

벌크비정질합금(BMG)의 절삭특성 평가

신형섭*† · 최호연**

* 안동대학교 기계설계공학과

** Tribotex Co. Ltd.

Evaluation of Cutting Characteristics in Bulk Metallic Glasses

Hyung-Seop Shin*† and Ho-Yeon Choi**

* Dept. of Mechanical Design Engineering, Andong Nat'l Univ.,

** Tribotex Co. Ltd.

(Received November 16, 2010 ; Revised March 23, 2012 ; Accepted March 30, 2012)

Key Words: Bulk Metallic Glass(벌크금속유리), Cutting Characteristics (절삭 특성), Cutting Force(절삭력), Insert Tool(인서트 공구), Chip Morphology(칩 형상), Tool Wear(공구 마모)

초록: 본 연구에서는 CNC선반을 사용하여 다양한 공구재질과 절삭속도에서 벌크금속유리(BMG)의 절삭 특성을 평가하였다. 선반가공시 Zr-기 BMG의 표면거칠기와 칩 형상을 관찰하여 가공조건에 따른 절삭력과 공구틀 마모 등 절삭 특성을 비교·검토하였다. 직경 8 mm $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG시험편의 절삭에는 네 종류의 절삭공구를 사용하였다. 가공후 BMG 시험편의 표면거칠기를 측정하였고, 표면거칠기에 미치는 공구 회전속도의 영향을 조사하였다. 회전속도가 빠를수록 낮은 표면거칠기를 나타내었고, 공구 재질의 영향도 크게 나타났다. 칩 형상의 관찰 결과, 산화를 일으키지 않은 BMG 칩은 단열 전단파 발생과 함께 나선형상의 형태를 나타내지만, 산화를 일으킨 칩은 국부적으로 용융과 함께 칩들이 뭉치는 현상을 나타내었다. BMG시험편을 가공하는 동안 발생한 절삭력은 TiN-WC에서 가장 큰 값을 나타내고, PCD가 그 다음, Cermet툴에서 가장 작은 값을 나타내었다.

Abstract: In this study, the cutting characteristics of bulk metallic glass (BMG) cut using a computer numerically controlled (CNC) lathe were investigated for different insert tool materials and cutting speeds. The surface roughness, chip morphology, cutting forces, and tool wear during turning of $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG alloy were examined. Four kinds of tool materials were used to cut an 8-mm-diameter BMG. The examination of the surface roughnesses of the BMG specimens machined at each cutting speed showed that the surface roughness became better as the cutting speed increased, and the tool materials also influenced the surface roughness. The chip morphology investigations showed that the unoxidized BMG chips had serrated curled chips with adiabatic shear bands, while the oxidized chips exhibited local melting and tangling rather than the usual spiral-shaped chips. The cutting force induced during machining of the Zr-based BMG was the largest for the TiN-WC tool, followed by the polycrystalline diamond (PCD) tool. The cermet tool exerted the smallest cutting force.

1. 서론

벌크 금속 유리(bulk metallic glass: BMG)는 결정질 금속과 달리 불규칙적인 원자 배열을 하고 있어서, 전위(dislocation)와 같은 초기 결함이 존재하지 않는 대신, 자유체적(free volume)이 내부에 다수 존재하는 관계로 결정질 금속에 비해 우수한 기계적 특성, 즉 높은 항복 및 파단강도(fracture strength), 높은 경도, 큰 탄성변형률 한계(elastic strain limit), 우수한 내마모성 및 내부식성

등을 갖고 있다.^(1,2)

BMG는 이와 같은 우수한 특성을 갖고 있음에도 불구하고, 기계 구조용 부재로 적용하기 위해서는 가공성, 성형성, 용접성에 관한 많은 연구가 필요하다.⁽³⁾ 한편, 본 연구팀에서도 이러한 BMG 합금을 구조용 부재로 적용하기 위해, 그간 BMG 특유의 과냉각액상영역에서 초소성 변형능을 살린 마찰접합 및 마찰교반점용접 기술을 개발해 오고 있는데,⁽⁴⁻⁶⁾ 이와 더불어 기계가공측면에서 특성 평가 필요성을 절감해 오고 있다. 이들 소성가공 및 접합기술도 절삭가공과의 조화를 통해 구조용 또는 기능성 부품제작이 가능한 바, 기계

† Corresponding Author, hsshin@andong.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

가공성의 평가는 매우 중요하다. 특히 BMG의 높은 경도와 낮은 소성변형능으로 인해 기계가공에 어려움이 있고, 이에 관한 연구가 최근 시작되어 오고 있다. Bakkal. et. al.은 소형 CNC와 기존 선삭 공구를 사용해 BMG의 가공이 가능한지를 조사하였고, 형성된 Chip의 형상과 산화유무 등 Chip의 특성도 조사하였다.⁽⁷⁾ 또한 소형 CNC 머시닝센터를 사용하여 드릴작업을 수행하였다.⁽⁸⁾ Fujita. et. al.은 BMG의 절삭가공성 평가와 절삭력과 이송력을 측정하였고 이를 통한 Chip의 발생 원리를 파악하였다.⁽⁹⁾

이들 선행 연구의 대부분은 칩의 형성, 산화 및 결정화 여부에 초점이 맞추어져 있어서, BMG의 기계가공 특성의 확립을 위해서는 보다 많은 연구가 필요하다. 특히 우수한 비정질형성능을 가진 다양한 합금계의 BMG가 최근 개발되면서 이들 BMG의 기계가공성 평가 및 조사가 필요하다. 본 연구에서는 Zr-기 BMG 합금에 4종류의 절삭공구를 사용하여 절삭공구 재질과 절삭속도에 따른 표면거칠기 및 절삭력 측정을 통해 BMG 재료의 절삭특성을 조사하였고, 절삭특성과 칩 형상과의 관계를 파악하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 BMG 합금은 $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ 조성으로 Ar분위기에서 수냉 동 몰드(copper mold) 주조법으로 직경 8 mm, 길이 60 mm의 봉 형상으로 제작되었다. 이 합금의 열 특성은 차분

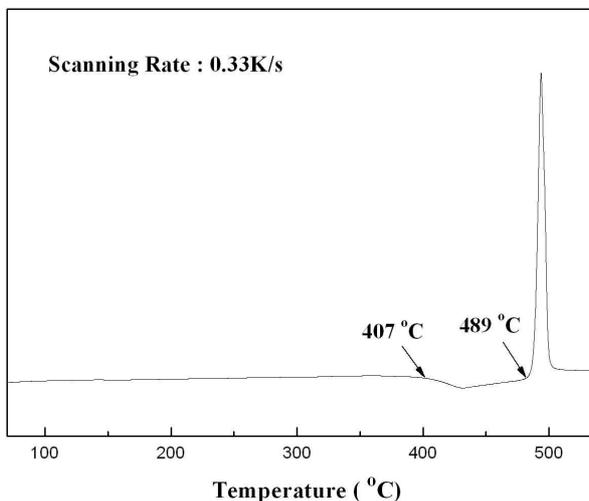


Fig. 1 DSC curve of $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG

주사 열량계(differential scanning calorimetry : DSC)로 측정하였다. 주사속도 0.33 K/s에서 DSC 분석 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

$Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ 합금의 열적 특성치인 유리전이온도(T_g)와 결정화 온도(T_x), Peak 온도는 각각 680 K, 762 K 그리고 767 K이다. 따라서 과냉각 액상 영역($\Delta T_x = T_x - T_g$)은 82 K이다. 또한 X-선 비파괴 검사법으로 $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ 합금 내부에 주조 결합의 존재여부를 조사하였고, 그 결과 재료의 내부에는 눈에 띄만한 주조결합은 존재하지 않음을 확인할 수 있었다.

2.2 BMG의 절삭 실험 방법

본 연구에서는 BMG의 절삭가공성 평가를 위해 $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG를 피삭재로, 절삭공구로는 텅 선탄 반경(nose radius)이 0.4 mm인 TiN이 CVD 코팅된 WC(초경이라 부름), Cermet, 다결정 다이아몬드(PCD), 입방정 질화붕소(CBN)등 4종류의 인서트 팁(insert tip)을 각각 사용하였다. 절삭 조건은 이송속도: 0.025 mm/rev, 절삭 깊이: 0.2~0.5 mm, 피삭재의 회전속도를 500 RPM, 1,000 RPM, 2,000 RPM으로 변화시켜 가면서, CNC선반을 사용해 자동 이동으로 절삭가공을 실시하였다. 이들 각 RPM에서의 절삭 속도는 0.4 m/s, 0.8 m/s 그리고 1.6 m/s에 해당한다. 필요한 경우 절삭속도를 달리하여 50 RPM, 3,000 RPM, 4,000 RPM에서도 절삭가공을 수행하였다. 이 때 가공된 피삭재의 표면상태와 표면거칠기, 생성된 칩의 형상을 관찰하여 가공조건에 따른 절삭력과 더불어 절삭가공 특성을 비교·검토하였다. 아울러 동일한 절삭조건에서 가공한 결정질금속인 Al-합금 및 Ti-합금의 경우와 비교하였다. 사용된 공구 인서트의 특성치를 Table 1에 나타내었다.

3. BMG의 절삭가공 실험 결과

3.1 가공면 양상

Fig. 2(a)는 TiN을 CVD코팅한 WC(초경)팁으로 BMG 피삭재를 절삭깊이 0.5 mm로 우측으로부터 5 mm씩 500 RPM, 1,000 RPM, 2,000 RPM으로 가공한 절삭 양상을 나타내고 있다. 그림 속의 화살표는 절삭속도를 달리한 절삭부 경계를 나타낸다. (b)는 가공 후 공구사진으로 BMG를 가공 후 공구에 기계적 결손(chipping)이 발생한 것을 볼 수 있다.

Table 1 Properties of cutting tools used in the turning experiment.

Tool designation	Coating	Chip breaker	Thermal conductivity (W/mK)	Hardness Hv
TiN-WC	TiN (CVD coated)	Yes	104	2,100
Cermet	No coating	Yes	13	1,600
Polycrystalline Diamond (PCD)	No coating	No	560	~8,000
Cubic Boron Nitride (CBN)	No coating	No	72	2,800

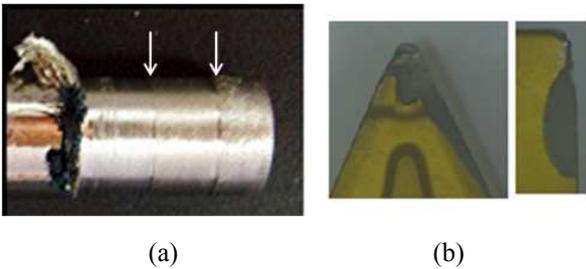


Fig. 2 (a) Appearances of $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG specimen machined using a TiN CVD coated WC tool, (b) Appearance of TiN CVD coated WC tools after machining BMG specimens

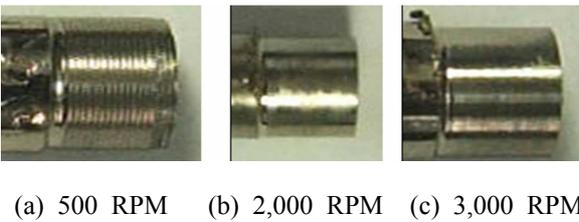


Fig. 3 Appearances of $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG specimens machined using a Cermet tool at each rotation speed

BMG의 경우 가공도중 공구가 기계적 결손을 일으킴으로 인해 양호한 가공마무리 및 표면거칠기를 얻을 수 없는 경우가 많았다. 또, 가공면이 고르지 못하며, 칩이 가공면에 눌러 붙은 현상이 나타났으며, 가공마무리 부분에 피삭재의 가공물질이 표면에 밀려나가면서 눌러 붙는 현상이 관찰되었다.

Cermet공구 팁으로 가공한 BMG 피삭재의 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 절삭깊이 0.3 mm으로 각각 500 RPM, 2000 RPM, 3000 RPM으로 가공한 사진이다.

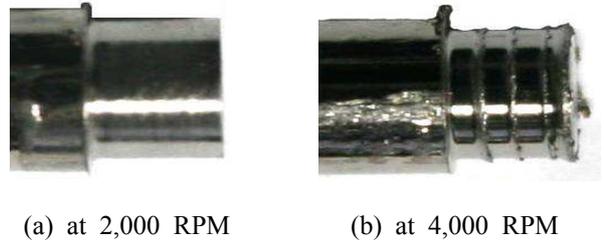


Fig. 4 Appearances of $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG specimens machined using a CBN tool (Cutting depth is 0.3 mm at all conditions)

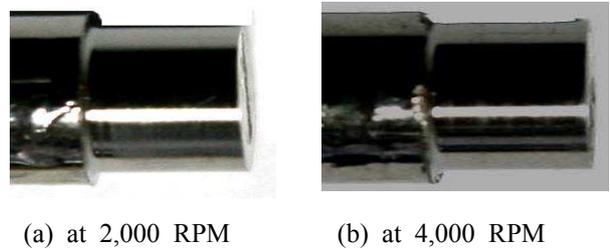


Fig. 5 Appearances of $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG specimens machined using a PCD tool (cutting depth is 0.2 mm)

CBN공구로 절삭깊이 0.3 mm로 가공한 BMG 피삭재의 표면양상을 Fig. 4에 나타내었다. (a)는 2,000 RPM에서 가공한 양상으로 비교적 양호한 표면거칠기와 마무리 가공면을 관찰할 수 있다. 한편 (b)의 경우 4,000 RPM으로 가공한 후 표면양상을 나타내는 사진이다. CBN공구의 경우 회전수가 높은 4,000 RPM에서는 가공면에 일정간격으로 칩이 눌러 붙어 있는 것을 관찰할 수 있고, 마무리 부분 또한 깔끔하게 가공되지 않았다.

PCD공구로 가공한 시험편의 사진을 Fig. 5에 나타내었다. 절삭깊이 0.2 mm에서 각각 2,000

Table 2 Surface roughness values measured at specimens machined using PCD tools

	Zr ₅₀ Cu ₄₀ Al ₁₀ BMG		A6061-T6		Ti-4V-6Al	
	R _a , μm	R _{max} , μm	R _a , μm	R _{max} , μm	R _a , μm	R _{max} , μm
500 RPM (0.4 m/s)	2.56	13.4	3.00	12.7	12.52	62.4
	2.55	12.5	3.02	12.9	12.19	59.6
	2.46	13.1	2.92	12.5	12.10	59.2
1000 RPM (0.8 m/s)	2.96	12.6	0.70	3.9	8.20	32.4
	3.03	15.2	0.73	4.2	8.78	34.6
	2.89	12.4	0.74	4.5	8.67	35.1
2000 RPM (1.6 m/s)	1.54	8.1	0.37	2.1	4.31	17.3
	1.36	7.2	0.36	1.9	4.32	16.7
	1.42	7.0	0.36	2.1	4.37	17.4

Table 3 Comparison of roughness values measured at surface of Zr₅₀Cu₄₀Al₁₀ BMG specimens machined using various tools at each RPM

RPM	Tool materials							
	TiN-WC		Cermet		PCD		CBN	
	R _a , μm	R _{max} , μm	R _a , μm	R _{max} , μm	R _a , μm	R _{max} , μm	R _a , μm	R _{max} , μm
500 (0.4 m/s)	3.17	14.5	2.84	13.8	2.52	13.0	-	-
1,000 (0.8 m/s)	4.97	19.0	4.32	19.9	2.96	13.4	-	-
2,000 (1.6 m/s)	3.67	17.0	0.62	3.6	1.44	7.43	-	-
3,000 (2.4 m/s)	-	-	0.54	3.1	0.53	2.5	1.50	6.7
4,000 (3.2 m/s)	-	-	1.21	6.5	0.25	2.13	4.53	23.9

RPM와 4,000 RPM에서 가공한 시험편으로, 매끈한 가공면을 나타내고 있다. 표면거칠기 측정결과 2,000 RPM보다 4,000 RPM에서 양호한 표면거칠기를 나타내었다. PCD공구로 가공 후 표면거칠기 측정 결과를 Table 2에 나타내었다. 500 RPM의 낮은 회전수에서는 Zr₅₀Cu₄₀Al₁₀ BMG가 Al합금(A6061-T6)과 같은 R_a값을 나타내나, 회전수가 증가하면 표면거칠기는 감소하지만 Al합금, BMG, Ti합금의 순의 표면거칠기를 나타내는 것을 볼 수 있다. 특히 난삭성 금속재료인 Ti합금과 비교하였을 때, Zr-기 BMG는 R_a뿐만 아니라 R_{max}에서도 훨씬 양호한 표면거칠기를 나타내는 것을 알 수 있다. Zr₅₀Cu₄₀Al₁₀ BMG의 경우는 RPM이

1,000까지 증가함에도 불구하고 R_a와 R_{max}의 감소는 별로 크지 않다가 2,000 RPM에 크게 저하하는 거동을 나타내었다.

이상 공구재질별로 가공 후 측정된 BMG피삭재의 표면거칠기를 Table 3에 비교하였다. Cermet과 PCD공구의 경우, RPM이 높아짐에 따라 표면거칠기가 감소하여 양호한 표면상태를 나타내고 있으나, TiN-WC(초경)공구의 경우에는 회전수가 증가하여도 R_a 및 R_{max}에는 거의 변화를 나타내지 않았다. 특히 Cermet의 경우 1,000 RPM에서 갑자기 표면거칠기가 다소 증가하는 거동을 나타내는데, 이것은 BMG가공 후 Cermet 공구손상을 살펴보면, 모든 조건에서 절삭방향으로 공구의 파손과 치핑이 발생하였고, 특히 1,000 RPM에서 이송방향으로 기계적 손상인 치핑(chipping)이 크게 발생하여 팁의 상당부분이 떨어져 나간 것에 기인한 결과로 보여진다. 그러나 RPM이 증가할수록 오히려 공구에 발생하는 손상의 크기 및 범위가 줄어드는 것을 볼 수 있었다.

한편 4,000 RPM에서는, PCD 공구외에는 표면거칠기가 다시 다소 증가하는 거동을 나타내었다. 이것은 본 연구에서는 무운할 상태로 절삭가공함에 따라서 높은 RPM에서 공구에 치핑과 열균열 발생에 따른 결과로 보여진다.

이와 같이 공구 재질 및 RPM에 따른 BMG시험편 가공면의 표면거칠기 변화에는 공구의 국부적인 결손의 영향 및 피절삭재 가공면에서 형성된 칩 형상(전단띠의 발생 크기와 관계가 있음)과 절삭속도의 상관관계도 관여를 하였다고 생각되는 바, 이에 대한 검토가 필요하다.

결과적으로 PCD공구를 사용하여 4,000 RPM으로 가공하였을 때, 가장 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있었다. PCD공구로 가공시 모든 경우에서 기계적 결손이 발생하였으나, RPM이 높아질수록 공구의 결손정도가 줄어드는 경향을 나타내었다. 이것은 Table 3에서 4000 RPM에서 가장 우수한 표면거칠기를 나타낸 것과 관계가 있다. 2,000~ 3,000 RPM에서 각 공구별 표면거칠기를 비교해 보면, PCD, Cermet, CBN, TiN-WC공구 순으로 높은 값을 나타낼 수 있다. 이것은 M. Bakkal 등에 의하면,⁽⁷⁾ PCBN과 PCD공구로 가공시, PCBN공구에는 chipping이 PCD공구에는 기계적 결함이 발생하였으나 표면거칠기에 있어서는 PCD공구를 사용한 경우가 가장 양호한 것으로 나타났다는 실험 결과

와도 유사한 경향임을 알 수 있다.

3.2 칩 형상 관찰 결과

가공 중 칩을 수거하여 칩의 형태와 산화여부를 관찰하였다. Al-합금과 Ti-합금 피삭재의 경우 모든 공구의 가공 칩에서 전단변형부를 뚜렷히 관찰할 수 있으며, 가공속도가 높아짐에 따라 전단변형부의 간격이 좁아짐을 관찰할 수 있었다. BMG 피삭재 가공의 경우, 초경과 Cermet공구로 가공한 경우 500 RPM에서 생성된 칩의 경우 가공시 전단띠(shear band)가 일정한 간격으로 형성되면서 전단 변형이 뚜렷히 관찰되었고, 이때 전단면에서는 베인 패턴(vein-like patterns)을 관찰할 수 있었고, 높은 RPM에서는 섬광과 함께 산화된 칩이 발생하였다.

CBN공구를 사용하여 BMG 피삭재 가공시 발생한 칩의 형상을 Fig. 6에 나타내었다. (a) 500 RPM에서 생성된 칩의 경우 뚜렷한 전단변형부가

용융현상을 볼 수 있다. (c) 2,000 RPM의 경우 관찰되며, 전단부를 보다 확대해서 보게 되면 얇게 층상(lamellar)으로 전단변형이 발생한 것을 관찰할 수 있다. (b) 1,000 RPM의 경우 전단변형부를 관찰할 수 있으며, 칩 형성 중 부분적으로 형성된 칩을 확대해 보면, 전단변형부 사이사이에 뚜렷하고 큰 폭의 전단변형이 일어나면서 전단부간 분리(separation)를 나타낸 것을 관찰할 수 있었다.

다이아몬드 팁(PCD)공구를 사용하여 BMG 피삭재 가공 시 발생하는 칩 형상을 관찰한 SEM 이미지를 Fig. 8에 나타내었다. (a) 500 RPM으로 가공시 발생한 칩의 경우, 전단변형부 간격이 매우 크며, 주 전단변형부 전단면에서 베인 형태를 관찰할 수 있다. (b) 1,000 RPM에서 생성된 칩의 경우, 이차전단부에서 전단변형이 크게 관찰되지 않는 매끄러운 면을 관찰할 수 있다. (c) 4,000 RPM에서 생성된 칩의 경우, 주전단부에서 이차전단부에 이르기까지 칩 발생 방향에 수직이 되는 전단 형성부를 관찰할 수 있다. PCD 공구는

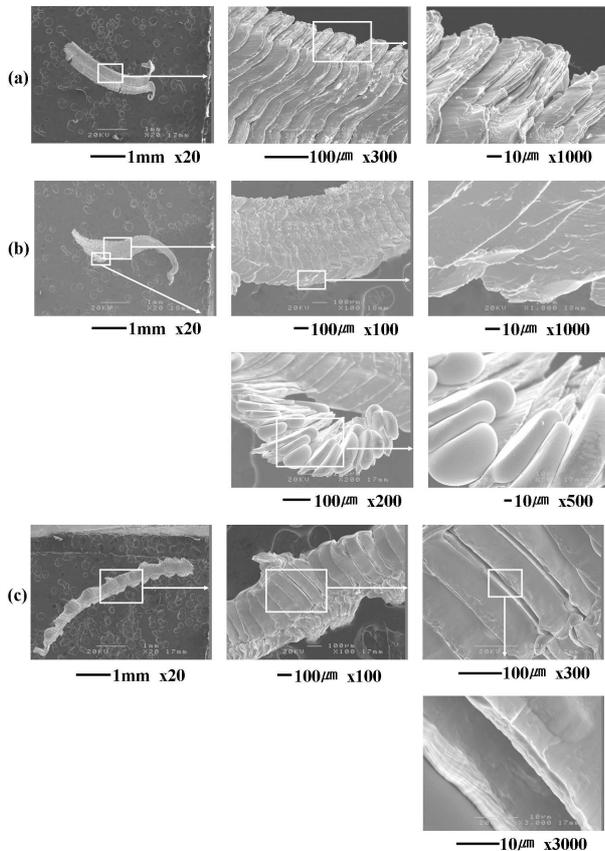


Fig. 6 SEM micrographs of BMG chips machined using a CBN tool at each cutting speed; (a) 500 RPM, (b) 1,000 RPM, (c) 2,000 RPM

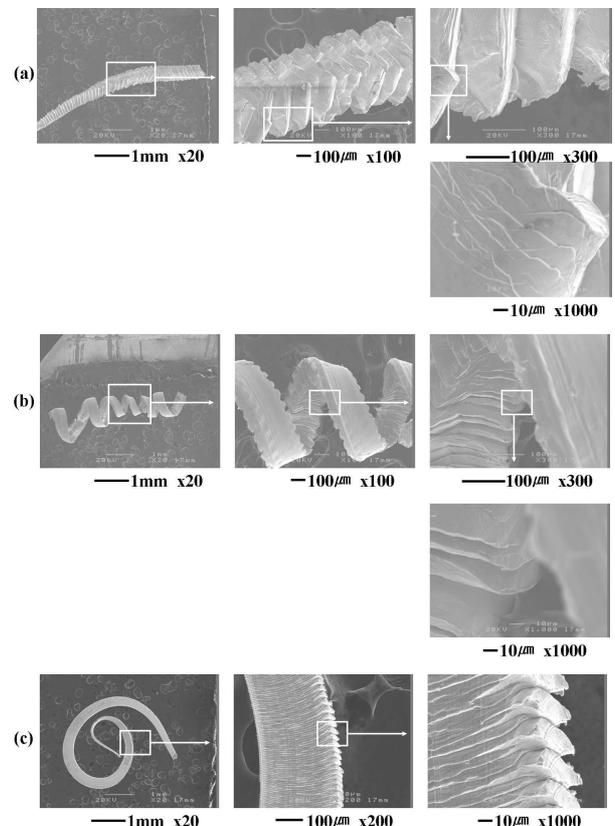


Fig. 7 SEM micrographs of BMG chips machined using a PCD tool at each cutting speed; (a) 500 RPM, (b) 1,000 RPM, (c) 4,000 RPM

열전도 계수가 다른 공구와 BMG 공작물에 비하여 월등히 큰 관계로 절삭 가공시 발생하는 열이 공구를 통해 전도되어서 가공 칩에 축적되지 않는 관계로, 열전도계수가 낮은 다른 공구를 사용한 가공시와 달리 절삭가공중 설파광이나 산화가 전혀 일어나지 않았다.

3.3 절삭력과 이송력의 측정 결과

BMG의 절삭가공 동안 반도체 스트레인 게이지 (gage length: 2 mm, gage resistance : 115.8 Ω \pm 2 %, gage factor : 121 \pm 3 %)를 공구 홀더에 부착하여 절삭력(cutting force)과 이송력(feeding force)을 측정하였다. 절삭가공동안 반도체 게이지로부터 얻어진 전기적 신호를 브리지 박스와 스트레인 앰프 (Kyowa, Model No: CDV- 700A, sampling rate: 500 kHz)를 거쳐서 랩뷰와 DAQ 보드(PCI 6251, BNC 2110)를 사용하여 수집하였다. 초경 텅으로 2,000 RPM에서 A6061-T6, Ti-4N-6Al 그리고 $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG 피삭재를 가공하였을 때 측정된 절삭력과 이송력을 Fig. 8에 나타내었다. 전체적으로 공작물로 사용한 결정질 금속과 BMG의 가공시 얻어지는 절삭력과 이송력의 특성 곡선에서 가장 큰 차이점은 두 결정질 금속의 경우는 발생한 힘이 가공동안 큰 변동을 나타내지 않고 거의 일정하게 가해진 상태에서 가공이 관찰되는 반면, BMG의 경우는 가공시 발생하는 힘 선도에 큰 변동이 발생하여 부하-제하가 주기적으로 가해지는 경향을 볼 수 있다. 또한 이송력의 경우도 절삭력보다는 그 크기가 작지만 주기적인 변동을 나타내는 거동은 유사하게 작용하는 것을 알 수 있다. 이것은, BMG의 경우, 앞 절에서 언급된 절삭가공시 칩 형성이 전단파의 주기적 발생에 의한 결과로 보인다. 공작물

재료에 따른 절삭력과 이송력을 비교해 보면, Al-합금이 가장 낮은 값을 나타내었고, BMG 그리고 Ti-합금의 순이다. 특히, BMG의 경우 그 강도가 Ti-합금의 두 배가 넘음에도 불구하고, 절삭력과 이송력의 경우, 절반정도의 낮은 값을 나타내었다. 이것은 BMG 합금의 경우, 절삭시 공구 이송폭에 해당하는 전단파가 절삭깊이만큼 순간적으로 발생하는 것에 기인하였기 때문이다. 절삭속도가 증가함에 따라서 전체적으로 절삭력과 이송력은 크게 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 500 RPM에서 1,000 RPM으로 회전수가 증가하면 그 경향이 현저하게 나타났다. BMG의 경우 500 RPM에서의 최대 절삭력은 180 N, 총 가공시간(약 3초) 동안 5개의 피크가 발생하였다. 1,000 RPM에서는 최대 절삭력이 100 N, 총 가공시간 동안 10개의 피크가 발생하였다. 1,000 RPM에서는 절삭력보다 이송력이 더 높게 나타났다. 2,000 RPM에서의 가공에서는 최대 절삭력 75 N, 총 가공시간동안 10개의 피크가 발생하였다. RPM이 높아짐에 따라 최대 절삭력은 점점 감소하였다. 이송력의 경우 1,000 RPM에서 500 RPM보다 증가하였고, 2,000 RPM에서도 500 RPM보다 높게 나타났다. 총 피크의 수는 1,000 RPM에서 500 RPM의 두배였으나, 2,000 RPM에서는 더 이상 증가하지 않았다. 따라서 RPM이 높아짐에 따라 모든 종류의 공구에서 절삭력이 낮아지는 거동을 나타내는 것을 알 수 있었다.

$Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG 가공시 사용한 공구 텅 재료에 따른 절삭력과 이송력의 피크 평균치 변화를 Fig. 9에 나타내었다. (a)는 절삭력, (b)는 이송력의 변화를 나타낸다. 사용된 공구텅 재질에 따라서 현저한 영향을 나타내, TiN-WC > Cermet > PCD의 순으로 절삭력이 소요됨을 알 수 있다.

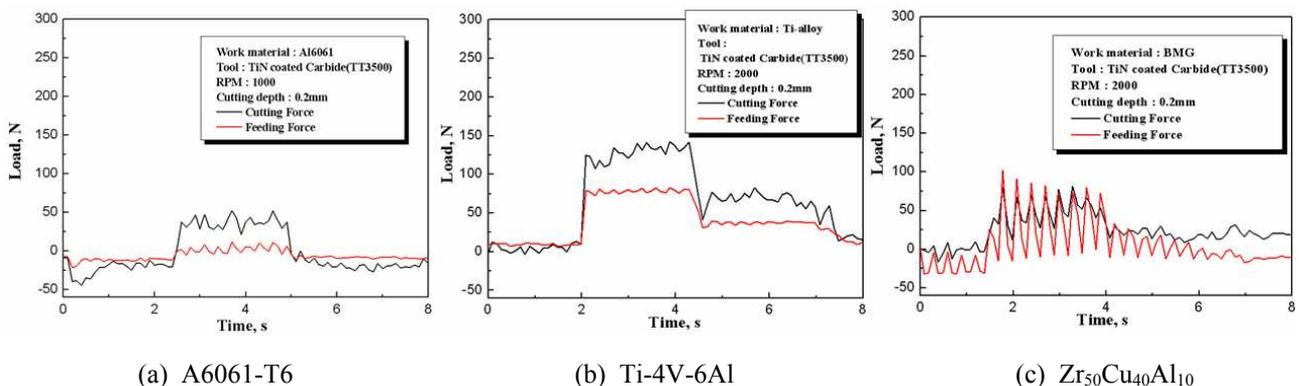


Fig. 8 Profiles of cutting and feeding forces measured during machining of each workpiece by using a TiN coated WC tool at 2,000 RPM

특히 Cermet의 경우 절삭 속도가 4,000 RPM으로 증가하면 오히려 절삭력이 증가하는 거동을 나타내는데, 이것은 표면거칠기에서 동일한 순서를 나타내는 것과 일치하는 것을 Table 3에서 볼 수 있다. 이 순서는 이송력의 경우도 500 RPM의 경우를 제외하면 같은 경향을 나타내었다. 이러한 BMG 기계가공시 소요 절삭력의 거동은 표면거칠기의 순서 및 거동과도 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

먼저 (a) 절삭력의 경우를 살펴보면 전체적으로 절삭속도가 증가함에 따라서 절삭력이 저하하는 거동을 나타내었으나, 그 정도는 공구 재질(공구의 열전도 계수, 칩 브레이크의 채용여부 등)에 따라서 차이를 나타내었다. (b) 이송력의 경우는 반대로 절삭속도가 증가하면 TiN-WC와 PCD 팁

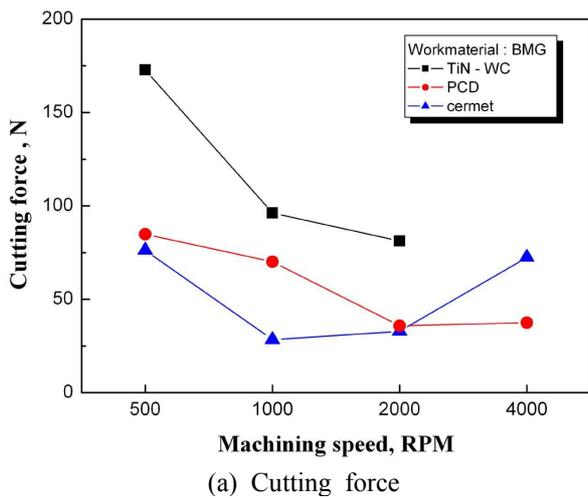
에서는 오히려 증가하는 경향을 나타내고 이후는 감소하였다. 이러한 이송력의 변화 거동은 아마도 칩 생성 시 전단띠의 발생 거동, 발열에 따른 연화거동에도 영향을 받아서 이와 관련한 검토가 향후 필요하다. 아울러 BMG재료 절삭의 경우, 최적의 절삭조건을 구하기 위해서 공구재질과 회전수의 적절한 조합이 필요하고, 이와 관련하여 다양한 조건에서 절삭력 측정이 요구되는데, 이 경우 노이즈 레벨의 저감을 위한 대책이 아울러 필요하다.

4. 결론

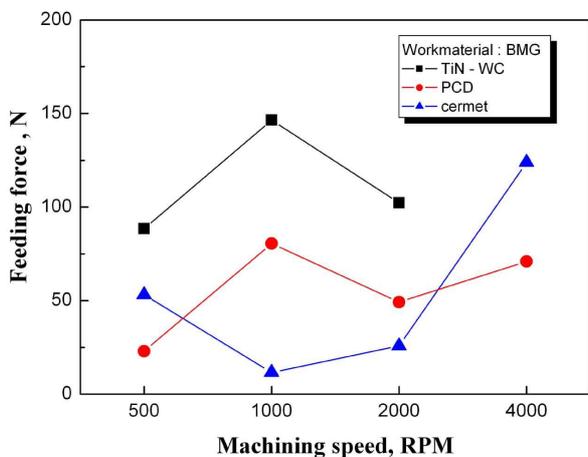
BMG합금의 기계가공에 의한 절삭특성을 조사하기 위하여 CNC선반을 사용하여 $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG의 선삭가공을 수행하였다. BMG합금의 선삭에 따른 표면양상과 표면거칠기, 발생 칩 형상, 절삭력의 측정을 통해 가공성을 조사하였고, 동일한 조건에서 가공한 A6061-T6재와 Ti-4V-6Al재의 경우와 비교하였다.

(1) TiN코팅-WC(초경), Cermet, PCD, CBN 등 4 종류의 공구를 사용하여 Zr-기 BMG합금을 가공한 결과, 공구 모두에서 국부적인 손상이 발생하였다. 절삭 가공후 BMG의 표면거칠기를 2,000~3,000 RPM에서 각 공구재질별로 측정하여 비교한 결과, PCD, Cermet, CBN, TiN-WC 공구 순으로 높은 값을 나타내었다. Cermet과 PCD공구의 경우는 RPM이 높아짐에 따라 표면거칠기가 감소하는 양상을 나타내나, 초경 공구의 경우는 회전수가 증가하여도 R_a 및 R_{max} 에는 큰 변화를 나타내지 않았다.

(2) BMG 가공시 발생하는 칩의 형태를 관찰한 결과, 큰 열전도계수를 갖는 PCD공구를 사용하였을 때, 주전단부와 이차전단부가 상호작용을 하면서 칩이 형성되었고, 1,000 RPM에서 나선형으로 꼬인 긴 형태로서 발생하여 가장 양호한 칩 형상을 나타내었다. 이것은 열전도계수가 다른 공구와 공작물에 비하여 월등히 큰 관계로 가공도중 칩의 산화나 용융이 발생하지 않았기 때문이다. 한편 열전도계수가 낮은 Cermet과 CBN 공구를 사용하여 가공한 경우는 낮은 RPM에서는 전단띠의 형성에 따른 세레이션 형태의 칩이나 불연속형 칩을 관찰할 수 있었으나, 높은 RPM에서는 용융과 산화가 발생하면서 칩이 뭉쳐서 형성되었다.



(a) Cutting force



(b) Feeding force

Fig. 9 Variation of (a) cutting force and (b) feeding force depending on during machining of $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG workpiece

(3) BMG의 절삭가공시 측정된 절삭력의 크기는 Al합금의 경우보다는 크지만 Ti합금의 경우보다는 훨씬 작은 값을 나타내었다. 절삭력은 공구재질과 절삭속도에 따라서 현저한 차이를 나타내, 절삭속도가 증가할수록 전체적으로 절삭력은 감소하였고, TiN-WC > PCD > Cermet 공구의 순으로 절삭력이 크게 결핍을 알 수 있었다. 이러한 BMG 기계가공시 소요 절삭력의 거동은 표면 거칠기의 순서 및 거동과도 잘 일치하였다. 양호한 표면 상태를 갖는 BMG의 가공을 위해서는 적절한 공구와 가공조건의 조합을 도출하기 위한 보다 많은 노력이 앞으로 요구된다.

후 기

본 연구는 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것(No.2010-0024639)임. 논문 투고를 위해 수고해 준 김기현씨(현 일진베어링)에게도 감사드립니다. 아울러 본 연구에 사용된 시료는 IMR, Tohoku Univ.의 Prof. A. Inoue그룹에서 제공되었기에 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Inoue, A., 2000, "Stabilization of Metallic Supercooled Liquid and Bulk Amorphous Alloys," *Acta Mater*, Vol. 48, pp. 279~306.
- (2) Wang, W. H., Dong, C. and Shek, C. H., 2004, "Bulk Metallic Glasses," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 44, pp. 45~89.
- (3) Schroers, J., 2009, "Processing of Bulk Metallic Glass," *Adv. Mater.*, Vol. 21, pp. 1~32.
- (4) Shin, H.-S., Jeong, Y.-J., Choi, H.-Y., Kato, H., Inoue, A., 2007, "Joining of Zr-based Bulk Metallic Glasses using the Friction Welding Method," *J. Alloys Compounds*, Vol. 434-435, pp. 102~105.
- (5) Shin, H.-S., Park, J.-S., Jung, Y.-C., Ahn, J. H., Yokoyama, Y., Inoue, A., 2009, "Similar and Dissimilar Friction Welding of Zr-Cu-Al Bulk Glassy Alloys," *J. Alloys Compounds*, Vol. 483, pp. 182~185.
- (6) Shin, H. S., Jung, Y. C., 2010, "Characteristics of Dissimilar Friction Stir Spot Welding of Bulk Metallic Glass to Lightweight Crystalline Metals," *Intermetallics*, Vol. 18, pp. 2000~2004.
- (7) Bakkal, M., Shih, A. J. and Scattergood, R. O., 2004, "Chip Formation, Cutting Forces, and Tool Wear in Turning of Zr-Based Bulk Metallic Glass," *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp. 915~925.
- (8) Bakkal, M., Shih, A. J., Samuel, B., McSpadden, S. B., Liu, C. T. and Scattergood, R. O., 2005, "Light Emission, Chip Morphology, and Burr Formation in Drilling the Bulk Metallic Glass," *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, Issues 7-8, pp. 741~752.
- (9) Fujita, K., Morishita, Y., Nishiyama, N., Kimura, H. and Inoue, A., 2005, "Cutting Characteristics of Bulk Metallic Glass," *Mater. Trans.*, Vol. 46, No. 12 pp.2856~2863.