

# 한국형 고속전철 객차 연결부 에어백 지지부 대형 알루미늄 주물의 개발

## Development of Large-Scale Aluminum Castings of Air Bag Support Components for the Korean High Speed Trains

유승목\*      남정호\*\*      김정인\*\*\*      임채호\*\*\*\*      김용현\*\*\*\*\*      박수현\*\*\*\*\*  
Yoo, Seung-Mok      Nam, Jeong-Ho      Kim, Jeong-In      Lim, Chae-Ho      Kim, Young-Hyun      Park, Soo-Hyun

### ABSTRACT

For the lighting of vehicles structural casting components of aluminum casting alloys are substituted for those of steel or iron. For the manufacturing of large-scale premium quality aluminum castings the developments of a new casting process and a heat treatment process are necessary. The optimum casting design and heat treatment condition for large-scale castings are drawn with the help of Z-Cast software for the casting process analysis in this study. Low pressure sand casting method is applied successfully to produce air bag support components of D357 aluminum casting alloy.

### 1. 서 론

각 종 수송기기의 경량화에 따라 기존에 주철/주강 재질의 주물 부품소재가 급격히 알루미늄 등의 비철금속으로 대체되고 있다. 또한 기존의 알루미늄 판재 성형 및 용접에 의하여 제작되던 알루미늄 부품도 일체형 주물로 제작하기 위한 많은 연구 개발이 이루어지고 있다.[1] 이를 위해서는 신뢰도가 높은 고강도 알루미늄 부품의 주조 기술과 열처리 기술 개발이 필수적이다. EN-AC 42200 AlSi7Mg0.6 알루미늄 합금인 ASTM D357계열의 주조 합금은 항공/우주 분야의 부품을 제조하기 위하여 개발된 재료로 인장강도가 높고 인성이 확보된 알루미늄 합금[2]이지만 고 신뢰도를 갖춘 수송기기 분야에 적용하기 위해서는 최적의 주조 조건을 도출하여 건전한 주물을 제작하는 기술과 고강도 물성을 달성하기 위한 적정 T6 열처리 조건 확립이 요구된다.

고속 대량 수송의 필요성 증대와 더불어 고속전철에 대한 기술개발이 주요 선진국을 중심으로 활발히 연구 개발되고 있으며, 국내에서도 경부고속철도 도입을 계기로 선도기술개발사업을 통하여 한국형 고속전철 시제차량이 개발되어 성공적으로 주행시험을 마쳤다. 비록 시제차량의 객차 주요부품의 평균 국산화율이 93%를 나타내었으나, 차량연결부 및 관절장치에 사용된 주요 경량화 알루미늄 주물부품은 개발 당시 국내 대형 알루미늄 주조 기술 부족 등의 이유로 외자품이 활용되었다.[3]

\* 한국생산기술연구원, 엔지니어링설계팀, 정회원

E-mail : yoosm@kitech.re.kr

TEL : (032)850-0467 FAX : (032)850-0460

\*\* 한국생산기술연구원, 엔지니어링설계팀, 비회원

\*\*\* 한국생산기술연구원, 엔지니어링설계팀, 비회원

\*\*\*\* 한국생산기술연구원, 엔지니어링설계팀, 비회원

\*\*\*\*\* 대신금속주식회사, 비회원

\*\*\*\*\* 대신금속주식회사, 비회원

본 연구에서는 특수차량용 고강도 D357.0 주조합금 대형 부품의 하나인 Air Bag Support 부품의 시제품을 개발하였으며, 저압주조법[4]에 의한 양산 공정 안정화를 위하여 주조공정 해석용 유동 및 응고해석 프로그램인 Z-Cast 소프트웨어를 사용해서 최적 공정변수를 도출하였다. 이를 통하여 주조공정에 미치는 각 변수의 영향을 평가하고 공정을 최적화하였으며 적정 열처리 조건을 설정하여 대형 고급 알루미늄 주물의 시제품 제작 및 양산에 성공하여 부품 국산화를 이룰 수 있었다.

## 2. 주조방안 해석 및 설정

본 연구에서 주물로 제작된 air bag support 알루미늄 주물 부품이 사용되는 객차 연결부인 gangway 부분의 구조도를 그림 1에 개략적으로 나타내었다. 아래의 그림은 한국형고속전철과 유사한 관절대차 형식인 Euro-Star 객차 연결부 및 대차의 개략적인 구조도이다. 그림에서와 같이 air bag support 부품은 운반링, 고정링 등과 함께 수직하중을 담당하는 부품으로 G7고속전철기술개발사업에서는 차체경량화를 위해서 기존의 철강 부품을 알루미늄 합금으로 대체하면서 알루미늄 판재를 사용하여 용접구조물로 제작되었던 부품이다. 이를 동일한 안정성을 보장하며 형상의 자유도 증가와 비용절감을 목적으로 주조합금으로 재질을 변경하여 적용되었다.

### 2.1 초기 방안 설정 및 해석

주물로 제작되는 air bag support의 제품 및 시험주조용 주조방안의 모델링 결과를 그림 2에 나타내었다. 용탕 충전 과정 중의 공기 혼입 등을 최대한 방지하며 안정적으로 충전하기 위하여 하주법으로 최초 방안을 설정하였으며 주형 및 중자제작에는 알파 세트를 적용하였다. 수축결함 방지 및 제품에서 요구되는 기계적 성질을 확보하기 위하여 적절한 크기의 냉금을 설치하였다. 주입온도는 700℃, 주형온도는 25℃, 주입구에서의 주입 속도는 1.5m/s로 설정하여 해석하였다.

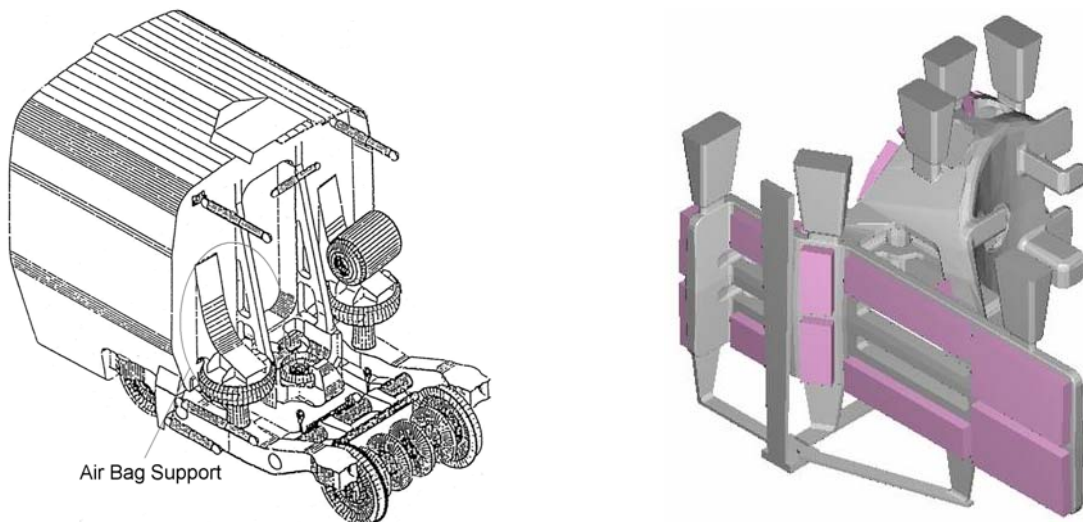


그림 1. Euro-Star 객차의 갱웨이 구조 개략도    그림 2. air bag support 부품 및 주조방안 모델링

유동해석 결과를 그림 3에 나타내었다. 용탕이 8% 충전되었을 때의 최대 유속은 3m/s로, 30% 충전되었을 때는 약 4m/s로 증가하였다. 충전 중 각 주입구에서 주형 공간으로 충전될 때의 유속은 그림 4에서와 같이 각 게이트에서 2.3, 1.6, 1.6 및 1.5m/s로 예측되어 주입구에서의 유속이 설계 시에 예상하였던 값보다 높게 나타나고 있음을 확인하였다. 이는 일반적으로 권장되는 주입구에서의 유속인 0.5m/s를 넘는 값으로[5] 주입 중에 용탕으로 공기 혼입의 가능성이 높아짐을 의미한다.

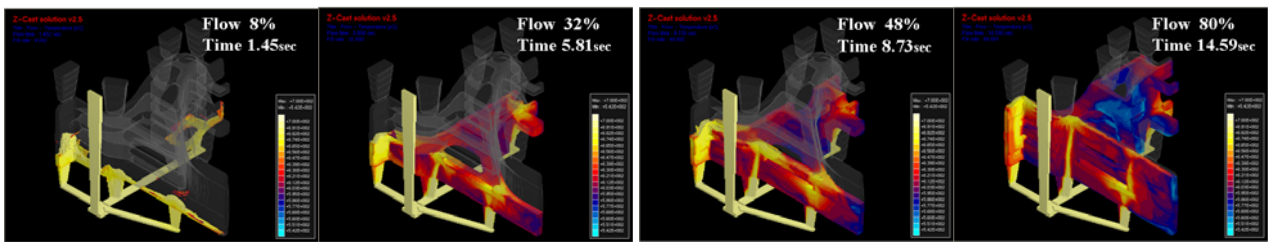


그림 3. 하주법에 의한 용탕 충전해석 결과

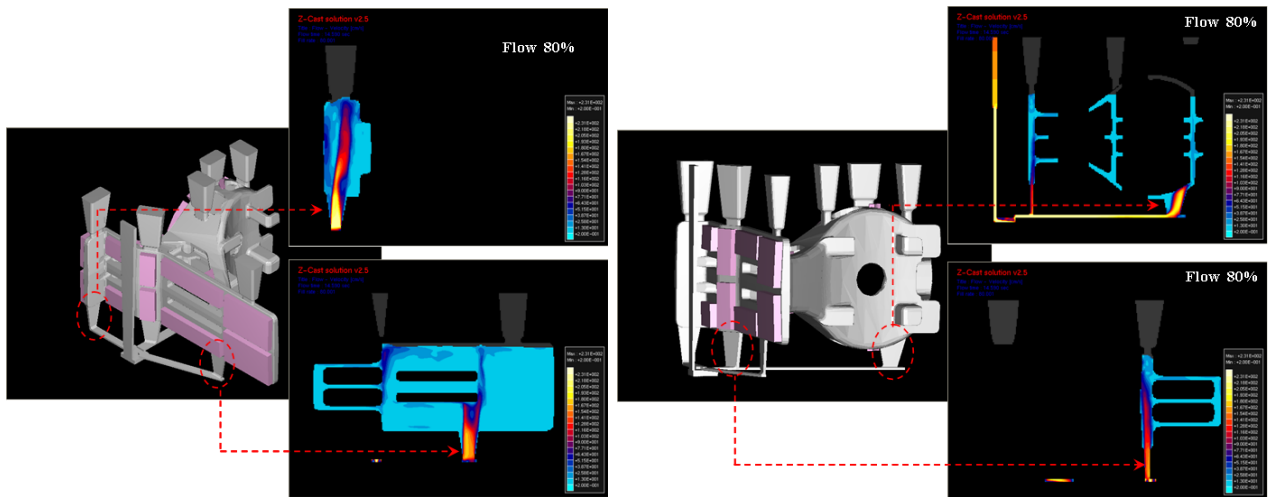


그림 4. 주입 중의 게이트에서의 용탕 속도 해석 결과

그림 5의 상부 좌측 결과와 같이 충전 완료 후의 주물부의 온도 분포는 상부 압탕 직하의 용탕이 570℃ 정도로 많이 냉각되어 있음을 확인할 수 있다. 냉각이 진행됨에 따라 주입구에서 먼 곳부터 빠르게 냉각되고, 제품의 중앙부가 서냉되고 있음을 알 수 있다. 상부 우측의 결과에는 제품이 75% 정도가 응고된 상태에서의 온도분포를 나타내었다. 그림 5의 응고과정 중의 온도분포 분석결과 형상적인 요인 및 하주법에 의하여 고온의 용탕이 하부에서 지속적으로 유입되면서 온도 구배가 역전되어 있어 제품 중에 고립부위가 많이 발생함을 알 수 있었다. 그림 5의 우측에는 응고해석 결과를 바탕으로 예측된 수축공 발생 위치를 나타내었다. 예측 결과에서와 같이 온도 구배가 적절히 유지되면서 방향성 응고가 이루어지지 못하여 응고 과정 중에 고립부위가 많이 발생되고 이로 인하여 제품 중심부위 및 후육부위에 수축결함발생이 예측되었다. 실제로 초기 제안된 방안으로 주조된 시제품에서는 일부 제품에서 수축결함 및 미세 기포결함이 발견되었으나, 지정부위 및 비지정부위의 기계적 성질은 모두 요구 값을 만족하고 있었다.

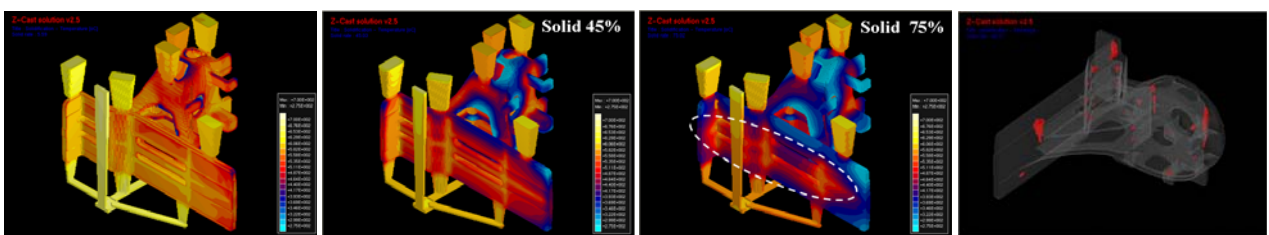


그림 5. 응고 중의 주물에서의 온도 분포와 수축결함 예상 결과

## 2.2 주조 방안 변경

앞의 해석 및 실험 결과를 바탕으로 주조 방안을 수정하였다. 특히 제품의 크기 등의 영향으로

주입구에서의 유속이 빠른 문제를 해결하고 주입 중 와류에 의한 공기 및 산화물의 혼입을 최소화하여 premium quality casting을 얻기 위해서 저압주조법을 채택하였다. 또 한 제품의 설계 변경 내용을 반영하고 박육부에서의 탕경과 결함방지를 위하여 해석을 통하여 공정 변수를 최적화 하였다. 새로 수립된 저압주조 방안에 따라서 그림 6과 같이 저압주조기 급탕관 상부에서부터 모델링을 하였다. 재질은 역시 D357.0 합금이며, 주입온도는 740℃로 하였으며, 1차 가압시간은 20초, 2차 가압시간은 60초로 설정하여 해석하였다.

저압 주조 공정 중의 용탕 충전 거동 해석 결과를 그림 7에 나타내었다. 기존의 하주법과 비교할 때 주입 완료 후에 제품 상부 및 압탕부위의 온도 분포가 개선된 것을 확인할 수 있었다. 그림 8에는 충전 중의 각 주입구에서의 유속을 나타내었다. 최대 유속은 주입구 4에서 0.55m/s로 예상되어 기존의 하주법과 비교할 때 매우 조용하게 충전될 것으로 예상되었다. 이를 통하여 산화물 생성 및 주입 중 공기 혼입 등이 최소화되어 제품 중의 기포 결함 생성이 최소화 될 것으로 기대되었다.

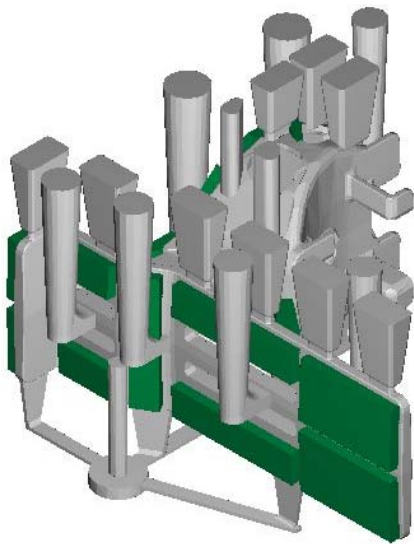


그림 6. 저압사형주조용 주조방안 모델링

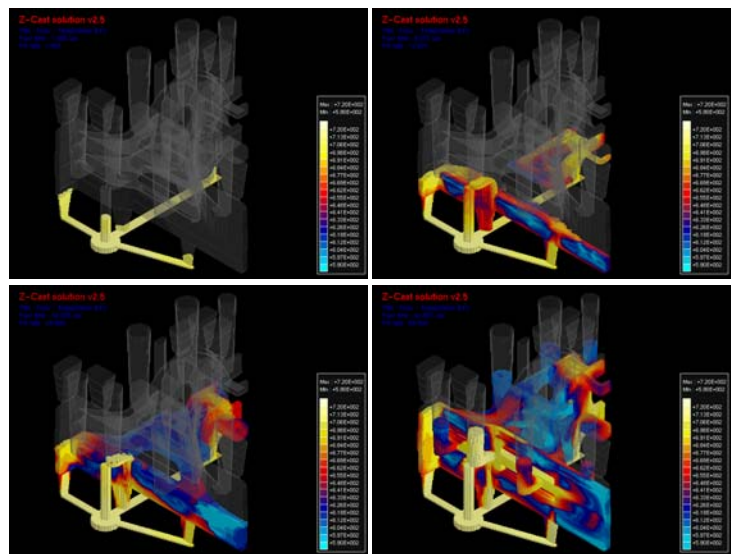


그림 7. 저압사형주조에서의 용탕 충전 해석 결과

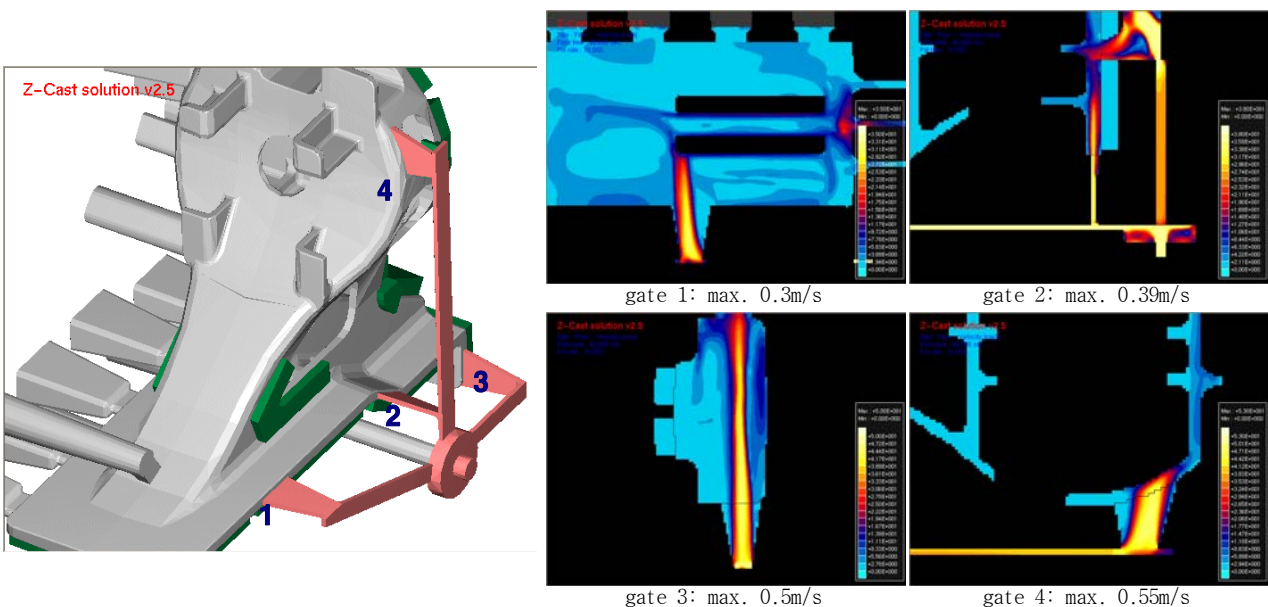


그림 8. 저압사형주조 공정 중의 각 게이트에서의 용탕 최대 유속 해석 결과



그림 9에는 응고 해석에 따른 주입 완료 직 후 및 응고 완료 후의 온도 분포(좌측) 및 최종응고 부위(우측)를 나타내었다. 해석 결과에서와 같이 저압주조 공정에서는 제품 하부에서 상부 압탕 쪽으로 온도가 높은 분포를 보이며 방향성 응고가 비교적 잘 유지되며 응고가 진행됨을 확인할 수 있다. 그림 9의 아랫 부분에는 주물에서 응고 진행에 따른 잔류 액상 영역을 표시하였다. 투명하게 처리된 부분은 이미 응고가 완료된 지역을 의미하며, 색상은 액상 영역의 온도 분포를 나타낸다. 이 결과를 분석하면 응고가 진행되면서 제품 중에 잔류액상으로 제품 중에 고립되는 영역을 확인할 수 있어 응고 완료 후에 미세수축공 영역 등을 예측하는데 활용할 수 있다.

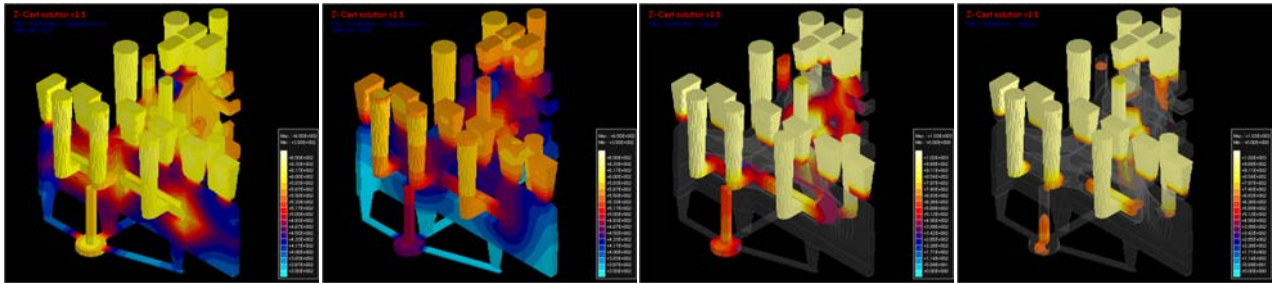


그림 9. 응고 과정 중의 온도 분포 변화 (좌측) 및 응고 순서 (우측) 해석 결과

### 3. 주조 및 열처리 시험

해석 결과 등을 바탕으로 사형주조용 대형 저압주조기를 설계하고 설치하여 성공적으로 시운전하였으며, 상세 방안설계 및 예상되는 문제점 분석 등을 진행하였다. 이를 바탕으로 최종적으로 결정된 제품 설계도에 따른 형상의 제품에 대하여 목형 수정 후에 조형 과정을 거쳐서 저압주조 실험을 수행하였다.

#### 3.1 주조 공정

그림 10의 좌측에는 3단 주형 중 상형과 중형의 조형 사진을 나타내었고, 우측에는 하형과 중형의 합형 과정 및 중형에 중자를 조립한 사진을 나타내었다. 용해로에서 용해된 합금을 레이들로 출탕 후에 이송하여 저압주조기의 보온로로 옮기고 GBF 장비를 이용하여 탈가스 처리를 하였다. 용탕 진정화 과정을 거친 후에 740℃에서 주입이 이루어졌다. 1차 가압은 20초, 2차 가압은 60초간 이루어졌다.

주조 합금의 성분 및 T6 열처리 후에 제품에서 요구되는 기계적 성질은 각각 표 1과 표 2와 같다. 제품이 완전히 냉각된 이후에 탈사한 후에 분사기로 표면을 청소한 사진을 그림 11에 실었다.



그림 10. 저압사형주조용 조형 공정

표 1. D357 합금의 화학 조성

| Si      | Fe   | Cu | Mn  | Mg        | Zn | Ti        | Be        | Al   |
|---------|------|----|-----|-----------|----|-----------|-----------|------|
| 6.5-7.5 | 0.20 | -  | 0.1 | 0.55-0.60 | -  | 0.10-0.20 | 0.04-0.07 | rest |

표 2. 제품에서 요구되는 기계적 성질

|                | Heat treatment | Rm [MPa] | Rp <sub>0.2</sub> [MPa] | A [%] | Hardness [HB] |
|----------------|----------------|----------|-------------------------|-------|---------------|
| specified area | T6             | 345      | 275                     | 3     | 100           |
| non specified  | T6             | 310      | 248                     | 2     | 85            |

### 3.2 열처리 공정

요구되는 기계적 성질을 얻기 위하여 주조된 제품을 T6 열처리 하였다. 제품에 대한 X-선 검사를 마친 후에 용체화 처리는 535±5℃에서 8시간, 퀴칭(수냉) 처리는 50±10℃ 그리고 시효 처리는 160±5℃에서 8시간 열처리 하였다. 그림 12에 T6 열처리 공정이 완료된 이후에 사진에서와 같이 변형 여부를 검사하였으며, 우측에 최종 제품 사진을 나타내었다.

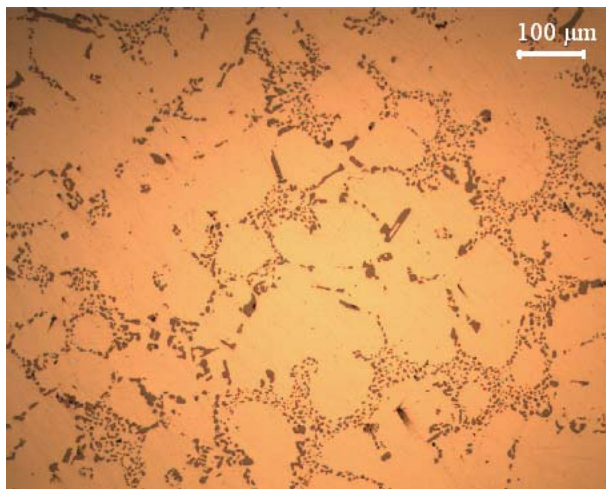


그림 11. 탈사 및 사상 직후 주방상태의 제품 사진

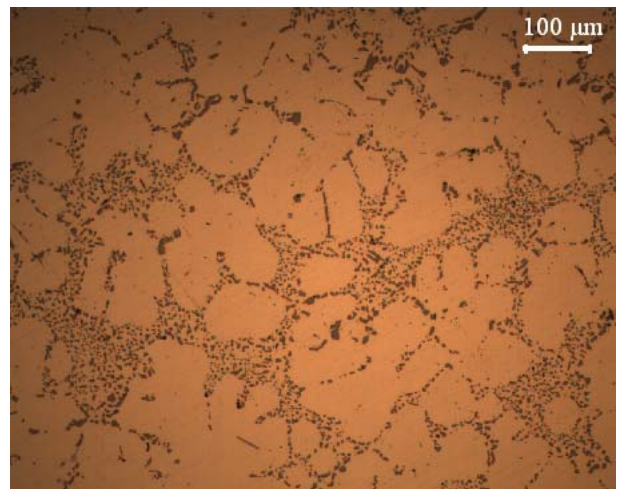


그림 12. T6 열처리 후 변형 검사 및 완성된 air bag support 제품

그림 13에는 냉금 미부착 및 부착 부위에서의 미세조직 사진을 나타내었다. 냉금 미부착 부위의 경우 2차 수지상정 간격의 (SDAS, secondary dendrite arm spacing) 평균 거리는 145µm이었으며 이때의 항복강도는 312MPa, 인장강도는 332MPa이었다. 냉금 부착 부위에서는 SDAS 평균 거리는 99µm이었으며 항복강도는 320MPa, 인장강도는 357MPa가 얻어졌다. 이를 통하여 응고과정 중에 냉각속도가 증가함에 따라 조직이 미세화 되고 기계적 성질이 증가함을 확인할 수 있었다.



냉금 미부착 부위



냉금 부착 부위

그림 13. air bag support 주물의 T6 열처리 후 조직 사진

### 4. 결론

주조방안에 대한 유동 및 응고해석을 통하여 적정 주조방안을 도출하고 시제품을 제작하여 다음과

같은 결론을 얻었다.

- 1) 특수차량의 구조재로 사용되는 air bag support 부품을 주조방안 해석과 실험을 거쳐서 저압주조공법을 적용하여 요구되는 기계적 성질을 만족하는 내부결함이 없는 premium quality casting 제품을 양산할 수 있었다.
- 2) 본 연구를 통하여 기존 시제차량 제작 시에 해외에서 수입되었던 대형 알루미늄 주물 부품을 국산화할 수 있었다.
- 3) 주조공정에 대한 해석을 통하여 초기 설정된 주조방안의 문제점을 분석하고, 저압주조공정을 최적화하여 요구되는 기계적 성질을 충족하는 제품을 양산할 수 있었다.
- 4) 본 연구를 통하여 대형 알루미늄 합금 주물의 사형저압주조기술을 확립하였으며, 이를 통하여 향후 항공 및 방위산업 분야에서 경량화를 위하여 요구되는 대형 알루미늄 고급주물 주조기술을 확보하였다.

## 감사의 글

본 연구는 2006/2007년도 산업자원부에서 시행한 부품·소재전문기업기술지원사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. H.Fuchs, G.Lagrene, M.Wappelhorst and N.Zeumer (2002), "Development of Thin-walled, Large-surface Structural Sand-castings using the Example of an Aircraft Door for Megaliner", Proceedings of the 65th World Foundry Congress, pp423-433
2. AFS (2001), "Aluminum Casting Technology", AFS, pp78-79
3. 정경렬, 김경택, 이병석 (2003), "한국형 고속전철 시제차량(HSR 350x) 부품기술 현황", 한국철도학회 03 추계학술대회 논문집(III), pp461-466
4. 지무성 (2003), "최신평수주조", pp325-342, 구민사
5. John Campbell (2004), "Castings Practice", pp10-12, Elsevier