

슬러지 연마입자를 이용한 이음매 없는 스테인리스강 튜브 내면의 자기연마

김 희 남^{*1)} · 윤 여 권²⁾ · 김 상 백²⁾ · 최 희 성²⁾

명지대학교 기계공학과¹⁾ · 명지대학교 대학원²⁾

Magnetic Abrasive Polishing for Internal Face of Seamless Stainless Steel Tube Using Sludge Abrasive Grain

Heenam Kim^{*1)} · Yeokwon Yun²⁾ · Sangbaek Kim²⁾ · Heesung Choi²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Myongji University, Gyeonggi 449-728, Korea

²⁾Graduate school of Mechanical Engineering, Myongji University, Gyeonggi 449-728, Korea

(Received 27 April 2004 / Accepted 23 August 2004)

Abstract : In this paper deals with behavior of the magnetic abrasive using sludge on polishing characteristics in a new internal finishing of seamless stainless steel tube applying magnetic abrasive polishing. The magnetic abrasive using sludge-abrasive grain WA and GC used to resin bond fabricated low temperature. And sludge of magnetic abrasive powder fabricated that sludge was crused into 200 mesh. The previous research have made an experiment in the static state the movement of magnetic abrasive grain is nevertheless in the dynamic state. In this paper, We could have investigated into the changes of the movement of magnetic abrasive grain. In reference to this result, we could have made the experiment which is set under the condition of the magnetic flux density, polishing velocity according to the form of magnetic brush.

Key words : Magnetic abrasive(자기 연마제), Granular structure(과립 구조), Magnetic flux density(자속 밀도), Polishing velocity(연마 속도), WA(White Alumina), GC(Green Carborundum)

1. 서론

현대 산업의 고도화 추세에 따라 반도체를 비롯한 의료 및 자동차 산업분야에 사용되는 부품의 고정도가 요구되면서 기존에 공구와 가공물이 직접 접촉하면서 절삭하는 가공방법으로는 절삭력에 의한 변형과 마찰열 등으로 인하여 고정도 가공의 실현에 어려움이 생기게 되었다. 그리고 내연기관에 사용된 부품의 내면을 기존의 기계적 가공방법으로 가공할 경우 공작물 표면에 미소한 가공흔적이 남

게 되어 표면의 청정도가 떨어지는 문제점이 발생하게 된다.

일반적인 연삭가공¹⁾은 숫돌형태인 공구가 공작물에 직접 연삭력이 가압되는 가공으로서 트러블이 발생할 경우 숫돌의 파괴로 인한 산업재해가 발생될 수 있으며, 연삭열의 발생을 억제하기 위해 연삭유를 사용해야 함으로 인하여 산업위생상 고정정용 부품의 고품위 표면을 얻기 위한 가공으로는 적합하지 않다.

이러한 산업안전의 문제 해결과 함께 보다 더 우수한 표면의 품위를 얻기 위한 가공법중의 하나가 자기연마 가공법이다. 자기연마법은 자기력에 의해

*To whom correspondence should be addressed.
hnkim@mju.ac.kr

자기연마재를 끌어당김으로서 가공물을 연마하는 방법으로 자기연마장치 및 연마재에 관한 많은 연구들²⁻⁶⁾이 이루어져 왔으며, 이들은 주로 자기력과 자극의 배치 등이 자기연마효율에 미치는 영향과 고경도 재료인 세라믹이나 초경합금 등을 연마하기 위한 다이아몬드, CBN 등을 이용하여 연마재를 제조하거나 산화철과 알루미늄을 화학반응으로 제조하는 방법에 관한 연구이었으며, 가공물 표면의 청정 가공과 고정밀도를 실현하기 위한 다양한 연구⁷⁻¹²⁾가 진행되어 왔다. 이러한 자기연마 기술에서 자기연마재는 가공의 주체로써 가공정밀도와 청정도를 좌우하며, 이러한 자기연마재를 이용한 효과적인 가공방식의 개발이 핵심요소이다. 본 실험에서는 제강공정에서 생성되어 산업폐기물로 버려지는 슬러지를 자성체로 사용하여 WA, GC입자를 저온에서 합성하여 제조한 자기연마재를 이용하여 이음매 없는 스테인리스강 튜브 내면에 대한 자기연마 가공을 수행하였다. 특히 기존의 자기연마법에서 주로 사용한 연마입자인 WA 등을 이용하여 화학적인 방법으로 제조한 자성입자 또는 다이아몬드와 CBN과 같은 고가의 연마입자를 대신하여 산업폐기물로 버려지는 슬러지를 자성체로 사용한 자기연마재를 사용함으로써 자원의 활용도를 높일 수 있다. 본 연구에서는 기존의 범용 공작기계에 자기력 발생장치를 부착한 자기연마기구를 사용함으로써 장비의 활용도와 안전성을 높이고, 저가의 연마재 입자를 이용한 자기연마 가공에 있어서 효율적인 가공조건을 찾는 데 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 자기력 발생 장치

전자석에 의한 자기력 발생장치는 현장에서의 적용이 비교적 간단하며, 자기력의 조절이 용이하여 자기력의 크기를 다양하게 변화시키면서 연마재의 자기적 특성을 고찰할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 사용한 자기력 발생장치는 D마그네틱(주)에서 제작한 고구배 전자석으로서 최대 자속밀도를 1.5 Tesla까지 발생시킬 수 있도록 설계·제작되었다. 그리고 자극과 공작물 사이의 공극(air gap)을 자유롭게 조절하기 위해서 자극이 시편의 직각방향으

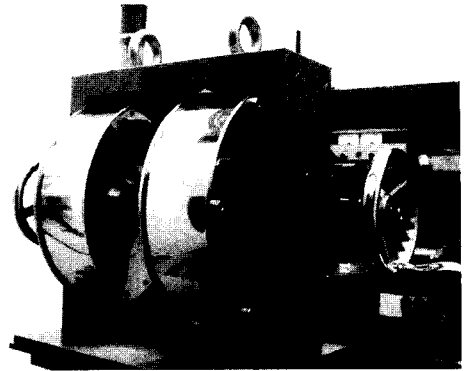


Fig. 1 Photograph magnetic force generator

로 직선운동이 가능한 구조로 이루어져 있다. 자기연마 실험시 발생하는 자기력은 PHYWE SYSTEME GMBH사의 Cobra3 Digital Gauss Meter로 측정하여 소요의 세기로 조절하였다. Fig. 1은 본 자기연마 실험에 사용된 자기력 발생장치를 보여준다.

2.2 자기연마 장치

본 자기연마 가공 실험을 위해 설계·제작된 자기연마 기구를 화천기계(주)에서 생산한 WHL-380L 범용선반에 부착하여 자기연마 실험을 수행하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 자기연마 장치의 개략도이다.

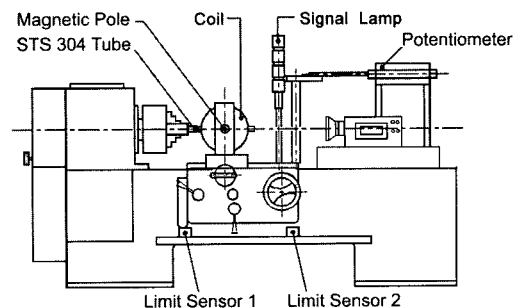


Fig. 2 Schematic of experimental set up

2.3 자기연마재

본 실험에서는 슬러지를 자성체로 하여 1,000 mesh의 WA와 GC 입자를 연마재로 이용하여 합성 제조한 평균 입도 30mesh 크기의 과립형태로 자기연마재를 사용하여 자기연마를 수행하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 자기연마재의 구성비율을 나

Table 1 Compositions of the mixture rate

Magnetic material	Abrasive grain	Composition	Resin (ml/g)	Synthesis temperature (°C)	Synthesis time (min)	Average particle size (mesh)
Sludge (Fe ₃ O ₄)	WA GC	Sludge : W A = 1 : 1 Sludge : G C = 1 : 1	0.20	185	120	30

Table 2 Polishing conditions

Workpiece	Polishing speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Magnetic flux density (G)	Pass number	Grain type
Seamless stainless steel tube (STS304)	31.8	0.15	1,500	5 10	Granular structure
	54.9		3,000		
	63.6		6,000		

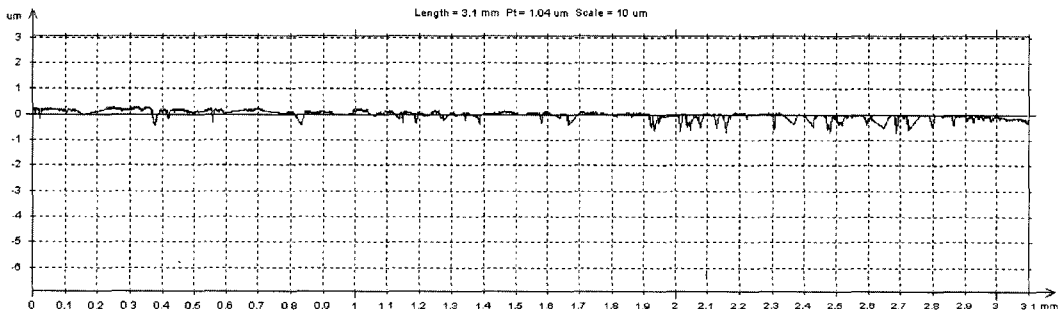


Fig. 3 Surface roughness curve of internal face in seamless stainless steel tube(STS304)

타내었다.

2.4 자기연마 시편

본 실험에 사용된 시편의 재료는 자동화 시스템을 구성하는 공기압 기기 부품의 실린더에 많이 이용되는 스테인리스강 튜브(STS304)를 사용하였다.

연마가공 전의 튜브 내면의 표면 거칠기는 Fig. 3 과 같은 형상으로서 표면 거칠기 값은 평균 0.08 μm Ra ~ 0.09 μm Ra의 범위에 존재하고, 시편의 형상과 치수는 Fig. 4와 같다.

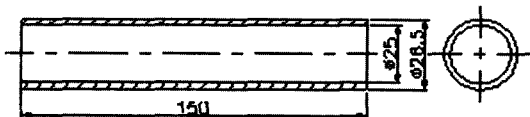


Fig. 4 Geometry and dimension of specimen

2.5 실험방법

슬러지와 WA 및 GC 연마입자를 합성하여 제조한 자기연마재를 이용하여 이음매 없는 스테인리스

강 튜브 내면을 자기연마 가공할 때, 연마입자의 성분 및 연마속도, 자속밀도 등이 가공정도를 비롯한 표면거칠기 변화 및 자기연마재의 거동 등 자기연마 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Table 2와 같은 자기연마 실험조건을 설정하였다. 그리고 Fig. 4와 같은 이음매 없는 스테인리스강 튜브를 범용선반에 부착된 자기연마 기구에 장착한 후 파이프 외면과 자극봉 사이의 공극을 2 mm로 설정한 후 Table 2와 같은 가공조건으로 자기연마 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 자기연마 조건 변화에 따른 표면거칠기

연마속도와 자속밀도 등의 연마조건이 튜브 내면의 표면거칠기 변화에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Table 2와 같이 가공조건을 설정하였으며, 또한 가공시간 및 회수에 따른 거칠기 변화를 고찰하고자 가공회수를 각각 5회, 10회로 하여 자기연마 가공을 수행하였다. 그리고 연마입자의 종류에 따

른 표면거칠기 변화를 비교하였다. Fig. 5는 WA와 GC입자를 사용하여 평균 30mesh 크기의 파립구조로 제조한 자기연마재로 가공하였을 경우에 연마조건 변화에 따른 튜브 내표면 거칠기를 보여주고 있다. Fig. 5의 (a)에서 볼 수 있는 바와 같이 5회 왕복 가공할 경우 자속밀도 1500G에서 연마속도 63.6m/min일 때, 표면거칠기가 가장 좋은 것을 볼 수 있으며, 3000G, 6000G 순으로 표면이 거칠어지는 것을 알 수 있다. 이는 자속밀도가 증가한다고 해서 반드시 표면거칠기가 좋아지는 것은 아니며, 작은 자속 밀도에서도 링(ring)거동¹¹⁾이 발생하지 않는 연마속도로 가공하면 상대운동을 유지하면서 연마입자의 자생대체 거동이 활발하여 가공정도가 우수해져 표면거칠기가 좋아짐을 의미한다. 10회 왕복 가공시

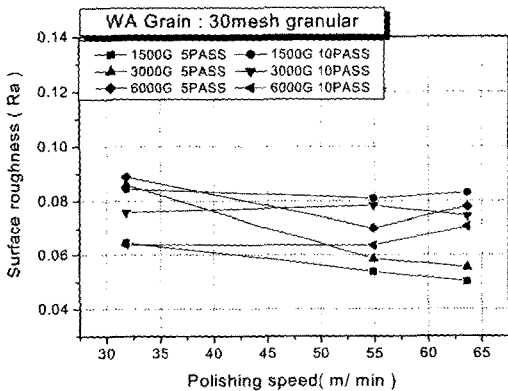
연마속도가 31.8 m/min일 때, 자속밀도 6000G에서 표면거칠기가 가장 좋으며, 3000G, 1500G 순으로 커짐을 알 수 있다. 이는 6,000G의 자속밀도를 통해 생성된 강한 자기 브러시(brush)의 자생교반이 활발히 진행되어 새로운 연마입자로 대체되면서 많은 횡수로 가공됨으로써 가공정도가 높아짐에 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 5의 (b)는 GC를 연마입자로 사용하여 제조한 자기연마재로 가공한 표면 거칠기 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 WA 연마입자를 사용한 경우보다 GC 연마입자의 가공정도가 저하되는 경향을 나타내는 것으로 보아 GC입자가 WA입자 보다 거칠게 가공하여 거칠기 값이 다소 떨어지는 것으로 여겨진다.

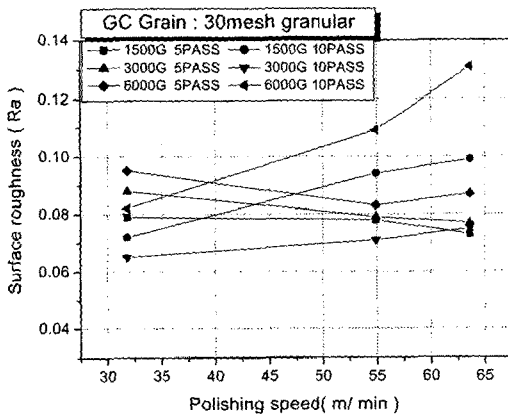
이러한 현상은 GC입자가 WA입자보다 경도와 취성이 크고, 예리한 절인으로 인하여 튜브 내측 표면에 깊은 골 형태의 거칠기를 생성시킴에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 5의 (b)에서 5회 왕복 가공시 연마속도가 31.8m/min일 때, 자속밀도가 1500G, 3000G, 6000G로 높아질수록 표면거칠기가 나빠지는 경향을 볼 수 있는데, 이는 예리하고 경도가 높은 GC 입자가 강한 자기력에 의해 튜브 내표면으로 작용하는 연마력에 의해 깊은 골 형태의 표면구조를 생성시킴에 의한 것이다. 그리고 5회 왕복가공 할 경우보다 10회 왕복가공 할 경우, 연마속도가 증가할수록 표면이 현저히 거칠어지는 경향을 나타내는데, 이러한 경우에도 강력한 자속밀도를 유지하며 예리한 절인으로 많이 가공할수록 가공도가 커짐에 의한 것이다.

따라서 GC 입자를 사용한 자기연마재를 사용할 때, 비교적 높은 자속밀도로 63.6m/min의 연마속도로 가공할 경우에는 표면거칠기가 오히려 나빠질 수 있다. 또한 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 10회 왕복 가공할 경우 54.9m/min의 연마속도에서는 자속밀도 3000G일 때가 가장 표면거칠기가 양호하며, 자속밀도가 1500G, 6000G일 때는 연마속도 31.8m/min일 때의 표면거칠기 값이 가장 좋게 나타났다. 이와 같은 현상들을 종합해 보면, 가공횟수가 5회일 때 보다 10회 일 때가 오히려 표면거칠기가 대체로



(a) WA



(b) GC

Fig. 5 Surface roughness according to polishing condition (granular structure type magnetic abrasive)

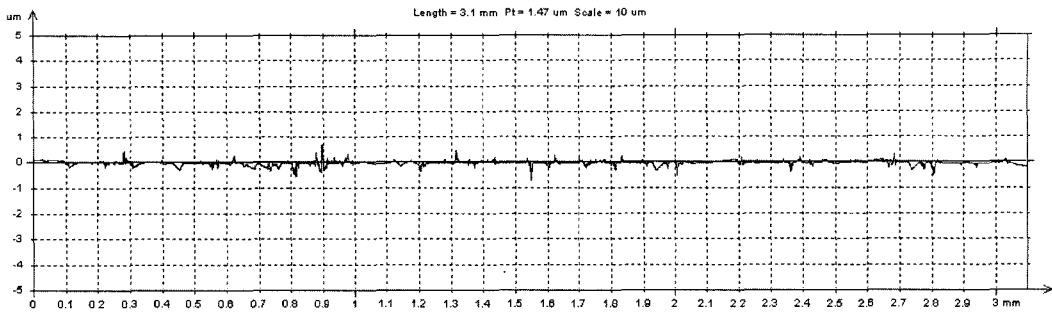


Fig. 6 Surface roughness profile after magnetic polishing (WA, 63.6m/min, 1500G, 5 Pass)

나빠지는 경향을 나타내는데, 이러한 현상은 가공 시간이 길어지면서 연마입자 날이 피가공물에 깊이 파고드는 과연삭에 의한 것이며, 특히 연마속도가 63.6 m/min로 증가하면 가공시간도 함께 길어져서 이러한 현상이 두드러지게 나타난다.

Fig. 6은 WA 연마입자를 사용하여 과립구조로 제조한 자기연마재를 사용하여 63.6m/min의 연마속도로 가공한 결과로 0.0503 μmRa 의 거칠기 값을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 자기연마 가공에 의해 새로운 형상의 표면이 생성되었으나, 깊은 골에 의해 거칠기 측정값이 크게 나타남을 알 수 있다.

3.2 자기연마재의 거동

자기연마 가공은 자력을 발생시키는 자극과 자기 연마재 사이에 위치한 피가공물을 자기흡인력을 이용하여 튜브 내측 표면을 가공하는 방법이다. 따라서 자극에서 가해지는 자기력과 연마속도에 따라 피가공물 내부에서 변화되는 자기연마재의 거동은 자기연마의 가공능률을 결정짓는 중요한 인자이다. 본 연구에서는 비자성체 재료인 이음매 없는 스테인리스강 튜브의 자기연마 가공시 자기연마재의 거동을 고찰하였다. 자기연마 가공에 있어서 자기연마재의 거동은 동적인 상태에 있으나, 종래의 연구에서는 주로 정적인 상태에서 검토함으로써 실제의 상황에 주로 접목하기에는 어려움이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 자기연마 가공 중에 있는 연마재의 동적인 거동을 고찰하였다.

Fig. 7은 자기연마 장치에 이음매 없는 스테인리스강 튜브를 장착하고, 연마재를 투입한 다음, 자속



(a) Static state



(b) Magnetic flux density 1500G



(c) Magnetic flux density 3000G



(d) Magnetic flux density 6000G

Fig. 7 Photo. of polishing speed (WA, 31.8 m/min)

밀도를 1500G, 3000G, 6000G로 설정하여 자기연마 가공을 진행하고 있는 상태를 보여준다.

Fig. 7의 (a)는 자기연마장치에 장착된 STS304 튜브 내에 슬러지와 WA를 이용하여 제조한 자기연마재가 충전되어 있는 정적인 상태를 보여주고 있으며, (b)는 1500G의 자기력과 31.8m/min의 연마속도로 파이프가 회전하면서 가공이 진행되는 동적인 상태의 자기연마재 거동을 보여주고 있다. 이때 자극에 의해 발생된 자기력이 자기연마재에 작용하는 연마력의 기초가 되며, 자기연마재 입자의 파이프 내면에 대한 상대운동이 연마특성에 직접 관계되는 인자이다. 이러한 자기연마재의 파이프 내면에 대한 상대운동 거동은 접선력에 의해서 변화된다. (c)는 자속밀도 3000G에서 31.8m/min일 때의 동적인 상태이며, (d)는 자속밀도 6000G에서 31.8 m/min의 연마속도로 파이프가 회전하면서 가공이 진행되는 동적인 상태에서의 자기연마재 거동을 보여주고 있다. 따라서 여기서는 자기력과 연마속도에 따라 변화되는 자기연마재의 상대운동에 대한 동적인 거동을 고찰하였다. 동적인 상태에서 자기브러시를 형성하는 자기연마재는 자기력과 접선연마저항에 의해 튜브 내면의 가공영역을 이동하면서 연마가 끝난 입자를 뒤쪽의 새로운 입자로 자생적으로 대체되며, 또 이동하면서 교반(攪拌)되는 거동이 나타남을 볼 수 있었다. 이러한 자발적으로 발생하는 자기연마재의 자생대체 · 교반 거동에 의해 가공물 내표면이 미세하게 가공되는 연마기구가 형성됨을 알 수 있었다.

4. 결론

슬러지를 함유한 연마입자를 이용하여 이음매 없는 스테인리스강 튜브 내면의 자기연마 가공을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) WA 연마입자를 사용하여 자기연마 가공할 때, 자속밀도 1500G, 연마속도 63.6m/min의 조건에서 0.05 μ mRa의 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있었다. 또한 자속밀도 1500G, 3000G일 때 연마속도가 증가할수록 표면거칠기가 대체로 좋아지는 경향을 나타낸다.
- 2) 슬러지와 WA 입자를 사용하여 합성 제조한 자

기연마재가 GC 입자를 사용할 때 보다 가공조건이 동일할 경우 전반적으로 표면거칠기 값이 작게 나타나 연마재로서 가공효율이 우수함을 알 수 있었다.

- 3) 슬러지를 자성체로 하고 WA, GC를 연마입자로 이용하여 제조한 자기연마재를 사용하여 자기연마가공이 가능함을 알 수 있었으며, 이를 활용함으로써 슷돌형태의 내면 연마를 벗어나 작업 안전성을 높이고, 청정가공을 통해 각종 튜브와 파이프산업에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산학협동재단의 2003년도 학술연구비 지원에 의하여 수행된 과제로서 이에 감사를 드립니다.

References

- 1) G. H. Kim, J. H. Kang, S. O. An and J. K. Park, "A Study on the Internal Grinding to Improving the Grinding Efficiency," Transactions of KSAE, Vol.2, No.6, pp.87-93, 1994.
- 2) H. Yamaguchi, T. Shinmura and T. Kaneko, "Development of a New Internal Finishing Process Applying Magnetic Abrasive Finishing by Use of Pole Rotation System," Int. Journal of JSPE, Vol.30, No.4, pp.317-322, 1966.
- 3) M. Anzai and T. Nakagawa, "Improve the Efficient of Magnetic Finishing," SEISAN KENKYU, Vol.45, No.12, pp.816-820, 1993.
- 4) T. Shinmura and H. Yamaguchi, "Study on a New Internal Finishing Process by Applying Magnetic Abrasive Machining," Journal of JSME, Vol.59, No.560, pp.293-299, 1993.
- 5) T. Shinmura, Y. Hamano and H. Yamaguchi, "A New Precision Deburring Process for Inside Tubes by the Application of Magnetic Abrasive Machining," J. of JSME, Vol.64, No.620, pp.312-318, 1998.
- 6) T. Shinmura and T. Aizawa, "Study on Internal Finishing of a Non-ferromagnetic Tubing by Magnetic Abrasive Machining Process," Journal of JSPE, Vol.54, No.4, pp.767-773, 1987.

- 7) M. Anzai, T. Sudo and T. Nakagawa, "Development of Magnetic Abrasive and It's Finishing Characteristics," SEISAN KENKYU, Vol.43, No.11, pp.13-22, 1991.
- 8) H. N. Kim, Y. K. Yun and J. W. Shim, "Ultra Finishing by Magnet-abrasive Grinding for Internal-face of STS304 Pipe," Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp.947-952, 2001.10.
- 9) H. N. Kim, Y. K. Yun and J. W. Shim, "Super Precise Finishing of Internal-face in STS304 pipe Using The Magnetic Abrasive Polishing," Journal of the Korea Institute of Industrial Safety, Vol.17, No.3. pp.30-35, 2002.
- 10) H. N. Kim, S. K. Song, Y. J. Chung, Y. K. Yun, H. W. Kim, S. W. Cho and J. W. Shim, "Development of The Magnetic Abrasive Using Ba-Ferrite," Journal of the Korea Institute of Industrial Safety, Vol.18, No.2. pp.46-49, 2003.
- 11) H. N. Kim, S. K. Song, Y. K. Yun, H. W. Kim, B. S. Kim, H. J. Ahn and J. W. Shim, "The Effects of Ba-Ferrite Magnetic Abrasive Behavior on Polishing Characteristics," Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp.565-568, 2003.6.
- 12) H. N. Kim, D. W. Soh, Y. K. Yun, S. B. Kim and H. S. Choi, "Magnet-abrasive Polishing for Internal- face of Seamless Stainless Steel Tube Using Sludge-abrasive Grain," 2003 KSAE Fall Conference, pp.867-872, 2003.