재활용 산화철 및 알루미늄 분말을 활용한 철도레일 이음용 테르밋 분말 개발

최 상 규* · 박 성 상** · 백 응 루**,*†

*현대비앤지스틸(주)

**영남대학교 공과대학 신소재공학부

Development of Thermite Powder for Rail Joining with Recycled Iron Oxide and Aluminium Powder

Sang-kyu Choi*, Sung-sang Park** and Eung-Ryul Baek**,*†

*HYUNDAI BNG STEEL, Changwon 642-370, Korea

**School of Materials Science and Engineering, Yeungnam Univ, Gyeongbuk 712-749, Korea

†Corresponding author : erbeak@ynu.ac.kr

(Received August 6, 2012 ; Revised August 13, 2012, ; Accepted October 31, 2012)

Abstract

Nowadays in Republic of Korea, whole amount of the thermite welding powder for rail joining is dependent on import. However the demand of the thermite welding powder would be enlarge because some constructing high-speed train and city metro projects are currently in progress. In addition this is the main reason why we should develop the thermite welding powder, domestically. This study is focused on utilizing the recyclable materials like Al powders from cans and iron oxide scales from wire rods as the main components of the thermite welding powder. By minimizing Al content in weld zone by controlling the mixing ratio of the Al powder in the thermite welding powder, the excessive dissolution of the Si and Mn components came from the Al powders could be controled. The tensile strength of welding zone in welded rail was 740 MPa, with that the developed thermite welding powder.

Key Words : Thermite, Thermite powder, Rail welding, Recyclable aluminium

1. 서 론

철도 레일은 열차바퀴가 탈선하지 않도록 안내 하면서 열차 무게를 침목과 도상에 고르게 분포 시키는 한편, 전기 신호를 열차에 전달하는 통신기능도 수행하는 등 철도의 가장 핵심적인 부분중의 하나라고 할 수 있다. 레일의 길이는 운행 안전, 승차감, 유지보수 비용 등을 감안하면 길면 길수록 좋으나, 제작·운반·시공 및 온도에 따른 길이 변화 등을 고려하여 보통 25m 길이를 기준으로 가장 많이 상용되고 있다¹⁻³⁾. 현재 국내에서는 이송 가능한 길이까지는 플래쉬 버트 용접으로 일차적으로 레일을 접합시키며 그 이상의 이음 부는 현

장에서 테르밋 공정으로 접합시키고 있다⁴⁾. 이때 사용되는 테르밋 분말은 전량 수입에 의존하고 있으며 연간 사용량은 250Ton (30억 원) 정도로 추산되고 있어 국산화 개발의 필요성이 매우 높다. 현재 레일 연결용 테르밋 분말을 생산하는 나라는 독일, 프랑스 등 세계적으로 많지 않으나 이들 대부분의 국가는 제조기술에 대한 노하우의 수출을 규제하고 있으며, 기술도입 시에도 막대한 로열티를 지불해야 하므로 국내의 철도를 부설하는 시공사의 영세한 규모로는 기술의 도입이 현실적으로 어려운 실정이다. 현재 국내의 고속전철 및 대도시의 지하철 건설이 활발히 추진되고 있어 철도레일 이음용 테르밋 분말의 수요가 급증할 것으로 예상되므로 이에 대한 국산화 대체가 시급히 요청되고 있다.

테르밋용접은 산화철이 Al과의 반응에 의해 환원되면 발열반응이 순간적으로 일어나 용융상태가 되어 레일과의 접합이 이루어지는 용접법이다. 화학반응은 다음 식에 따라 진행된다^{5,6)}.

본 논문에서는 용접심선(SWRY-11) 제조 시 부산물로 발생되는 선재 산화스케일과 폐 알루미늄 캔으로부터 제조된 Al 분말 등을 사용하여 테르밋 분말로의 적용가능성을 검토하였다. 또한 상용화 가능성을 평가하기 위해서 상용 레일의 테르밋 용접에 적용하였으며, 이때 비교재료는 외국 R사 테르밋 분말 제품을 동일한 조건에서 테르밋 용접 후 용접부의 미세조직 및 물성 등을 함께 비교 평가 하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 테르밋 분말 구성재료는 용접심선(SWRY-11) 제조 시 부산물로 발생되는 선재 산화스케일과 폐 알루미늄캔으로부터 제조된 Al 분말(표 1 참조), 그리고 폐로망간 분말(표 2 참조)을 사용하였다. 테르밋 반응실험은 그림 1에 나타난 바와 같이 30×100×155(mm³) 크기의 CO₂ 경화 사형 몰드 내에서 실시하였다. 테르밋 반응에 사용된 테르밋 분말의 구성비는 표 3과 같으며, Al 분말의 비를 달리한 3종의 테르밋 분말을 제조하였다.

3종의 테르밋 분말을 각각 사형 몰드 내에서 테르밋 반응을 실시하였다. 이때 반응에 의해 생성된 슬라그와 용융금속 중에서 슬라그는 제거하고 남은 용융금속이 응고된 금속 부분을 채취하여 스펙트로미터기를 사용하여 화학성분을 분석하였으며, 로크웰 경도기를 이용한 경도 측정 그리고 광학현미경 및 주사전자현미경을 이

Table 1 Chemical compositions of recycled Al powder(Wt.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.18	0.35	0.17	0.77	2.12	0.04	0.11	Bal.

Table 2 Chemical compositions of ferro Mn powder(Wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Fe
6.10	0.36	75.73	0.16	0.003	Bal.

Table 3 The composition ratio of iron oxide, Al and high carbon Fe-Mn in thermite powders.(Wt.%)

	Iron Oxide Powder + High Carbon Ferro-Mn Powder	Recycled Aluminium Powder
TW1	81	19
TW2	82	18
TW3	83	17

Fig. 1 Mold modeling for thermite reaction

용하여 미세조직을 관찰하였다.

실험실에서 개발된 테르밋 분말을 상용화 가능성 평가를 위해서 그간 레일을 전문으로 10년 이상 시행해 온 S사의 용접팀과 함께 60kg/m급 상용레일 테르밋 용접 접합에 적용시험하였다. 이때 60kg/m급 상용레일의 테르밋 용접 접합 적용시험에는 성능 비교를 위해서 외국 R사 테르밋 분말 제품 또한 사용하였으며, 동일한 상용 몰드와 작업방법으로 테르밋 용접을 실시한 후 용접부의 성분분석, 경도시험 및 인장시험, 그리고 미세조직 및 퍼일라이트상의 콜로니 크기를 측정하여 비교하였다.

3. 실험결과

3.1 테르밋 반응에 의한 금속 생성물의 평가

표 4는 3종의 테르밋 분말(표 3 참조)을 사용하여 테르밋 반응에 의해 생성된 금속 생성물의 화학성분을 분석한 결과이다. 표 4로부터 TW1에서부터 TW3로 갈 수록 C 성분은 0.74~0.75 범위로 일정하나 Al, Si, Mn 성분들의 함유량은 지속적으로 감소하고 있음을 알 수 있었다.

표 5는 용강 중에서 Al, Si, Mn 원소가 O와의 상호작용계수값을 나타낸 것이다⁷⁾. 각 원소들의 산소와의 친화력은 상호작용계수값의 음의 값이 클수록 세기 때문에 각 원소들의 산화력(산소와의 친화력)은 상호작용

Table 4 Chemical compositions of the metal products(TW1~TW3) from the thermite reaction with different ratio of iron oxide, Al and high carbon Fe-Mn in thermite powders and the Korea Standard of head hardened rail material(KS R9110)(Wt.%)

구분	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Fe
KS R9110	0.72-0.82	0.1-0.55	0.7-1.1	0.03	0.02	0.2	-	Bal.
TW1	0.74	1.19	1.99	0.04	0.006	0.04	0.22	Bal.
TW2	0.75	0.48	1.0	0.04	0.006	0.03	0.17	Bal.
TW3	0.75	0.08	0.35	0.04	0.006	0.02	0.07	Bal.

Table 5 Interaction factor of each elements between Oxide, during Fe reduction process

원소	Al	Si	Mn
eoi	-1.1	-0.14	0

계수값을 비교해 봄으로서 Al>Si>Mn 순서임을 알 수 있다.

실험에 사용된 테르밋 분말 중에서 산소 친화력이 가장 높은 원소인 Al이 테르밋 반응 중에 우선적으로 가장 활발하게, 그리고 그 다음으로 Si, Mn 순으로 산화철의 산소와 반응하여 산화물(Al_2O_3 , SiO_2 , MnO_2)를 형성하여 슬래그로 배출된다. 이때 산화철에 존재하는 산소와의 반응에 참여하지 않은 잉여 Al이 존재한다면 이는 최종 금속 생성물 내에 고용되어질 수 있으며, 이러한 거동은 산소 친화력이 Al 보다는 작으나 Fe 보다는 큰 Si와 Mn 역시 동일하게 적용될 수 있다.

실험에 사용된 테르밋 분말 중에서 TW3의 경우는 TW1에 비해서 Al 분말의 구성비가 17wt.%로 가장 낮았다. TW3 테르밋 분말로 부터 테르밋 반응에 의해 생성된 금속 생성물의 성분 중 Al의 함유량은 0.06wt.%, Si의 함유량은 0.08%로서 매우 낮은 수치를 보였다. 이는 테르밋 분말 구성 원소 중의 하나인 Al 분말 중의 Al 성분은 거의 대부분이 산화철의 산소 성분과 반응하여 슬래그로 제거되었음을 의미한다. 또한 Al 성분이 산소와의 반응으로 거의 대부분이 소진된 상황에서는 Al 분말 중에 불순물 성분으로 존재하던 Si 성분 또한 산소와의 반응에 대부분 참여할 수 있게 되어 산화물로 제거됨에 따라 용융 금속(Fe) 속으로 고용된 양은 0.08wt.%로 매우 낮은 수치를 보인 것으로 판단된다. 그리고 Mn 성분은 Si 성분 보다는 산소와의 친화력이 낮기 때문에 일부는 산소와의 반응으로 제거되었지만 Al과 Si 성분 보다는 많은 양이 산소와 반응에 참여하지 못하고 용융금속(Fe)에 고용(0.35wt.%Mn)되었다.

한편 실험에 사용된 테르밋 분말 중에서 Al 분말 구성비가 19wt.%로 가장 높은 TW1의 경우에는 테르밋

반응으로 생성된 금속 생성물의 성분 중 Al의 함유량은 0.22wt.%, Si는 1.19wt.%, Mn은 1.99wt.%로 나타났다. 금속 생성물 중에 Al 성분이 0.22wt.%로 잔존한다는 것은 테르밋 반응 중에 산화철의 산소 성분을 전부 제거한 후 남은 잉여 Al 성분이 용융 금속(Fe) 속으로 고용되었음을 의미한다. 테르밋 반응 중에 미반응 Al 성분이 존재할 때는 미반응 Al 성분이 거의 존재하지 않았던 TW3 상황 때와는 달리, Al성분 보다 산소와의 반응성이 열악한 Si와 Mn 성분 원소들이 산소와의 반응에 참여하기가 어려워지고 이는 반응에 참여 못한 보다 많은 양의 Si와 Mn 성분이 용융금속 중으로 고용될 수 밖에 없다. 그 결과 산소와의 반응성이 제일 열악한 Mn 성분이 1.99wt.%로 제일 많은 양이, 그 다음으로 Si 성분이 1.19wt.%로 용융금속으로 고용되었다.

그리고 표 4에서 TW2의 화학조성이 철도레일 화학 조성 규격(KS R 9110⁸⁾)에 가장 근접하는 수치를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

그림 2는 TW1~3 시편을 광학현미경으로 살펴 본 미세조직을 보여 주고 있다. 모든 조직은 통상 상용 테르밋 용접접합부 조직에서 나타나는 퍼얼라이트 상으로 구성되었으며(그림 3 참조), 퍼얼라이트상의 콜로니 크기는 68~72 μm 범위의 값을 가졌다.

그림 4는 구성비가 다른 3종의 테르밋 분말로부터 테르밋 반응을 통해 생성된 3종의 금속 생성물(시편)의 경도값을 나타낸 것이다. TW1에서부터 TW3으로 갈수록 경도값이 Hv 340에서 Hv 260까지 지속적으로 감소하였다. K.Han 등의 연구결과에 의하면 0.76~0.95wt.% 탄소강에서 Si 성분이 0.1wt.%에서 1.2wt.%로 증가함에 퍼얼라이트상의 경도값은 Hv 20~60로 증가하였으며 이는 퍼얼라이트상을 구성하는 상 중의 하나인 페라이트상에 Si이 고용되어 고용강화를 일으켰기 때문으로 설명하고 있다^{9,10)}. 본 실험에 사용된 TW1과 TW3의 경우 Si 함유량이 0.08wt.%와 1.19wt.%Si로 K.Han¹⁰⁾등의 사용 시편체의 Si함유량 변화값과 유사하나 경도값의 차이가 Hv 70으로 다소 높게 나타난

Fig. 2 Optical microstructure of the metal products (TW1~3) from the thermite reaction

Fig. 3 SEM micrograph the metal rodent(TW2) from the thermite reaction

것은 TW1의 경우 Si 원소 이외에 Mn(1.99wt.%)과 Al(0.22wt.%) 성분이 추가적으로 고용되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 테르밋 분말의 상용 레일 적용 시험

TW2 기준의 테르밋 분말과 비교재료는 외국 R사 상용 테르밋 분말을 동일한 테르밋 용접조건하에서

Fig. 4 The hardness of the metal products (TW1~TW3) from the thermite reaction with different ratio of iron oxide, Al and high carbon Fe-Mn in thermite powders

상용 철도레일재(Head hardened rail, KS R9110)에 적용한 후 용접부의 단면사진(그림 5 참조), 미세조직(그림 6 참조), 그리고 인장강도값(그림 7 참조)을 함께 비교 평가 하였다.

그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 TW2재 및 R재 모두 테르밋 용접부는 기공이 없는 건전한 용접 단면조직을 나타내었다. 그리고 그림 6으로부터 미세기공 또한 존재하지 않는 퍼얼라이트상으로 구성되었으며, 퍼얼라이트상의 콜로니 크기는 TW2재의 경우 130µm, R재는 134µm로 비슷한 크기임을 알 수 있었다. 앞 절에서 TW1~3재의 실험실 시편(30x30x100)의 경우는 콜로니 크기가 모두 68~72µm 범위인데 반해서, 상용 레일 용접부의 경우에는 130µm로 보다 조대한 콜로니를 가졌다. 이는 상용 레일의 크기가 실험실 시편 크기에 비해서 10배 이상의 크기였기 때문에 테르밋 반응 후 용융금속의 응고 및 냉각 시 냉각 속도가 보다 느리게 진행되었기 때문이다.

그림 7은 TW2 기준의 테르밋 분말과 비교재료는 외국 R사 상용 테르밋 분말을 동일한 테르밋 용접 조건에서 상용 철도레일재(Head hardened rail, KS

Fig. 5 Cross sectional face of the welded zone gained by TW2 and R thermite powder

Fig. 6 Microstructure and colony size of the weld zone, welded by TW 2 thermite powder

Fig. 7 Tensile strength of the thermite welded zone with TW2 and R thermite powder

R9110)에 적용한 후 용접부의 인장강도값을 나타낸 것이다. 인장 시험에 사용된 인장시험편은 용접부가 평형 neck부 중간에 위치하게 하였다. 인장강도값은 TW2재의 경우에는 740MPa, R재의 경우는 750MPa

Fig. 8 Fracture site of TW2 and R after tensile test

로 거의 비슷한 값을 나타내었다. 인장 파단은 TW2재 및 R재를 사용한 인장시험편 모두 공히 테르밋 용접부에서 파단이 발생하였다(그림 8 참조).

TW2재 및 R재로부터 제조된 철도레일 테르밋 용접부의 인장강도값(740~750MPa)은 통상 알려진 상용 철도레일 테르밋 용접부의 인장강도값(695~794MPa)¹¹⁾ 범위 내의 값을 알 수 있었다.

4. 결 론

현재 100% 수입에 의존하고 있는 철도레일 이음용 테르밋 분말의 개발을 위해서 폐산화철 및 재활용 Al 분말을 원료로한 본 연구의 실험 결론은 다음과 같다.

- 1) 폐산화철, 재활용 Al 분말, 그리고 폐로망간의 조합 비율을 조정함으로써 테르밋 용접부의 화학조성을 철도레일의 KS규격 성분에 맞출 수 가 있었다.
- 2) 자체 개발된 테르밋 분말은 상용 철도레일 접합에 적용한 결과 인장특성에서 수입제품과 유사한 특성의 740MPa의 인장강도를 획득할 수 있었다.

후 기

본 연구는 (주)베스트엔지니어링의 연구개발 지원사업으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Hauser, D.,: Welding of Railroad Rails-A Literature and Industry Survey., In Rail Steels-Developments, Processing and Use, ASTM Special Technical Publication 644, edited by D. H. Stone and G. G. Knupp, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA., 1978, 118-144

2. C. P. Lonsdale: Thermite Rail Welding : History, Process, Developments, Current Practices and Outlook for the 21st Century (1999), 3-4
3. J. Dearden, "Continuous welded rails", Br. Welding J., **4** (1968), 158-169
4. Sung-Hoon Na, Sin-Chu Yang: A Study on the Characteristics of Thermit Welded Rai, Collection of learned papers of the 2001 Annual Meeting of Korean Rail Society (2001), 488-489 (in Korean)
5. ASM Handbook Vol. 6, Welding Brazing and Soldering, ASM International, 1997, 835-837
6. H.G.Suk, R. Killing, W.H.Chung and J.U. Park : Recent Application of Rail Joint Welding in Europe - Flash Butt Welding Gains Increasing Importance, International Journal of Korea welding Society, **4-1** (2004), 5-6
7. Steel Technology II- Steel Making Part, RIST, 1992, 120-146, (in Korean)
8. Standard of Korea Industry, Heat Treatment for Rail(KS R 9110), 2007, (in Korean)
9. Ming-hui CAI, Hua Ding, Young-kook LEE, Zheng-you TANG and Jian-su ZHANG : Effect of Si on Mecrostructure Evolution and Mechanical Properties of Hot-rolled Ferrite and Binite Dual-phase Steels. ISIJ International, **51-3** (2011), 476-481
10. K. Han, D.V. Edmonds, and G.D.W. Smith: Optimization of mechanical properties of high-carbon pearlitic steels with Si and V additions, Metallurgical and Materials Transaction A, **Vol. 32 A** (2001), 7-11
11. Yoshihiko Sato : Updated Track Dynamics, Tetsudo Gengyosha, 1997, (in Japanese)