

## 임펠러식 쇼트피닝 머신에 의한 표면 커버리지 시뮬레이션

신기훈

서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

### Simulation of Surface Coverage Made by Impeller Type Shot-peening Machines

Ki-Hoon Shin

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Received 11 November, 2013; received in revised form 25 November, 2013; accepted 9 December, 2013

#### ABSTRACT

Shot-peening is frequently used on various mechanical parts because it can improve the fatigue life of components by generating compressive residual stresses on the surface. This can be done by repeatedly hitting the work-piece surface with small balls and making indentations on it. In fact, finding optimal peening time among various peening parameters is the most important. Under-peening can not improve the fatigue life sufficiently while over-peening causes cracks and reduces fatigue life in contrast. In general, optimal peening time is experimentally determined by measuring arc-height using Almen-strip in accordance with SAE J442 standard. To save the time and efforts spent in carrying out experiments to find optimal peening time, this paper presents a computer simulation algorithm for the estimation of surface coverage made by impeller type shot-peening machines (PMI-0608). Surface coverage is defined as the proportion of the work-piece surface that has been indented in a given time of shot-peening. An example (standard tensile test specimen) is presented to validate the proposed method.

**Key Words:** Fatigue life, Optimal peening time, Shot-peening, Simulation algorithm, Surface coverage

#### 1. 서 론

산업이 고도로 발전함에 따라 자동차, 항공기, 로봇 프레임 및 스포츠 용품 등의 다양한 분야에서 고강도, 내식성이 뛰어나며, 비강도가 우수한 재료에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히

부품의 파괴에 직접적으로 관련이 있는 피로수명을 향상시킬 수 있는 방법으로 쇼트피닝(shot peening) 가공에 대해서도 활발한 연구가 진행되고 있지만<sup>1)</sup>, 아직까지는 국내에 참고할 만한 서적이나 연구 결과를 생산현장에 도입하는 사례가 부족한 실정이다.

쇼트피닝 가공은 Fig. 1(a)와 같이 쇼트볼(shot ball)이라고 불리는 강구를 금속 표면에 투사하여 햄머링(hammering)하는 냉간단조 가공으로 금속

<sup>†</sup>Corresponding Author, shinkh@seoultech.ac.kr  
©2014 Society of CAD/CAM Engineers

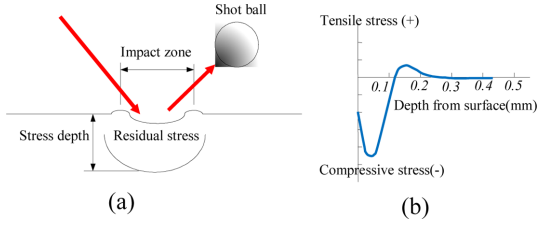


Fig. 1 Residual stress imparted by shot-peening

의 극표면 부위에 Fig. 1(b)와 같은 압축잔류응력 (compressive residual stress)을 생성하여 내피로를 받는 부품의 피로수명을 증가시키는 가공방법이다. 쇼트볼이 금속에 고속으로 충돌할 때의 운동에너지가 순간적으로 재료의 표면에 소성변형을 일으키며, 소성변형에 의해 늘어난 표면층에는 이전의 상태로 돌아가려는 힘이 작용하여 형성된 압축잔류응력이 내부의 인장응력(tensile stress)과 평형을 이루게 된다.

이러한 쇼트피닝 가공으로 재료의 표면에 생긴 압축잔류응력은 반복인장하중이 작용할 때 조금씩 상쇄되어 완전히 사라질 때까지 재료의 피로수명을 연장시킨다. 현재 최적의 쇼트피닝 조건은 각각의 쇼트피닝 머신의 특성과 부품의 형상을 고려한 반복적인 실험을 통하여 찾아낼 수 있다. 그러므로 이러한 반복적 작업은 많은 시간을 소비하게 되어 생산성 향상을 기대하기 어렵다.

주어진 조건하에서 최적의 쇼트피닝 시간은 SAE J442 규정에 의거 알멘스트립(almen strip)<sup>[4]</sup>의 아크하이트(arc-height)를 측정하여 커버리지(coverage)를 계산할 수 있다. 현재까지 쇼트볼의 충격에 의해 생성되는 압축잔류응력의 계산을 위해 유한요소해석을 이용한 많은 연구<sup>[7-10]</sup>들이 있었으나, 가공소재의 기하학적 형상에 따른 표면 커버리지의 예측과 관련된 연구는 미미한 실정이다.

본 논문에서는 이러한 실험적인 방법에 소요되는 시간과 경비를 줄이고, 좀 더 최적화된 쇼트피닝 가공 시간을 탐색하기 위해 쇼트피닝 가공시간에 따라 증가하는 커버리지를 계산할 수 있는 시뮬레이션 알고리즘을 제안하고자 한다.

## 2. 피닝강도 및 커버리지

Fig. 2와 같이 알멘스트립을 일정간격의 알멘홀더에 4개의 지지점으로 장착한 후, 쇼트피닝 가공을 하면 피닝된 전면부는 인장력을 받게 되고, 후

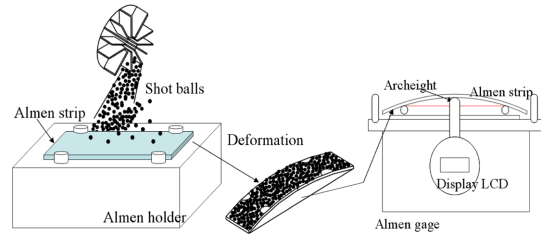


Fig. 2 Measurement of arc-height

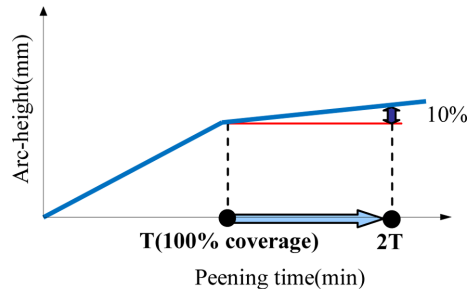


Fig. 3 Arc-height vs. peening time

면부는 전면부 인장력에 의해 압축을 받게 된다. 알멘홀더의 지지점을 풀면 전후면부의 인장압축력에 의해 알멘스트립은 곡률을 가지게 되고 이러한 곡률의 높이(아크하이트)를 전용 측정장치인 알멘게이지로 측정하여 피닝강도(peening intensity)를 예측할 수 있다.

측정된 아크하이트를 피닝시간을 변수로 하여 그래프로 나타내면 Fig. 3과 같이 아크하이트는 어느 정도 일정한 증가를 나타내다가 일정 시간 이후에는 증가폭이 감소하는 포화곡선의 형태를 나타낸다. 이러한 아크하이트에서 시간을 두 배 했을 때 아크하이트 증가분이 10% 미만인 곳을 커버리지(coverage) 100% 시간(T)으로 예측하고 있다. 여기서 커버리지는 전체 소재표면 중 주어진 시간 동안 쇼트피닝에 의해 가공된 표면의 비율로 정의된다. n개의 쇼트볼이 면에 수직하게 충돌할 경우의 커버리지는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

임의 형상의 가공 표면적을 S, 1개의 쇼트볼이 가공 표면에 수직으로 충돌 시 발생시키는 가공면적을 A라고 하면, 쇼트볼이 1회 충돌 시 커버리지 C<sub>1</sub>은 식 (1)과 같이 계산되며, n회 충돌 시의 C<sub>n</sub>은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$C_1 = \frac{A}{S} \tag{1}$$

$$C_n = C_{n-1} + (1 - C_{n-1})C_1 \\ = 1 - (1 - C_1)(1 - C_{n-1}) \quad (2)$$

식 (2)의  $C_n$ 은 식 (3)과 같이 최종적으로 유도될 수 있다.

$$C_n = 1 - (1 - C_1)^n \quad (3)$$

식 (2)와 (3)은 새로운 쇼트볼이 충돌할 때, 아직 가공되지 않은 표면을 가공할 확률로부터 유도할 수 있다.

### 3. 커버리지 계산 알고리즘

전술한 바와 같이 본 논문에서는 실험적으로 알멘스트립의 아크하이트를 측정하여 피닝시간을 예측하는 기존 방법의 단점을 극복하기 위하여 가공소재의 형상 및 피닝 가공변수로 부터 커버리지를 계산할 수 있는 알고리즘을 제안하고자 한다.

#### 3.1 쇼트볼의 가공 면적 계산

Fig. 4에서와 같이, 가공소재에 질량  $m$ 인 쇼트볼이 초기속도  $V$ 로 수직하게 충돌한 후  $V_r$ 의 속도로 되 튕다고 가정하면, 충돌에 의해 생긴 분화구(crater)의 부피( $W$ )와 가공소재의 경도( $H$ , bulk hardness) 사이에 아래 식 (4)의 관계가 성립한다<sup>[8]</sup>.

$$\frac{1}{2}m(V^2 - V_r^2) = HW \quad (4)$$

한편 분화구의 부피  $W$ 는 적분을 통해 아래 식 (5)와 같이 계산된다.

$$W = \pi \left( \left( \frac{D}{2} \right) h^2 - \frac{1}{3} h^3 \right) \quad (5)$$

일반적으로 분화구의 높이  $h$ 는 쇼트볼의 직경에 비해 아주 작은 값이기 때문에 부피  $W$ 는 아래 식 (6)의 근사값으로 계산할 수 있다. 한편  $(D/2)^2 =$

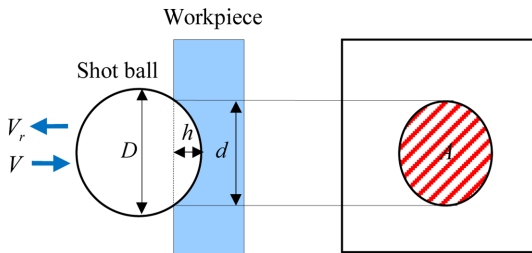


Fig. 4 Calculation of the crater area(A)

$(D/2 - h)^2 + (d/2)^2$ 의 관계식에서  $h^2 \approx 0$ 으로 근사하면  $h \approx (d^2/4D)$ 의 근사값을 얻을 수 있다.

$$W \approx \pi \left( \frac{D}{2} \right) h^2 \approx \pi \left( \frac{D}{2} \right) \left( \frac{d^2}{4D} \right) = \frac{\pi d^2}{32D} \quad (6)$$

식 (4)에 쇼트볼의 밀도  $\rho$ , 반발계수  $e (= V_r/V)$ , 부피  $W$ 를 대입하여 분화구 직경  $d$ 를 계산하면 분화구 면적  $A$ 는 아래 식 (7)과 같이 최종적으로 유도할 수 있다.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi}{4} \left( \left( \frac{8\rho(1-e^2)V^2}{3H} \right)^{1/4} D \right)^2 \quad (7)$$

위 식 (7)은 Tirupataiah<sup>[8]</sup> 등의 연구에서도 유사하게 유도되어 있다. 한편 Frija<sup>[9]</sup> 및 Han<sup>[10]</sup> 등의 연구에서는 쇼트볼의 반발계수  $e = 0.86$ , 충돌시간  $10^{-5}$  sec 등을 사용하여 유한요소 해석을 수행하였다.

본 논문에서는 식 (7)을 이용하여 쇼트볼에 의한 가공면적( $A$ )을 계산하는 알고리즘을 개발하였다. 식 (7)에 의하면 가공면적은 쇼트볼의 충돌속도( $V$ )에 근사적으로 선형 비례하는 것으로 알려져 있다.

#### 3.2 유효 쇼트볼 밀도의 계산

Fig. 5는 쇼트볼이 수직으로 충돌하는 경우와 비스듬히 충돌하는 경우를 비교하고 있다. 비스듬히 충돌하는 경우  $V_{eff} = V \cos \delta$ 이므로 유효한 가공면적은 식 (7)로부터  $A_{eff} = A \cos^2 \delta$ 이 된다. 그러므로  $m$ 개의 쇼트볼이 비스듬히 충돌한 후의 커버리지는 식 (3)으로부터 식 (8)과 같이 유도된다.

$$C_m = 1 - (1 - C_{eff})^{m-1} (1 - (C_{cur} + C_{eff})) \quad (8)$$

식 (8)에서  $C_{cur}$ 는 현재까지의 누적 커버리지,  $C_{eff} = A_{eff}/S = C_1 \cos^2 \delta$ 는 1개의 쇼트볼이 비스듬히 충돌 시 커버리지를 나타낸다. 식 (8)을 직접 사용하면 충돌각도 별로  $C_{eff}$  값이 변화하여 계산이 복잡해진다. 계산을 단순화 시키기 위해 아래와 같이  $C_{eff}$  대신  $C_1$ 을 사용하는 등가 시스템을 사용한다.

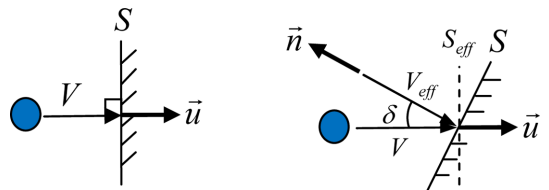


Fig. 5 Perpendicular impact vs. oblique impact

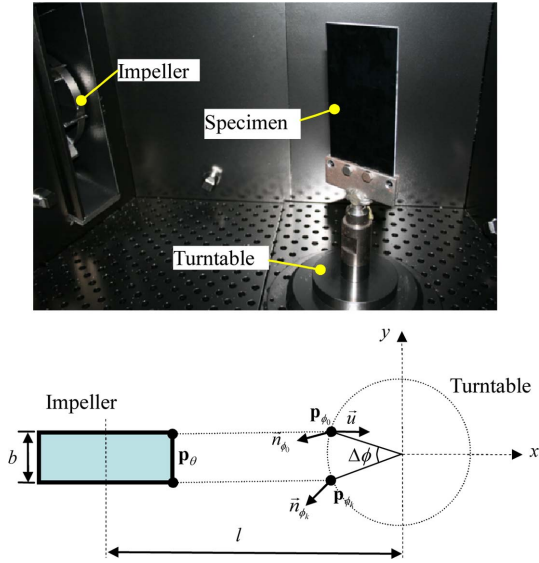


Fig. 6 Calculation of  $I_{eff}$  with reference to the angular position  $\phi$  of the turntable

즉, 단위시간 당 단위 면적에 수직으로 충돌하는 쇼트볼의 개수를 쇼트볼 밀도( $I$ )로 정의하면, 비스듬한 면( $I_{eff}$ )을 수직인 면( $I$ )과 비교할 때, 유효충돌면적 비( $=S_{eff}/S$ )가  $\cos\delta$ 배이고, 각 쇼트볼의 가공면적 기여도( $=A_{eff}/A$ )도  $\cos\delta$ 배이므로 식 (9)의 관계가 성립한다.

$$I_{eff} = I \cos^2 \delta \left[ \frac{\text{shots}}{\text{mm}^2 \cdot \text{sec}} \right] \quad (9)$$

Fig. 6에서와 같이 유효 쇼트볼 밀도( $I_{eff}$ )는 턴테이블의 각도( $\phi$ )에 따라 가공면의 법선벡터( $\vec{n}_{\phi_i}$ ,  $i = 0, 1, \dots, k$ ) 방향이 바뀌기 때문에 임펠러의 유효폭( $b$ ) 안에 들어와서 쇼트볼 충돌이 일어나는  $\Delta\phi$  각도를  $k$  등분한 후 수치적 적분을 통해서 아래 식과 같이 계산할 수 있다.

$$I_{eff} = \int_0^{2\pi} dI_{eff} = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \sum_{i=0}^k \frac{I(\phi_i)_{eff}}{k+1} \quad (10)$$

$$I(\phi_i)_{eff} = I(\phi_i) \cos^2 \delta_i = I(\phi_i) (-\vec{n}_{\phi_i} \cdot \vec{u})^2 \quad \text{if}$$

$$(\vec{n}_{\phi_i} \cdot \vec{u}) < 0$$

$$I(\phi_i)_{eff} = 0 \quad \text{if } (\vec{n}_{\phi_i} \cdot \vec{u}) > 0$$

실제 시뮬레이션 과정에서는 가공면이 다른 가공면에 의해 가려지는 경우에도  $I(\phi_i)_{eff} = 0$ 이 되

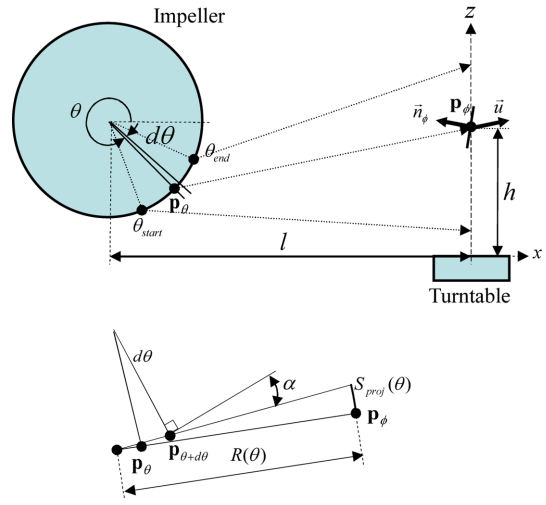


Fig. 7 Calculation of  $I(\phi, h)$

므로, 은선제거(hidden line removal) 기법을 이용하여 검사할 필요가 있다.

한편 가공면의 한 점( $p_\phi$ )에서의 쇼트볼 밀도( $I(\phi)$ )는 Fig. 7과 같이 턴테이블의 기준면으로부터의 높이( $h$ )에 좌우된다. 턴테이블에서의 각도  $\phi$  및 높이  $h$ 가 주어졌을 때  $I(\phi, h)$ 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$I(\phi, h) = \frac{\Delta B}{S_{proj}} = \frac{B \cdot d\theta}{R \cdot d\theta \cdot b} = \frac{B}{R \cdot b \cdot (\theta_{end} - \theta_{start})} \quad (11)$$

위 식 (11)에서  $B$  [shots/sec]는 단위시간당 하나의 임펠러에 공급되는 쇼트볼 수를 나타낸다.  $\theta_{start}$ 와  $\theta_{end}$ 는 임펠러에서 쇼트볼이 투사되는 유효투사범위를 지정하는 투사 시작각과 투사 끝각을 나타낸다.  $\alpha$  각은 쇼트볼이 임펠러의 블레이드에 수직인 직선과 이루는 각도로 쇼트볼이 반경방향의 속도 성분과 탄젠트방향의 속도 성분을 가지기 때문에 생기는 각도다.

### 3.3 커버리지의 계산

본 논문에서 시뮬레이션에 사용되는 CAD 모델은 제일 먼저 삼각형 facet 모델로 근사화 된다. 다음으로 Fig. 8에서와 같이 각 꼭지점에서 유효 쇼트볼 밀도를 구하여 아래 식과 같이  $i$  번째 삼각형 요소에 단위시간 당 수직으로 충돌하는 쇼트볼의 수( $B_i$ )를 계산한다.

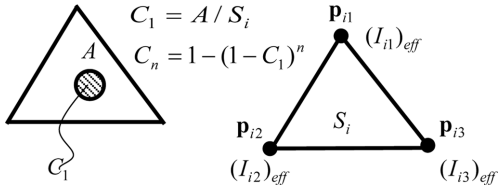


Fig. 8 Calculation of the surface coverage of the  $i$ -th facet element

$$B_i = \frac{(I_{i1})_{eff} + (I_{i2})_{eff} + (I_{i3})_{eff}}{3} S_i [\text{shots/sec}] \quad (12)$$

최종적으로  $i$  번째 삼각형 요소에서 피닝 시간  $t$  에 따른 커버리지는 아래 식으로 계산할 수 있다.

$$C_i(t) = 1 - \left(1 - \frac{A}{S_i}\right)^{B_i \cdot t} \quad (13)$$

#### 4. 적용 예

본 연구에서 제안한 쇼트피닝 커버리지 시뮬레이션 알고리즘은 C++ 언어와 ACIS(Spatial Technologies Inc.) 커널 루틴을 사용하여 통합모델링 시스템<sup>[11-13]</sup> 상의 한 모듈로 구현하였다. GUI 구현을 위해 MFC와 OpenGL 그래픽 라이브러리가 사용되었다.

##### 4.1 육면체 블록의 커버리지 시뮬레이션

Fig. 9는 육면체 블록 형상의 가공소재에 대한

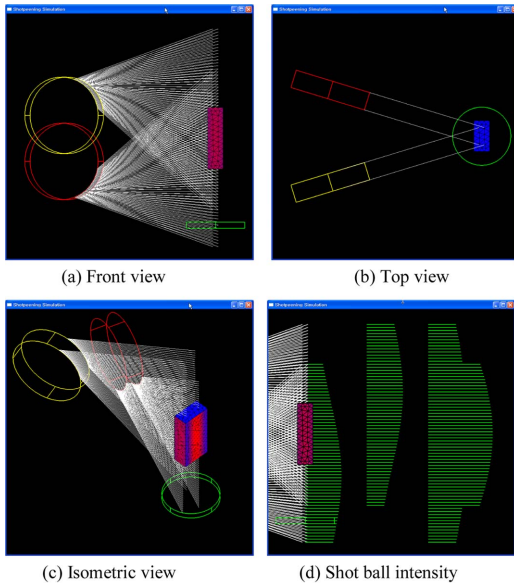


Fig. 9 Simulation result for a simple hexahedron

커버리지 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 시뮬레이션에 사용된 쇼트피닝 머신은 (주)세명 쇼트기계의 PMI-0608으로 Fig. 9(a)와 같이 상향식과 하향식 각각 1개씩의 임펠러를 구비하고 있다. Fig. 9(d)에 표시된 3개의 그래프는 각각 상향식, 하향식, 상향식+하향식 임펠러에 의한 수직면에서의 유효 쇼트볼 밀도를 보여주고 있다. 가공소재의 각 위치에서의 커버리지 차이는 Fig. 9(c)에서와 같이 가공소재 면에서의 색상차이로 나타난다. 턴테이블이 일정한 속도로 회전하기 때문에 육면체 블록의 경우 Fig. 9(c)와 같은 커버리지 차이를 보이는 것으로 예측되는 데, 예측 결과는 사용자의 직관과 잘 부합하는 것으로 판단된다.

##### 4.2 Al7075-T6 표준인장 시험편

실제 쇼트피닝 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 10의 치수를 가지는 Al7075-T6 표준 인장시험편을 제작하였다. Al7075-T6알루미늄 합금은 고강도, 고경량, 내식성이 뛰어난 재료로서 항공기 부품, 자동차 부품, 로봇 골격 및 스포츠 용품까지 다양하게 사용되고 있다. 가공된 표준시험편의 표면은 어노다이징 처리하여 피닝 시간 증가에 따른 커버리지 변화의 식별이 용이하도록 하였다.

실제 실험과 시뮬레이션에 사용된 쇼트피닝 가공변수들은 아래 Table 1에 요약되어 있다.

Table 1의 가공변수들과 가공소재인 Al7075-T6의 경도값  $H = 1865 \text{ MPa}$  (= Vickers hardness (175 g/cc)  $\times 9.806/0.92$ )를 식 (7)에 대입하면 가공 분화

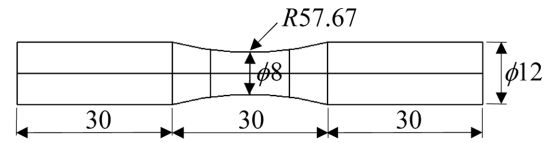


Fig. 10 Dimensions of Al7075-T6 tensile specimens

Table 1 Shot-peening simulation parameters

Shot ball diameter	$\phi 0.8 \text{ mm}$
Shot ball velocity	40 m/sec
Shot ball mass flow rate	24 kg/min
Shot ball desnsity ( $\rho$ )	7,800 kg/m <sup>3</sup>
Projected area (Meyer) hardness of Al7075-T6 (H)	1,865 MPa

구 면적  $A = 0.03426 \text{ mm}^2 (d = 0.209 \text{ mm})$ 을 얻을 수 있다.

Fig. 11은 커버리지 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. Fig. 11(a)에서와 같이 Al7075-T6 표준 인장시험편의 사이즈가 피닝 머신에 비해 상대적으로 작기 때문에 인장시험편 전체가 Fig. 9(d)의 유효 쇼트볼 밀도가 큰 부분에 모두 포함된다. 하지만 Fig. 11(b)에서와 같이 표준인장 시험편의 A부(중간부)와 B부(라운드링 부)를 비교할 경우 유효 쇼트볼 밀도가 각각 1.62, 1.55 shots/mm<sup>2</sup>·sec로 약 4.5% 정도 A부가 큰 것으로 계산되었다. 한편 Fig.

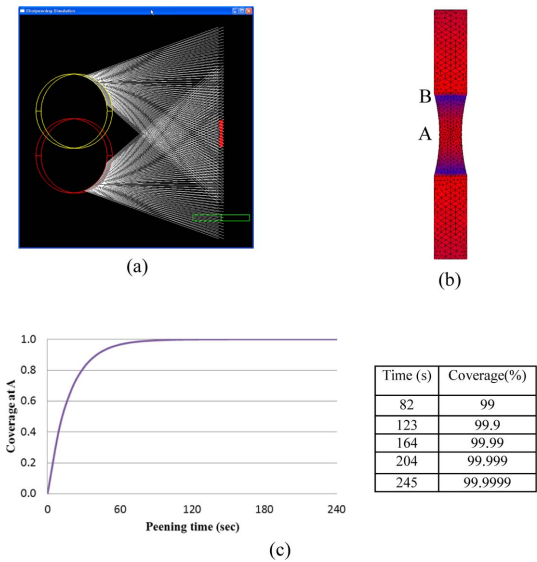


Fig. 11 Simulation results for the Al7075-T6 tensile specimen

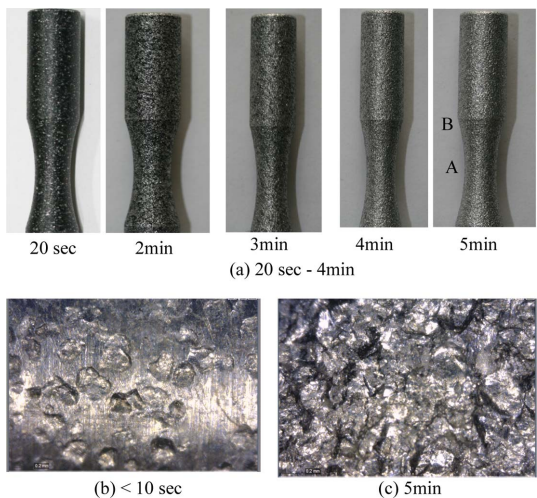


Fig. 12 Images of peened surfaces

11(c)는 A부에서의 피닝시간에 따른 커버리지의 변화를 그래프와 표로 보여주고 있다.

Fig. 12(a)는 피닝 시간에 따른 실제 가공 표면의 변화를 보여주고 있다. 하지만 Fig. 11(b)의 A부와 B부의 차이는 미미하기 때문에 명확하게 관측되지 않는다.

Fig. 12(b)와 (c)는 각각 10초 이내와 5분 경과 시의 가공 표면의 현미경 사진을 보여주고 있다. Fig. 12(b)에서는 식 (7)에 의해 계산된 결과와 비슷하게  $\phi 0.2$  근처의 가공 분화구가 많이 관측되었다.

알멘스트립의 아크하이트를 이용한 선행 연구<sup>[1]</sup>에 의하면 약 4분 정도에서 최적의 피닝조건이 탐색된 것으로 나타난다. 시뮬레이션 결과에서 4분의 가공 시간은 커버리지가 99.999%에서 99.9999%로 바뀌는 시간 혹은 커버리지 99%를 돌파하는 가공시간의 약 3배에 해당하는 시간임을 Fig. 11(c)에서 알 수 있다. 이러한 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교 분석하여 다른 가공소재 및 형상에 대해서도 근사적으로 최적의 피닝 시간을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

즉 식 (13)의 커버리지 계산식에서 피닝시간이 무한대가 되어야 커버리지 100%가 달성되기 때문에 시뮬레이션에서 계산된 커버리지 값이 얼마일 때 100%로 간주할 것인가는 Fig. 3의 아크하이트 측정 실험값과 비교하여 예측할 필요가 있다.

### 5. 결 론

기존의 쇼트피닝 공정에서는, 쇼트피닝 시간에 따른 알멘스트립의 아크하이트를 측정하여 최적의 쇼트피닝 시간을 실험적으로 구하였다. 본 논문에서는 이러한 실험적인 방법에 소요되는 시간과 경비를 줄이고, 좀 더 최적화 된 쇼트피닝 가공 시간을 탐색하기 위해 쇼트피닝 가공시간에 따라 증가하는 커버리지를 계산할 수 있는 시뮬레이션 알고리즘을 제안하였다.

먼저 가공소재의 솔리드 모델을 삼각형 근사 모델(facet model)로 변환한 후, 쇼트피닝 가공변수(쇼트볼 직경, 쇼트볼 투사 속도, 쇼트볼 투사량, 가공소재)에 따른 삼각형 요소의 각 노드 점에서 쇼트볼 밀도를 계산한다. 삼각형 요소의 세 노드 점에서의 쇼트볼 밀도를 평균하고, 삼각형 요소의 면적을 계산하여 최종적으로 피닝시간에 따른 커버리지 변화를 예측한다.

가공소재에 따른 쇼트피닝 가공변수가 너무 다양하여 아주 정확한 커버리지의 예측은 어려우나, 본 논문에서 제안한 커버리지 시뮬레이션 알고리즘은 가공소재의 형상에 따른 사각지대의 예측 및 전체적인 쇼트피닝 시간 예측에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 뿐만 아니라, 임펠러식 투사 장비 외에 에어 노즐 식의 쇼트피닝 장치 등에도 약간의 수정을 통해 커버리지 예측이 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원으로 수행되었습니다.

### References

1. Nam, J.H., Kim, T.H. and Cheong, S.K., 2003, Effects of Shot Peening on the High Temperature Fatigue Characteristics of Al7075-T6, *Proceedings of KSAS Conference*, pp.903-907.
2. Kim, J.C. and Cheong, S.K., 2012, Microscopic Analysis of Effect of Shot Peening on Corrosion Fatigue behavior of Aluminum Alloy, *Transactions of the KSME (A)*, 36(11), pp.1381-1389.
3. Kim, H.T. and Shin, K.H., 2007, Simulation for the Estimation of Shotpeening Coverage, *Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers Conference*, pp.843-847.
4. Guagliano, M., 2001, Relating Almen Intensity to Residual Stresses Induced by Shot Peening: a Numerical Approach, *Journal of Materials Processing Technology*, 110, pp.277-286.
5. Kim, H.T. and Shin, K.H., 2007, A Study on the Effects of Federate and Shotpeening on the Fatigue Life of Al 7075-T6 Specimens, *Transactions of KSMTE*, 16(4), pp.64-70.
6. Jang, H.S., Kim, H.S. and Shin, K.H., 2012, A Study on Performance Improvement of Electrical Discharge Machining for Producing Micro-holes Using a Shot Blasting Surface Treatment, *Transactions of Materials Processing*, 21(5), pp.312-318.
7. Majzoobi, G.H., Azizi, R. and Nia, A.A., 2006, A Three-dimensional Simulation of Shot Peening

Process Using Multiple Shot Impacts, *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165, pp.1226-1234.

8. Tirupataiah, Y., Venkataraman, B. and Sundararajan, G., 1990, The Nature of the Elastic Rebound of a Hard Ball Impacting on Ductile, Metallic Target Materials, *Materials Science and Engineering: A*, 124(2) pp.133-140.
9. Frija, M., Hassine, T., Fathallah, R., Bouraoui, C. and Dogui, A., 2006, Finite Element Modeling of Shotpeening Process: Prediction of the Compressive Residual Stresses, the Plastic Deformations and the Surface Integrity, *Materials Science and Engineering, A* 426, pp.173-180.
10. Han, K. and Peric, D., 2000, A Combined Finite/discrete Element Simulation of Shot Peening Processes, *Engineering Computations*, 17(5), pp.593-619.
11. Shin, K.H. and Kim, J.H., 2005, An Integrated CAD System for FEA-based Design of Heterogeneous Objects, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 10(5), pp.328-338.
12. Shin, K.H. and Kim, S.H., 2006, Decomposition-based Process Planning for Layered Manufacturing of Functionally Gradient Materials, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 11(3), pp.223-233.
13. Shin, K.H. and Lee, J.K., 2006, CSG-based Representation for Free-form Heterogeneous Object Modeling, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 11(4), pp.235-234.



### 신기훈

1990년 서울대학교 기계설계학과 학사

1992년 서울대학교 기계설계학과 석사

2002년 Univ. of Michigan, Ann Arbor 기계공학과 박사

1990년 3월~2005년 2월 (주)대우일렉트로닉스 책임연구원

2005년 3월~현재 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 부교수

관심분야: CAD/CAM/CAE, Modeling and Layered Manufacturing of Heterogeneous Materials, Sports Biomechanics