金型材料의 精密硏削을 위한 多氣孔 다이아몬드 숫돌의 開發

Development of Multi-Porous Diamond Wheel for Smooth and Mirror Finishing of Die Materials

목 차

1. 서론
2. 다기공 멜라민본드 다이아몬드 숫돌
3. 결론

許 盛 中*
Heo, Seong Jung

ABSTRACT

Development of diamond wheel with fine grains and multi-pore structures were newely attempted to be studied in this paper. Wheels, that are employed for the smooth and mirrow finishing of die materials such as tungsten carbide alloy using tool and die materials, must have both performances to remove tool marks efficiently and to contact elastically with curved surfaces. Diamond abrasive grains were bonded firmly by a melamine to prevent the decrease of machining efficiency due to grain sinking within the bond materials. Also, highly foamed structures were developed to increase the flexibility of the wheel, and to induce active self-sharpening by increasing contact pressure between the wheel and work surfaces.

In this paper, melamine-bonded diamond wheels are trial manufactured, then the forming method of wheels are explained.

Key Words: Multi-Porous Diamond Wheel(다기공 다이아몬드 숫돌),
Die Materials(금형재료), Self-Sharpening(자생작용),
Abrasive Grain(숫돌입자)

*기계제작기술사, 두원공업전문대학 기계과 조교수.

1. 서론

금형의 가공공정은 형상창성의 가공공정 및 다듬질가공으로 구분[1]되며, 사용하는 공구의 종류와 공작기계의 운동방식을 크게 변화시킬 필요가 있으므로 종래부터 이들 가공공정을 분리시킴과 함께 각 공정을 자동화하려는 시도가 계속되고 있다[2].

금형의 자동가공을 실현하기 위해서는 특히 다듬질 가공행정의 자동화를 촉진시킬 필요가 있으며 이 경우, 가공 흔적이 없는 금형의 가공면을 얻기 위해서는 연삭공구를 금형의 표면에 면접촉시킨 후에 공구와 가공표면과의 상대속도 및 가공면의 법선 방향에 작용하는 연삭압을 일정하게 하는 공구의 자세제어 기술과, 금형의 곡면에 잘 적응함과 동시에 눈막힘(grazing)과 눈무딤(loading)이 발생하지 않아 소정의 연삭성능을 지속적으로 얻을 수 있는 새로운 공구의 개발이 필연적이다.

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

한편, 공구기술에 관해서는 다종다양한 공구[4]가 금형의 연삭에 사용되어 온 것은 사실이지만 그것들은 평활가공과 경면다듬질가공을 분리하여 행하는 것을 목적으로 개발된 것으로 다듬질 가공행정을 일관시켜 행하는 것을 지향한 것은 아니었다.

금형의 가공시간에 차지되는 형상가공, 평활가공 및 경면다듬질가공의 비율과, 각 공정에서 얻는 표면거칠기와의 관계는 전체 가공시간 가운데서 70% 정도가 평활가공과 경면다듬질가공에 소요되며 가공시간을 단축시키려는 시도는 이전부터 있었다.

예를 들어 원호상의 절인 형상을 가진 볼엔드밀[4]과 PVA 탄성숫돌[1]을 조합시켜 가공시간을 20% 정도 단축시킨 경우가 있으며 이외에도 회전공구를 사용한 형상가공과 절삭가공을 다축제어 공작기계와 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.

한편 동시제어가 가능한 공작기계의 자유도는 증가하는 경향이며[8], 금형의 다듬질가공에 필요한 공구의 자세제어는 가능해졌다.

볼엔드밀의 이송마크가 잔류하는 거칠기가 5 ㎛ Rmax 정도의 가공면을, 경면이라 불리는 50nm Rmax 정도의 가공면까지 단일 공구로 더구나 고능률로 다듬질하기 위해서는 유리지립보다는 오히려 고정지립을 사용하는 것이 적절하다고 생각한다.

이 경우, 숫돌입자의 지지강성이 높은 결합제를 사용한 상태에서 50nm Rmax 정도의 가공면을 얻기 위해서는 입경이 작은 입자를 사용할 필요가 있지만 입경이 작아짐에 따라 숫돌 눈메움의 가능성이 높아지므로 이것들을 방지할 필요가 있다.

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 궤적을 가공공정 중에 수차 변화시킬 필요가 생긴다.

숫돌의 이송마크를 가공면에 남기지 않게 하기 위해서는 숫돌 자체가 가공표면에 적응시킬 필요가 있지만 이 형상추종성[9]을 중요시하면 기존의 탄성숫돌과 같이 지립의 지지강성이 부족하여 눈막힘이 생겨 양극에 연삭압이 높아짐으로써 공작물의 각부에서 숫돌의 마모량이 급증하고 숫돌의 형상이 변화하여 눈막힘과 숫돌의 형상변화에 대한 대책이 필요하다.

따라서 금형의 가공시간을 단축시키기 위해서는 평활가공과 다듬질가공을 병행할 수 있는 연삭숫돌의 개발을 위해 미립의 숫돌입자를 사용함으로써 눈막힘이 없고, 고능률가공을 행하며 연삭성능과 형상이 변화하지 않도록 내구성이 있고 곡면 적응성이 좋은 숫돌을 개발할 필요가 있다.

이와 같은 배경으로 본 연구에서는 금형의 평활가공과 경면다듬질가공을 병행할 수 있도록 초미립의 다이아몬드 숫돌입자를 탄성정수가 높은 멜라민 수지로 결합시켜, 자생작용을 활성화시킬 수 있는 발포구조 다기공 다이아몬드 연삭숫돌의 개발을 시도하였다.

2. 다기공 멜라민본드 다이아몬드 숫돌 (Melamine Bond Wheel)

2. 1 成形方法

숫돌의 성형에 사용된 분말의 내역 가운데 숫돌입자는 입경 3~5㎛의 고충격강도 다이아몬드, 결합제로는 레진본드 숫돌의 성형에 많이 사용되고 있는 페놀 수지에 비해 탄성률과 강도가 높고 내수성도 우수한 멜라민수지[10]를 사용하게 되었다. 이들 외에, 수지의 경화반응시에 생기는 수분과 반응하여 이산화탄소를 발생하는 탄화수소 나트륨(SAC)을 발포주제로, 산화 페로린산소다(SAP)를 발포조제로, 그리고 폴리비닐알코올(PVA)을 가소제[11]로 사용하였다.

잘 혼합시킨 이들 분말을 금형에 넣고 가열시켜 1A1 플랫형의 숫돌을 성형하였다. 여기서 성형후의 숫돌의 외경은 30mm, 두께는 15mm로 고정시켜 금형에 넣는 분말의 체적을 변화시킴에 따라 식 [2. 1]과 같이 정의된 기공률(α_a)을 조절한다.

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

수지의 경화반응 시에 생기는 수분이 미량으로 되는 것과 생성된 기포를 안정화시키는 것이 곤란하여, 최소한 상압 아래에서는 α_a가 80% 이상인 숫돌을 시험 제작하는 것은 어려웠다.

2. 2 다이아몬드 숫돌의 강도와 평가방법

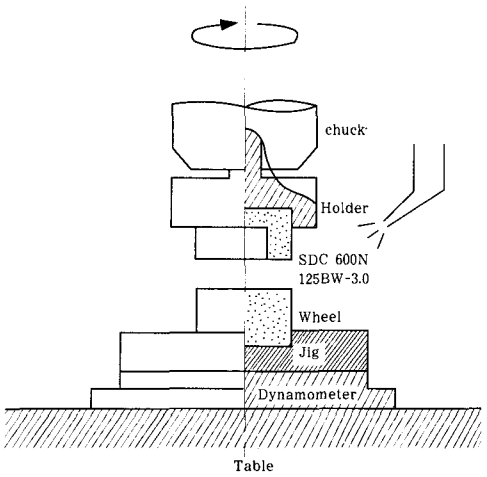
탄성률이 높은 결합제를 사용하여 숫돌에 형상추종성을 주기 위해 기공률을 높게 하는 과정에서는 기공으로 인해 수지부의 단면적이 좁아지므로 미세 고발포체를 제작할 필요가 있으며 발포제의 배합량, 배합비 및 가소제의 배합량과 성형온도, 시간 등의 변화에 따라 숫돌의 강도와 발포구조가 달라질 것이라고 생각된다.

따라서 이들 파라메타를 변화시킨 숫돌을 시험제작하여 미세 고발포체를 만들기 위한 기초실험을 행하였다.

또 <그림 1>과 같은 실험장치로써 시작된 숫돌에 대한 평면연삭 실험을 행하여 법선연삭저항을 측정함으로써 숫돌의 강도와 발포구조와의 관계를 파악하고자 하였다.

우선 연삭조건은 <표 1>과 같이 하며, 숫돌의 연삭에는 스트레이트 컵형의 레진본드 숫돌(SDC 600N125BW-3.0)을 사용하였다. 또 숫돌의 트루잉(truing)과 드레싱(dressing)에는 GC

숫돌(GC120H8V)을 장착한 구동식 로타리드레서를 사용하였다. 또한 연삭실험은 시작한 숫돌의 표면에서 5mm 내부에 들어간 단면에 대하여 행하며, 숫돌절입량은 2㎛/1 왕복시켜 정상상태에 도달한 법선연삭저항을 측정하였다.



〈그림 1〉 Experimental apparatus

〈표 1〉 Grinding condition

Truing & Dressing	Truer : GC120H8V(125D×20T×16H)
	Revolution speed of truer : 500rev/min
	Revolution speed of grinding wheel : 200rev/min
	Table speed : 600mm/min
	Setting depth of cut : 1㎛
	Coolant : Soluble(1/50)
Grinding	Revolution speed of grinding wheel : 500rev/min
	Table speed : 600mm/min
	Setting depth of cut : 2㎛/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 SAC는 약염기성, SAP는 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 β를 변화시킨 다이아몬드 숫돌을 시작하여 다이아몬드 숫돌의 강도와 성형온도와의 관계를 규명하는 것을 시도하였다.

$\alpha_F = V_F/V_{powder}$ $\beta = V_{SAP}/(V_{SAP}+V_{SAC})$ [2. 2]

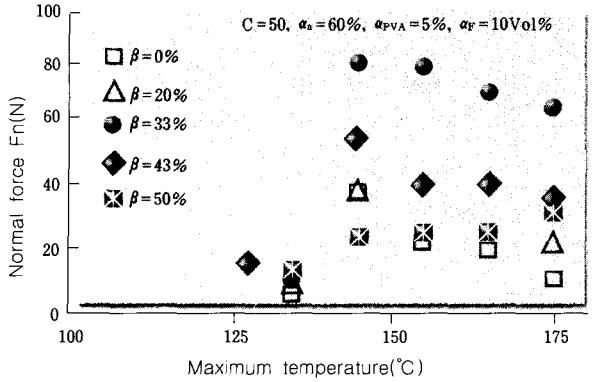
최고온도에 달하기까지의 가열시간을 30분으로 고정함과 함께 최고온도를 변화시킨 경우에 얻어진 법선연삭저항 Fn과 성형온도와의 관계를 〈그림 2〉에 나타내었다. 다이아몬드 숫돌의 집중도 C를 50, 기공률 α_a를 60%, 발포제의 배합량 α_F를 10%, PVA의 양 α_P를 5%로 설정한 경우의 결과이다.

파라메타는 식[2. 2]와 같이 정의된 SAP와 SAC의 배합비 β를 사용하였다. 배합비 β를 변화시킨 각 경우에도 법선연삭저항은 145℃ 부근에서 최고에 달한 후에 성형온도가 증가함에 따라서 감소하여 진다. 이와 같이 발포제의 배합비를 변화시켰다 하여도 145℃으로 가열하면 소결되는 것이 확실하게 확인되었다.

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

2. 4 발포제의 배합량과 성형온도

SAC와 SAP가 단순히 발포제로서만이 아니라 경화 촉매의 역할까지 한다면 다이아몬드 숫돌의 강도 특성은 식[2. 2]와 같이 정의된 발포제의 배합량 α_F가 다름에 따라서도 변화할 것이다. 따라서 집중도 C를 50, 기공률 α_a를 60%,



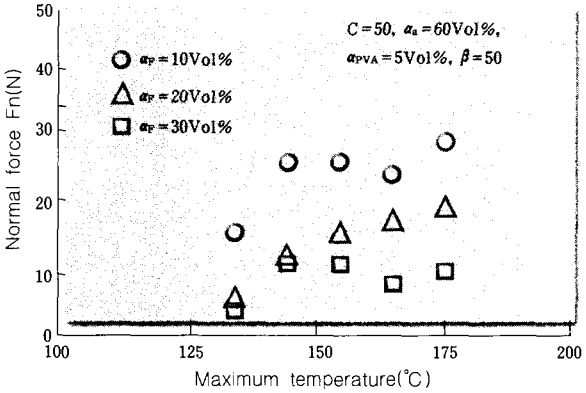
〈그림 2〉 Relation between normal force and maximum temperature

PVA의 양 α_p를 5%로 설정함과 함께, 발포제의 배합량 α_F를 변화시킨 숫돌을 시험제작하여 숫돌의 강도와 성형온도와의 관계를 규명하고자 하였다.

우선, SAP와 SAC와의 배합비 β는 0.5로 설정하고 α_F를 10, 20, 30%로 변화시킨 경우에 얻어진 법선연삭저항과 성형온도와의 관계를 〈그림 3〉에 나타내었다. α_F를 변화시켰다 하여도 145℃ 이상의 온도에서 성형하면 경화반응은 종료되어 있다고 판단된다. 또 α_F를 변화시킨 각 경우와도 법선연삭저항은 성형온도가 145℃ 이상의 범위에서는 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 이와 같이 경화반응이 완료된 후에 생기는 열분해의 속도는 SAP와 SAC의 배합비 β가 달라지면 변화하지만 β가 같게 되면 발포제의 배합량 α_F에는 의존하지 않는 것이 명확해졌다. 또 소결 후 숫돌의 강도는 α_F가 증가함에 따라 저하하는 것이 명확해졌다.

이 경우에 얻어진 기공의 형태는 발포제의 배합량 α_F를 변화시킨다 하드라도 그다지 크게는 변화하지 않음을 관찰할 수 있었으며 α_F가 증가함에 따라 숫돌의 강도가 저하된 것은 결합제의 양이 감소하기 때문에 숫돌의 결합도가 저하되어 발포구조가 약해졌기 때문이라고 여겨진다.

숫돌입자의 지지강성을 높인다는 관점에서 본다면 숫돌의 결합도를 낮게 하는 것은 좋지 않지만 숫돌의 형상추종성을 부여하는 관점에서는 발포제의 배합량 α_F를 높이는 것에 따라 숫돌의 결합도를 낮추는 방법도 하나의 유용한 수단이라고 생각된다.



〈그림 3〉 Relation between normal force and maximum temperature

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_F를 증가시킴에 따라 숫돌의 결합도를 낮추는 것도 하나의 수단이라고 생각한다. 단 C와 α_F가 증가함에 따라 수지량이 감소하기 때문에 균일한 발포구조를 가진 숫돌을 제작하는 것은 어려울 것이다.

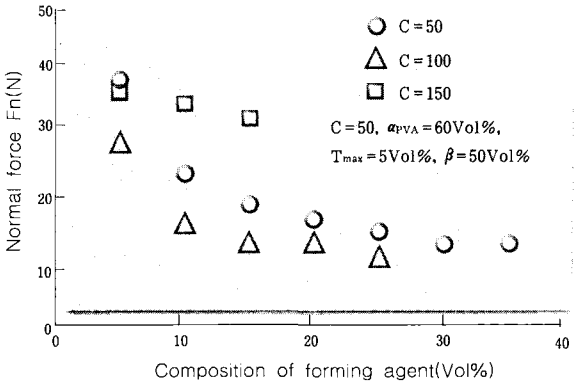
여기서 기공률 α_a를 60%, PVA의 양 α_{PVA}를 5%, 발포제의 배합비 β를 50%로 설정하고 집중도 C와 발포제의 배합량 α_F를 변화시킨 숫돌

을 시험제작하여 숫돌의 성형에 필요한 수지율을 규명하기 위한 실험을 행하였다.

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

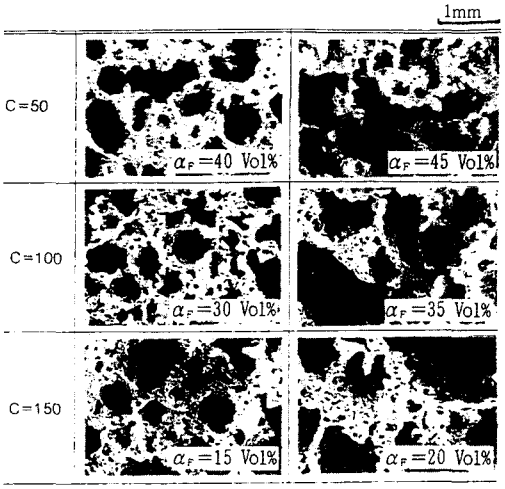
집중도 C를 50, 100, 150으로 변화시킴과 동시에 발포제의 배합량 α_F를 변화시킬 경우에 얻어진 법선연삭저항과 α_F와의 관계를 〈그림 4〉에 나타내었다. α_F를 증가시킨 경우, C가 50의 경우에는 40%, 100의 경우에는 30%, 150의 경우에는 α_F가 20% 부근까지는 균일한 발포구조를 가진 숫돌을 제작하는 것이 가능하였다.

이 경우에 얻어진 기공의 형태는 〈그림 5〉에 나타낸 바와 같다. 집중도 C가 50과 100의 경우에 비해 150의 경우에는 기공의 사이즈와 기공에 둘러싸인 수지부의 단면적이 크게 변화하고



〈그림 4〉 Relation between normal force and composition of forming agent

있는 것을 알 수 있다. 따라서 〈그림 4〉에 나타낸 바와 같이 α_F를 변화시킨 경우의 다이아몬드 숫돌의 강도특성이 집중도 50, 100의 경우와 150의 경우에서 큰 차이를 나타내는 것은, 기공에 둘러싸인 수지부의 단면적이 양자에서 달라진 것이 영향을 미친것이 아닌가하고 사료된다.



〈그림 5〉 Microphotograph of structures derived by varying the composition of forming agent

2. 6 발포제의 배합량과 발포의 한계

기공률을 60%로 고정시킨 경우, 균일한 발포구조를 얻기 위해서는 최저라도 수지량이 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, PVA의 양 α_{PVA}를 5%, 발포제의 배합비 β를 50%로 설정하고 발포제의 배합량 α_F와 기공률 α_a를 변화시킨 숫돌을 시작하여 숫돌의 성형에 필요한 수지율을 규명하기 위한 실험을 행하였다. 이 경우에도 숫돌의 성형온도는 150℃, 최고온도에 도달하고 부터의 가열시간은 30분으로 한다.

발포제의 배합량 α_F를 0, 7.5, 15%로 변화시키면서 다이아몬드 숫돌의 기공률 α_a를 증가시킨 경우에 얻어지는 법선연삭저항과 기공률 α_a와의 관계를 〈그림 6〉에 나타내었다.

〈그림 7〉에 기공의 형태를 나타내었듯이 균일

한 발포구조를 얻을 수 있는 기공률 α_a의 상한은 α_F가 0%의 경우는 80%, α_F가 7.5%의 경우에는 75%, α_F가 15%의 경우에는 70% 정도가 됨을 알 수 있다. 발포제의 배합량 α_F가 0, 7.5, 15%의 경우, 수지율 α_M은 각각 71.2, 65.6, 60%에 해당된다.

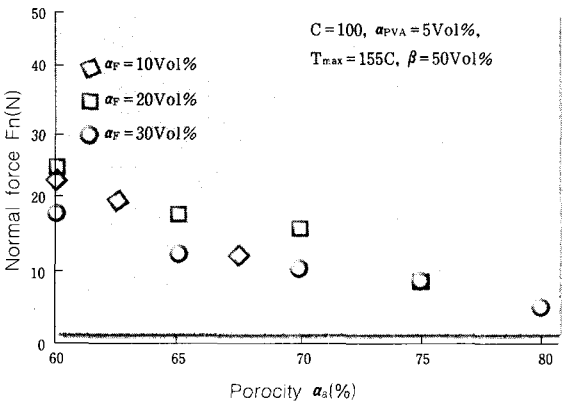
여기서 균일한 발포구조를 얻기 위해 필요한 수지량 α_M과 그 수지량에 대응하는 발포의 한계치 α_a와의 관계를 구하면 〈그림 8〉의 결과가 얻어 진다.

수지량과 한계기공률과는 거의 선형적인 관계가 되며, 수지량이 증가함에 따라서 한계기공률은 증가하는 것이 분명해졌다. 또 〈그림 6〉의 결과에 있어서 α_a가 증가함에 따라 법선연삭저항이 감소하고 있는 것은 〈그림 7〉에서도 명확해졌듯이 발포가 거친 구조로 변화되었기 때문인 것으로 생각된다. 또 발포제의 배합량 α_F가 0이 됨에도 불구하고 발포구조가 얻어진 것은, 수지가 용융되면서 생긴 수분이 기화하여 열팽창되었기 때문이라고 생각된다.

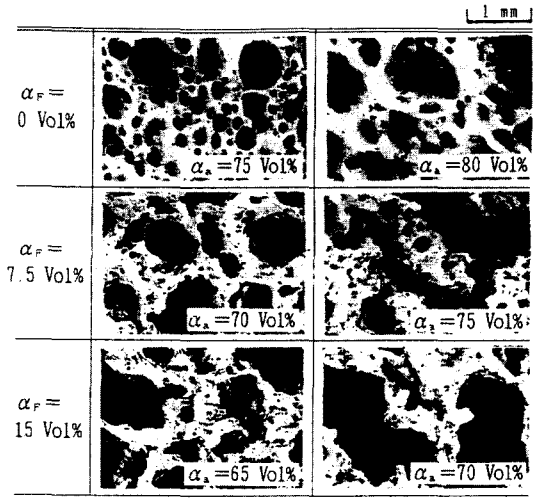
2. 7 가소제와 발포구조

가소제로서 사용된 멜라민수지는 경도와 탄성률이 높은 반면 충격력에 대하여 취약한 성질을 가지고 있다[10]. 결합제의 내충격성이 약할 경우, 숫돌이 가공면과 접촉될 때에 지립이 탈락될 수도 있을 것이라 여겨져 결합제인 멜라민수지의 내충격성을 증가시키기 위해 폴리비닐알코올 PVA를 가소제로 사용하였다.

숫돌의 집중도 C를 100, 발포제의 배합량 α_F를 15%, 발포제의 배합비 β를 50%로 설정하고, PVA의 배합량 α_{PVA}와 기공률 α_a와를 변화시킨 경우에 얻어진 법선연삭저항과 기공률 α_a와의 관계를 〈그림 9〉에 나타내었다. 기공의 형태는



〈그림 6〉 Relation between normal force and porocity



〈그림 7〉 Microphotographs of pore structures derived by varying the porosity
Concentration 100, PVA 5 Vol%, F = 15 Vol%

〈그림 10〉에 나타낸 바와 같이, 균일한 발포구조를 얻게 되는 기공률 α_a의 상한은 α_{PVA}가 0%의 경우에는 68%, α_{PVA}가 5%의 경우에는 70%, α_{PVA}가 10%의 경우에는 75%가 되었다.

이와 같이 PVA의 배합량 α_{PVA}가 증가함에 따라, 성형하여 얻어진 기공률 α_a의 상한이 크게

되는 것이 명확해졌다. 또 기공률이 같은 경우에는 PVA의 배합량을 늘림에 따라 생성된 기공의 크기가 크게되는 것이 명확해졌다. 이들은 PVA의 배합량이 늘어남에 의해, 용융시에 있어서 점성이 증가하는 것을 나타낸 것이다.

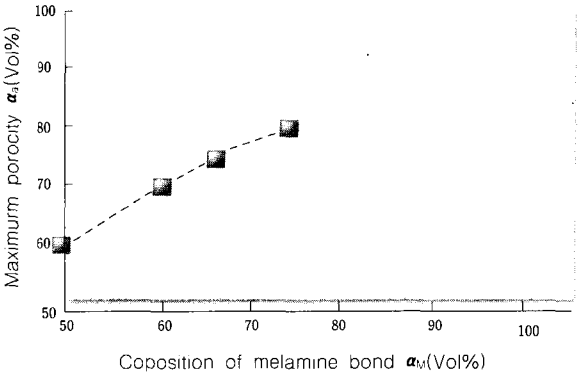
3. 결론

금형의 가공시간을 단축화하기 위해 평활가공과 다듬질가공과를 병행할 수 있는 눈막힘이 없고, 고능률가공을 행하며 연삭성능과 형상이 변화하지 않도록 내구성이 있고 곡면 적응성이 좋은 성능을 가진 숫돌을 개발하기 위해, 결합제로서 사용한 멜라민수지, 발포제로서 사용한 탄화수소나트륨(SAC)과 산성 페로린산소다(SAP), 가소제로 사용한 폴리비닐알코올(PVA)이 시험제작된 숫돌의 강도와 발포구조에 끼치는 영향에 대해 고찰하였다. 이 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

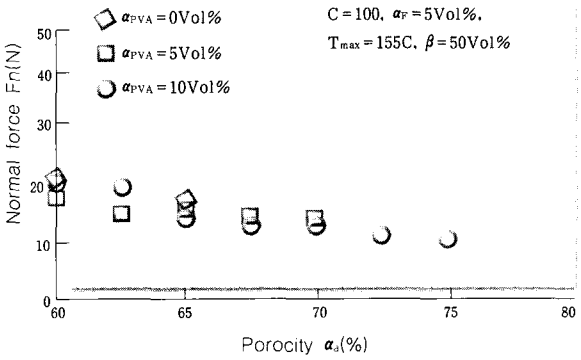
1) 탄화수소나트륨(SAC)과 산성 페로린산소다(SAP)는 발포제로서 뿐만 아니라 경화촉매로서도 작용하기 때문에, SAC와 SAP와의 배합비가 다르면 경화반응이 종료된 시점에서의 분자결합의 강도와, 경화반응이 종료된 후의 열분해속도가 변화한다.

2) SAC와 SAP의 배합량과 배합비를 변화시킨 경우에도, 최고온도를 150℃, 최고온도에 도달하고 부터의 가열시간을 30분으로 설정하면 수지의 경화반응은 완전히 수행되어진 것이 규명되었다.

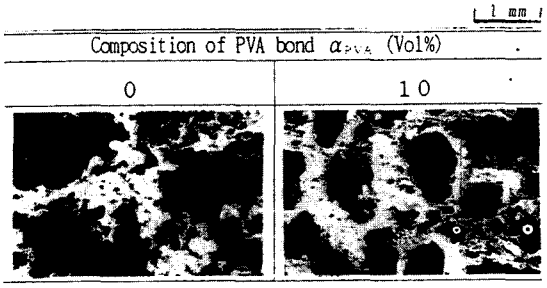
3) 집중도와 발포제의 배합량을 변화시킨 각 경우에도, 기공률이 60%의 균일한 발포구조를 얻기 위해서는 수지율이 최저라도 50%는 필요한 것이 명확해졌다. 또 균일하게 발포되는 범



〈그림 8〉 Relation between maximum porocity and composition of melamine bond



〈그림 9〉 Relation between normal force and porocity



〈그림 10〉 Microphotographs of pore structures derived by varying the composition of PVA bond

위 내에서 수지율을 감소시켜도 다이아몬드 숫돌의 결합도가 저하되기 때문에 발포구조는 취약해진다.

4) 집중도를 100이라고 할 경우에는, 수지율을 증가시킴에 따라 기공률이 80% 정도의 다이아몬드 숫돌을 성형시키는 것이 가능하다. 또 균일한 발포구조를 얻는데 필요한 수지의 양과, 그 수지량에서 성형하여 얻은 기공률의 상한치와의 관계는 선형적인 관계가 성립되는 것이 명확해졌다.

5) 가소제로서 사용된 폴리비닐알코올 PVA의 양을 증가시킴에 따라, 성형하여 얻은 기공률의 상한치가 올라가는 것이 명확해졌다. 또 PVA를 첨가하면서 생성된 기공의 사이즈가 증가하게 되며, 이것은 용융시 일어나는 수지의 점성을 증가시킨 것이라고 생각한다.

참고문헌

1. 機械と工具編集部編, 最新金型製作技術, (1988), 131-142, 日刊工業
2. 幸田, 最近の金型仕上げ加工技術(1), 機械の研究, 40-10(1988), 8-23
3. 幸田, 金型磨き加工とその自動化, 砥粒加工學會誌, 34-2(1990), 9-14
4. 機械と工具編集部編, 最新金型製作技術, (1988), 23-45, 日刊工業
5. 大平, 仙波, ヘ-ル加工特性の研究, 1994年度精密工學會春季學術講演會講演論文集, (1994), 553-554
6. 齊藤, 三好, 井田, 三浦, 昭和52年度精密學會春季大會學術講演會前刷, (1994), 53-554, (1977), 121-122
7. Takuya Semba etal, Development of Melamine-Bonded Diamond wheels with High Porosity for Smooth and Mirror Finishing of Die Materials, Annals of the CIRP, 45-1(1996), 315-318
8. 竹內, 横山, 久木, 6軸制御ヘ-ル工具による曲面加工, 1994年度精密工學會春季學術講演會講演論文集, (1994), 559-560
9. 幸田, 最近の金型仕上げ加工技術(2), 機械の研究, 40-11(1988), 24-28
10. 村橋, 小田, 井本, プラスチックハンドブック, (1980), 884-889, 朝倉書店
11. 栗原, 高分子フィ-ルドノ-ト, (1991), 126, 日刊工業新聞社

[후기] 본 연구의 수행에 있어서 자료제공 등 많은 도움을 주신 두원공업전문대학 진상호 교수님과 후쿠오카 공업대학 타쿠야 셈바 교수님께 감사드리며, 숫돌의 시험제작에 적극 협조하여 주신 제일연마공업(주) 이영서 연구소장님, 이재영 과장, 박주강 과장께도 고마움을 표합니다.

(원고 접수일 1997. 7. 28)