

## 엔진 블리스크 제조를 위한 초내열합금 이종재의 HIP Diffusion Bonding

나영상\* · 황형철\* · 염종택\* · 권영삼\*\* · 박노광\*

(2002년 11월 29일 접수)

## HIP Diffusion Bonding of Two Types of Superalloys for Engine Blisk Applications

Y. S. Na, H. C. Hwang, J. T. Yeom, Y. S. Kweon and N. K. Park

### Abstract

HIP diffusion bonding of Ni-based superalloys, cast Mar-M247 (MM247) and Udimet 720 (U720) powder, was experimentally and numerically studied. Subsolvus HIP treatment was optimized by investigating the variations of high temperature tensile properties of HIP-bonded specimens with powder size, HIP'ing time, etc. While the tensile strength at high temperatures showed no detectable changes, the tensile elongation and reduction in area were slightly increased as the powder size decreased from -140 mesh to -270 mesh. While as-HIP'ed U720 showed a high tensile strength comparable to that of forged U720 alloy, the HIP diffusion-bonded specimen showed a strength lower than the forged U720 alloy and the cast MM247 alloy. The increase of HIP'ing time from 2 hours to 3 hours resulted in a rapid rise of tensile strength and elongation due to the disappearance of microvoids in the cast MM247. FEM simulation for HIP process was conducted by applying the McMeeking micromechanical model, which uses power-law creep model as constitutive equations. ABAQUS user subroutine CREEP with an implemented microscopic model was used for the simulation. Numerical simulation was shown to be essential for the near-net shape manufacturing as well as the HIP process optimization.

**Key Words** : HIP, Ni Base Superalloy, Udimet 720, Mar-M247, Diffusion Bonding, HIP Simulation

### 1. 서 론

제트엔진 고온부품의 강도, 크리프 저항성, 크리프-피

로 특성 및 저주기 피로특성 등의 향상을 위해 약 25년  
전부터 니켈기 초내열합금 분말 성형품이 사용되었다.<sup>(1)</sup>  
본 연구에서 목표로 하고있는 dual-property 블리스크를

\* 한국기계연구원  
\*\* (주)세타텍

제조하기 위한 HIP diffusion bonding 기술은 1980년대 초반 Teledyne 373 엔진에 최초로 적용된 이래 공정 개선을 통해 개별적으로 주조된 블레이드를 분말야금으로 제조된 디스크의 급형에 삽입한 후 HIP diffusion bonding을 수행함으로써 1997년 Allied Signal사(현 Honeywell)의 항공용 보조동력장치 터빈 로터에 성공적으로 사용되었다. 이밖에도 선진 항공용 엔진사에서는 초내열합금 분말야금 기술을 차세대 아음속 엔진의 압축기 등에 적용하기 위한 연구가 계속되고 있으며 이를 통해 엔진의 출력, 효율 등을 크게 향상시킬수 있을 것으로 기대하고 있다.<sup>(2)</sup> 국내에서는 이에대한 연구가 거의 전무한 상태로서 천이액상확산접합(TLP bonding)에 관한 기초적인 연구가 일부 진행되었을 뿐<sup>(3)</sup>, 니켈기 초내열합금 분말의 HIP diffusion bonding 기술에 대한 경험은 전무하다.

본 연구는 HIP diffusion bonding을 통해 상용의 니켈기 초내열합금인 Udimet 720 합금 분말과 Mar-M247 주조합금으로 된 일체형의 dual property 블리스크를 개발하기 위해 수행되었다. U720 분말입도, HIP 시간에 따른 HIP 후 미세조직과 인장강도 변화를 조사, 분석함으로써 최적의 공정 조건을 찾고자 하였다. 또한 수치해석 기법을 이용하여 HIP diffusion bonding시 발생할 수 있는 급형 형상 변화를 예측하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에 사용된 Mar-M247 및 Udimet 720 분말의 조성은 Table 1에 나타내었다. 특히 Udimet 720 합금은 gas atomization법에 의해 Special Metals 사에서 제조된 분말을 사용하였다. 분말 표면의 산화를 방지하기 위해 sieving, loading 등 분말 취급은 불활성 질소가스 분위기 하에서 행하였다. 캔 소재로는 스테인레스 스틸을 사용하였으며 적절한 양의 U720 합금 분말과 정밀주조된 Mar-M247 합금 블록을 캔에 장입한 후 약  $10^{-2}$  torr의 진공분위기 하에서 degassing 처리를 수행하였다. 2시간 동안의 degassing 처리가 완료된 후 HIP을 수행하였다. U720 분말의 조대화를 방지하기 위하여 HIP 온도는  $v'$  solvus 온도(1160°C) 이하인 1100°C에서 수행하였으며 -140mesh 및 -270mesh의 분말 크기와 HIP 시간 등에 변화를 주어 실험을 수행하였다.

HIP 성형품의 높은 기계적 특성을 파악하기 위해 U720 분말만을 장입하여 HIP을 수행한 시편(HIP-PM)과 U720 분말내에 MM247 주조품을 삽입한 후 HIP diffusion bonding을 수행한 시편(HIP-bond)에 대해 고

온 기계적 특성을 조사하였으며 광학현미경 및 전자현미경을 이용하여 성형품 및 접합부의 미세조직을 관찰하였다.

Table 1 Chemical composition of alloys (wt.%)

Element	Cr	Co	Mo	Ti	Al	W	Zr
MM247	8.25	10	0.7	1	5.5	10	0.05
U720	18	14.7	3	5	2.5	1.25	0.03
Element	Ta	Hf	C	B	Ni		
MM247	3	1.5	0.15	0.015	Bal.		
U720	-	-	0.035	0.033	Bal.		

HIP diffusion bonding 공정에 대한 수치해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS의 user subroutine인 CREEP module을 이용하였으며 McMeeking 등이 제안한 power-law creep 모델<sup>(4-5)</sup>을 적용하여 수치해석을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 1의 전자현미경 사진으로부터 알 수 있는 바와 같이 U720 합금 분말은 구형의 입자로서 입도분석 결과  $33\mu\text{m}$  정도의 평균입자 크기를 보였다. U720 분말에 대한 열분석 결과  $v'$  solvus 온도는 약 1160°C였으며 이를 바탕으로 HIP 온도는 1100°C로 결정하였다.

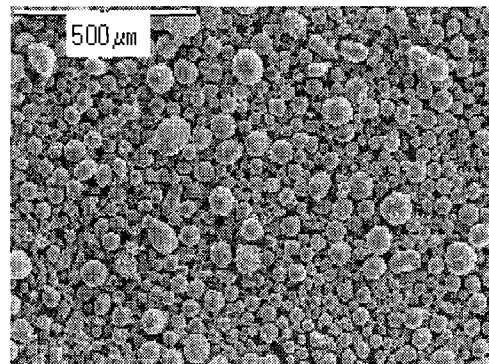


Fig. 1 SEM micrograph of Udimet 720 powder

밀도 측정을 통해 성형밀도를 분석한 결과 사용된 분말 크기에 관계없이 성형 시간인 2시간 내에 성형밀도는 100% 달성되었으며 이는 추후에 언급될 HIP 공정에 대한 수치해석 결과와 일치하는 결과이다. 분말 성형품 및 확산 접합부의 미세조직을 관찰하기 위해 HIP-bond 시

편에 대해 마크로 및 마이크로 조직을 관찰하여 Fig. 2에 나타내었다. HIP 성형시 스테인레스 스틸 캔의 수축이 MM247 주조품이 놓여있는 부위에서 작게 발생하여 불룩한 모양을 나타내고 있음을 Fig. 2(a)로부터 확인 할 수 있다. U720 분말과 MM247 주조품 사이의 확산접합부에서는 접합선이 관찰되었으며 고배율 관찰결과 접합부위에서 미세한 기공들이 관찰되었다.(Fig. 2(b)) 한편 접합선을 가로질러 조성에 대한 선분석을 시행한 결과 (Fig. 2(c)) 확산층이 관찰되었는데, 고용강화 원소인 W, Ta 등이 확산접합층에 trap되어 있었고 또한 Ti, Cr 등의 빠른 확산으로 인해 접합면이 U720 합금쪽으로 이동되는 것을 관찰할 수 있었다.

성형조건에 따른 성형품의 상온 및 고온인장특성을 조사하여 Fig. 3에 나타내었다. HIP-PM 시편의 경우 기준시편인 U720 단조 시편의 특성에 비해 90% 이상의 고온인장강도 특성을 나타냈고 연신율은 오히려 증가한 반면, HIP-bond 시편의 경우 고온인장강도가 MM247 주조품의 특성에도 미치지 못하였다. HIP-PM 및 HIP-bond 시편의 고온인장 파단면을 관찰한 결과(Fig. 4) HIP-PM 시편의 경우 prior particle boundary 들이 관찰된 반면 HIP-bond 시편의 경우 파면에 수직상의 morphology를 관찰할 수 있었으며 이는 HIP-bond 시편의 파단이 MM247 주조품에서 발생하였음을 나타낸다.

입자 크기에 따른 HIP-PM 시편의 고온인장 특성을 조사하여 Fig. 5에 나타내었다. 입자 크기가 감소함에 따라 고온 인장강도 및 연신율에서 약간씩 증가하였으나 그 크기는 크지 않았다. 750℃에서 연신율이 감소하였는데, 이는 결정립계와 결정립 내부의 강도가 같아지는 온도(equi-cohesive temperature)에서 Ni계 합금의 연신율이 일반적으로 감소하는 현상과 관련이 있으나 정확한 원인에 대해선 좀더 많은 연구가 필요하다. 한편 HIP-bond 시편의 고온 강도 및 연신율을 향상시키기 위해서 HIP 시간을 3시간으로 늘려 성형을 수행하였으며, 그에 따른 고온 기계적 특성 변화를 조사하여 Fig. 6에 나타내었다. HIP 성형시간이 증가함에 따라 고온 강도 측면에서 약간의 증가가 관찰되었으며, 특히 연신율이 크게 증가하였다. HIP-bond 시편의 경우 앞서 Fig. 4에서 보여준 바와 같이 고온 파단이 MM247에서 발생하므로 HIP 시간에 따른 특성 변화의 원인은 HIP에 따른 MM247 합금의 미세조직 변화(Fig. 7)로부터 파악할 수 있을 것이다. 통상적으로 MM247 합금에서 고온 강도를 발현하는  $v'$  상의 분율은 60vol.%에 이른다. 그러나 1100℃에서  $v'$  상의 평형 분율은 약 30% 정도로서 비록 HIP 처리 후 냉각중에  $v'$  상이 추가 석출되었다 하더라도 그

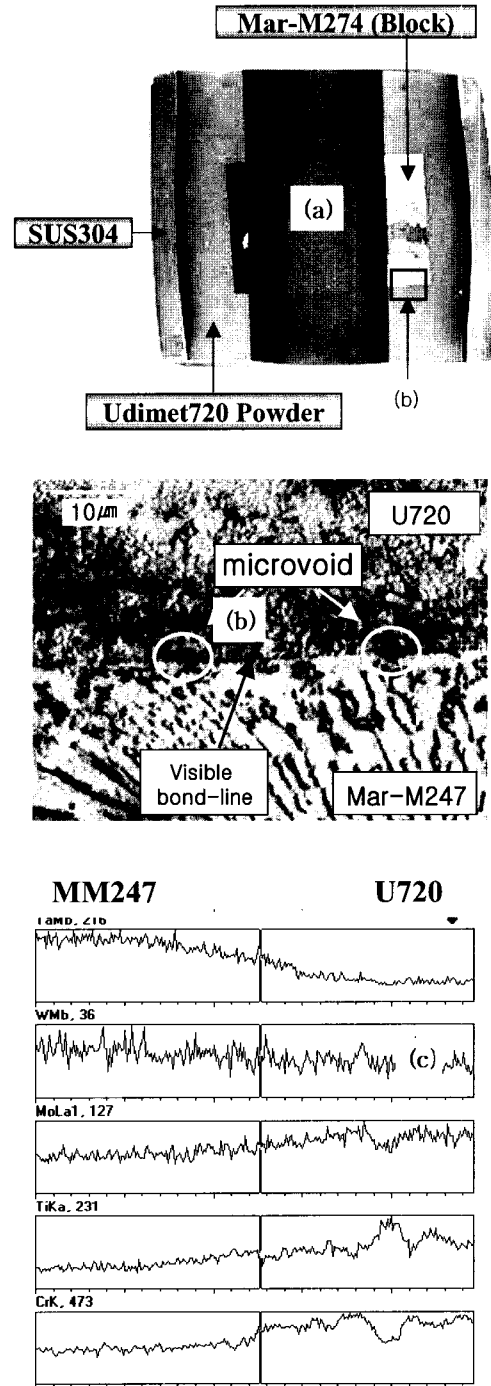


Fig. 2 Micrographs of HIP diffusion-bonded specimen (a) macrostructure, (b) microstructure (c) line profile

양은 크게 감소했을 것으로 판단된다. 뿐만아니라 1100℃에서 잔류하고 있는  $v'$  상의 조대화, 탄화물과 기지와

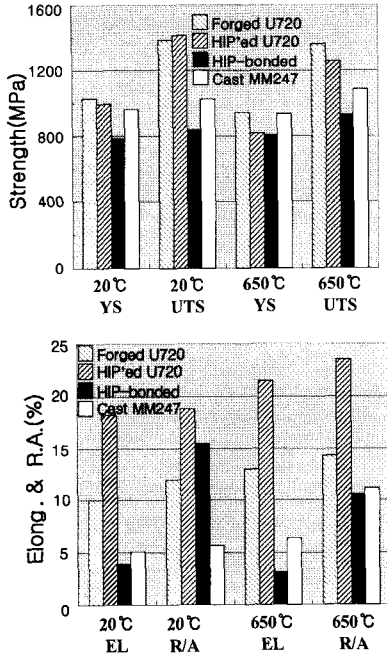


Fig. 3 Tensile properties after 2 hours HIP at 1100°C

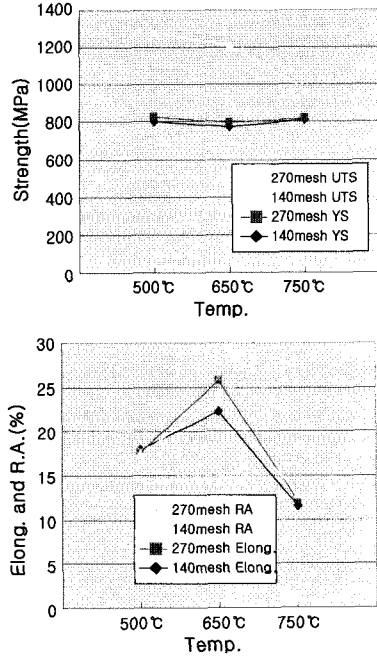


Fig. 5 Effect of particle size on hot tensile properties

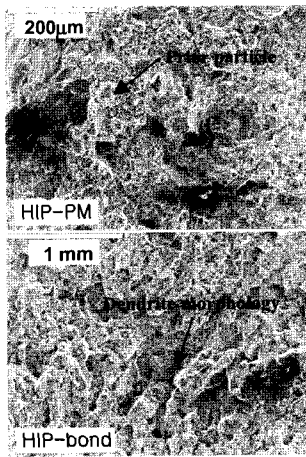


Fig. 4 SEM micrographs of tensile fracture surface

의 반응에 따른 탄화물 주위의 morphology 변화 등이 복합적으로 작용했을 것으로 판단된다. 반면 1100°C에서 3시간 HIP을 수행한 시편의 경우 주조시 발생했던 미세 공공(microvoid)들이 소멸하면서 2시간 HIP한 시편에 비해 상대적으로 강도 및 연신율이 증가한 것으로 판단된다. 3시간 HIP한 경우 강도 증가에 비해 연신율의 증가가 더욱 뚜렷한 사실로부터 미세공공의 소멸이 중요한 역할을 했음을 짐작할 수 있다. 한편 1100°C HIP 과정에서  $\gamma'$  및 탄화물 등 구성상들의 morphology 변화는 후열

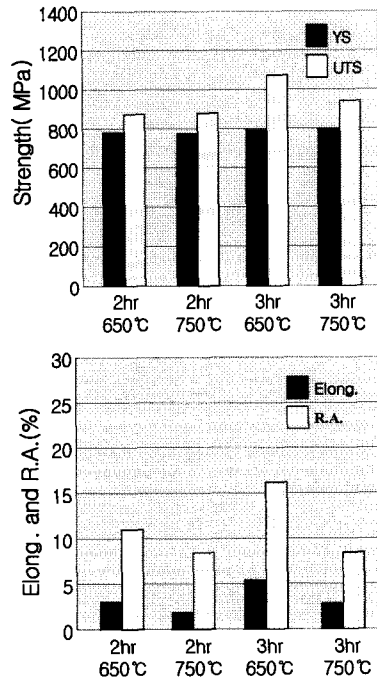


Fig. 6 Effect of HIP'ing time on tensile properties

열처리를 통해 최적화될 필요가 있다. 현재 U720 단조품 및 MM247 주조품보다 우수한 고온 기계적 특성을 발현

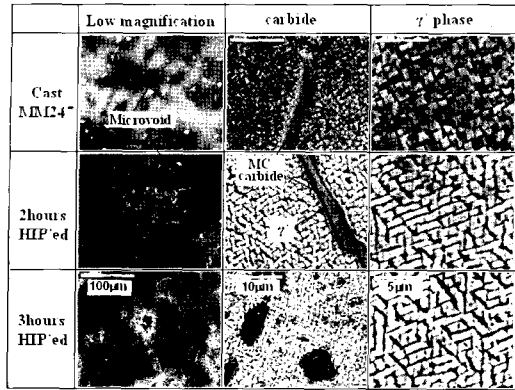


Fig. 7 Microstructure change of cast Mar-M247 with HIP'ing time

하는 최적 열처리 조건에 대한 연구를 수행하고 있으며 이에 대해서는 별도의 발표를 준비중에 있다. 한편 HIP diffusion bonding에 의해 제조될 블리스크의 near-net shaping(NNS)을 가능케 하기위해서 HIP 공정에 대한 수치해석 연구를 수행하였다. 수치해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS의 CREEP 모듈에 McMeeking<sup>(4-5)</sup> 등이 제안한 power-law creep 모델을 적용하여 수행하였다. McMeeking 등이 제안한 모델 (micromechanical 모델)에서는 아래 식(1)의 간단한 power-law creep 식을 활용하기 때문에 간단한 재료상수(A, n, Q) 만으로 해석이 가능한 이점이 있다. 또한 micromechanical 모델에서는 분말의 치밀화에 따른 밀도 변화가 국부적인 응력, 변형률에 미치는 영향을 고려하는 데, 본 해석에서는 상대밀도가 0.92 이하인 경우 분말 충전 공정으로 해석하였으며 0.92 이상에서는 벌크 소재 내부에 공극이 존재하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

$$\dot{\epsilon} = A \times \sigma^n \times \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

여기서  $\dot{\epsilon}$ ,  $\sigma$ ,  $Q$ ,  $T$ 는 각각 변형률속도, 응력, 활성화에너지 및 절대온도이다.

한편 HIP 공정 해석을 위해 필요한 재료상수들은 고온 압축시험 및 크리프 시험을 통해 얻은 변형률속도-응력 데이터를 비선형 다중 회귀 분석법을 활용해 power-law creep 식에 일치시킴으로써 얻었으며 Table 2에 실험조건 및 재료상수를 나타내었다.

Fig. 8에 HIP 수치해석에 사용된 형상의 모델을 보여주고 있다. 총 요소의 수는 1458개로서 U720 분말 충전부는 950개, MM247 주조부위는 300개, 캔 부위는 208개

였고 그림에서 보는바와 같이 x축 대칭조건으로 수치해석을 수행하였다. 해석은 초기 분말 충전밀도 0.68, 가열속도 10°C/min, 최대온도 1100°C, 유지시간 2시간, 최대압력 100MPa의 조건으로 수행하였다.

Table 2 Determination of material parameters

materials	Udimet720	Mar-M247
test method	hot compression test	creep test
temperature range	1025 ~ 1150°C	760 ~ 980°C
strain rate range	$5 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	$10^{-1} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$
parameters	$A=4.6E^4 \text{ (kPa}^{3.82}\text{-s)}^{-1}$ $n=3.82$ $Q=447 \text{ kJ/mol.K}$	$A=9.8E^{10} \text{ (kPa}^{5.73}\text{-s)}^{-1}$ $n=5.73$ $Q=442 \text{ kJ/mol.K}$

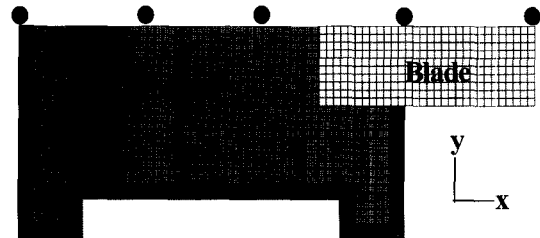


Fig. 8 Geometry model for HIP simulation

Fig. 9에 HIP 공정중 가열 및 유지동안의 U720 분말의 밀도변화를 보여주고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 분말 성형품의 밀도는 가열과정에서 이미 98% 이상의 성형밀도에 도달하였으며 1100°C에서 30분 유지만으로도 100%의 성형밀도를 얻을 수 있었다. 또한 가열이 진행되고 분말의 충진이 진행되면서 Fig. 8 형태의 초기 형상이 변형되어 가는 과정을 확인할 수 있다.

MM247 주조품 및 U720 분말의 성형에 따른 최종 성형품의 형상변화를 해석하여 Fig. 10에 나타내었다. HIP 성형후 성형품의 심한 형상변화가 관찰되었으며 두께방향과 함께 반경 방향의 수축이 관찰되었다. 특히 MM247 dummy 블레이드가 삽입된 부분의 영향으로 인하여 U720 부분의 수축율이 부위에 따라 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 결국 최종 블리스크의 NNS 성형을 위해서는 부위별 형상변화 및 수축을 고려하여 프리폼 형상을 결정하여야 한다.

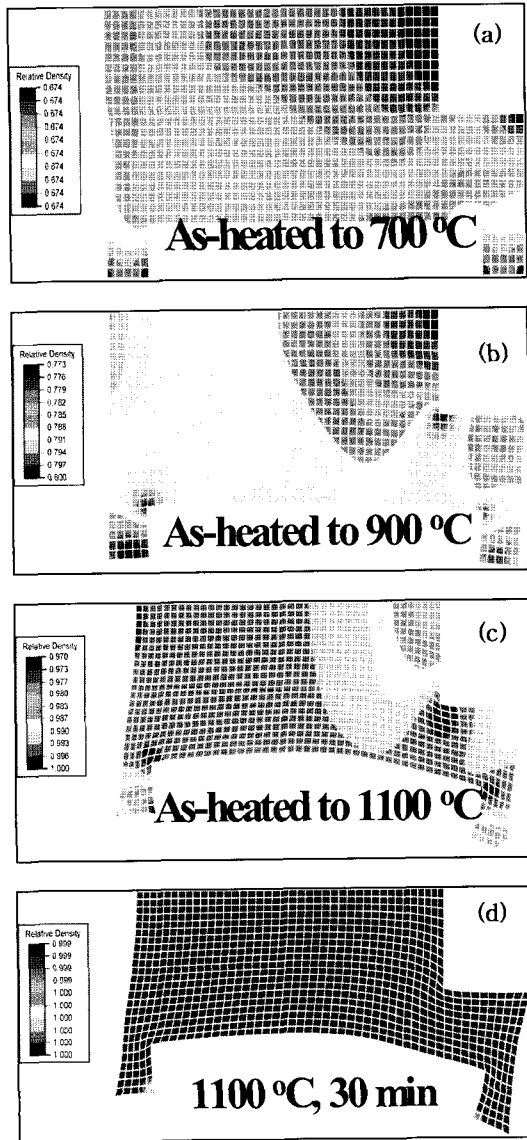


Fig. 9 Simulated relative density contour during HIP cycle of U720 powder

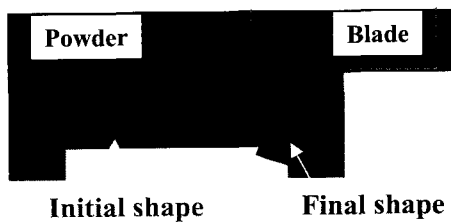


Fig. 10 Initial and deformed shape of HIP diffusion bonded blisk

#### 4. 결론

Mar-M247 주조합금과 Udimet 720 분말의 HIP 확산접합 공정에 대한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 1100°C/2시간 열간 정수압 성형을 통해 기존의 단조품에 비해 충분한 강도를 갖는 분말 성형품을 얻을 수 있었다.

(2) 그러나 위와 같은 성형 조건에서 확산 접합품의 고온 인장강도는 크게 낮았으며 HIP 성형 시간을 3시간으로 증가시킴에 따라 확산 접합품의 고온 인장 특성을 크게 개선하였다.

(3) 입자 크기에 따른 분말 성형품의 고온 인장강도 변화는 크지 않았으나 입자 크기가 감소함에 따라 연신율이 약간 증가하는 경향을 관찰할 수 있었다.

(4) Micromechanical 모델을 적용하여 HIP 공정에 대한 수치해석을 수행하였으며 열간 정수압 성형 과정에서의 급형의 형상변화를 예측할 수 있었다. NNS 성형을 위해서는 부위별 수축율을 감안하여 프로토폰 형상을 결정하여야 한다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어연구개발사업의 일환인 '차세대소재성형기술개발사업단'의 연구비 지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- (1) Eisen, W., 1996, "PM Superalloys: past, present, and future", Materials World, pp. 22~24
- (2) Eisen, W. B., 1997, "P/M Superalloys: a current perspective", Int. J. Powder Metallurgy, Vol. 33, pp. 62~67
- (3) Kang, C. Y. et al, 1994, "A study on TLP diffusion bonding of directionally solidified Ni base superalloy", J. Kor. Inst. Met. Mater., Vol.32, pp. 1346~1355
- (4) Kuhn, L. T. and McMeeking, R. M.: Int. J. Mech. Sci., 34 (1992) pp. 563~573
- (5) Sofronis, P. and McMeeking, R. M.: J. Appl. Mech., 59 (1992) pp. S88~S95