

항공용 구조물의 신뢰성 향상을 위한 샷피닝 공정 최적화 연구

남용석¹ · 정유인² · 김화수^{3*}

¹국방기술품질원, 항공센터, ²한국항공우주산업, 항공개발부, ³항공기술연구소

The Study of Shot Peening Process Optimization for Reliability Improvement of an Aircraft Structural Part

Yong-Seog Nam¹ · Yoo-In Jeong² · Hwa-Soo Kim^{3*}

¹Aeronautical Center, Defence Agency for Technology and Quality, Jinju, Republic of Korea

²Aircraft R&D Division, Korea Aerospace Industries, Ltd., Sacheon, Republic of Korea

³Aero Technology Research Institute Daegu, Republic of Korea

Purpose: There is active research that improves both reliability and fatigue life of structures which widely used in the aerospace fields of defense industry. The effects of three parameters (pressure, peening time, nozzle distance) on Almen intensity and coverage will be investigated by using the experimental and analyzed data.

Methods: we employed a Box-Behnken design. Additionally, to verify the validity of the optimal condition obtained from experimental results, metallurgical analyses of the shot-peened aerospace part were conducted with respect to surface morphology, residual stress.

Results: Optimal shot peening condition is determined as (distance, pressure, time) by optimizing simultaneously the two responses of intensity and coverage. At the optimal peening condition the prediction interval for Almen intensity is well within the required range. And, the validity of the condition was checked by using the real aerospace aluminum alloy plate.

Conclusion: Shot peening introduces significant levels of compressive residual stress and induces improves both reliability and fatigue life of structures

Keywords: Shot Peening, Almen Intensity, Surface Coverage, Response Surface Methodology

1. 서론

최근 항공분야에서는 구조용 재료의 피로수명과 신뢰성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그중 표면처리 기법은 부품의 표면 완전성을

변형시켜 마모, 피로, 응력부식 균열 등에 관하여 부품의 특성을 향상시키기 위하여 광범위하게 적용되고 있다. 이러한 표면처리 기법 중 샷피닝은 부품 표면에 압축잔류응력을 유발시키며, 이것은 금속 표면에 피로 균열의 성장을 완화시키는 효과가 있다[1, 2].

* 교신저자 nys0804@dtq.re.kr

2017년 8월 21일 접수, 2017년 10월 16일 수정본 접수, 2017년 10월 24일 게재 확정.

샷피닝은 금속의 작은 구형의 샷 볼을 고속으로 금속표면에 투사하여 충돌시키는 냉간 단조 공법이라 정의 할 수 있다. <Fig. 1>은 샷피닝에 의한 압축잔류응력에 대한 모식도를 나타내고 있으며, 샷의 입자는 $E = 1/2mv^2$ 의 운동에너지를 갖고 작은 해머 역할로 금속표면을 강타하며 이때 순간적으로 국부적인 발열을 일으켜 재료에 영구변형을 주고 샷 볼은 반발하여 표면에서 이탈하게 된다. 이때 샷 볼은 재료의 표면에 자국을 형성하며 표면층에 압축잔류응력을 생성시킨다. 구형인 작은 샷 볼이 충돌할 때 일반적으로 높은 속력을 가지고 있어서 재료표면에 소성변형을 유발하여 기계적 성질을 변화시킨다. 따라서 샷피닝 가공을 하면 재료의 표면경도는 증가하고, 표면근처에 생성된 압축 잔류응력이 피로수명의 증가와 재료의 신뢰성 향상에 상당한 영향을 미친다.

압축잔류응력은 <Fig. 2>의 연구 결과처럼 재료표면으로부터 약 0.1~0.3mm 정도의 깊이까지 분포층을 형성하며, 최근에는 펄스 레이저 등을 이용한 레이저 피닝 기법으로 1mm 이상의 깊이까지 응력분포층을 형성시키고 있다[3]. 재료의 피로파괴는 인장환경

에서 발생함으로 샷피닝 가공으로 형성된 금속 표면의 압축잔류응력은 외부의 반복하중이 재료에 작용할 때 표면에 균열형성을 억제시켜 재료의 피로에 대한 수명을 연장시킨다[4, 5].

특히, 샷피닝은 제품의 형상과 크기에 제한이 없어 다양한 부품에 적용 가능하고 공정 특성상 높은 생산성으로 많은 산업현장에서 적용되고 있으나, 단순히 피로특성이 좋아진다고 알고 있을 뿐 최적의 피닝 공정조건을 찾고자 하는 노력이 부족하였고, 효과가 얼마나 중요한가를 아직 인식하지 못하고 있는 실정이다. 샷피닝의 품질은 알멘 스트립(Almen strip)의 강도(intensity)와 커버리지(coverage)의 양 및 압축잔류응력 크기에 의존한다. 특히, 알멘 강도와 커버리지는 샷피닝 공정의 효과성과 반복성을 보증하기 위한 중요한 척도로 사용된다[6-8].

과거 수십 년 동안, 실험계획법은 실험 횟수를 줄이기 위해 제품 및 공정의 최적화에 가끔씩 적용되었다. 실험계획법은 정보량의 획득 효율에 대해 연구하는 학문으로 시스템 혹은 공정의 인자와 반응 값에 대한 인과관계를 결정하기 위한 접근방법이다. 다소 복잡

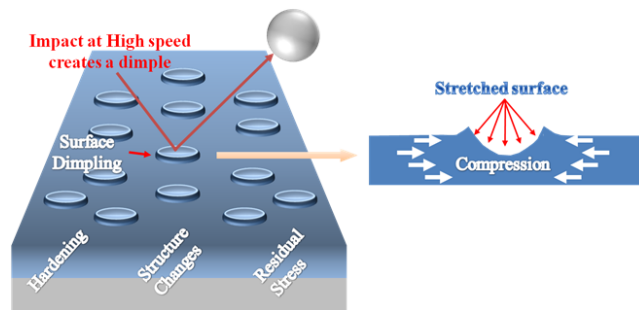


Fig. 1 Major surface effect of shot peening

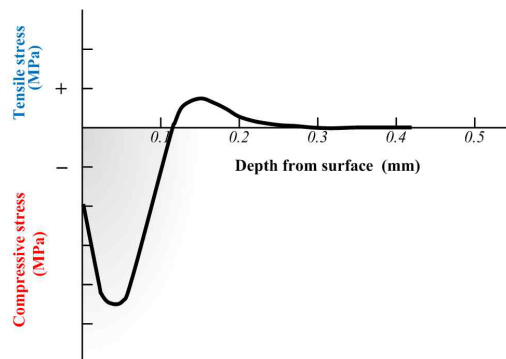


Fig.2 Distribution of compressive residual stress on depth from surface

하더라도 데이터를 산출하여 실증적으로 이를 결정하고자 할 때의 정보량의 채택 방법 및 해석 방법을 연구하는 분야이다. 반응표면 분석법은 복수의 변수 작용으로 반응이 복합적으로 나타나는 문제를 수학적으로, 통계적으로 분석하는 방법이라고 하며, 여러 개의 변수가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수에 영향을 주고 있을 때 이러한 반응의 변화가 이루는 반응 표면에 대한 통계적 분석방법을 말한다. 반응 표면에 일반적으로 이용되는 실험계획법은 중심합성법과 Box-Behnken 실험계획법이 있다. 중심합성법은 2k 요인실험에서 각 변수의 두 수준에서만 실험을 수행하며, Box-Behnken 실험계획법은 1차, 2차 항을 효율적으로 추정하고자 할 때 그리고 모든 실험이 안정된 공정에서 이루어진다고 확신할 때 활용한다.

본 논문은 국방산업의 항공분야에 널리 사용하는 구조물의 피로수명과 신뢰성을 향상시키기 위하여 슛피닝 공정의 최적화 방안을 연구하였다. 알멘스트립 시험편에 대한 노즐 거리, 압력, 슛피닝 시간에 대해 반응표면 분석법을 적용하여 조사하였다. 반응표면분석법에 의하여 알멘 강도와 커버리지에 대한 1차 효과, 2차 효과와 교호작용을 조사하였으며, 동시에 최적조건을 선정하였다. 재료의 피로수명과 신뢰성 향상 여부를 확인하기 위하여, 국방산업 항공 구조 분야에 널리 사용되는 Aluminum 7050 재료에 대해 선정된 최적조건으로 슛피닝 처리하여 표면 형태학 잔류응력을 조사하여 재료의 피로수명과 신뢰성 향상에 대해 조사하였다.

2. 본론

2.1 재료 및 시험방법

스�피닝에 사용된 슛 불은 ASH-230의 0.56 mm~0.70 mm Cast steel을 사용하였다. 알멘스트립은 A-Type을 사용하였으며, 알멘 강도를 측정하기 위해 Almen gage를 사용하였으며, 커버리지 측정은 15배 확대경을 활용하였다. 실험에 사용된 주요 인자는 압력, 피닝 시간, 노즐거리이며 각각의 인자별 수준은 <Table 1>과 같다.

3개의 인자에 대해 Box-Behnken 실험계획법을 적용하여 <Table 2>와 같은 직교배열표를 작성하였다. 표에서 각각의 인자에 대해 저, 중, 고 수준에 대해 -1,

Table 1 Factor levels for the experiment

Factor	Level 1	Level 2	Level 3
Pressure (psi)	20	40	60
Exposure time (sec)	10	40	70
Nozzle distance (cm)	10	40	50

Table 2 Three-factor Box-Behnken design matrix

Number	X ₁	X ₂	X ₃
1	1	-1	-1
2	1	1	0
3	0	-1	1
4	0	1	-1
5	-1	0	1
6	0	0	0
7	-1	1	0
8	0	-1	-1
9	0	0	0
10	1	0	1
11	-1	0	-1
12	-1	-1	0
13	0	0	0
14	0	1	1
15	1	-1	0

0, 1로 각각 명시하여, 3인자 3수준으로 총 15회 실험을 계획하였다. 반응변수의 목표값은 알멘강도 0.254 mmA이며 커버리는 100%로 정하였다. 요구되는 규격범위는 알멘강도가 0.216mmA~0.292mmA이며, 커버리지는 100% 이상이다.

실험은 실험 오차를 최소화하기 위하여 랜덤으로 수행하였으며, 반응 요소인 Y(알멘 강도 혹은 커버리지)의 수학적 관계식은 2차 방정식으로 표현하였다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{i,j} X_i^2 + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \beta_{i,j} X_i X_j + \epsilon$$

여기서 Y는 관찰된 반응변수이며, x_i 와 x_j 는 코딩된 인자 값이다. β_0 는 상수이며, β_i , β_j 및 $\beta_{i,j}$ 는 선형, 2차 항과 교호 작용을 나타낸다. 실험 데이터에 대한 통계적 분석은 MINITAB 16® 통계 패키지[6]를 사용하였다.

3. 시험 및 결과

3.1 시험 및 통계적 분석

Box-Behnken 계획법에 따라 3인자 3수준으로 실험한 결과 <Table 3>과 같다

실험 데이터는 분산분석법에 의해 요인들 간의 선형, 2차 효과 및 교호작용을 분석하였으며 세부 결과는 <Table 4>와 같다. 알멘 강도 대한 결정계수(R^2)는 0.9813이다. 결정계수(R^2)는 총 변동 중에서 회귀 직선에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율로 범위는 $0 \leq R^2 \leq 1$ 이다. 결정 계수의 값이 0에 가까우면 추정된 회귀직선은 쓸모없고, 값이 클수록 쓸모 있는 회귀직선이 된다. 알멘 강도에 대한 회귀 방정식은 다음과 같다.

$$\hat{Y} = 103.555 + 16.111X_1 - 1.849X_2 - 1.504X_3 - 2.197X_3^2$$

또한, 커버리지에 대한 회귀 방정식은 다음과 같다

$$\begin{aligned} \hat{Y}_c = & 236.777 - 2.616X_1 + 33.752X_2 - 9.377X_3 \\ & - 33.311X_1^2 - 10.763X_1X_2 - 3.054X_1X_3 \\ & + 7.449X_2X_3 \end{aligned}$$

Table 3 Four-factor Box-Behnken design matrix

Number	X ₁	X ₂	X ₃	Almen intensity (mm)	Coverage (%)
1	60	40	10	0.415	100
2	60	70	30	0.437	100
3	40	10	50	0.278	30
4	40	70	10	0.278	100
5	20	40	50	0.204	100
6	40	40	30	0.204	100
7	20	70	30	0.206	100
8	40	10	10	0.206	80
9	40	40	30	0.320	100
10	60	40	50	0.409	100
11	20	40	10	0.192	100
12	20	10	30	0.192	20
13	40	40	30	0.326	100
14	40	70	50	0.323	100
15	60	30	30	0.371	70

Table 4 Statistical analysis results of BBD data for intensity

Term	Coefficients	SE (Coeff.)	T	P
Constant	103.555	1.0774	96.116	0.000
Pressure	16.111	0.8399	19.183	0.000
Time	-1.849	0.9455	-1.956	0.086
Distance	-1.504	0.8422	-1.786	0.112
Distance×Distance	-2.197	1.3281	-1.655	0.137

$R^2 = 98.13\%$, Adjusted $R^2 = 97.19\%$, Prediction $R^2 = 95.01\%$.

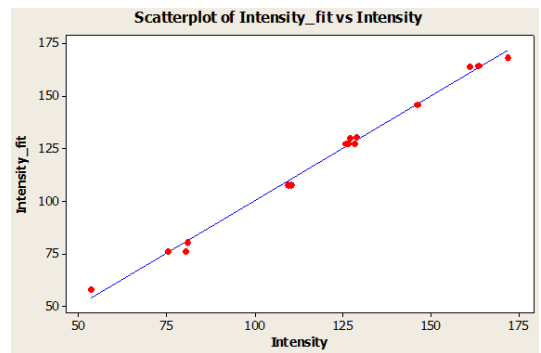


Fig. 3 Scatter plot between the fitted and experimental intensity values

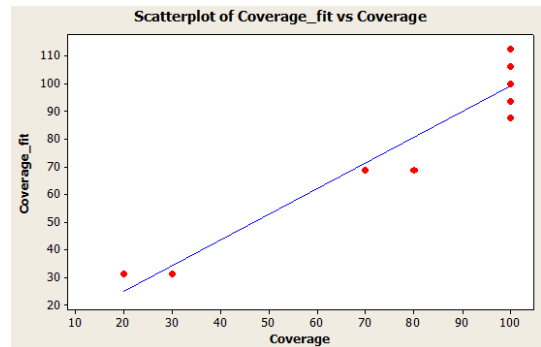


Fig. 4 Scatter plot between the fitted and experimental coverage values

관찰된 데이터와 피팅한 산점도를 분석한<Fig. 3> 및 <Fig. 4>와 같이 관측한 데이터와 예측한 데이터의 상관관계가 매우 높은 것을 알 수 있다. 커버리지가 알멘 강도보다 상대적으로 상관관계가 다소 미흡한 이유는 커버리지는 목측으로 5% 단위로 측정하였기

때문에 측정값이 다소 불확실한 것으로 나타났다.

또한, 2개 인자의 교호작용을 명확히 확인하기 위하여 등고선도 분석한 결과<Fig. 5>~<Fig. 7>과 같다. <Fig. 5>는 알멘 강도에 대한 피닝 시간과 압력과의 상관관계를 나타낸 그림으로, 압력은 약 60 psi에서 피닝 시간은 약 40초~70초 시간에 알멘 강도가 최적

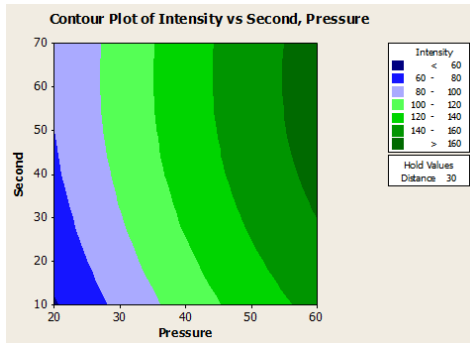


Fig. 5 Contour plot of intensity in terms of time and pressure

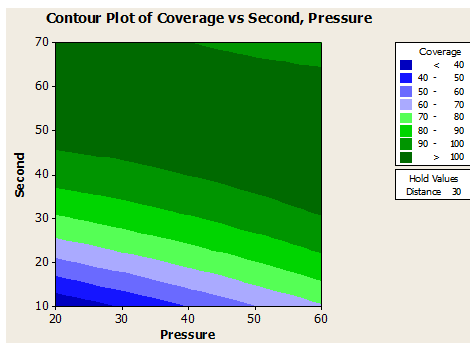


Fig. 6 Contour plot of coverage in terms of time and pressure

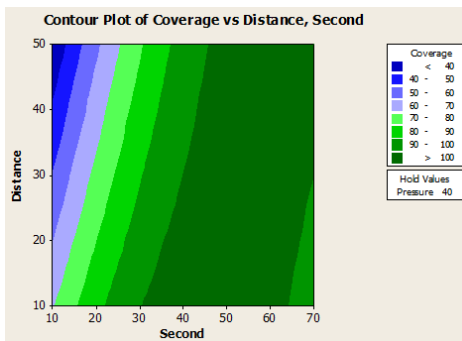


Fig. 7 Contour plot of coverage in terms of distance and time

값에 도달하는 것을 알 수 있다. <Fig. 6>은 커버리지에 대한 시간과 압력과의 상관관계를 나타낸 그림으로, 압력은 약 20 psi ~ 60 psi 전 구간과 시간은 50초 ~ 70초 사이에서 커버리지가 최적 값에 위치함을 알 수 있다. 또한, <Fig. 7>은 커버리지에 대한 거리와 시간과의 상관관계로, 시간은 약 40초~60초 사이와 노즐과 공작물간의 거리는 10cm~50cm 사이에서 최적 값이 나타남을 알 수 있었다.

반응변수 목표값인 알멘 강도 0.254mmA와 커버리지 100%에 만족하는 최적 공정조건은 공작물과 노즐간 거리(30cm), 숏볼의 분사 압력(28psi), 피닝 작업 시간(50초)이다. 실험을 수행한 결과 0.279mmA와 100% 커버리지를 확인하였다. 선정된 최적공정 조건은 목표값인 알멘 강도 0.254mmA와 요구되는 규격범위인 0.216mmA~0.292mmA를 만족하며, 커버리지 또한 규격 요구조건인100%를 만족하였다.

3.2 확인 실험

실험결과와 재현성을 입증하기 위하여 실험계획법의 의해 선정된 최적조건으로5회 재현실험을 수행한 결과 평균 알멘강도는 0.279mmA와 커버리지 100%가 측정되었으며, 목표 값과 거의 일치됨을 알 수 있다. <Fig. 8>은 피닝 시간의 증가에 따라 알멘 강도의 변화를 나타내는 그래프로서, Miao et al.[6]의 결과에 따르면 알멘 강도는 피닝 시간에 따라 증가하다가 특성 시간 이후에는 수렴한다고 보고하였다. <Fig. 16>의 실험결과를 살펴보면, 피닝 시간이 증가됨에 따라 알멘 강도는 증가되다가 200초 이상부터는 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 Miao et al.[6]의 결과와 일치됨을 알 수 있다

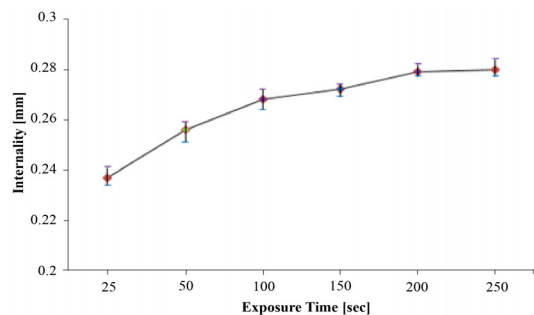


Fig. 8 Almen intensity in terms of exposure time

선정된 최적조건에 따라 항공 산업에서 널리 사용하는 재료인 Aluminum 7050 재료에 샷 피닝 처리한 후 압축 잔류응력과 재료 표면을 관찰하였다. 표면분석을 위하여 전자현미경(JSM-6610LV)을 사용하였다. <Fig. 9>는 오버 피닝 조건이 최적조건에서 과도한 국부적인 소성변형과 많은 수의 균열이 나타났다 또한 <Fig. 10>은 전자현미경으로 250배, 500배 확대한 표면 균열 사진으로, 과도한 피닝 조건을 수행한 경우 심한 균열과 깊은 딩플이 확인되었다. 피닝 시간 상대적으로 많이 증가할 경우 재료 표면에 미세 균열이 증가되어 재료의 피로수명과 신뢰성이 저하됨을 알 수 있다.

샷피닝에 의한 재료의 피로수명과 신뢰성이 향상되었는지 확인하기 위하여 잔류응력측정기(TEC 4000 X-ray diffraction system)를 이용하여 측정하였다. 잔류응력은 5개의 각도(-30°, -15°, 0°, +15°, +30°)에서 측정하여 평균값으로 산정하였다. 측정 결과는 약 220 Mpa

이였으며 피닝 시간의 변화에 따른 압축 잔류응력 값은 <Fig. 11>과 같다. 압축 잔류응력 약 25~50초 사이에서 급격히 증가된 후에 150까지 수렴하였으며, 피닝 시간이 증가됨에 따라 감소되는 경향을 보였다. 이러한 결과는 Grendahl et al.[8]와 Sharp and Clark[9]의 결과와 유사함을 알 수 있다.

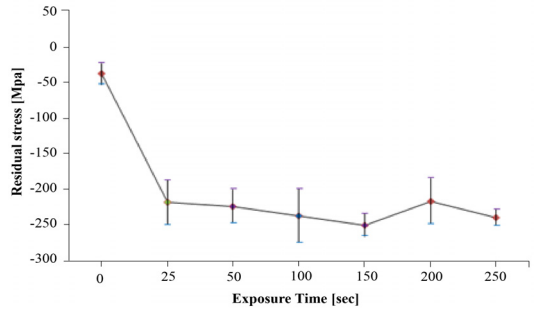


Fig. 11 Residual stress profile with exposure time

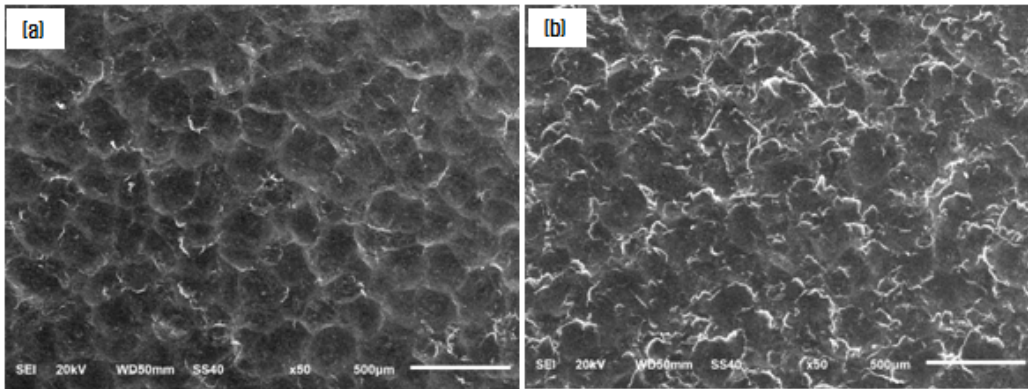


Fig. 9 SEM observation – (a) optimal, (b) over-peened (250 s)

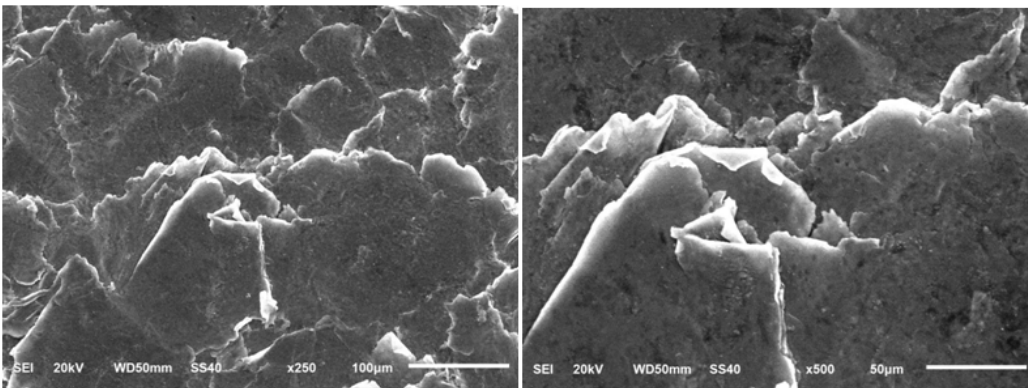


Fig. 10 SEM observations of over-peened surfaces (250 s)

5. 결론

국방산업의 항공분야에 사용되는 구조용 재료의 신뢰성을 향상시키기 위하여 실험계획법을 통한 슷 피닝 공정 최적화 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

Box-Behnken 실험계획법을 적용하여 3개의 인자(노즐과 공작물간 거리, 압력, 피닝 시간)에 대해 알멘 강도와 커버리지와의 상관관계를 조사하였다. 최적 피닝 조건은 압력 30cm, 압력 28psi, 피닝시간 50초로 선정하였다. 최적 피닝조건에서 재현성을 확인한 결과 값(0.279mmA)로 예측 값(0.254mmA)과 거의 일치됨을 확인하였다.

선정된 최적조건으로 Aluminum 7050 재료에 슷 피닝 처리를 수행한 후 표면의 형태학과 압축 잔류응력의 분포를 조사하였다. 시험 결과, 재료 표면에 균열이 거의 생성되지 않았으며, 압축 잔류응력이 약 220 Mpa를 생성시킴을 알 수 있었다. 이에 따라 재료의 피로 수명과 신뢰성이 향상됨을 예측할 수 있다. 또한 과도한 피닝을 수행할 경우, 표면에 미세균열이 증가되고, 압축 잔류 응력이 감소되는 현상이 발생됨을 확인 하였다.

향후 재료의 피로시험과 신뢰성 시험을 수행하여 재료의 슷 피닝 공정에 따라 피로시험과 신뢰성이 얼마나 향상되었는지에 대한 추가시험이 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] Mhaede, M. (2012). "Influence of surface treatments on surface layer properties fatigue and corrosion fatigue performance of AA7075 T73". *Material and Design*, Vol. 41, pp. 61-66.
- [2] Afazov, S. M., Becker, A. A., and Hyde, T. H. (2010). "Effect of micro-stresses from machining and shot peening processes on fatigue life". *International Journal of Manufacturing Technology*, Vol. 51, pp. 711-722.
- [3] Zupanc, U. and Grum, J. (2010). "Effect of pitting corrosion on fatigue performance of shot-peened aluminium alloy 7075-T651". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, , No. 9, pp. 197-1202.
- [4] Iida, K. (1984). "Dent and Affected Layer Produced by Shot Peening". *Process of the 2nd International Conference on Shot Peening*, Chicago, pp. 283-292.
- [5] Shin, Y. S., Jeong, S. K., and Seo, Y. W. (1998). "Fatigue Characteristics of SCM 22 Steel by Shot Peening". *Journal of the KSMTE*, pp. 126-13.
- [6] Miao, H. Y., Larose, S., Perron, C., and Lesque, M. (2010). "An analytical approach to relate shot peening parameters to Almen intensity". *Surface Coating Technology*, Vol. 205, pp. 2055-2066.
- [7] Wang, J., Liu, F., Yu, F., and Zhang, G. (2011). "Shot peening simulation based on SPH method". *International Journal Advance Manufacturing Technology*, Vol. 56, pp. 571-578.
- [8] Grendahl, S., Snoha, D., and Hardisky, B. (2007). "Shot-peening sensitivity of aerospace materials. ARL-TR-4095, Army Research Laboratory.
- [9] Sharp, P. K. and Clark, G. (2001). "The effect of peening on the fatigue life of 7050 aluminum alloy". DSTO-RR-0208, Defense Science and Technology Organisation, Commonwealth of Australia.