

유한요소해석을 이용한 M8 블라인드 리벳 너트 형상 최적 설계

구본준¹·최정묵²·홍석무^{3,#}

Design Optimization of M8 Blind Rivet Nut Geometry using Finite Element Analysis

B. Gu, J.M. Choi, S. Hong

(Received April 10, 2020 / Revised May 14, 2020 / Accepted May 15, 2020)

Abstract

Blind rivet nuts are increasingly used in automotive for the joining of sheets. Their application, however, requires appropriate design guides to prevent catastrophic events arising from the failure of joints. In this study, the shaft shape of a frequently used M8 blind rivet nut is optimized based on 3D numerical analysis of the blind rivet nut considering the characteristics of thread. The thread needs to be modeled to suitably consider the fastening of the M8 bolt after the crimping process. FE analysis showed that while the friction in the contact between crimp flange and plate has no significant effect on the crimp geometry, shaft thickness (t) and shaft height (h) are the most significant design variables. The parameter study including various combinations of t and h reveals that they affect the gap (the distance between the crimped flange and the plate that develops through riveting) and the load acting on the plate. The gap is an indicator of the tightening force. It is found that t is inversely proportional to the gap, and proportional to the load, whereas h is proportional to the gap and inversely proportional to the load. Based on our FE analysis results, we propose the range $0.062 < t/h < 0.1$ to ensure sufficient fastening (high clamping load, small gap) of the M8 blind rivet nut. The design guide for determining the t/h ratio proposed in this study can be used for general quantitative analysis of the size and the t/h ratio of blind rivet nuts.

Key Words : Blind Rivet Nut, Design Optimization, Fastener, Finite Element Analysis, Separation Distance

1. 서 론

최근 자동차 산업은 자율 주행, 전기자동차에 대한 연구와 함께 연비 향상, 안전성에 대한 연구가 활발히 진행된다. 특히 차량 경량화를 통한 연비 향상 관련 다양한 연구들이 진행되고 있다. 이에 따라 자동차 관련 부품 및 차체에 사용되는 재료가 기존의 철강재료에서 경량화 금속인 알루미늄, 마그네슘 합금 등으로 대체되고 있다.

그러나 경량화 금속과 철강재 간의 접합, 즉 이종 금속 접합은 기존의 용접 방법을 적용할 수 없어, 특수 접착제 개발이나 용접이 아닌 다른 체결방식이 요구되고 있다 [1].

그중 국내에서는 활성화가 되어 있지 않지만, 해외에서는 블라인드 리벳 너트 (blind rivet nut, BRN) 사용이 증가하고 있다 [2]. BRN은 자동차 부품 조립에 직접적인 영향을 미친다. BRN은 기계식 체결체 방법 (fastener)으로 Fig. 1은 자동차 산업에서 차체 결합에 BRN이 사용되는 예시를 보여준다. 블라인드 리벳과 유사하게 BRN은 구멍이 있는 판재에 삽입

1. 국립공주대학교 융합기계공학과 석사과정

2. (주)진합 이사

3. 국립공주대학교 기계자동차공학부 교수

Corresponding Author : Department of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University, E-mail: smhong@kongju.ac.kr
ORCID : https://orcid.org/0000-0001-5569-6285

되어 너트와 판재를 일체 시키며 이때 샤프트 (shaft)가 소성 변형된다.

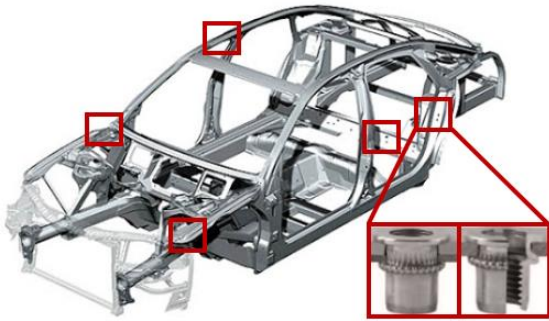


Fig. 1 Applications of blind rivet nuts for automotive assembly

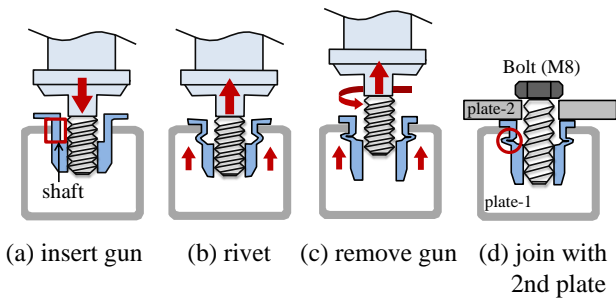


Fig. 2 Schematic of blind rivet nut fastening process

샤프트는 BRN에서 나사산이 없고 압착 플렌지를 성형하는 부분이다. Fig. 2는 M8 BRN을 사용한 체결 과정을 나타낸다. 먼저 plate-1에 클리어런스를 고려한 BRN 외경 크기의 홀을 가공해 BRN을 삽입한 후, 리벳건을 BRN과 체결한다 [Fig. 2(a)]. 체결된 리벳건을 강제로 상승시키면 BRN 샤프트가 변형되어 압착 플렌지를 형성한다 [Fig. 2(b)]. 이때 BRN 플렌지에 압축하중이 걸린다. 삽입된 리벳건을 제거하고 [Fig. 2(c)], 볼트를 BRN과 체결한다. 결국 Fig. 2(d)와 같이 이종 판재 (plate-1, 2)는 볼트 헤드, BRN 플렌지 및 압착 플렌지로 기계적 체결된다.

BRN을 사용하면 기존보다 체결에 걸리는 시간이 적고, 샤프트 높이 및 두께를 달리하여 다양한 체결 조건에서 사용되어진다.

특히 접합 재료에 대한 제약이 거의 없어 이종 재료간 체결을 손쉽게 해결할 수 있다.

또한 용접과는 다르게 유해한 증기나 가스가 발생하지 않고 화상 위험이 없어 안전하다.

쉽게 체결이 가능하다는 장점에도 불구하고, BRN을

사용할 때 볼트/너트의 강도, 피로수명 관련 문제뿐만 아니라 응력 집중이나 체결력 저하와 같은 단점이 발생할 수 있다 [3].

볼트 체결력 관련 연구에서 Kim 등 [4] 및 Kim 등 [5]은 볼트의 다양한 설계 변수들이 체결력에 미치는 영향에 대해 분석했다 [4, 5]. Lee 등 [6]은 유한요소해석을 통해 디스크 브레이크 허브 볼트의 나사산의 위치를 조정해 허브 밀면의 런아웃 변형량을 최소화했다. Hassanifard 등 [7]은 리벳 너트 조인트의 피로 수명에 대해 Smith-Waston-Topper 모델 기반 유한요소해석을 통해 예측했다. Van de Velde 등 [8]은 BRN의 적정 토크 값을 역해석을 통해 예측했다.

기존 연구들은 BRN 설계 가이드에 대해 충분한 연구가 진행되지 않아 본 연구에서는 BRN에 대한 형상 최적 설계에 대한 해석적 연구를 수행한다. BRN은 샤프트의 t/h 비에 따라 압착 플렌지의 형상에 큰 영향을 준다. 따라서, 높은 체결력을 고려하며 파라미터 해석을 통해 판재 하중 및 미접촉 거리의 경계조건을 설정하여 설계 가이드를 제시하고자 한다.

2. BRN 유한요소해석

2.1 유한요소해석 방법 및 모델링

Fig. 3(a)는 M8 BRN을 체결체에 삽입한 것으로 다양한 설계 변수들이 존재함을 보여준다. 여기서 B , D , E , h , t 는 각각 BRN 플렌지 직경, 너트 바디 직경, BRN 플렌지 높이, 샤프트 높이, 그리고 샤프트 두께를 나타낸다.

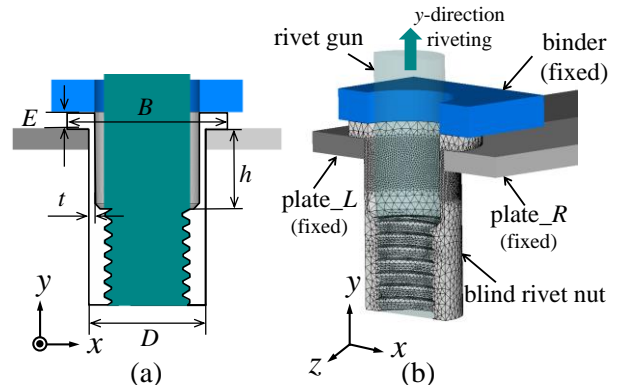


Fig. 3 (a) Design parameters and (b) FE model of blind rivet nut

$$\sigma_{eq} = K\epsilon_{eq}^n \quad (1)$$

Table 1 Material properties of Al6061-O

Parameter	Value
Young's modulus (GPa)	68.9
Ultimate Tensile Strength (MPa)	124
Yield stress (MPa)	101.6
Poisson's Ratio	0.33
K (MPa)	203.9
n	0.112

BRN 사용에 있어 실질적으로 판재를 체결하기 위해 접촉되는 부위는 Fig. 2(d)의 적색원 부분이다. 적색원 부는 샤프트가 리벳팅 공정으로 좌굴되어 성형된 압착 플렌지다. 샤프트의 설계 변수인 두께 t 와 높이 h 의 비에 따라 다양한 형상의 샤프트가 만들어지기 때문에 해석 시 압착 플렌지 성형에 있어 영향도가 떨어지는 변수를 제외하고 중요 설계 변수인 샤프트 두께 t 와 높이 h 만을 고려했다.

Fig. 3(b)는 BRN을 이용한 체결의 기초 단계를 전산 모사한 것으로 앞서 언급한 Fig. 3(a)의 유한요소 모델링이다. 리벳팅 공정 후 M8 볼트가 삽입됨으로 체결 적합성을 확인하기 위해 반드시 나사산이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 압착 플렌지 형상 최적 설계에 초점을 맞추고 있으므로 Fig. 2(b) 공정까지만 고려하기로 한다.

해석은 범용 해석 프로그램인 AFDEX를 사용했다 [9]. 해석에 소요되는 시간을 고려해 1/2만을 모델링했으며, 이때 사용된 요소수는 약 80,000개이다. BRN 체결 시 샤프트가 집중적인 변형을 받으므로, 샤프트에 요소를 집중적으로 배치했다. 마찰계수는 0.3으로 고정했으며, 마찰계수 영향도는 추후에 기술한다.

BRN 소재는 Al6061-O이며, 해석에 사용한 유동응력은 식(1)과 같이 Hollomon 관계식을 사용했다.

K 는 강도계수를 나타내고, n 은 가공경화지수를 나타낸다. 자세한 소재 물성은 Table 1에 기술했다.

리벳 너트를 제외한 모든 파트 (리벳건, 판재, 바인더)는 강체로 가정했고, 원활한 너트 삽입을 위해 리벳 너트와 판재 사이의 클리어런스는 0.05mm를 적용했다. 나사산을 고려하여 비대칭 형상인 BRN 때문에 좌우에 걸리는 하중을 각각 분석하기 위해 판재를 세로로 분할해 총 2분할된 판재를 사용했다.

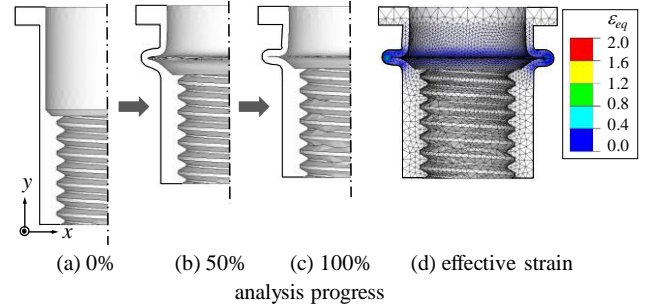


Fig. 4 Fastening simulation

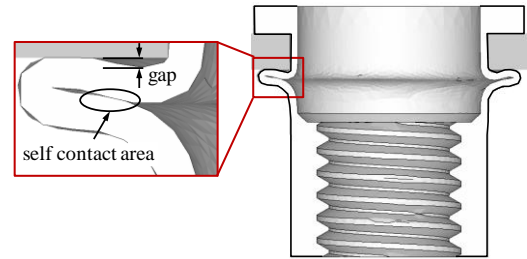


Fig. 5 Definition of fastening gap and self-contact area

Fig. 4는 BRN의 유한요소해석 진행도를 보여준다. 해석이 진행됨에 따라 리벳건에 의해 샤프트가 소성변형이 일어나 최종 BRN의 모양이 성형된다. Fig. 4(a)는 리벳 공정이 성형되기 전 모습이고, Fig. 4(b)에서 BRN를 판재에 고정하고, 리벳건이 너트 안에 접촉되어 있다고 가정한 뒤 리벳건을 y 방향으로 1mm/s 속도로 상승시켜 압착 플렌지를 성형한다. 이 과정에서 샤프트의 외벽은 인장력, 내벽은 압축력이 작용한다.

Fig. 4(c)에서는 샤프트의 소성변형이 극심해지며 좌굴 되어 압착 플렌지를 성형하고 성형된 압착 플렌지를 통해 판재에 체결력을 전달한다. 해석 종료 조건은 압착 플렌지를 성형하는 샤프트의 t 와 h 가 달라짐으로 미성형 및 과성형을 고려하여 동일한 리벳팅 거리 및 힘이 아닌 샤프트가 좌굴 되어 자가 접촉(self-contact)될 때를 해석 종료 조건으로 설정했다. Fig. 4(d)는 해석이 완료된 Fig. 4(c)는 요소 및 유효변형률을 표시한 그림이다.

체결력 확보를 위해 판재와 압착 플렌지 사이의 공간을 고려해야 한다. 이러한 공간은 BRN 체결력 지표인 판재하중과 밀접한 관련이 있다. 판재와 BRN 압착 플렌지의 미접촉 하는 거리는 t , h 에 따라 달라지며 이를 미접촉 거리 (gap)라고 정의했다 (Fig. 5). 본 연구에서는 미접촉 거리와 판재하중을 동시에 고려하여 보다 정밀한 t/h 의 비를 제시한다.

2.2 최적 설계 방법

전체적인 최적 설계 흐름도를 Fig. 6에 나타냈다. BRN의 FE 모델링을 한 후 유한요소해석을 통한 결과 분석 후 판재 하중과 미접촉 거리를 경계조건으로 설정했다. 설정되어진 경계조건을 만족하지 못하면 t 와 h 를 수정해 다시 해석을 진행하여 만족되어지는 최적 t/h 의 비를 결정했다.

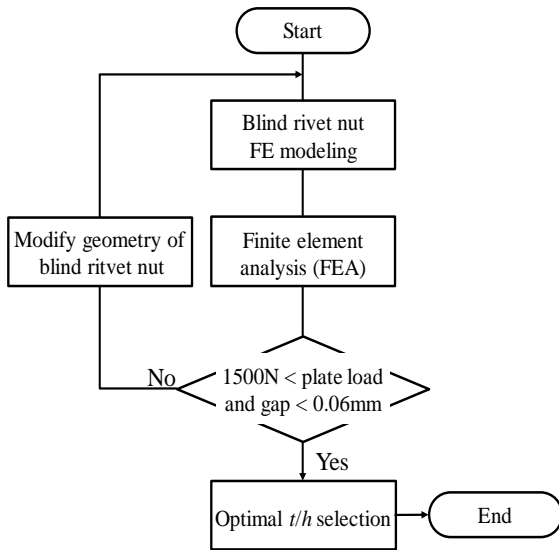


Fig. 6 Optimization flow chart in order to select optimal ration of t/h

3. 결과

3.1 마찰계수 영향도

해석 시 마찰계수에 따른 영향을 파악하고자 단일 case ($t=0.55\text{mm}, h=7.0\text{mm}$)에서 BRN에 대해 마찰계수를 0.1-0.5까지 달리했다.

Fig. 7(a)는 마찰계수에 따라 압착 플렌지에 걸리는 최대유효응력을 측정했다. 유효응력의 최댓값과 최솟값의 차이가 약 4%로 영향이 미비하다.

Fig. 7(b)는 마찰계수에 따라 좌우에 걸리는 판재 하중의 평균을 나타냈다.

하중의 최대 최소인 마찰계수 0.2과 0.3의 판재 하중 차이는 약 9%이지만, 실제 블라인드 너트 공정에서는 마찰계수가 0.3이하로 관리됨으로 본 연구에서는 마찰계수를 0.3으로 고정했다.

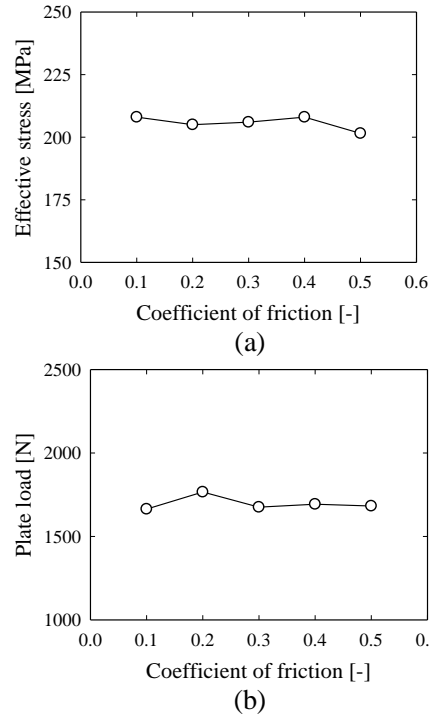


Fig. 7 (a) Effective stress and (b) load on plate for various friction coefficients

3.2 t/h 에 따른 판재 미접촉 거리

본 연구에서 고려한 변수들에 대해 얻어진 미접촉 거리를 Fig. 8에 나타냈다. Fig. 8(a)는 t 와 h 에 따른 미접촉 거리 차이를 나타냈으며, t 가 일정할 때 h 는 미접촉 거리에 정비례하고, h 가 일정할 때 t 는 미접촉 거리에 반비례한다. 본 연구에서는 현장에서 통상적으로 미접촉 거리가 0.06mm 보다 작게 고려되므로 0.06mm 이상일 때 체결 기능이 떨어진다고 가정했다. 이를 t 와 h 비율 (t/h)로 나타낸 것이 Fig. 8(b)이며, 미접촉 거리는 식 (2)와 같이 t/h 에 대한 이차식 형태의 회귀식으로 나타낼 수 있다. 회귀식에 따르면 t/h 가 커질수록 미접촉 거리가 작아진다. 그러나 t/h 가 과도하게 커질 경우, 너트와 볼트 사이에 이격거리 (separation distance)가 커져 후공정 볼트 체결력을 확보할 수 없기 때문에 $t/h < 0.1$ 을 만족해야 한다 (Fig. 9). BRN의 후공정은 본 연구에서 진행하는 해석 공정 후 다른 판재와의 고정을 위해 M8 볼트와 체결되는 공정이다 [Fig. 2(d)]. 본 연구에서 미접촉 거리는 후공정 볼트 체결 정밀도를 고려해 0.06mm 이하로 선정했다. 결국 미접촉 거리가 0.06mm 이상이 되는 t/h 를 제외하면 t/h 의 범위는 $0.062 < t/h < 0.1$ 이어야 한다.

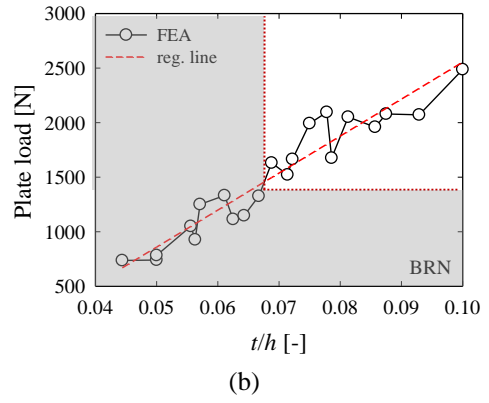
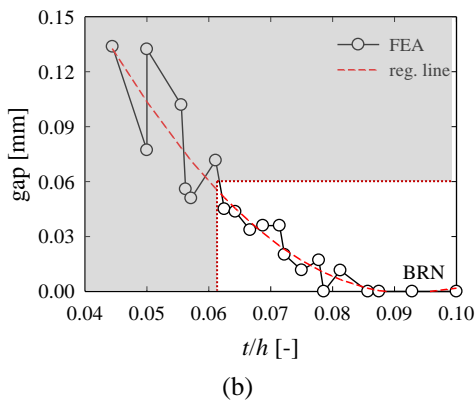
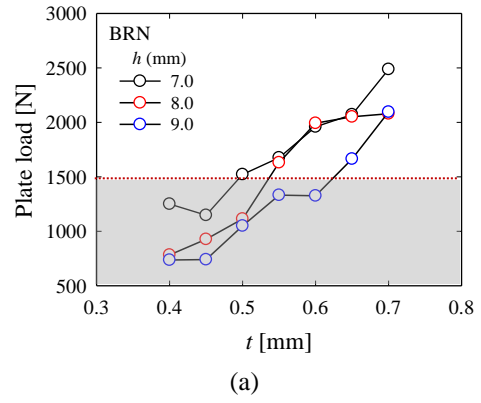
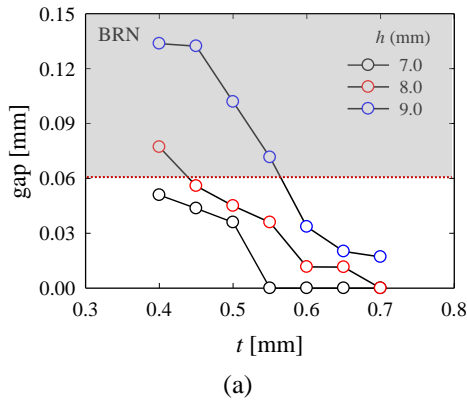


Fig. 8 Comparison of gap according to various t/h

Fig. 10 Load for various combinations of t/h

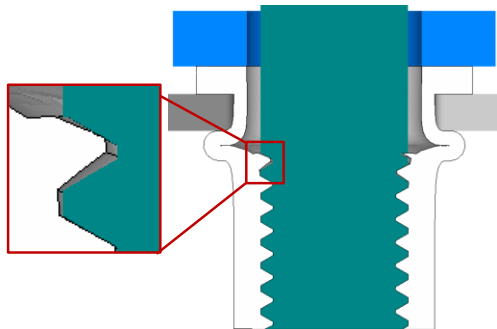


Fig. 9 For high t/h (here, 0.1), BRN and M8 bolt start to separate at the upper thread

$$Gap = 57.3 \times (t/h)^2 - 106 \times (t/h) + 0.492 \quad (2)$$

3.3 t/h 에 따른 판재 하중

BRN의 체결력 확보를 위해서는 직접적으로 하중이 전달되는 판재 하중을 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 체결력을 고려해 하중을 1500N으로 채택했다. Fig. 10은 고려한 변수들인 샤프트 t , h 에 따른 판재 하중을 나타냈다. Fig. 10(a)는 동일 t 에서

$$Plate Load = 3.39 \times 10^4 \times (t/h) + 8.37 \times 10^2 \quad (3)$$

h 가 커짐에 따라 하중이 작아지며, $h=7.0\text{mm}$ 와 9.0mm 의 판재 하중 차이 평균은 약 500N이다. 동일 h 에서 t 가 커질수록 두꺼운 압착 플렌지가 형성됨으로 판재에 가해지는 하중은 증가한다. 이를 t/h 로 나타내면 판재하중과의 관계를 Fig. 10(b)로 나타낼 수 있다. t/h 와 판재 하중의 정비례 관계를 식 (3)과 같이 t/h 에 대한 일차식 형태의 회귀식으로 나타낼 수 있다. 앞서 판재 미접촉 거리에 대한 t/h 범위는 $0.06 < t/h < 0.1$ 이지만 판재에 걸리는 하중이 1500N 이상임을 고려하면 M8 BRN 샤프트 t/h 의 범위는 $0.068 < t/h < 0.1$ 이어야 한다. 현장에서 체결력을 위해 요구되는 판재 하중을 적용하면 쉽게 BRN 샤프트의 t/h 의 최적 범위를 설정할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 나사산을 고려한 BRN의 다양한 형상변수 중 샤프트 t , h 의 파라미터 해석을 통해 최적 설계를 수행했으며 다음과 같은 결론에 도달했다.

(1) BRN 해석 시 마찰계수는 압착 플렌지의 최대유효응력과 판재 하중에는 영향이 없으며 이에 0.3으로 고정했다.

(2) BRN의 기능을 위해 판재 미접촉 거리를 고려한 해석을 진행했으며, 해석상 미접촉 거리는 0.06mm 보다 작아야 한다.

(3) 후공정 볼트 체결 시 너트와 볼트사이의 이격 거리를 고려하여 t/h 의 범위를 $0.062 < t/h < 0.1$ 로 결정했다.

(4) 본 연구에서는 BRN의 체결력을 고려한 요구 판재 하중을 1500N으로 설정했으며, 이를 고려한 t/h 범위는 $0.068 < t/h < 0.1$ 로 결정했다.

(5) BRN 설계에 있어 현장에서 요구되는 미접촉 거리와 판재 하중을 적용하면 쉽게 t/h 의 범위를 결정할 수 있다.

(6) 본 연구에서 t/h 비에 대한 설계가이드를 제시했으며, 제안한 방법을 확장하면 BRN 크기와 정량적 분석이 가능할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] D. Jung, J. Jung, 2018, Aluminum alloys and their joining methods, Journal of the Microelectronics and Packaging Society, Vol. 25, No. 2, pp. 9~17.
- [2] L. Han, M. Thornton, M. Shergold, 2010, A comparison of the mechanical behaviour of self-piercing riveted and resistance spot welded aluminum sheets for the automotive industry, Materials and Design, Vol. 31, No. 3, pp. 1457~1467.
- [3] A. Manes, M. Giglio, F. Viganò, 2011, Effect of riveting process parameters on the local stress field of a T-joint, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 53, No. 12, pp. 1039~1049.
- [4] S. S. Kim, S. Y. Kim, K. S. Kim, 2000, Evaluation of clamping forces according to length-to-diameter ratios and preserved thread lengths of high strength bolts, Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 12, No. 3, pp. 259~268.
- [5] Y. H. Kim, K. S. Kim, 1999, Evaluation of tightening forces according to length-diameter ratios for high strength bolts, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 15, No. 1, pp. 37~44.
- [6] J. S. Lee, S. Y. Kwak, S. Kang, 2011, An analysis of plastic deformation developed during interference fitting of disk brake hub bolt, The Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 17, No. 6, pp. 407~411.
- [7] S. Hassanifard, M.R. Adibeig, M. Mohammadpour, A. Varvani-Farahani, 2019, Fatigue life of axially loaded clamped rivet-nut joints: Experiments and analyses, International Journal of Fatigue, Vol. 129, No. 105254.
- [8] A. Van de Velde, S. Coppieters, J. Maeyens, M. Wevers, D. Debruyne, 2019, On the numerical prediction of the torque-to-turn-value of a blind rivet nut, International Journal of Material Forming, Vol. 13, pp. 127~141.
- [9] AFDEX, <https://www.afdex.com>