

12Cr Steel과 Stellite 6B의 액상충격 침식 (Liquid Impact Erosion)에 의한 손상과면 관찰

이 민 구·김 흥 회·이 창 규·김 선 재·김 영 석
한국 원자력 연구소

Investigation of Liquid Impact Erosion for 12Cr Steel and Stellite 6B

M. K. Lee, W. W. Kim, C. K. Rhee, S. J. Kim and Y. S. Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-353, South Korea

A study has been made on the liquid impact erosion mechanisms of 12Cr steel and Stellite 6B(Co-28Cr) currently used as steam turbine blade materials. 12Cr steel underwent the transition from ductile to brittle deformation behavior during liquid impacts. Damage started with the formation of isolated hollows. The increase in density and the overlapping of these hollows resulted in surface undulations with repeated impacts. The cumulative liquid impacts produced a work hardened surface, followed by the material loss due to crack formation and propagation. The deformation in Stellite 6B was especially governed by its microstructure. The carbide precipitates were selectively eroded while the precipitate-matrix interface and the precipitate interior acted as initiating sites for cracks. The damage of the cobalt matrix, where the mechanical twins were formed, was much lower than that of the carbide precipitates.

Keywords : liquid impact erosion, 12Cr steel, Stellite 6B, crack.

1. 서 론

터빈 블레이드의 손상은 주로 스팀 내에 존재하는 습분이 블레이드와 충돌로 인하여 발생하는 침식에 의한 것이다. 특히 LP(low pressure) 구획에서는 HP(high pressure) 구획으로부터 나온 스팀이 LP 구획으로 들어갈 때 단열팽창을 하게 되고 포화응결 조건보다도 낮은 온도에서 응결이 일어나기 때문에 터빈 내에서 가장 많은 습분을 형성하게 된다. 이러한 습분은 블레이드와 맞물려있는 guide vane/stator를 통과하면서 수십 μm ~수백 μm 의 두께로 적층되며 그 위의 증기흐름에 따라 다시 그 크

기가 큰 습분으로 합쳐져 이동 블레이드와 충돌하게 된다. 충격속도가 큰 습분이 재료에 연속 또는 불연속적인 충격을 가할 때 재료에 계속해서 접촉압력을 발생시키고 이 접촉압력은 물의 정상흐름에서 보다 훨씬 높은 값을 갖는데 보통은 재료의 내구력 한계 나 항복강도보다 크다. 유체에 의한 재료 침식의 파손형태는 톱니 같이 날카로운 표면을 갖게 되는데, 원전 터빈의 LP 최종단 블레이드의 침식 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

이러한 현상을 방지하기 위한 노력에는 블레이드의 설계측면과 재료적인 측면으로 분류할 수 있다. 우선 설계측면에서는 stator의 표면 위에 적층되어

Stellite 6B이다. 블레이드 재료인 12Cr steel과 Stellite 6B의 물리적 성질과 기계적 성질을 table 1에 나타내었다. 모든 시편은 두께가 1.5mm 그리고 직경이 15mm와 25mm의 판상이었고, bare 12Cr steel과 Stellite 6B는 1 μ m Al₂O₃ powder까지 연마하였다.

Table 1. Physical and mechanical properties of 12Cr steel and Stellite 6B.

	12Cr steel	Stellite 6B
Composition (wt. %)	12Cr, 0.3Mn, 0.1C, bal. Fe	28Cr, 4W, 3Ni, 2Si, 1.2C, bal.Co
ρ (g/cm ³)	7.70	8.38
Poisson ratio (ν)	0.26	0.3
Elastic Modulus	217	209
Yield strength (MPa)	589	633
Tensile strength (MPa)	765	1110
Vickers hardness (kg/mm ²)	350	420

Fig. 1. Eroded surface of Lp last rotating steam turbine blade.

있는 습분을 흡인이나 배액 장치를 설치함으로써 제거한다거나, 습분이 모여있는 표면을 붙어 날려버리거나 stator와 이동 블레이드사이의 간격을 넓혀 습분의 이동 경로를 길게 함으로써 미세한 물방울들로 분산시키는 방법 등이 연구되어 왔다.¹⁻⁴⁾ 재료적인 측면에서는 침식이 가장 심하게 일어나는 leading edge 부분을 좀 더 강한 재료로 보호하는 방법이 1920년대 이후로 계속 연구되고 있는데 특히 Baker등은 cobalt-base 합금인 Stellite를 leading edge에 brazing하였을 경우 침식에 대한 저항성이 가장 우수하였다고 보고하였다.⁵⁾ 그러나 무엇보다도 블레이드의 침식에 대한 저항성을 향상시키기 위해서는 현재 사용하고 있는 재료들의 침식기구가 먼저 규명되어야 하지만 이에 관한 연구는 아직 충분치 못한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 블레이드의 재료로 사용되는 12Cr steel과 Stellite 6B의 액상충격에 의한 침식 특성을 규명하고자 하였다.

2. 실험 및 실험장치

침식 시험을 위해 준비한 시편은 원자력 LP 터빈 블레이드 재료인 12Cr steel과 shield 재료인

현재 세계적으로 사용되는 침식 장치의 종류에는 Whirl arm type (미국, Bell aerospace company)⁶⁾과 Disk rotary type (영국 Cambridge 대학, 프랑스, 체코 등)이 있다.^{7,8)} Whirl arm type 또는 disk rotary type은 300m/s 이상의 물방울 입사 속도를 얻을 수 없을 뿐 아니라 설사 300m/s 이상의 속도를 얻는다 하더라도 "air shock"이 발생할 가능성이 있다. 또한 시편을 disk에 장착하였을 때 균형유지의 문제로 인해 진동의 소지가 있으며 소음이 매우 심하다. 따라서 본 연구에서는 물방울의 속도에 따라 침식률을 결정할 수 있고, single impact 및 multi impacts를 자유롭게 조절할 수 있는 침식 장치를 설계 제작하였다. Fig. 2에 본 연구에서 제작한 침식 장치를 나타내었다. Air reservoir내의 대기압 이상 (본 연구에서는 1.3 bar 이상)으로 압축된 공기는 nylon piston 상하에 발생된 압력차이에 의해 nylon piston을 하강시킨다. Nylon piston은 T-piston을 치게 되고, T-piston은 nozzle내의 물을 치면서 물을 내보낸다. Nozzle내의 물은 연동 펌프 (peristaltic pump)에 의해 일정량이 연속적으로 공급되도록 하였다. Nozzle내 물이 일정량 이상이 되면 진공 펌프에 의해 연속적으로 뽑히도록 하여

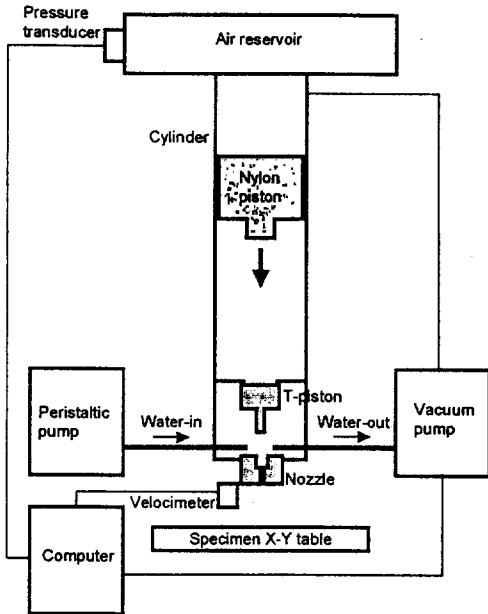


Fig. 2. Schematic diagram of liquid jet apparatus.

nozzle내에는 물이 항상 일정량을 유지하도록 하였다. 또한 nozzle내 물의 안정화를 위하여 water line 으로부터 2mm 상부에 모든 동작은 연속적인 동작으로 이루어졌고 컴퓨터로 제어하였다. 물의 속도는 nozzle 바로 밑에 설치된 속도측정계에 의해 측정되었다. 물의 속도는 속도측정계에서 빛을 상하 8mm에서 각각 보내주고 물이 빛을 통과 시 신호를 받음으로써 측정되었다. 침식시험시 nozzle 직경과 길이는 각각 0.5mm, 3mm였고 nozzle-to-specimen 간격은 11mm이고, impact angle은 90°로 일정하게 하였으며 nozzle을 통해 나오는 물의 양은 약 0.15cc를 유지하도록 하였다. 침식시험 분위기는 대기 상태였고 온도는 상온이었다. 시편의 침식 정도를 알아보기 위해 광학 현미경을 이용하여 초점면의 위치를 변화시켜 침식 깊이를 측정하였다. 침식된 표면과 단면 형상 관찰은 광학현미경과 투과 전자 현미경(SEM)을 이용하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 Single Impact Damage

Fig. 3은 12Cr steel과 Stellite 6B 위에 형성된

Fig. 3. Single impact damage on (a) 12Cr steel at 323m/s and (b) Stellite 6B at 342m/s.

single impact에 의한 손상을 보여준다. 약 0.8~1mm의 직경을 갖는 손상 부위 내에 수 개의 크고 작은 고립된 hollow(crack의 전파나 국부적인 파괴가 일어나지 않은 변형 형태)들이 곳곳에 형성되어 있는 모습을 관찰할 수 있다. 이러한 single impact damage로부터 시편과 충돌하는 liquid jet의 형태는 연속적인 액상이 아니라 각기 구별된 액상으로 구성되어 있다는 것을 예측할 수 있다. 시편 표면에 형성된 hollow들의 직경은 liquid impingement의 size를 의미하고, hollows의 깊이는 impingement intensity와 관련된다.

3.2 12Cr steel, Stellite 6B의 liquid impact erosion mechanism

Fig. 4는 충격 속도가 350 ± 20 m/s일 때 충격 횟수 증가에 따라 12Cr steel위에 형성된 침식 손상의 발전 양상을 보여주고 있다. 12Cr steel의 경우, 초기에는 주로 수 개의 고립된 hollow 형태의 변형을

Fig. 4. Development of erosion damage in 12Cr steel with increasing impact number at a velocity of $350 \pm 20\text{m/s}$: (a) 30, (b) 90, (c) 130 and (d) 290.

관찰할 수 있었다. 그러나 충격 횟수가 증가함에 따라 이러한 hollow의 밀도가 증가하였고, 계속되는 충격은 hollows의 겹침 현상을 초래하여 Fig. 4 (a)에서 볼 수 있듯이 연속적인 굴곡을 갖는 표면을 발생시켰다. 충격 횟수가 더욱 증가하면서 표면 비틀림이 심화되었고 (Fig. 4 (b)), 가장 취약한 지점

에서 선택적으로 침식이 일어나 군데군데 작은 crater(cracks의 발생 및 전파 또는 국부적인 손상에 의한 변형 형태)들이 형성되었다 (Fig. 4 (c)). 이러한 작은 crater들은 계속적인 충격에 의해 크기가 더 큰 deep crater들로 발전하였다 (Fig. 4 (d)). 충격 횟수가 어느 이하에서는 Fig. 4 (a)와

Fig. 5. Scanning electron micrographs showing the craters created on 12Cr steel after 290 impacts at a velocity of 350 ± 20 m/s.

(b)에서 볼 수 있듯이 심한 재료 손실은 일어나지 않았고 변형 양상은 연속적으로 표면 굴곡을 나타내는 연성 양상을 나타내었다. 그러나, 충격 횟수가

Fig. 6. Scanning electron micrographs showing the cracks around craters of 12Cr steel after 290 impacts at a velocity of 350 ± 20 m/s.

어느 이상이 되면 표면은 충격에 의한 경화(impact induced work hardening)에 의해 경도가 증가하면서 변형은 균열의 발생 및 전파에 의한 취성 양상으로 변화하였고 심한 재료 손실을 초래하였다 (Fig. 4 (c)와 (d)). 12Cr steel의 깨지기 쉬운 형태로의 변형 양상은 Fig. 5와 Fig. 6으로부터 확인할 수 있다. Fig. 5는 충격 속도가 350 ± 20 m/s일 때 290 impacts 이후에 12Cr steel의 표면 위에 형성된 deep crater들을 나타내고 Fig. 6은 이러한 deep crater들의 둘레에서 관찰된 crack들을 보여준다. 이러한 deep crater들은 깊이가 약 $50 \mu\text{m}$, 너비가 약 $60 \sim 70 \mu\text{m}$ 가 되는 큰 것에서부터 깊이가 약 $4 \mu\text{m}$, 너비가 약 $6 \mu\text{m}$ 의 작은 것에 이르기까지 다양한 크기를 갖고 있다. 다양한 크기의 crater들의 존재는 가장 취약한 부분이 선택적으로 침식되었음을 암시

Fig. 7. Development of erosion damage in Stellite 6B with increasing impact number at a velocity of $350 \pm 20\text{m/s}$: (a) 30, (b) 90, (c) 130 and (d) 290.

한다. 또한 crater들의 형태가 원형이 아닌 불규칙한 형태를 갖고 있는 것은 crater들의 주변이 균열의 발생 및 전파로 인한 국부적인 파괴에 의해 침식되었음을 나타낸다.

Stellite 6B와 같은 cobalt 합금은 cavitation 침식이나 액상충격 침식에 대한 저항성이 가장 우수

한 합금으로 알려져 왔다.⁹⁾ Stellite 6B는 일반적으로 연성의 Co-rich 고용상의 matrix내에 조대하고 ($5\sim 20\mu\text{m}$), hard한 M7C3 (M=Cr)와 M6C (M=W, Mo)의 탄화물들이 분산되어 있는 2상 구조를 갖고 있다. 이러한 Stellite 6B의 미세구조는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 충격 속도가 $350\pm 20\text{m/s}$

Fig. 8. Scanning electron micrographs of Stellite 6B showing the twin boundary cracks in Co matrix induced by liquid impingements after 290 impacts at a velocity of $350 \pm 20\text{m/s}$.

일 때 충격 횟수가 증가함에 따라 민감한 변화를 나타내었다. 충격 초기에는 12Cr steel과 마찬가지로 hollow의 형성과 겹침으로 인해 표면의 굴곡상태를 보여 주었다. 표면의 굴곡 정도는 충격 횟수가 증가할수록 심해졌으나 (Fig. 7의 (a) → (b) → (c) → (d)), 12Cr steel의 경우처럼 심한 편은 아니었고, Co matrix내의 손상 깊이는 최대 $3 \sim 4\mu\text{m}$

에 불과하였다. Co matrix내에서의 중요한 변화는 Fig. 7에서 관찰할 수 있듯이 mechanical twins의 형성이다. Co single crystal이나 Co alloys의 경우 mechanical working이나 cavitation shock에 의해 twin이 형성된다는 것은 이미 여러 연구자들에 의해 확인된 바 있다.¹⁰⁻¹⁴⁾ 이러한 mechanical twin은 물방울 충격이 진행됨에 따라 밀도가 증가하였고 충격 횟수가 더욱 증가하면 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 twin의 경계에서 균열을 형성하였다. Twin 경계에서 나타난 균열은 반복적인 충격 하중에 의해 발생한 피로 균열인 것으로 보인다. 결국 matrix의 변형은 주로 twin의 형태로 나타났고, matrix의 경우 물방울 충격에 의한 재료 손실은 매우 작은 것으로 나타났다. Stellite 6B의 경우 물방울 충격에 의한 재료 손실은 주로 경한 탄화 석출물들에서 관찰되었다. Fig. 9는 충격 속도가 $350 \pm 20\text{m/s}$ 일 때 290 impact 이후, Stellite 6B의 표면 위에 형성된 damage를 보여준다. 290 impact 이후에 탄화 석출물들의 대부분은 파괴되었다. 이러한 탄화 석출물들의 손상은 precipitate의 국부적인 파괴(A), precipitate의 interface 또는 내부를 따라 진행된 crack의 전파(B), 그리고 precipitate의 탈락(C) 등의 3가지 양상을 나타내었다. 석출물들의 손상은 초

Fig. 9. Damage features of Stellite 6B induced by liquid impingements after 290 impacts at a velocity of $350 \pm 20\text{m/s}$.

Fig. 10. Scanning electron micrographs showing the precipitate boundary cracks of Stellite 6B induced by liquid impingements after 290 impacts at a velocity of $350 \pm 20\text{m/s}$.

기에는 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 석출물들의 interface와 내부에서 균열의 발생 및 전파로 나타나다가 반복되는 충격 하중은 Fig. 11에서처럼 석출

Fig. 11. Scanning electron micrographs showing the fractured precipitates of Stellite 6B induced by liquid impingements after 290 impacts at a velocity of $350 \pm 20\text{m/s}$.

물들의 interface나 내부에서 국부적인 파괴를 유발하고 결국에는 precipitate의 탈락을 초래하였다. 석출물들의 파괴에 의한 손상 깊이는 약 $5 \sim 10\mu\text{m}$ 로서 matrix의 손상보다 컸다. 결국 물방울 충격에

의한 Stellite 6B의 재료 손실은 Co matrix보다는 탄화 석출물들에서 발생하는 것으로 관찰되었다.

Stellite 6B가 12Cr steel에 비해 그다지 높지 않은 경도를 갖으면서도 우수한 물방울 충격에 대한 침식 저항성을 나타낸 것은 앞서 언급하였듯이 Co matrix에 의한 것이 분명하다. 물방울 충격 하중에 의한 Co matrix의 손상은 침식이 아니라 twin 형태의 변형으로 나타났다. Twin이 일어난 부분은 결정배열의 변화를 초래한다. 따라서 twin의 발생과 twin 밀도의 증가는 Co matrix내에 존재하는 grain을 매우 작은 units로 세분화하는 역할을 하게 될 것이다. 이러한 "effective grain size"의 감소는 dislocation의 mean free path를 감소시키고, 물방울 충격에 의한 표면 변형은 이러한 매우 미세한 grain들에 의해 제약을 받게 될 것이고 결과적으로 침식 저항성은 향상되는 것으로 생각된다.

4. 결 론

1. 12Cr steel은 물방울 충격 초기에 연속적으로 표면 굴곡을 나타내는 연성 변형 거동을 나타냈으나, 충격 횟수가 증가하면서 liquid impact induced work hardening에 의해 취성 변형 거동으로 변화하였다.

2. Stellite 6B의 경우 물방울 충격에 의한 변형은 cobalt matrix에서는 주로 mechanical twin이 나타났으나 침식에 의한 손상 정도는 작았고, 주로 경한 탄화 석출물들에서 침식에 의한 손상이 컸다.

3. 물방울 충격 초기에는 hard한 탄화 석출물들보다는 ductile한 matrix의 depression을 형성하였고, 충격 횟수가 증가함에 따라 탄화 석출물들의 내부와 interface에서 crack이 형성되어 carbide 석출물들의 탈락을 유발하였다.

References

1. D. W. C. Baker, D. E. Elliott, D. G. Jones and D. Pearson, Proc. Int. Conf. Rain Eros., **2**, 449 (1967).
2. W. Herbert, Proc. Int. Conf. Rain Eros., **2**, 359 (1967).
3. H. Rieger, Proc. Int. Conf. Rain Eros., **3**, 147 (1970).
4. A. Behrendt, Proc. Int. Conf. Rain Eros., **4**, 425 (1974).
5. R. Araki, M. Kisimoto, K. Yoshida, *JSME Int. J.* **34**, 397 (1991).
6. J. V. Hackworth, Proc. 5th Int. Conf. on Erosion by Solid and Liquid Impact, Camvridge, England, Sep. 10 (1979).
7. R. I. Jaffee, Titanium steam turbine blading, Workshop proceedings, Palo Alto, California 9-10, Nov. p. 371 (1988).
8. M. Orna and Z. Ruml, Proc. 5th Int. Conf. on Erosion by Solid and Liquid Impact, Camvridge, England, Sep. (1979).
9. G. C. Gould, Characterization and determination of erosion resistance, symposium presented 72 annual meeting, ASTM pub., Atlantic city, N. J., 22~27 June 182 (1969).
10. A. H. Graham and J. L. Youngblood, *Metall. trans.*, **1**, 423 (1970).
11. L. Remy and A. Pineau, *Mater. Sci. Eng.* **26**, 123 (1976).
12. D. A. Woodford, *Metall. trans.*, **3**, 1137 (1972).
13. S. Vaidya, S. Mahajan, and C. M. Preece, *Metall. trans. A*, **11A** 1139 (1980).
14. C. J. Heathcock and A. Ball, *Wear*, **74**, 11 (1981).