

스터드 보울트로 조립된 체결체의 강성 평가 Determination of Stiffness in Stud Bolted Connection

김 태완* 성 기광* 손 용수* 박 성호*
Kim Tae Wan Sung Ki Kwang Sohn Yong Soo Park Sung Ho

ABSTRACT

A useful finite element method to determine the stiffness of assembled member by stud bolt was introduced in this paper. Since threads on clamped members and stud bolts may produce different stress distribution, brief theories and equations based on bolt and nut may produce less conservative results on this case. A finite element model using non-linear gap element was introduced to find out the basic feature of stress distribution caused by threads on both stud and member.

1. 서론

동적 혹은 정적하중을 받는 둘 혹은 다수의 부재를 체결하기 위하여 보울트(Bolt) 체결방식이 널리 사용되고 있다. 보울트를 이용하는 체결방식에는 보울트가 체결체(Member)를 관통하는 방법과 체결체의 일부분에 나사(Threads)를 가공하여 스테드 보울트(Stud Bolt)로 부재를 체결하는 방식이 사용되고 있다. 체결용 보울트의 파손 사례중 가장 많은 경우가 체결시의 체결 장력(Pre-Load)이 낮거나 사용중에 체결 장력이 저하하는 경우이다. 체결 장력이 저하하면 보울트에 발생하는 반복 응력의 진폭(Stress Range)이 증가하여 체결 보울트의 피로 파괴(Fatigue Failure) 현상이 촉진 된다. 따라서, 체결시 보울트의 체결 장력을 정확하게 정의하는 것은 체결의 건전성 유지에 가장 중요한 인자라 할 수 있다. 일반적으로 체결 장력은 체결체의 강성(Stiffness), 보울트의 강성 및 외력(External Loading)에 의하여 (1)식으로 정의 할 수 있다. (1)식에서 표시한 것과 같이 체결체와 보울트의 강성이 체결 장력을 결정하는 가장 중요한 인자임을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 보울트의 강성은 비교적 간단하게 정의할 수 있으나, 체결체의 강성은 체결체의 기하학적 조건에 따라 가변적인 값을 가진다.

$$\text{체결장력} \geq \text{외부하중} \times \frac{\text{체결체 강성}}{(\text{체결체강성} + \text{보울트강성})} \quad (1)$$

체결체의 강성에 대한 연구는 실험과 탄성론으로 부터 유도된 다수의 간편식과 유한 요소법을 이용하는 방법[1][4][5][6]으로 나눌 수 있다. 기존의 연구는 관통 보울트를 사용하는 경우에 대하여 확인한 것이며, 스테드 보울트(Stud Bolt)를 사용하여 체결하는 경우에는 관통 보울트에 대한 해석 이론을 동일하게 적용하여 강성을 정의하고 있다[1][2][7]. 스테드 보울트를 이용한 체결방식에서는 체결체와 보울트의 나사산(Thread)의 상호 간섭에 의하여 보울트의 강성이 체결체의 강성에 직접적인 영향을 미치게 된다. 또한, 체결되는 부재간의 대칭성을 고려할 수 없고, 나사산이 가공되지 않은 부분이 응력분포에 영향을 미칠 수 있으므로, 기존의 연구에서 제시한 해석 결과의 적용에 대한 체계적인 연구가 요구된다.

*한국 원자력 연구소 계통기계설계실

본 연구에서는 스테드 보울트를 이용한 체결기구에서 체결체에 발생하는 응력 분포를 예측할 수 있는 유한 요소 해석 방법을 제시하고, 보울트와 체결체의 기하학적인 변화에 따른 체결체의 강성 변화를 검토코저 한다.

2. 체결체의 유한 요소 해석

스테드 보울트로 체결된 체결체의 해석은 체결체와 보울트의 나사를 일체로 고려하여야 하기 때문에 이론해를 구하기 어려우므로, 본 연구에서는 유한 요소법을 이용하여 체결체를 해석하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용한 유한 요소 모델을 표시한 것이다. 그림 1에 표시한 것과 체결체와 보울트를 축대칭 4 절점 요소(4-Node Axisymmetric Element)와 비선형 간극 요소(Non-Linear Gap Element)를 이용하여 보울트와 체결체를 모델링 하였다. 본 연구에서 사용한 비선형 요소는 그림 2에 표시한 것과 같이 한 방향으로만 강성을 가지는 요소로서 대부분의 상용 유한 요소 코드는 유사한 요소를 지원하고 있다.

보울트는 지지조건(Support Condition)으로 설정하고, 하중은 너트와 체결체가 접촉하는 위치에 모델링하였다. 체결체의 강성은 너트의 접촉 위치에서 발생하는 변위(Displacement)를 이용하여 구할 수 있다. 그러나 그림 1과 같은 해석 모델에서는 보울트의 변형이 포함된 전체계의 변형량이 관찰되므로, 보울트의 강성을 보정하거나 탄성 변형량을 제거 하여야 한다. 본 연구에서는 보울트의 탄성 계수를 충분히 크게하여 보울트의 탄성 변형을 극소화하여, 체결체와 보울트 나사 상호간의 저항 효과만을 고려 하였다. 상부 체결체와 하부 체결체의 경계면은 Prying Force에 의한 기밀 상태를 관찰하기 위하여, 비선형 간극 요소를 이용하여 모델링 하고, 스테드 보울트의 숫나사와 체결체의 암나사는 하중방향에 의한 접촉 순서를 고려하여 비선형 간극 요소로 연결하였다. 체눈(Mesh)의 크기는 나사의 피치(Pitch)의 1 - 1.5 배를 기준으로 하였다. 나사산의 형상과 제원은 ASME B1.1(1989 Edition)에 수록된 표준 Unified Inch 나사 제원을 따랐으며[8], 해석에 사용한 물성치(Material Properties)는 그림 3에 표시하였다. 본 연구에서는 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS(Version 4.4A)를 사용하여 유한 요소 해석을 수행하였으며, 하드웨어는 HP-APOLLO DN 10000을 사용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

그림 4는 스테드 보울트를 이용한 체결체에서 발생하는 등응력선도(Stress Contour)를 표시한 것이다. 그림 4에 표시한 것과 같이 너트와 접촉하는 영역에서는 기존의 해석 결과에서 제시한 것과 일치하는 전형적인 응력분포를 보이고 있다[2][3][5][6]. 그러나 나사의 영향으로 인하여 나사가 가공된 체결체(Tapped Members)에서는 압축응력과 인장응력이 동시에 발생하는 현상을 볼 수 있다. 체결체내에서 발생하는 인장 응력은 압축 응력과 산술적으로 상쇄되기 때문에 변형량을 감소시켜서 강성을 증가시킬 것으로 생각된다.

체결체의 강성은 변위와 응력 분포를 이용하여 정의 할 수 있다[5]. 변위를 이용하여 강성을 정의할 경우에는 체결체내의 응력 분포를 원통형(Cylindrical Equation)으로 가정하는 것과 일치하는 해석 결과를 얻을 수 있다[5]. 응력 분포를 이용하는 경우에는 압축 응력이 발생하는 전체 면적을 적분하며 강성을 구하며, 응력 분포를 원추형(Conical Equation)으로 가정하는 방법이 많이 사용된다[2][3]. 따라서 강성을 평가하는 방법에 따라 해석 결과의 보수성이 뚜렷하게 나타나는 특징을 보인다[5]. 스테드 보울트를 이용한 체결체에서는 그림 4에 표시한 것과 같이 기존의 연구에서 제시한 응력 분포를 직접적으로 적용하기 어려우므로, 기존의 원통형 및 원추형식의 수정에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 유한 요소 해석에서 평균 변위를 구하여 (2)식으로 부터 강성을 구하였다.

$$\text{강성} = \text{하중/평균변위} \quad (2)$$

그림 5는 나사 피치의 크기 변화에 따른 체결체의 강성 변화를 표시한 것이다. 그림 5에 표시한 것과 나사의 피치를 감소시키면, 체결체의 강성은 매우 완만하게 증가하지만 큰 변화는 보이지 않음을 알 수 있다. 이것은 피치가 작을수록 체결체의 단면적이 증가하기 때문에 강성이 다소 증가하지만 전체 강성에 미치는 영향은 작은 것으로 이해된다. 그림 6은 나사를 가공하지 않은 체결체의 두께 변화에 따른 강성 변화를 표시한 것이다. 그림 6에 표시한 것과 같이 나사를 가공하지 않은 체결체의 두께가 증가할수록 강성이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 체결체의 강성은 원통형식에 의한 해석결과 보다는 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 그림 4에 표시한 것과 같이 체결체내에 발생하는 인장 응력이 압축 응력과 산술적으로 상쇄되어, 전체 변형량이 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 그림 7은 나사가 가공된 체결체의 길이 변화에 따른 강성 변화를 표시한 것이다. 그림 7에 표시한 것과 같이 나사의 가공 길이가 증가 할수록 체결체의 강성이 증가 함을 알 수 있다. 이러한 현상은 나사의 가공 길이가 증가 할 수록 체결체의 단면적이 증가하고, 인장 응력의 분포 범위가 증가하기 때문인 것으로 이해된다. 기존의 해석은 체결체의 전체 두께가 증가할수록 강성이 감소하는 것으로 보고되고 있으나, 본 연구에서는 상반된 결과를 관찰 할 수 있었다. 따라서 기존의 해석 결과를 스티드 보울트로 이용한 체결체의 강성 해석에 직접적으로 적용하기 위해서는, 원통형식을 수정하거나 원추형식을 적용하는 것이 타당할 것으로 생각된다. 또한 보다 정확한 해석을 위해서는 나사의 영향에 따른 응력 분포를 효과적으로 예측할 수 있는 이론에 대한 연구가 진행 되어야 할 것이다.

4. 결론

유한 요소법을 이용하여 스티드 보울트로 체결된 체결체의 강성 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 스티드 보울트로 체결된 체결체의 응력 분포는 기존의 해석에서 제시한 것과 일치하지 않으므로, 제한적인 영역에서만 적용하는 것이 타당하다.
2. 스티드 보울트 나사의 피치는 체결체의 강성에 큰 영향을 미치지 않는다.
3. 나사가 가공되지 않은 체결체의 두께가 증가하면 체결체의 강성은 감소하지만, 나사가 가공된 체결체의 길이가 증가하면 체결체의 강성은 증가 한다.

5. 참고문헌

1. Motosh, 'Determination of stiffness in bolted connection', J. Eng. Ind., ASME Ser. B, Vol.98, No.3, 1976.
2. Joseph E. Shigley & Larry D. Mitchell, 'Mechanical Engineering Design', 1983.
3. K.S. Edwards, JR., & Robert B. Mckee, 'Fundamentals of Mechanical Component Design', 1991.
4. C.T. Yahr, 'Preloading of Bolted Connections in Nuclear Reactor Component Support', NUREG/CR - 3853, 1984.
5. J.Tang and Z. Deng, ' Better Stress and Stiffness Estimates for Bolted Joints', Machine Design, Nov., 1988.
6. 김 태완, ' 최적화 기법을 이용한 보울트 체결체의 강성 평가', 한국전산구조공학회 1993년 봄 학술발표회 논문집, 1993.
7. 기계설계기술, 제8권 제 2호, PP. 97-104, 1993.
8. ASME B1.1, ' Unified Inch Screw Thread', 1989.
9. Swanson Analysis System Inc., 'ANSYS User's Manual Vol. I & II', 1989.

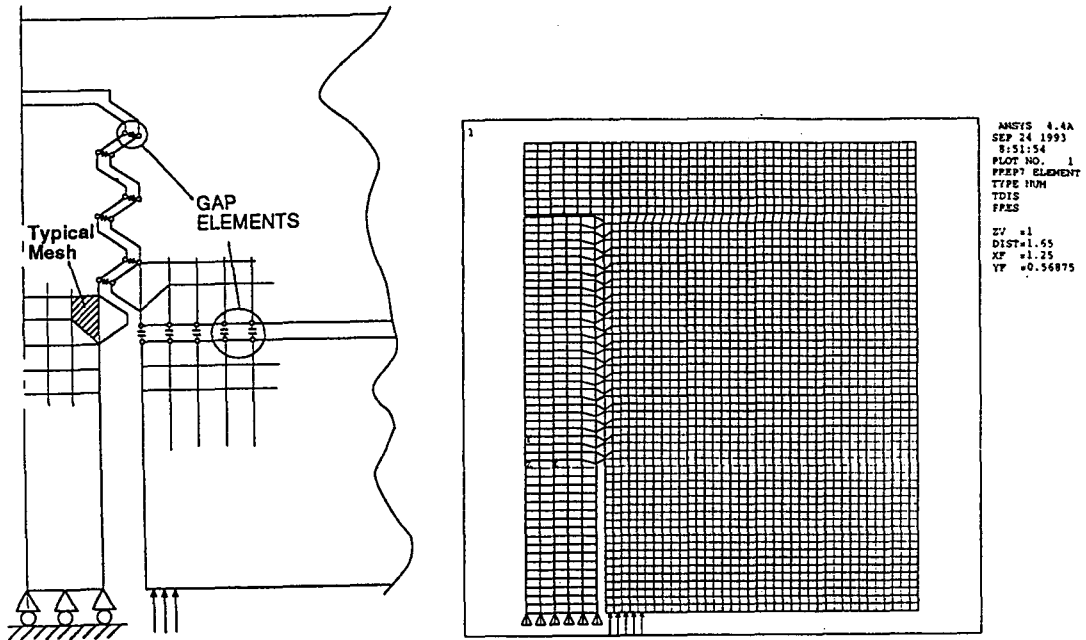


그림 1 스타드 볼트 체결체의 유한 요소 모델

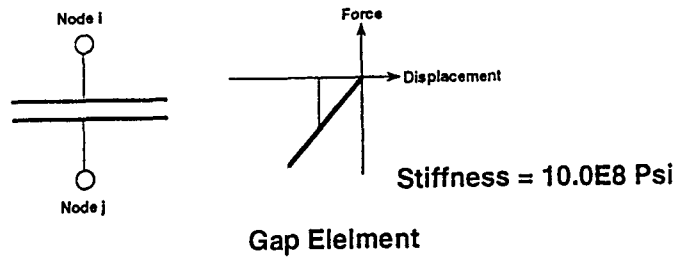


그림 2 비선형 간극 요소

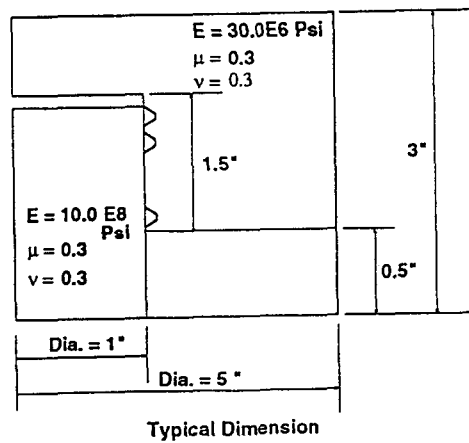


그림 3 해석 모델의 물성치

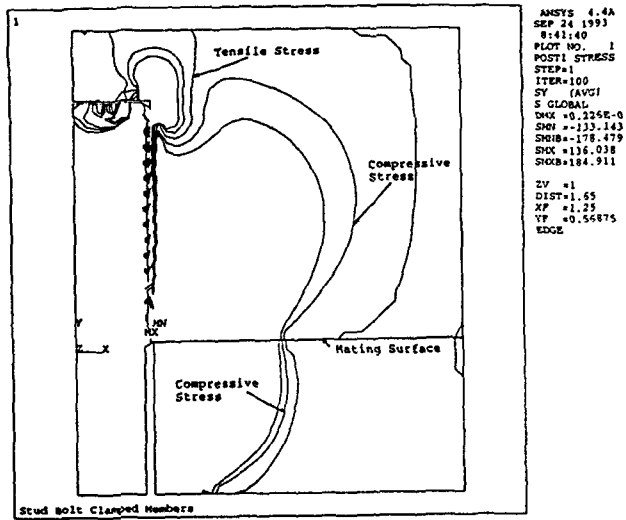


그림 4 등응력 분포 곡선

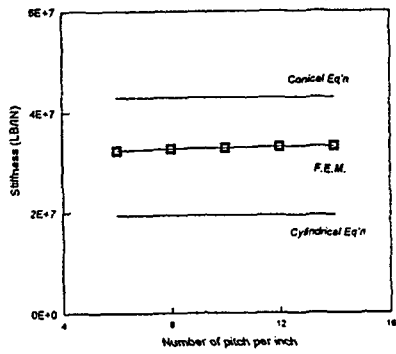


그림 5 나사의 피치 변화에 따른 강성 변화

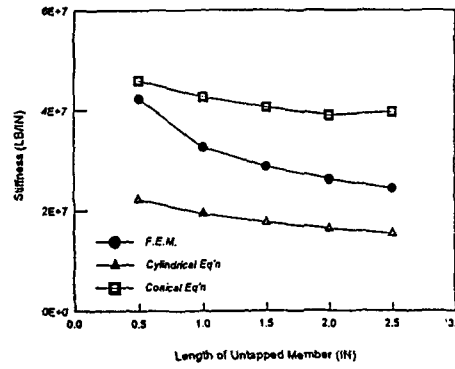


그림 6 나사가 가공되지 않은 체결체의 두께에 따른 강성 변화

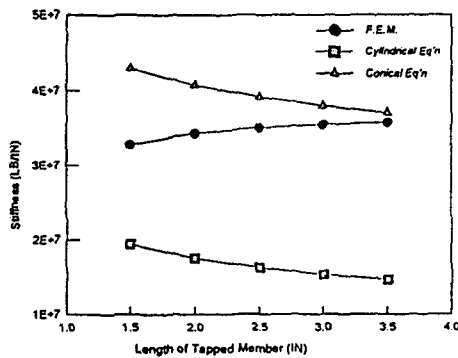


그림 7 나사가 가공된 체결체의 길이 변화에 따른 강성 변화