

알루미늄 합금(AI 7075) 절삭성 향상을 위한 열간단조 후처리 방법에 관한 연구

김진복* · 임학진* · 강범수**

A Study on the Improvement of Machinability in Hot-Forged Aluminum Alloy Product(AI 7075)

J. B. Kim* · H. J. Im* · B. S. Kang**

Abstract

Hot forging of aluminum alloy has the bad machinability due to continuous chip formation caused from the ductility. The bad machinability requires a labor and a high cost to produce final products after hot forging. In industrial field, T4 heat treatment is performed to improve the machinability, and the annealing and the cold sizing are followed. In this study, a series of heat treatments are introduced during hot forging operation without T4 heat treatment after forming so that it improves the machinability with reduction of the number of operations and machining cost. Instead of T4 heat treatment, water cooling and air cooling are tried and compared to find out an optimum cooling condition

초 록

알루미늄 제품은 열간단조하면 재료가 연화되어 있어 절삭가공시 연속적인 칩이 발생하여 공구와 피삭재를 감고 회전함으로써 가공면 손상, 공구파손 및 작업자의 안전을 초래함에 따라 가공이 어려워 단지 절삭성 개선목적만을 위해 중간공정으로 T4열처리하여 절삭가공하고 다시 어닐링처리하여 냉간성형을 하고 최종열처리를 한다.

따라서 본 연구는 열간단조후 제품을 급냉시키면 용체화처리의 효과를 얻어 재료가 경화됨으로써 절삭성이 개선될 수 있다는 이론에 근거하여 T4열처리를 대체할 수 있는 후처리방법에 대해 연구하였다. 최적의 후처리방법을 구하기 위해 열간단조후 수냉과 공냉처리를 비교분석하였고, 열간단조후 냉각처리까지 지연된 시간과 수냉과정에서의 유지시간에 따른 분석을 통해 최적의 작업조건을 설정하였다.

1. 서 론

고강도 알루미늄합금은 항공기, 자동차 및 방산부품에 대한 수요가 최근에 급증함으로 인해

이 분야의 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다. 일반적으로 고강도 알루미늄합금의 냉간 및 온간단조는 정밀정형성형(Net-shape)이 가능하나, 열간단조는 열수축 및 표면결합(찌힘, 굽힘

* (주) 풍산 (Poongsan Corp.)

** 부산대학교 항공우주공학과(Pusan National University, Dept. of Aerospace Engineering)

등) 발생으로 정밀성형이 어려운 관계로 원하는 형상을 만족시킬 수 없다. 따라서 요구하는 형상을 충족시키기 위해선 열간단조는 필연적으로 후가공(절삭가공)공정이 수반되어야 하며, 제품 정밀도 및 단가결정은 열간단조 후공정 설정에 의해 크게 의존한다.

열간단조제품의 열처리형태는 "F"상태이며 이 조건상태에서 절삭가공하게 되면 연질재료인 순수 알루미늄합금의 절삭조건과 유사하게 길고 연속적인 칩(continuous chip)이 발생하여 공구와 피삭재를 감고 회전함으로써 가공면을 손상시키거나 공구파손이 발생하여 작업자의 안전에 위험을 초래할 뿐 아니라 절삭가공때 발생하는 마찰열로 인해 공구(tip)선단에 AI입자들이 융착되는 구성인선(built-up edge)이 발생하여 가공면 표면조도 저하 및 가공중단으로 생산성을 감소시킨다.

따라서 현장에서는 이러한 문제를 개선하기 위한 목적으로 T4열처리를 추가하여 재료를 경질상태로 변환시켜 최적의 절삭조건을 형성하여 왔다. 그러나 T4열처리를 추가함에 따라 과다한 열처리 횟수(총 4회)로 인한 품질저하(Military Spec.(MIL-H-6088)에서는 열처리횟수를 2회 이하로 추천하고 있음) 공정수 과다로 인한 경제성의 문제가 대두되었다.

본 연구의 목적은 열간단조후 최적의 조건으로 급냉을 시키면 재료의 표면을 경질상태로 변환시켜 절삭성을 개선할 수 있다는 점에 착안하여 연구함으로써 불필요한 공정(T4열처리)을 배제시켜 본 제품의 경제성을 도모하고 다른 유사 제품 제조공정설정에 활용이 되고자 하였다.

연구활동을 효율적으로 수행하기 위해 관련 연구내용을 조사한 결과 국내외 유사연구내용은 발견할 수 없었으며, Ezugwu와 Wang이 Ti 합금과 Ni기지합금에 대한 절삭성을 연구하였고^[8], M. Rahman이 Inconel 718의 절삭성 개선에 대해서^[9], Hung과 Boey가 SiC 분산강화 알루미늄합금에 대한 절삭성^[10]을 연구하였다.

본 연구에 적용된 제품은 방산부품의 중간제품으로 소재는 고강도 알루미늄합금 7075를 사용하며 공정설정은 Table 1. 에 나타낸 바와 같이 열간단조후 절삭가공을 위한 T4열처리가 수반되고 내, 외경을 정삭한 후 유동성형(Flow-Forming)공정을 거쳐 최종 T6열처리 및 마무리가공함으로써 기계적성질과 제품요구형상을 만족하는 완성제품에 도달한다.

Table 1. Comparison process for Before/After improvement

No.	Before improvement	After improvement
1	Heating	→
2	Forging	→
3	Cleaning	omitted
4	★ T4 heat treatment	omitted
5	Turning of outer profile	→
6	Turning of inner profile	→
7	★ Full Annealing	★ →
8	1st Flow Forming	→
9	★ Annealing	★ →
10	2nd Flow Forming	→
11	Final finishing	→
12	★ T6 heat treatment	★ →
13	Protective coating	→

★ : process for heat treatment

2. 이론 해석

2.1 열간단조 제품 후처리 방법

알루미늄 합금 7075 재료는 열간단조를 할 때 보통 420~470℃의 온도로 가열하여 단조한다. 열간단조제품은 통상적으로 현장에서는 단조작

업후 제품을 대기조건에서 자연냉각하여 후공정을 진행시킨다. 그러나, 본 연구에서는 열간단조한 제품을 절삭성을 개선시키기 위해 자연냉각하는 대신에 급냉(수냉)처리함으로써 용체화처리 효과를 나타내게 하여 T4 열처리의 물성치에 접근시키도록 한다. 즉, 용체화 처리온도는 465℃이나 단조온도 420℃에서도 과포화 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대됨에 따라 단조후 냉(수냉)을 시켜 자연방치하면 석출경화가 이루어져 제품이 경화될 것으로 추정된다.

2.2 절삭성 평가

일반적으로 절삭성은 표면거칠기, 칩의 처리성, 공구의 수명, 절삭력등에 의해서 판단되나, 알루미늄의 절삭에서는 공구수명, 절삭력 등은 공구재료에 대한 개발기술의 발달등으로 큰 영향을 미치지 못하고, 표면의 거칠기나 연속생산이 가능한 불연속 칩의 생성이 알루미늄 제품의 절삭성을 평가하는 데 주 요소로 작용한다.

따라서, 동일 조건의 사용공구(바이트)와 작업 조건(절입량, 이송속도, 회전력) 설정하여 배출되는 칩의 형태를 분석하여 연속작업성 여부를 판단하고 표면거칠기를 측정하여 절삭성평가를 실시한다.

2.3 유한요소 해석

열간단조후 제품은 후처리방법 즉, 수냉하기 전까지의 지연시간과 입욕후 유지시간에 따른 온도변화가 제품 경도와 절삭성평가의 중요한 인자이므로 유한요소해석을 통해 제품의 온도변화과정을 관찰하였다.

급속이 냉각하는 동안의 온도분포 해석은 지배방정식, 구성방정식, 적합방정식, 그리고 경계조건 및 초기조건 등을 이용하여 해를 구해야 한다. 그러나 실제의 상태는 윤활제와 입욕방법에 따라 복잡한 거동을 하기 때문에 수학적인 정해를 구하기가 어렵다.

본 연구에서는 상용 유한요소 패키지인 ANSYS를 이용하여 수행되었으며 그 이론적 배경은 다음과 같다.

2.3.1 열전달 이론

1) Fourier 법칙(열전도 방정식)

$$\dot{q} = -K \nabla T$$

$$= -K \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

여기서, K : 열전도 계수, \dot{q} : 열유속

2) 열확산 방정식

매질내의 위치에 따른 온도분포 계산

$$\nabla(K \nabla T) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, \dot{q} 는 단위 체적당 에너지 발생율(W/m^3)

열발생은 없고 축대칭일 경우 열확산 방정식은

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(Kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

단 $c_p = \frac{K}{\rho \alpha}$ 이며,

여기서 α (m^2/s)는 열확산 계수이다.

3) 경계 조건과 초기 조건

㉠ 일정 표면 온도

$$T(0, t) = T_s \quad (4)-㉠$$

㉡ 일정표면 열 플럭스

유한 열 플럭스 및 단열 혹은 절연 표면

$$K \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \dot{q}_s \quad (4)-㉡$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = 0 \quad (4)-㉢$$

㉢ 대류 표면 조건

$$K \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h [T_\infty - T(0, t)] \quad (4)-㉣$$

여기서, h 는 대류열전달 계수이다.

2.3.2 열전달 유한요소 해석

1) 에너지 평형

Green 과 Naghdi에 의한 에너지 평형식

$$\int_V \rho \dot{U} dV = \int_S q dS + \int_V r dV \quad (5)$$

여기서, V : 체적, S : 표면적, ρ : 밀도

\dot{U} : 내부에너지 시간 변화율,

q : 열유속, r : 외부 열 공급량

내부에너지는 $U = U(\theta)$ 이다. 여기서 θ 는 온도이다.

2) 구성방정식

비열과 Fourier에 의한 열전도 방정식은 각각 아래와 같이 표현되며,

$$c(\theta) = \frac{dU}{d\theta} \quad (6)$$

$$f = -k \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (7)$$

여기서, k : 열전도 계수, $k(\theta)$
 f : 열유속, x : 좌표

3) 경계조건

- (i) 온도 : $\theta = \theta(x, t)$
- (ii) 표면 열 유속 : $q = q(x, t)$
- (iii) 단위 체적당 열유속 : $q = r(x, t)$
- (iv) 표면 대류 : $q = h(\theta - \theta_0)$
- (v) 대류 열전달 계수 : $h = h(x, t)$

3. 실험 방법

3.1 가열 및 단조

Al 7075합금, 직경 80mm, 길이 280mm인 소재를 바스켓에 담아 염욕에서 420℃로 가열하여 소재내부까지 충분히 가열되도록 120분 동안 유지시켰다. 충분히 가열된 소재를 염욕에서 꺼내 500톤 유압프레스에 설치된 금형내에 넣고 업세팅펀치를 사용하여 전방압출/업세팅을 성형하고, 연속적으로 펀치를 이동시켜 후방압출용 펀치로 후방압출을 하여 완성성형을 하였다. 이때 램 속도는 100 mm/min., 금형의 예열온도는 250℃로 유지하였다.

3.2 냉각 처리 및 시편 채취

열간단조가 끝난 제품은 Fig. 1과 같이 냉각 처리조를 이용하여 최적의 후처리조건을 설정하기 위해 Table 2와 같이 공냉(자연방치)/수냉, 냉각 지연/유지시간을 달리하는 조건으로 구성하여 실험작업을 실시하였다. 냉각처리된 제품은 Fig. 2와 같이 톱기계로 절단하여 하단부는 절삭성평가 시료로, 상단부는 각 제품의 동일한 위치에서 일부분을 채취하여 경도 및 현미경 조직관찰용 시료로 사용하였다.

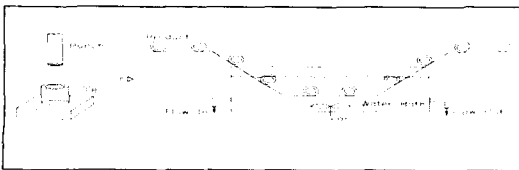


Fig. 1 A schematic diagram of cooling system

Table 2. The cooling condition on typical product

Typical product	A	B	C	D	E	F	G	H
Type of cooling	W	W	W	A	T4	W	W	W
Delay time (sec)	20	180	360	-	-	20	180	360
Holding time(sec)	10	10	10	-	-	30	30	30

W : water quenching, A : air cooling

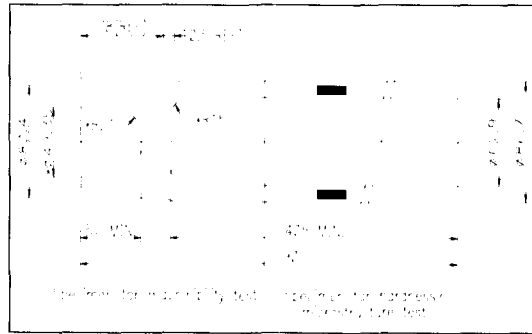


Fig. 2 A Configuration and selected specimen on product

3.3. 경도분석 및 조직관찰

열간단조의 후처리가 끝난 제품은 각 조건별 결과에 대해 정밀한 경도를 비교측정하기 위해 비커스경도계로 외부 표면에서 2mm간격으로 경도시험을 하였다. 또한 경도시험한 인접부위에 대해 Keller시약으로 부식시켜 광학현미경으로 배율 100배로 금속조직상태를 외부, 중심, 내부에 대해 관찰하였다.

3.4 절삭성 평가

절삭가공은 범용선반을 이용하여 내,외경부위를 Table 3과 같은 조건으로 가공하여 발생 칩 형태를 비교분석하고, 절삭성은 발생 칩으로 인한 연속작업의 간섭유,무로서 평가하였으며, 표면거칠기는 Surface Tester. 402 (Mitutoyo)를 이용하여 Ra(중심선 평균표면거칠기)값으로 비교분석하였다.

Table 3. The machining condition of inner/outer profile

Profile	Tool (Insert Tip)	rev. (rpm)	feed (mm/rev.)	depth of cut (mm)
Inner	DCGT 11T 304FN, K10	1,600	0.32	1.2
Outer	CNMP 120408, K10	1,600	0.32	2.0

Table 4. Result for hardness on typical product

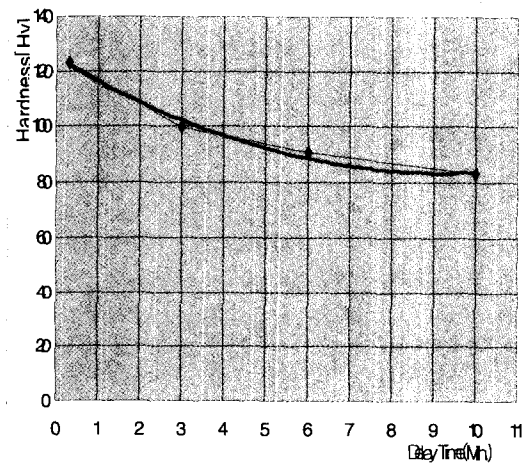
Position Type	Hardness [Hv]					
	1	2	3	4	5	6
A	123	123	123	125	127	127
B	99.8	99.2	99.5	99.4	99.4	99.3
C	90.6	90.7	90.1	91.3	93.3	92.6
D	83.2	83.5	84.1	84.7	86.4	87.5
E	138	138	138	137	136	136
F	123	122	121	122	124	126
G	103	101	99.7	99.7	100	102
H	89.4	90.7	89.1	89.3	89.3	88.8

4. 실험 결과 및 고찰

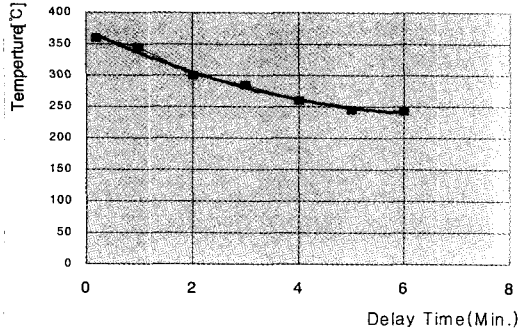
4.1 후처리 조건에 따른 경도 측정

열간단조후 후처리방법에 따른 경도분석을 실시한 결과 Table 4.와 같이 나타났으며, 수냉조건에서는 냉각 유지시간이 10초(A,B,C)일 때와 30초(F,G,H)일 때의 경도차이는 거의 없는 관계로 수냉시 입욕상태에서 10초이상만 유지되면 냉각효과는 충분한 것으로 판단된다. 또한 냉각 지연시간이 20초(A,F), 180초(B,G), 360초(C,H)일 때 경도는 각각 Hv 124, Hv 100, Hv 90로서 지연시간이 증가할수록 경도는 낮게 나타났다. 즉, 열간단조후 수냉처리할 때까지의 시간이 지연되면 제품온도 강하로 과포화정도가 낮게 형성되어 자연시효되면서 석출물이 볼륨이 적어 석출경화효과가 떨어진 것으로 판단된다.

Fig. 3은 실제 실험결과를 토대로 냉각 지연시간에 따른 제품 표면 온도변화와 경도변화를 그래프로 구성한 것이다. 냉각방법이 수냉처리한 제품(A~C, F~H)과 공냉(자연방치)한 제품(D)간의 경도를 비교해 보면, 공냉한 제품(D)의 경도는 Hv 85로서 수냉 지연시간이 20초인 제품(A,F)보다 Hv 39정도의 큰 차이를 보이고, 수냉 지연시간이 360초인 제품(C,H)보다는 Hv 5 정도의 근소한 차이를 보였다. 즉 수냉조건에서도 지연시간이 360초 이상되면 수냉의 효과없이 공냉처리의 효과정도밖에 나타낼 수 없다. 또한 수냉 지연시간이 20초인 제품(A,F)은 열간단조후 T4 열처리한 제품(E)에 비해 경도가 Hv 13정도 낮게 나타났다.



(a) The changes in hardness with delay time



(b) The changes in temperature with delay time

Fig. 3 The changes in hardness (a) and temperature (b) according to delay time on water quenching

4.2 후처리 조건에 따른 금속조직 변화

광학현미경 배율 100배로 관찰된 Fig. 4를 보

면 수냉 지연시간이 20초인 제품(A)의 조직은 T4열처리한 제품(E)의 조직과 거의 유사하며, 수냉 지연시간이 360초인 제품(C)는 자연방치한 제품(D)과 거의 동일한 조직상태를 나타내고 있다. 따라서, 수냉처리시 냉각 지연시간이 금속조직변화에 상당한 영향을 미치고 있다.

4.3 후처리 조건에 따른 절삭성 평가

Fig. 5는 각 후처리조건별 내, 외경가공할 때 발생된 칩 형태, 절삭성 및 표면거칠기 결과를 보여 주고 있다. 수냉 지연시간이 20초인 제품(A)는 T4 열처리한 제품(E)과 유사하게 내, 외경가공 부위의 칩은 칩브레이커에 의해 쉽게 전단된 형태로 발생되어 칩으로 인한 연속작업에 지장이 없으며, 표면거칠기 또한 3.2a이내로서 매끄럽게 형성되었다. 반면에 냉각 지연시간이 360초인 제품(C)와 자연방치한 제품(D)는 외경부위의 발생된 칩은 A, E제품에 비해 길게 형성되었으나, 칩이 자연낙하됨에 따라 연속작업

Type	A	B	C	D
Micro-structure				
Hardness	Hv 123	Hv 99.8	Hv 90.6	Hv 83.2
Type	E	F	G	H
Micro-structure				
Hardness	Hv 138	Hv 123	Hv 103	Hv 89.4

Fig. 4 Microstructure according to typical product(×100)

Config. of chip (Outer)					
Type	A	B	C	D	E
Machinability	Good	Good	Bad	Bad	Good
Roughness	3.2a	3.2a	6.3a	6.3a	3.2a
Config. of chip (Inner)					
Type	A	B	C	D	E
Machinability	Good	Bad	Bad	Bad	Good
Roughness	3.2a	6.3a	6.3a	6.3a	3.2a

Fig. 5 Deviation between chip, machinability and roughness on typical product

이 가능하나, 내경부위는 길게 형성된 칩으로 인해 칩배출이 되지않고 공구에 감겨 연속작업

이 불가능하였다. 가공후 형성된 표면거칠기 또한 6.3a이상으로 표면상태가 매우 나빴다.

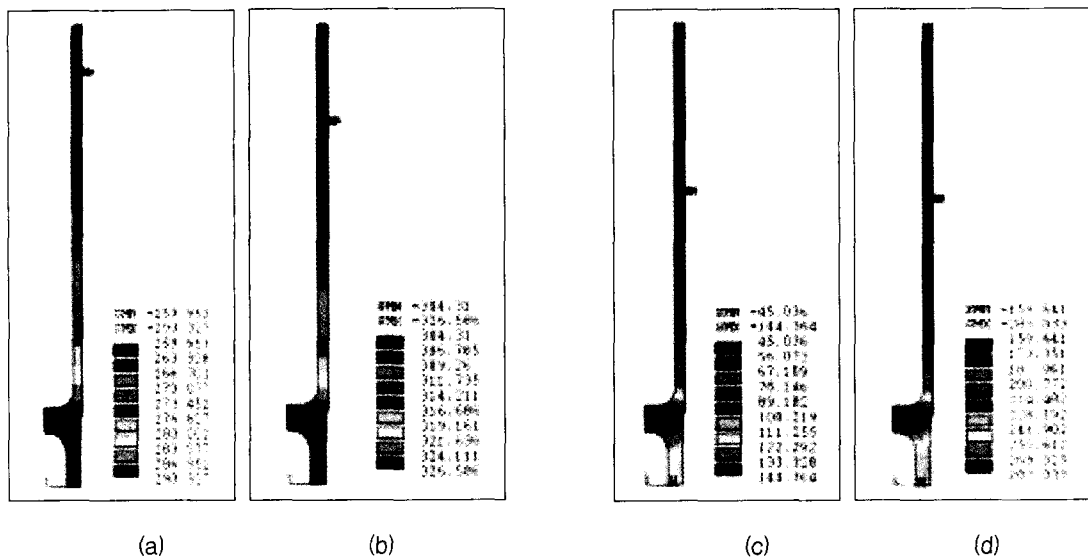


Fig. 6 distribution of temperature regarding to delay time and retain time

(a) delay time : 180 (sec)

(b) delay time : 360 (sec)

(c) holding time : 30 (sec)

(d) holding time : 10 (sec)

4.4 유한요소 해석 결과

열간단조후 수냉처리할 때까지의 지연된 시간에 따른 제품온도 분포변화와 수냉 유지시간에 따른 온도분포변화를 고찰하기 위해 유한요소 해석한 결과 Fig. 6과 같이 나타났으며, 수냉 지연시간이 180초, 360초인 경우 실린더 부위에서 측정된 실제값과이 약 10℃정도 유한요소 해석 결과보다 낮게 나타났으며, 수냉 유지시간에서는 10초 유지된 제품이 약 35℃정도 유한요소 해석결과가, 30초 유지된 제품은 약 20℃정도의 실제측정값이 크게 나타났다. 수냉 유지 시간에서의 해석결과와 실제값 차이발생은 물의 대류 열전달계수(h)가 온도변화에 따른 정확한 수치가 고려되지 않은 결과로 초래한 것으로 판단된다.

또한 수냉처리 전,후의 제품간 온도분포차이를 보면 수냉처리후의 온도분포차가 123℃, 99℃로서 수냉처리전의 분포차 31℃, 22℃보다 크게 나타나는 데, 제품두께차이로 인한 냉각속도차이로 기인한 것으로 추정된다.

5. 결 론

열간단조제품의 절삭성 개선을 위한 T-4열처리없이 절삭가공이 가능한 후처리방법을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 절삭성향상을 위한 열간단조 후 일련의 후처리 작업조건은 공냉보다는 수냉, 수냉과정에서는 열간단조후 냉각처리까지의 지연시간은 정도 및 절삭성에 주요 변수로 작용하므로 열간단조후 20초이내에 수냉처리를 하고, 수냉과정의 유지시간은 절삭성에 별영향이 없으므로 경제성을 고려 10초정도 유지한다.

(2) 공정개선으로 인한 효과는 공정수를 2개 공정 단축, 작업인원은 2명 절감등으로 제품단가를 약 15% 낮출 수 있었으며, 향후 유사 공정을 갖는 제품에 대해 이 공법을 적용하면 경

제적인 효과를 얻을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 日本 輕金屬協會, "アルミニウム 技術便覽", 카로스出版, 1985
2. ASM, "Aluminum : Properties and Physical Metallurgy", 1984
3. 전창배, 김종찬, "원심분무법으로 제조된 P/M 2011 알루미늄 압출재의 절삭성", 한국재료학회지, Vol. 8, No. 7, 1998, p.p 641~647
4. Metal Handbook Vol. "Section VII, Machining, Machining of Aluminum Alloys" 1964, p.p 180~185
5. Frank P. Incropera and David P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass transfer", Fourth Edition, Wiley, 1990
6. Gibbons and C. Robert, "Machinability and machining of metals, McGraw-Hill, 1951
7. 안 용선, " 기계재료의 절삭성에 관한 연구", 1983
8. E.O. Ezugwu and Z.M. Wang, " Titanium alloys and their machinability" Journal of Materials Processing Technology, Vol. 68, No. 3, 1997
9. M. Rahman, W.K.H. Seah and T.T. Teo, " The machinability of Inconel 718" Journal of Materials Processing Technology, Vol. 63, No. 1-3, 1997
10. N.P. Hung and F.Y.C. Boey, " Machinability of Aluminum Alloys Reinforced with Silicon Carbide Particulates " , Journal of Materials Processing Technology, Vol. 68, No. 3, 1997