

초정밀 자기연마 공정에 탄소나노튜브 입자의 적용에 관한 연구

곽태경*, 곽재섭⁺

(논문접수일 2010. 11. 26, 심사완료일 2011. 02. 14)

The Study on the Application of CNT Particle in High-Precision Magnetic Abrasive Polishing Process

Tae-Kyung Kwak*, Jae-Seob Kwak⁺

Abstract

In this study, new abrasives that were composed of iron powder and carbon nanotube (CNT) particle were attempted to be abrasives for magnetic abrasive polishing. Because the CNT particles itself are very small ones with high hardness and magnetic strength, these properties are effective for magnetic abrasive polishing of nonmagnetic materials. As an experimental result for evaluating the machining characteristics in magnetic abrasive polishing, the CNT particles showed better performance than the conventional abrasives such as Fe and CBN powder.

Key Words : Carbon nano tube(탄소나노튜브), Magnetic abrasive polishing(자기연마), Surface roughness(표면 거칠기)

1. 서론

최근 전자제품 및 광학제품 등의 발달과 함께 마이크로/나노 단위의 고품질 정밀부품의 수요가 급증하고 이에 따라 초정밀 가공이 가공분야 뿐만 아니라 과학 전 분야의 기술적 방향을 획기적으로 이끌 수 있을 것으로 기대된다. 1991년 Iijima에 의해 발견된 탄소나노튜브는 우수한 기계적 특성, 전기적 선택성, 뛰어난 전계방출 특성, 고효율의 수소저장매체 특성 등을 지니며 현존하는 물질 중 결함이 거의 없는 완벽한 신소재로 알려져 있고 첨단소재로서의 중요성이 대두되고 있다⁽¹⁾. 탄소나노튜브의 탄성률은 강철의 7배, 인장강도는 강철의 100배, 전기전도도는 구리선의 1000배 그리고 열전도도는 다이아몬드 2배 정도로 여러 분야에 활용 가능하다고 판단된다. 특히, 기계가공 분야에 있어서 탄소나노튜브의 기계적 특성인 고강

도, 고경도 그리고 낮은 밀도 때문에 연마재료의 사용도 가능하다고 평가되어진다.

기존 연구자들은 자기연마의 절삭력 향상과 최적화에 초점을 맞추고 있다. 그러나 자기연마에서 연마입자의 크기가 가공면의 거칠기에 큰 영향을 미치므로, 궁극적인 초정밀가공을 위해 입자크기에 따른 가공능력분석이 필요하다⁽²⁾.

정밀 가공기술 중 하나인 자기연마법은 전자석으로 구성된 인덕터(Inductor)와 가공물 사이에 자성입자와 연마입자를 혼합해서 슬러리 형태로 공급하면 발생된 자기장에 의해 공급된 혼합입자들이 자력선 방향으로 정렬하여 브러쉬(Brush) 형태의 공구가 형성된다⁽³⁾. 이러한 브러쉬가 금속표면을 연마하는 방법으로 공구의 형상이 유연성을 가진다.

본 연구에서는 자기연마 가공에서 연마입자로서의 탄소나노튜브의 성능을 평가하기 위해 다른 연마입자들과 비교하여 탄

* 부경대학교 대학원

⁺ 교신저자, 부경대학교 기계공학과 (jskwak5@pknu.ac.kr)
주소: 608-739 부산시 남구 용당동 산100번지

소나노튜브의 연마입자로서의 가능성을 평가하고자 한다.

2. 이론

2.1 탄소나노튜브(Carbon nanotube)

탄소나노튜브는 흑연판(Graphite sheet)이 둥글게 말린 형태이고, 그 직경이 나노미터 수준으로 극히 작은 영역의 물질이다. 탄소나노튜브의 구조에 따라서 한 겹으로 구성된 단일벽 탄소나노튜브(Single-walled carbon nanotube), 두 겹의 탄소나노튜브로 이루어진 이중벽 탄소나노튜브(Double-walled carbon nanotube) 그리고 여러 겹의 탄소나노튜브가 동심원 상을 이루는 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled carbon nanotube)로 크게 분류가 가능하며, 단일벽 탄소나노튜브들의 상호 인력으로 모인 다발형 나노튜브(Roped nanotube)도 존재한다. 탄소나노튜브는 말린 각도에 따라 Armchair, Zigzag, Chiral 타입으로 나눌 수 있는데 이 각도에 따라 탄소나노튜브의 특성이 다르다. Armchair 나노튜브는 금속성을, Zigzag 나노튜브는 갭이 작은 반도체이거나 반금속성 성질을, Chiral 나노튜브는 반도체의 특성을 띤다. 그리고 단일벽 탄소나노튜브가 전기전도성 및 열전도성이 매우 우수한 반면 다중벽 탄소나노튜브는 전기 및 열적 특성이 단일벽 탄소나노튜브와 비교해서 다소 떨어지지만 기계적 특성이 우수하고 제조가 다소 용이해서 다양한 분야에 넓게 사용되고 있다. 탄소나노튜브는 흑연판과 같이 1개의 탄소가 주변의 동일평면상에 있는 3개의 탄소와 결합하는 sp^2 구조로 sp^3 의 결합 구조를 가지는 다이아몬드보다 결합강도가 강하다. 위와 같은 성질에 따라서 탄소나노튜브는 매우 높은 강성과 강도를 나타내고 아주 좋은 기계적 물성을 나타낸다. Table 1에는 자기연마에 사용되는 몇몇 연마제의 특성을 비교했다. Table 1에서처럼 탄소나노튜브는 다른 연마제와 비교해서 매우 작은 직경과 높은 강도 그리고 낮은 밀도를 가지고 있다는 것을 확인할 수 있다⁽⁴⁻⁷⁾.

Fig. 1은 한화나노텍의 Thermal CVD공법으로 제조된 다중벽 탄소나노튜브(CM-95)를 SEM(Scanning electron microscope)으로 촬영한 것이다. Fig. 2는 탄소나노튜브의 라만분광법(Raman spectroscopy)으로 진동모드에 따른 에너지에 대

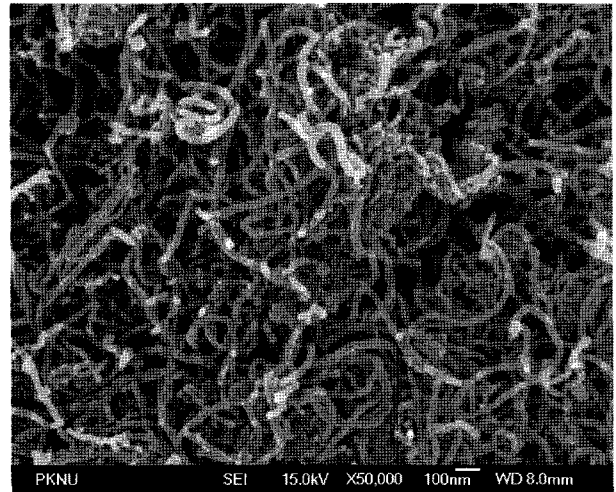


Fig. 1 SEM image of CNT

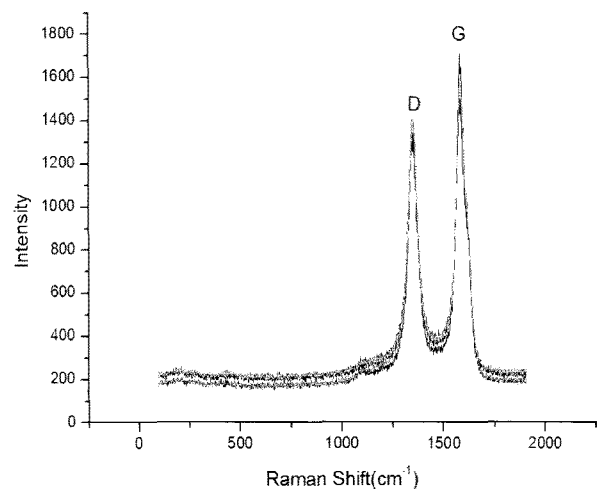


Fig. 2 Raman spectroscopy (Hanwha co., CM95)

한 정보이다. G선은 흑연 결정체로 흑연화된 탄소나노튜브를 나타내고, D선은 탄소나노튜브 이외의 탄소질의 불순물이나 구조적 결함에 의한 피크가 나타났다. 그러므로 CVD공법으로 제조된 다중벽 탄소나노튜브는 우수한 전기전도, 열전도도, 그리고 높은 기계적 강도를 가진다.

2.2 자기연마

Fig. 3은 자기연마 개략도를 나타낸 것이다. 자기연마 헤더는 전자석으로 구성되어있고 이 전자석에 전류를 부가하면 자기력이 발생한다. 이 때 자성체와 연마입자를 용융하여 분쇄한 일체형 입자나 자성체와 연마입자를 일정한 비율로 혼합한 입자를 가공물과 전자석 사이에 공급하게 되면 전자석인 자기연마 헤더에 자력선 방향으로 입자들이 사슬구조로 정렬되고 이 입자들은 자기연마에서 공구로 사용되는 브러시의 형상을 생성한다. 이렇게 형성된 브러시 형상의 공구는 가공물 표면에

Table 1 Properties of abrasive used in magnetic abrasive polishing

	Diameter (μm)	Strength (GPa)	Density (g/cm ³)
Boron	140	3.3~4.0	2.3~2.5
SiC	15~145	2.9~4.0	2.5~3.5
Al ₂ O ₃	20	1.5	3.9
CNT	0.01~0.04	20~50	1.6

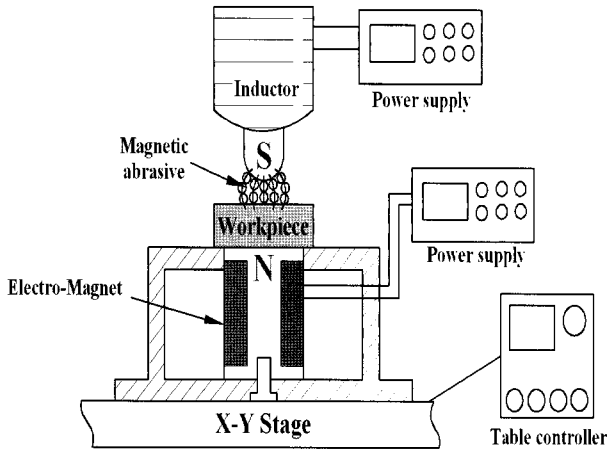


Fig. 3 Schematic diagram of magnetic abrasive polishing

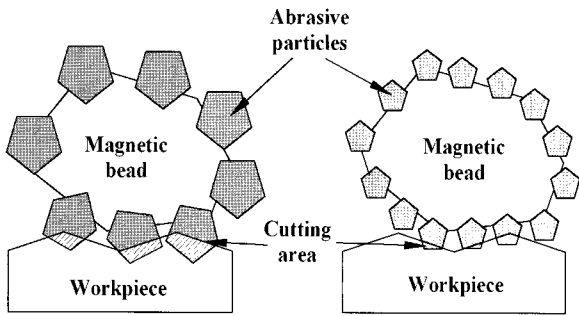


Fig. 4 Mechanism of polishing according to size of abrasives

따른 유연성이 뛰어나기 때문에 기존의 정밀 가공분야에서는 가공이 어려웠던 일정하지 않은 곡면의 표면을 가지는 가공물의 가공이 가능하다⁽⁸⁾.

하지만 자기연마는 자성체인 가공물을 가공할 때 비자성체를 가공할 때 효율이 현저하게 감소하는 단점을 나타낸다. 이런 단점을 극복하기 위해서는 가공물 아래에 영구자석이 나 전자석으로 자기력을 향상 시켜주는 방법이 있다. 또한 전자석을 배열하여 극성제어가 가능한 자기연마 테이블을 이용한 비자성체 가공물의 가공효율 증가에 대한 연구도 활발히 진행 중이다.

자기연마에서 요구되는 표면 거칠기를 얻기 위해 연마입자의 크기는 매우 중요한 인자이다. 연마입자의 크기가 큰 경우보다 연마입자의 크기가 작은 경우에 가공 후 표면거칠기가 더 향상되었다⁽⁹⁾. Fig. 4는 자기연마의 입자 크기에 따른 메커니즘을 나타낸다. 즉, 연마입자의 크기가 절삭량과 표면거칠기에 미치는 영향을 나타낸 것으로 연마입자가 큰 경우에는 연마입자가 가공하는 절삭 면적은 크지만 정밀한 가공이 어렵다. 이에 반해서 연마입자가 작은 경우에는 절삭 면적이 작아서 절삭량은 작지만 정밀도가 높은 표면을 얻을 수 있다는 장점이 있다.

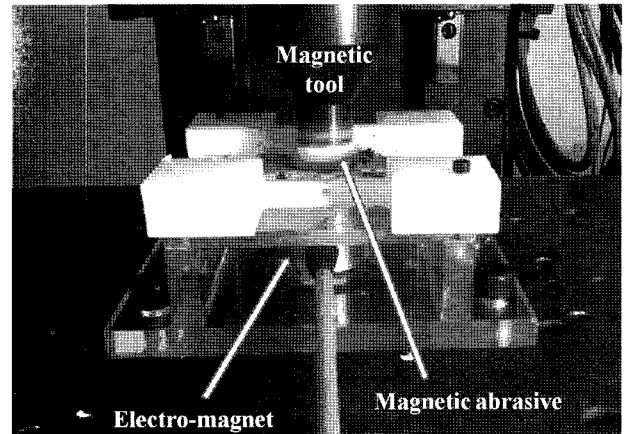


Fig. 5 Experimental setup of magnetic abrasive polishing

3. 실험의 구성 및 방법

3.1 실험장치의 구성

초정밀 자기연마를 수행하기 위해 본 연구에서는 Fig. 5와 같은 장치를 구성하였다. 코일에 의해 전자석 역할을 하는 자기연마 공구와 여기에 전류를 공급해주는 전원공급장치, 그리고 자기연마공구를 회전시키는 모터, 테이블을 이송 할 수 있는 X-Y이송장치로 구성되어 있다. 또한 비자성체 가공물의 자기연마에서 가공효율 저하의 단점을 보완하기 위해 가공물 아래에 전자석을 설치하였다. 가공물은 투자율을 고려해 플라스틱 지그를 사용하여 전자석위에 고정하였다.

3.2 실험방법

자기연마 공정에서 탄소나노튜브의 연마입자로서 활용 가능성을 평가하기 위해 기존의 자기연마공정에서 최적화된 조건을 공통으로 사용 하였으며, Table 2에 나타내었다.

본 연구에 사용되어진 시편은 CNT의 고강도, 고경도 특성을 고려하여 AISI316을 사용하였다. 실험에 우선하여 시편은 CBN(#8000)입자로 20분간 초기가공을 실시하고, 초음파 세척기로 클리닝하였다. Table 3은 각 실험에 적용된 자성입자와 연마입자에 대한 구성을 나타내고 있다. Table 4는 자성입자 및 연마제의 입자크기를 나타내었다. 우선 연마제의 입자 크기가 가공물의 표면거칠기에 미치는 영향을 고려하여 기존 CBN 입자와 비교실험을 하였고, 추가적으로 연마제의 특성상 미소량의 절삭을 수행하므로 자성입자의 영향을 분석하기 위해 자성입자로서 철 입자와 코발트 입자를 비교 실험하였다. AFM의 표면거칠기 측정은 각 시편의 동일한 방향과 거리로 측정하였다.

Table 2 Experimental conditions

Items	Conditions
Current of inductor	2.5A
Current of electro-magnet	0.12A
Working gap	1.5mm
Spindle speed	900rpm
Traverse speed	20mm/min
Working time	40min
Workpiece	AISI316

Table 3 Type of magnetic abrasive in experimental

Items	Fe/Co	Abrasive	Medium
EXP1	Fe	-	Gel
EXP2	Fe	CBN	Gel
EXP3	Fe	CNT	Gel
EXP4	Co	CNT	Gel

Table 4 Particle size of magnetic abrasive polishing

	Fe	Co	CBN	CNT
Size(μm)	150	3	1~2	0.003~0.005

4. 실험결과 및 분석

실험은 마무리가공에서 연마입자로서의 CNT 절삭능력을 분석하기 위해 Fig. 6과 같이 표면형상을 AFM으로 측정하였다. Fig. 6(a)는 연마입자 없이 자성입자 Fe만으로 실험하였을 때이다. Fe입자가 상대표면을 파내어 끝의 양쪽이 융기된 형상으로 보이며, 이러한 플라우잉(Plowing)으로 인하여 3차원 형상은 부드럽게 나왔지만 표면거칠기 값은 나빠진 것으로 사료되어진다. 또한 Fig. 6(b)와 (c)는 Fe+CBN과 Fe+CNT의 AFM 3차원 표면형상으로 Fig. 6(a)와 비교했을 때 표면형상이 더 평탄한 것을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 6(b)와 (c)를 비교했을 때 (b)는 전체적으로 표면형상이 평탄하나 돌기의 편차가 크고, (c)는 (b)에 비해서 표면형상이 덜 평탄하지만 돌기의 편차가 작다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 CNT 연마입자로 가공 하였을 때 자성입자에 따른 3차원 표면형상을 나타냈다. 자성입자에 따른 중심선 평균 표면거칠기 값은 철에 비해 코발트를 사용하였을 때 더 좋은 표면거칠기를 얻었고, 그 값은 Fe+CBN과 거의 동일한 96% 수준이었다. 이것은 Fig. 8의 SEM사진에서 나타나듯이 Fe입자와 Co입자를 비교했을 때 Fe입자는 자성입자 대 연마입자 비가 너무 커 자성입자가 연마입자를 덮어 연마입자 절삭날 수가 작업표면에서 감소되는 경향이 생기고 그 원인으로 절삭량이 감

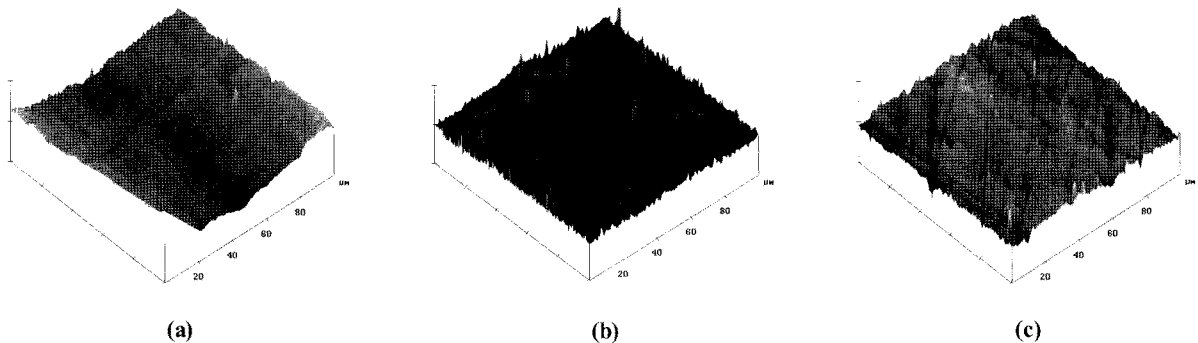


Fig. 6 Comparing to surface topography using AFM (a) only Fe-powder, (b) Fe-powder + CBN, (c) Fe-powder + CNT

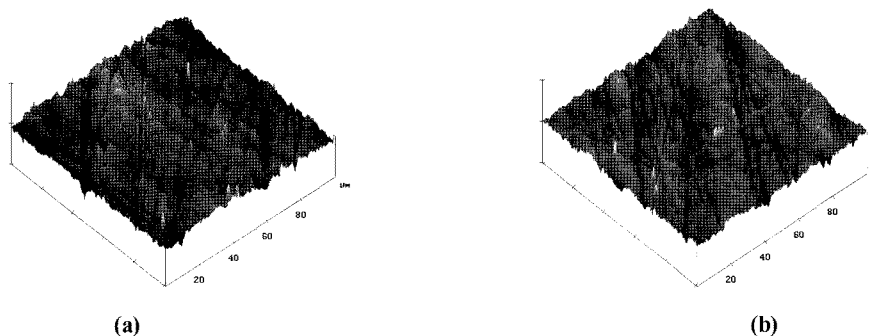


Fig. 7 Comparing to surface topography using AFM (a) Fe-powder + CNT, (b) Co-powder + CNT

소한 것으로 사료되어진다.

Fig. 9는 AFM에 의한 중심선 평균 표면거칠기 값을 나타낸 것으로 Fe+CBN의 표면거칠기가 가장 좋았지만, Fe+CNT 또한, CBN에 비해 80%이상의 표면거칠기 값을 나타냈다. 이는 Fig. 10과 같이 CBN의 입자에 비해 CNT입자가 매우 작고 절삭량 또한 작아서 표면형상이 CBN을 사용했을 때 더 좋은 표면형상을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

그러므로 CNT연마입자로 가공한 경우에도 CBN 연마입자와 유사한 표면거칠기를 나타내므로 CNT는 연마재로서 충분한 가능성이 있다고 판단된다.

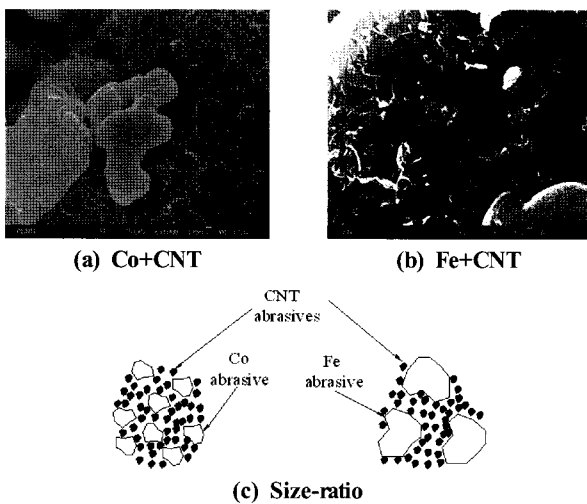


Fig. 8 SEM micrograph of mixed abrasive particles

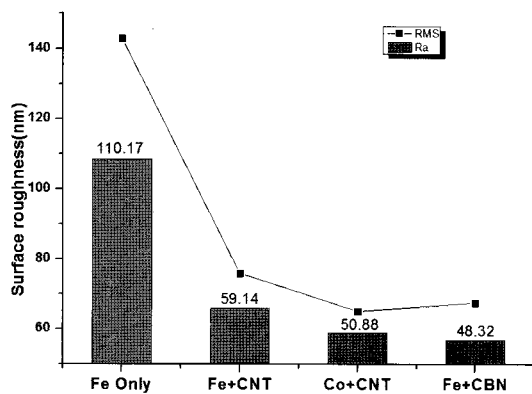


Fig. 9 Comparing to surface roughness according to experimental conditions

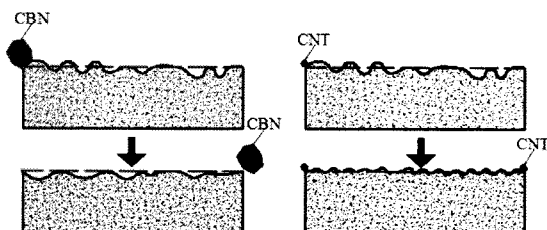


Fig. 10 Material removal from the workpiece surface

5. 결론

본 논문에서는 자기연마 가공에서 연마입자로서의 탄소나노튜브의 성능을 평가하기 위해 실험을 통해 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 각 실험의 평균 표면거칠기 값을 비교했을 때 Fe+CBN의 경우 Ra 값은 48.32nm로 가장 좋은 값을 가졌고, Fe+CBN에 비해 Fe+CNT는 59.14nm로 80%이상의 Ra 값을 Co+CNT는 50.88nm로 96% 수준의 Ra 값을 나타냈다.
- (2) Fe+CBN과 Co+CNT를 비교할 때 CBN 입자는 CNT 입자에 비해 입자의 크기가 커서 절삭량은 많지만 가공 후 표면의 돌기 편차가 커서 각각의 Ra 값은 48.32nm와 50.88nm로 유사하게 나타났다.
- (3) 또한 연마입자 CNT의 자성입자 크기에 따른 가공실험에서 Fe입자는 Co입자에 비해 자성입자 대 연마입자의 비가 너무 커서 절삭량이 감소하는 것으로 사료 된다.
- (4) CNT연마입자로 가공한 경우에 CBN 연마입자와 유사한 표면거칠기를 나타내므로 CNT는 연마재로서 충분한 가능성이 있다고 판단된다.

후기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No. 2010-0007932).

참고 문헌

- (1) Ijiima, S., 1991, "Helical Microtubules of Graphitic Carbon," *Nature*, Vol. 354, pp. 56~58.
- (2) Lee, Y. C., Anzai, M., and Nakagawa, T., 1996, "A Study on Improving the Efficiency of Magnetic Abrasive Polishing for Die & Mold Surfaces," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 59~65.
- (3) Kim, S. O., You, M. H., and Kwak, J. S., 2008, "Performance Evaluation of Magnetic Abrasive Polishing by Design of Experiments," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 4, pp. 35~41.
- (4) Treacy, M. M. J., Ebbesen, T. W., and Gilson, J. M., 1996, "Exceptionally High Young's Modulus Observed for Individual Carbon Nanotubes," *Nature*, Vol. 381, pp. 678~680.

- (5) Krishnan, A., Dujardin, E., Ebbesen, T. W., Yianilos, P. N., and Treacy, M. M. J., 1998, "Young's Modulus of Single-walled Nanotubes," *Phys. Rev. B.*, Vol. 58, No. 20, pp. 14013~14019.
- (6) Wong, E. W., Sheehan, P. E., and Lieber, C. M., 1997, "Nanobeam Mechanics: Elasticity, Strength, and Toughness of Nanorods and Nanotubes," *Science*, Vol. 277, No. 5334, pp. 1971~1975.
- (7) Yu, M. F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F., and Ruoff, R. S., 2000, "Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load," *Science*, Vol. 287, No. 5453, pp. 637~640.
- (8) Kwak, T. K., Kim, S. O., and Kwak, J. S., 2010, "Compound Machining of Milling and Magnetic Abrasive Polishing for Free Form Surface," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 4, pp. 455~461.
- (9) Cho, J. R., Yang, S. C., and Jung, Y. G., 2006, "A Study on the Improvement of Performance for High Speed Cutting Tool using Magnetic Fluid Polishing Technique," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 1, pp. 32~38.