

쇼트피닝공공에 의한 금속재료의 부식피로수명 개선

Improvement of the Corrosion Fatigue Life of Metal Material by Shot Peening

남지현*, 구대림**, 이국진*, 이동선*, 정성근***

Ji-Hyun Nam, Dae-Lim Kou, Kook-Jin Lee, Dong-Sun Lee and Seong-Kyun Cheong

ABSTRACT

Corrosion highly affects to reduce lifetime and performance of machinery metallic components. The effects of shot peening on the fatigue life of metal material under corrosive environment are investigated in this paper. Experimental results show that the fatigue limit of shot peened specimen increases about 52%. That means the fatigue life of metallic components is highly extended by shot peening. The corrosion greatly reduces the fatigue strength depending on the corrosive condition from one week up to one year. In case of shot peened specimen, the corrosion does not reduce the fatigue strength and fatigue life up to six months. It means that shot peening has superior effectiveness to reduce the influence of corrosion to the metallic materials.

1. 서 론

최근 우리나라는 300Km/hr를 질주하는 고속전철건설사업을 마무리하여 전국을 만리길 생활권으로 이끌고 있는데, 이는 걸림된 10만 여개의 작은 부품소재 하나하나가 신뢰할 수 있는 강도, 경도 및 수명이 보장되어 고장이 발생치 않음으로서 가능해진 것이다. 산업기술의 발달로 고강도, 경량화 및 고차원의 설계기술이 요구되고 있는 현실 속에서 주위환경의 변화에 의해 부식(corrosion)에 의한 영향도 무시할 수 없는 주요 인자가 되었다. 연간 부식으로 인한 경제적 손실이 무려 GNP의 3~ 4%나 된다는 통계자료가 이를 잘 증명해 주고 있다.⁽¹⁾ 부식으로 인한 피해의 예는 전국의 상수도 배관이 부식되어 누수율이 무려 40%에 이른다는 것이 그 대표적이라 할 수 있으며, 이를 외에도 각종 배관, 항만시설 및 콘크리트 구조물의 철근 등에서 부식문제가 광범위하게 나타나고 있다.

일반적으로 구조물이 반복하중을 받으면 피로파괴를 일으킨다. 만일 이 구조물이 부식환경 속에 있게 되면 분할성 분위기에서보다 빨리 파괴에 이르게 된다. 이러한 현상을 흔히 부식피로라 하

* 서울산업대학교 산업대학원, 학생회원
** 산업자원부 산업표준개발과
*** 교수직자, 서울산업대학교 기계공학과 교수

때 부식피로에 의한 재료의 손상은 피로 및 부식에 의한 각각의 손상을 단순 중첩시킨 것보다 훨씬 크고 빠르기 때문에, 산업현장이나 엔지니어링 분야에서 예기치 못한 파손을 초래할 수 있다.⁽²⁾ 특히 금속의 부식 피로수명은 금속의 표면상태에서 더 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있는데⁽³⁾ 기계구조물의 설계시 부식피로파괴를 고려하여 설계해야 하며, 쇼트피닝 가공은 부식에 대한 저항력을 증가시켜 부품의 피로수명에도 우수한 효과를 주는 기술로도 잘 알려져 있다.^(4,5)

본 논문에서는 쇼트피닝 가공이 Al 7075-T6의 부식피로수명에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여 쇼트피닝 가공한 시험편과 가공하지 않은 시험편에 대해 부식시간에 따른 피로수명과의 관계를 회전굽힘 피로시험을 통하여 비교해 보고자 한다.

2. 관련이론

2.1 쇼트피닝 가공이론

쇼트피닝 가공은 쇼트볼이 금속 표면에 고속 충돌하면서 이때 쇼트볼의 운동에너지가 순간적으로 재료의 표면에 소성변형(plastic deformation)을 주고 표면에서 이탈한다. 쇼트볼과 충돌 후 표면층은 요철이 발생하며 표면에 얇은 소성 변형층이 형성되어 탄소침투의 경계를 형성한다. 이때 늘어난 표면층을 늘어나기 전의 상태로 유지하려는 힘이 작용하게 되어 표면은 잔류압축응력, 내부는 인장응력을 갖고 평형을 이루게 된다.⁽⁶⁾ 쇼트볼의 충돌 후 압축응력이 잔류하게 되는데 응력의 크기는 크지만 응력은 가공조건에 따라 약간의 차이는 있으며, 일반적으로 표면에서 깊이 0.1~0.25mm 정도에 분포되고 특수한 경우 0.8mm까지 분포 층을 형성시킬 수도 있다. 이러한 쇼트피닝 가공으로 재료의 표면에 압축잔류응력을 남게 함으로써 반복인장이 작용할 때 압축잔류응력은 점점 상쇄되어 압축잔류응력이 사라지게 될 때까지 피로수명 및 피로강도의 증가에도 크게 기여하고 있으며, 이러한 쇼트피닝 가공은 사용 전에 하는 마지막 공정으로만 사용되는 것이 아니라 사용 중에 피로를 받는 부분에도 적용이 가능하다.

2.2 부식 피로특성

재료의 피로강도는 표면상태와 긴밀한 관계를 갖는다. 만일 재료 표면에 요철이 존재한다면 그 요철은 피로균열 발생을 촉진시킬 것이다. 따라서 부식에 의해 생성된 표면 요철에는 응력이 집중하게 된다. 금속의 피로균열은 공기중 또는 부식환경 하에서 항상 슬립밴드(slip band)를 따라 오스테나이트 조직에서 시작된다. 쇼트피닝 가공되지 않은 상태에서 슬립단(slip step)은 주기적인 변형에 의해 생성되고, 재료 표면 보호막의 파손을 가져온다. 그 후 보호막이 없어진 재료는 부식 환경에 의해 침해를 받으며, 계속된 용해과정을 통해 슬립밴드에 작은 노치를 형성하게 되고, 결국 부식피로 균열이 성장하게 된다.

쇼트피닝 가공은 표면의 변형에 의해서 정도와 압축잔류응력이 증가한다. Fig. 1의 (a)와 같이 재료의 주기적인 하중에 의한 변형된 표면의 반작용으로 슬립 밴드가 발생한다. 쇼트피닝 가공을 하면 이러한 슬립밴드의 층은 (b)와 같이 감소하게 된다.⁽⁴⁾ 이런 결과 모재의 표면 보호층의 파손이나 부식피로 균열에 대한 저항력이 더 높아진다.

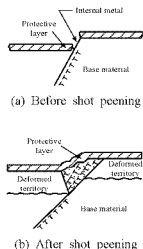


Fig. 1 Effect of shot peening on the corrosion fatigue crack

3. 실험

3.1 시험편

본 실험에 사용한 시험편 재료는 고강도 알루미늄 합금인 Al 7075-T6를 사용하였으며, 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 피로시험편은 중앙부의 최소직경이 8 mm가 되게 가공하였으며, 가공 후에 #2000 sand paper로 연마하고 다시 metal polish액으로 연마하였다. Fig. 2 는 피로시험편의 형상을 나타낸 것이다.

3.2 쇼트피닝 조건

가장 높은 피로수명을 갖는 피닝강도 조건을 찾기 위해 선행연구⁷⁾를 기초로 쇼트피닝기의 알덴강도가 포화가 되는 투사시간을 4분으로 고정해 \varnothing 8 mm 쇼트볼로 쇼트피닝 가공하였고, 실험에 적용한 쇼트피닝 조건을 Table 3에 나타내었다. 실험을 통하여 아크하이트(Arc height)가 0.341 mm일 때를 최적조건으로 선정하였다.

쇼트피닝기는 쇼트볼의 투사방식이 임펄서식인 쇼트피닝머신(MULTI ABLE TYPE, PTM-400)이며 쇼트볼은 경강선을 일정한 크기로 잘라서 만든 컷와이어(cut wire) KS D 3559 SWRII 72A 라운드 볼을 사용하였다.

3.3 부식조건

본 실험에서 설정한 부식환경은 증류수에 시약용 NaCl을 섞어 만든 3.5%의 NaCl 수용액이며, 시험편은 용존산소 없이 밀폐하여 상온에서 각각 1주에서 1년까지 침수하여 보관하였다. Fig. 3은 시험편을 부식시키는 과정을 나타낸 것이며, 시험편을 침수시킨 동안 NaCl의 침식을 고려하여 일정시간마다 NaCl 수용액을 교반하여 수용액의 pH를 맞추었다. 설정한 부식시간에 도달한 시험편은 NaCl 수용액에서 꺼내 흐르는 물에 세척하여 염분을 제거하였다. 이때 시험편 표면에 생긴 염분생성물을 완전히 제거될 때까지 세척하였으며 세척 후 공기 중에서 수분이 증발될 때까지 건조시켜 상온에서 회전급탕 피로시험을 실시하였다.

3.4 경도 및 조도 측정

쇼트피닝 전과 쇼트피닝 후 재료표면의 경도 분포 및 표면조도의 변화를 관찰하였다. 표면 경도 분포 측정을 위하여 시험편의 중앙부를 다이아몬드 커팅기를 이용하여 절단, 채취한 후 절단면은 프레스 바운팅하여 미세하게 연마하였으며 마이크로 비커스 경도계(Micro Vickers hardness tester, MOK-E3)를 사용하여 시험편의 표면으로부터 시험편의 중심부 방향으로 측정하였다. 측정조건은

Table 1 Chemical composition of Al 7075-T6 (wt%)

Mn	Si	Fe	Cu	Mg	Ti	Ti+Zr	Cr	Zn
0.14	0.15	0.29	1.6	2.4	0.03	0.25	0.19	5.7
			1.65	2.5			0.2	5.8

Table 2 Mechanical properties of Al 7075-T6

Element	Ultimate strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
Value	635	578	9

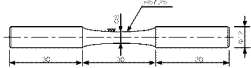


Fig. 2 Rotary bending fatigue test specimen

Table 3 Conditions of shot peening

Content	Condition
Shot ball diameter	\varnothing 0.8 mm
Impeller diameter	360 mm
Shot ball velocity	35 m/s
Time	4 min
Arc height (Almen A strip)	0.341 mmA

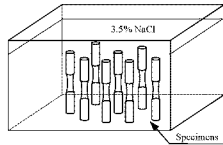


Fig. 3 Conditions of corrosion

로 시험압입하중은 50gf, 압입시간 20초로 선정하여 경도를 측정하였고 시험편의 측정각적은 표면에서 0.4mm 직경까지 0.02 mm 간격으로 측정하였다.

표면조도는 표면조도계(Mitutoyo SJ-400)를 이용하여 측정하였으며 중심선 평균거칠기(Ra)와 최대거칠기(Rmax), 10점 평균 거칠기(Rz)를 측정하였다.

3.5 피로시험

피로시험은 쇼트피닝 가공 전, 후의 굽힘에 대한 피로수명의 변화를 관찰하기 위하여 회전굽힘 피로시험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 피로시험기는 Ono type 4궤침 회전굽힘 피로시험기(SHIMADZU, 117)를 사용하였으며 응력비(stress ratio, R)는 -1, 적용 응력의 증감은 과단강도를 기준으로 후의 부계로 조절하였으며 10^6 사이클 이후에 과단된 응력을 피로한도로 채택하였다. 피로시험기의 회전수는 장비에 무리가 가지 않는 범위인 1,800~ 200 rpm으로 하였고 시험편에 가해지는 응력은 순수 굽힘응력 상태에서 아래식과 같이 정의된다.

$$\sigma_b = \frac{M}{I} c = \frac{16FL}{\pi d^3}$$

여기서 σ_b : 굽힘응력 M : 굽힘모멘트
 I : 관성모멘트 P : 적용하중
 L : 모멘트 거리 d : 시험편 직경

4. 결과 및 고찰

4.1 경도분포

쇼트피닝 처리 및 일반 시험편의 깊이에 대한 경도의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 쇼트피닝 처리했을 때의 표면에서의 경도값은 약 217 Hv이고 일반 시험편의 경우 약 186 Hv로 나타나 쇼트피닝 처리한 시험편이 약 16.7% 증가하였다. 쇼트피닝 처리한 시험편 표면부에서 높은 경도를 나타내는 것을 알 수 있는데 이는 쇼트복의 운동에너지가 재료 표면에 소성변형을 주었기 때문이다. 또한 중심부로 갈수록 수렴하는 경향을 보이고 있는데 이는 쇼트분이 재료의 표면에 부사되면서 재료의 극 표면부에만 가공경화가 일어났고 내부로 갈수록 에너지 전달이 작아져서 수렴하는 것으로 생각된다.

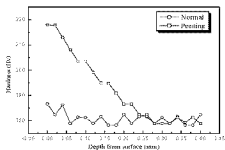


Fig. 4 Hardness distribution of specimen

4.2 표면조도

표면의 거칠기를 비교하기 위하여 쇼트피닝 처리한 시험편과 일반 시험편의 조도를 측정하였다. Table 4는 조도측정 결과이며, 결과에서 알 수 있듯이 쇼트피닝 처리에 의해 표면부는 일반 시험편보다 요철이 심해진 것을 볼 수 있다.

Table 4 Roughness of specimen

	unpeened	peened
Rmax(μm)	1.16	34.88
Ra(μm)	0.13	6.59
Rz(μm)	0.62	24.08

4.3 피로시험

모든 피로파괴는 표면부의 크랙 발생과 전이에 의하여 생겨나는데 쇼트피닝 처리를 하면 금속의 부식피로에 의한 크랙 전진을 지연시켜서 피로수명을 향상 시킨다는 전제하에 실험을 실시하였고 그 결과 Fig. 5와 같은 S-N선도 결과를 얻었다. 그림에서 보는 바와 같이 상온에서 쇼트피닝 처리한 시험편과 일반 시험편을 비교하면 현격한 피로특성의 향상을 보여주고 있다. S-N선도 결

과로부터 1×10^7 사이클을 기준으로 쇼트피닝 처리한 시험편의 피로한도는 약 315 MPa이고 일반 시험편의 피로한도는 약 206 MPa로서 약 52%의 피로한도가 증가하였다.

4.4 일반 시험편의 부식 피로시험

부식환경 하에서 일반 시험편의 피로강도 및 피로수명의 변화를 피로시험을 통하여 S-N선도를 얻었고 Fig. 6에 나타내었다. 일반 시험편의 1×10^7 사이클을 기준으로 1주 부식시킨 시험편의 피로강도는 150 MPa로 부식되지 않은 시험편의 피로강도 206 MPa보다 약 37% 감소하였고, 2주 부식시킨 시험편의 피로강도는 125 MPa로서 약 64% 감소하였다. 이러한 결과에서 알 수 있듯이 일반 시험편은 침수 초기부터 2 주까지 급격하게 피로강도 및 피로수명이 감소함을 보였다. 이는 표면 보호층의 파손으로 부식환경에 침해를 받으면서 슬립밴드에 노치를 형성하여 부식 피로균열이 더 빨리 성장한 것으로 생각된다.

4.5 쇼트피닝에 의한 부식 피로시험

Fig. 7은 부식환경 하에서 쇼트피닝에 의한 피로강도 및 피로수명의 변화를 보여주고 있다. 쇼트피닝 처리한 시험편은 3.5% NaCl 수용액 속에 시켰을 때 대체로 부식에 영향을 받지 않았다.

S-N선도 결과로부터 쇼트피닝 처리한 시험편은 전체적으로 피로강도의 감소는 없었으며, 1년을 침수시킨 시험편은 1×10^7 사이클을 기준으로 피로한도는 약 18% 감소하였으며, 피로수명은 약 67% 감소하였다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 쇼트피닝 처리한 시험편은 부식환경 속에서 우수한 효과를 나타냈다. 이는 쇼트피닝 가공에 의해 재료 내부에 생성된 압축 잔류응력이 표면 보호층을 형성하여 부식 피로균열에 대한 저항력이 더 높아졌기 때문으로 생각된다.

4.6 시간에 따른 부식 피로특성 비교

Fig. 8은 비교편의상 1년동안 부식시킨 시험편을 상온에서 피로시험한 결과와 비교한 것이다. S-N선도 결과로부터 일반 시험편의 피로강도 1×10^7 사이클을 기준으로 약 71% 감소하였고, 쇼트피닝 처리한 시험편의 피로강도는 약 18% 감소하였다. 결과로부터 쇼트피닝이 부식환경에서 우수한 효과가 있었다.

Fig. 9는 쇼트피닝 처리한 시험편과 일반 시험편을 1주에서 1년동안 부식 시켰을 때 피로강도의 변화를 보여주고 있다. 일반 시험편의 경우 1×10^7 사이클을 기준으로 피로강도 206 MPa, 1주 부식된 시험편의 피로강도 150 MPa로 약 37% 감소하였고, 2주 부식된 시험편은 피로강도 125 MPa로 약 64% 감소하였고 1달(4주)이후부터 1년까지 피로강도의 변화가 거의 없었다.

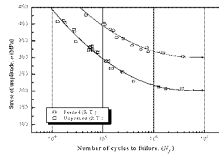


Fig. 5 S-N curves for unpeened and peened specimen

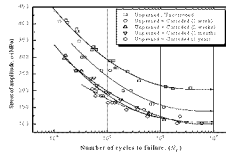


Fig. 6 S-N curves for unpeened specimen under corrosion

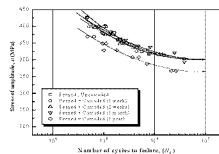


Fig. 7 S-N curves for shot peened specimen under corrosion

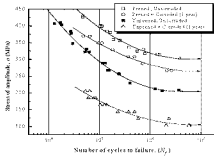


Fig. 8 Comparison of S-N curves between shot peened and unpeened specimen after corroding for one year

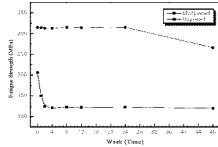


Fig. 9 Corrosion fatigue strength of shot peened and unpeened specimen depending on time

쇼트피닝 처리한 시험편은 1×10^7 사이클을 기준으로 6개월(24주)까지는 피로강도의 변화가 없었으나 1년(48주)이 되었을 때 피로강도 266 MPa로 약 18% 감소하여 일반 시험편보다 부식에 의한 영향이 매우 느린 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 논문에서는 부식환경 하에서 쇼트피닝이 피로수명의 변화를 통하여 부식에 미치는 효과에 대하여 규명하고자 Al 7075-T6 소재를 가지고 3.5% NaCl 수용액 속에 침수시켜 1주에서 1년까지 피로특성을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 쇼트피닝 처리했을 때의 표면에서의 경도값은 일반 시험편보다 약 16.7% 증가하였다.
- (2) 1×10^7 사이클을 기준으로 상온에서 쇼트피닝 처리한 시험편의 피로한도는 일반 시험편의 피로한도보다 약 52%의 피로한도가 증가하였다.
- (3) 부식환경 하에서 일반 시험편은 침수 후부터 2주까지 피로강도 및 피로수명이 급격하게 감소하였으나, 쇼트피닝 처리한 시험편은 24주까지 피로특성의 변화가 거의 없어 부식환경에서 우수한 효과가 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Denny A. Jones, 1996, "Principles and Prevention of Corrosion", Prentice Hall, Inc.
- (2) D. Y. Lee, 1988, "Fracture and Fatigue under Corrosion Environmental", Transactions of the KSME, Vol. 28, No. 4, pp. 313~321.
- (3) Y. G. Kwon, 1989, "Corrosion Fatigue", Transactions of the KSME, Vol. 29, No. 2, pp. 138~143.
- (4) W. Koehler, Dr.-Ing, 1984, "Influence of Shot Peening with Different Peening Materials on the Stress Corrosion and Corrosion Fatigue Behavior of a Welded AlZnMg Alloy", Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening, Vol. 1, pp. 126~132.
- (5) M. O. Speidel, 1981, "Effect of Shot Peening on Stress Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue", Proc. of the 1st International Conference on Shot Peening, Vol. 1, pp. 625~635.
- (6) Sharma, M. C., 1996, "Assesment of Over Peening by time on Fatigue behavior of Spring Steel," Proc. of 6th International Fatigue Congress, pp. 1397~1402.
- (7) S. K. Cheong, T. H. Kim, 2003, "A Study on the Optimum Shot Peening Condition for Al7075-T6", Transactions of the KSAS, Vol. 31, No. 7, pp. 63~68.