

BN 첨가 AISI P20 쾌삭강의 개발

Development of BN Added Free-Machining Steel based on AISI P20

황성국¹, 류시형^{1,#}

Sung Kug Hwang¹ and Shi Hyoung Ryu^{1,#}

¹ 전북대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Jeonbuk National University)
Corresponding Author / E-mail: ryu5449@jbn.u.ac.kr, TEL: +82-63-270-2325
ORCID: 0000-0002-6483-2020

KEYWORDS: Free-machining steel (쾌삭강), Cutting force (절삭력), Metal structure (금속 조직), Inclusions (개재물)

As products life cycles are becoming shorter, the reduction of die and mold manufacturing cost and time is becoming more crucial in the machinery, automotive, and electronics industries. Over the past decades, many initiatives have been made to develop high performance free-machining steels without significant degradation of mechanical properties. To develop a modified AISI P20 free-machining steel, we studied the effects of B, N, and S additives on the variations of the cutting forces and metal structures such as grain size, density, and distribution of free-machining inclusions. From a set of experiments, it was observed that an appropriate addition of B and N additives reduces the resulting cutting force by approximately 6.3% and delays the tool wear progress. During the solidification B and N additives form hBN precipitates, with a layered and planar structure, within the steel matrix. The hBN precipitates' weak shear strength results in lowering the required milling force. It is also confirmed that machinability is prominently improved when a large number of micro-sized hBN precipitates are distributed uniformly in the steel matrix. This study could contribute to the development of high performance BN-added free-machining steels for die and mold applications.

Manuscript received: September 25, 2019 / Revised: December 27, 2019 / Accepted: December 31, 2019

1. 서론

소비자들의 기호가 다양해지고 제품의 수명 주기가 짧아짐에 따라, 금형 제조 비용 절감과 납기 단축이 점차 중요해지고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위해 절삭 가공성을 개선한 쾌삭강의 개발에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 쾌삭강은 가공 시 절삭 부하가 낮고 절삭 가공면이 우수하여, 고속 절삭이 가능할 뿐만 아니라 공구 수명을 향상시키는 효과가 있다. 소재의 피삭성을 좋게 하는 원소로 Pb, S, P, Bi, Se, Te, Ca, Mn 등이 대표적으로 알려져 있다.¹ Pb, Bi는 녹는점이 낮은 금속들로서 첨가 시 칩과 공구의 접촉면에서 마찰력을 감소시키는 윤활제로 작용하고, S는 Mn과 결합 비금속성 개재물인 MnS을 형성하여 칩 절단을 용이하도록 하면서 공구면에서 구성인선 형성을 억제하는 것으로 알려져 있다. 그러나, Pb는 환경에 유해하여 사용이 제한적이며, S, Te, Bi 등을 과다 첨가하면 소재를 단조나

압연할 때 표면 크랙의 원인으로 작용하게 된다.^{1,2} 따라서, 이러한 문제점들을 개선하고, 기계적인 성질을 저하시키지 않으면서 환경친화적인 쾌삭강 소재를 개발하는 것이 필요하다.^{3,4} Hwang 등은 플라스틱 금형강으로 널리 사용되고 있는 AISI P20 소재의 절삭성을 개선시킬 목적으로 B, N 및 S 등의 성분을 첨가한 새로운 강종을 개발하고 이에 대한 가공 특성을 조사, 분석하였다.⁵ TiN, TiCN, TiAlN이 코팅된 초경 공구로 날당 이송량 등 절삭 조건을 변화시키면서 각 소재에 대한 공구 마모 및 표면 거칠기 특성을 살펴보았다. 그러나, 여전히 난삭재인 금형용 쾌삭강 개발과 이의 가공성 평가에 대한 연구는 찾기 어려우며, 특히 국내에서는 세라믹스 분야 이외에는 BN을 첨가한 소재 개발이나 절삭성 평가에 대한 연구가 거의 이뤄지지 않고 있다. 본 논문에서는 B, N, S 성분 첨가에 따른 절삭 부하 변동과 금속 조직, 결정 입도, 개재물의 조성분포 등 소재 특성을 중심으로 고찰하였다.

Table 1 Chemical composition of workpiece materials

Classification	Work material		
	P20 Mod. (Ref.)	Ref. +B, N	Ref. +B, N, S
C	0.31	0.33	0.27
Si	0.3	0.29	0.28
Mn	0.88	0.89	0.86
P	0.02	0.018	0.017
S	0.011	0.011	0.017
Al	0.025	0.025	0.028
B	0.0019	0.0092	0.0082
N	0.009	0.023	0.027

2. 실험 방법

2.1 시험편 제작

AISI P20은 플라스틱 사출 금형강으로서 우수한 기계적인 특성과 가공성으로 인해, 자동차용 범퍼, 라디에이터 그릴, 대형 TV와 PC의 후면 덮개와 사무자동화 기기 등의 제작에 널리 활용되는 소재이다.

본 연구에서는 AISI P20을 기본 소재(Ref.)로 하고 기본 소재에 B, N을 첨가한 소재(Ref.+B, N)와 기본 소재에 B, N, S를 첨가한 소재(Ref.+B, N, S) 등 3가지 소재를 진공 유도 용해로 (Vacuum Induction Melting, VIM)를 이용하여 각각 제작하였다.^{6,7} 먼저, 조성비를 맞춘 각 소재를 300 kg의 잉곳으로 응고시킨 후 단련비 4S로 단조하여 사각 블럭을 제작하고, 초음파 탐상 (Ultra Sound Inspection, UT) 시험을 통해 내질이 건전한 부위를 선정하였다. 상용되는 소재와 동일한 기계적 특성을 부여하기 위해 890°C에서 250분 동안 가열한 후 공기 중에서 천천히 냉각시키는 불림(Normalizing) 처리와 850°C에서 200분 동안 가열 후 물속에서 담금질(Quenching) 처리를 하고, 다시 550°C에서 300분 동안 가열한 후 공기 중에서 서냉시키는 뜨임(Tempering) 처리 과정을 차례로 실시하였다.

제작된 3가지 강종의 화학적 조성은 Table 1과 같으며, 항복 강도(YS), 인장 강도(TS), 충격 값, 경도(HB) 등 기계적 특성은 Table 2와 같다. 기본 소재(Ref.) 대비 충격 값만 9%정도 낮게 나타났고, 그 외 기계적 성질들은 대부분 개선되거나 서로 큰 차이가 없어 가공성을 비교하는데 문제가 없음을 알 수 있다.

2.2 실험 장치 및 가공 조건

단조, 열처리 등 시험편 제작 과정에서 발생하는 시험편 표면의 산화층과 표면 불균일이 절삭 과정에서 단속적인 부하 및 충격을 유발하여 소재에 대한 절삭성을 평가하는데 오류를 가져올 수 있으므로, 실험 시작 전에 시험편 표면의 흑피가 완전히 제거될 때까지 예비 절삭을 실시하여 실험 결과의 신뢰성을 확보하였다. 제작된 3가지 강종에 대하여, 수직형 머시닝센터

Table 2 Measured mechanical properties of workpiece materials

Work material	YS (Mpa)	TS (Mpa)	Impact (J)	HB	Grain size
P20 Mod. (Ref.)	810	918	52.9	322	10.6
Ref. +B, N	855	960	48	337	10.7
Ref. +B, N, S	819	937	51	317	10.8

Table 3 Cutting conditions

Parameter	Value
Cutting speed (m/min)	80
Tool federate (mm/min)	306
Spindle speed (rpm)	2550
Axial depth of cut (mm)	5
Feed per tooth (mm/tooth)	0.06

(Mazak, AJV-60/120)에서 TiAlN 코팅된 두 날 초경 엔드밀 (OSG, GS-EDS, Ø10 mm)을 이용하여 건식 절삭 실험을 수행하였다. 가공 중 공구동력계(Kistler, 9257B)와 전하 증폭기(Kistler, 5070A)를 이용하여 3축의 절삭력을 10 kHz 주파수로 획득하였다. 구체적인 절삭 조건은 Table 3과 같다. 제작된 강종의 금속 조직, 결정 입도, 석출물의 성분 및 크기, 분포, 수량 등은 광학 현미경(Leica, DMI5000M)과 주사전자현미경(Tescan, VEGA 3LM)으로 관찰, 분석하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 절삭력

측정된 각 방향의 평균 절삭력 성분과 합력을 Table 4에 나타냈다. 공구 이송 방향의 절삭 분력은 Ref.에 비해 Ref.+B, N의 경우는 7.2% 낮게, Ref.+B, N, S의 경우는 7.5% 낮게 측정되었다. 이송에 수직인 방향의 경우는 Ref.에 비해 Ref.+B, N의 경우는 2.8% 낮게, Ref.+B, N, S의 경우는 오히려 16.1% 높게 측정되었다. 절삭력의 합력은 Ref.의 경우는 992 N, Ref.+B, N의 경우는 930 N으로 Ref. 대비 6.3% 낮았으며, Ref.+B, N, S의 경우가 965 N으로 Ref. 대비 2.7% 낮게 나타났다. 이로부터 Ref.+B, N 경우가 절삭력 측면에서 가장 우수하며, 쾌삭강으로서 유의미한 수준의 절삭 부하 감소 효과가 있다고 판단된다.

$$Resultant = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \tag{1}$$

절삭력이 감소하는 이유는 강의 조직 내에 BN 개재물이 형성되었기 때문으로 판단된다. B와 N은 기지 조직 내에서 BN 화합물을 형성하게 되는데, B와 N은 반데르발스 결합을 하며

Table 4 Comparison of cutting forces

Work material	Average cutting force (N)			
	F_x	F_y	F_z	Resultant
P20 Mod. (Ref.)	-890	428	-89	992
Ref. +B, N	-826	416	-93	930
Ref. +B, N, S	-823	497	-81	965

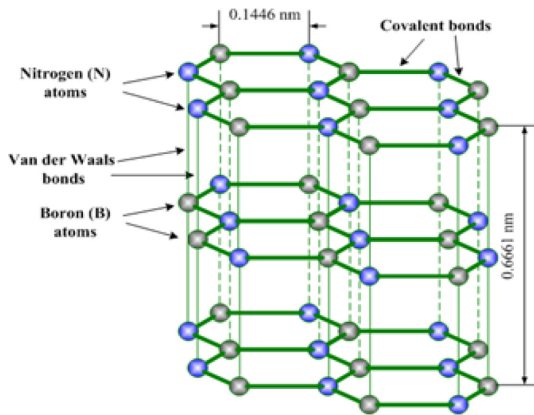


Fig. 1 Hexagonal boron nitride (hBN) structure

Fig. 1과 같이 hBN (Hexagonal Boron Nitride)의 육각판상 구조를 이룬다. 주철에 육각판상 구조를 갖는 흑연이 석출될 경우 가공성이 개선되는 것과 같은 원리로, 절삭 시 평면 층간 단단 파괴가 쉽게 일어나 피삭성이 향상된다고 볼 수 있다.

또한 흑연과 같이 공구와 칩의 경계면에서 윤활 작용을 하여 공구면 마찰을 감소시킴으로써 가공성이 개선되는 것으로 해석할 수 있다.

3.2 소재 분석

소재의 제조 공정이 가공성 평가에 영향을 미치기 때문에 제강, 단조 및 열처리 제조 공정을 동일하게 하여, 각 소재를 제작하였다. 제작된 3가지 강종에 대하여 기계적 성질, 금속 조직과 결정 입도, 개재물의 성분과 분포 등을 비교, 분석하였다.

3.2.1 금속 조직과 경도

소재 조직은 단조 및 열처리 온도, 냉각 온도와 속도, 냉각 매질 등에 의해 결정되고 이에 따라 경도값이 달라진다. 플라스틱 금형강에 일반적으로 적용되는 조건에서 각 소재에 대해 동일하게 열처리 과정을 진행하였다(2.1절). 담금질 처리로 인해 모든 소재의 표면 조직에서 템퍼-마르텐사이트 조직이 관찰되었으며, 내부로 갈수록 템퍼-마르텐사이트, 페라이트, 펄라이트 혼합 조직이 유사한 패턴으로 관찰되었다.

절삭 가공은 경도가 높은 공구를 이용하여 상대적으로 경도가 낮은 소재를 가공하는 과정이므로, 공작물의 경도가 높을수록

Table 5 Comparison of Brinell hardness of workpiece materials

Work material	Brinell hardness (HB)	
	Surface	R/2
P20 Mod. (Ref.)	322	304
Ref. +B, N	337	314
Ref. +B, N, S	317	294

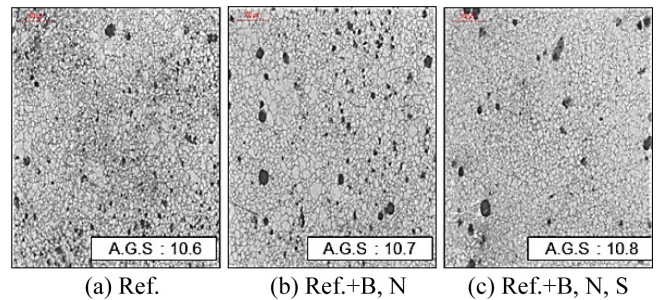


Fig. 2 Comparisons of metal structures and austenitic grain size

가공성은 떨어지고 공구의 마모량이 증가한다. 제작된 소재의 경도값을 표면에서 측정하고 표면과 소재 중심 사이의 중간 지점(R/2)에서 측정한 결과를 Table 5에 나타냈다. 표면과 R/2 지점 모두에서 Ref.+B, N의 경우 경도가 가장 높았으며, Ref.+B, N, S의 경우는 경도가 가장 낮았다. 또한 3가지 소재 모두에서 표면에 비해 R/2 지점의 경도가 낮음을 알 수 있다.

3.2.2 결정 입도

소재의 결정 입도가 조대(Coarse)하면 경화능이 향상되나 결정입계 크랙의 원인이 되며, 인성이 부족해 외력에 의해 결정립 취성 파괴가 발생한다. 또한 공구의 경사면에 칩의 용착이 일어나 노치 마모를 일으키며, 버(Burr)의 발생량을 늘리는 것으로 알려져 있다.⁸ 결정 입도 지수(G)는 시편 1 mm² 단면적에 존재하는 평균 결정립의 수(m)로부터 식(2)에 의해 정의되며, 입도 지수가 크다는 것은 평균 결정립의 크기가 작음을 의미한다.⁹ Fig. 2에서 보듯이, 제작된 소재의 결정 입도 지수(Austenitic Grain Size, AGS)는 모두 10 이상으로 미세하였다.

$$G = 8 \times 2^m \tag{2}$$

3.2.3 BN의 석출

소재의 피삭성을 향상시키기 위해서는 BN 개재물을 기지 금속에 균일하게 분산, 석출시키는 것이 중요하다. BN은 응고 과정의 후반에 석출, 비금속 개재물을 형성한다. BN 개재물을 확인하기 위해 주사전자 현미경(SEM)으로 관찰하였으며, 소재별 결과를 Fig. 3에 나타냈다.

Fig. 3에서 보듯이, Ref. 소재에서는 MnS 개재물만 관찰되었으며,

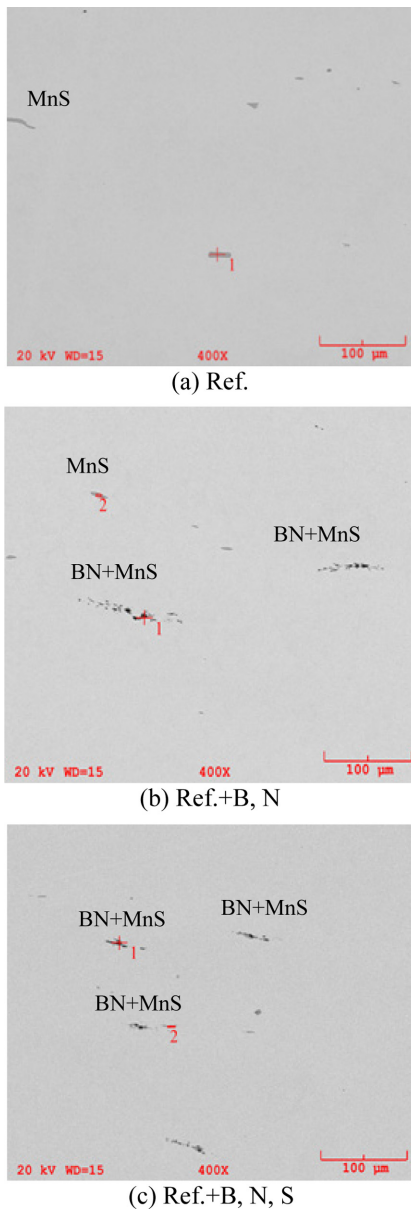


Fig. 3 SEM images of BN and MnS inclusions

Ref.+B, N과 Ref.+B, N, S에서는 MnS와 BN 개재물이 함께 관찰되었다. SEM 사진에서 바탕보다 진한 회색은 MnS이며, 검은색은 BN을 나타낸다. 특이한 점은 MnS는 단독으로 존재하는 경우가 있지만, BN 개재물은 많은 경우에 MnS와 함께 섞여 관찰된다는 것이다. BN과 MnS의 녹는점이 철에 비해 낮아 응고 과정에서 서로 뭉치고 결합하려는 특성이 있는 것으로 생각되거나 정확한 원인 분석을 위해서는 추가 연구가 필요해 보인다.

Fig. 4는 Fig. 3(b)의 중앙부를 EDX 분석한 것으로 BN과 MnS 개재물이 석출되어 혼재되어 있음을 확인할 수 있다.

3.2.4 BN과 MnS의 분포

BN 개재물의 피삭성 향상 효과를 높이기 위해서는 미세한 크기의 개재물이 다량으로 조직 내에 균일하게 분산되어 분포

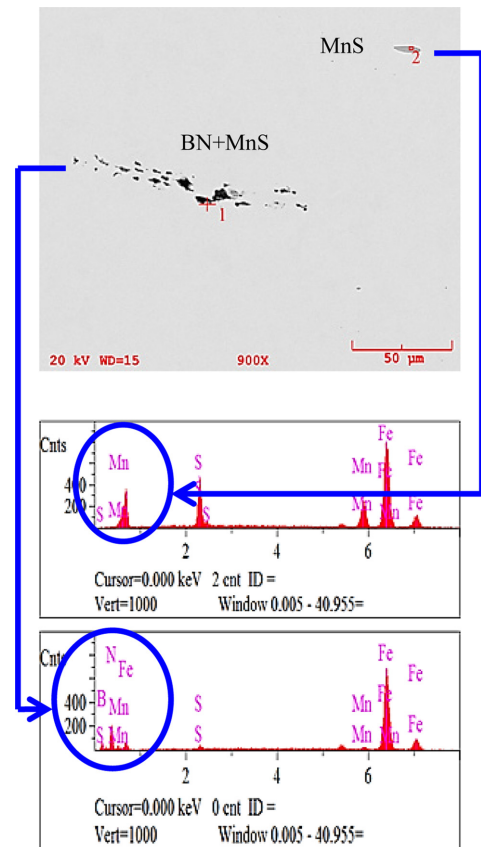


Fig. 4 EDX analysis of BN and MnS inclusions

Table 6 Analysis of BN inclusions

Work material	Properties			
	Number (ea)	Density (No/mm ²)	Average size (μm)	Aspect ratio
P20 Mod. (Ref.)	504	36	2.56	2.02
Ref. +B, N	2128	153	2.28	2.21
Ref. +B, N, S	1928	139	2.26	2.44

되어야 한다. 각 소재별로 석출된 BN 개재물의 크기와 형상, 단위면적당 개수를 Table 6에 나타냈다. B의 함유량이 가장 높은 Ref.+B, N의 소재에서 가장 많은 BN 개재물이 관찰되었으며, 평균 크기는 Ref.+B, N과 Ref.+B, N, S가 유사하게 나타났다. Ref.+B, N, S 소재에 비해 Ref.+B, N 소재를 절삭할 때 절삭력이 작은 이유는 생성되는 BN 개재물의 밀도와 형상 차이로 설명할 수 있다. Fig. 5는 Ref.+B, N 소재에 형성된 BN 개재물의 크기 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 2 μm 크기의 개재물이 47.4%로 가장 많은 분포를 차지하며, 전체의 87.9%가 4 μm 이하의 크기로 미세하게 석출되었음을 확인할 수 있다.

BN의 효과를 얻기 위해서는 금속 조직 내에 10 μm 상당의 BN 개재물이 1 mm²당 50개 이상으로 고르게 분포되어야 한다.

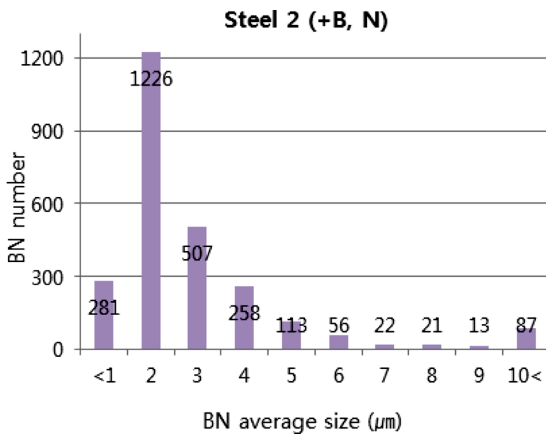
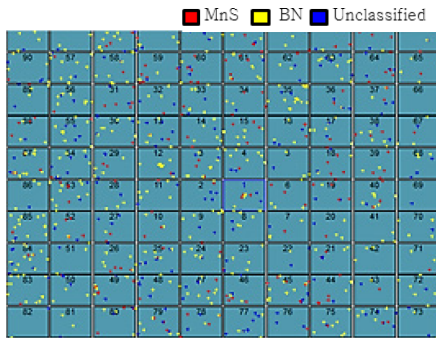
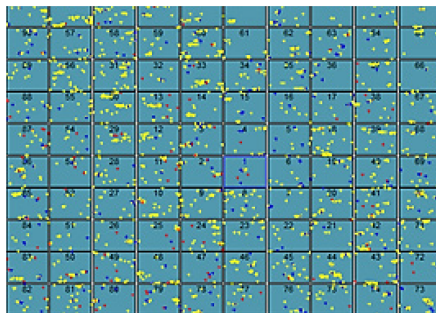


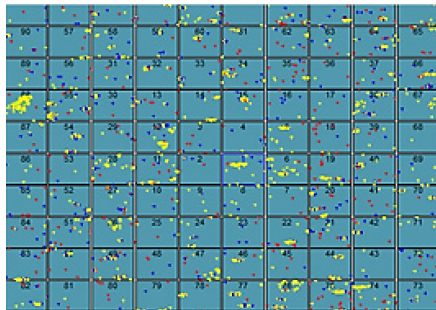
Fig. 5 Size and number distribution of BN inclusions in Ref.+B, N steel



(a) Ref.



(b) Ref.+B, N



(c) Ref.+B, N, S

Fig. 6 Distribution of precipitate materials

Fig. 6은 BN과 MnS의 석출물 분포를 관찰한 결과이다. MnS의 경우는 세 강종 모두에서 큰 차이를 보이지 않지만 BN 개재물의 경우는 1 mm²당 Ref.+B, N에서는 153개와 Ref.+B, N,

S에서는 139개로 차이가 있으며, Ref.+B, N의 경우가 Ref.+B, N, S에 비해 금속 조직 전체에 고르게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 결과적으로, BN 개재물의 높은 밀도와 분포의 균일성이 절삭성 개선에 효과적으로 작용하고 있음을 추정할 수 있다.

4. 결론

플라스틱 금형용 쾌삭강을 개발할 목적으로, AISI P20 금형강에 붕소(B), 질소(N), 황(S) 등을 첨가한 새로운 강종을 제작하고 가공 실험을 통하여 절삭 부하 특성을 살피고 소재 특성을 분석하였다. 붕소와 질소를 적정량 첨가한 경우 기본 소재 대비 절삭력이 6.3% 감소하였다. 소재 분석 결과 4 μm 이하의 미세 BN 개재물이 금속 조직 내에 균일하게 석출되어 있음을 확인하였다. BN 개재물은 흑연과 같은 육각판상 구조를 하고 있어서, 절삭 가공 시 층과 층 사이의 전단 파괴가 쉽게 일어나 절삭 부하를 감소시키는 역할을 한다. 또한, 공구 경사면과 칩 사이의 마찰을 감소시키는 윤활 작용을 하는 것으로 해석된다. B와 N의 첨가가 강도와 경도 등 기계적 물성치 변화에 대한 영향은 미미하지만, 단조 및 열처리 공정에서 가열 온도와 유지 시간을 증대하여 금속 조직 내 BN 개재물을 보다 균질하게 분포하도록 유도함으로써 절삭성 향상 효과를 보다 높일 수 있었다. 본 연구 결과가 효과적인 금형용 BN 쾌삭강 개발의 가능성을 제시하였다고 생각된다.

REFERENCES

1. Lee, Y. M., Cho, S. K., Choi, S. J., Song, T. S., and Park, T. J., "Chip-Tool Friction and Shear Characteristics of Cold Drawn Free Machining Steels in Turning," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 198-203, 1999.
2. Lee, Y., Cho, S., Jang, E., Tae, W., and Shim, B., "Chip Forming Characteristics of Bi-S Free Machining Steel," Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 9, No. 3, pp. 48-54, 2000.
3. Maruzen Publishing Co., Ltd., "Japan Foundry Engineering's Handbook," pp. 603-612, 1986. (in Japanese)
4. Emura, S., Kawajiri, M., Min, X., Yamamoto, S., Sakuraya, K., et al., "Machinability Improvement and its Mechanism in SUS304 Austenitic Stainless Steel by H-BN Addition," Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 98, No. 7, pp. 358-367, 2012.
5. Hwang, S. K., Lee, J. H., and Ryu, S. H., "A Study on Tool Wear and Surface Roughness Characteristics in Milling of AISI P20 Mold Steel with BN," Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 20, No. 4, pp. 420-426, 2018.

6. Choi, J. C. and Park. I. M., "The Role of Boron on the Hardenability of Steel," Journal of the Korean Foundrymen's Society, Vol. 10, No. 3, pp. 202-209, 1990.
7. Murakami, T., Tomita, K., and Shiraga, T., "Development of BN Utilized Free Cutting Steel without Lead Addition for Machine Structural Use," JFE Giho, Vol. 23, pp. 10-16, 2009.
8. Irshad, M. A., "The Effect of Prior Austenite Grain Size on the Machinability of a Pre-Hardened Mold Steel," M.S. Thesis, Karlstad University, 2011.
9. KS D 0205, "Steel-Micrographic Determination of the Ferritic or Austenitic Grain Size," 2002.

**Sung Kug Hwang**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Jeonbuk National University. His research interests are mechanical machining, materials and machinability.

E-mail: 892.joseph@gmail.com

**Shi Hyung Ryu**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Jeonbuk National University. His research area includes micro/nano manufacturing, precision machining and CAD/CAM.

E-mail: ryu5449@jbnu.ac.kr