

# 반도체 관련 최신 뉴스 모음집

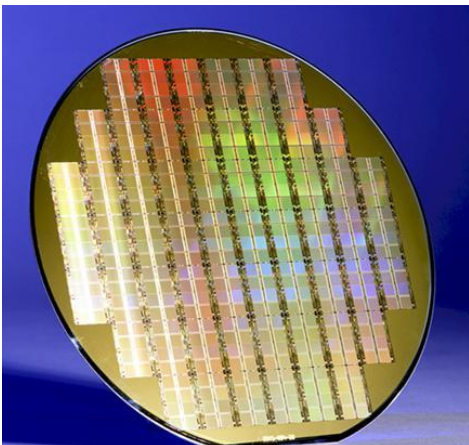
제공 : (주) 바이세미

4 월호

## BUYSEMI 에서는

여러분의 연구와 생산에  
늘 도움을 드리 고져  
최선을 다하는 노력을  
하겠습니다 .

각종 반도체 웨이퍼, 단위 공정  
, Patterning 작업 ,  
기타 소모품이  
필요하시면 언제든지 연락  
부탁드립니다.



2"~12" Silicon wafer 공급& Thermal Oxidation,  
Sputtering, CVD

## 관련기사

● 공정 미세화 고비용 구조 깎는다...

비상하는 FD-SOI ; 2page

● 삼성 시스템 LSI, 상반기 FD-SOI

파운드리 양산 체제 가동 ; 5page

● ETRI, MIT 소자 상용화 앞당기기

‘박차’ ; 6page

● ‘티라노 섬유’ 탄생...섬유소재

지각변동 예고 ; 8page



#### [전자부품 전문 미디어 인사이트세미콘]

20 나노, 14/16 나노 핀펫(FinFET) 공정은 기존 28 나노 벌크형 하이케이메탈게이트(HKMG) CMOS 공정 대비 칩(Die) 면적을 줄일 수는 있으나 늘어난 설계 및 생산 시간, 고난도에 따른 수율 저하 등으로 오히려 원가가 높아질 것이라는 예상이 나오고 있다. 이런 가운데 대안으로 주목받고 있는 기술이 바로 FD-SOI 다. FD-SOI 공정으로 생산된 칩은 원가가 저렴한데다 성능, 전력소모량 면에서 기존 벌크형 CMOS 기술 대비 우수하다는 분석이 이어지고 있다.

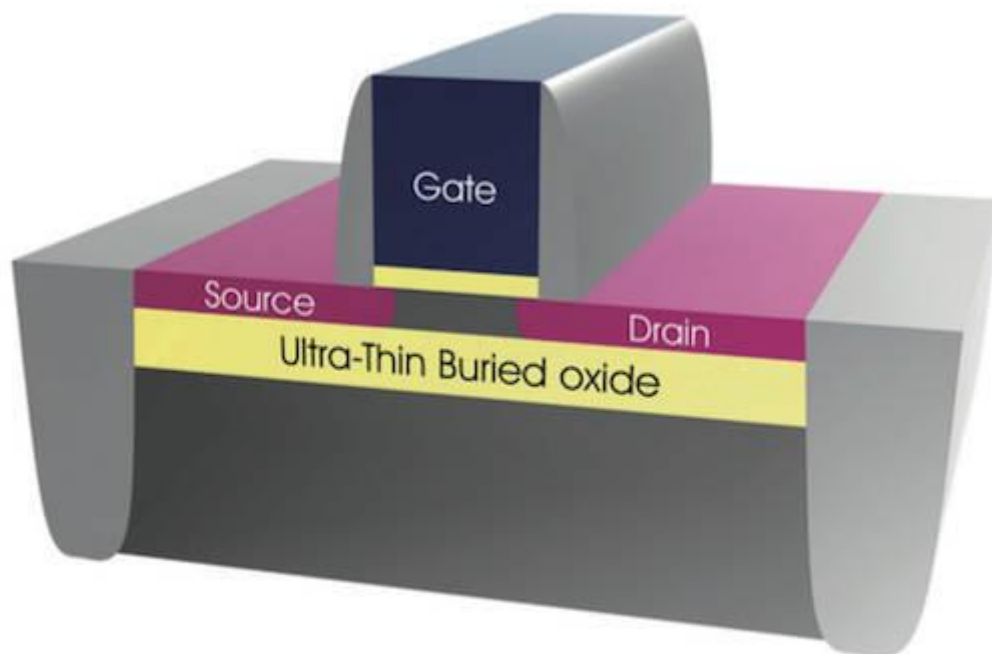
글 한주엽 기자 powerusr@insightsemicon.com

반도체 생산 업체들은 웨이퍼 한 장에서 뽑아내는 칩 수를 늘리는 방법으로 원가를 낮추고 이익을 높여왔다. 웨이퍼에서 추출되는 칩 수를 늘리는 방법은 칩의 면적을 줄이는 것이다. 칩 면적을 줄이려면 제조 공정을 보다 미세화해야 한다. 동일 설계 구성에서 회로 선폭이 줄어들면 칩 면적 역시 축소된다. 제품 측면에서는 성능 향상, 전력소모량 감소라는 장점이 뒤따른다. 그러나 이러한 공식은 최근 바뀌고 있다. 고성능 시스템반도체를 기준으로 삼으면 28 나노를 기점으로 공정이 미세화될 수록 생산 원가가 높아진다는 것이 전문가들의 일관된 견해다. 각종 분석에 따르면 20 나노 공정부터 물리적으로 선폭을 줄이는 데 상당한 어려움(수율 저하)이 따르는데다 설계, 공정, 장비, 재료 비용도 기하급수적으로 늘어나 칩 면적이 축소돼도 원가는 오히려 높아진다. 경제적 측면에서 ‘무어의 법칙’은 이제 그 의미가 퇴색돼 가고 있다는 얘기가 그래서 나온다.

완전 공핍형 실리콘-온-인슐레이터(Fully Depleted Silicon On Insulator, FD-SOI) 기술이 대안으로 떠오르는 이유도 바로 이 때문이다. FD-SOI는 유럽 반도체 업체인 ST 마이크로의 독자 기술이다. ST 마이크로는 FD-SOI를 사용하면 전체 생산공정 수를 줄일 수 있어 28 나노는 물론 20 나노 미만 공정에서도 원가를 지속 낮춰갈 수 있다고 강조하고 있다.

### 전체 생산공정 수 15% 줄일 수 있어

FD-SOI는 실리콘 웨이퍼 위에 매우 얇은 절연 산화막을 형성(Silicon On Insulator)한 뒤 그 위로 평면형 트랜지스터 전극을 구성하는 기술이다. 실리콘 웨이퍼 위로 올라간 절연 산화막은 트랜지스터 아래쪽 공간을 완전히 공핍(혹은 밀봉 Fully Depleted) 하기 때문에 전자가 게이트(소스→게이트→드레인)를 거쳐 이동할 때 발생하는 기생 용량(parasitic capacitance)을 낮추고 누설 전류도 크게 감소시킨다. 그간 여러 기업과 연구 컨소시엄이 공핍(SOI)과 관련한 방법론을 제시한 바 있으나 ‘완전하게’ 공핍하는 것은 ST 마이크로의 기술이다.



공정으로 생산된 트랜지스터 구조. 채널층 아래에 절연 산화막이 위치하고 있다. 이를 통해 전자가 채널 층을 빠져나오는 것을 막는다. 이는 누설 전류를 크게 감소시킨다는 의미다.

FD-SOI 공정을 적용한 제품은 기존 일반적인 평면형 반도체 대비 동작 전압이 낮아 에너지 효율성도 높다. 게이트 뿐 아니라 실리콘 기판을 통해 트랜지스터 동작을 제어할 수 있는 점도 특징이다. 아울러 전자가 흐르는 채널 영역에 불순물(Dopant)을 첨가하지 않아도 된다. FD-SOI 공정을 도입하면 이에

맞춰진 전용 실리콘 웨이퍼를 써야 한다. 프랑스 소이텍이 FD-SOI 용 실리콘 웨이퍼를 공급하고 있다. 전용 웨이퍼 가격이 상대적으로 비싸지만 채널 영역에 불순물 첨가 등의 과정이 빠지기 때문에 전체적으로는 생산 공정 수를 15% 줄일 수 있다. 전체적으로는 보다 경제적이라는 것이 ST 측의 설명이다. 기존 장비 대부분을 그대로 사용할 수 있어 공정 도입시 대규모 투자가 병행되지 않아도 된다. FD-SOI 공정으로 생산된 칩은 일반 벌크 CMOS 공정 칩 대비 성능은 30%, 전력효율성은 2 배나 높다는 것도 ST 가 강조하는 포인트다.

## 칩당 원가 월등히 낮아

시장조사업체 인터내셔널비즈니스스트래티지(IBS)의 분석 자료에 따르면 28 나노 FD-SOI 공정으로 생산된 칩의 원가는 기존 28 나노 벌크형 HKMG CMOS 공정 대비 7.5~15.4% 저렴했다. 칩 면적이 넓을 수록, 고성능으로 갈 수록 원가 절감 효과가 더 큰 것으로 나타났다. 이 같은 결과는 20 나노, 14 나노에서도 동일하게 나타났다.

이 같은 장점을 인지한 글로벌 반도체 파운드리 기업들은 하나둘씩 FD-SOI 진영에 합류하고 있다. 이미 글로벌파운드리(GF)는 2012 년 6 월 ST 와 FD-SOI 라이선스 계약을 맺고 양산체제에 돌입하겠다는 계획을 밝힌 바 있다. 삼성전자 시스템 LSI 사업부도 지난해 동일한 라이선스 계약을 맺었다. 삼성전자는 올 상반기 중 28 나노 FD-SOI 공정으로 반도체 양산을 시작할 계획이다. 삼성전자는 ST 와 FD-SOI 공정 라이선스 계약 직후 연구개발(R&D)에 매진, 해당 공정의 수율을 현재 일반적인 28 나노 공정과 동등 수준까지 끌어올렸다. 초고성능 프리미엄 시스템반도체는 14 나노 3D 핀펫(FinFET)으로, 중고급형 칩의 경우 FD-SOI 공정으로 파운드리 서비스를 하겠다는 것이 삼성전자의 전략이다.

28나노 벌크 하이케이메탈게이트 CMOS

대상 기간	Q4/2013		Q4/2014	
다이 사이즈	100mm <sup>2</sup>	200mm <sup>2</sup>	100mm <sup>2</sup>	200mm <sup>2</sup>
웨이퍼 원가[달러]	2,634.91	2,634.91	2,517.49	2,517.49
웨이퍼당 총 추출 다이 수	651.5	319.2	651.5	319.2
수율(%)	76.4	59.8	78.2	61.9
실제 추출 다이 수	497.7	190.9	509.5	197.6
다이 원가[달러]	5.29	13.8	4.94	12.74

28나노 FD-SOI

대상 기간	Q4/2013		Q4/2014	
다이 사이즈	100mm <sup>2</sup>	200mm <sup>2</sup>	100mm <sup>2</sup>	200mm <sup>2</sup>
웨이퍼 원가[달러]	2,601.94	2,601.94	2,504.41	2,504.41
웨이퍼당 총 추출 다이 수	651.5	319.2	651.5	319.2
수율(%)	79.3	61.4	80.2	63.7
실제 추출 다이 수	516.6	196	522.5	203.3
다이 원가[달러]	5.04	13.28	4.79	12.32

14/16나노 핀펫

대상 기간	Q4/2015		Q4/2016	
다이 사이즈	100mm <sup>2</sup>	200mm <sup>2</sup>	100mm <sup>2</sup>	200mm <sup>2</sup>
웨이퍼 원가[달러]	4,775.85	4,775.85	4,426.14	4,426.14
웨이퍼당 총 추출 다이 수	651.5	319.2	651.5	319.2
수율(%)	59.7	44.3	63.5	46.8
실제 추출 다이 수	388.9	141.4	413.7	149.4
다이 원가[달러]	12.28	33.77	10.7	29.63

14나노 FD-SOI

대상 기간	Q4/2015		Q4/2016	
다이 사이즈	100mm <sup>2</sup>	200mm <sup>2</sup>	100mm <sup>2</sup>	200mm <sup>2</sup>
웨이퍼 원가[달러]	3,598.42	3,598.42	3,369.36	3,369.36
웨이퍼당 총 추출 다이 수	651.5	319.2	651.5	319.2
수율(%)	68.2	51.5	69.7	52.6
실제 추출 다이 수	444.3	164.4	454.1	167.9
다이 원가[달러]	8.1	21.89	7.42	20.07

※ IBS가 추정한 FD-SOI 공정 칩(Die)당 원가. FD-SOI가 28나노 벌크형 CMOS 및 14/16나노 핀펫 공정 대비 압도적으로 원가가 낮다.

FD-SOI의 진화 방향은 두 가지다. 우선 고성능 칩 양산을 위해 14나노 및 10나노로 회로 선폭을 축소해나간다는 방침이다. ST는 지난해 12월 미국 샌프란시스코에서 열린 국제전자소자회의(International Electron Device Meeting, IEDM) 2014에서 이 같은 계획과 연구 방향을 밝힌 바 있다. 다른 방향은 저전력, 고성능을 무기로 다양한 공정 개발을 통해 사물인터넷(IoT) 칩 시장을 장악하겠다는 것이다. 특히 무선주파수(RF)칩 시장이 유망한 것으로 ST와 시장 전문가들은 관측하고 있다. ST 마이크로 측은 이미 FD-SOI 공정을 사용한 반도체 개발 프로젝트가 18건에 이르며 이 가운데 일부는 연내 시장에 나올 계획이라고 강조했다. 일본 소니도 최근 FD-SOI 공정으로 글로벌내비게이션위성시스템(GNSS) 칩을 양산, 웨어러블 기기에 탑재하겠다는 계획을 밝히며 FD-SOI 진영에 합류했다.

## 삼성 시스템 LSI, 상반기 FD-SOI 파운드리 양산 체제 가동



[디지털데일리 한주엽기자] 삼성전자가 유럽 반도체 업체인 ST 마이크로로부터 도입한 28나노 완전 공핍형 실리콘-온-인슐레이터(Fully Depleted Silicon On Insulator, FD-SOI) 공정의 본격 양산 체제에 돌입한다.

3일 관련 업계에 따르면 삼성전자 시스템 LSI 사업부는 올 상반기 내 28나노 FD-SOI 공정의 위탁생산(파운드리) 양산 체제를 갖추는 것으로 전해졌다. 삼성전자는 지난해 5월 ST 마이크로와 FD-SOI 공정 기술을 도입하기로 합의한 바 있다. 회사는 이 계약 직후 연구개발(R&D)에 매진, FD-SOI 공정의 수율을 현재 일반적인 28나노 공정과 동등 수준까지 끌어올렸다. 초고성능 프리미엄 시스템반도체는 14나노 3D 핀펫(FinFET)으로, 중고급형 칩의 경우 FD-SOI 공정으로 파운드리 서비스를 하겠다는 것이 삼성전자의 전략이다.

FD-SOI는 실리콘 웨이퍼 위에 매우 얇은 절연 산화막을 형성(Silicon On Insulator)한 뒤 그 위로 평면형 트랜지스터 전극을 구성하는 기술이다. 실리콘 웨이퍼 위로 올라간 절연 산화막은 트랜지스터 아래쪽 공간을 완전히 공핍(혹은 밀봉 Fully Depleted)시켜 전자가 게이트(소스→게이트→드레인)를 거쳐 이동할 때 발생하는 기생 용량(parasitic capacitance)을 낮추고 누설 전류도 크게 감소시킨다. 일반 평면형 반도체와 비교하면 동작 전압이 낮아 에너지 효율성도 높다. 게이트 뿐 아니라 실리콘 기판을 통해 게이트를 제어할 수 있는 점도 특징이다. 전자가 흐르는 채널



영역에 불순물(Dopant)을 첨가하지 않아도 된다. ST 측은 동일 회로 선폭에서 FD-SOI 공정으로 생산된 칩의 성능은 30%, 전력효율성은 2 배나 높다고 설명하고 있다.

FD-SOI 공정을 도입할 경우 전용 실리콘 웨이퍼를 써야 한다. 전용 웨이퍼 가격이 상대적으로 비싸지만 채널 영역에 불순물 첨가 등의 과정이 빠지기 때문에 전체적으로는 생산 공정 수를 15% 줄일 수 있다. 결과적으로는 보다 경제적이다. 기존 장비 대부분을 그대로 활용할 수 있어 대규모 투자가 병행되지 않아도 된다.

시장조사업체 인터내셔널비즈니스스트래티지(IBS)가 내놓은 조사 자료에 따르면 28 나노 FD-SOI 공정으로 생산된 칩(Die)의 원가는 기존 HKMG 공정 대비 7.5~15.4% 저렴했다. 칩 면적이 넓을 수록, 고성능으로 갈 수록 원가 절감 효과가 더 큰 것으로 나타났다. 업계 관계자는 “일반적 28 나노 하이케이메탈게이트 공정에서 평면형 20 나노, 14 나노 3D 핀펫 공정으로 넘어가면 칩 사이즈는 작아지지만 설계의 복잡성으로 인해 원가 구조는 오히려 올라간다”며 “FD-SOI는 원가 측면에서 유리한 공정이므로 중보급형 칩의 위탁생산에 주로 활용될 것으로 보인다”고 설명했다.

## ● ETRI, MIT 소자 상용화 앞당기기 ‘박차’

### 대량 생산용 8 인치 웨이퍼 개발...실리콘 위 에피 성공



▲ Si 기판 위에 MIT 박막을 증착 중인 김현탁 박사(오른쪽)와 테티아나 연구원. ©ETRI

국내 연구진이 지난 2005년 규명한 모트 금속 절연체 전이(Mott MIT) 현상을 활용, 각종 센서 및 스위치에 널리 활용이 가능한 MIT 물질로 소자 대량생산 개발에 성공했다.

모트 MIT 란 부도체가 금속으로 또는 금속이 부도체로 변하는 현상을 말한다.

ETRI(한국전자통신연구원)는 MIT 소자가 널리 상용화되기 위한 대량생산 기술인 대면적 웨이퍼 개발에 성공했다고 14 일 밝혔다.

이 기술은 응용물리 및 재료공학분야 저널인 어플라이드 피직스 레터 머트리얼즈(Applied Physics Letters Materials)에 지난 2 월초 게재됐다.

이 기술을 활용케 되면 MIT 소자의 생산단가를 절감, 값싸게 소자 생산이 가능해 전류가 새는 누설의 특성이 적고 불량소자 제조의 확률도 줄일 수 있게 된다. 향후 HTR(고효율 스마트 전력 트랜지스터), 화재감지기 및 센서, 조도 센서, 전력도선의 발열 감시용 소자, 리튬이온전지에 있는 파워소자 발열관리 등에 널리 활용될 전망이다.

김현탁 ETRI 박사 연구팀은 기존 2 인치(inch) 웨이퍼로 MIT 소자를 연구용으로 생산해 왔는데, 이는 1 만 6000 여개의 소자밖에 만들 수 없고 연구용이라서 값도 비싸며 생산 효율이 떨어졌다고 설명했다.

이번에 김현탁 박사 연구팀과 모브릭이 공동으로 개발한 웨이퍼는 실리콘(Si) 기판위에 8 인치 크기 소자를 최대 20 만개 이상을 만들 수 있어 MIT 소자의 상용화에 성큼 다가서게 됐다.

이 기술의 핵심은 가장 널리 사용되고 값이 싼 실리콘 기판면 위에 MIT 물질 박막을 올리면 실리콘 기판과 박막 사이 계면(界面)에 격자 불일치 현상이 일어난다. 이 계면을 연구진은 안정화된 물질인 AlN(질화알루미늄)을 사용, 실리콘과 MIT 물질사이의 격자 불일치를 조절한 것이다.

또한 연구진은 AlN 이외의 다른 물질을 사용할 경우, MIT 물질 박막과 기판 사이의 원소 확산 때문에 MIT 특성에 변화가 있었으나, AlN 을 사용하면 특성변화가 생기지 않는다고 밝혔다. 이렇게 기판과 똑같이 정렬된 박막을 에피(Epitaxy) 박막이라고 하는데, 이 에피 박막을 김현탁 박사 연구팀이

처음으로 개발한 것이다.

특히 HTR(고효율 스마트 전력 트랜지스터)의 경우, MIT 기술로 조명용 LED 드라이버에 50 만개가 적용되어 판매됐으며 심장박동기에도 쓰이고 있다. HTR 을 이용한 정전류 회로는 이미 미국특허도 받아 조명시장에서 널리 사용될 것으로 보고 있다.

아울러 정온식 화재감지기 시장에서도 MIT 화재 감지기가 현재는 약 50% 정도 국내 시장을 점유하고 있는데, 올해 90%까지 점유율을 높여 해외시장으로 진출 할 예정이다.

또한 전력도선 감시용 소자의 경우도 국내 기업과 기술이전을 타진 중에 있으며 올 상반기내로 기술이전이 진행될 것으로 보인다. 특히 철도분야의 전력차단기술로도 유망할 것으로 연구진은 보고 있다.

김현탁 박사 연구팀은 이 소자가 리튬이온전지에 적용시 스마트폰이나 노트북내 파워 트랜지스터로 사용, 과열로 인한 부풀림 방지에도 효과적일 것이라고 설명했다. 아울러 이 기술이 사물인터넷(IoT)시대를 맞아 인체 적외선용 센서시장에서도 각광을 받을 것으로 예측했다.

김 박사는 “MIT 소자의 응용범위인 열, 빛, 전기가 있는 곳에 쓰이는 MIT 소자의 대량생산 기술과 응용기술을 개발하고, 현재 도래하고 있는 사물인터넷 등 기술과 접목하여 고부가가치 MIT 기술을 새로운 성장동력으로 키워야 할 것”이라고 밝혔다.

## ‘티라노 섬유’ 탄생...섬유소재 지각변동 예고

日 우베 흥산(宇部興産) 자체 개발 ‘차세대 최첨단 세라믹 섬유’

최근 일본에서 개발된 티라노 섬유(Tyranno Fiber)에 대하여



## 1. 서언

일본의 우베흥산(宇部興産,株)은 최근 2천도가 넘는 고열에도 타지않는 ‘티라노 섬유’를 개발해 전 세계의 항공우주산업 및 관련 업계들로부터 비상한 관심을 모으고 있다.

우베흥산(宇部興産,株)은 무기기능섬유(티라노섬유)를 제조하는 기술을 보유하고 있다. 이 기술을 이용해 실리카( $\text{SiO}_2$ )와 티타니아( $\text{TiO}_2$ )로 만든 광촉매섬유(직경 6~8  $\mu\text{m}$ )를 개발하였다. 아나타-제 형의 티타니아의 높은 광촉매 활성과 실리카에 의한 유리섬유와 동등의 강도를 갖고 있다. 주 용도는 수질과 공기 정화용 및 우주항공용이다. 수질정화의 경우 UV 살균등과 병용하면 대장균 세포까지 분해할 수 있다. 또한 항공 산업에도 대단한 관심을 가지고 있으며

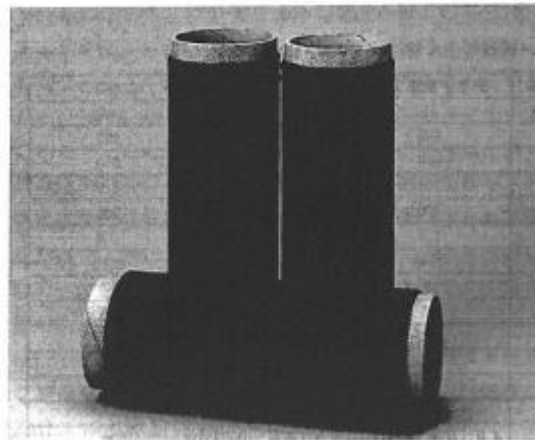
미국 보잉사는 최신예 중형기 보잉 787 기체의 약 5 할을 탄소섬유를 사용해 경량화를 추구했으며, 이보다 더 다음 세대가 되는 항공기 재료의 공동개발사로 우베흥산(宇部興産,株)을 선정했었다.보잉사는 지난 2007 년부터 우베흥산(宇部興産,株)이 개발한 ‘유피렉스’에 주목해왔는데 이 소재는 폴리이미드라고 하는 첨단수지로, 탄소섬유와 조합하면 150 도에서 300 도의 온도 변화에도 견딜 수 있는 특성이 있다.종전 엔진 나셀부분에 티탄합금 등이 사용해오던 것을 유피렉스가 채택될 가능성이 높아지고 있으며, 보잉은 이러한 재료 후보로 선정한 회사가 수십 개 기업이 있었지만 일본기업으로는 유일하게 우베흥산(宇部興産,株)만 남아 있는 것으로 알려졌다.

○ 일본의 우베흥산,주(宇部興産,株)가 독자 기술로 개발된 탄화규소(Silicon carbide)계 섬유( $\text{SiC}$  계 섬유)는 뛰어난 역학적 특성과 내열, 내산화성을 갖고 있다. 또, 가늘고 탄력 있는 섬유이기 때문에 각종 직물이나 펠트(Felt), 로프(Rope) 등의 제작도 가능하다. 이러한 특성을 이용해 티라노 섬유를 강화재료로 한 각종 복합재료의 개발이나 섬유, 2 차 가공품을 내열재료로 이용하려는 시도들이 활발하다. 특히 최근의 지구환경 보전 문제나 에너지 절약, 자원절약 의식 고양과 함께 고효율 발전, 고효율 운송을 실현시킬 수 있는 재료 중의 하나로도 주목받고 있다. 본고에서는 Si-M-C-O 계 섬유((티라노 섬유, Ube Industries., Ltd. / M 은 Ti(Titanium), Zr(Zirconium) 또는 Al(Aluminium)))의 특성과 이 특성들을 살린 용도에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 개발경위와 제조방법

### ○ 개발경위

유기규소폴리머(Polycarbosilane)를 전구체(Precursor)로 하는 SiC 계 섬유 개발은 1960년대 Frits에 의해 시작되었지만 전구체의 방사성(Spinnability)과 획득할 수 있는 무기섬유의 성능 모두 충분하지 않았다. 이후, 유기규소폴리머인 Polycarbosilane(PCS)에서 합성된 SiC 계 섬유가 일본의 독자적인 기술로 개발되었다. 이 방법은 폴리머 전구체법(Polymer Precursor Method) 또는 Yajima's Method 로도 부르며, 이 방법의 개발 이후 세라믹 섬유에 관한 연구개발이 활발해졌다. 개발 이후 현재까지 PCS로 제조된 SiC 계 섬유는 1980년대 전반 Nippon Carbon Co., Ltd.가 공업화에 성공해 제조·판매(현재, 관계회사인 NGS Advanced Fibers Co., Ltd. 제조 및 판매)하고 있는 니카론(NICALON ; NGS Advanced Fibers Co., Ltd. 등록상표)섬유, PCS 중에 Ti가 함유된 Polytitanocarbosilane으로 제조한 Si-Ti-C-O 계 섬유(티라노 섬유)가 Ube Industries., Ltd.에서 개발, 판매되고 있다.

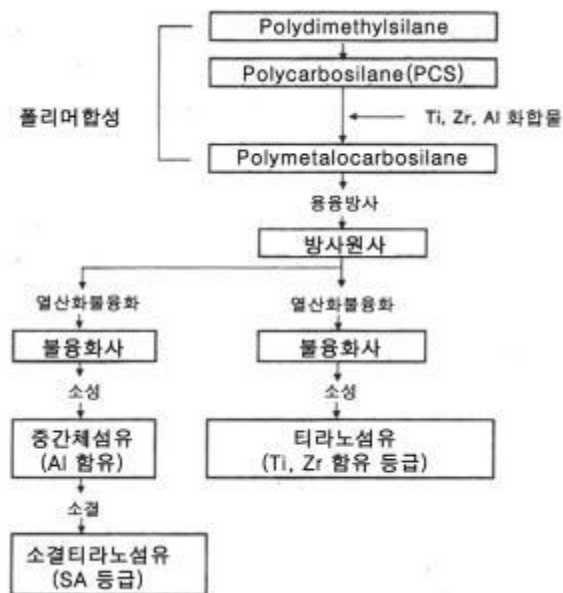


티라노 섬유 보빈 외관

### ○ 제조방법

티라노 섬유의 보빈 외관은 그림 1과 같다. 그림 2는 티라노 섬유의 제조 프로세스를 보여주는데, ‘열산화(Thermal oxidation)불용화 공정’은 방사(Spinning)된 폴리머섬유가 소성(Burning) 중에 용융(Melting)하는 것을 막기 위한 목적으로 이루어진다. 보통은 가열한 공기 중의 산소로 PCS 분자를

가교화 해 고분자량화(Quantification of Polymer)시키는 반응이지만, 섬유 속 산소함유율의 저감이 SiC 계 섬유의 내열성을 향상시키기 때문에 니카론의 일부 등급(Grade)에서는 전자선조사(Electron Beam Irradiation)에 의한 불용화도 이루어진다. 이렇게 불용화한 제품은 High NICALON(NGS Advanced Fibers Co., Ltd. 등록상표), High NICALON Type S(NGS Advanced Fibers Co., Ltd. 등록상표)의 상품명으로 판매되고 있다. 티라노 섬유 가운데 SA 는 Al 을 함유하는 Polyaluminocarbosilane 에서 얻은 섬유를 2000℃에 가까운 더 높은 고온으로 처리, 섬유 속 Al 이나 B 를 조제(An auxiliary agent)로 해서 소결(Sintering)한 것이다. 소결 공정 도중에 산소를 CO, SiO 로 방출시키기 때문에 ‘전자선조사 불용화’라는 별도의 방법을 이용해 산소를 거의 함유하지 않는 SiC 계 섬유로 만들었다. 한편, 미국에서는 AVCO Corp.가 화학기상증착법(Chemical Vapor Deposition ; CVD 법)을 이용해 SiC 를 심선(Core wire ; 텅스텐(Tungsten)선이나 탄소섬유)주위에 코팅한 두꺼운(직경 100  $\mu\text{m}$ 초) 탄화규소섬유를 개발해 판매했으며, 현재는 TEXTRON Corp.가 제조·판매하고 있다. 넓은 의미로는 이 섬유도 SiC 계 섬유지만 본고에서는 상세한 내용은 생략한다.



티라노 섬유의 제조 프로세스

### 3. 티라노 섬유의 특징

○ 티라노 섬유는 내열 등급과 반도체 등급으로 크게 나눌 수 있다. 표 1에서는 내열 등급 티라노 섬유의 주요 특성을 보여준다. 티라노 섬유는 필라멘트(Filament)경이 10  $\mu\text{m}$ 전후의 얇고 탄력있는 세라믹 섬유이며, 인장강도도 3GPa 전후로 역학적 특성 또한 뛰어나다.

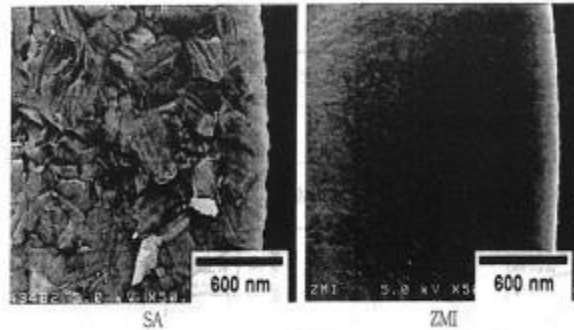
– S 등급은 처음으로 판매된 어모퍼스(Amorphous ; 무정형, 비결정질)구조의 Si-Ti-C-O 계의 티라노 섬유이다. 그 후 내열성을 향상시키기 위해 섬유 속 산소함유율을 18wt%에서 11wt%로 낮춘 어모퍼스 구조의 Si-Ti-C-O 계 LoxM, 섬유 속 Ti 를 Zr 로 바꿈으로써 내열성을 향상시킴과 함께 내알칼리성을 개선한 어모퍼스 구조의 Si-Zr-C-O 계의 ZMI, 여기에서 더욱 발전해 산소를 거의 포함하지 않는 Al 이 함유된  $\beta$ -SiC 다결정구조로 만든 소결 SiC 구조의 SA 를 개발했다.

– LoxM 이나 ZMI 의 특징은 어모퍼스 구조에서 산소를 9-11wt% 함유, SiC 의 화학량론(Stoichiometry)조성보다 많은 탄소를 포함한다( $\text{C/Si(atomic)}=1.4$ ). 밀도는  $2.5\text{g/cm}^3$ 정도로 SiC 의 소결체( $3.0\text{-}3.2\text{g/cm}^3$ )보다 작고, 열전도율(Thermal conductivity)도  $1.4\text{-}2.5\text{W/mK}$  로 작다. 인장강도는  $3.3\text{-}3.4\text{GPa}$  로 매우 높으며, 인장탄성률은  $200\text{GPa}$  라 파단 신율(Break Elongation)이 1.7-1.8%로 높아졌다.

– SA 의 특징으로는 LoxM 이나 ZMI 보다 약 1.9 배 높은 탄성률, 모놀리식(Monolithic ; 일체형) SiC 에 가까운 밀도 및 ZMI 보다 약 30 배 높은 열전도율을 들 수 있다. 화학조성에서는 낮은 산소량과 2wt 이하 소량의 Al 을 포함한 것이 특징이다. 그리고 C/Si 의 비율이 1.08%로, C 를 많이 포함한 LoxM 이나 ZMI 와는 다르게 SiC 의 화학량론조성에 근접한 수치를 갖고 있다. 그림 3 은 SA 와 ZMI 의 단면 SEM 상을 보여준다. 이를 통해 ZMI 에서는 결정립(Grain)이 확인되지 않은 채 어모퍼스 구조라는 것을 알 수 있다. 한편, SA 는 미세한 SiC 입자로 구성되어 있으며, 입자내 파괴를 확인할 수 있어 SiC 결정립이 강고히 결합된 치밀한 SiC 다결정체구조로 되어 있는 것을 알 수 있다.

특성		티라노섬유S	티라노섬유LoxM	티라노섬유ZMI	티라노섬유SA	니카론
필라멘트경	( $\mu\text{m}$ )	8.5	11	11	10, 7.5	14
필라멘트수	(개/다발)	1600	800	800	800, 1600	500
텍스	(g/1000m)	220	200	200	180, 190	210
인장강도	(GPa)	3.3	3.3	3.4	2.8	2.9
인장탄성률	(GPa)	165	187	200	380	205
파단신율	(%)	2.0	1.8	1.7	0.7	1.4
밀도	(g/cm <sup>3</sup> )	2.37	2.48	2.48	3.10	2.55
조성	(wt%)	Si	50	55	67	57
	C	30	32	34	31	33
	O	18	11	9	< 1	—
	Ti	22	—	—	—	—
	Zr	—	—	1	—	—
	Al	—	—	—	< 2	—
열팽창계수	(10 <sup>-6</sup> /K)	3.1 (실온 -500°C)	—	4.0 (실온 -1000°C)	4.5 (실온 -1000°C)	—
열전도율	(W/mK)	1.0	1.4	2.5	65	1.5

### 내열 등급 티라노 섬유의 주요 특성



SA 와 ZMI 단면 SEM 상

○ 현재, 내열재료 용도로는 주로 LoxM, ZMI 가 이용되며 SA 에 대해서도 초내열성이나 높은 열전도도(Thermal conductivity)를 살린 항공기 엔진 부재료, 원자로 부재료 등으로의 용도개발이 이루어지고 있다. 티라노 섬유의 비저항은  $106\Omega\cdot\text{cm}$ (A 등급)에서  $10\text{-}1\Omega\cdot\text{cm}$ (H 등급)까지 임의제어가 가능하다. 일반적인 탄소섬유는  $10\text{-}2$  부터  $10\text{-}3\Omega\cdot\text{cm}$  정도의 도체, 유리 섬유(Glass fiber)는 109 부터 1012 정도의 절연체(Insulator)이며, 티라노 섬유 반도체 등급의 비저항은 위 섬유들의 중간 정도이다. 이들 등급은 항공기용 전자파 흡수재료나 정전기 제거재, 정전 도장(Electrostatic painting) 케이블의 심선 등으로 실용화 된 사례가 있다. 본고에서 반도체 등급의 상세한 특성은 생략하지만, 보통은 Ti 가 함유된 티라노 섬유이며 역학적 특성은 S 등급과 거의 동일하다.

- 그림 4는 건조공기 속 1600℃의 온도에서 1 시간 동안 열처리 한 후, 각종 티라노 섬유 및 니카론의 인장강도(Tensile Strength)를 보여준다. SiC 계 섬유는 공기 중에서의 열처리에 의해 산화하며, 열처리 시간의 경과에 따라 강도저하를 일으킨다. 그러나 ZMI에서는 1600℃에서 처리 후에도 2GPa 정도의 강도를 유지하고 있다. SA는 이 시험에서 거의 강도열화를 보이지 않는다.

- 그림 5는 아르곤(Argon) 속 1800℃의 온도로 1 시간 동안 열처리 한 후, 각종 티라노 섬유 및 니카론의 인장강도를 보여준다. 결정질(Crystalline)로 된 섬유 SA는 이 열처리에 의한 강도저하도 거의 볼 수 없다. 이것은 그림 3에서 본 것처럼 SA가 치밀한 SiC 다결정체구조로 되어 있어 1800℃ 고온에서도 그 구조를 유지한 걸로 보인다. 나머지 비정질(Non-crystalline) SiC 계 섬유는 열처리 온도의 상승과 함께 열분해에 따른 강도저하가 관찰되었다. 여기서 말하는 열분해란, 섬유 속 산소(전술한 불용화공정과정에서 다룬 것)가, SiO 내지는 CO 상태로 섬유에서 분리, β-SiC의 결정이 증대하는 현상이다. LoxM이나 니카론은 1600℃ 열처리에 따라 현저한 결정화를 보였고 강도측정불능 상태가 되었다. 이에 비해 ZMI는 비정질 섬유면서 열분해가 거의 완료된 1800℃ 이상의 열처리 이후에도 1GPa 정도의 강도를 유지한 것은 흥미롭다. 이것은 섬유 속 지르코늄(Zirconium)이 8 배위로써 산소 또는 SiO<sub>2</sub>를 강고히 포획하는 안정구조를 형성, SiO<sub>2</sub> 환원반응에 의해 SiC의 생성반응을 억제하기 때문이라고 추정한다.

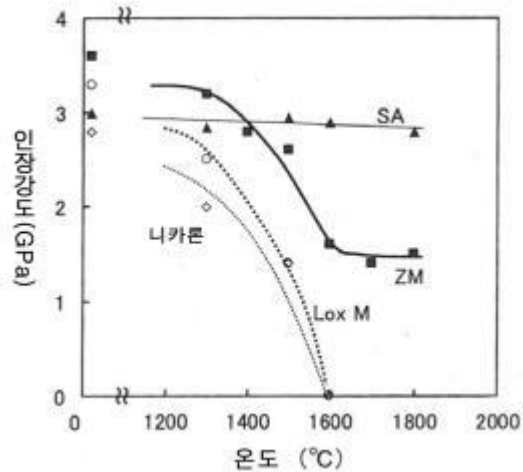
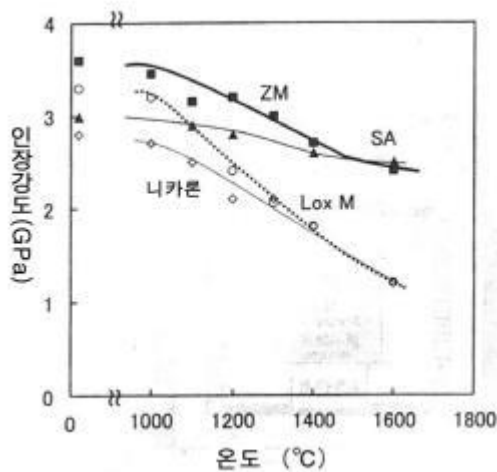




그림 4(좌). 건조공기 속 1600℃ 온도로 1 시간

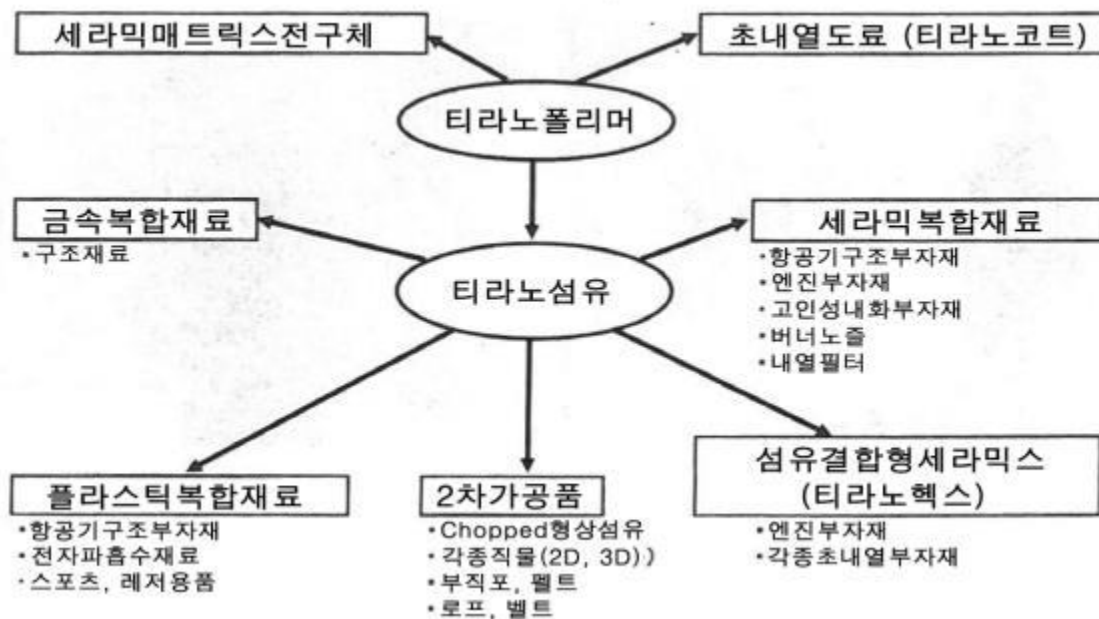
열처리 한 후의 각종 티라노 섬유 및 니카론의 인장강도

그림 5(우). 아르곤 속 1800℃ 온도로 1 시간

열처리 한 후의 각종 티라노 섬유 및 니카론의 인장강도

#### 4. 티라노 섬유의 주요 용도

○ 티라노 섬유의 주 용도는 그림 6 과 같다. 티라노 섬유의 뛰어난 내열성을 살려 내열 로프, 벨트, 펠트 등 섬유의 2 차 가공품 그 자체를 이용하는 사례와 다른 재료와의 조합을 통해 복합재료로 이용하는 사례로 나눌 수 있다.



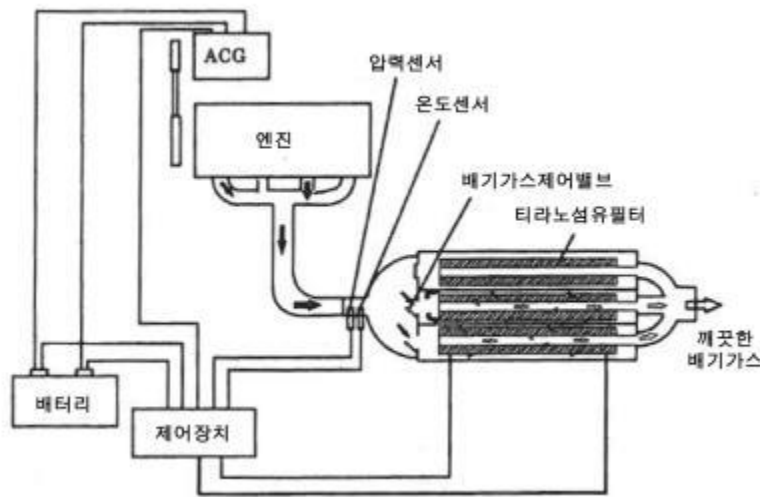
티라노 섬유의 주 용도

##### 4.1. 2 차 가공품

티라노 섬유의 2 차 가공품을 사용해 이제까지 실용화 된 예로는 디젤 자동차의 배기가스

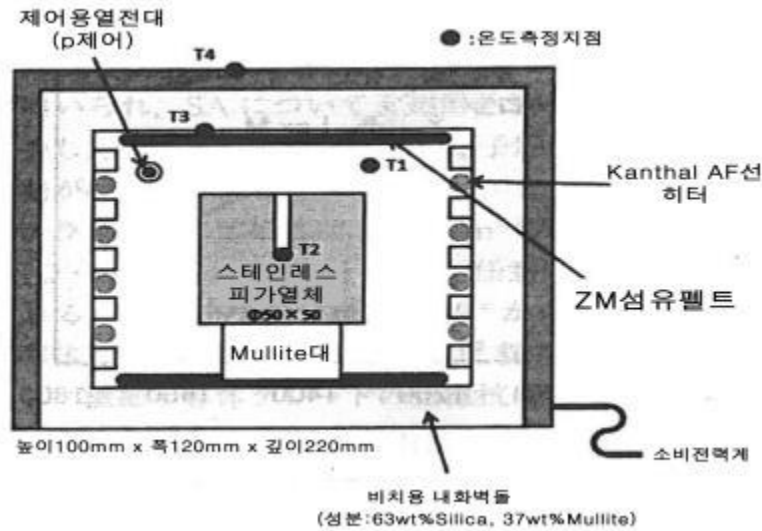
정화장치(Diesel Particulate Filter(DPF))를 들 수 있다. 2003 년 8 개 도현시(都縣市)의 배기가스 규제에

따라 특히 연식이 오래되고 배기가스 가운데 PM(Particulate Matter ; 입자상물질)이 많은 버스, 트럭용 DPF 에 적용되었다. DPF 시스템의 개요는 그림 7 과 같다.



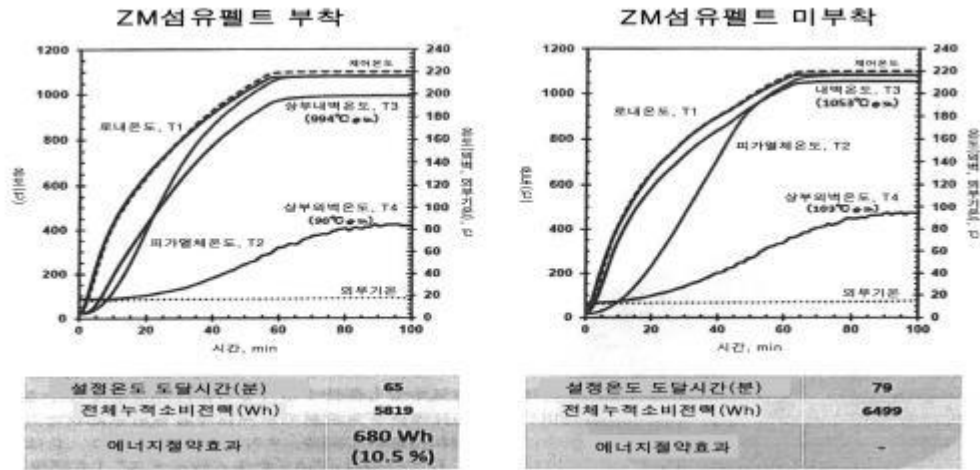
DPF 시스템 개요

디젤연료 속에는 칼슘화합물이 함유되어 있어 내열성 외에 알칼리성도 필요하기 때문에 Ti 를 포함하는 LoxM 등에서는 열화가 문제가 된다. 그래서 Zr 이 함유된 ZMI 의 티라노 섬유로 만든 Chopped(ZM 섬유 Chopped)가 사용되고 있다. 현재, 일본 국내에서의 규제에는 자동차 Maker 들이 대응하고 있으며 후속 DPF 시장은 종료되었지만, 선박용 DPF 나 동남아시아의 버스, 트럭, 건설기계 등에 대한 적용이 검토 중에 있고 일부는 실용화되었다. 그리고 최근 중국이나 인도의 심각한 대기오염과 함께 그 원인 중 하나로 PM 이 지목되고 있어, 배기가스 정화장치의 적용이 확대된다면 오염저감효과도 기대할 수 있다. DPF 외에 가스로(Gas furnace)의 연소 효율을 높이는 노재(炉材)로도 주목받고 있으며, 각 분야에서의 필드 테스트가 진행되고 있다. 또한, ZM 섬유의 Chopped 로 제작한 펠트(ZM 섬유펠트)를 전기로의 노벽에 붙여 사용전력량을 크게 줄일 수 있다는 사실도 밝혔다. 그림 8 은 ZM 섬유펠트로 에너지절약 효과를 평가한 실험방법을 보여준다.

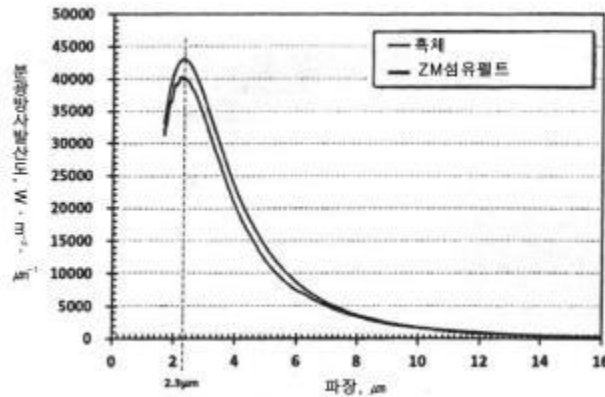


### ZM 섬유펠트의 에너지절약효과 평가 실험방법

소형전기로를 준비한 후에 로내 내벽(상하면과 전후면)에 ZM 섬유펠트를 부착한 경우와 부착하지 않은 경우를 비교했다. 그리고 스테인레스의 피가열체를 장착했다. 설정온도는 1078℃, 승온(Temperature rising) 후, 5 시간 유지를 통해 설정온도까지의 도달시간, 설정온도, 로내 온도, 피가열체 온도, 상부내벽온도, 상부외벽온도를 기록, 전체 누적 전력계로 소비전력을 측정했다. ZM 섬유펠트를 부착한 경우의 도달시간은 14 분 단축되었으며, 전체 누적 전력은 680Wh, 비율로는 10.5%의 큰 에너지 절약 효과를 얻을 수 있었다. 이것은 ZM 섬유펠트 부착으로 상부외벽온도의 저하(펠트 미부착 : 103℃, 부착 : 90℃), 즉 노벽의 방산열량 감소가 주요인이라는 것을 알 수 있다. 또한, 스테인레스 피가열체의 온도상승이 현저하게 빨라지는 효과도 확인되었다. 이것은 ZM 섬유펠트 자체가 지닌 높은 열복사율에 기인한 것으로 보인다. 그림 10 은 1000℃에서 ZM 섬유펠트의 분광방사발산도 스펙트럼을 보여준다. ZM 섬유펠트의 복사율은 흑체의 약 90%로 매우 높은 수치를 나타내 고열복사율의 재료라는 것을 알 수 있다. 현재는 뛰어난 에너지절약 효과를 살리는 용도 개발이 진행 중이다.



ZM 섬유펠트의 에너지절약효과 측정 결과



1000°C에서 ZM 섬유펠트의 분광방사발산도 스펙트럼

#### 4.2. 세라믹 복합재료(Ceramic Matrix Composites(CMC))

지구환경을 위해 가스 터빈(Gas Turbine) 등의 운전온도 고온화에 대한 에너지 사용 고효율화가 중요한 과제로 대두되고 있다. 또한, 우주·항공분야에서는 고속화 등과 같이 한층 업그레이드 된 고성능화를 위한 개발이 진행 중이다. 이러한 니즈(Needs)를 충족시키기 위해서는 재료의 고내열성화, 고내환경성화, 경량화가 필수불가결함과 동시에 높은 신뢰성이 요구된다. 세라믹(Ceramics)은 내열성, 내식성, 내마모성 등에 뛰어나고, 고내열성화, 고내환경성화, 경량화에 맞는 재료로써 금속에 필적할 수 있어 새로운 응용전개에 대한 기대가 높다. 대표적인 세라믹으로는  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , Mullite 등의 산화물계나  $Si_3N_4$ ,  $SiC$  등의 비산화물계를 들 수 있다. 그러나 세라믹의 본질적인 문제로, 저인성(低靱性)에 기인한 낮은 신뢰성이 응용전개에 큰 장애가 되고 있다. 이를 위해 세라믹의 강인화에

대한 개발연구가 활발히 이루어지고 있다. 강인화 방안 중 하나로 세라믹을 세라믹 연속섬유로 강화하는 방법이 있다. 이 방법은 섬유와 매트릭스 사이에 계면층을 형성시켜 섬유와 매트릭스 사이의 계면 결합을 제어함으로써, 파괴 시 발생하는 섬유와 매트릭스 계면에서의 박리, 섬유의 가교, 잡아 뽑기 작업 등에 의한 균열(Crack)진전을 억지하고 편향시켜 강인화를 도모하는 것이다. 이에 따라 파괴 과정에서 큰 파괴 에너지가 필요하며 세라믹의 내열성을 손상시키지 않으면서 강인화 된 CMC 제작이 창출 가능하다. 그중에서도 SiC 를 SiC 계 연속섬유로 강화한 SiC 섬유강화 SiC 복합재료(SiC/SiC 복합재료)는 내열합금과 비교할때에 약 1.5 배의 비강도(Specific strength)를 보이며, 뛰어난 내열성과 신뢰성을 가진 재료의 가장 유력한 후보로써 연구개발이 이루어지고 있고, 용도개발 또한 제일 활발하다. LoxM, ZMI 나 SA 를 강화섬유로 한 CMC 의 기초평가에 의해 뛰어난 내열성을 가진 CMC 를 얻을 수 있음을 보여준다. CMC 는 아직 개발 중이라 연구개발 단계의 것이 많지만 일부는 실용화 된 것도 있다. 예를 들면, 프랑스 Pyromeral Systems Inc.는 티라노 섬유로 유리 세라믹 등을 결합시킨 PyroSic(Pyromeral Systems Inc. 등록상표) 재료를 개발, 판매한다. 현재 F1 레이스 자동차의 부자재로 사용되고 있지만 가볍고 내열성도 높기 때문에 고급승용차나 항공기 분야에서도 이용하려 하고 있다. 그 외 SiC 계 섬유를 이용한 가스 터빈, 항공기 엔진, 원자로 부자재 등의 개발이 다수 이루어지고 있다. 한 예로 그림 11 은 시범 제작한 연소기 라이너(Combustor liner)의 외관이다.

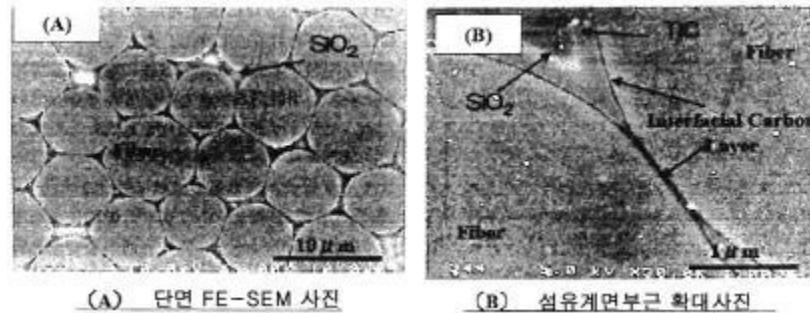


연소기 라이너 시제품 외관

#### 4.3. 티라노 섬유결합형 세라믹

열산화로 표면에 산화물을 형성시킨 티라노 섬유의 시트 상물(Unidirectional sheet, 직물 등)을 적층,

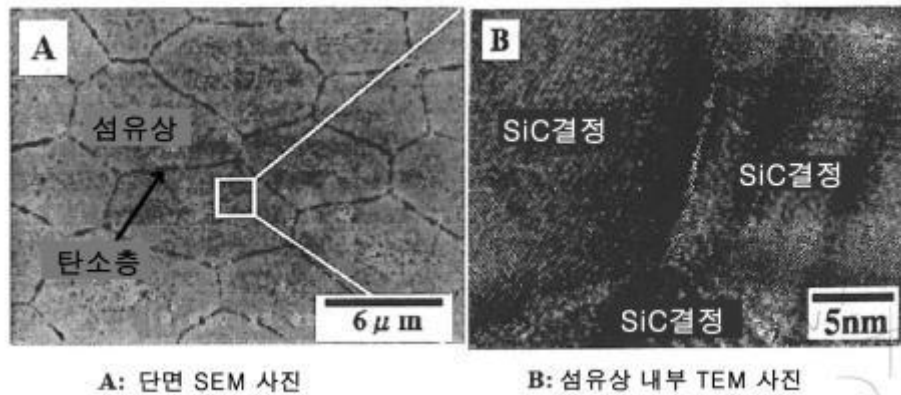
고온고압화로 성형하여 제조된 세라믹이 티라노 섬유 결합형 세라믹이다. 티라노 섬유결합형 세라믹에는 2 종류가 있으며, 그 중 하나가 티라노헥스(Tyrannohex, Ube Industries., Ltd.)이다. 그림 12 는 티라노헥스의 조직구조를 보여준다.



티라노헥스 조직구조

티라노헥스는 섬유재료들이 밀집한 충전구조처럼 결합해, 섬유의 체적함유율이 약 90vol%인 재료이다. 섬유와 섬유 사이는 TiC 미결정(Crystallite)이 분산한 비정질(Non-crystalline) SiO<sub>2</sub> 상으로 충전되어, 섬유표면에는 두께 약 20nm 정도의 얇은 탄소층이 균일하게 존재한다. 티라노헥스는 공기 중에 1400℃까지 높은 강도를 유지, 1500℃의 공기 중에서 1000 시간 가열 후에도 초기강도의 90%이상을 유지한다. 또한, 극히 큰 파괴 에너지(질화규소의 30 배)를 보여주며, 파괴가 어려운 성질을 1400℃의 대기 중에서도 유지한다. 게다가 열전도율이 작기 때문에 엔진 부자재의 단열재나 각종 내열부자재로 용도개발이 기대되고 있다. 또 다른 하나는 SA 티라노헥스(Ube Industries., Ltd.)로, 티라노 섬유만을 고온·고압 하에서 결합한 완전히 새로운 형태의 세라믹 성형체이다. 그림 13 은 SA 티라노헥스의 조직구조를 보여준다.





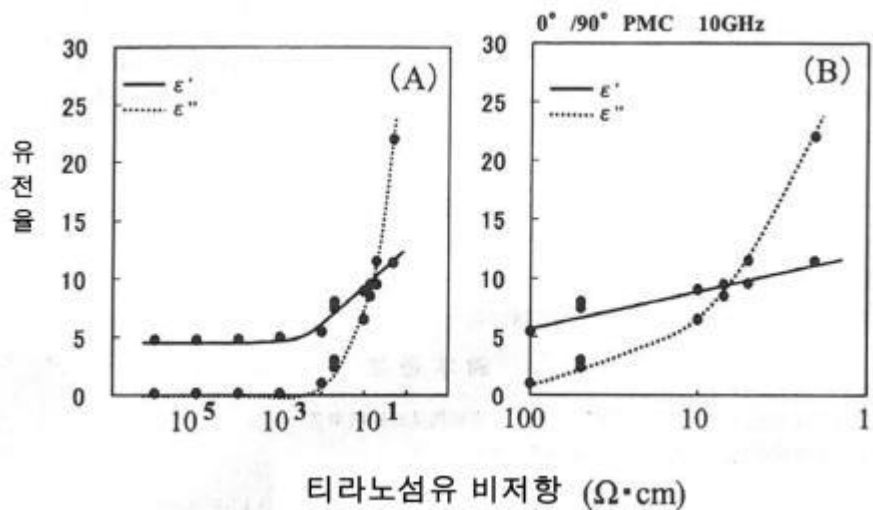
SA 티라노헥스의 조직 구조

고온, 고압 처리에 의한 원주상태의 원료섬유는 육각주 상태로 변형하여 굳어진 채 매우 치밀한 구조를 이룬다. 이 변형과정을 통해 섬유 속에 남아있던 탄소가 섬유 표면으로 밀려나가 두께 몇 십 nm 의 탄소층이 되어 섬유 조직들을 적당히 접착함으로써, 섬유상태는 명확한 입계상(Grain-Boundary Phases)을 함유하지 않는  $\beta$ -SiC 다결정소결구조를 형성한다. SA 티라노헥스는 매우 치밀하며 공기 중 1600℃까지 높은 강도를 유지한다. 그리고 매우 뛰어난 파괴에너지(질화규소의 약 20 배)를 보여주며, 파괴가 어려운 성질은 1600℃의 대기 중에서도 유지한다. 더욱이 열전도성이 뛰어나기 때문에 내열충격성이 요구되는 엔진 부자재나 각종 내열 부자재로의 용도가 기대되고 있다.

#### 4.4. 플라스틱 복합재료(Plastic Matrix Composites(PMC))

SA 이외의 티라노 섬유는 비결정질이기 때문에 플라스틱에 비해 양호한 습윤성(Wettability)을 보여준다. 이러한 성질로 티라노 섬유를 이용한 플라스틱 복합재료는 압축강도나 대마모성이 뛰어나 골프 클럽이나 스키판 등, 스포츠·레저 분야에서 이미 실용화된 실적을 갖고 있다. 또한, 티라노 섬유는 전술한 것과 같이  $10^{-1}$  부터  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  의 비저항을 지닌 것을 임의로 제조하는 것이 가능하다. 그림 14(A)와 (B)는 티라노 섬유의 비저항과, 이 섬유를 사용한 PMC 의 10GHz 에서의 유전율(Permittivity)과의 관계를 보여준 것이다. PMC 가운데 높은 비저항 티라노 섬유를 이용한 것은 특정 파장의 전파를 투과(Transmission)하며, 낮은 비저항 섬유를 이용한 것은 흡수하는 특성을 갖고

있다. 이러한 특성을 가진 PMC 를 조합시킨 재료는, 구조재료와 전파흡수재료를 겸비하는 복합재료로써 주목받고 있다.

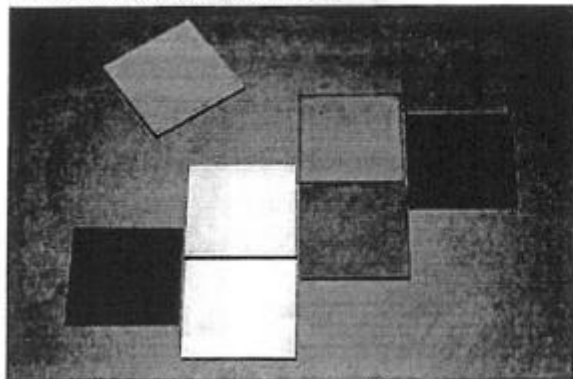


티라노 섬유 비저항과, 이들 섬유를 사용한 PMC 의 10GHz 에서의 유전율(Permittivity)과의 관계

#### 4.5. 기타

SiC 계 섬유 개발 당시에는 금속복합재료의 강화섬유를 위한 용도개발이 활발했지만, 현재는 전술한 태경(太徑) 단섬유가 중심을 이루고 있다. 그리고 티라노 섬유의 원료인 Polytitanocarboasilane 과 Silicone Varnish 를 혼합해 목적에 맞는 필러, 안료를 첨가한 내열 도료, 티라노 코트(Tyranno Coat ; Ube Industries., Ltd.)의 용도개발도 진행 중이다.

■ Color example of a "Tyranno Coat"



■ Example of Application:



## 5. 끝으로

○ 니카론의 최초 등급의 것이 판매된 이후 30년 정도가 경과했으며, 이제까지 다양한 용도분야에 대한 적용 시도가 이루어지고 있다. 이와 함께 내열성을 필두로 하는 섬유 특성도 시중에서 요구하는 재료의 요구특성에 맞춰 개선되고 있으며, 현재는 다양한 분야로의 실용화와 실용화를 향한 개발이 이루어질 수 있게 되었다. 이런 종류의 재료를 널리 보급시키는 것이 어려운 이유 중 하나는 비용 문제이다. 보통의 다른 재료나 티라노섬유와 동일한 무기섬유인 탄소섬유 혹은 유리 섬유의 사용도와 비교해도 확실히 고가이기 때문이다. 그러나 본문에서 설명한 것처럼 환경보전이나 자원 절약·에너지 절약 문제를 해결하기 위해서 티라노섬유는 지극히 유용한 재료이며, 앞으로 우주항공 분야만이 아닌 일상생활 속에서의 용도전개가 계속해서 이루어진다면 비용 절감도 이룰 수 있으며, 용도확대도 지속적으로 발전할 것이라고 본다.



응력 측정 센서인 스트 레인 센서 (DHSS)를 개발 완료하여 16년 4월부터 영업을 시작하고 있습니다.  
적용 분야는 PCB에 적용되고 있습니다. 혹시 응력 측정이 중요한 섹터가 되시는 업체에서는 연락 부탁드립니다.

e-mail: [wikim@buysemi.co.kr](mailto:wikim@buysemi.co.kr)

카카오톡 ID : buysemi1

밴드 친구 가입 하기 : <http://band.us/n/a8a3Q2Jdz0Jca>

Tel : 82-2-471-2588 , Fax : 82-2-471-2589 , C.P : 82-10-9173-7016 , <http://www.buysemi.co.kr>