

## 기술자료

## 회주철 중 합금 원소

권해욱<sup>†</sup> · 서갑성\*

영남대학교 신소재공학부

\*대한특수금속주식회사

## Alloying Element in Gray Cast Iron

Hae-Wook Kwon<sup>†</sup> and Gap-Seong Seo\*

School of Mat. Sci. &amp; Eng., Yeungnam Univ., Gyeongsan, 712-749, Korea

\*Daehan Special Metal Co., Ltd. 1434, Songgok-Ri, Dasan-Myun Koryung-Gun, Kyung-Buk, Korea

## 1. 서 언

회주철에 합금 원소를 적절하게 사용하여 얻을 수 있는 많은 잇점이 있다. 그 중 몇 가지 잇점은 다음과 같다.

- 현저한 강도 개선
- 인성의 개선
- 두꺼운 단면(후단면)주물에서 균일성 증대
- 단면 민감도 감소
- 고온 강도의 향상
- 열처리하는 주철의 경우 경화능 향상
- 내마모성의 개선
- 저온 충격 특성의 개선
- 경도 증가

여기에서는 이와 같은 각각의 잇점을 평가하고 논의하고자 한다.

## 2. 합금 원소의 잇점

## 2.1 강도에 미치는 영향

회주철에서 강도를 증가시키기 위하여 보통 쓰이는 7가지 합금 원소는 니켈, 구리, 망간, 크롬, 몰리브덴, 주석 및 바나듐이다. 각 원소의 성능과 효과는 예측할 수 있다. 이와 같은 6가지 원소의 사용량과 철을 형성시키는 경향은 Table 1에서 보이는 바와 같다. 이 표에 없는 주석은 인장 강도에 미치는 잠재 효과가 바나듐보다 약간 더 크다. 그러나, 회주철에서 최대 사용량은 0.10%를 잘 넘지 않으며, 나중에 더 자세히 논의할 것이지만, 탄화물을 형성시키는 원소는 아니다.

## 2.2 인성에 미치는 영향

회주철의 인성에 관한 Table 2를 검토해 보면, 모든 일반적인 합금 원소는 이 재료의 인성을 향상시킨다는 결론을 얻은

수 있다. 그러나, 조직 내에 유리 탄화물이 없을 때에만 그렇다. 대부분의 경우에, 이 표로부터 각 원소를 단독으로 첨가할 경우보다 원소를 조합하여 첨가하였을 때 인성을 증가시키는데 더 효과적이라는 것을 알 수 있다.

Table 2에서 보이는 바와 같은 모든 결과를 분석해 보면, 몰리브덴이 인성을 증가시키기 위하여 회주철에 첨가할 수 있는 가장 잠재력이 큰 원소이다. 그 다음으로 가장 효과적인 원소는 구리이다. 이와 같은 이유로, 서로 보완적인, 몰리브덴과 구리를 동시에 첨가하는 것이 주철의 인성을 향상시키기 위하여 가장 좋다는 것은 놀라운 것이 아니다. 몰리브덴과 니켈을 동시에 첨가하는 것이 그 다음으로 좋았다. 이 두 가지 합금 원소는, 고 강도와 고 인성의 잇점이 크기 때문에 주목을 받는, 침상 또는 배이나이트 기지의 주철을 얻는데 효과적이기 때문에, 이와 같은 사실은 놀라운 일이 아니다.

## 2.3. 단면 균일성 및 민감도에 미치는 영향

두꺼운 단면에 균일성을 증가시키고 단면 민감도를 더 감소시키는 것을 촉진하기 위하여 합금 원소를 사용한다. 두꺼운 단면에서의 균일성을 증가시키고 회주철 주물의 단면 민감도를 감소시키기 위하여 활용할 수 있는 가장 효과적인 원소는 몰

Table 1. 회주철 중 합금 원소

합금 원소	최대사용량, %	사용량 1%당 강도증가율,%	철 형성 경향	비고
니켈	3.00	10	약하거나 무시가능	
구리	1.50	10	약하거나 무시가능	
망간	*	10	약함	
크롬	0.50	20	강함	
몰리브덴	1.00	40	온건함	
바나듐	0.35	45	매우 강함	

<sup>†</sup>E-mail : hwkwon@yumail.ac.kr

Table 2. 탄소 당량 4.0%인 회주철의 인성 증가율에 미치는 합금 원소의 영향

인성 증가율, %	%Cr	%Mn	%Cu	%Ni	%V	비고
80.0	-	0.54	0.65	-	-	
69.0	-	0.54	-	0.66	-	
52.0	0.61	0.56	-	-	-	
43.4	0.47	0.43	0.52	-	-	
41.5	0.05	0.47	-	-	0.13	
28.5	0.49	0.43	-	1.45	-	
23.0	-	0.47	-	-	-	
17.1	-	-	1.80	-	-	
16.8	0.49	-	-	-	0.12	
8.75	0.56	-	-	-	-	
5.80	-	-	-	1.72	-	
3.30	0.50	-	0.52	-	-	
0*	-	-	-	-	-	기본 주철*

\*기본 주철의 화학 조성; 3.30%C, 2.00%Si, 0.95%Mn, 0.03%S, 0.11%P

리브덴이다. 그 다음 순서로 바나듐, 주석, 크롬, 구리 및 니켈이 있다. 그러나, 합금 원소를 조합하여 가장 좋은 결과를 얻을 수 있다. 예를 들면, 몰리브덴과 크롬을 조합하였을 때 잘 작용한다. 또 다른 가능성으로는 바나듐, 구리 및 크롬의 조합이 있다. 몰리브덴, 바나듐 및 니켈의 조합은 회주철에 있어서 균일성을 증가시키고 단면 민감도를 감소시키는데 또한 잘 작용한다.

또한, 회주철을, 탄화물 형성을 방지하고 합금 원소를 첨가하여 확실하게 최대 잇점을 얻기 위해서는, 항상 적당하게 집중

하여야 한다.

2.4 온도의 영향

760°C에서 합금 주철을 어닐링 처리하였을 때 경도와 강도에 미치는 영향을 보여주고 있는, Table 3을 합금 회주철의 강도를 고온에서 유지시키기 위한 대략적인 척도로 사용할 수 있다. 다시 말하면, 합금 주철의 고온에서의 조직 분해에 대한 저항이 클수록 주철의 내열성이 더 크다.

Table 3에서 보이는 바와 같은 결과를 정확하게 평가하기 위해서는, 주철의 열처리하기 전의, 원래의 경도와 인장 특성을 비교하여야 한다. 열처리하기 전의 경도와 인장 강도는 Table 4에서 보이는 바와 같다. Table 4에서 보이는 주철의 인장 강도 및 경도 값을 Table 3에서 보이는 값과 비교해 보면, 니켈, 크롬 및 몰리브덴 합금 주철의 강도가 상온에서 제일 크다는 것을 알 수 있다. 그러나, 760°C에서 어닐링한 후에는, 경도가 31% 그리고 강도가 23% 각각 감소한다. 이것은 이 합금 주철의 내열성이 나쁘다는 것을 의미한다.

한편, 크롬과 몰리브덴을 첨가한 합금 주철은 동일한 열처리를 하는 동안 경도의 17%와 강도의 2%만을 잃었다. 이것은 내열성이 뛰어나다는 것을 뜻한다. 보통의 크롬 주철도 또한 고온에 노출되어 있는 동안 내열성이 매우 커서 경도의 14%와 원래 인장 강도의 4%를 잃는데 그친다.

크롬 및 니켈을 첨가한 합금 주철에 비하여 크롬과 구리를 첨가한 합금 주철의 내열성이 더 우수하다는 것이 또한 흥미롭다.

Table 3으로부터, 회주철의 내열성을 증가시키기 위하여 첨가하는 가장 좋은 합금 원소는 크롬이라는 결론을 얻을 수 있다. 이와 같은 목적으로 몰리브덴과 크롬을 함께 첨가하는 것이 매우 좋다. 내열성이 필요한 경우에 크롬이 그 성능을 잘 발휘하지 않는 유일한 경우는 1.45%의 니켈과 함께 첨가한 경우이다. 이와 같은 함량의 니켈은 크롬의 탄화물과 페라이트

Table 3. 합금 주철의 경도와 강도에 미치는 760°C에서의 어닐링의 영향

경도, HB	인장강도, MPa	%Cr	%Mn	%Cu	%Ni	%V	비고
217	302	0.61	0.56	-	-	-	
207	297	0.47	0.43	0.52	-	-	
207	275	0.56	-	-	-	-	
201	263	0.50	-	0.52	-	-	
197	293	0.49	0.43	-	1.45	-	
187	257	-	0.54	0.65	-	-	
179	275	-	0.47	-	-	0.13	
156	239	0.49	-	-	1.45	-	
156	227	-	0.54	-	0.66	-	
156	215	-	-	-	-	0.12	
149	206	-	-	-	1.72	-	
146	217	-	0.47	-	-	-	
143	206	-	-	1.80	-	-	
143	191*	-	-	-	-	-	기본 주철*

\*기본 주철의 화학 조성; 3.30%C, 2.00%Si, 0.95%Mn, 0.03%S, 0.11%P

Table 4. 회주철의 경도와 인장 강도에 미치는 합금 원소 첨가의 영향

경도, HB	인장강도, MPa	%Cr	%Mn	%Cu	%Ni	%V	비고
262	312	0.61	0.56	-	-	-	
248	344	0.47	0.43	0.52	-	-	
241	287	0.56	-	-	-	-	
241	296	0.50	-	0.52	-	-	
285	382	0.49	0.43	-	1.45	-	
269	361	-	0.54	0.65	-	-	
255	333	-	0.47	-	-	0.13	
255	306	0.49	-	-	1.45	-	
269	413	-	0.54	-	0.66	-	
229	282	-	-	-	-	0.12	
235	287	-	-	-	1.72	-	
241	303	-	0.47	-	-	-	
235	299	-	-	1.80	-	-	
217	257*	-	-	-	-	-	기본 주철*

\*기본 주철의 화학 조성; 3.30%C, 2.00%Si, 0.95%Mn, 0.03%S, 0.11%P

Table 5. 동일한 경도값으로 어닐링한 회주철의 인장 강도에 미치는 합금 원소 첨가의 영향

경도, HB	인장강도, MPa	%Cr	%Mn	%Cu	%Ni	%V	비고
217	312	0.61	0.56	-	-	-	
217	300	0.47	0.43	0.52	-	-	
217	287	0.56	-	-	-	-	
217	288	0.50	-	0.52	-	-	
212	306	0.49	0.43	-	1.45	-	
217	303	-	0.54	0.65	-	-	
217	323	-	0.47	-	-	0.13	
207	299	0.49	-	-	1.45	-	
212	293	-	0.54	-	0.66	-	
217	282	-	-	-	-	0.12	
217	287	-	-	-	1.72	-	
217	296	-	0.47	-	-	-	
217	288	-	-	1.80	-	-	
217	260*	-	-	-	-	-	기본 주철*

\*기본 주철의 화학 조성; 3.30%C, 2.00%Si, 0.95%Mn, 0.03%S, 0.11%P

안정화 특성에 강력하게 반대로 작용하기 때문에 이것은 예측되는 사실이다. 니켈은 이와 같은 점에서 규소와 비슷하다. 주석을 합금 원소로 첨가한 회주철을 시험해보면, 그 결과는 크롬을 첨가한 경우와 비슷할 것이다. 크롬과 달리, 주석은 탄화물 형성 원소는 아니다.

고온에서 긴 시간동안 노출된 회주철의 내열성에 관련된 또 다른 인자는 펄라이트 내의 탄화물 상의 흑연화에 의하여 부분적으로 야기되는 성장이다. 크롬과 몰리브덴을 함께 첨가하면 이와 같은 성장 문제를 최소화하는데 잘 작용한다. 예를 들면, 반복된 가열과 냉각 사이클을 포함하여, 538~927°C의 온도 범위에서 장 시간 노출시키는 시험에서 탄소 당량 3.80%의 비합금 주철은 약 3.5%의 성장을 나타낸다. 동일한 기본 조성

에 0.50%의 크롬을 첨가한 주철의 경우에는 동일한 열처리 사이클동안 0.80%만 성장이 일어난다. 크롬 주철에 0.5%의 몰리브덴을 더 첨가하면 동일한 처리를 하는 동안 0.50% 이하로 성장이 감소한다.

이와 같은 점에서 일반적으로 관심을 끄는 것은 동일한 경도 수준으로 어닐링한 회주철의 인장 강도에 미치는 합금 원소의 영향이다. 합금 원소를 첨가하지 않은 기본 주철은 260 MPa(37,000 psi)의 인장 강도와 함께 217의 경도값을 나타낸다. - 이것은 몰리브덴과 바나듐을 첨가한 합금 주철보다 거의 69 MPa(10,000 psi) 정도 더 낮다. Table 5에서 보이는 바와 같은 모든 주철의 미세 조직은 펄라이트 기지에 A 형태의 편상 흑연으로 되어있다. 주철을 적당하게 집중하였기 때문에 초

정 탄화물은 존재하지 않는다.

Table 5로부터 주어진 경도 값에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 어떤 합금 회주철도 동일한 탄소 당량의 비합금 주철보다 강도가 더 높다.
2. 몰리브덴과 바나듐 또는 몰리브덴과 크롬의 첨가로 최대 강도를 가지는 회주철을 얻는다.

### 2.5 경화능에 미치는 영향

열처리한 주철의 경화능이 더 큰 것이 회주철 중의 합금 원소에 의하여 현저하게 영향을 받는 또 다른 특성이다. 주철의 경화능이란 적절한 열처리로 얻을 수 있는 최대 경도를 나타내는 것은 아니다. 그 대신에, 경화가 일어나는 깊이, 또는 주어진 냉각 조건에서 주어진 최소 경도 값으로 경화시킬 수 있는 단면의 크기를 나타낸다. 주철의 기지 조직의 최대 경도는 주로 퀀칭(급냉)하기 전 오스테나이트 내에 녹아 있는 탄소에 따라 달라진다. 반면에, 경화능은 탄소 함량보다는 합금 원소의 함량과 오스테나이트 결정립 크기에 더 의존한다.

예를 들면, 직경 100 mm의, 합금 원소를 첨가하지 않은 회주철 봉을 약 817~885°C로 가열하고 물에 퀀칭하면, 표면 경도는 로크웰 C 경도로 약 50일 것이다. 이 봉재의 중심부에서는 로크웰 C 경도로 28 정도 밖에 안된다. 동일한 주철에 크롬, 니켈 몰리브덴과 같은 합금 원소를 첨가하고 817°C로부터 퀀칭하면, 표면 경도는 합금 원소를 첨가하지 않은 주철과 마찬가지로 동일하다. 그러나, 합금 원소 첨가량에 따라서, 봉재의 중심부에서의 경도는 로크웰 C 경도로 35~50 정도가 될 수 있다. 다시 말하면, 합금 원소는 봉재의 표면으로부터 중심으로 경도 깊이를 증가시킨다.

경화능을 증가시키기 위하여 회주철에 보통 첨가하는 여러 가지 합금 원소로는 크롬, 몰리브덴, 바나듐, 망간, 구리 및 니켈이 있다. 회주철 내에 항상 존재하는, 규소도 또한, 비록 이와 같은 목적으로 보통 첨가하지는 않지만, 어느 정도 주철의 경화능을 증가시킨다.

합금 원소 중, 크롬, 바나듐, 몰리브덴, 그리고 망간은 쉽게 탄소와 결합한다. 이와 같은 일이 경우에는, 각 합금 원소의 경화능에 기여하는 것은 탄화물로 존재하지 않은 부분만큼으로 제한된다. 예를 들면, 경화능을 증가시키기 위하여 0.50%의 크롬을 주철에 첨가하고 그 중 0.35%가 크롬 탄화물로 결합된다면, 0.15%의 크롬만 경화능에 기여할 것이다. 이것이 열처리로 경화시킬 회주철의 경우 집중이 중요한 한 가지 이유이다.

앞에서 이미 언급한 바와 같이, 회주철을 적절하게 집중 처리하면, 특히 얇은 단면의 주물에서, 주방 상태의 탄화물을 최소화할 수 있다.

니켈과 구리는 크롬, 바나듐, 망간 및 몰리브덴의 탄화물을 형성하는 경향에 반대로 작용하는 잇점이 있다는 것을 앞에서 이미 언급하였다. 니켈과 구리는 열처리로 경화시킬 합금 주철에 효과적으로 사용할 수 있다. 더욱이, 탄화물 형성을 억제시키는 효과뿐만 아니라 경화능에 영향을 미치는 잇점을 활용하기 위하여 주철의 규소 함량을 증가시킬 수 있다.

크롬, 바나듐 및 몰리브덴이 회주철의 경화능을 향상시키기

위한 잠재력이 가장 큰 합금 원소이다. 그러나, 다른 합금 원소와 함께 첨가하였을 때, 주어진 경화능 값을 경제적으로 달성할 수 있으므로 전체 합금 원소의 양이 더 적게 필요하기 때문에 이와 같은 합금 원소를 단독으로는 거의 사용하지 않는다. 탄화물 형성을 최소화하고 주철 내에 최대 고용도를 얻기 위하여, 대부분의 경우 바나듐, 크롬 및 몰리브덴과 함께 소량의 니켈과/또는 구리(0.25~0.60%)를 첨가한다.

### 2.6 내마모성에 미치는 영향

아마도, 회주철의 전체 내마모성을 개선하기 위한 가장 효과적인 합금 원소는 크롬, 바나듐, 몰리브덴 및 주석일 것이다. 각각의 경우 요구 조건이 다른, 마모가 결부된 다양한 응용 분야가 있다. 따라서, 마모 저항을 한 가지의 비교 시험이나 실제 수치의 값으로 나타낼 수는 없다. 회주철의 마모 저항은 미세 조직에 따라 크게 달라진다는 것은 잘 알려져 있다. 경도, 강도, 충격 저항 및 부식 저항과 같은 다른 성질도 또한 회주철의 마모 저항에 영향을 미치는 인자이다. 그러나 미세 조직보다는 그 영향이 더 작다.

비록 경도가 회주철의 마모 저항에 영향을 미치는 중요한 성질이기는 하지만, 모든 마모 저항이 필요한 응용 분야에 대하여 경도가 가장 큰 회주철이 가장 좋다는 것을 의미하지는 않는다. Sefing이 1946 년 AFS Transactions에 발표한, 회주철 마모 저항(Gray Iron Wear Resistance)이라는 제목의 논문에서는, 실린더 라이너, 피스톤 링 및 공작 기계 웨이(way)와 같은, 금속-과-금속 마모 저항에 관한 여러 가지 주방 상태의 주철의 시험 결과를 보여주고 있다. Sefing은 미세한 펄라이트와 미세한 페라이트 기지에 A 형태의 흑연이 균일하게 분포된 회주철이 이와 같은 적용 분야에 가장 좋은 조직이라는 결론을 얻었다. 회주철의 경도는 약 200 HB였다. 경도가 더 높고 다양한 양의 - 극히 경도가 높은 구성 요소인 - 세멘타이트를 함유하고 있는 주방 상태의 회주철은 위에서 언급한 주철보다 나빴다.

다양한 양의 페라이트 및/또는 펄라이트를 함유하고 있는, 더 연한 주철도 또한 더 나빴다.

미세한 펄라이트 조직과 적당한 흑연 형태, 크기 및 분포를 확실하게 얻기 위하여, 합금 원소를 첨가하는 것이 바람직하다. 미세한 펄라이트 기지의 형성을 선호하는 합금 원소는, 자주 니켈 및/또는 구리와 함께 첨가하는, 크롬, 몰리브덴, 바나듐 및 주석이다. 한 가지의 적당한 집중체로 적당하게 집중하는 것이 적당한 흑연 형태, 크기 및 분포를 확실하게 얻는데 도움이 된다.

### 2.7 충격 강도에 미치는 영향

회주철의 저온 충격 저항이 합금 원소를 적당하게 사용하여 개선시킬 수 있는 또 다른 성질이다. 충격 강도는 하중이 갑자기 걸렸을 때 파괴에 대한 재료가 저항하는 능력에 대한 척도이다. 편상 흑연은 노치(notch)와 같은 효과가 있기 때문에, 회주철의 충격 강도는 지극히 제한된다. 모든 합금 원소는 회주철의 저온 충격 저항을 개선하는데 효과적이라고 할 수 있다. 몰리브덴, 구리 및 바나듐의 조합이(주철 내에 완전히 녹아

들어가면) 충격이 걸리는 적용 분야에 가장 효과가 좋다. 그런 경우에 조차도, 회주철의 충격 강도는 너무 낮아서 이 재료의 연·전성은 일반적으로 특성으로 간주하지 않는다.

**2.8 경도에 미치는 영향**

회주철에서 합금 원소를 사용하여 얻는 최종적인 잇점은 합금 원소를 첨가하지 않은 주철에 비하여 경도가 증가하는 것과 관계가 있다. 주방 상태에서 경도를 증가시키기 위하여 회주철에 첨가하는 일반적인 합금 원소는 몰리브덴, 크롬, 바나듐, 구리, 니켈 및 주석이다. 때에 따라서는, 이와 같은 합금 원소는 주철에 단독으로 첨가한다. 그러나, 상호 보완적인 효과로 인하여 합금 원소를 조합하여 첨가하는 것이 일반적이다. 원하는 목적을 달성하기 위하여 충분한 양의 합금 원소를 단독으로 첨가하는 것보다 합금 원소를 조합하여 첨가하는 것이 보통 더 경제적이다.

주방 상태의 회주철의 경도에 미치는 각 합금 원소의 영향은 Table 6에서 보이는 바와 같다. 이 값들은 생형에서 주조한 직경 30.5 mm의 시험 봉재로부터 얻었다. 주철의 화학 조성은 3.35%C, 2.10%Si, 0.65%Mn, 0.08%S 및 0.06%P였다. 1454°C에서 주철 용탕을 정중 처리하고 주입하였다. 주방 상태의 미세 조직은 펄라이트 기지내에 A 형태의 크기 5의 흑연으로 되어 있었다. 모든 경우에, 합금 원소 첨가량이 증가함에 따라, 펄라이트의 층간 거리가 더 미세해졌다. 이것은 표에서 보이는 바와 같은 경도 값으로 반영된다. 어느 주철에도

Table 6. 합금 원소 첨가에 따른 주방 상태 회주철의 브리넬 경도 변화

합금 원소	첨가량, wt%				비고
	0	0.10	0.50	1.00	
몰리브덴	205	210	230	255	
크롬	205	209	225	245	
바나듐	205	215	255	-	
구리	205	206	210	215	
니켈	205	207	211	217	
주석	205	225	-	-	

\*생형 주조한 직경 305 mm의 시험봉

공정 탄화물은 나타나지 않았으며, 이것은 정중 처리하여 적당하게 핵생성 되었다는 것을 가리킨다.

Table 6에서, 탄소 당량 4.0%의 회주철의 정도에 미치는 여러 가지 합금 원소의 조합의 영향을 보여준다. 단독으로 첨가하였는지, 또는 조합으로 첨가하였는지 간에, 합금 원소를 첨가한 모든 경우에 회주철의 주방 상태의 경도가 증가하였다. 합금 원소를 첨가하지 않은 주철에 비하여 합금 원소를 첨가하면 주방 상태의 경도 값이 증가하는 이유는 다음과 같다:

1. 펄라이트의 층간 거리의 감소(더 미세한 펄라이트)
2. 편상 흑연 크기의 감소
3. 펄라이트 중 페라이트 부분의 고용 경화