

철강의 재활용과 합금설계



최 병 학

(강릉대학교 재료공학과)

- '80 - '84 서울대학교 금속공학과(학사)
- '84 - '86 서울대학교 금속공학과(석사)
- '86 - '90 서울대학교 금속공학과(박사)
- '90 - '95 한국기계연구원 재료기술연구부 선임연구원
- '95 - 현재 강릉대학교 재료공학과 조교수



최 재 호

(강릉대학교 재료공학과)

- '80 - '84 서울대학교 금속공학과(학사)
- '84 - '86 서울대학교 금속공학과(석사)
- '87 - '91 독일 Karlsruhe 대학교 재료공학과(박사)
- '92 - 현재 강릉대학교 재료공학과 조교수



김 성 준

(KIMM 재료기술연구부)

- '76 - '80 서울대학교 금속공학과(학사)
- '80 - '82 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- '85 - '90 미국 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 금속공학과(박사)
- '94 - '95 일본금속재료기술연구소 STA Fellow
- '82 - 현재 한국기계연구원 재료기술연구부 선임연구원

1. 철강 재활용의 개요 및 필요성

철강이 근대 인류 문명의 발전에 가장 큰 영향을 끼친 재료중의 하나로 널리 인식되고 있음은 주지하는 바와 같다. 1톤의 철강을 생산하기 위해서는 1150톤의 철광석과 0.5톤의 석탄 그리고 20kg의 석회석이 소모된다. 연간 2억톤 이상의 조강을 생산하는 미국과 1억톤 이상을 생산하는 일본 그리고 4천만톤의 조강을 생산하는 우리나라의 제강분야만 고려하더라도 여기에 투입되는 지구 자원의 소모량은 상상을 초월할 정도로 많다. 이와같이 철강은 단일재료로서는 가장 많이 사용되고 있는 재료로서 이에 따른 자원의 소모와 폐기물의 발생 등, 지구환경을 황폐화시키는 주된 요인으로도 작용하고 있다.

따라서 이미 사용되고 폐기되는 고철(Scrap)을 재활용하는 것은 자원과 환경을 보호하는 가장 큰 효과를 발휘할 수 있는데, 1톤의 고철을 완전 재생 활용할 경우 1150톤의 철광석, 0.5톤의 석탄 및 20kg의 석회석을 절약하는 상당한 효과를 나타낼 것이다. 이에 따라 대부분의 나라들이 고철의 적극적인 재이용을 모색하여 환경 부담을 줄이고 경제적으로도 이익을 얻을 수 있는 방안을 국가정책으로 추진하고 있다. 자동차와 건축, 기계 및 부품으로부터 주로 얻어지는 고철은 자원 회수 측면에서 회수율과 고철 수급율이 조사되어 철강 수급이 조절된다. 이중에서 자동차에 쓰이는 철강은 거의 100%에 달하는 회수율(미국 : 96.5%)을 보여 고철수급상 가장 확실한 물량을 갖는다. 연간 800만대가 폐차되는 미국에서는 1천 3백만톤의 고철이 폐차로부터 얻어지고 있으며,

2000년도에 100만대의 폐차가 예상되는 우리나라에 있어서도 폐차의 고철발생은 전체 고철량중 중요한 부분을 차지한다. 독일에서는 국책연구로 고철과 플라스틱류를 분류하는 기술개발이나 자동차 모터에서 구리와 철강을 쉽게 분리할 수 있는 새로운 모터개발에 착수하였으며 이를 통해서 폐차중 양질의 고철을 선별하기 위한 연구를 진행중이기도 하다.

고철의 폭넓은 활용을 위해서는 분류와 분급체계를 확립하여 고철의 전기로 제강시 불순물 유입을 최소화하고 제강품 등급을 전로 제강품에 유사하도록 만드는 것이 우선적으로 필요하다. 이외에도 전기로 제강시 불순물의 환원을 용이하게 조절하여 고품위 강을 제조하는 방안이 강구될 수 있으나, 보다 궁극적인 해결책은 고강도용이나 내식성 혹은 내열성을 갖춘 소재로 이용되는 고합금강들을 저합금강으로 대체하여 고철의 화학성분에서부터 불순물 유입을 제한하는 것이 고철을 이용하여 고품위 강을 제조하기 위한 최선의 방안이 된다.

첨가 성분 원소의 종류와 양이 제한된 저합금강으로 특수 목적용의 고합금강을 대체하는 것은 철강재료의 고성능 및 고기능화를 위하여 다양한 합금화를 추구한 최근까지의 연구 개념과 전혀 상이한 것이다. 독일의 BMFT 소재연구 프로그램에서 기술적으로 우수한 재료개발은 제조와 사용시 자원과 에너지의 낭비를 줄이고 폐기물과 공해물질을 감소시키는 효과를 가져야 하는 것으로 규정하고 있듯이, 앞으로의 재료개발과 응용은 자원과 환경을 보존하면서 우수한 성능을 지니는 새로운 소재 또는 공정이어야 하는 신연구개념이 도입되는 시점에 있는 것이다.

고강도 혹은 기타 특성이 고합금강에 떨어지지 않는 저합금강이 개발되어, 자동차나 건축 및 기계류에 사용후 고철로써 재활용되는 비율을 높게 된다면 자원과 환경측면에서 가장 의미있는 연구성과의 하나가 될 것으로 보여진다.

저합금강 혹은 Fe-C-Si-Mn의 기본원소로 구성

된 강종의 특성향상을 위해서는 철강이 가질 수 있는 모든 강화기구와 용접성 및 인성향상의 개선기구가 적용될 수 있는데 이중에서 미세조직의 2상조직제어나 제어압연에 의한 특성향상기술이 가장 효과적일 것으로 예상된다. 이러한 2상조직강이나 제어압연기술은 합금원소 첨가로 얻어지는 기계적 특성의 향상효과를 저합금강에서 섬세한 조직의 제어만으로 극대화하고자 하는 재료기술이다. 이외에도 최소한의 합금원소 첨가만으로 강도, 내식성 및 내열성에서 최대한의 사용수명 증대 효과를 나타낼 수 있다면 환경과 조화를 이루는 재료라 할 수 있을 것이다.

지구의 자원을 보호하고 재료제조시 환경에의 부담을 줄이고자 하는 대명제하에 현시점에서 그 효과가 가장 큰 철강의 재활용은 이상과 같은 고철 수급처리와 환경과 조화를 이루는 재료기술 개발에 의존한다고 볼 수 있다.

2. 철강의 재활용

철광석, 석탄, 석회석 등과 전기 및 설비투자에 이르기까지 단일 재료로서는 가장 많은 자원을 소모하는 철강은 광석을 이용하는 전로(轉爐)와 고철을 이용하는 전기로 제강법에 의해 생산된다. 표 1은 한국과 일본의 전로 및 전기로의 조강량을 비교한 것으로써 고철을 이용한 전기로 제강량이 전체 조강중에 30~40%에 이르는 것을 알 수 있다.

표 1. 한국과 일본의 철강 생산량^{1), 2)} (천톤)

제강법	전로	전기로	총생산량
한국 (1995)	22,870	13,900	36,770
일본 (1990)	75,640	34,700	110,340

철강생산에 따르는 에너지 및 자원의 보호와 폐기물 발생과 같은 환경의 부담을 줄이기 위해

서는 전기로에 투입되는 고철의 적극적인 재활용이 모색되어야 한다.

다음에는 고철의 회수율 증가를 위한 각국의 고철 수급현황을 살펴보고, 전기로 제강시 환원에 제한을 받는 고철내의 불순물 원소와 그 제어성에 대하여 조사하였다.

2.1 고철의 수급현황

(1) 고철의 재활용

전체 고철의 발생량 중에서 저합금강인 보통강이 차지하는 비율은 85%에 이르며 나머지가 고풍금강인 특수 목적강에 해당한다. 고철이 재활용되는 흐름은 그림 1과 같으며 각 분야의 유기성이 철강 재활용율의 상승과 재생철강의 품위를 높이는 데 역할을 담당하게 되는 것이다.

그림에서 자가발생 고철은 제강업체에서 발생되는 고철로써 양질의 원료가 되지만, 폐기 고철은 분류와 분급의 회수처리에 따라 고철의 품위 뿐만 아니라 전기로 제강후 제강품의 순도와 품위를 결정짓는 중요한 변수가 된다.

다음은 전기로 제강의 원료인 고철의 분류와 탄소 함유량 및 톤당 용해 소비전력량을 나타낸 것이다.

표 2. 고철의 종류 및 탄소 함유량과 용해 소비 전력량

고철	용어의 정의	탄소량 (%)	용해소비 전력량 (kwh/ton)
HMS	Heavy Metal Scrap, 부피에 비해 비중이 높고 서로 엉키지 않아 쉽게 중량으로 식별되는 고철	0.2	280
M/B	Motor Block, 차량의 엔진 부분만을 선별한 고철		
S/D	Shredded, 1차가공을 하며 서로 분리된 주먹만한 고철		
B/D	Bundle, 중량 및 경량 고철을 직사각형 모양으로 압축 가공시킨 고철	0.03	350
P&S	Plate and Structure, 중량구조물 및 후판으로 품질이 좋은 고철	0.26	300
Bushelling	고로에서 발생한 것으로 자동차용 박판 및 사시를 구성하는 최상급의 고철	0.04	250
P/I	Pig Iron, 선철	4.1	500
HBI	Hot Briquetted Iron, 가공고철		
생철	수입고철의 Bushelling	0.03	300
중량고철	수입고철의 HMS NO. 1과 동일		
경량고철	수입고철의 HMS NO. 2과 동일		
분철	선반, 절삭 등의 가공시 발생하는 가루형태의 고철		

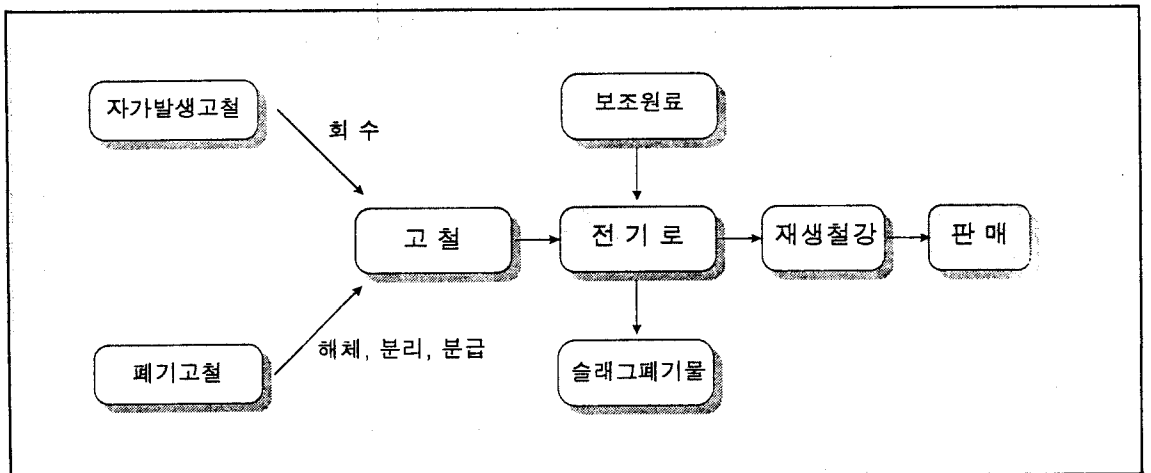


그림 1. 고철의 재활용 흐름²⁾

위에서 살펴보았듯이 폐기되는 고철중에서 최상급의 품위를 갖는 것은 철광석의 환원으로부터 얻어지는 전로 가공품인 자동차용 박판강이다. 자동차 고철의 경우 분별이 쉽고 강중에 일체의 불순물 원소가 섞이지 않는 강중임을 고려할 때, 유입되는 불순물 함량에 따라 품위와 제조효율이 결정되는 전기로 제강품에 있어서 가장 안전하게 용해할 수 있는 원료인 것이다.

미국의 1년간 폐차되는 양이 800만대이고 한국에서만 곧 100만대에 이르는 폐차분을 고려하면, 자동차 철강의 재활용이 고급 고철 원료로 분류되는 것 뿐 아니라 그 양에 있어서도 상당한 분량을 차지하는 것을 알 수 있다. 다음의 그림 2는 폐차 재활용의 흐름을 보여주는 것으로서 전체 재활용 중량중 약 70%가 철강의 재활용에 해당한다. 이외에도 철강캔류가 고철로서는 분류와 회수

가 용이한 재활용 대상이 되는데 캔에는 Sn, Cr, Ni 등 회수가 어려운 불순물 성분이 함유되어 있어 고급 고철로 평가받지는 못한다. 최근에는 Internet 게시판에 T-55 기종의 우크라이나 탱크 3,600대가 55,000톤의 고철로 공급판매됨이 파악되는 등, 각종 무기 및 폐선박의 해체과정에서 고철의 회수와 재활용이 다각적으로 이루어지는 것을 알 수 있다.

(2) 각국의 고철 수급현황

국내의 전기로 제강을 위한 고철의 수요는 매년 증가하여 최근에는 1,000만톤 이상의 고철이 필요한 실정이다. 그러나 고철의 수입의존도가 30%에 달해 비교적 저급으로 평가되는 수입고철에 대한 문제점이 내재한다. 표 3은 우리나라의 연도별 고철수요와 자급도 추이를 나타낸 것이다.

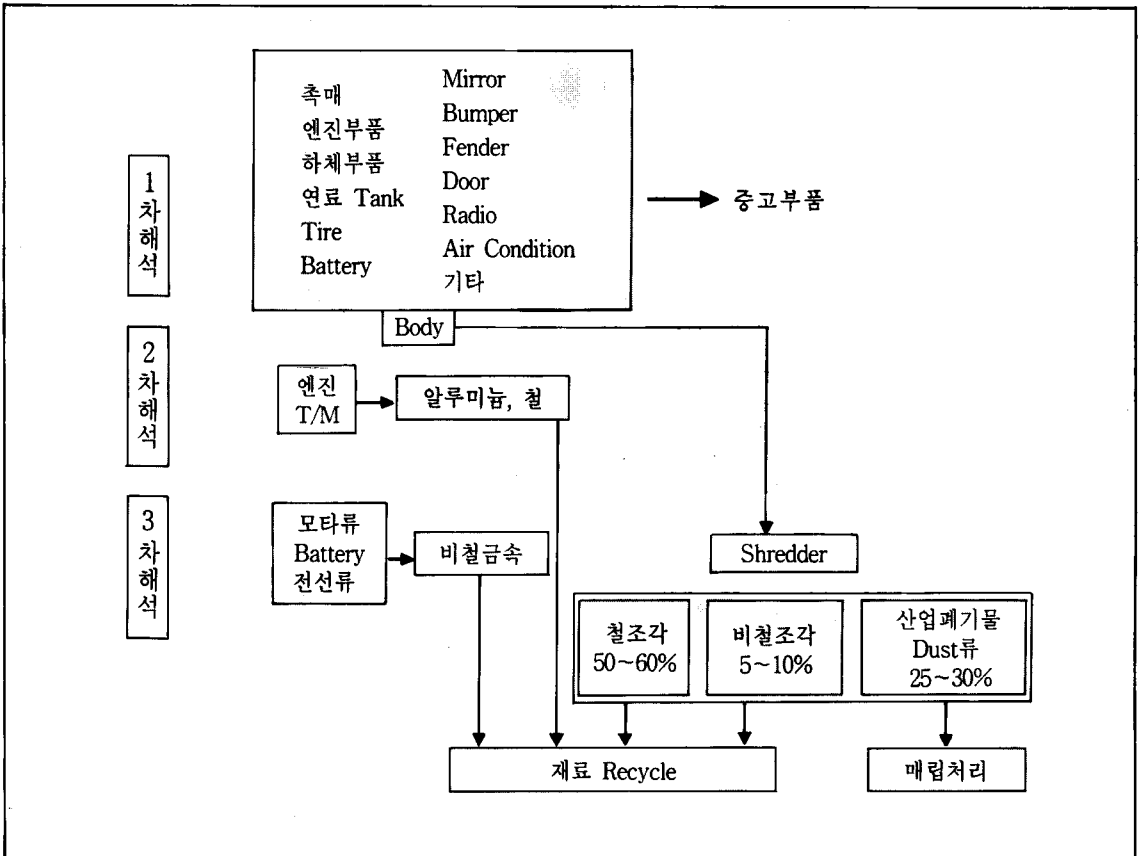


그림 2. 폐차처리의 재활용³⁾의 흐름

표 4. 미국의 연도별 고철 및 선철 수급 현황

(단위:천톤)

Year	Receipts of scrap2/	Production of home scrap3/	Consumption of both purchased and home scrap4/	Shipments of scrap	Scrap ending stocks. Dec. 31	Imports of scrap for consumption5/	Exports of scrap5/	Pig iron consumption
1969----	39,625	51,063	86,016	6,123	5,944	304	8,095	85,851
1970----	35,986	47,695	77,618	5,008	6,956	273	9,173	82,303
1971----	35,872	44,628	75,130	4,835	7,706	257	5,517	73,677
1972----	42,856	46,433	84,814	4,990	7,411	283	6,511	80,866
1973----	46,208	52,384	93,990	5,600	6,428	317	9,865	90,556
1974----	52,081	50,122	95,693	5,510	7,628	182	7,708	87,808
1975----	37,693	41,769	74,689	4,351	7,952	277	8,566	72,246
1976----	43,075	45,383	81,565	5,518	9,061	460	7,146	78,966
1977----	43,279	44,921	83,641	5,238	8,494	557	5,311	74,392
1978----	46,981	47,248	90,014	5,189	7,509	720	8,200	80,213
1979----	48,254	47,372	89,721	5,650	7,914	689	10,028	79,341
1980----	42,490	38,290	75,940	5,337	7,274	528	10,131	62,644
1981----	42,991	39,245	77,199	4,906	7,365	504	5,820	68,075
1982----	28,771	24,609	51,153	3,376	5,822	425	6,172	40,287
1983----	34,309	24,718	56,048	3,266	5,268	582	6,822	45,423
1984----	36,241	26,559	59,604	3,528	4,773	523	8,616	48,264
1985----	39,322	27,622	63,950	4,107	4,630	554	9,026	46,639
1986----	37,941	23,944	59,744	3,465	3,941	657	10,618	41,371
1987----	43,397	22,444	61,963	2,748	4,394	765	9,405	45,386
1988----	47,685	24,898	69,692	2,677	4,131	942	9,161	53,567
1989----	44,516	23,014	65,507	2,845	4,213	1,016	11,149	52,968
1990----	49,861	25,258	70,451	5,396	4,433	1,309	11,580	51,100

- 1 : Includes manufacturers of pig iron, raw steel, iron and steel castings, and miscellaneous users.
- 2 : From brokers, dealers, and other outside sources and other own company plants.
- 3 : Recirculating scrap resulting from current operations and obsolete scrap (includes ingot molds, stools, and scrap from old equipment, buildings, etc).
- 4 : Includes recirculating scrap.
- 5 : Includes tinplate and terneplate. Excludes used rails for rerolling and other uses, and ships, boats, and other vessels for scrapping.

보면 표 4와 같다. 위의 표에서 미국내 고철은 다양한 방법으로 구입, 회수되는 것을 알 수 있으며, 회수고철의 양이 1990년에 1억 5천만톤에 이르고 선철은 5천만톤 정도로 사용량이 감소하는 것을 알 수 있다.

2.2 전기로의 고품위 제강 기술

전기로에 장입되는 고철에는 제강시 환원이 어

려워 순도 조절에 영향을 미치는 원소들이 포함되어 있다. 이러한 불순 원소들은 고철의 분류과정에서 비철이나 고탍금강이 잘못 선별됨으로써 유입되거나 캔류나 도금강판에서 불가피하게 유입되는 것들을 들 수 있다.

고철의 불순 성분중에서 Cu와 Sn은 강의 고온 성형시 취화를 유발하므로 특히 주의해야 하며, Ni은 고온에서 수소취성을 유발시키므로 특정한 사용조건에서는 조성량을 제어해야 한다. 또한 전

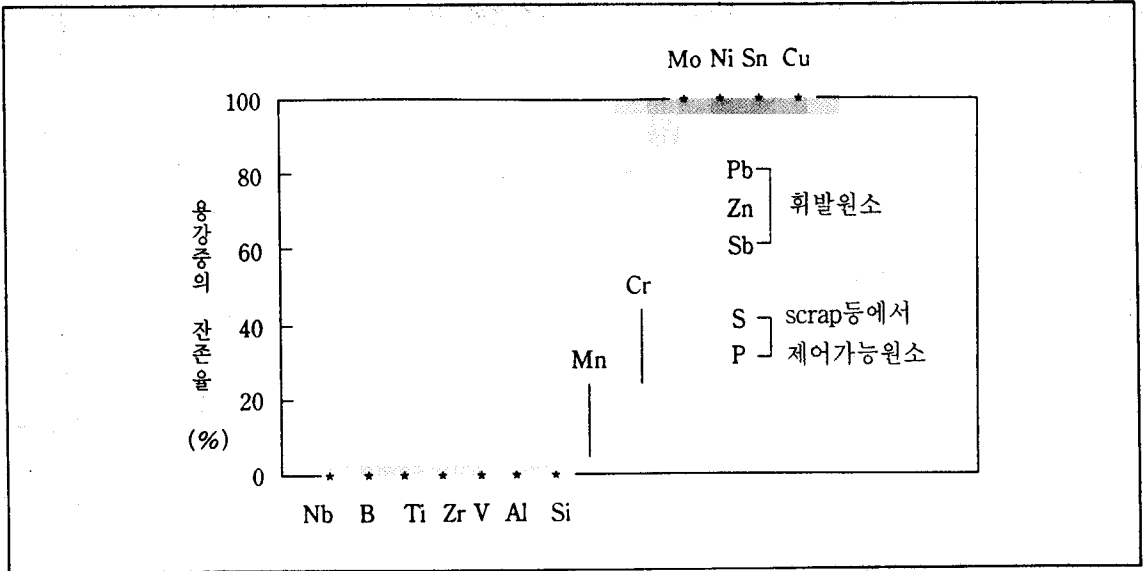


그림 5. 각 원소의 용강중 잔존율⁶⁾

로강에서도 극히 해로운 영향을 미치는 Pb, As, P, S 등은 고철을 용해하는 전기로 강에서 다른 불순 성분과 함께 특성 저하를 가중시킬 우려가 있으므로 이들 성분제어가 필수적이다.

고철의 불순 성분중 Cu는 비철 분리과정 중에 유입되고, Zn이나 Sn은 도금강판에서 유입될 가능성이 있는데 가능하면 그 양이 적을수록 유리하며 Ni, Cr 등의 원소도 유입량이 적어서 첨가원소의 영향을 최소화하게 되면 고철을 이용한 재생강의 품위를 향상시키는 방안이 된다.

그림 5에서와 같이 각 원소가 용강중에 잔존하는 비율은 서로 다르다. Nb, B, Ti, Zr, V, Al, Si 등의 원소는 100% 전기로 제강의 환원에 의한 제거가 가능한 종류로써 고철 중의 유입을 특별히 관리할 필요가 없으나, Mo, Ni, Sn, Cu는 제강시 환원제거가 거의 불가능하고 강중에 그대로 잔존하는 원소에 해당한다. 이들 원소의 조성비율은 고순도의 고철을 더 많이 장입하여 회석에 의해 낮출 수 밖에 없다. Pb, Zn, Sb는 용강중 잔존율은 높으나, 취발성이 높아 제거가 용이한데 비하여 Cr, P, S는 일정 비율만큼 용강중에 잔존되는 경향을 나타낸다.

Ni, Cr 등 제강시 환원이 어려워 제강품의 순도

조절에 제한을 주는 첨가원소는 환경과 조화를 이루는 재료개발의 개념에서 사용이 제한되어야 한다. 즉 강도 등의 기계적 특성 향상을 위해서 첨가된 Ni, Cr은 강도 및 다른 기계적 특성을 고려하여 Si, Mn 등의 기본 원소로만 구성된 강종으로 대체할 필요가 있는 것이다. 그림 6은 Ni, Cr이 강도증가 목적으로 첨가된 것을 가정할 경우 Mn량의 조절만으로 Ni, Cr강 정도의 강도 증

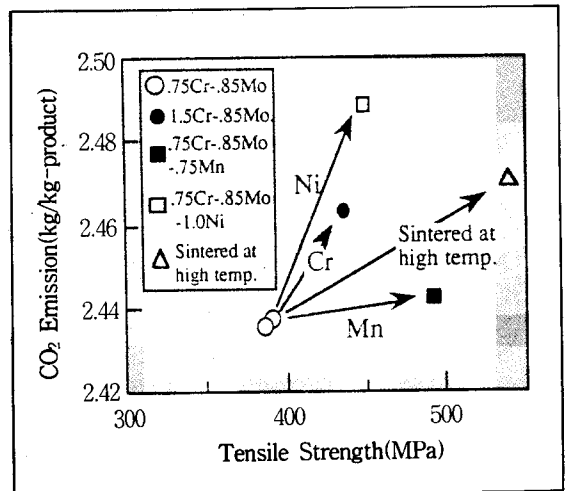


그림 6. Ni, Cr, Mn의 강도 향상 효과에 따른 CO₂ 방출량⁷⁾

가 효과를 가져오는 것을 보여주는 것이다. 여기서 동일한 강도증가의 목적으로 Ni, Cr, Mn를 합금원으로 첨가할 경우 제강시 CO₂를 방출하여 대기의 온도를 높이는 효과가 Mn에 비하여 Ni, Cr의 경우가 높은 것을 알 수 있다. 결국 Ni, Cr의 기계적 특성 향상 효과와 환경의 난이성을 동시에 고려할 때 가능하다면 환원과 순도조절이 용이하고 철강의 기본 원소로 잔존하는 Mn양의 변화만으로 대체 특성을 얻고, 이를 통해 자원의 재활용 순환계에서 회전시키는 것이 궁극적으로 올바른 재료의 활용이 된다.

3. 재활용가능 철강의 설계

3.1 저합금강의 특성 향상

고철을 이용한 철강의 재활용시 제강품의 순도와 품위를 높이기 위해서는 고철로 이용되는 철강재에서부터 첨가원소를 제한시킬 필요가 있다. 기존의 합금개발 개념은 강도, 인성 및 내식성 등의 특성 향상을 위하여 여러 가지 합금원소를 다양하게 첨가하여 합금화하는 경향이었으나, 앞으로는 자원과 환경을 보호하려는 관점에서의 재료개발이 도입되어 합금강을 저합금강이나 제강시 성분조절이 가능한 Fe-C-Si-Mn강으로 대체시킬

으로써 철강의 재활용 체계에 적합하게 하는 것이 보다 합리적인 개념으로 정립되고 있다.

그림 7은 이러한 재료개발의 신, 구개념을 나타낸 것으로 철강의 특성을 향상시키기 위한 각종 첨가원소의 영향을 미세조직 제어의 효과로 대체하고자 하는 노력을 보여주는 것이다. 그림에서 첨가원소의 영향으로 C, Cr, Mo에 의해 강도를 높일 수 있고, Ni, Mn의 첨가로 인성을 개선하고 Cu, Si는 내식성을 향상시키는 효과를 갖고 Zn, Sn의 도금으로 인하여 철강의 표면 특성을 개선하는 등 기존의 합금화 개발 결과가 포괄적으로 나타나 있는 것을 알 수 있다.

그러나 이러한 합금강들은 고철과 전기로로 재생될 때 불순물을 강중에 잔존시켜 제강품의 품위를 떨어뜨리는 중대한 결점을 안고 있다. 이에 따라 앞으로의 재료개발 연구를 통해서는 각 첨가원소가 부여하는 강도, 인성 및 내식성 등의 특성 향상 효과를 미세조직 제어만으로 얻어내고, 합금강과 견주어 모든 특성면에서 뒤떨어지지 않고 동등하게 안정적으로 사용할 수 있게 하는 노력이 있어야 한다.

이를 위해서는 1) 단일상의 미세조직보다는 2상이상의 복합조직강으로 제어하는 것이 강도와 인성을 동시에 향상시킬 수 있는 우선적인 방안이

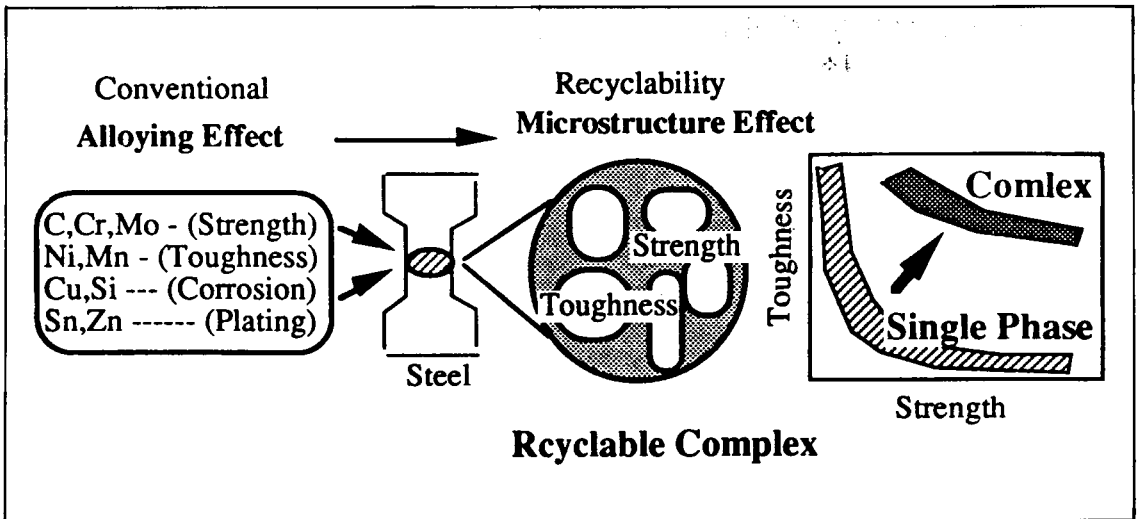


그림 7. 철강의 기계적 특성 향상을 위한 재료개발 : 첨가원소영향 및 미세조직 제어 효과⁷⁾

된다. 또한 2) 제어압연의 가공효과를 통한 결정립 미세화를 피할 경우 기계적 특성 향상 효과를 극대화할 수 있다. 이외에도 3) 미량의 합금원소 첨가만으로도 석출경화나 결정립 미세화를 유도할 수 있는 microalloying과 단순 성분의 합금으로 내열성 등을 향상시키는 것 등이 환경과 조화를 이루는 새로운 재료개발 범주에 속하는 것으로 볼 수 있다. 철강중에서 철광석의 환원과정부터 성분제어가 용이한 C, Si, Mn은 철강의 재활용시 불순물 원소로 작용하지 않는다. 따라서 Fe-C-Si-Mn강으로 특수 목적의 고합금강을 대체하는 것에 대한 다각적인 고려가 필요하다.

그림 8의 철강에 대한 기본적인 강화와 인성향상 기구를 종합적으로 살펴볼 때 Fe-C-Si-Mn강에는 고용강화(C, Si, Mn), 석출강화(Carbide), 열처리 경화(마르텐사이트, 베이나이트) 및 성형가

공에 의한 substructure 강화와 결정립 미세화에 의한 강화기구를 적용시킬 수 있다. P, S, N의 불순물을 최소화한 경우에는 인성향상의 효과를 동시에 얻을 수 있다.

그러나 고합금강을 대체하기 위한 저합금강 혹은 Si, Mn강의 미세조직 제어만으로 충분한 기계적 특성을 발휘하는가에 대해서는 여러 관점에 의해 조사되어야 한다. 우선 고강도나 고인성의 관점에서 뿐만 아니라 용접성, 내식성 등의 사용성에 따르는 특성에 대해서도 비교 검토가 되어야 하며, 강도의 제조단가와 재현성 및 신뢰성에 대한 검토가 병행되어야 할 것으로 보여진다. 이를 통하여 사용자는 자원과 환경을 고려하는 입장에서 재활용가능 철강을 적절한 비용과 안정적인 특성의 신뢰로 보다 폭 넓게 사용할 수 있을 것이다.

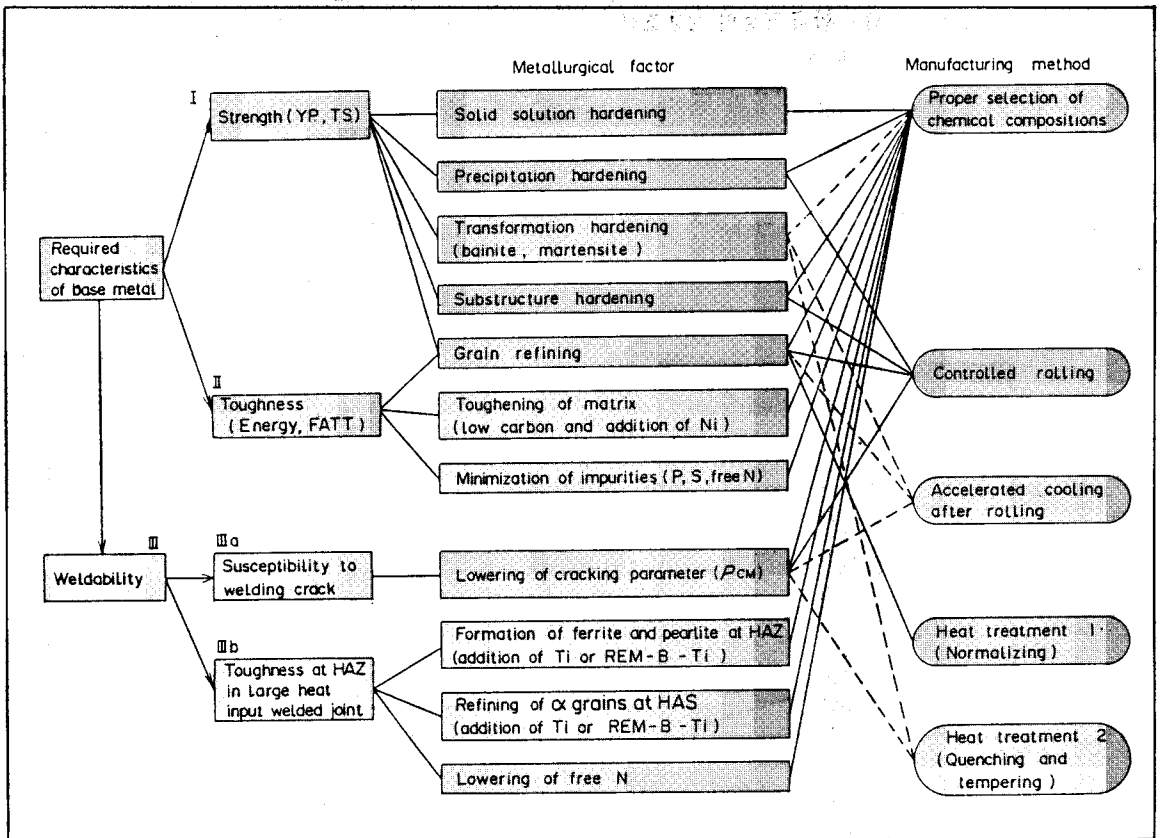


그림 8. 철강의 강화 및 인성향상 기구⁸⁾

3.2 2상조직강 (Dual Phase Steel)

2상조직강은 저합금강의 강도 및 인성을 동시에 향상시킬 수 있는 가장 큰 가능성을 지닌 미세조직 형태의 강종으로서 α -페라이트와 마르텐사이트가 미세하게 복합되어 특성의 향상이 유발되는 강이다. 2상조직강은 그림 9에서와 같이 페라이트+오스테나이트의 2상영역에서 반복적으로 가열과 냉각을 시행함으로써 얻어지는데 최종의 열처리 후에는 그림 9의 D와 같은 페라이트와 마르텐사이트의 미세한 복합구조로 구성된다.

그림 10은 2상조직강으로 얻을 수 있는 인장강도와 연신율의 영역을 나타낸 것이다. 그림 10(a)에서 급냉과 템퍼링의 일반 열처리 조직보다는 고온성형의 가공도가 더해진 As Hot-rolled의 강도와 연성이 높고, 2상조직강은 이들 보다도 더 개선된 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 그림 10(b)는 0.2~0.4C-1.2Si-1.2Mn 합금조성의 2상조직강 예를 보여주는 것인데 0.4C의 경우 20%의 잔류 오스테나이트가 형성되며 20%이상의 연신율에서 1,200MPa에 이르는 고강도를 얻을 수 있는 가능성을 나타낸다.

C, Si, Mn의 성분과 2상조직의 미세조직 제어

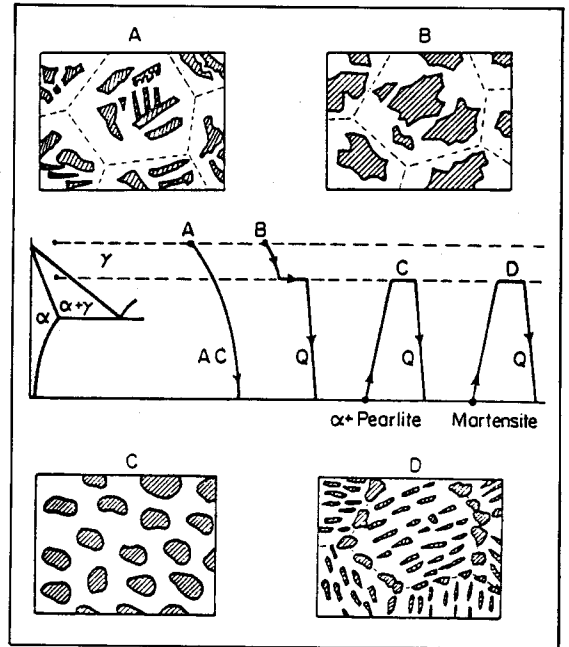


그림 9. 2상조직강의 형성기구

만므로 더 높은 고강도와 고인성을 얻는 새로운 합금과 열처리공정의 개발이 다시 새로운 연구개발 목표로 설정될 시점에 있으며, 이러한 합금개발은 철강 재활용의 극대화를 위해 반드시 달성해야 하는 과제이다.

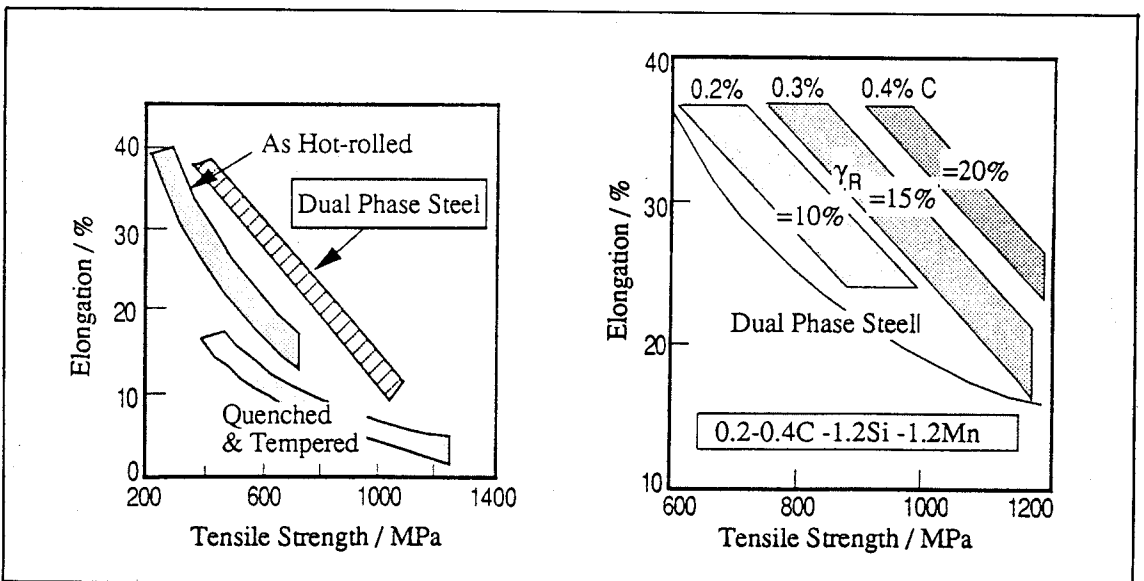


그림 10. 2상조직강의 강도 및 연성 개선 효과⁹⁾

3.3 제어압연(Controlled Rolling)

제어압연은 재활용이 가능한 철강으로써 저합금강에 대하여 가공성형성 효과를 더함으로써 기계적 특성의 향상을 꾀할 수 있는 또 다른 방법이다. 제어압연의 공정은 그림 11에서와 같이 재결정온도 구간이하 혹은 페라이트와 오스테나이트 2상영역에서 고온 가공을 가함으로써 결정립내의 소성밴드를 형성시키고 이것에 의해 결정립 미세화나 이보다 훨씬 미세한 전위셀의 아결정립을 형성하는 일련의 공정을 일컫는다.

일반적인 고온 성형은 재결정온도 이상의 구간에서 시행되며 성형후 냉각시 (b')와 같은 비교적 조대한 결정립이 형성되지만, 제어압연은 일반적

으로 A_{r3} 이상의 재결정온도 이하에서(950°C) 고온 성형을 함으로써 소성밴드나 연신된 형태를 그대로 남기는 가공형태이다. 이것을 서냉하거나 일정한 온도로 가열할 경우 전위가 집적된 결정립계와 밴드에서 결정립이 생성하며 (c')와 같은 미세한 결정립 형태로 구성된다. 고온 성형온도를 더욱 낮춰서 페라이트와 오스테나이트의 2상 영역인 A_{r3} 이하에서 시행할 경우 최종 미세조직은 (d')와 같이 전위셀의 아결정립으로 구성된 매우 미세한 조직으로 구성된다.

그림 12는 일반 고온성형과 제어압연 및 열처리시의 미세조직 구성을 보여주는 것이다. 일반 고온성형의 경우 재결정이 일어나는 오스테나이트 영역에서 시행되어 미세조직은 성형의 영향이

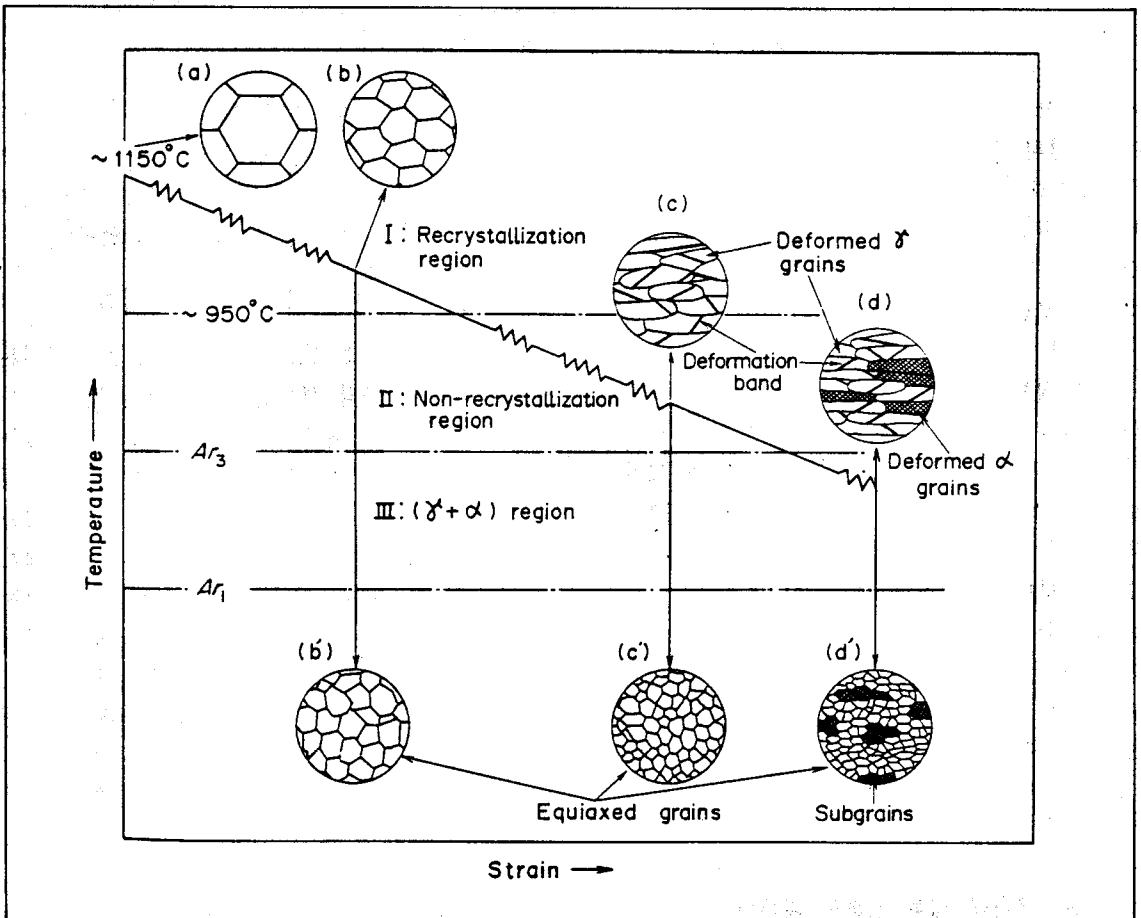


그림 11. 제어압연 공정¹⁰⁾

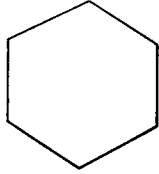



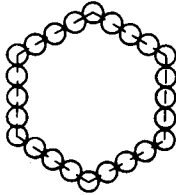
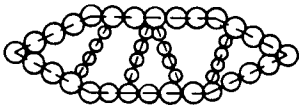






	Conventional hot-rolling	Controlled rolling	Normalizing	Quenching
γ grain structure		 Deformation band		
Nucleation of α grain				 Lath
α grain structure				 Cementite (Tempering)

그림 12. 제어압연의 결정립 미세화 기구¹²⁾

거의 없는 조대한 결정립으로 구성되는데 반하여, 제어압연의 경우 결정립은 재결정온도 이하의 조성으로 인하여 연신된 형태를 유지하며 결정립 내에는 완전히 풀리지 않는 소성밴드가 형성되어 성형 후 냉각시 입계나 소성밴드에 페라이트 형성과 새로운 결정립계가 미세하게 형성되는 것을 나타낸다.

고온 성형온도를 낮추면 소성가공 효과를 충분히 얻을 수 있으며 이에 따라 결정립 미세화와 강도 및 인성의 개선효과를 얻을 수 있다. 그러나 소재의 고온 가공성은 성형온도 감소에 따라 크게 감소할 수 밖에 없는데, 가열 후 성형비를 낮추어야 하며 이에 따라 여러 단계의 가열과 성형을 반복해야 하는 번거로움이 뒤따르게 된다. 또한 성형시 균열이나 표면결함의 발생 가능성이 높게 되어 정밀한 성형공정이 우선 되어야 하는 문제점을 갖고 있다.

이를 통해 볼 때 제어압연의 제강품은 제조단가가 높으며 제조수율이 낮고 설비와 공정상 투자와 기술확보가 있을 때 얻어질 수 있다. 고합금강의 환경부담에 대한 정확한 평가와 자원보호와 재활용의 가치가 제조의 편의성보다 우선한다면

이러한 제어압연에 의한 특성향상 강의 사용과 보급이 확대될 것으로 예상된다. 또 앞으로 정밀 제어 성형기술이 발전한다면 제어압연 기술의 보편적인 정립은 용이하게 될 것으로 판단된다.

3.4 환경조화형 최소 합금강의 개발

환경조화형 최소 합금강이란 C, Si, Mn의 기본 원소이외에 미량의 성분원소만 첨가하여 강의 특성향상 효과를 최대로 할 수 있는 경우를 일컫는다. 여기에는 V, Nb, Ti, Zr, B, Al 등이 속하는데 미량첨가로 기지내에 미세한 탄화물이나 질화물을 형성시켜 결정립 성장 억제와 결정립 미세화에 기여하게 된다. 이러한 첨가원소들은 제강시 완전히 제거할 수 있는 잇점도 함께 갖고 있어 제강시 성분제어가 용이한 원소에 속한다.

한편 내열강으로 사용되는 저합금강에 대한 새로운 연구결과가 보고되고 있다. 일반적으로 보일러 튜브에 많이 사용되는 내열 저합금강에는 0.5wt%의 Mo를 첨가하여 내열성을 높이는 것으로 알려져 있다. 그러나 Mo는 용강중에서 제거가 불가능한 원소로써 고철의 재활용시 재생 철강의 순도를 낮추는 환경의 비친화성 원소로 분류할

수 있다. 이러한 Mo의 함유량을 내열강에서 감소시키고 고온 크리프 특성을 만족하는 새로운 합금개발이 시작되었다.

그림 13은 크리프 특성을 향상시키기 위한 합금체계를 나타낸 것으로써 순수한 Fe보다는 C가 함유된 경우 크리프 수명이 증가하며 Mo가 첨가되면 내열성이 더욱 증가하는 것을 보여준다.¹⁾

그러나 그림에서 알 수 있듯이 Mo의 과도한 첨가는 고온력의 짧은 파단수명 구간에서만 우수한 내열성을 보일 뿐이고 실제 이 소재의 부품이 사용되는 100,000 시간 이상의 장시간의 파단수명 구간에서는 Mo첨가량에 관계없이 그 크리프 강도가 서로 유사한 것을 나타낸다.

그림 14는 0.2Cr 강에서 Mo첨가에 따른 크리프 강도를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 Mo가 0.03wt%까지만 첨가되면 0.5wt%에 해당하는 페라이트계 내열강의 저응력 구간과 크리프 특성이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 높은 Mo를 함유하는 내열강의 경우 0.03Mo 강에 비하여 고온력 구간에서 특성은 월등히 우수하지만 저응력 구간에서 내열성은 현저히 감소하며 0.03Mo에 해당하는 크리프 특성을 갖는 것이다. 고온에서 사용되는 설비나 부품이 보통 100,000시간 이상의 사용수명으로 설계되는 것을 감안하면 크리프 특성상 고온력 구간은 큰 의미가 없다. 단지 저응력 구간에서의 고온 특성이 합금개발에 중요한 관건이 되며, 높은 Mo를 함유하는 페라이트계 내열강이 환경 부담을 끼친다면 이와 유사한 특성을 갖는 0.03Mo 강으로 대체 사용해도 무방한 것으로 해석할 수 있다.

이와같이 환경과 조화를 이루는 최소 합금강의 개발은 무조건 최상의 특성을 피하는 자원소모의 개념에서 꼭 필요한 기계적 특성의 향상만을 최소한의 자원으로 얻으려는 새로운 개념의 합금개발 방향인 것이다.

4. 철강자원의 재활용을 위한 체계

철강자원의 재활용을 높이기 위해서는 재료

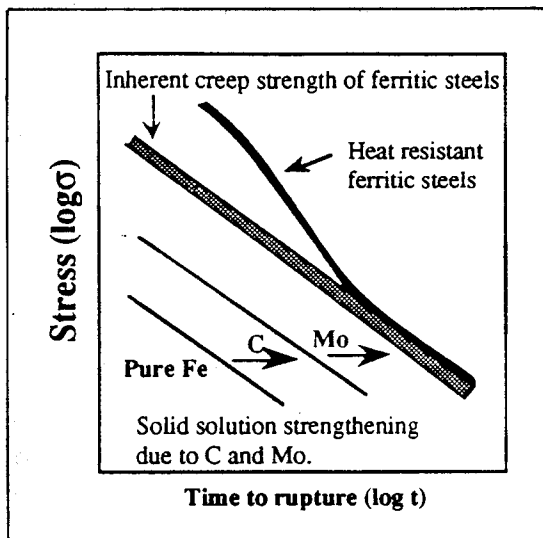


그림 13. C, Mo 첨가에 따른 내열성 개선 효과⁷⁾

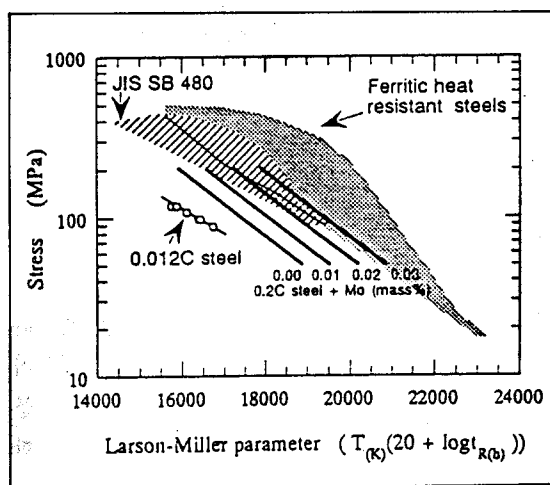


그림 14. 0.2C-XMo 강의 크리프 특성 비교¹²⁾

의 설계로부터 제품의 구조설계, 사용자와 사회적 인식도, 고철처리 및 전기로 제강기술에 이르기까지 폭넓은 상호 유기성이 존재하여야 한다. 재료설계는 2상조직의 미세조직 제어나 제어압연 및 최소 합금화를 통한 특성 향상을 통해 고합금강을 대체하는 것이 개발의 목표이며 이러한 재료로 만들어지는 제품의 구조에 있어서도 다른 재료와 분리회수가 용이한 구조로 설계, 제작되는 것이 바람직하다. 사용자나 사회적인 인식에 있어

서 재활용이 어렵거나 비용이 많이 드는 소재의 제품에 환경부담비용을 물려 자원의 재활용을 유도하는 정책도 필요하다. 고철은 혼합물에 대한 분리, 분급의 선별처리기술이 개발되어 재생철 전기로에 불순물 유입을 억제하는 것과 전기로 제강시 불순물과 잔존 성분의 제어로 고품위 강종을 생산하기 위한 기술개발 노력이 병행되어야 한다. 이와같이 철강의 적극적인 재활용을 위해서는 많은 분야에서 다각적인 상호보완과 유기체계를 필요로 하는 것이다.

부품이나 소재개발에 있어서 기존의 개발개념은 환경과 조화를 이루는 재료개발 관점으로 변화되어야 하는데, 즉 소량 다품종 및 고풍금화와 고기능성을 추구해 온 기존의 연구개발 성향은 대량 소품종화, 저합금화 그리고 적정한 기능을 유지하는 새로운 개발방향으로 바뀌어야 하는 것이다. 이것은 사용재료의 원활한 재활용을 돕고 한 제품을 만들기 위해 적정한 자원소모만을 용납한다는 일종의 의식의 전환이라고 할 수도 있다.

철강자원의 재활용을 위해서는 법적으로도 체계가 갖추어져 원활한 자원재생 사이클링에 접근하도록 해야 한다. 사용재료의 규격으로서 재활용 가능 철강의 이용을 새로이 정해야 하며, 제품은 구조설계에서 부터 조립과 분리가 용이한 표준라인으로 규제를 하고, 폐처리품의 분별을 쉽게하기 위해 일정 중량 이상의 부품에서는 반드시 성분 표시를 하도록 법적으로 규제를 하게되면 막대한 자원을 낭비하여 만들어지는 철강의 재활용율을 상승시킬 수 있을 것으로 판단된다.

철강의 재활용을 높이기 위한 기술개발이라 함은 이와같이 어느 한 분야에 귀착된 연구분야라고 볼 수 없다. 재료설계에서 부터 제품구조설계, 고철 선별기술 및 제강기술에 이르는 여러가지 분야가 종합적으로 관련되어 있다. 하지만 이 모든 기술들이 처음부터 새롭게 시작해야하는 기술들도 아니다. 단지 자원의 재활용이라는 연구지향성에 따라 기존에 연구개발되어 온 기술들을 접목시키고 적극적으로 활용하는 기술의 재활용인 것으로 생각된다.

재활용이 가능한 철강재료의 개발을 위해서 고풍금강을 대체할 수 있는 여러 가지 방안(2상조직강, 제어압연, 최소합금강)이 언급되었는데, 이들 모든 방안은 기존에 잘 정립된 기술에 해당된다. 현 시점에서 필요한 것은 이러한 자료들을 근거로 하여 고풍금강을 대체해도 괜찮다는 충분한 특성상의 근거와 제조성에 대한 구체적인 평가가 우선적으로 확립되어야 한다. 이를 바탕으로 하여 보다 특성이 우수한 저합금강을 개발하여 철강시장에 보급하는 것이 그 다음의 연구개발 순위가 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Korean Iron and Steel Industry Trends, 1996, KDB Data Plaza
- [2] K. Nii : Material Japan, 33 (1994) 524
- [3] 오재현 : 대한금속학회회보, 6 (1993) 266
- [4] K. S. Shin and S. J. Kim : ECOM-CONF. '95, China, (1995) 624
- [5] 秋末治 : “지속가능 리사이클 설계입문”, K. Nagai 편저, Eco material 연구회, (1995) 32
- [6] J. R. Stubbs : Tonnage max. of electric arc furnace steel production, Iron & Steel Maker, (1984) 50
- [7] K. Nii : ECOM-CONF. '95, China, (1995) 568
- [8] I. Tamura et al. : Thermomechanical Proc. of High Strength Low Alloy Steels, Butterworths (1988) 173
- [9] K. Nagai : Advanced Materials '93 V/A : Ecomaterials, ed. by R. Yamamoto et al., Trans. Mat. Res. Soc. Jpn., 18A (1994) 139
- [10] I. Tamura et al. : Thermomechanical Proc. of High Strength Low Alloy Steels, Butterworths (1988) 81
- [11] Ibid, (1988) 90
- [12] K. Kimura, H. Kushima and K. Yagi : ECOM-CONF. '95, China, (1995) 666.