

다기공 다이아몬드 연삭숫돌의 개발에 관한 연구

허성중*

A Study on the Development of Diamond Grinding Wheel with Multi-Porous Structure

Seong-Jung Heo *

Abstract

Diamond wheels with fine grains and multi-porous structures are newly trial developed for smoothing and mirror finishing materials. Grinding wheel must have performed both to remove tool marks efficiently and to contact elastically with curved surfaces, that are employed for ultra precision and high performance grinding of difficult-to materials such as tungsten carbide alloy using tool and die materials. Diamond grains are bonded by a melamine resin to prevent the decrease of machining efficiency due to grain sinking within the bond materials. Also, highly foamed structures are developed to increase the flexibility of the grinding wheel, and to induce self-sharpening by increasing contact pressure between the grinding wheel and workpiece surfaces.

In this paper, melamine-bonded diamond wheels try to manufacture, then the forming method of grinding wheel are suggested, and the grinding characteristics of melamine-bonded diamond grinding wheel are also illustrated.

Keywords : Difficult-To Materials(난삭재), Die Materials(금형재료), Mirror finishing(경면다듬질), Self-Sharpning(자생작용) Melamine-bonded Diamond Grinding Wheel(멜라민본드 다이아몬드 숫돌)

1. 서론

금형의 가공공정은 형상창성의 가공공정 및 다듬질가공으로 구분⁽¹⁾되며, 양자의 가공공정은 사용하는 공구의 종류와 공작기계의 운동방식을 크게 변화시킬 필요가 있다. 따라서 종래는 이들 가공공정을 분리시킴과 함께 각 공정

정을 자동화하려는 시도가 행하여 지고 있다⁽²⁾.

금형의 자동가공을 실현하려면 특히 다듬질 가공행정의 자동화를 강구해야 하며 이 경우, 가공 흔적이 없는 금형의 가공면을 얻기 위해서는 연삭공구를 금형의 표면에 면접촉시킨 후에 공구와 가공표면과의 상대속도 및 가공면의 법선방향에 작용하는 입자력을 일정하게 하는 공구의 자세제

* 두원공업전문대학 기계과

어 기술과, 금형의 곡면에 잘 적응함과 동시에 눈막힘 (grazing)과 눈무덤 (loading)이 발생하지 않아 소정의 연삭성능을 지속적으로 얻을 수 있는 새로운 공구의 개발이 필요하다.

이들 기술 개발의 필요성은 종래부터 인식되어 왔고 더구나 자세제어기술에 관해서는 다축정압기구를 가진 티칭 (teaching) 모방제어의 연삭로봇과 3축 정압기구를 가진 자기 모방제어의 연삭장치 등⁽³⁾이 이미 개발되어져 있다.

공구기술에 관해서는 다종다양한 공구가 금형의 연삭에 사용되어 진 것은 사실이지만 그것들은 평활가공과 경면다듬질가공을 분리하여 행하는 것을 목적으로 개발된 것이므로 다듬질가공행정을 일관시켜 행하는 것을 지향한 것은 아니었다.

예를들어 원호상의 절인형상을 가진 볼엔드밀⁽⁴⁾과 PVA 탄성숫돌을 조합시켜 가공시간을 20% 정도 단축시킨 경우가 있으며, 회전공구를 사용한 형상가공과 절삭가공을 다축제어 공작기계로 병행함에 따라 평활가공으로 달성하여 얻는 형상정도와 표면거칠기를 향상시키려는 연구⁽⁵⁾ 및 평활가공과 경면 다듬질가공과를 일관시켜 행할 수 있는 연삭공구를 개발하려는 연구⁽⁶⁾가 이미 진행되고 있다.

그리고 仙波 등⁽⁷⁾은 이와 같은 문제점을 극복하기 위해 발포구조를 가진 멜라민본드 다이아몬드 연삭숫돌을 시험 제작하여 강성 및 유연성의 측면에서 상당히 진전된 결과를 얻었다. 동시제어가 가능한 공작기계의 자유도는 증가하는 경향⁽⁸⁾이며, 금형의 다듬질가공에 필요한 공구의 자세제어는 가능해 졌다.

볼엔드밀의 이송마크가 잔류하는 거칠기가 5 μ m Rmax 정도의 가공면을, 경면이라 불리우는 50nm Rmax 정도의 가공면까지 단일 공구로 더구나 고능률로 다듬질하기 위해서는 유리지립 보다는 오히려 고정지립을 사용하는 것이 적절하다고 생각한다.

미립의 숫돌을 사용한 상태에서 소정의 연삭성능을 연속적으로 얻기 위해서는 숫돌의 자생작용을 활성화 시켜야 되지만 숫돌의 결합도가 너무 낮게 되면 숫돌의 손모가 급격하게 되고 변화된 숫돌의 형상에 일치하는 숫돌의 껍적을 가공과정 중에 수차 변화시킬 필요가 생긴다.

숫돌의 이송마크를 가공면에 남기지 않게 하기 위해서는 숫돌 자체를 가공표면에 적응시킬 필요가 있지만 이 형상추종성⁽⁹⁾을 중요시하면 기존의 탄성숫돌과 같이 지립의 지지강성이 부족하여 눈막힘이 생겨 양극에 입자력이 높아짐으로써 공작물의 각부에서 숫돌의 마모량이 급증하고 숫돌의 형상이 변화하여 눈막힘과 숫돌의 형상변화에 대한

대책이 필요한 문제점을 생각할 수 있다.

따라서 평활가공과 다듬질가공을 병행함으로써 금형의 가공시간을 단축시킬 수 있는 연삭숫돌의 개발을 위해서는 미립의 숫돌입자를 사용하여 눈막힘이 없고, 고능률가공을 행하며 연삭성능과 형상이 변화하지 않도록 내구성이 있고 곡면 적응성이 좋은 성능을 가진 숫돌을 개발할 필요가 있다.

이와 같은 배경으로 본 연구에서는 금형의 평활가공과 경면다듬질가공을 병행할 수 있도록 초미립의 다이아몬드 숫돌입자를 탄성정수가 높은 멜라민 수지로 결합시켜 발포 구조를 가진 다기공 다이아몬드 연삭숫돌의 개발을 시도하였다.

2. 다기공 다이아몬드 숫돌의 시험제작

2. 1 성형방법

숫돌의 성형에 사용된 분말의 내역 가운데 숫돌입자는 입경 3~5 μ m의 고충격강도 다이아몬드, 결합제로는 레진본드 숫돌의 성형에 많이 사용되고 있는 페놀 수지에 비해 탄성률과 강도가 높고 내수성도 우수한 멜라민수지⁽¹⁰⁾를 사용하였다. 수지의 경화반응시에 생기는 수분과 반응하여 이산화탄소를 발생하는 탄화수소 나트륨(SAC)을 발포주제, 산화 피로린산 소다(SAP)를 발포조제, 폴리비닐알코올(PVA)을 가소제⁽¹¹⁾로 사용하였다.

충분히 혼합시킨 이들 분말을 금형에 넣고 가열시켜 6호 스트레이트 컵형의 숫돌을 성형하였다. 이 경우 성형후의 숫돌의 외경은 30mm, 두께는 15mm로 하여 금형에 넣는 분말의 체적을 변하게 함에 따라 식 [2. 1]과 같이 정의된 기공률 (α_a)을 조절한다.

$$\alpha_a = [V_{air} / (V_{air} + V_{powder})] \times 100 \quad [2. 1]$$

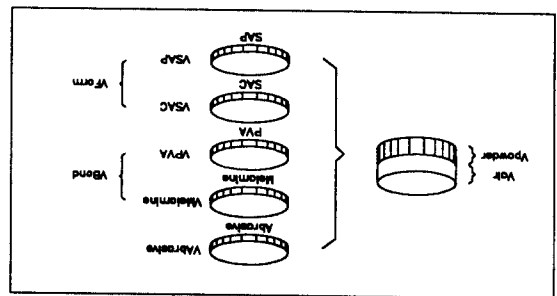


Fig. 1 Powders that were used for grinding wheel

수지의 경화반응시에 생기는 수분이 미량으로 되는 것과 생성된 기포를 안정화시키는 것이 곤란하여, 최소한 상압의 하에서는 α_a 가 80% 이상의 숫돌을 시험 제작하는 것은 어려웠다.

2. 2 다이아몬드숫돌의 강도와 평가방법

탄성률이 높은 결합제를 사용하여 숫돌에 형상추중성을 주기 위해 기공률을 높게하는 과정에서는 기공으로 인해 수지부의 단면적이 좁아지므로 미세고발포체를 제작할 필요가 있다고 생각하며 발포제의 배합량, 배합비 및 가소제의 배합량과 성형온도, 시간 등의 변화에 따라 숫돌의 강도와 발포구조가 달라질 것이다.

따라서 이들 파라메타를 변화시킨 숫돌을 시험제작하여 미세고발포체를 만들기 위한 기초실험을 행하였다.

즉, Fig. 1과 같은 실험장치로써 시작된 숫돌에 대한 평면연삭 실험을 행하여 법선연삭저항을 측정함으로써 숫돌의 강도와 발포구조와의 관계를 파악하고자 하였다.

우선 연삭조건은 Table 1과 같이 하며, 숫돌의 연삭에는 스트레이트 컵형의 레진본드 숫돌(SDC 600N 125BW-3.0)을 사용하였다. 또 숫돌의 트루잉(truing)과 드레싱(dressing)에는 GC 숫돌(GC120H8V)를 장착한 구동식 로타리드레서를 사용하였다. 또한 연삭실험은 시작한 숫돌의 표면에서 5mm 내부에 들어간 단면에 대하여 행하며, 숫돌절입량은 2 μ m/1왕복시켜 정상상태에 도달한 법선연삭저항을 측정하였다.

Table 1 Grinding conditions

| | |
|----------|--|
| Truing | Grinding wheel : GC120H8V(125d×20t×16h) |
| | Revolution speed of truing : 500 rev/min |
| | Coolant : Soluble(1/50) |
| Dressing | Revolution speed of grinding wheel : 200 rev/min |
| | Table speed : 600mm/min |
| | Depth of cut : 1 μ m |
| | Coolant : Soluble(1/50) |
| Grinding | Revolution speed of grinding wheel : 500 rev/min |
| | Table speed : 600mm/min |
| | Depth of cut : 2 μ m/rev. |
| | Grinding type : traverse |
| | Coolant : Soluble(1/50) |

2. 3 발포제의 배합비와 성형온도

결합제로 사용된 멜라민수지의 경화 반응은 가열온도와 경화 촉매로서 사용되는 첨가제의 pH가 다름에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다. 발포제로서 사용된 탄화수소 나트륨(SAC)은 약염기성, 산화 피로린산 소다(SAP)는 약산성의 성질을 가지고 있다. 따라서 성형온도와 성형후의 다이아몬드 숫돌의 강도는 SAC와 SAP의 배합비가 다름에 의해 변화할 가능성이 있다고 생각되었다.

여기서 식 (2. 2)와 같이 정의된 발포제의 배합비 β 를 변화시킨 다이아몬드 숫돌을 시작하여 다이아몬드 숫돌의 강도와 성형온도와의 관계를 규명하는 것을 시도하였다.

$$\alpha_F = (V_F / V_{\text{powder}}) \times 100$$

$$\beta = [V_{\text{SAP}} / (V_{\text{SAP}} + V_{\text{SAC}})] \times 100 \quad (2. 2)$$

최고온도에 달하기 까지의 가열시간을 30분으로 고정함과 함께 최고온도를 변화시킨 경우에 얻어진 법선연삭저항 F_n 과 성형온도와의 관계를 Fig. 2에 나타 내었다. Fig. 2는 다이아몬드 숫돌의 집중도 C를 50, 기공률 α_a 를 60%, 발포제의 배합비 α_F 를 10%, PVA의 양 α_P 를 5%로 설정한 경우의 결과이다.

식(2. 2)와 같이 정의된 SAP와 SAC의 배합비 β 를 변화시킨 각 경우에도 법선연삭저항은 145℃ 부근에서 최고에 달한 후에 성형온도가 증가함에 따라서 감소하여진다. 이와 같이 발포제의 배합비를 변화시켰다 하여도 145℃으로 가열하면 소멸되는 것이 확실하게 확인되었다.

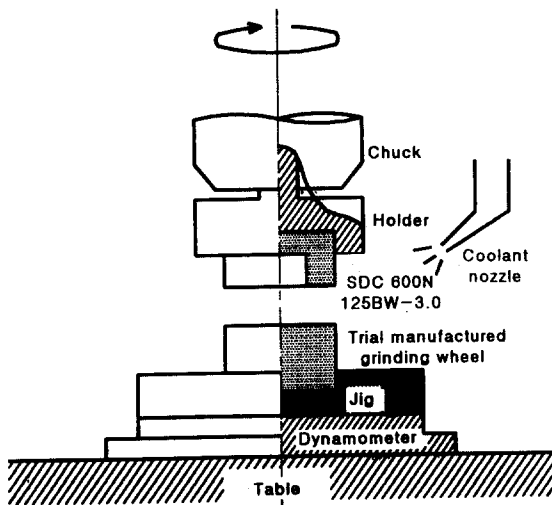


Fig. 2 Experimental apparatus

또한 성형온도가 135℃의 경우에 법선연삭저항이 낮은 것은 성형온도가 낮아지기 때문에 다이아몬드 슷돌이 완전히 소결되지 않는 것을 나타내고 있다.

이러한 현상은 발포제가 염기성으로 작용하면 메틸렌 에텔 결합이 일어나는 것이, β 의 값이 증가하여 발포제가 산성으로 작용함에 따라 메틸렌 결합이 생성되어, 분자결합의 강도가 변화한 것을 나타낸다.⁽¹²⁾ 또 메틸렌 에텔 결합과 메틸렌 결합과의 비율이 변화함에 따라 분자결합이 열에 의해 분해되는 속도에 차이가 있는 것을 나타내고 있다. 이 경화반응이 완료된 후에 생긴 열분해속도가 빨라진다는 것은 성형시의 온도 변화에 의해 슷돌의 강도 특성이 크게 변화하여 성형온도가 높아짐에 따라 연삭저항이 감소하는 현상을 나타내고 있다.

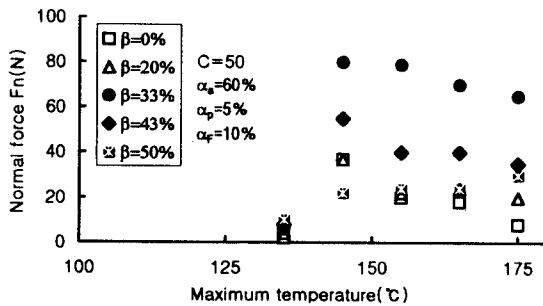


Fig. 3 Relation between normal force and maximum temperature according to volumetric percent of forming agent

2. 4 발포제의 배합량과 성형온도

탄화수소 나트륨(SAC)과 산화 피로린산 소다(SAP)가 단순히 발포제로서만이 아니라 경화 촉매의 역할까지 한다면 다이아몬드 슷돌의 강도 특성은 식(2. 2)와 같이 정의된 발포제의 배합량 α_f 가 다름에 따라라도 변화할 것이다. 따라서 집중도 C를 50, 기공률 α_s 를 60%, PVA울 α_p 를 5%로 설정함과 함께, 발포제의 배합량 α_f 를 변화시킨 슷돌을 시험제작하여 슷돌의 강도와 성형온도와의 관계를 규명하고자 하였다.

우선, SAP와 SAC와의 배합비 β 는 0.5로 설정하고 발포제의 배합량 α_f 를 10, 20, 30%로 변화시킨 경우에 얻어진 법선연삭저항과 성형온도와의 관계를 Fig. 3에 나타

내었다. α_f 를 변화시켰다 하여도 145℃ 이상의 온도에서 성형하면 경화반응은 종료되었다고 판단된다. 또 α_f 를 변화시킨 각 경우의 법선연삭저항은 성형온도가 145℃ 이상의 범위에서는 각각 거의 변화하지 않음을 알 수 있다.

여기서 경화반응이 완료된 후에 생기는 열분해의 속도는 SAP와 SAC의 배합비 β 가 달라지면 변화하지만 β 가 같게 되면 발포제의 배합량 α_f 에는 의존하지 않는다는 것과 소결 후 슷돌의 강도는 α_f 가 증가함에 따라 저하하는 것이 명확해 졌다.

이 경우에 얻어진 기공의 형태는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 발포제의 배합량 α_f 를 변화시켜도 그다지 크기는 변화하지 않는다. 따라서 α_f 가 증가함에 따라 슷돌의 강도가 저하된 것은 결합제의 양이 감소하기 때문에 슷돌의 결합도가 낮아져서 발포구조가 약해졌기 때문이라고 생각된다.

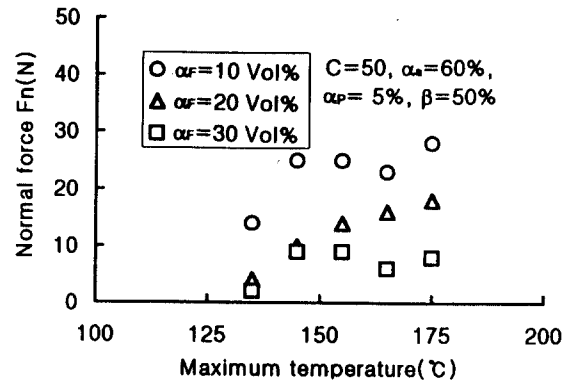


Fig. 4 Relation between normal force and maximum temperature according to volumetric percent of forming agent in the bond posder

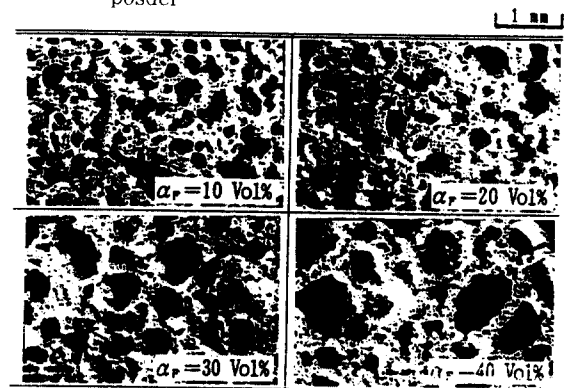


Fig. 5 Microphotograph of pore structures derived by varying the composition of forming agent

숫돌입자의 지지강성을 높인다는 관점에서 본다면 숫돌의 결합도를 낮게하는 것은 좋지 않지만 숫돌의 형상추종성을 부여하는 관점에서는 발포제의 배합량 α_F 를 높임에 따라 숫돌의 결합도를 낮추는 방법도 하나의 유용한 수단이라고 생각된다.

2. 5 집중도와 발포의 한계

고능률적인 가공을 행하기 위해서는 숫돌입자의 지지강성을 높임과 동시에 집중도 C를 높임에 따라 작용 지립수를 증가시킬 필요가 있다. 또 숫돌에 형상추종성을 가지게 하기 위해서는 숫돌의 기공율을 높이는 것 외에 발포제의 배합량 α_F 를 증가시키에 따라 숫돌의 결합도를 낮추는 것도 하나의 수단이라고 생각한다.

단지 집중도 C와 발포제의 배합량 α_F 가 증가함에 따라 수지율이 감소하기 때문에 균일한 발포구조를 가진 숫돌을 제작하는 것은 어려울 것이다.

여기서 기공률 α_a 를 60%, PVA를 α_p 를 5%, 발포제의 배합비 β 를 50으로 설정하고 집중도 C와 발포제의 배합량 α_F 를 변화시킨 숫돌을 시험제작하여 숫돌의 성형에 필요한 수지율을 규명하기 위한 실험을 행하였다.

우선 Fig 3과 같이 얻어진 기초실험의 결과에 따라 성형온도는 150℃, 최고온도에 도달하고 난 후부터 가열시간은 30분으로 한다.

집중도 C를 50, 100, 150으로 변화시키고 동시에 발포제의 배합량 α_F 를 변화시킬 경우에 얻어진 법선연삭저항과 α_F 와의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. α_F 를 증가시킨 경우, 집중도 C가 50의 경우에는 40%, 집중도가 100의 경우에는 30%, 집중도가 150의 경우에는 α_F 가 20%

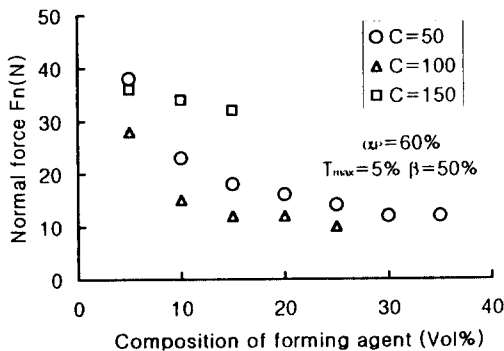


Fig. 6 Relation between norma force and composition of forming agent

부근까지는 균일한 발포구조를 가진 숫돌을 제작하는 것이 가능하였다.

이 경우에 얻어진 기공의 형태는 Fig. 5의 흰색으로 나타나는 바와 같다. 집중도 C가 50과 100의 경우에 비해 150의 경우에는 기공의 크기와 기공에 둘러쌓여 검은색으로 나타나는 수지부의 단면적이 크게 변화하고 있는 것을 알 수 있다.

따라서 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 α_F 를 변화시킨 경우의 다이아몬드 숫돌의 강도특성이 집중도 50, 100의 경우와 150의 경우에서 큰 차이를 나타내는 것은, 기공에 둘러쌓인 수지부의 단면적이 양자에서 달라진 것이 영향을 미친것이 아닌가하고 사료된다.

2. 6 발포제의 배합량과 발포의 한계

기공률을 60%로 고정시킨 경우, 균일한 발포구조를 얻기 위해서는 최저라도 수지율이 50% 정도는 필요하다는 것이 명확하게 되었다. 이 균일한 발포구조를 얻기 위해 필요한 수지의 양은 숫돌의 기공률이 달라짐에 따라 변화될 가능성이 있다.

여기서 집중도 C를 100, PVA를 α_p 를 5%, 발포제의 배합비 β 를 50%로 설정하고 발포제의 배합량 α_F 와 기공률 α_a 를 변화시킨 숫돌을 시험제작하여 숫돌의 성형에 필요한 수지율을 규명하기 위한 실험을 행하였다. 이 경우에도 숫돌의 성형온도는 150℃, 최고온도에 도달하고 부터의 가열시간은 30분으로 한다.

발포제의 배합량 α_F 를 0, 7.5, 15%로 변화시키면서 다이아몬드 숫돌의 기공률 α_a 를 증가시킨 경우에 얻어지는 법선연삭저항과 기공률 α_a 와의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 7에 기공의 형태를 나타내었듯이 균일한 발포구조를 얻을 수 있는 기공률 α_a 의 상한은 α_F 가 0%의 경우는 80%, α_F 가 7.5%의 경우에는 75%, α_F 가 15%의 경우에는 70% 정도가 됨을 알 수 있다.

여기서 균일한 발포구조를 얻기 위해 필요한 수지율 α_M 과 그 수지율에 대응하는 발포의 최대한계치 α_a 와의 관계를 구하면 Fig. 8의 결과가 얻어진다.

수지율과 최대한계기공률과는 거의 선형적인 관계가 되며, 수지율이 증가함에 따라서 최대한계기공률은 증가하는 것이 분명해졌다. 또 Fig. 6의 결과에 있어서 α_a 가 증가함에 따라 법선연삭저항이 감소하고 있는 것은 Fig. 7에서도 명확해 졌듯이 발포가 거친 구조로 변화되었기 때문인 것으로 생각된다. 또 발포제의 배합량 α_F 가 0이 됨에

도 불구하고 발포구조가 얻어진 것은, 수지가 용융되면서 생긴 수분이 기화하여 열팽창되었기 때문이라고 생각된다.

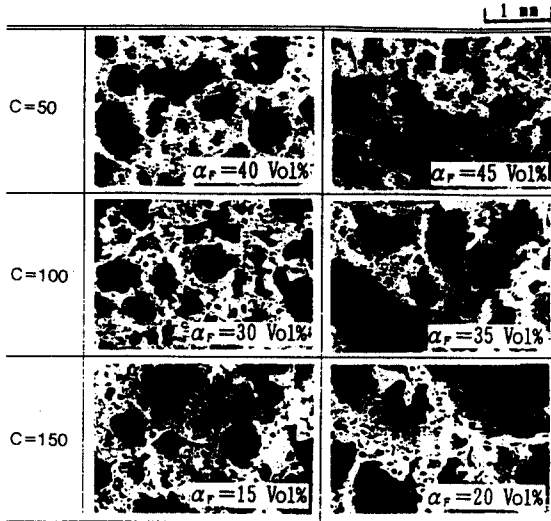


Fig. 7 Microphotograph of pore structures derived by varying the composition of forming agent

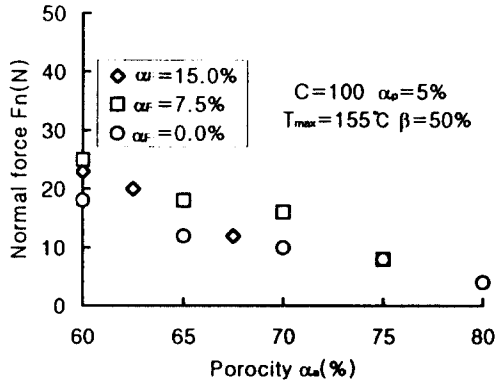


Fig. 8 Relation between normal force and porosity

Fig. 9는 성형온도를 150℃, 최고온도에 도달하고 부터의 가열시간을 30분으로 하고 발포제의 배합량 α_F 를 0%로 하여 시험제작한 다기공멜라민본드 슷들의 전체 기공의 분포형태를 살펴 보기 위해 배율을 작게하여 촬영한 현미경 사진이다. 그림에서 슷들의 전체면에 걸쳐 균일한 기공의 형성에 만족할 수 있는 것은 아니지만 이는 슷들의 성형과정에서 기존의 페놀수지 레진본드 다이아몬드스�들의 성형에 사용하는 열간 프레스를 변형하여 사용하였기 때문이라 여겨지며 전체면에 고루 가열이 될 수 있는 방법을 택하면 해결할 수 있을 것이다.

따라서 이러한 소정의 자생작용과 형상추종성을 가질 수 있는 슷들의 시제품화 및 양산을 위해서는 여러 가지 파라메타의 변화를 통한 지속적인 연구를 비롯하여 가열로의 새로운 설계와 시험제작된 슷들의 효율적인 드레싱기법 등의 개발이 필요하다고 할 수 있다.

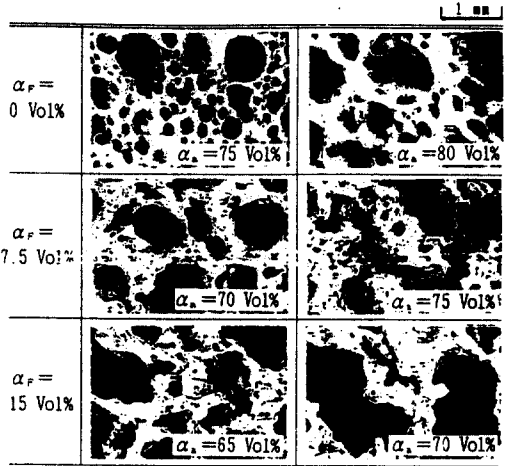


Fig. 9 Microphotograph of pore structures derived by varying the porosity

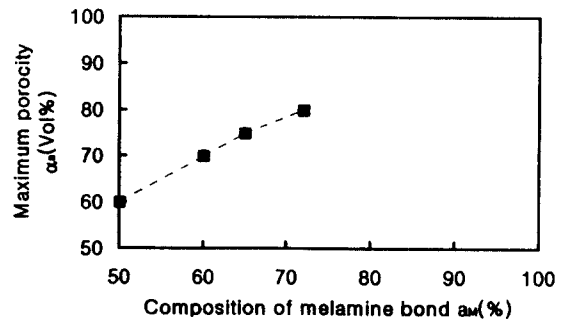


Fig. 10 Relation between maximum porosity and composition of melamine bond

3. 결론

금형의 가공시간을 단축화하기 위해 평활가공과 다듬질 가공과를 병행할 수 있는 눈막힘이 없고, 고능력가공을 행하며 연삭성능과 형상이 변화하지 않도록 내구성이 있고 곡면 적용성이 좋은 성능을 가진 슷들을 개발하기 위해, 결합제로서 사용한 멜라민수지, 발포제로서 사용한 탄화수소

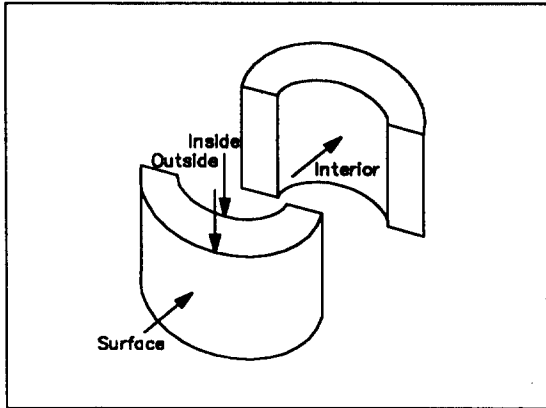


Fig. 11 Microphotograph of general pore distribution of trial manufactured diamond wheel

나트륨(SAC)과 산화 피로린산소다(SAP), 가소제로 사용한 폴리비닐알코올(PVA)이 시험제작된 슷들의 강도와 발포구조에 끼치는 영향에 대해 고찰하였다. 이 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) SAC와 SAP의 배합량과 배합비를 변화시킨 경우에도, 최고온도를 150℃, 최고온도에 도달하고 부터의 가열시간을 30분으로 설정하면 수지의 경화반응은 완전히 수행되어진 것이 규명되었다.
- 2) 집중도와 발포제의 배합량을 변화시킨 각 경우에 균일하게 발포되는 범위내에서 수지율을 감소시켜도 다이아몬드 슷들의 결합도가 저하되기 때문에 발포구조는 취약해진다.

3) 집중도를 100으로 할 경우, 수지율을 증가시킴에 따라 기공률이 80% 가까운 다이아몬드 슷들을 성형시키는 것이 가능하다. 또 균일한 발포구조를 얻는데 필요한 수지의 양과, 그 수지율에서 성형하여 얻은 기공률의 상한치와의 관계는 선형적인 관계가 성립되는 것이 명확해 졌다.

4) 시험제작된 슷들의 기공의 분포형태는 충분히 만족할 수 있는 상태는 아니었으나, 슷들 전체에 걸쳐 균일한 가열이 될 수 있는 방법을 새롭게 설계하여 시도함으로써 해결할 수 있을 것이라 여겨진다.

따라서 소정의 자생작용과 형상추종성을 가질 수 있는 슷들의 시제품화 및 양산을 위해서는 향후, 가열로의 새로운 설계를 비롯하여 여러 가지 파라메타의 변화를 통한 지속적인 연구와 시험제작된 슷들의 효율적인 드레싱기법 등의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 機械と工具編集部編, “最新金型製作技術”, 日刊工業新聞社, pp. 131-142, 1988
2. 幸田, “最近の金型仕上げ加工技術(1)”, 機械の研究, Vol. 40, No. 10, pp. 8-23, 1988
3. 幸田, “金型磨き加工とその自動化”, 日本砥粒加工學會誌, Vol. 34, No. 2, pp. 9-14, 1990
4. 機械と工具編集部編, “最新金型製作技術”, pp. 23-45, 日刊工業新聞社, 1988
5. 大平, 仙波, “へル加工特性の研究”, 1994年度日本精密工學會春季學術講演會講演論文集, pp. 553-554, 1994
6. 齊藤, 三好, 井田, 三浦, 昭和52年度精密工學會春季大會學術講演會前刷, pp.53-554, , 1994, pp. 121-122, 1977
7. 仙波卓彌, 大森舜二, “多氣孔メラミンボンドホイールの開發と金型材料の精密研削”, 福岡大學エレクトロニクス研究所所報, Vol. 11, pp. 109-115, 1994
8. 竹内, 横山, 久木, “6軸制御へル工具による曲面加工”, 1994年度日本精密工學會春季學術講演會講演論文集, pp. 559-560, 1994
9. 幸田, “最近の金型仕上げ加工技術(2)”, 機械の研究, Vol. 40, No. 11, pp. 24-28, 1988

10. 村橋, 小田, 井本, “プラスチックハンドブック”, pp. 884-889, 朝倉書店, 1980
11. 栗原, “高分子フィールドノート”, p. 126, 日刊工業新聞社, 1991
12. プラスチック加工技術便覧編執委員会, プラスチック加工技術便覧, p.205, 日刊工業, 1982