

## 분말합금을 이용한 블리스크 제조용 캔 설계

임정숙\* · 염종택\* · 권영삼\*\* · 박노광\*

### Can design for Blisk of Nickel-base Superalloy Powder

J. S. Lim\*, J. T. Yeom\*, Y. S. Kwon\*\*, N. K. Park\*

#### Abstract

Superalloys with many strengthening alloying elements are frequently used in powder form to alleviate harmful effects of alloy segregation. HIP (hot isostatic pressing) and DB (diffusion bonding) as a form of solid-state bonding process is often used to make turbine components, such as integrated turbine rotors. HIP/DB process requires many technical overcomes related to dimensional changes as well as microstructural control.

In this research, HIP/DB process for nickel base superalloys, Udimet 720, were investigated with a view to control the dimensional change during the consolidation process. Simple disc-shaped cans were used to select the conceptual die design for the control of the dimensional change especially in radial direction. The change in the shape of consolidated shape was investigated using commercial FE code with constitutive equations for low temperature plasticity and creep deformation.

**Key Words :** Udimet720, HIP, 확산접합, 블리스크

#### 1. 서 론

고강도 Ni 합금은 고온에서 기계적특성과 내산화성이 우수하기 때문에 항공용, 육상용 가스터빈은 물론 증기터빈, 디젤엔진 등 내열기관에 광범위하게 사용되는 합금이지만 석출경화형 합금이 다량 포함되어있어 가공성, 접합성이 상대적으로 나쁘다. 원소재의 특성을 유지하면서 에너지 절감, 공정 단축 등의 요구를 만족하는 일체화성형부품을 제조하기 위해서는 분말 초내열합금을 이용한 접합기술 개발이 절실히 요구되는 실정이다. 니켈기 초내열합금 분말합금 중 Udimet720의 HIP/DB (열간정수압성형/확산접합) 공정에 관련되어 발표된 연구논문은 거의 없다.

Udimet720을 이용하여 일체화성형된 부품을 제작할 경우 접합부위에서의 기계적, 화학적 특성이

시스템 전체의 특성발현에 중요하기 때문에 공정 변수를 최적화한 접합기술개발은 매우 중요하다. 현재 가스터빈의 터빈부분은 대부분 블레이드와 디스크 조립품이 이용되고 있으며, 블레이드 root 부위와 디스크 rim 부위를 fir-tree type으로 가공하여 조립한 것이 이용되고 있다. 그러나, 디스크에는 금속분말을 이용하고 블레이드에 주조용합금을 이용하여 HIP/DB 일체화성형시킨 블리스크를 이용할 경우, 디스크부와 블레이드부의 요구특성에 맞는 dual property를 구현하여, 엔진의 공력 효율을 극대화시킴과 동시에 firtree를 제거함으로써 엔진의 경량화, 소형화를 이룰 수 있다.

본 논문에서는 이들 부품제작에 적용하기 위한 기술개발의 일환으로 HIP/DB을 이용하여 이종소재인 U720 분말을 이용하고 확산접합으로 블리스크를 제작하기 위한 금형을 설계하고자 하였다.

\* 한국기계연구원 재료기술연구소 공정연구부

\*\* 세타텍㈜

Deform-2D 를 이용하여 성형체의 형상변화를 측정하고, ABAQUS 를 이용하여 실제 캔 형상의 형상변화를 예측하였다. 이종 소재의 확산접합에 대한 기계적 특성은 기존의 문헌을 참고하였다<sup>(1)</sup>.

## 2. 시뮬레이션 방법

### 2.1 시뮬레이션 조건

본 연구에 사용된 HIP/DB 용 분말 소재는 니켈 기지 초내열합금인 Udimet 720 이며 화학조성을 표 1 에 나타내었다. 캔 소재는 AISI302 (mild steel) 혹은 Udimet720 를 사용하였다. HIP/DB 성형을 위한 HIP chamber 온도와 압력 그래프는 아래의 Fig.1 과 같이, 가열 및 냉각 속도는 10°C/min 이며, 최대 온도 1100 °C, 압력 100Mpa 에서 3hr 유지하였는데, 이는 HIP 후 최적의 기계적 특성을 나타내는 조건이며 특성시험과 기존의 문헌을 참고하여 결정한 것이다<sup>(3)</sup>. HIP/DB 공정시점에서의 분체의 Grain density 는 0.68 로 설정하였으며, 실제 실험에 사용된 powder 의 밀도를 측정된 값이다. HIP 공정에 대한 수치해석은 DEFORM 2D 코드와 ABAQUS 를 사용하였다.

DEFORM 2D 해석에서는 porous-plastic module 을 이용하여 캔 형상의 치수변화를 다양한 조건에서 예측하였으며, ABAQUS 해석에서는 고온에서의 캔소재와 Udimet720 의 크리프 변형식을 이용하여 HIP 사이클 도중에 일어나는 밀도변화에 따른 치수변화를 확인하였다. Fig.3 에서 보는 바와 같이 실제 적용 가능한 형상을 시뮬레이션 하였다. 파우더와 캔의 소재는 같게 사용하고 중심부의 플레이트만 304 stainless steel 과 크리프 변형이 일어나지 않는 소재로 가정하여 각각 시뮬레이션 후 Can Body 의 변화를 비교하기 위해 각 Node 점의 정보를 비교 분석하였다

Table 1. Chemical composition of Udimet 720

(unit: wt.%)					
Element	C	Cr	Co	Mo	W
Content	.025	18.0	14.8	3.0	1.3
Element	Ti	Al	B	Zr	Ni
Content	5.0	2.5	.035	.035	Bal.

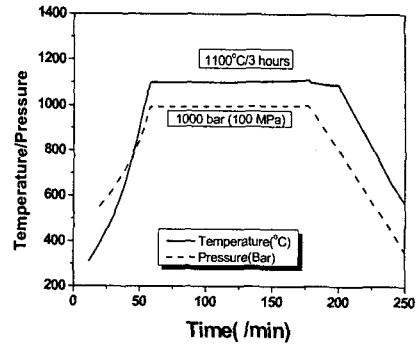
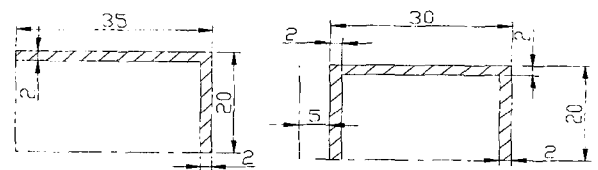


Fig. 1 Graph of heating and cooling rate via pressure rate

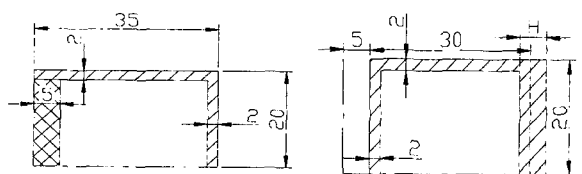
### 2.2 캔의 형상설계

우선, HIP 을 위해 고안된 단순한 캔의 형상은 모두 4 종류이며, Fig.2 에 각각의 단면도를 나타내었다. 여기에서 Fig. 2(a)는 캔의 두께가 2mm 로 모두 같은 경우이고, Fig. 2(b)는 캔의 중심에 직경 10mm 의 hole 이 있는 경우이며, Fig.2(c)는 직경 10mm 의 블록을 넣은 경우이고, Fig.2(d)는 각기 캔 외벽의 두께에 따른 영향을 알아보기 위하여 두께(H)를 5, 10, 20mm 로 하여 해석하였다. 단순형태의 캔 형상에 대한 Deform 2D 해석결과를 바탕으로 실제형상과 근사한 모델에 대하여 캔형상을 Fig. 3 과 같이 설계하여 ABAQUS 를 이용하여 해석하였다. Fig. 3 의 왼쪽은 캔의 2 차원 형상을 나타낸 것으로, 치수변화를 측정하기 위한 Node 의 위치를 표기하였다.



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig. 2(a) Geometry of the simple can with uniform wall thickness, (b) Block diagram of the can with a center hole, (c) Block diagram of the can with a block in the middle, (d) Block diagram of can with a center hole and thick wall(H=5, 10, 20mm)

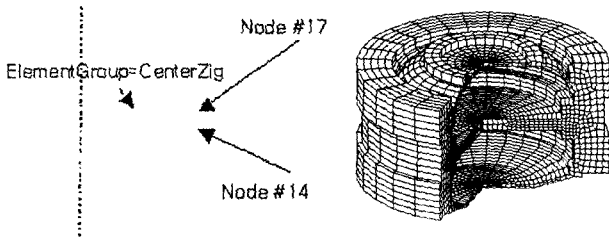


Fig. 3 Geometry model for ABAQUS

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 캔 형상에 따른 shape 비교

HIP/DB 성형에 의한 블리스크에서 가장 중요한 부분은 디스크와 블레이드가 집합되는 방향인 가로방향의 수축 제어가 필요하다. HIP 성형시 can의 형상변화는 Fig.4 에 대표적으로 나타낸 바와 같이 can 두께에 따라 달라짐을 확인할 수 있었다. Fig.2 에서의 각 경우에 대한 가로 및 세로 길이방향의 수축정도를 Table 2 에 나타내었다. 각각의 CASE 는 Fig. 2 와 대응하다. CASE B 의 캔 내부에 hole 이 존재하는 경우 단순 캔 형상에 비해 가로 수축의 정도는 다소 향상되었으나 C 와 같이 캔 내부에 블록이 있는 경우 오히려 캔의 가로 수축률에 악영향을 미침을 알 수 있었다.

CASE D-1, D-2, D-3 의 수축률을 비교해보면 캔 외벽이 두꺼울수록 세로수축이 심하게 일어나며, 상대적으로 가로 수축은 저조하게 일어났고 캔의 외벽이 20mm 로 가장 두꺼운 D-3 의 경우 캔의 가로 수축률이 가장 많이 향상되었으므로, 이를 이용하여 캔의 가로 수축률을 제어할 수 있음을 알게 되었다. Fig.5 는 온도에 따른 캔 내부의 밀도 변화를 나타내고 있다.

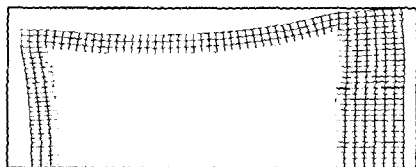


Fig. 4(a) Change in geometry of can (H=5mm).

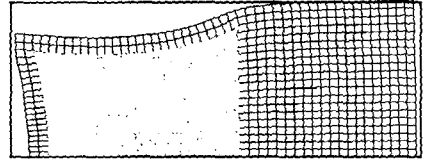


Fig. 4(b) Change in geometry of can (H=20mm).

Table 2. HIP 성형후 CAN 의 수축률

CASE	A	B	C	D-1	D-2	D-3
수축률(%)						
가로	11.58	9.72	14.76	9.45	7.23	5.95
세로	16.81	13.61	16.85	20.49	24.00	26.82

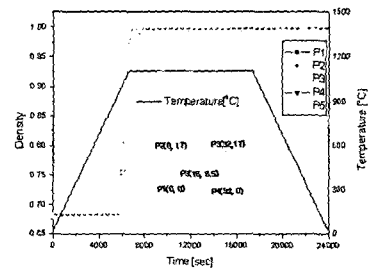


Fig. 5 Change in powder density by HIP'ing

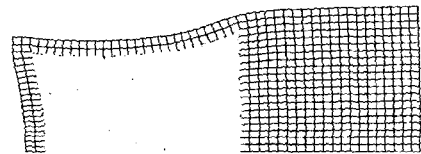


Fig. 6(a) Deformed shape of Mild steel Can

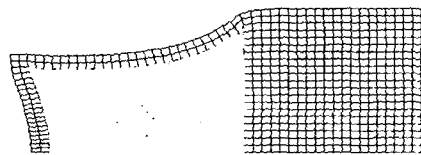


Fig. 6(b) Deformed shape of Udimet720 Can

#### 3.2 캔 소재에 따른 shape 비교

앞의 Fig.2 의 캔형상에 대한 해석결과 CaseD-3 의 경우에서 캔의 가로 수축율이 가장 작은 것으로 나타났다. 치수변화에 미치는 캔 소재의 영향을 검토하기 위하여 캔 소재를 Udimet720 와 mild steel 로 하였을 경우 shape 의 형태를 비교하였는

데 그 결과는 Fig. 6 과 같다. 즉, 고온에서 크리프 강도가 큰 Udimet720 을 캔의 소재로 사용한 경우가 mild steel 을 사용한 경우보다 외벽의 변형이 거의 일어나지 않았음을 확인할 수 있다.

### 3.3 ABAQUS 해석 비교

Fig. 6 에서의 결과를 바탕으로 고온에서 크리프 특성이 좋은 재료를 사용할 경우 캔의 가로방향 수축에 영향을 적게 미칠 것으로 판단하여 ABAQUS 를 이용하여 해석하여 Fig. 7 과 8 의 결과를 얻었다. Fig. 7 에 각 조건에 따른 캔의 초기 형상과 변형후의 형상을 나타내었다. 또한 HIP 성형도중에 일어나는 각 노드점의 변화를 가시적으로 나타내기 위해 Fig. 8 에 그래프로 나타내었다.

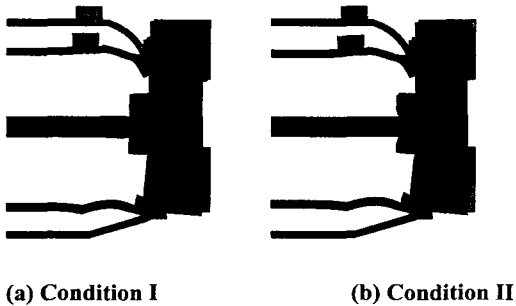


Fig. 7 Deformed shape of can with initial shape

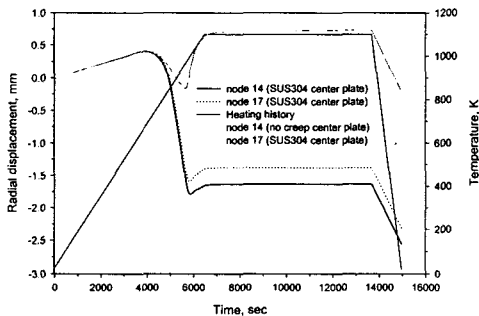


Fig.8 Variation of radial displacement

Fig. 8 에서 보면, 온도의 상승에 따른 열팽창에 따라 반경은 점차 커지다가 HIP 온도에 다다르게 되면 반경이 축소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 HIP 에 의한 밀도증가에 따라 나타나는 현상이다. 한편 내부지지대의 고온 크리프 강도가 높을수록 반경방향으로의 수축은 줄어드는 양상을 확인할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구를 통하여 다음에 따르는 몇 가지 결론을 얻게 되었다.

- (1) HIP/DB 시뮬레이션은 압력의 영향이 가장 크며 shape 에 따른 영향은 그 정도가 미미하다.
- (2) 캔의 외벽이 두꺼울수록 캔의 가로 수축을 감소시켰다.
- (3) 고온강도가 큰 재료를 캔의 외벽에 사용하고 나머지 부분은 Mild steel 을 사용하였을 때 가로 수축율의 정밀도를 향상시킬 수 있었다.
- (4) Deform 2D 를 이용한 해석에서는 고온에서 크리프 특성이 좋은 소재를 사용하였을 때 반경방향의 캔의 수축이 거의 일어나지 않았지만, ABAQUS 를 이용한 해석에서는 Center Plate 에 변형이 일어나는 것으로 판단되었다. 그러므로 가로 수축률의 완벽한 제어는 불가능하므로 실제 캔 제작에서는 이러한 수축을 감안하여 설계하는 것이 타당하다고 하겠다.

## 후 기

본 사업은 차세대 소재성형 사업의 일환으로 수행된 것임을 밝힙니다. 예산 지원에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Eisen, W., 1996, "PM Superalloys: past, present, and future", Materials World, pp.22~24.
- (2) Kang, C. Y. et al, 1994, "A study on TLP diffusion bonding of directionally solidified Ni base superalloy", J. Kor. Knst. Met. Mater., Vol.32, pp.1346~1355.
- (3) 나영상, 황형철, 엄종택, 권영삼, 박노광, 2003, "엔진 블리스크 제조를위한 초내열합금 이중재의 HIP Diffusion Bonding," 한국소성가공학회지, 제 12 권, 제 1 호, pp. 60~65.
- (4) P. Sofronis, R. M. McMeeking, 1992, "Creep of Power-Las Material Containing Spherical Voids", Transactions of ASME, Vol. 59, pp.88~95.
- (5) L. T. Kuhn and R. M. McMeeking, 1992, "Power-low creep of powder bonded by isolated contacts", Int. J. Mech. Sci. Vol. 34, No. 7, pp563~573.