



FIX All on AI
Future Innovation tech eXpo Conference 2025

전기차 베어링 전식방지용 세라믹 볼 소재·제조기술

김지혜 / 대구기계부품연구원



CONTENTS



- 01 배경
- 02 연구개요
- 03 연구내용
- 04 응용분야
- 05 향후계획

[배경] 미래모빌리티

미래모빌리티

연결

+

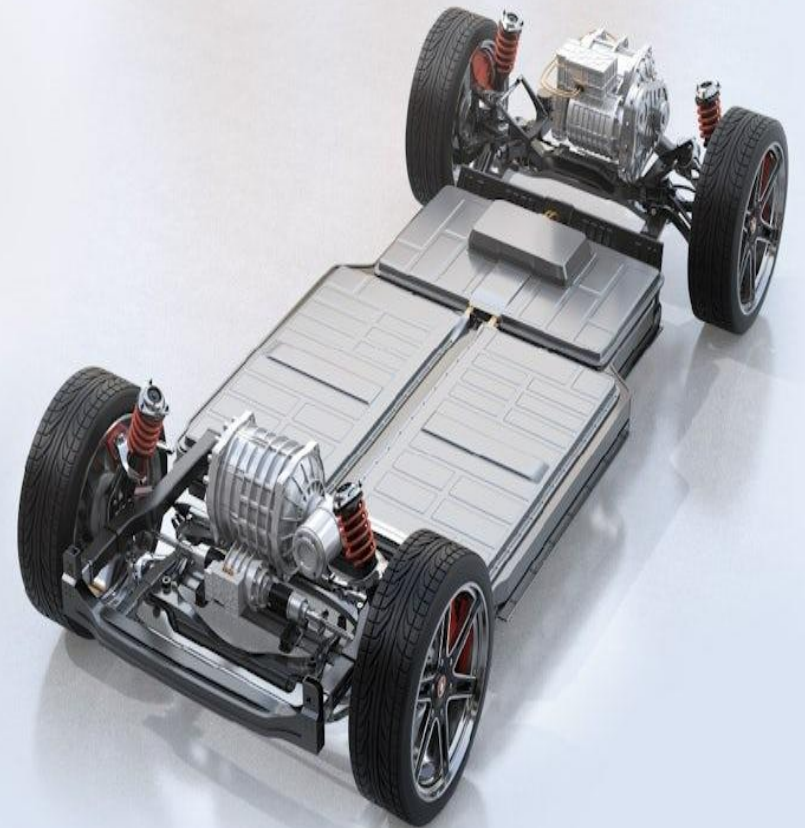
자동화

+

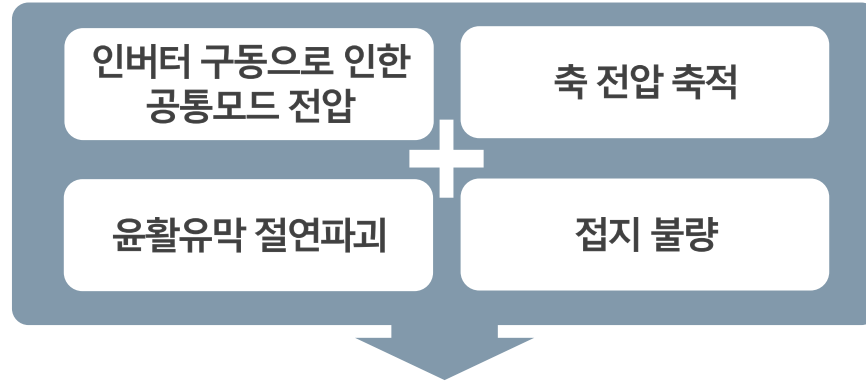
공유

+

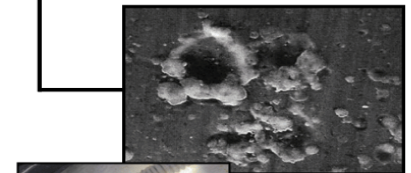
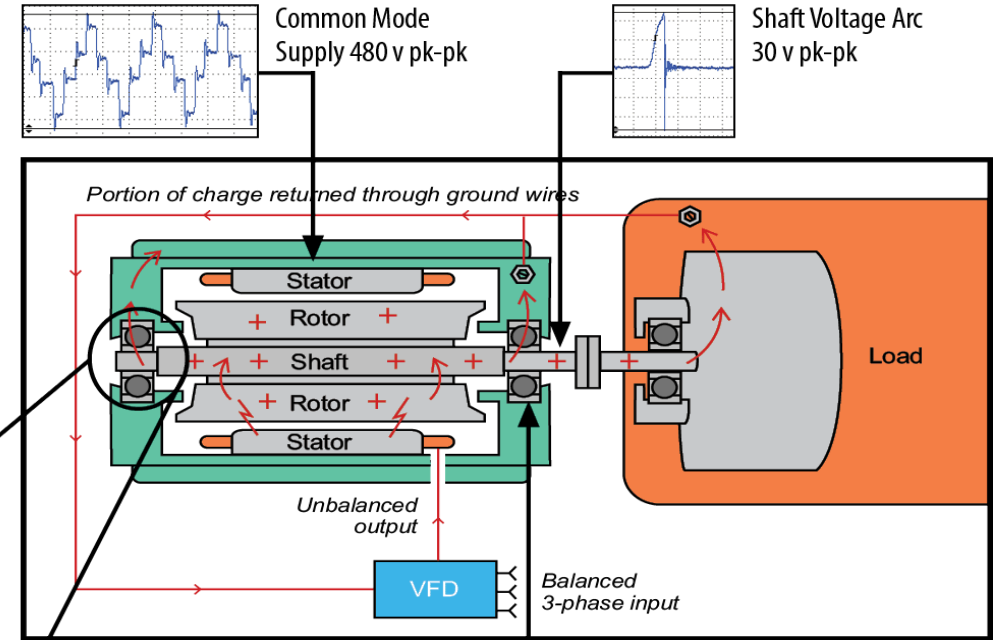
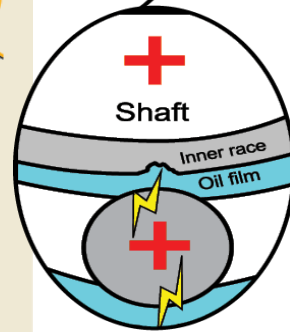
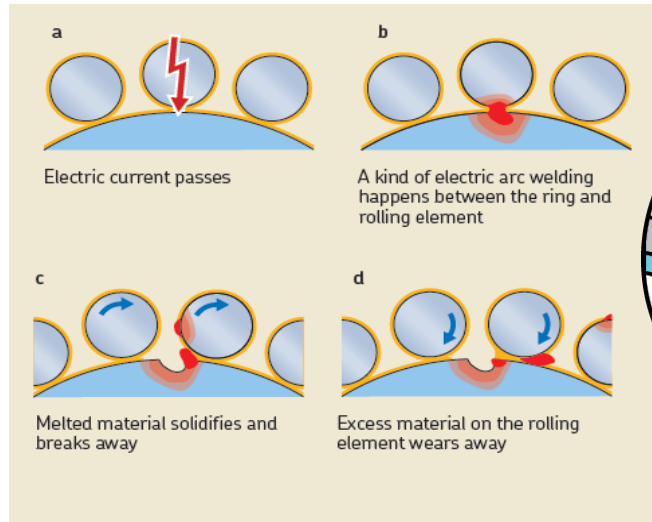
전동화



[배경] 전동화로 인한 문제



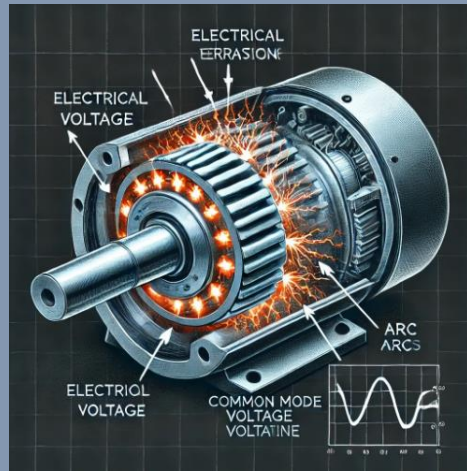
베어링을 통한 전류 방전



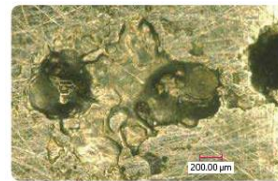
[배경] 전류침식 해결방법



AS-IS



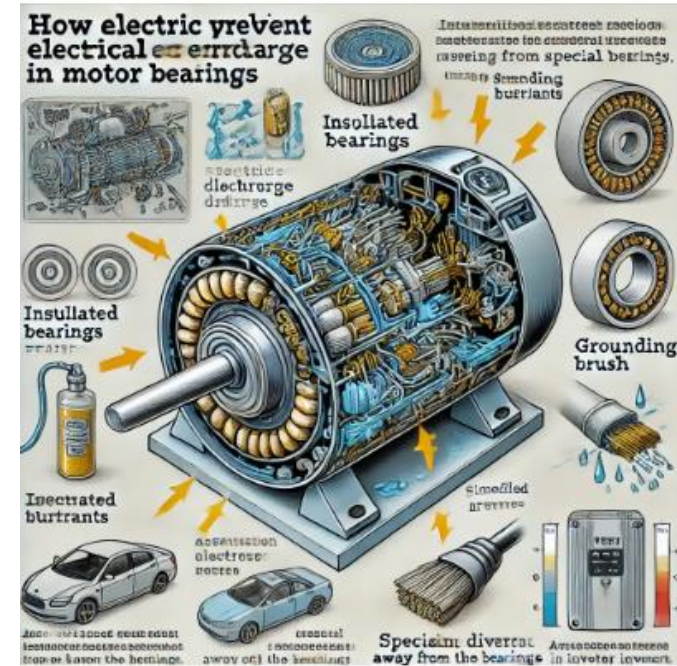
강구(Steel) 베어링



전류침식
→ 베어링 파손

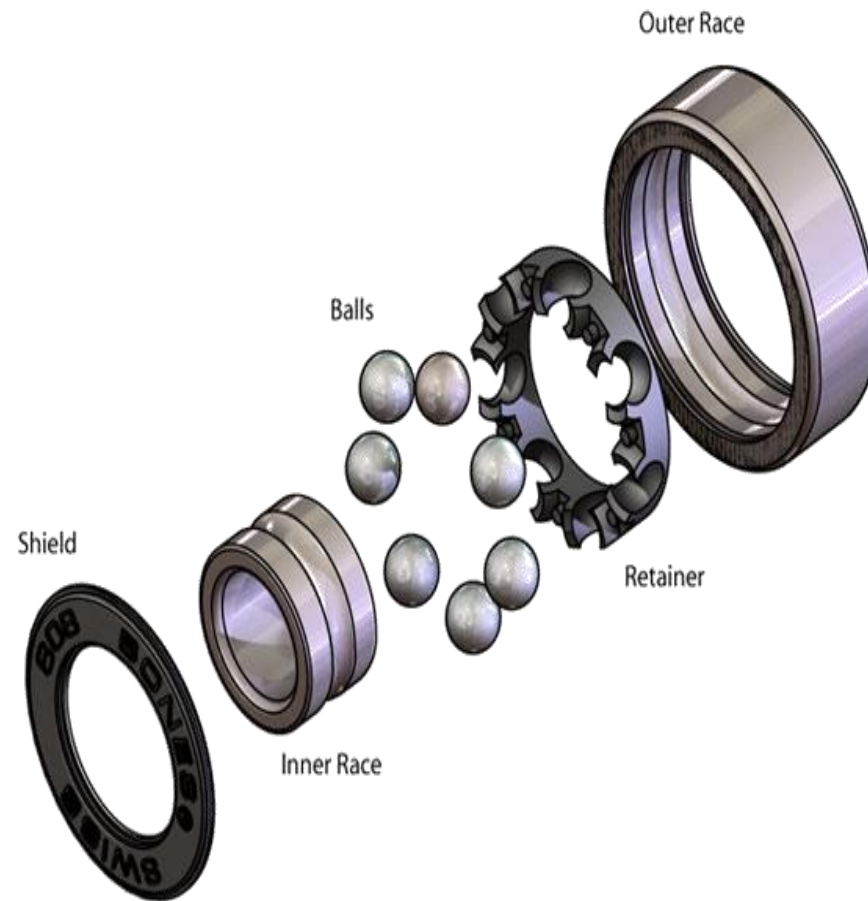
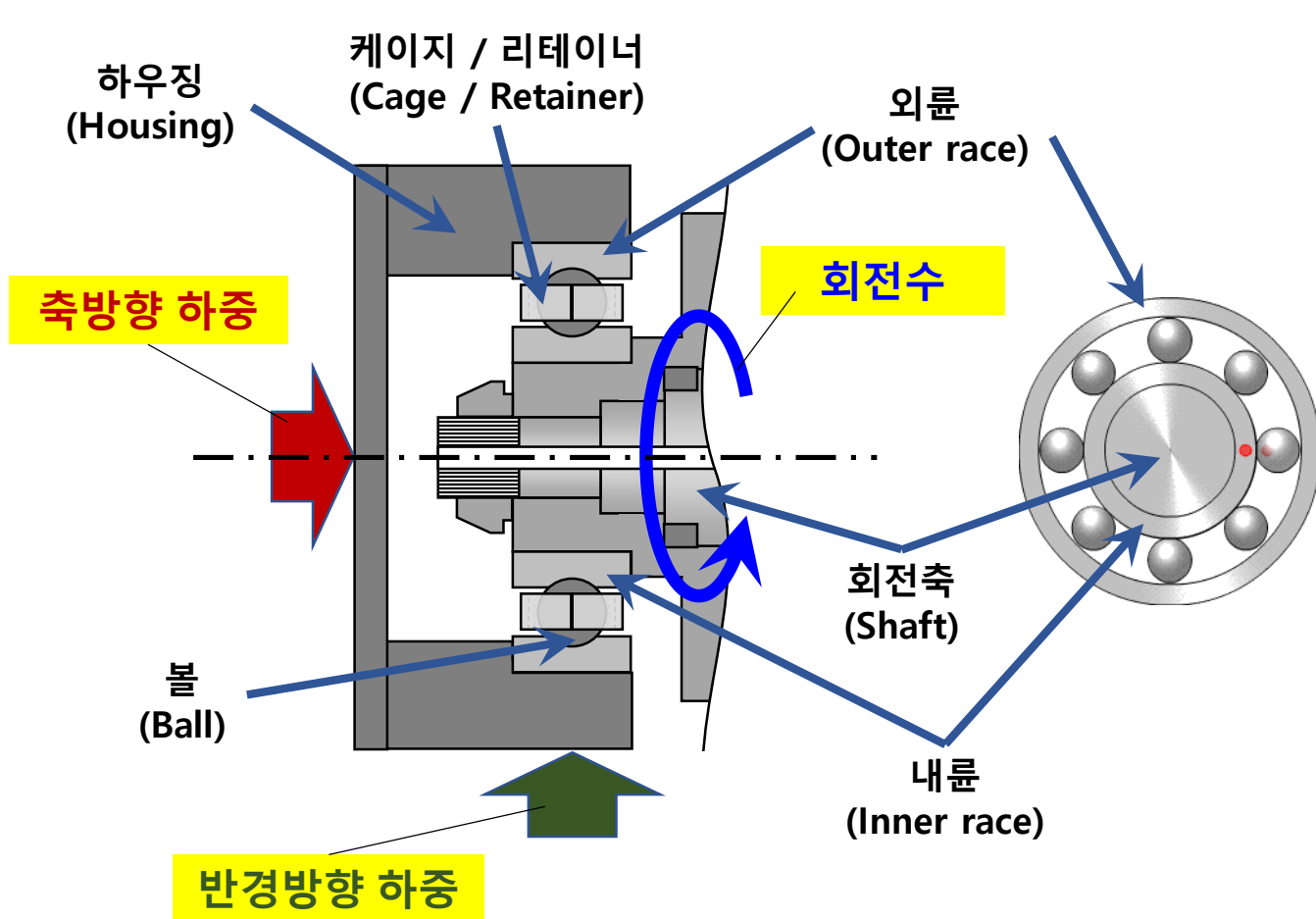
TO-BE

1. 절연 베어링
2. 그라운드 브러시
3. 전기적 필터
4. 통전 윤활유
5. 인버터 제어 알고리즘 최적화

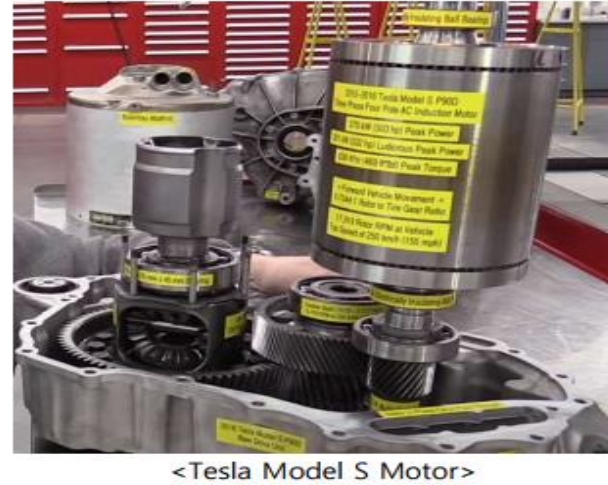
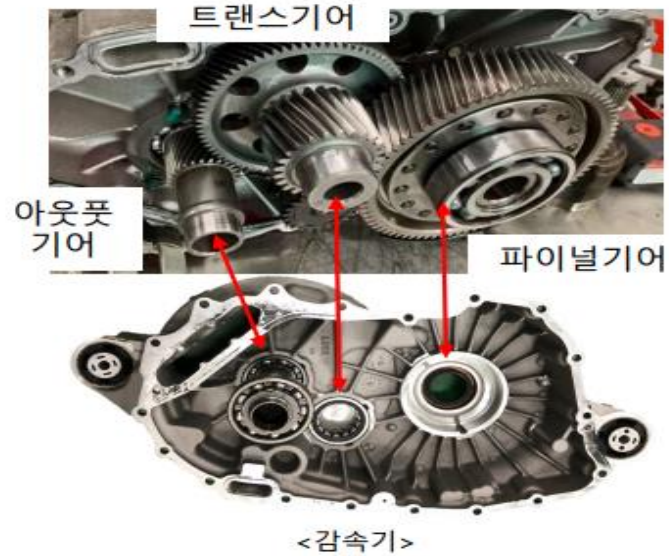


[배경] 베어링

회전체가 매끄럽게 움직이도록 마찰력 감소와 하중 지지 역할



[배경] 테슬라의 절연베어링



강구 → 세라믹 볼 변경 적용



* 질화규소 소재, 볼크기 6mm

[배경] 세라믹

원소주기율표

11 Na Sodium	12 Mg Magnesium											13 Al Aluminium	14 Si Silicon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium					

+

5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine
--------------	---------------	-----------------	---------------	-----------------

금속 + 비금속의 결합

- ZrB_2 , SiC , Si_3N_4 , Al_2O_3 , CaF_2

- 강한 이온결합 + 공유결합
→ 높은 경도, 고용점, 내식성
- **전기·열 절연성** (일부 예외: SiC , TiN 은 반도체/도전성)
- 취성: 변형보다는 파괴로 거동

세라믹산업
(사회기반 세라믹
제품 제조)

유리

판유리, 병유리,
디스플레이용유리,
섬유유리, 광학유리,
광섬유, 석영유리 등

내화물

정형내화물,
부정형내화물,
인조흑연

시멘트

시멘트,
콘크리트,
모르타르제품 등

도자기

도자기, 타일,
점토벽돌,
위생도기,
산업용 도자기 제품

세라믹연관산업
(첨단세라믹제품
제조)

전기전자 세라믹

반도체, 디스플레이,
각종센서, 콘덴서,
저항기 등

엔지니어링 세라믹

우주항공엔진 부품,
절삭공구,
내마모공구 등

에너지·환경세라믹

태양전지,
이차전지,
연료전지 등

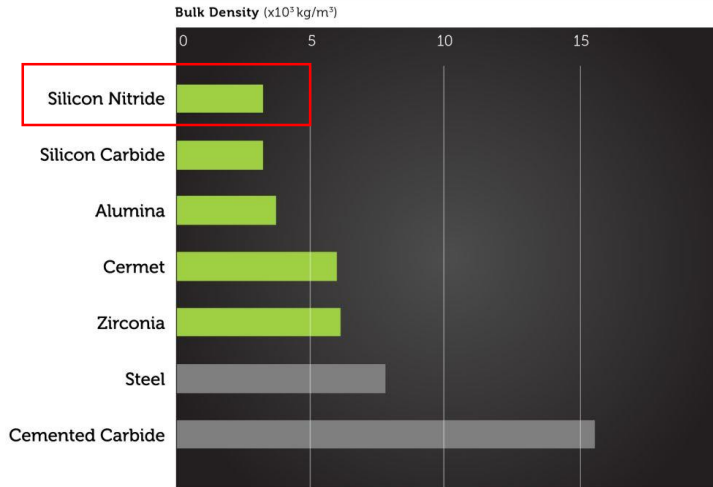
바이오세라믹

인공뼈, 인공치아,
인공장기,
헬스케어센서 등

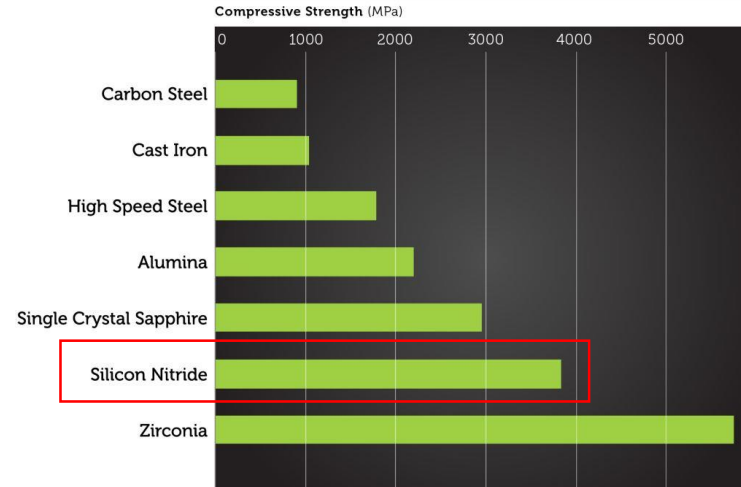
[배경] 세라믹 중에 어느 소재를?



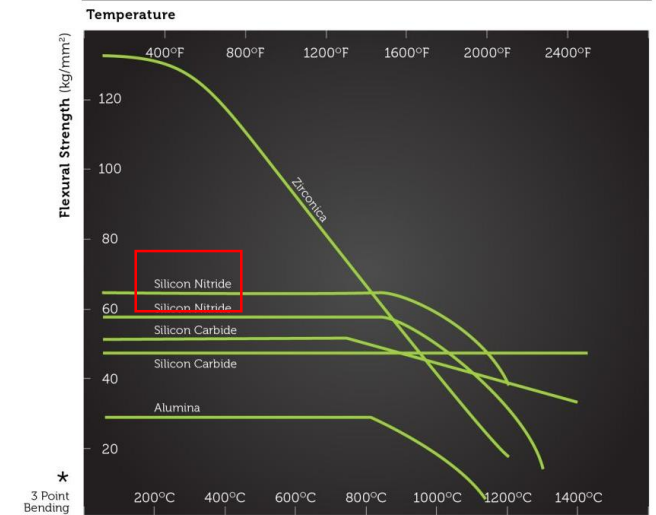
Specific Gravity



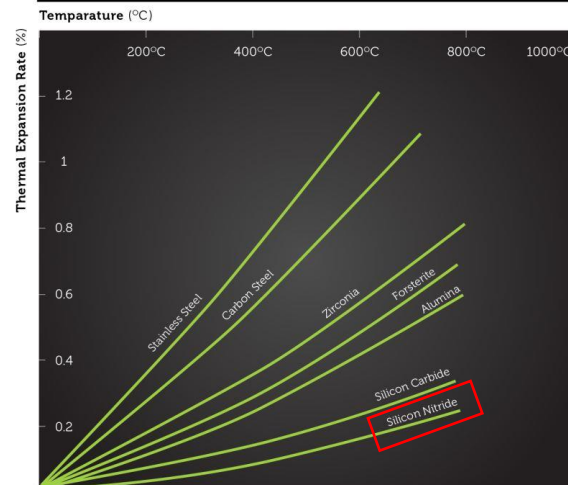
Compressive Strength



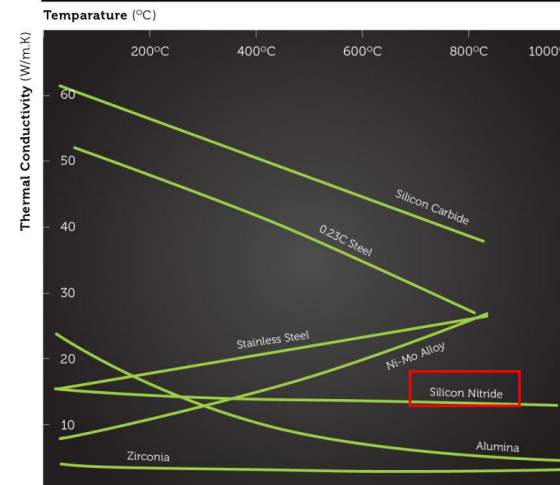
Flexural Strength vs. Temperature



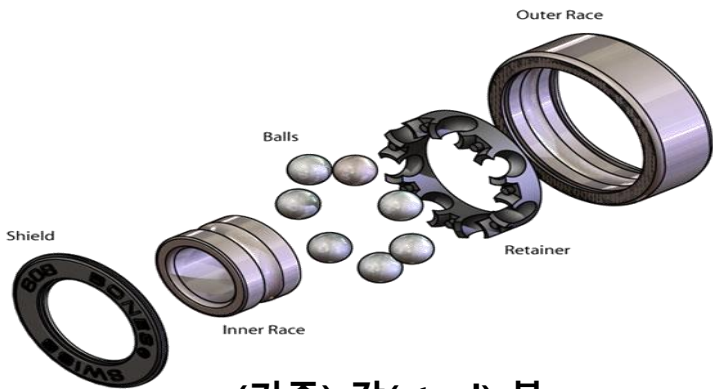
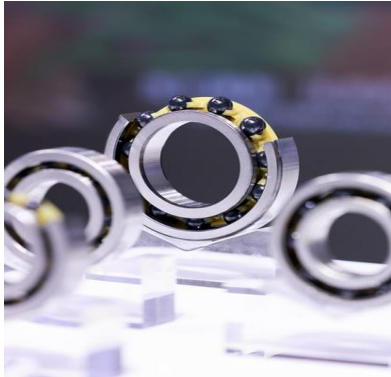
Thermal Expansion



Thermal Conductivity



[배경] 세라믹 볼의 장점



(기존) 강(steel) 볼
(하이브리드형) 세라믹 볼

저밀도 (스틸의 40% 수준)

스틸 대비 낮은 열팽창 계수
(낮은 예압, 작은 열발생)

마찰이 작음 → 발열이 작음

고경도 (스틸의 10배)

전기 저항이 높음

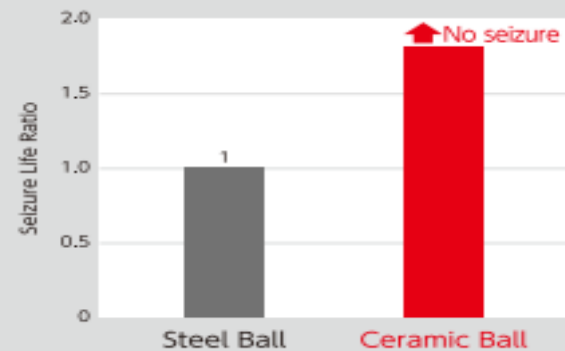
고속화

저운할 환경에
대한 신뢰성

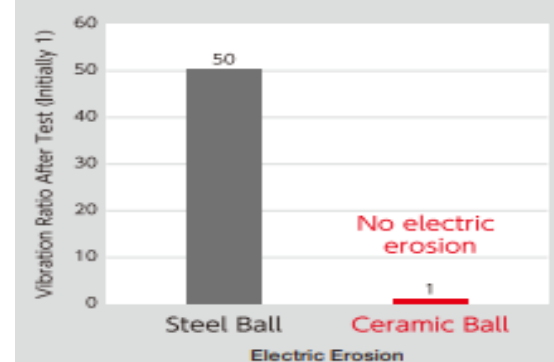
고수명

전식 방지

Maintenance-Free



No Electric Erosion



[연구개요] 세라믹볼 제조장벽

금속 강구

봉재 원자재를 선택하고 절단부터

봉재 절단

단조

열처리

가공



철강업계 표준규격 존재

Fe계

표준규격	계열	주요성분
SUJ2	표준베어링강	Cr1.3~1.6
SUJ3	케이스경화강	Cr 0.9~1.2
SUS440C	스테인리스계	Cr~1.0
AMS 6491	항공고온용	Cr 4.0

세라믹 세라믹 볼

재종을 설계하고 원소 혼합부터

분말 혼합

성형

소결

가공



Si₃N₄ 분말
+A원소 분말
+B원소 분말
...



업체마다 별도 재종 보유, 표준규격 X

Si₃N₄계

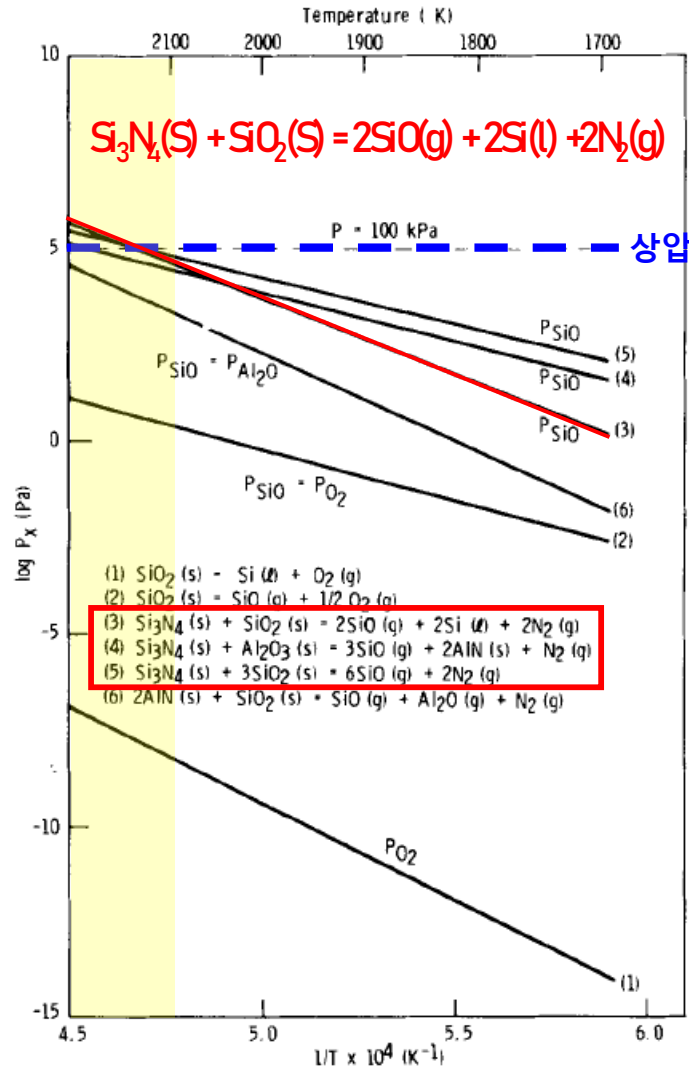
<Toshiba 재종표>

표준규격	재종	계열	주요성분
X	TSN-03NH	고강도 기계부품	X
X	TSN-23HA	거대볼, 풍력용	X
X	TSN-33H	저가 베어링용	X

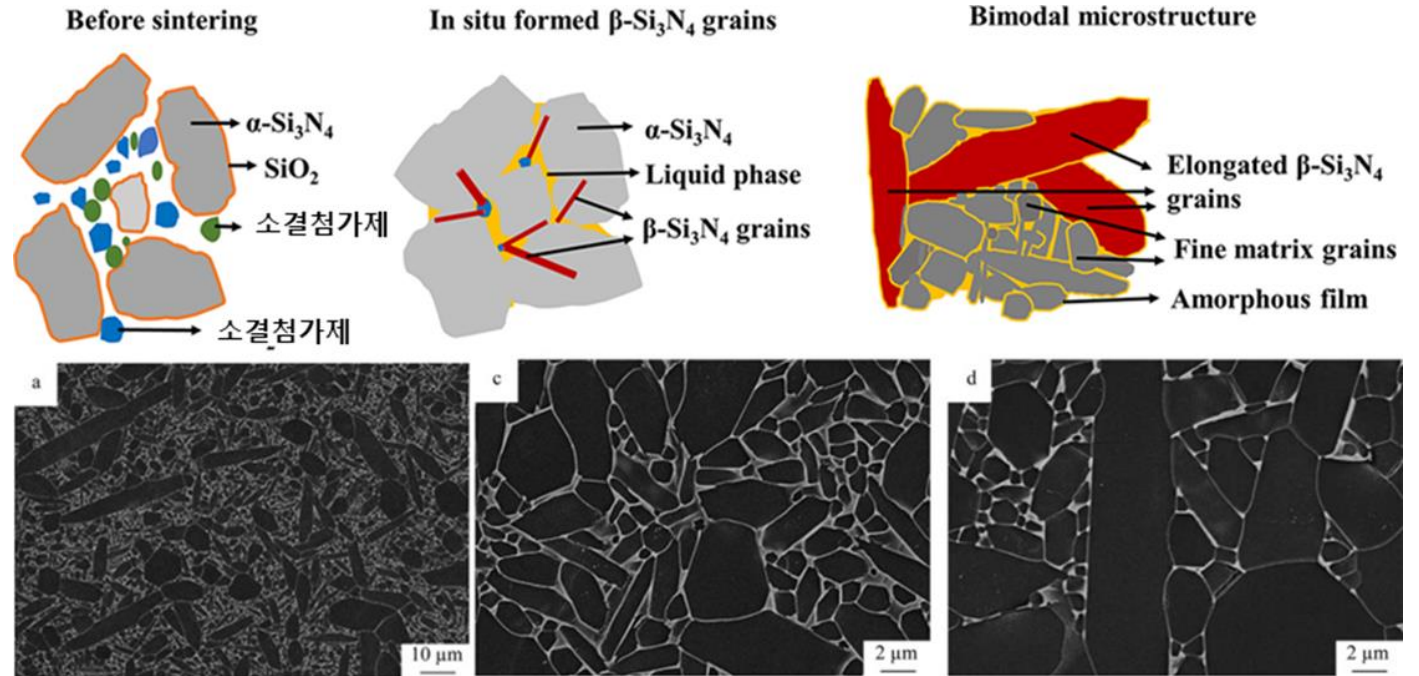
* 제품을 통한 성분분석도 어려워 선진사들의 정확한 성분 추정 불가능

[연구개요] 질화규소 제조 기술난제

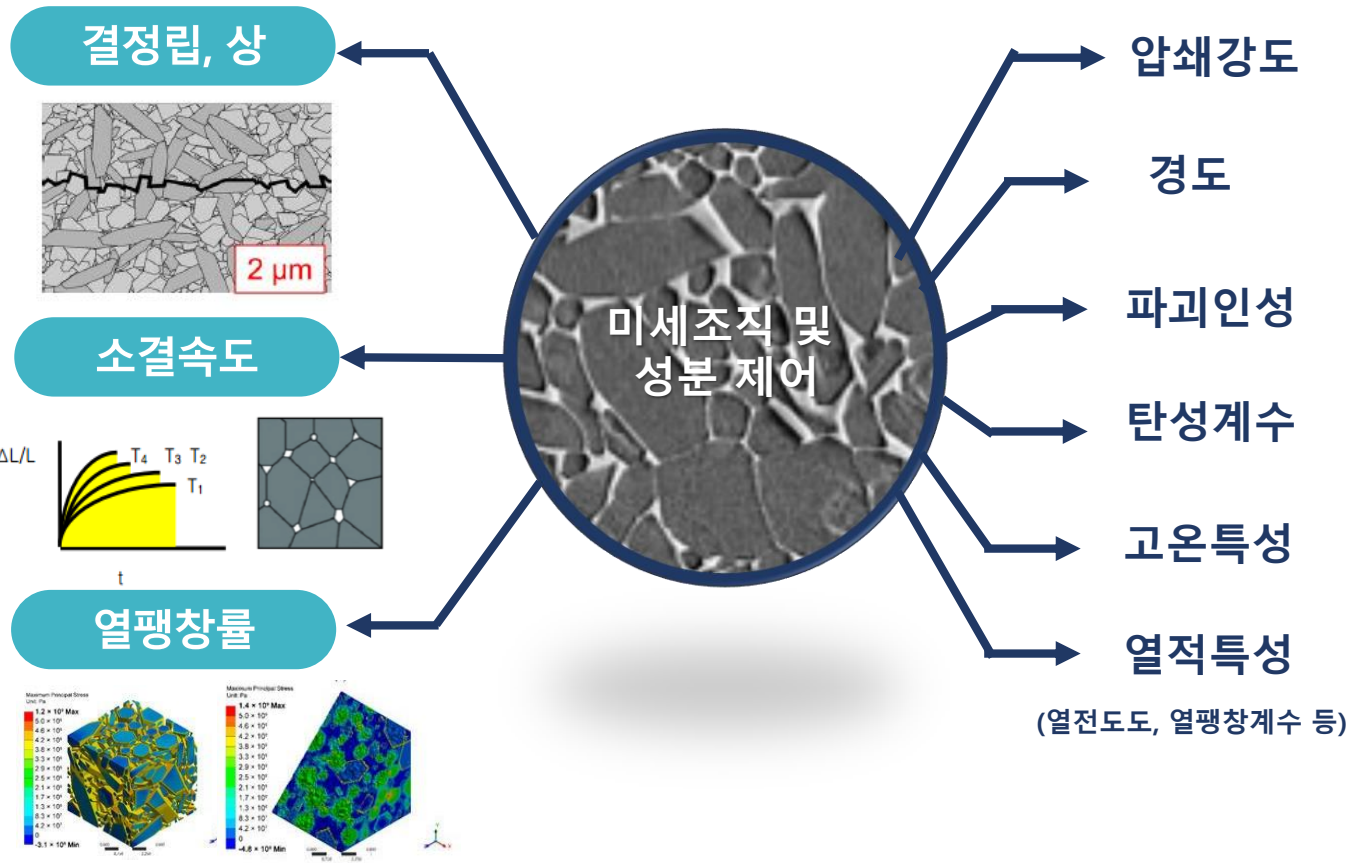
상압 하에서의 Si-Al-O-N 열분해 반응



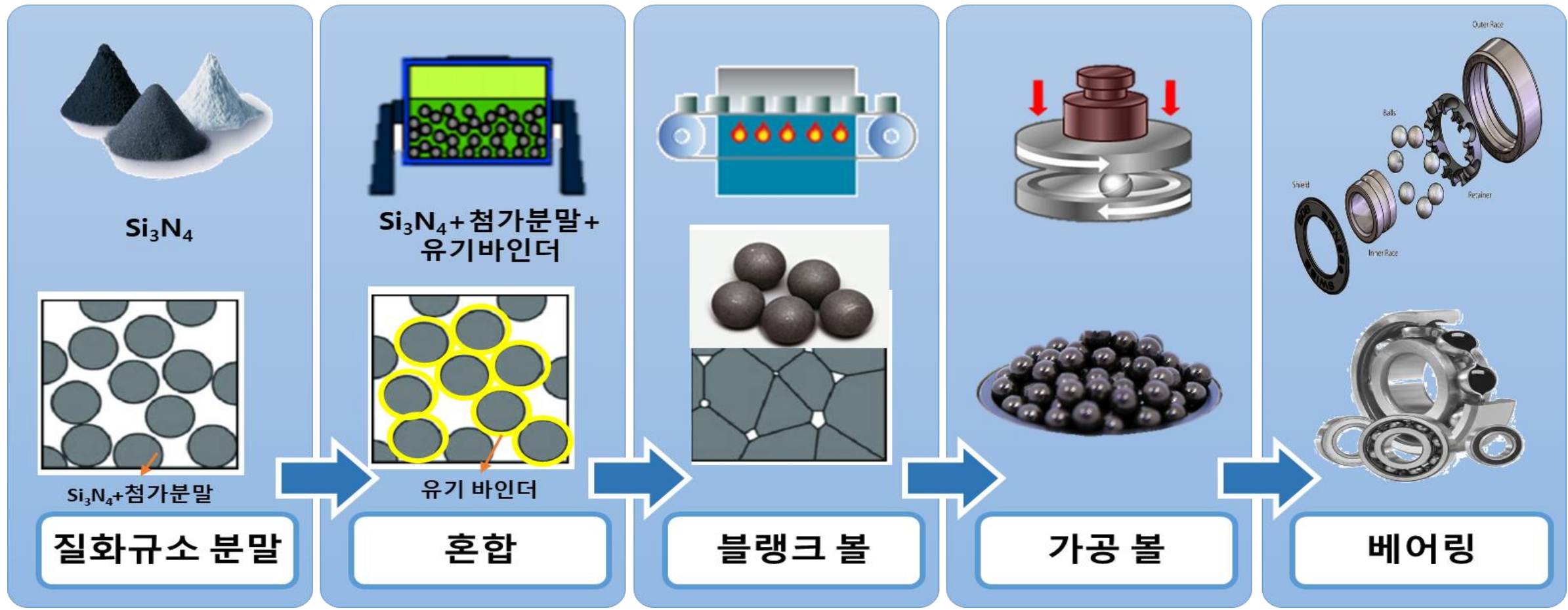
질화규소 세라믹의 소결 원리



[연구개요] 질화규소 소재 설계 방법



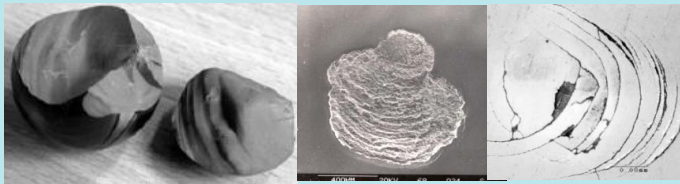
[연구개요] 세라믹 볼 제조 방법



[연구개요] 목표 및 전략

목표 1

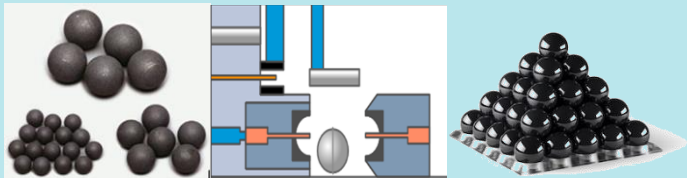
고속 베어링에 적합한 높은
질화규소 소재 조성 설계



- ✓ Lab Scale 공정 설계
- ✓ 목표 물성 구현
- ✓ 선진사 분석
- ✓ 질화규소 분말
- ✓ 첨가분말

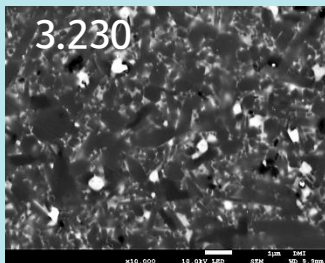
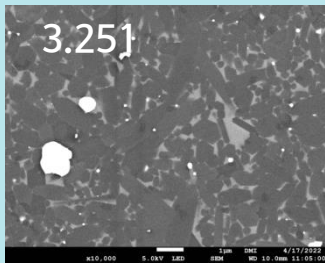
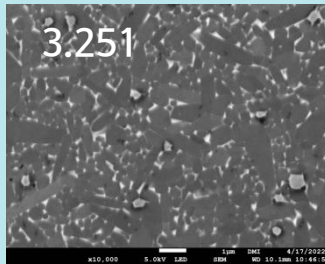
목표 2

G5 등급 가공이 가능한
구형도를 지닌 블랭크 볼 제조

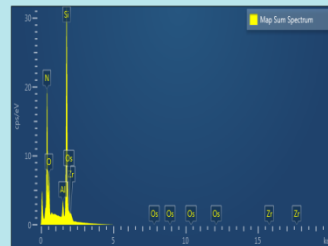
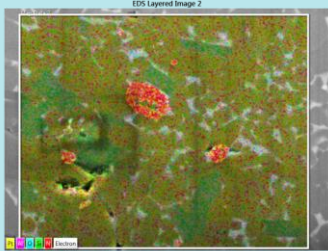
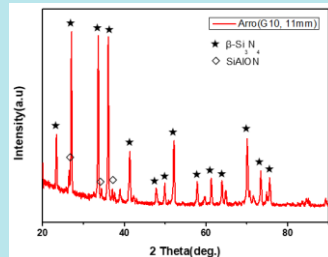


- ✓ Pilot scale 공정 설계
- ✓ 과립분말 제조
- ✓ 프레스 성형 공정 최적화
- ✓ 소결 공정 최적화
- ✓ HIP 공정 최적화

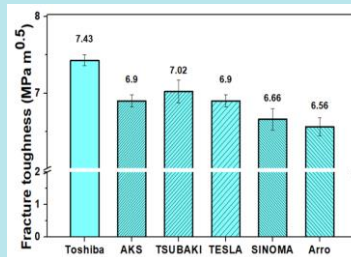
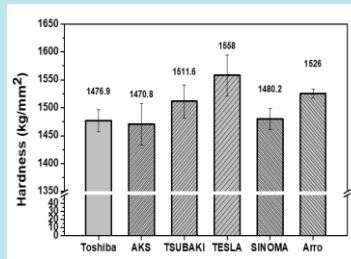
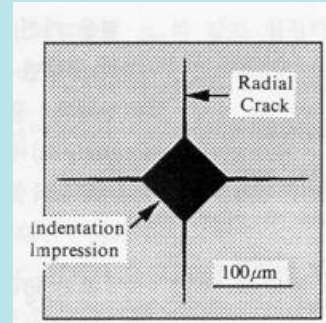
[연구내용] 소재 조성 설계



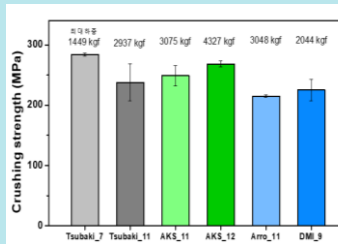
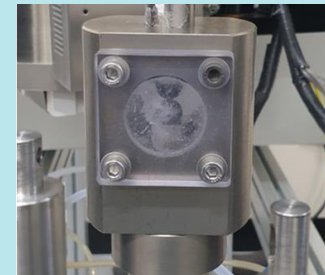
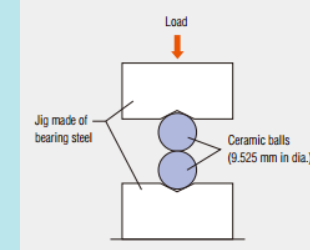
밀도 & 미세조직



성분 & 상분석



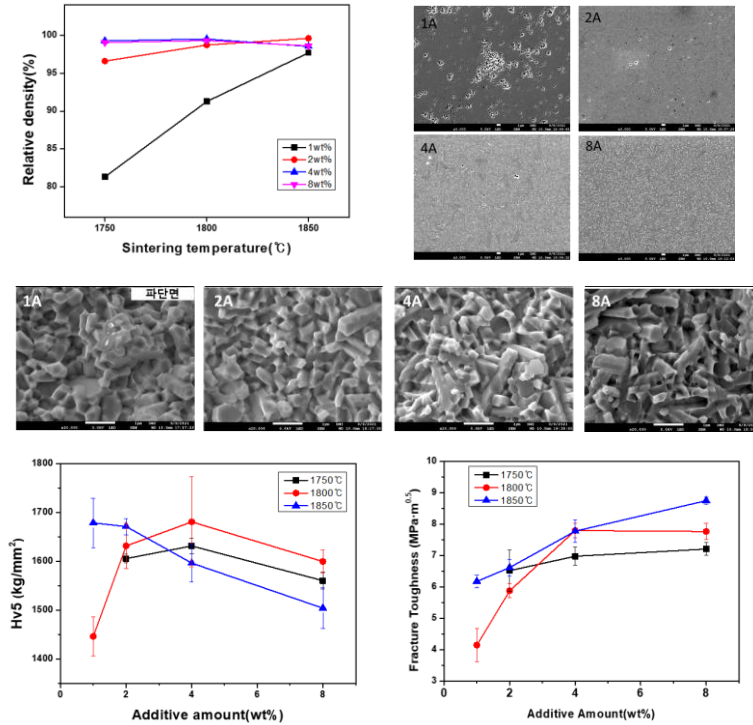
경도 및 인성



압쇄강도

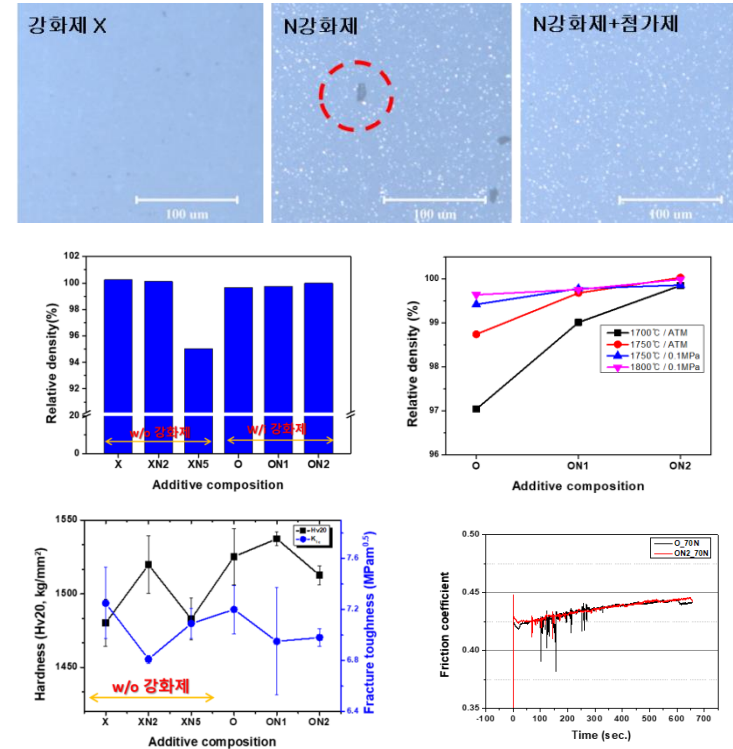
[연구내용] 소재 조성 설계

A첨가제 양에 따른 영향 연구



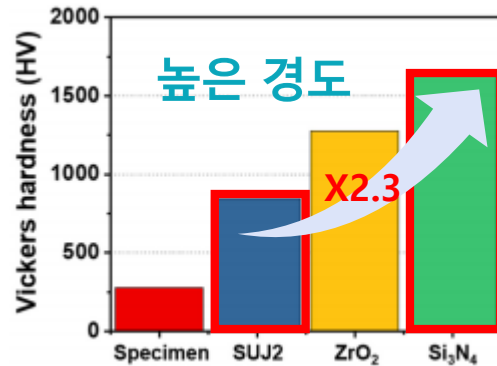
미세조직, 밀도, 경도, 인성, 열팽창계수에 미치는 영향 파악

B첨가제 영향 연구



이차상 생성 방지와 밀도, 경도, 인성 및 마찰특성에 미치는 영향 파악

[연구내용] 블랭크 볼 제조

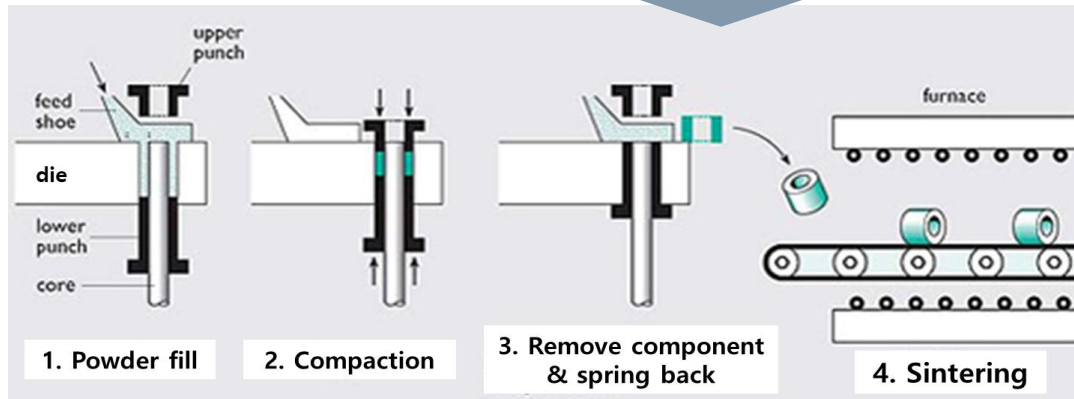


TO-BE

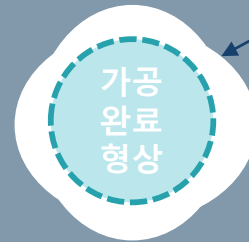
우수한 구형도 구현을 통한 가공량 최소화



가공량



$$S_{Total\ shrinkage} = S_{powder\ fill} + S_{compaction} - S_{spring\ back} + S_{sintering}$$



블랭크 볼(가공 전)



가공시간 증가
➔ 생산비용 증가



품질저하

[연구내용] 블랭크 볼 제조

목표

1,000개급 세라믹 블랭크 볼 제조 공정 설계

전략

각 공정별 제어인자 선정 및 최적화

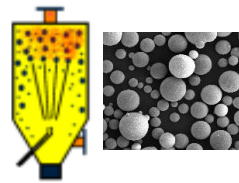
분말 혼합



Si_3N_4 +첨가분
말+유기바인더

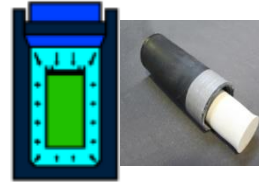
- 분말 조성 설계
- 볼 종류 및 크기
- 혼합 형태 및 시간
- 유기바인더 종류 및 양
- 분산제 종류 및 양

건조·과립



- 건조 온도
- 슬러리 공급속도
- 고형분 함량
- 과립 크기 제어

성형



- 성형압력
- 수축률 도출
- 볼 성형 금형 설계
- 프레스 성형 기술
- CIP 전처리

탈지



- 유기바인더 제거
- 탈지 온도
- 탈지 분위기
- 장입 지그 설계
- 장입방법

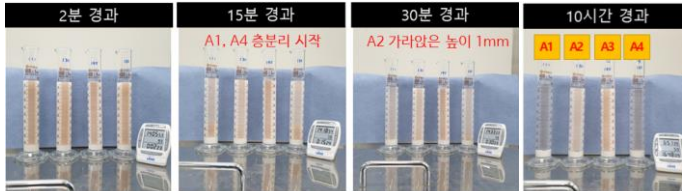
소결



- 소결 온도
- 소결 분위기
- 가스 압력
- 장입 지그 설계
- 장입방법

[연구내용] 블랭크 볼 제조

분산제 선정

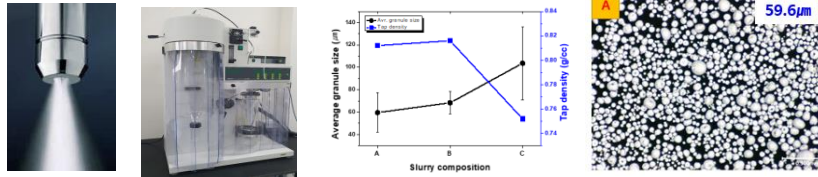


분산특성
A3>A2>A4=A1

- ✓ A1 : 산성계
- ✓ A2 : 폴리카복실릭산
- ✓ A3 : 인산 에스테르염
- ✓ A4 : 알킬올암모늄

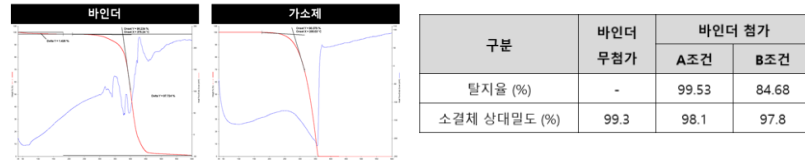
2차에 걸친 7종 분산제 평가

유기물 조성



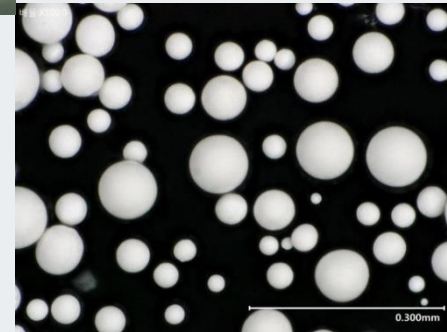
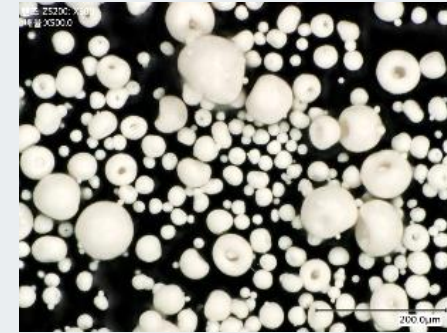
노즐형 분무 건조 장비를 활용한 바인더 종류 및 고형분 함량 영향 파악

탈지 조건



TG-DTA 분석과 소결체 상대밀도를 평가하여 최적 바인더 조건 선정

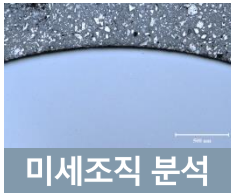
과립분말 제조 공정 최적화



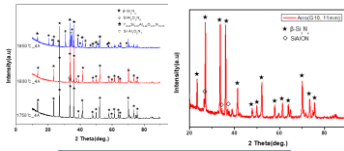
정상과립 95% 이상 달성
(대량양산 공정에 적합한 디스크형 분무)

[연구내용] 보유기술

소재 분석 및 평가 기술



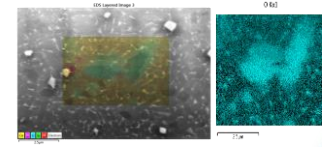
미세조직 분석



상분석

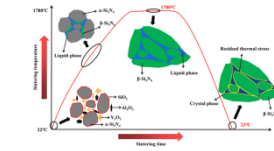


기계적 물성 평가

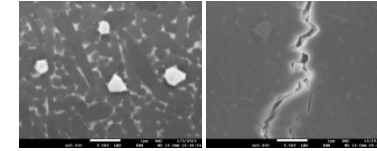


이차상 규명

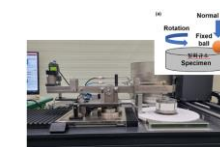
질화규소 조성 설계 기술



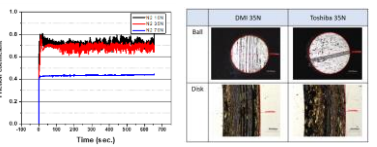
소결성 향상



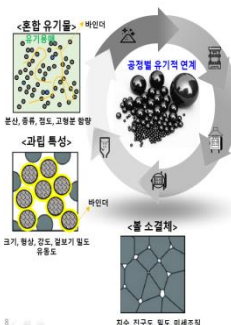
물성 강화 설계



마찰마모 특성

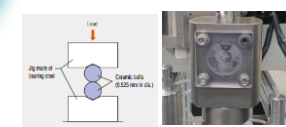


블랭크 볼 제조 기술

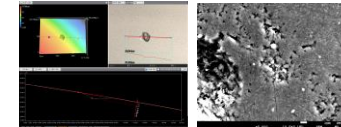


혼합/ 과립/ 성형/ 탈지/소결/ HIP

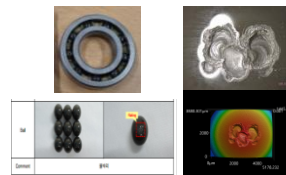
세라믹 볼의 성능 평가 기술



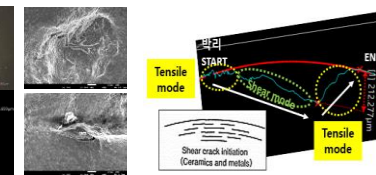
압쇄력 평가 기술



가공 볼 표면 결함



내구테스트 고품 분석 및 피로기구 특성



[응용분야] 세라믹 베어링



<항공우주>
고속 성능과 고온에 대한 내성
제트 엔진, 터빈 블레이드



<풍력 터빈>
극한 환경 조건
에너지 손실 저감
에너지 출력 향상



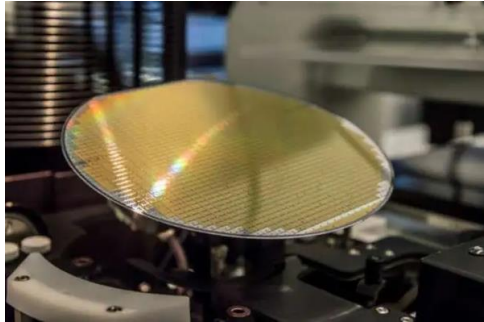
<로봇>
로봇 관절, 액추에이터, 압
정밀도&신뢰성
적은 마찰, 높은 내구성,
가벼운 무게



<의료 장비>
MRI 기계,
정밀 수술 기구

[응용분야] 전기차 파워모듈용 방열기판

SiC 파워모듈



Si (실리콘) IGBT 모듈
(상당품 이미지)



체적비
50% 저감



Full SiC 파워 모듈
사이즈 : 122×46×17mm (단자 불포함)

- 기존의 400A 급 Si-IGBT 모듈 대신 사용할 경우,
체적을 약 50% 삭감



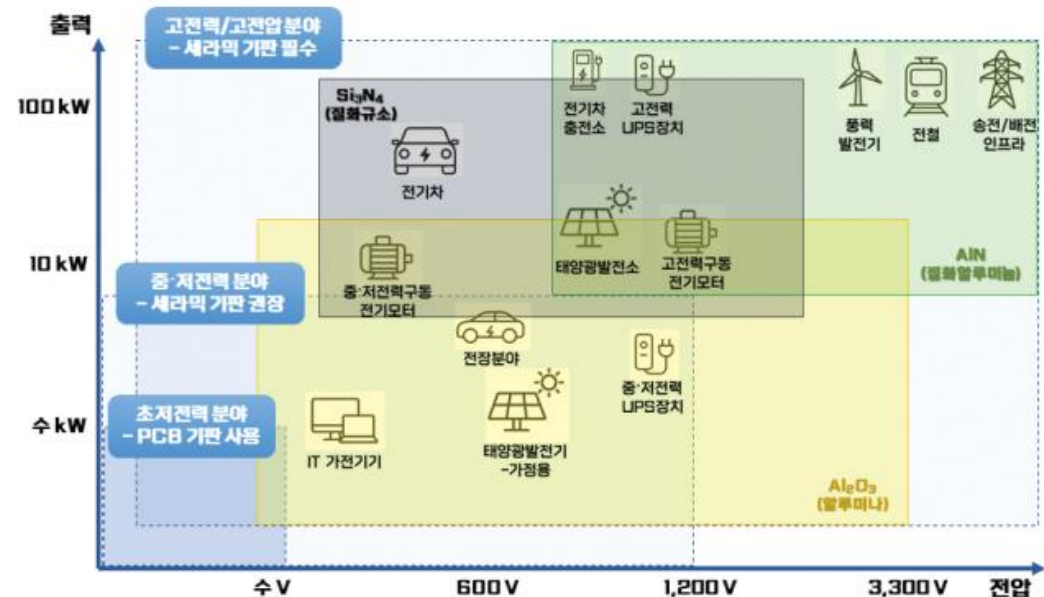
[인버터]
1700V/1200A x 2set
38.6% 소비전력 절감

NEWS

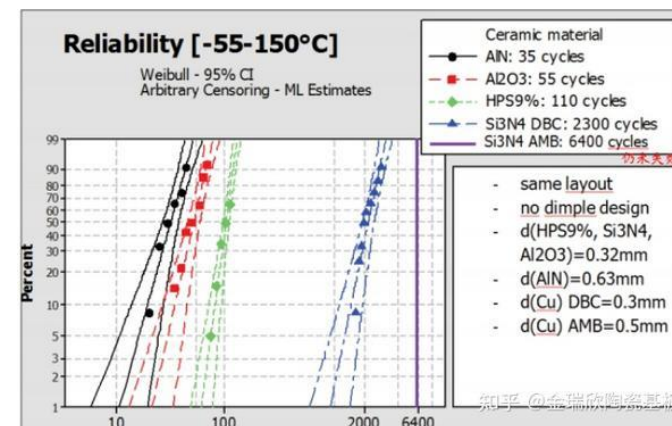
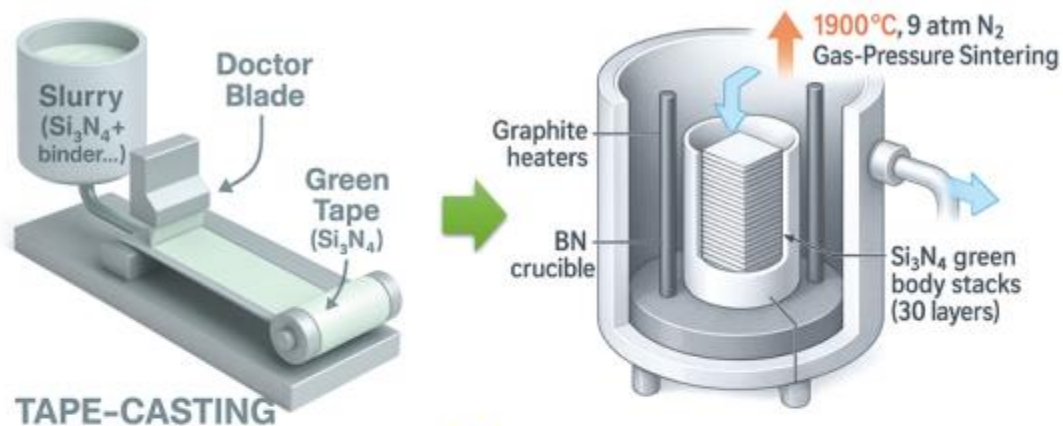
Silicon Carbide Ready to Run the Rails

Mitsubishi is showing that silicon carbide electronics can bring big power savings to underground trains

By JOHN BOYD / APRIL 2013



[응용분야] 전기차 파워모듈용 방열기판



Si₃N₄ DBC 및 AMB 세라믹 기판 - Zhihu



[응용분야] 전기차 방열필러

전기자동차 배터리 열폭주 사례 빈도수 증가



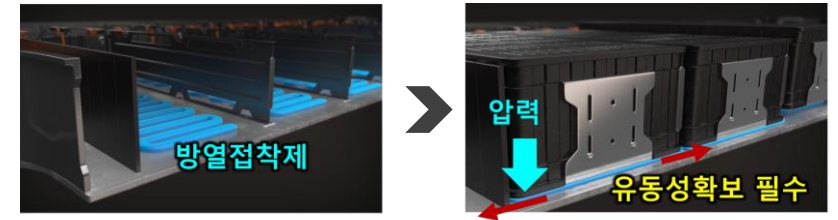
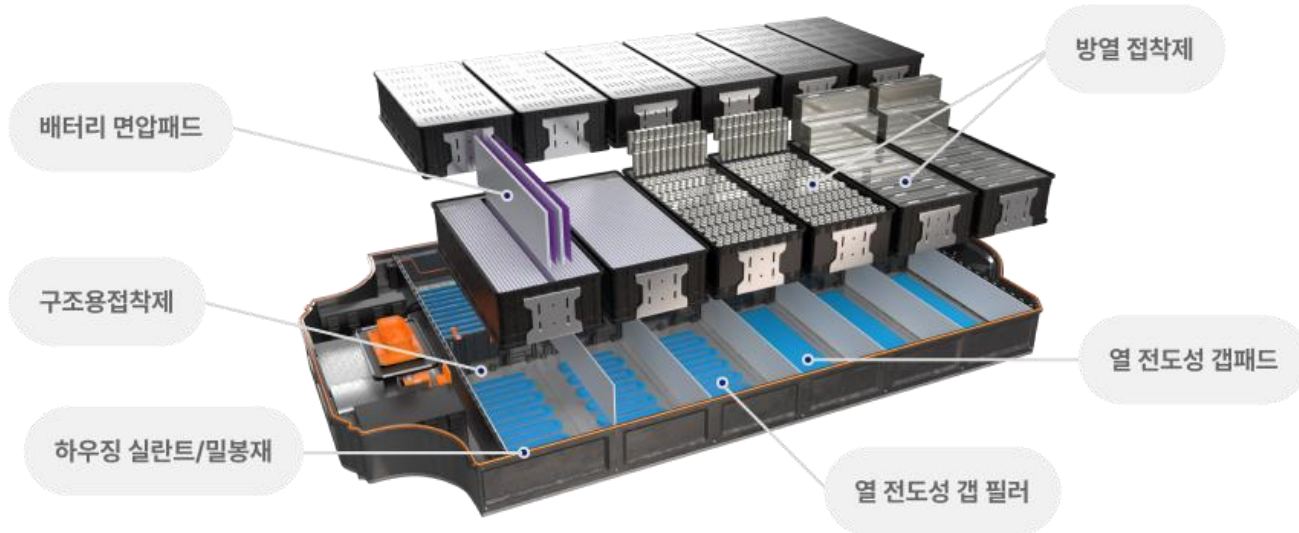
① **BMS 기반의 정밀 모니터링:** 배터리 관리 시스템(BMS)은 셀의 전압, 전류, 온도를 실시간으로 감지해 이상 징후를 조기에 탐지합니다. 최근에는 AI 기반 BMS가 이상 패턴을 학습하여 예측 기반 제어로 사전 대응 능력을 높이고 있습니다.

② **셀 간 열 차단 구조:** 전기차 배터리는 수백 개의 셀이 밀집된 구조이기 때문에 난연성 소재와 열 차단 소재(PCM 등)를 사용하여 셀 간 열 전달을 최소화해야 합니다.

③ **자동 냉각 시스템:** 액체 냉각 방식을 적용하면 배터리 셀 온도를 균일하게 유지할 수 있으며, 이상 발열이 감지됐을 때 즉각적인 냉각이 가능합니다.

④ **물리적 보호:** 차량 충돌이나 도로 충격으로부터 셀 구조를 보호하기 위해 내충격 프레임과 흡수형 케이스 설계가 필요합니다.

[응용분야] 전기차 방열필러



방열접착제 열전달 모식도

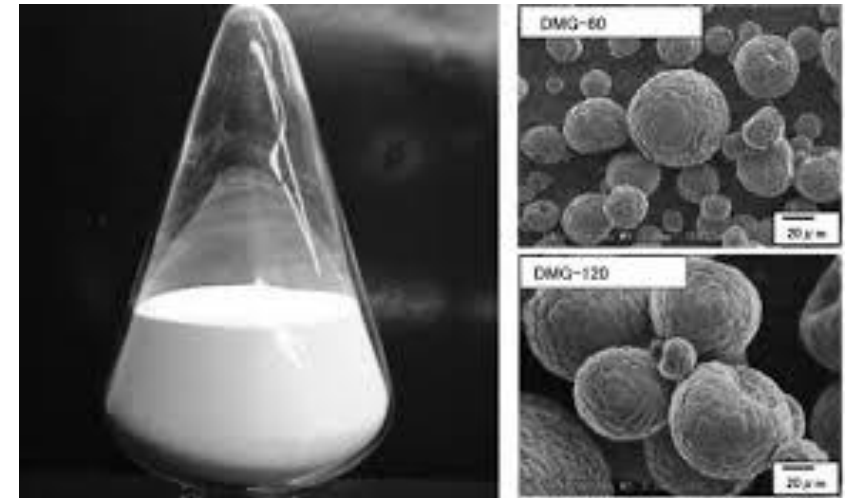
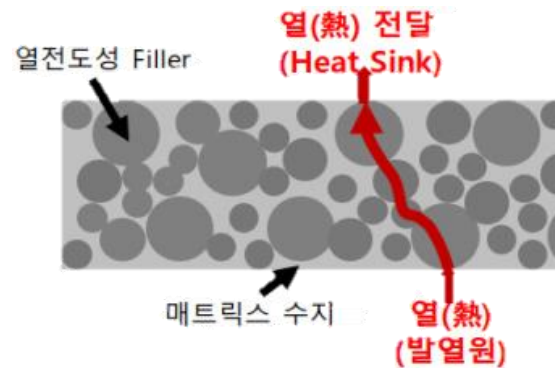
Thermal Filler
70 ~ 85 vol.%

열전도성
기계강도
절연성

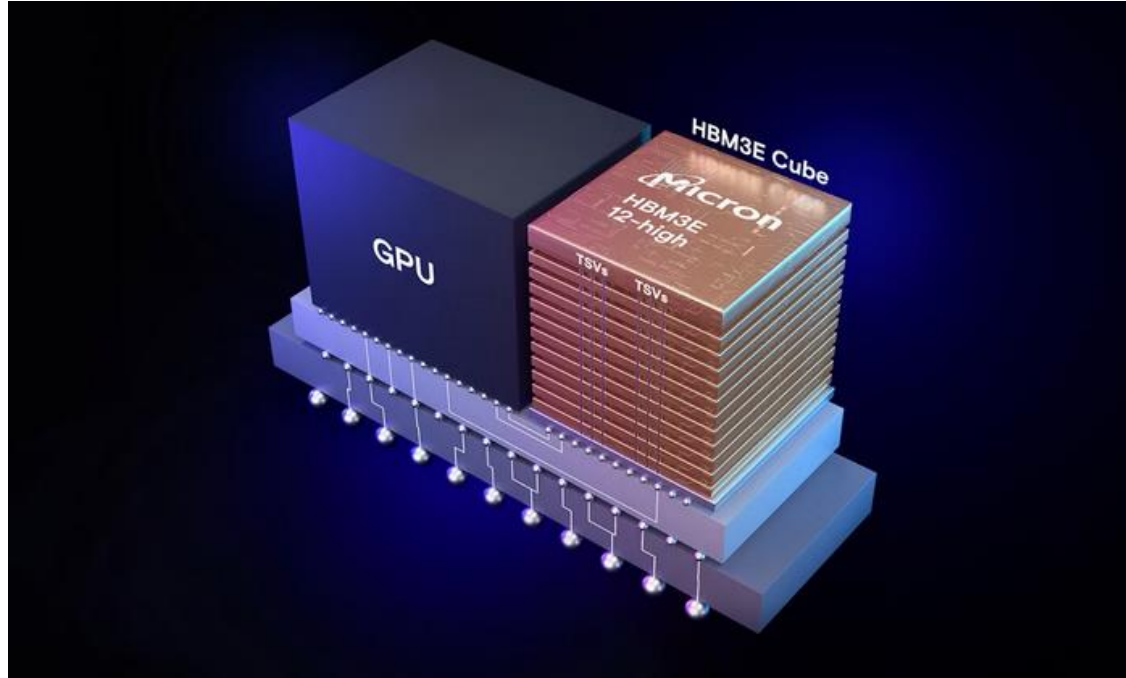


Organic Polymer matrix
15 ~ 30 vol.%

접착강도
내화학성, 절연성
유연성 및 내충격성



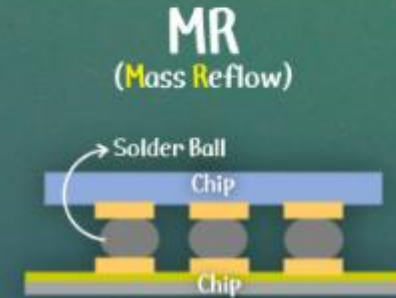
[응용분야] HBM



SK하이닉스는 이 문제를 해결하기 위해 D램 패키지를 감싸는 핵심 소재인 EMC의 열전도 성능 향상에 주력했다. 기존에 EMC의 소재로 사용하던 실리카(Silica)에 알루미나(Alumina)를 혼합 적용한 신소재인 High-K EMC를 개발한 것이다.

이를 통해 열전도도를 기존 대비 3.5배 수준으로 대폭 향상시켰으며, 그 결과 열이 수직으로 이동하는 경로의 열 저항을 47% 개선하는 성과를 거뒀다.

MR-MUF란?



Chip간 연결 시 Oven에 넣어 '한 번에' *Solder ball을 녹여(Reflow) 대량(Mass)으로 접합하는 공정

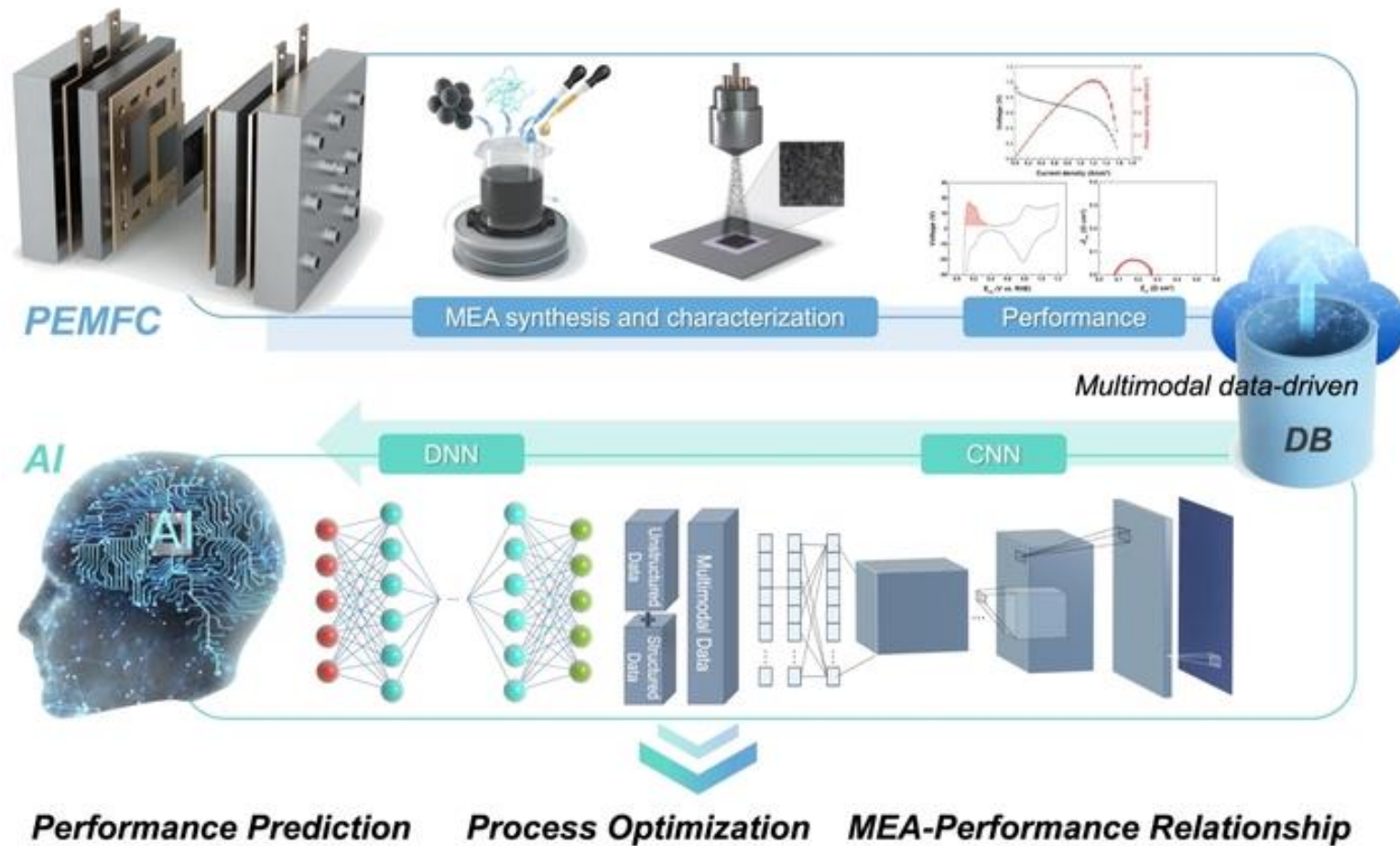
* Solder ball: 반도체 칩을 칩 또는 기판에 전기적 연결을 하기 위한 연결 소재



적층된 Chip 사이에 물리(충격)·화학적(열) 보호를 위하여 빈공간을 액상의 molding 소재인 *EMC로 채우는 공정

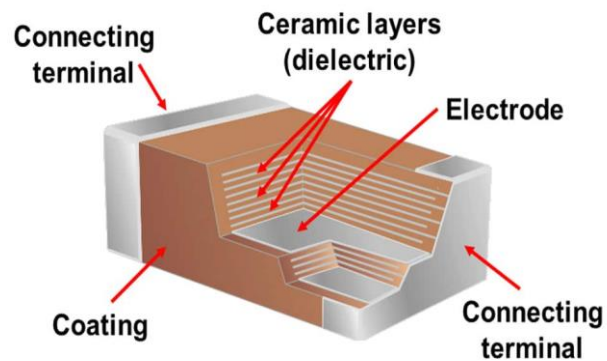
* EMC(Epoxy Molding Compound) : 반도체 chip을 보호하고 열방출에 도움을 주는 소재

[향후계획] 스마트자율제조 적용

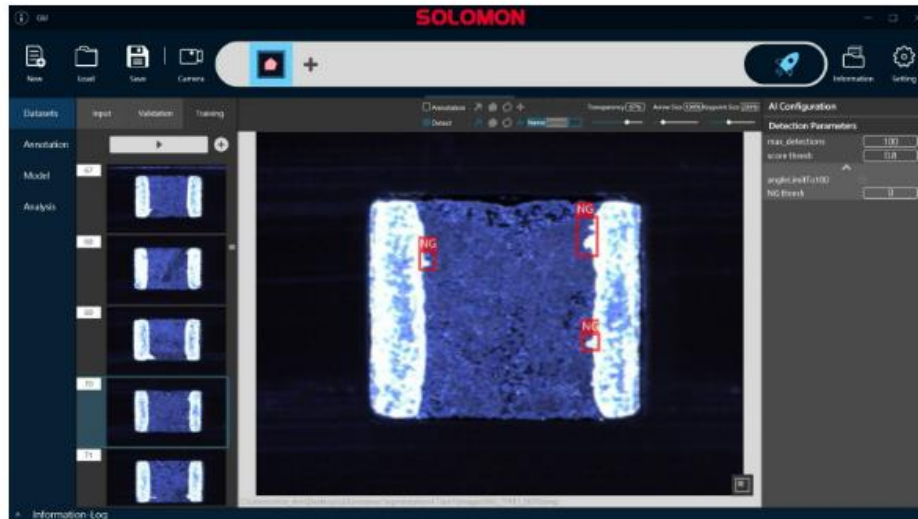


한국세라믹기술원 수소디지털융복합센터 류가애, 신서윤 박사 연구팀이 개발한 AI 기반 연료전지 성능 예측 기술 개요.

[향후계획] AI검사를 통한 결함 탐지



AI는 시각 검사의 도약을 이끈다. (이미지: IDS Imaging Development Systems GmbH)



AI는 회선식 인서트의 외형 윤곽을 정확히 인식하고, 새로운 제품조차도 정상(OK)과 불량(NOK)을 정확히 구별해낸다. (이미지: Xactools GmbH)

Thank you

