

## AA6061 판재의 핫 포밍 퀴칭 공정에서 성형온도가 스프링백에 미치는 영향

심인보<sup>1</sup> · 김재홍<sup>1</sup> · 김병민<sup>#</sup>

### Effect of Forming Temperature on Spring-back in Hot Forming Quenching of AA6061 Sheet

I. B. Shim, J. H. Kim, B. M. Kim

(Received November 3, 2016 / Revised January 19, 2017 / Accepted January 20, 2017)

#### Abstract

Aluminum alloys are widely used in automotive industry because of their high strength-to-density ratio and excellent corrosion resistance. However, conventional cold stamping of aluminum alloys leads to low formability and excessive spring-back. To overcome these problems, Hot Forming Quenching (HFQ) is applied to manufacture automotive part using aluminum alloy. The purpose of this study is to investigate effect of forming temperature on spring-back in HFQ of T6 heat treated AA6061 sheet. In this study, hat shape forming test was adopted to evaluate spring-back characteristics according to various forming temperatures. In additions, the test was also performed with warm forming conditions in comparison with dimensional accuracy of HFQed part. The experimental results showed that dimensional accuracy of HFQed part was superior to warm formed part and amount of spring-back was decreased as forming temperature rise.

**Key Words** : Hot Forming Quenching(HFQ), Warm Forming, Forming Temperature, Springback, Aluminum Alloy

## 1. 서 론

전세계적으로 차체 경량화를 위해 알루미늄을 이용한 차체 부품의 제조 및 적용이 확대되고 있다. 알루미늄은 높은 비강성, 우수한 내부식성 등의 이점을 가지며, 후드와 팬더, 도어 등에 주로 적용되고 있다[1, 2]. 일반적으로 알루미늄을 이용한 차체 부품은 냉간 스탬핑 공정으로 제조되고 있으나, 낮은 성형성과 과도한 스프링백 등의 문제가 발생한다[3]. 최근 이러한 문제를 해결하기 위해 알루미늄 판재를 이용한 핫 포밍 퀴칭 공정(hot forming quenching; HFQ)이 제안되었다[4].

HFQ는 용체화처리 온도로 가열된 소재를 냉각체

널이 설치된 금형을 이용하여 성형 및 퀴칭을 동시에 진행하는 방법이다. HFQ은 열간 성형이므로 성형성 향상, 스프링백 저감, 후열처리 공정의 제거 등이 가능한 공정이다. 이에 따라 많은 연구자들에 의해 HFQ에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

Yuan 등[5]은 2A12의 HFQ에서 금형의 온도가 소재의 조직 및 물성에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과, 상형은 냉간, 하형은 450℃로 가열한 조건에서 균일한 석출로 인해 높은 기계적 물성을 갖는 것을 확인하였다. 또한, Ko 등[6]은 에릭슨 테스트(Erichsen test)와 V-bending 실험을 통해 AA6061의 HFQ과 냉간 성형 공정의 성형성 및 기계적 특성을 평가하였다. Fan 등[7]은 AA6A02의 HFQ에서 냉간

1. 부산대학교 기계공학부 정밀가공시스템 전공  
# Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

및 열간 금형을 이용하여 소재의 강화 거동에 대해 조사하였다. 그러나, 위와 같은 HFQ에 관련된 연구는 기계적 물성 및 조직학적 분석에 대한 연구가 대부분이다. 하지만 알루미늄 판재의 HFQ에서 치수 정밀도에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 알루미늄 판재의 HFQ에서 성형온도가 스프링백에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 다양한 성형 온도에서 소재의 스프링백 특성을 평가하기 위해 모자 형상(hat shape) 성형 실험을 수행하였다. 또한, 스프링백 특성을 비교하기 위하여 냉간 스탬핑 공정을 대체하기 위해 많이 적용되고 있는 온간 성형(warm forming) 공정에 대한 실험을 수행하였다. 실험 후, 목표 성형 각도와 제품의 성형 각도의 비교를 통해 스프링백을 평가하였다.

## 2. HFQ 실험 절차

### 2.1 HFQ 개요

일반적으로 알루미늄 판재를 이용한 차체 부품의 제조는 자연시효 또는 인공시효 처리된 소재에 냉간 스탬핑 공정을 적용하여 제작된다. 본 연구에서는 냉간 스탬핑 공정에서 나타나는 성형성 저하 및 후열처리에 따른 열변형을 방지하기 위한 HFQ를 적용하였으며 그 절차를 Fig. 1에 나타내었다.

HFQ에서 알루미늄 판재는 용체화 처리 온도로 가열된 후 냉각채널이 장착된 금형으로 이송되어 성형과 동시에 냉각된다. 이와 같이 HFQ은 열간 성형이기 때문에 성형 하중의 감소 및 열처리공정과 성형공정의 일체화가 가능하여 효율적으로 제품을 제조할 수 있는 공정이다. 또한, HFQ은 금형으로 소재를 냉각하여 빠른 냉각 성능을 확보할 수 있기 때문에 미세한 석출물로 강화효과를 얻어 최종 제품의 강도를 확보하는데 용이하다.

### 2.2 실험 조건

본 연구에서 사용된 소재는 T6 열처리된 AA6061 판재이며, 그 화학 조성을 Table 1에 나타내었다. 스프링백 특성 평가를 위해 사용된 판재의 크기는 L240mm×W30mm×t1.6mm이며, HFQ을 위한 모자 형상 성형 금형은 Fig. 2와 같은 형상으로 제작하였다. 금형에는 직경 10mm의 냉각채널을 17개 설치하여 각 채널 당 4L/min의 유량으로 냉각수를 순환시켰으며 실험이 진행되는 동안 지속적으로 금형을 냉각

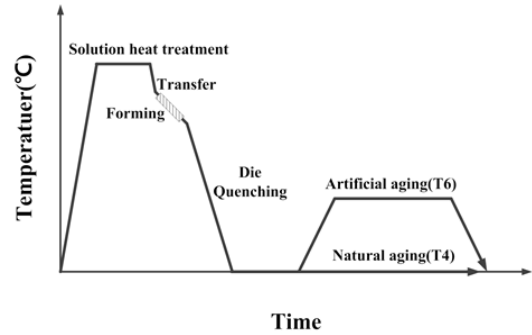


Fig. 1 Schematic diagram of HFQ [7]

Table 1 Chemical compositions of AA6061 sheet[8]

Material	Chemical compositions (wt.%)						
	Cu	Mg	Si	Mn	Fe	Cr	Al
AA6061	0.31	1.03	0.74	0.08	0.19	0.18	Bal.

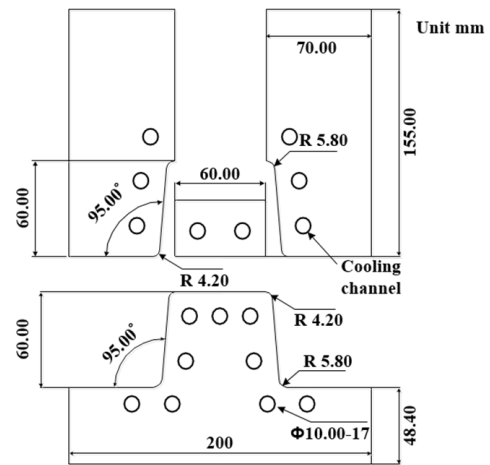


Fig. 2 Structure and dimension of hat shape forming tool set

하여 균일한 냉각속도를 확보할 수 있도록 하였다.

HFQ의 적용을 위해 알루미늄 판재는 전기를 이용하여 용체화 처리 온도인 530℃로 10분간 가열한 후, 금형으로 이송하였다. 이 때, 성형 온도에 따른 스프링백 특성 평가를 위해 소재의 온도를 측정하여 목표 온도 도달까지 공랭시킨 후 속도 20mm/s인 상형으로 성형하였다. 소재는 충분한 냉각을 위해 10초간 쿨링시킨 후 취출하여 인공시효 처리를 수행하였다. 또한, 스프링백 특성의 비교를 위해 온간 성형 조건에 대해서도 실험을 수행하였다. 이와 같이 모자 형상 성형 실험을 수행한 조건을 Table 2에 요약하였다.

Table 2 Conditions for hat shape forming test

Heat treatment	Heating temp.	Forming temp.
HFQ	530°C	400°C
	530°C	300°C
	530°C	200°C
Warm forming	250°C	200°C

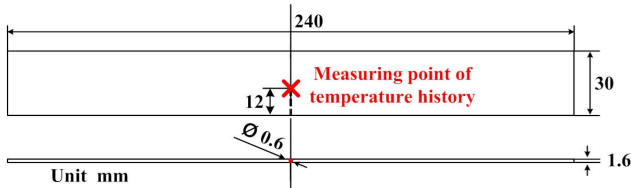


Fig. 3 Measuring points of temperature history for AA6061 sheet in HFQ

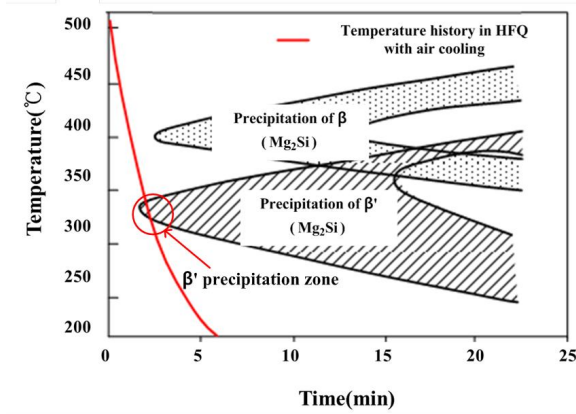


Fig. 4 Temperature history in HFQ with air cooling and C-curve for AA6061 sheet

### 2.3 온도 이력 측정

열간 성형 공정에서 알루미늄 소재의 냉각속도가 저하되게 되면 조대한 석출물이 생성되어 시효로 인한 석출경화 효과를 얻을 수 없다. 이에 따라, 스프링백 평가에 앞서 AA6061 판재의 온도 이력을 측정하였다. 온도 이력은 Fig. 3과 같이 시험편을 가공하고 K-type 열전대를 삽입하여 측정하였다. Fig. 4에 HFQ 조건으로 소재를 530°C에서 200°C로 공랭시킨 시험편의 온도 이력과 AA6061의 C-curve를 함께 나타내었다[9]. 이와 같이 성형 온도 350°C 이하에서 성형이 될 경우,  $\beta'$  석출이 예상되어 이송과정에서 추가의 냉각장치가 필요한 것으로 판단되었다.

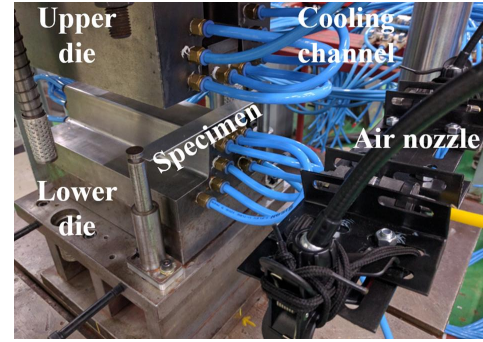


Fig. 5 Hat shape forming tool set with air quenching device

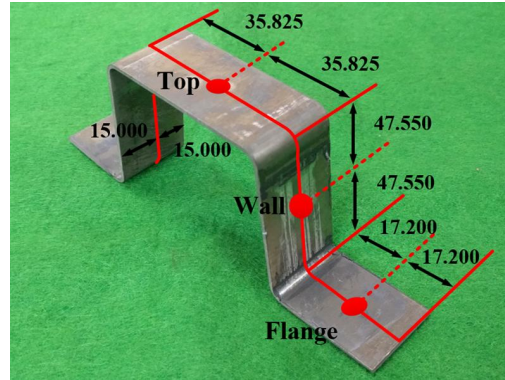


Fig. 6 Measuring points of hardness and microstructure observation

본 연구에서는 소재의 조대한 석출물의 생성을 방지하기 위하여 Fig. 5와 같이 모자 형상 성형 금형에 공기 퀴칭 장치를 장착하였다. 정확한 성형온도의 설정을 위해, 공기 퀴칭 중 소재에 K-type 열전대를 삽입하여 냉각 이력을 측정하였으며 측정 결과를 기반으로 하여 성형 시작 시점을 결정하였다. 이 때, 소재의 냉각 속도는 400°C 조건에서 23.72°C/s, 300°C 조건에서 18.81°C/s, 그리고 200°C 성형 조건에서는 10.51°C/s로 측정되었다. 일반적으로 알루미늄 소재는 10°C/s 이하의 냉각 속도에서 조대한 석출물이 생성되기 때문에 공기 퀴칭 장치를 이용한 모자 형상 성형 시험편은 석출경화 효과를 기대할 수 있었다[10].

## 3. HFQ 실험 결과

### 3.1 경도 측정 및 조직 분석

본 연구에서는 제작된 시험편의 석출경화 효과를 확인하기 위하여 경도 측정 및 조직 분석을 수행하였으며 측정 위치를 Fig. 6에 나타내었다.

**Table 3 Results of hardness measurement**

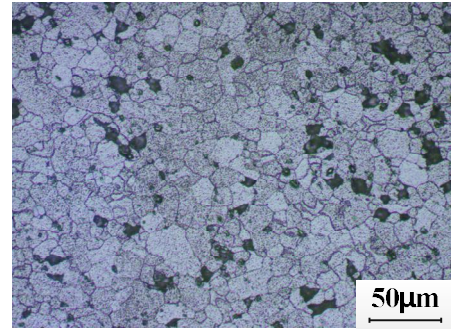
Heat treatment	Forming temp.	Hardness(Hv)		
		Top	Wall	Flange
HFQ	400 °C	108.3	107.6	107.8
	300 °C	110.3	108.4	108.8
	200 °C	109.8	107.4	107.4
Recieved	-	> 107		

**Table 4 Results of grain size measurement**

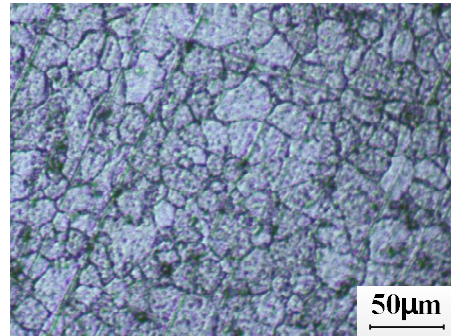
Heat treatment	Forming temp.	Grain size (μm)		
		Top	Wall	Flange
HFQ	400 °C	30.33	32.13	31.17
	300 °C	32.62	33.98	33.02
	200 °C	35.51	36.37	35.95
Recieved	-	30 ~ 50		

경도 측정은 0.5kgf의 시험 하중을 부여해 비커스 경도를 측정하였으며 각 평가 지점에 대해 5회 측정된 결과의 평균을 Table 3에 요약하여 나타내었다. 평가 지점 중, 상단부의 경도가 미소하게 높은 것은 패드에 의해 가장 먼저 냉각되기 때문이며 측벽부의 경도가 미소하게 낮은 것은 금형과 소재의 접촉 압력이 낮아 원활한 열전달이 일어나지 않았기 때문으로 판단된다. 하지만 시험편의 경도는 모든 평가 지점에서 107Hv 이상으로 초기 T6열처리된 AA6061 초기 판재보다 높기 때문에 석출경화 효과가 나타난 것으로 예상된다.

HFQ 공정의 성형 온도가 AA6061 판재의 결정립 크기에 미치는 영향을 알아보기 위해 광학현미경을 이용하여 미세조직을 관찰하였다. 미세조직은 Keller 에칭법을 적용한 시험편을 200배의 배율로 관찰하였으며 Intercept method를 이용하여 결정립의 크기를 측정하였다[11, 12]. 측정위치는 경도측정 위치와 동일하게 적용하였으며, Fig. 7에 모재와 HFQ 200 °C 성형 조건의 상단부 측정 결과를 대표적으로 나타내었다. 또한, 각 평가지점에 대한 결정립 크기 측정 결과를 Table 4에 요약하여 나타내었다. 일반적으로 T6 열처리된 AA6061 판재의 결정립 크기는 30μm에서 50μm로 나타나기 때문에 HFQ 조건에서 성형된 소재는 T6 열처리된 AA6061 초기 소재와 유사한 물성을 가질 것으로 판단된다.



(a) Received



(b) HFQ, 200 °C

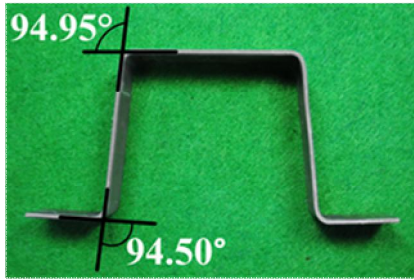
**Fig. 7 Microstructure for grain size measurement**

이와 같이 경도 및 결정립 크기를 측정된 결과, 빠른 냉각 속도에 의한 석출경화 효과가 나타나 물성의 저하가 발생하지 않을 것으로 판단되었기 때문에 공기 쿨칭을 이용한 HFQ 실험의 적합성을 확인하였다.

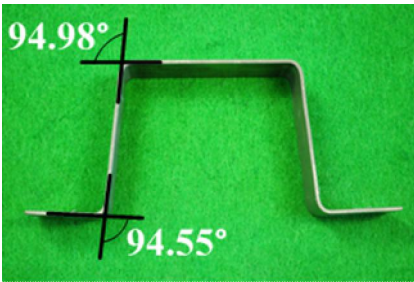
### 3.2 스프링백량 측정 및 분석

Hat shape 성형으로 제작된 시험편의 성형온도에 따른 스프링백 발생량을 측정하였다. 성형 및 열처리가 완료된 시험편은 3차원 스캐너를 이용하여 형상을 측정하였으며, 정량적인 스프링백 량의 비교를 위해 NUMISHEET '93 벤치마크 문제에서 정의한 스프링백 표기방법을 활용하였다[13].

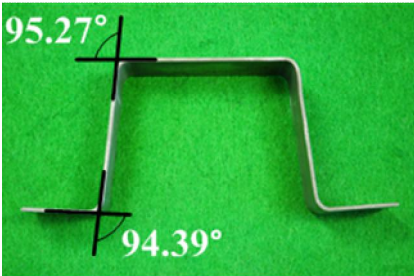
Fig. 8은 성형 온도에 따른 HFQ 조건의 시험편을 나타내었다. HFQ 조건에서 인공시효 처리가 치수 변화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 열처리 유무에 따른 굽힘각도를 측정하였다. 그 결과, Fig. 7(a), (b)와 같이 열처리에 의한 변형량은 0.05°미만으로 나타나 소재를 175 °C의 가열 온도에서 장시간 유지하는 인공시효 처리 과정이 제품의 치수정밀도에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단되었다.



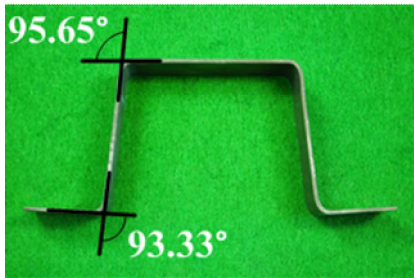
(a) HFQ condition with forming temp. 400°C (before artificial aging)



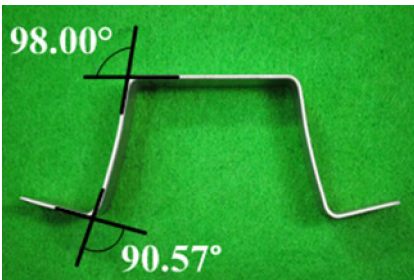
(b) HFQ condition with forming temp. 400°C



(c) HFQ condition with forming temp. 300°C



(d) HFQ condition with forming temp. 200°C



(e) Warm forming

Fig. 8 Results of hat shape forming test

Table 5 Results of thickness measurement

Heat treatment	Forming temp.	thickness (mm)		
		Top	Wall	Flange
HFQ	400°C	1.570	1.572	1.570
	300°C	1.572	1.574	1.572
	200°C	1.576	1.575	1.573
Recieved	-	1.578		

Fig. 7(b)와 같이 성형 온도가 가장 높은 400°C 조건에서 상단부의 굽힘각도는 94.98°, 하단부의 굽힘각도는 94.55°로 측정되었다. 모자 형상 금형의 목표 굽힘각도가 95°인 것을 감안하면 스프링백이 거의 발생하지 않아 우수한 치수 정밀도를 가지는 것으로 나타났다. 반면에, Fig. 7(d)와 같이 성형 온도가 가장 낮은 200°C 조건에서 하단부의 스프링백 발생량은 1.78°로 비교적 많은 양의 스프링백이 발생하였다. 이와 같이, HFQ 조건에서 성형 온도의 감소에 따라 스프링백의 발생량은 증가하여 치수정밀도가 저하되는 것으로 나타났다. 이는 성형 온도의 감소에 따라 항복강도 및 유동응력이 증가하여 스프링백의 발생량이 증가된 것으로 판단된다.

그리고, 각 조건에 따른 시편의 두께를 측정하여 Table 5에 나타내었다. 본 연구에서 적용한 모자 형상의 경우, 형상이 간단하여 변형량이 적고, 곡률부에만 인장 응력이 발생하기 때문에 두께 감소가 크지 않은 것으로 판단된다.

또한, 스프링백 특성을 비교하기 위하여 냉간 스템핑 공정을 대체하기 위해 많이 적용되고 있는 온간 성형 조건에 대한 실험 결과를 Fig. 10(e)에 나타내었다. 상단부의 굽힘각도는 98.00°, 하단부의 굽힘각도는 90.57°로 측정되었으며 HFQ 조건에 비해 스프링백이 크게 발생한 것을 확인할 수 있다. 200°C로 동일한 성형 온도 조건인 HFQ과 온간 성형을 비교할 경우에도 스프링백 발생량은 2배 이상으로 크게 발생하는 것으로 나타났다. HFQ 조건의 경우, 용체화처리한 시험편으로 성형이 이루어지기 때문에 소재 내부의 미세 석출물에 의한 석출경화 효과가 제거된 상태이다. 반면에 온간 성형의 경우, 가열 온도가 250°C이기 때문에 소재 내부의 미세 석출물이 존재하여 온도 상승에 의한 항복응력 및 유동응력 저하에 따른 스프링백 저감 효과만 기대할 수 있다.

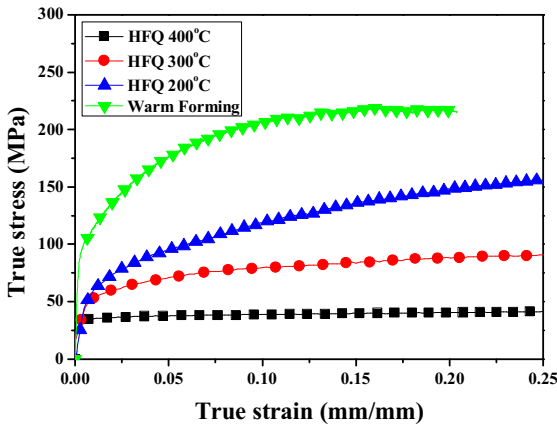


Fig. 9 Results of tensile test

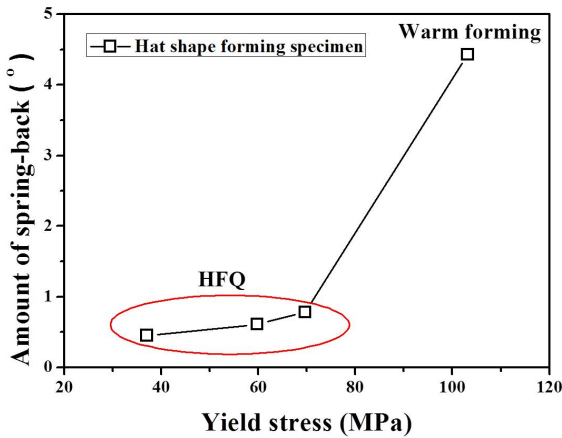


Fig.10 Relationship between yield stress and amount of spring-back with HFQ and warm forming conditions

열처리 및 성형 온도에 따른 스프링백 발생량과 항복응력의 관계를 조사하기 위하여 AA6061 판재의 고온 인장 시험을 수행하였다. 인장 시험은 Table 2에 요약된 모자 형상 성형 실험과 동일한 온도 조건을 적용하였다. 인장 시험편은 ASTM E8M 규격을 참고하여 비례 축소 시편 형상으로 가공하였으며 변형률 속도는 0.1/s로 설정하였다. Fig. 9에 인장 시험 결과를 나타내었으며, Fig. 10에 항복응력과 모자 형상 시험편의 하단부 스프링백 발생량의 관계를 도시하였다. HFQ 조건에서는 성형 온도가 감소함에 따라 항복응력이 미약하게 증가하였으며 스프링백량도 크게 발생하였다. 또한, 온간성형 조건의 경우에는 석출경화 효과가 존재하기 때문에 항복응력이 크게 나타났으며 이에 따라 스프링백량도 증가하는 것으로 판단된다.

따라서 HFQ를 적용하여 알루미늄 부품을 제조할 경우, 일반적으로 적용되는 공법인 냉간 및 온간 성형에 비해 우수한 치수정밀도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 용체화처리 및 높은 성형 온도에 따른 성형력 저감 및 금형 수명의 증가, 성형성 증가, 열처리공정과 성형공정의 일체화에 따른 효율적인 제조 공정 설계가 가능할 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 AA6061 판재의 HFQ에서 성형온도가 스프링백 발생량에 미치는 영향에 대해 조사하기 위해 모자 형상 성형 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 성형 온도에 따른 HFQ 시, 냉각 속도 감소에 따른 물성 저하가 우려되어 공기 퀴칭 장치가 장착된 모자 형상 성형 금형을 제작하였다. 이 때, 소재의 냉각 속도는 10°C/s를 초과하여 인공시효 효과를 기대할 수 있었다.

(2) 공기 퀴칭 장치가 장착된 HFQ 시험 시, 시험편의 경도 및 미세 조직의 크기가 T6 열처리된 AA6061 초기 판재와 유사하였으므로 석출 경화 효과가 나타났을 것으로 판단되었다.

(3) 성형 온도에 따른 스프링백 발생량 측정 시, 성형 온도가 증가할수록 치수정밀도가 우수한 것으로 나타났다. 또한, 온간 성형과 HFQ의 비교 시, 온간 성형된 제품의 스프링백 발생량이 2배 이상 크게 나타났다.

(4) 스프링백의 발생량은 항복응력이 증가함에 따라 커지는 것으로 나타났으며, HFQ 과정에서 용체화 처리에 의한 석출경화 효과의 제거는 항복응력 및 유동응력 저하에 효과적이다.

(5) HFQ를 적용하여 알루미늄 부품을 제조할 경우, 일반적으로 적용되는 공법인 냉간 및 온간 성형에 비해 우수한 치수정밀도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012R1A5A1048294).

## REFERENCES

- [1] X. B. Fan, Z. B. He, S. J. Yuan, P. Lin, 2013, Investigation on Strengthening of 6A02 Aluminum Alloy Sheet in Hot Forming-quenching Integrated Process with Warm Forming-dies, *Mater. Sci. Eng., A*, Vol. 587, pp.221~227.
- [2] M. S. Mohamed, A. D. Forster, J. Lin, D. S. Balint, T. A. Dean, 2012, Investigation of Deformation and Failure Features in Hot Stamping of AA6082: Experimentation and Modeling, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 53, No. 1, pp. 27~38.
- [3] C. I. Kim, S. H. Yang, Y. S. Kim, 2012, Prediction of Formability of Aluminum Alloy 5454 Sheet, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 2, pp. 179~186.
- [4] J. Lin, T. A. Dean, R. Garrett, 2008, A Process in Forming High Strength and Complex-shaped Al-alloy Sheet Components, UK Patent WO2008059242.
- [5] S. J. Yuan, X. B. Fan, Z. B. He, 2014, Hot Forming-quenching Integrated Process with Cold-hot Dies for 2A12 Aluminum Alloy Sheet, *Procedia Eng.*, Vol. 81, pp. 1780~1785
- [6] D. H. Ko, J. H. Kim, C. J. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim, 2013, Evaluation of Formability and Mechanical Characteristic for Hot Forming Quenching in Sheet Forming of Al6061 Alloy, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 4, pp. 483~490.
- [7] X. Fan, Z. He, K. Zheng, S. Yuan, 2015, Strengthening Behavior of Al-Cu-Mg Alloy Sheet in Hot Forming-quenching Integrated Process with Cold-hot Dies, *Mater. Des.*, Vol. 83, pp. 557~565.
- [8] D. H. Ko, 2015, A Methodology to Predict the Hardness using Quenching Factor Analysis in Heat Treating and Forming of Quenchable Metals, Ph. D. Thesis, Pusan National University, p. 42.
- [9] T. Sheppard, 1999, Extrusion of Aluminum Alloys, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- [10] B. C. Shang, Z. M. Yin, G. Wang, B. Liu, Z. Q. Huang, 2011, Investigation of Quench Sensitivity and Transformation Kinetics during Isothermal Treatment in 6082 Aluminum Alloy, *Mater. Des.*, Vol. 32, pp. 3818~3822.
- [11] ASTM E112-12 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.
- [12] ASM Handbook Vol. 9, Metallography and Microstructures.
- [13] C. Gomes, O. Onipede, M. Lovell, 2005, Investigation of Springback in High Strength Anisotropic Steels, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 159, No. 1, pp. 91~98.
- [14] ASTM E8M-90a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.