

아크용사를 이용한 Spray-formed Tooling 기술

백경호¹ · 김진홍² · 성병근[#]

Spray-formed Tooling Process by Arc Spraying

K. H. Baik, J. H. Kim, B. G. Seong

1. 서 론

최근의 제품 생산기술의 특징은 다양한 소비자의 기호와 급격히 발전한 생산공정에 부응하기 위하여 제품의 다양화와 사이클의 단축에 있다. 이와 같은 생산기술의 추세는 제품을 생산하는 업체에게 제품의 출시 기간 및 생산 기간의 단축과 함께 효과적이면서 투자비용을 절감할 수 있는 공정기술을 요구하고 있다. 제품의 생산에 직접 적용되고 있는 금형기술 분야에서도 보다 신속하고 경제적인 금형제조공정에 대한 필요성이 절실히 요구되고 있으며, 최근 쾌속조형기술(rapid prototyping: RP)과 함께 쾌속금형제조기술(rapid tooling: RT)에 대한 연구 및 개발이 국내외적으로 활발히 진행되고 있다.

RP에 있어서는 SLA(stereolithography apparatus), SLS(selective laser sintering), 3D printing, LOM(laminated object manufacturing) 등 다양한 제조 공정 및 장비가 개발되고 있으며[1], 국내에서도 특히 SLA를 중심으로 한 RP 기술의 개발이 활발하게 진행되고 있다[2]. RT 기술은 일종의 RP 기술의 연장이라고 할 수 있으며, 즉, RP 모델들의 성능을 평가하기 위하여 필요한 소량의 모델 부품들을 실제 양산에 사용될 생산공정과 동일한 소재로 생산할 필요가 있다[3]. RT 기술을 이용하여 제작한 금형이 우수한 내구성을 지니게 되면 양산공정으로 바로 적용될 수 있기 때문에, RT 기술은 단순한 부품성능평가(component performance testing) 이상의 중요성을 갖는다. 그러므로 RP 기술과 RT 기술을 결합한 고속 제품 생산(rapid manu-

facturing: RM) 방식에 대하여 활발한 연구가 진행되고 있다[4].

현재까지 개발 완료 및 진행중인 RT 기술은 매우 다양하며, 그 방식과 특성에 따라서 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 분류할 수도 있다[3]. 본 논문에서 소개하고자 하는 “용사를 이용한 rapid spray tooling”은 spray-formed tooling 혹은 spray metal tooling 이라고도 명칭되며, 분류상으로 indirect tooling 중에서 hard tooling의 범주에 속한다.

2. 아크용사 (Arc Spray) 공정

용사란 선재 또는 분말 형태의 소재를 다양한 방법에 의하여 생성된 고온의 열원에 노출하여 용융시킨 후 기판으로 분사시켜 코팅층을 형성하는 기술이다. 용사공정은 소재를 용융시키는 열원에 따라서 가스연소 방식과 전기에너지 방식으로 구분할 수 있다. 가스연소방식에는 화염용사(flame spray), 고속화염용사(high velocity oxygen fuel spray), 폭발용사(detonation spray) 등이 있고, 전기에너지를 이용하는 방식으로는 아크 용사와 플라즈마 용사가(plasma spray) 있다.

RT에 적용되고 있는 용사공정은 주로 아크 용사이며, 그 이유는 다른 용사법들과 비교하여 적층속도가(즉, 코팅층 형성 속도) 비교적 빠르고, 대면적 코팅이 가능하며, 운용비가 적게 소요되기 때문이다. 원료소재에 있어서도 고가의 금속 분말보다는 상대적으로 저렴한 금속 선재를 사용하기 때문에 소재가격의 측면에서도 경제적인 장점이 있다. Fig. 2는 아크 용사 공정의 개략도를 나

1. 충남대학교 신소재공학부 응용소재공학과

2. 포항산업과학연구원

교신저자 : 포항산업과학연구원, seong@rist.re.kr

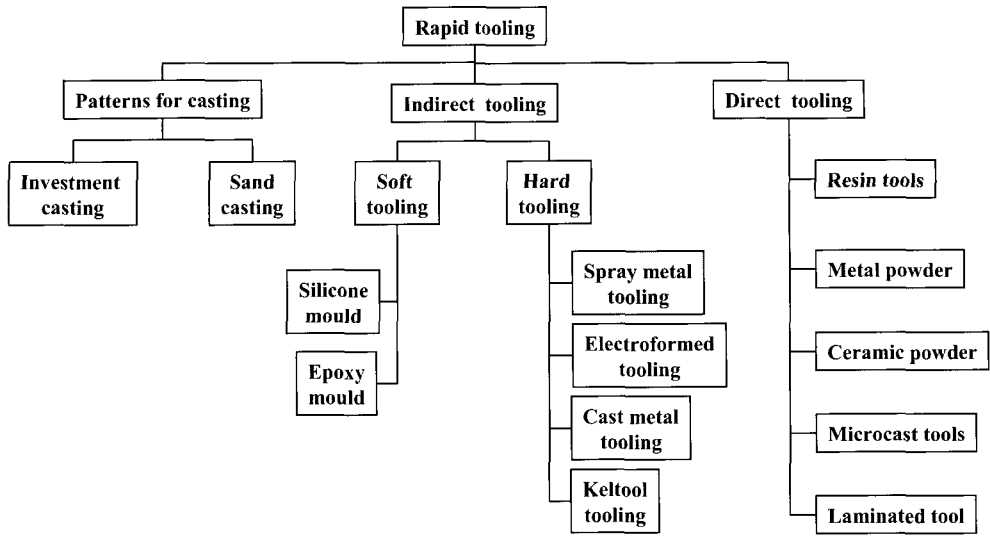


Fig. 1 Classification of rapid tooling technologies[3]

타낸 것이며, 그 원리는 다음과 같다. 아크용사에서는 2가닥의 금속 선재를 소모성 전극으로 사용하며, 각각의 선재에 (+) 및 (-) 전기를 인가함으로써 금속 선재의 끝 단에서 아크가 발생된다. 이때 금속선재는 고온의 아크 열에 의하여 용융되며, 동시에 고압의 분사가스와의 충돌에 의하여 용융금속은 미세한 액적으로 분무화된다. 분무화된 액적들은 분사가스와 함께 기관 표면으로 비행하게 되며, 최종적으로 기관 표면에 부착되어 냉각, 응고됨으로써 성형체를 형성한다. 아크 용사 공정은 원료소재가 전도성 금속선재로 제한하는 단점이 있다. 최근에는 이를 보완하기 위하여 우수한 표면 특성을 나타내는 서멧계

또는 고합금성분계의 분말을 이용한 플라즈마 용사도 일부 적용되고 있다[5].

3. Spray-formed Tooling 기술의 개요

용사금형제조의 기본원리는 용사에 의하여 형성된 수 mm의 금속 코팅층을 금형 표면으로 사용하고, 그 뒷면을 열전도도와 내압성이 우수한 소재로 채워줌으로써 (backfilling), 금형의 형상을 갖추어 시작금형 (prototype tool) 또는 양산용 금형을 제조하고자 하는 것이다. Fig. 3은 용사에 의해 제조된 금형을 부품제조에 사용될 수 있도록 조립된 형태의 단면모식도를 나타낸 것이다 [6]. 아크용사에 사용되는 소재에 따라서 상세한

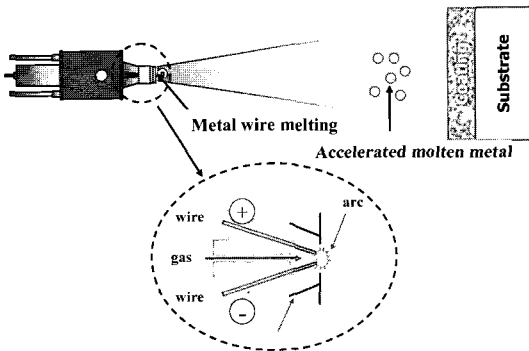


Fig. 2 Schematic diagram of arc spraying

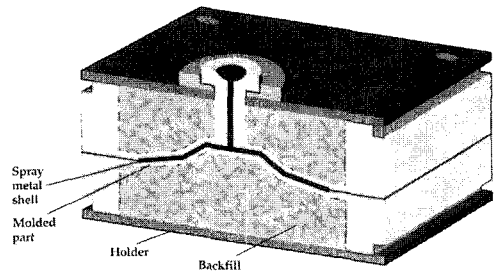


Fig. 3 Schematic diagram of cross-section of spray-formed tool [6]

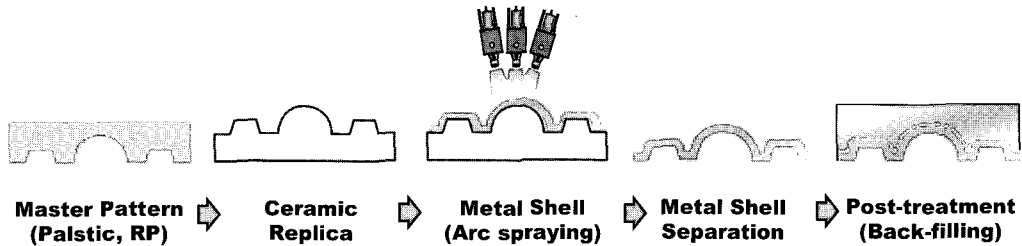


Fig. 4 Procedure of spray-formed tooling for steel alloys

공정은 차이가 있을 수 있지만, 기본적으로 용사금형을 제조하는 단계는 크게 5단계로 구분된다.

- (1) 마스트 모델의 (또는 용사용 패턴) 준비단계
- (2) 아크용사에 의한 금속층의 형성 (수 mm 까지)
- (3) 냉각라인의 설치
- (4) 금속계 복합재를 이용한 후면 충전- backfilling
- (5) 용사용 패턴 분리

용사금형에 사용되는 소재는 개발초기인 70년대 말에는 아연 또는 알루미늄, Kirksite와 같은 저융점 금속을 사용하였다[7~8]. 저융점 금속을 사용하는 경우, 용사공정 동안의 적층온도가 비교적 낮은 50-60°C를 유지하기 때문에, 기관으로 사용할 용사용 패턴을 별도로 제작할 필요가 없다. 즉, 나무, 플라스틱, 왁스, SLA용 소재 등으로 제조한 마스트 모델을 기관으로 하여 그 표면에 직접 용사하는 것이 가능하다. 또한 용사시 적층온도가 낮기 때문에 용사 성형체의 잔류응력 및 변형이 크게 발생하지 않으며, 이로 인하여 제작 가능한 금형의 크기에 큰 제약이 없다. 그러나 아연계 또는 알루미늄계 소재로 제조된 용사금형은 연질이기 때문에, 실제적으로 플라스틱 사출용 시작금형으로만 사용되는 적용분야에 제약이 있다. 아연계 용사금형이 적용된 사례는 RTM(resin transfer molding), RIM(reaction injection molding) 과 SMC(sheet molding compound) 등이 있다[6]. 아연계 용사금형의 제품 생산능력은 고온, 고압의 플라스틱의 사출의 경우 (사출압력 15,000 psi) 25-1,000개에 불과하지만, 압력과 온도조건이 낮은 경우에는 10,000-100,000개 정도의 제품 생산이 가능하다[7].

4. 고용점 소재를 이용한 Spray-formed tooling 기술

아연계 소재를 사용한 spray-formed tooling 기술은 앞서 설명한 바와 같이 많은 장점을 가지고 있지만, 철계 또는 공구강 소재로 제작된 일반 금형에 비하여 수명이 현저히 떨어지는 단점으로 인하여 양산용 금형으로 적용이 어렵다. 이러한 단점을 해소하기 위하여, 아연계 소재 보다 강도가 높고 내구성이 우수한 고용점 금속을 용사하여 RT에 적용하는 기술이 현재 연구 개발되고 있다. 고용점 금속소재의 spray-formed tooling 기술은 대부분 0.8%의 탄소함량을 갖는 고탄소강을 사용하고 있으며[9], 특수한 목적을 위하여 인바(Invar) 합금을 사용하기도 한다[10].

탄소강을 사용하여 용사하는 경우에는 고온의 액적들의(1600-2000°C) 연속적인 적층으로 인하여 spray-form tooling 공정 동안에 기관표면의 온도는 300°C 이상으로 가열된다. 그러므로 기관으로 사용되는 용사용 패턴은 고온의 액적의 충돌에 견딜 수 있어야 하며, 동시에 용사공정 동안에 열변형이 없어야만 한다. 탄소강을 용사하여 금형을 제조하는 spray-formed tooling 공정을 4단계로 구분하여 설명하면 다음과 같다(Fig. 4 참조).

(1) 마스터 모델 제조: 최종적으로 원하는 금형의 형상을 플라스틱, 나무 등을 소재로 하여 가공한다. 또한 SLA, 3D printing과 같은 RP기술을 응용하여 제조할 수도 있다.

(2) 세라믹 용사용 패턴(ceramic replica) 제조: 탄소강의 아크용사는 아연계의 용사소재와는 달리 용사층의 형성온도가 높기 때문에 나무 또는 플라스틱 등의 소재에 직접 용사하는 것은 불가능하므로, 고온에서 변형이 적은 세라믹 용사용 패

턴을 사용한다. 금형 형상의 마스터 모델에 세라믹 슬러리를 주입하여 slurry casting 또는 freeze casting 등의 방법으로 세라믹 용사용 패턴을 제조한다. 이때, 마스트 모델의 형상과 치수를 정확히 복제해야 하고, 마스터 모델과 분리할 때 손상을 받지 않아야 한다. 복제된 세라믹 패턴은 고온 열처리를 통하여 충분한 강도를 부여하게 되며, 이때 치수 변형이 전혀 없어야만 한다.

(3) 용사공정: 이 과정은 용사용 패턴에 금형으로 작동할 금속층을 형성하는 과정으로 금형의 강도, 치수정밀도 등의 특성이 결정되는 과정으로 spray-formed tooling 기술에서 가장 중요한 공정이라고 할 수 있다. 금속층의 형성속도를 높이기 위하여 Fig. 5와 같이 다수의 아크용사건을 로봇 암에 부착하여 사용한다. 금형은 다양한 형상 및 크기의 요철을 포함하고 있으므로 세라믹 패턴의 표면 형상을 정확히 복제하기 위하여서는 용사건의 배열, 분사각도, 적층패턴 등의 공정변수들을 제어하여야만 한다. 용사된 금속층은 수 mm 에서 수 cm 까지 두께의 제약이 없으며, 실제 300x300mm의 면적에 10mm 정도의 두께를 적층하는데 소요되는 시간은 약 1시간 정도이다.

(4) 후면 충전 공정: 용사에 의하여 제조된 금속층은 최초로 제작하였던 마스트 모델과 동일한 형상을 가지며, 세라믹 패턴과 접촉하고 있는 면이 금형으로 사용하게 된다. 반면에 용사된 금속

이 적층된 면은 마스트 모델의 요철로 인하여 매우 불규칙하다. 그러므로, 적층면을 평탄하게 가공하고, 금형으로써 적절한 두께를 부여하기 위하여 레진과 금속분말을 혼합한 소재 혹은 저융점의 아연계나 비스무스 합금을 사용하여 충전함으로써 금형을 완성하게 된다.

미국의 Ford 자동차는 철계 또는 합금강의 용사를 이용한 RT기술의 개발에 가장 앞선 기술을 보유하고 있으며, 다양한 종류의 금형 제작에 대한 기술과 경험을 가지고 있다. Fig. 6은 아크용사에 의해 제조된 다양한 크기의 spray-formed tool의 예를 나타낸 것이다. Ford 자동차에서는 실제 양산 자동차의 일부 부품을 용사금형을 이용하여 생산하고 있는 것으로 알려져 있다[11].

5. 용사금형 제조를 위한 주요 공정 제어

철계 또는 합금강의 spray-formed tooling 공정에 의한 금형 제작은 다양한 요소기술들을 필요로 한다. 그 중에서 가장 중요한 요소기술은 마스트 모델과 동일한 형상의 금형을 얻기 위한 용사공정에서 발생하는 용사층의 변형을 최소화 하는 것과 용사금형의 기계적 특성을 결정하는 미세조직을 제어 하는 기술이다. 용사층의 변형은 용사층을 형성하는 과정에서 발생하는 잔류응력의 발생과 부위별 온도분포의 불균일성에 기인한다.

용사층의 잔류응력은 용융 액적이 세라믹 용사 패턴의 표면에서 응고하는 과정에서 발생하는 부피수축으로 인한 인장응력과 이후 고상으로 냉각되는 과정에서의 마르텐사이트 및 베이나이트로

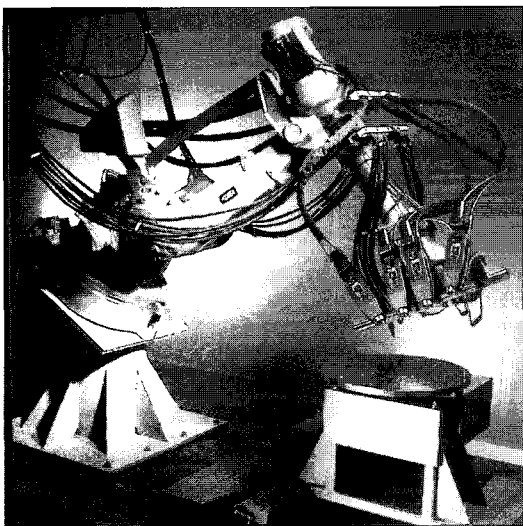


Fig. 5 Four-gun arc spray system for manufacturing spray-formed tooling

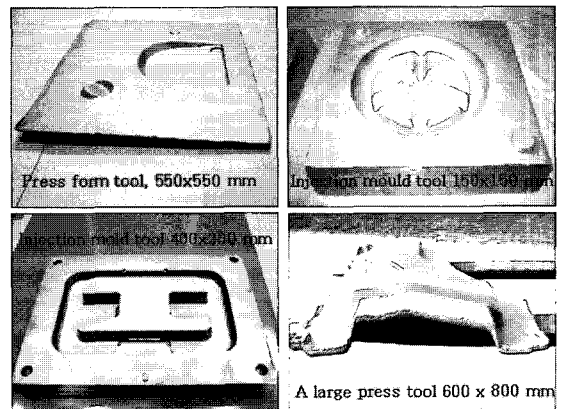


Fig. 6 Examples of large-sized, spray-formed tools

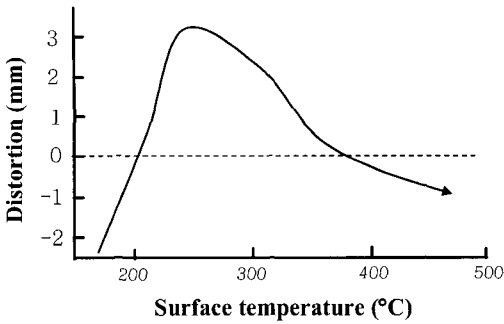


Fig. 7 Distortion of arc sprayed Fe-C shell as a function of deposit surface temperature

의 상변태에 따른 부피팽창으로 인하여 압축응력으로 구분된다. 인장 및 압축 응력이 서로 동일한 크기를 나타내면 전체적인 잔류응력이 “0”이 되어 변형이 없게 된다. 이러한 변형을 제어하는데 있어서 가장 중요한 인자는 용사과정에서의 적층표면의 온도이다. Fig. 7은 305x305mm 크기의 평판에 10mm 두께의 Fe-C계 용사층을 형성할 때, 적층표면온도에 따른 용사층의 변형량을 나타낸 것이다[12]. 매우 좁은 온도범위에서 변형이 없는 용사온도 구간이 존재함을 알 수 있으며, 용사층의 잔류응력 또는 변형량을 최소화 하기 위하여서는 용사과정중에 적층표면온도를 보다 정밀하게 제어할 수 있는 기술이 (on-line temperature control) 필요하다[12]. 이 외에도, 용사가 이루어지는 영역에 대한 온도구배와 다중 용사건을 사용시에 용사건의 배열 등이 잔류응력 또는 변형에 영향을 미치게 된다[13~14].

용사층의 기계적 특성을 결정하는 주요인자는 용사층의 미세조직이며, 특히 기공과 산화물의 양에 따라 금형의 특성은 크게 영향을 받는다[15]. 아크 용사과정에서 용융금속은 분사가스 그리고 대기중의 가스과 반응하게 된다. 분사가스로 압축공기를 사용하게 되면 분사된 액적은 매우 심한 탈탄 및 산화반응을 일으키며, 최종 용사 금속층은 상당량의 산화물을 포함하게 된다. 용사 금속층으로의 산화물의 혼입은 취성을 유발하고 적층액적간의 결합을 약화시킴으로써 금속층의 특성을 크게 저하시키게 된다. 그러므로 분사가스로서 질소가스를 사용하는 것이 일반적이다. 그럼에도 불구하고, 주변에서 혼입되는 공기중의 산소와의 반응을 완전히 억제하는 것은 불가능하다. Fig. 8(a)는 질소가스의 분사에 의하여 제조된 Fe-C

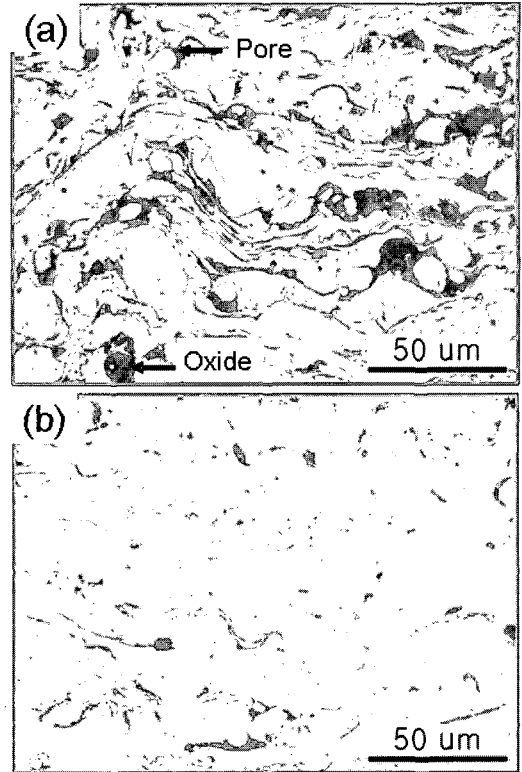


Fig. 8 Microstructure of arc sprayed Fe-C steel using (a) standard gas nozzle and (b) modified gas nozzle

아크용사층의 미세조직을 나타낸 것이며, 소량의 기공과 함께 약 10v/o의 산화물이 생성되어 있음을 보여준다. 산화물의 생성을 완전히 억제하기 위하여서는 불활성 분위기를 유지할 수 있는 챔버에서 용사가 이루어져야 하지만, 공정비용의 큰 상승을 초래한다. 최근 본 연구진은 아크용사건의 노즐개량을 통하여 산화물의 생성을 현저하게 줄이는 성과를 거두었다. Fig. 8(b)는 개량노즐에 의해 제조된 아크용사층의 미세조직으로, 크게 감소된 산화물 분율을 나타내고 있다.

6. 맺음말

용사를 이용하여 금형을 제조하는 spray-formed tooling 기술은 미국, 영국, 프랑스, 호주를 비롯하여 최근 중국에서도 많은 연구가 진행되고 있으나, 국내에서는 이에 대한 연구 및 개발이 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 아연용사를 이용

하여 시작금형을 제작하는 작업은 일부 소형업체에서 이루어지고 있으나, 고용점 소재인 합금강을 용사하여 대량생산용 금형을 제조한 사례는 전무하다. 국내에서는 2003년부터 포항산업과학연구원(RIST)과 충남대학교가 공동으로 spray-formed tooling 개발 연구를 시작하여, 기초연구 단계를 거쳐, 현재 제품생산이 가능한 금형을 제작하는 기술을 확보하였다. 용사공정을 통한 형상복제능력을 극대화하고, 잔류응력/변형 제어, 미세조직 제어 그리고 공정 자동화 기술을 이미 확보하였다. 또한 전체 제작공정 중에서 가장 긴 시간이 소요되는 세라믹 재질의 용사용 패턴 제조과정을 생략할 수 있는 기술을 개발하여 완성단계에 와 있어 독자적인 연구영역을 구축하고 있다. 본 기술은 아직까지 국내에 잘 알려져 있지 못하여 적용된 사례가 없지만, 지속적인 연구개발과 홍보를 통하여 국내 금형산업의 발전에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 양동열, 손현기, 1999, 쾌속조형공정의 원리 및 특성, 기계저널, 제39권 제9호, pp. 28~31.
- [2] 박근, 이상찬, 정준호, 양동열, 윤재륜, 1996, 쾌속 3차원 조형법을 이용한 시작기술 및 시작금형 제작기술 개발, 대한기계학회논문집, 제 20권, pp. 1582~1589.
- [3] A. Rosochowski, A. Matuszak, 2000, Rapid tooling: the state of the art, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 106, pp. 191~198.
- [4] D. T. Pham, S. S. Dimov, 2001, Rapid manufacturing, Springer-Verlag Limited., pp. 1~17.
- [5] H. Zhang, G. Wang, Y. Luo, T. Nakaga, 2001, Rapid hard tooling by plasma spraying for injection molding and sheet metal forming, Thin Solid Film, Vol. 390, pp. 7~12.
- [6] S. Wichmanowski, 2003, Pseudo-alloys for spray metal tooling, Adv. Mater. & Proc., pp. 33~34.
- [7] M. L. Thorpe, J. W. Minge, 1981, Spray metal composite tooling, Proc. of the 26th National SAMPE Symp., Los Angels, USA., pp. 374~387.
- [8] W. A. Zanchunk, L. J. Grant, 1989, The use of spray metal tooling for metal injection molding, Metal Powder Industries Federation, pp. 25~34.
- [9] A.P. Newbery, P.S. Grant, A.D. Roche, 1998, The electric arc spray manufacture of rapid production tooling: A case study, Proc. of the 15th Inter. Thermal Spray Conf., Nice, France, pp. 1223~1228.
- [10] D. I. Wimpenny, G. J. Gibbons, 2003, Metal spray tooling for composite forming, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 138, pp. 443~448.
- [11] R. E. Chalmers, 2001, Rapid tooling from Ford: Production dies made without machining, Manuf. Eng., pp. 36~41.
- [12] T. Rayment, S. Hoile, P. S. Grant, 2004, Phase transformations and control of residual stresses in thick spray-formed steel shells, Metall. Mater. Trans. B, Vol. 35B, pp. 1113~1122.
- [13] D. A. Jones, S. R. Duncan, T. Rayment, P. S. Grant, 2003, Control of temperature profile for a spray deposition process, IEEE Trans. on Control Systems Tech., Vol. 11, pp. 656~667.
- [14] T. Rayment, P. S. Grant, 2002, Optimization of an electric arc gun cluster design for the spray tooling process, Proc. of the 1st Inter. Surf. Eng. Congress and the 13th IFHTSE Congress, Columbus, Ohio, USA, pp. 505~514.
- [15] P. S. Fussell, H. O. K. Kirchner, F. B. Printz, L.E. Weiss, 1994, Controlled microstructure of arc-sprayed metal shells, J. Thermal Spray Tech., Vol. 3, pp. 148~161.