

유리질 결합 공구의 미세구조

양 진

쌍용중앙연구소 환경자원연구소

Microstructure of Vitreous Bonded Grinding Wheel

Jin Yang

Environment & Resources Research Team, SsangYong Research Center, Taejon 305-345

(1998년 8월 14일 받음, 1998년 12월 1일 최종수정본 받음)

초 목 정밀연삭에 있어 필수적인 소재로 사용되는 유리질 결합 공구의 미세구조를 Kingery 등이 제안한 two particle model을 이용하여 이론적으로 고찰하였다. 즉 Kingery 등이 제안한 지석입자가 서로 붙어 있는 경우를 보다 확장하여 입자간 거리가 존재하는 경우의 미세구조에 관한 일반식을 제시하였으며, 그 결과 결합제 대 지석의 부피비인 V_b/V_s 와 기공량 V_p 는 모두 α (입자간 거리 대 입자지름의 비)와 θ (기공의 중심으로부터 지석의 중심까지의 각)만의 함수임을 알 수 있었다. 따라서 이미 알고 있는 V_b/V_s 와 R (지석의 반지름) 그리고 측정이나 계산을 통해 쉽게 구할 수 있는 V_p 및 α 로부터 θ 를 정량적으로 구할 수 있었으며 이로 부터 유리질 결합 공구의 미세구조를 총체적으로 파악할 수 있었다. 또한 결합제의 양이 많을 경우 발생하는 two particle model의 모순을 수정하고자 하였으며 그 결과 이러한 경우 V_b/V_s 및 V_p 는 α 와 β (기공지름과 입자지름의 비)만의 함수임을 알 수 있었다.

Abstract The microstructure of vitreous bonded abrasives, which are used as the essential materials in the precise grinding, was investigated theoretically using two particle model. In this paper, a general equation applicable for a case in which there is a gap between abrasive grits is suggested. As a result, it was known that both the volume ratio of grit to glassy bond (V_b/V_s) and porosity (V_p) are the function of α (the ratio of distance between grit to diameter of grit) and θ (the angle from the center of pore to that of grit). Because the value α and θ can be get easily by using these suggested equations, the microstructure could be explained quantitatively. Also the raised error with the increasing amount of bond was modified by the simple assumption. As a result, in that case, both V_b/V_s and V_p were known to be the function of α and β (the ratio of diameter of pore to that of grit).

1. 서 론

유리질 결합 공구는 연마재인 지석 (abrasive grit), 유리질 결합제 그리고 기공으로 이루어지는 미세구조를 가지고 있으며 그 구조상 특징은 소결시 용융된 결합제가 지석간 결합교 (bonding bridge)를 형성하고 또한 비교적 많은 양의 기공이 존재한다는 것이다.^{1,2)} 즉 레진이나 금속소재의 결합제를 이용한 공구의 경우 그 기공량은 0에 가까우나 유리질 결합 연삭공구의 경우 전형적으로 40 vol.% 정도의 기공량을 함유하고 있으며,³⁾ 이러한 기공들은 연삭시 생성되는 chip을 포획하여 제거하는 chip pocket의 역할을 하여 공구에 걸리는 과도한 하중을 감소시키고 마찰열을 줄여준다. 또한 기공들은 냉각수의 원활한 분산을 촉진하기도 하고 또한 연삭시 지석입자의 자발적인 돌출 (self-sharpening)을 유도함으로써 드레싱의 필요성을 경감시킨다.⁴⁾ 이와 같은 유리질 결합 공구의 미세구조는 지석 및 결합제의 양, 기공량 및 기공의 크기, 지석간 거리 그리고 결합제의 형상 등에 따라 크게 좌우되는데 이러한 구조의 변화는 다른 모든 재료에서처럼 그 물성에 커다란 영향을 미치게 된다.

Kingery 등¹⁾은 이러한 유리질 결합 공구에서의 구조를 이론적으로 고찰하였는데 그는 그 구조를 단순화하기 위하여 two-particle model을 제안하였다. 즉 그는 지석입자를 cubic packing을 하고 있는 구 (sphere)로, 그리고 결합제 유리는 소결시 용융되어 입자사이에 가교 (bridge)를 형성하는 것으로 가정된 후 이러한 모델로부터 추정된 구조와 열전도도, 강도 등의 실험치가 잘 일치한다고 주장하였다. 이 보고에서 그는 유리질 결합제가 적은 경우 즉 지석입자끼리 서로 붙어 있어 있는 경우만을 고려하여 이론을 전개하였는데 결합제가 많아져 결합제 대 지석의 부피비가 28.4% 이상이 되면 입자들이 서로 분리되므로 이 경우 입자의 분리를 고려한 새로운 모델이 필요한 것으로 설명하였다.

본 연구는 이러한 Kingery 등¹⁾의 이론을 보다 일반화시켜 입자가 붙어 있을 뿐만 아니라 입자가 서로 분리되어 있는 경우에도 적용하기 위한 모델을 제시하기 위한 것으로 이를 통하여 유리질 결합 공구의 미세구조를 보다 자세히 알아보려 하였으며 또한 결합제의 양이 아주 많아질 경우 발생하는 two-particle model에서의 모순에 관하여도 다른 모델을 제시함으로써 이를 수정하고자 하였다.

2. 모 델

일반적인 유리질 결합 공구는 개개의 지석을 용융된 결합제가 가교를 형성하여 붙잡고 있으며 그 사이사이를 기공이 자리잡고 있는 미세구조를 가지고 있다. 전형적인 공구에서의 지석량은 50%, 결합제량은 10% 그리고 기공량은 40% 정도이나 이는 지석의 종류 및 공구의 용도 등에 따라 일정하지는 않다.²⁾ 이러한 공구의 구조는 일반적인 액상소결체의 미세구조와 비슷하나 기공이 비교적 많고 또한 입자 성장이 없다는 점에서 차이가 있다고 할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 Kingery 등¹⁾은 two particle model을 사용하여 그 구조를 단순화함으로써 이러한 공구의 미세구조를 설명하고자 하였으며 그 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 즉 그는 지석입자 (grit)를 반지름 R의 둥근 구로, 그리고 유리질 결합제 (bond)가 소결시 용융되어 지석을 완전히 적실으로써 곡률반경 r인 meniscus를 형성한다고 가정하였다. 이중 지석입자의 경우 실제적으로는 연삭성을 향상시키기 위하여 각진 모양을 하고 있다. 그러나 일반적으로 지석은 피상 모양 (blocky shape)을 하고 있으므로 이를 구상으로 가정하는 것은 판상입자를 둥근 구로 가정하는 것과는 다르다고 할 수 있다. 즉 판상구조의 입자일 경우 편평한 부분에 전단력 (shear force)과 토크 (torque)가 작용하므로³⁾ 이로 인한 입자끼리의 응집현상이 일어나고 그 결과 지석간 거리가 불균일해지므로 이러한 지석의 사용은 바람직하지 않다.

또한 그는 결합제 유리가 용융시 지석을 완전히 적신다고 가정하였는데 이 역시 결합제의 개발방향이 적실성을 향상시키는 방향으로 진행되어 왔기 때문에 타당한 가정이라고 할 수 있다. 아울러 그는 일반적인 유리질 결합 공구의 기공량이 50% 정도로 비교적 크기 때문에 지석의 배열을 simple cubic (solid volume = 52.4%)으로 가정하였으며 또한 소결시 생성되는 유리의 액상으로 말미암은 표면장력 (식 (1))에 의하여 입자들이 서로 붙어있는 것으로 가정한 후 결합제 대 지석의 부피비 (V_b/V_a)인 식 (2)를 구하였다. (실제 논문에서의 식은 오타가 있었음)

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{h} \right) \tag{1}$$

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{3n}{4} \left(\frac{1-x}{x} \right)^2 \left(1 - \theta \frac{\sqrt{1-x^2}}{x} \right) \tag{2}$$

식 (1)에서 ΔP 는 표면장력에 의하여 발생하는 압력차이며 γ , r 그리고 h는 각각 표면장력, 기공의 반경 그리고 meniscus의 반경이다. 또한 식 (2)에서 V_b/V_a 는 결합제 대 지석의 부피비이고, n은 입자의 배위수로 cubic packing인 경우 6으로 볼 수 있으며 $x = \sin\theta$ 이다. 따라서 결합제의 양이 적은 경우인 $h > r$ 인 경우 압력차에 의해 입자끼리 서로 붙어 있으나 결합제가 더욱 증가하여 $r > h$ 가 되면 입자끼리는 서로 분리되게 된다. Kingery 등은 $h > r$ 이어서 입자가 서로 붙어 있는 경우 즉 결합제 유리가 14.9% 이하인 경우 ($V_b/V_a < 28.4$)에 한하여 이론을 전개하였으며 그로부터 식 (2)를 유도하였다. 그러나 실제 연삭공구에서는 지석간의 결합력을 증가시키기 위하여 이보다 많은 결합제를 사용하기도 하며 모든 지석끼리 서로 붙어 있는지에 대하여는 명확히 증명되지 않은 상황이다. 따라서 본 연구에서는 지석간의 거리가 존재하는 상황에서의 미세구조를 통하여 보다 일반적인 상황을 이해하고자 하였다. Fig. 2는 본 모델에서의 구조를 나타낸 것으로 입자간 거리(2a)가 존재하는 것을 제외하고는 Kingery 등¹⁾의 모델과 다르지

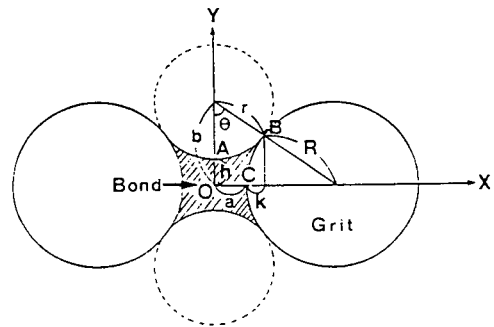


Fig. 2. Model of the microstructure of vitreous bonded abrasives when the distance between grits(2a) exists.

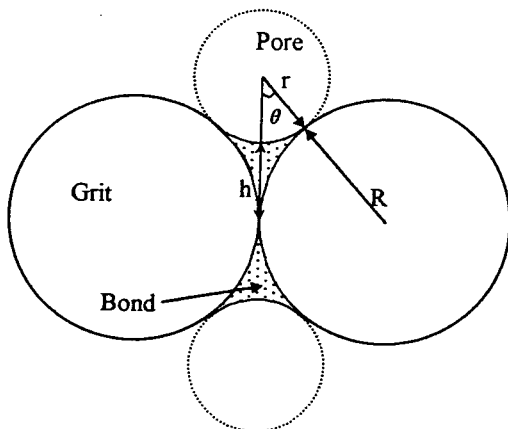


Fig. 1. Spherical particles in contact with fluid meniscus pulling them together at firing temperature.(from ref. 1)

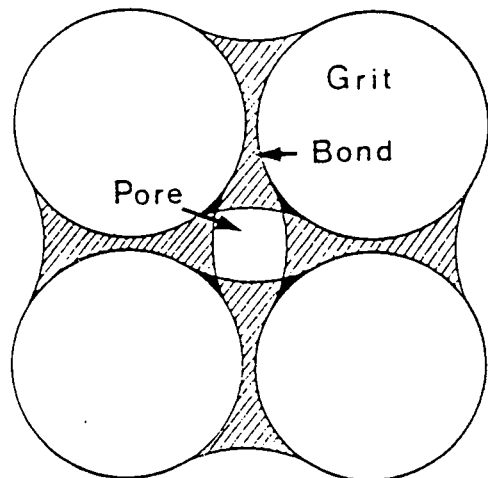


Fig. 3. The overlapped part in two particle model in two particle model.

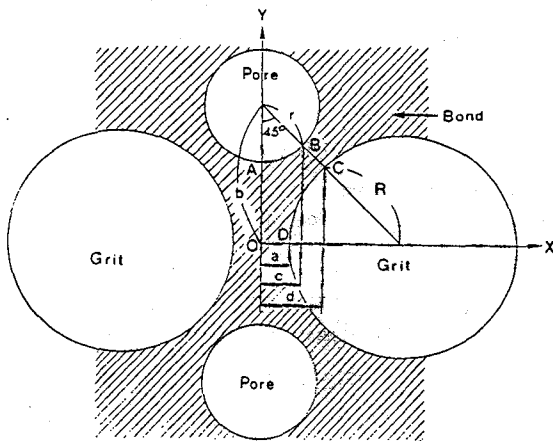


Fig. 4. Geometrical configuration of grits, bond and pores in corrected two particle model.

않으나 그 미세구조를 알아보기 위한 각종 수식은 보다 복잡한 모양을 띠게 된다.

또한 이러한 모델은 결합제의 양이 보다 증가되어 θ 가 45° 로부터 0° 로 감소할 경우 결합제의 양이 중복되어 계산되는 모순을 가지고 있다. Fig. 3은 이러한 경우의 결합제 모양을 나타낸 것으로 그림에서 겹쳐 표시된 부분의 결합제 양이 중복되어 계산되기 때문에 실제로는 결합제의 양이 많이 계산되고 또한 액상속에서의 가공의 모양이 구가 아닌 다른 형태를 띠게 된다. 따라서 본 모델에서는 θ 가 90° 부터 45° 로 될 때까지는 기존 모델을 그대로 적용하고 θ 가 45° 가 되는 순간부터는 가공의 모양이 2차원적으로 원을 형성하면서 결합제량의 증가에 따라 그 크기(반지름 r)만이 감소하는 것으로 가정하였다. Fig. 4는 본 모델에서 θ 가 45° 를 유지하면서 가공의 크기가 감소할 때의 지석, 결합제 그리고 가공의 기하학적 관계를 나타낸 도식적인 그림이다.

한편 Shinozaki 등⁶⁾은 결합제의 양이 증가하는 경우에도 지석의 부피비는 크게 변화하지 않아, 결합제량의 증가가 입자간의 거리에 크게 영향을 미치지 않으며 결합가교의 반경만을 변화시켜 결과적으로 기공량만이 감소한다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서도 Kingery 등¹⁾이 제안한 cubic packing model이 결합제 양이 증가하는 경우에도 그대로 유지되어 배위수가 6인 것으로 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

유리질 결합 공구에서 지석이 차지하는 부피분율을 V_a (%) 그리고 결합제 및 기공이 차지하는 부피분율을 각각 V_b (%), V_p (%)라 하면 이들 사이에는 다음 관계가 성립한다.

$$V_a + V_b + V_p = 100 \quad (3)$$

또한 Fig. 2에 나타낸 모델의 구조로부터 반지름 R 인 지석이 거리 $2a$ 만큼 떨어져 있을 때 입자간 거리($2a$) 대 입자지름 ($2R$)의 비인 a/R 을 α 로 정의하면 식 (3)에서 V_p

는 다음과 같이 표시되어진다.

$$V_p = 100 - \frac{100\pi}{6(\alpha+1)^3} \left[1 + \frac{V_b}{V_a} \right] \quad (4)$$

따라서 식 (4)로부터 기공률 V_p 는 α 와 V_b/V_a 만의 함수임을 알 수 있는데 이로부터 기공률과 V_b/V_a 값을 알면 간단히 지석간 거리를 구할 수 있다. 즉 유리질 결합 공구는 입도분포가 좁은 비교적 일정한 크기의 지석을 사용하며 이러한 지석입자의 크기, 즉 반지름 R 은 공구의 제조시 이미 알고 있는 값이다. 또한 결합제 대 지석의 부피비인 V_b/V_a 역시 원료조합시 이미 알고 있는 값이며 기공량의 경우 실험을 통하여 용이하게 측정할 수 있으므로 이러한 값을 이용하면 식 (4)에서 쉽게 지석간 거리를 구할 수 있다. 아울러 이러한 식으로부터 연삭공구의 제조시 연삭조건에 따른 지석간 거리와 기공량이 결정되면 혼합해야 하는 V_b/V_a 를 추정할 수 있으며 따라서 연삭공구의 설계가 보다 용이해질 것으로 판단된다.

여기서 지석간 거리인 $2a$ 는 연삭성능에 크게 영향을 미치는 인자로 예를 들어 그 거리가 너무 좁으면 수많은 입자들이 동시에 연삭작용을 하기 때문에 절삭저항 및 발열량이 증가하고 chip의 배출이 곤란해진다. 반면 그 거리가 너무 넓으면 결합제가 빨리 마모되고 그 결과 입자이탈이 가속화되어 연삭비가 낮아진다고 알려져 있다.⁴⁾ 또한 지석간 거리는 연삭깊이, 칩의 두께 및 길이 그리고 연삭저항 등을 이론적으로 계산하기 위한 연삭기구를 이해하는데 있어서도 필수적인 인자로, 현재 그를 알기 위한 실험적 방법으로는 인주 및 잉크 또는 카본용지 등을 이용하여 평균 입자간격을 복사하는 방법이 제시되고 있으나 이는 드레싱 및 연삭시의 입자이탈 등으로 인하여 부정확한 것으로 보고되어 있다.⁷⁾

한편 Fig. 2의 그림에서 두 지석사이에 존재하는 결합제의 양은 곡선 AB를 X축에 대해 회전시킨 부피(v_1)에서 곡선 BC를 X축에 대해 회전시킨 부피(v_2)를 빼준 부피의 두 배가 된다. 따라서 지석 한 개에 붙어 있는 결합제의 부피(v_b)는 지석의 배위수를 n 이라 하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$v_b = n\pi \left[(a+k)(b^2+r^2-a \cdot k) - \frac{1}{3}a^3 - R \cdot k^2 - b \cdot r^2(\sin\theta \cdot \cos\theta + \theta) \right] \quad (5)$$

또한 지석 한 개의 부피를 $v_a (=4/3 \cdot \pi R^3)$ 라 하면 v_b/v_a 는 지석 한 개당 붙어 있는 결합제의 부피가 되고 이는 전체 계에서 결합제가 차지하는 부피비(V_b) 대 입자부피비(V_a)의 비로 볼 수 있다. 따라서 V_b/V_a 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{3n}{4R^3} \left[(a+k)(b^2+r^2-a \cdot k) - \frac{1}{3}a^3 - R \cdot k^2 - b \cdot r^2(\sin\theta \cdot \cos\theta + \theta) \right] \quad (6)$$

한편 Fig. 2의 기하학적 관계로부터 식 (6)의 k, b 그리고 r은 쉽게 a, R 그리고 θ 의 함수로 나타낼 수 있으며 이를 대입하고 a/R을 α 로 치환하면 식 (6)은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{3n}{4\sin^2\theta} \left[(\alpha+1)^3 - 2(\alpha+1)^2\sin\theta + (1+\alpha - \alpha^2 - \frac{1}{3}\alpha^3) \cdot \sin^2\theta - (\alpha+1)(\alpha+1-\sin\theta)^2 \frac{\sqrt{1-\sin^2\theta}}{\sin\theta} \cdot \theta \right] \quad (7)$$

즉 식 (7)은 Kingery 등¹⁾이 제안한 식 (2)를 입자가 떨어져 있는 경우까지 확장한 것으로 이 식에 입자간 거리를 0으로 하였을 경우 즉 $\alpha=0$ 를 대입하면 다시 식 (2)가 된다. 이 식으로부터 V_b/V_a 는 α 와 θ 만의 함수임을 알 수 있으며 또한 앞의 식 (4)에 의해 V_p 역시 식 (8)과 같이 α 와 θ 만의 함수로 표시된다. ($n=6$)

$$V_p = 100 - \frac{100\pi}{6(\alpha+1)^3} \left[1 + \frac{9}{2\sin^2\theta} \left\{ (\alpha+1)^3 - 2(\alpha+1)^2\sin\theta + (1+\alpha - \alpha^2 - \frac{1}{3}\alpha^3)\sin^2\theta - (\alpha+1)(\alpha+1-\sin\theta)^2 \frac{\sqrt{1-\sin^2\theta}}{\sin\theta} \cdot \theta \right\} \right] \quad (8)$$

따라서 식 (8)로부터 α 가 일정할 때 θ 에 따라 V_p 가 어떻게 변화하는가를 알 수 있으며 이를 Fig. 5에 나타내었다. 그림으로부터 입자간 거리인 α 가 일정할 때 θ 가 감소함에 따라 즉 결합체의 양이 증가함에 따라 기공량 V_p 는 보다 급격히 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 앞서 언급한 Shinozaki 등⁶⁾의 결과와 일치하는 결과이며 또한 그림으로부터 α 가 커질수록 그 감소량은 보다 증가하리라는 것을 예측할 수 있다. 또한 유리질 결합 공구가 통상 함유하고 있는 40% 정도의 기공량범위에서는 θ 에 따른 기공량의 변화가 비교적 큼을 알 수 있으며, 위와 같은 결과를 이용하여 결합체의 형태를 보다 자세히 추정할 수 있다. 즉 앞서

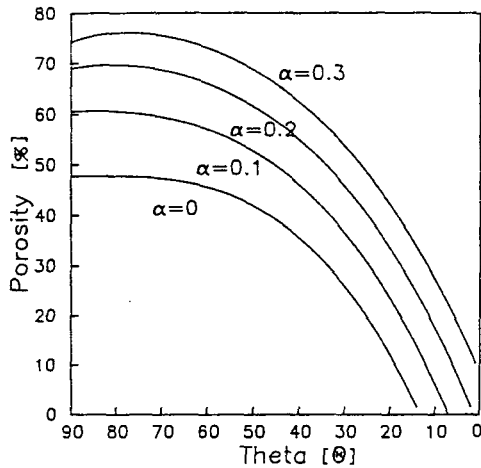


Fig. 5. The change of porosity with θ for different α in two particle model.

언급한 바와 같이 V_b/V_a , V_p 값으로부터 α 를 구할 수 있고 이러한 값으로부터 식 (8)에 의해 θ 값도 계산이 가능하다. 이러한 결과는 본 모델의 기하학적 관계로부터 Fig. 2에 나타난 모든 변수 즉 결합체의 반경 및 곡률 그리고 기공의 곡률 등을 알 수 있게 해주므로 이로부터 결합체가 어떠한 형태로 지식을 결합하고 있는지를 추정할 수 있으며 또한 어떤 한 변수의 변화에 따른 다른 변수의 변화를 정량적으로 파악할 수 있다.

한편 Fig. 5에서 결합체의 양이 증가하여 θ 가 계속 감소할 경우 궁극적으로 기공량 V_p 는 0 이하로 떨어지는 모순이 발생하게 된다. 이는 모델에서 언급한 바와 같이 θ 가 45°로부터 0°로 감소함에 따라 결합체의 양이 보다 많이 중복되어 계산되기 때문이다. 이러한 모순으로 말미암아 결합체의 양 및 기공량의 계산에서 오차가 발생하게 되며 그 오차는 θ 가 0°에 가까워질수록 커지게 된다. 또한 실제의 기공은 결합체의 액상이 서로 맞닿은 순간부터 표면장력으로 인하여 2차원적으로는 원으로 존재할 것으로 예상되기 때문에 본 논문에서는 결합체의 양이 증가되어 결합체끼리 맞닿는 순간 즉 θ 가 45°로 되는 순간부터는 기공의 모양이 원을 형성하면서 θ 는 45°를 유지한 채 그 크기 (반지름 r)만이 감소하는 것으로 가정하였다.

앞서의 Fig. 4는 이와 같은 상황을 나타낸 도식적인 그림으로 이 때의 결합체 대 지식의 부피비 (V_b/V_a) 및 기공량 (V_p) 역시 앞에서와 유사한 방법으로 구할 수 있으며 이를 식 (9) 및 (10)에 나타내었다.

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{9}{2} \left[\frac{1}{3}\alpha^3 + \alpha^2 + \alpha + \frac{\sqrt{2}}{3}\beta^3 - \frac{\pi}{4}\beta^2(\alpha+1) + \frac{\sqrt{2}-1}{3} \right] \quad (9)$$

$$V_p = 100 - \frac{100\pi}{6(\alpha+1)^3} \left[1 + \frac{9}{2} \left\{ \frac{1}{3}\alpha^3 + \alpha^2 + \alpha + \frac{\sqrt{2}}{3}\beta^3 - \frac{\pi}{4}\beta^2(\alpha+1) + \frac{\sqrt{2}-1}{3} \right\} \right] \quad (10)$$

식 (9)와 (10)에서 α 는 a/R을 그리고 β 는 r/R을 나타낸다. 이러한 식으로부터 V_b/V_a 와 V_p 는 오직 α 와 β 만의 함수임을 알 수 있는데 이로부터 공구의 미세구조를 보다 정확히 추정할 수 있다. 즉 α 와 V_b/V_a 및 V_p 값은 앞서 언급한 바와 같이 이미 알고 있거나 쉽게 구할 수 있는 값이기 때문에 이로부터 β 를 구할 수 있으며 결과적으로 기공의 크기인 r값 등을 정량적으로 구할 수 있다. 한편 이 때 β 값은 일정 범위의 값만을 가지게 되는데 그의 최소값은 0이고 최대값은 $\sqrt{2}(\alpha+1)-1$ 로 이러한 최대, 최소값을 갖는 이유를 Fig. 6에 나타내었다. 즉 R이 일정할 때 기공의 반지름 r은 0부터 r_{MAX} 까지의 값을 취하게 되며 따라서 β 역시 0부터 $\beta_{MAX}(=r_{MAX}/R)$ 의 값을 갖게 되는데 이 때의 값을 그림의 기하학적인 관계로부터 구해 보면 다음과 같다.

$$\beta_{MAX} = \sqrt{2}(\alpha+1) - 1 \quad (9)$$

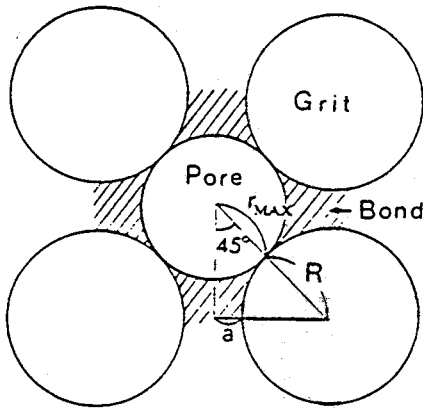


Fig. 6. Configuration of grits, bond and pore with $\beta = \beta_{MAX}$.

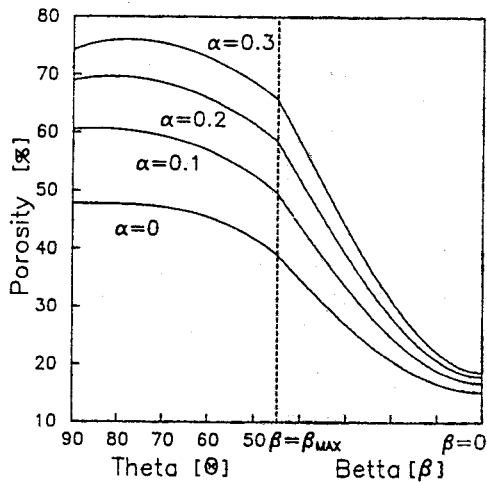


Fig. 7. The change of porosity with θ and β for different α in corrected two particle model.

그러므로 β 는 0부터 $\sqrt{2}(\alpha+1)-1$ 까지의 범위만을 가지게 되며 $\beta = \beta_{MAX}$ 일 때는 결합제가 서로 맞닿은 순간을 의미한다.

Fig. 7은 앞서의 Fig. 5를 θ 가 45° 가 된 순간 즉 $\beta = \beta_{MAX}$ 인 순간부터 $\beta = 0$ 가 될 때까지 식 (10)을 적용하여 기공량의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 θ 가 90° 부터 45° 일 때까지와 θ 가 45° 를 유지한 채 기공크기만이 감소할 때의 곡률의 부호가 반대임을 알 수 있으며 이러한 모델에 의하여 기공량이 음의 영역으로 떨어지는 모순이 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한 그림에서 기공량이 40% 정도인 범위를 살펴보면 결합제가 증가될 때 θ 와 β 의 변화에 따른 기공량은 초기에는 급격히 감소하다가 차츰 완만해짐을 알 수 있는데 이러한 현상은 입자간 거리가 증가할수록 더욱 현저해짐을 알 수 있다.

한편 그림에서 β 가 0일 때 기공량이 완전히 0이 되지 않는데 Fig. 8에 이를 설명하기 위한 도식적인 그림을 나타내었다. 즉 본 모델의 경우 β 가 0일 때 한 지석당 결합되어 있는 결합제의 부피를 구하기 위하여 Fig. 8의 (a)에 나타난 바와 같이 다각형 OABC를 X축에 회전시킨 부피에 배위수 6을 곱하여 계산하였고 이 때 ALMN평면상에서 보면 기공이 존재하지 않은 것 같으나 실제 입체상으로는 그

림에서 나타난 것(점으로 나타난 부분)과 같은 기공이 존재하게 된다. 이러한 기공은 β 가 0인 순간부터 고립기공으로 존재하며 Fig. 8의 (b)에 나타난 것처럼 단위정인 정육면체 DEFGHIJK의 각 모서리부분에 위치하게 된다. 이 부분은 단위정내에서 지석으로부터 가장 거리가 먼 곳으로 결합제의 양이 점점 증가되어질 때 최종적으로까지 기공이 존재할 확률이 가장 큰 곳이라고 말할 수 있다. 식 (10)은 고립기공이 형성될 때 즉 $\beta = 0$ 일 때의 기공량을 나타낸 것으로 이 때의 기공량은 오직 α 만의 함수임을 알 수 있다.

$$V_p = 100 - \frac{100\pi}{6(\alpha+1)^3} \left[1 + \frac{9}{2} \left(\frac{1}{3}\alpha^3 + \alpha^2 + \alpha + \frac{\sqrt{2}-1}{3} \right) \right] \quad (10)$$

또한 β 가 0인 상태에서 결합제가 더욱 증가될 때, 늘어난 결합제는 기공에서의 좁은 가지부분(narrow branch region)을 우선적으로 채울 것으로 예상되는데 이는 액상소결체에서 개기공이 액상에 의해 채워질 때 가장 작은 가지로부터 채워지는 것과 같은 현상⁸⁾으로 이해될 수 있으며 따라서 결합제는 (b)에 나타난 것처럼 $\beta = 0$ 일 때의 기공에 내접하는 반지름 s 의 구형기공을 형성하게 되고 이후 결합제의 양이 더욱 증가하면 기공을 완전히 채우게 될 것이다. 따라서 기공이 반지름 s 의 구를 형성하였을 때 s 의 관계식 및 그 때의 기공률을 계산하여 보면 다음과 같다.

$$s = (\sqrt{2}-1)(a+R) \quad (11)$$

$$V_p = \frac{\frac{4}{3}\pi s^3 \times \frac{1}{8} \times 8}{(2a+2R)^3} \times 100 = 3.7\% \quad (12)$$

즉 고립기공이 구형이 되었을 때의 기공률은 약 3.7%이며 그 기공률은 입자크기나 입자간 거리에 무관하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 앞서의 식 (4)를 이용하여 일정한 α 값에서 V_p/V_s 의 변화에 따른 V_p 의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 A점은 θ 가 45° 를 이루는 점을 나타낸 것이고 B점은 β 가 0이 되어 고립기공이 형성되기 시작한 때, 그리고 C점은 고립기공내의 가지부분을 액상화된 결합제가 채움으로써 구형의 고립기공이 형성될 때를 나타낸다. 실제 공구의 기공량의 범위를 고려하여 보면 그 범위가 통상 A와 B 사이에 존재함을 알 수 있는데 이로부터 연삭공구의 지석은 개개의 분리된 결합제의 가교(bridge)로 연결된 것이 아니라 서로 연결된 결합제에 의해 지지되고 있음을 알 수 있으며 그 때의 기공 역시 고립기공이 아닌 서로 연결된 개기공, 즉 pore channel의 형태를 갖고 있음을 추정할 수 있다.

또한 그림에서 형성되어지는 고립기공의 양(B점)은 a 가 증가할수록 점차적으로 증가하며 그 값은 a 가 0일 경우 약 15%임을 알 수 있는데 이 값은 일반적인 소결체에서 관찰되는 고립기공의 양보다 많다.⁹⁾ 이는 유리질 결합 공구가 아닌 일반적인 소결체의 미세구조에서는 배위수가 6보다 더 클 뿐만 아니라 입자성장 등이 개재되기 때문으로 생각

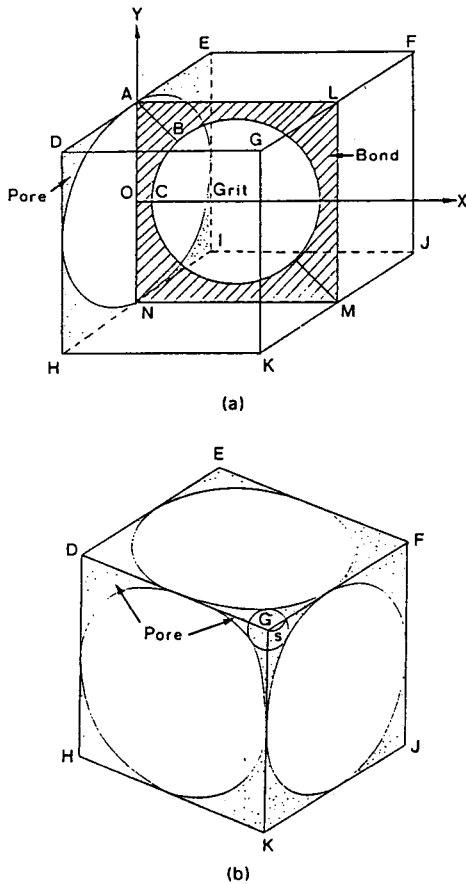


Fig. 8. Configuration of grits, bond and pores with $\beta=0$.

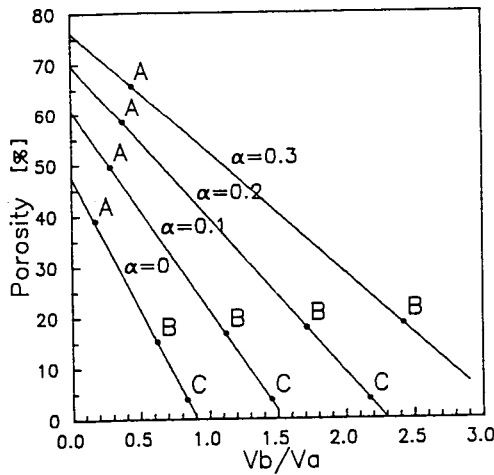


Fig. 9. The change of porosity with V_b/V_a for different α : (A: $\theta = 45^\circ$, B: $\beta=0$ and C: formation of isolated spherical pore.)

되며 또한 고립기공의 좁은 가지부분이 빨리 채워짐으로써 고립기공의 형성단계에서의 관찰이 어렵다는 점을 고려하여 볼 때 이러한 고립기공의 거동에 대해서는 보다 많은 연구가 필요한 것으로 판단된다. 아울러 본 연구의 경우 배위수가 6인 경우에 한정하여 이론을 전개하였는데 이를 복잡하기는 하나 8배위나 12배위 등으로 발전시켜 나갈 수 있

을 것으로 예상되며, 지식간의 정확한 거리측정 등을 통한 실험치와 본 모델의 결과와의 비교를 통한 연구가 또한 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

정밀연삭 등에서 필수적인 소재인 유리질 결합 공구의 미세구조를 도식화된 모델을 이용하여 이론적으로 고찰하였다. 즉 Kingery 등이 제안한 two particle model을 이용하여 연삭공구의 제조시 이미 알고 있는 결합제 대 지식의 부피비 (V_b/V_a) 및 지식의 크기 그리고 실험을 통하여 용이하게 측정이 가능한 V_p 로부터 연삭성능에 크게 영향을 미치는 지식간 거리를 용이하게 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

또한 Kingery 등이 제시한 입자끼리 서로 붙어 있는 경우의 미세구조를 보다 일반적인 경우로 확장하여 지석이 떨어져 있는 경우에서의 V_b/V_a 와 V_p 에 대한 일반식을 유도하였으며, 이로부터 이들값은 모두 α (입자간 거리 대 입자 지름의 비)와 θ (기공의 중심으로부터 지식의 중심까지의 각)만의 함수임을 알 수 있었다. 따라서 쉽게 구할 수 있는 V_b/V_a , V_p , α 값으로부터 θ 를 정량적으로 구할 수 있는 방법을 제시하였으며 결과적으로 결합제의 모양 및 기공의 모양 등 미세구조의 모양을 총체적으로 파악할 수 있었다. 아울러 결합제의 양이 많을 경우 발생하는 two particle model의 모순을 수정하고자 하였으며 그 결과 이러한 경우 V_b/V_a 및 V_p 는 α 와 β (기공지름과 입자지름의 비)만의 함수임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. W.D. Kingery, A.P. Sidhwa and A. Waugh, Am. Ceram.Soc.Bull., **42** (5), 297-303 (1963)
2. T.J. Clark and J.S. Reed, Am.Ceram.Soc.Bull., **65** (11), 1506-1512 (1986)
3. T.I. Barry, L.A. Lay and R. Morrell, Trans.J.Brit. Ceram.Soc., **79**, 139-145 (1980)
4. H.O. Juchem and B.A. Cooley, *Vitrified Bond-No longer a Synonym for Conventional Abrasive Tools*, 1984
5. J.W. Cahn and R.B. Heady, J.Am.Ceram.Soc., **54** (12), 406-409 (1970)
6. K. Shinozaki, M. Yokoi, K. Uematsu, N. Mizutani, M. Kato, S. Okada and T. Kameyama, Yogyo-Kyokai-Shi, **88** (7), 66-71 (1980)
7. 염영하, 공작기계의 절삭이론, 동명사, 1988
8. J.K. Park, Ph.D.Thesis, KAIST (1990)
9. D.W. Burworth, Trans.Brit.Ceram.Soc., **69** (1) 29-31 (1970)