

저온분사 공정에서 구리분말 충돌속도 변화에 따른 충돌변형 거동의 유한요소해석

조규진 · 윤승채 · 김형섭*
충남대학교 나노공학부

Finite Element Analysis on the Impactive Deformation of a Cu Particle in Cold Spraying Processing : Effect of Velocity

Kyu Jin Cho, Seung Chae Yoon and Hyoung Seop Kim*

Department of Nano Materials Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

(Received May 6, 2008; Accepted June 15, 2008)

Abstract Dynamic plastic deformation behavior of copper particles occurred during the cold spray processing was numerically analyzed using the finite element method. The study was to investigate the impact as well as the heat transfer phenomena, happened due to collision of the copper particle of 20 μm in diameter with various initial velocities of 300~600 m/s into the copper matrix. Effective strain, temperature and their distribution were investigated for adiabatic strain and the accompanying adiabatic shear localization at the particle/substrate interface.

Keywords : Cold gas spray, High velocity impact, Copper particle, Deformation behavior, Finite element method, Shear localization

1. 서 론

일명 저온분사라 일컬어지는 코팅공정은 입자와 모재의 용융점보다 낮은 온도에서 코팅이 이루어진다는 점에서 열용사 공정과 큰 차이를 보인다[1]. 저온분사는 열용사와는 다르게 분말이 고상상태에서 모재에 결합이 되며, 분말의 고상상태와 낮은 공정 온도로 인한 장점을 가지고 있다. 즉, 낮은 온도에서 이루어지는 공정이어서 모재의 선택범위가 넓고, 최초 분말의 고유 물성 유지가 가능하다. 또한 냉각의 영향 및 낮은 공정온도로 인하여 모재와 분말간의 열팽창계수 차이에 기인하는 계면에서의 인장응력이 발생되지 않으며, 오히려 충돌의 효과로 압축응력이 발생하고 기공률이 현저하게 낮게 된다. 저온분사에서 가장 중요한 요소는 온도라고 할 수 있는데, 충돌 후 온도는 분말의 계면에서 약 1 mm이하의 범위에서 온도가 증가하기 때문에 전체적인 코팅 특성에는 영

향을 미치지 않으며, 이에 일반적으로 계면의 온도가 높을수록 적층효율 및 접합강도는 증가하게 된다는 보고된 바가 있다[1-5]. 기본적으로 두 물체가 더 빠른 속도를 가지고 충돌할 경우 충격 및 운동에너지는 속도에 비례하여 변형 정도와 응력 및 온도변화 등이 큰 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있으나, 정성적으로만 예측이 가능할 뿐 정량적 제시가 미흡하여 산업적 응용에 병목으로 작용하게 된다. 따라서 저온분사에서 정성적인 연구 및 정량적 수치 해석이 가능한 선행 연구가 이루어져야 한다.

그림 1은 장치의 개략도로서 작동원리를 살펴보면, 압축가스를 De Laval 형태의 노즐에 통과시키면 기체가 팽창하여 그때 발생하는 팽창력이 초음속 공기 흐름을 만들고 고속의 가스에 1~50 μm 의 입도를 가진 금속이나 복합재료 분말을 장입하면, 입자와 가스간의 운동량 이송에 의해 입자가 고속으로 비행하게 되며, 고속의 입자는 모재와 충돌 후 소성변형이 발생한다.

*Corresponding Author : [Tel : +82-42-821-6596; E-mail : hskim@cnu.ac.kr]

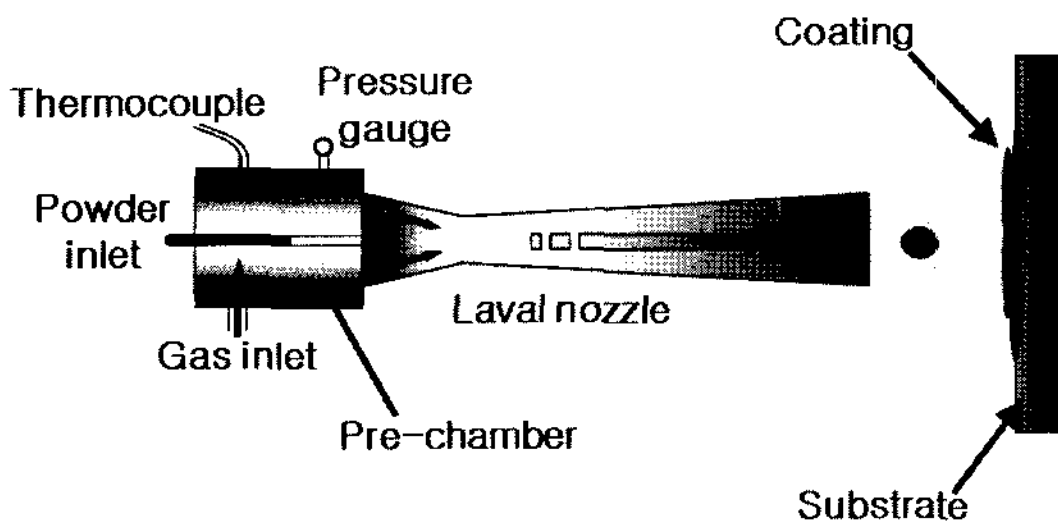


Fig. 1. Schematic of cold spray.

이러한 두 물체간의 소성변형에 의해 결합이 발생하게 되며 코팅층이 형성되게 되는데, 열용사의 경우 열에너지와 운동에너지의 합으로 코팅을 형성하지만, 저온분사의 경우는 입자의 운동에너지만으로 코팅을 형성하는 코팅 기법이다[1]. 이러한 두 물질간의 결합이 일어나기 위해 필요한 입자의 최소한의 속도를 임계속도(critical velocity)라 하며, 이 임계속도는 재료의 물성에 따라 큰 차이가 있으나 일반적으로 약 300~1200 m/s로 보고되고 있다[1-3, 6-10]. 저온분사 코팅은 입자간의 결합기구(bonding mechanism)로서 제시되어 있으며, 고속의 충돌이 분말표면의 얇은 산화막을 파괴하여 드러난 내부입자가 충돌로 인한 큰 에너지로 인해 모재와 원자간 결합을 이루는 것으로 알려져 있고, 이는 포지용접이나 폭발용접과 유사한 원리이다 [2, 6, 11, 12].

기본적으로 두 물체가 더 빠른 속도를 가지고 충돌할 경우 충격 및 운동에너지는 속도에 비례하여 변형 정도와 응력 및 온도변화 등에 큰 영향을 줄 수 있으나, 정성적으로만 예측이 가능할 뿐 정량적 제시가 미흡하여 산업적 응용에 병목으로 작용하게 된다. 따라서 저온분사에서 정성적인 연구 및 정량적 수치 해석이 가능한 선행 연구가 이루어져야 한다. 이에 본 연구에서는 입자속도의 변화에 따른 모재 충돌시 각 소재의 온도변화 및 변형률 분포 고찰을 통해 운동 에너지 변화에 따라 소재에 미치는 공정 변수를 제시하고자 하며, 발생하는 충돌 속도에 따른 공정 변수에 대한 정량적 해석을 기초로 저온분사에 필요한 선행 공정 연구를 수행하고자 한다.

2. 유한요소 해석법

모재에 충돌하는 입자의 변형 거동을 해석하기 위해 상용의 탄소성해석 코드인 ABAQUS를 사용하였

다[13]. 본 연구에서는 모재와 입자를 같은 구리 물성으로 한정하였고, 고려해야 할 물리적 특성으로 밀도 8960 kg/m³, 비열 383 J/kg·K, 열전도도 386 W/m·K이고, 탄성영역 물성은 영률 124 GPa, 포아송비 0.34, 소성영역 물성은 Johnson-Cook 소성모델 식 (1)을 사용하였다[6, 7, 10].

$$\sigma_y = (A + B\epsilon_{eff}^N)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*M}) \tag{1}$$

여기서 사용된 값은 A=90 MPa, B=292 MPa, N=0.31, C=0.025, M=1.09, T_m=1356 K, T_{room}=298 K 을 사용하였는데, T_{room}은 상온을 나타내고 T_m은 녹는점을 의미한다. 또한 ε_{eff}^N은 소성변형률을 나타내고 ε^{*}는 변형률속도를 나타내었고 각각의 A, B, N, C, M은 재료 상수를 나타낸다. 여기서 T*는 다음 식 (2)의 관계를 가지고 있다.

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_m - T_{room}} \tag{2}$$

유한요소 계산의 효율성을 극대화하기 위해 3차원의 충돌 문제를 2차원으로 접근하여 축대칭 모델을 이용하였으며, 그림 2에서의 경계면 A-B-C-D는 X-변위에 대해서 구속조건을 주었고, 경계면 D-E 경우는 Y-변위에 대해서 구속조건을 주었으며, 그 밖의 다른 영역은 구속인자를 주지 않았다. 입자의 지름은 20 μm이고 모재의 반지름과 높이는 각각 100 μm로

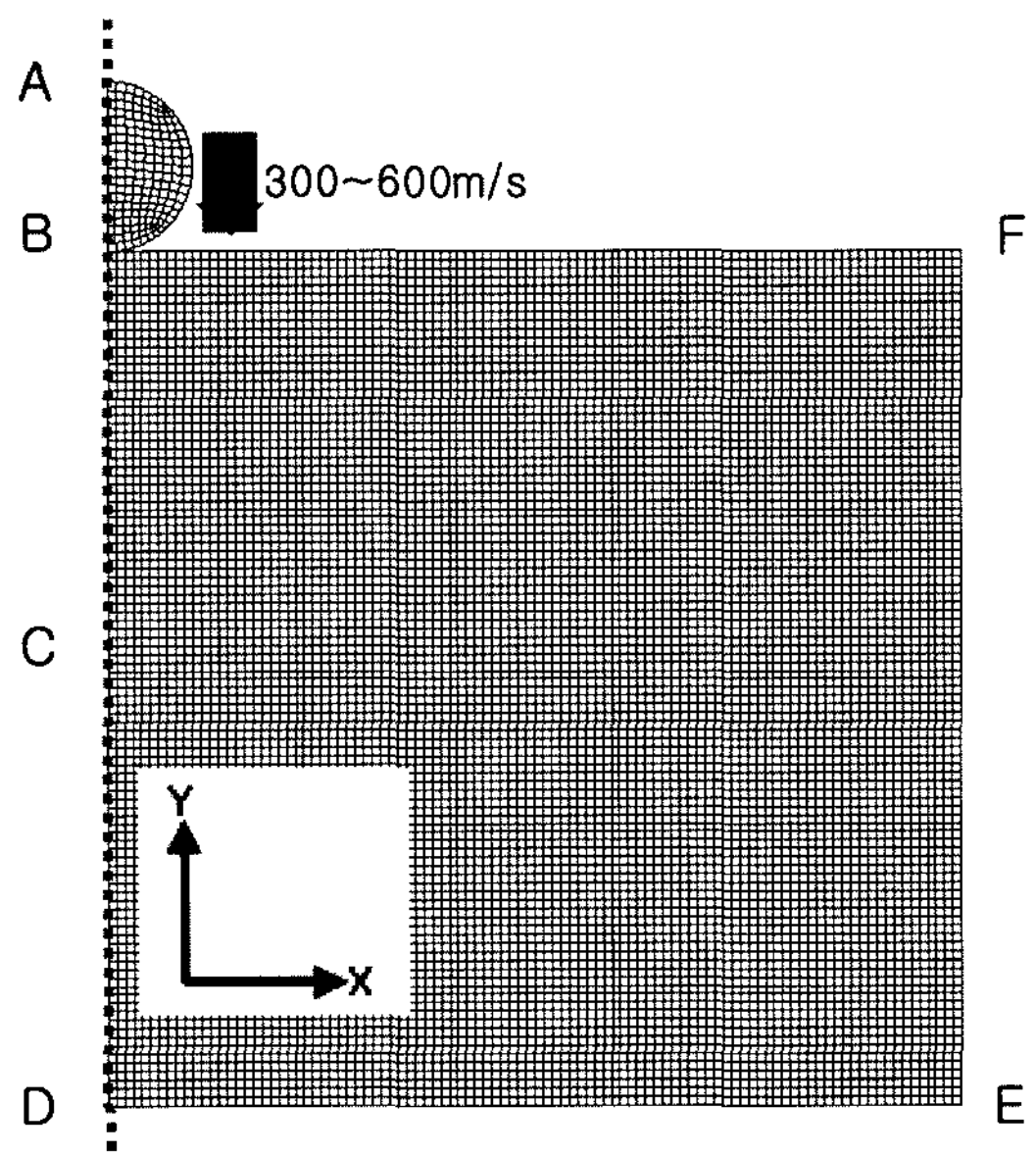


Fig. 2. Calculation domain and the finite element mesh.

하였다[6]. 그림 2는 계산에 사용된 유한요소망을 나타낸 것이고 요소 하나의 크기는 가로와 세로 각각 1 μm 를 사용하여 총 10,175개의 4절점 축대칭요소를 사용하였다. 입자와 모재의 초기 온도는 모두 상온인 298 K로 하였으며, 분말의 초기속도를 각각 300, 400, 500, 600 m/s로 하여 0.1초 동안의 충돌에 따른 온도 및 변형률 분포와 정량적인 수치를 고찰하였는데, 이는 충돌 이후에도 발생하는 거동을 예측하기 위한 것이다. 측정위치는 A-C에 경로를 설정하여 변형후의 A 지점부터 C까지의 거리에 따라 0.001, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1초 경과 시간 후에 변화된 정도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3과 그림 4는 300, 400, 500, 600 m/s 속도의 입자와 모재가 충돌한 후 0.1초 후의 형상의 변형률 및 온도 분포결과를 나타낸 것으로서, 변형형상을 보면 충돌시의 속도가 클수록 모재의 표면에서 안쪽까지 더 많은 변형이 일어나고 발생하는 유효변형률과 온도 변화의 크기도 증가하는 것을 알 수 있

을 뿐만 아니라 가장 높은 온도나 유효변형률을 나타내는 영역은 모재와 입자의 경계면의 가장자리에서 발생됨을 알 수 있다. 유효변형률의 경우에는 입자 충돌로 인해 유한요소망이 납작해지는 효과가 발생하고 특히 가장자리에서는 접촉지역의 폭이 좁게 형성되어 밀려남으로 그 값이 크게 나타나게 되고, 온도의 경우 밀려나가는 지점에서 입자와 모재 사이에 작용하는 마찰력에 의해 발생하는 온도가 입자 중심 지점보다 크게 나타난다[6]. 하지만 이러한 온도 및 변형률 분포의 비교는 정성적인 결과를 이해하기는 쉬우나 명확한 정량적인 분석은 미흡한 것이 실정이다. 이에 본 연구에서 충돌 경과시간에 따라 변형정도에 따른 결과를 다음과 같은 조건에서 고찰하였다.

우선 그림 5에서 300 m/s일 경우, 시간에 따라 모재의 표면에서 가장 큰 유효변형률이 발생한 깊이와 그 크기를 나타내었는데, 충돌 후 0.001초 경우 0.1948 μm 의 깊이에서 0.0953, 0.02초의 경우 2.7909 μm 깊이에서 0.7027, 0.04초의 경우 4.3015 μm 깊이에서 0.9617, 0.06초의 경우 4.4244 μm 에서 1.0294, 0.08초의 경우 4.4229 μm 에서 1.0294, 0.1초의 경우

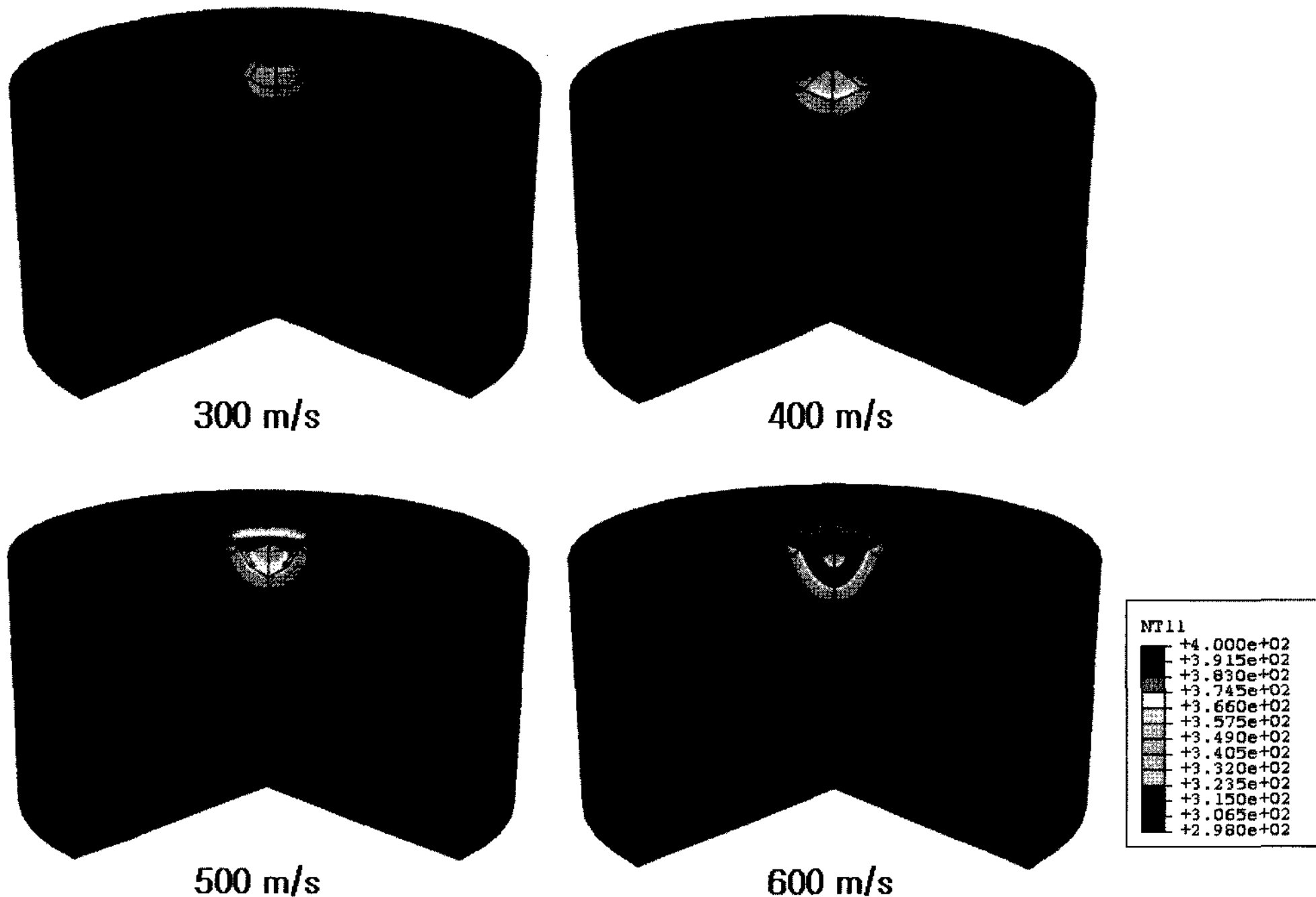


Fig. 3. Temperature distributions at 0.1 s after impact under initial velocity values of 300, 400, 500, and 600 m/s, respectively.

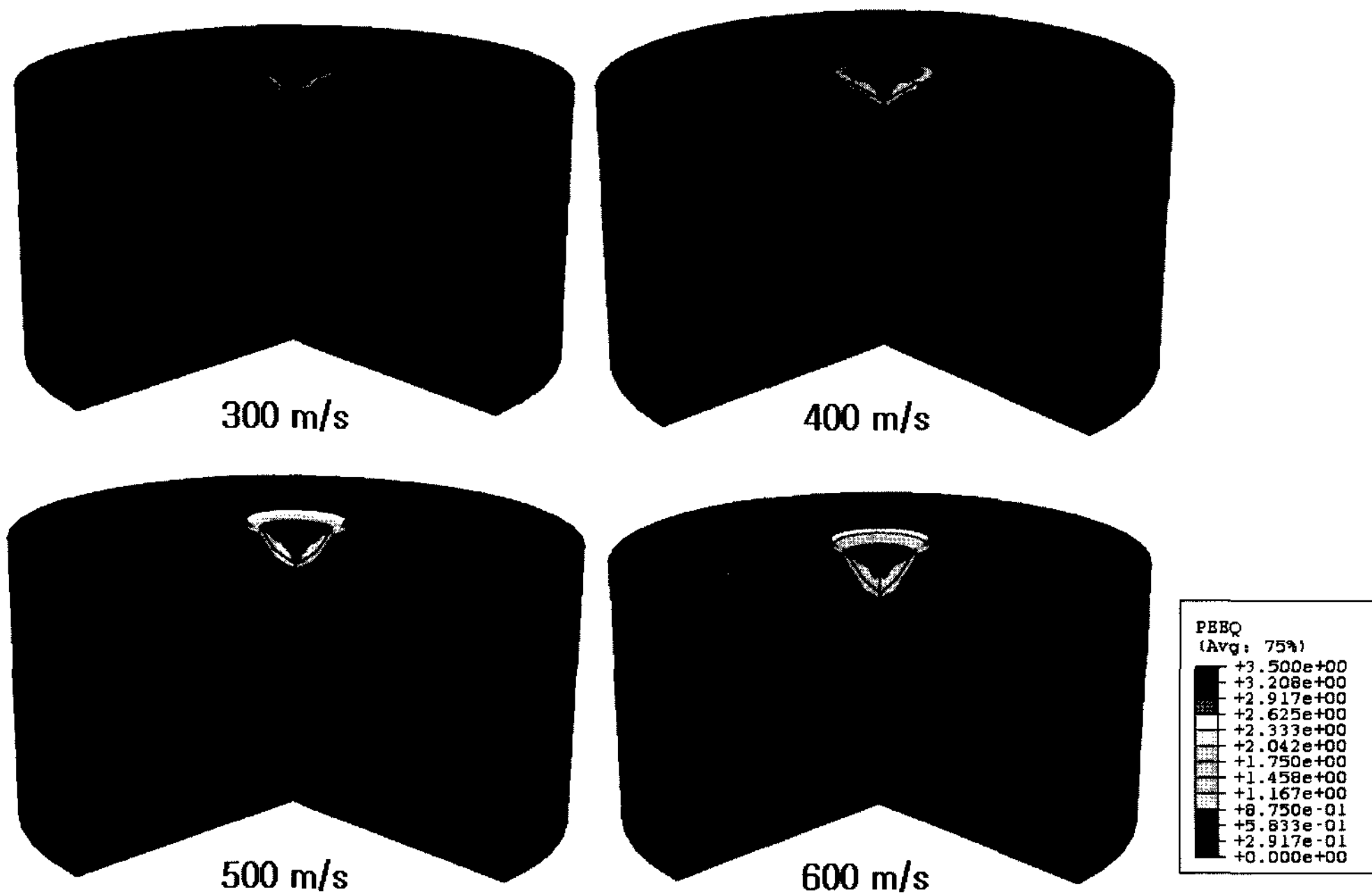


Fig. 4. Effective strain distributions at 0.1 s after impact under initial velocity values of 300, 400, 500, and 600 m/s, respectively.

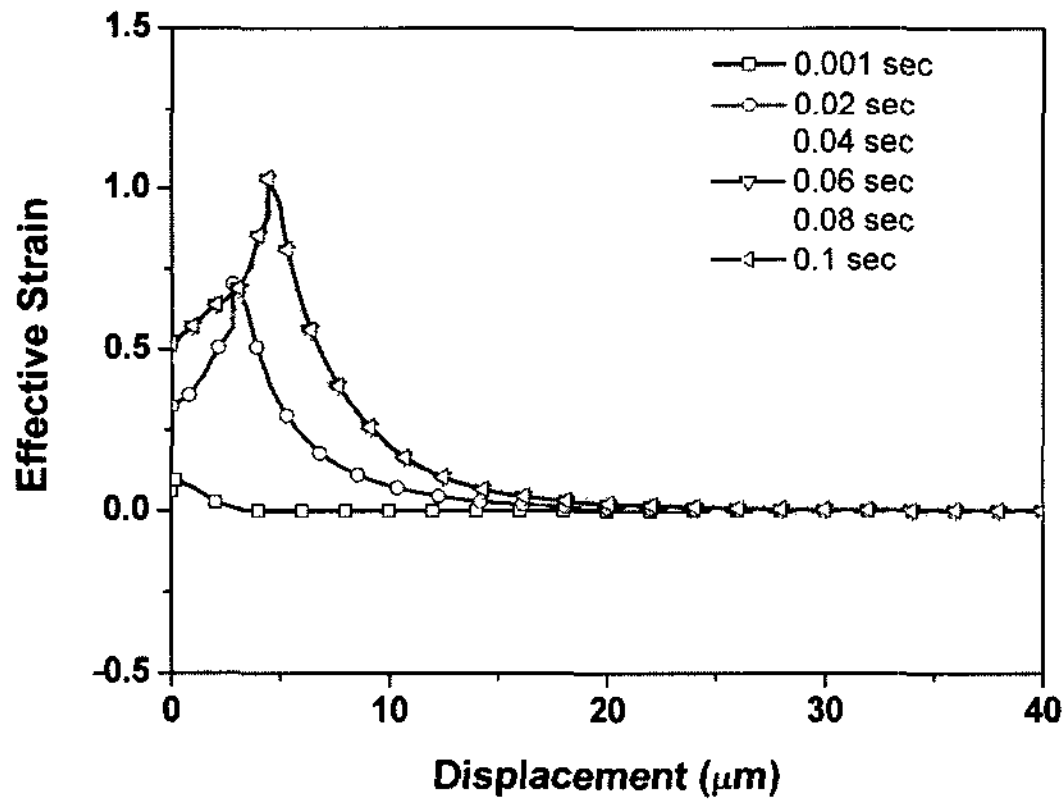


Fig. 5. Effective strain as a function of depth from the surface at various times after impact under initial velocity of 300 m/s.

4.4380 μm 에서 1.0302의 유효변형률을 얻을 수 있다. 또한 변형깊이와 변형률을 보면 300 m/s의 경우에는 0.06초에서부터 깊이와 값이 거의 일정한 것으로 보아 발생할 수 있는 최대 유효변형률 값을 알 수 있다. 이를 통해 최대 유효변형률이 생기는 부분이 입자와 모재의 경계면이라는 사실을 확인할 수 있으며, 다른 속도의 조건 역시 유사한 결과를 얻을 수 있다.

속도에 따라서 발생하는 유효변형률을 비교할 경우에는 0.001, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1초 등과 같이 정해진 시간에 따라 비교조건을 설정하기보다 입자의 속도가 0 m/s일 경우, 다시 말해 입자가 완전히 정지한 상태를 비교하는 것이 명확한 결과를 도출할 수 있다. 입자가 충돌 후 속도가 0 m/s가 되어 탄성회복을 시작할 경우에 속도가 음수의 값을 가지게 되는데, 그때 약간의 오차가 발생할 수 있다. 또한 오차의 크기는 미미하지만 각 속도별로 생기는 오차의 합이 커질 수 있기 때문에 본 실험에서는 그림 2에서의 입자가 A점에서의 속도가 0 m/s가 되는 경우를 충돌이후 정지한 점으로 정하고 이를 기준으로 하여 변형률 및 변위를 측정하였다. 이를 통해 300 m/s의 경우 4.4105 μm 깊이에서 1.0254, 400 m/s의 경우 8.8829 μm 깊이에서 2.7503, 500 m/s의 경우 11.9802 μm 에서 2.9074, 600 m/s의 경우 15.9888 μm 에서 3.5019의 유효변형률을 얻을 수 있었으며 이는 그림 6에서 명확히 확인할 수 있다. 그러나 그림 6에서 입자 부분과 모재 부분의 분포를 비교하기 쉽지 않아, 최대 유효변형률 지점이 변형 후 입자와 모재의 경계지점이기 때문에 이를 기준으로 모재 영역의 변형률 분포와 입자 영역의 변형률 분포를 나누

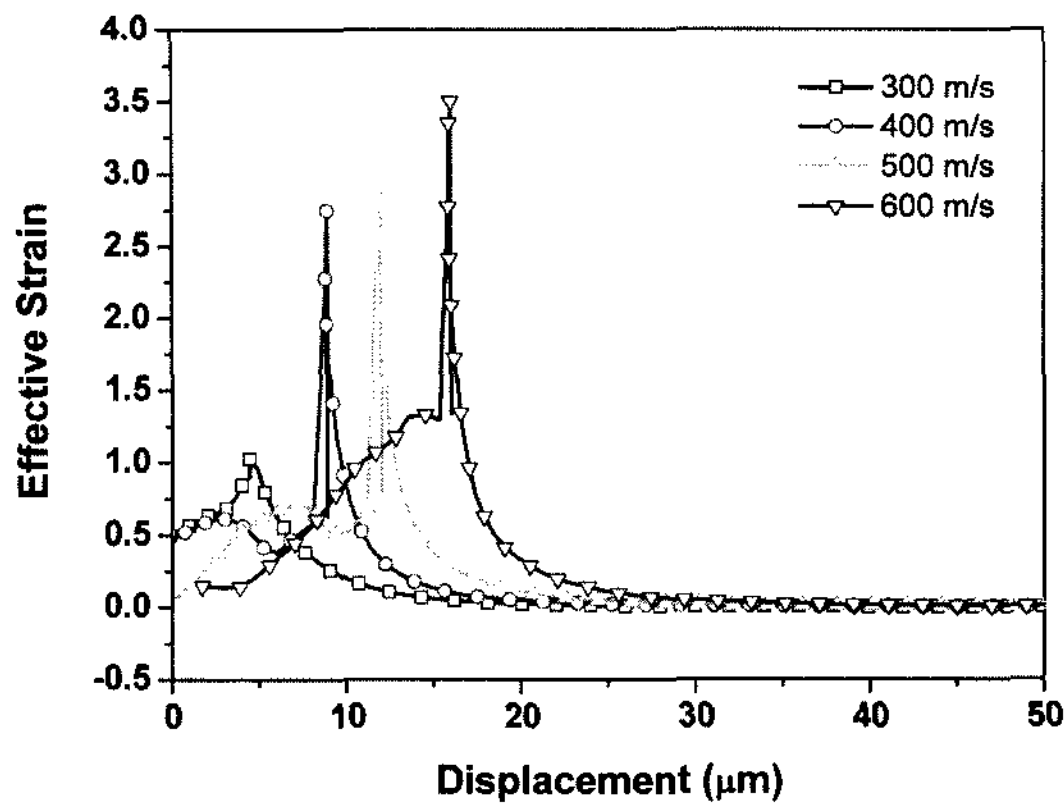
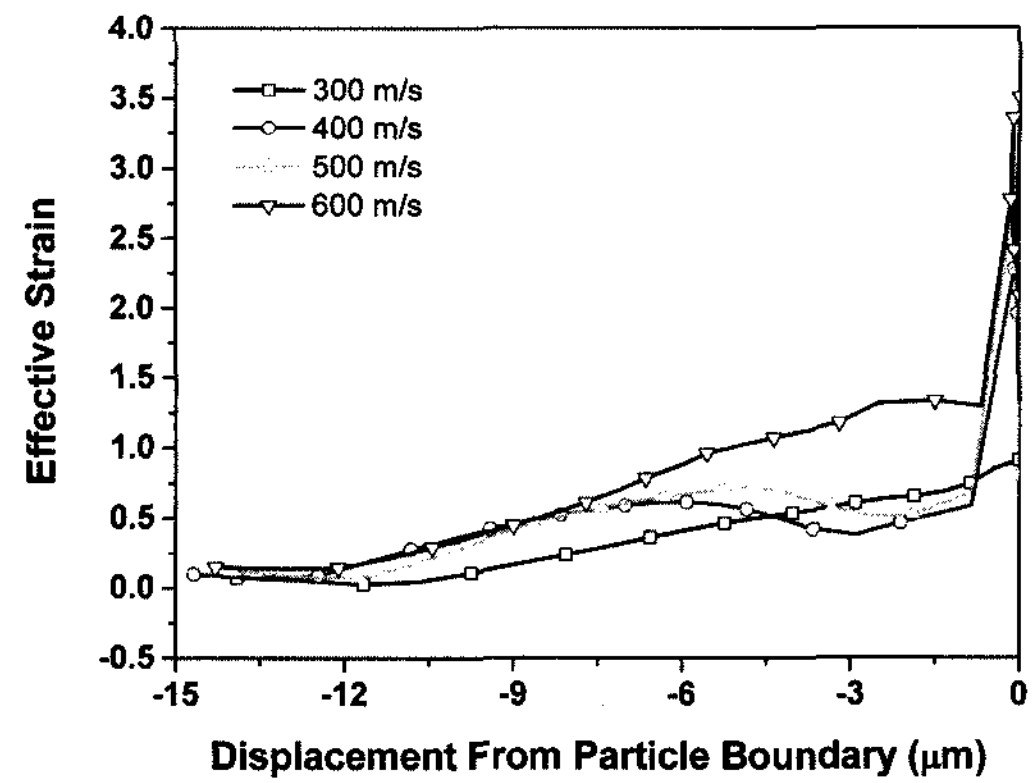


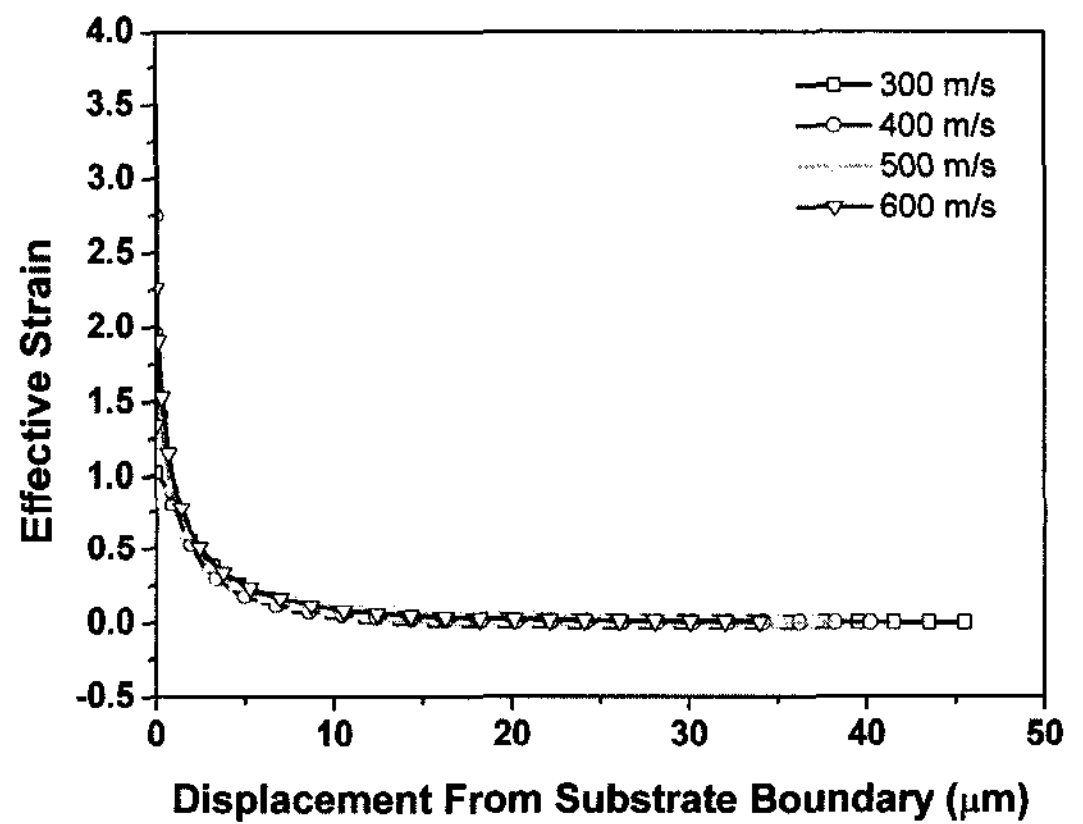
Fig. 6. Effective strain as a function of depth from the surface at velocity=0 due to each different initial velocity.

어 나타내었다. 이때 각 조건의 비교를 용이하게 하고자 최고점을 0점으로 조정하여 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 비교해보면 (-) 변위를 가지는 부분(그림 7(a))은 경계면으로부터 입자 안으로의 변위이고 (+) 변위를 가지는 부분(그림 7(b))은 경계면으로부터 모재 안으로의 변위로 생각할 수 있으며, 이를 통해 속도에 따라서 입자와 모재의 영향부의 비교가 가능하다. 즉 입자 속도가 증가함에 따라 충격량을 고려할 경우 전체적으로 작은 질량을 소유한 입자의 변형이 크게 발생됨을 알 수 있으며, 이에 반해 모재의 변형은 속도에 따라 차이가 적음을 알 수 있다.

온도의 분포의 경우, 300 m/s에서 시간에 따라 0.001초의 경우 B-C 경계면부터 0.19477 μm 깊이에서 302.116 K의 온도를 나타내고, 0.02초의 경우는 2.7909 μm에서 335.89 K, 0.04초의 경우는 3.8378 μm에서 351.38 K, 0.06초의 경우 3.0709 μm에서 352.22 K, 0.08초의 경우 2.5361 μm에서 347.74 K, 0.1초의 경우 2.0528 μm에서 344.082 K를 나타낸다. 0.04초까지는 최대 온도 지점이 안쪽으로 나타났으나, 0.06초부터는 다시 외부로 향함을 관찰할 수 있는데, 이는 충돌한 후 탄성회복이 일어나 최대 온도 지점인 계면에서 발생하는 현상으로 보인다. 또한 0.04초까지는 온도가 급격히 상승을 하였으나 0.06초부터는 상승 속도가 감소하는 것을 알 수 있으며 0.08초부터는 온도가 떨어지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 운동에너지가 표면에서 열에너지로 충분히 바뀐 후, 입자와 모재로 열에너지가 확산되어 감소하는 것으로 사료되며, 이는 그림 8에서 명확히



(a)



(b)

Fig. 7. Effective strain as a function of the distance from the interface between particle and substrate: (a) in particle and (b) in substrate.

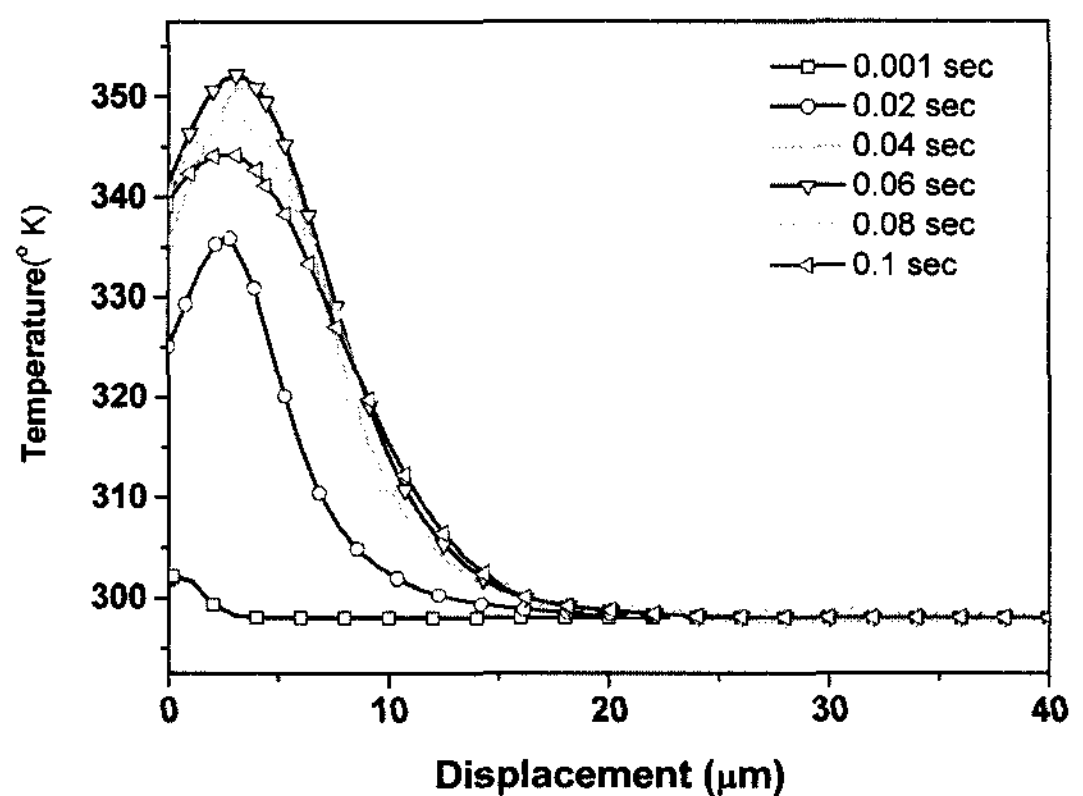


Fig. 8. Temperature as a function of depth from the surface at various times after impact under initial velocity of 300 m/s.

확인할 수 있다. 600 m/s의 경우의 온도는 약 427.721 K로 구리의 용점인 1356 K보다 매우 낮은

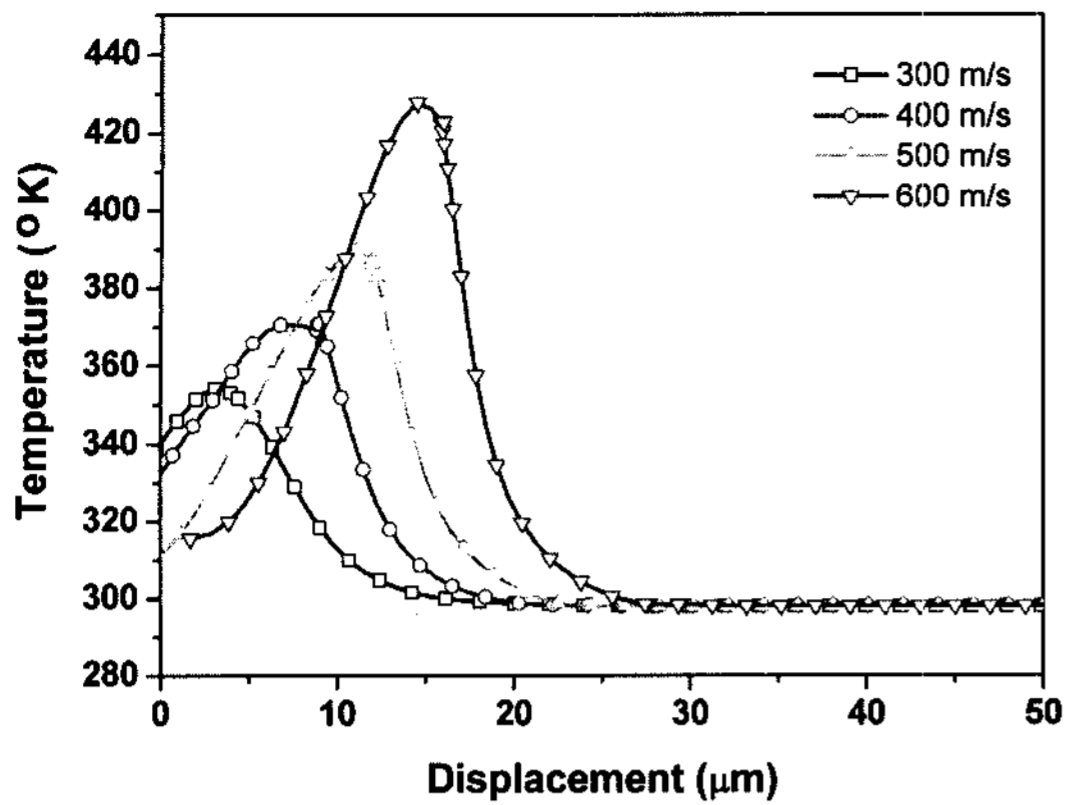
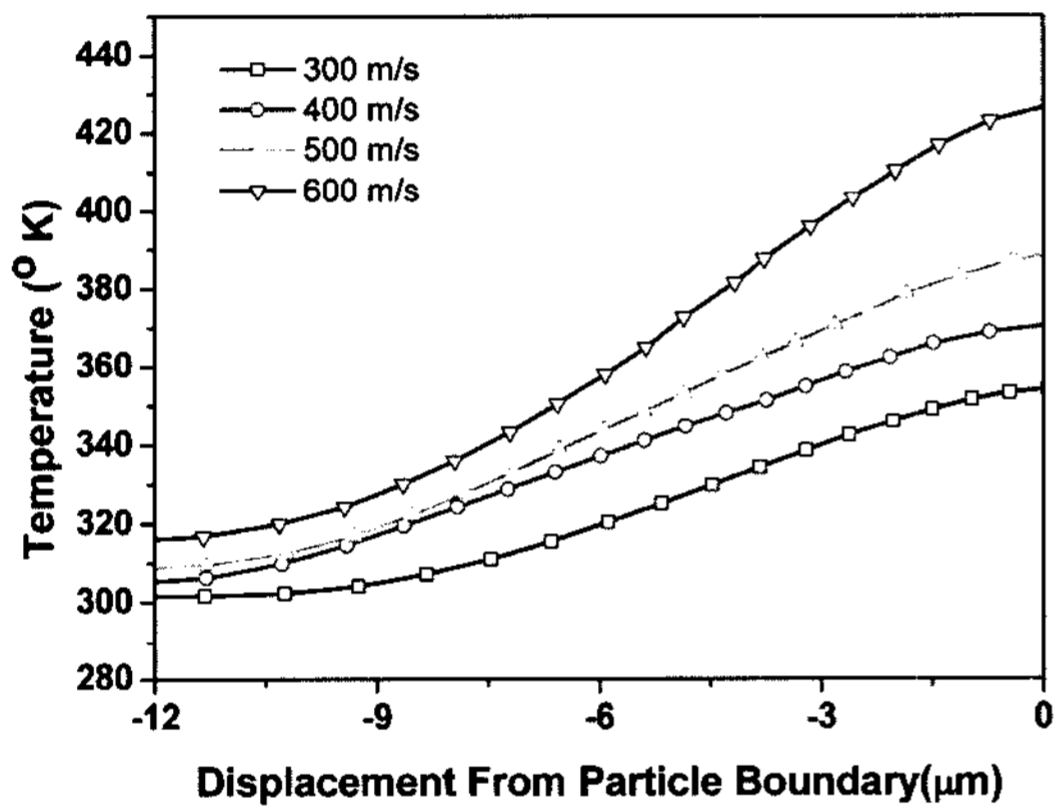
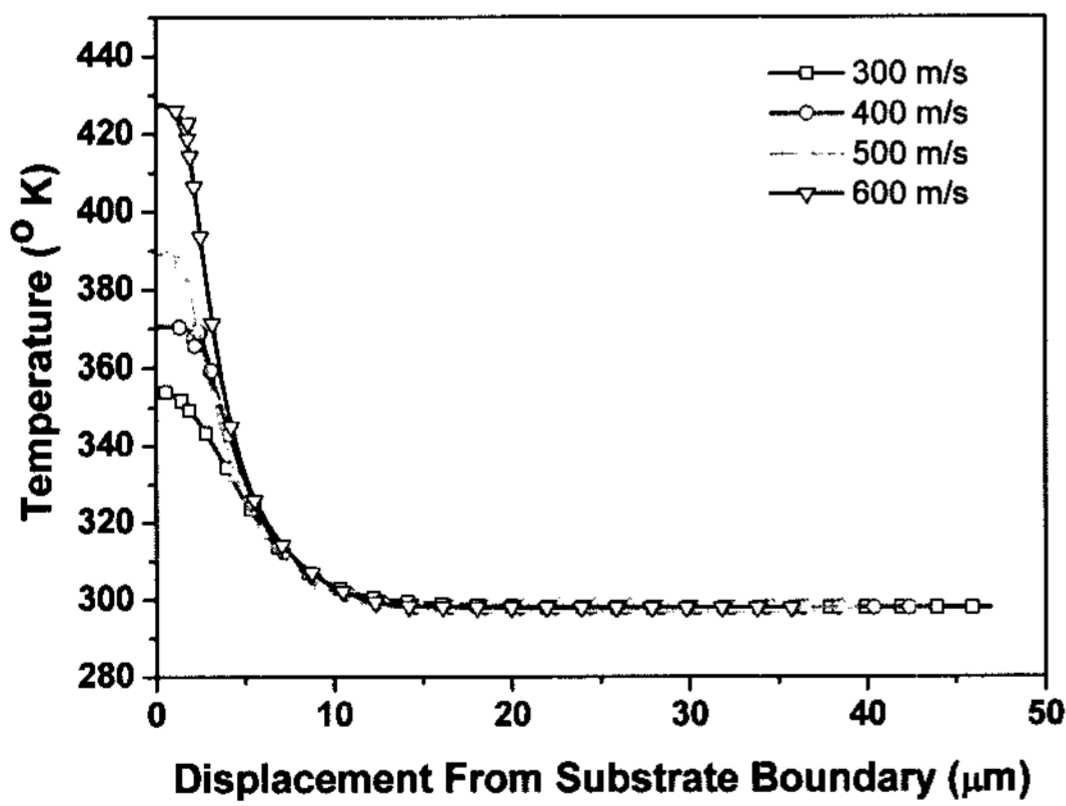


Fig. 9. Temperature as a function of depth from the surface at velocity=0 under various initial velocities.



(a)



(b)

Fig. 10. Temperature as a function of the distance from the interface between particle and substrate: (a) in particle and (b) in substrate.

온도이기 때문에 입자 충돌로 인해 발생하는 열이 큰 영향을 주지 않아 저온분사만의 장점을 충분히 살릴

수 있는 것으로 사료된다[6]. 기존의 연구[6-7]에서는 발생하는 온도가 높은 것으로 나타났는데, 이는 측정된 온도 예측 위치가 다르기 때문으로 사료된다. 또한 속도에 따른 유효변형률을 비교조건과 같이 그림 2의 A점의 속도가 0 m/s인 지점에서 온도분포 그림 9와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 각각 입자와 모재의 조건에 따라 비교하기 위해 최대온도 발생 지점을 0으로 설정하여 경계면에서부터 입자 혹은 모재 안으로의 거리에 따른 분포를 그림 10으로 나타내었다. 이를 통해 입자(그림 10(a))보다 모재의 온도(그림 10(b))가 급격하게 감소하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 입자보다 모재의 부피가 커서 열에너지 소모가 많기 때문으로 사료되며, 추후 복수 입자의 충돌 계산을 통해 저온분사시 발생하는 코팅 효과 및 온도 분포를 연구하고자 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 구리 입자를 구리 모재에 충돌시켜 코팅이 되는 공정으로 입자의 속도가 증가 할수록 운동에너지에 따른 변형 및 온도 유발을 기초로 정성적으로 알고 있는 경향을 유한요소법을 통해 정량적인 값으로 얻을 수 있었다. 그 결과 구리 입자와 구리 모재에서 실험상 최고속도인 600 m/s에서 가장 큰 유효변형률과 온도가 발생함을 알 수 있었으며, 이때 발생하는 온도가 저온분사의 장점을 사라지게 할 정도로 크지는 않다는 사실을 확인 할 수 있었다. 재료가 바뀌고 속도가 변화함에 따라 발생하는 온도와 유효변형률이 달라질 것이며, 산업에 적용하기 위해서는 최적의 조건 설정이 반드시 선행되어야 한다. 이에 본 연구를 통하여 산업 응용에 앞서 유한요소법을 이용하여 최적의 공정 조건을 확인할 수 있을 것으로 사료되며, 추후에는 하나의 입자가 아닌 다수의 입자를 이용하여 충돌 코팅된 입자위에 다른 입자가 충돌할 경우의 영향을 고찰하여 실제 산업 현장의 조건과 더욱 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대될 뿐만 아니라 본 연구보다 효과적인 예측이 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 21세기 프론티어기술개발

사업의 일환인 차세대소재성형기술개발사업단의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] K. H. Ko: J. Kor. Mater. Comp. Indus. Agen. Tech. Rev., (2007) 42 (*Korean*).
- [2] H. J. Kim, C. H. Lee and Y. G. Kweon: J. Kor. Weld. Soc., **20** (2002) 459 (*Korean*).
- [3] H. J. Kim, Y. K. Kwon and D. R. Park: J. Res. Unst. Indus. Sci. Tech., **18** (2004) 1.
- [4] www.sandia.gov/coldspray/presentations
- [5] M. Grujicic, C. L. Zhao, C. Tong, W. S. Derosset and D. Helfritch: Mater. Sci. Eng. A, **368** (2004) 222.
- [6] W. Y. Li, H. Liao, C. J. Li, G. Li, C. Coddet and X. Wang: Appl. Surface Sci., **253** (2006) 2852.
- [7] H. Assadi, F. Gartner, T. Stoltenhoff and H. Kreye: Acta Mater., **51** (2003) 4379.
- [8] A. Papyrin: Adv. Mater. Proc., **159** (2001) 49.
- [9] S. H. Kwon, D. Y. Park, H. J. Kim and K. A. Lee: J. Kor. Met. Mater., **45** (2007) 216 (*Korean*).
- [10] M. Grujicic, C. L. Zhao, W. S. DeRosset and D. Helfritch: Mater. Design, **25** (2004) 681.
- [11] S. D. E. Wakil: Processes and Design for Manufacturing, PWS Publishing Company, (1998) 91.
- [12] M. A. Bejar, W. Schnake and R. Urqueta: J. Mater. Process. Tech., **127** (2002) 68.
- [13] ABAQUS Explicit ver. 6.6, <http://www.abaqus.com>