

A16061 판재성형에서 핫 포밍 퀘칭의 성형성 및 기계적 특성 평가

고대훈* · 김재홍* · 이찬주** · 고대철*** · 김병민****†

* 부산대학교 정밀가공시스템, ** 부산대학교 IFAM 국제공동연구소, *** 부산대학교 부품소재산업협력연구소, **** 부산대학교 기계공학부

Evaluation of Formability and Mechanical Characteristic for Hot Forming Quenching in Sheet Forming of Al6061 Alloy

Dae Hoon Ko*, Jae Hong Kim*, Chan Joo Lee**, Dae Cheol Ko*** and Byung Min Kim****†

* Precision Manufacturing System Division, Pusan Nat'l Univ.,
** Dongnam Regional Division, Korea Institute of Industrial Technology,
*** Industrial Liaison Innovation Center, Pusan Nat'l Univ.,
**** Dept. of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received August 22, 2012 ; Revised December 4, 2012 ; Accepted December 5, 2012)

Key Words: Hot Forming Quenching(핫 포밍 퀘칭), Solid Solution Heat Treatment(용체화처리), Erichsen Test(에릭슨 시험), V-bending Test(V형 굽힘 시험), Formability(성형성)

초록: 알루미늄 소재의 냉간 판재성형에서는 낮은 성형성과 성형 후 과도한 스프링백에 의한 치수정밀도가 저감되는 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 기존 제조공법의 문제점을 개선하기 위해 새로운 제조공법인 Hot forming quenching(HFQ)을 제시하고자 한다. HFQ은 용체화처리 온도로 가열된 알루미늄 판재를 열간성형하고, 다이 내에 설치된 냉각채널에 의해 퀘칭하여 열간성형과 열처리를 동시에 함으로써 성형성 향상, 스프링백 저감 효과를 얻을 수 있다. 기존의 냉간성형 대비 HFQ의 성형성 향상효과를 에릭슨 시험을 통해 평가하였다. 스프링백 특성을 파악하기 위해 V-beding 시험에 HFQ를 적용하여 굽힘 성형된 제품의 치수정밀도를 기존의 냉간성형과 비교하였다. 또한 강도 및 경도를 측정하여 기존 냉간성형에 의한 값들과 비교함으로써 알루미늄 제품 성형에 HFQ을 적용하기 위한 타당성을 평가하였다.

Abstract: In aluminum sheet metal forming, the conventional forming methods of T4 or T6 heat-treated sheets result in low formability and dimensional accuracy. This study suggests a new forming method for aluminum sheets called as hot forming quenching (HFQ) that solves the problems faced in the conventional method. HFQ combines the heat treatment and forming processes through the forming die during the quenching of a solid solution. To evaluate the application of HFQ to the sheet forming of aluminum, an Erichsen and V-bending test are performed in this study to measure the dimensional accuracy and formability, which are then compared with those of the conventional forming method. Furthermore, the strength and hardness of the products formed by HFQ are measured to confirm the degradation in mechanical properties compared with the conventional forming method, which shows the validity of the application of HFQ to aluminum sheet metal forming.

1. 서론

최근 차량 경량화를 위해 마그네슘 및 알루미늄 등의 비철금속재료를 적용한 차체부품 제조가 대두되고 있다.^(1~3) 특히 대표적인 경량 소재인 알루

미늄은 5XXX(Al-Si)와 6XXX(Al-Mg-Si) 계열의 합금이 후드, 펜더 및 도어 등의 차체부품으로 주로 적용되고 있으며, 이는 냉간 스탬핑(Stamping) 등의 판재성형으로 제조되고 있다.^(4,5) 또한 알루미늄 차체부품의 강도확보를 위해 T4 혹은 T6 열처리된 판재를 일반적으로 성형한다.⁽⁶⁾

알루미늄 판재의 성형성은 냉연강판에 비해 국부 연신율이 매우 낮아 복잡한 형상을 가지는 제품들 성형하는 스탬핑 시 매우 불리하다. 일반적

† Corresponding Author, bmkim@pusan.ac.kr
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

으로 알루미늄 합금의 냉간 스탬핑 성형성은 냉연 강판의 60~70% 정도로 보고되고 있다.⁽⁸⁾ 특히, T6 처리된 6XXX 계열의 알루미늄 합금의 경우, 열처리로 향상된 제품강도 때문에 매우 낮은 성형성과 스프링백(Springback)으로 제품 치수정밀도가 저하되는 치명적인 문제가 발생된다.^(5,7) 따라서 성형성 향상이라는 주된 목적과 더불어 스프링백 저감을 위해 최근까지 알루미늄 판재의 온간성형(Warm forming)이 많이 적용되고 있다.⁽⁹⁻¹³⁾

알루미늄 온간성형은 소재와 다이의 어닐링(Annealing) 온도 부근인 약 300°C까지 가열한 후에 성형하는 것으로 성형성과 치수정밀도 향상은 가능하나, 어닐링 열처리 효과로 인해 성형된 제품의 강도가 저하될 수 있다.⁽¹¹⁾ Daoming 등⁽¹²⁾이 A15754 와 A15182 소재에 대하여 펀치 및 다이의 온도에 따라 드로잉성(Drawability)을 평가한 결과, 소재의 온도가 200°C에서는 강도 및 연신율의 변화가 없었지만 350°C에서는 연신율은 증가하는 반면 강도가 현저하게 저하되었다. 또한 Wang 등⁽¹³⁾의 연구결과에서는 T6 열처리된 Al7075 합금을 약 200~250°C의 온간에서 딥 드로잉(Deep drawing) 성형한 결과, 성형성은 약 45% 향상되었으나 제품강도가 약 25% 저하되는 것으로 나타났다. 따라서 성형성 및 치수정밀도 향상과 더불어 제품강도를 확보할 수 있는 제조공법이 필요하다.

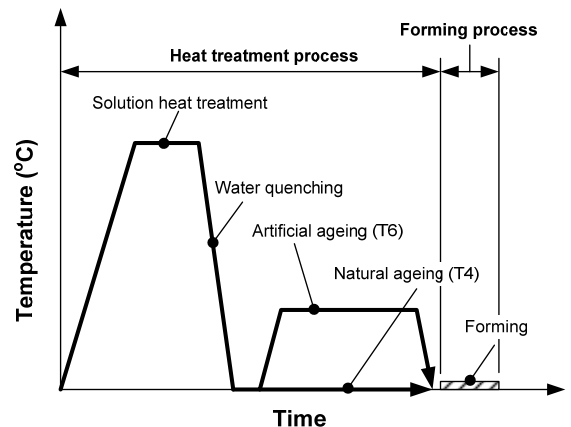
본 연구에서는 기존의 알루미늄 판재성형에서 발생하는 문제를 해결하기 위해 새로운 방법인 핫포밍 퀴칭(Hot forming quenching, HFQ)을 소개하고자 한다. HFQ 은 용체화처리 온도로 가열된 소재를 열간성형한 후에 제품 강도 확보를 위해 다이 내에 설치된 냉각채널을 이용하여 퀴칭하는 방법이다. HFQ 는 열간성형이므로 알루미늄 소재의 성형성 향상 및 스프링백 저감과 다이냉각으로 제품 강도를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

따라서 알루미늄 판재성형에 HFQ 의 적용성 및 그 타당성을 확보하기 위해 다양한 평가항목들에 대한 기초실험을 수행하여 기존의 냉간성형 공정과 비교해 보았다. 우선 기존의 냉간성형 대비 HFQ 의 성형성 향상여부를 판단하기 위해 에릭슨 시험(Erichsen test)을 수행하였다. 시험방법은 판재에 네킹(Necking)이 발생하여 파단까지 도달하는 높이 즉, 한계 돔 높이(Limit dome height, LDH)를 측정하여 비교하였다. 그리고 적용성 평가를 위해 HFQ 을 V-bending 공정에 적용하여 굽힘 성형된 제품의 스프링백을 측정하여 치수정밀도를 비교하였다. 또한 최종 제품의 기계적 물성에 직접적인

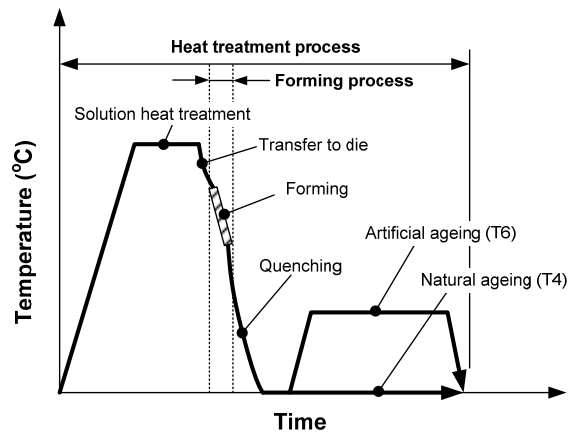
영향을 미치는 용체화처리 시 판재의 냉각속도를 측정하고, 인장과 경도시험을 수행하여 기존의 냉간성형 공정과 비교함으로써 HFQ 된 최종제품의 기계적 물성을 평가하였다.

2. Hot Forming Quenching 개요

일반적으로 알루미늄 차체부품은 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 T4 또는 T6 열처리된 판재를 스탬핑 등의 냉간성형으로 제조한다. 강도향상을 위한 알루미늄 열처리는 용체화처리와 인공 혹은 자연시효로 구성되며 용체화처리 후 상온에서 그대로 방치하는 것은 자연시효(Natural ageing)로써 T4 열처리, 그리고 약 150~200°C에서 장시간 유지하는 것은 인공시효(Artificial ageing)로써 T6 열처리라고 한다. 또한 알루미늄의 재질에 따라 용체화처리는 약 450~550°C에서 1~2hr 유지한 뒤, 퀴칭하며 이때의 냉각매체는 일반적으로 상온의 물이 적용된다.



(a) Conventional forming procedure



(b) HFQ procedure

Fig. 1 Comparison of conventional forming and HFQ procedure for aluminum sheet

하지만 본 연구에서 제시하는 HFQ 은 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 용체화처리 온도로 가열된 알루미늄 판재가 상온의 물이 아닌 다이로 냉각하고 동시에 성형한다. 따라서 HFQ 은 열간성형이기 때문에 냉간성형에서 발생하는 성형성 및 과도한 스프링백으로 인한 치수정밀도 저하 문제를 개선할 수 있는 장점 외에 성형하중의 감소 및 열처리 공정과 성형공정의 일체화로 공정 수를 단축할 수 있다.

Fig. 2에 6XXX(Al-Mg-Si)계열 알루미늄 합금의 C-curve를 나타내었다.⁽¹⁴⁾ 500°C 이상의 고온에서 Mg 및 Si 등의 불순 용질(Solute) 원소들이 고용된 고용체를 매우 빠르게 냉각하게 되면 용질원소들의 석출되는 과정 없이 과포화고용체(Super saturated solid solution)로 형성되어 인공 및 자연시효과정에서 생성되는 미세한 석출물로 강화효과를 얻을 수 있다.^(15,16) 반면에 느린 냉각속도에서는 냉각 시, 조대한 석출물이 생성되어 시효로 인한 석출강화 효과를 얻을 수 없다. 따라서 용체화처리의 냉각속도는 최종 제품의 강도를 결정하는 데에 매우 중요한 요소이다.^(17,18)

다이로 소재를 냉각하는 HFQ의 경우도 용체화처리 후의 냉각속도가 매우 중요하다. 본 연구에서 목표로 하는 HFQ으로 제조된 제품강도는 일반적인 상온의 물로 냉각하여 결정되는 강도와 비교하였을 때 현저한 강도저하 없이 동일 수준으로 유지하는 것이다. 따라서 실질적인 HFQ에서는 알루미늄 판재의 냉각성능 향상을 위해 다이 내부에 냉각채널(Cooling channel)을 설치하여 판재와의 열전달로 가열된 다이의 지속적인 냉각이 필요할 것으로 판단된다.

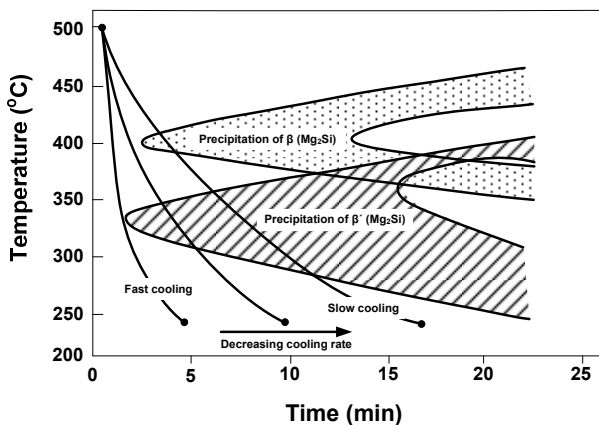


Fig. 2 Schematic C-curve of 6XXX(Al-Mg-Si) for Mg₂Si precipitation⁽¹⁴⁾

3. HFQ의 성형성 평가

기존 판재성형 대비 HFQ의 성형성 향상 여부를 에릭슨 시험을 통해 평가하였다. 시험은 ASTM E643-09에 의거하여 수행되었으며,⁽¹⁹⁾ 시험에 사용된 알루미늄 재질은 Al6061이며, 크기는 L60mm X W60mm X t2mm로 정사각형 판재가 사용되었다. Fig. 3에 에릭슨 시험에 사용된 펀치, 홀더 및 다이의 구조 및 그 치수를 나타내었으며, 그리고 시험 수행을 위해 구성된 장비들을 Fig. 4에 나타내었다.

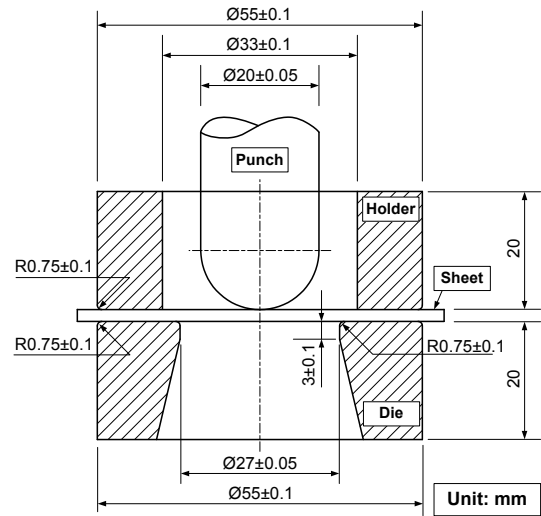
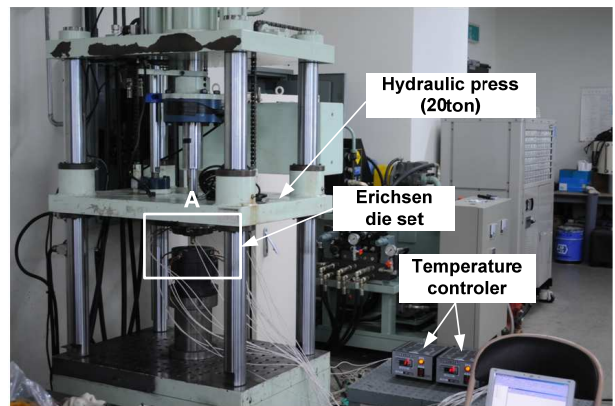
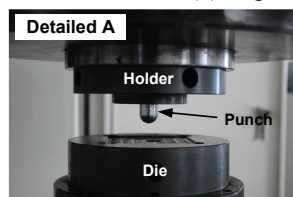


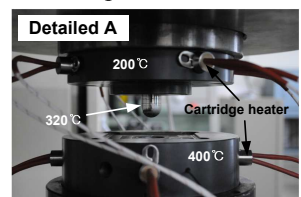
Fig. 3 Structure and dimension of Erichsen die set



(a) Experimental setup



(b) Cold Erichsen (T4, T6)



(c) Hot Erichsen (HFQ)

Fig. 4 Experimental setup of cold and hot Erichsen test for Al6061 sheets

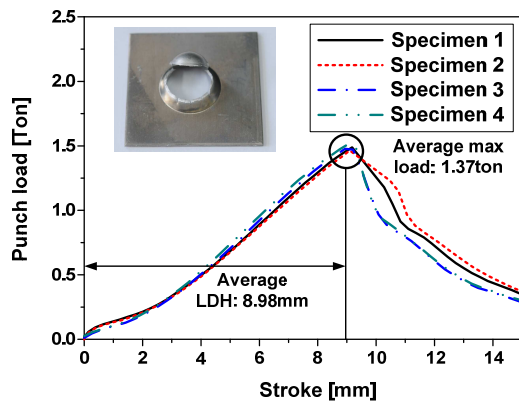
T4 및 T6 열처리된 판재는 냉간에서 에릭슨 시험을 수행한 반면 HFQ는 판재 및 다이를 가열하여 열간에서 시험을 수행하였다. 판재는 일반적인 Al6061의 용체화처리 온도인 530°C까지 가열하였으며, 그리고 Fig. 4(c)에 나타낸 바와 같이 총 9개의 카트리지 히터(Cartridge heater)를 삽입하여 펀치는 320°C, 홀더는 200°C, 다이는 400°C까지 각각 가열한 후에 HFQ 성형성을 평가하였다.

시험 결과의 재현성 확인을 위해 열처리 조건에 따라 각각 4회의 실험을 반복하여 수행하였으며, 홀더력(Holder force)은 모든 조건에서 1.2ton으로 동일하게 가압하였다. 시험은 Al6061 판재가 파단이 발생할 때까지 진행하였으며, 이송거리(Stroke)에 따라 펀치에 걸리는 하중을 측정하였다. 그리고 성형성 평가는 네킹이 발생하여 펀치에 걸리는 하중이 감소하는 시점 즉, 최대 하중이 걸리는 시점에 상응하는 그 이송거리를 LDH(Limit dome height)로 판단하고 각 조건에 따라 비교하였다.

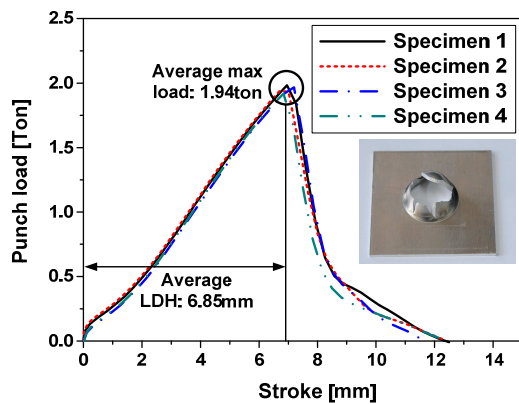
Fig. 5는 열처리 조건에 따른 에릭슨 시험 결과로써 펀치의 이송거리에 따른 펀치에 걸리는 하중으로 나타내었다. 실험결과, 강도가 가장 높은 T6 열처리된 판재의 LDH가 평균 6.85mm로 가장 낮은 성형성을 나타내었으며, 평균 성형하중 또한 1.94ton으로 가장 높았다. 반면에 HFQ의 LDH와 성형하중은 각각 10.53mm와 0.52ton으로 나타났다. 따라서 에릭슨 시험 결과로부터 HFQ는 T4 및 T6 열처리된 판재보다 각각 17.3%, 53.7%의 성형성 향상이 가능하였으며, 성형하중은 62.0%, 73.2% 각각 저감되었다. 따라서 알루미늄 판재성형에 HFQ의 적용은 기존의 냉간성형보다 낮은 성형하중과 높은 성형성 확보가 가능할 것으로 판단되었다.

4. HFQ의 적용성 평가

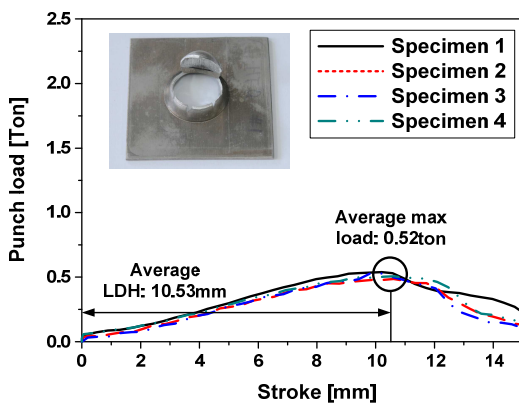
본 연구에서 제시한 HFQ는 V-bending 시험을 수행하여 그 적용성을 평가하였다. 이에 굽힘성형된 제품의 치수정밀도, 판재의 냉각속도, 강도 및 경도를 측정하여 기존의 냉간성형과 비교하였다. 평가를 위한 열처리 조건은 T4와 T6의 기존 공정과 HFQ 후에 각각 자연시효(HFQ(T4)) 및 인공시효(HFQ(T6))한 총 4가지 조건으로 고려하였으며, 그 열처리 조건들을 Table 1에 요약하였다.



(a) Al6061-T4



(b) Al6061-T6



(c) Al6061-HFQ

Fig. 5 Results of Erichsen test for punch load and stroke according to heat treatment conditions

Table 1 Conditions of heat treatments for Al6061 alloy

Heat treatment	Solid solution			Ageing	
	Temp. (°C)	Time (hr)	Quenching method	Temp. (°C)	Time (hr)
Conventional T4	530	2	Water(20°C)	RT	72
Conventional T6	530	2	Water(20°C)	175	9
HFQ(T4)	530	2	Die	RT	72
HFQ(T6)	530	2	Die	175	9

4.1 치수정밀도 평가

치수정밀도 평가에 사용된 Al6061 판재의 크기는 L200mm X W50mm X t2mm 이며, 특히 HFQ 을 위해 냉각채널이 설치된 V-bending 다이를 Fig. 6 과 같이 제작하였다. 냉각채널의 직경은 12mm 이며, 다이의 상형과 하형에 각각 5 개의 냉각채널이 설치되어 있다. 또한 냉각수는 각 채널 당 4L/min 의 유량으로 실험이 진행되는 동안 지속적으로 다이를 냉각한다. 일반적인 T4 와 T6 열처리 조건 의 경우 열처리가 완료된 판재를 냉간에서 성형한 반면 HFQ 조건은 용체화처리 온도인 530℃까지 가열된 판재를 즉시 V-bending 다이로 이송하고 성형한 뒤에 각각 자연 및 인공시효 하였다. 각 조건에 따라 열처리와 성형이 완료된 Al6061 판재의 굽힘각도를 측정하였으며, 각각 총 5 회의 굽힘시험을 수행하여 그 평균 값으로 굽힘각도를 비교하였다.

Fig. 7 에 열처리 조건들에 따라 V-bending 시험을 수행한 결과를 나타내었다. 강도가 가장 높게 나타나는 T6 열처리된 판재의 굽힘각도는 92.6°로 나타났으며 V-bending 다이의 굽힘각도가 90°인 점을 감안하면 약 2.6°의 스프링백이 발생되었다. 그리고 T4 열처리된 판재 또한 91.2°의 굽힘각도로 1.2°의 비교적 높은 스프링백이 발생되었다. 반면에 HFQ 는 굽힘각도가 90.4°로 스프링백이 거의 발생하지 않았으며, T4 혹은 T6 열처리된 판재보다 우수한 치수정밀도를 가지는 것으로 나타났다. 또한 동일하게 HFQ 을 적용한 후에 각각 자연시효와 인공시효한 판재의 굽힘각도는 모두 90.4°로 나타났다. 따라서 판재를 175℃까지 가열하여 장시간 유지하는 인공시효 처리 과정이 제품의 치수정밀도에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단

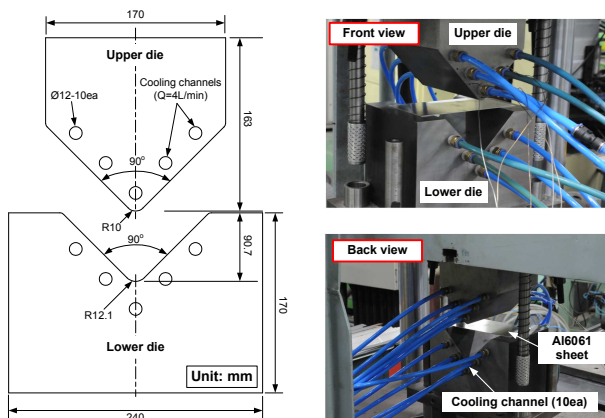
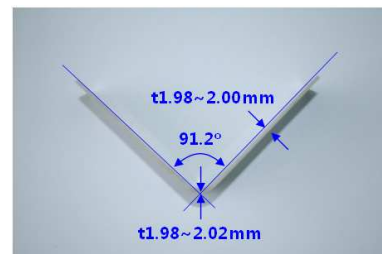


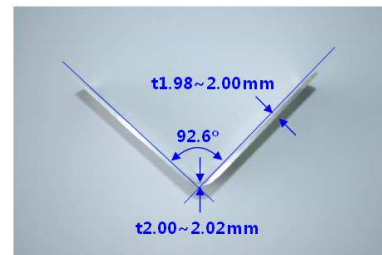
Fig. 6 V-bending die with cooling channels for HFQ test

되었다.

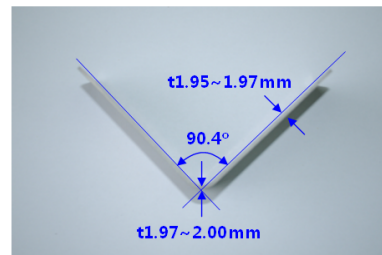
그리고 각각의 열처리 조건들에 따라 굽힘성형된 판재의 두께를 측정한 결과, HFQ 된 판재가 기존 냉간성형의 판재 보다 약 0.02~0.05mm 얇은 두께를 가졌다. 이는 HFQ 의 경우 용체화처리 온도까지 가열된 판재가 연화됨에 따라 나타난 현상이라 판단된다. 하지만 HFQ 이 적용된 판재가 기존공정 대비 현저한 두께차이는 확인할 수 없었다. 따라서 본 연구에서 제시한 HFQ 을 Al6061 판재의 V-bending 시험에 적용하여 스프링백을 측정하여 기존의 냉간성형과 비교한 결과, 최종제품의 치수정밀도 향상이 가능하였다.



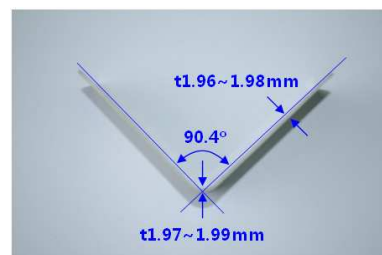
(a) Conventional T4



(b) Conventional T6



(c) HFQ T4



(d) HFQ T6

Fig. 7 Results of V-bending test for Al6061 sheets

4.2 냉각속도 평가

앞서 수행된 에릭슨 시험과 V-bending 시험을 통해 HFQ 은 기존의 냉간성형 공정보다 제품의 치수정밀도 및 성형성 향상이 가능하였다. 하지만 HFQ 으로 제조된 제품의 강도가 현저하게 저하된다면 실제공정에 적용하는 것은 문제가 있다. 이에 HFQ 이 적용된 최종제품의 기계적 특성에 직접적인 영향을 미치는 용체화처리의 냉각속도를 우선적으로 파악하였다.

HFQ 의 냉각온도는 일반적인 T4 및 T6 열처리의 용체화처리 시, 상온의 물에 의해 냉각되는 온도와 직접적으로 비교되었다. 또한 HFQ 에 의해 냉각되는 정도를 분석하기 위해 상온의 공기에 냉각하는 경우(Air quenching)와도 간접적으로 비교하였다. Al6061 판재의 냉각온도를 측정할 위치를 Fig. 9 에 나타내었다. 두께가 2mm 인 판재의 측면에 Ø1.1mm X h20mm 의 홀 가공하고, Ø1mm 의 K-type 열전대(Thermocouple)를 삽입하여 온도를 측정하였다. 특히 HFQ 의 냉각온도는 V-bending 시험에서 사용된 냉각채널이 설치된 다이로 판재를 냉각하여 측정되었다. 모든 조건에서 냉각이 시작되는 온도는 530°C이며, 매 1 초의 간격으로 실시

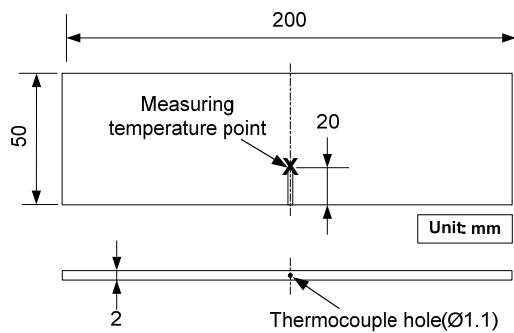


Fig. 8 Measuring temperature point of Al6061 sheets

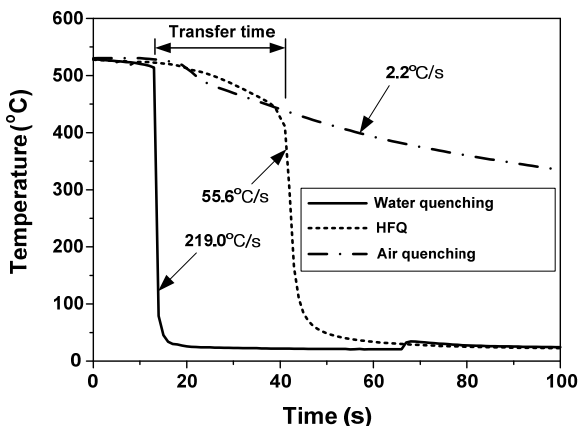


Fig. 9 Cooling temperature of Al6061 sheet according to quenching methods

간 온도를 측정하였다.

냉각방법에 따라 Al6061 판재의 측정된 냉각온도 결과를 Fig. 10 에 나타내었다. 측정결과, HFQ 의 냉각속도는 55.6°C/s 로 219.0°C/s 의 냉각속도를 가지는 상온의 물보다 약 4 배 가량 낮았다. 하지만 2.2°C/s 의 냉각속도를 가지는 공기로 냉각한 경우와 비교하면 매우 높은 냉각속도를 가지는 것으로 나타났다. 그리고 HFQ 시 판재는 가열로에서 다이로 이송하는 과정에서 약 70~80°C 가량 냉각되었다. 이는 HFQ 으로 최적의 기계적 물성을 얻기 위해서는 이송과정에서 발생하는 열손실의 최소화가 필요할 것으로 판단된다.

4.3 기계적 물성 평가

상온의 물로 냉각한 경우 보다 약 4 배 가량 낮은 냉각속도를 가지는 HFQ 판재의 기계적 물성을 평가하기 위해 강도 및 경도를 측정하여 기존의 냉간성형과 비교하였다. 강도는 인장시험을 수행하여 측정되었으며, 시험편은 KS B0801 규격에 의거하여 13B 호 판재 시험편으로 고려하였다. 특히 HFQ 된 시험편은 V-bending 시험으로 굽힘성형된 판재로부터 채취하였다. 또한 경도는 Vickers 경도 측정법으로 고려되었으며, 0.3kgf 의 압입하중으로 각 시편 당 총 5 회 측정하여 그 평균값으로 평가하였다.

Al6061 판재의 인장시험을 수행하여 그 결과를 항복강도, 인장강도 및 연신율에 대해 각각 열처리 조건에 따라 비교하여 Table 2 에 요약하였다. 시험결과, 인공시효된 기존의 T6 열처리 및 HFQ(T6)가 적용된 경우가 자연시효된 경우 보다 높은 강도를 가지는 반면에 매우 낮은 연신율을 나타내었다. 이는 인공시효 과정에서 생성된 미세한 석출물로 인한 강화효과로 판단된다.

Table 2 Comparison of conventional method and HFQ for results of tensile test of Al6061 sheet

Heat treatments	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Conventional T4	139±5.4	312±12.1	26.4±0.5
Conventional T6	312±8.2	379±12.6	14.2±1.1
HFQ T4	132 ± 7.9	305±10.5	25.7±0.7
HFQ T6	308 ± 9.4	352±21.4	11.8±1.9

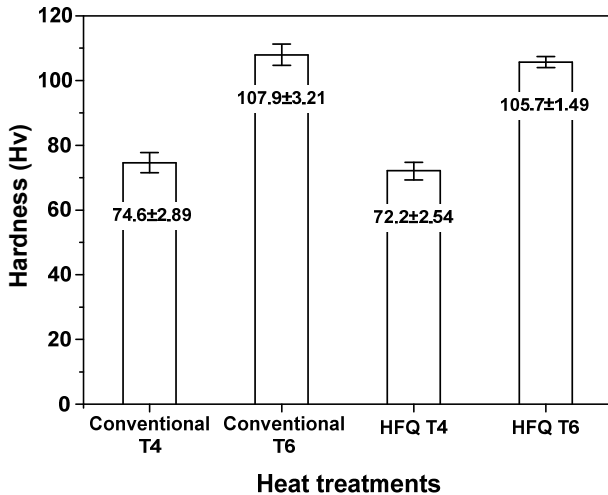


Fig. 10 Measured Vickers hardnesses of Al6061 alloy according to heat treatment conditions

자연 및 인공시효된 HFQ 과 기존의 제조공정과 각각 비교하면, 자연시효된 HFQ 과 기존의 냉간성형인 T4 와 거의 동일한 기계적 물성을 가졌다. 그리고 인공시효된 HFQ 의 인장강도는 352 MPa, 기존의 냉간성형 T6 의 인장강도는 379 MPa 로 HFQ 이 기존의 T6 보다 약 27 MPa 낮았으나, 그 차이가 오차 범위로 나타내고 있기 때문에 HFQ 에 의한 현저한 기계적 물성저하는 확인할 수 없었다. HFQ 의 기계적 강도가 기존의 제조공정보다 다소 낮은 이유는 용체화처리된 판재를 다이로 이송과정에서 발생하는 느린 냉각속도 때문으로 판단된다. 또한 열처리 조건에 따라 연신율을 비교하면 자연 및 인공시효된 HFQ 의 연신율은 모두 기존 냉간성형 보다 약 2.4% 가량 다소 낮은 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 HFQ 의 굽힘시험 시, 판재와 다이의 접촉과정에서 다소 불균일한 냉각으로 인해 발생된 현상으로 판단된다. 하지만 HFQ 이 적용된 이후 판재의 연신율은 최종 제품을 제조함에 있어서 필수적으로 고려해야만 하는 인자가 아니기 때문에 HFQ 이후에 연신율이 저하되는 요인에 대한 분석은 배제하였다.

인장시험 결과에서 확인된 바와 같이 기존의 제조공정과 유사한 기계적 물성을 가지는 HFQ 의 경도는 경도 측정결과에서도 동일하게 나타났다. Fig. 10 에 기존의 제조공정과 HFQ 의 열처리 조건에 따라 각각 경도를 비교하여 나타내었다. 동일하게 자연시효된 T4 열처리와 HFQ 의 경도는 각각 74.6Hv, 72.2Hv 로 나타났으며, 인공시효된 T6 열처리와 HFQ 도 각각 107.9Hv, 105.7Hv 로 거의 동등한 값을 가지는 것으로 나타냄에 따라 HFQ 의 기계적 물성 저하는 발생하지 않았다.

Al6061 판재의 온도측정결과에서 HFQ 가 물로 냉각한 경우 보다 약 4 배 가량 낮은 냉각속도를 가졌으나, 냉각속도 차이는 동일하게 시효된 최종 제품의 기계적 물성에는 크게 영향을 미치지 않았다. 이는 HFQ 이후 자연 및 인공시효된 제품의 기계적 물성은 기존의 제조 방식의 제품과 동일 수준의 물성 확보가 가능할 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 HFQ 의 적용성을 평가한 결과, HFQ 은 기존의 제조공법과 비교하여 기계적 물성 저하 없이 제품 성형성과 치수정밀도 향상이 가능한 제조공법으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 알루미늄 판재성형의 제품 치수정밀도 및 성형성 향상을 위한 새로운 제조공법인 HFQ 을 제시하고, 그 적용성 평가를 위한 V-bending 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 에릭슨 시험을 통해 성형하중 및 성형성을 평가한 결과, HFQ 의 성형하중은 T4 와 T6 열처리된 판재 보다 각각 62.0%, 73.2% 낮았으며, 성형성은 각각 17.3%, 53.7% 향상되었다.

(2) HFQ 의 적용성 평가를 위해 V-bending 시험을 수행하여 치수정밀도를 평가한 결과, T4 및 열처리된 판재는 1.2°, T6 열처리는 2.6° 의 스프링백이 발생하는 반면 HFQ 이 적용된 판재의 스프링백은 0.4°로 우수한 치수정밀도를 가졌다.

(3) 동일하게 HFQ 후에 각각 자연 및 인공시효된 제품의 굽힘각도를 측정된 결과, 인공시효로 인한 제품의 치수변화는 거의 없었다.

(4) HFQ 시 판재의 냉각온도를 측정하고 강도 및 경도를 평가한 결과, 상온의 물 보다 HFQ 의 냉각속도가 약 4 배 가량 낮았으나, 자연 및 인공시효가 완료된 최종 제품의 기계적 물성 저하는 발생하지 않았다.

(5) Al6061 판재의 V-bending 시험을 통해 본 연구에서 제시한 HFQ 은 제품의 기계적 물성저하 없이 성형성과 치수정밀도를 향상할 수 있는 새로운 알루미늄 판재의 성형공법이다.

후 기

본 논문은 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업 및 2012 년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (한국연구재단-2012R1A5A1048294).

참고문헌

- (1) Zhongqi, Y., Zhongqin, L. and Yixi, Z., 2007, "Evaluation of Fracture Limit in Automotive Aluminum Alloy Sheet Forming," *Material and Design*, Vol. 203, pp. 203~207.
- (2) Wang, Z. J., Li, Y., Liu, J. G. and Zhang, Y. H., 2007, "Evaluation of Forming Limit in Viscous Pressure Forming of Automotive Aluminum Alloy 6k21-T4 Sheet," *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 17, pp. 1169~1174.
- (3) Yu, Z. Q., Zhao, Y. X. and Lin, Z. Q., 2004, "Evaluation Parameter of Drawability of Automotive Aluminum Alloy Sheets," *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, Vol. 14, No. 10, pp. 1689~1693.
- (4) Mohamed, S. M., Alistair, D. F., Jianguo, L., Daniel, S. B. and Trevor, A. D., 2012, "Investigation of Deformation and Failure Features in Hot Stamping of AA6082: Experimentation and Modeling," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 53, pp. 27~38.
- (5) Kim, C. I., Yang, S. H. and Kim, Y. S., 2012, "Prediction of Formability of Aluminum Alloy 5454 Sheet," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 2, pp. 179~186.
- (6) Miller, W. S., Zhuang, L., Bottenma, J., Wittebrood, A. J., Smet, P. D., Haszler, A. and Vieregge, A., 2000, "Recent Development in Aluminum Alloy for the Automotive Industry," *Materials Science & Engineering A*, Vol. A280, pp.37~49.
- (7) Zhongqi, Y., Zhongqi, L. and Zhao, Y., 2007, "Evaluation of Fracture Limit in Automotive Aluminum Alloy Sheet Forming," *Materials & Design*, Vol. 28, pp. 203~207.
- (8) Kim, Y. S., 1992, "Recent and Future Development of Stamping Technology for Aluminum Car Body Sheet," *Trans. of the KSAE*, Vol. 14, No. 1, pp. 3~12.
- (9) Kim, H. S. and Muammer, K., 2008, "Numerical Investigations on Springback Characteristics of Aluminum Sheet Metal Alloys in Warm Forming Conditions," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 204, pp. 370~383.
- (10) Toros, S., Ozturk, F. and Kacar, I., 2008, "Review of Warm Forming of Aluminum-Magnesium," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 207, pp. 1~12.
- (11) Mahabunphachai, S. and Koc, M., 2010, "Investigation on Forming of Aluminum 5052 and 6061 Sheet Alloys at Warm Temperature," *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 2422~2434.
- (12) Daoming, L. and Amit, K. G., 2004, "Biaxial Warm Forming Behavior of Aluminum Sheet Alloys," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145, pp. 281~293.
- (13) Wang, H., Luo, Y. B., Peter, F. Chen, M. H. and Gao, L., 2012, "Warm Forming Behavior of High Strength Aluminum Alloy AA7075," *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp. 1~7.
- (14) Sheppard, T., 1999, *Extrusion of Aluminum Alloys*, Kluwer Academic Publishers.
- (15) David, D. H. and Issam, M., 1996, "Optimization of Quench History of Aluminum Parts for Superior Mechanical Properties," *Int. Jour. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No.1, pp. 81~85
- (16) Myhr, O. R., Grong, O. and Andersen, S. J., 2001, "Modeling of the Age Hardening Behaviour of Al-Mg-Si Alloys," *Acta Materialia*, Vol. 49, pp. 65~75.
- (17) Tanner, D. A. and Robinson, J. S., 2004, "Effect of Precipitation During Quenching on the Mechanical Properties of the Aluminum Alloy 7010 in the W-temper," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153~154, pp. 998~1004.
- (18) Schikorra, M., Donati, L., Tomesani, L. and Tekkaya, E., 2007, "Microstructure Analysis of Aluminum Extrusion: Grain Size Distribution in AA6060, AA6082 and AA7075 Alloys," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, pp. 1445~1451.
- (19) ASTM E643-09, Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material.