

SNCM강의 피로균열의 발생 및 전파속도에 미치는 질화처리의 영향

김민건 · 임복규

강원대학교 공과대학 기계메카트로닉스공학부

Effect of Nitriding on Fatigue Crack Initiation and Growth Rate in Ni-Cr-Mo Steel

Kim, Min-Gun Lim, Bok-Kyu

Dept. of Mechanical Engineering, Kangwon National University Kangwon, 200-701, Korea

Abstract Effect of nitriding on fatigue crack initiation and growth rate has been studied in Ni-Cr-Mo steel. Specimens were nitrided at 860°C for 15 hr. The fatigue limit of nitrided specimens were superior to those 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 by comparing with those of annealed specimens. It was found that the crack growth rate was markedly decreased and the threshold stress intensity factor range was improved by nitriding. 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.

(Received September 1, 2003)

Key words: Fatigue, Nitriding, Fatigue crack growth rate, Ni-Cr-Mo steel

1. 서 론

공업의 발전과 더불어 산업구조물의 대형화는 물론 새로운 최적 설계개념의 도입 및 신소재의 개발과 각종 표면처리기술의 개발에도 불구하고 원자력 구조물의 안전사고, 교량 및 항공기의 파괴사고 등이 끊이지 않고 있다. 이들 사고 원인의 대부분은 피로파괴에 의한 사고로 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 강재속에 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 증대시킴에 의해서 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-8 질화강의 질화에 따른 피로한도의 상승을 피로균열의 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 저하하는 특이한 거동을 보이는 데, 대부분의 연구는 이 원인을 규명하는 데 집중되어 있다[8, 9]. 티탄은 질화에 의하여 피로한도가 저하함은 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 SNCM-8으로, 그 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 피로균열전파용 시험편의 형상은 Fig. 1과 같은 CT시험편이다. CT 시험편은 질화처리 후 노치를 가공하여, 노치로 부터의 균열발생단계가 아닌 전파단계에서만 질화층이 영향을 미치도록 하였다.

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. 유동화를 위해서 질소를 같이 사용했으며, 암모니아와 질소의 공급속도는 0.8 l/min 이다.

유동상을 이용한 열처리기술은 염욕로의 공해문제

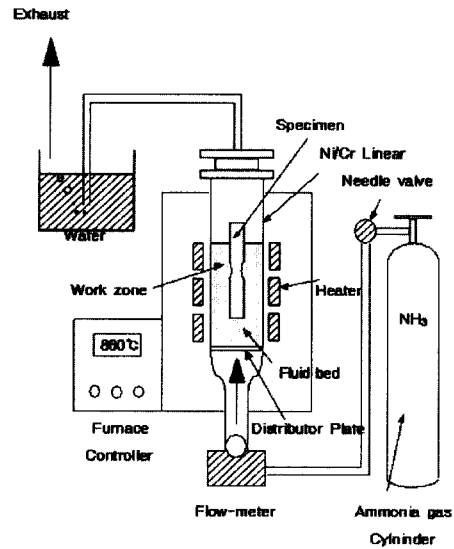


Fig. 2. Shape of fluidized bed furnace.

가 심각하게 대두됨으로써 구미 각국에서 실용화된 것으로, 질화, 침탄과 같은 표면처리분야에 응용이 시도되고 있다.

860°C, 15시간 특수 고온 질화처리한 SNCM-8강의 질화층의 형상을 Fig. 3에 제시하였다. 질화 화합물층은 표면으로부터 약 0.1 mm의 두께로 형성되어 있음을 확인할 수 있다.

2.3. 피로시험 및 응력확대계수 평가

피로균열전파 특성을 평가하기 위한 피로시험은 최대용량 100 kN의 유압서어보식 피로시험기를 사용하였다. 시험은 실온대기중에서 응력반복속도 20Hz, 응력비(R) 0.1의 정현파로 하였다. 본 실험에 앞서 모든 시험편에 2 mm의 예비균열을 도입하였다.

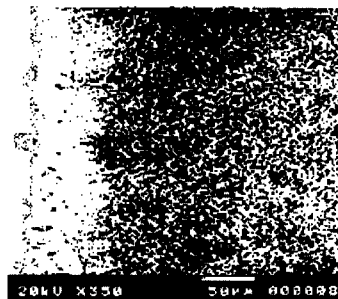


Fig. 3. Nitrided compound formed at surface layer.

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 σ_B (MPa) | Yield strength σ_Y (MPa) | Elongation δ (%) | Micro Vickers hardness (Hv) |
|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 735 | 588 | 15 | 270 |

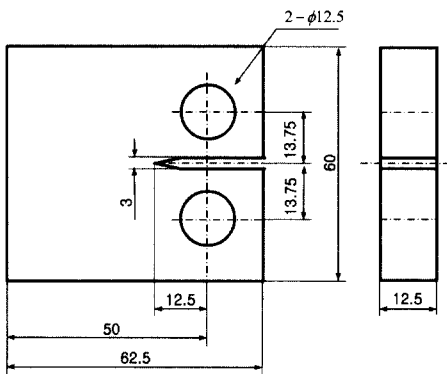


Fig. 1. Shape and dimensions of CT specimen.

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

응력확대계수폭 ΔK 는 다음 식을 이용하여 계산하였다. 피로한도는 ϕ_9 , R20의 환봉시험편을 사용하여 회전굽힘피로시험으로 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 질화처리한 SNCM강의 피로균열 발생 특성

Fig. 4에 860°C, 15시간 어닐링처리한 SNCM-8 어닐링재와 질화재의 S-N관계를 나타내었다. S-N관계를 구하는데 사용된 시험편은 통상적인 환봉형상이고, 질화처리조건도 CT시험편과 동일하다.

어닐링재의 피로한도는 310 MPa, 질화재의 피로한도는 410 MPa로, 질화에 의하여 약30% 상승하

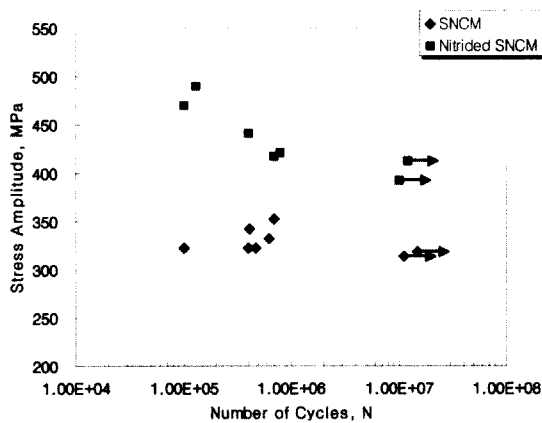


Fig. 4. S-N curves of annealed and nitrided specimens.

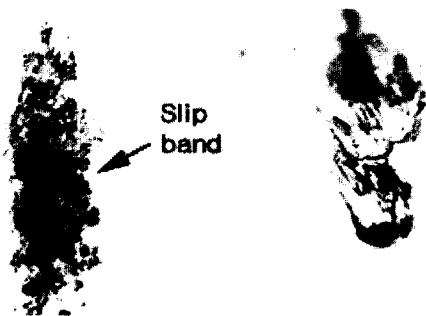


Fig. 5. Slip band and micro crack initiation at surface.

고 있어, 질화처리가 질화강의 피로한도를 개선시킨다는 일반적인 학설과 부합하고 있다. 이러한 피로한도의 상승은 표면 질화경화층의 슬립저항이 증대된 결과로 알려져 있다.

질화재에 발생한 슬립과 슬립내부에 발생한 미소균열을 Fig. 5의 (a), (b)에 나타내었다. 이 사진은 S-N곡선을 작성하는 데 사용되었던 환봉형 시험편의 최소단면부의 표면에서 촬영한 것이다.

(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 선택하여 집중적으로 슬립이 형성되는 것이 특징이다. 이는 균일한 질소화합물층의 슬립저항 증가로 인하여, 슬립발생부위가 지극히 제한되고 있음을 보여주고 있다.

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

3.2. 피로균열전파속도에 미치는 질화처리 의 영향

Fig. 6은 SNCM-8강의 어닐링재 및 질화재의 a-N 선도이며, Fig. 7은 어닐링재 및 질화재의 피로균열전파속도와 응력확대계수폭과의 관계를 나타낸 것이다.

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

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

어닐링재에서 $da/dN=0.0002\Delta K^{1.73}$ 질화재에서 $da/dN=0.000015\Delta K^{1.86}$ 이다.

Paris지수값이 1.73과 1.86으로 큰 차이가 없는 것

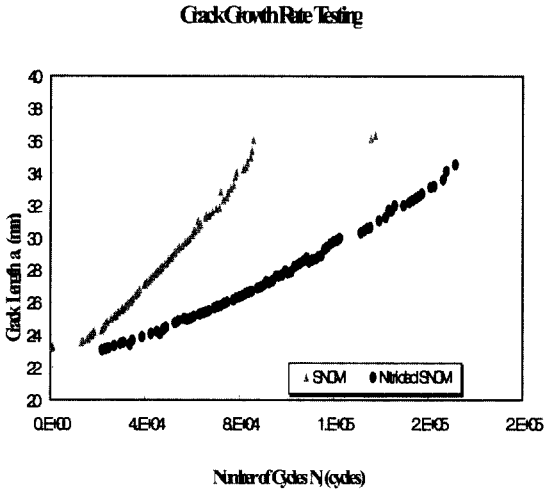


Fig. 6. a-N curves.

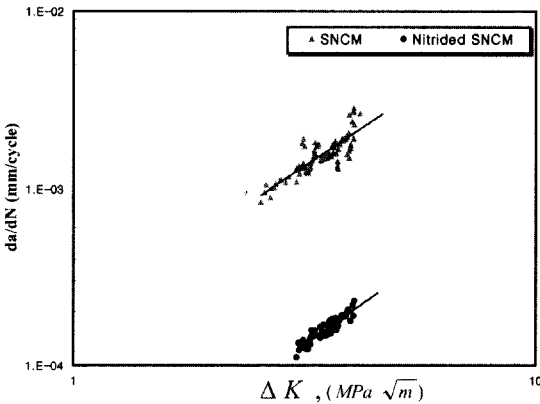


Fig. 7. Crack growth rate versus stress intensity factor range.

은, 일반적으로 동일재료에서는 이 값이 같다는 점을 감안하면, 어닐링재와 질화재의 차이는 수십미크론의 표면 질화층만 제외하고는 기지조직이 서로 같은 동일성 재료이기 때문으로 이해된다.

Fig. 7로 부터, 어닐링재 및 질화재의 하한계응력 확대계수폭(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 향상됨을 알 수 있다.

이상의 결과와, 질화강과 상반된 결과를 보이는 질화티탄의 경우를 대비하여 보면 Table 3과 같다. 티탄은 질화에 의하여 피로한도가 낮아지고 균열전파속도는 증가한다고 조사되어 있다[5][7,8]. 각각을 어닐

Table 3. Comparison of fatigue limit and fatigue crack growth rate.

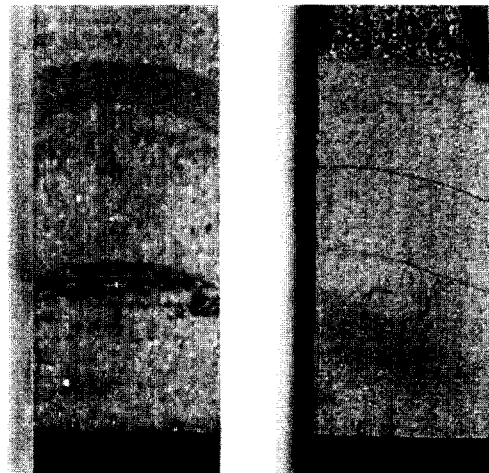
| | 피로한도 | 피로균열 전파속도 |
|------|------|-----------|
| 질화강 | 상승 | 감소 |
| 질화티탄 | 하강 | 증가 |

링재와 비교할 때, 질화강과 질화티탄의 피로한도와 균열전파속도는 Table 3과 같다.

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

3.3. 피로균열전파속도에 미치는 표면질화 층의 영향

Fig. 8은 SNCM-8강의 어닐링재 및 질화재의 거시적 파면이고, Fig. 9는 미시적 파면이다. 비치마크 (beach mark)법에 의하여 형성된 피로균열팁의 형상을 보면, (a)의 어닐링재에서는 전형적인 좌우대칭의 타원의 일부형상을 하고 있으나, (b)의 질화재에서는 좌우대칭이 아닌 모습을 띄고 있다. 즉, 오른쪽의 균열팁이 왼쪽에 비하여 그 전파가 지연된 흔적을 보여주고 있다. 전파지연의 원인을 밝히기 위하여, 오른쪽 균열팁 부근을 확대촬영한 것이 Fig. 9이다.



(a) Annealed specimen (b) Nitrided Specimen

Fig. 8. Shape of crack tip formed by beach mark method.

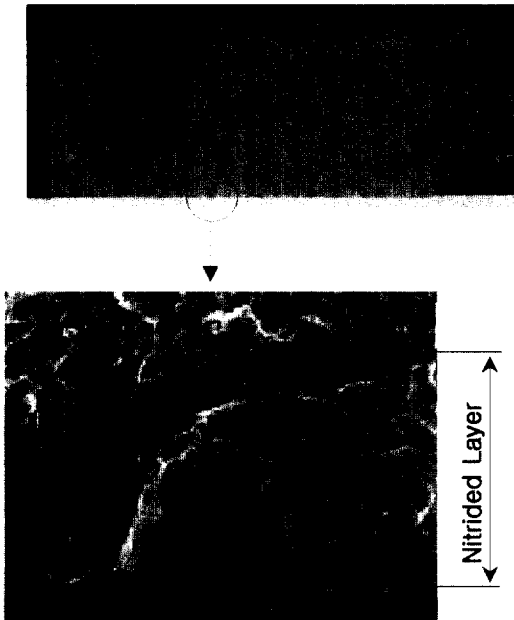


Fig. 9. Shape of crack tip obstructed by nitrided layer.

그림은 질화층으로 판단되는 조직(취성 스트라이에이션의 정도로 판단)에 의하여 균열이 저지당했던 증거를 보여주고 있다. 비치마크를 형성시킨 시점에서의 균열팁의 형상으로, 균열은 질화층에 의하여 그 전파가 모재부의 선행균열에 비하여 지연되었음이 명백하다. 따라서, Fig. 7에 나타난 어닐링재 및 질화재의 피로균열전파속도의 차는 이 사실에 주로 기인한다고 볼 수 있다. 즉, 질화처리는 표면질화경화층의 균열전파에 대한 억제력을 통해서 SNCM-8강의 피로균열전파속도를 감소시킴을 알 수 있다.

4. 결 론

어닐링재의 피로한도는 310 MPa, 질화재의 피로한도는 410 MPa로, 질화에 의하여 약30 % 상승하고 있어, 질화처리가 질화강의 피로한도를 개선시킨다는 일반적인 학설과 부합하였다.

질화재의 슬립은 질화층 표면에 타원형상으로 집적

되어, 전체적으로 균일한 질소화합물층의 가장 취약한 일부분을 골라 집중적으로 형성되는 것이 특징이다. 이는 균일한 질소화합물층의 슬립저항증가로 인하여, 슬립발생부위가 지극히 제한되고 있음을 보여주고 있다.

질화재의 균열발생 및 파단수명이 어닐링재에 비하여 길어지며, 피로균열전파속도가 어닐링재에 비하여 현저히 작다. 따라서 질화처리에 의한 표면 질화층의 형성이 전체적인 균열전파 억제효과를 갖는다.

어닐링재 및 질화재의 하한계응력확대계수폭(ΔK_{th})은 각각 2.54 MPa m^{1/2}, 3.04 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.

참 고 문 헌

1. 中村 宏, 材料, 제21권, 제231호, pp.1046 -1051, 1972.
2. 寺澤正男, 金屬, pp.50-55, 1977.
3. 김형준, “가스질화 및 연질화 처리한 Cr-Mo강의 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, “파괴기구의 비교를 통한 질화강과 질화처리한 티타늄의 피로특성”, 대한금속재료학회지, 제40권 제6호, pp.661-666, 2002.
6. 戶梶惠郎, 小川武史, 柴田英明, “純チタンの疲労挙動に及ぼすガス窒化の影響”, 日本機械學會論文集(A편), 57권 534호, pp.268-273, 1991-2.
7. 戶梶惠郎, 小川武史, 柴田英明, 神谷征典, “Ti-6Al-4V合金の疲労挙動に及ぼすガス窒化の影響”, 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労特性”, 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労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.