

SNCM강의 피로균열의 발생 및 전파속도에 미치는 질화처리의 영향

Effect of Nitriding on Fatigue Crack Initiation and Growth Rate in SNCM

김민건* 이상호**
Kim, Min-Gun Lee, Sang-Ho

Abstract

Effect of nitriding on fatigue crack initiation and growth rate has been studied on SNCM. Specimens were nitrided for 15 hr at 860°C. The fatigue limit of nitrided specimens was superior to that of annealed(860°C, 15 hr) specimens. Based on detailed observations of slip band and micro crack initiation, it is concluded that the excellent fatigue limit of nitrided specimens is attributed to improved slip initiation resistance by nitriding. The characteristic of fatigue crack growth rate of nitrided specimens was investigated and compared with those of annealed specimens. It was found that by nitriding the crack growth rate was markedly decreased and the threshold stress intensity factor range was improved. It is concluded that the excellent fatigue limit of nitrided specimens is also attributed to improved fatigue crack growth rate and threshold stress intensity factor range by nitriding.

키워드 피로, 질화, 피로균열전파속도

Keywords fatigue, nitriding, fatigue crack growth rate

1. 서론

공업의 발전과 더불어 산업구조물의 대형화는 물론 새로운 최적 설계개념의 도입 및 신소재의 개발과 각종 표면처리기술의 개발에도 불구하고 원가력 구조물의 안전사고, 교량 및 항공기의 파괴 사고 등이 끊이지 않고 있다. 이들 사고 원인의 대부분은 피로파괴에 의한 것으로 판명되고 있으므로, 피로파괴에 대한 안전설계의 중요성이 더욱 요구되고 있다.

질화, 고주파담금질 및 침탄처리 등의 표면경화 열처리는 철강재료의 표면층만을 경화시켜, 내마모성, 내피로성을 향상시킨다. 질화에 의한 경화기구는 강재 속에 침투한 질소가 크롬, 몰리브덴, 알루미늄 등과 같이 질소와 친화력이 큰 원소와 미세한 질화물을 형성하여, 그것의 변형경화에 의한 것이다.

금속재료의 피로파괴는 통상 표면에서의 비가역적 슬립의 결과로서 생기기 때문에, 재료표면의 슬립저항을 증대시킴으로써 피로한도는 개선된다. 실제, 질화 등의 표면개질법은 일반강 및 특수강의 피로강도를 개선하는 방법으로 공업적으로 널리 이용되고 있다[1, 2].

질화강의 기계적 특성에 관한 연구의 대부분은 내마모특성에 관한 것으로[3, 4], 피로특성에 관한 연구는 국내에서 찾아보기 어렵다. 저자는 SNCM 질화강의 질화에 따른 피로한도의 상승을 피로균

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학 박사

** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 박사과정

열의 발생특성과 결부시켜 설명하였다[5]. 즉, 질화에 의하여 재료표면의 슬립저항을 증대시킴으로써 피로한도는 개선되었다. 국외에는 질화처리한 티탄의 피로거동에 관한 연구가 많이 수행되었다[6, 7]. 티탄은 질화에 의하여 피로한도가 저하되는 특이한 거동을 보이는 데, 대부분의 연구는 이 원인을 규명하는 데 집중되어 있다[8, 9]. 티탄은 질화에 의하여 피로한도가 저하됨은 물론, 균열전파속도는 질화층의 영향을 직접 반영하는 표면층에서 현저하게 가속되는 것으로 알려져 있다[7].

본 연구에서는, 티탄과 상반되게 질화에 의하여 피로한도가 상승하는 기계구조용 질화강에 대하여 피로균열전파속도를 고찰함으로써, 피로균열전파속도에 미치는 질화의 영향이 티탄과 상반되게 나타나는지 여부를 밝히고자 한다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 기계구조용 특수강인 SNCM으로, 그 화학적성분과 기계적성질을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 피로균열전파용 시험편의 형상은 Fig. 1과 같다

Table 1 Chemical compositions (wt%)

C	Si	Ni	Cr	Mo	Mn	S	Fe
0.44	0.24	1.74	0.80	0.17	0.71	0.018	bal.

Table 2 Mechanical properties of SNCM

Ultimate strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation δ (%)	Micro vickers hardness (Hv)
735	588	15	270

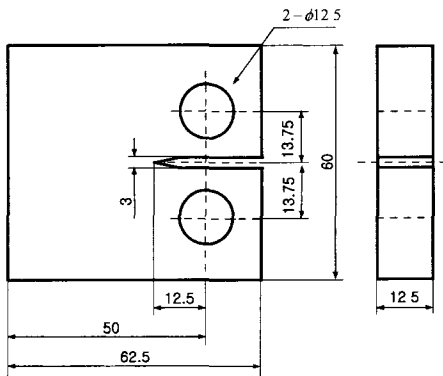


Fig. 1 Shape and dimensions of CT specimen

2.2 유동상로를 이용한 질화처리

질화처리는 진공로보다 처리단가는 크게 저렴하면서 동일한 효과를 얻을 수 있는 유동상로를 자체 제작하여 수행하였다. Fig. 2에 그 구조를 나타내었다. 질화처리에 사용된 가스는 99.9%의 암모니아이다.

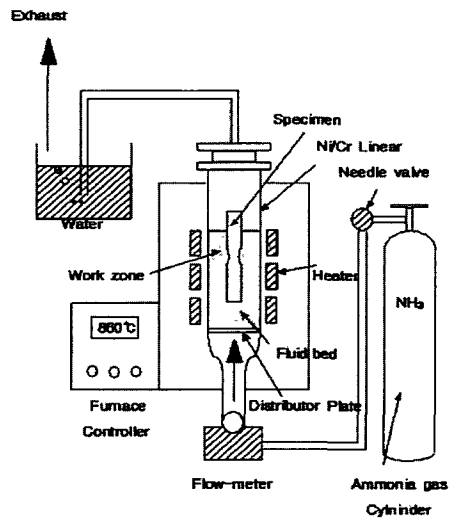


Fig. 2 Shape of fluidized bed furnace

유동상로를 이용한 열처리기술은 염욕로의 공해문제가 심각하게 대두됨으로서 구미 각국에서 실용화된 것으로, 종래의 열처리보다 빠르고 균일한 가열이 가능하여 질화, 침탄과 같은 표면처리 분야에 응용이 시도되고 있다.

860° C, 15시간 질화처리한 SNCM강의 질화층의 형상을 Fig. 3에 제시하였다. 질화층은 표면으로부터 약 0.1mm의 두께로 형성되어 있음을 확인할 수 있다.

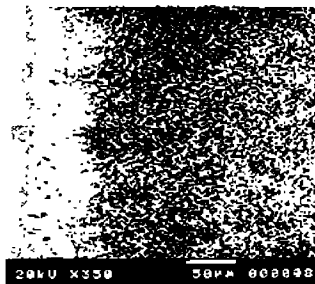


Fig. 3 Nitrated compound formed

2.3 피로시험 및 응력확대계수 평가

피로균열진과 특성을 평가하기 위한 피로시험은 최대용량 100kN의 유압서보식 피로시험기를 사용하였다. 시험은 실온대기 중에서 응력반복속도 20Hz, 응력비(R) 0.1의 경현파로 하였다. 본 실험에 앞서 모든 시험편에 2mm의 예비균열을 도입하였다.

균열길이의 측정은 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 행하였고, ΔK 점감법(ΔK decrease)에 의하여 ΔK_{Ic} 를 구하였다.

응력확대계수족 ΔK 는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta K = \left[\frac{\Delta P}{(B \cdot \sqrt{W})} \right] \cdot f(x), \quad (X = \frac{a}{W}) \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{(2+X)}{(1-X)^{3/2}} \cdot (0.866 + 4.64 \cdot X - 13.32 \cdot X^2 + 14.72 \cdot X^3 - 5.6 \cdot X^4)$$

피로한도는 $\phi 9$, R20의 환봉시험편을 사용하여 회전굽힘피로시험으로 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 질화처리한 SNCM강의 피로균열 발생특성

Fig 4에 860°C, 15시간 어닐링처리한 SNCM 소둔재와 질화재의 S-N관계를 나타내었다.

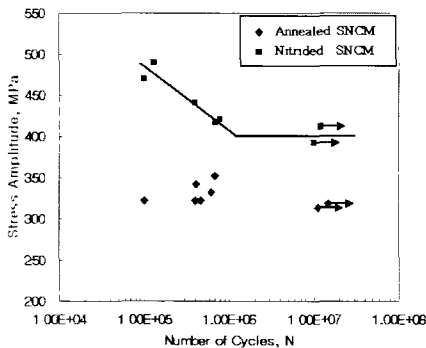
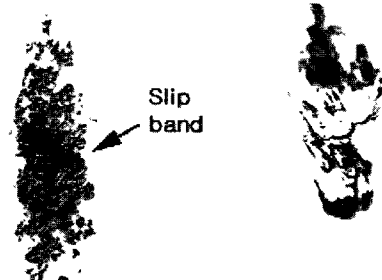


Fig 4 S-N curves of annealed and nitrided specimens

소둔재의 피로한도는 310MPa, 질화재의 피로한도는 410MPa로, 질화에 의하여 약 30% 상승하고 있어, 질화처리가 질화강의 피로한도를 개선시킨다는 일반적인 학설과 부합하고 있다. 이러한 피로한도의 상승은 표면 질화경화층의 슬립저항이 증대

된 결과로 알려져 있다.

질화재에 발생한 슬립과 슬립내부에 발생한 미세균열을 Fig 5의 (a), (b)에 나타내었다.



(a) $N = 4.5 \times 10^5$ (b) $N = 5.5 \times 10^5$

Fig 5 Slip band and micro crack initiation at surface

(a)로부터 슬립이 질화층 표면에 타원형상으로 국부적으로 집적되어 있음을 알 수 있다. 표면의 미세조직적인 형상으로 슬립이 형성되는 일반 강재와 달리 전체적으로 균일한 질소화합물층의 가장 취약한 일부분을 골라 집중적으로 슬립이 형성되는 것이 특징이다. 이는 균일한 질소화합물층의 슬립저항 증가로 인하여 슬립 발생부위가 지극히 제한되고 있음을 보여주고 있다.

(b)는 (a)를 전해연마에 의하여 고집슬립밴드의 일부분을 제거하여 촬영한 것이다. 고집슬립밴드는 이미 미세균열이 발생해 있음을 알 수 있다. 또 차슬립에서도 균열발생이 인정되므로, 이들 균열은 전단응력에 의한 1단계균열이라 볼 수 있다. 균열의 발생시기가 $N=5.5 \times 10^5$ 으로, 소둔재의 발생시기(Fig 6에서, $N=5.5 \times 10^5$ 에 해당하는 두 재료의 과단수명으로 미루어 알 수 있음)보다 늦은 점은 질화에 의하여 표면슬립저항이 향상된 결과라 생각된다.

3.2 피로균열전파속도에 미치는 질화처리의 영향

Fig 6은 SNCM강의 소둔재 및 질화재의 a-N 선도이며, Fig 7은 소둔재 및 질화재의 피로균열 전파속도와 응력확대계수족과의 관계를 나타낸 것이다.

Fig 6에서 질화재의 균열발생 및 과단수명이 소둔재에 비하여 길어지고 있으며, 곡선의 기울기도 완만하다. Fig 7로부터 질화재의 피로균열전파속도가 소둔재에 비하여 현저히 작음을 알 수 있다.

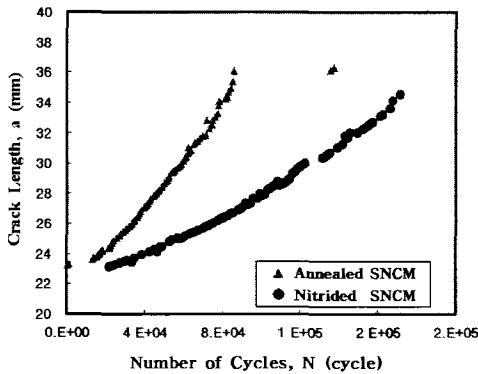


Fig. 6 a-N curves

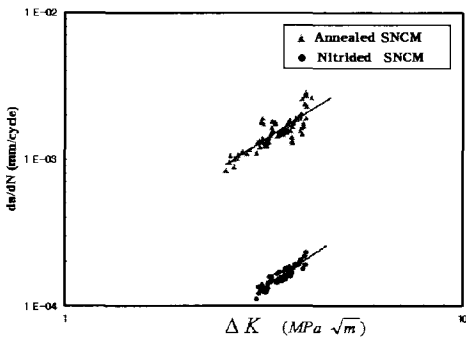


Fig. 7 Crack growth rate versus stress intensity factor range

따라서, 질화처리에 의한 표면 질화층의 형성이 전체적인 균열전파 억제효과를 갖는다고 할 수 있다. 안정전파구간을 직선근사한 Paris의 식은 다음과 같다.

소둔재에서

$$\frac{da}{dN} = 0.0002 \Delta K^{1.73} \quad (2)$$

질화재에서

$$\frac{da}{dN} = 0.000015 \Delta K^{1.86} \quad (3)$$

Paris 지수값은 1.73과 1.86으로 큰 차이가 없는데, 동일재료에서는 이 값이 같다는 점을 감안하면, 소둔재와 질화재의 차이는 수십 μm 의 표면 질화층만 제외하고는 두 재료는 동일재료이기 때문이다.

Fig. 7로부터, 소둔재 및 질화재의 하한계응력확

대계수폭(ΔK_{th})은 각각 $2.54\text{MPa m}^{1/2}$, $3.04\text{MPa m}^{1/2}$ 이다. 즉, 질화에 의하여 하한계 균열전파에 대한 재료 고유의 저항이 향상됨을 알 수 있다.

이상의 결과와, 질화강과 상반된 결과를 보이는 질화티탄의 경우를 대비하여 보면 다음과 같다. 각각을 소둔재와 비교할 때,

	피로한도	피로균열 전파속도
질화강	상승	감소
질화티탄	하강	증가

그러므로 질화처리한 질화강에서 피로균열전파속도의 감소를 통하여 피로한도의 개선에 이바지하고 있음을 알 수 있다. 이외에도 피로한도의 개선에 대한 여러 가지 요인이 있을 수 있으며, 이 사항은 향후 연구과제라고 생각된다.

4. 결론

소둔재의 피로한도는 310MPa , 질화재의 피로한도는 410MPa 로, 질화에 의하여 약 30% 상승하고 있어, 질화처리가 질화강의 피로한도를 개선시킨다는 일반적인 확설과 부합하였다.

질화재의 슬립은 질화층 표면에 타원형상으로 집적되어, 전체적으로 균일한 질소화합물층의 가장 취약한 일부분을 골라 집중적으로 형성되는 것이 특징이다. 이는 균일한 질소화합물층의 슬립저항 증가로 인하여, 슬립 발생부위가 지극히 제한되고 있음을 보여주고 있다.

질화재의 균열발생 및 파단수명이 소둔재에 비하여 길어지며, 피로균열전파속도가 소둔재에 비하여 현저히 작다. 따라서, 질화처리에 의한 표면 질화층의 형성이 전체적인 균열전파 억제효과를 갖는다. 소둔재 및 질화재의 하한계응력확대계수폭(ΔK_{th})은 각각 $2.54\text{MPa m}^{1/2}$, $3.04\text{MPa m}^{1/2}$ 이다. 즉, 질화에 의하여 하한계 균열전파에 대한 재료고유의 저항이 향상된다. 그러므로, 질화처리한 질화강에서, 피로균열전파속도의 감소 및 ΔK_{th} 의 상승이 피로한도 개선의 요인이 되고 있다.

참고 문헌

- [1] 中村 宏 외 3명, 材料, 제21권, 제231호, pp.1046-1051, 1972.
- [2] 寺澤正男 외 2명, 金屬, pp.50-55, 1977.
- [3] 김형준, "가스질화 및 연질화 처리한 Cr-Mo 강의 건식 미끄럼 마모 거동", 대한금속재료학회지, 제32권 제12호, pp.1515-1523, 1994.

- [4] 나영상, 박노광, “질화강의 고온 내마모 거동”, 대한금속재료학회지, 제34권 제3호, pp 342-349, 1996.
- [5] 김민건, 이상호, 신동진, “과피기구의 비교를 통한 질화강과 질화처리한 티타늄의 피로특성”, 대한금속재료학회지, 제40권 제6호, pp 661-666, 2002
- [6] 戸梶恵郎 외 2명, “純チタンの疲勞舉動に及ぼすカス窒化の影響”, 日本機械學會論文集(A편), 57권 534호, pp 268-273, 1991-2.
- [7] 戸梶恵郎 외 3명, “Ti-6Al-4V合金の疲勞舉動に及ぼすカス窒化の影響”, 日本機械學會論文集(A편), 57권 542호, pp 2293-2299, 1991-10
- [8] 森田, 清水, “窒化により表面改質した純チタンの疲勞特性”, 日本機械學會論文集, 58-546, pp 172~177, 1992.
- [9] 森田, 清水, “窒化した純チタンの疲勞強度に及ぼす表面硬化層の影響”, 日本機械學會論文集, 59-563, pp 1650~1655, 1993.