고순도 선철 주물용 신재료의 개발 및 실용화¹⁾

野田 俊 · 谷口 浩平 * · 福田 勝 *

KOBEL STEEL, LTD., *H. FUKUDA CO., LTD.

Development and Utility of High Purity Pig Iron on Foundry Material

Takashi Noda, Kohei Taniguchi*, and Masaru Fukuda*

KOBEL STEEL, LTD., *H. FUKUDA CO., LTD.

번역 : 장시영²⁾**Key words:** Pig iron, High purity pig iron, Foundry material, Foundry pig iron.

1. 서 론

당사는 1960년대의 尼崎제철 합병 이후 주물용 선철의 공급 메이커로서 일본 주물 업계의 발전에 미력하지만 공헌해 왔다. 특히, 고순도 선철인 EP선철은 상품개발부터 실용화에 이르기까지 선철상사인 (株)福田博商店과 함께 진행하여 왔다. 그 성과로서 고순도 선철은 지금 미량원소 함유에 의한 품질약화가 진행되는 강 스크랩에 대응하는 귀중한 철원으로서 일본의 주철주물업계에 폭넓게 침투하고 있다.

본 보고에서는 주물용 신재료로서 개발 실용화된 EP선철에 관하여 과거에 학회 및 회지 등에 보고한 내용을 중심으로 보고한다.

2. EP선철의 개발 경위

Table 1에 1970년대부터 주철주물업계 및 당사 선철의 동향을 정리하였다.

1970년대 후반부터 1990년대 전반에 걸쳐 주물제조에서 원료

Table 1. 일본 주물업계 및 당사 고순도 선철의 동향.

	일본 주물업계	神戸製鋼의 고순도 선철
1970년대 후반	<ul style="list-style-type: none"> 스크랩 배합이 상승, 선철 배합율이 30%를 넘음. 가단주철로부터 구상흑연주철로의 이행이 진행됨. 큐폴라로부터 저주파로 용해로 이행. 	<ul style="list-style-type: none"> 스크랩, 수입선철 대항으로서 저렴한 저Si보통선철(FE선철)을 개발 (新日鐵이 고순도 선철을 개발)
1980년대 전반	<ul style="list-style-type: none"> 규소강판의 고인화가 진행 선철 배합율이 20%이하로 떨어짐 에너지 절약 및 소규모 용해용 고주파 전기로 도입 시작 	<ul style="list-style-type: none"> 내마모 선철용으로서 FV선철을 개발 스크랩의 성분 오염 대책, 고급 주철용으로서 탈P, S의 고순도 선철(SP선철)을 개발
1980년대 후반	<ul style="list-style-type: none"> 표면처리강판의 비율이 상승 전기로의 아연문제가 현재화 자동차용 주철의 생산비율이 50%를 넘음 주철의 박육화, net shape화가 진행 	<ul style="list-style-type: none"> 저C선철의 시험 제작, 모재의 검토, 시험 제작
1990년대 전반	<ul style="list-style-type: none"> 선철 배합율이 15%이하로 떨어짐 모합금 신속 채용해 시스템의 검토가 진행됨 	<ul style="list-style-type: none"> Si첨가한 고순도 선철(EP선철)을 개발 방청 처리 기술을 개발
1990년대 후반	<ul style="list-style-type: none"> 응고해석의 연구와 실용화가 진행 주조재료의 에코머터리얼화의 검토가 진행 	<ul style="list-style-type: none"> EP선철의 용해성 향상 효과의 발표 LCA에 의한 에코머터리얼화 신재료로서의 검증
2000년대 전반	<ul style="list-style-type: none"> 선철 배합율이 10%정도의 추세 스크랩의 Mn 등의 성분 문제가 나타남 중국 등 해외의 주철생산이 대두, 일본으로 수입이 진행 	<ul style="list-style-type: none"> 저P, 저Al의 EP선철 개발 EP선철의 주물품질 효과 발표 ①기계적 특성 효과(인장, 연성, 피로) ②응고수축 캐비티 저감 효과
2000년대 후반	<ul style="list-style-type: none"> 선철 배합율이 10%이하로 떨어짐 코크스를 대체한 목질 바이오매스의 연구가 진행 동결주조법의 실용화가 진행 	<ul style="list-style-type: none"> 고황 EP선철(EPHS)의 개발 EPHS선철 가황 효과의 발표

¹⁾日本鑄造工學會誌 제 82권(2010) 제12호, page 789~793에 게재된 자료임.

²⁾한국항공대학교(Korea Aerospace University) 항공재료공학과 교수.

용해 방법이 쿠파로부터 저주과 유도 전기로를 걸쳐 고주과 유도 전기로로 이행함과 동시에 선철 배합율이 30%로부터 15% 정도까지 감소하고, 그 대신에 저렴한 강 스크랩의 배합율이 상승하였다. 그 사이, 선철 공급 메이커는 순 흑연의 유효성을 실험으로 검증하는 등[1] 선철의 필요성을 PR함과 동시에, 고객 필요에 따른 저가의 저Si선철과 부가 가치를 높이기 위해 바나듐을 첨가한 내마모 주철용 선철을 개발 판매하였다.

제철소의 기존 설비를 이용하여, 산소정련에 의해 순도를 높인 고순도 선철은 1970년대 후반에 개발되어[2], 구상흑연주철용 선철로서 판매가 개시되었다. 당사에서는 1980년대 전반에 탈P, 탈S처리를 한 SP선철을 개발하여 판매를 시작하였으나, 백철화 및 가스에 의한 캐비티 발생 등의 형상불량으로부터 주물 공장에서 사용하기 힘든 문제가 생겼다. 1990년대에 들어가 고순도 선철의 형상개선이 진행되어 당사에서는, 형상 개선에 더하여 용해성이 뛰어나고 또한 배합하기 적합한 성분조성으로 조정된 고순도 선철, 즉 EP선철을 개발하였다. 이 선철은 탈P처리에 의해 Mn, Ti, Cr, V 등의 산화하기 쉬운 미량원소를 제거하고, 첨가 규소량의 조정에 의해 저용점의 공정조성에 맞춘 것이 특징이다. 이러한 특징에 의한 EP선철의 효과에 관해서는 나중에 기술하고, 당사는 고객의 요구에 맞춰 1990년대 전반에 방청처리 선철을, 2000년대 후반에 고허선철을 개발하였다.

방독처리선철은 전기로용해에 있어서 수분에 대한 안전성을 향상하기 위해 빨간 녹의 발생을 억제한 형선철 제조기술을 개발하여 실용화한 선철이다. 형선철 제조과정에 있어서 이형한 형선철을 고온으로 유지함으로써 빨간 녹이 진행하기 어려운 검은 녹을 발생시키는 노하우를 취득하여[3], 神戸製鐵所에 방독처리 설비를 가동시켰고 현재도 필요로 하는 주물공장에 공급하고 있다.

고황선철은 전기로용해법에서 S의 적량 첨가에 있어서 황화철 첨가의 결점인 S수율의 오차를 100%개선할 수 있는 신원료로서 개발되었다[4].

3. 고순도 선철의 동향

고순도 선철의 명확한 정의는 특별히 정해진 것은 아니지만,

Fig. 1. 고순도선철의 일본내 소비 비율.

일반적으로 인 등의 불순물이 많은 고로선철에 산소취련 공정을 가해서 불순물을 저감한 선철을 의미한다. 또한, 일본으로 수입되는 비합금 선철은 통관 통계상 인의 함유량이 전중량의 0.04%이하인지 아닌지로 분류되기 때문에 $P \leq 0.04\%$ 가 고순도 선철이라고 통계상으로 정리되어 있다.

그래서 Fig. 1에 통관 통계상 수입 데이터 및 국내선철의 통계자료를 바탕으로 2007년에 조사한 결과를 나타낸다[5]. 국내에서 유통하는 고순도 선철의 비율은 1997년경 20%정도였으나, 그 후 서서히 상승하여 30%남짓 되었다. 그 후 통계 데이터는 사정상 수집할 수 없지만, 당사의 고순도 선철의 비율은 2006년 이후에도 상승하고 있고, 최근에는 주물용 선철 판매량의 60%를 고순도 선철이 차지하고 있다.

4. EP선철이 주철 소비자에 미치는 영향

보통 선철 또는 강 스크랩으로부터 EP선철로 전환했을 때의 주물 소비자에 미치는 효과를 Fig. 2에 나타낸다.

EP선철의 C 및 Si 수치는 저용점의 공정조성으로 조정하고 있기 때문에 과공정 조성으로 되어 있는 보통 선철과 비교하여 용해시의 녹내리는 온도가 낮아지고, 전력원 단위가 저감되며 용해시간이 단축된다. 또한, 강 스크랩으로부터 고순도 선철로 전환한 경우에 불순물이 감소하고, 흑연 조직과 기지 조직에 좋

Fig. 2. EP선철의 주물 소비자에 미치는 영향.

Table 2. 실험에 사용한 재료성분.

		(mass%)						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti
FC용	고순도선철	3.87	1.77	0.49	0.024	0.003	0.020	0.013
	보통선철	4.17	2.20	0.38	0.091	0.014	0.036	0.060
FCD용	고순도선철	3.94	1.02	0.08	0.017	0.007	0.011	0.007
	보통선철	4.38	1.39	0.27	0.094	0.009	0.035	0.060
강 스크랩		0.12	0.02	0.34	0.015	0.006	0.050	0.020

은 영향을 미친다.

1990년대 후반부터 2000년대 전반에 걸쳐 당사는 실험 등에 의해 Fig. 2에 나타난 것과 같은 효과를 검증하여 왔다. 그 중에서 2001년 학회에서 발표한 내용을 소개한다[6,7].

실험에는 당사의 고순도 선철, 보통선철 및 강재를 재료로서 사용하였다. 그 성분을 Table 2에 나타낸다.

실험수준으로서는 세 가지 예를 설정하여 기계적 특성을 비교하였다. 원료배합은 ①고순도 선철 50%+ 강 스크랩 50%, ②고순도 선철 20%+ 강 스크랩 80%, ③보통선철 50%+ 강 스크랩 50%의 세 종류를 용해하여 주조하였다. 주형은 플랜 모래에 의한 Y형 블록을 사용하여 Y블록의 평행부로부터 상하 2개(상:B, 하:A)의 인장시험편을 채취하여 기계 시험을 하였다. 접종 후 용탕 성분치의 불순물을 흑연화 촉진 원소(Al, Bi, Co, Cu, Ni), 흑연화 방해 원소(Cr, Mo, Ti, V) 및 펄라이트 촉진 원소(Cu, Cr, Ni, As, Mo, V, Sn)로 분류하여 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타낸다. 이 불순물 원소의 합계는 보통선철 50%에서 높은 수치를 나타내었다. 고순도 선철 50%와 강 스크랩

80% 용탕의 불순물량은 거의 같은 수준이었다.

Fig. 5에 회주철의 비교 경도와 성숙도의 관계를 나타낸다. 고순도 선철 50%는 종래 회귀선보다도 성숙도가 높은 위치에 있는 것에 반해 보통선철 50% 및 강 스크랩 80%는 종래 회귀선상에 위치한다. 즉, 고순도 선철을 사용하면 같은 경도라도 인장강도가 커진다.

Fig. 6에 구상흑연주철의 연성을 비교하였다. 고순도 선철 50%의 연성이 A, B모두 가장 좋았다. 어떠한 시료에서도 A에 대해 B의 연성이 떨어지지만, 강 스크랩 80%의 경우 현저하게 감소한다. 또한 고순도 선철과 보통선철에서는 연성의 감소가 큰 차는 없었다.

Fig. 7에 조직에서 펄라이트가 차지하는 면적율과 연성의 관계를 나타낸다. 고순도 선철에서 연성의 우위성은 조직에 펄라이트가 적은 것이 원인으로 추정된다.

5. LCA에 의한 에코머티리얼의 검증[8,9]

당사와 함께 EP선철을 개발한 (株)福田博商店은, C를 함유한 선철은 C를 필요로 하는 주철용 원료로서 사용하고, C를 거의

Fig. 3. FC재의 미량원소량.

Fig. 4. FCD의 미량원소량.

Fig. 5. FC의 강도와 경도의 관계.

Fig. 6. FCD의 연성 비교.

Fig. 7. 펄라이트율과 연성과의 관계.

Fig. 8. 현재 공정.

Fig. 9. 개선 공정.

함유하지 않는 강 스크랩은 철강원료로서 사용하는 것이 이론적으로 적합하다고 생각하여 神鋼Research(株)와 공동으로 LCA라는 수법을 이용하여 그 효과를 검증하고 있다. 그 중에서 EP선철의 다량배합에 의한 제품수율의 개선 효과에 관해서도 정량적으로 산출하고 있다. 아래에 그 내용을 일부 소개한다.

현재의 주철 제조 공정과 개선 공정을 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타낸다. 두 공정의 차이는 주철 제조의 재료 선택에 있다. 현재는 철강업체의 가공공정에서 발생하는 강 스크랩이 주원료이고, 개선 공정은 주원료를 고로에서 생산되는 선철로 공급하며 강 스크랩은 전부 전로와 전기로로 리턴하여, 강으로 재생하는 공정이다. 주철과 강은 같은 업태체로서, 강 스크랩의 리사이클은 제로섬의 계내 순환에 의해 성립된다. 강 스크랩을 주철의 주원료로 하는 것은 리사이클이고, 강 스크랩을 강으로 재생하는 것은 재질적으로 재사용이다. 순환재생의 관점으로 보면 재사용이 훨씬 순환 부하가 적다.

개선 공정에서 주철의 주원료인 선철은, 이런 공정에 견딜 수 있는 특성, 즉 가격 퍼포먼스와 품질력을 갖추어야 하고, 그

Table 3. LCA 에 의한 시스템의 재료 흐름.

(단위: 10³톤/년)

철광석	현재	개선	차
강	117,756.96	113,539.17	△ 4,217.79
주	1,597.98	5,736.49	4,138.51
합계	119,354.94	119,275.65	△ 79.29

(수율 63.7%→75%로 개선했을때△76.19)

석탄	현재	개선	차
강	56,757.12	54,724.21	△ 2,032.91
주	1,407.95	3,236.43	1,828.48
합계	58,165.07	57,960.64	△ 204.43

(" " △274.13)

석회석	현재	개선	차
강	22,275.18	21,477.34	△ 797.84
주	260.12	856.67	596.55
합계	22,535.31	22,334.01	△ 201.29

(" " △208.95)

Activity

강제품 69,613.00

주철제품 4,575.20

CO ₂	현재	개선	차
강	150,874.35	145,808.55	△ 5,065.80
주	7,301.81	11,559.28	4,257.47
합계	158,176.16	157,367.83	△ 808.34

(" " △1,163.39)

목적에 따라 개발한 것이 EP선철이다.

이처럼 어떤 동일계에서 주원료의 전환은, 자원의 생산성, 환경부하, 가격, 품질 등에 많은 영향을 미친다. 그래서, 이 두 개의 공정을 LCA(Life Cycle Assessment)에 의해 자원의 생산성과 환경 부하에 관하여 비교 검토하였다.

LCA라는 것은, 어떤 시스템의 경계를 설정하고, 시스템내의 재료 선택과 공정개선 등의 이노베이션을 도모함으로써 자원의 채집에서 제품의 판매, 나아가 리사이클과 폐기까지의 자원과 에너지 등의 인풋과 그 아웃풋인 제품과 이산화탄소 등의 폐기물과의 물질 수지를 계산하여 정량적으로 어떻게 개선되었는지를 측정하는 수법이다.

Table 3에 LCA에 의한 계산 결과를 보이지만, 철광석 등의 자원은 각각 1년간에 철광석; 79,290톤, 석탄; 204,430톤, 석회석; 201,290톤, CO₂도 808,340톤 감소할 수 있다. 이것은 주철의 주원료를 선철로, 강 스크랩을 강으로 재사용함으로써 이 정도의 자원이 절약 가능하다는 것을 암시한다. 지금부터의 제품 제조는 이처럼 자원의 소비가 적게 드는 생산 공정을 지향해야 하고, 결과로서 이산화탄소도 감소하고, 지구환경에의 부하도 경감할 수 있다.

다음으로, 이런 개선 공정처럼 주원료를 강 스크랩에서 EP선철로 바꾸어 수율 향상을 달성하여 대폭적인 코스트 다운을 달성한 주물공장을 소개한다. 이 공장은 원래 강 스크랩을 주원료로 하고, 강 스크랩의 품질악화에 동반되는 캐비티 등, 돌

발적인 불량률의 발생을 고려하여 배합과 방안 변경 등으로 대처하였지만, 작업성 등도 생각하여 주원료를 EP선철로 바꾸었다. 그 결과 압탕에 캐비티가 없는 것을 발견하여 무압탕 방안으로 개선하였고, 더불어 불량률도 1.5%절감할 수 있었고, 제품 수율은 63.7%에서 75%로 향상하였다. 1회 용해 당 용해 시간도 단축되었고 14%의 생산성 향상이 달성되었다. 그 결과 1개월간의 제품 550t을 생산하기 위해 863t을 용해하던 것이 737t으로 가능하였고 3시간의 시간외 조업을 없앨 수 있었다. 또한, 가탄재, FeSi 등 부자재의 사용 감소 및 전력 소비량의 절감도 가능하였다.

만약 전국의 주물공장이 EP선철의 다량 배합에 의해 10% 가깝게 수율 향상이 달성 가능하다면 Table 3의 난외에 표시한 것처럼 용해에 필요한 석탄(전력포함)의 절감이 더욱 진행되어 이산화탄소도 감소시킬 수 있다.

6. 결 론

EP선철의 이러한 특성은 지금까지 기술한 바와 같이, 주물공장의 경영에 크게 공헌하여 왔고, 절대적으로 신뢰를 얻고 있다. 따라서, 가까운 장래에 EP선철을 주원료로 하는 주철 제조의 합리화, 자동화, 나아가서 무인화에도 그 가능성을 추구하여 나아가고 싶다.

참고문헌

- [1] 千田昭夫, 目黒勝, 高橋宥夫, 瀬谷修 : 製鐵研究 298, 1 (1979)
- [2] 三村滋, 佐藤孝, 佐藤兼弘, 小林啓三, 高橋宥夫, 古橋久司 : 製鐵研究 298, 13 (1979)
- [3] 笹原茂樹, 石脇史郎, 谷口浩平 : 日本鑄造工學會 第124回 全國講演大會 講演概要集 (1994) 16
- [4] 野田俊, 藤原宏司, 越中俊雄, 牛込智章 : 日本鑄造工學會 第147回 全國講演大會 講演概要集 (2005) 57
- [5] 野田俊 : 鑄造工學 79 (2007) 430
- [6] 野田俊, 森岡耕一, 木口昭二 : 日本鑄造工學會 第138回 全國講演大會 講演概要集 (2001) 14
- [7] 野田俊, 森岡耕一, 木口昭二 : 日本鑄造工學會 第139回 全國講演大會 講演概要集 (2001) 16
- [8] 福田勝 : 鑄物の 花見酒 日本鑄物工業新聞社
- [9] 谷口浩平, 福島章 : 日本鑄造工學會 第136回 全國講演大會 講演概要集 (2000) 35