

합금강의 응력집중 및 평균 응력에 따른 피로 특성

Effects of Stress Concentration and Mean Stress on Fatigue Properties of Alloy Steels

김 현수, 박 윤기, 황 주환, 윤 중근

* 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소

ABSTRACT The purpose of this study is to establish the fatigue design criteria for the notched structural components subjected to high mean stress. In order to do it, the effects of stress concentration factor on the monotonic and cyclic tensile properties were investigated. Based on the results, two fatigue design approaches for the notched specimen using Goodman diagram was established and verified by comparing with the experimental result.

1. 서 론

기계 구조물의 체결을 위해 볼트/너트 체결법이 많이 사용되고 있으며 볼트의 피로파괴, 피로하중 하에서의 ratcheting strain 등에 의한 loosening은 생산 line의 작동 중지, 대형 발전설비의 운전 중단을 초래할 수 있으며, 때로는 대형 사고의 직접 원인이 되기도 한다. 볼트는 사용중 정적 하중을 받는 경우도 있지만 대부분의 경우는 피로 하중을 받으며 체결 하중은 높은 평균 응력으로 작용하며, 이로 인하여 나사산 노치 부에는 항복을 초과하는 응력이 작용한다. 따라서 볼트와 같이 나사산 노치 형상에 따른 응력집중을 받는 재질의 피로 강도에 대한 신뢰성 확보는 매우 중요하다. 볼트와 같이 높은 평균응력 및 항복을 초과하는 국부응력이 작용하는 경우에 대한 일반적인 피로 해석 방법에는 일축하중 조건에서의 S-N방법과, 평균 응력을 고려한 Goodman 선도를 이용하는 방법 등이 있으며, 작용 하중이 변동 하중일 경우에는 Miner의 linear damage accumulation 방법이 적용되기도 한다[1,2].

따라서 본 연구에서는 높은 평균 응력 및 국부 소성응력이 작용하는 경우 SNCM439의 인장 및 피로 특성을 평가함으로써 설계기준을 정립하고자 하였다.

2. 시편 설계 및 강도

본 연구에서 사용한 합금강은 SNCM439이며

기계적 물성은 Table 1과 같다. 노치 인장 시편의 설계시 볼트 나사산에 의한 응력집중을 고려하기 위하여 나사산과 유사한 형상의 나사산 각도, 깊이 및 노치 반경을 고려할 수 있는 응력집중 평가식인 西田正孝의 응력 집중 계수 평가식을 사용하여 인장 및 피로 노치 시편을 Fig. 1과 같이 설계하였다.

Table 1 Mechanical properties of SNCM439

항복강도 [90kgf/mm ²]	인장강도 [90kgf/mm ²]	연신률 [%]
Min. 90	Min. 100	Min 16

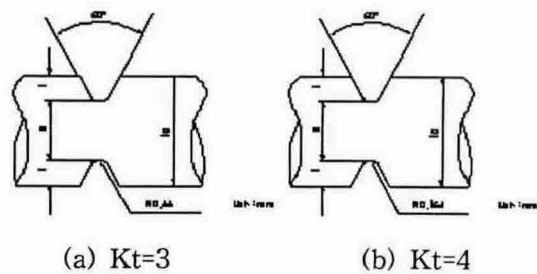
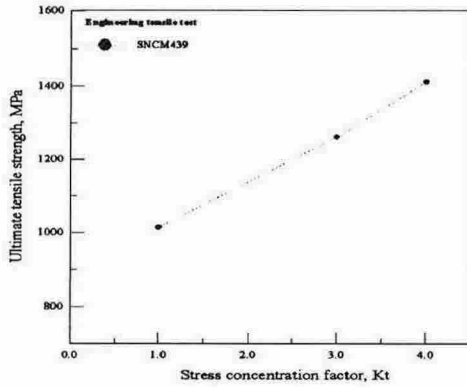
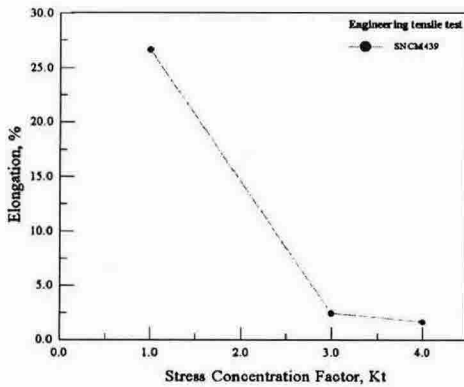


Fig. 1 Notch configurations of test specimens

Fig. 2는 SNCM439의 평활 및 노치 인장시편에 대하여 monotonic engineering tensile 시험 결과를 도시한 것이다. Fig. 2와 같이 Kt가 증가함에 따라 노치 선단에서의 응력 상태가 다축 응력 상태로 변하기 때문에 인장 강도는 증가하는 반면에 연신률은 감소한다. 그러나, Kt가 기계적 물성에 미치는 효과는 Kt가 증가함에 따라 감소한다.



(a) Tensile strength



(b) Elongation

Fig.2 Changes of monotonic tensile properties at the specimen of SNCM439 with Kt

Fig. 3은 SNCM439의 cyclic tensile properties 시험 결과를 도시한 것이다. Fig. 3과 같이 가공 연화 특성에 기인하여 cyclic 항복 강도는 약 30%정도 감소한다. 이는 Table 1과 같이 SNCM439의 항복 및 인장강도의 비가 약 1.1로 Manson이 제안한 softening 재질 기준과 잘 일치하고 있다[2].

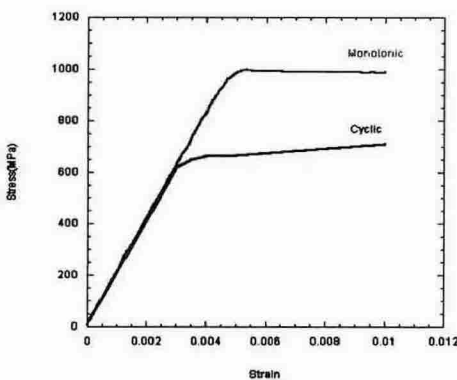


Fig. 3 Stabilized cyclic strain-stress curve at the notched specimen of SNCM439

3. 피로 설계

3.1 피로 강도

Goodman diagram을 이용한 피로 데이터를 구축을 위하여 응력비, $R=-1$ 로 노치 시편에 대한 피로강도 평가를 실시하였다. Fig. 4는 응력집중에 따른 피로강도 변화를 도시한 것이다. 평활 시편의 경우 인장강도에 비례하여 피로강도가 증가하나, 응력집중이 증가함에 따라 국부 응력의 증가 및 노치 민감도의 증가에 기인하여 피로 강도는 급격하게 감소한다.

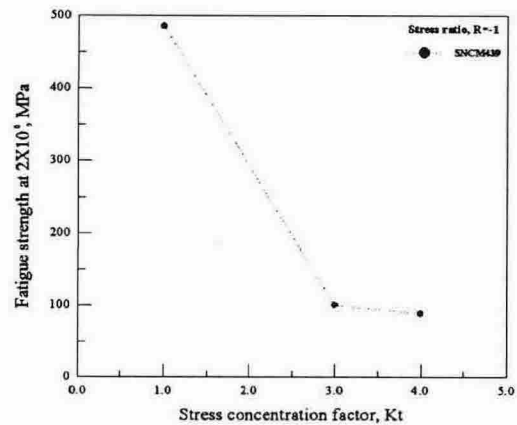


Fig.4 Changes of the fatigue strength at the specimen of SNCM439 with Kt.

3.2 피로설계

Fig. 5는 공칭 응력을 설계 기준으로 적용한 경우 monotonic 항복(σ_{ys}) 및 인장강도(σ_{ut}) 그리고, 응력집중에 따른 피로강도(S_f)를 이용하여 구축된 Goodman 선도와 노치재에 대한 피로 시험 결과를 함께 도시한 것이다. Fig. 5와 같이 공칭 응력 설계 기준하에서 노치재의 피로 설계는 노치재의 응력 집중을 고려한 피로 강도를 이용한 Goodman 선도를 이용하여 비교적 보수적인 설계가 가능함을 알 수 있다. 즉, 노치재의 피로 강도에 의하여 정의된 안전 영역에서 피로 파손은 관측되지 않은 반면에 파손 영역에 위치한 시편의 경우 거의 대부분 피로 파손이 발생하고 있다는 사실에서 이를 잘 확인할 수 있다.

평균 응력이 항복 응력을 초과하는 경우 노치부의 국부 응력과 Goodman 선도를 이용한 피로

설계시 Fig. 6과 같이 평활재의 인장강도(σ_{ut}) 대신 노치재의 인장강도(σ_f)와 $K_t=4$ 인 경우의 피로 강도를 이용하는 경우 안전한 피로설계가 가능함을 알 수 있다. 이는

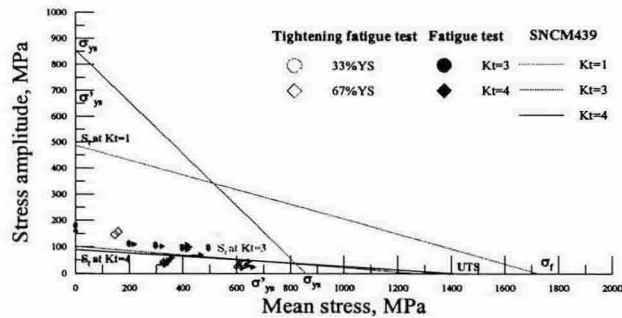


Fig. 5 Goodman diagram for fatigue design using nominal stress

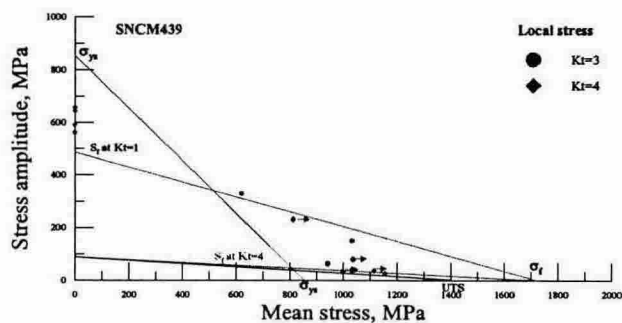


Fig. 6 Goodman diagram for fatigue design using local stress

4. 결 론

노치재에 높은 평균 응력 및 국부 소성응력이 작용하는 경우 합금강의 피로 설계 기준을 정립하기 위해서 인장 및 피로 특성을 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평활 및 노치 인장시편에 대하여 인장시험 응력집중이 증가함에 따라 인장 강도는 증가하는 반면에 연신율은 감소한다. 그러나, 이러한 인장 특성의 변화는 K_t 가 3을 초과하는 경우 감소한다.
- 2) 노치재에서 공칭 응력과 Goodman선도를 이용한 피로 설계시 모재의 항복 강도와 노치재의 피로 강도를 설계 기준으로 적용하는 경우 보수적인 설계가 가능하다.

3) 노치재의 국부 응력과 goodman 선도를 이용하여 피로 설계를 수행하는 경우 노치재의 인장 강도와 노치재의 피로 강도를 이용한 피로 설계 기준을 적용해야 한다.

참고문헌

1. P.J. Haagenen : Fatigue of high strength steels, 2nd Int. Sym on high strength steel, Stiklestad Apr. 2002
2. H.O.Fuchs et. al.: Metal fatigue in engineering