

# Al 모재의 온도에 따른 플라즈마 용사코팅층의 잔류응력에 관한 연구

## Effect of Al substrate temperatures on the residual stresses of plasma sprayed coatings

김동현\*, 양영수\*\*, 범현규\*\*\*

\*전남대학교 대학원 기계공학과

\*\*전남대학교 기계공학과

\*\*\*전남대학교 기계공학과

### 1. 서 론

근래에 요구되는 부품들은 가혹한 환경 하에서의 사용이 늘어나고 있을 뿐만 아니라 경량화, 소형화가 요구된다. 따라서 가벼운 모재와 두꺼운 코팅층이 필요하게 된다. 앞선 많은 연구자들에 의해 산업적으로 가장 많이 사용되고 있는 재료인 steel 모재에 부분안정화 지르코니아를 이용한 단열코팅에서 여러 공정변수들이 잔류응력에 어떤 영향을 주는가에 관한 많은 연구가 이루어졌다. 그러나 앞으로 계속 늘어날 전망이다. 경량 합금재료의 세라믹 코팅에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다. 특히 알루미늄 및 알루미늄 합금에 코팅이 필요한 경우 모재인 알루미늄은 열팽창계수가 매우 큰 반면 코팅재인 세라믹 재료는 열팽창계수가 매우 작아 모재와 코팅층 사이의 열팽창률 차이에 의해 코팅층의 적용이 더욱 어렵게 된다. 더군다나 알루미늄 엔진 등과 같이 높은 온도에 의한 모재의 손상이 우려되는 경우에는 두꺼운 단열코팅층(TBC)이 요구되어 코팅층과 모재의 접합력이 매우 중요하게 되므로 코팅층/모재의 접합력에 큰 영향을 미치는 잔류응력의 해석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 합금 모재에 단열용의 TS-1037ZA( $Al_2O_3$ -CoCr-Cr $_2O_3$ 계 cermet)를 플라즈마 용사코팅하여 두꺼운 단열코팅층(500 $\mu$ m)을 제조하는 공정에서 특히 모재의 예열온도(preheat temperature)가 코팅층과 모재의 응력분포에 미치는 영향을 조사하기 위하여 유한요소법(FEM)을 이용하여 코팅층과 모재의 잔류응력 분포 해석을 수행하였고, CD(coating length change after detaching from the substrate) test를 수행하여 코팅층의 평균 잔류응력을 측정하였다.

### 2. 실 험

본 연구에 사용된 시편의 모델은 알루미늄 합금인 Al6061 T6를 모재로 하고 플라즈마 용사법(plasma spray coating)을 이용하여 일본 TOCALO 사의 TS-1037ZA( $Al_2O_3$ -CoCr-Cr $_2O_3$ 계 cermet)를 모재의 단면에 코팅하였다. 잔류응력 측정과 코팅층의 접합력 시험을 위한 시편의 모재(substrate)인 알루미늄 합금의 형상은 지름 25mm, 길이 35mm의 봉형이며, 코팅 전에  $Al_2O_3$ 를 이용하여 모재의 단면을 블라스팅(blasting)하여 충분한 조도를 유지할 수 있게 하였다. 코팅 변수로서 모재의 예열 온도를 변화시키면서 용사하였다. 코팅층의 평균 잔류응력 계산을 위해 코팅층의 탄성계수를 알아야 한다. 그러나 코팅층은 splat과 splat 사이에 많은 기공과 미소균열을 포함하고 있으므로 코팅이 끝난 후 코팅층의 탄성계수는 bulk material의 탄성계수와 많은 차이를 보이게 된다. 따라서 코팅층의 탄성계수 측정이 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 4점 굽힘 시험(4-point bending test)을 통해 코팅층의 탄성계수를 측정하였다. 모재로부터 코팅층을 분리시킨 후 코팅층의 스트레인(strain)을 측정하였다. 모재로부터 분리 후 코팅층의 길이변화는 응력 완화(stress relief)의 결과이다. 따라서, 코팅층의 평균 응력은 상대 길이 변화(macrostrain)와 탄성계수의 곱으로 계산될 수 있다.

### 3. 유한요소해석

플라즈마 용사 코팅의 잔류응력 해석에는 상용 FEM 패키지(package)인 ABAQUS 컴퓨터 프로그램을 이용하여 Al모재와 TS-1037ZA 코팅층의 잔류응력 분포를 계산하였다. Fig.1에 나타난 바

와 같이 시편의 대칭성을 고려하여 4 노드 축대칭 요소(4-node axisymmetric element)를 사용하였다. 해석을 효과적으로 하기 위해 열원 근처에서 요소 내의 온도구배가 큰 점을 감안하여 코팅층-모재의 경계면과 코팅층 근처에서는 요소의 크기를 작게 하고 코팅층에서 멀어지는 모재 부분으로 갈수록 요소의 크기를 크게 하였다.

코팅층과 모재의 잔류응력 해석에는 먼저 플라즈마 용사 코팅시의 온도분포 해석이 선행되어야 한다. 온도분포 해석 모델은 코팅층을 5층으로 나누어 모재를 일정 온도로 예열한 뒤(예열없음, 150°C, 250°C, 350°C, 400°C), 첫번째 층이 모재에 코팅되고(1 pass) 일정 시간이 지난 후 두번째 층이 첫번째 층 위에 코팅(2 pass)되는 방식으로 다섯번째 층까지 코팅(5 pass)한 후 코팅층과 모재 모두 자연대류에 의해 상온으로 냉각되는 과정으로 해석하였다. 해석시 열원은 K.Y.Bae & H.J.Kim의 연구를 참고로 하여 모재에 충돌하기 직전의 입자온도를 입자에 의한 모재의 열원으로 고려하였다. 잔류응력 해석은 온도분포 해석을 입력(input)으로 하여 모재와 코팅층이 모두 상온으로 냉각되었을 때 최종 상태의 응력을 잔류응력으로 계산하였다. 때 해석 전반에 다음과 같은 가정을 하였다.

- 용사거리, 토오치의 pass속도, 분말 공급속도, 모재의 초기 온도 등의 조건은 일정하다.
- 토오치의 pass 속도가 매우 빨라 입자는 모재에 균일한 적층속도로 코팅된다.
- 열은 모재-코팅층 사이의 계면에 수직방향으로 일차원적으로 전달된다.
- 모재와 스플릿(splat), 스플릿과 스플릿 사이의 계면은 매우 치밀하다.
- 재료의 상변화(phase transformation)에 따른 체적변화는 무시한다

#### 4. 결과 및 고찰

CD(coating length change after detaching from the substrate) test를 수행하여 얻은 코팅층의 상대길이변화(macrostrain)를 측정한 결과, 코팅층을 모재에서 분리시켰을 때 높은 예열온도(preheat temperature)로 예열을 한 후 플라즈마 용사 코팅한 시편일수록 더 큰 (+)방향의 스트레인(strain)이 측정되었다. 즉, 코팅층에 압축잔류응력이 걸려있었기 때문에 모재로 부터 분리 후 응력이 이완되어 코팅층의 상대길이가 증가했다고 생각할 수 있다.

코팅층의 상대길이변화로부터 잔류응력의 크기를 알기 위해 필요한 코팅층의 탄성계수는 측정 결과 약 43.2 GPa 정도의 값을 보였다. 플라즈마 용사 코팅층의 탄성계수는 코팅 특유의 구조 특성과 불균일성으로 인하여 bulk재와는 상이하게 측정되었다.

CD test와 코팅층의 탄성계수 측정으로부터 얻은 모재의 예열온도 증가에 따른 플라즈마 용사코팅층의 평균 잔류응력을 Fig.2에 나타내었다. 코팅층은 시험 범위 내에서 모두 압축 잔류응력을 보였으며, 모재의 예열온도가 증가함에 따라 압축 잔류응력이 증가하는 경향을 보인다. 이는 예열온도가 높을수록 코팅 시작 직전에 모재의 열팽창이 커져서 냉각시 열팽창 계수가 큰 모재의 수축량이 커지기 때문이라 생각된다. 즉, 표재표면을 예열에 의해 팽창시키면 용융된 입자에 의한 새로운 코팅층의 상대 수축량을 줄이기 때문에 잔류응력의 크기가 작아진다. 그러나 400°C로 모재를 예열한 후 플라즈마 용사 코팅한 시편은 코팅 직후 코팅층이 모재에서 박리가 되는 현상을 보였다.

Fig.3에 모재의 예열온도 증가에 따른 코팅층 내의 잔류응력의 최대값과 최소값을 각 방향의 응력에 대해 나타내었다. 각 데이터들은 유한요소해석 결과에서 코팅층 내에 존재하는 최대의 응력값과 최소의 응력값들을 표시한 것이다. 최대 전단응력( $\sigma_{12,max}$ )과 최대 축응력( $\sigma_{22,max}$ )을 제외하고는 거의 모든 잔류응력이 압축 잔류응력임을 알 수 있다. 그러나 최대 전단응력의 경우에는 그 분포 범위가 매우 좁고 최대 축응력의 경우에는 분포도 좁을 뿐만아니라 인장 잔류응력의 크기도 상대적으로 낮아서 코팅층 내부에는 거의 압축 잔류응력이 형성되어 있다고 할 수 있다. 각 방향의 잔류응력에 대하여 최소 잔류응력의 크기는 모재의 예열온도가 증가함에 따라 더 작아지는 경향을 보인다. 즉 모재의 예열온도 증가에 따라 코팅층에는 더욱 큰 압축 잔류응력이 형성됨을 알 수 있다. 그러나 250°C의 모재 예열온도를 기점으로 압축 잔류응력 증가의 기울기가 둔화됨을 알

수 있다.

Fig.4에 모재의 예열온도 증가에 따른 코팅층/모재 계면에서의 잔류응력의 최대값과 최소값을 각 방향의 응력에 대해 나타내었다. Fig.4에서와 마찬가지로 각 데이터들은 유한요소해석 결과에서 코팅층 내에 존재하는 최대의 응력값과 최소의 응력값들을 표시한 것이다. 코팅층에 형성되는 잔류응력과는 반대로 코팅층/모재 계면에 형성되는 잔류응력은 대체로 인장 잔류응력이며, 모재의 예열온도의 증가에 따라 인장 잔류응력의 크기가 급격히 감소함을 알 수 있다. 예열온도의 증가에 따른 이러한 인장 잔류응력의 감소는 모재/코팅층 간의 접합력 향상에 기여한다. 즉, 모재를 250°C 이상으로 예열을 하면 모재/코팅층 간의 접합력이 예열을 하지 않은 경우에 비해 크게 증가할 것이라고 기대된다. 그러나 코팅층의 잔류응력 측정을 위한 시편 제작중 모재를 400°C로 예열하는 경우 플라즈마 용사코팅 도중에 계면박리(delamination)가 일어날 수 있기 때문에 250~350°C 범위의 예열온도가 적당하다고 판단된다. 축방향의 잔류응력과 전단응력은 코팅층에서와 마찬가지로 계면의 대부분에서는 그 크기가 0에 가깝고 가장자리의 아주 좁은 영역에서만 압축 또는 인장 잔류응력이 존재하지만, 모재의 예열온도 증가에 따라 커지는 계면 끝단의 축방향의 압축응력(minimum axial stress,  $\sigma_{zz,min}$ )은 코팅층/모재 사이에 계면박리가 일어나는 것을 어느정도 막아 줄 것이라고 판단된다.

## 5. 결론

절단법(CD test)을 이용하여 플라즈마 용사 코팅층의 잔류응력을 측정하였으며 ABAQUS 프로 그램을 이용한 유한요소해석(FEM)으로 코팅층과 모재의 잔류응력을 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실험조건 내에서 플라즈마 용사 코팅층에는 압축 잔류응력이 형성되어 있음을 확인하였다.
2. 플라즈마 용사 코팅층의 압축 잔류응력은 모재의 예열온도를 증가시킴에 따라 압축 응력의 크기가 증가하나 250°C 이상의 모재 예열온도에서는 압축 잔류응력 증가의 기울기가 감소함을 알 수 있었다.
3. 코팅층/모재의 계면에는 전체적으로 인장 잔류응력이 형성되어 있음을 확인하였다.
4. 코팅층/모재의 계면에서 존재하는 인장 잔류응력은 모재의 예열온도를 증가시킴에 따라 그 크기가 감소하는 경향을 보였다.
5. 코팅층과 모재의 계면에서 존재하는 인장 잔류응력은 모재의 예열온도가 낮을 때에는 중심부에 분포하나 모재의 예열온도가 증가하면 시편의 가장자리에 응력이 집중됨을 알 수 있었다.

## ※참고문헌

1. P. Scardi, M. Leoni, L. Bertamini, "Influence of phase stability on the residual stress in partially stabilized zirconia TBC produced by plasma spray", Surface and Coatings Technology, Vol. 76-77(1995), pp.106-112
2. 배강열, 김희진, "플라즈마 용사층에 발생하는 응력 해석", 대한용접학회지, 제8권 제4호(1990), pp.58-68
3. 이주동, "플라즈마 용사코팅시의 적층모델 및  $ZrO_2(8wt\% Y_2O_3)$  코팅층의 잔류응력에 관한 연구", 서울대학교 대학원 금속공학과 박사학위논문(1992)
4. S. Kuroda and T. W. Clyne, "The Quenching Stress in Thermally Sprayed Coatings", Thin Solid Films, Vol. 200(1991), pp.49-66
5. S. Kuroda, T. Fukushima and S. Kitahara, "Simultaneous Measurement of Coating Thickness and Deposition Stress during Thermal Spraying", Thin Solid Films, Vol. 164(1988), pp.157-163

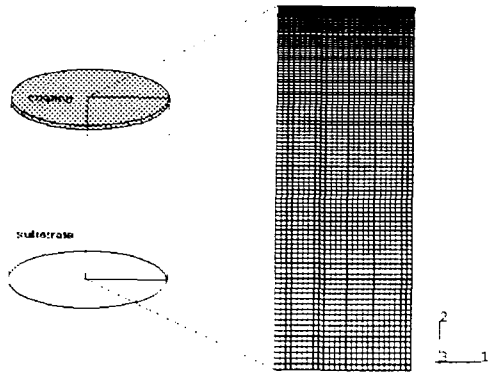


Fig.1 Axisymmetrical FEM model

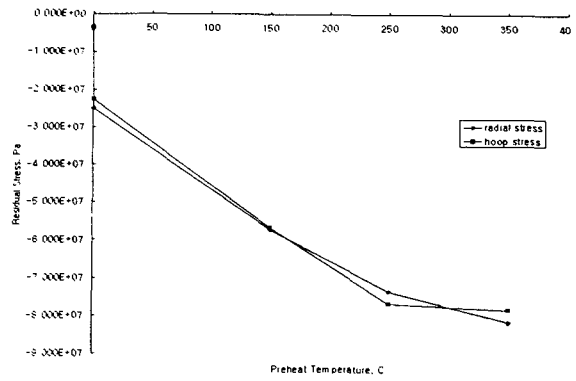


Fig.2 Average residual stress of coatings vs. preheat temperature

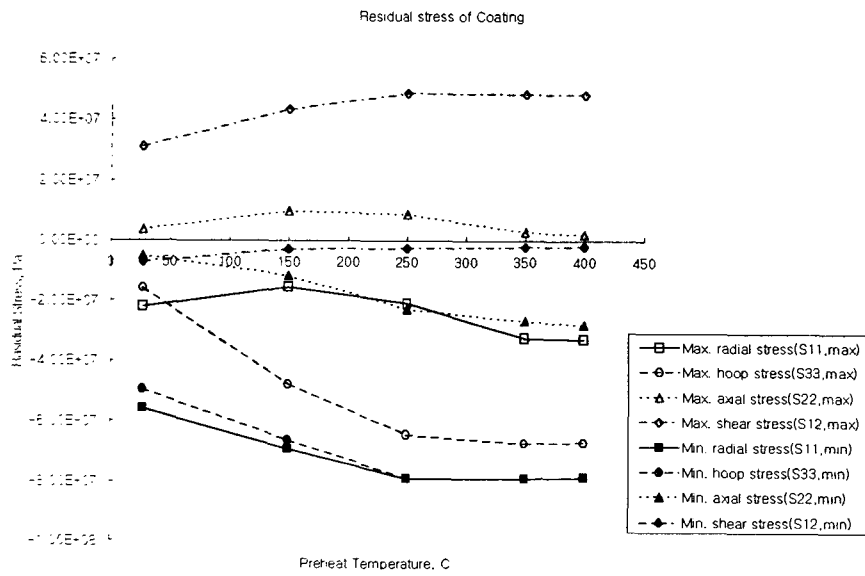


Fig.3 Preheat temperature vs. residual stress of coating(FEM)

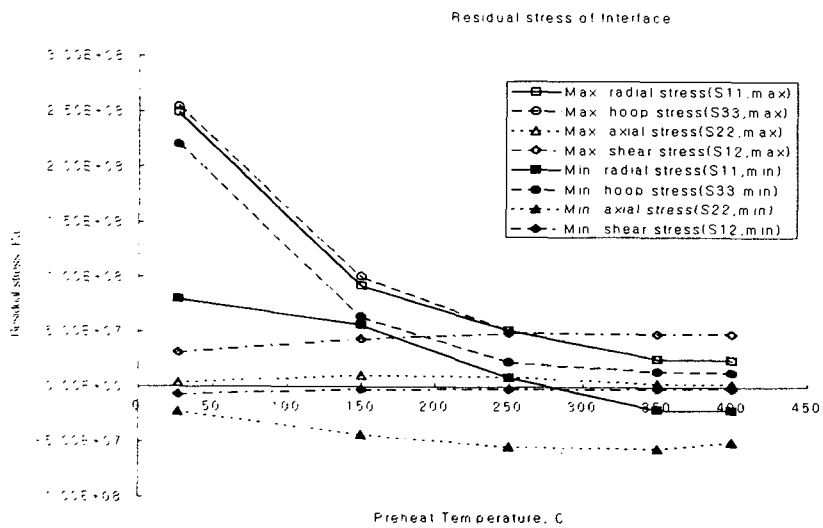


Fig.4 Preheat temperature vs. residual stress of interface(FEM)