

# 1050MPa급 초경량 오스템퍼드 구상흑연주철제 콘트롤암 개발

이정익  
인하공업전문대학 기계설계과 교수

## The Development of ADI(Austempered Ductile Iron) Lower Control Arm in 1050MPa Ultra-light

Jeongick Lee  
Professor, Dept. of Mechanical Design, INHA Technical College

**요약** 이 연구는 1050MPa급 경량 연성 주철 주관류 컨트롤 암을 개발하기 위한 첫 해의 결과를 보여줍니다. 첫째, 최적 설계 구조를 위한 레이아웃 설계 및 구성 요소 개발, 그리고 컨트롤 암 강성과 최적 구조 디자인 및 강건성 설계를 통해 예상 응력을 제어하는 중점 영역의 강건성을 달성합니다. 둘째, 높은 강성과 고성능 경량 구조를 반영하는 컨트롤 암을 개발합니다. 중공을 통해 소비자가 요구하는 설계와 강성을 충족시키기 위해 개발된 컨트롤 암은 코어 제작 공정을 개발합니다. 셋째, 최적의 합금 조성 및 열처리 방법을 통해 철 합금(Cu, Ni, Mo)의 양과 Austempered 열처리 및 조화 상태를 도출합니다. 넷째, 저강도, 고강성 구성 요소 개발을 위해 최적의 성형 기술 개발을 통해 최적의 주조 기술 개발로 이어지는 구성 요소 개발을 위한 높은 강도의 주조 형성 기술을 개발하기 위한 시도를 합니다.

**주제어** : 초경량, 오스템퍼드 구상흑연주철, 콘트롤 암, 전산모사 분석

**Abstract** This study is shown the result of the first year to develop an export 1050MPa-class lightweight ductile iron castings Austempered control arm through the research process to obtain the following results. First, the structure of the optimal design Layout design and development of the component, and then achieve them through the Control Arm rigidity and optimal structure design and robust design of the focus areas of the expected stress Control Arm. Second, to develop a Control Arm reflects the high rigidity and high performance lightweight structures. Control Arm them developed to meet the design and rigidity as required by the consumer through the hollow, and to develop a process for the Core. Third, through optimum alloy composition and heat treatment methods will be derived to derive the amount of iron alloy (Cu, Ni, Mo) and Austempered heat treated and tempered condition. Fourth, through the development of optimum molding technology development component to develop the optimum ADI for the low-stiffness, high-rigidity component development, it attempts to develop a high-strength casting forming technology..

**Key Words** : Ultra-light, ADI(Austempered Ductile Iron) Lower Control Arm, CAE Analysis

\*Corresponding Author : Jeongick Lee(jilee@inhac.ac.kr)

Received May 12, 2023

Accepted June 22, 2023

Revised June 9, 2023

Published June 30, 2023

### 1. 서론

최근 미 국방성으로부터 미국 Oshkosh사가 수주한 미군의 통합 경량 전술 기동차량(Joint Light Tactical Vehicle, 이하JLTV)은 기존 험비(High-Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle, HMMWV, 고기동성 다목적차량)의 기동성과 MRAP(Mine Resistant Ambush Protected vehicle, 지뢰 방호 장갑차량)의 방호력을 겸비한 차량이다[1-3]. 총 수주 규모는 2018년부터 2022년까지 17,000대 규모이며, 이후 2040년까지 총 55,000대 규모로 기존의 험비를 100% 대체할 계획이다[4-6].

험비가 21세기 미군이 참전한 전장에서 한계를 드러낸 이유는 그 태생에 있다. 험비는 본래 2차 대전의 `지프(Jeep)`들을 교체하기 위해 만들어진 차량이었다. 직접적으로 전투를 수행하는 장갑차량이 아닌, 병력과 물자 등을 전장에 신속하게 전개하기 위한 기동용 차량이었던 것이다[7-9]. 세계 각지의 험난한 지형지물을 돌파하며 이름에 걸맞은 우수한 기동력을 그간의 전장에서 증명해 왔다[11].

하지만 전장의 변화는 험비에게 더욱 많은 것을 요구했다. 전장의 중심은 야전에서 시가지로 넘어갔으며, 전쟁의 양상은 `저강도분쟁(低強度紛爭, Low Intensity Conflict)`의 형태를 띠게 되어 국지적인 무력충돌이 잦아졌다[12]. 또한 미 육군의 경우, 개전 초기부터 마땅한 APC(Armored Personnel Carrier, 병력수송장갑차) 조차 마련되지 못한 상태였기 때문에 작전 기동에는 좋은 선택을 험비를 이용해야만 했다[13]. 이 때문에 험비에게는 이전에는 요구되지 않았던 `방어력`이 요구되었고, 험비의 부족한 방어력 문제는 끊임없이 구설수에 오르기 시작했다[14].

MRAP이 가진 `V`형태의 차체 하부는 차체 하부의 공간이 적었던 데다, 하부에서 일어나는 폭발에서 탑승자의 생존성을 높이기 위해 차체를 필연적으로 높게 만들 수밖에 없었다. 이 때문에 전투용 차량으로서는 전고가 지나치게 높았으며, 이 때문에 무게중심도 따라서 높아졌다. MRAP의 드높은 무게중심은 차량의 주행안정성을 떨어뜨리는 주범이었다[15-18]. 특히, 험준한 산악 지형이 이어지는 야간에서는 전복사고를 속출하게 한 주요 원인이었다. 여기에 두터운 장갑과 독특한 차체 구조, 비교적 소형에 해당하는 차량조차도 10톤을 훌쩍 상

회하는 중량 때문에 기동성은 고사하고, 조종성도 떨어졌다[18].

JLTV의 수송을 위한 요구 사항은 현재 미군이 운용 중인 수송체계에 맞춘다. 최대 중량은 2만 파운드(약 9톤) 이내여야 한다. 이는 미 해병대의 요구가 반영된 것으로, C-130 전술수송기를 사용하고 있는 현행의 수송 체계에 맞추기 위함이다[17]. 이에 따라 Table 1과 같이 기존의 MRAP의 단점인 높은 무게중심을 낮추고, 험비의 기동성을 발휘하고 수송체계에 부합하기 위해서는 Axle에 소요되는 Control Arm과 Steering Knuckle 주철소재의 고강도, 추가 경량화를 요구하고 있는 상태이다[15]. 특히, Control Arm의 경우 소재를 Core처리로 중공 처리하여 경량화, 고강도화 시켰다.

Table 1. Ultra-lightweight osteomorph



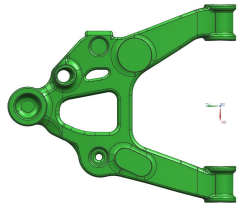

Category	MRAP	JLTV
Vehicle photo		
Material schematic diagram		
Tensile strength	900MPa	1050Mpa
Material	ASTM A897/A897M-06 Gr.2	ASTM A897/A897M-06 Gr.3
Weight	44Kg	22Kg
Thickness	25mm	7.5mm
Remark		Mid-range (Core processing)

Fig. 1에서 보는바와 같이 주관기관인 (주)진흥주물은 미국 Oshkosh사와 1998년부터 계약을 맺고 동사 차량 제작에 소요되는 Axle용 Control Arm과 Knuckle등의

소재를 오스템퍼드 구상흑연 주철(Austempered Ductile Iron, ADI)로 제작 공급해 왔으나, 인장강도 900MP급으로 이번 JLTV용 1050MPa급은 소재의 추가적인 건전성 확보, 중공형 Core처리로 인한 가스결함 및 소재 두께 균일성 확보가 과제라 할 수 있다.

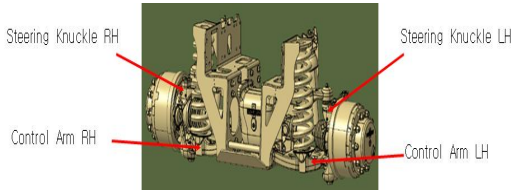


Fig. 1. Major parts of TAK4 Axle



Fig. 2. ADI product using in vehicle of OSHKOSH

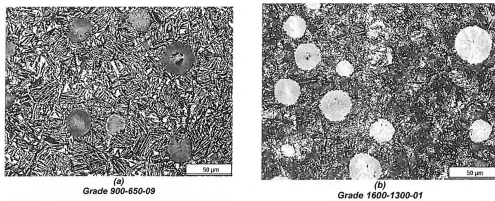


Fig. 3. Microscopic diff. of ASTM A897 Grade2 and Grade6

## 2. 본론

### 2.1 개발 필요성

자동차연비 향상은 Fig. 2와 같다. 엔진출력 향상, 차체의 형상 설계변경을 통한 공기 저항을 감소시키고 차체의 소형화 및 자동차 경량화 등에 의해 달성할 수 있으나 엔진 출력향상과 공기저항저감 등의 설계상의 기술 개발은 이미 한계에 도달한 것으로 판단되어 더 이상의 급격한 개선은 기대하기 어려운 실정이다. 또한, Fig. 3에서 보는 바와 같이 차체의 소형화는 고기능성, 고출

력, 안정성에 문제가 있어 자동차 소재의 경량화가 연비 향상에 가장 유력한 방법으로 제기되고 있다[10]. 주물을 소재로 한 자동차 부품의 경량화는 경량화 재질의 대체로서 이루어지고 있으나 용도에 따라 주철주물의 특성에 의하여 재질의 대체가 불가능한 경우도 있다. 자동차 부품의 소재로서 주철주물의 경량화를 위한 방안으로 박육화, 일체화, 중공화 및 접합 방법이 있는데, 이외에 주철주물의 고강도화 기술개발을 위한 대체재질의 개발 또한 필요할 것이다. 양산 성공시 국내 방산 차량 및 상용차용에 적용 가능하여 국내 방산 및 상용차 연비 향상에 기여 가능하다.

### 2.2 개발 기술의 독창성 및 도전성

오스템퍼드구상흑연주철(Austempered Ductile Iron, ADI)은 구상흑연주철을 A1 변태온도 이상으로 가열하여 조직을 오스테나이트로 변태시킨 후 적당한 온도에서 항온 변태시켜[17], Fig. 4에서 보는 바와 같이 즉 오스템퍼링처리를 하여 기지조직을 베이나이트(bainite)로 변화시켜 내마모성, 강도 그리고 인성이 우수한 재료를 만드는 것을 말한다. 그림은 전형적인 ADI 열처리 사이클을 나타낸 것이다.

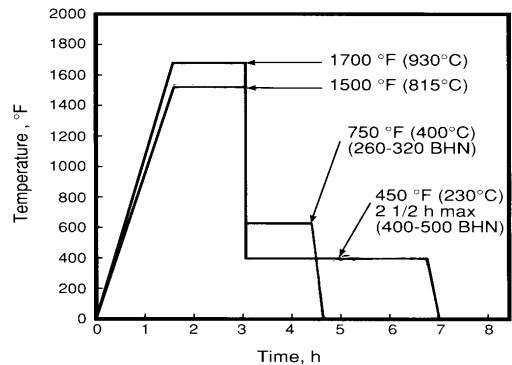


Fig. 4. Heat treatment cycle of conventional ADI

아래 Fig. 5, 6은 ADI와 구상흑연주철, steel, 알루미늄 합금 사이의 기계적 특성을 비교한 것이다. ADI의 항복강도는 알루미늄 합금의 3배 이상이고, steel에 비해 밀도가 10% 정도 작은 이점이 있다. Fig. 5는 가격 및 무게 대비 강도를 비교한 것이다. 다른 소재에 비해 가격 및 경량화 측면에서 큰 이점을 가진다는 것을 알

수 있다. ADI에서 오스테나이트의 조직형태, 잔류 오스테나이트량과 분포, 안전성 등은 기계적 성질에 크게 영향을 미치는 것으로 이러한 영향인자는 오스테나이트화 및 오스템퍼링 온도와 유지시간, 합금원소의 종류와 첨가방법 등의 제조조건에 따라 영향을 받는다. 현재 상용되고 있는 ADI의 합금조성은 Ni를 base로 하고 여기에 Cu, Mo 등을 복합 첨가한 것이다.

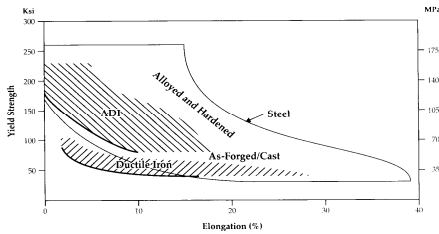


Fig. 5. Characteristic comparison with ADI, As-Forged iron and Cast iron

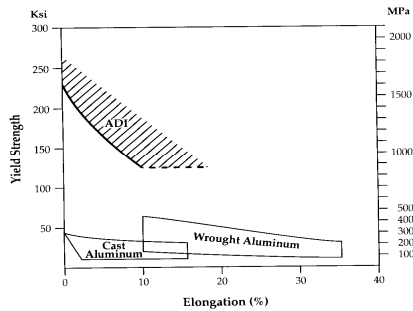


Fig. 6. Characteristic comparison between ADI, Cast Aluminum and Wrought aluminum

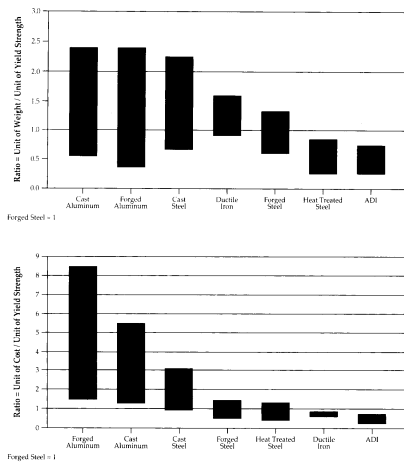


Fig. 7 Comparison cost/strength and weight/strength (Forged cast=1)

### 2.3 기술적 파급효과

- \* 경제적 측면 : 국내 자동차 및 건설기계의 시장 경쟁력 확보 기존 자동차 단조부품 대비 중량 및 생산원가 13.4% 이상 절감
- 주조제품의 Near net shape를 통해 가공 절삭량 감소
- \* 산업적, 환경적 측면 : 자동차 연비 향상을 위한 경량화로 친환경 구현
- 기존 단조제품 대비 13.5% 정도 중량 감소
- 기존 주철부품의 박육화를 통한 추가 경량화 가능
- \* 기술적 측면 : ADI 국내 양산 체계 구축
- 미국, 유럽에서 상용화가 활발한 ADI 기술의 진보

1. 1차 년도 연구 결과 수출용 1050MPa급 초경량 오스템퍼드 구상후연주철제 콘트롤 암을 개발로 1차 년도 연구과정에 다음과 같은 연구결과를 달성하였다. 개발목표는 아래 표와 같이 거의 100% 달성
2. 해당연도 기술개발내용(소재유동해석, 소재의 응고해석을 통한 Fig 7에서 확인 할수 있듯이, 최적 주조방안 설계, ADI 최적 조성 합금 설계 및 열처리 방안 도출, ADI 기계적 성능평가 방법 도출(인장시험, 충격시험, 경도시험), 금형, 시작품 제작 및 평가, 공정불량률 2% 이내의 양산성 확보 개발)에 대한 하기의 성과를 거둘 수 있었다.
3. 기타성과, 개발과정상 발견된 몇 가지 문제. 연구 과정 상 변경사항, 2차 년도 연구계획은 하기 표와 같다.

### 3. 결론

본 연구는 중소기업청의 2016년 기술혁신과제의 일환으로 [“1050MPa급 초경량 오스템퍼드 구상후연주철제 콘트롤암 개발”(개발기간 : 2016. 09. 01. ~ 2018. 08. 31.)]의 연구로 수행 중인 연구로 1차 년도 수행결과이다. 자동차 부품의 소재로서 주철주물의 경량화를 위한 방안으로 박육화, 일체화, 중공화 및 접합 방법이 있는데, 이외에 주철주물의 고강도화 기술개발을 위한 대체재질의 개발 또한 필요할 것이다. 양산 성공시 국내 방산 차량 및 상용차용에 적용 가능하여 국내 방산 및 상용차 연비 향상에 기여 가능하다.

*Society for School & Community Health Education, 22(3), 17-27.*

## REFERENCES

- DOI : <http://dx.doi.org/10.35133>
- [1] J. D. Kim & M. K. Song. (2015). Characteristic of Surface Hardening by Laser Power Control in Real Time of Spheroidal Graphite Cast iron. *Journal of KSLP, 18(2), 1-4.*
- [2] G. Y. Kim. (2013). Effects of Mo on the Mechanical Properties of Ductile Cast Iron with Cu Austempered at 380°C. *Journal of the Korean Society for Heat Treatment, 26(5), 219-224.*
- [3] D. K. Lee, S. K. Kim & B. W. Lee. (2013). Heat Resistance Properties of Thin Section HiSiMo Ductile Iron for Exhaust Manifold. *Journal of the Korean Society for Power System Engineering, 17(4), 109-114.*
- [4] H. S. Son & B. K. Choi. (2011). Optimization of Conditions of Forming Quality for Hot-press-formed Lower Control Arm Using Finite Element Analysis. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 19(1), 45-50.*
- [5] D. H. Park et al. (2010). *Study on Hot Air Forming of Automotive Control Arm using Al Tube.* 2010 Spring Proceedings of Society of Korea Precision Engineering, 35-36.
- [6] E. H. Lee. (2020). Corona 19 Generation, How is mental health. *Gyeonggi: Issues & Diagnosis, 414, 1-25.*
- [7] H. W. Jeon & H. C. Lee & Suk. Joon. Yun & H. J. Lee. (2021). Factor of Quality of Life during COVID-19 era among 69 countries. Korean public health research, 47(3), 59-70.  
DOI : 10.22900/kphr.2021.47.3.006
- [8] H. E. Lee & S. J. Kang.(2021). The Impact of the COVID-19 Pandemic on Health-Related Quality of Life (HRQOL) in Korea. *Korean journal of physical education, 60(3), 247-259.*  
DOI : 10.23949/kjpe.2021.5.60.3.18
- [9] S. K. Ha & H. S. Lee & H. Y. Park. (2021). Impact of COVID-19 on Individual Depression and Quality of Life: Focusing on Differences by Age Group. *Therapeutic Science for Neurorehabilitation, 10(3), 111-122.*  
DOI : <http://dx.doi.org/10.22683/>
- [10] H. K. Kim. (2021). The Effect of Stress Caused by the Spread of COVID-19 on the Quality of Life in University Students: The Moderating Effect of Family Health. *The Journal of Korean Society for School & Community Health Education, 22(3), 17-27.*
- [11] H. K. Kwon & M. H. Seong. (2021). Effects of COVID-19 Fear, Anxiety, and Depression on Health-related Quality of Life in the Elderly. *The Journal of Humanities and Social science, 12(4), 1303-1318.*
- [12] S. E. Kim. (2020). A convergence study of stress caused by the epidemic of COVID-19, quality of life and positive psychological capital. *Journal of the Korea Convergence Society, 11(6), 423-431.*  
DOI : <http://dx.doi.org/10.15207>
- [13] N. R. Bae & J. W. Kim. (2021). Study on Experience of Prospective Social Workers Participated in Social Welfare Field Practice during COVID-19 Pandemic. *Journal of the Korea Convergence Society, 12(11), 301-310.*  
DOI : <https://doi.org/10.15207>
- [14] K. R. Han. (2021). Changes in Elder's Lives and Death by COVID-19. *The Korean Association of Ethics, 133, 171-191.*  
<http://dx.doi.org/10.15801/je.1.133.202106.171>
- [15] D. H. Lee & Y. J. Kim & D. H. Kim & H. H. Whang & S. G. Nam & J. Y. Kim. (2020). The Influence of Public Fear, and Psycho-social Experiences during the Coronavirus Disease 2019(COVID-19) Pandemic on Depression and Anxiety in South Korea. *Korean Journal Of Counseling And Psychotherapy, 32(4), 2119-2156.*
- [16] S. M. An & H. A. Kim. (2021). A Concept Analysis of subject well-being in the COVID-19 era. *Journal of Next-generation Convergence Information Services Technology, 10(2), 171-183.*
- [17] S. H. Hong. (2021). An Exploratory Study of Daily Life and Coping Behaviors Since the Onset of COVID-19: Data from University Students. *Journal of Families and Better Life, 39(2), 47-61.*  
<https://doi.org/10.7466/JFBL.2021.39.2.47>
- [18] E. H. Lee. (2020). *Corona 19 Generation, How is mental health.* Gyeonggi: Issues & Diagnosis, 414, 1-25.

이 정 익(Jeong-Ick Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한양대학교 공과대학.  
기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 한양대학교 공과대학.  
정밀기계공학과 (공학석사)
- 1999년 8월 : 한양대학교 공과대학.  
정밀기계공학과 (공학박사)

- 1993년 1월 ~ 1999년 12월 : (주)대우전자. 중앙연구소  
(선임연구원)
- 2000년 3월-2007년 2월 : 용인송담대. 자동차기계설계전  
공 (교수)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 인하공전. 기계공학부. 기계설계과 (교수)
- 관심분야 : CAD/CAM/CAE, 스마트팩토리, 생산자동화,  
사출금형, 주조, 용접, 유비쿼터스 Eng., Nano, MEMS,  
BIOMECHANICS
- E-Mail : jilee@inhatc.ac.k