

論 文

오스템퍼 구상흑연주철의 충격인성에 미치는 Mo 및 Ni의 영향

박 윤 우, 장 현 구

The Effects of Molybdenum and Nickel Addition on Impact Toughness of Austempered Ductile Cast Iron

Yoon-Woo Park, Hyun-Ku Chang

Abstract

This study was carried out in the austempering temperature and time after Ni, Mo addition in purpose of modification of impact toughness of austempered ductile irons. Addition of alloy element and austempering treatment of 900°C 60 minutes followed by 300°C, 350°C and 400°C for 60 minutes, in this case impact value was increased by ideal mixed structure. But impact value was decreased when holding time is 120minutes, this is attributed to segregation and carbide precipitation from high carbon austenite. Highest impact value was obtained by 350°C (Mo-addition) and 400°C (Ni-addition). This phenomena was caused by presence of remained austenite. At all austempering temperature,, Ni-added specimen showed higher impact values than that of Mo-added specimen. And hardness property was affected by austempering temperature and holding time rather than amounts of alloying element.

1. 서 론

구상흑연주철은 강도가 높고 내마멸성이 우수하기 때문에 자동차, 공작기계, 각종 산업기계등 부품에 널리 사용되고 있으며 회주철에 비해서 강도가 높고 연성과 인성이 우수하지만 강에 비하면 강도가 낮은 재료이다. 이와 같은 여러가지의 기계적 성질은 흑연형상이나 기지조직에 따라서 변화하기 때문에 구상흑연주철의 기계적 성질을 개선하기 위해서는 기지 조직의 강화가 우선되어야 한다. 구상흑연주철은 합금원소를 첨가하여 기지의 퍼얼라이트량을 증가시켜 주방상태에서 80kg/mm<sup>2</sup> 정도 까지 인장강도를 높일 수 있다. 이것을 다시 열처리하여 기지를 베이나트로 하면 인장강도를 140kg/mm<sup>2</sup> 정도 까지도 향상시킬 수 있으며 강도뿐만 아니라 인성, 내마멸성 및 피로 강도를 높이는 등의 품질 개선을 할 수 있다.<sup>1)</sup> 이와같은 오스템퍼 구상흑연주철(Austempered Ductile Iron, ADI)은 최근 고강도 재료로서 평가되고 있어,<sup>2)</sup>생산비가 훨씬 높은 단조품에 필적 할 수 있는 우수한 성능을 가지고 있기

때문에 이미 선진 공업국에서는 단조품이 점차적으로 저렴한 ADI에 의해 대체되어 가고 있는 실정이다.

그러나, ADI의 기지조직과 기계적 성질과의 관계를 정량적으로 규명할 수 있는 기초적 자료는 충분히 갖추어져 있지 못한 실정이다. 또한 ADI는 합금 조성과 열처리 조건에 따르는 기지 조직의 변화가 매우 민감하므로 목적으로 하는 성능을 갖춘 ADI의 제조는 아직 체계화 되어 있지 않은 형편이다.<sup>3)</sup>

따라서, 설계자가 요구하는 성능을 얻기 위해서는 합금 조성과 제품의 크기 및 형상에 따른 보다 정량적인 열처리 작업의 제어가 필요하다.

본 연구에서는 최근 각종 기계부품에 상당히 큰 수요가 급증하고 있으며, 생산가가 저렴한 반면 그 특성이 고강도 재료로서의 가능성을 충분히 가지고 있는 베이나이트 기지의 구상흑연 주철을 제조하기 위한 기술을 개발하고자 오스템퍼링온도에 따라서 기지조직 및 기계적 성질의 영향과 아울러 Ni 및 Mo 등 합금 원소가 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였다.

성균관대학교 금속공학과 (Dept. of Metallurgical Eng. Sung Kyun Kwan University, Suwon, Kyungi-do)

## 2. 실험방법

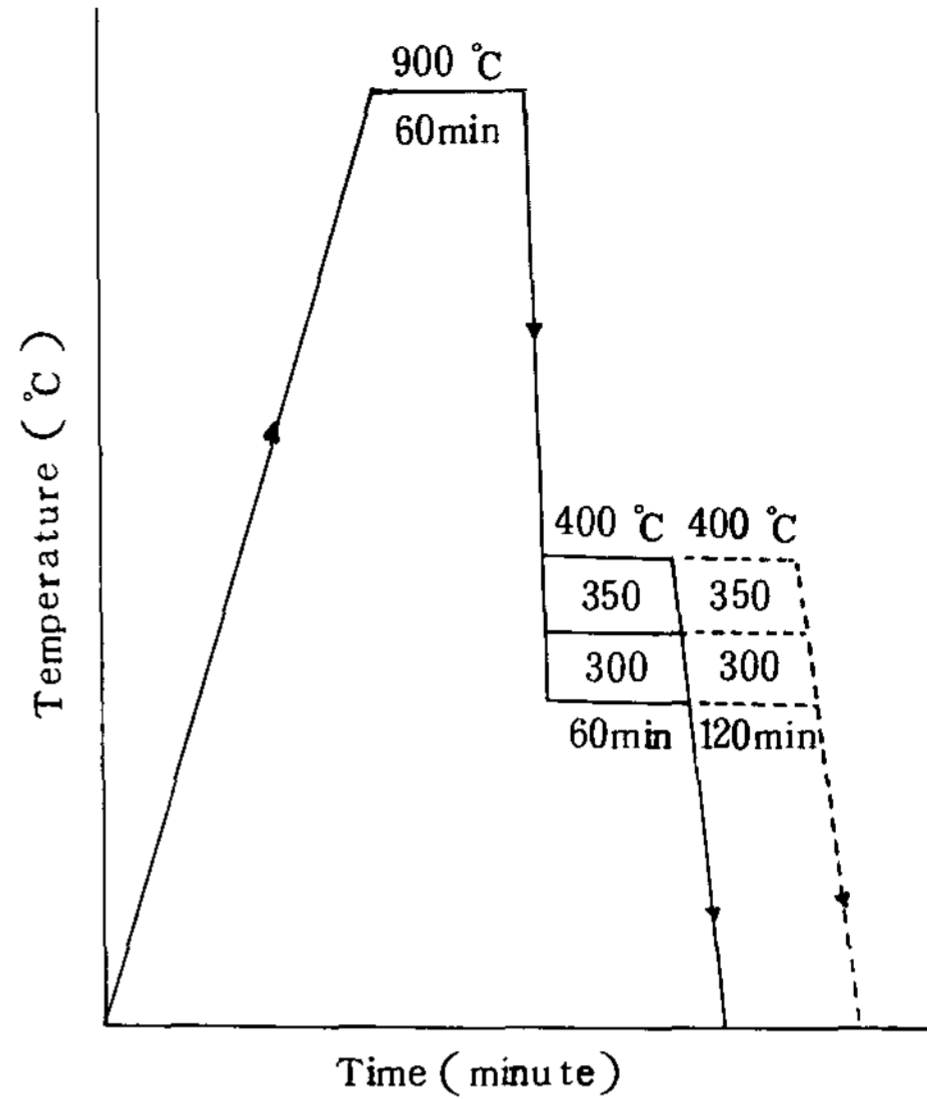
본 실험에 사용한 시료는 포철선을 용해 탈황처리 후 원료선을 제조하고 다시 재용해하여 소정량의 Mo 및 Ni을 첨가하여 "Y"block에 주입하여 제조하였다. 시료의 화학 조성을 분석한 결과 Table 1.과 같다.

**Table 1.** Chemical composition of test specimen(wt %).

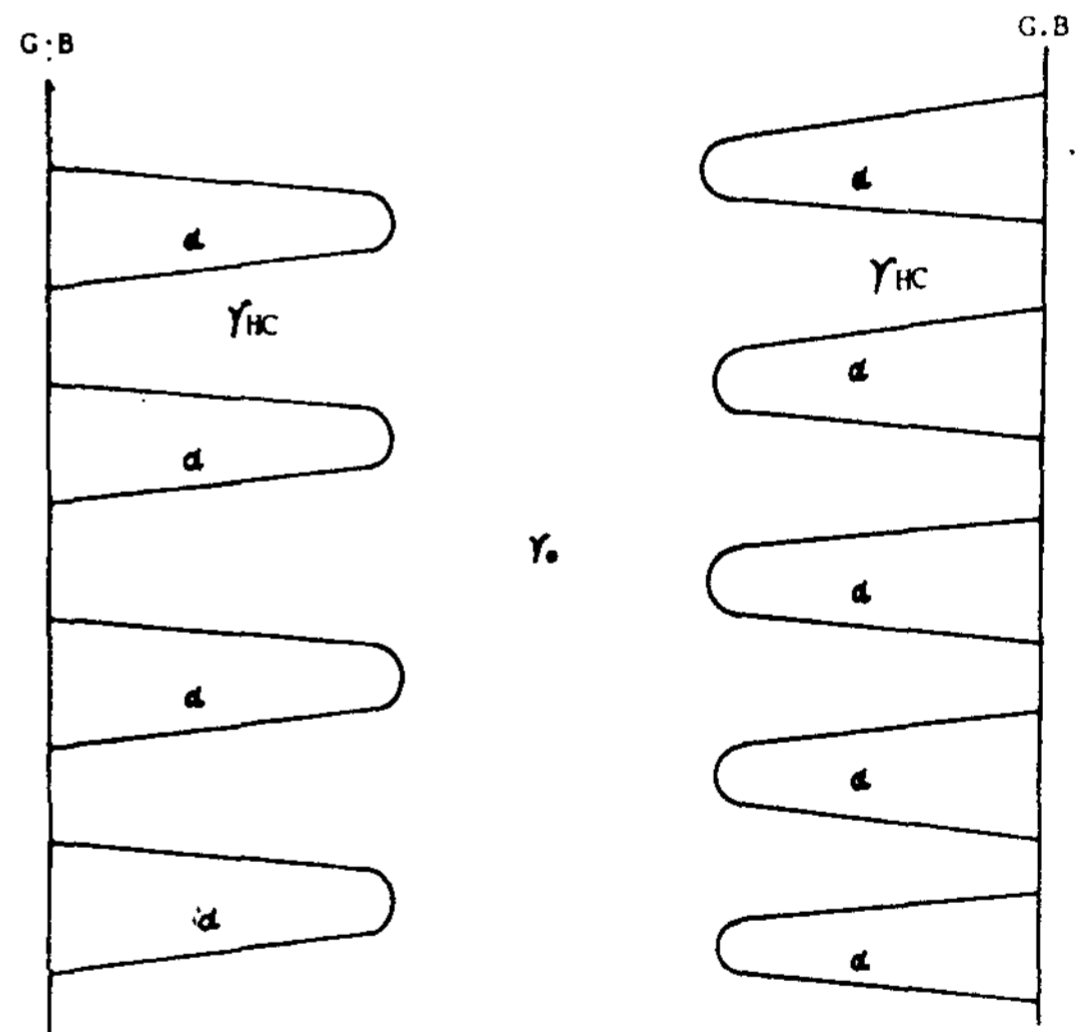
Test Specimen No.	C	Si	Mn	P	S	Mg	Mo	Ni
M 1	3.58		0.21	0.03	0.03	0.058	-	-
M 2	3.49	2.79	0.19	0.04	0.03	0.046	0.19	-
M 3	3.52	2.84	0.20	0.04	0.02	0.038	0.38	-
M 4	3.39	2.86	0.19	0.03	0.02	0.043	0.61	-
N 1	3.46	2.87	0.20	0.03	0.03	0.042	-	1.02
N 2	3.44	2.83	0.18	0.04	0.02	0.041	-	2.04
N 3	3.45	2.91	0.19	0.02	0.02	0.052	-	3.11
N 4	3.68	2.95	0.19	0.04	0.03	0.045	-	4.03

충격 시편은 10×10×55(mm)의 무 notch로 제작한 후 Charpy 충격 시험을 행하였다. 염욕은(α+γ) 구간에서는 BaCl<sub>2</sub>+KCl, 400~300℃ 부근에서는 NaNO<sub>3</sub>+KNO<sub>3</sub>를 사용하였다. 오스템퍼링 열처리 방법은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 900℃에서 60분간 오스테나이트화 한 후 400℃, 350℃, 300℃에서 각각 60분, 120분간 항온 유지 시킨후 공냉하였다.

오스템퍼구상흑연주철의 바람직한 기지 조직은 bainitic ferrite와 오스테나이트의 2상혼합으로 이루어졌다. 오스템퍼링하는 동안 Fig. 2에 표시한 바와 같이 bainitic-ferrite는 오스테나이트로부터 석출하여 안으로 성장하고, 동시에 탄소는 성장하는 페라이트판에서 부터 주위로 방출된다고 한다.<sup>3)</sup> 주철에 있어서 고 규소량은 탄화물의 형성을 억제한다. 결과적으로 잔류오스테나이트는 베이나이트 반응이 진행할 때 탄소를 계속해서 흡수한다. 오스테나이트가 탄소로 풍부하게 될 때 bainitic - ferrite의 성장은 방해받고, 그 반응은 멈춘다. 따라서, 유지시간이 길어지면 페라이트와 탄화물로 분해된다. 그러므로, 오스템퍼링 변태는 2단계 반응으로서 설명되어 질 수 있다. 이는 첫번째 반응은 인성개선에 기여를 하지만 두번째 반응은 취성을 나타내기 때문에 바람직하지 않다고 보고<sup>5)</sup> 되고 있다.



**Fig. 1.** Schematic illustration of heat treatment employed in this work.



**Fig. 2.** Schematic illustration of bainite-ferrite(α) platelets growing from a grain boundary(GB) into the original austenite(γ<sub>0</sub>) and creating zones of high-carbon austenite(γ<sub>HC</sub>).

따라서, 오스테나이트화 온도를 일정하게 하고 첨가량에 대하여 오스템링 온도와 시간의 변화에 따라 충격값과 경도값을 조사하였다. 이와같이 하여 얻은 시편을 Nital (HNO<sub>3</sub> 5%, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 95%)로 etching 하여 주사전자현미경을 사용하여 조직관찰을 하였고, 용량 25kgm Charpy 시험기로 실온에서

충격시험을 한 후 파면을 주사현미경을 사용하여 파면관찰을 하였다. 또한 경도시험은 Vickers 경도기를 이용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1 Mo첨가시 충격 시험

Fig. 3 은 900°C에서 60분간 오스테나이트화하고, 오스테퍼링 온도를 300°C, 350°C 및 400°C에서 각각 60분간 유지시켰을때 Mo 첨가량에 따른 충격값의 변화를 나타낸 것이다. 350°C인 경우가 가장 높은 충격값을 갖으며, 이 온도에서 잔류 오스테나이트량이 증가하고 연신율이 증가하여 높은 충격값을 갖는다. 그러나, 모든 온도 범위에서 Mo첨가량이 0.2% 이상이 되면 응고중 Mo의 편석 즉 공정조직 입계에 농화되어 충격값이 감소된다고 사료된다. 그리고, 300°C인 경우에는 국부적인 마르텐사이트 형성으로 인해 더욱 감소된다고 생각한다.

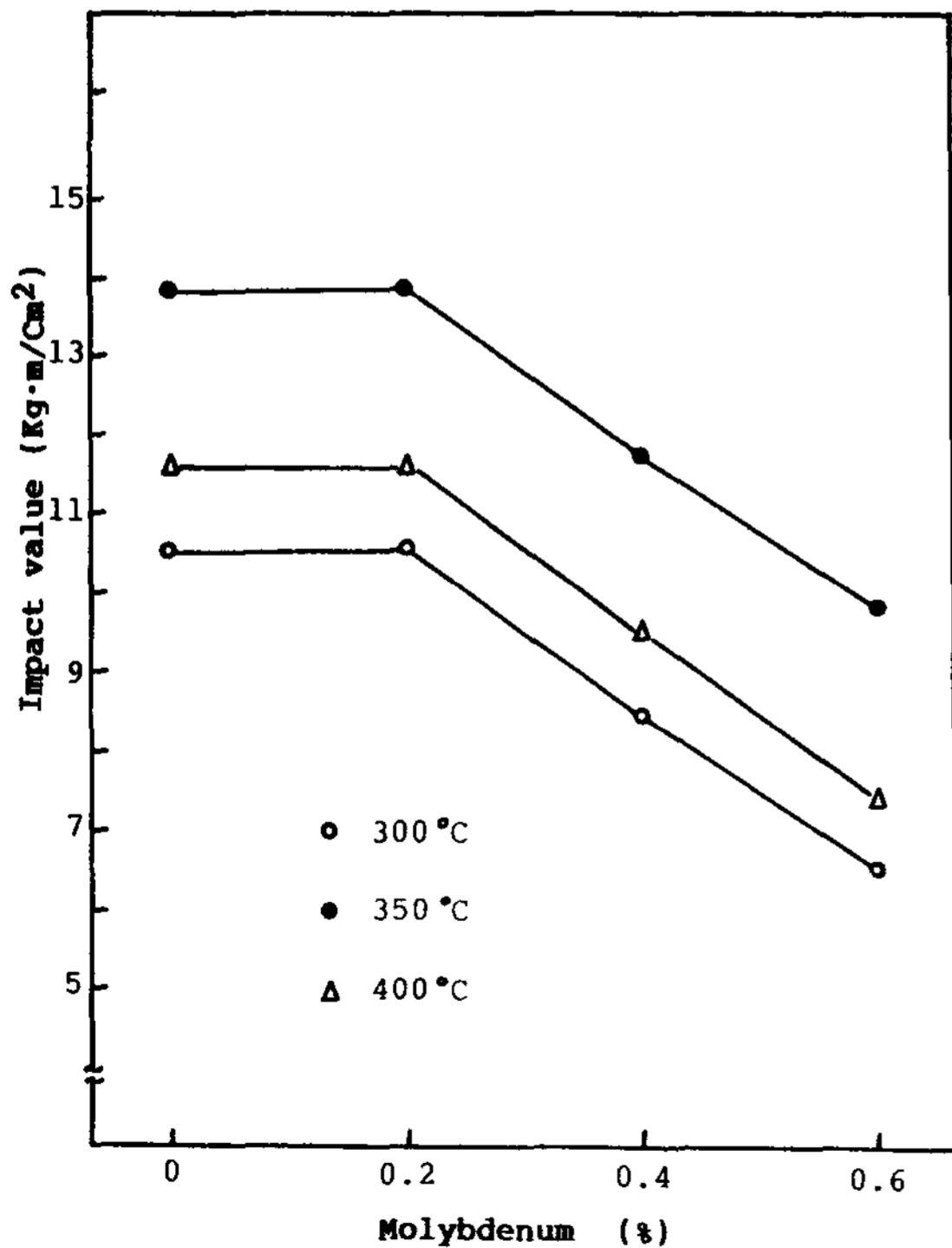


Fig. 3. Effect of molybdenum content on the impact values of austempered ductile irons heat treated at 900°C, 60minutes followed by austemper for 60minutes.

Fig. 4는 오스테퍼링 유지 시간을 120분간으로 하였을 때는 고탄소 오스테나이트로 부터 탄화물 석출로 인해서 Fig. 3에서의 충격값보다도 낮게 된다고 사료된다. 0%Mo인 경우에는 유지 시간이 길어지면 충격값이 현저히 감소하는데 이는 잔류오스테나이트량 및 연신율이 감소되기 때문이라고 사료된다. 그런데 Mo량이 0.2% 될때까지 잔류 오스테나이트량의 증가로 인해 충격값이 증가하다가 이 범위 이상이 되면 편석으로 인해 다시 감소되며 이것은 R.A. Blackmore 등의 연구에서도<sup>6)</sup> 같은 결과를 보여 주고 있다.

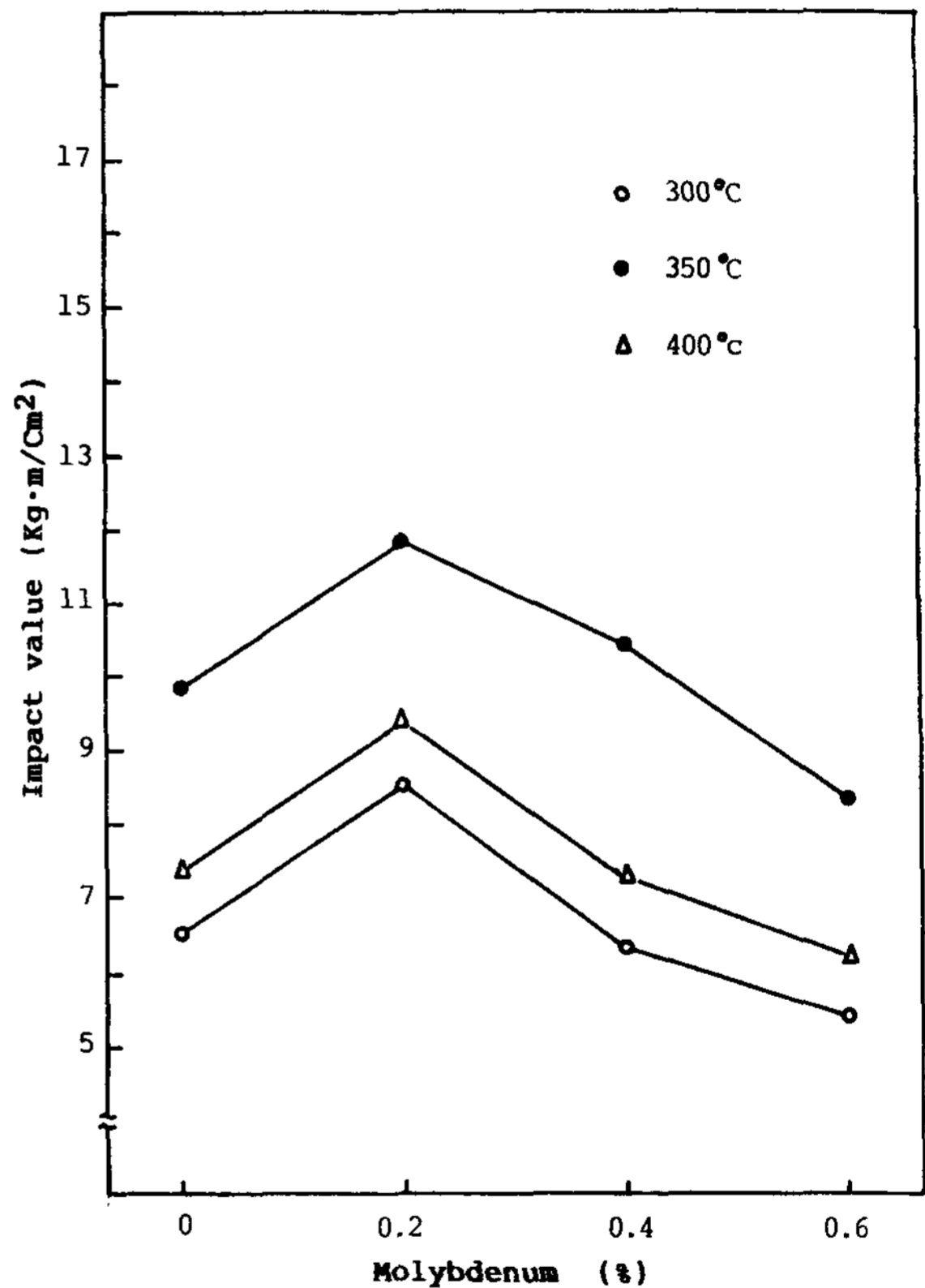


Fig. 4. Effect of molybdenum content on the impact values of austempered ductile irons heat treated at 900°C, 60minutes followed by austemper for 120 minutes.

#### 3-2 Ni 첨가시 충격 시험

Fig. 5는 Fig. 3의 경우와 같은 조건으로 하였고, Ni 첨가량에 따른 충격값의 변화를 나타낸 것이다. Ni 첨가시 400°C에서 가장 높은 충격값을 나타낸다.

이 온도에서 잔류 오스테나이트량이 최대이고, 연신율이 높기 때문에 이러한 값이 얻어지고 Ni 첨가 시에는 첨가량이 증가함에 따라 배이나이트 생성시에 탄소, Ni의 고용량이 적은 bainitic-ferrite 상과 농도 구배로 인한 오스테나이트상과의 합금 농도 차이가 생겨서<sup>7)</sup> 배이나이트 기지 조직에서 강인성을 나타낸다고 생각된다. 첨가량이 3% 이상이 되면 오스템퍼링 처리직후 공냉하는 동안 약간의 마르텐사이트가 형성되어 감소된다.

Fig. 6은 오스템퍼링 유지 시간을 120분으로 하여 Ni첨가량에 따른 충격값의 변화를 나타낸 것이다. 이 경우도 유지 시간이 길어짐에 따라 고탄소 오스테나이트로부터 탄화물 석출로 인하여 모든 온도에서 60분 유지 했을때 보다도 충격값이 감소되고, 모든 오스템퍼링 온도에서 Ni을 첨가한 경우가 Mo를 첨가한 경우보다 높은 충격값을 가진다. 즉 잔류 오스테나이트량을<sup>8)</sup> 많이 함유하기 때문이라고 생각된다.

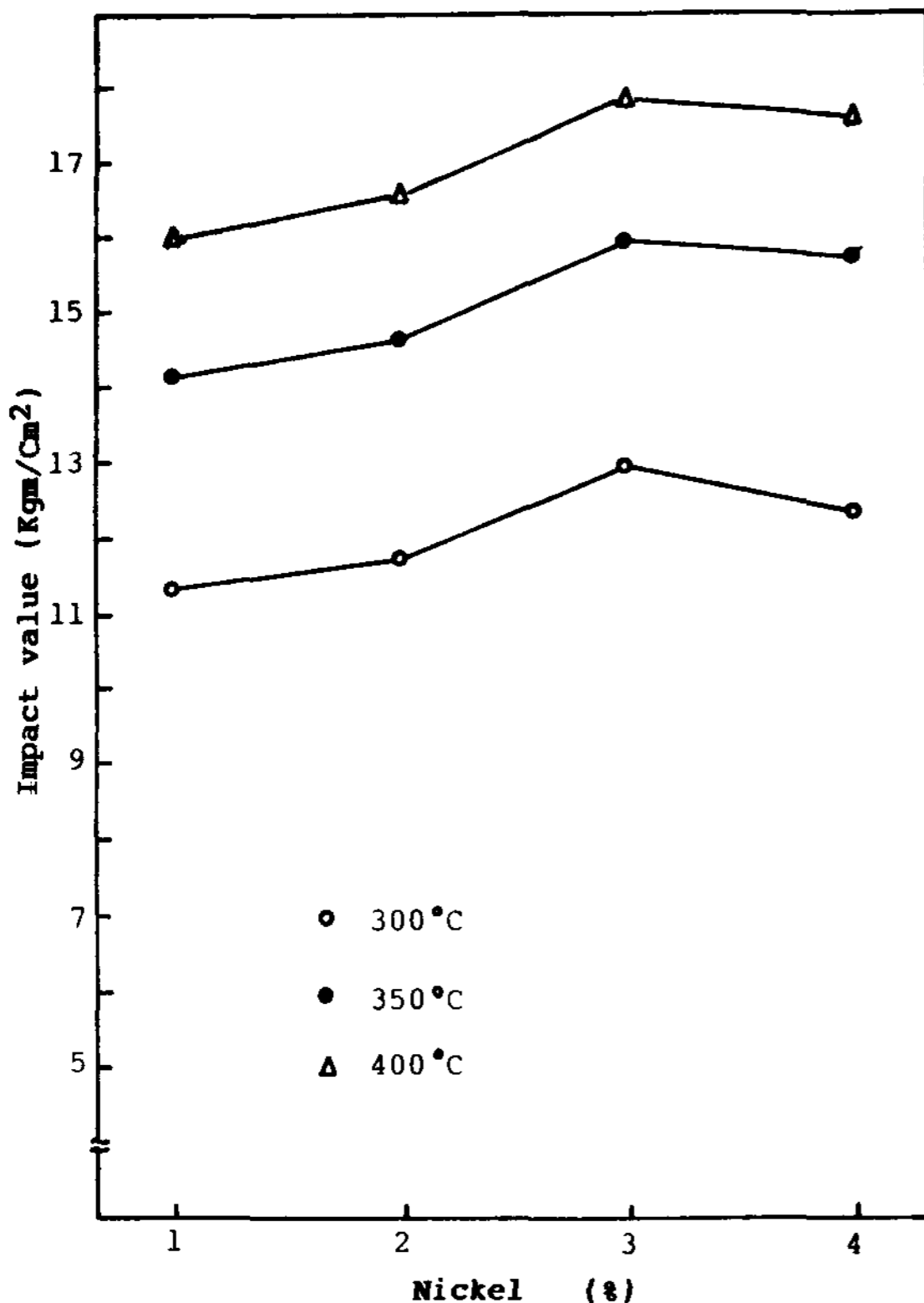


Fig. 5. Effect of nickel content on the impact values of austempered ductile irons heat treated at 900 °C 60minutes followed by austemper 60minutes.

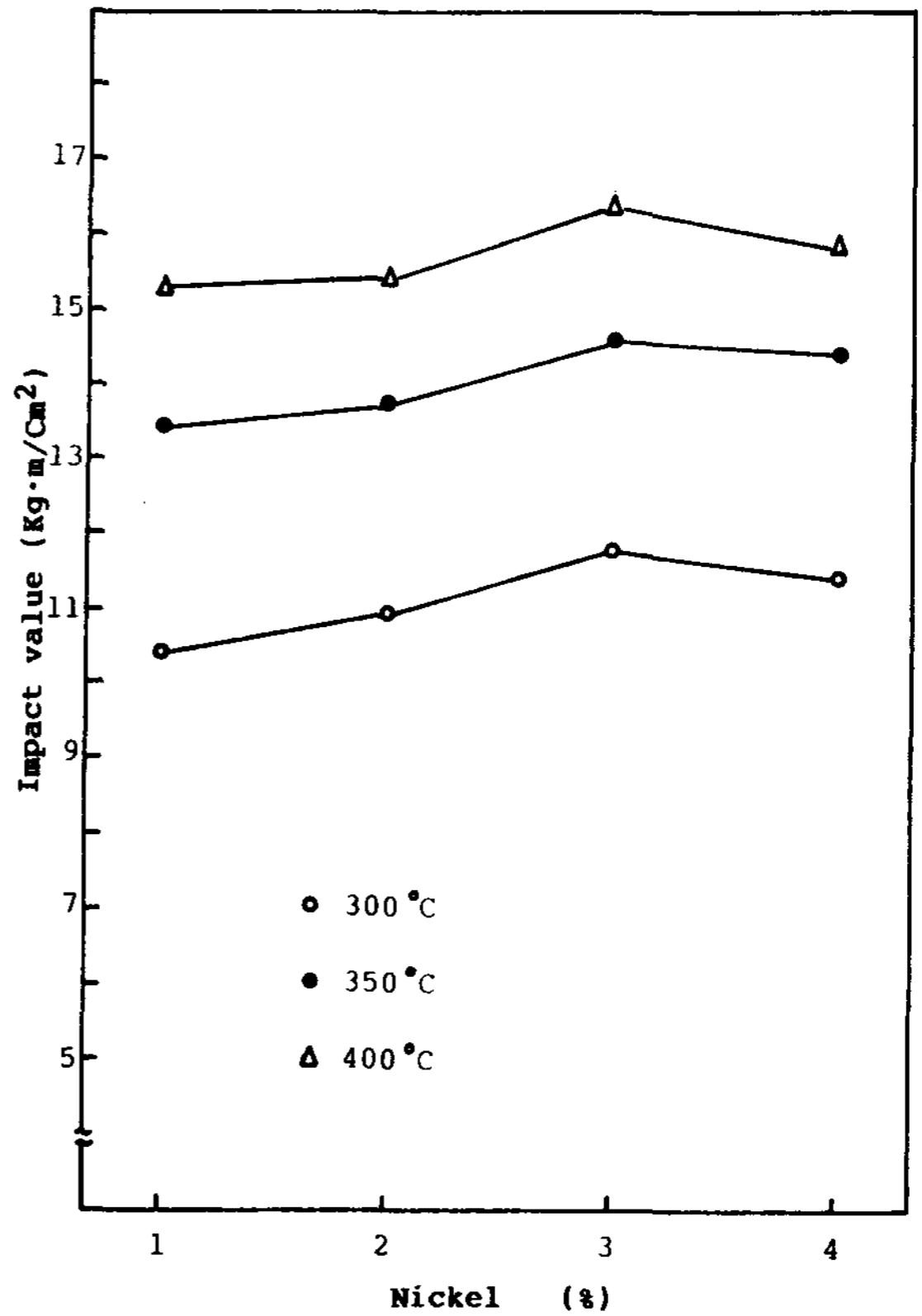


Fig. 6. Effect of nickel content on the impact values of austempered ductile irons heat treated at 900 °C, 60minutes followed by austemper for 120minutes.

### 3-3 오스템퍼링 온도에 대한 기지 조직

Photo. 1, 2 및 3은 무첨가 Mo 및 Ni을 첨가한 것으로서 오스템퍼링 온도에 따라 주사전자현미경을 사용하여 기지 조직을 관찰한 것이다. 온도가 감소함에 따라 기지조직이 치밀해 지고 bainitic ferrite가 미세해 짐을 알 수 있다. 합금 원소의 영향은 bainite 온도 구역의 범위를 좁게 (Mo), 넓게(Ni) 할 뿐이지 기지 조직의 모양이나 양에는 그리 크게 영향을 끼치지 않는다. 고온일 경우에 배이나이트 형상이 날카롭지 못하고 조대해지며 깃털 모양의 상부 배이나이트가 생성됨을 알 수 있다. 그리고 고온일수록 잔류 오스테나이트량이 많고, 저온일수록 적어진다<sup>7)</sup> 사료된다.

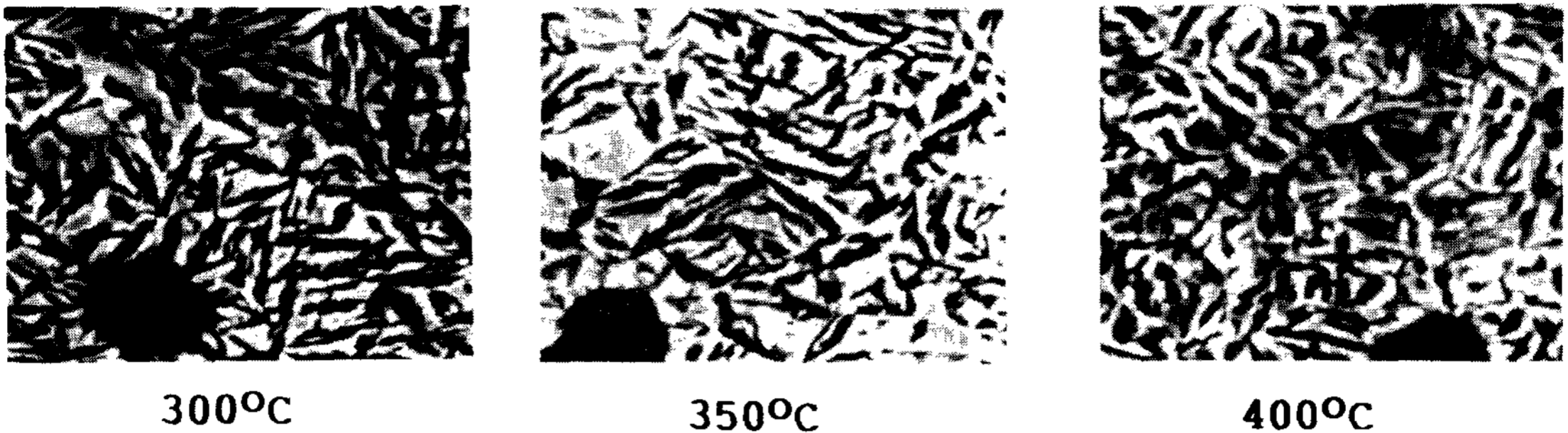


Photo. 1. Microstructure of unadded specimens with various austempering temperature (nital etched, SEM, ×1000).

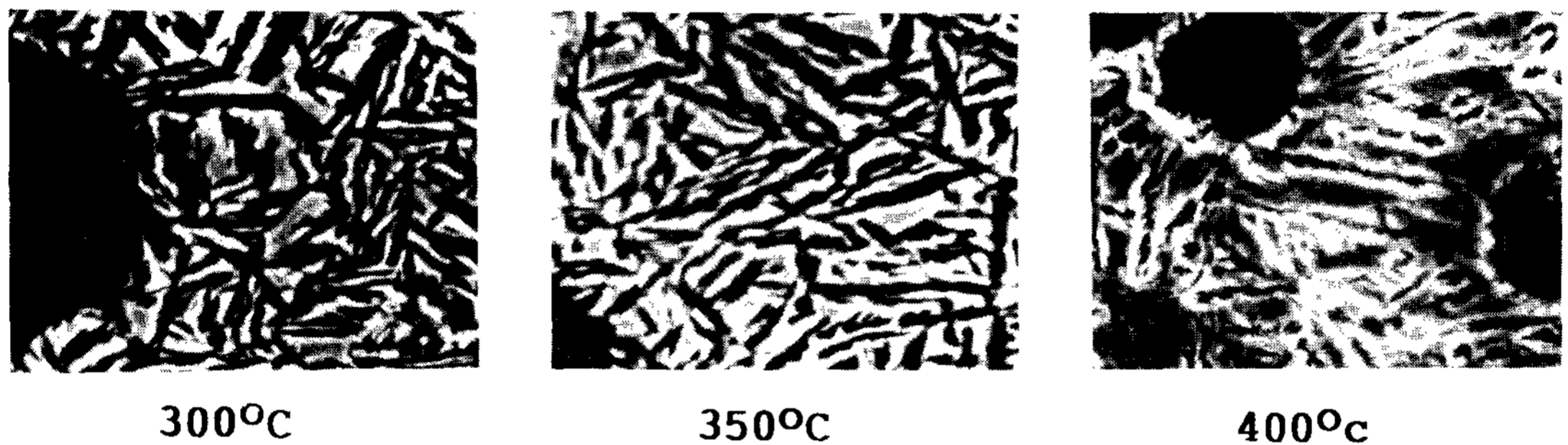


Photo. 2. Microstructure of Mo-added specimens with various austempering temperature (nital etched, SEM, ×1000).

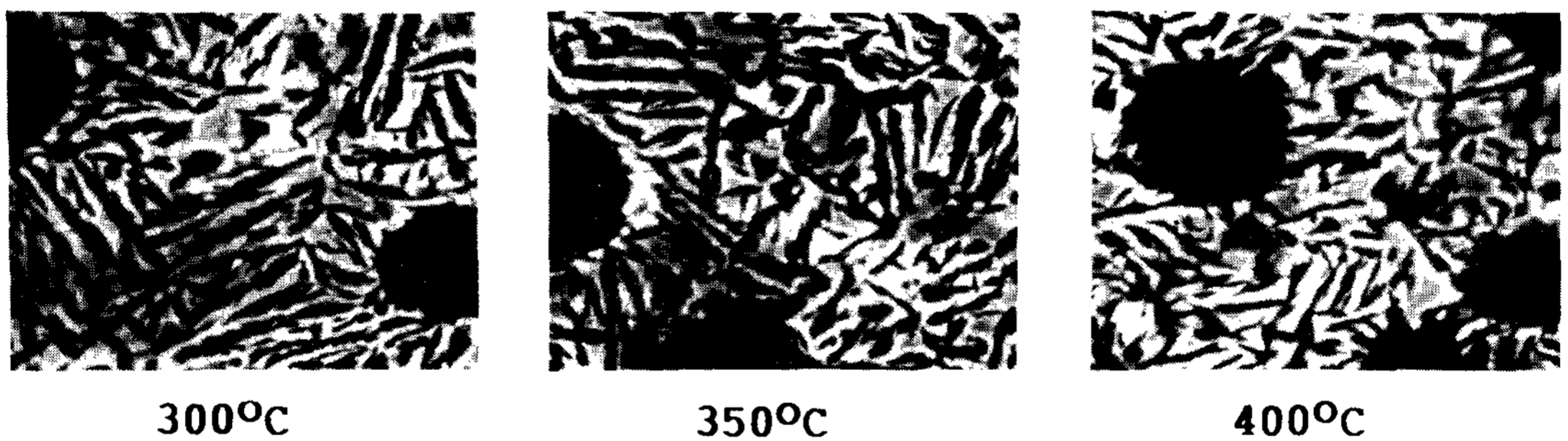


Photo. 3. Microstructure of Ni-added specimens with various austempering temperature (nital etched, SEM, ×1000).

3-4. 경도시험

Fig. 7,8은 오스템퍼링 온도를 60분 120분간 유지시켰을 때 Mo 첨가량에 따른 경도값의 변화를 나타내었다. 경도값은 첨가량에 관계없이 300°C에서 오스템퍼링 처리한 경우가 가장 높다. 이것은 기지 조직의 베이나이트 형상이 미세하기 때문이고 첨가량이 증가함에 따라 응고시 편석으로 인해 탄화물 형

성으로 약간씩 감소하고 또 오스템퍼링 처리후 공냉시 편석 주위에 국부적인 마르텐사이트로의 형성으로 인해 경도값이 감소된다. 그리고 유지 시간과 첨가량과는 관계 없이 오스템퍼링 온도에 관계된다고 생각된다.

Fig. 9, 10은 Fig.7,8과 같은 조건으로 하고, Ni 첨가에 따른 경도값의 변화를 나타내었다. Ni 첨가시도 Mo 첨가와 비슷한 거동을 나타내는 것으로 생각된다.

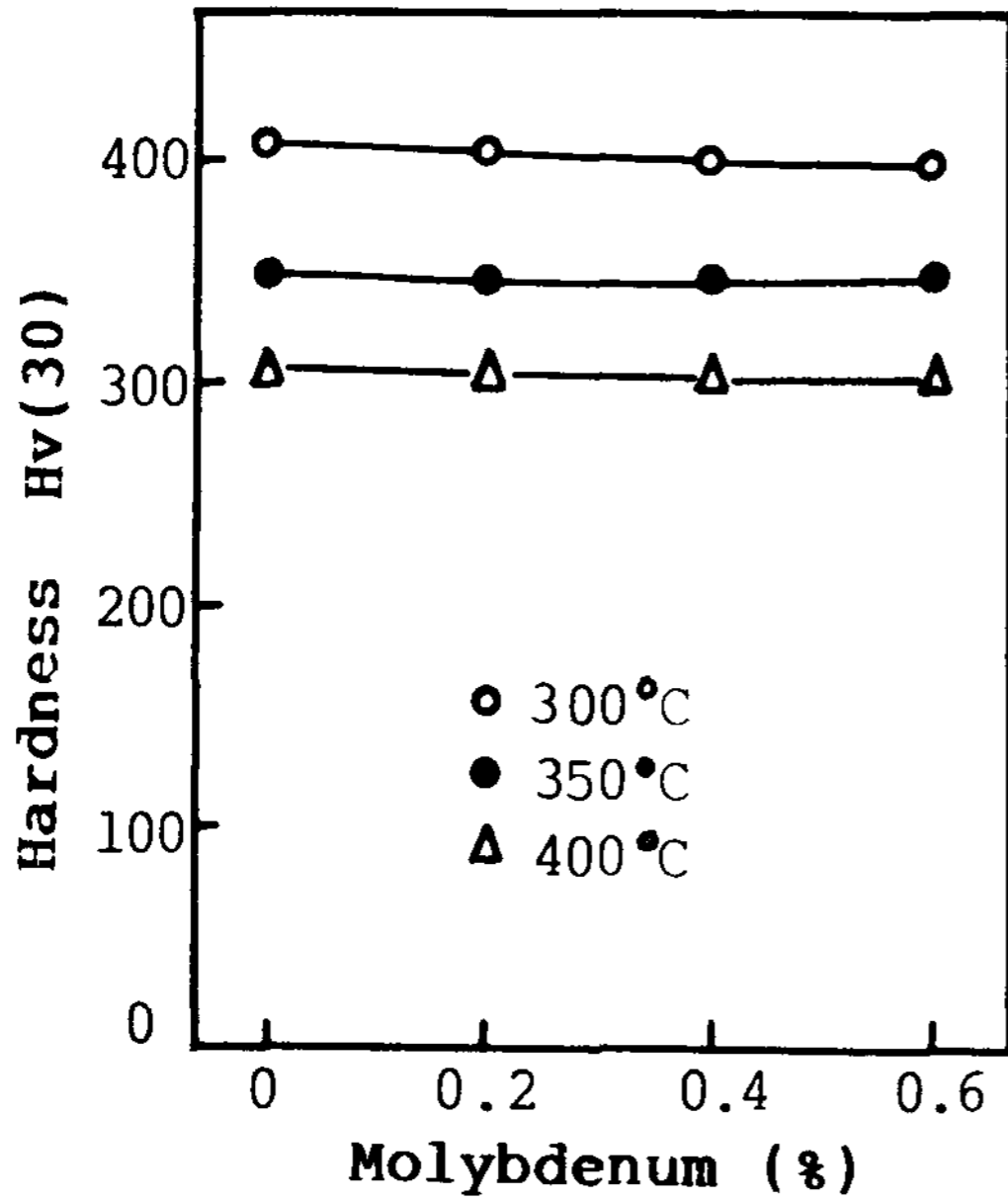


Fig. 7. Effect of molybdenum content on the hardness properties of austempered ductile irons heat treated at 900°C, 60minutes followed by austemper for 60minutes.

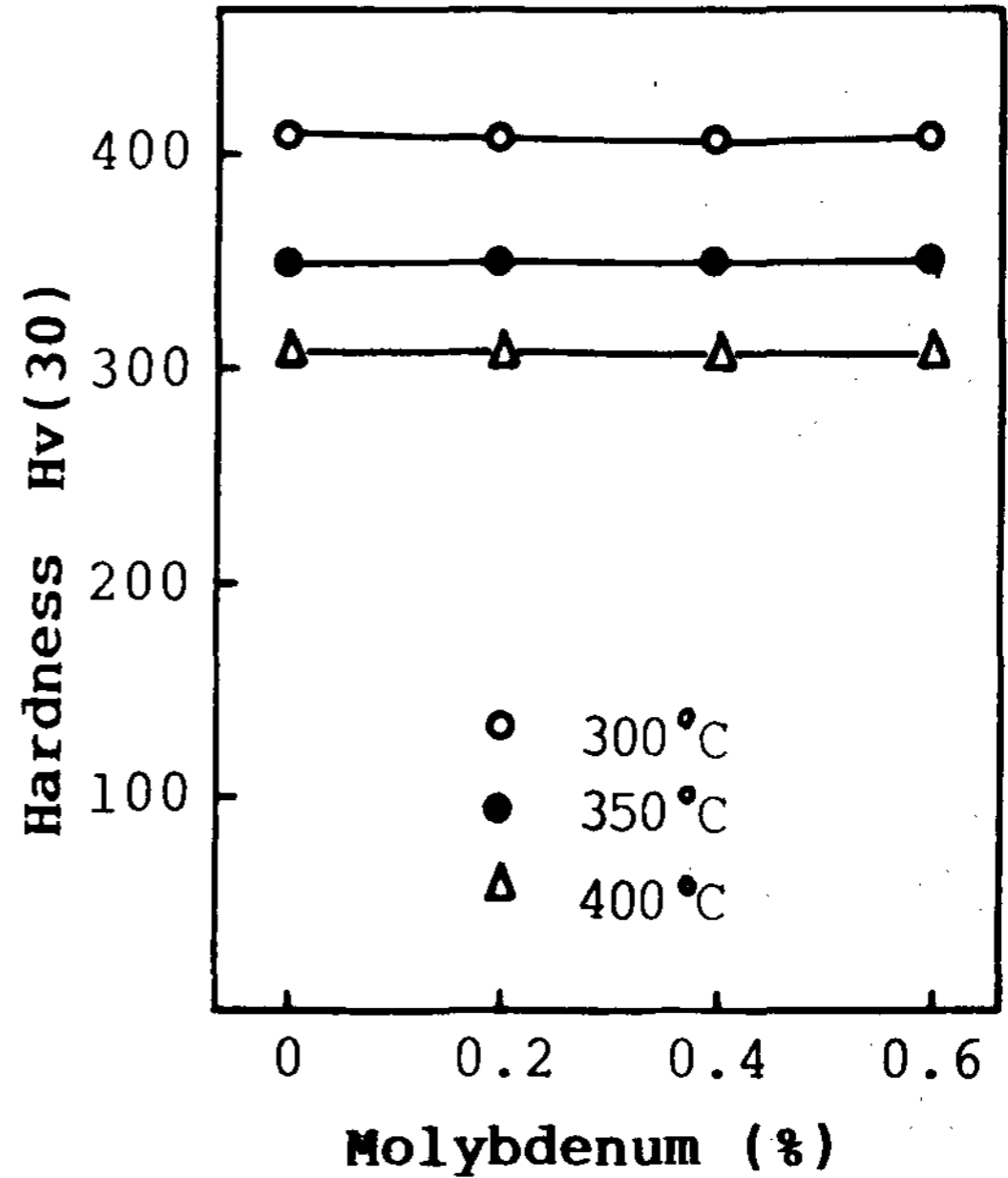


Fig. 8. Effect of molybdenum content on the hardness properties of austempered ductile irons heat treated at 900°C, 60 minutes followed by austemper for 120 minutes.

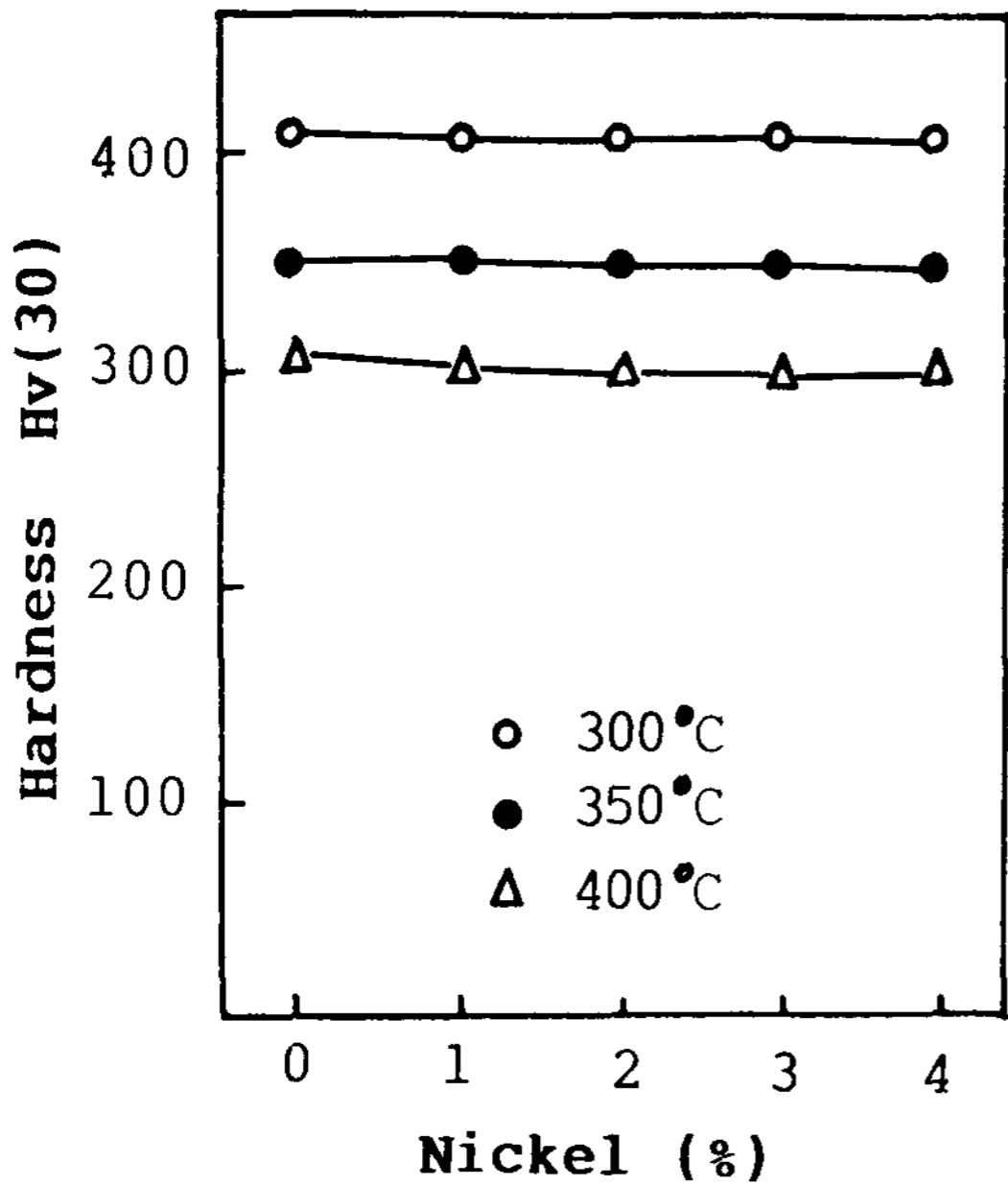


Fig. 9. Effect of nickel content on the hardness properties of austempered ductile irons heat treated at 900°C, 60minutes followed by austemper for 60minutes.

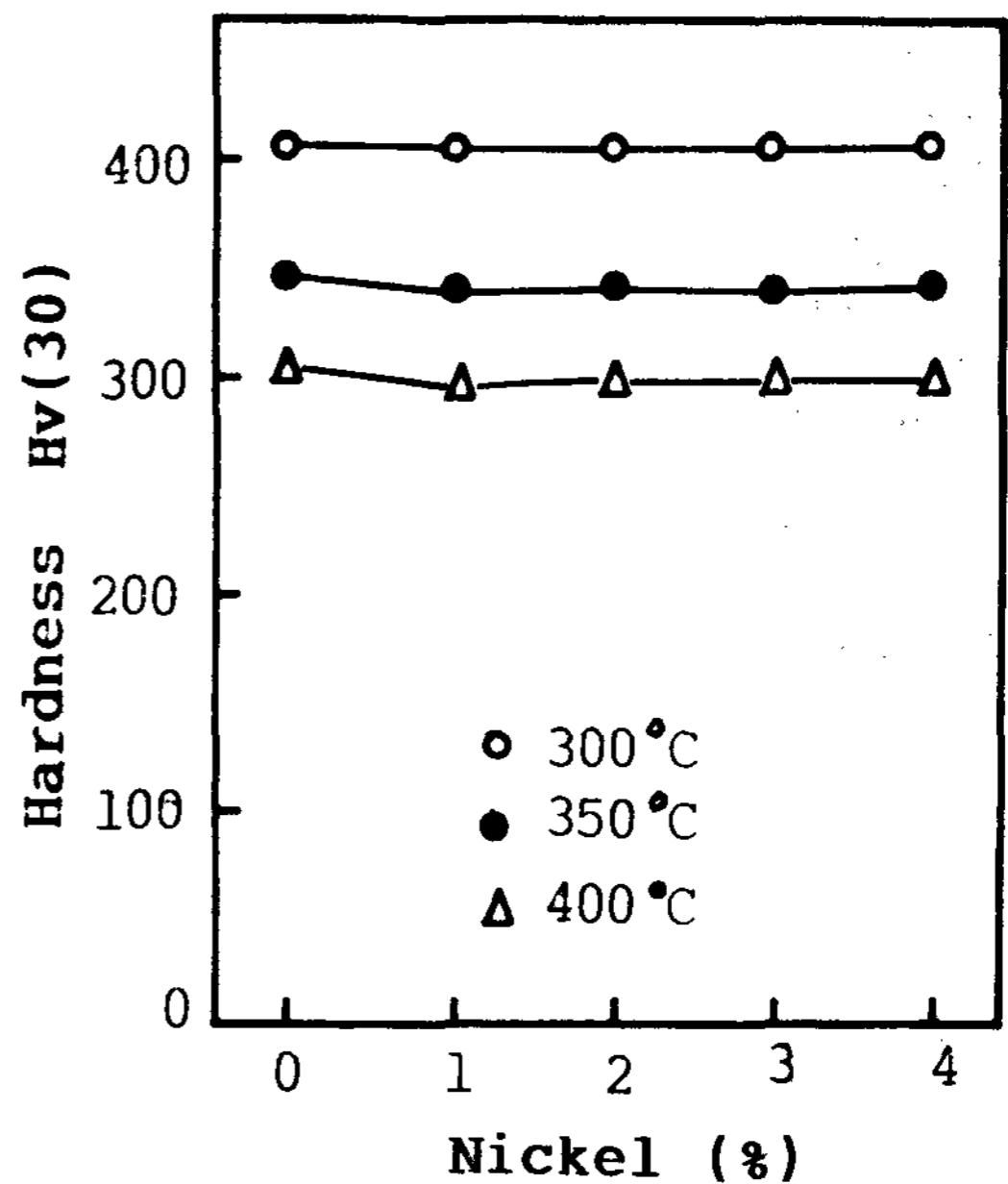
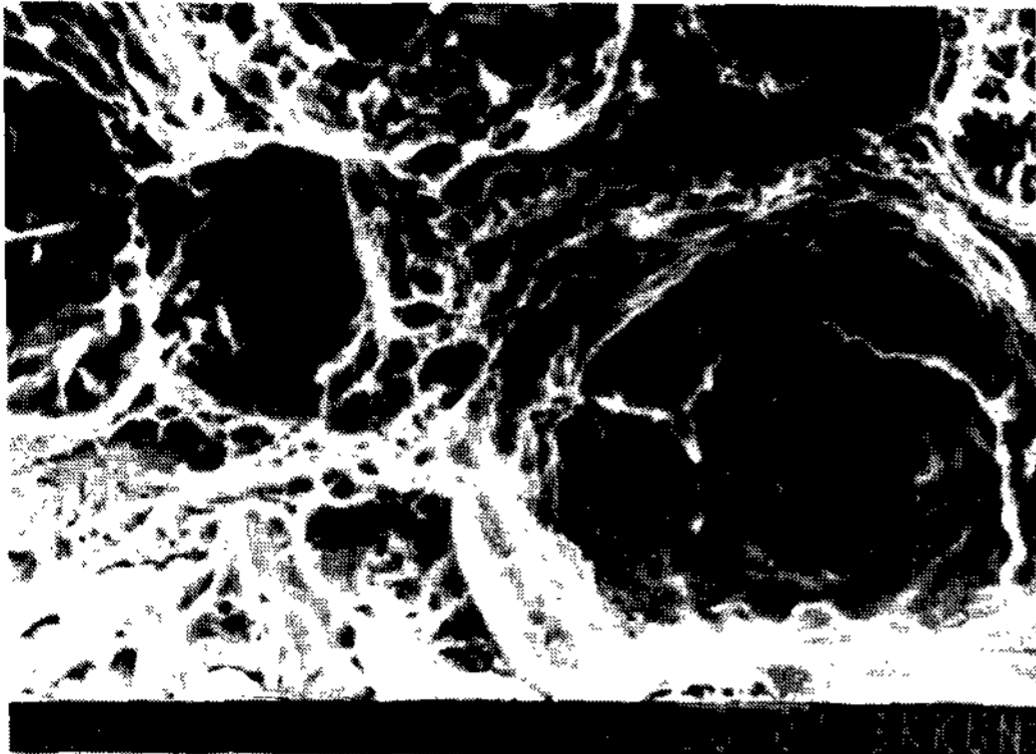
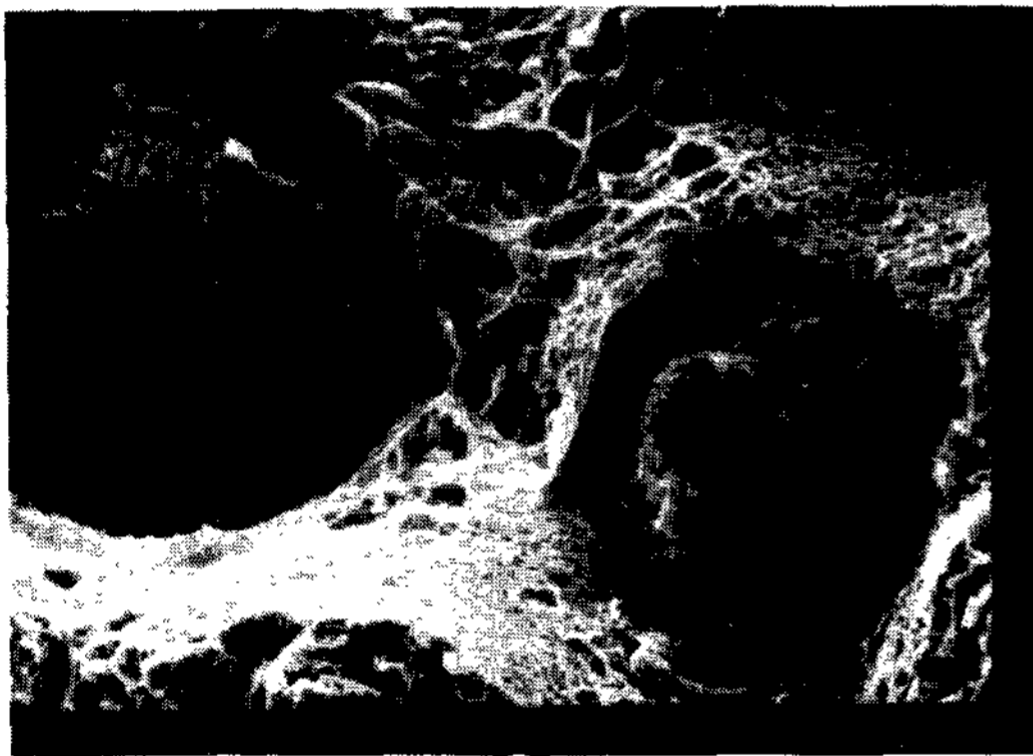


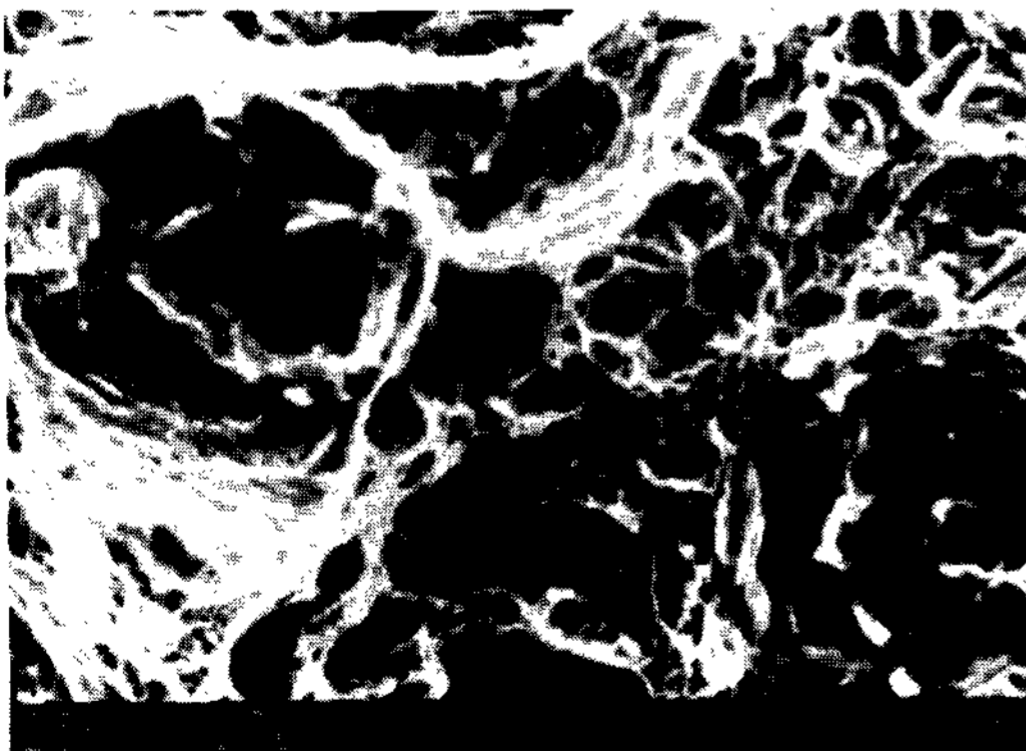
Fig. 10. Effect of nickel content on the hardness properties of austempered ductile irons heat treated at 900°C, 60minutes followed by austemper for 120 minutes.



0% Mo, Ni



0.2% Mo



3% Ni

**Photo. 4.** Fractographs of unadded, Mo-added and Ni-added specimens after impact test. (SEM,  $\times 1500$ ).

### 3-5. 파면 관찰

Photo. 4는 부첨가, Mo 및 Ni 이 첨가된 시편에 대해 충격 시험을 한 후 파단면을 주사전자 현미경으로 관찰하였다. 파괴점은 小林등<sup>9)</sup>의 연구에 의하면 흑연-기지계면 및 공정 cell 경계부로서 이는, 본 연구에서도 일치함을 알 수 있었다. 그리고, 파면에서 보듯이 파괴 양상이 준벽개파괴와 미세한 공동모임의 파괴가 일어난다. Ni을 첨가한 시편이 Mo을 첨가한 시편보다 인성이 높은 이유는 Photo. 4에서 보인 바와 같이 미세한 공동모임이 더 많고 잔류 오스테나이트가 많이 있기 때문이라고 사료된다.

## 4. 결 론

오스템퍼구상흑연주철의 충격 인성의 개선을 위해 Mo 및 Ni 첨가에 따른 오스템퍼링온도와 시간에 대한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) Mo 및 Ni을 첨가한 시편을 900°C에서 60분간 오스테나이트화하고 300°C, 350°C 및 400°C에서 각각 60분간 오스템퍼링 처리에 의해 바람직한 2상혼합조직을 얻어 충격값이 증가하였다. 그러나, 유지시간을 120분으로 했을 경우에는 공냉시 편석과 고탄소 오스테나이트가 분해 되어 탄화물 생성으로 충격값이 감소하였다.

2) Mo 첨가시 오스템퍼링 온도가 350°C인 경우에 가장 높은 충격값을 나타내었다.

3) Ni첨가시 오스템퍼링 온도가 400°C인 경우에 가장 높은 충격값을 나타내었다.

4) 오스템퍼링 온도에서 Ni 첨가가 Mo첨가한 경우보다 높은 충격값을 나타내었다.

5) 경도값은 300°C인 경우가 가장 높고 첨가량과 유지 시간에는 크게 영향을 받지 않는 것 같다.

### 후 기

이 논문은 1986년도 문교부 지원 학술 진흥재단의 학술연구조성비에 의한 연구의 일부이며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 鹽川忠 : 鑄物 54(1984) 6
2. John Dodd : Modern casting, (1978)5
3. J. F. Janowak, R.B. Gundlach : AFS Trans., (1983) 377
4. M.Johansson : AFS Trans., (1977) 117

5. E. Eorazil, B. Barta, E. Munsterora, L. Stransky,  
A. Huvar AFS International cast Metals Journal, 7(1982)  
52  
6. P.A. Blackmore, R.A. Harding : J. Heat Treating,  
Vol. 3. No.4(1984) 310

7. 青山正治, 構井時秀, 小林俊郎 : 鑄物, 58(1986)  
3  
8. K. B. Rundman, R. C. Klug : AFS Trans., 90(1982)  
499  
9. 小林俊郎, 新家光雄, 山本浩喜 : 鑄物, 58(1986)4