

1,300 MPa급 고장력볼트의 나사형상 개선 및 성능평가

Evaluation of Structural Performance and Improvement of Screw Thread Shape on 1,300 MPa High Strength Bolts

한종욱* · 김진호** · 박영석***

Han, Jong Wook · Kim, Jin Ho · Park, Young Suk

Abstract

Although high strength bolts with tensile strength of 1,000 MPa are mainly used in steel structure construction sites throughout the world, new high strength bolts are required owing to the installation of continuous long-span bridges resulting from the development and distribution of high strength steel and ultra-thick steel plates. Currently, high strength bolts with tensile strength of 1,300 MPa are being used. However, as they tend to place a large load on a small section of space, a high strength bolt of high structural performance and screw thread shape with less stress concentration is thought to be more effective. This study conducted analyses in order to develop an improved screw thread shape relative to the KS screw thread shape. A new screw thread shape with less stress concentration and effective load distribution at the time of fastening bolts and nuts was provided upon analysis of the characteristics of screw thread shape. Additionally, in an experimental study, the structural performance of high strength bolts with tensile strength of 1,300 MPa was investigated. The results revealed that the new screw thread shape was more effective than the existing screw thread shape in terms of structural performance and mitigating the stress concentration.

Keywords : *high strength bolts, screw thread shape, tensile strength, stress concentration*

요 지

각국 강구조물 시공현장에서 사용되고 있는 고장력볼트의 인장강도는 1,000 MPa급이 주종을 이루고 있으나, 고강도강과 극후판의 개발과 강교량 건설기술의 발전에 따른 교량 지간의 장대화로 인하여 강도가 큰 새로운 볼트 개발이 요구되고 있다. 현재, 인장강도 1,300 MPa급의 고장력볼트가 개발되어 사용중에 있다. 그러나 고장력볼트는 작은 단면에 큰 하중이 작용하기 때문에 고강도볼트에서는 응력집중이 완화된 나사형상과 구조성능이 우수한 고장력볼트가 보다 효과적이다. 본 연구에서는 KS에서 규정된 나사형상보다도 우수한 나사형상을 개발하기 위하여 해석적 연구를 수행하였다. 나사형상에 대한 특성을 분석하여 볼트와 너트 체결시에도 하중분배가 효과적이고 응력집중이 완화된 신나사형상을 제안하였다. 또한, 실험적 연구에서는 인장강도 1,300 MPa급의 고장력볼트를 대상으로 구조성능에 대해서 실험연구를 수행하였다. 연구결과 신나사형상이 기존의 나사형상보다도 응력집중 완화효과와 구조성능효과가 있음이 검증되었다.

핵심용어 : 고장력볼트, 나사형상, 인장강도, 응력집중

1. 서 론

세계 각국에서 생산되고 있는 고장력볼트의 인장강도는 800~1,100 MPa(F8T~F11T)급이며, 나사부형상은 1982년부터 ISO(International Organization for Standardization)가 규정한 통일된 규격을 사용하고 있다. 일반적으로 강구조물 시공현장에서 사용되고 있는 고장력볼트의 인장강도는 1,000 MPa(F10T)급이 주종을 이루고 있다. 그러나, 고강도강과 극후판의 개발 및 보급, 강교량 건설기술의 발전에 따른 교량 지간의 장대화로 인하여 강도가 큰 새로운 볼트 개발이 요구되어 현재는 1,300 MPa(F13T)급 고장력볼트가 개발되어

사용 중에 있다(포항산업과학연구원, 2002, 2005; 이덕락 등, 2004; 김진호 등, 2005). 고강도의 고장력볼트를 개발함으로써 얻어지는 설계와 시공상의 장점은 상당히 크다고 볼 수 있다. 강도가 증가된 만큼 볼트체결력을 증가시킬 수 있어 강성이 높은 접합부의 설계 및 시공이 가능하다. 또한, 강도가 상승된 만큼 볼트 직경을 감소시킬 수 있어 체결볼트의 수량과 볼트직경이 감소하기 때문에 접합부의 크기가 작아지고 구조물의 경량화가 가능하다.

그러나, 인장강도 1,300 MPa(F13T)급 고장력볼트에서는 기존의 1,000 MPa(F10T)급 고장력볼트 보다도 수소에 의한 지연파괴와 반복하중에 의한 피로파괴 문제가 중요한 요소

*정회원 · 교신저자 · 명지대학교 토목환경공학과 연구교수 · 공학박사 (E-mail : jwhan@mju.ac.kr)

**강구조연구소 건축해양연구본부 본부장 · 공학박사 (E-mail : jinho@rist.re.kr)

***정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : pys@mju.ac.kr)

이다. 고장력볼트의 지연파괴 및 피로파괴는 주로 작은 단면에 큰 하중이 작용하는 나사부에 응력이 집중하여 발생한다. 따라서 고강도의 볼트를 개발하고 실용화하기 위해서는 응력집중이 완화된 나사형상을 개발하여 지연파괴 및 피로파괴에 관한 문제를 우선적으로 해결되어야 한다.

본 연구에서는 인장강도 1,300 MPa급의 고장력볼트를 개발하기 위하여 한국산업규격으로 규정된 나사형상 보다 응력집중이 완화되고 응력이 균일하게 분포하여 볼트의 인장강도 및 피로강도가 향상된 신나사형상을 해석적 제안 및 실험적인 검증을 수행하였다. 해석적연구에서는 기존 나사형상에 대한 특성을 분석하여 나사형상을 개선한 신나사형을 제안하였다. 신나사형상에 대한 구조해석은 나사의 곡률반경, 나사골의 체결깊이 및 볼트와 너트 체결시의 거동에 대해서 해석하였다. 최종적으로는 볼트와 너트 체결시에 응력집중계수 완화효과와 이격거리에 대해서 상호비교 분석하였다. 또한, 실험적연구에서는 기존 나사형상(F13T)과 신나사형상(F13T-N)을 적용한 볼트를 제작하고 인장실험을 수행하여 인장강도 및 변형량 등에 대해 평가 및 분석하였다.

2. 기존 나사형상에 대한 구조해석

2.1 개요

고장력볼트에 대한 나사형상에 대한 기존 규정은 그림 1(a)의 윌트워스나사(whitworth screw thread)와 그림 1(b)의

매트릭나사(metric screw thread)형상을 사용하였다. 윌트워스나사는 영국에서 제안된 세계 최초의 국제적으로 규격화한 나사이고, 매트릭나사는 프랑스에서 제조되어 ISA(International Federation of the National Standardizing Associations) 미터나사로 공인되었다.

각각의 나사형상에 대한 특징을 살펴보면 윌트워스나사(그림 1(a))의 경우 나사산 피치(P)가 2.822 mm, 나사산 기준높이(H)가 2.711 mm, 나사산 각도가 55°, 나사골의 곡률반경(r)이 H/7의 원호로 규정되어 있으며, 매트릭나사(그림 1(b))의 경우 나사산 피치(P)가 2.500 mm, 나사산 기준높이(H)가 2.165 mm, 나사산 각도가 60°, 나사골의 곡률반경(r)이 H/8의 원호로 규정되어 있다. 매트릭나사(그림 1(c))는 ISO규격으로 통일되었고, 현재 우리나라 KS규격 나사형상으로 사용하고 있다. 현재의 나사형상은 나사산의 곡률반경이 H/6의 원호로 규정되어 과거의 나사형상에 비해 곡률반경이 커졌다는 특징이 있다.

2.2 구조해석 모델 및 조건

구조해석에 사용된 재원은 표 1과 같이 나사형상별 특성을 고려하여 모델링 및 해석을 수행하였다. 구조해석시 나사선 국부에 집중되는 응력의 크기를 정확하게 산출하기 위하여 그림 2와 같이 요소 한변의 길이를 나사선 곡률반경의 1/10 정도로 정교하게 분할하였다. 구조해석모델은 나사선을 1/2 축대칭 QAX8(axisymmetric solid)요소의 절점 4변형 요소를 사용하여 모델링하였다. 하중은 볼트상부에 면하중으

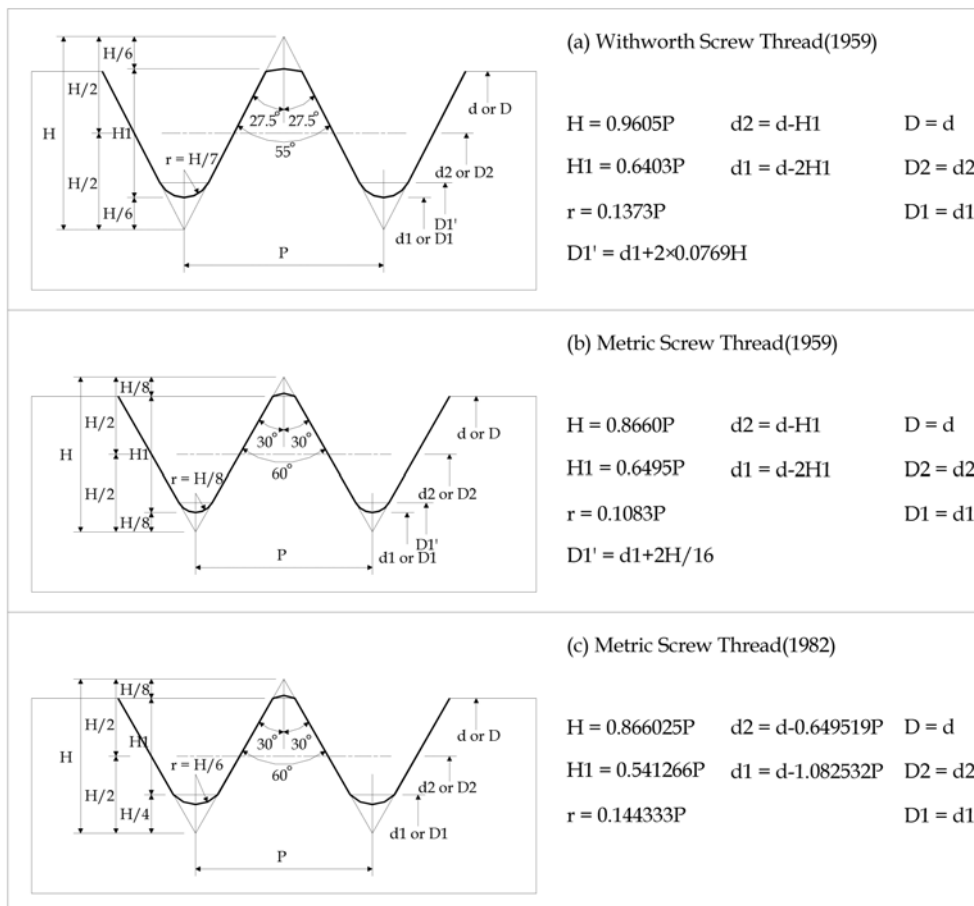
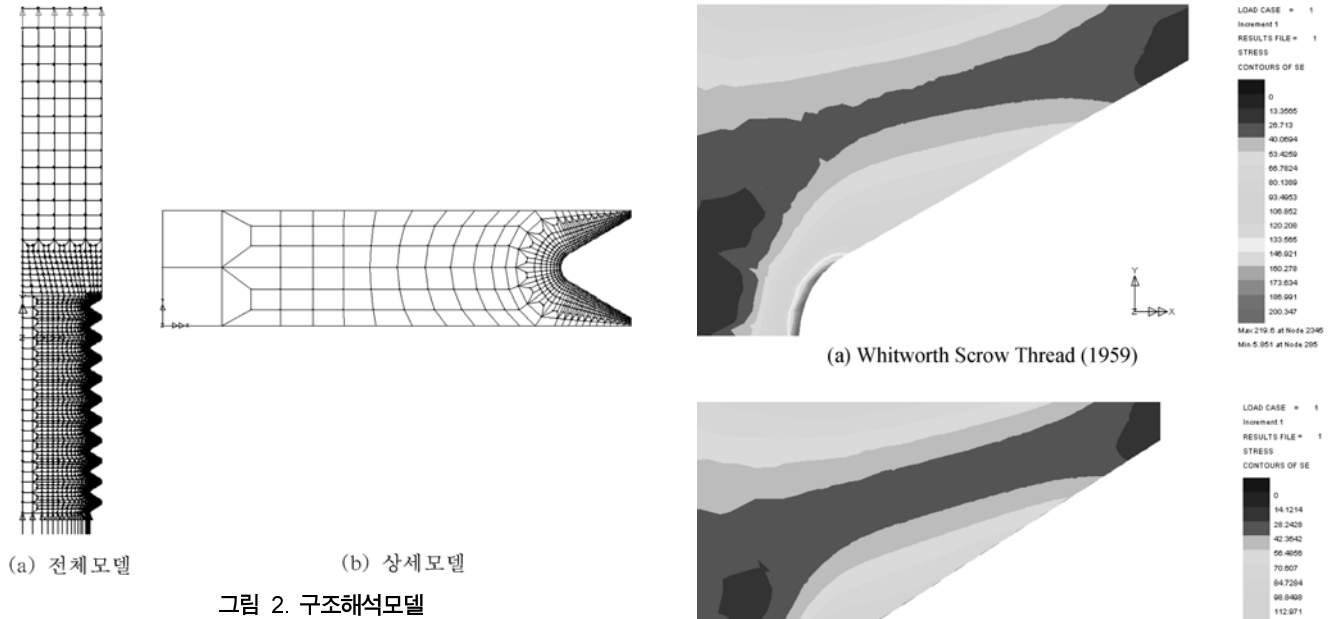


그림 1. 기존 고장력볼트 나사형상 및 규격

표 1. 나사형상별 제원

나사형상	피치 (P)	나사산 기준높이 (H)	외경 (d)	유효경 (d ₂)	골경 (d ₁)	유효 단면적 (mm ²)
Whitworth Screw Thread(1959)	2.822	2.711	22.225	20.418	18.611	299.1
Metric Screw Thread(1959)	2.500	2.165	22.000	20.376	18.752	300.0
Metric Screw Thread(1982)	2.500	2.165	22.000	20.378	18.932	303.4



(a) 전체모델 (b) 상세모델
그림 2. 구조해석모델

로 재하하였고, 경계조건은 볼트하단부를 하중재하방향에 대해서 구속하였다(LUSAS, 2005).

2.3 해석결과

나사형상에 따른 유효응력분포는 그림 3과 같이 나사형상 모두 최대인장응력은 나사선 골의 중앙부에서 발생하였고, 나사선 심부에서 나사선 기울기 상부쪽으로 가면서 응력이 곡률반경을 따라서 일정하게 감소하였다.

각 나사형상에 대한 해석결과를 응력집중계수(stress concentration factor)로 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, 응력집중계수는 최대응력을 공칭응력으로 나눈 값이고, 공칭응력은 볼트 축방향력을 볼트의 유효단면적으로 나눈 값이다. 해석결과 각 나사부에서의 응력집중은 나사골 중심부에서 가장 높고 나사산 사면에 근접함에 따라 조금씩 감소하였다.

응력집중은 그림 4와 같이 나사골 중심부에서 약 0.2~0.3 mm내에서 크게 작용하고, 약 0.5 mm 이후부터는 나사형상에 상관없이 일정하게 감소하였다. 각 나사형상에 따른 최대응력집중계수는 Metric Screw Thread (1982)가 응력집중이 가장 작게 발생하였다. 이는 Metric Screw Tread(1959)에 비해 나사골 곡률반경이 1.33배 정도 크게 규정되어 있고, Whitworth Screw Thread(1959)에 비해서는 곡률반경이 1.16배, 나사선 기울기도 27.5°에서 30°로 각을 크게 규정되어 있기 때문이다. 결과적으로 고장력볼트 나사부에서는 응력집중이 상당히 크게 발생하였고, 나사골 심부에서 최대응력집중이 발생하였다. 나사골에서 곡률반경과 응력집중계수사이의 관계를 고려하면 곡

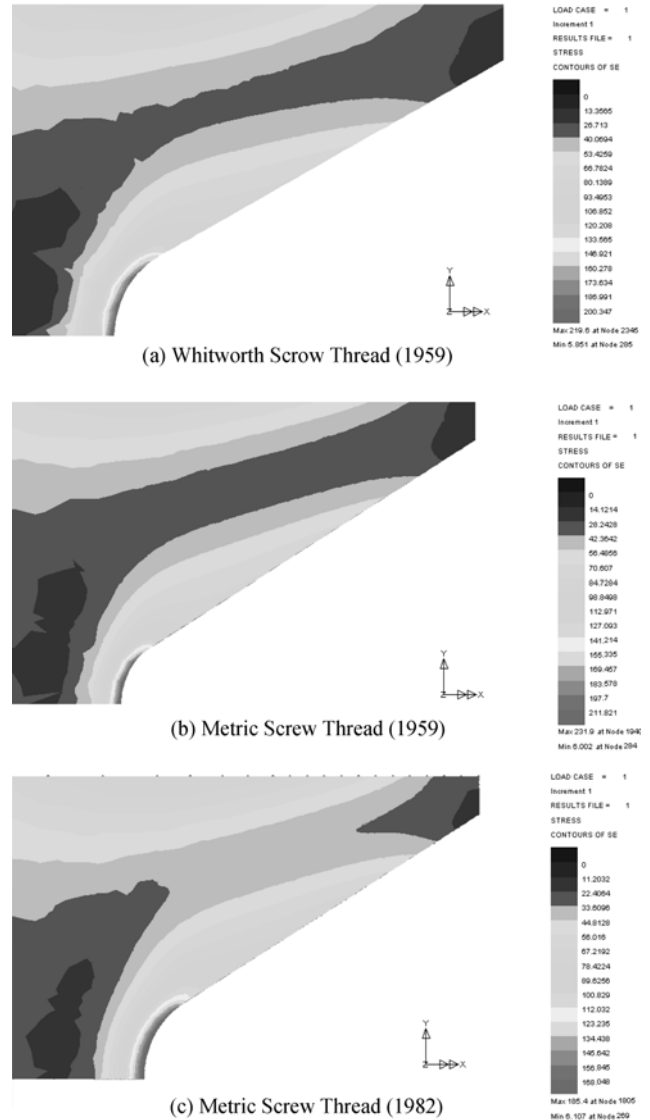


그림 3. 나사형상에 따른 응력분포

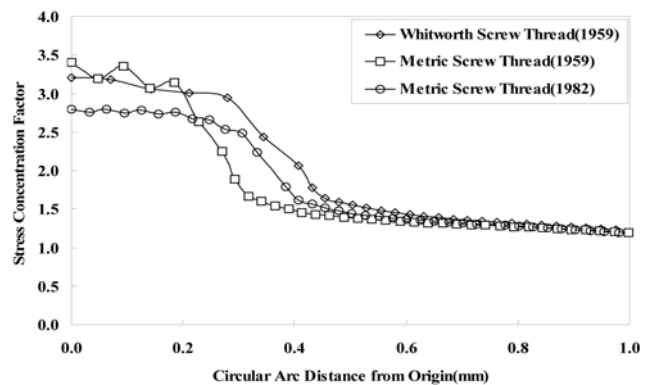


그림 4. 나사형상에 따른 응력집중계수분포

률반경의 크기가 커짐에 따라 응력집중현상이 완화된다는 것을 알 수 있다.

3. 신나사형상에 대한 구조해석

3.1 나사 곡률반경의 영향

신나사형상은 응력집중을 완화시키고 응력을 균일하게 분포시키기 위하여, 현재 KS규격 형상을 기본으로 하여 나사 곡률을 완화한 형상을 고려하였다. KS규격 나사형상에 대한 특성은 그림 5와 같이 나사선 기울기는 30°, 나사 길이는 $H=2.165$, 프랭크(frank)와 곡률반경의 시작점은 나사 길이의 $H/2$, 프랭크 길이(H_1)는 $3H/8$ 로 이루어 졌다.

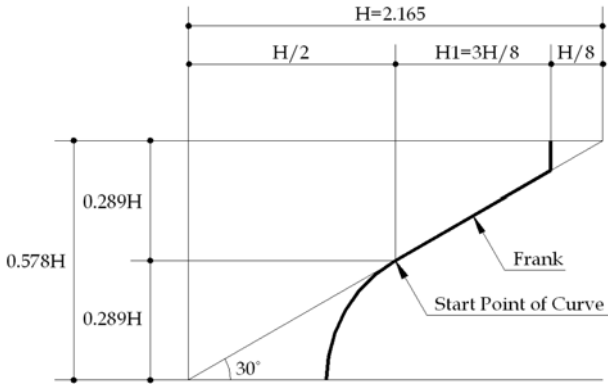


그림 5. KS규격 나사형상의 특성

신나사형상은 그림 5에서 곡률반경을 변화 시키면서 그림 6과 같이 3가지 형상을 제안하였다. 나사형상의 기울기, 피치(pitch), 기준산 높이 및 외직경은 동일하다. 해석모델 그림 6(a)는 현재 KS규격 형상으로 곡률반경이 $H/6$ 이고, 그림 6(b)는 곡률반경이 $H/3$ 으로써 KS규격보다 곡률반경을 2배로 하였다.

기존 나사형상의 해석결과를 반영하여 프랭크 부근에서는 곡률반경을 작게 하고 나사골 부근에서는 곡률반경을 크게 하였다. 기존 나사형상과는 다르게 그림 6(c), (d)와 같이 곡률반경을 2개를 제안 하였다. N2형상은 곡률반경 시작점 부근에서는 현재 KS규격의 곡률반경인 $H/6$ 로 하고, 골 부근에서는 곡률반경을 $2H/3$ 으로 크게 하였다. N3형상은 곡률반경 시작점 부근에서는 $H/6$, 골 부근에서는 $H/2$ 의 곡률반경과 골 중심부에서는 0.1 mm 직선을 두었다.

나사형상에 따른 응력분포는 그림 7과 같이 KS 및 N1형상은 나사골에서 최대인장응력이 발생하였고, 나사골에서 프랭크쪽으로 갈수록 인장응력이 일정하게 감소하였다. N1형상은 KS형상보다 곡률반경이 2배 크게 제안되어 있어 응력 집중이 완화 및 응력분포가 넓게 분포하였다. N2와 N3형상은 곡률반경 $H/6$ 와 큰 곡률반경($2H/3$, $H/2$)이 접하는 경계 부근에서 최대인장응력이 발생하였고, 나사골과 프랭크부근

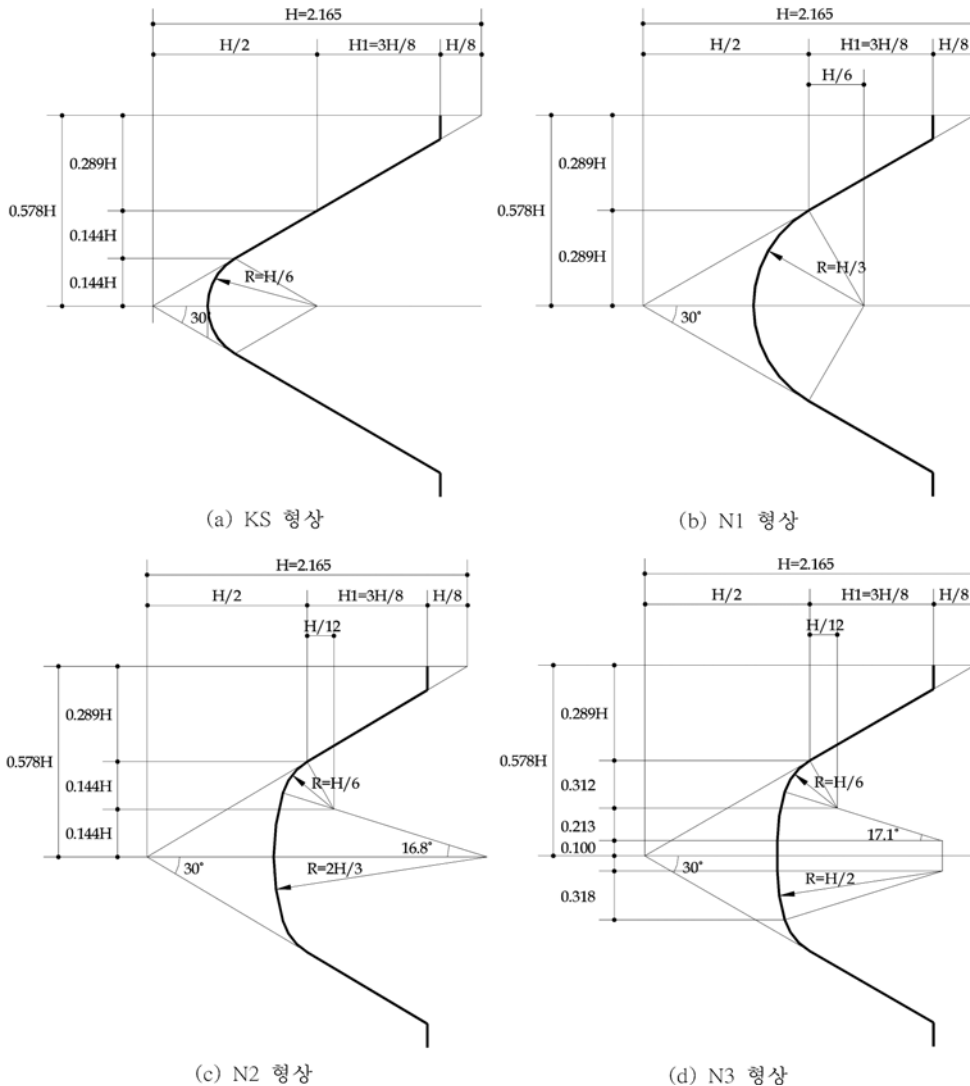


그림 6. KS형상 및 나사형상 개선 모델

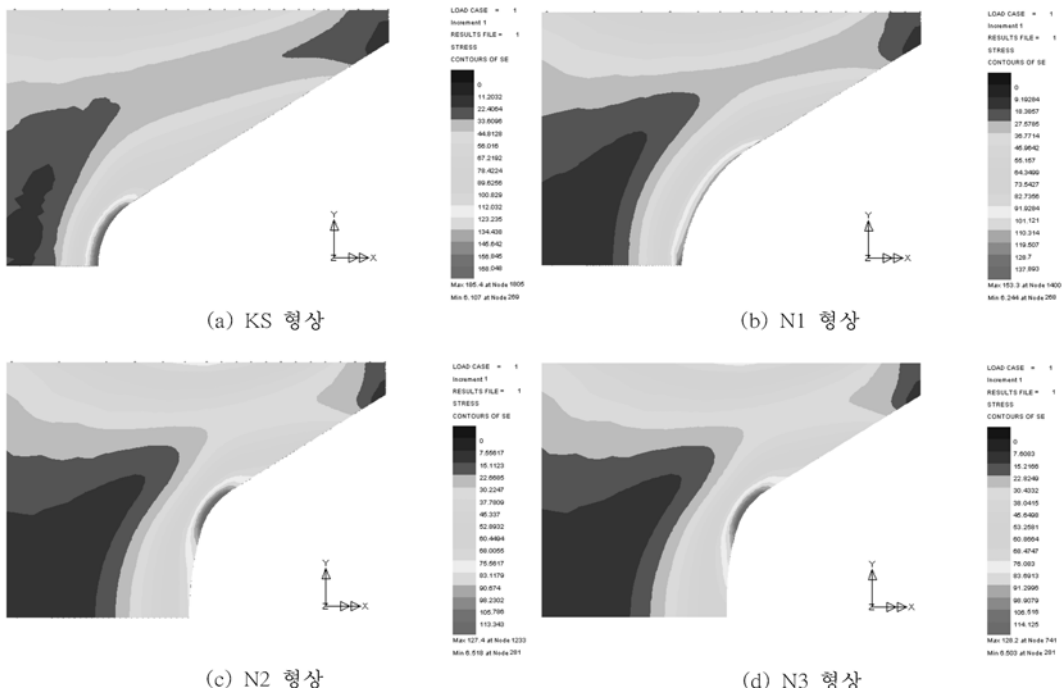


그림 7. 나사형상에 따른 응력분포

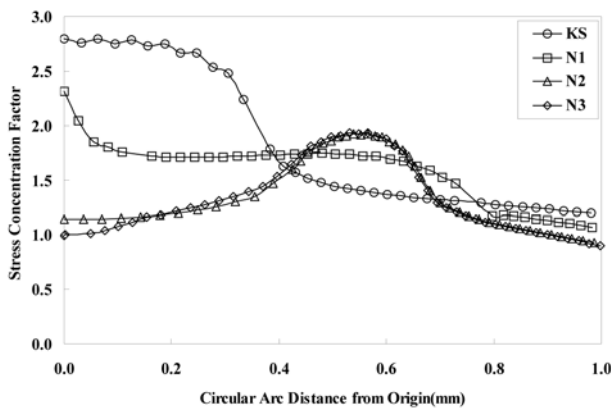


그림 8. 나사형상에 따른 응력집중계수분포

으로 갈수록 일정하게 응력이 감소하였다. 또한, 한 개의 곡률반경으로 제안되어 있는 N1형상보다 N2 및 N3형상이 응력집중 감소와 응력분포를 균일하게 분포하였다.

응력집중계수는 그림 8과 같이 KS 및 N1형상의 응력집중은 나사골 중심부에서 가장 높고, 프랭크에 근접할 수록 감소하였다. N2 및 N3형상은 두 개의 곡률반경부근인 나사골 중심부에서 나사선 곡률반경을 따라 약 0.6 mm 부근에서 최대인장응력이 발생하였다. 한 개의 곡률반경보다 두 개의 곡률반경으로 구성되어 있는 N2 및 N3형상의 최대응력집중계수는 현재의 KS형상보다도 31.4% 및 31.1% 감소하였다. N2와 N3형상의 응력집중계수 및 응력분포는 거의 비슷한 경향을 보이고 있으나, 본 연구에서는 가장 최대응력집중계수가 작고, 볼트 제작시에 가공 용이성을 고려하여 N2형상을 새로운 나사형상으로 결정하였다.

3.2 나사 체결깊이의 영향

N2형상은 현재 KS형상보다도 너트와의 체결깊이(H1)가 작기 때문에 새로운 고장력볼트를 개발했을 때 볼트와 너트의

체결시 높은 장력에 의한 풀림, 휨에 의한 너트의 벗겨짐 및 너트 산이 전단파괴가 발생하는 위험성이 있다. 그래서 너트 체결깊이(H1)를 변수로 나사형상을 개선 하여 구조해석을 수행하였다.

N2형상을 기준으로 하여 너트 체결깊이(H1)를 변화시키면서 그림 9와 같이 나사형상을 만들었다. 각 모델의 형상과 사이즈는 나사선 기울기와 나사 곡률반경에 따른 상호관계를 계산하여 각각의 형상을 결정하였다. 너트 체결깊이(H1)가 증가하면서 곡률반경 H/6의 높이는 0.144H로 일정하지만, 곡률반경이 시작하는 위치는 나사골로 이동하면서 곡률반경 2H/3의 각(θ)의 값은 작아지고 높이도 0.130H에서 0.091H로 감소하였다. 즉, 나사형상을 규정하고 있는 곡률반경 H/6의 비율은 증가하지만 2H/3의 비율 및 z' 값이 작아지게 되어 나사부 끝에서 곡률반경이 작아지게 된다.

너트 체결깊이(H1) 영향에 의한 나사형상에 대한 해석결과는 그림 10과 같이 최대응력집중이 발생하는 위치는 곡률반경 H/6에서 2H/3으로 변하는 변곡점 부근에서 발생하였다. 나사 체결깊이(H1)가 증가할 수록 최대응력집중은 증가하지만 KS형상의 최대응력집중보다는 감소하였다. 너트 체결깊이(H1)가 증가하면서 곡률반경이 시작하는 위치가 나사골 중심부로 이동함에 따라, 나사골의 곡률반경 2H/3 효과는 감소하기 때문에 최대응력집중은 증가하였다. 최대응력집중계수는 1.92에서 2.21로 증가하고, 최대응력집중계수가 발생하는 위치도 나사골 중심으로부터 약 0.6 mm에서 약 0.4 mm에 발생하였다(그림 11).

N2형상이 최대응력집중계수는 가장 우수하지만 신나사형상으로써 사용되기 위해서는 볼트와 너트가 결합하여 장시간 동안 장력이 유지되어야 한다. 동일한 형상이라도 나사 체결깊이가 증가할 수록 볼트와 너트가 체결시에 보다 안전성을 확보할 수 있다. 따라서 N2형상은 체결깊이가 0.3750H이고 최대응력집중계수가 가장 작지만, 가장 얇은 체결깊이와 나

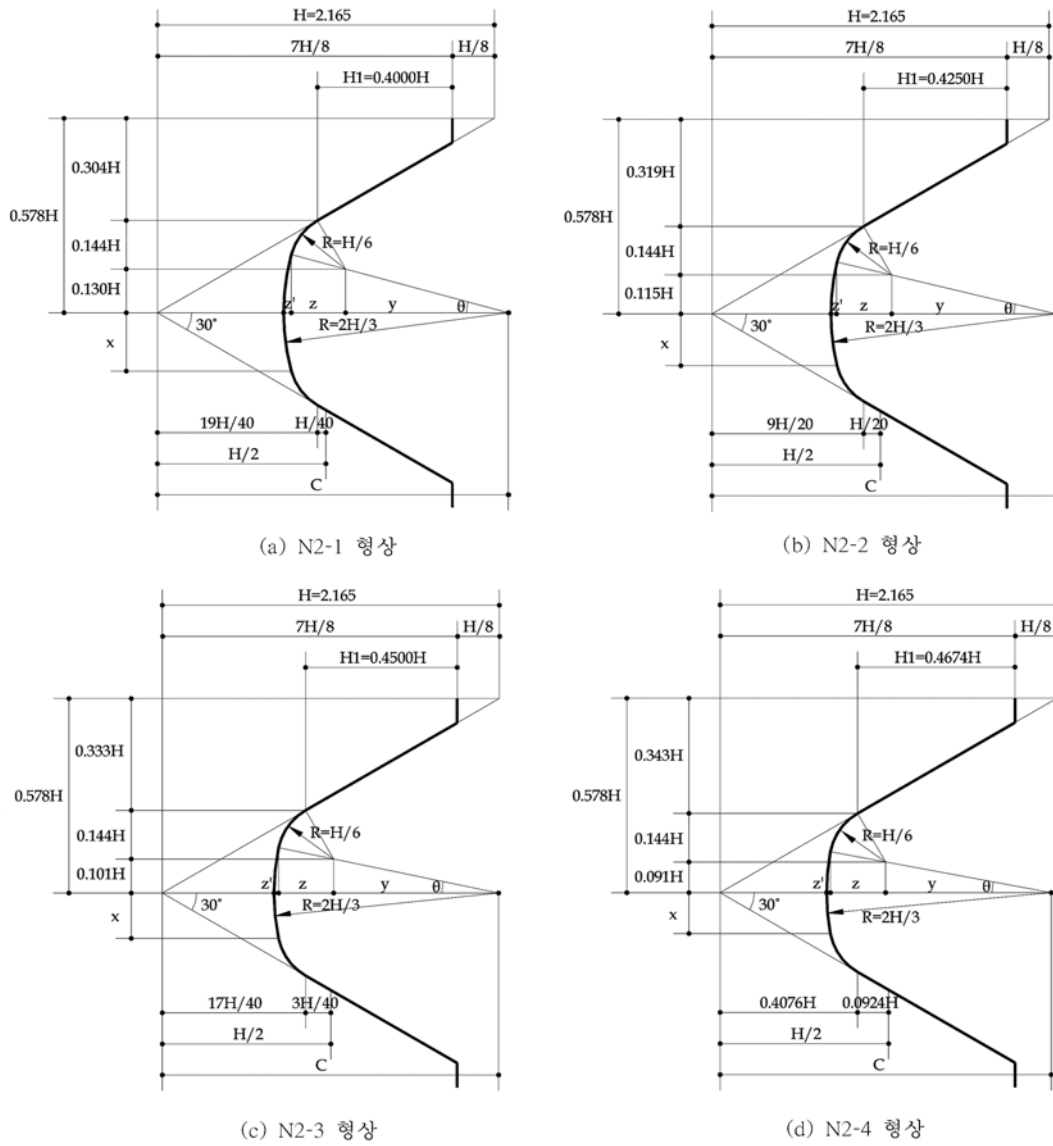


그림 9. 나사 체결깊이(H1)에 따른 형상

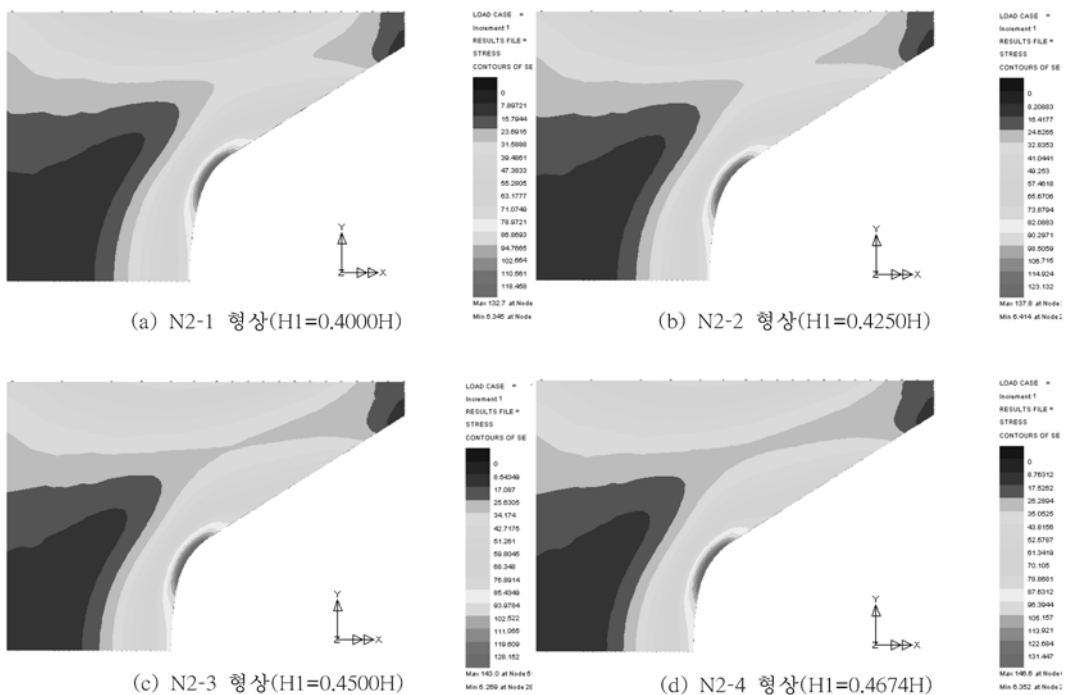


그림 10. 나사 체결깊이(H1) 변화에 따른 응력분포

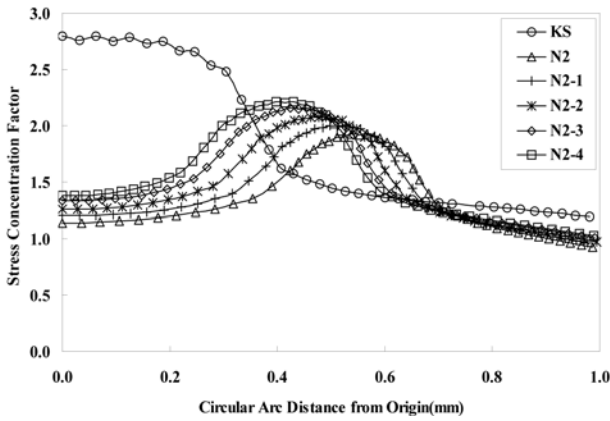


그림 11. 나사 체결깊이(H1)에 따른 응력집중계수분포

사산의 전단높이를 확보하고 있어 가장 불안한 형상이라고 할 수 있다. 그러나 N2-4형상은 체결깊이가 0.4674H로써 응력집중은 다소 증가 되었지만 가장 깊은 체결깊이와 전단 높이를 확보하고 있어 가장 안전한 형상이라고 할 수 있다. N2-4형상은 N2형상에 비해 체결깊이는 24.6%, 전단높이 18.7%가 증가되어 고장력볼트의 기계적 성능이 우수하다고 판단되어 N2-4형상을 신나사형상으로 제안하고자 한다.

N2-4형상과 KS형상에 대해서 상호 비교 검토하면 N2-4형상의 체결깊이는 25.2% 감소되었지만, 나사부의 유효단면적 증가로 인장강도는 5.1%가 증가되고, 최대응력집중계수는 26.7% 감소로 피로강도가 증가되기 때문에 볼트의 안전성에 가장 효율적인 형상이라고 판단된다.

3.3 볼트와 너트 체결시의 영향

KS형상과 제안된 N2-4형상이 볼트와 너트가 체결시의 거동에 대해서 FEM해석을 통해서 비교 검토하였다. 볼트와 너트 체결시 최대응력집중계수와 체결부 나사골에서 각각의 응력집중계수 분포와 장력도입으로 인한 볼트와 너트간의 이격거리의 변화에 대해서 검토하였다. 해석방법은 볼트와 너트사이에 경계조건은 슬라이드라인(slideline)을 사용하였고, 슬라이드라인에서 볼트의 나사선을 주(master)로, 너트의 나사선을 종(slave)으로 규정하였다(LUSAS, 2005).

볼트와 너트 체결시에 발생하는 마찰계수는 한국산업규격(2004)에 규정된 B인 0.150~0.190의 값을 사용하였고, 해석시 마다 마찰계수를 0.01씩 증가 시켰다. 해석결과는 각각의 피치에서 발생하는 최대값을 사용하였다. 피치번호는 그림 12(a)와 같이 볼트와 너트가 결합된 부위에서 상부에서부터 번호를 1~8까지 부여하였고, KS형상 및 N2-4형상은 그림 12(b), (c)와 같이 나사형상을 상세모델링 하였다.

볼트와 너트 체결시에 마찰계수의 영향을 고려한 해석결과에 의하면 마찰계수가 증가하면 응력집중계수도 증가 하였다. 각각의 마찰계수에 따른 최대응력집중은 그림 13과 같다. KS형상과 N2-4형상에서 최대응력집중계수는 볼트와 너트 체결부에서 하중작용방향의 1번째 피치에서 발생하였다. 2번째 피치에서는 1번째 피치에서 발생한 응력집중계수의 약 50%로 감소하며 3~8번째 피치에서는 응력집중이 완만하게 감소하였고, 전체응력의 50%가 1~2번째 피치에서 분담하였다. N2-4형상이 KS형상에 비해 응력집중계수가 작게 발생하였다.

볼트에 너트를 체결하기 전과 후의 최대응력집중계수를 비

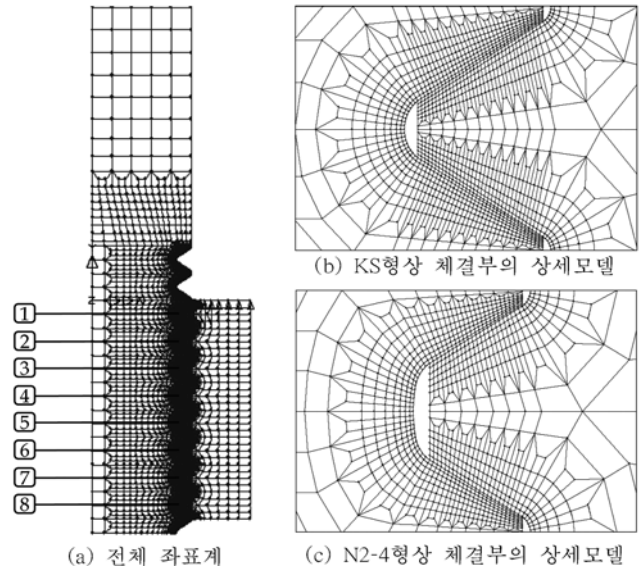


그림 12. 볼트와 너트 체결시 해석모델

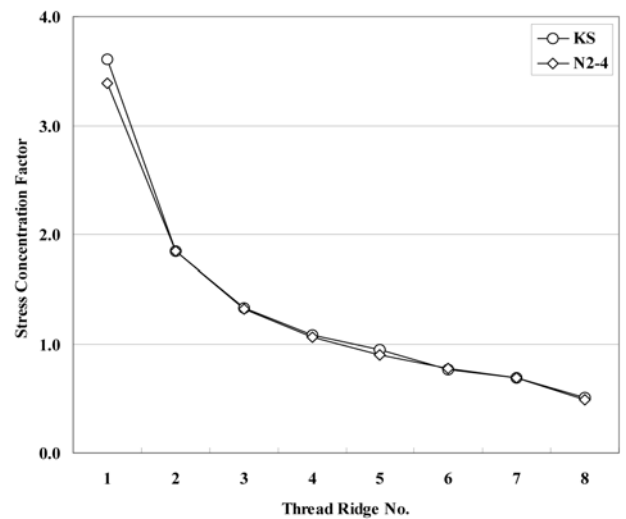


그림 13. 피치별 응력집중계수분포

교하면 KS형상은 2.80에서 3.61로, N2-4형상은 2.21에서 3.39로 증가되었다. 체결 전에는 KS형상에 비해 N2-4형상이 최대응력집중계수는 0.59에서 체결 후에는 0.22로 감소되었다. 이는 볼트와 너트가 체결함으로써 볼트와 너트 접촉부에 응력이 집중되어 체결 전에 비해 최대응력집중계수는 증가하게 되고, 체결 후에는 형상 개선효과가 감소하게 된다. 이러한 현상은 고장력볼트와 너트 결합에 의해 일체로 거동하는 특성이라고 규정할 수 있다. 볼트와 너트 체결시 N2-4형상은 KS형상에 비해 최대응력집중계수가 3.61에서 3.39로 감소 되어 N2-4형상의 최대응력집중 완화효과는 KS형상에 비해 약 6.09%가 개선되었다.

피로강도는 국부응력에 의해 지배적인 영향을 받게 된다(한중욱 등, 2008). 동일한 볼트의 공칭응력(ΔF)과 구조상세 범주(A)를 기준으로 N2-4형상의 최대응력집중계수 개선효과를 계산한다면 최대국부응력 비와 S-N선도의 기울기 $m=3$ 을 고려하면 피로강도는 약 20.8%의 개선효과가 있다고 판단된다(AASHTO LRFD 2007).

또한, 볼트와 너트 체결시 장력에 따른 볼트와 너트 사이에 벌어지는 이격거리에 대해서 그림 14(a)와 같은 위치에서

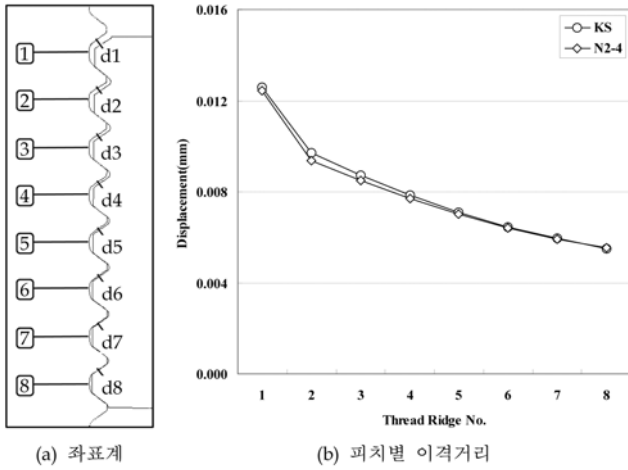


그림 14. 피치별 위치와 이격거리 분포현황

확인하였다. 볼트와 너트 사이에 마찰력에 따른 해석결과는 각각의 피치에서 최대값만 고려하면 그림 14(b)와 같다. 볼트와 너트 사이에 마찰력이 적을 수록 벌어짐의 효과가 크고 마찰력이 클 수록 벌어지는 효과가 적었다.

KS형상과 N2-4형상은 모두 1번째 피치에서 최대 이격거리가 발생하였고, 2~8번째 피치에서 일정하게 이격거리가 일정하게 작아졌다. 이러한 특징은 볼트와 너트 사이에 하중분배가 일정하게 분배되는 효과라고 볼 수 있다. 최대이격거리를 비교하면 N2-4형상이 KS형상에 비해 작게 발생되었을 뿐만 아니라 전체 피치별 이격거리도 작게 발생되었다.

4. 인장실험결과

4.1 실험체 특성 및 실험방법

인장실험은 한국산업규격 KS B 1010 규정에 준하여 실험하였다(한국표준협회, 2004). 실험대상은 1,300 MPa급의 고장력볼트인 KS형상의 F13T 볼트와 신나사형상(N2-4형상)을 적용하여 제작한 F13T-N 볼트에 대해서 볼트의 인장강도 성능과 변형성능의 특성치를 파악하기 표 2와 같이 실험을 수행하였다.

실험은 그림 15와 같이 실험체 변형량 측정은 실험체의 중앙부에 부착한 스트레인지이지와 실험용 지그에 설치한 변위계에 의해 측정하였으며 가력은 볼트가 파단될 때까지 실

표 2. 인장실험체 제원

볼트종류	나사형상	수량	Grip	
			나사부	축부
F13T M20	KS형상	5개	40 mm	40 mm
F13T-N M20	신나사형상	5개	40 mm	40 mm

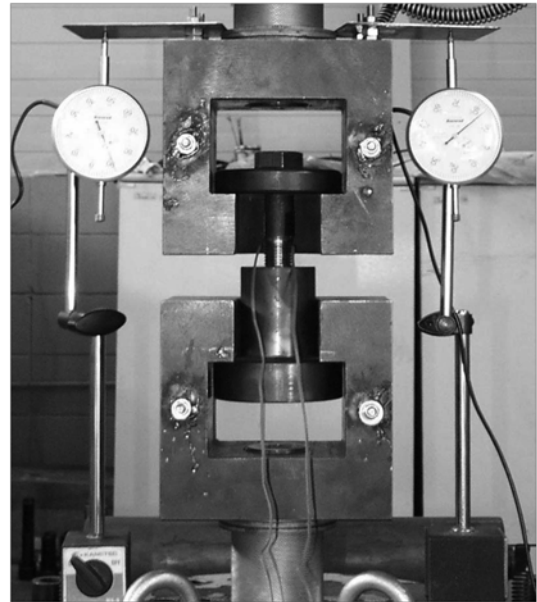


그림 15. 인장실험 전경

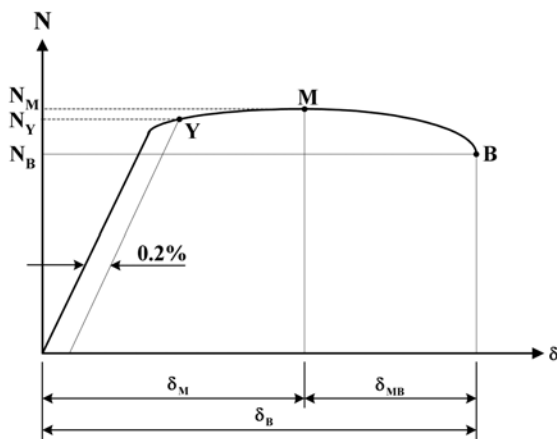
시하였다.

도로교설계기준(2010)의 규정에 준하여 설계볼트장력은 F13T 볼트의 항복강도와 유효단면적의 곱에 75%를 사용하였고, 표준볼트장력은 축력감소율을 고려하여 설계볼트장력에 1.1배를 사용하였다.

4.2 실험결과 및 분석

실험결과 F13T 및 F13T-N 볼트의 파괴는 지그와 결합된 나사부 및 불완전나사부에서 발생되었다. 인장실험결과는 그림 16과 같이 볼트 축력과 변위와의 관계를 표 3과 같이 정리하였다.

실험결과 F13T 볼트의 항복하중은 294.9~301.8 kN(평균 298.9 kN), 최대인장하중은 331.4~339.1 kN(평균 336.1 kN), 파단하중은 326.0~334.9 kN(평균 330.5 kN)으로 평가되었다.



- N_Y : 0.2% 항복하중(kN)
- N_M : 최대인장하중(kN)
- N_B : 파단하중(kN)
- δ_M : 최대인장시 변형량(mm)
- δ_{MB} : $M_B - M_M$ (mm)
- δ_B : 파단시 변형량(mm)
- δ : 파단시 측정된 연신율(%)

그림 16. 볼트 축력과 변위와의 관계곡선

표 3. 고장력볼트의 인장실험결과

볼트 종류	No.	N_Y (kN)	N_M (kN)	N_B (kN)	δ_B (mm)	δ_M (mm)	δ_{MB} (mm)	δ (%)
F13T M20	1	299.0	336.0	326.0	3.76	3.17	0.59	3.60
	2	294.9	331.4	327.9	3.62	3.28	0.34	3.50
	3	299.0	336.0	333.1	3.07	2.78	0.29	3.00
	4	300.0	338.0	330.6	3.47	2.87	0.60	3.40
	5	301.8	339.1	334.9	3.15	2.73	0.42	3.10
	평균	298.9	336.1	330.5	3.41	2.96	0.45	3.32
F13T-N M20	1	337.3	378.9	360.8	4.46	3.13	1.33	6.30
	2	338.5	380.3	365.8	4.56	3.25	1.31	6.50
	3	334.0	375.3	365.5	3.96	3.00	0.96	5.60
	4	333.2	374.4	360.6	4.41	3.15	1.26	6.20
	5	332.3	373.4	347.7	4.80	3.09	1.71	6.70
	평균	335.1	376.5	360.1	4.44	3.12	1.32	6.26

또한, F13T-N 볼트의 항복하중은 332.3~338.5 kN(평균 335.1 kN), 최대인장하중은 373.4~380.3 kN(평균 376.5 kN), 파단하중은 347.7~365.8 kN(평균 360.1 kN)으로 평가되었다. F13T-N 볼트가 항복하중, 최대인장하중 및 파단하중은 F13T 볼트에 비해 평균 12.11%, 12.02% 및 8.96%의 강도 증가 효과가 있었다. 이는 구조해석결과의 인장강도 증가 효과 보다도 실험결과가 크게 평가되었다.

볼트의 변형량 및 연신율에 대해서 평균값을 사용하여 분석하면 F13T-N 볼트의 최대인장하중 작용시 변형량(δ_M)은 F13T 볼트에 비해 1.05배가 우수하였고, 볼트의 파단사까지의 총 변형량(δ_M)은 1.30배의 변형량 차이를 보였다. 또한, 볼트 판단시 측정된 연신율(δ)은 F13T-N 볼트가 1.89배 우수 하였다.

또한, 고장력볼트의 지압하중 및 전단하중은 실험을 통해 명확하게 알 수 있으나, 도로교설계기준(2010)에서는 고장력볼트의 지압하중은 마찰접합용 고장력볼트의 기계적 성질(KS B 1010)과 동등하게 사용하고 있고, 전단하중은 인장하중의 $1/\sqrt{3}$ 로 생각하여 안전율을 항복하중 및 인장하중에 대해서 고려하여 계산하게 되어 있다. 고장력볼트의 지압하중 및 전단하중에 대한 계산결과 도로교설계기준(2010)에 규정된 값을 만족하였다.

5. 결 론

고강도 고장력볼트에 효율적인 신나사형상을 개발하기 위하여 유한요소프로그램을 사용하여 각종 나사형상에 대한 정밀구조해석을 수행하였다. 기존 나사형상에 대한 특성분석, 곡률반경에 따른 영향, 너트와의 체결깊이에 따른 영향 및 볼트와 너트 체결시에 따른 영향을 해석하여 신나사형상을 제안하였다. 또한, 인장강도 1,300 MPa급의 고장력볼트인 KS형상을 적용한 F13T 볼트와 구조해석적으로 제안된 신나사형상을 적용한 F13T-N 볼트에 대해서 기계적 성능평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 나사형상에 따른 구조해석결과에 의하면 KS형상의 나사를 포함한 기존 나사에서는 최대응력집중이 나사끝에서 발

생하였고, 나사끝에서 프랭크에 가까워짐에 따라 응력집중은 일정하게 감소하였으며, 나사끝의 곡률반경이 클수록 응력집중 감소 효과가 있음을 알 수 있었다. 그러나, 나사 끝 형상을 한 개의 곡률반경으로 규정하는 것 보다는 응력집중이 큰 나사 끝 심부에서는 곡률반경을 크게 하고 프랭크에 인접한 부분에서는 곡률반경을 작게 하는 것이 응력집중을 완화시킬수 있는 효율적인 형상으로 분석되었다. 따라서, KS형상은 나사 끝 곡률반경이 H/6이지만, 새로운 N2형상은 나사 끝에서는 곡률반경 2H/3이고 프랭크의 곡률시작점에서는 곡률반경 H/6으로 구성한 나사형상을 제안하였다. 해석결과에 의하면 N2형상은 KS형상에 비해 응력집중이 감소되고 응력분포가 보다 균등하게 분포하였다.

2. N2형상에서 너트의 체결깊이(H1)를 변화시키면서 분석한 결과에 의하면 체결깊이, 응력집중 및 나사의 전단높이를 고려하여 체결깊이가 H1=0.4674H로 하는 N2-4형상을 신나사형상으로 제안하였다. 제안된 신나사형상(N2-4)과 KS형상의 볼트와 너트 체결 후의 구조해석결과에 의하면 신나사형상(N2-4)은 응력집중이 작게 발생하고, 볼트와 너트사이에 이격거리도 작게 발생하여 볼트와 너트사이의 체결력 확보와 하중분배 효과가 우수하다고 평가되었다. 또한, 신나사형상(N2-4) 볼트는 KS형상의 볼트에 비해 유효단면적 증가로 5.1%의 인장강도 증가와 응력집중계수가 감소로 동일한 볼트의 공칭응력과 구조상세범부를 기준으로 계산한다면 피로 강도도 20.8% 개선효과가 있다고 해석적으로 평가되었다.

3. 인장강도 1,300 MPa급의 고장력볼트를 대상으로 한국산업규격에서 요구하는 인장실험결과 신나사형상(F13T-N) 볼트는 KS형상(F13T) 볼트에 비해 평균적으로 항복하중은 12.11%, 최대인장하중은 12.02%, 파단하중은 8.96%의 하중증가 개선효과가 있었다. 또한, 볼트의 변형량 및 연신율에 대해서 평균값을 사용하여 분석하면 F13T-N 볼트가 최대인장하중 작용시 변형량(δ_M)은 1.05배, 볼트의 파단사까지의 총 변형량(δ_B)은 1.30배, 볼트 판단시 측정된 연신율(δ)은 1.89배가 향상된 것으로 평가되었다. 이는 볼트의 유효단면적 증가와 나사선의 응력집중완화로 응력재분배가 효과적으로 분배된 결과라고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업의 초장대교량사업단 및 POSCO 지원에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사 드립니다.

참고문헌

국토해양부(2010) 도로교설계기준, 한국도로교통협회.
김진호, 김원기(2005) F13T급 고력볼트 기술개발, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 대한건축학회, 제25권 1호, pp. 71-113.
이덕락, 최해창, 이상윤, 최상우, 김진호, 박재철(2004) 1300MPa 급 고강도 볼트 개발현황, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제16권 2호, pp. 18-23.
포항산업과학연구원(2002) 차세대 고강도볼트 연구, 기술보고서.
포항산업과학연구원(2005) F13T급 고력볼트 실용화 기술개발, 기술 보고서.

한국표준협회, KS B 1010(2004) 마찰접합용 고장력 6각 볼트-6각 너트·평와셔의 세트, pp. 1-19.
한종욱, 박영석(2008) 고장력볼트의 인장피로강도에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권 제2A호, pp. 165-170.
AASHTO LRFD (2007) Bridge Specifications-US, 4th Edition.
Nair, R.S., Birkemoe, P.C., and Munse, W.H. (1974) High strength bolts subjected to tension and prying, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 100, ST2.
Bouwman, L.P. (1979) Fatigue of bolted connections and bolts loaded in tension, Report No. 6-79-9, Stevin Laboratory, Delft, the Netherlands.
Geoffrey Kulak and Fisher, J.W. (1987) Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, 2nd edition.
LUSAS(2005) Power FE Technology for Specialist Applications, Element Reference Manual 1(Ver. 13.7), pp. 143-148.

(접수일: 2011.1.3/심사일: 2011.3.30/심사완료일: 2011.4.26)