

球狀黑鉛鑄鐵의 強靱化方法 (Austemper 處理를 中心으로)

金錫元*

1. 序 論

현재 제조되는 구상흑연주철은 제조방법 즉, 화학 성분이나鑄造條件 및 熱處理方法에 따라 基體組織이 연성이 가장 큰 ferrite, 경도가 높고 내마모성이 좋은 martensite, 또는 그 중간의 성질인 二相混合組織을 갖는 구상흑연주철등 여러종류의 구상흑연주철이 있다. 구상흑연주철을 強靱化 한다는 것은 기저조직을 Bainite 조직 또는 austenite - bainite, ferrite 등 二相혼합조직으로하여 引張強度가 높은 구상흑연주철을 제조하는 것이다. 이와 같이 기계적 성질을 향상시킴으로써 지금까지 특수강이나 단조품에 한정되어 사용되던 부품에도 적용할 수 있어 구상흑연주철의 용도가 다양화 될 것이다. Bainite 조직은 pearlite와 martensite의 中間的 恒溫變態組織으로 두 조직이 갖는 성질과는 전혀 다른 우수한 성질을 갖게 된다. 구상흑연주철의 강인화 하는 방법은 크게 두가지 방법으로 구분하여 생각할 수 있다.

첫째 : 합금설계에 의한 강인화

둘째 : 열처리에 의한 강인화

여기에서는 구상흑연주철의 강인화 방법중에서 austemper 처리로 기저조직을 bainite化 또는 bainite + austenite로 변태시키는 강인화 방법의 理論 및 실제로 각공장에서 적용할 수 있는 기술에 대해서 소개하기로 한다.

2. Austemper 變態

구상흑연주철의 기본적인 열처리 이론은 그림 1의 항온변태도에 의해서 알 수 있다. 구상흑연주철을

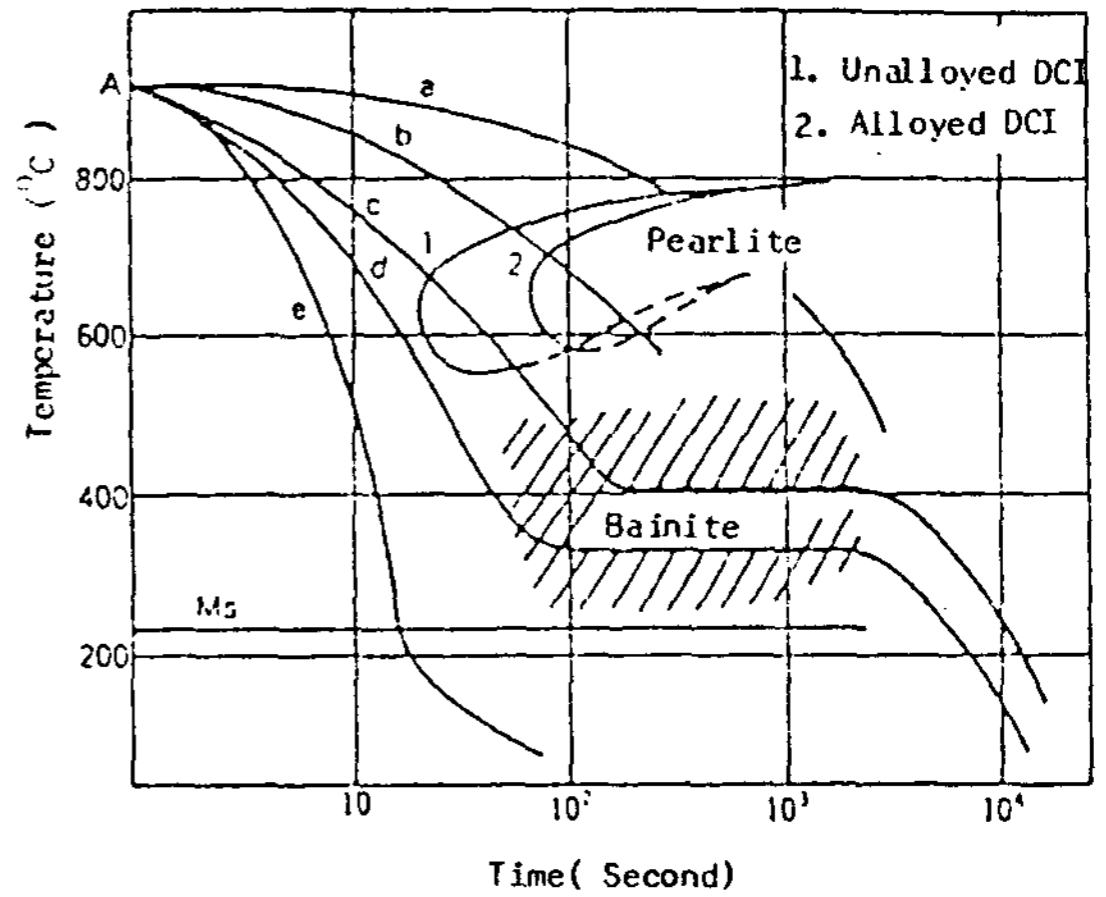


그림 1. 구상흑연주철의 항온변태도.

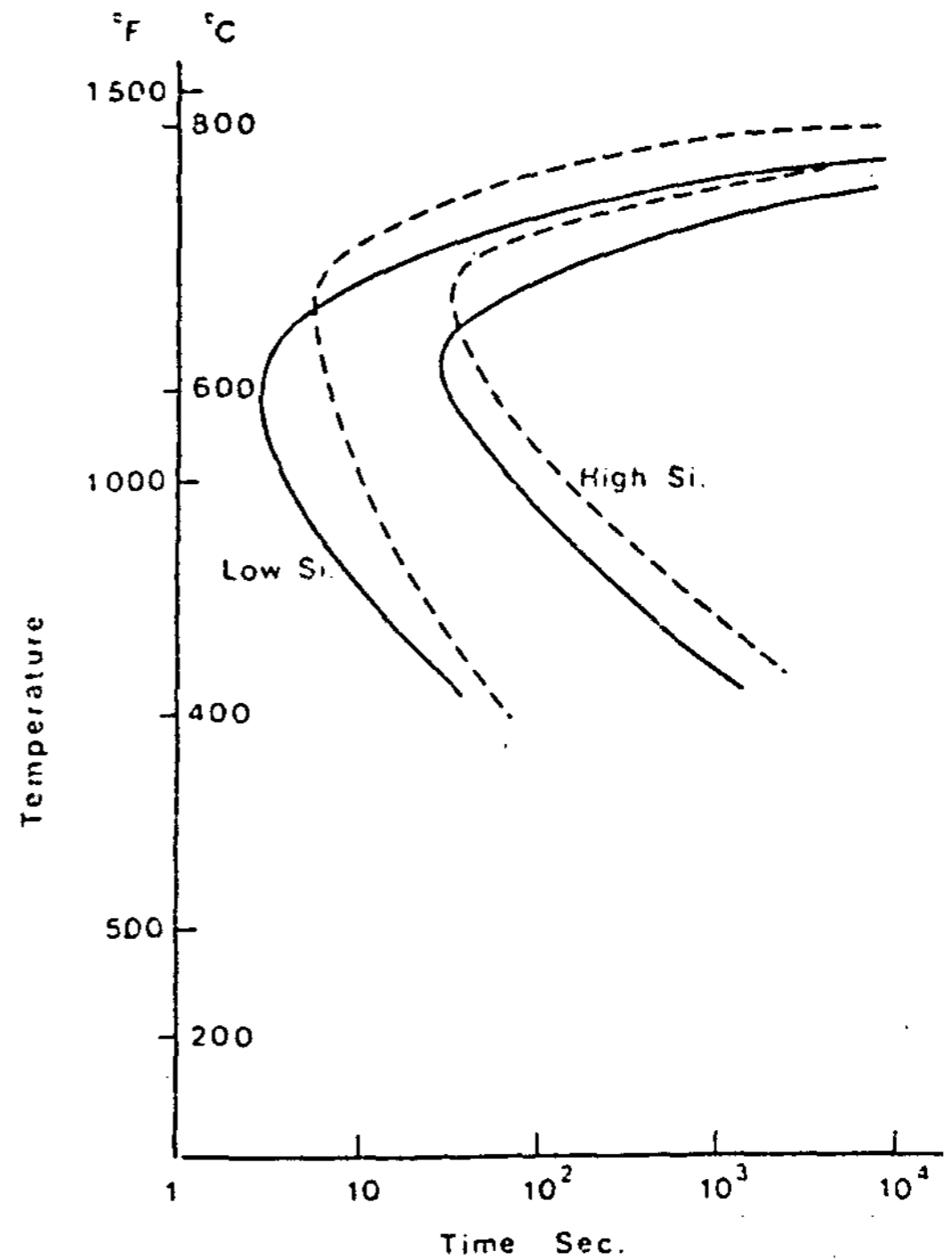


그림 2. 항온변태도에 미치는 Si의 영향 (Low: 2.0%, High: 4.0%)

* 全北大學校 工科大學 金屬工學科 助教授

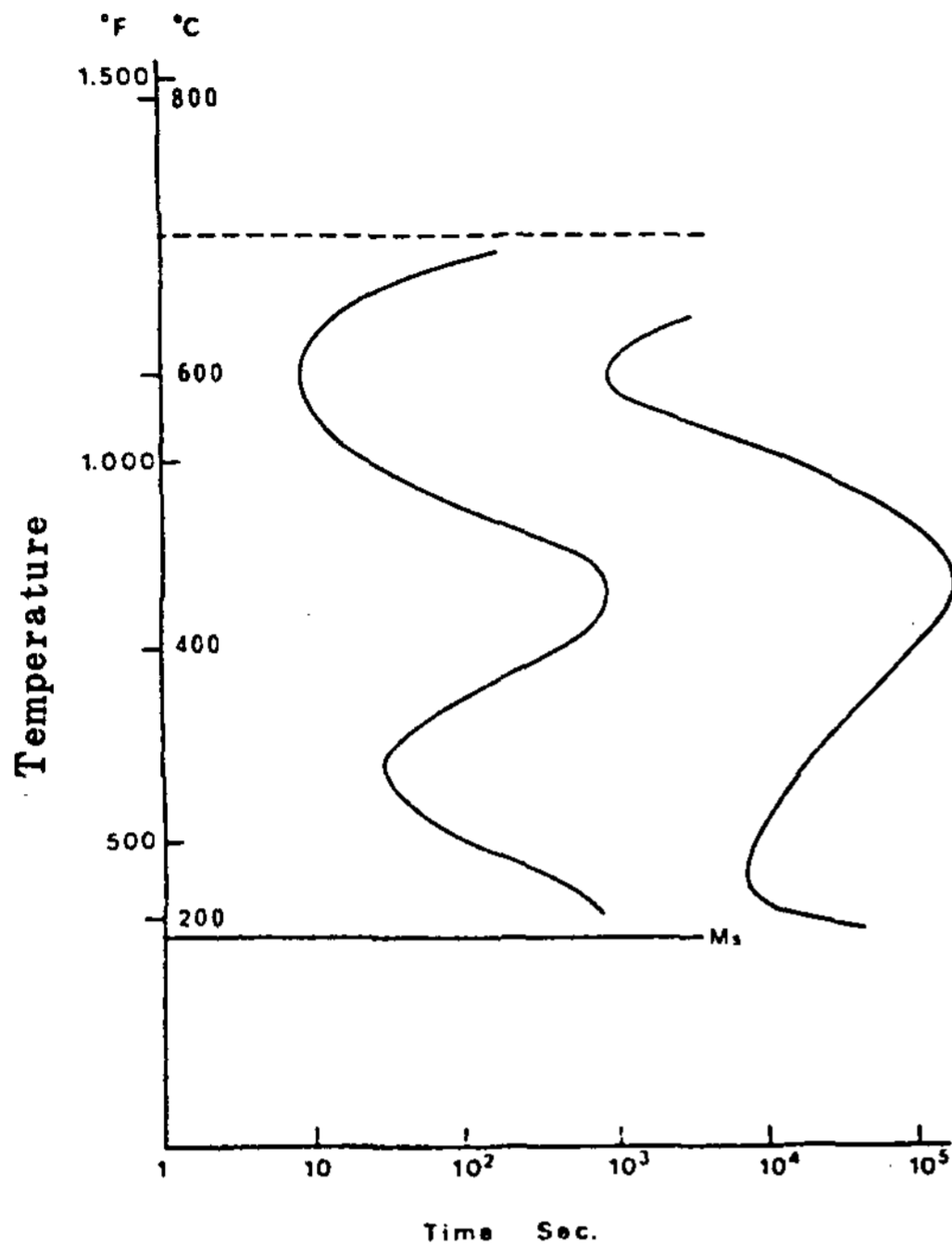


그림 3. Ni-Mo 합금 구상흑연주철의 항온변태도. (Ni: 2.0%, Mo: 0.65%)

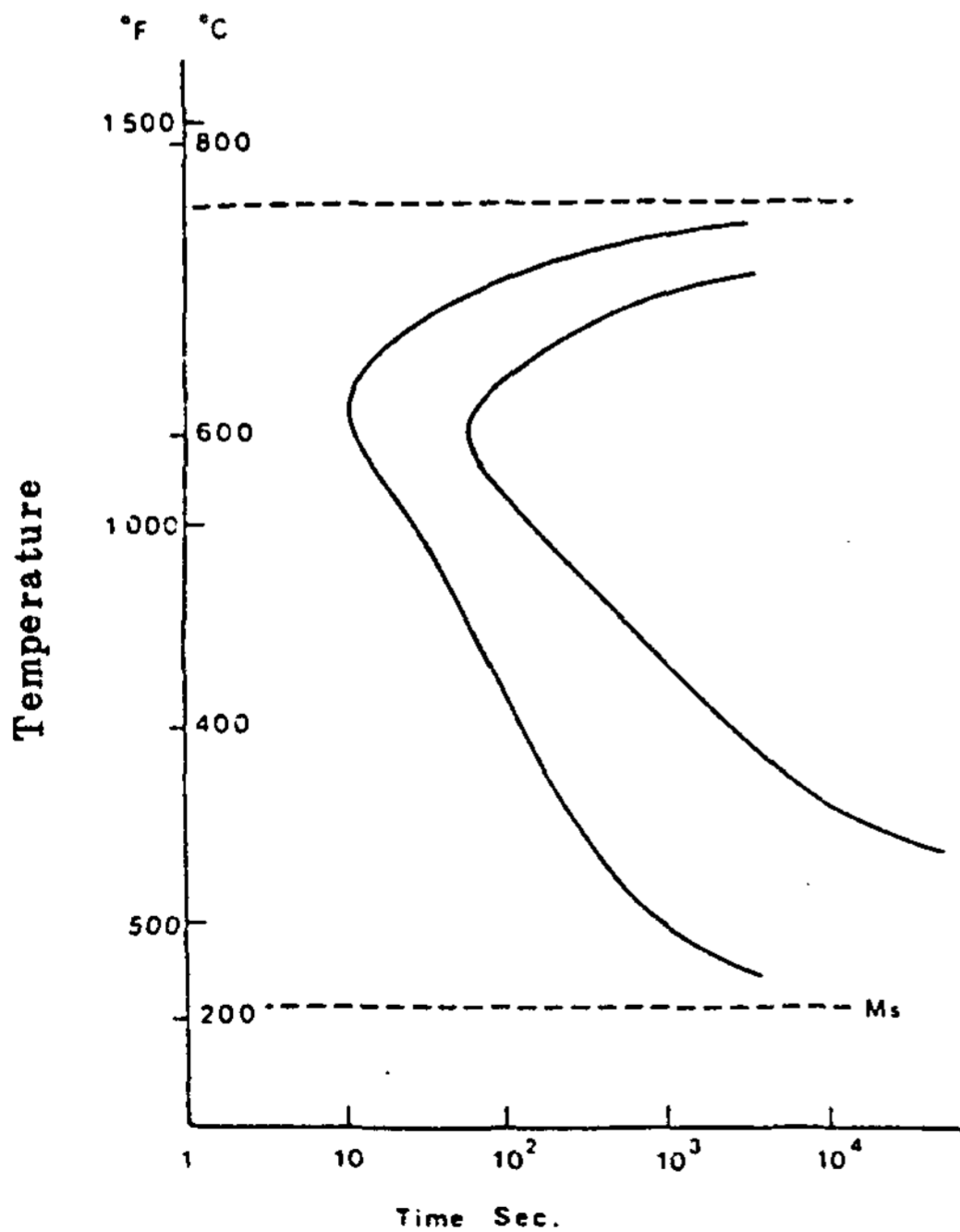


그림 4. 합금원소가 첨가되지 않은 구상흑연주철의 항온변태도.

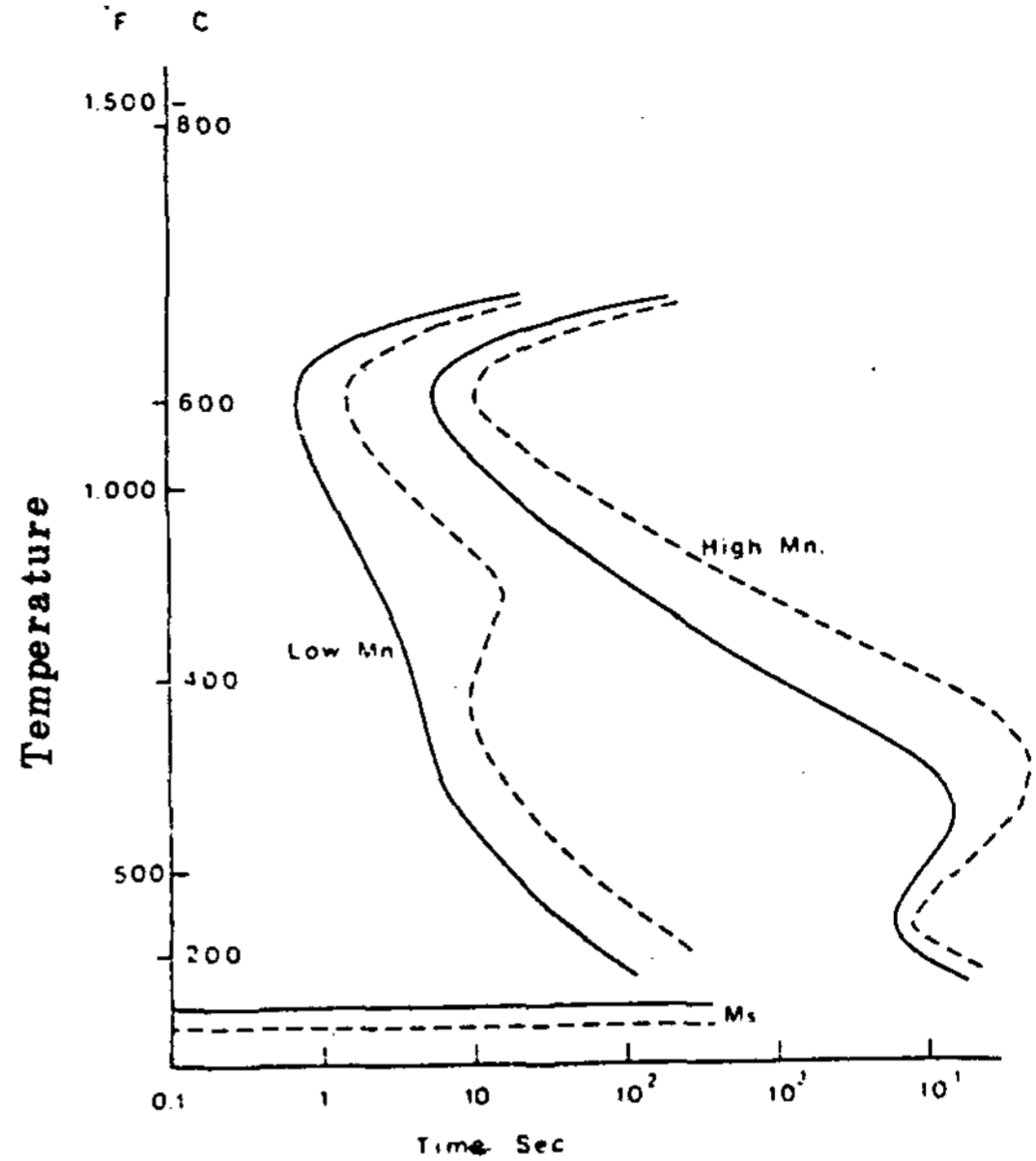


그림 5. 항온변태도에 미치는 Mn의 영향 (Low: 0.2%, High: 1.0%)

800°C 이상인 austenite 化 온도구역까지 가열시킨 후 상온까지 냉각시키는 변태경로에 따라서 각종의 기지조직이 얻어지고 그 성질도 다양하게 변화된다. 그림 2, 3, 4, 5는 화학성분이 다른 구상흑연주철의 항온변태곡선 들이다.

냉각속도에 따라서 서로 다른 조직이 얻어지는 원인은 구상흑연주철을 austenite 化 구역까지 온도를 상승시키면 구상흑연 内에 있던 탄소들이 基地中, 즉 Austenite 에 擴散되고 이것을 徐冷시키면 기지조직에 확산되어있던 炭素濃度가 저하 됨에 따라 熔解度가 감소되어 ferrite 가 되고 중간정도의 冷却速度로 서냉하면 탄소의 일부가 잔류하여 pearlite 가 되고 급냉하면 martensite 로 변태된다. 그러나 martensite 변태 개시점 (Ms) 보다 높고 pearlite 변태 구역 보다 낮은 온도 구역에 급냉시킨 다음 이 온도에서 일정시간 항온 유지시킨 후 공냉 또는 수냉시키면 Bainite 의 기지조직을 얻을 수 있다. 이러한 항온변태를 이용하여 bainite 조직 또는 bainite 를 포함한 二相混合組織을 얻는 열처리 방법을 austemper라고 하고 이 변태를 austemper 변태라고 한다. 구상흑연주철의 austemper 처리는 강재의 경우와 기본적으로 같지만 다음과 같이 서로 다른 점이 있다.

첫째 : 구상흑연주철은 多量の 탄소를 함유하고 있고 이 탄소가 대부분 흑연 형태로 존재하고 있다. 이 흑연이 austenite 구역에서 가열되는 동안 탄소는 기지조직인 austenite 에 확산되어 이 확산된 탄소량은 항온변태에 영향을 미친다.

둘째 : 구상흑연주철은 강에 비하여 結晶粒이 粗大化하지 않기 때문에 austenite 化 온도범위가 고온에서도 가능하며 비교적 짧은 시간으로 탄소가 포화상태에 이른다.

그림 1. 에서 a와 b의 냉각곡선은 austenite 구역에서 서냉시킬때 pearlite 가 생성되고 c와 d의 곡선은 중간 정도의 냉각 속도 이므로 pearlite 변태 구역을 지나 bainite 변태구역에 들어가므로 이 온도에서 일정시간 유지하면 針狀의 ferrite 가 austenite 로부터 析出 成長하여 소위 bainite 조직으로 변태된다. 곡선 e는 急冷되므로 martensite 가 生成된다.

2-1. Austenite 化의 溫度와 時間

austemper 처리의 제 1 단계는 재료를 austenite 化하기 위하여 austenite 변태구역까지 가열시켜야 된다. 그림 1. 에서 보는 바와 같이 austenite 化하기 위하여 온도를 높게 하면 단시간 內에 austenite 化 하지만 austenite 에 固溶되는 고용 탄소량이 증가하므로 toughness 가 요구되는 경우에는 austenite 化 온도가 낮은 쪽이 바람직 하다. 이런 이유로 고온에서 장시간 가열하면 기계적 성질, 특히 연성, 충격인성이 저하된다. 그러나 재료 중에 잔류 탄화물이 존재하여 분해시킬 필요가 있을 경우 특별히 고온에서 가열하여 austenite 중의 탄소 고용량을 높게하면 비교적 저온에서 austemper 처리 하여도 상부 bainite 가 생긴다. 이 austenite 化 온도는 재료의 성분 에 따라서 다르지만 850℃~950℃의 온도가 적당하고 合金元素를 첨가하지 않는 경우는 900℃ 이상이 필요하며 合金成分이 첨가됨에 따라 austenite 化 溫度는 저하된다. Austenite 化 온도에 크게 영향을 미치는 원소로써 Si 가 있으며 2.5% Si 이상의 高 Si 의 경우에는 下限溫度가 880℃이고 보통은 900℃정도이다. austenite 化 온도에서 維持時間

은 1" 당 1시간 정도이며 austenite 化 하기 위한 열처리로는 주방상태의 제품은 보통 가열로를 사용하지만 가공이 끝난 완성품인 경우에는 酸化를 방지하기 위하여 분위기 로에서 가열하여야 한다.

2 - 2. 鹽浴의 溫度와 恆溫維持時間

열처리를 하고자 하는 주조품이 필요로 하는 조직이나 기계적 성질 등에 따라 염욕의 온도, 항온 유지시간을 서로 절충하여 austemper 처리하는 것이 바람직하다. 염욕의 온도 차이에 따라 얻어지는 기지조직은 달라지며 기계적 성질 또한 크게 다르기 때문에 합금원소 첨가의 유무, 재료의 두께 등도 충분히 고려하여 온도와 유지시간을 결정하여야 한다.

표 1. 은 900℃에서 1시간의 austenite 化 후 서로 다른 염욕온도에서 1시간 유지시킨 경우 상온에서 나타난 기지조직을 설명하였다.

표 1. 조직에 미치는 염욕온도의 영향

| 염욕온도℃ | 기 지 온 도 |
|----------|--|
| 300~350℃ | 가늘고 긴 침상의 하부 bainite로 치밀한 조직 |
| 350~375℃ | bainite 침상이 약간 둔화되고 잔류 austenite 가 증가됨 |
| 400~430℃ | bainite 가 조대화 되어있고 우모상의 상부 bainite 가됨 |
| 430~460℃ | troostite가 생성 |

(시편 : GCD45:3.8% C - 2.8% Si - 0.3% Mn - 0.019% S - 0.042% Mg)

300℃-350℃의 저온역에서 austemper 처리 하면 인장강도가 130 kg/mm² 정도를 나타내며 경도는 높지만 연신율, 충격치는 저하된다. 350℃-375℃의 중간 온도에서는 인장강도 100 kg/mm² 이며 연신율은 10% 이상이고 충격치는 ferrite 化 소둔한 경우와 거의 같게된다. 염욕온도가 400℃를 넘으면 강도는 다시 증가하고 연신율, 충격치는 저하한다. Austemper 처리된 구상흑연주철의 기지조직은 침상 또는 판상의 Ferrite (bainite)와 austenite 의 미세한 2상혼합 조직으로써 austenite 와 ferrite 의 부피분율이 변태온도나 시간등의 austemper 조건에 따라서 크게

변화한다. 이러한 결과를 종합하여 보면 인성(연신율10%이상)을 동시에 만족하는 적합한 표준 열처리조건은 350°C에서 1시간정도 항온처리하는 것이 효과적 일 것이다. 그림 6. 은 표1에서 사용한 재료를 각기 다른 austenite 化 온도에서 1시간 유지한 후 서로 다른 온도의 열처리에서 1시간 항온변태시켰을때에 기계적 성질이 어떻게 변화 되는지를 나타냈다.

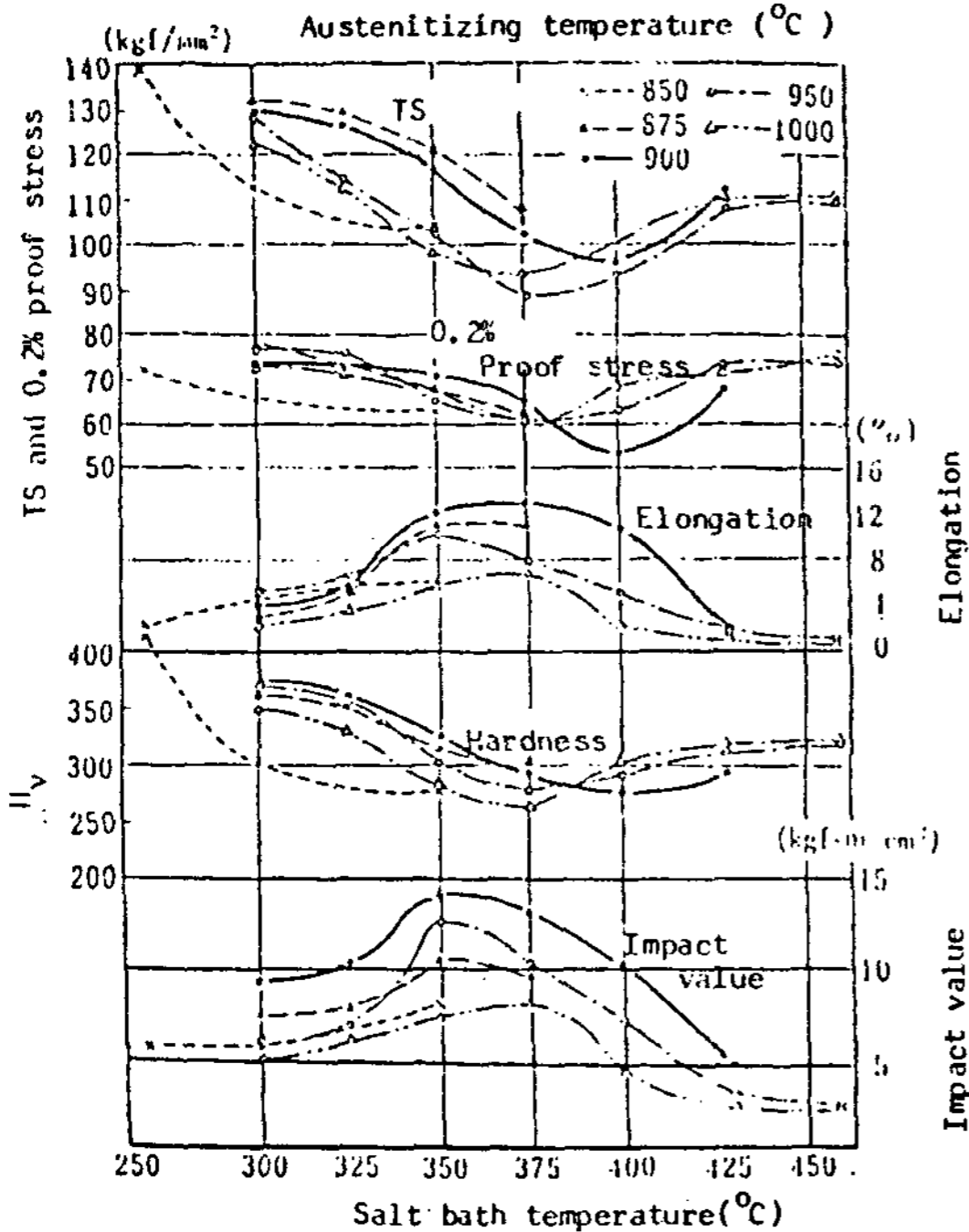


그림 6. GCD 45의 기계적 성질에 미치는 열처리 온도의 영향 (3.8% C-2.8% Si-0.3% Mn-0.019% S-0.042% Mg)

3. Bainite 化에 미치는 두께의 影響

鹽川 忠의 실험결과에 의하면 합금원소가 첨가되지 않을 GCD 50의 경우에 同一 austemper처리를하면 직경이 50mm는 bainite 변태를 일으키지 않고 pearlite (sorbite) 조직으로 되며 두께가 적어짐에 따라서 bainite 조직으로 변태되어 직경 20mm에서는 완전한 bainite 기지조직을 얻을 수 있었다. 이와같이 중심부까지 bainite 化 하는데는 두께의 한계가 있다. 따라서 두께가 큰 제품은 냉각방법을 검토하든지 합금성분을 사용하든지 검토하여야 한다.

4. Bainite 化에 미치는 添加元素의 影響

항온 변태온도나 유지시간이 부적당 할때 완전히 Bainite로 변태되지 않고 일부 pearlite로 변태되는 부분이 있으면 인성이 저하된다. 그림 7. 은 아직 변태되지 않은 pearlite가 증가함에 따라서 충격치와 연신율이 저하되고 있음을 알 수 있다. 이러한 인성의 저하를 방지키 위해서는 austemper처리가 용이하도록 合金元素를 첨가할 필요가 있다.

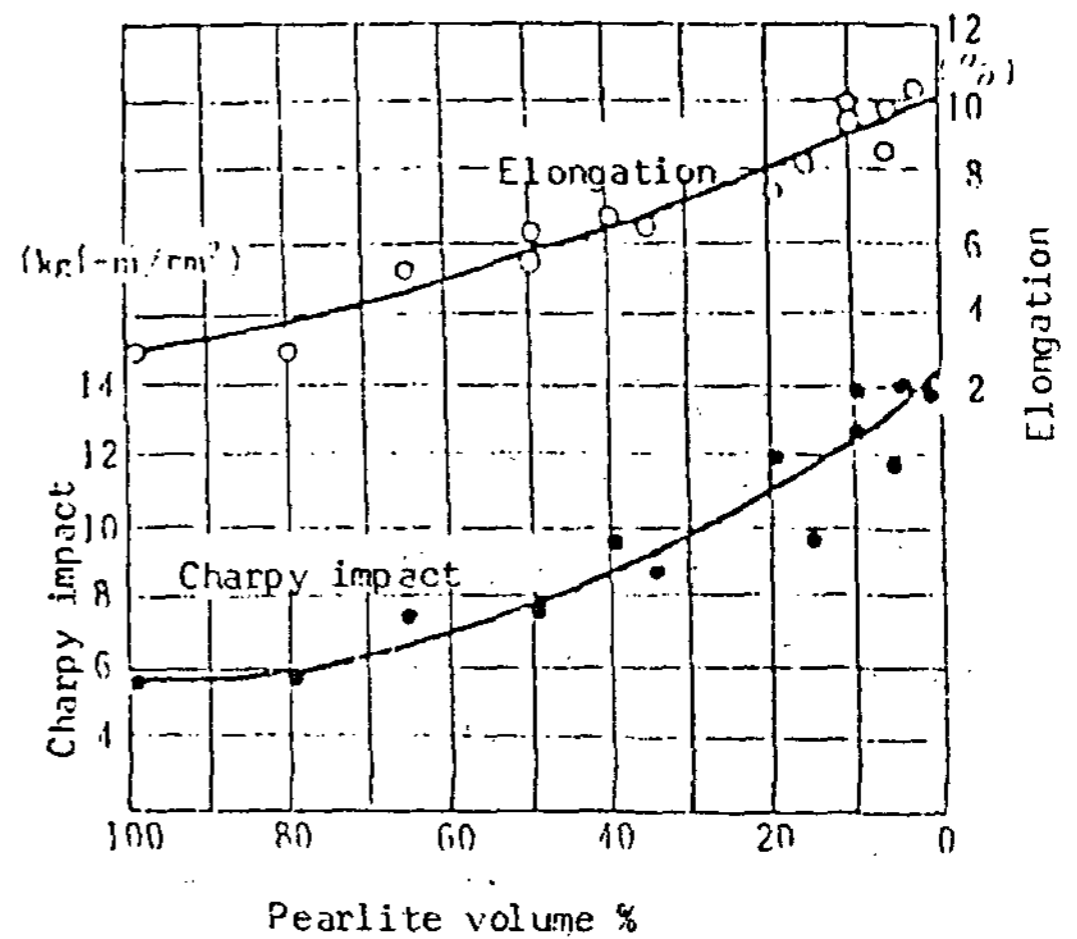


그림 7. 충격치에 미치는 기지조직내의 Pearlite 양 (%)의 영향

물론 대상품의 용도에 따라서는 반드시 中心部까지 Bainite 조직이 필요없고 표면으로부터 어느깊이까지 Bainte 조직이 되면 충분할 경우가 있다. 예를들면 압연용 roll과 같은 제품들 이다. 반대로 두께가 두꺼울 경우에는 전체적으로 bainite 化가 필요하면 Bainite 변태구역을 넓혀주고 austenite 化를 용이하게 하는 합금원소를 선택하여 첨가하는 것이 바람직하다.

그림 8. 은 연속냉각 과정중 austenite 분해에 미치는 합금원소들의 영향을 나타냈다.

Bainite 化의 촉진원소로서는 Mo, Ni, Cu, Sn, Mn, 등이 있으며 특히 Mo, Ni는 bainite 化에 현저하게 영향을 미친다. 그림 9, 10에 Mo, Ni의 원소가 CCT 곡선에 미치는 영향을 나타내고 있다.

상기의 bainite 化 촉진 원소들은 CCT곡선에서 알 수 있듯이 pearlite 변태구역을 우측으로 이동시키므

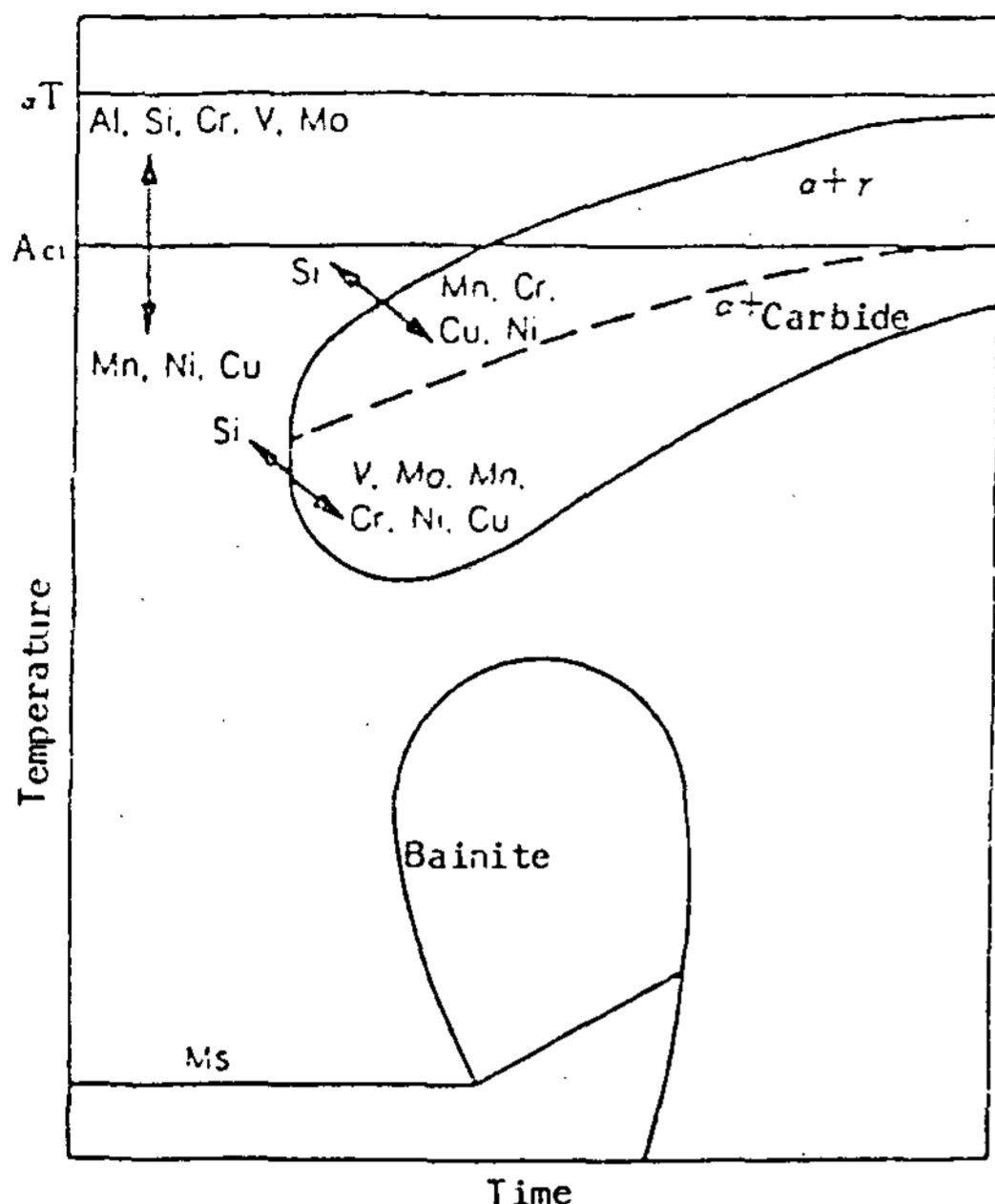


그림 8. 연속냉각 과정중 austenite 분해에 미치는 합금원소의 영향

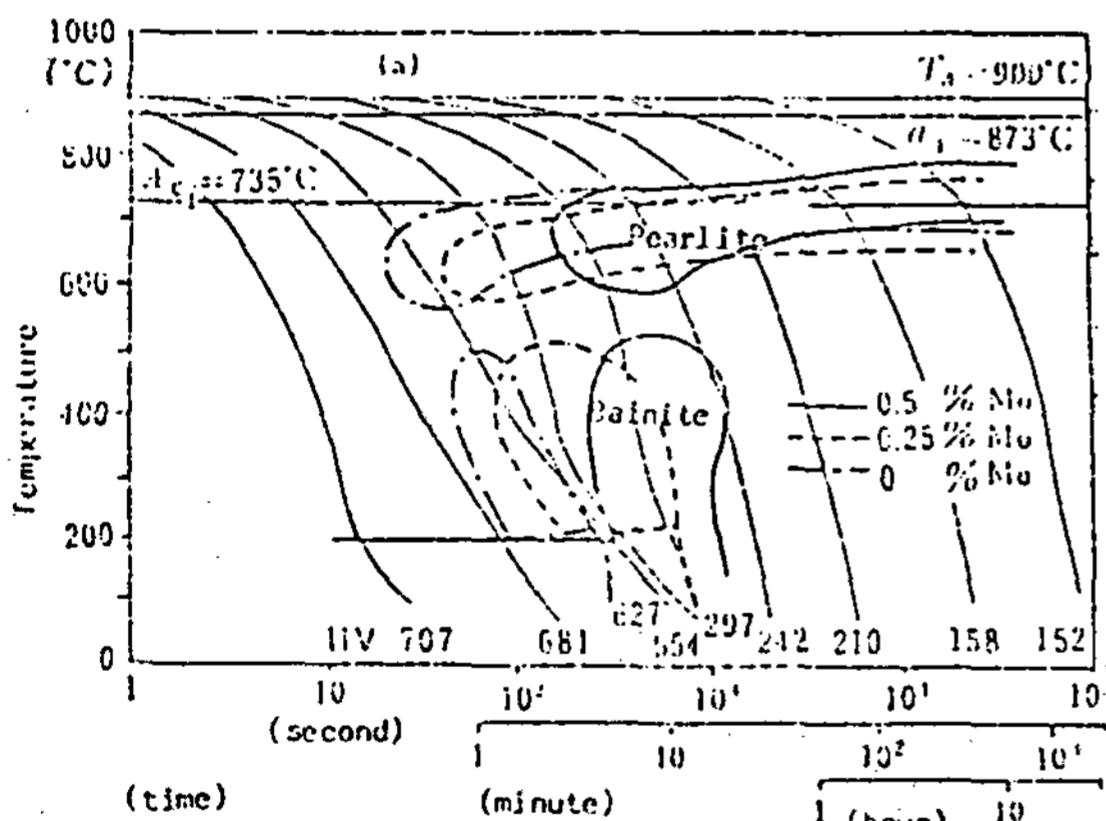


그림 9. 항온변태곡선에 미치는 Mo의 영향 (3.3% C-2.6% Si-0.3% Mn)

로 냉각속도가 적은경우에도 pearlite로 변태되지 않고 bainite 조직을 쉽게 얻을 수 있어 austemper 처리가 용이해진다. 이들 합금원소의 첨가는 단독 또는 복합첨가 방법이 있다. 합금원소 중 특히 소입 경화능이 있는 Mo을 Ni 또는 Cu와 함께 첨가하면 효과적이다. 그러나 Mo, Ni 등이 高價인 점을 고려할때 Mn, Sn, Cu, 등으로 대체 사용하여도 된다.

Bainite 화에 미치는 각 성분의 영향을 간략하게 설명한다.

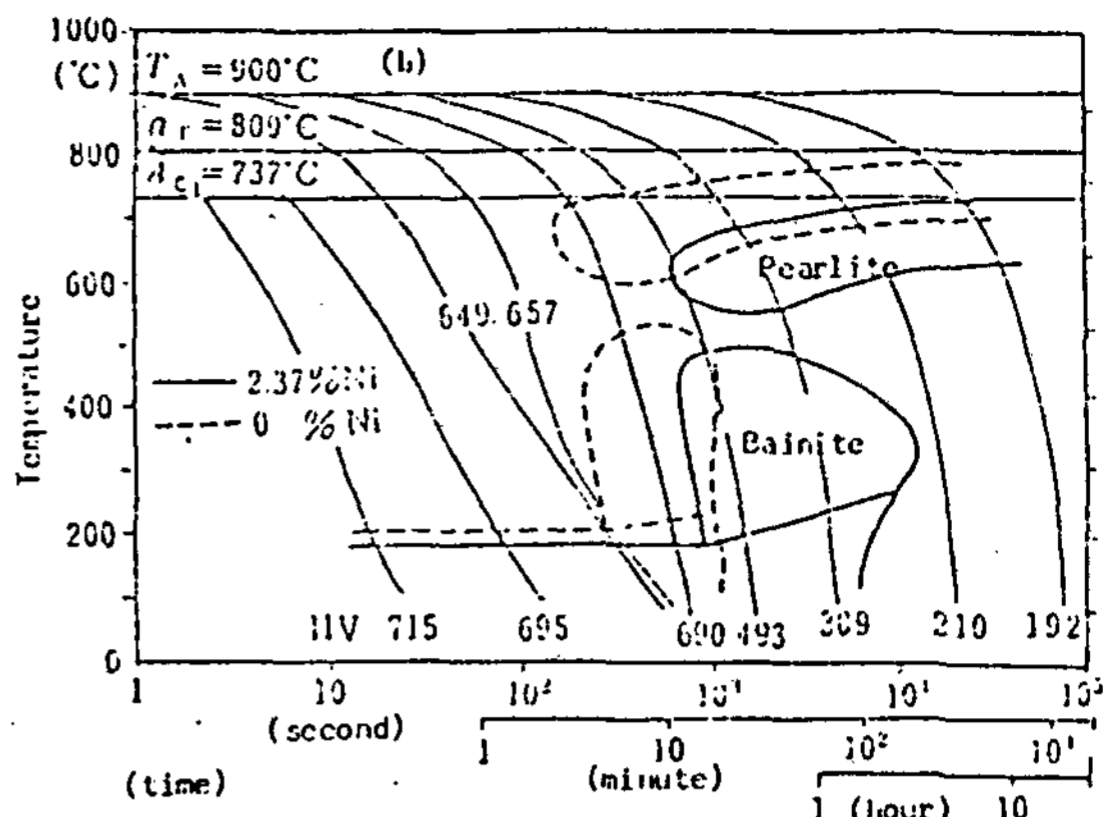


그림 10. 항온변태곡선에 미치는 Ni의 영향 (3.3% C-2.6% Si-0.3% Mn-0.5% Mo)

① Mn : Bainite 化를 촉진하는 효과가 있지만 일반적으로 단독첨가는 좋지않고 다량이면, 인성을 저하시킨다. 그림 11.에 인성에 미치는 Mn의 영향을 나타내었다. Mn의 첨가량의 상한은 0.5%이고 과잉이 되면 최종 응고시 결정입자에 Mn의 편석이 현저하게 되며 조직중에 하얗게 반짝이는 상이 나타나 대단히 硬한 복합 탄화물을 형성하게 되어 취약하게된다. 따라서 양호한 기계적 성질을 얻기 위해서는 될 수 있는 한 Mn을 적게 첨가하여야 한다.

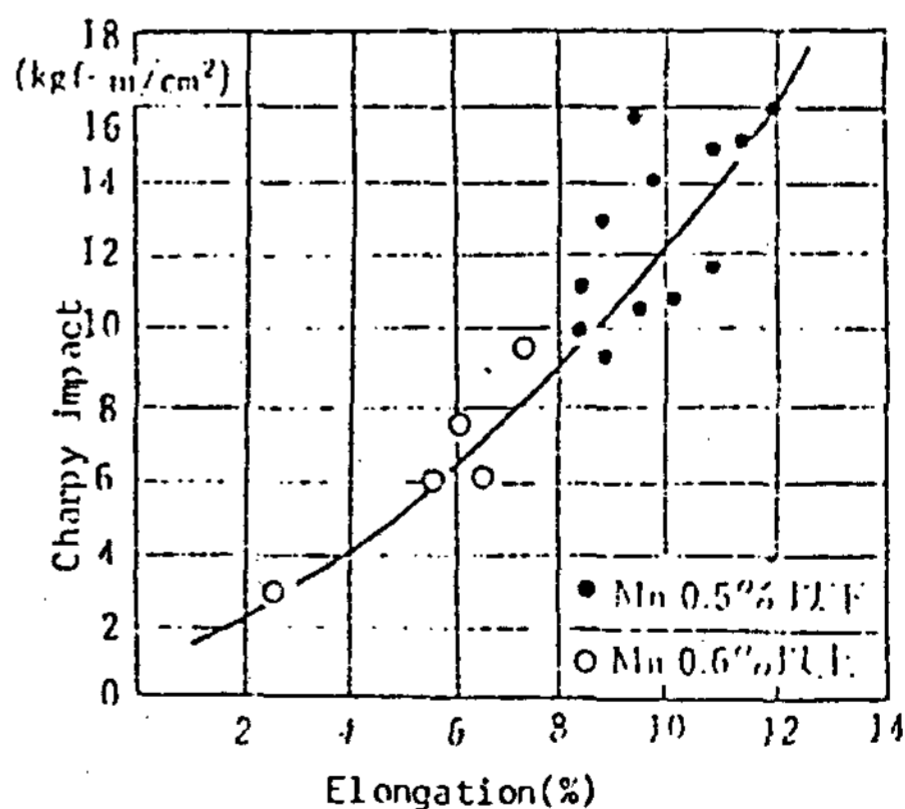


그림 11. 오스템퍼 처리한 구상흑연주철의 인성에 미치는 Mn의 영향

② Cu : Bainite 化에 효과적으로 작용하고 0.6% Cu 이상 첨가된 구상흑연주철은 직경 40mm에서도 中心部까지 bainite로 변태된다. 이경우 0.5% Mo 단독첨가할때에 비해서 0.2% Mo + 0.6% Cu를 복합첨가하면 다수의 미세한 黑鉛粒이 기지에 분포되어

굴곡강도가 현저히 상승하게 된다. Cu는 Mn에 비하여 그다지 편석하는 경향이 적다.

③ Sn: 단독 첨가해서는 효과가 없지만 Mn, Cu 등과 같이 첨가하면 bainite 化에 효과적이거나 0.6~0.7% Cu + 0.4~0.5% Mn + 0.02~0.04% Sn의 3원소 첨가에 의해서 직경 40mm의 두꺼운 주물의 中心部까지 bainite가 가능하다.

④ Mo: 타 합금원소에 비해서 bainite 化에 보다 효과적이다. Mo을 첨가하면 항온변태도에서 pearlite 변태 구역을 우측으로 이동시키므로써 탄소확산에 의한 ferrite의 생성을 억제하는 作用이 비교적 약하기 때문에 Cu와 함께 사용하면 좋다. Mo는 편석을 일으키기가 쉽기 때문에 첨가량은 0.3%정도가 좋다. 그 이상의 Mo의 첨가는 쉽게 편석을 일으키어 기계적 성질이 저하되므로 Ni과 복합 첨가하면 좋다.

⑤ Ni: 단독 첨가는 bainite 化에 영향은 주지 않으므로 Mo 등과 병용하여 첨가하면 좋다.

⑥ Cr: 편석을 일으키며 경도를 증대시킨다. 炭化物의 生成元素이므로 bainite 化에는 부적당하다.

⑦ C, Si: 구상흑연주철 제조의 기본적인 원소이며 Si량이 어느정도 높다할지라도 특별히 austemper 처리에 나쁜영향을 미치지 않으며 오히려 austenite 변태중에 탄화물 생성을 저지하는 作用이 있기때문에 Si 존재는 대단히 중요하다.

이상의 합금원소 첨가의 영향을 정리하면 austemper 처리를 실시할 때 합금원소 첨가가 구상흑연주철의 기조직의 개선이나 기계적성질의 향상에 직접적인 효과를 나타낸다고 생각하기 보다는 오히려 austemper 처리의 용이성 즉, 두께의 敏感性에 미치는 bainite 化 효과에 직접적으로 영향을 준다고 생각할 수 있다. 구상흑연주철의 기조직의 강인화에 영향을 크게 주는 원소는 강의 경우와는 달리 화학조성 즉 주철의 기본원소인 다량의 Si와 C이라고 생각된다.

5. 冷却速度와 方法

Austemper 처리時 충분한 bainite 化를 얻기 위해서는 austenite 구역에서 pearlite 구역을 거치지 않

고 bainite 구역으로 급냉시킬 수 있는 냉각속도가 필요하다. 만약에 두께가 두꺼우면 두꺼울수록 표면과 중심부의 냉각속도가 다르므로 냉각능이 큰 염욕을 사용하지 않으면 중심과 표면이 냉각속도가 다르므로 서로다른 조직이 된다. 그러므로 austemper한 경우에는 염욕을 교반시켜 주어야 될 것이다. 또한 좀더 효과적인 냉각 방법으로는 첫째: austemper 化의 온도구역인 900 C에서 직접염욕에 냉각시키지 않고 800 C~820 C의 A₁ 점 직상까지 서냉시키고 A₁ 점 직상온도에서 염욕에 냉각시키는 방법.

둘째: austenite의 구역으로부터 200 C전후의 저온 염욕에 냉각시켜 적당한 시간 경과후 꺼내어 별도의 고온염욕으로 옮겨 항온변태를 진행시키는 방법.

그림 12.는 austemper 처리의 냉각방법을 나타냈다. 그림중 a는 보통냉각 방법을 이용한 austemper 처리방법이고 b와 c는 2段冷却方法이다. 이는 Ms점 보다 낮은 온도에서 냉각시키고 다시 고온 염욕에 넣어 항온변태시키는 것으로써 표면층은 Martensite 조직이 된다.

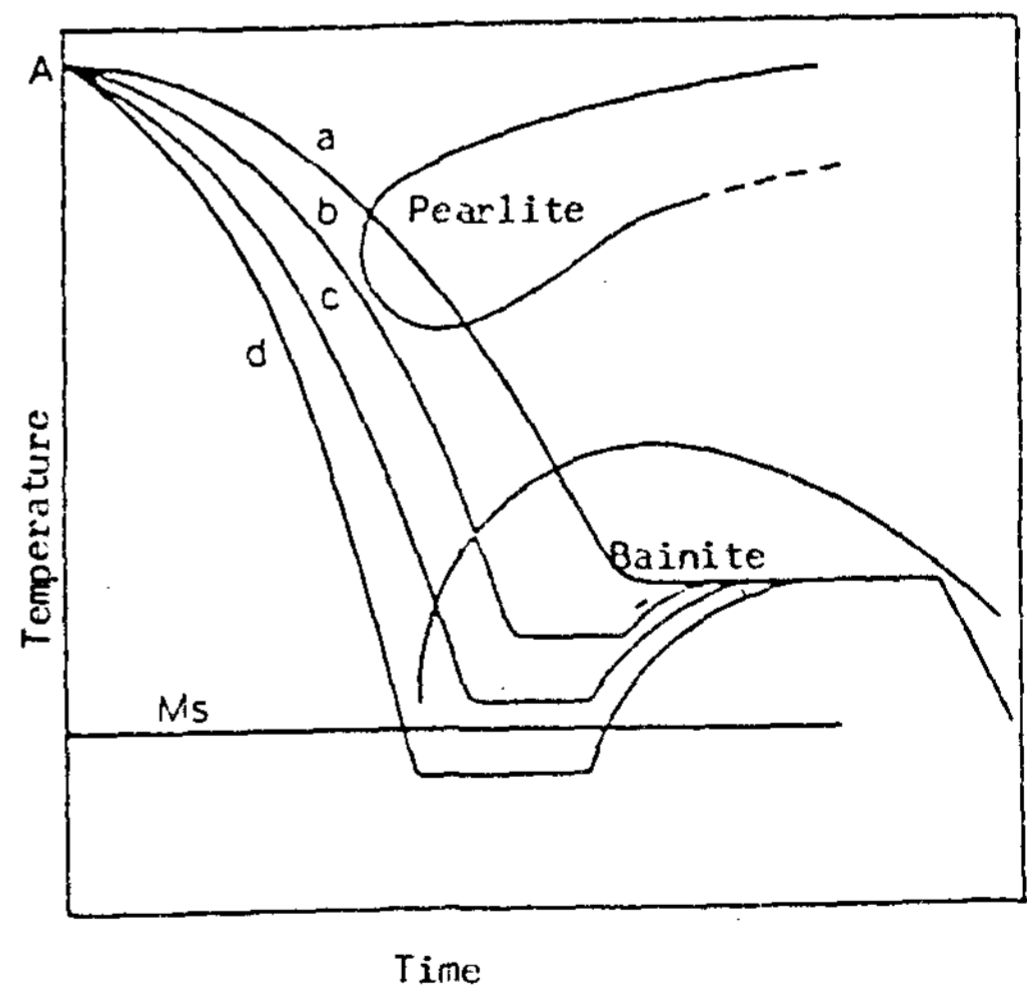


그림 12. Austemper의 냉각방법

6. 不完全한 Austemper 處理

Mo와 Ni을 함유하는 구상흑연주철을 염욕에 급냉후 항온변태하여 실온에서 냉각시켰을때 bainite 化가 불완전하면 austenite가 잔류하게 된다. 물론합금 원소가 첨가되지 않은 경우에도 염욕중 유지시간

이 부적당하면 이와같은 현상이 생긴다. 이 불완전한 Austemper 처리를 하면 bainite 와 잔류 austenite (20~50%)의 혼합조직으로 된다.(핀란드에서 개발된 Kymenite) 불완전 austemper 처리 후 기지조직 중에 잔류 austenite 가 존재하면 응력하에서 應力誘起 martensite 변태에 의한 팽창으로 재료가 응력 부하 상태에서 사용할 경우 재료의 균열진전이 둔화된다. 또한 shot peening 처리에 의해 표면에 압축 응력을 생성하게 하므로써 피로강도가 현저히 상승한다. 강인화 면에서 강의 주조품과 경쟁하는 경우에 구상흑연주철의 불완전 austemper 처리는 앞으로 기대되는 熱處理方法이라 생각된다.

7. 結 論

구상흑연주철은 鑄造性과 加工性이 양호하여 어떠한 복잡한 기계 부품에도 사용이 가능하지만 인성이 부족하여 인성이 필요한 부품에는 주강품이나 단강품을 사용하여 왔다. 그러나 austemper 처리에 의하여 강인한 bainite 기지조직을 갖는 구상흑연주철을 제조할 수 있어 鑄鋼品이나 鍛鋼品 대신에 사용할 수 있고 實用化가 기대되어지는 材料이다. 그러므로 구상흑연주철의 austemper 처리는 현재 구상흑연주철 제조공장에서는 중요한 현장기술의 하나이다. 그러나 최종제품이 완성되기까지의 총생산경비가 얼마나 절감되며 高強度의 구상흑연주철 재료를 生産할 수 있는가를 충분히 검토하여 경비를 절감시킬 수 있는

기술개발 또는 생산관리 체제를 운영한다면 수요는 급증할 것으로 기대된다.

Reference

1. 鹽川忠 : 鑄物, 56(1984), No. 362~367
2. M. Johanson : "Austenitic-Bainitic Ductile Iron." AFS Transaction, 85(1977)
3. K. Rundman, R. Klug : "An X-ray and Metallographic Study of an Austempered DCI." AFS Transaction, (1982).
4. 特許第 1011639 號 : フインラント, ワーサンコヌキー, キュミン, オサケイチエ, キュンネ, アクチボラグ.
5. 張博, 明智清明, 嚙健三 : 球狀黑鉛鑄鐵, (1983), 266~274.
6. J. Dodd : Modern Casting, 68(1978), 60
7. 上田倣完, 和出昇 : 鐵と鋼, 63(1977), 1572
8. Lo-Kan : Foundrie, 367(1977), 167.
9. AFS Congress Highlights : Technology for Tomorrow and Today(part III), Modern Casting, (1981), Aug.
10. J. Janowak et al. : "Technical Advances in Cast Iron Metallurgy," 48th International Foundry Congress in Varna, Bulgaria, (1981)