미래성장 산업용 차세대 탄화규소 소재기술

글 _ 신병철
동의대학교 융합부품공학과

1. 왜 SiC 인가?

SiC는 학부 교과서에도 등장하는 정통 구조 세라믹스였다. 대학원 논문 방향이 전자 세라믹스로 방향이 잡히면서 지금까지 전자세라믹스와 함께 지내왔는데, 새삼 SiC를 연구하고 있다. 시커먼 분말로 시편을 만들고, 기계적인 강도를 측정하려고, 시험편을 폴리싱하던 친구들이 생각난다. 밤새도록 폴리싱을 하다보면 잠깐 졸기도 하는데 그러다 보면 손가락이 폴리싱 되면서 피가 나기도 하였다. 그 친구들에 비하면 나는 상당히 쉬웠던 것 같다. 일단 소결 조건도 어렵지 않고 폴리싱도 잘되는 전자 세라믹스를 다루었으니 말이다. 더구나 그 친구들은 어렵게 만든 시편을 똑똑 부러뜨리면서 데이터를 측정하였다. 점 하나를 찍기 위해선 13개 이상의 시편을 부러뜨리곤 하였다. 하나 만드는데 드는 정성이 내 시편의 열배가 넘고, 측정 후엔 재활용도 어렵고, 그 친구들의 고생을 생각하면 지금도 웃음이 난다.

주어지는 연구, 기업이 원하는 연구를 하면서도, 장차 내가 속한 경제권에서 필요한 연구를 해 놓아야 소재 연구자로서 의미 있는 삶이 되겠다는 생각을 하였다. 그러면서 여러 가지 연구 과제를 탐색하기 시작했다. 처음부터 아무런 사전 기반 없이 여기 저기 물어가면서 연구 테마를 찾아보기 시작하였다.

그러면서 아래와 같이 몇 가지 조건을 정하여 그에 맞는 소재를 찾아보기로 하였다.

- 가급적 재료공학자 고유의 영역이어야 한다. (전자 세라믹스를 하면서 전기, 전자 회로를 많이 접하게 되었는데, 아무리 공부를 해도 회로는 전기, 전자공학 전공자 보다 못하다는 것을 자주 깨달았다.)
- 완제품을 직접 만든다. (그동안은 핵심기술을 연구하여 그 제조 방법을 발표하거나 특허로 만드는 것이 최종 결과물이 되었는데, 생산하고 연결되지 못하면 별 소용이 없었다.)
- 기존에 설치된 장비를 활용할 수 있어야 한다. (보통의 실험실에서 사용하는 범용 장비를 활용하고, 새로운 투자 없이 연구를 진행하고자 하였다.)

위와 같은 조건을 만족시키는 소재를 찾다보니, 세라믹 부품 보다는 특수한 분말을 만들거나, 단결정이 적당하다는 판단을 하였다. 왜냐 하면 세라믹 부품은 그동안 해봐서 그런지 대형 또는 자동생산으로 이어지지 않으면 사업화가 어렵다는 것을 잘 알고 있었다. 특수한 분말을 만드는 것은 화학적 기본이 충실하여야 하는데, 자신이 없었다. 단결정은 주로 물리학 하시는 분들이 많이 하고 있었는데, 그분들은 주로 정확한 물성을 측정하기 위하여 단결정을 필요로 하고 있었다. 정확한 물성을 측정하고 나면 목적을 이루었기 때문에 단결정 자체의 사업화에는 관심이 없어 보였다. 여기에 착안하여 몇 군데를 견학하고, 대화하면서 방향을 잡아가기 시작하였다. 이렇게 압축하면서 GaN과 AlN, 사파이어, SiC 중 그나마 쉬워 보이는 사파이어와 SiC를 놓고 고민하였다. 당시 LED용 GaN의 기판으로 쓰였던 사파이어는 제조 공정을 견학 했

는데, 이미 한국에서 만들어 파는 회사가 있었다. 따라서 자연스럽게 SiC를 하게 되었다.

SiC는 그동안 연마제나 구조 세라믹스, 복합재료로 더 많이 알려져 있었다. 따라서 이것들에 관한 연구도 살펴보지 않을 수 없었다. 자동차 등에 들어갈 것으로 기대했던 것과는 달리 반도체 공정에 더욱 많이 활용되고 있었다. 이에 대한 최근 기술 동향은 2009년도에 발행된 세라미스트 제12권 1호에 KIST 박상환 박사 및 서울시립대 김영욱 박사팀에서 게재한 "반도체 제조공정용 SiC 소재 기술"이라는 글에 자세히 나와 있다. 또한 복합재료의 새로운 경향은 같은 호에 세라믹기술원 나노융합팀에서 게재한 "항공우주용 SiC 섬유의 개발동향"에 자세히 정리되어 있다.

따라서 여기에선 SiC 단결정을 키우고 가공하여 웨이퍼로 만드는 공정을 알기 쉽게 기술해 보고자 한다.

2. SiC는 초크랄스키법으로는 안된다?

보통 단결정 성장은 액체로부터 고체로 바뀌는 과정을 거친다. 어릴 때 해본 백반 단결정 실험이나, 초크랄스키법으로 성장시키는 실리콘 단결정 공정과 달리, SiC는 액상을 건너 뛰고 바로 고상과 기상간의 상변화를 이용한다. 물의 경우, 1 기압에선, 온도가 올라가면서, 고체, 액체, 기체로 바뀌지만 삼중점 이하의 기압에선 고체와 기체만 존재하는 것과 같다. 즉 SiC도 아주 고압에선 액상이 존재하므로 초크랄스키법으로 결정성장을 시킬 수 있을 것으로 생각하여 고압에서 실험을 실시한 연구자도 있었다.

SiC 성장의 원리는 아주 간단하다. 한여름에 차가운 물이 들어 있는 주전자에 물방울이 맺히는 원리와 같다. 공기 중의 수분이 온도가 낮은 주전자 표면에 맺히듯이, SiC 파우더를 고온에서 승화시켜 기체로 만든 다음 씨앗결정에 차곡차곡 다시 달라붙게 하면 된다. 여기서 씨앗결정의 온도가 상대적으로 좀 낮아야 한다. 초크랄스키법은 작은 씨앗 결정으로 큰 결정체를 만들 수 있으나 SiC는 그렇게 하지 못한다. 현재의 공정에서 웨이퍼를 씨앗결정으로 사용할 경우, 두께만 늘어나기 때문이다. 구경을 늘리기 위하여 다양한 방법을 시도하고는 있으나 품질이 저하되는 등 어려움이 있다. 즉 웨이퍼 한 장을 씨앗 결정으로 사용하여 두꺼운 잉곳을 만들고 이를 잘라서 다시 여러 장의 웨이퍼로 만드는 것이 일반적이다. 이렇게 나온 웨이퍼의 일부는 다음 실험의 씨앗 결정으로 사용된다.

앞에선 온도를 이야기 하였다. 결정성장을 제대로 하려면 온도 외에 압력도 조절해야 한다. 고기압에선 비가 오지 않고, 저기압일 때 비가 오는 것과 마찬가지로, 온도를 올리는 동안은 고기압을 유지해 주고, 결정 성장이 가능한 온도가 되면 저기압으로 만들어 준다. 약 50mbar 정도가 적당하다. 1 기압이 1013mbar임. 결정 성장이 끝나면 다시 고기압으로 만들어 주고 온도를 서서히 내린다. 전 공정이 약 1주일 정도 소요되며, 아무리 자동화가 되어 있어도 안전사고를 방지하기 위하여 밤새워 지켜보아야 한다. 상당한 정성이 들어가는 공정이다.

3. 가공이 생각 보다 어렵다.

SiC는 다이아몬드 다음으로 경도가 높은 재료이다. 따라서 가공 때문에 많은 시행착오가 있었다. 결정 성장이 끝난 잉곳은 일단 원통 가공을 한다. 즉 씨앗 결정으로 사용한 웨이퍼 위에 차곡차곡 달라붙어 약 2cm 정도로 두꺼워진 잉곳 주위를 잘 깎아서 완벽한 원기둥 모양으로 가공하는 것이다.

원통 가공이 끝나서 원기둥 모양으로 된 덩어리는 한 장씩 슬라이싱을 해야 한다. 상당히 많은 시행착오를 거쳐 자리 잡은 공정이다. 처음엔 휠의 가운데가 뚫려있으며, 다이아몬드가 박혀 있는 ID(internal diameter) saw를 사용하였다. 그런데 이 방식으로는 손실이 너무 많았다. 톱의 두께 만큼 손실이 생기는 톱질과 같이 휠 두께 만큼 깎여 없어져야 하므로 간신히 잉곳의 두께를 늘려놔도 경제성이 없다. 따라서 wire saw를 사용하였다. 스틸 와이어가 왔다 같다 하고, 연마제가 섞인 슬러리를 부어 주면서 절단하는 방식이다. 이 방법은 너무 시간이 오래 걸리고, 중간에 와이어의 방향이 곧바로 내려가지 못하는 단점이 발견되었다. 그래서 wire에 다이아몬드가 박혀

있는 diamond wire saw를 사용하기로 하였다. 연실에 사기 가루와 풀을 먹여 연싸움을 하는 원리와 같다. 제대로 슬라이싱이 되었다. 기술적으로는 별 문제가 없어졌으나, diamond wire 가격이 너무 비싸서 실험을 제대로 하기 어려웠다. 결국 한꺼번에 톱질을 할 수 있는 multi wire saw를 사용하게 되었다. 줄의 장력 등 공정 조건 잡는데 시간이 많이 소요 되었지만 어느 정도 조건이 잡히고 나서는 절단 공정이 안정되었다.

절단 후엔 표면 가공을 한다. 거친 가공부터 시작하여 점점 미세하게 표면을 연마해 나간다. 그전에 edge grinding을 한다. 책상 등의 모서리가 수평면과 수직면이 정확히 직각이면 손이 베일 수도 있고 흠집도 나기 쉽기 때문에 rounding 처리해주는 것처럼, 웨이퍼의 가장자리를 rounding 가공해준다. 그래야 균열 등이 발생할 확률이 줄어든다. 표면 연마는 상식적인 수준에서 단계별로 진행한다. 사용하는 슬러리에 들어 있는 다이아몬드 입도가 점점 작아지는 순서로 진행한다. 그다음 CMP (chemical mechanical polishing) 공정으로 마무리 한다. CMP 공정이 생각 보다 힘든 공정이다. 앞서의 연마는 기계적 연마였으나 기계적 연마만으로는 매끈한 표면을 얻을 수 없다. 원자력 현미경으로 보면 수많은 스크래치가 존재하므로 이를 없애주기 위해선 CMP 공정을 제대로 해야 한다. 다양한 슬러리를 사용해 보고 ph 값도 바꿔보고 여러 가지 연마제도 사용해 보았지만, 정말로 어려운 공정이다. 아직도 자신이 없는 공정이다. 과거 구조 세라믹스를 연구하는 분들의 도움이 필요하다.

4. 어떻게 평가하는가?

만들어진 웨이퍼의 품질을 제대로 평가해야만 공정을 개선할 수 있기 때문에 평가 및 분석을 소홀히 할 수 없다. 우선 맨 눈으로 보는 방법이 있다. 맨 눈으로 봐서 뭔가가 보이거나 색깔이 균일하지 않다면 좋지 않은 것이다. 어느 정도 품질이 향상되면 맨 눈으로는 맑고 깨끗하게 보인다. 그 다음엔 두 개의 편광판 사이에 웨이퍼를 놓고 검사한다. 편광판은 아이맥스 3차원 영화를 볼 때 끼고 보는 안경인데, 한 쪽은 빛의 수직 성분만, 다른 한 쪽은 수평 성분만 통과시킨다. 두 편광판을 겹쳐 놓으면 빛이 하나도 통과하지 않고 두 편광판을 같은 방향으로 맞춰 놓으면 빛이 잘 통과한다. 그런데 두 편광판 사이에 내부 결함이 많은 웨이퍼를 끼우면 그 결함에서 굴절된 빛 때문에 편광판 사이에 아무 것도 없거나 무결함 웨이퍼를 끼웠을 때와 달라진다. 이를 이용하여 맨 눈 보다 정확하게 웨이퍼의 품질을 간단히 검사할 수 있다.

다음은 X-ray회절 분석을 이용한다. Bragg's law에 의하면 특정 결정면의 면간 거리에 해당하는 입사각과 반사각이 있다. 단결정의 경우 웨이퍼의 표면에 해당하는 면의 입사각과 반사각에서 뚜렷한 피크가 나타난다. 이론적으로 결정의 배열이 완벽할 수록 이 피크는 폭이 좁아지고, 결정의 배열이 흐트러질 수록 이 피크의 폭이 넓어진다. 보통은 피크 높이의 50% 되는 지점에서 그 피크가 이론적인 입사각 및 반사각에서 얼마나 퍼져 있는지를 각도의 단위인 도, 분, 초로 나타내는데, 통상 공정이 안정된 실리콘 웨이퍼는 15초 정도이고 제작해본 SiC는 60초 정도 나온다. 1도가 60분이고, 1분이 60초.

표면의 상태를 광학 현미경, 전자 현미경, 원자력 현미경 등을 이용하여 직접 관찰한다. 표면 바로 아래의 결함을 보기 위하여 KOH 용액에 넣어 섭씨 500도 정도에서 부식 처리를 시도 한다. 전자 현미경의 경우 CL (Cathode Luminescence)을 장착하여 일반적인 2차 전자 이미지를 보면서 CL 이미지도 동시에 보면 불순물이나 결함에 의한 이미지도 함께 볼 수 있다. 에너지 밴드 갭의 스펙트럼도 볼 수 있다.

결정의 품질을 보고 나면 전기적 특성 및 광학적 특성을 측정한다. Hall measurement로 전자나 홀의 농도를 측정하여 n형 반도체인지 p형 반도체 인지도 알 수 있으며, 이동도 등도 알 수 있다. C-V 곡선 및 UV 흡수 곡선을 측정하여 밴드 갭을 추정할 수 있다. PL (Photo Luminescence)로 결정내의 밴드 갭 및 이물질의 에너지 레벨을 측정한다.

5. SiC는 어디에 응용할까?

실리콘 반도체 소자를 머리에 비유한다면 SiC 반도체

소자는 심장에 비유할 수 있겠다. 즉 정보처리 및 메모리 분야는 가격이 싸고 집적도가 높은 실리콘 반도체가 적합하고, 구석구석까지 전기를 보내는 에너지 분야는 SiC 반도체가 적합하다. 섭씨 500도 정도의 고온에서도 동작이 가능하고, 실리콘 보다 10배 이상 높은 전계에서도 견딜 수 있기 때문이다.

예를 들어 태양전지로부터 직류 전류가 발행하는데, 이를 교류로 변환해야만 송전이 가능하다. 즉 DC/AC 인버터가 필요하다. Mitsubishi에선 SiC를 이용하여 전력손실이 적은 태양광 발전설비용 인버터를 개발하였다.

서버에서 소모되는 전력이 상당하여 이를 절감하기 위하여 Hitachi에선 SiC 반도체로 서버 전원부를 구성하고 있다. 초기 투자비는 실리콘에 비하여 많이 들지만 몇 년 후엔 전기료 때문에 이익이라는 계산이다.

송전라인에 있어서 전봇대 두 개를 이용하여 설치하는 전압 레귤레이터를 SiC 반도체를 이용한 반도체로 교체하여 전봇대 한 개에 올릴 수 있게 하고 있다.

전기자동차 또는 하이브리드카에는 시동걸때 모터를 구동시키고 있는데 이를 위해선 기존의 전력계통시스템에 비하여 높은 전압을 필요로 한다. 따라서 자동차에 들어가는 각종 트랜지스터 스위치가 고전압용이어야 하는데, 여기에는 실리콘보다 SiC가 적합하여 Toyota는 오래 전부터 SiC에 투자하여 왔다. 현대자동차 입장에서도 당장 Toyota에서 SiC 반도체부품을 수입하겠지만, 경쟁 관계에 있는 완성차 메이커로 부터의 핵심 부품 수입이 마음 편할 리 없다.

결국 SiC 반도체는 높은 전압에서 구동하는 에너지 반도체 소자로 응용 분야를 찾아가고 있다. 발전 및 전력계통, 고속전철, 에어컨, 엘리베이터 등 많은 힘을 필요로 하는 산업의 심장에는 SiC가 실리콘보다 적합하고, 경제적이라고 판단한다.

6. 지구 온난화 방지 및 탄소 배출량 감소에 기여하는 SiC 반도체

지구는 어느 한계까지의 이산화탄소 배출은 스스로 자정할 수 있다. 이 자정한계 배출량은 연간 약 110억톤이다. 그런데 현재의 배출량은 연간 140억톤에 달한다고 한다. 즉 이미 자정한계를 넘었다. 이를 전 세계 인구 60억명으로 나누어 보면, 자정한계는 일인당 1.8톤이고 현재 배출량은 일인당 2.3톤이 된다. 미국의 경우 일인당 20톤, 한국, 일본의 경우 10톤, 중국은 4톤 정도를 배출하고 있다. 이에 대한 해결 방안으로는 에너지의 종류를 바꾸어야 한다. 즉 탄소를 원료로 하는 에너지인 석탄, 석유 대신 원자력이나 태양, 풍력, 조력 등으로 대체하고, 에너지 소비도 줄여가야 한다.

여기에 SiC가 기여할 수 있다. 즉 원자력 발전소로 부터의 송전 시스템, 전기 자동차, 태양광 발전용 인버터 등으로 에너지 대체분야에 기여하고, 서버 전원부 및 전력계통에 사용되어 에너지 절감에도 기여할 수 있다. 따라서 앞으로 등장하게 될 탄소세를 고려한다면 SiC는 점점 중요해질 것으로 판단된다.

7. SiC는 전형적인 선진국형 산업

제철소, 조선소, 자동차 생산 공장, 반도체 생산 라인 등 대규모 자금 투자와 많은 에너지와 인력이 필요한 산업. 선진국이 하던 산업을 이제 한국이 하고 있다. 그렇다면 선진국들은 어디로 가고 있을까? 후발 주자의 추적이 어렵고 선점한 자가 오랫동안 이익을 누릴 수 있는 영역을 미리 확보하고 있지는 않을까? 그런 산업이 무엇일까? 쉽게 눈에 보이지 않지만, 꼭 필요한 산업이라고 볼 수 있겠다. 준비 기간이 길어서 투자한다고 바로 따라올 수 없는 분야를 찾아야 한다.

예를 들어, 명품 및 디자인 시장도 여기에 해당하지 않을까? 일본이 아무리 정밀하게 핸드백을 만들어도 유럽의 유명 디자이너 이름이 들어간 핸드백을 넘어설 수 없는 것이 현실이다. 크루즈 선박도 마찬가지라고 생각한다. 일본 조선소가 특수선을 만들면서 한국과 차별화를 이룩했었지만, 한국이 특수선을 수주하면서 일본은 크루즈 선박으로 방향을 잡았었다. 그런데 유럽 및 미국의 부호들을 만족시키지 못하여 재미를 보지 못하고 있다고 한다. 반면 한국의 조선소들은, 중국의 추격을 따돌리기 위하여 배는 한국 기술로 만들고, 인테리어는 유럽의 회

사를 인수하여 만들고 있다고 한다. 그 유럽회사는 탑승객들의 심리를 고려하여 인테리어를 하고 있을 것이다. 배에 오르는 순간, 베르사이유 궁전에 들어온 느낌이 나야 한다면, 그들의 역사를 제대로 파악하지 않은 동양의 디자이너가 어설프게 꾸며서는 곤란할 것이다. 제약 분야도 진입 장벽이 높은 분야다. 개발이 끝나고도 동물시험, 임상시험 등을 거쳐 효능 및 안전성을 인정 받기위해선 오랜 기간이 소요된다. 아스피린, 타미플루 등을 연상해 보자.

우리의 전공인 소재 분야로 눈을 돌려 보자. 핵심적인 소재를 쓰다 보면, 독일이나 일본이 상당히 오랫동안 준비해 왔음을 알 수 있다. SiC의 경우 미국이 독점적 지위를 누리고 있다. 미공군이 적극적으로 밀어 주고 있는 펜실바니아 주립대 ARL에서는 CVD 법으로 SiC를 만들고 있다. 가스 값이 비싼데 어째서 CVD법을 채택했냐고 했더니, 가격보다는 품질이 우선이기 때문이라고 하였다. 동작 중 온도가 높아져도 냉각 팬이 필요 없음, 무게도 줄일 수 있고, 전자파 교란도 없어서, 전투기나 우주선에 쓰이는 반도체로 개발되고 있다.

탄소세를 대비하여 벌써부터 부품을 개발해 놓고 서서히 판매를 시작한 기업들에 비하여 한국 기업들은 아직 준비가 덜 되어 있다. 닥쳤을 때 비싼 돈 주고 사오지 말고 미리 미리 준비해야 한다. 그러기엔 SiC도 그런 소재 중의 하나로 본다.

8. 누가 SiC를 만들고 있는가?

가장 앞선 회사는 미국의 Cree이며, Dow Corning도 열심히 따라오고 있다. 그 다음은 독일의 SiCrytal. 일본의 경우, Toyota, Mitsubishi, Hitachi 등이 응용분야에서 두각을 나타내고 있으나 웨이퍼의 Cree 종속에 대한 우려가 높다. 이는 오랫동안 결정 성장의 핵심기술을 축적해 온 AIST, 신일본제철, Bridgestone 등 국가출연연구소나 대기업의 엘리트들이 창업전선에 뛰어들려고 하지 않기 때문인 것으로 해석된다. 또한 SiC 분야를 연구하는 주축이 물리학자 또는 전기, 전자공학자들이기 때문이라는 생각도 든다.

한국의 경우, 일본과 달리 재료공학관련 전공자들이 SiC를 연구하고 있으며, 현재는 네오세미테크, 크리스밴드가 SiC 웨이퍼를 생산하여 판매하고 있다. 페어차일드 코리아, Rohm에서는 응용제품이 생산되고 있다. 앞으로 더 많은 기업이 나설 것으로 전망된다.

9. 맺음말

SiC의 연구 동기와 만드는 방법, 응용 분야, 만드는 회사 등을 소개하였다. SiC 학회에 가면 왜 한국 기업이 참석하지 않는지 묻는다. 경제 규모에 비하여 한국 기업이 너무 없어서 이상한 가 보다. SiC 국제학회는 2년에 한 번씩 열리는데, 유럽, 미국, 아시아를 돌면서 열리고 있다. 아시아에서 열릴 때는 일본에서만 열려 왔다. 학회를 연다는 것은 사실 힘든 일이다. 어렵고 귀찮은 일은 하지 않고 얻어갈 생각만 했던 것은 아닌지 부끄러워진다. UN이나 구호활동 등 국제 행사에 적극 동참하면서 우리가 조금씩 대우를 받는 것과 같이, SiC를 연구하는 우리나라 전문가들이 국제학회를 통해 봉사함으로써, 국제사회가 우리를 기술만 빼가려는 사람들로 보지 않고, 함께 이 분야를 발전시켜가려는 파트너로 봐주기를 기대한다.

신병철

- 1988 KAIST, Ph.D.
- 1989 MRL, Pennsylvania State University.
- 1991 RCAST, Tokyo University.
- 1995 RIST
- 현재 동의대학교