

HRE - Free Magnet 기술 보고서

1. HRE Magnet의 뜻 · 2. 기존 Nd Magnet과의 차이 · 3. 결정립계 확산(GBD) · 4. 적층 Magnet 적용 현실성

기존 HRE 첨가형 vs HRE-Free

기존 HRE 첨가형

NdFeB + Dy/Tb

고온 Hcj ↑

감자 Margin 확보 용이

Br 저하·HRE 리스크

HRE-Free

Dy/Tb 없음

미세조직/입계 제어

Rotor·냉각·제어 통합

공급망 리스크 ↓

목적 전동기 설계자가 HRE - Free를 단순한 자석 재료 변경이 아니라 자석 - 로터 - 열 - 제어 - 공급망의 통합 기술로 이해할 수 있도록 정리한다. GBD와 적층 Magnet은 실제 적용 관점에서 장점과 한계를 함께 기술한다.

작성 기준: 2026 - 09 · 공개 기술자료/논문 기반 · 도식은 이해를 위해 재구성

Executive Summary

HRE - Free Magnet은 '희토류를 전혀 쓰지 않는 자석'이 아니다. 전동기용 NdFeB 문맥에서는 일반적으로 Dy(디스프로슘), Tb(터븀) 같은 Heavy Rare Earth를 사용하지 않는 네오디뮴 자석을 뜻한다. Nd와 Pr은 여전히 포함될 수 있으므로 Rare - Earth - Free와 구분해야 한다.

기존 고내열 NdFeB는 Dy/Tb를 이용해 고온 보자력 Hcj를 높여 왔다. 그러나 HRE는 공급 편중 · 가격 변동 · 자원 리스크가 크며, Dy가 주상에 많이 들어가면 Br가 불리해질 수 있다. 산업의 방향은 벌크 HRE 첨가 → GBD에 의한 HRE 저감 → HRE - Free 미세조직 → Magnet/Rotor/Cooling/Control 통합 최적화로 이동해 왔다.

GBD는 자석 표면에 확산원을 도포하고 열처리하여 Dy/Tb 등을 결정립계를 따라 침투시키는 공정이다. 결정 전체가 아니라 결정립 표면에 HRE - rich shell을 만들어 역자구 발생을 억제하므로 적은 HRE로 높은 Hcj를 얻을 수 있다. 단, Dy/Tb를 사용하는 GBD는 HRE - Free가 아니라 HRE 저감 기술이다.

적층 Magnet은 목적을 구분해야 한다. 와전류 저감용 segmentation, GBD 확산거리 단축용 얇은 segment 적층, 서로 다른 Hcj/Br grade를 조합하는 graded magnet은 서로 다른 기술이다. 특히 2026년에는 GBD와 segmentation을 결합해 얇은 segment 사이의 합금층이 접합재와 확산원 역할을 동시에 수행하는 연구가 보고되었다.

희토류와 HRE(Heavy Rare Earth)의 위치

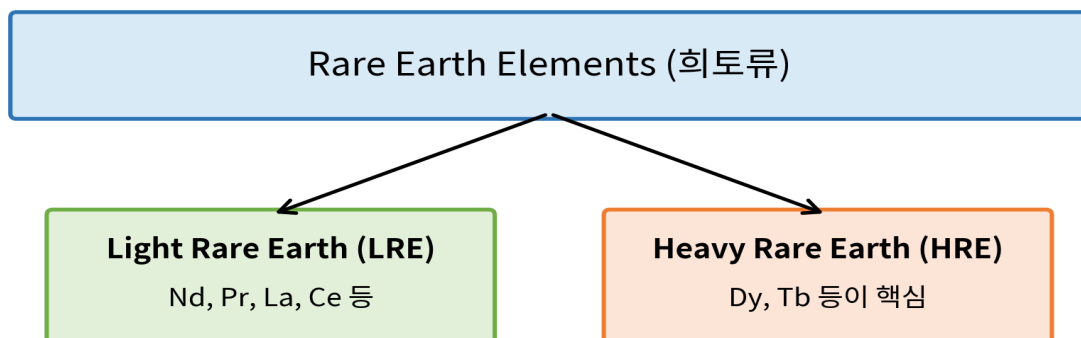


그림 1. HRE와 LRE의 개념적 구분

1. HRE Magnet의 뜻

HRE는 Heavy Rare Earth, 즉 중희토류를 뜻한다. 전동기용 NdFeB에서 실무적으로 가장 중요한 HRE는 Dy와 Tb이다. 이 원소들은 $Nd_2Fe_{14}B$ 결정의 Nd 일부를 치환하거나 결정립 표면에 농축되어 자기결정 이방성장을 높이고, 결과적으로 고온 보자력과 감자 내력을 향상시킨다.

따라서 'HRE Magnet'은 보통 Dy/Tb가 들어간 고보자력 NdFeB를 의미하고, 'HRE - Free Magnet'은 Dy/Tb 없이 필요한 고온 성능을 확보한 자석을 의미한다. 고객사마다 HRE - Free를 0 wt%, 검출한계 이하, 특정 원소 금지 등으로 정의할 수 있으므로 사양서에서 정량 기준을 확인해야 한다.

용어	정의	설계 의미
NdFeB	$Nd_2Fe_{14}B$ 기반 영구자석	고출력 · 고효율 · 소형화에 유리
HRE - added	Dy/Tb 등이 포함된 NdFeB	고온 감자 margin 확보 용이
HRE - reduced	HRE 사용량을 줄인 자석	GBD가 대표 수단
HRE - Free	Dy/Tb 등 HRE를 사용하지 않음	미세조직과 Motor System 최적화 필요
Rare - Earth - Free	Nd까지 포함해 희토류를 사용하지 않음	HRE - Free보다 훨씬 넓은 목표

1.1 왜 HRE를 넣어 왔는가?

NdFeB는 온도가 올라가면 보자력이 크게 감소한다. 자동차 구동모터는 고부하, 냉각 악화, Peak Current, 고속 Field Weakening에서 높은 온도와 강한 역자계를 동시에 경험한다. Dy/Tb를 사용하면 높은 자기결정 이방성장을 이용해 이러한 고온 감자에 대한 내력을 크게 높일 수 있다.

반면 HRE는 희소하고 공급원이 편중되어 있으며 가격 변동성이 크다. 일본 NEDO는 이를 공급 리스크가 높은 핵심 소재로 보고 HRE를 사용하지 않는 고성능 자석과 그 자석에 적합한 모터를 국가 R&D; 대상으로 지속적으로 추진해 왔다.

2. 기존 Nd Magnet과 HRE - Free Magnet의 차이

기존 HRE 첨가형 vs HRE-Free

기존 HRE 첨가형	HRE-Free
NdFeB + Dy/Tb	Dy/Tb 없음
고온 Hcj ↑	미세조직/입계 제어
감자 Margin 확보 용이	Rotor·냉각·제어 통합
Br 저하·HRE 리스크	공급망 리스크 ↓

그림 2. 기존 HRE 첨가형과 HRE - Free의 설계 철학

항목	기존 HRE - added NdFeB	HRE - Free NdFeB
주요 희토류	Nd/Pr + Dy/Tb	주로 Nd/Pr, Dy/Tb 없음
고온 Hcj	Dy/Tb로 직접 확보	결정립 미세화 · 입계 제어 · 열간변형 등
Br	Dy 치환 증가 시 분리할 수 있음	HRE 제거로 잠재적 이점, 공정 의존
감자 Margin	상대적으로 확보 용이	Rotor/전류각/냉각 동시 검토
공급망	Dy/Tb 리스크 노출	HRE 리스크 감소
설계 철학	재료 자체로 margin 확보	자석 + Motor System으로 확보

2.1 일본의 개발 배경

Honda와 Daido Steel은 2016년 HRE를 전혀 포함하지 않는 hot - deformed NdFeB를 하이브리드 구동모터에 실용화했다고 발표했다. 중요한 점은 자석만 바꾼 것이 아니라 자석 형상과 Rotor 형상을 함께 변경하여 자속 흐름을 최적화하고 기존 HRE 자석 모터와 동등한 토크 · 출력 · 내열 성능을 목표로 했다는 것이다.

Toyota는 2018년 Dy/Tb를 사용하지 않으면서 Nd 사용량까지 줄인 내열 자석을 발표했다. NEDO는 2014~2021년 고효율 모터용 자성재료 개발을 추진했고, 2024~2029년에는 경제안보 중요기술 프로그램에서 HRE - Free/Rare - Earth - Free 자석과 차세대 자석에 맞춘 모터 설계를 함께 개발하고 있다.

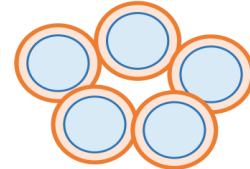
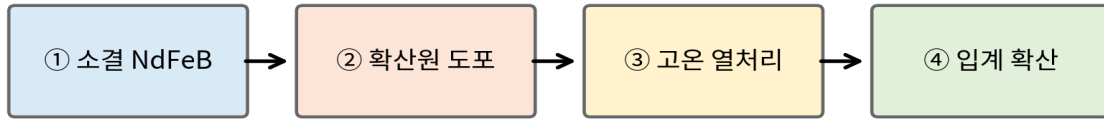
2.2 기술 진화

단계	핵심	의미
벌크 HRE 첨가	Dy/Tb를 전체 조성에 첨가	성능은 좋지만 HRE 사용량 큼
GBD	Dy/Tb를 결정립 표면에 집중	적은 HRE로 Hcj 향상
HRE - Free 미세조직	grain refinement / boundary isolation	HRE 자체 없이 coercivity 확보
System Co - design	Magnet+Rotor+Cooling+Control	재료 한계를 시스템으로 보완

단계	핵심	의미
Nd - reduced / RE - free	Nd 저감 또는 희토류 제거	장기 자원 리스크 최소화

3. 결정립계 확산(GBD) 공정이란

결정립계 확산(GBD) 공정



HRE-rich shell → 역자구 발생 억제 → Hcj 상승

그림 3. GBD의 대표 공정 흐름

GBD(Grain Boundary Diffusion)는 완성된 소결 NdFeB 자석 표면에 확산원을 도포한 뒤 열처리하여 원소가 주로 결정립계를 따라 내부로 이동하도록 하는 후처리 공정이다. 대표적인 HRE - GBD에서는 Dy/Tb 금속, 합금, 산화물 또는 불화물 계열 원료가 사용된다. 문헌에서는 약 800~1000°C의 확산 열처리와 후속 annealing이 흔히 보고되지만 실제 조건은 자석 조성 · 두께 · 확산원에 따라 달라진다.

3.1 왜 결정립계를 이용하는가?

소결 NdFeB는 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 결정립과 그 사이의 Nd-rich grain-boundary phase로 구성된다. 역자구는 결정립 표면 결함이나 낮은 이방성 영역에서 시작되기 쉽다. 따라서 Dy/Tb를 결정 전체에 균일하게 넣기보다 역자구가 시작되기 쉬운 결정립 표면에 집중시키면 자원 사용량 대비 coercivity 향상 효과가 커진다.

Dy/Tb가 입계를 따라 이동한 뒤 결정립 표면에서 Nd를 일부 치환하면 HRE-rich shell이 형성된다. 이 shell은 높은 anisotropy field를 가지므로 reverse-domain nucleation을 억제한다. HRE가 core까지 많이 들어가지 않기 때문에 벌크 첨가보다 Br 손실을 억제하면서 Hcj를 높이기 유리하다.

3.2 GBD의 장점과 한계

구분	내용
장점	HRE를 결정립 표면에 선택적으로 사용 → Hcj/HRE 사용량 효율이 높음
장점	벌크 Dy 첨가 대비 core의 높은 자화를 더 많이 유지 가능
장점	소결 후 후처리로 적용 가능하여 산업화가 진행됨
한계	확산 깊이가 제한되어 두꺼운 자석의 중앙부까지 동일 효과를 주기 어려움
한계	열처리와 농도구배가 기계 · 부식 · 전기 특성에 영향을 줄 수 있음
주의	Dy/Tb - GBD는 HRE '저감'이지 HRE-Free가 아님

4. 적층 Magnet의 적용 현실성

적층 Magnet은 하나의 기술명이 아니라 목적에 따라 구분해야 한다. ① 자석을 전기적으로 분할해 와전류를 줄이는 segmentation, ② GBD의 확산거리 한계를 극복하기 위한 얇은 segment 적층, ③ 서로 다른 Hcj/Br grade를 위치별로 조합하는 graded/stacked 구조가 대표적이다.

두꺼운 자석의 GBD 한계와 얇은 Segment 적층

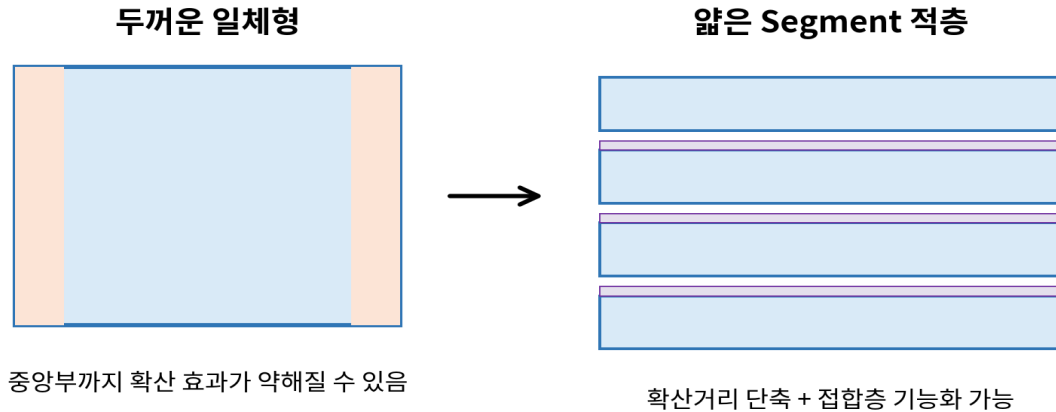


그림 4. 두꺼운 자석의 GBD 한계와 얇은 segment 적층 개념

4.1 와전류 저감용 Segmentation

고속 모터에서는 슬롯 및 인버터 고조파로 자석 내부에 와전류가 발생한다. 자석을 절연된 여러 segment로 나누면 와전류 경로가 짧아져 손실과 발열을 줄일 수 있다. 이 구조는 기술적 현실성이 높다. 다만 절연/접착층으로 인한 유효 자석 체적 감소, 접착 신뢰성, 조립 공정 증가를 고려해야 한다.

4.2 GBD 확산거리 단축용 적층

GBD는 표면에서 시작하므로 두꺼운 자석에서는 중심부까지 충분한 확산 효과를 얻기 어렵다. 얇은 segment 각각에 확산 처리를 하고 다시 적층하면 최대 확산거리를 줄일 수 있다. 2026년 Scripta Materialia에는 GBD와 segmentation을 결합하여 10 μm 미만의 저융점 Tb - Pr - Al - Cu - Ga 합금층이 segment binder와 diffusion source를 동시에 수행하는 생산 route가 보고되었다. 이 연구는 기존 GBD가 통상 약 4 mm 수준의 얇은 자석에 제약되는 문제를 출발점으로 삼았다.

4.3 서로 다른 Grade의 적층

Rotor bridge나 magnet edge처럼 역자계가 큰 위치에만 높은 Hcj grade를 사용하고 나머지는 높은 Br 또는 저원가 grade를 쓰는 방식은 자원 효율 측면에서 매력적이다. 하지만 자석 조각 수 증가에 따른 극성·착자 방향 관리, Grade별 위치 관리, 접착 공정, 치수 누적공차, Rotor Balancing, NVH 및 자동화 공정 복잡도와 Takt Time 증가 등의 양산 이슈를 고려해야 한다.

4.4 자동차 구동모터 관점 현실성 평가

평가	전기적 Segmentation	GBD용 얇은 적층	서로 다른 Grade 적층
성속도	높음	연구/산업화 확장 단계	설계별 편차 큼
주 목적	와전류 · 온도 저감	확산거리 한계 극복	Hcj/Br/원가 최적화
HRE 절감	간접적	직접적	직접적 가능
공정 난이도	중	중~높음	높음
접합 신뢰성	필수	핵심 이슈	핵심 이슈
권장	양산 적용성 높음	PoC 가치 높음	CAE+시제품 후 판단

4.5 핵심 Failure Mode

Failure mode	원인	검증
층간 박리	접착제 열화 · 열팽창 차이 · 원심력	고온 회전 내구 + thermal cycling
자속 저하	비자성 접합층/공극	3D Maxwell, Back - EMF
국부 발열	와전류/절연 불량	Magnet loss + thermal
치수 누적	segment · 접착층 편차	stack tolerance / air - gap
Rotor 불평형	질량 · 위치 편차	dynamic balancing
감자 편차	GBD depth/grade 편차	Demag map + post - demag EMF/Torque

4.6 적용 판단

적층 Magnet의 기술적 가능성은 충분하지만, 자동차 구동모터에서는 '자석 성능이 좋아지는가'보다 접합된 Rotor가 최고속도와 최고온도에서 수명 동안 유지되는가가 더 중요한 Gate가 된다. 따라서 전자기 해석만으로 적용 결정을 내리기 어렵고, 회전 구조해석 · 접착 내열 · 열사이클 · overspeed 시험을 동시에 설계해야 한다.

5. 권장 검증 절차

단계	검증	Output
1 Material	온도별 Br, Hcj, B - H/J - H curve	재료 DB
2 Concept	HRE - free / GBD / segmented / stacked 비교	후보안
3 EM CAE	Rated, Peak, Max - Id, Max speed, Fault	Torque/EMF/Demag
4 Thermal	Magnet Tmax · 냉각 민감도	온도 margin
5 Mechanical	접합층 · bridge · 원심력	Safety factor
6 Post - demag	Worst case 후 정상조건 재해석	비가역 Flux/EMF/Torque loss
7 Prototype	고온 감자 · 효율 · NVH · 회전내구	CAE correlation
8 Production	공정능력 · 접합품질 · 원가	양산성 판정

5.1 Maxwell에서 특히 볼 조건

HRE - Free는 고온 Hcj margin이 중요하므로 Tmax + Peak Current와 Tmax + Maximum negative Id를 별도 worst case로 잡는 것이 좋다. 평균 자속밀도보다 magnet edge/corner의 국부 operating point와 Demag_Coef를 확인하고, worst case 이후 정상 운전점에서 Back - EMF와 Torque의 비가역 손실을 비교해야 한다.

5.2 고객사 확인 필요 정보

No.	정보	이유
1	HRE - Free 정의(0 wt%, ppm limit)	합격 기준
2	Magnet grade/공급사	물성 기준
3	온도별 B - H/J - H curve	감자 해석
4	Magnet Tmax	Worst temperature
5	Peak current / Max - Id	최대 역자계
6	Max speed / FW 조건	고속 운전점
7	허용 irreversible flux loss	최종 OK/NG
8	접착/적층 구조 허용 여부	Stacked concept 가능성

6. 종합 결론

- 1) HRE - Free는 Rare - Earth - Free가 아니다. 전동기용 NdFeB에서는 Dy/Tb를 없애는 것이 핵심이며 Nd/Pr은 남을 수 있다.
- 2) 기존 고내열 NdFeB는 HRE로 고온 Hcj를 확보하지만, HRE - Free는 미세조직과 모터 시스템으로 감자 margin을 확보한다. 동일 Rotor에 자석만 교체하는 방식은 충분하지 않을 수 있다.
- 3) GBD는 HRE를 필요한 결정립 표면에만 배치하는 핵심 HRE 저감 기술이다. Dy/Tb - GBD는 엄밀히 HRE - Free는 아니지만 grain - boundary engineering의 산업적 기반을 만들었다.
- 4) 적층 Magnet은 현실성이 있다. 와전류 저감 segmentation은 이미 현실성이 높고, GBD 확산거리 단축용 적층은 최근 연구에서 구체적인 생산 route가 제시되고 있다. 서로 다른 grade 적층은 매력적이지만 양산 공정과 회전 신뢰성 검증 부담이 크다.
- 5) 최종 판정 단위는 자석이 아니라 Motor System이어야 한다. Magnet Tmax, Peak Current, - Id, Rotor geometry, cooling, post - demag Torque/EMF를 함께 평가해야 한다.

실무 제안: HRE - Free 후보와 기존 HRE Magnet을 동일 Rotor에서 비교한 뒤, HRE - Free 전용 Rotor 최적화안을 별도로 만들어 비교하십시오. 그러면 '재료 자체의 차이'와 'System Co - design으로 회복 가능한 성능'을 분리해서 판단할 수 있습니다.

7. 주요 참고자료

- 1) Honda / Daido Steel, “ Adopt World's First Hybrid Vehicle Motor Magnet Free of Heavy Rare Earth Elements, ” 12 Jul. 2016.
- 2) Toyota Motor Corporation, “ Toyota Develops New Magnet for Electric Motors Aiming to Reduce Use of Critical Rare - Earth Element by up to 50%, ” 20 Feb. 2018.
- 3) NEDO, “ Development of Magnetic Materials for High - Efficiency Motors, ” FY2014 – FY2021.
- 4) NEDO, K Program: HRE - Free / Rare - Earth - Free Magnet and next - generation motor design, 2024 – 2029.
- 5) Liu, Z. et al., Materials & Design 209 (2021) 110004, review of grain boundary diffusion.
- 6) Journal of Magnetism and Magnetic Materials 514 (2020) 167227, recent progress of GBD in NdFeB.
- 7) “ Most frequently asked questions about the coercivity of Nd - Fe - B permanent magnets, ” 2021.
- 8) Chen, S. et al., Journal of Alloys and Compounds 1050 (2026) 185724, progress on grain - boundary - diffused NdFeB.
- 9) Durgun, A. et al., Scripta Materialia 275 (2026) 117164, combining GBD and segmentation.

※ 본 보고서의 그림은 이해를 돕기 위해 새로 구성한 개념도이며 특정 제조사의 실제 미세조직 또는 공정 도면을 복제한 것이 아닙니다.