

마하피닝 처리에 의한 기계구조용 합금강의 피로균열전파 지연효과

Effect of mach peening treatment on fatigue crack growth retardation in structural steel alloy

김민건* 임복규** 박홍기*** 황중각**
Kim, Min-Gun Lim, Bok-Kyu Park, Hong-Ki Hwang, Jung-Gak

Abstract

Mach peening treatment is one of the various kinds of techniques to improve the fatigue properties. The mach peening process gives high-level work hardening and compressive residual stress near the surface layer, improving the fatigue strength. In addition, this treatment reduces slip bands that initiate the fatigue cracks near the surface. During impingement, a plastic indentation surrounded by a plastic zone is formed. Mach peening treatment characteristic is less energy consumption and is an environmental friendly processing methods that is not accompanied by pollution. It is machining process that can prevent fatigue fracture beforehand in structure using already as well as process of production. The test results showed that fatigue crack propagation delay appeared by drilling type 43%, mach peening type 110%.

키워드 : 피로균열전파지연, 피로수명, 압축잔류응력, 쇼트피닝, 마하피닝,
Keywords : Fatigue crack growth retardation, Fatigue life, Compression residual stress, Shot peening, Mach peening

1. 서론

기계·구조물에서 발생하는 대부분의 파괴사고는 반복적인 하중에 의한 피로파괴이다. 특히 기계 및 자동차 부품은 반복적인 하중을 받고 있다. 이러한 반복하중은 표면에서 균열을 발생시키고 발생된 균열을 더욱 진전시켜 결국 파괴의 원인으로 작용하게 된다. 현대의 산업기술은 고강도 및 경량화 요구에 따른 부품의 성능과 수명연장에 관한

문제에 봉착하게 되었고 이러한 문제점을 해결하기 위해 금속표면에 열처리와 각종 물리적, 화학적 표면처리가 이용되고 있다[1-5]. 그 중의 하나가 마하피닝이다. 쇼트피닝의 일종인 마하피닝은 에너지 소비가 적으며, 공해가 없는 친환경 가공방법이다. 또한, 금속 표면에는 높은 압축잔류응력과 내부에는 높은 연성을 유지할 수 있어 피로하중을 받는 부품의 피로강도 및 피로수명을 향상시킬 수 있다. 특히 제품 생산과정뿐만 아니라 이미 사용 중인 구조물에서도 피로파괴를 미연에 방지할 수 있는 가공법이다[6]. 발전소의 대형터빈과 같은 기계구조물에서 미소균열이 발생하면 균열성장을 지연시키기 위해 균열선단을 천공하여 응력집중을 분산시키는 방법을 흔히 사용하고 있다. 이러한 관점에서 본 저자는 가혹한 환경에서 부품의 피로수

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수
** 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 박사과정
*** 강릉정보공업고등학교 자동차과 교사

명향상을 극대화시킬 수 있는 고성능 마하피닝 장비를 개발하여 피로수명에 미치는 영향을 보고한 바 있다[7]. 본 연구는 기계구조용 합금강에 입자의 인공균열을 도입하여 균열선단에 천공과 마하피닝을 하여 피로균열전파 지연에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

2. 이론적 배경

마하피닝은 금속표면에 수많은 쇼트볼(shot ball)이라는 강구를 초음속으로 금속 표면에 투사하여 금속표면을 햄머링(hammering)하는 냉간가공이다. 마하피닝의 가공방법은 쇼트피닝과 유사하지만, 쇼트볼이 투사되는 속도에 큰 차이가 있다. 쇼트피닝은 쇼트볼 투사속도가 최대 70% 내외이지만, 마하피닝은 초음속 이상으로 쇼트볼을 투사할 수 있다. 초음속에 의한 높은 에너지의 쇼트볼은 순간적으로 재료의 표면에 소성변형을 주고 표면에서 이탈한다. Fig. 1과 같이 쇼트볼과 충돌된 금속 표면층은 요철이 발생하며 표면에 얇은 소성변형 층을 형성하며 탄·소성 층의 경계를 형성하게 된다. 이때 늘어난 표면층은 늘어나기 전의 상태로 유지

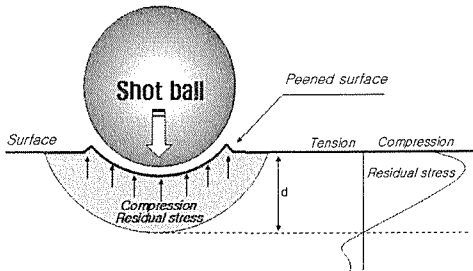


Fig. 1 Schematic of compressive residual stress created by a single shot peen dimple.

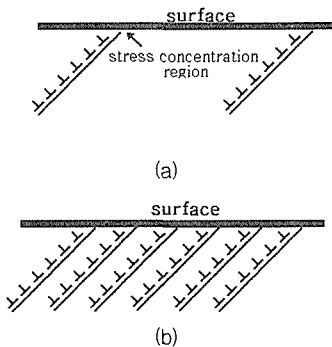


Fig. 2 Material surface (a) Unpeened surface (b) peened surface.

하려는 힘이 작용하게 되어 표면은 압축잔류응력(compressive residual stress), 내부는 인장잔류응력(tensile residual stress)을 갖고 평형(equilibrium)을 이루게 된다[8].

표면에 형성된 압축잔류응력은 반복인장이 작용할 때 점점 상쇄되어 압축잔류응력이 모두 사라지게 될 때까지 피로수명과 피로강도 증가에 크게 기여하게 된다. 압축잔류응력의 분포 범위는 표면적하에서 깊게 형성될수록 피로에 의한 균열 억지력을 더욱 향상시킬 수 있다. 쇼트볼이 금속표면에 충돌 후 발생하는 압축잔류응력 층의 크기는 쇼트볼의 속도와 경도에 따라 다양한 분포 층을 형성한다. 일반 쇼트피닝은 표면에서 0.1~0.4mm 정도 분포되지만, 마하피닝은 1mm내외까지 분포되어 피로수명을 더욱 증가시킨다. 마하피닝에 의해 피로수명이 향상되는 또 다른 이유는 Fig. 2와 같이 금속표면에 균일한 슬립밴드(slip band)를 형성하여 응력집중을 감소시킨다는 점이다. Fig. 2(a)와 같이 마하피닝 가공전의 금속표면 조직은 슬립밴

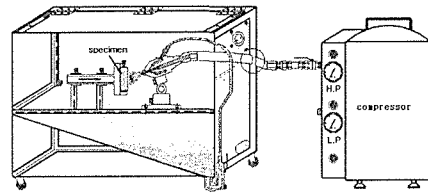
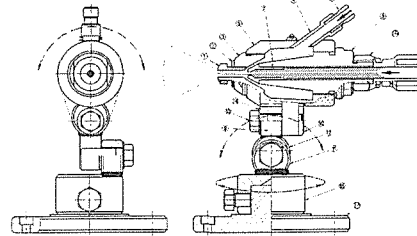
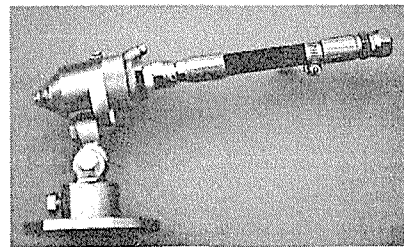


Fig. 3 The structure of mach peening system.



(a) detailed drawing.



(b) actual nozzle

Fig. 4 Special nozzle for mach peening.

드가 상대적으로 작아 응력집중의 원인이 되어 초기 균열발생의 기점부로 작용하여 피로수명이 짧아진다.

그러나 마하피닝 가공을 하게 되면 Fig. 2(b)와 같이 표면에 소성변형으로 인한 균일한 슬립밴드가 형성된다. 균일한 슬립밴드는 반복적인 외력을 받아도 응력을 분산시킨다. 따라서 초기의 피로균열 발생이 지연됨으로 인해 피로수명이 증가된다.

3. 실험방법

3.1 마하피닝 장비제작

마하피닝 장비의 구성은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 본체와 압축기로 구분된다. 본체 내부에 있는 Fig. 4의 노즐부분은 쇼트볼과 고압의 압축공기가 혼합되어 쇼트볼이 초음속으로 투사되도록 설계되었다. Fig. 4(a)의 부품 ①은 노즐출구로 직경에 따라 15종으로 구성되어 있으며, 본 시험에서는 직경 4mm의 노즐을 사용하였다. 시험편과 노즐사이의 거리와 투사각은 간단히 조절할 수 있도록 설계되었으며, 시험편의 형상에 따라 쇼트볼이 시험편 표면에 균일하게 투사되도록 고안되었다.

3.2 재료 및 시험편 제작

본 연구에 사용한 재료는 기계구조용 합금강인 SNCM-8로, 그 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 피로균열 전파용 시험편은 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 예비균열만 도입한 처녀제와 Fig. 5(b)의 예비균열 선단에 $\varnothing 5$ 의 드릴 가공한 천공제, 그리고 Fig. 5(c)의 두께 5mm의 마하피닝제로 준비하였다.

3.3 마하피닝 가공 조건

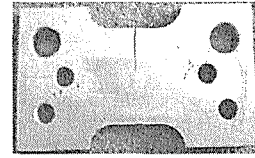
Table 1 Chemical compositions (wt%)

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

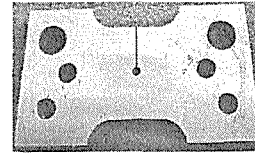
Table 2 Mechanical properties of SNCM

σ_Y	σ_{TS}	δ	Hv
588	735	15	270

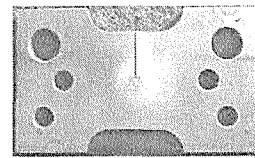
σ_Y : Yield strength(MPa)
 σ_{TS} : Tensile strength(MPa)
 δ : Elongation(%)
 H_v : Micro vickers hardness



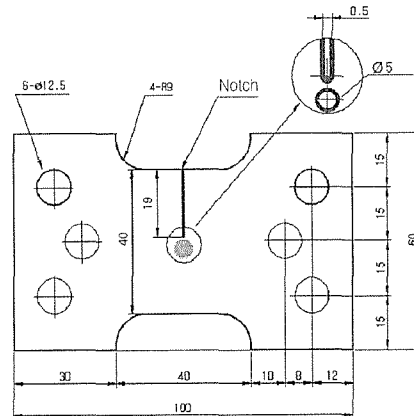
(a) normal.



(b) drilling.



(c) mach peening.



(d) schematic of specimen. (t=5mm)

Fig. 5 Specimen configuration for fatigue test(mm).

시험편의 표면에 높은 압축잔류응력을 형성하기 위해서 Table 3과 같은 조건으로 마하피닝 처리를 하였다. 높은 운동에너지를 가진 쇼트볼이 금속표면을 타격하면 표면에는 약간의 자국(dent)이 형성되고 표면은 반경방향으로 늘어나서(stretching) 결국 금속표면에 전이(transformation)현상이 생긴다. 이 때 전이되는 에너지는 투사속도, 쇼트볼의 경도, 쇼트볼과 표면과의 입사각(impact angle)에 영향을 받는다. 이때 쇼트볼의 운동에너지 크기보다는 전이정도가 중요한 요소로 작용한다. 본 실험에서는 쇼트볼의 투사속도를 400m/s, 투사각은 쇼트볼이 시험편 표면에 강타하여 발생하는 충격에너지를 최대한 흡수할 수 있도록 시험편을 향해 90°의

각도로 설정하였다. 그리고 표면조도 향상과 극표면에서의 압축잔류응력을 높이기 위해 0.2mm의 작은 쇼트볼을 사용하였다.

3.4 잔류응력 측정

마하피닝 가공에 의해 형성된 압축잔류응력 분포를 측정하기 위해서 X-선 잔류응력 측정 장치를 사용하였다. 표면직하의 압축잔류응력 측정은 전해연마로 200 μ m씩 연마하여 1000 μ m까지 반복 측정하였다. 측정조건은 Table 4와 같다.

Table 4 Measuring condition of residual stress.

X-Ray diffraction	Condition	
	X-Ray source	Target
	Voltage	30kv
	Current	10mA
θ	0°, 15°, 30°, 45°	
2 θ	140°~170°	
Diffraction	Scintillation Counter	

3.5 피로시험

피로균열전파 특성을 평가하기 위한 피로 시험기는 Fig. 6과 같이 최대용량 100 kN의 유압서보식 피로 시험기를 사용하였다. 시험은 실온 대기 중에서 응력 반복속도 20Hz, 응력비(stress ratio, R) 0.5, 평균하중 2,250N, 정현파 조건으로 모든 시험편에 19mm의 예비균열을 도입하여 피로시험을 실시했다.

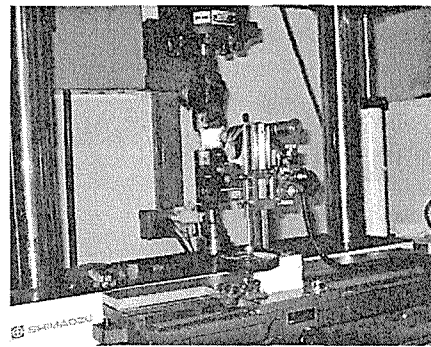


Fig. 6 Fatigue testing machine.

4. 실험결과

4.1 피로균열전파 지연거동

Fig. 7은 처너제와 천공제, 마하피닝제의 피로균열전파 실험으로 얻어진 a-N선도이다. 처너제의 경우 균열전파지연구간은 나타나지 않았다. 피로시험 초기부터 예리한 노치(notch)에서 응력집중에 기인하여 비교적 일정한 속도로 균열이 전파됨을 관찰할 수 있다. 반면 천공제는 피로균열 선단에서 응력집중 완화에 기인하여 2.8*10⁵cycle까지 균열전파 지연 효과가 나타났으나, 2.8*10⁵cycle이후 천공된 부분에서도 균열이 발생되어 급속한 성장으로 파단되었다. 마하피닝제는 4.8*10⁵cycle까지 균열전파 지연효과가 나타났으며, 이후 마하피닝 영향부(25mm)를 지나서는 균열의 급속한 성장으로 파단되었다. 균열전파 지연거동을 비교 관찰하면 처너제를 기준으로 천공제는 43%, 마하피닝제는 110%의 균열전파

지연효과가 나타났다. Fig. 8은 파단된 시험편의 균열진행방향을 주사형전자현미경(SEM)으로 촬영한 것이다. 처너제(Fig. 8(a))의 경우 균열 성장방향에 따라 균열 선단에서 균열이 균일하게 성장하고 있는 반면 마하피닝제(Fig. 8(b))는 중심부에서 마하피닝 처리된 표면부로 기울어진 스트라이에이션(striation)을 관찰할 수 있다. 이것은 시험편 중심부에 비해 마하피닝 처리된 표면부에서 스트라이에이션 기울기만큼 균열성장이 지연되었음을 의미한다. Fig. 9는 X-선 잔류응력측정기로 마하피닝제의 압축잔류응력을 측정된 결과이다. 일반 쇼트피닝의 경우 압축잔류응력은 100~400 μ m까지 분포하는 반면 마하피닝의 경우 1000 μ m 내외까지 분포한다. Fig. 8(b)은 Fig. 9의 높은 압축잔류응력의 영향으로 나타난 것으로 생각된다. 즉, 마하피닝에 의한 균열전파지연 효과가 높게 나타난 원인은 극표면에 생성된 압축잔류응력이 균열선단의 소성영역을 구속하여 피로균열 전파가 지연된 것으로 판단된다.

Table 3 Conditions of mach peening.

Content	Condition
Shot ball diameter (mm)	0.2mm
Shot ball velocity (m/s)	400m/s
Air pressure (atm)	70atm
Exposure Time (s)	180sec
Stand-off distance (mm)	10mm
Project angle	90°
Nozzle diameter (mm)	4mm

4. 결론

본 연구는 초음속 마하피닝 장비를 개발하여 마하피닝 가공에 따른 피로균열전파 지연효과에 관

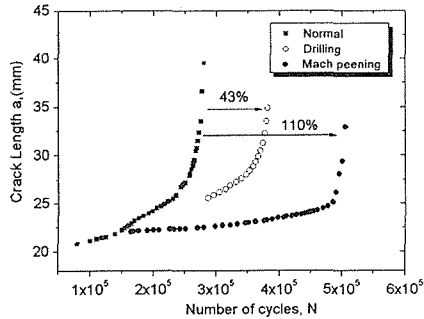


Fig. 7 Comparison of fatigue life by normal, drilling and mach peening treatment.

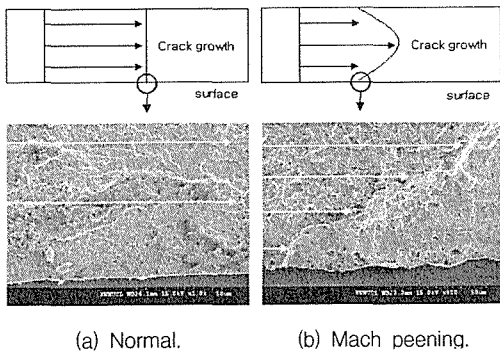


Fig. 8 Diagram showing typical fatigue fracture surface appearance for mach peening condition.

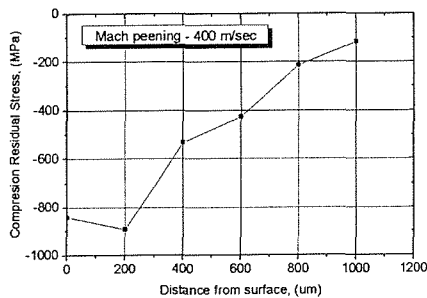


Fig. 9 Compressive Residual Stress Distribution of Specimen Surface.

한 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

[1] 피로균열전파 지연효과는 처너제를 기준으로 천공제는 43%, 마하피닝제는 110%의 균열전파 지연효과가 나타났다.

[2] 천공제를 기준으로 마하피닝제의 피로균열 지연효과는 67% 높게 나타났다.

[3] 마하피닝 가공에 의한 압축잔류응력은 최고 표면직하 20 μ m에서 893MPa로 나타났고, 범위는 표면직하 1000 μ m까지 압축잔류응력이 분포되었다.

[4] 마하피닝에 의한 피로균열전파 지연 원인은 시험편 극표면에 생성된 압축잔류응력이 균열선단에서 소성영역을 구속하여 피로균열 전파가 지연된 것으로 판단된다.

[5] 마하피닝 기술을 산업구조물 및 자동차 산업 등에 적용한다면 제품의 경량화 및 피로수명 향상에 크게 활용될 것으로 판단한다.

참고문헌

- [1] M. S. Baxa, Y. A. Chang and C. H. Buck, "Effects of NaCl and Shot Peening on Corrosion Fatigue of AISI 6150 Steel," *Met. Trans.* 9A, pp.1141, 1978.
- [2] G. S. Was and R. M. Pelloux, "The Effect of Shot Peening on The Fatigue Behavior of Alloy 7075-T6," *Met. Trans.* 10A, pp. 665, 1979.
- [3] O. Vohringer, "Changes in the State of the Material by Shot Peening," *Shot Peening*, DGM, pp. 185, 1987.
- [4] W. B. Koster, "Effect of Residual Stress on Fatigue of Structural Alloys," *Practical Applications of Residual Stress Technol, Proc. of the Third Int. Conf*, Indianapolis, IN, USA. pp. 1, 1991.
- [5] L. Wanger, "Mechanical Surface Treatments on Titanium, Aluminium and Magnesium Alloys," *Materials Science and Engineering A* 263, pp. 210.
- [6] S. K. Cheong, S. H. Lee and S. C. Chung, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," *Transactions of the KSME A*, Vol.25, No. 10. pp. 1590-1596, 2001.
- [7] M. G. Kim, B. K. Lim, J. G. Hwang, D. Y. Kim, "A study on the development of Mach peening for Prolonging fatigue life a Structure," *Proc. of KSME*, pp.117-122, 2005.
- [8] Sharma, M. C, "Assesment of Over peening by time on Fatigue behavior of Spring Steel," *Proc. of International Fatigue Congress*, pp.1397-1402, 1996.