적게 발생하는 최적의 형상이며, 그때의 l 은 250m 정도이다.

FEM으로 계산한 응력 집중 계수(K_{tg})를 원 기호와 점선으로 나타내었다. 전체적인 경향성은 비슷하게 나타났으며, 최소가 되는 l 은 250m 근처로 예상된다. 따라서 앞에서 제시한 두 응력 집중 효과를 독립적으로 가정하는 방법이 최적화에 활용될 수 있음을 알 수 있다.

이론상 K_{tg} 는 3 이상이어야 하지만 FEM으로 계산된 많은 값들이 이를 만족하지 못했다. 구멍 주위의 응력 변화를 세밀하게 구현할 수 있도록 mesh를 많이 적용하는 것으로 이론값과 비슷한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

3. 결 론

본 연구에서는 EDISON 2D Continuum linear analysis program을 이용하여 평판 위의 리벳 배치 최적화 과정을 진행하였다. 유한한 너비의 평판에 단일 구멍이 있는 형상과 무한한 평판에 여러 개의 구멍이 나열된 형상에 대하여 각각 응력 분포를 구하였고, 응력 집중 계수를 이론값과 비교하였다. 또한 최종적으로 유한한 너비의 평판 위에 2개의 구멍이 있는 형상을 수치적으로 분석함으로써 리벳 배치 최적화 방법의 타당성을 검증하였다.

단일 구멍의 경우, 구멍과 모서리 사이의 거리가 좁아짐에 따라 최대 응력 값이 점차 증가함을 볼 수 있었다. 또한 수치적 값이 이론값과 오차범위 3% 이내로 매우 정확함을 확인하였다. 판재에 리벳을 배치할 때 판재의 모서리와 리벳 간의 간격이 넓을수록 이런 응력 집중 효과가 감소하게 된다.

여러 개의 구멍이 나열된 너비가 무한한 평판 해석에서도 구멍들의 응력 집중에 의한 상호작용이 잘 구현된 응력 분포를 보였다. 그리고 구멍의 크기가 작을 때 이론값과의 오차가 약 3% 이내로 비교적 정확한 값을 구할 수 있었다. 구멍간의 간격이 좁을수록 상호간 응력 간섭 현상으로 인해 최대 응력 값이 증가하기 때문에 리벳과 리벳 사이의 간격이 넓을수록 응력 간섭 효과가 덜 발생하게 된다.

앞의 두 응력 집중 효과를 고려하여 유한한 너비의 평판 위의 구멍을 최적으로 배치하는 방법을 고안하였다. 판 전체의 응력 집중 계수는, 두 구멍간의 거리가 가까울 때 구멍 간의 응력 집중 해석에서 구한 응력 집중 계수의 경향성을 보이다가, 구멍 간의 거리가 점점 멀어지면서 벽면과 구멍간의 응력간섭에서 구한 응력 집중 계수의 경향성을 따를 것으로 예측하고 구멍 간 거리를 바뀌가며 수치적 해석을 진행하였다. 그 결과 이론값으로 예측한 값과 수치적으로 구한 값의 경향성이 매우 일치함을 확인하였다.

실제 판재 위에 리벳을 배치할 때 이론값만으로 최대 응력 값이 최소가 되는 지점을 미리 예측하여 형상을 최적화 하는 방법을 수치적인 해석 값을 이용하여 검증하였다. 따라서 향후 리벳 배치의 최적화 연구에서 리벳의 위치를 바뀌가면서 여러 번의 수치해석을 할 필요 없이, 이론값으로 미리 예측한 리벳간의 간격을 기준으로 수치해석을 진행함으로써 설계단계의 단순화를 기대할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단이 주관하는 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업(EDISON)(NRF-2014M3C1A6038344)과 서울

대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다.

References

Isida, M. (1953) Form Factors of a Strip with an Elliptic Hole in Tension and Bending, *Sci. Pap. Faculty Eng., Tokushima Univ.*, 4, p.70.

Isida, M. (1955) On the Tension of a Semi-Infinite Plate with an Elliptic Hole, *Sci. Pap. Faculty Eng., Tokushima Univ.*, 4, p.70.

Schulz, K.J. (1941) On the State of Stress in Perforated Plates, *Doctoral Dissertation, Technische Hochschule.*

Timoshenko, S., Goodier, J.N. (1951) Theory of Elasticity, *McGraw-Hill Book Company*, p.80.

Walter, D.P., Deborah, F.P. (2008) Peterson's Stress Concentration Factors, *John Wiley & Sons*, p.6, 7, 270, 271, 314.

Woo, J.H., Na, W.B. (2010) A Stress Concentration Analysis in Plates with Various Shaped Cutouts, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 23(1), pp.196~199.

요 지

리벳이나 볼트가 결합되는 구멍은 항공기, 선박 및 기타 구조물에 사용되는 판재의 응력 집중을 유발한다. 과도한 응력 집중 현상이 지속되면 종래에는 파단이 일어날 수 있으므로 설계 단계에서 응력 집중 현상의 명확한 해석이 중요하다. 이 논문에서는 판재위에 리벳을 배치하는 간단한 최적화 방법이 제시되었다. 첫째로 응력 집중 현상 해석에서 FEM 구조 해석이 얼마나 정확한지 검증하였다. 평판 위에 존재하는 단일 구멍의 반경을 바꿔가며 응력 집중 계수의 변화를 분석하였다. 같은 방법으로 일렬로 존재하는 구멍들 사이에서의 응력 집중 계수를 수치 해석하였다. 각각의 응력 집중 계수를 이론값과 비교하여 정확도를 확인하였다. 마지막으로 두 응력 집중 현상을 독립적으로 적용하는 최적화 방법을 확인 및 검증하였다. 이 결과들은 이론적인 예측과 밀접한 경향성을 보여 앞으로의 리벳 배치 최적화에도 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

핵심용어 : 2차원 평판, 응력 집중 계수, 단일 구멍, 다중 구멍, 최적화, 구멍 배치