

비정질/나노구조 투사재(shot peening ball)의 개발동향 및 전망

이진규

한국생산기술연구원 신소재본부

1. 서론

Shot peening 기술은 투사재가 재료에 투사됨에 의해 재료의 표면에 소성변형층을 유발시키고 이로 인한 잔류 압축응력을 유기시킴으로써 재료의 피로 수명과 응력부식균열에 대한 저항성을 동시에 향상시키는 기술로서(그림 1) 자동차와 항공 산업 분야에서 광범위하게 활용되어 왔다[1-6]. 특히 Al 합금 및 Ti 합금으로 제조된 항공부품 소재의 대표적인 표면 처리 기술로서, 그 적용범위가 매우 광범위하며, 다른 표면처리 기술 대비 친환경적이며 경제적인 상용 기술이라고 할 수 있다(그림 1, 2).

Shot peening 효과를 결정하는 여러 인자 중 가장 중요한 인자는 투사재의 재질이며, 일반적으로 고경도, 고밀도, 고탄성한계를 가지며 내부결함이 없는 균질한 미세조직을 가지는 투사재가 요구되어진다. 현재 shot peening 공정에 사용되는 투사재에는 steel shot, rounded cut wire(high carbon steel), 지르코니아, 초경합금 등이 있으며, 가장 범용적으로 사용되는 재료는 steel shot과 rounded cut wire이다. 기존에 사용되고 있는 투사재는 미세조직이 마이크로 스케일의 결정들로 이루어져 있으며, 제조 공정상 야금학적으로 불가피하게 불균질 미세조직을 가진다. 즉, 각종 주조 결함, 편석 등이 존재하며, 이는 투사재의 수명을 단축시킴은 물론, 복잡한 형상의 부품소재 shot peening시 표면에 균질한 미세조직을 형성하기가 어렵고 미소크랙과 같은 표면 결함을 형성하여 항공기 부품소재와 같이 고 신뢰성이 요구되는 분야에서 신뢰성 저하를 야기하게 된다(그림 3). 또한 투사재의 경도는 shot peening 효과를 극대화하는데 중요한 인자이지만, 일반적으로 투사재의 경도가 높아지면, 내충격성은 급격하게 저하하게 되어 공정 중에 쉽게 파괴가 일어나게 된다. 이러한 shot peening 공정 중 투사재의 파괴는 투사재 소모량의 증대와 더

불어 파괴시 분진의 발생으로 인해 환경적 유해인자 발생의 주요 요인이 되며, 이로 인한 제품의 품질 및 생산성의 저하를 초래하게 된다.

비정질 합금은 무질서한 원자배열 구조로 인해 결정합금에 비해서 고강도, 내마모성, 우수한 자기 특성, 고 내식성 등의 특성을 가지고 있으므로, 최근에 들어서는 그 산업적 응용에 대한 관심이 증가하고 있다. 비정질 합금의 특징인 고강도, 고경도, 낮은 영율, 높은 탄성한계 등의 특성을 고려해보면, 투사재의 재료로 활용될 경우, 우수한 특성을 가지는 것을 기대할 수 있다. 최근에는 합금 설계 및 공정제어 기술로 개발로 인해 비정질/나노구조 합금의 대량생산이 가능하여졌으며, 이러한 기술을 활용하여 기존 투사재 대비 가격 경쟁력을 가지면서 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 새로운 비정질/나노구조 투사재의 개발이 가능하게 되었다.

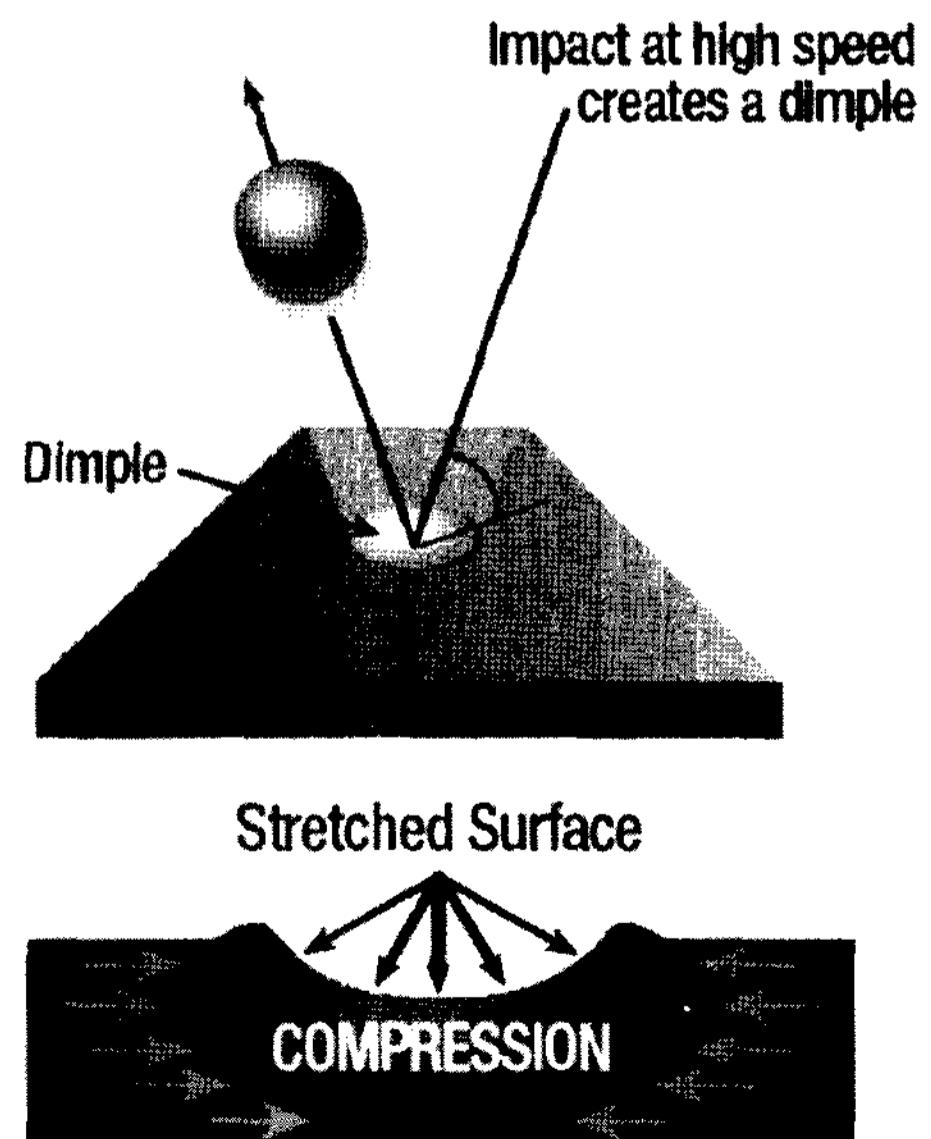


그림 1. Shot peening 공정의 개략도[6].

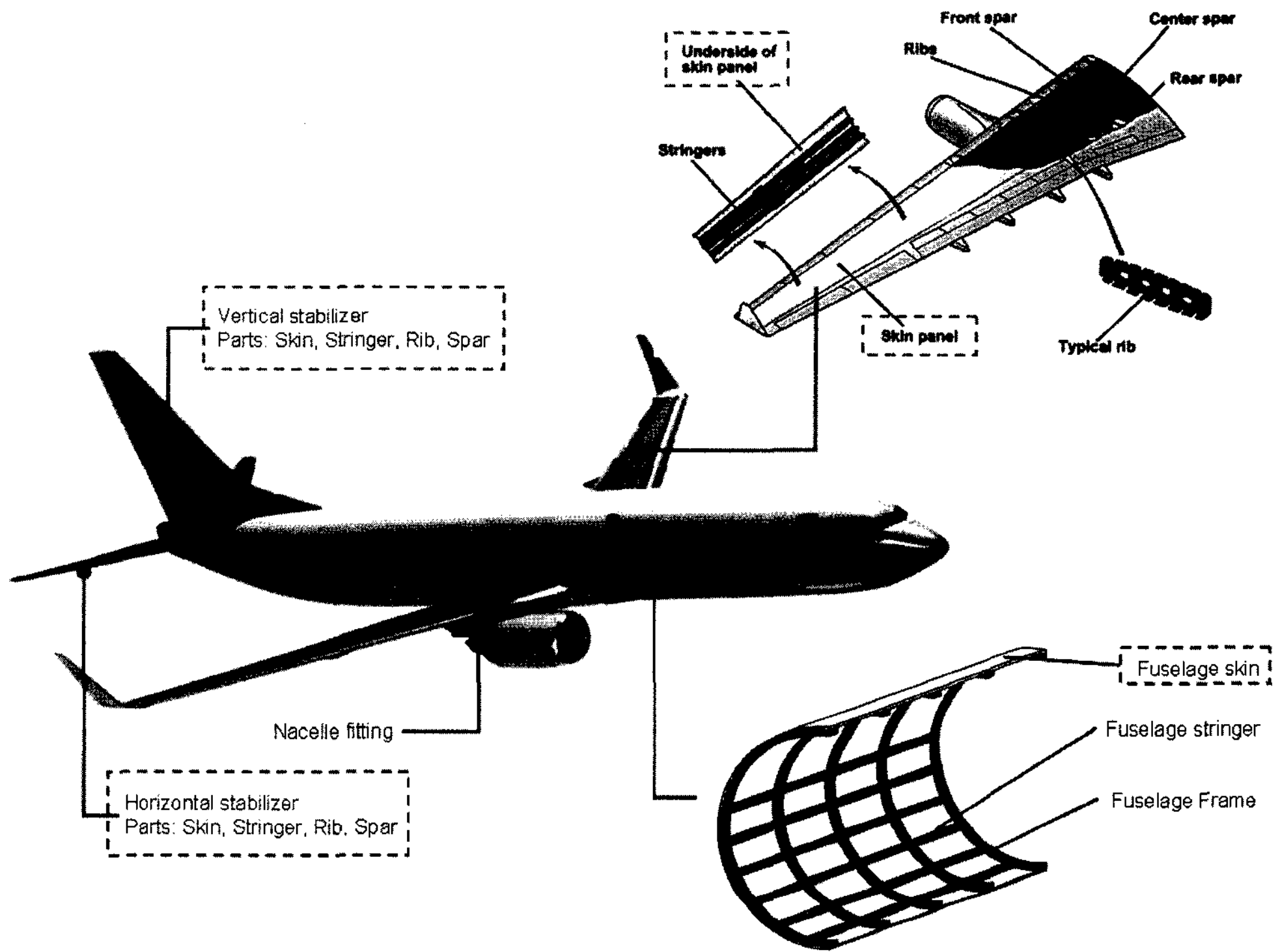


그림 2. Shot peening 공정이 적용되는 항공기 부품.

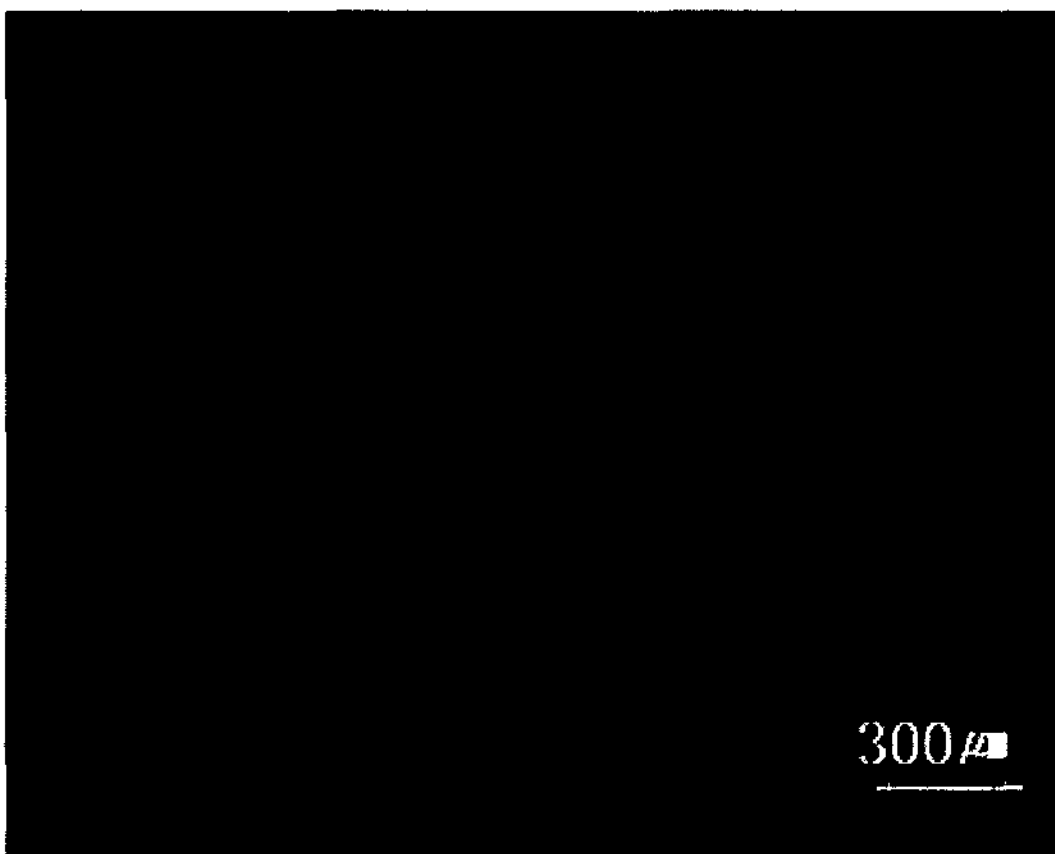


그림 3. 일반 결정질 투사재의 내부결합 (cast steel shot ball).

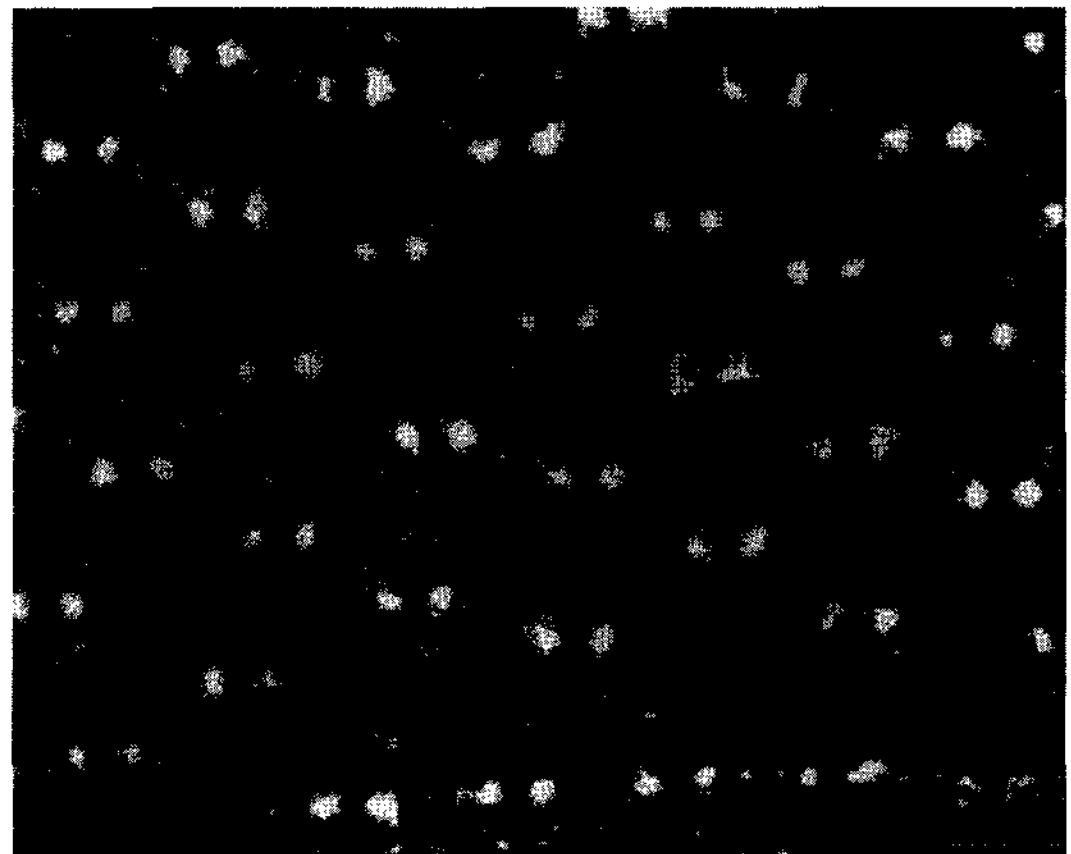


그림 4. 수분무 분사법에 의해 제조된 Fe계 비정질 투사재[8].

2. 해외기술개발동향

비정질 구조의 투사재는 2000년도 초반 일본 동북대학교의 Inoue 그룹과 Sintobator 사와의 공동연구로 처음으로 개발되었다[7-8]. 투사재의 소재로 고려된 합금은 경도값이 Hv 800 이상이며, 비정질 합금

중 가장 경제성이 있는 Fe계 비정질 합금이고, $Fe_{44}Co_5Ni_{24}Mo_2B_{17}Si_8(at\%)$ 조성의 비정질구조 투사재를 수분무 분사법(water atomization)법에 의해 제조하였다. 그림 4는 수분무 분사법에 의해 제조된 Fe계 비정질 투사재를 보여주고 있다. 일반적으로 고진공이 요구되는 다른 비정질 합금계와 달리 Fe계 비정질의

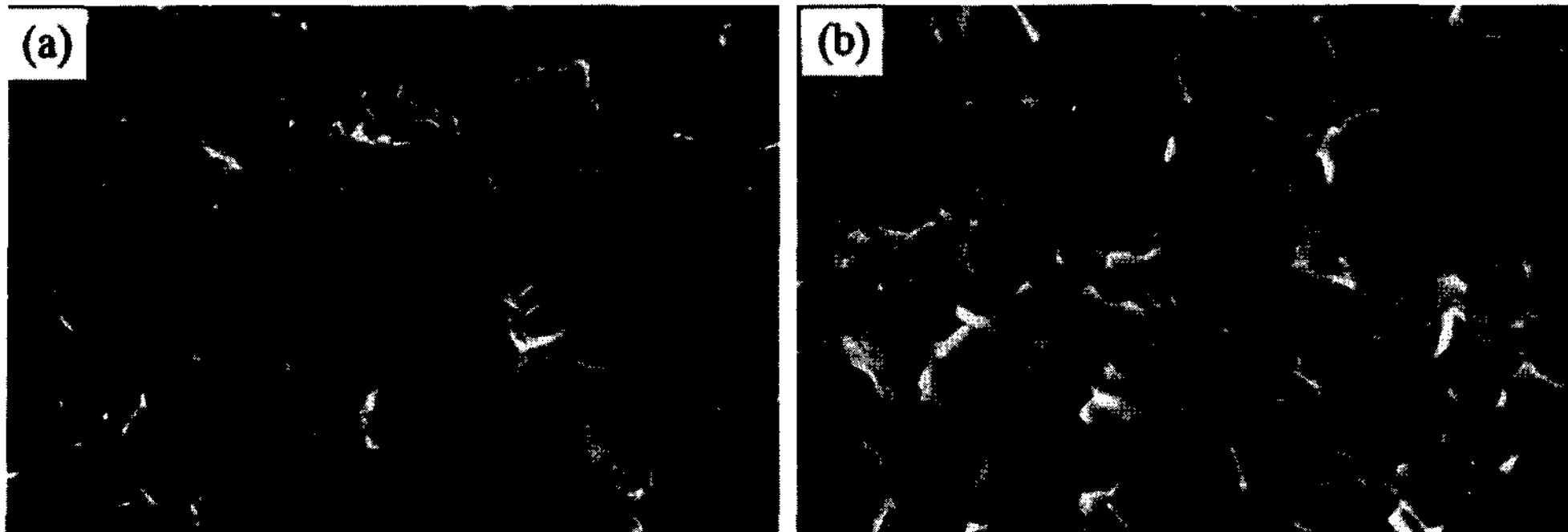


그림 5. Shot peening 공정 후 소재의 표면 형상[8]. (a) Fe계 비정질 투사재 (b) cast steel 투사재

경우는 대기 중에서도 제조가 가능하므로, 수분무에 의해 투사재의 제조가 가능한 장점이 있다. 이렇게 제조된 Fe계 비정질 투사재의 영율, 강도, 경도값은 80 GPa, 3200 MPa, 930 Hv로, 일반적으로 사용되는 cast steel 투사재(Fe-1%C-0.9%Si-0.7%Mn, mass%)의 210 GPa, 1100 MPa, 810 Hv에 비해서 낮은 영율, 높은 강도 및 경도 값을 보여주고 있다.

그림 5는 Fe계 비정질 투사재와 cast steel 투사재를 이용하여 carbon steel sheet에 shot peening을 한 후의 표면의 형상을 보여주고 있다. 투사 후 표면의 형상은 비정질 투사재를 이용한 경우 더 균일한 형상을 보여주고 있으며, 표면 소성변형 영역의 평균 크기와 깊이는 비정질 투사재의 경우 20 μm 과 15 μm 으로 cast steel 투사재의 7 μm 과 5 μm 에 비해 큰 값을 보여주고 있다. 이러한 넓은 shot peening 영역은 우수한 shot peening 효과를 나타내며, 비정질 투사재의 낮은 영율과 높은 강도 값에 기인한다. 그림 6은 shot peening된 소재의 표면으로부터

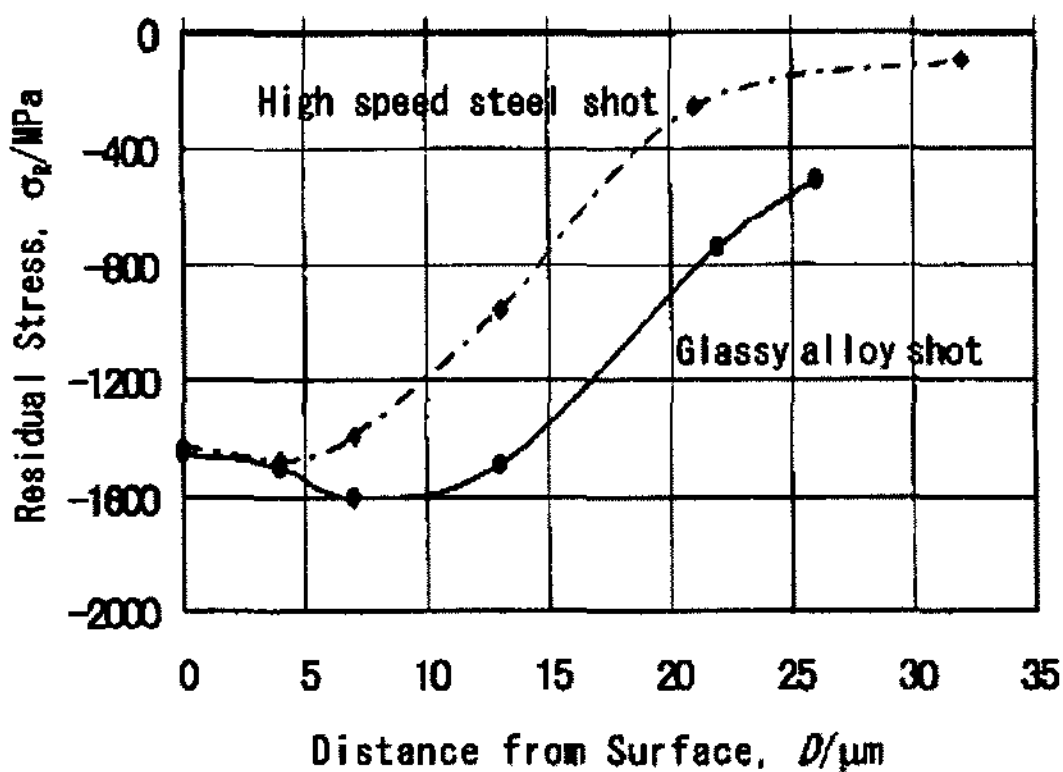


그림 6. Shot peening 공정 후 소재의 표면으로부터의 거리변화에 따른 압축잔류응력의 변화[8].

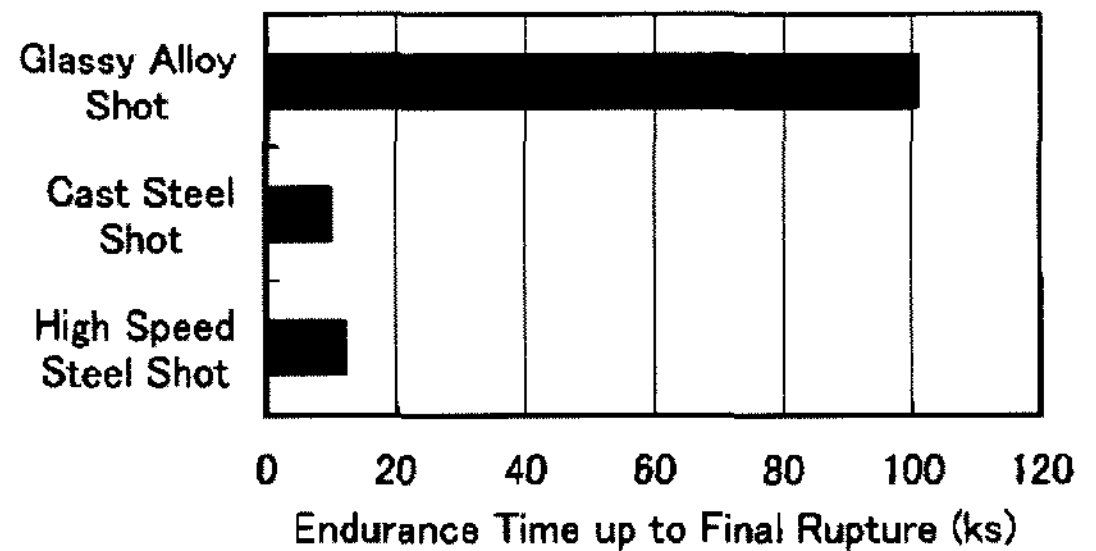


그림 7. 투사재 종류에 따른 투사재의 수명[8].

거리의 변화에 따른 압축잔류응력의 변화를 보여주고 있다. Shot peening된 표면영역은 매우 높은 압축잔류응력을 보여주고 있으며, 비정질 투사재로 shot peening된 표면의 경우 high speed steel 투사재의 경우에 비하여 높은 압축잔류응력을 나타내고 있다. 500 MPa 이상의 압축잔류응력을 가지는 소성변형영역은 비정질 투사재의 경우는 27 μm , high speed steel 투사재의 경우는 18 μm 으로, 비정질 투사재의 경우 더 넓은 것을 알 수 있다. 그러므로 비정질 투사재의 경우 압축잔류응력의 크기와 압축잔류응력을 가지는 영역이 더 크고 넓은 것을 알 수 있으며, shot peening 효과가 우수한 것을 알 수 있다.

투사재에서 고려되어야 할 또 하나의 중요한 특성은 투사재의 수명이다. 그림 7은 파괴가 일어나는 시점까지의 투사재의 수명을 투사재의 종류에 따라 보여주고 있다. 일반 결정질 cast steel 투사재와 high speed steel 투사재에 비해서 비정질 투사재의 경우 10배 정도의 우수한 수명을 나타내는 것을 알 수 있다.

이러한 비정질 투사재의 우수한 shot peening 특성은 결정질 투사재에 비해서 상대적으로 낮은 비정질 투사재의 영율(low Young's modulus), 높은 강도

값(high strength), 그리고 큰 탄성한계(large elastic limit)로부터 설명되어질 수 있다. 소재의 밀도는 비정질 투사재와 결정질 투사재의 경우 비슷하므로 충돌에너지 값은 거의 동일하다고 하다고 볼 수 있다. 상대적으로 매우 낮은 비정질 투사재의 영율은 shot peening된 영역의 크기를 증가시킴으로 투사되는 소재에 더 많은 변형에너지를 가하게 되고 결과적으로 shot peening의 효과를 증대시킨다. 또한, 상대적으로 높은 비정질 투사재의 강도 값과 큰 탄성한계는 반복되는 shot peening 공정시 투사재에 가해지는 손상을 감소시킴으로서 우수한 shot peening 특성을 나타내게 하고, 투사재의 수명을 증가시키는 효과가 있게 된다.

이러한 여러 우수한 특성에도 불구하고 현재까지 개발된 Fe계 비정질 투사재는 비정질을 형성하기 위해 고순도의 원소를 사용해야 하므로 제품의 가격 상승발생으로 인해 현재는 매우 제한적으로만 응용되고 있는 실정이다. 이 분야의 기술 선진국가인 일본은 우수한 특성과 경제성을 가지는 투사재 원소재의 개발과 더불어 shot peening 특성과 신뢰성 향상을 위한 공정기술 연구를 지속적으로 진행 중에 있다.

3. 국내기술개발동향

국내의 투사재 제조는 대부분 50명 이하의 중소기업에서 단순 atomization 기술을 통하여 이루어지고 있으며, 제품의 품질 혁신, 활용분야 창출 노력이 매우 곤란한 상황이며, 특히, 새로운 개념의 비정질/나노구조 투사재 개발 또는 이를 활용한 shot peening 기술 연구는 거의 전무한 상태이다. 국내에서 생산된 투사재는 주로 주물공장, 제철소등 shot peening 기술력이 크게 요구되지 않는 분야에서 사용되며, 항공기 핵심 부품 소재 등 고도의 신뢰성이 요구되는 경우에는 거의 수입품에 의존하고 있는 실정이다.

한편, 국내의 합금설계 기술 및 공정제어 기술은 최근의 나노 테크놀로지가 신속히 접목되었고, 이를 통한 벌크 비정질 합금, 나노 구조합금 개발 분야는 세계적으로 비교우위에 있는 것으로 평가되고 있다. 또한 최근에 저가의 선철을 이용한 Fe계 비정질 합금이 경북대 등에서 개발되면서 이를 활용한 투사재의 연구가 일부 진행되고 있다[9,10]. 따라서 이러한 합금

설계기술 및 공정제어 기술을 접목하여 신개념의 투사재 개발 및 그 활용 기술을 개발할 경우, 비정질 구조의 고성능 투사재 개발이 가능할 것으로 판단된다.

4. 향후 전망 및 결론

Shot peening에 의한 항공기 핵심 부품소재의 신뢰성 향상은 매우 오랜 역사를 가지고 통상적으로 적용해오던 기술이며, 기존 투사재 물성이 한계에 도달함에 따라 shot peening 효율 향상 또한 매우 미미하였다. 그러나 고성능 비정질 투사재의 개발이 성공할 경우, shot peening 기술의 breakthrough가 가능하며 이는 기존 shot peening 대상 부품소재의 신뢰성 제고는 물론, 새로운 핵심 부품소재로의 확대적용을 고려할 수 있다. 최근에 국내외 일부 항공사를 중심으로 항공기 핵심부품의 shot peening 공정에 사용하는 투사재의 재질을 현재의 rounded cut wire(high carbon steel)에서 지르코니아 등으로 대체하기 위한 연구가 진행 중에 있다. 지르코니아의 단가가 steel shot에 비해 7배 이상 높음에도 불구하고 shot peening 공정시 투사재의 파쇄로부터 기인하는 오염문제와 그로 인한 투사재의 수명 등을 고려하면 효율면에서 유리한 측면이 있으므로 지르코니아 투사재를 활용한 항공기 핵심 부품의 신뢰성 향상에 관한 연구가 진행 중에 있다. 최근에 국내에서 개발된 선철을 이용한 경제성이 우수한 Fe계 비정질 합금을 활용한다면, 기존 투사재의 물성한계를 월등히 능가하는 유용한 특성을 가진 투사재를 개발할 수 있을 것이다. Shot peening 기술은 기타 표면처리 기술 대비 환경오염이나 에너지 소비면에서 매우 유리한 공정이므로, shot peening 효율을 혁신적으로 제고 할 경우, 항공기 부품소재 신뢰성 향상 단가를 크게 절감할 수 있을 것이다. 아울러, 비정질나노구조 투사재는 기존 투사재 대비 내마모, 내부식성이 월등히 우수하고, 내부결합이 최소화된 소재로서 기존 투사재 대비 5배 이상의 사용수명 증대가 예상된다. 따라서, shot peening 공정의 단가 절감은 물론 생산성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 비정질나노구조 투사재는 현재 세계적으로 개발 초기 단계에 있으므로, 적극적이고 체계적인 연구를 통하여 원천기술 선점이 가능하며, 이를 활용한 shot peening 기술은 항공기 부품소재 산업을 비롯하여, 자동차, 조선 산업에

도 매우 유용하게 적용될 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] S. I. Kwon: J. Kor. Inst. Met. Mater., **19** (1981) 152.
- [2] H. W. Lee and Y. S. Park: Kor. Soc. Prec. Eng., **21** (2004) 149.
- [3] M. Umemoto, Y. Todaka and K. Tsuchiya: Mater. Trans., **44** (2003) 1488.
- [4] J. L. Liu, M. Umemoto, Y. Todaka and K. Tsuchiya: J. Mater. Sci., **42** (2007) 7716.
- [5] T. Yamamoto, T. Takahashi, H. Kimura and A. Inoue: J. Alloys and Compds., **430** (2007) 97.
- [6] Metal Improvement Company, www.metalimprovement.com
- [7] J. Eckert, A. Kubler and L. Schultz: J. Appl. Phys., **85** (1999) 7112.
- [8] A. Inoue, I. Yoshii, H. Kimura, K. Okumura and J. Kurosaki: Mater. Trans., **44** (2003) 2391.
- [9] K. Okumura, J. Kurosaki, K. Nishimura and H. Kimura: Materia Japan, **43** (2004) 142.
- [10] H. X. Li, H. S. Sohn and S. Yi: J. Mater. Res., **22** (2007) 164.