

다이아몬드 공구에 의한 Al합금의 가공

최성국*, 최정철**, 황도연**

Machining of Aluminum Alloys Using Diamond Tools

S. K. Choi*, J. C. Choe** and D. Y. Hwang**

1. 서 언

최근 자동차, 전자산업의 눈부신 발전에 따라 이에 필요한 다이아몬드 공구의 수요도 나날이 증가하고 있다. 이러한 증가는 특히 자동차 산업에 있어서 경량화에 따른 Al합금의 다수 채용으로 인한 영향이 가장 크며, 부가해서 고강도 Al합금의 개발로 인해 이에 따른 고성능 다이아몬드 공구의 필요성 때문이다. 또한 전자산업의 경우도 컴퓨터, 가전제품의 고성능화를 위해서는 핵심 Al부품의 고정밀도 가공이 필수적이며, 따라서 이에 소요되는 다이아몬드 공구의 수량도 증대할 수 밖에 없는 실정이다.

현재 자동차산업에 응용되는 다이아몬드 절삭 공구는 주로 다이아몬드 소결체(통상 Polycrystalline Diamond, 약해서 PCD라고 한다. 이하 PCD라 한다) 공구에 의해 지배되며, 전자산업의 경우는 거의 대부분이 단결정 다이아몬드 공구의 응용으로 부품이 가공되고 있다. 따라서 본 해설에서는 Al합금의 절삭가공에 응용되는 PCD 소결체와 단결정 다이아몬드 공구의 사용실태에 관하여 알아보기로 하며, 최근 개발되고 있는 다이아몬드 코팅공구에 관해서도 약간 설명하기로 한다.

2. PCD 소결체공구

다이아몬드는 물질 중 최고의 경도를 가짐과 동시에 탄성률, 열전도율이 높고 열팽창계수가 아주 작는데 이러한 성질은 공구재료로서 큰 의

미를 갖는 것이다. 표 1에는 공구재료로서 사용되는 각종 硬質材料의 物性値를 비교한 것이다. 또한 각종 재료와의 마찰계수가 작은 다이아몬드는 피삭재와의 응착이 쉽지 않아 평활한 사상면을 얻을 수 있다. 다이아몬드가 마찰계수가 적은 이유는 접촉면에 있어서 미시적으로도 소성변형을 일으키지 않으며 다이아몬드 표면에 존재하는 흡착기체가 영향을 주기 때문이라 생각된다. 이러한 우수한 다이아몬드 분말을 Co 등의 결합체로서 소결한 것이 PCD인데, 제조는 1972년 General Electric사가 최초로 개발, 시판하였다.

그림 1은 PCD의 제조영역인데, 빗금친 부분의 안정영역에서 Co-C 共晶溫度 이상의 Co가 용해한 조건에서 이루어진다. 즉 50000기압

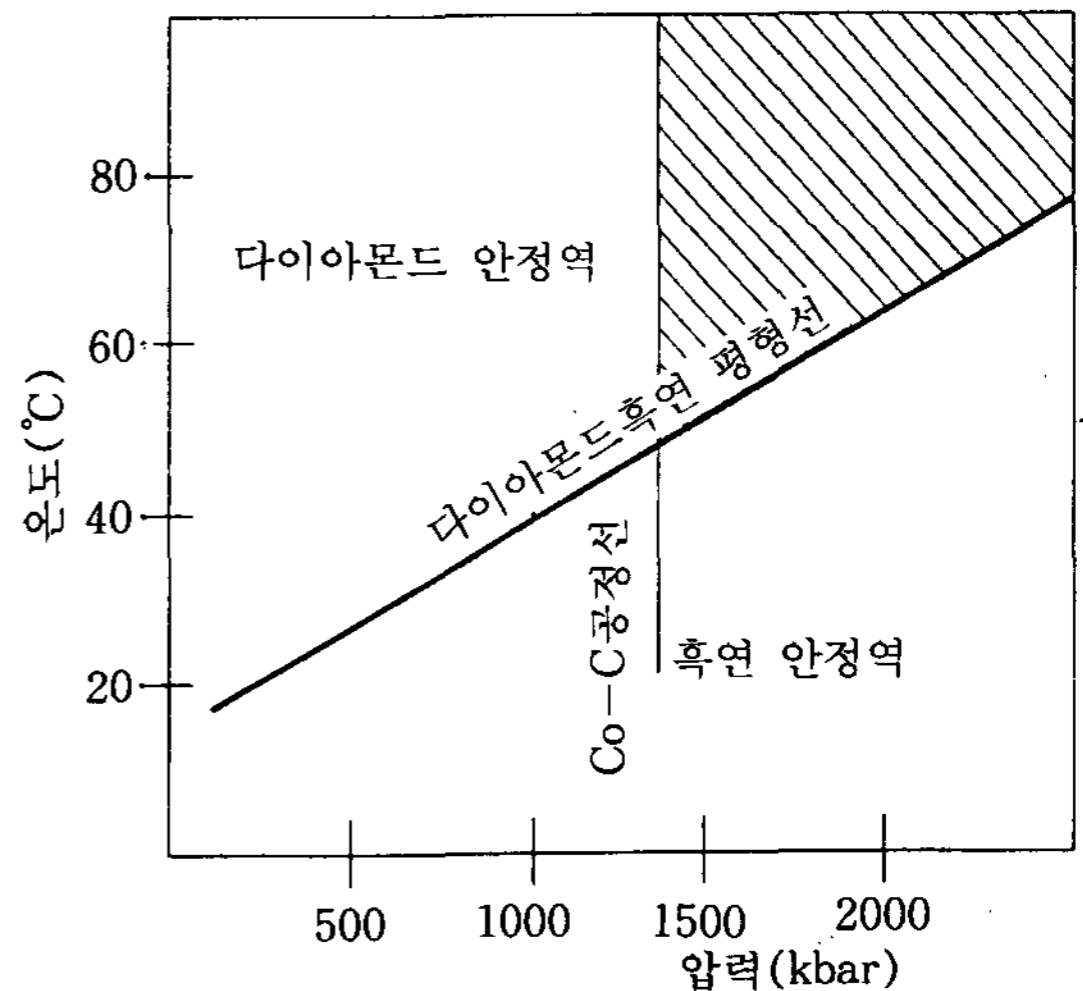


그림 1. PCD의 제조영역

* 이화다이아몬드(주)
 **아주대학교 재료공학과

표 1. 공구재료에 사용되는 각종 내마모재의 특성

물 질	비 중	영률($\times 10^3 \text{kg/mm}^2$)	경도(mH _v)kg/mm ²	열전도율(cal/cm ⁴ °C)	열팽창계수($\times 10^3$ °C)
다이아몬드	3.52	99	>9000	5.0	3.1(RT-800°C)
CBN	3.48	71	4500	3.1(注)	4.7(RT-900°C)
WC	15.8	70	1700 2400	0.29	5.1(RT-1,400°C)
TiC	4.92	46	3200	0.08(R.T.) 0.09(1000°C)	7.6(RT-850°C)
Al ₂ O ₃	3.98	42	3000	0.10(R.T.) 0.015(1000°C)	8.5(RT-980°C)

주) 계산치, 다결정체실측치 0.48cal/cm⁴°C

1400°C 이상으로 흑연으로부터 다이아몬드를 합성하는 조건과 거의 유사하다. 사진 1은 이러한 조건에서 제조된 각종 크기의 PCD이며 최대 직경 50mm까지 시판되고 있다. 이렇게 조제된 소재를 방전 와이어 절단기로 절단하여 그림 2와 같이 초경합금 등의 기판에 브레이징하여 모서리를 정밀하게 연마하면 공구로서 사용할 수 있게 된다. 사진 2는 완성된 PCD 공구이며, 사진 3은 연마된 PCD 공구의 절삭날을 보여준다.

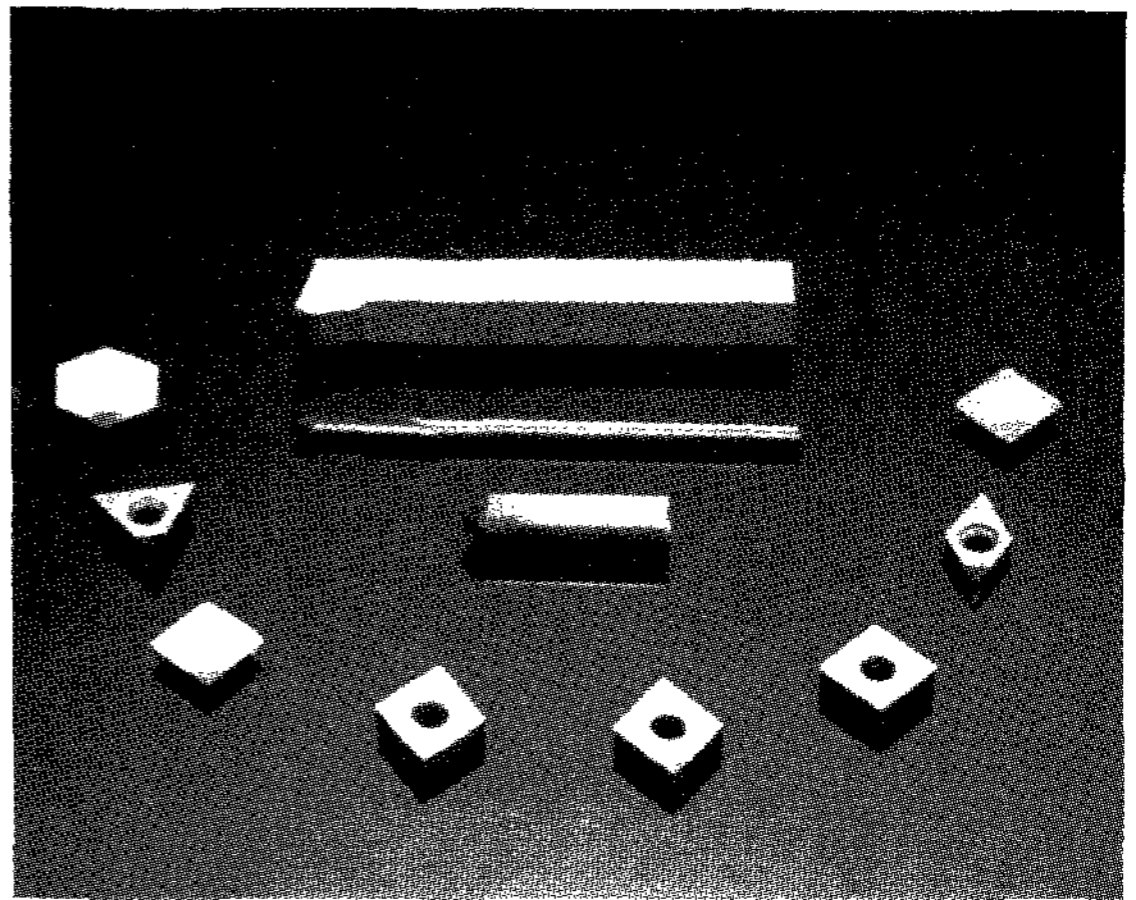


사진 2. 완성된 PCD 공구

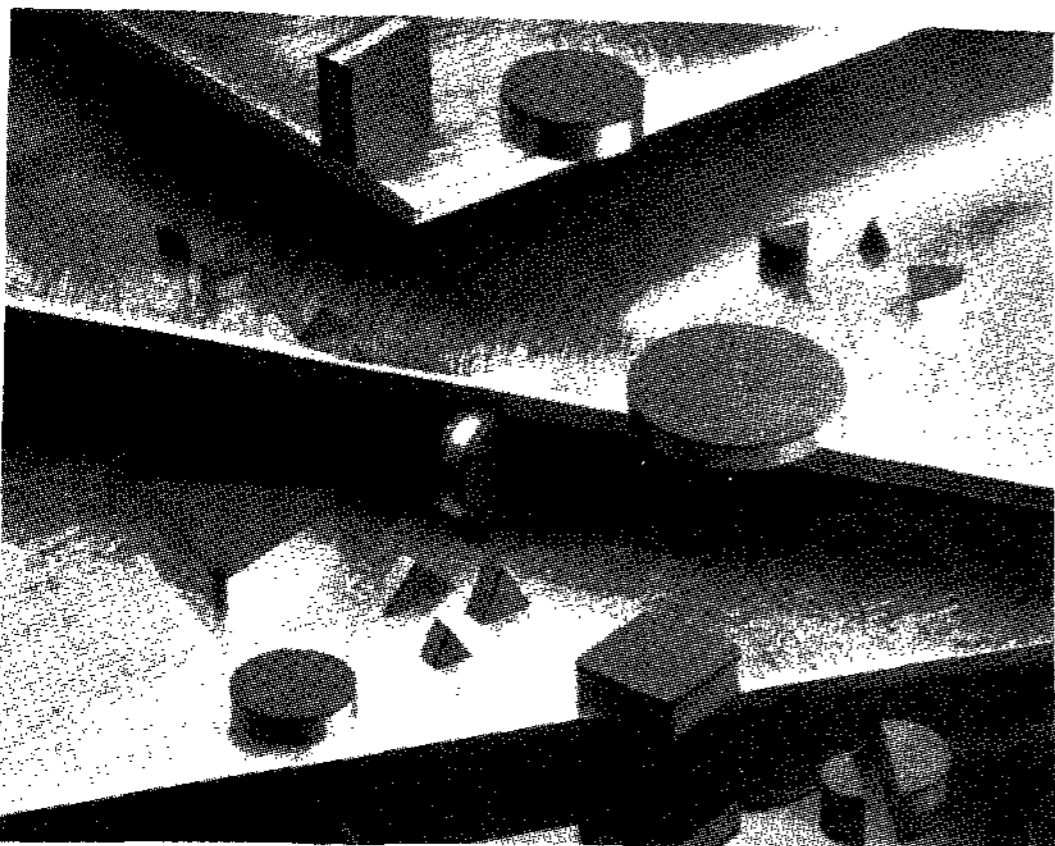


사진 1. 각종 크기의 PCD 원재료

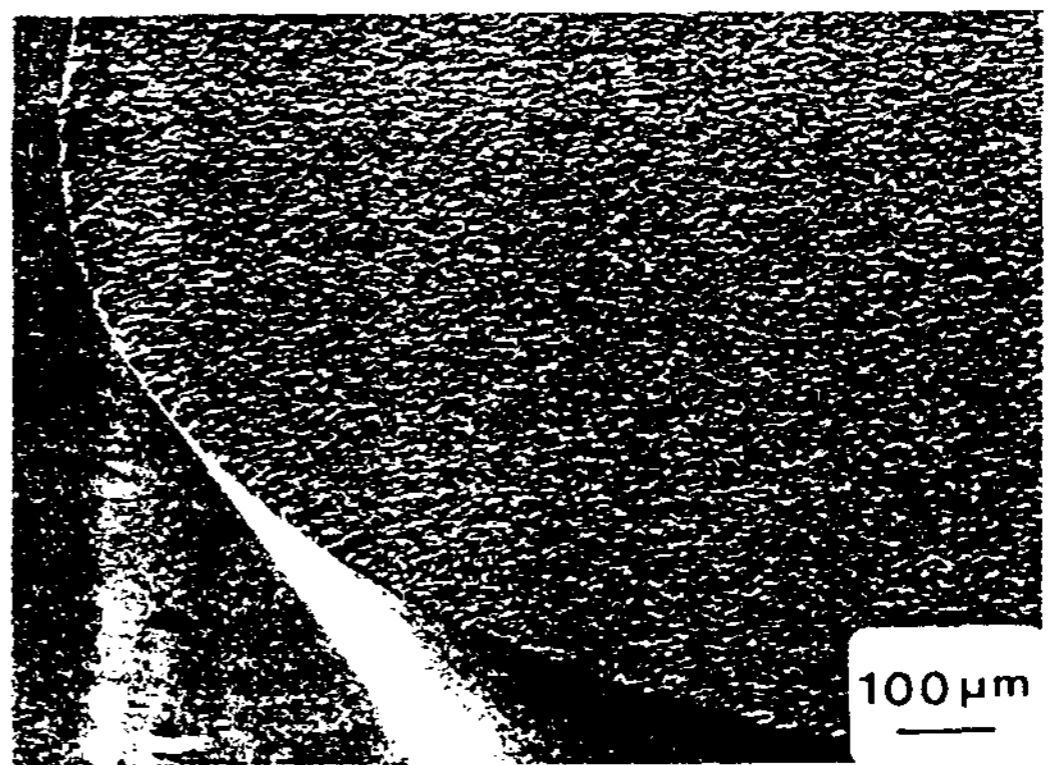


사진 3. PCD 공구의 절삭날의 형성

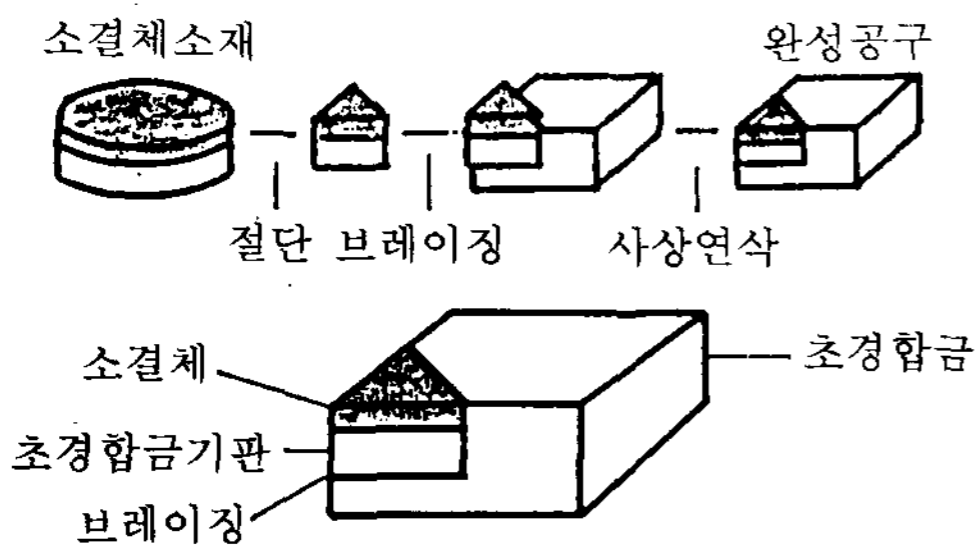


그림 2. PCD의 제조공정

3. PCD 공구의 사용실례

PCD 공구는 주로 비철금속 가공분야에서 이제까지 사용되어 온 초경공구의 대체품이라 할

커터, 밀링커터, 드릴공구 등이 실용화되고 있으며, 이러한 공구들을 응용하여 가공되는 Al합금 부품을 중심으로 설명하고자 한다.

3.1 선삭가공

과거에는 자동차, 항공기 등의 수송산업에서 사용되는 Al합금은 주로 Si을 5~13% 포함하는 아공정 Al-Si합금이 상당 부분 차지하였으나, 1970년대에 Reynolds Aluminum사에 의해 자동차 엔진용 390합금이 개발되어 14~25%의 Si을 함유하는 과공정합금이 증대하고 있다. 이들 과공정합금은 공정기지에 경질의 Si초정입자가 존재하는 일종의 복합재료조직을 형성하고 있어 높은 비강도, 고온강도, 내식성, 내마모성 및 양호한 주조성, 높은 열전도도를 나타내게 된다. 이러한 특성 때문에 자동차 엔진블록, 피스톤, 실린더 등과 항공기 부품 등의 용도로서 널리 이용되고 있다. 사진 4는 Al-18% Si합금으로 제조된 자동차용 피스톤과 PCD를 나타낸다. 여기서 사용되는 피스톤 홈 그루빙용 PCD 공구는 200 Å이하의 엄격한 정밀도로 제조되어야 한다. 사진 5는 Al-16% Si합금 피스톤의 실제 외경절삭 가공장면이다.

이러한 작업에서 종전의 초경공구와 비교해 볼 때 PCD 공구의 수명은 약 50배나 향상된 결과를 낳고 있다.

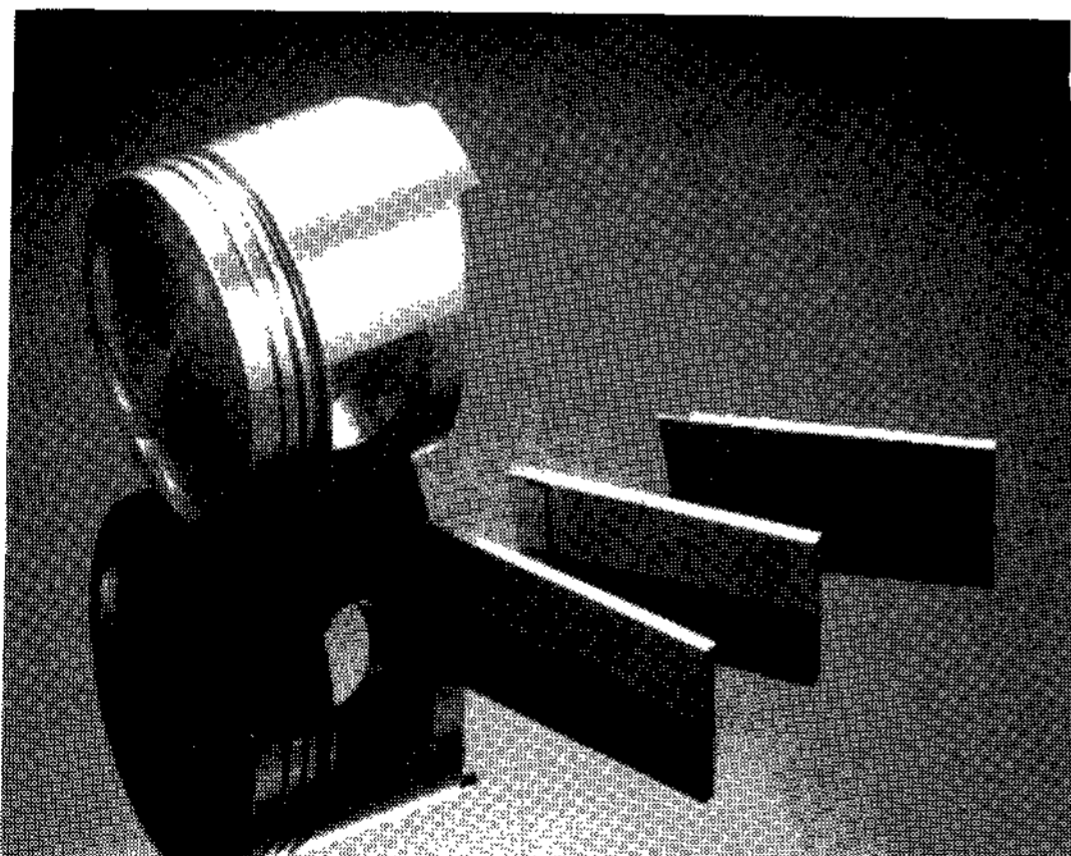


사진 4. Al-18%Si합금 피스톤과 PCD 공구

3.2 절단가공

Al합금제 자동차용 부품은 주조후 냉각하여

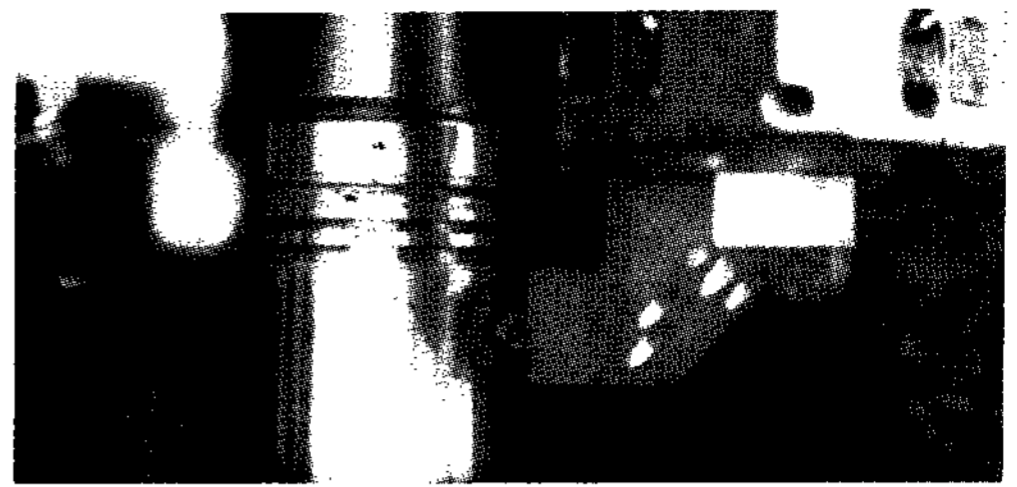


사진 5. 피스톤 가공중인 PCD 공구

탕구의 절단가공을 습식으로 고속도강제 띠톱, 또는 초경합금제 띠톱으로 실시되고 있는 것이 통상의 방법이다. 그러나 최근 PCD 회전톱을 사용해서 탕구를 절단하는 새로운 가공법이 채택되어 생산량을 크게 향상시키게 되었다. ADC12인 실린더 헤드의 탕구 절단시 종전 하이스 띠톱인 경우에는 재연삭당 500대의 수명이었으나, PCD 사용시 10000대의 수명을 나타내었으며 Al-18%Si합금인 자동차 에어컨 압축기 로타의 절단에도 커다란 수명 향상을 이룩하였다. 사진 6은 탕구 절단용 PCD 회전톱의 형태를 보여주고 있다.

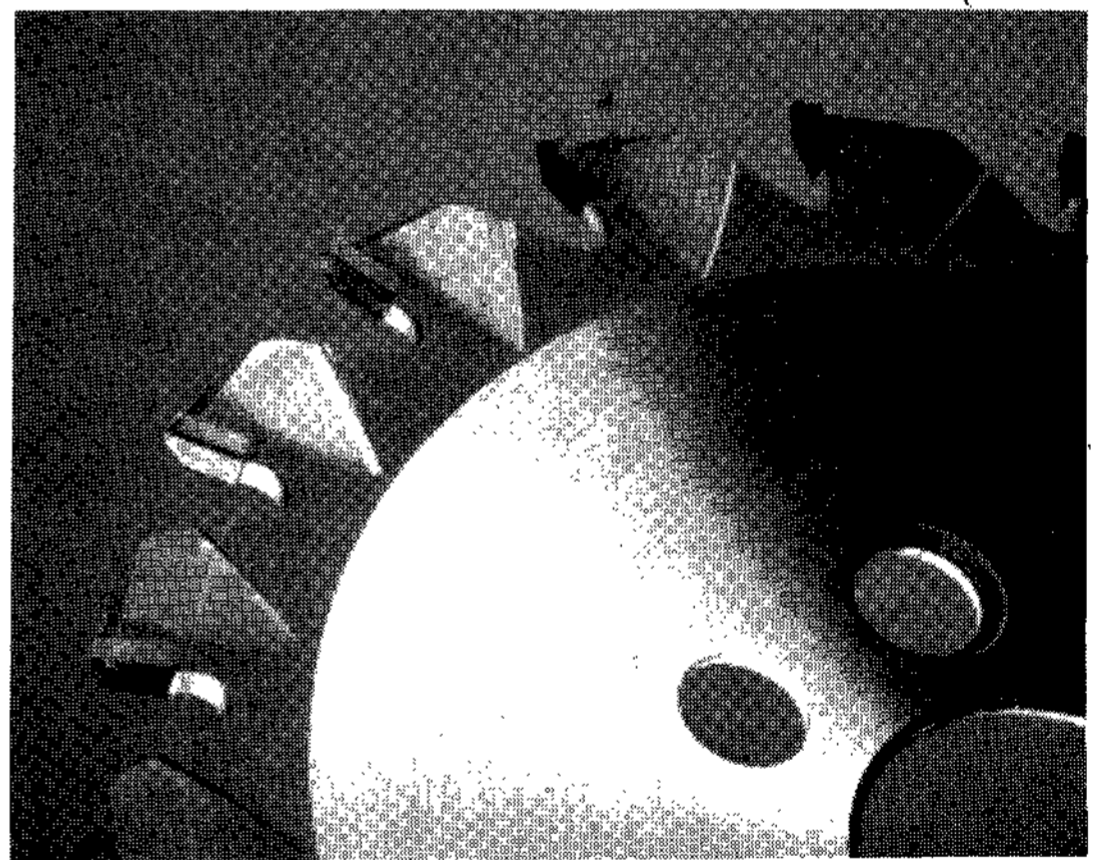
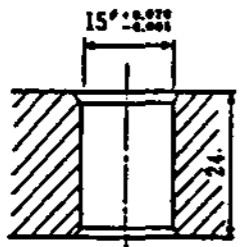
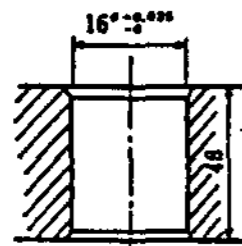
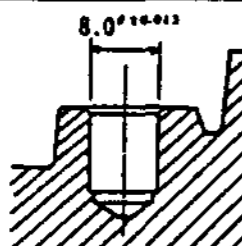
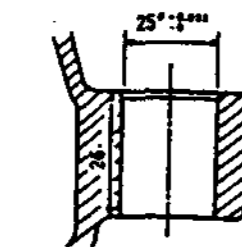


사진 6. Al주물 탕구 절단용 PCD 회전톱

3.3 밀링가공

PCD 밀링절단기의 주용도는 자동차 엔진의 실린더 헤드, 오일펌프, 토랜스퍼액슬케이스 등의 맞춤면의 가공이다. 표 2에 PCD 밀링절단기의 응용예를 나타낸다. 표 중의 공구수명으로 알 수 있는 바와 같이 量産 라인에서 적어도 1개월 정도의 기간은 공구교환 없이 사용할 수 있기 때문에 생산성 향상면에서 초경공구보다 훨씬 유리함을 알 수 있다.

표 3. PCD리머의 응용예

피삭재 형상	재 질	절삭조건	결과 효과
 콘로드 작은 구멍	ADC10	$V=94[m/min]$ $d=0.3\sim0.6[mm]$ (반경) $f=0.1[mm/rev]$ 수용성절삭액	1) 면조도 0.8S에서 안정 2) 40000구멍 가공계속중 경도-리머 (15000구멍/reg)
 오일 펌프 카버	ADC12	$V=130[m/min]$ $d=0.1[mm]$ (반경) $f=0.11[mm/rev]$ 유성절삭액	1) 120000구멍 가공계속중 2) 경도-리머(7000구멍/reg)에 비해 15배 이상의 수명 3) 84000구멍 가공후의 면조도 $1\sim1.3\mu_{Rmax}$ 4) 120000구멍 가공중 피삭재의 불량수 0 (경도-리머로는 7000구멍 가공 중 수10개의 불량발생)
 피스톤	ADC12	$V=63[m/min]$ $d=0.2[mm]$ (반경) $f=0.2[mm/rev]$ 수용성절삭액	1) 160000구멍 가공계속중 2) 경도-리머(4000구멍/reg)에 비해 10배 이상의 수명
 스피드 메타	ADC12	$V=52[m/min]$ $d=0.2[mm]$ (반경) $f=0.25[mm/rev]$ 수용성절삭액	1) 210000구멍 이상가공 2) 경도-리머(5,000구멍/reg)에 비해 30배 이상의 수명 3) 면조도 : $1.7\mu_{Rmax}$ 진원도 : $3.7\sim4.1\mu_{Rmax}$

3.4 구멍가공

정밀도 높은 구멍을 가공하기 위해서는 PCD 리머의 사용은 필수적이라 할 수 있다. 그러나 이러한 정밀공구의 치수 정도는 극히 높기 때문에 고도의 가공기술이 필요한데 국내에서는 아직 완벽한 제품을 시판하지 못하고 있는 실정이다. 표 3은 PCD 리머의 응용예를 나타내는데, Al다이캐스팅재의 가공에 있어서 수명의 연장, 면조도의 품질향상 효과를 이루고 있음을 알 수 있다.

4. 단결정 다이아몬드 공구

전술한 PCD 공구는 주로 초경공구의 대용으로 사용되어 오고 있다. 이것은 특별히 피삭재의 면조도를 요구하지 않고 대부분의 경우 획기적인 수명증대의 효과를 이루기 때문이다. 따라서 Al합금의 鏡面가공을 위해서는 PCD 공구 대신 단



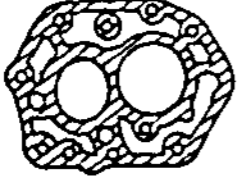
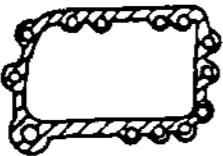
결정 다이아몬드 공구의 사용을 고려해야 한다.

특히 피삭면 자체의 면조도가 최종 부품의 성능에 절대적인 영향을 미치는 경우는 반드시 양질의 단결정 다이아몬드를 사용하여 정밀하게 가공되어야 한다.

최소의 결함을 갖는 다이아몬드의 선택과 선택된 다이아몬드의 초정밀 연마기술의 결합만이 완벽한 Al합금 부품의 생산을 초래할 수 있다. 사진 7은 시판되고 있는 각종 천연 다이아몬드 원석의 형태를 나타낸다.

공구의 제조는 원석의 선택과 결정면의 선택에 따라 품질이 좌우되기 때문에 고도로 숙련된 기능자에 의해 수행되는 것이 일반적이다. 그림 3은 8면체 다이아몬드에 있어서 {111}, {001}, {011}면의 위치를 나타낸다. 그러나 대부분의 천연 다이아몬드 원석은 연마방향을 사진과 같이 쉽게 육안으로 구별할 수 있는 경우가 드물어 숙련에 의존하고 있다. 따라서 이러한 단점을 해소

표 2. PCD 밀링 절단기의 응용예

피삭재 형상	재 질	절삭조건	결과 효과
 실린더 헤드	ADC12	N=1200 V=764 F=960 f=0.16 d=1-3	PCD-60000個/reg 경도: 1600-2000個/reg 면조도: $3\mu R_{max}$ 평탄도: $20\mu m$
 트랜스퍼 케이스	ADC12	N=650 V=1000 F=3310 f=0.196 d=0.5	PCD-40000個/reg 면조도: $0.7\mu R_{max}$ 평탄도: $30\mu m$
 플레이트	ADC12	N=1085 V=852 F=1012 f=0.078 d=0.1	PCD-40000個/reg 면조도: $0.7\mu R_{max}$ 평탄도: $25\mu m$
 미션케이스	ADC10	N=1050 V=1040 F=1150 f=0.137 d=0.3	PCD-60000個/reg 경도: 2000個/reg 공구비: 30% 감소

N[rpm]: 회전수, V[m/min]: 절삭속도, F[m/min]: 이송(1분당), f[mm/rev]: 이송d[mm]절입

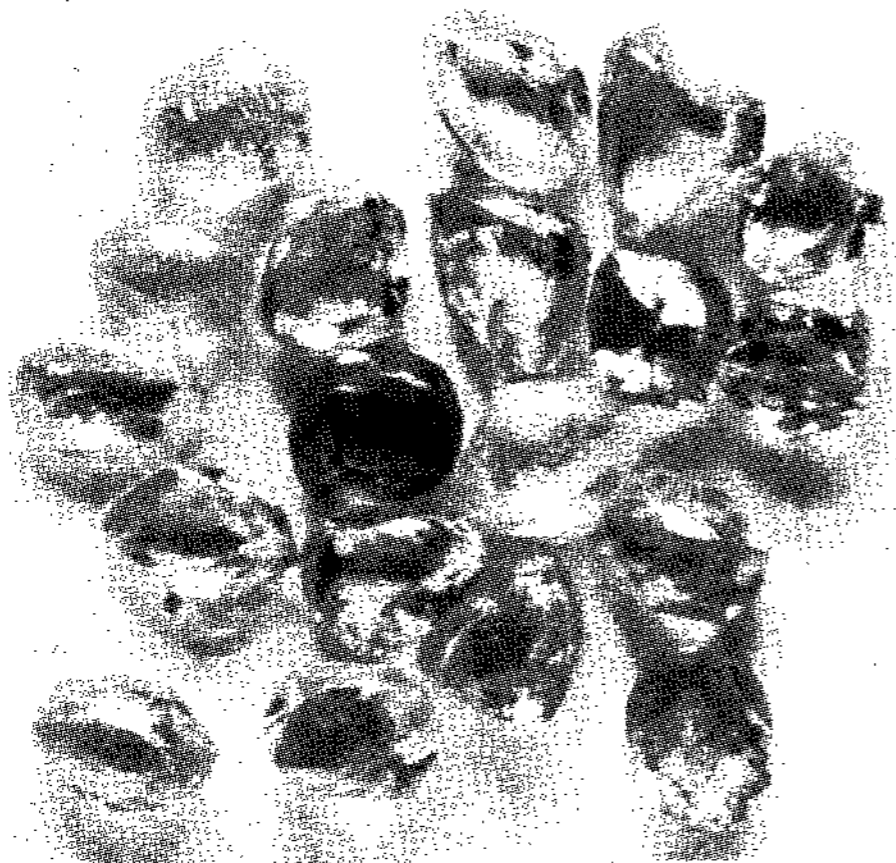


사진 7. 공구재료로 사용되는 천연 다이아몬드 원석

하기 위해 합성 다이아몬드를 사용하면 육안으로 쉽게 연마방향을 찾을 수 있어 초보자도 용이한 작업을 할 수 있게 되었다. 사진 8은 시판되고 있는 합성 단결정 다이아몬드의 형태이다. 그러나 이러한 합성 다이아몬드는 그 가격이 천연 다

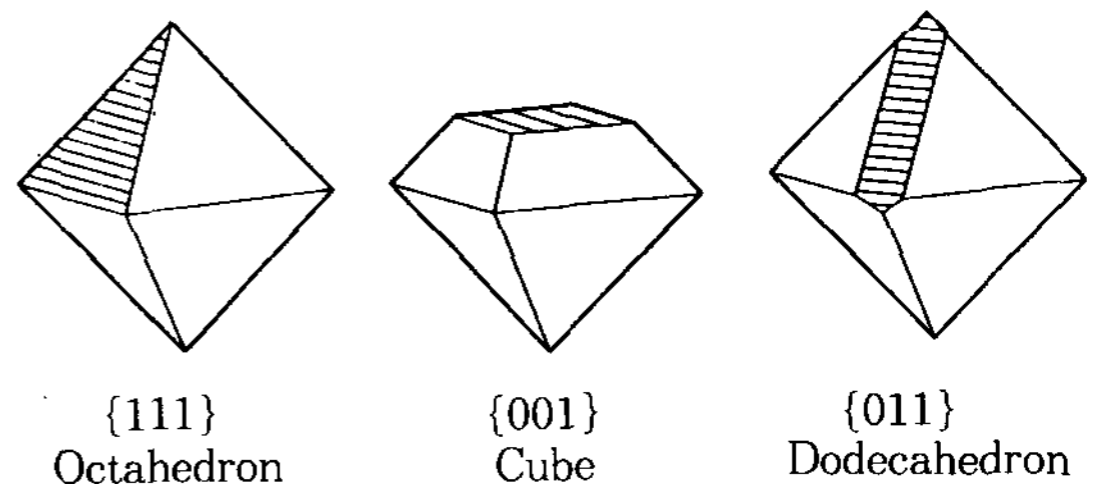


그림 3. 8면체 다이아몬드에 있어서 {111}, {001}, {011}면의 위치

이아몬드보다 수배 비싸 오늘날 많이 사용되고 있지 않으나 점차적으로 증가하고 있는 추세이다. 다이아몬드 연마는 주철판 위에서 $0\sim 1\mu m$ 의 다이아몬드 파우더를 도포해서 행해진다. 연마가 끝나면 화이트 상크 위에 브레이징하게 되는데 이때 물리적 결합방식과 화학적 결합방식이 이용된다. 물리적 결합방식의 경우는 예전부터 시행해온 방식으로 날 부위의 보강체가 복잡하게 형성되어야 한다. 그러나 최근 화학적 결합방식의 개발로 인해 날부위의 형상이 단순해져 가공 및

사용상에 많은 유리함을 갖고 있다. 그러면 실제 각종 Al합금의 절삭가공 예를 들어보기로 한다. 서두에서도 기술한 바와 같이 대부분 전자부품용 Al합금에 경면 절삭가공이 이루어지고 있다.

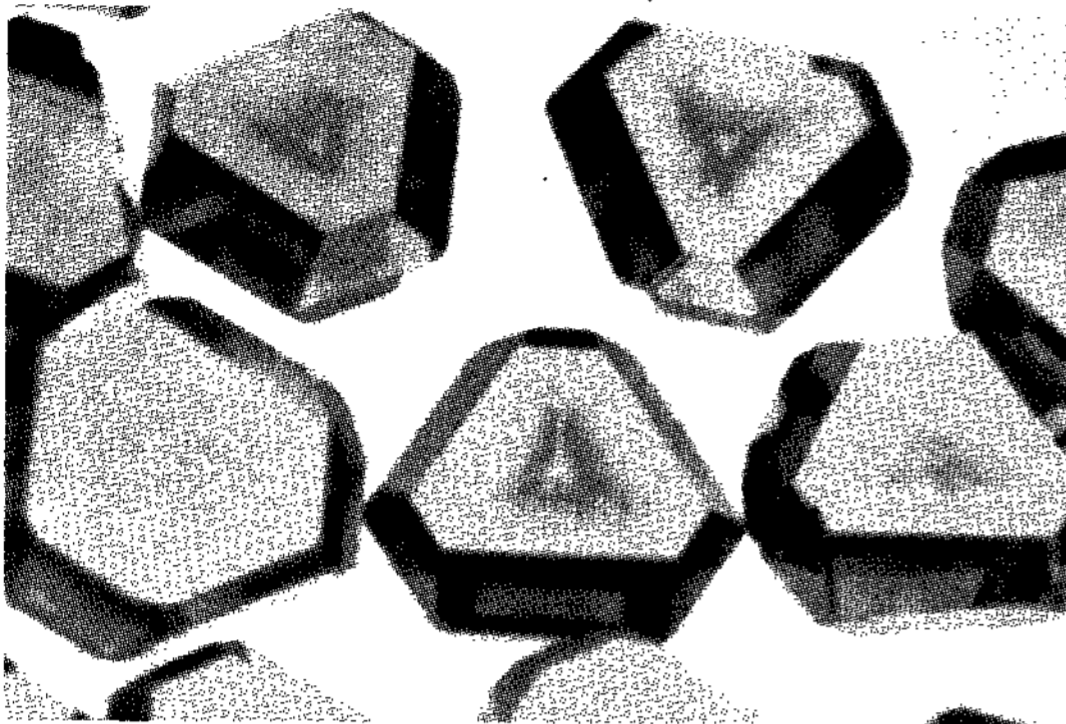


사진 8. 시판되고 있는 합성 단결정 다이아몬드의 형태

4.1 VTR용 헤드드럼 가공

최근 VTR 시장의 급격한 성장과 더불어 Al합금의 수요가 증대되고 있는 것은 역시 VTR의 핵심 부품인 헤드드럼의 사용이 증가하고 싱글, 더블 6헤드로 점차 복합화하기 때문이라고 생각된다. 또한 DAT(Digital Audio Taperecorder)의 새로운 출현으로 헤드드럼의 수요가 더욱 더 증대될 전망이다.

이러한 VTR 등의 테이프 주행에 사용되는 회전 헤드드럼에는 경량, 비자성의 이유로 Al합금이 채용되고 있는 것은 주지의 사실이다.

VTR용 헤드드럼 가공에는 전술한 PCD 공구와 단결정 다이아몬드 공구가 모두 사용되는데 테이프가 닿는 면은 鏡面을 요하므로 단결정 다이아몬드 공구가 이용된다. 이러한 단결정 다이아몬드 공구도 수명이 문제가 되는데 최근 국내에서 고온 열처리에 의한 공구가 개발되어 기존 외제에 비해 그 수명이 수배나 늘어나 커다란 생산성 향상을 이루게 되었다.

4.2 감광드럼의 가공

전식복사기, 팩시밀리, 레이저 프린터 등에 사용되는 감광드럼은 Al합금의 薄肉형태이다. 이것은 초정밀 선반으로 가공된 후 감광제로 코팅해서 마무리한다. 그러나 이러한 방식으로 제조된

것은 마모가 빠른 단점이 있어 최근 표면을 비정질화해서 경도를 높인 것이 개발되어 실용화되고 있다. 이러한 드럼은 최대 높은 거칠기 $0.01\mu\text{m}$ 의 면조도가 얻어질 정도로 단결정 다이아몬드 공구에 의해 초정밀 선삭가공되고 있다. 사진 9에 단결정 다이아몬드 공구에 의해 가공된 VTR 헤드드럼과 복사기 감광드럼을 나타낸다.

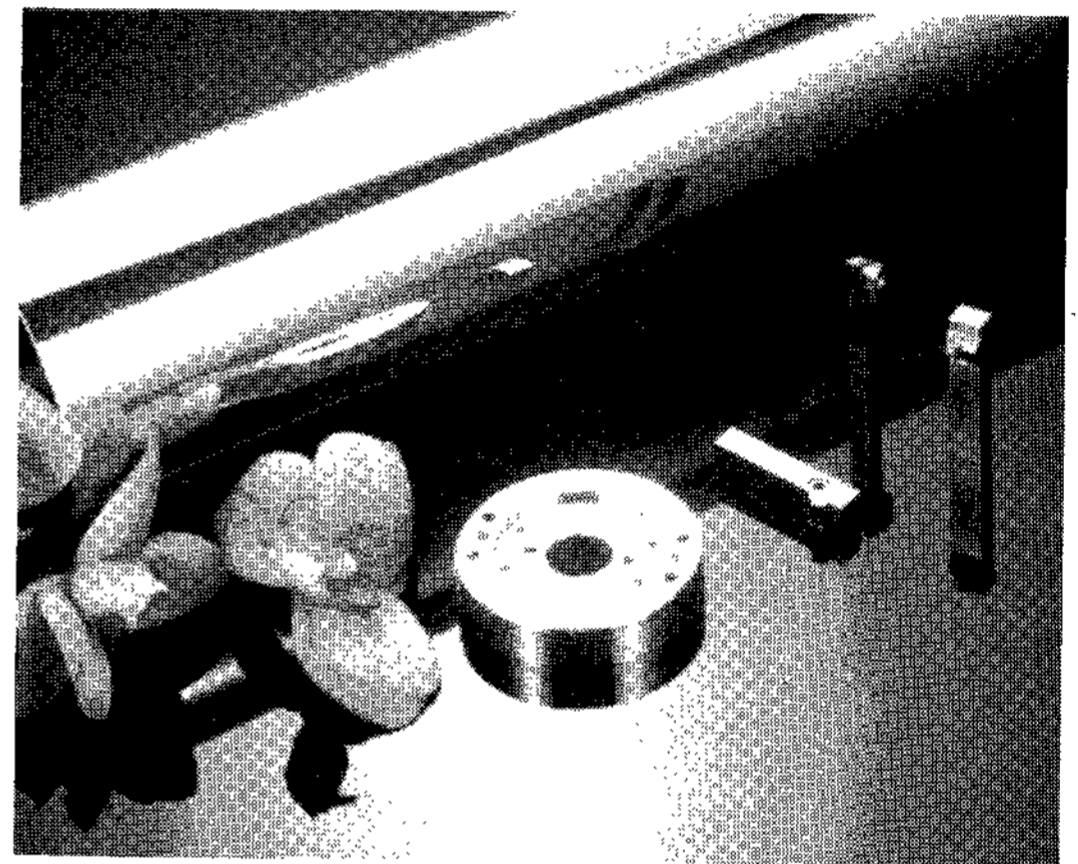


사진 9. 단결정 다이아몬드 공구에 의해 가공된 VTR 헤드드럼과 복사기 감광드럼

4.3 폴리곤 미러의 가공

폴리곤 미러는 컴퓨터의 印字部인 레이저 빔 프린터와 바코드 리더 등에 조립되는 레이저 빔 미러로서 사용된다. 반사율, 산란율 등 경면으로서의 엄격한 품질이 요구되며, Al기판을 초정밀 절삭후 SiO_2 를 증착하여 미러 형태 스캐너로 제작한다. 최근 다이아몬드 공구는 선단 R에 윤곽도가 $0.05\mu\text{m}$ 까지 연마하는 가공기술이 확립되어 면조도를 $0.02\mu\text{m} R_{\text{max}}$ 까지 얻게 되었다.

5. 氣相合成 다이아몬드 코팅공구에 의한 Al합금의 가공

전술한 바와 같이 수송기관의 경량화에 따른 수 있으며, 초경공구가 해결하지 못한 절삭가공 분야를 한층 높게 끌어올린 획기적인 절삭공구라 할 수 있다.

현재로서는 인서트팁, 바이트, 엔드밀, 리마,

표 4. 다이아몬드 코팅 드릴의 성능

드릴 경	피삭재	초경합금드릴 가공구멍	다이아몬드	절삭조건
φ2.5	알루미늄합금 (ADC 12)	2,000	258,000	회전수 : 20000RPM 이송속도 : 0.08mm/rev 절삭액 : 수용성 에멀존
φ6.0	알루미늄합금 (A 390)	100	2,300	회전수 : 80000RPM 이송속도 : 0.1mm/rev 절삭액 : 수용액
φ3.0	GFRP	3,000	30,000	회전수 : 40000RPM 이송속도 : 500mm/rev 절삭액 : 수용성
φ1.5	WC계세라믹스 가소결체	100	14,000	회전수 : 1000RPM 이송속도 : 0.01mm/rev 절삭액 : 건식 절삭

Al합금의 수요의 증가에 따라 PCD 공구의 사용량도 증대되고 있다. 그러나 PCD의 경우에 자신이 난가공성을 갖고 있고 브레이징해서 사용하기 때문에 드릴과 엔드밀의 복잡한 형상의 절삭공구에 응용하는 것은 특수 기술을 요하게 된다. 따라서 이러한 절삭공구에도 응용할 수 있는 다이아몬드 코팅의 실용화가 행해지고 있다. 최근에 개발된 코팅드릴은 10~100배 이상의 수명개선이 기대되고 있음을 표 4에서 알 수 있다.

6. 결 론

급속한 산업발전은 새로운 재료, 새로운 공구를 끊임없이 탄생시키고 있으며 이에 따른 High-Technology의 형성도 수반되고 있다. 이러한 현실속에 요구되는 각종 Al합금 부품의 소재개발과 개발된 소재의 효과적인 가공은 첨단산업을 지지해 주는 필수적인 요소라 할 수 있다. 따라서 장차 제품의 고기능화에 따른 특수 Al합금의 개발이 점점 중요성을 띠게 되고 이러한 Al합금의 높은 정밀가공을 위한 다이아몬드 공구의 개발은 더 한층, 필요하게 됨은 말할 필요도 없다. 점점 진화되어 가는 Al합금의 성능을 충분히 끌어내기 위해서는 가공 초기 단계부터 다이아몬드 공구를 이용하는 것이 최선책이다. 다만 Al합금의 면조도가 크게 문제시 되지 않는 경우는 PCD공구로 鏡面을 요구할 때는 단결정 다이아

몬드 공구로 적용하게 되면 대부분의 경우 성공적인 결과를 낳게 된다.

마지막으로, 전반적인 다이아몬드 공구에 관해 Al합금을 중심으로 설명하였으나, 일반적이며 광범위한 내용이 되어 부분적으로 이해하기 어려운 곳이 있을 것으로 믿으나 업무에 조금이라도 도움이 되었으면 한다.

참 고 문 헌

1. 倉田豊 : 다이아몬드툴, 日經技術圖書, (1987) 628
2. S. F. Krar, E. Ratterman : Superabrasive, McGraw-Hill, (1990) 152
3. 정운재, 김기태, 김상훈 : 한국주조공학회지, 13 (1993) 17
4. 森五郎 : 非鐵金屬材料選擇のポイント, 日本規格協會, (1984) 13
5. (社)General Electric : COMPAX Catalogue
6. 狩野勝吉 : 難削材の切削加工技術, 工業調査會, 日本 (1989) 54
7. 小山喜照, 深尾良郎 : NEW DIAMOND, 5 (1989) 54
8. 神轉一隆, 竹端青己, 吉田昇一 : NEW DIAMOND, 8 (1992) 34
9. ODK 뉴스, 第60號 (1990) 4
10. J. Wilks, E. Wilks : Properties and Application of Diamond, Butter Worth, (1991) 379