

# 터보차저 컨트롤 플레이트의 절삭량 최소화를 위한 정형공정

윤필환\*, 이선봉\*\*,#

\*계명대학교 기계공학과, \*\*계명대학교 기계자동차공학과

## Net Shaping Process to Minimize Cutting amount of Turbocharger Control Plate

Pil-Hwan Yoon\*, Seon-Bong Lee\*\*,#

\*Department of Mechanical Engineering, Keimyung University,

\*\*Department of Automotive and Mechanical Engineering, Keimyung University

(Received 22 May 2017; received in revised form 15 June 2017 ; accepted 19 June 2017)

### ABSTRACT

Turbocharger is a device for increasing the power of a vehicle engine. The control plate is the main component for fixing the vane of the turbocharger. Now, the control plate is made of austenite steel cutting after the casting process. It has excellent corrosion, heat resistance and mechanical characteristics of material. However, present the process is made by cutting after casting. when cutting is processed after casting, so materials, processing time, and processing energy are lost. Therefore, this study proposes a process to powder compact use of stainless steel Deklak2 and to minimize amount of cutting through net shape process. The mechanical properties of Deklak2 were verified by tensile test, hardness test and relative density measurement, and the governed equation was defined. Also, the curvature radius 1, 2 and the density, affects the shape, were selected as the design parameters, and the best process conditions was proposed through the Taguchi method and the evaluation of SN ratio. And then prototype molds were fabricated and compared with the results of the finite element analysis for the verification, and it was found that the tendency of relative density and dimension was coincided. Therefore, it was found that the amount of cutting can be minimized by only the net shape process after the sintering process and it can be applied to mass production.

**Key Words** : Turbocharger(터보차저), Control Plate(컨트롤 플레이트), Finite Element Analysis(유한요소해석), Design Of Experiment(실험계획법), Net Shape Process(정형공정)

### 1. 서 론

터보차저(turbocharger)는 내연기관에서 발생하는 엔진의 배출가스 압력을 이용해 터빈을 돌린 후,

터빈의 회전력을 이용해 흡입하는 공기를 대기압보다 강한 압력으로 밀어 넣어 출력을 높이는데 사용된다. 터빈은 배기통로에 연결되는데, 회전력을 변화시키기 위하여 배기가스의 에너지를 이용하여 혼합 가스의 충전효율을 높이고 연비를 향상시킨다.<sup>[1]</sup>

이에 따라, 과급유량을 조절하는 터보차저의 핵

# Corresponding Author : seonbong@kmu.ac.kr

Tel: +82-53-580-5476

심부품 중 하나인 컨트롤 플레이트(control plate)는 스테인리스강을 이용하여 분말 야금법(neo powder metallurgy)으로 제작한 후 절삭가공을 통해 치수정밀도를 향상시킨다.

스테인리스강의 분말야금 제작 후 절삭가공으로 치수 정밀도를 향상시키는 것은 재료의 손실, 가공 에너지 증가 등의 문제점들이 있어 절삭가공을 최소화하는 연구가 진행되고 있다.

스테인리스 강으로 제작된 컨트롤 플레이트는 내식성, 내열성, 기계적 성질 등이 우수하여 일반 기계부품, 일상생활용품 등 많은 산업에서 사용되고 있다. 하지만 절삭성이 좋지 않아 절삭가공에 어려운 점이 많다. 그러므로 최근에는 복잡한 형상의 제품을 단시간에 다량으로 생산하고, 치수의 정밀도를 높일 수 있는 분말야금법이 스테인리스강 제품 생산에 많이 이용된다.<sup>[2-4]</sup>

Kim 등은 배터리 클램프 생산을 위한 냉간 단조 금형설계 및 금형응력해석, 제품유동해석 등을 진행하였다.<sup>[5]</sup> Lee 등은 오스테나이트 계 316L 스테인리스강을 소결조건에 따라 재료거동 과 비균질 미시구조에 관한 연구를 진행하였고,<sup>[6]</sup> Ku 등은 six cross ball의 곡률반경을 2단계로 단차를 주어 성형하중을 감소시키는 연구를 수행하였다.<sup>[7]</sup> Jung 등은 냉간 단조를 이용하여 자동차용 기계부품 중 하나인 피니언 플러그(pinion plug)를 개발하는 과정 중 금형의 재질별 수명에 관련된 연구를 진행하였고,<sup>[8]</sup> Joun 등은 단조 시뮬레이션에서 발생한 결함예제와 문헌에서 발견된 결함 예제의 원인을 체계적으로 분석함으로써 단조 시뮬레이션의 정확성에 영향을 미치는 주요 인자에 대하여 연구를 진행하였다.<sup>[9]</sup> Kim 등은 자동차용 단조 플랜지의 최적 값을 찾기 위해 유한요소해석을 실시하였으며 해석 결과 값 확인을 성형력, 물질유동, 재료내 응력분포, 금형부하로 검증하였다.<sup>[10]</sup> 그러나, 강도가 높은 스테인리스강을 활용한 제품의 최종형상을 제작하기 위하여 정형공정을 통해 절삭량을 줄이는 성형방법에 대한 연구와 프레스 성형 공정 변수인 곡률반경에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 오스테나이트 계 스테인리스강인 Deklak2를 이용하여 터보차저 유량을 조절하는 주요 구성요소 부품인 컨트롤 플레이트 생산의

정형공정에 대한 연구를 실시하였다. 공정 변수는 두 곳의 하부 곡률반경(R1), 상부 곡률반경(R2), 밀도( $\delta$ )로 선정하였으며, 실험계획법을 이용하여 소결체로 컨트롤 플레이트의 절삭량을 최소화 하도록 유한요소해석을 통하여 해석하였고, SN비를 활용하여 최적의 성형조건을 연구하고자 한다.

## 2. 유한요소 해석

### 2.1 컨트롤 플레이트 구조

Fig. 1은 스테인리스강인 Deklak2 분말 소재의 컨트롤 플레이트를 나타내었다.

터보차저의 과급유량을 조절하는 핵심 부품 중 하나인 컨트롤 플레이트는 터보차저에서 베인(Vane)을 고정해주는 역할을 한다. 약 900℃의 고온에서 사용되기 때문에 내열성과 내식성이 우수하다. 직경은 76.9mm이며 높이는 10.5mm의 성형품을 이용하여 소결, 정형공정 및 절삭공정을 거쳐 최종제품의 형상을 가진다.

### 2.2 컨트롤 플레이트의 기계적 특성

컨트롤 플레이트는 정형공정에서 내부 국부 응력 발생으로 인해 형상 변형이 발생하며, 성형해석을 통해 이를 예측하기 위해 먼저, Deklak2 소재의 인장 시험과 경도시험을 실시하였으며, 그 결과를 Table 1, Table 2에 나타내었다.

컨트롤 플레이트는 Deklak2의 분말을 이용하여 소결공정을 거친 제품이므로 상대밀도가 중요하다. 일반적으로 소결단조품은 압축금형에서 발생하는 불균

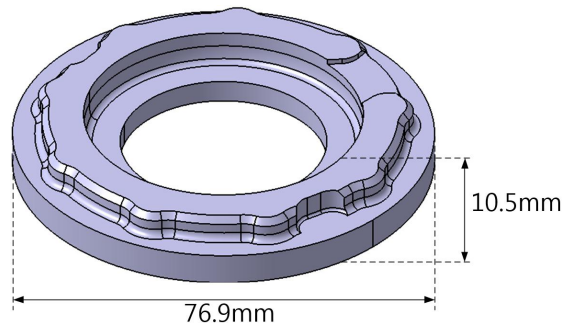


Fig. 1 3D modeling shape of control plate

**Table 1 Tensile properties of Deklak2**

Type	Sintering condition			Flow stress curve[MPa]
	Sintering temperature [°C]	Sintering atmosphere	Lubricants	
1	1220	Ar	Non	$\bar{\sigma} = 1304.97\epsilon^{-0.23}$
2	1220	Ar	additi	$\bar{\sigma} = 1324.65\epsilon^{-0.23}$
3	1220	Ar	on	$\bar{\sigma} = 1336.60\epsilon^{-0.22}$

**Table 2 Hardness test results of Deklak2**

Type	Results according to the depth of the specimen( $H_V$ , mm)				
	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
1	243.64	260.23	250.73	249.42	250.73
2	275.52	271.76	274.01	281.71	271.76
3	255.42	252.06	255.42	259.54	256.10

**Table 3 Relative density of Deklak2**

Type	Average density	Theoretical density	Average relative density
1	7.402	7.62	0.971
2	7.423	7.62	0.974
3	7.367	7.62	0.967

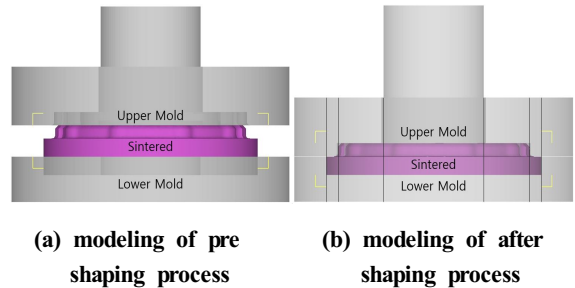
일한 밀도분포와 단조시 금형의 형상과 마찰에 의해 최종제품은 불균일한 밀도를 나타낸다.<sup>[11-13]</sup>

분말제품의 평균밀도 측정은 비중법을 이용하였으며, Table 3에 측정결과를 나타내었다. 해석은 실제 공정과 동일하게 하부 금형은 고정이며, 상부 금형이송에 의해 이루어진다.

### 2.3 유한요소해석 모델

Fig. 2에 유한요소해석 모델을 나타내었다.

컨트롤 플레이트의 소재는 Deklak2를 사용하였으며, 윤활유 미함유, 소결온도 1220°C, 소결분위기는 아르곤가스분위기 등의 양산조건을 적용한다. 소결 후 절삭공정을 최소화하기 위해 정형공정을 제안하고 유한요소해석 S/W인 DEFORM-3D를 이용하여 성형 해석을 수행하였다. 또한 본 연구에서는 정형공정의



**Fig. 2 Modeling of Shaping process**

최적 해석조건을 선정하기 위하여 실험계획법의 다구치 기법을 사용하였다.<sup>[14]</sup>

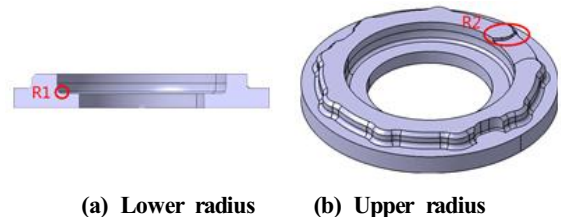
### 2.4 실험인자 및 직교배열표 작성

정형공정의 설계 변수는 펀치의 하부 곡률반경, 상부 곡률반경, 밀도로 선정하였는데, 이유는 일반적으로 펀치의 곡률반경이 커면 클수록 펀치가 소재를 누르는 접촉면이 커지면서, 소재에 많은 응력이 발생하게 된다. 그러나 곡률반경이 너무 커지게 되면 곡률반경이 없을 때와 효과가 동일하게 나타나게 되므로 적절한 곡률반경이 필요하기 때문이다.<sup>[15]</sup>

이러한 공정변수의 최적 조건을 찾기 위해 실험계획법을 적용하였으며<sup>[16]</sup>, Table 4의 수준과 값들을 설계변수로 적용하였고, 그 결과는 Table 5와 같다. 그리고 Fig. 3에 곡률반경의 위치를 나타내었다.

**Table 4 Design variables and levels**

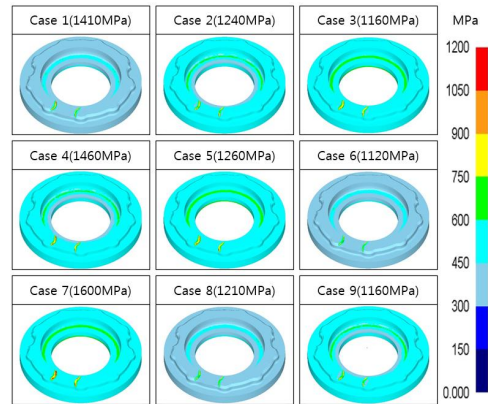
Variables	Level	Level		
		1	2	3
1	Radius 1[mm]	1.5	1.6	1.7
2	Radius 2[mm]	0.3	0.4	0.5
3	Relative density	0.90	0.94	0.98



**Fig. 3 position of radius**

**Table 5**  $L_9(3^4)$  orthogonal array

No. of simulation cases	Radius1	Radius2	Density
1	1.5	0.3	0.90
2	1.5	0.4	0.94
3	1.5	0.5	0.98
4	1.6	0.3	0.94
5	1.6	0.4	0.98
6	1.6	0.5	0.90
7	1.7	0.3	0.98
8	1.7	0.4	0.90
9	1.7	0.5	0.94



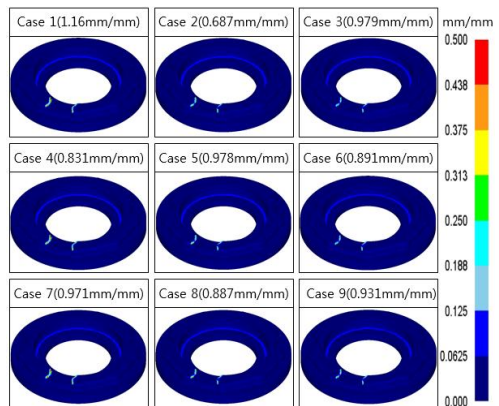
**Fig. 4** Each case stress distribution by finite element analysis results

### 3. 유한요소해석 결과

#### 3.1 실험계획법을 통한 성형해석 결과

Table 6에 실험계획법을 적용하여 진행한 수준별 결과값을 나타내었다.

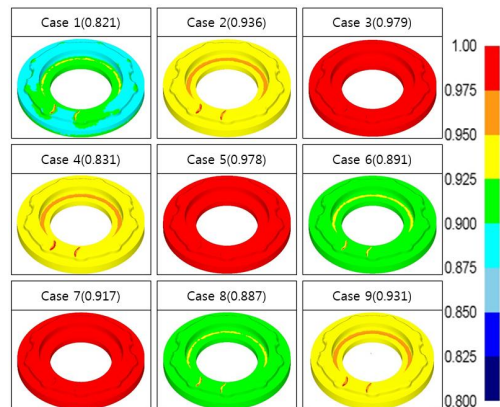
유효응력, 유효변형률, 밀도, 정수압에 따른 제품 형상을 Fig. 4, 5, 6, 7에 나타내었으며, 해석결과 모든 경우에서 소결체의 성형은 잘 진행되었으나, 소결체의 절점에 작용하는 최대 응력 값은 차이가 나타났다. 이는 제품 제작 공정상에서 금형의 수명을 단축시킬 수 있다. 그래서 유효응력 1160MPa, 유효변형률 0.54mm/mm, 정수압 526으로 가장 최적의 조건인 Case 3의 곡률반경 1.5mm, 곡률반경 0.5mm, 밀도 0.98의 설계변수를 선정하였다.



**Fig. 5** Each case strain distribution by finite element analysis results

**Table 6** Finite element analysis results of  $L_9(3^4)$  orthogonal array

No. of simulation cases	Stress [MPa]	Strain [mm/mm]	Hydrostatic pressure [MPa]
1	1410	1.16	475
2	1240	0.69	739
3	1160	0.54	526
4	1460	1.37	851
5	1260	0.73	993
6	1120	0.51	338
7	1600	2.07	1170
8	1210	0.66	610
9	1160	0.53	422



**Fig. 6** Each case relative density distribution by finite element analysis results

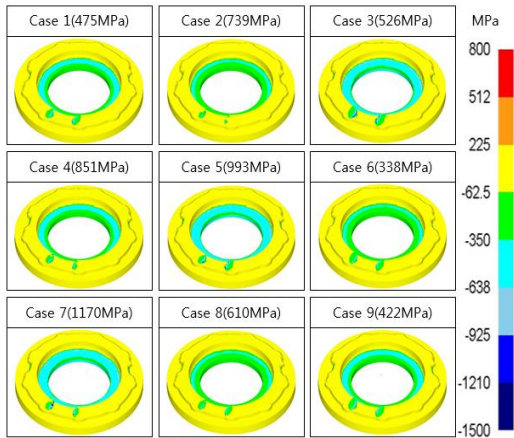


Fig. 7 Each case hydrostatic pressure distribution by finite element analysis results

### 3.2 SN비를 통한 최적 값 도출

앞에서 선정한 최적조건의 Case 3에 대한 성형성을 평가하기 위한 기준을 정수압으로 선정하고, 망소특성의 손실함수를 적용, SN(Signal-to-Noise)비로 비교하고 가장 좋은 수준을 예측하였다.

$$SN = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad \text{식(1)}$$

식(1)의 y는 해석 결과 값, n은 해석횟수를 나타낸다.

유효응력, 유효변형률, 정수압은 결과 값이 작을수록 제품에 가해지는 영향이 줄어 성형력과 품질이

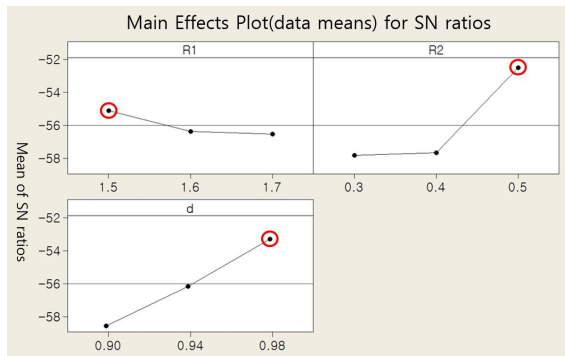


Fig. 8 The SN ratios for variables

상승한다. Fig. 8에 SN비를 활용하여 정수압에 미치는 수준별 요인 효과도를 나타내었다.

정수압에 대해 설계 변수가 해석에 미치는 영향의 순서는 상부 곡률반경, 하부 곡률반경, 밀도 순으로 나타났다. 또한, 정수압에 대해 SN비가 최대인 공정조건은 하부 곡률반경 1.5mm, 상부 곡률반경 0.5mm, 밀도 0.98로 나타났다. 따라서 실험계획법을 사용하여 나타난 9가지 Case중 Case 3과 동일함을 확인하고, Case 3이 최적의 성형해석 결과라고 평가하였다.

### 3.3 정형공정을 통한 절삭량 감소

현재 생산중인 컨트롤 플레이트는 Fig. 9 (a)와 같다. 본 연구에서는 Fig. 9 (b)의 형상과 같이 압분체 제조 후 정형공정 과정을 거쳐 절삭량을 줄이는 것이 목표이다. 소결체를 제안한 것과 같이 제작할 경우 질량은 3.81g(약 2%) 줄일 수 있고, 가공시간과 가공에너지 절감도 있을 것이라 판단된다. 또한 소결체의 높이기준 10.5mm에서 양산공차를 고려하여 ±0.1mm단위로 선정하고 성형력, 응력분포 등의 유한요소해석을 진행하고 결과를 Fig. 10에 나타내었으며, 기준치 이하로 양산성도 문제가 없는 것으로 판단된다.

정형공정의 금형재질은 양산재질과 같은 SKH51종으로 제작되었으며, 금형에 걸리는 응력, 주응력을 해석한 결과를 Fig. 11과 Table 9에 정리하였다.

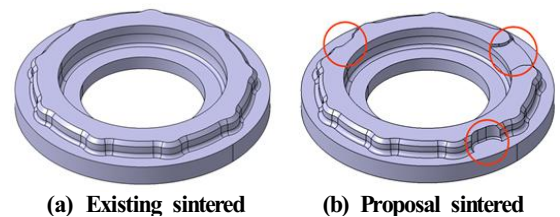


Fig. 9 Shape comparison

Table 7 Weight comparison

Existing sintered weight [g]	Theoretical sintered weight [g]	Proposal sintered weight [g]
197.81	197	194

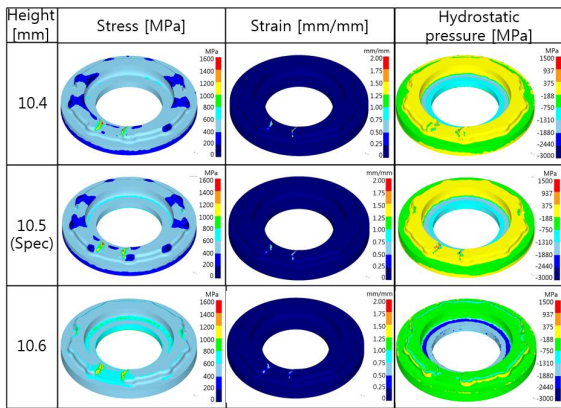


Fig. 10 Finite element analysis of sintered with tolerance

Table 8 Finite element analysis results of sintered subjected to tolerance

Sintered height[mm]	Stress [MPa]	Strain [mm/mm]	Hydrostatic pressure [MPa]
10.4	1510	2.20	1780
10.5	1610	2.17	1810
10.6	1320	1.11	2490

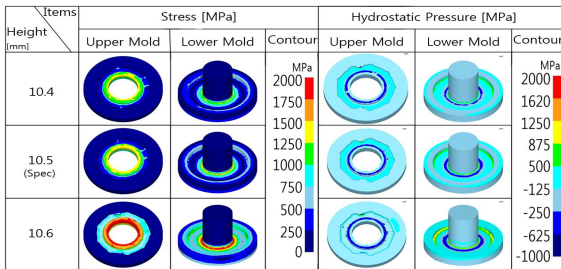


Fig. 11 Finite element analysis of mold with tolerance

Table 9 Finite element analysis of mold with tolerance

Height [mm]	Items	Stress [MPa]		Hydrostatic Pressure [MPa]	
		Upper Mole	Lower Mole	Upper Mold	Lower Mold
10.4		1340	1320	635	887
10.5		1340	1850	343	1120
10.6		1940	2170	707	1190

금형의 상, 하판에 걸리는 주응력이 2400MPa 이하로 SKH51종의 항복조건에 미치지 않는 수준으로 안전한 것으로 판단된다.<sup>[17]</sup>

#### 4. 유한요소해석 결과 검증

##### 4.1 프로토 금형 성형 해석 결과

유한요소해석을 통해 얻은 유효응력, 유효변형률, 상대밀도 등의 값과 치수 및 형상도 확인을 위해 프로토 금형(proto mold)을 제작하여 비교 검증을 진행하였다. 프로토 금형으로 해석 검증을 진행한 이유는, 양산금형을 새로 제작하거나, 변경할 경우 시간이나 비용적 측면에서 과다해지기 때문에 프로토 금형으로 설계변수가 미치는 영향과 해석의 경향성을 파악하고 양산금형에 적용하기 위함이다.

타당성 검증을 위하여, Fig. 12와 같이 프로토 금형을 제작 하고, 하부 곡률반경 1.5mm, 상부 곡률반경 0.5mm, 상대밀도 0.98의 조건에서 0.2배 비율로 축소 제작한 모델을 Fig. 13에 나타내었다. 이에 따라 축소 모델의 유한요소해석을 실시하여 Fig. 14에 나타내었고, Fig. 15에는 제작된 시험품의 형상을 나타내었다. 또한 결과 값은 Table 10에 정리하여 나타내었다.



Fig. 12 Prototype net shape mold

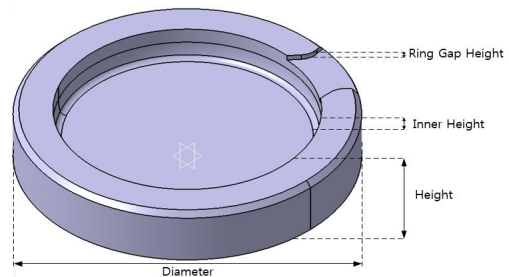
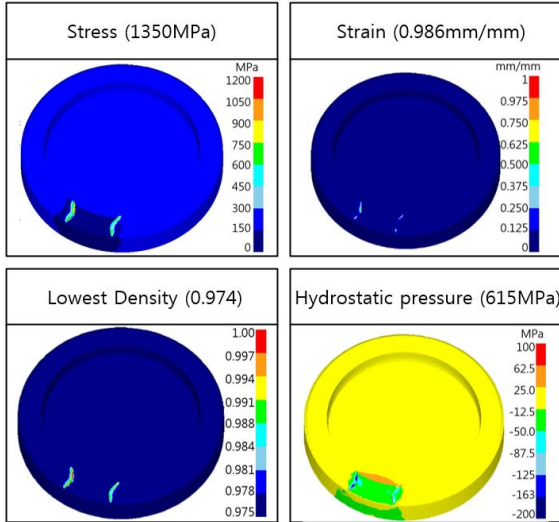


Fig. 13 Name of part of prototype sintered

**Table 10 Element analysis results of prototype sintered**

Stress [MPa]	Strain [mm/mm]	Hydrostatic pressure [MPa]
1350	0.99	615



**Fig. 14 Finite element analysis result of prototype sintered**



**Fig. 15 3D 0.2 ratio modeling shape of prototype sintered**

## 4.2 치수를 통한 유한요소해석 검증

0.2배 비율로 축소된 컨트롤 플레이트의 규격과

**Table 11 Results of compared simulation and the actual product**

Items	Simulation [mm]	Real [mm]	Error factor [%]
Diameter	∅16.58	∅16.42	0.97
Height	2.63	2.56	0.03
Inner Height	1.55	1.52	0.02
Ring Gap Height	0.25	0.26	+4
Lower Radius	0.3	0.3	0
Upper Radius	0.1	0.1	0

유한요소해석 결과와 최종제품의 치수는 Table 11에 나타내었다. 도면의 치수와 형상을 비교한 결과 98.5%이상 일치함을 알 수 있었다.<sup>[18]</sup>

따라서 컨트롤 플레이트 제작에 절삭 공정을 거치지 않은 정형공정만으로 성형성을 향상시킬 수 있다는 경향성을 확인할 수 있었다.

## 4.3 상대밀도를 통한 유한요소해석 검증

소결 후의 상대밀도는 앞선 Table 3에서 파악한 것과 같이 실제 양산제품과 동일하게 적용되도록 하였다. 정형가공후의 하부 곡률반경, 상부 곡률반경, 밀도 0.98의 조건으로 유한요소해석을 통하여 구하였으며, Table 12에 이론밀도와 제품의 밀도를 측정하여 비교하여 결과를 도출하였다. 위 조건으로 구한 상대밀도는 +0.001%이내로 일치한다고 판단할 수 있다.

또한 유한요소해석 결과의 밀도 값과 본 연구에서 제안한 소결 제품과 비교하였고, 실제제품과 해석결과와의 밀도는 99%이상 동일하여 경향성 파악에 신뢰성을 확보하였다.

**Table 12 Various density of molding process**

Theoretical density	Simulation density	Real density	Relative density [%]	Real / simulation
7.62	7.40	7.41	97.1	1.001

## 5. 결론

본 연구에서는 컨트롤 플레이트의 기존 양산공정인 주조 후 절삭가공 실시하던 것을, 소결처리 후 정형가공 공정으로 변경하여 절삭량을 최소화할 수 있도록 제안하였다. 이의 검증은 위해 성형해석을 통해 결과를 예측하고 프로토타입 금형을 제작하여 실험 검증하였다. 검증방법으로 제작된 소결체는 직경 16.58mm, 높이 2.63mm이다. 하지만 프로토타입 금형으로 제작된 압분체의 경우 두께가 얇으면 소결 시 뒤틀림 현상이 미량 발생하였다. 그러나 정형공정에서 압력이 가해지면, 소결체의 뒤틀림 현상이 바로 잡히고 재료내 응력분포가 고르게 되는 것을 확인할 수 있었다.

성형해석은 Deform-3D를 이용하였고 실험계획법을 적용, 선정된 수준별로 유한요소해석을 수행하고 최적의 수준을 선정, 망소특성의 SN비 평가를 통해 선정하였다. 또한 설계변수는 하부 곡률반경, 상부 곡률반경, 밀도이며 재질은 스테인리스강 Deklak2이다.

본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 컨트롤 플레이트의 소재인 Deklak2의 기계적 물성을 얻기 위해 인장시험과 경도시험 및 상대밀도를 측정하였다.
2. 실험계획법의 수준별 유한요소해석을 수행하여 SN비의 설계변수 영향도를 평가하였고, 분석결과 상부 곡률반경 0.5mm, 하부 곡률반경 1.5mm, 밀도 0.98인 Case 3이 가장 우수하다고 판단되었다.
3. 유한요소해석으로 곡률반경에 따른 재료내 응력분포를 알 수 있었고, 하부 곡률반경 1.5mm, 상부 곡률반경 0.5mm의 해석결과가 가장 좋은 응력분포를 가지며, 해석의 신뢰성을 확보하기 위해 제품의 치수와 상대밀도를 비교한 결과 치수는 98.5%, 밀도는 100.1% 동일하다는 것을 확인하였다.
4. 설계변수와 치수의 영향도 평가를 위해 0.2배의 축소모형으로 프로토타입 금형을 제작하고 검증한 결과 치수정밀도는 기존제품대비 98.5%, 상대밀도는 100.1%로 나타나 양산제품의 해석결과에 대한 신뢰도를 검증하였다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제안한 컨트롤 플레이트의 소결후 정형공정 가공만으로도 절삭량이 약 2%(3.81g) 절감되고 연간 생산량 30만대 기준 1,143kg이 절감될 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 향후 양산금형에 적용하는 추가 연구를 통해 양산적용 가능할 것으로 사료된다.

## 후 기

“본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 경제협력권산업 육성사업으로 수행된 연구결과입니다.”

## REFERENCES

1. Wikipedia, “Turbocharger”, Retired 14, Jun., 2010, from [www.wikipedia.org/wiki/turbocharger](http://www.wikipedia.org/wiki/turbocharger)
2. Kim, H. Y., Park, C. W., Kim, H. I., Park, K. S., Kim, Y. H., Joe, H. S., “A study of the FEM Forming Analysis of the Al Power Forging Piston”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 34, No. 10, pp. 1543-1548, 2010.
3. Lee, B. S., Kim, K. H., Lee, D. J and Choi, D. C., “A Study on Some Properties of Sintered Stainless Steel Powder Compacts with Sintering Conditions”, Journal of the Korean Institute of Metals, Vol. 24, No. 6, pp. 669-680, 1986.
4. Ambs, H. D. and Stosuy, A. “Handbook of Stainless Steel”, Handbook of Stainless Steel, McGraw-Hill, New York, pp. 29-32, 1977.
5. Kum, H. M., Lee, H. J., Kim, T. B., Sin, K. S and Park, Y. B., “Precision Cold Forging of Battery Clamp Using Finite Element Analysis”, J of The Korean Society Of Automotive Engineers, pp. 95-98, 2011.
6. Lee, J. E., “A Study of the heterogeneous microstructures and material behaviors of austenitic 316L stainless steel by sintering condition,” A Thesis for a Master, hanyang university, Republic



- of Korea, 2014.
7. Ku, T. W., Kang, B. S., "Tool Design for Inner Race Cold Forging with Skew-type Cross Ball Grooves", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, No. 8, pp. 1482-1502, 2014.
  8. Jung, T. W., Kim, Y. S., Lee, Y. S., Hoon, M. Y., Nam, J. H., "A Study on the Split Die to Prevent Stress Concentration under Cold Former Forging Process", Proceedings of Korean Society of Precision Engineering Conference, pp. 249-250, 2010.
  9. Joun, M. S., "Case Study on Major Defects in Cold Forging by Finite Element Method", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, pp. 223-227, 2011.
  10. Kim, S. Y., "Development of Creative Cold Forging Process Using High-performance Servo Press and Numerical Analysis Technology", Forging Symposium, pp. 21-32, 2015.
  11. Park, J. J., "Relationship between hardness and Relative Density in Sintered Metal Powder Compacts", Journal of Korean Society for Technology of Plasticity, pp. 168-174, 1998.
  12. Kim, J. Y., Park, J. J., "Prediction of Relative Density by Hardness in compressed Sintered-Metal Powder", Journal of Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 6, No. 6, pp. 508-516, 1997.
  13. Kuhn, H. A and Downey, C. L., "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials", International Journal of Powder Metallurgy, Vol. 7 pp. 15-25, 1971.
  14. Kim, B. J., Lee, S. B., "Study on the Shaping Process of Turbocharger Nozzle Slide Joint", Journal of KASIO, Vol. 18, No. 1, pp. 107-114, 2017.
  15. Suh, C. H., Jung, Y. C., Lim, Y. J., Yum, H. Y. and Lee, K. H., "The Effects of Process Parameters of Multi-Stage Forming On Springback for a U-Channel made of Ultra-High-Strength Steel", Journal of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 36, No. 3, pp. 283-288. 2012.
  16. Kim, K. M., "Optimization of Sheet Metal Forming Process Using Mahalanobis Taguchi system",
  17. Kang, B. S. and Ku, T. W., "Process Modification and Numerical Simulation for an Outer Race of a CV Joint using Multi-Stage Cold Forging", Journal of Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 23, No. 4, pp. 211~220. 2014.
  18. Choi, S. Y., Kwon, D. G., Park, I. S. and Wang, D. H., "A study on the optimal conditions for machining accuracy when endmill fillet cutting at the corner", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 101~108. 2016.