

ADI(Austempered Ductile Irons)기술개발 및 응용

산업과학기술연구소 압연연구부 공정연구실

이 영 호

1. 서 론

오스텨퍼링(Austempering) 열처리가 구상후연 주철에 최초로 시도된 것은 1950년대 중반 경이었으나 실제 적용되어 austempered ductile iron(ADI)이 다량 생산되기 시작한 것은 1970년대 중반 이후 부터이다. ADI가 최초로 큰 관심을 불러 일으킨 것은 미국 General Motors¹⁾가 자체 개발한 하부 베이나이트 형(lower bainitic grade)ADI를 자사 승용차의 후륜축 하이포이드 피어언(rear-axle hypoid pinion)과 링기어(ring gear)로 사용한 데에 기인한다. GM이 발표한 바에 따르면 ADI의 성능이 아주 우수하여 종래의 침탄 열처리된 단조부품을 경제적으로 대체할 수 있다고 발표했다.²⁾ 거의 같은 시기에 중공은 ADI를 트럭의 후륜축 기어(rear gear)로 사용하고 있다고 발표했다.³⁻⁵⁾ 그 이후 주철 산업을 주도하고 있는 대부분의 국가들이 ADI의 개발 및 응용을 위한 연구를 추진해 왔으며 이와같은 관심도는 '84년도와 '86년도에 개최된 2차의 국제회의(International Conference on ADI)에서 잘 나타났으며 ADI의 중요성이 다른 재료의 대체제로서 세계적으로 널리 인식되기 시작했다.

본 기술해설에서는 ADI의 열처리 과정 및 고려해야 할 중요 요소, 기계적 성질 및 응용, 그리고 향후 전망등에 관해 고찰함으로써 ADI의 국내 활성화에 도움이 되고자 한다.

2. ADI 열처리

오스텨퍼링(Austempering) 열처리는 그림 1에서 보는 바와 같은 열처리 방식, 즉 오스테나이트화, 일정시간 오스텨퍼링 처리, 그리고 상온으로의 냉각등의 순서에 따른다.⁶⁾ 구상후연 주철의 오스텨퍼링 열처리로 개발되는 미세

조직은 그림 2에 보인 바와 같이 침상 페라이트와 탄소가 강화된 잔류 오스테나이트(austenite)의 복합 미세조직이다. 이 미세조직은 균일한 오스테나이트 상태에서 선택된 오스텨퍼링 온도로 급속 냉각함으로써 페라이트(ferrite), 상부 베이나이트(upper bainite) 혹은 퍼얼라이트(pearlite)의 생성이 억제되고, 오스텨퍼링 온도에서 침상 페라이트가 생성되며 축출된 탄소가 잔류 오스테나이트에 용해됨으로써 생성된다. 변환이 종료된 오스테나이트는 탄소함유량이 약 2%정도까지 증가되어 영하 120℃정도의 온도에서도 매우 안정된 상태를 유지한다. 오스텨퍼링 열처리 과정에서 고려해야 할 사항은 오스테나이트화 온도, 오스텨퍼링 온도 및 시간이다.⁷⁻¹⁴⁾

ADI에 사용되는 오스테나이트화 온도의 범위는 815에서 925℃사이이며 노내 온도편차를 6℃이내로 제어해야 한다. 오스테나이트화 온도의 선택은 합금원소, 주물의 크기, 열처리된 주물의 조직, 요구되는 기계적 성질에 따라 달라진다. 오스테나이트화 온도가 바뀌면 오스테나이트의 탄소 함유량이 바뀌고 오스텨퍼링 처리후 잔류되는 오스테나이트의

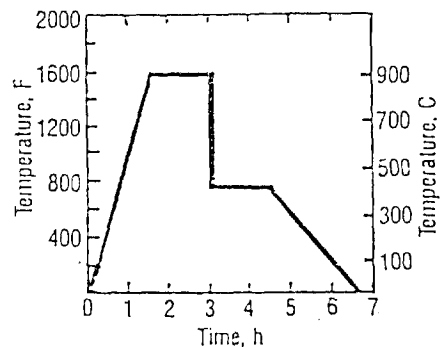


그림 1 오스텨퍼링 열처리 공정 개략도 (6).

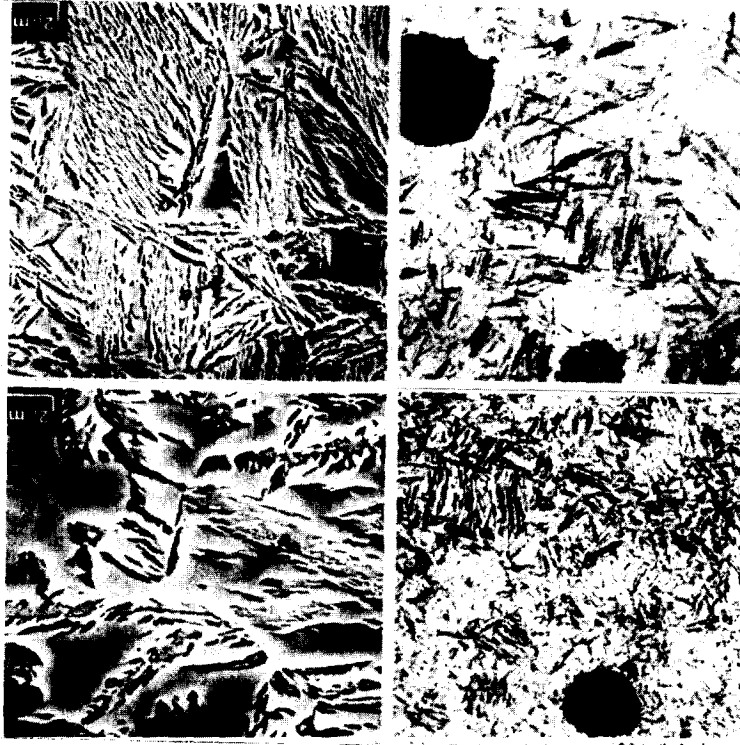


그림 2 오스텨퍼드 구상흑연주철, 열처리 온도 370°C(상), 315°C(하), 오스테나이트 처리온도 900°C, 현미경조직 오스테나이트 (γ), 침상 페라이트 (α), 마르텐사이트 (M) (7).

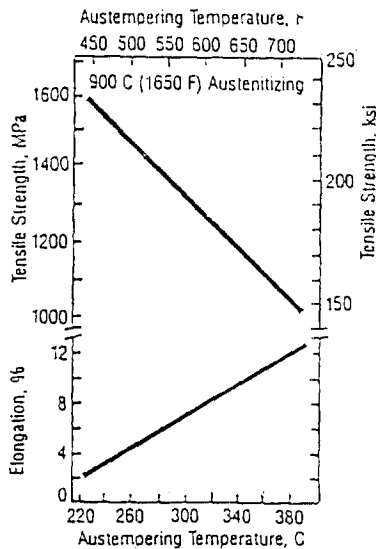


그림 3 ADI의 인장강도 및 신율에 미치는 항온 처리 온도의 영향 (6).

양 및 오스텨퍼링 속도도 바뀐다(그림 3).^{1,6,7,9,14-17)}

기지조직(matrix)내의 탄소 분포를 균일하게 하려면 적당한 오스테나이트 처리시간을 필요로 한다. 오스테나이트 처리시간은 기지조직의 구성, 구상흑연(graphite nodule)의 크기, 주물의 크기, 합금 원소, 오스테나이트화 처리온도에 따라 차이가 있으나 0.5-4시간 사이가 통상적이다.^{1,7,8)}

오스텨퍼링 온도는 요구되는 기계적 성질(그림 4)에 따라 다르지만, 통상 205°C에서 400°C 범위내에서 선택되며 온도 편차가 6°C 이내로 제한되어야 한다. 고강도가 필요할 경우에는 낮은 온도를 선택해서 하부 베이나이트의 미세조직을 얻고 고연신율이 요구되는 경우에는 높은 온도를 선택하여 상부 베이나이트의 미세조직을 얻는 방법이 활용되며 이와 같이 오스텨퍼링 온도를 임의로 선정하여 강도 및 연신율을 효율적으로 조정할 수 있다.^{5-9,12-16,18)}

요구되는 오스텨퍼링 시간은 합금성분, 탄소입자의 수, 합금성분의 편석정도, 그리고 오스테나이트화 열처리 온도

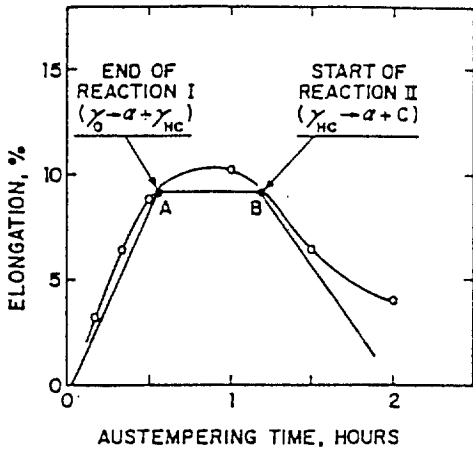


그림 4 오스텨퍼링시 두가지 베이나이트 반응이 인성에 미치는 영향.
오스테나이트 (γ), 침상 페라이트 (α),
고탄소 오스테나이트 (γ_{HC}), 카바이드 (C) (7).

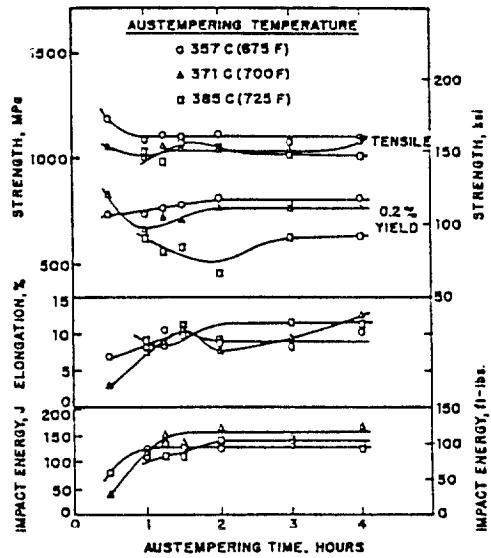


그림 6 오스텨퍼링 시간이 성질에 미치는 영향, 합금성분 3.6% C, 2.5% Si, 0.5% Mn, 1.5% Ni, 0.3% Mo (7).

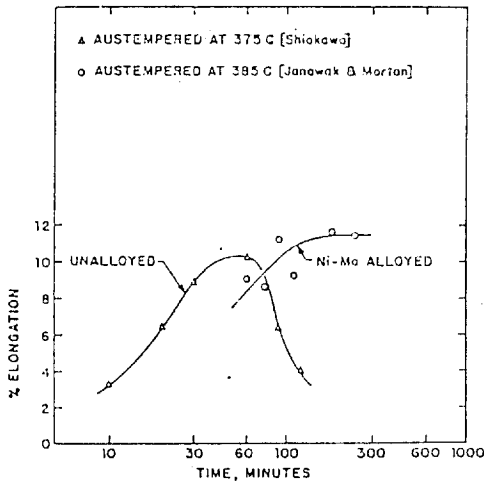


그림 5 오스텨퍼링시 연신율의 저하를 순연시키는 Ni-Mo 합금 효과 (12).

등에 따라 결정된다. 오스텨퍼링 시간이 너무 짧은 경우, 상온으로의 냉각시 마르텐사이트(martensite)조직이 형성되므로 연성이 저하된다(그림 5). 이와같은 잔류 오스테나이트 분해현상은 합금원소 특히 Ni 및 Mo 등을 첨가함으로써 억제될 수 있으며 오스텨퍼링 시간에 따른 연성의 저하현상을 순연시킬 수 있다. 그림 6 및 그림 7은 오스텨퍼링 온도 및 시간에 따른 기계적 성질을 보인 것으로 비교적 넓은

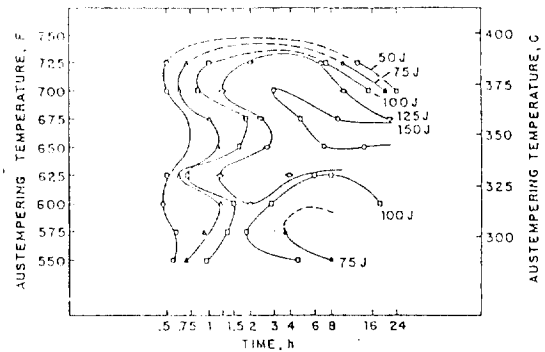


그림 7 오스텨퍼링 온도, 시간과 충격치와의 관계(단위 Joules) (7).

은 온도 및 시간 범위에 걸쳐 제조가 가능함을 알 수 있다. (7,9,12,18)

3. 합금과 경화능

오스텨퍼링 열처리 후 페라이트를 생성시키지 않고 베이나이트 만의 조직을 얻으려면 대부분의 경우 합금원소의 첨가가 필요하다. 즉 합금원소를 첨가함으로써 경화능을 증가시키고 원하는 미세 조직의 형성을 효율적으로 조절할수

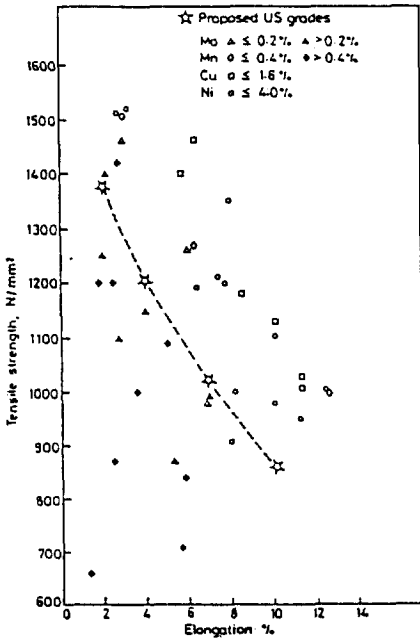


그림 8 합금원소가 ADI 인장강도와 신율에 미치는 영향 (2)

있다는 측면이다. 구상흑연주철의 경화능을 증가시키기 위해 사용할 수 있는 합금원소는 Ni, Cu, Mn 그리고 Mo로 제한되어 있다. V, Cr 과 같은 철강의 경화능 향상에 주로 쓰이는 원소들은 입계 또는 cell boundary 에 탄화물을 형성하여 취성을 나타내는 효과를 가져올 뿐 아니라 기지조직내의 탄소함량을 감소시켜 경화능을 저하시키므로 사용하지 않는다. 19-22)

구상 흑연주철의 경화능에 대한 자료로는 CCT 곡선과

표 1 ADI의 합금원소 성분, wt%(6)

Element	Range	Developed	Operating Range.
Total Carbon	3.2 - 3.8	3.4 - 3.8	0.2
Silicon	2.0 - 3.0	2.25 - 2.75	0.15
Manganese	0.5 max.	0.3 max	0.05
Phosphorus	0.03 max.	—	0.01
Chromium	0.06 max.	0.06 max	0.01
Nickel	5.0 max.	1.5	0.1
Copper	1.0 max.	—	0.1
Molybdenum	0.5 max.	0.3	0.05

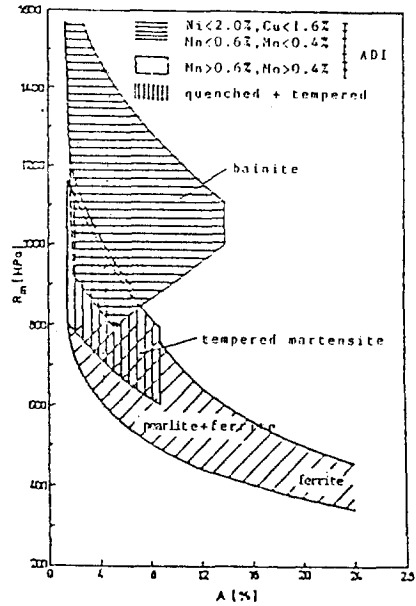


그림 9 기지 조직에 따른 인장 강도와 신율의 분포 (1)

Jominy 경화능 곡선등이 있다. 18,23-25) 그림 8은 다양한 합금원소들이 ADI의 인장강도와 연성에 미치는 영향을 보인 것으로 합금의 경우 편석에 의해 연성이 급격히 저하되는 점이다. 편석은 구상흑연주철에 있어서 필연적이며 합금원소, 주물의 크기, 주물의 냉각 속도에 영향을 받는다. 편석은 기지조직내에 불균일한 상변태를 초래하며 열처리후의 기계적 성질에 악영향을 미친다. 그러므로 양질의 ADI를 만들려면 표 1에서 보는 바와같은 합금원소의 조절이 필요하다. 특히 고연성 및 고인성이 요구될 경우에는 Mo 및 Mn 양의 제한이 필요하며 잔류 불순물의 양이 엄격히 규정치 이하로 제한되어야 한다. 6-8,11,12,16,19,22,24,26,27)

4. ADI의 기계적 성질 및 응용

ADI의 특성은 고강도, 고연성 및 고인성이다. 그림 9는 구상흑연 주철의 기지조직에 따른 기계적 성질을 보인 것으로 ADI의 우수성으로 알 수 있다. ADI의 강도와 연성에 관한 자료는 열처리 조건, 주조물의 질, 합금원소 등에 따라 어느정도 차이는 있으나 표 2와 3에 보인바와 같은 등급으로 나눌 수 있다. 6,7,22)

ADI의 파괴인성(fracture toughness)은 아주 우수해서 K_{Ic} 값이 $105 \text{ MN}^{3/2}/\sqrt{\text{m}}$ 까지 이른다(그림 10). 내피로성 또

한 그림 11 과 그림 12 에 보인 바와같이 아주 우수해서 단조품(특히 기어)과 효율적으로 대체될 수 있다. ADI는 가공경화 능력이 있으므로 shot-peening이나 압연 등에 의한 표면개질을 통하여 내피로성을 더욱 향상시킬 수 있다. ^{6,13,22,28,29)}

ADI는 내마모성이 아주 우수하여 경도가 500 H_B인 단철(wrought steel)보다 300 H_B의 ADI쪽이 오히려 수명이 길다고 보고됐다. 이같은 수명의 연장은 조직내의 오스테나이트가 가공경화됨에 기인한다. ^{6,10,22,30,31)}

상기한 ADI의 우수한 기계적 성질은 우수한 주조물의 질, 열처리제어 등이 근본이 되어야 한다. 우수한 ADI 생산을 위한 조건을 요약하면 표 4와 같다.

현재 ADI가 응용되고 있는 분야는 크게 기어류와 자동차 부품 등이 주종을 이루고 있으나 복잡한 주조물 등의 일반 공학부품에도 널리 응용될 수 있다. 그림 13은 성공적으로

상용화되고 있는 ADI 응용의 예들을 보인 것이다. 표 5는 ADI의 응용을 분야별로 모은 것으로 주로 강철 단조품의 대체재로 많이 사용되고 있음을 알 수 있다. ^{7,13,22)}

5. ADI의 전망

ADI의 우수한 기계적 성질과 광범위한 응용 가능 분야를 바탕으로 새로운 공업 소재로서의 ADI의 활용은 더욱 확산되고 증가될 전망이다. 이를 위해서는 표 4에 보인바와 같은 기술적 측면 이외에도 ADI사용에 따른 경제적 잇점 및 판매망 등의 경제적 측면의 뒷받침 되어야 한다.

현재 ADI의 이용에 따른 경제적 잇점에 관한 연구는 한정되어 있으나 ADI기어에 관한 자료를 바탕으로 강철 단조품과 비교 분석코자 한다. ADI가 갖는 가장 큰 잇점은 주조를 이용하여 거의 완성된 부품을 생산한다는 것이다. 그에 따른 에너지 절약은 아주 커서 표 6에 보인 같이 ADI기어 생산시에 사용되는 에너지는 침탄 처리된 단조강 기어 생산에 사용되는 에너지의 약 50% 수준까지 절약될 수 있다. ²²⁾ 에너지 절약 이외에도 융통성 있는 칩수 조정,

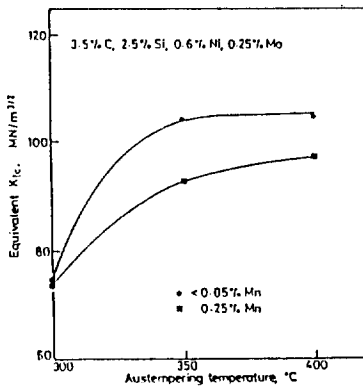


그림 10 오스테퍼링 온도에 따른 K_{IC} 값의 변화 (22).

표 3 BCIRA에 의해 제안된 ADI의 규격(22)

BCIRA Tentative Grade	Range of Properties in sections of varying size	
	Tensile strength N / mm ²	Elongation %
950 / 6	950 - 1020	6 - 12
1050 / 3	1050 - 1130	3 - 8
1200 / 1	1200 - 1300	1 - 6

표 2. 미국 Ductile Cast Iron Society에 의해 제안된 ADI의 규격(6)

Grade	Suggested Treatment		Tensile Strength MPa (ksi)	0.2% offset Yield Strength: MPa (ksi)	Elongation %	Typical Hardness: HB	Unnotched Charpy Bar Energy at Room Temperature J (M1b)
	Temperature C (F)	Time h					
1	400 (750)	0.5-8	860 (125)	585 (85)	10	269-331	110 (80)
2	355 (675)	1.25-8	1035 (150)	690 (100)	7	302-363	90 (65)
3	315 (600)	1.25-8	1200 (175)	830 (120)	4	341-415	60 (45)
4	260 (500)	1.0-8	1380 (200)	965 (140)	2	375-461	40 (30)

** Austenitized at 845 C (1550 F): all other grades austenitized at 900 C (1650 F): elongation and toughness tend to be improved by lowering the austenitizing temperature

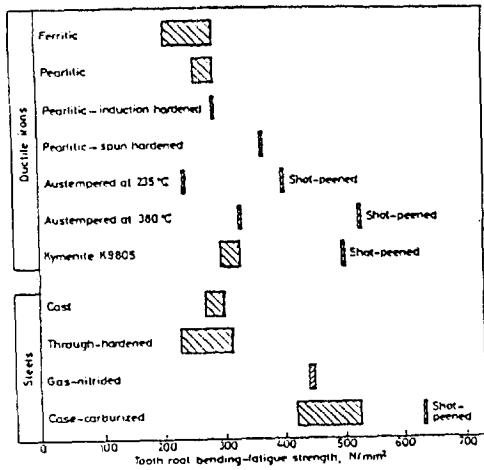


그림 11 실험적으로 결정된 기어의 굽힘 피로 강도 범위 (22).

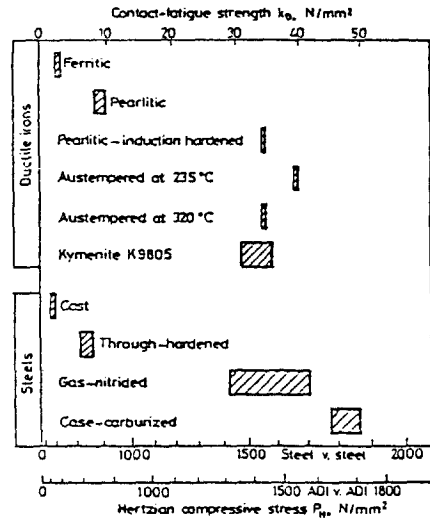


그림 12 실험적으로 결정된 접촉 피로 강도 범위 (22).

coring 을 이용한 복잡한 내부구성 등의 구조의 장점을 이용할 수 있는 잇점 또한 대단히 크다. ADI의 잇점은 기계 가공(machining)중에도 잘 나타난다. General Motors²¹⁾의 보고에 의하면 표 7에서와 같이 transmission 기어 생산시 tool의 마모를 현저히 줄일 수 있다고 했다. 또한 Fiat (Italy)가 수행한 연구에 의하면 ferritic 구상흑연 주철의 경우 tooling 과 sharpening에 드는 경비가 annealed 단조 강철에 비하여 약 75%정도 절감된다고 보고했다.²²⁾

표 4 우수한 ADI 생산을 위한 조건

<p>합금 성분 제어</p> <ul style="list-style-type: none"> - 합금 원소량의 엄격한 제어 - Mn, Cr 및 P 잔류량의 최저 유지 - 경화능 증가를 위해 Ni, Mo, Cu의 복합적 사용
<p>주조물의 질</p> <ul style="list-style-type: none"> - 다량의 구상흑연수 - 균일한 구상흑연 분포 및 형상 - 탄화물과 기포 (porosity) 제어 - 편석과 계재물의 최소화
<p>오스테퍼링 열처리 제어</p> <ul style="list-style-type: none"> - 오스테나이트화 및 오스테퍼링 온도를 ± 6 C 이내로 제어 - 탈탄 방지를 위한 분위기 제어 - 오스테나이트화와 오스테퍼링 열처리로 사이의 운반시간 제어

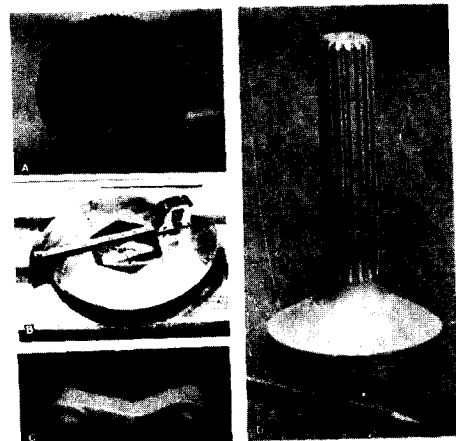


그림 13 ADI 응용예,
 A : 소형엔진용 타이밍 기어(Cummins Engine Co.),
 B : 타이어 컷터, 공구강 단조품 대체 (Atmosphere Furnace Co.),
 C : 39 kg로드 휠 압, 59 kg단조품 대체 (Hayes-Albion Corp.),
 D : 트럭 드라이버 샤프트, 1.6 kg (7).

BCIRA 는 영국에서 단조품을 ADI로 대체할 경우 20%이상의 경비 절감을 예상했으며 Cummins^{32,33)}의 경우 diesel engine의 timing 기어를 ADI로 대체할 경우 약 30%정도의 경비 절감이 가능하다고 보고했다. 만약 ADI를 사용함으로써 기어 이외의 응용분야에도 전술한 경비절감이 적용될 수 있다면 ADI의 전망은 대단히 밝다고 할 수 있다.

표 5 ADI의 응용예

기 어	자동차 트랜스미션; 디젤엔진용 타이밍 기어; 링 기어; 디퍼렌셜 하우징; 일반공업용
크랭크 샤프트	디젤 엔진용; 에어콘용; 콤프레사
엔진	커넥팅 랫드; 캠 샤프트; 일반부품
자동차 부품	서스펜션 스프링 스틱 및 브라켓; 드라이브 샤프트 요크; 스테브 샤프트; 셀렉트 휠크; 트라이팟 하우징; 킹핀; 스티어링 부품
중장비	보기판 카바; 트랙 가이드; 퍼니온 드라이브; 유니버설 조인트; DIGGER TEETH ; 마모 판; 트래킹 스프라켓
군사장비	트랙 링크 및 가이드; 서스펜션 압 및 스트라켓
농경장비	경작 도구; 제초도구
철도 부품	기차바퀴; 제동장치 부품; 서스펜션 링크 및 크레이들; 철로 보수 장비
스프라켓	체인 스프라켓; 컨베이어 체인 링크
절단기	도끼; 타이어 컷터; 밀링 컷터
롤	컨베이어 시스템 롤러; 선재 압연 롤
기타	붐시; 슬라이드 베어링; 마모 가이드; 수력 모터 부품

경제적 측면에서 또하나 고려되어야 할 사항은 시장성이다. ADI의 시장으로서 가능한 범주에는 강철 주조물 및 단조물의 대체에 의한 새 시장 개척과 신소재 등에 의해 잠식될 가능성이 있는 기존 시장의 유지 및 확장 등이 있다. 이 같은 시장 가능성을 바탕으로 ADI가 성공적으로 이용될 수 있는 분야는 표 5에 언급한 분야 이외에도 새로운 설계나 모델시험을 거의 필요로 하지 않는 일반 공업 부품 분야와 구조의 장점을 이용한 세밀하고 복잡한 형상이 요구되는 분야 등이다. 성공적인 시장개척을 위해서는 설계자와 구매자가 확신할 수 있는 균일한 기계적 성질의 확보와 경제성에 대한 신빙성있는 자료제공이 뒷받침 되어야 한다. 생산의

표 6 ADI와 침탄 단조 강철의 기어 생산에 소요되는 에너지량²²⁾.

Operation	Energy consumption kwh/T	
	Ductile Iron	Forged Steel
Production of blank	2500	4500
Annealing		500
Austempering	600	—
Case-hardening	—	800 - 1200
Total	3100	5800 - 6200

Saving : 46 - 50 %

표 7. 침탄 단조 강철을 ADI로 대체함에 따른 공구 수명의 증가(3)

Machining operation	Tool-life improvement %
Pinion blanking	
- centre press	30
- drill	35
- rough lathes	70
- finish lathes	50
- grind	20
Ring-gear blanking	
- bullard turning	200
- drilling	20
- reaming	20
Gleason machining	
- pinion - roughing	900
- finishing	233
- ring - roughing	962
- finishing	100

측면에 있어서도 주물업체, 열처리 업체, 가공업체가 서로 연계되어 각 공정의 최대 효율을 내는 것이 바람직하다.²²⁾ 예를 들어 일본의 경우 일본 구상혁신주철 협회주관으로 ADI 생산기술, 기계적 성질 등에 대한 연구를 15개 회원 산업체에서 수행하여 요구되는 기술이나 기준 등의 자료를 산업체에 효율적으로 공급하고 있다.¹³⁾

6. 요약

ADI는 우수한 기계적 성질과 경제성을 바탕으로 80년대

들어 중요한 공업소재의 하나가 되었다. 성공적인 ADI 개발에 중요시 되는 요소로는 오스테나이트화 온도와 시간, 오스템퍼링 온도와 시간, 합금원소, 주물의 질 등이다. 온도와 시간은 ADI의 성능과 매우 밀접한 관계가 있으므로 엄격한 제어가 필요하다. 양질의 주물만이 양질의 ADI을 생산할 수 있으므로 열처리 전 주물의 질에 대한 관리가 필요하다.

ADI의 우수한 성능으로는 고강도, 고연성 및 고인성, 내피로성, 내마모성 등이 있다. ADI의 성능을 이용하여 응용될 수 있는 분야는 기어 및 자동차 부품등의 단조강철 대체품과 주조성 및 가공성 등을 이용한 일반 공업제품에 이르기까지 다양하다. 경제적 측면에서의 ADI의 잇점은 생산에너지 및 가공비의 절감 등이다.

새 공업 소재로서의 ADI의 전망은 기술적, 경제적 측면에서 보장되어야 할 사항이 있으나, 이의 최대 장점인 우수한 강도 및 연성, 내피로성, 파괴인성의 조합적인 기계적 성질과 강철 단조품에 대한 경제성, 주조가 부여하는 부품설계상의 융통성을 바탕으로 대단히 밝다고 할 수 있다.

7. 참고문헌

1. J.Dodd : Modern Casting. vol.668, pp.60-66, 1978.
2. Z.Yicheng and others : 46 th. Intl. Foundry Cong., pp.7, 1979.
3. M.Johansson, A.Vesanen, and E.Retting : BCIRA Trans., vol.15, no.11, pp.539-600, 1976.
4. M.Johansson : AFS Trans. vol.85, pp.117-122, 1977.
5. M.Johansson : Proc. of the 45 th. Intl. Foundry Cong., Paper no.22, 1978.
6. AMAX Inc. : Internal Paper, 1985.
7. R.B.Gundlach and J.F.Janowak : AFS Trans. vol.86, pp.377-388, 1983.
8. R.C.Voigt and C.R.Loper : J. of Heat Treating, vol.3, no.4, pp.291-309, Dec. 1984.
9. E.Dorazil and others : AFS Intl. Cast Metals Journal, vol.75, no.2, pp.52-62, June 1982.
10. M.Gagne and P.A.Fallen : 23 rd. Annual Conf. of Metallurgists, August 1984.
11. J.D.Verhoeven and others : Proc. of 3rd. Intl. Symp. on the Physical Metallurgy of Cast Iron, pp.387-398, 1984.
12. J.Dodd and R.B.Gundlach : BCIRA Conf. Paper no.15, 1984.
13. P.A.Blackmore : BCIRA Conf. Paper no.14, 1984.
14. D.J.Moore, T.N.Rouns and K.BV.Rundman : AFS Final Progress Report, 1985.
15. S.E.Stenfors and R.Sandstrom : Research Report, Toyal Inst. of Technology, Stockholm Sweden, 1985.
16. M.M.Shea and E.F.Rynts : General Motors Research Publication, GMR-5163, 1985.
17. D.A.Harris and R.J.Maitland : Iron and Steel, pp.325-328, 1981.
18. E.Koraxil : vysokopevna Baintica Litina, Academia, Praha, Czeck., pp.53-116, 1985.
19. Iron Casting Handbook : Iron Casting society, Inc., pp.121-151, 323-378, 1981.
20. J.E.Bevan and W.G.Scholtz : AFS Trans., vol.85, pp.271-276, 1977.
21. G.Jolley and G.N.J.Gilbert : J. of the British Foundrymen, pp.79, 1967.
22. R.Harding : 2nd. Intl. Conf. on Austempered Ductile Iron, pp.39-57, March 1986.
23. C.C.Reynold and others : AFS Trans. vol.63, pp.116-122, 1985.
24. Y.J.Park : Unpublished Research for ASME GRI, 1985.
25. Y.H.Lee : Ph.D Thesis, Univ. of Kansas, 1987.
26. Lo-Kan : Proc. of the 43 rd. Intl. Foundry Cong., pp.35, 1976.
27. A.A.Cushway : BCIRA Report 1602, 1984.
28. R.D.Forrest : Machine Design, vol.57, no.22, pp.95-99, Sep.1985.
29. M.A.Zaccone and D.E.Bowman : 1st. Intl. Conf. on Austempered Ductile Iron, ASM, pp.227-252, 1984.
30. F.Wilson and T.J.Eyre : Wear, vol. 14, pp.107-117, 1969.
31. P.Zhou, J.Sun, and X.Zhang : Wear of Materials, ASME, New York, pp.87-96, 1983.

32. K.Boiko : Heat Treating, pp.78-81, Sep. 1987.
33. M.M.Lottridge and R.B.Grindahl : Proc. of SAE Conf. on Fatigue(P-109), pp.213-218, 1982.
34. B.J.Hogan : Design news, vol.96, pp.96-97, August, 1983.
35. F.M.Hager : 1st. Intl. Conf. on Austempered Ductile Iron, ASM, pp.253-256, April 1984.