

금형면의 자기연마가공 고효율화에 관한 연구

A Study on Improving the Efficiency of Magnetic Abrasive Polishing for Die & Mold Surfaces

이 용 철 安 齊 正 博 中 川 威 雄
연암공전 (日)理化學研究所 東京大學

A b s t r a c t

There are many difficulties in automatic polishing for die & mold surfaces. Even though the process has been studied in the past 15 years, it has not been achieved yet, but by the process of actual hand work of well-skilled workers.

A new magnetic assisted polishing process, which is one of the potential methods for automation of surface finishing has been studied in the past 10 years by colleagues. The process has many merits, but on the other hand also has demerits, one being low efficiency of grindability by comparison with grinding wheel polish.

Therefore, some attempts were tried to improve the grindability by adopting electropolishing, ultra-high speed milling, 5-axis controlled machine etc... most recently by colleagues. This study also aims to improve the efficiency of polishing by introducing the easily-polished shape surface milling method equalizing the tool feed per tooth to the pick feed. This milling method was experimentally confirmed to have sufficient grindability to polish milled surface (with 10 μmR_{\max} surface roughness) into mirror surface (with 0.4 μmR_{\max} surface roughness).

1 서 론

자동차, 가전제품 등의 대량생산품의 제조생산을 뒷받침해 주는 주된 기술은 금형공업이다. 이 금형의 제작방법도 제품의 다양화, 복합기능화, 고정밀도화, 제조가의 적밀화 및 납기단축화 등의 수요자 요구를 충족시키기 위해서 종래 제래식 가공방식과 숙련공들의 기능중심 생산방식에서 이제는 컴퓨터를 이용한 CAD/CAM과 CNC 공작기계 등을 이용한 고도의 장치산업 생산방식으로 금형생산 자동화⁽¹⁾로 변모해 가고 있다.

그러나 금형제작과정의 마무리공정인 연마가공은 아직도 자동화되지 못하고 거의 숙련공의 수작업에 의존한 세작형태로 이어져 오고 있으며, 다른 공정에 비해 자동화가 극히 미진한 상태이다. 이분야의 자동화를 위해서 선진공업국들에서는 십여년전부터^(2~4) 많은 연구가 진행되고 있으며, 본 연구의 저자들도 최근 몇년간 자기력을 이용한 다듬질가공의 자동화⁽⁵⁾에 관해서 연구해 오고 있다.

이 자기연마법은 많은 장점을 가지고 있는 반면에 자기력이 가공압으로 작용되므로 고정속도에 의해 연마효율이 떨어진다는 문제점을 안고 있다. 그래서 본 연구자

들은 자기연마법의 효율을 향상시키기 위해서 전해 연마법, 고속밀링가공법, 5축제어 머시닝센터에 의한 가공법을 자기연마법에 병용한 연구^(6~8) 등을 계속 수행해 오고 있다.

연마가공의 효율에 영향을 미치는 주요인자가 몇가지 있으나 그 가운데 첫번째로 생각할 수 있는 것이 방전가공, 절삭가공 등에 의한 전(前)가공면의 표면거칠기와 형상이다. 따라서 본 연구에서는 연마가 잘 될 수 있는 형상으로 가공할 수 있는 절삭가공법을 도입하여 자기연마법의 고효율화를 꾀하였다. 이 가공법은 최근 “고속절삭법”, “FF가공법” 등 고품위, 고정도, 고능률의 절삭가공법^(8,9)과 더불어 연구되고 있다.

각종 기계부품, 특히 금형의 자유곡면 가공에 불 앤드밀을 사용하여 가공하게 되는데, 이 때 불엔드밀의 피크피드랑 Pf(이하 ‘Pf’로 표기)와 공구 한 날당 이송량 Fz(이하 ‘Fz’로 표기)의 설정에 의해 가공면의 표면거칠기와 형상이 크게 다르게 나타난다. 이 때 이 절삭면 형상은 연마가공시에 연마시간 및 연마면의 표면거칠기에 지대한 영향을 미치게 됨은 물론 가공시간도 큰 차이를 나타낸다.

본 연구에서는 절삭가공시 피크피드량은 일정하게 하고, 한 날당 이송량을 변화시키면서 절삭과 연마의 전체 가공시간과 가공면 상태를 검토하면서 자기연마의 고효율화를 위한 연구실험을 하였다.

2. 피크피드량(P_f)과 한 날당 이송량(F_z)의 변화에 따른 표면거칠기와 형상특성

최근 금형수요의 급격한 신장과 다양한 요구에 부응하기 위하여 금형제작용 기계, 공구, 가공법 등을 종합한 가공기술의 개선이나 신가공기술개발⁽¹⁰⁾이 활발히 진행되고 있다. 이러한 현상은 금형의 1차 형상가공의 고능율화와 고정도화를 꾀하는 것은 물론 나들질가공의 경감화 내지는 생략화를 목표로 하고 있다. 이러한 형상가공과 연마가공의 효율을 향상시키려는 관점에서 가공시간을 단축시키고 매끈하고 정밀도 높은 표면을 얻을 수 있는 절삭가공법⁽⁸⁾⁽⁹⁾을 도입, 연마가공과 병용하는 것을 검토해 보았다.

절삭가공에서 불엔드밀로 공작물을 가공할 때 P_f 와 F_z 의 설정에 따라 절삭면의 표면거칠기와 형상이 변화하게 된다.

일반적으로 불엔드밀로 가공하는 경우, 공구제작사에서 만든 절삭조건표를 보면 F_z 를 P_f 에 비해 훨씬 작게 잡고 있으며, 이는 가공능률을 떨어뜨리는 것은 물론이거니와 표면거칠기도 비교적 좋지 않게 나타난다. 본 연구에서는 P_f 를 일정하게 하고 F_z 를 $P_f/4$, $P_f/3$, $P_f/2$, P_f 로 변화시키면서 절삭했을 때, 절삭면의 표면거칠기와 형상에 대해서 절삭과 연마의 가공효율을 향상시킬 수 있는 P_f 와 F_z 의 관계를 고찰해 보았다. F_z 의 변화에 따른 절삭표면의 변화형상을 간략히 모델링하여 Fig.1에 나타내었다.

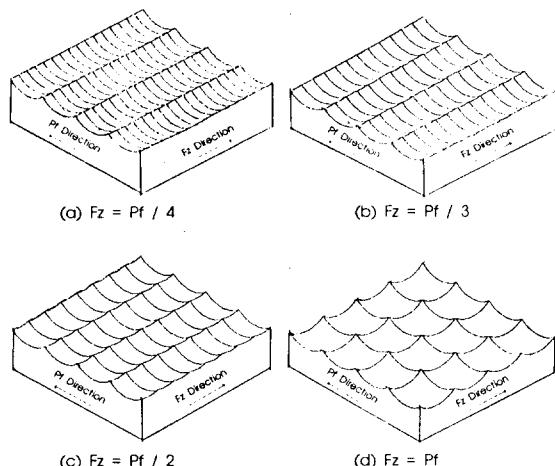


Fig.1 The Model of Milled Surface In dependence on F_z

절삭면을 이론적으로 생각해보면 $F_z=P_f$ 인 조건에서의 가공면이 F_z 방향과 P_f 방향의 이송량이 똑같게 되므로 Fig.1의 (d)와 같이 정사각형의 균일형상이 되어야 한다. 그러나 실제적으로 두 날 불엔드밀의 경우 $F_z=P_f/2$ 의 조건일 때, 즉 P_f 가 공구 1회진당 이송량 $F_r=P_f$ 의 조건일 때, Fig.1의 (d)와 같은 형상으로 나타났다. Photo.1에 실제 가공한 시편 표면의 금속현미경 사진에서 이를 잘 증명해 주고 있다. 이는 공작기계의 회전정밀도와 공구날 선단의 불일치 등으로 인한 현상으로, 결국 공구날 선단이 닿는 쪽의 가공흔만이 남게되어 이것이 최종 표면거칠기로 나타나게된다.

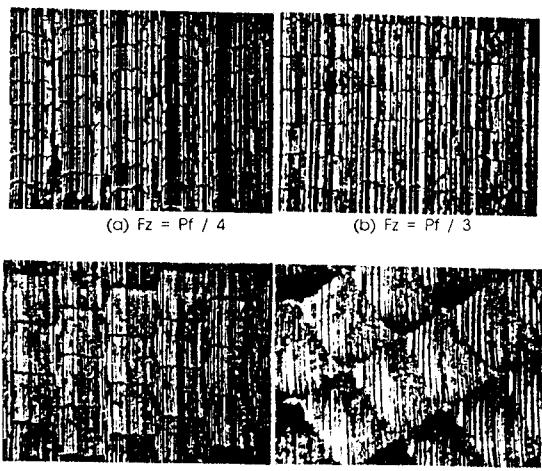


Photo.1 External Appearance of Milled Surface

3. 실험장치 및 방법

3.1 절삭가공실험

절삭가공에 사용된 공작기계는 (주)마쓰우라 기계제작소 제작 머시닝센터 FX-5이며, 시편재질은 일반기계부품 및 금형재로 널리 쓰이는 SM50C를 선택하였다. 절삭조건에서 P_f 의 설정은 예비실험에서 $P_f=0.2\text{mm}$ 일 경우는 절삭시간이 많이 걸릴 뿐만아니라 표면거칠기가 아주 매끈하게 나타나 연마의 효율성을 기대할 수 없으며, $P_f=0.5\text{mm}$ 는 너무 거칠어 연마하기에는 부적합한 것으로 판명되어, 그 중간값인 0.3, 0.4mm로 하였다. 한 날당 이송속도 F_z 는 두종류의 P_f 에 대해서 $P_f/4$, $P_f/3$, $P_f/2$, P_f 네 종류로 선정하였다.

사용된 공구는 직경 10mm의 두 날 불엔드밀을 사용하였다. 불엔드밀로 가공할 때는 공구와 공작물의 절삭위치와 공구마모 등을 고려하여야 하므로, 시편을 15°에서 24° 까지 3° 씩 증가시켜, 공작물이 기울여진 상태에서 P_f

와 F_z 의 변화에 따라 필요한 8종류의 시편을 각각 제작하였다. 본 연구에 사용된 기계와 실험조건은 Table.1과 같으며, 절삭면과 연마면의 표면거칠기 측정은 표면거칠기와 윤곽형상측정이 가능한 (주)코사카연구소제인 Surfcoorder SEF-30D를 사용하였다.

Table 1 Experimental Apparatus & Machining Condition

구 분	절삭가공	연마가공
머시닝센타 (주)마쓰우라	Px-5 (5축제어)	MC-600VF (3축제어)
공작물	SM45C	←
주축회전수	30,000rpm	8,000rpm
공 구	조경코팅엔드밀 VC-2MB-R5-2 (주)고오네제작소	020플랫엔드슬릿타입 (자체제작)
가 공 조 건	주축회전수 3,000rpm	1,750rpm
	이송속도 600mm/min	Pf=0.3경우 5~15mm/min Pf=0.4경우 3~15mm/min
기 타	절삭깊이: 0.2mm 피크피드: 0.3, 0.4mm	가공간극: 1.4mm 자성지립: IPM(입자경 212~300μm) 자속밀도: 1.2T

3.2 자기연마가공 실험

자기연마장치는 특별한 전용기가 필요하지 않고 머시닝센터에서 전자식과 철심으로 만들어진 자기연마공구, 그리고 Fe분말과 연마제를 결합시켜 만든 자성지립으로 구성되어 있다.

공구인 전자식의 철심은 Flat end type 형상으로 제작하여, 머시닝센터의 주축에 장착하고, 회전과 이송운동을 주어 공작물 표면의 연마가 가능하게끔 되어있다. 공구와 공작물사이에는 1.4mm의 간극을 주고, 이 간극에 자성지립을 채우고 적류전류를 통하여 자화된 지립은 철심선단으로부터 공작물까지 부러워상으로 정렬되며, 이것이 유연성을 가진 연마숫돌 역할을 하게 된다. 아울러 공작물도 SM45C로 강자성체이기 때문에 공작물 자신도 자화되어 입자를 흡인하게 된다. 이것이 연마의 가공압으로 되어 연마되게 된다.

연마가공 시 주축회전속도는 1750rpm이고 이송속도는 3~15mm/min의 범위에서 연마하였다. 본 연구에서의 연마실험조건은 Table.1과 같으며, 연마실험장면을 Photo.2에 실었다.

4 실험결과 및 고찰

4.1 Pf와 F_z 의 변화에 따른 절삭면의 표면거칠기

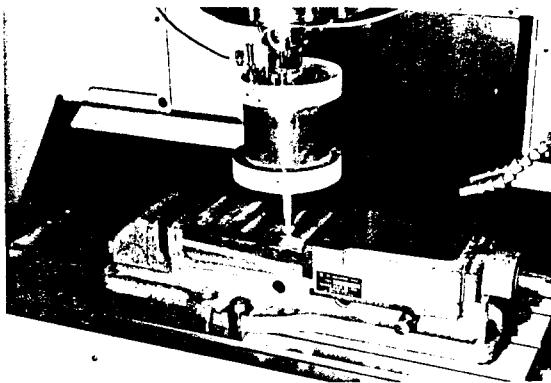


Photo.2 External Appearance of Magnetic Abrasive Polishing

표면거칠기의 측정은 Pf방향과 F_z 의 두방향에서 측정하여 비교해 본 결과, Pf방향이 F_z 방향의 표면거칠기에 비해 1.3배에서 크게는 2배 가까이 거칠게 나타나, 거친 쪽의 Pf방향만의 표면거칠기에 대해서 고찰하였다.

Pf를 0.3, 0.4mm로 일정하게 하고 F_z 를 Pf/4, Pf/3, Pf/2, Pf로 변화시키면서 절삭했을 때의 표면거칠기 R_{max} , R_a 의 변화를 Fig.2에 나타내었으며, Pf=0.4mm에서의 F_z 의 변화에 따른 각 시편의 표면사진을 Photo.1에 나타내었다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 F_z 를 Pf/2보다 작게 잡았을 경우에도 표면거칠기는 나쁘게 나타나고 있으며, 크게 잡았을 경우에는 더 나쁘게 나타나고 있다.

가공능률과 표면거칠기를 고려해 볼 때 $F_z=Pf/2$ 의 조건, 즉 1회전당 이송량 Fr 을 피크피드량과 같게 하여 절삭하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 아울러 이 조건에서의 절삭면 형상은 Pf에 의한 절삭흔과 F_z 에 의한 절삭흔이 그림 1의 (d)에서 보는 바와 같이 똑같이 균일하

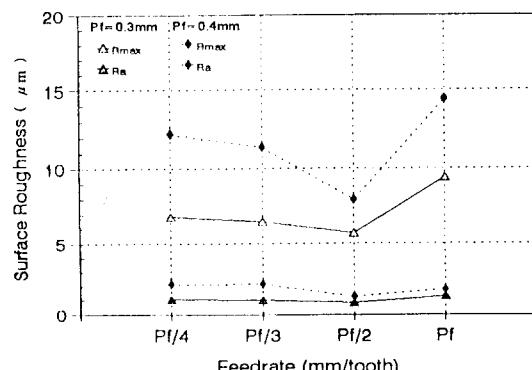


Fig.2 Milled Surface Roughness in dependence of F_z

게 나타나고 있으며, 또한 이것은 연마해야 할 체적이 다른 것에 비해 작고, 형상도 연마가 쉽게 될 수 있는 모양을 이루고 있다. 즉 똑같은 시간에 걸쳐서 가공하는 공작물을 종래보다 Pf를 작게 하고 Fz를 빠르게 하여 Fz가 Pf/2와 같은 절삭조건에서 가공하게 되면 연마가 용이한 표면거칠기와 형상을 갖게 되고, 그럼에 따라서 연마시간을 단축시킬 수 있게 됨을 알 수 있다.

4.2 Pf와 Fz의 변화에 따른 연마면의 표면거칠기

연마실험에서 연마이송속도를 3~15mm/min의 범위에서 실시하였으나, 15mm/min이하의 경우는 15mm/min에 비해 표면거칠기가 상당히 좋게 나타나므로, 가공효율을 고려한 축면에서 실험의 최고속도인 15mm/min에 대한 결과만을 고찰하여 Fig.3에 나타내었다.

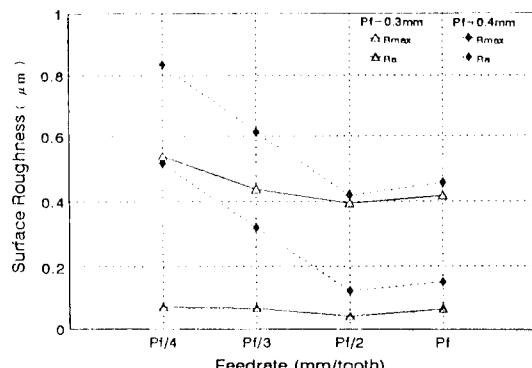


Fig.3 Polished Surface Roughness in dependence of Fz

Fig.3에서 보는 바와 같이 전가공면의 표면거칠기가 나빴던 Fz를 미세하게 잡은 경우는 연마 후의 표면거칠기도 나쁘게 나타났으며, 그와 반면에 Fz를 크게 잡은 경우 절삭면 표면거칠기가 거칠었지만, 오히려 똑같은 연마속도에 대해서 연마 후의 표면거칠기가 좋게 나타났다. 이러한 현상은 Fig.1과 Photo.1에서 알 수 있듯이 Pf방향의 절삭면에서 凸부분이 Fz가 미세할 수록 조밀하고 높게 되어, 연마하기 어려운 형상을 가지게 되고, Fz를 점점 크게 하면 Fz-Pf/2에서 가장 양호한 표면상태로 되어, 가장 연마하기 쉬운 형상을 가지게 되기 때문이다. 즉 공구 한 회전당 이송량 Fr=Pf의 절삭조건에서 표면거칠기가 가장 좋게 나타났고, 연마면의 표면거칠기도 가장 좋게 나타났다. 즉 Pf 0.3mm인 경우 절삭면의 표면거칠기 5.712 μmR_{max}에서 연마 후 0.294 μmR_{max}로 향상되었고, Pf 0.4mm의 경우는 7.974 μmR_{max}에서 0.419 μmR_{max}로 향상되었다.

Fz를 Pf/2보다 더 크게 증가시키면 이때부터는 절삭면의 표면거칠기가 거칠어질 뿐만아니라 연마가공 효율도 향상되지 않았다. Photo.3에 Pf=0.4mm로 절삭한 연마면의 표면사진을 나타내었고, Fig.4에 절삭면과 연마면의 표면거칠기 프로파일을 나타내었다. Photo.3에서 보는 바와 같이 Fz-Pf/2의 경우를 제외하고는 표면에 점선이나 선모양의 피드마크가 조금씩 남아있어 연마가 제대로 되지 않았음을 알 수 있다.

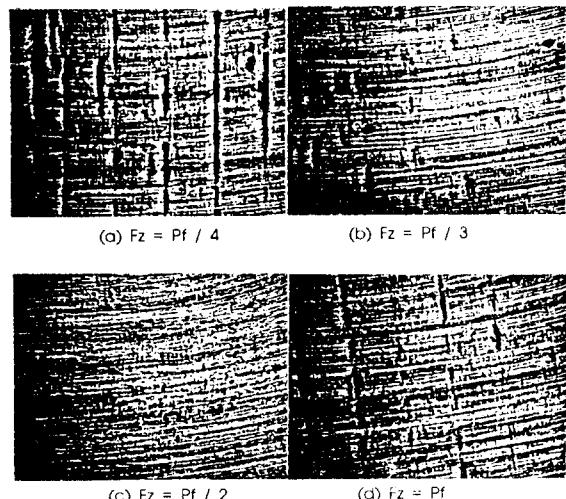


Photo.3 External Appearance of Polished Surface

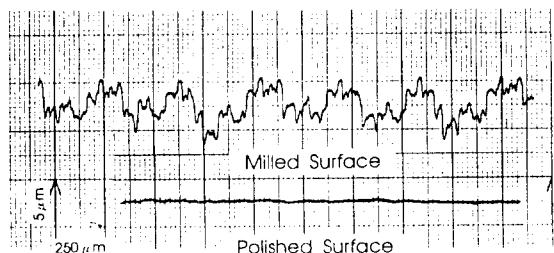


Fig.4 Surface Roughness Profile of Milled & Polished Surface

4.3 Pf와 Fz의 변화에 따른 절삭 및 연마가공 효율

절삭가공효율은 단위시간당 가공면적으로 나타낼 수 있으며, 이것은 Pf와 Fz로 쉽게 계산되어진다. Pf를 일정하게 하고 Fz를 크게 해서 원하는 가공정밀도를 낼 수 있다면 가공효율을 향상시킬 수 있음은 당연하다.

Table 1의 절삭조건에서 100×100mm의 평면면적을 Pf는 일정하게 하고 Fz만을 Pf/4, Pf 3, Pf 2, Pf로 변화시키면서 절삭했을 경우 걸리는 가공시간과, 그리고 이 절

삭면을 자기연마에 의해 $0.3\sim0.5\mu\text{m}$ R_{\max} 의 표면거칠기로 연마하는데 걸리는 시간과 그 총합을 Fig.5에 나타내었다.

일반적으로 공구제작사에서 권장하는 F_z 는 $Pf/3$ 정도이므로 $Pf/2$ 로 절삭했을 때의 절삭효율을 고려해 보면 Pf 가 0.3mm 일 경우는 150%, Pf 가 0.4mm 일 경우는 200% 향상된다.

Fig.5에서 보는 바와 같이 절삭가공에서는 Pf 가 일정하므로 F_z 의 크기에 반비례해서 가공시간은 단축됨을 알 수 있지만, 표면거칠기가 나빠 연마시간은 많이 걸림을 알 수 있다. F_z 를 너무 작게 할 경우는 절삭시간도 많이 걸리고 표면거칠기도 나빠질 뿐만아니라 연마가 어려운 형상을 가져, 연마시간도 꽤 많이 걸림을 알 수 있다.

$Pf=0.3, 0.4\text{mm}$ 로 절삭한 면을 연마할 경우, F_z 가 $Pf/2$, 즉 $Fr=Pf$ 일 때 가공효율이 가장 좋음을 알 수 있다.

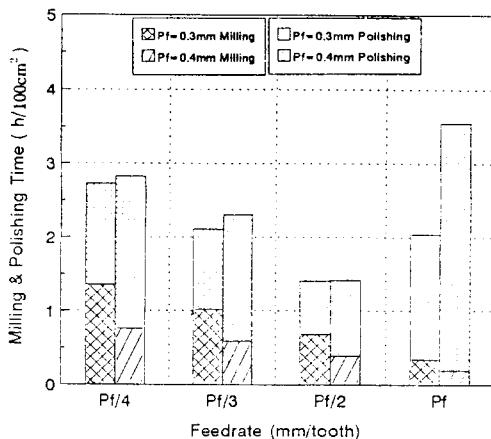


Fig.5 Total Machining Time for Milling & Polishing

5 결 론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 절삭에서 표면거칠기가 가장 양호하고 연마가 가장 잘 될 수 있는 형상을 만드는 이송속도는 두 날 공구의 경우 $F_z=Pf/2$, 즉 한 회전당 이송량이 피크피드량과 같을 때이다.
- 2) 이 경우 절삭효율은 일반절삭조건으로 가공할 때보다 $Pf=0.3\text{mm}$ 일 경우는 150%, $Pf=0.4\text{mm}$ 일 경우는 200% 향상되었다.
- 3) 연마효율은 $Fr=Pf$ 의 절삭조건으로 가공한 면이 일반적인 절삭조건으로 가공한 면보다 이송속도를 150%정도 향상되었다.
- 4) 절삭과 연마가공의 전체효율은 100cm^2 의 평면 공작

률에 대해서 $Pf=0.3\text{mm}$ 일 경우 150%, $Pf=0.4\text{mm}$ 일 경우 200%가량 향상되었다.

References

- 1) 齊藤勝政, 金型製作工程の自動化, 最新 金型製作技術, 工業調査會, pp.15~22, 1986
- 2) 大森 整, 高橋一郎, 松岡甫策, ELIDを利用した金型曲面の成形鏡面研削, 型技術, Vol.8, No.8, pp.14~19, 1993
- 3) 佐佐木哲夫, 齊藤勝政, 三好降志, 金型みがき作業の自動化に関する研究, 型技術, Vol.8, No.8, pp.24~25, 1993
- 4) 池上拓史, 仙波卓彌, 導電性・弾性砥石の試作と金型材料の電気泳動研磨, '95精密工學會 春季學術講演會(日), pp.489~490, 1995
- 5) 李龍哲, 安齊正博, 中川威雄, 자기연마법을 이용한 금형면의 다듬질 가공자동화 연구, '95년도 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp.97~101, 1995
- 6) 川島悅哉, 中川威雄, 安齊正博, 電解磁氣研磨法による金型材研磨の試み, 型技術, Vol.8, No.8, pp.20~21, 1993
- 7) 李龍哲, 安齊正博, 川島悅哉, 中川威雄, 高速ミーリング面の磁氣研磨, 型技術, Vol.9, No.7, pp.164~165, 1994
- 8) 李龍哲, 安齊正博, 川島悅哉, 中川威雄, 森重功一, 5軸制御マシニングセンタを用いた金型材曲面の磁氣研磨, '94精密工學會 秋季學術講演會(日), pp.409~410, 1994
- 9) 内藤國雄 外 5人, 金型の高品位・高能率仕上切削法の開発, 精密工學會誌, Vol.59, No.4, pp.117~122, 1993
- 10) 中村 誠, 自由曲面仕上げ加工における最適條件設定, 機械と工具, 1995年5月號, pp.81~86, 1995
- 11) 松岡甫策, 仕上工程の輕減化・高精度化, 型技術, Vol.8, No.7, pp.18~23, 1993