

ADI의 탄성계수와 내마모성에 미치는 합금원소 및 열처리의 영향

金錫元*·禹基道·陳永喆

전북대학교 신소재공학부, 신소재 개발연구소, *금속공고기술연구소

The Effect of Alloying Elements and Heat Treatment on
Elastic Modulus and Wear Resistance Property of ADI

S.W. Kim, K.D. Woo and Y.C. Jin

Faculty of Advanced Materials Engineering, Chonbuk National University,
Research Institute of Advanced Materials Development, *RASOM
Chonju, 560-756, Korea

ABSTRACT

The elastic modulus and wear resistance in austempered ductile cast iron(ADI) are two important mechanical properties for automobile parts. Therefore, the effect of Cu, Ni, Mo and special austempering treatment such as preheated, prequenched, and step austempering treatments on elastic modulus and wear resistance has been investigated systematically. As a result, elastic modulus and wear resistance were increased by the addition of Mo-Cu and preheated austempering treatment.

1. 서 론

구상흑연주철을 오스템퍼링 열처리하여 자류오스테나이트의 베이나이트가 혼합된 2상혼합 조직을 ADI (austempered ductile cast iron)¹⁻⁴⁾를 제조한다. 이때 ADI의 조직, 기계적 성질과 탄성계수, 내마모성 및 절삭성은 화학 성분, 제조조건 및 열처리 조건에 따라서 변화된다. ADI를 기지조직에 따라서 분류하면 고강도, 고인성의 상부 베이나이트 조직을 갖는 ADI와 고강도, 고경도의 하부 베이나이트 조직을 갖는 ADI로 대별할 수 있다. 이런 ADI가 자동차의 주요한 부품으로 사용되면 소음저하 및 생산원가가 저하된다. 이를 위해서는 ADI의 적당한 강도와 경도

탄성계수, 내마모성 및 피로강도 개선과 더불어 기계 가공성의 개선이 필요하다. 저자 등⁵⁻⁷⁾의 연구결과에 의하면 ADI는 Cu, Ni 등의 첨가원소와 전처리 조직을 제어하는 특수열처리에 의하여 조직, 기계적성질, 피로특성 및 절삭가공성에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다.

따라서 본 연구에서는 ADI의 탄성계수 및 내마모 특성에 미치는 Cu, Ni 단독첨가 및 Cu, Ni 복합첨가의 영향과 특수열처리의 영향에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 용해·주조방법, 조직관찰 및 기계적 성질 측정

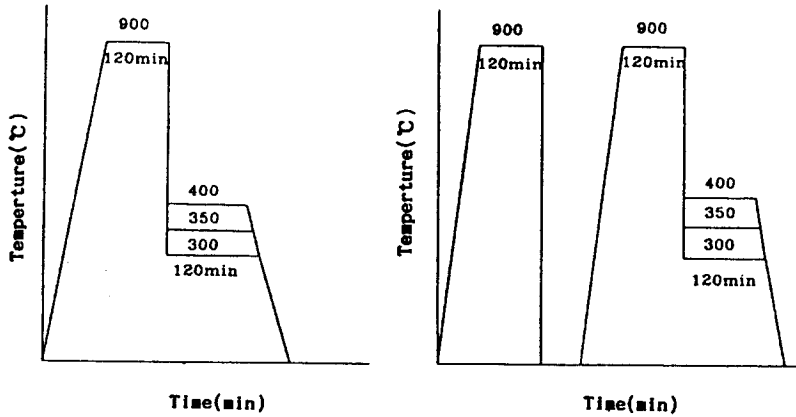
시편의 조성은 Table 1과 같고 용해·주조 및 오스템퍼링 처리방법은 보고서⁵⁾와 같으며 특수 오스템퍼링 열처리는 Fig. 1과 같이 하였다.

특수 오스템퍼링 열처리는 Prequenched 오스템퍼링 열처리(PQ), Preheated 오스템퍼링 열처리

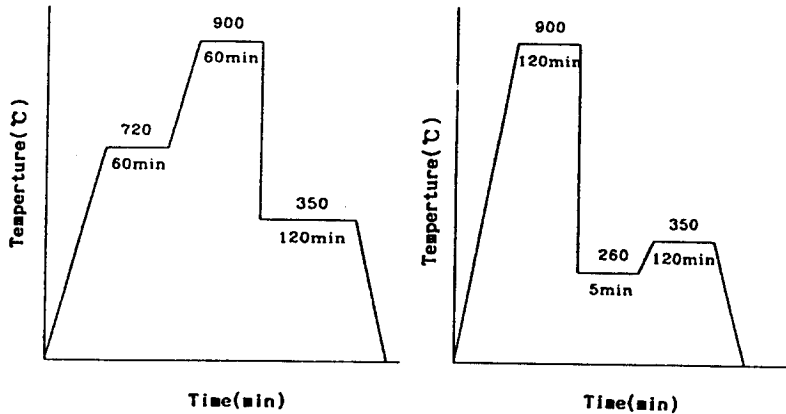
(PH), Step 오스템퍼링 열처리(ST)등으로 하였으며, 비교 오스템퍼링처리로서 Normal 오스템퍼링 열처리를 하였다. PQ 열처리의 경우 냉각시 시편의 변형 방지와 폭음, 연기등을 방지하기 위해서 수용성 합성용매인 UQ-E 15%를 물과 섞은 냉각제에서

Table 1 Chemical composition of specimens (wt. %).

Elements Specimens	C	Si	Mn	P	S	Mg	Mo	Cu	Ni
Unalloyed DCI	3.7	2.7	0.14	0.07	0.01	0.045	—	—	—
Mo-Cu DCI	3.6	2.6	0.16	0.07	0.01	0.045	0.313	0.331	—
Mo-Ni-Cu DCI	3.6	2.6	0.16	0.05	0.01	0.041	0.332	0.343	0.981
Mo-Ni DCI	3.7	2.7	0.16	0.06	0.01	0.042	0.320	—	1.012



(a) Conventional normal heat treatment(CN) cycle. (b) Quenched heat treatment(PQ) cycle.



(c) Preheated heat treatment(PH) cycle. (d) Step heat treatment(ST) cycle.

Fig. 1 Special heat treatment cycles.

에칭을 하였다. 열처리한 시편의 조직관찰, 기계적 성질 및 잔류오스테나이트량의 측정방법은 직접비교법⁸⁾으로 하였다.

2.2 탄성계수 측정

탄성계수 측정 시험편은 일반적으로 단면적의 적경이 9mm이상의 원주형으로 상부와 하부가 서로 수평면을 이루도록 가공하여 사용하였다. 시편의 윗부분에서 Ultrasonic wall thickness meter caliper CL-204 장비를 사용하여 sound velocity의 측정값을 아래의 실험식⁹⁾에 대입하여 탄성계수를 구하였다.

$$E = \left[\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \right] \rho v^2 \times 10^{-6} (\text{GPa})$$

여기서 E=탄성계수(GPa), ν =포아송비, ρ =밀도(g/cm^3), ν =시편의 수직으로 주사된 초음파 펄스 속도(m/s)이다.

2.3 마모시험

마모시험은 고속 마모시험장치(Tokyo OAT-U)을 사용하였으며 상대 마멸재는 두께가 3mm, 직경 3cm의 SM45C를 사용했으며, 마찰거리 66mm, 하중 3.2kg, 마찰속도 1.87m/s의 조건하에서 1회 실험마다 상대마모재의 Dressing을 실시하면서 비마모량(specific wear amount)을 구하였다. 마모시편은 연마지를 이용하여 1200#까지 연마한 후 0.03 μm Al₂O₃을 사용하여 정연마하였으며 마모면과 상대마모재는 알콜로 깨끗이 세척한 후 실험을 하였다. 비마모량을 구하였다¹⁰⁾.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 탄성계수에 미치는 합금원소 및 열처리의 영향

일반적으로 탄성계수는 결정립의 크기의 영향을 받지 않지만, 결정의 이방성 및 상의형상, 크기 및 분포 상태에 따라서 영향을 받게 된다. 기지조직은 퍼얼라이트나 페라이트로 변화되어도 탄성계수는 크게 변화

되지는 않는다. 다만, 페라이트가 퍼얼라이트 보다 탄성계수가 낮은 것은 페라이트화에 따른 시멘타이트량의 증가로 탄성계수가 저하되기 때문이다¹¹⁾. 따라서 주조합금의 탄성계수는 평균흑연립수 및 부피분율에 가장 큰 영향을 받으며 이들의 증가에 따라 탄성계수는 감소하며, 동일한 흑연의 부피분율에서는 흑연립수가 많은 경우가 탄성계수가 저하된다¹²⁾. 또한 조직에도 영향을 받고 있으며 그 예로 마르텐사이트 조직이 기타의 조직(퍼얼라이트, 오스테나이트, 페라이트등)보다 탄성계수를 저하시킨다고 사료되며, 특히 마르텐사이트와 유사한 특성을 가진 하부 베이나이트가 그 영향이 크다고 생각된다. 시편들의 DCI주조 상태에서 주조조직의 특성을 조사한 결과 Table 2와 같다.

Fig. 2는 300 $^{\circ}\text{C}$, 350 $^{\circ}\text{C}$ 및 400 $^{\circ}\text{C}$ 에서 오스텝퍼링한 각종 ADI 시편들의 탄성계수 측정결과이다. 그림에서 알수 있듯이 어떠한 오스텝퍼링 조건에서도 Mo-Ni-Cu DCI, Mo-Cu DCI, 무합금 DCI순으로 감소되었고 Mo-Ni DCI가 가장 낮았다. 그러나 흑연립수는 무합금 DCI가 가장 많고 Mo-Cu DCI, Mo-Ni-Cu DCI, Mo-Ni DCI는 유사한 값을 나타내었다. 따라서 흑연립수와 흑연량으로 보면 Mo-Ni DCI가 탄성계수가 가장 높아야 하지만 오스텝퍼링 처리한 ADI의 탄성계수가 제일 크게 나타났다. 그 이유는 탄성계수가 열처리후의 조직에 큰 영향을 받았기 때문이라 생각된다. 이것은 조직변화가 흑연의 부피분율과 입자수가 모상의 조직과 함께 크게 탄성계수에 영향을 미쳤기 때문으로 생각된다. 즉 오스텝퍼링에 의하여 모든 합금의 주조조직이 변화되었으며 그 조직변화는 Fig. 3과 같다. 이들 조직을 정량관찰한 결과 흑연립수와 양은 거의 변화가 없으나 모상의 조직이 크게 변화되었고 따라서 기계적 성질도 변화하였다⁵⁾. Mo-Cu ADI는 조대한 베이나이트 조직을 나타내고 있는 반면 Mo-Ni ADI는 미세한 베이나이트 조직을 나타낸다. 또한 잔류 오스테나이트량이 Mo-Cu ADI가 가장 적고 Mo-Ni ADI가 가장 많다. 무합금 ADI는 낮은 인장강도와 높은

인성 및 충격치를 갖지만 탄성계수가 Mo-Cu ADI 보다 낮은 것은 주조재에서 존재하는 많은 흑연립수의 영향이 조직의 변화에 의한 영향보다 크게 작용하였기 때문으로 사료된다. 합금을 첨가한 오스템퍼링 처리재에서는 흑연의 양과 수 뿐만아니라 이와 같은 조직의 변화에 따른 기계적 성질 변화에 의해서도 탄성계수가 큰 영향을 받은 것으로 사료되나 어떤 인자가 가장 큰 영향을 미치는 지는 차후 계속 연구할 필요가 있을 것으로 사료된다.

그리고 탄성계수는 템퍼링 온도의 증가에 따라서 증가되었다. 템퍼링 온도의 증가에 따라 합금첨가 ADI는 강도와 경도가 감소하고 연신율과 충격치가 증가하였다. 이와 같은 현상은 소입한 탄소강¹⁴⁾ 및 합금주철¹⁵⁾의 경우 템퍼링할 경우 탄성계수가 증가되는 형상과 동일하다. 그러나 Grech 등¹⁶⁾은 Cu-Ni ADI에서 템퍼링 온도에 따라 탄성계수 값이 일정치 않아 탄성계수는 강도 및 조직과는 무관하다고 하였으나, Vetiska¹⁷⁾는 구상흑연주철에서 인장강도는 탄성계수와 비례관계에 있다고 하였다.

본 연구 결과에서도 동일 합금의 경우는 탄성계수가 증가하면 강도가 감소되는 경향을 잘 나타내고 있다. 또한 합금첨가 ADI는 템퍼링온도가 증가하면 탄성계수가 증가하는 것은 400℃에서 템퍼링하면 상부 베이나이트가 형성되고, 300℃에서 템퍼링하면 하부

베이나이트가 형성되기 때문이라 생각된다. 이것은 저온 템퍼링의 조직인 하부 베이나이트는 탄소의 고용량이 상부 베이나이트보다 높아 부피 팽창에 의한 고밀도의 전위가 생성된다.

이와 같은 조직은 다량의 전위를 포함하고 있는 Lath형 마르텐사이트와 유사하며 이보다 결함이 적은 상부 베이나이트에 비하여 탄성계수가 적은 것으로 생각된다. 또한 400℃에서 템퍼링할 경우 잔류 오스테나이트량의 증가도 탄성계수의 증가에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 일반 탄소강을 냉침시 형성되는 마르텐사이트는 탄성계수가 낮다. 그 이유는 마르텐사이트변태에 의해 격자변형이 일어나고 이에 의하여 변태전위가 도입되기 때문이다.

이 마르텐사이트 조직을 가진 합금을 템퍼링하면 각종 결함이 회복과정에서 제거되어 탄성계수가 증가되며 또한 마르텐사이트가 분해되면서 전위밀도가 급격히 감소되고 조직중에 존재하는 잔류응력도 회복 또는 poligonization에 의하여 경감되어 탄성계수가 증가된다고 하였다¹³⁾. 이와같은 현상은 흑연의 부피 분율 및 입자수가 일정할 경우에 잘 적용되나 베이나이트의 형태 및 크기와 잔류오스테나이트량등이 다르고 합금의 성분이 상이한 경우에는 탄성계수를 지배하는 인자가 매우 복잡하게 되고 따라서 직접 탄성계수를 비교 검토가 어렵다.

Table 2 Microstructural analysis in the as cast of DCIs.

	Volume percent of parlite(%)	Volume percent of ferrite(%)	Shape of graphite	Number of graphite (#/mm ²)	graphitization (%)	Radius of graphite(μm)	Volume percent of graphite(%)
Unalloyed DCI	11	67.7	Spheroidal	329	95	13	20
Mo-Cu DCI	41	40.7	"	254	95	17	25
Mo-Ni-Cu DCI	37	40.0	"	245	93	20	27
Mo-Ni DCI	20	60.3	"	241	93	13	15

3.2 탄성계수에 미치는 특수열처리의 영향

Fig. 4는 오스탬퍼링 온도를 350℃로 고정하고 합금의 변화 및 특수열처리 도입에 따른 탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 탄성계수는 합금의 종류 및 특수 열처리에 따라서 그 값이 상이하게 되었다. 즉 Mo-Cu ADI가 가장 탄성계수가 높게 나타나고 있으며 또한 모든 합금에서 CN-ADI 처리재가 가장 낮은 탄성계수를 나타내고 있고 PQ-ADI, ST-ADI 그리고 PH-ADI 처리재 순으로 탄성계수가 증가되었다. 본 연구결과에 의하면 특수 열처리한 ADI에서는 인장강도나 경도값이 증가하면 탄성계수가 감소하였다⁸⁾. 이것은 베이나이트 조직이 미세할수록 고

강도를 나타내는 반면 고밀도의 전위를 나타내므로 탄성계수는 오히려 감소되었다고 생각된다. 그러나 이 결과는 합금의 성분이 동일할때에 잘 적용되나 합금의 성분이 상이하여 조직이 상이하게 되고 따라서 각 기계적 성질등이 상이하고 또 흑연의 수와 크기등도 다를 경우에는 매우 복잡하여 항상 일치된 현상을 나타낸다고 단정할 수가 없다. 이 경우는 탄성계수에 미치는 흑연의 수 및 양과 조직변화에 따른 각종 기계적성질 변화중 어떤 인자가 탄성계수에 더 큰 영향을 미치는가에 의하여 탄성계수의 크기가 결정되어진다고 생각된다, 이와같은 결과는 Table 3과 Fig. 4에서 잘 나타나고 있다.

Table 3 The effect of additional elements and special heat treatments in ADIs on tensile strength(Mpa).

Spe. Heat Treat. \ ADIs	UN-ADI	Mo-Cu ADI	Mo-Cu-Ni ADI	Mo-Ni ADI
CN-350	1200	1155	1060	1105
PQ-352	1195	1175	1150	1115
PH-350	1050	940	960	920
ST-350	1190	1050	960	845

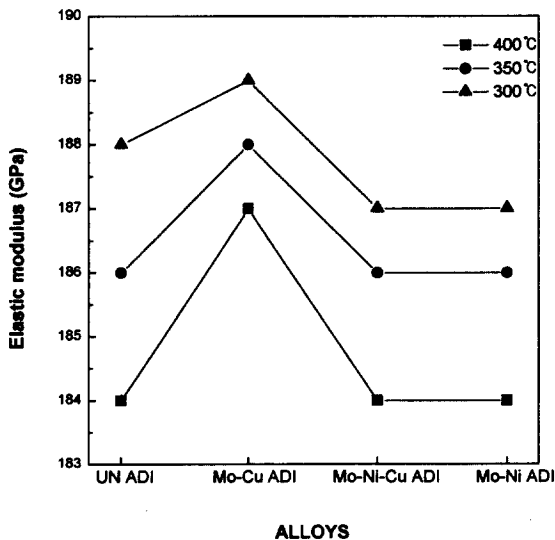


Fig. 2 Effects of austempering temperatures and addition elements in ADIs on the elastic modules.

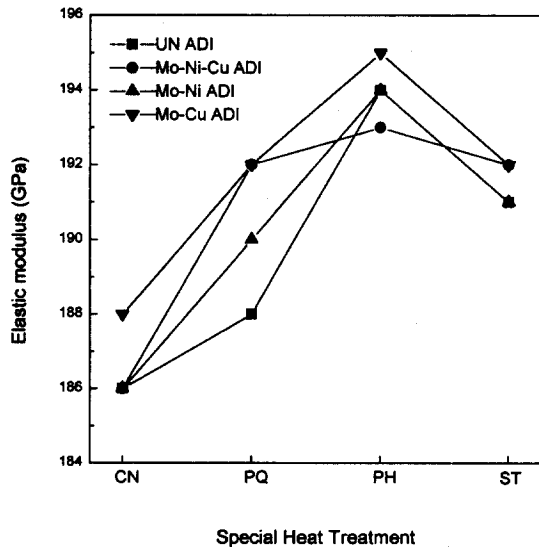


Fig. 4 Effects of special heat treatments and addition elements in ADIs austempered at 350℃ on the elastic modules.

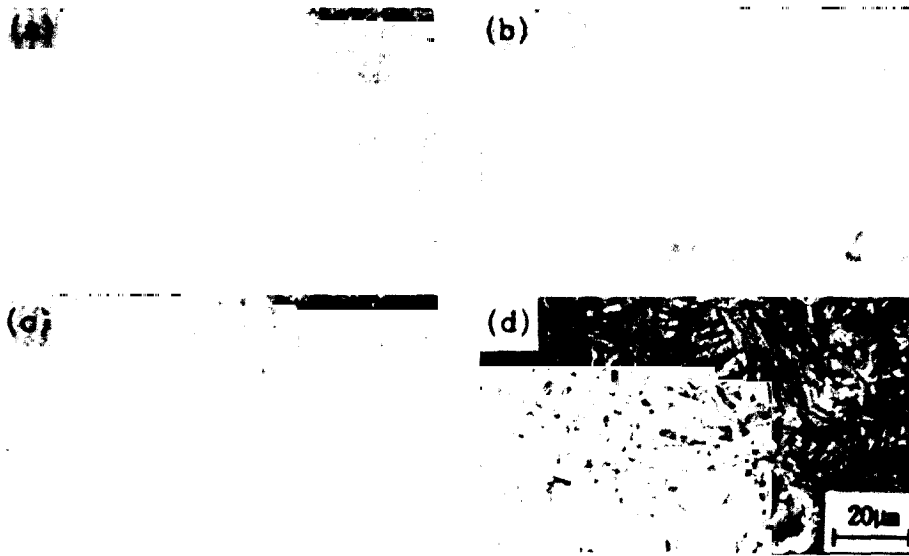


Fig. 3 Micrographs of various ADIs austempered at 350°C
 (a) Unalloyed ADI (b) Mo-Cu ADI (c) Mo-Ni-Cu ADI (d) Mo-Ni ADI

각 합금의 특수열처리에서 UN-ADI 및 Mo-Ni ADI 합금이 대체로 탄성계수가 낮고 Mo-Ni-Cu ADI, 그리고 Mo-Cu ADI 순으로 탄성계수가 증가한다. 합금 성분이 상이한 Mo-Cu ADI와 Mo-Ni ADI의 탄성계수와 강도의 관계를 조사하면 강도가 증가하면 탄성계수가 증가하는 일반적인 현상이 잘 나타나고 있다. 그러나 CN-ADI는 고강도이지만 탄성계수가 낮은 것은 DCI에서 흑연립수가 다른 합금에 비하여 현저히 많기 때문이라 생각된다.

Mo-Ni ADI 합금의 탄성계수가 낮은 것은 구상 흑연의 입자수가 적고 흑연량이 적지만 3.1에서 기술한 바와 같이 조직이 상이하고 Ni 원소가¹⁸⁾ 첨가될 때 경우 탄성계수가 저하되기 때문이라 생각된다. Mo-Cu ADI가 높은 탄성계수를 나타내는 이유는 3.1항에서 설명한 이유와 그외에도 알려지지 않은 조직 및 Cu의 첨가영향이 있을 것으로 사료된다.

3.3 내마모 특성에 미치는 합금원소 및 열처리의 영향

Table 4와 Fig 5는 주조 및 300°C, 350°C 및 400°C에서 오스렘퍼링 열처리한 시편들의 내마모 특

성변화를 각각 나타낸 것이다. 일반적으로 경한 재료일수록 마모량은 감소하는 것으로 알려져 있으며 Fig 5와 Fig 6에 의하면 주조상태 시편에서는 기지 조직이 흑연을 구속하지 못해 흑연이 빠져나가는 pitting 현상과 이 부위에서 균열발생으로 인한 기계적 마모 현상과 아울러 뜰어지는 용착마모가 발생하여

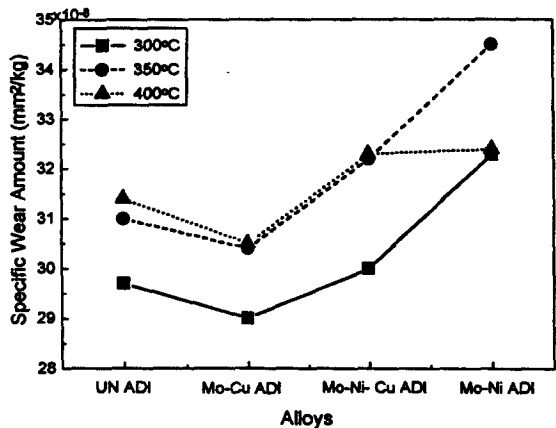


Fig. 5 Effects of austempering temperatures and addition elements in special heat treated ADIs compared with DCIs on the specific wear amount.

마모량은 증가하였다. 특히 연질의 페라이트가 많을수록 상대마찰재와의 응착마모현상이 쉽게 발생하여 마모량이 증가함을 알 수 있었다. 한편 흑연립수가 많을수록 흑연의 고체 윤활기능¹⁹⁾으로 마모량이 적다고 알려져 있으나 Fig. 5와 Fig. 6에서 알 수 있는

바와 같이 무합금의 DCI가 Mo-Cu DCI 와 Mo-Ni-Cu DCI 보다 내마모성이 저하되는 것은 흑연립수는 많지만 흑연량이 적고 페라이트량이 많기 때문으로 생각된다.

Table 4 Effects of addition elements in DCIs on the specific wear amount(%)

	UN-DCI	Mo-Cu DCI	Mo-Ni-Cu DCI	Mo-Ni DCI
Specific wear amount(mm ² /kg)	54	28	28.5	48

저온 오스템퍼링열처리에서 기지 조직이 하부 베이나이트를 형성하면 흑연과의 강력한 구속력 또는 결합력으로 흑연이 이탈되지 않고 고체윤활제로써 그 역할을 다하여 미끄럼 마모현상으로 인한 마모량은 적게되며^{20, 21)} 템퍼링처리 온도가 증가할수록 베이나이트의 핵생성속도는 감소하지만 탄소의 확산속도가 커지므로 탄소가 베이나이트 래스중간에 존재하는 오스테나이트로 빠르게 확산되므로써 그 두께가 증가하며 안정한 고탄소의 연질의 잔류 오스테나이트를 형성하고 이 잔류 오스테나이트량이 증가함에 따라 응

착 저항이 적어 응착마모의 증가로 마모량이 증가하게 됨을 알 수 있다. 또한 Mo-Ni을 첨가하여 CCT 곡선을 우측으로 이동시켜 오스테나이트에서 베이나이트 변태를 억제시켜 연질의 잔류오스테나이트량을 증가시키므로써 응착마모가 발생하여 마모량은 증가한다²²⁾. 한편 저온 템퍼링 열처리에서 미세하게 형성된 하부 베이나이트 시편은 약간의 기계적 파괴만 있을 뿐 매우 단단한 기지 조직이기 때문에 응착저항이 증가하여 원자 격자의 탄성적인 비틀림으로 인해 내부응력이 증가하게 되지만^{23, 24)} 응착부의 결합이 약해

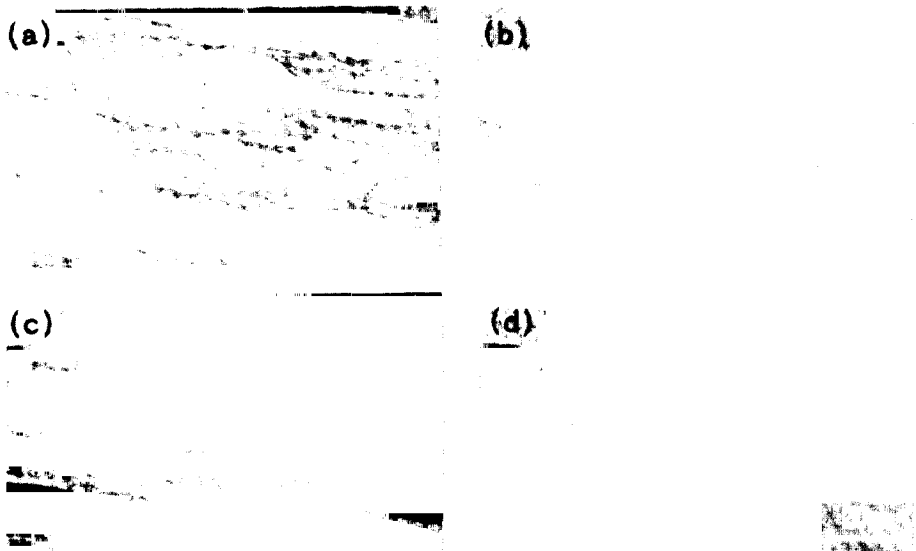


Fig. 6 Morphologies of wear surfaces in various DCIs austempered at 350°C
 (a) Unalloyed ADI (b) Mo-Cu ADI (c) Mo-Ni-Cu ADI (d) Mo-Ni ADI

저서 약간의 기계적 마모의 요인이 되기도 한다. 이와같은 사실로 보아 경한 하부 베이나이트로 변태시키는 것이 내마모성을 향상시키는데 유용할 것으로 생각되나 사용하고자하는 부품의 기능과 부위에 따라 다른 기계적 성질을 고려하여 필요한 열처리 조건을 선정하여야 하며, 또한 적절한 합금원소도 첨가하여야 할 것이다. 본 연구에 의하면 Mo-Cu 합금을 300℃에서 오스템퍼링 처리시 우수한 내마모성을 나타내었다.

3.4 내마모 특성에 미치는 특수열처리의 영향

ADI의 내마모성에 미치는 인자는 흑연의 양과 수, 열처리 온도와 합금원소에 따른 베이나이트 크기 및 형상, 그리고 이 베이나이트와 구상흑연과의 결합력 및 잔류오스테나이트량 등이다. Fig 7과 Fig 8을 통해서 각종 특수 열처리에(오스템퍼링 온도 : 350℃) 따른 내마모성을 보면 모든 열처리조건에서 Mo-Cu PH-ADI가 내마모성이 가장 양호한 것이 특이하며 이는 Mo-Cu ADI가 Mo-Ni-Cu ADI, Mo-Ni ADI보다 항온변태곡선을 우측으로 적게 이동시켜 오스테나이트에서 베이나이트의 변태가 빨리 시작되어 오스테나이트의 안정화에 기여도가 감소하여 잔류오스테나이트량이 적어지기 때문이라 생각하

며 또한 내마모성은 인장강도에 관계가 있는데 인장강도가 클수록 기지 베이나이트가 강할뿐아니라 구상흑연과의 강한 결합으로 인해 마모시 흑연이 이탈되지 않고 고체윤활제^{20, 21)}로서의 기능을 다하여 미끄럼 마모현상이 유발되어 마모량은 줄어들게 되는데 모든 특수열처리 조건에서 Mo-Cu ADI가 강도가 높아 위와 같은 이론에 잘 부합된다. 무합금 ADI가 모든 특수열처리에서 잔류오스테나이트가 적고 강도가 높은데도 마모량이 특수열처리한 모든 Mo-Cu ADI보다 많은 것은 앞으로의 연구과제이다. PH-ADI는 900℃에서 오스테나이트화 처리전에 720℃에서 1시간 유지시켜 줌으로써 일부 퍼얼라이트가 미세화되고 이 퍼얼라이트로부터 결정입이 작은 오스테나이트로 변태한 후 결국 베이나이트 변태가 미세해질 뿐만 아니라 sliver 형태의 잔류 오스테나이트가 형성되어 잔류 오스테나이트가 적어짐으로써 내마모성은 증가한다. ST-ADI는 잔류 오스테나이트량이 PH-ADI보다 약간 적음에도 불구하고 마모량이 큰데 이는 ST-ADI가 BHN 350~390의 고경도 재료로서 강한 원자결합으로 인해 표면에너지가 증가하여 내부용력이 상승하게 됨에 따라 마모초기에 기계적 마모가 발생했기 때문으로 생각된다. CN-ADI와 PQ-ADI에 있어서 큰 차이는 보이지 않으나 PQ-ADI가 약간 내마모성이 떨어지는 것으로 나타난다.

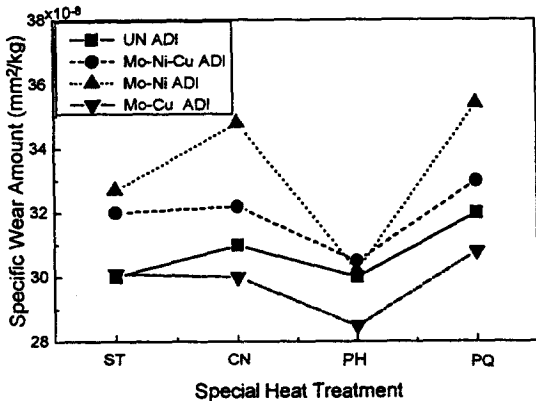


Fig. 7 Effects of special heat treatments and addition elements in ADIs austempered at 350℃ on the specific wear amount.

4. 결 론

1. 오스템퍼링 온도가 상승할수록 탄성계수는 증가하나 내마모성은 감소하였다. 또한 Mo-Cu ADI의 탄성계수가 다른 ADI 합금의 탄성계수보다 모든 템퍼링 온도에서 높게 나타났다.
2. 특수열처리한 경우도 Mo-Cu ADI가 높은 탄성계수를 나타내었고, Preheat 열처리(PH처리)한 ADI가 다른 특수열처리의 경우보다 높은 탄성계수를 나타내었다.
3. Mo-Cu ADI는 높은 내마모성을 갖는 반면 Mo-Ni-Cu ADI는 UN-ADI와 유사한 내마모



Fig. 8 Morphologies of wear surfaces of various special heat treated Mo-Cu ADI(austempered at 350°C).
(a) PQ-ADI (b) CN-ADI (c) ST-ADI (d) PH-ADI

성을 갖지만 Mo-Ni ADI는 내마모성이 가장 나쁘게 나타났다.

4. 300°C에서 템퍼링한 ADI가 내마모성이 높은 것은 미세하고 침상인 하부베나이트 조직 때문으로 사료된다.
5. 특수 열처리한 합금의 경우 내마모성은 Preheat 열처리(PH처리)한 Mo-Cu ADI에서 가장 높은 값을 나타내었다.

후 기

본 연구는 산·학·연 공동기술개발 전북지역 컨소시엄사업에 의하여 수행되었음에 감사드립니다.

참고문헌

1. J.F.Janowak and R.B.Grundlach : AFS Trans., 54 (1983) 377
2. R.C.Voigt : Cast Metals, 2 (1985) 1
3. T.N.Rouns, K.B.Rundman and D.M.

Moore : AFS Trans., 121 (1984) 815

4. D.J.Moore, T.N.Rouns and K.B.Rundman : ASM, 4 (1985) 7
5. 김석원 : 자동차부품용 내열 및 고강도 구상흑연주철의 제조기술의 개발, '93 산·학·연 연구보고서, 전북대학교, (1994)
6. S.W. Kim, K.D.Woo, C.S.Lee, S.W.Han : Proceeding of 3rd Asian Foundary Congress, The Korean Foundarymen's Society, (1995) 248
7. S.W.Kim, K.D.Woo and S.W.Han : Proceeding of 3rd Asian Foundary Congress, The Korean Foundarymen's Society, (1995) 239
8. K.B.Rundman and R.C.Klug : AFS Trans., 74 (1982) 499
9. 村松篤良 : 金属材料の 弾性係數 日本 機械學會, (1976)
10. 大越諄外 : 日本機械學會論開集, 21 (1955) 555

11. 藤井澄二：金屬材料の 弾性係數に 關する 資料調査研究分科會報告書 “金屬材料の 弾性係數に 關する資料” 日本機械學會 昭和 55. 261, 285
12. Z.Hashin : ASM J. Aool.Mech., 29 (1962) 43
13. I.E.Pope : Met. Trans., 7A (1976) 103.
14. 手塚秀男：東京工獎報 22 (昭和 45) 67
15. 藤井澄二：金屬材料の 弾性係數に 關する 資料調査研究分科會報告書 “金屬材料の 弾性係數に 關する資料” 日本機械學會 昭和 55. 18. E.H.F.Date : British J.Appl.Phys., 2 (1969) 1373
16. M.Grech and J.M.Young : Cast Expo, April 21-24, Reprint No 90-160 AFS
17. A. Vetiska : Giessereitechnik 17 (1971) 19. Richard B.Gundlach and Jay F. Janowax : Metal Progress 5 (1985) 92
20. E.Dorazil and B.Brata : Technical Univ., of Brno, 4 (1982) 114
21. R.A.Haroin and G.N.J.Gilbert : The British Foundryman, 18 (1986) 8
22. 박홍식 : 한양대학교 박사학위논문, (1989)
23. 江川 清美 : 潤滑, 26 (1981) 48
24. M.O.A.Mokhtar : Wear, 78 (1982) 297