

技術資料

自動車用 알루미늄 합금鑄物の 미세조직과 기계적성질

趙源爽

Microstructural Effects on the Mechanical Properties of Automotive Aluminum Alloy Castings

W. S. Cho

1. 머리말

最近, 자동차의 輕量化 및 燃比, 내구 신뢰성 등의 성능 향상을 목적으로서, 엔진 부품을 알루미늄 주물로 재료 치환하는 경우가 급증하고 있다. 그러나 실린더 헤드와 같이 연소실(Fire Deck)을 직접 구성하는 부품에 있어서는, 高出力, 長수명化 要求에 따라, 보다 높은 내열성의 향상이 필수적 과제이고, 이를 충족시키기 위해서는, 생산성, 가격이 적절히 조화된 주조공법의 개발과 때로는 表面改質 기술의 개발이 급선무이다. 알루미늄 주물의 내열성을 비롯한 기계적 성질의 향상에는 응고속도 제어에 의한 주조 조직의 미세화가 先行되어야 한다.

알루미늄 주조 조직은 냉각속도가 다양한 주조 공법에 따라 크게 變化한다. 주조 조직의 크기를 나타내는 것으로서, 結晶입경, 덴드라이트 암 간격(Dendrite Arm Spacing, 이하 DAS), 共晶相을 열거할 수 있는데, 어느 것의 조직도 냉각 속도의 증가에 의해 크기가 미세화 한다. 알루미늄 합금주물에서는, 結晶粒은 티타늄 첨가에 의한 異質核生成에 의해 미세화되고, 또 Al-Si계의 共晶相은 改良처리에 의해 미세화 된다. 따라서 주조 조직의 크기를 나타내는 척도로써, 덴드라이트 암 간격(DAS)이 많이 사용되고 있다.

DAS는 그림 1에서 보는 바와 같이 주물의 응고時 α 덴드라이트 主軸에서 성장한 2次 수지狀의 평균간격으로 나타내는데, 최근 자동차 엔진이 고성능, 고효율화 되면서 사용조건이 가혹해

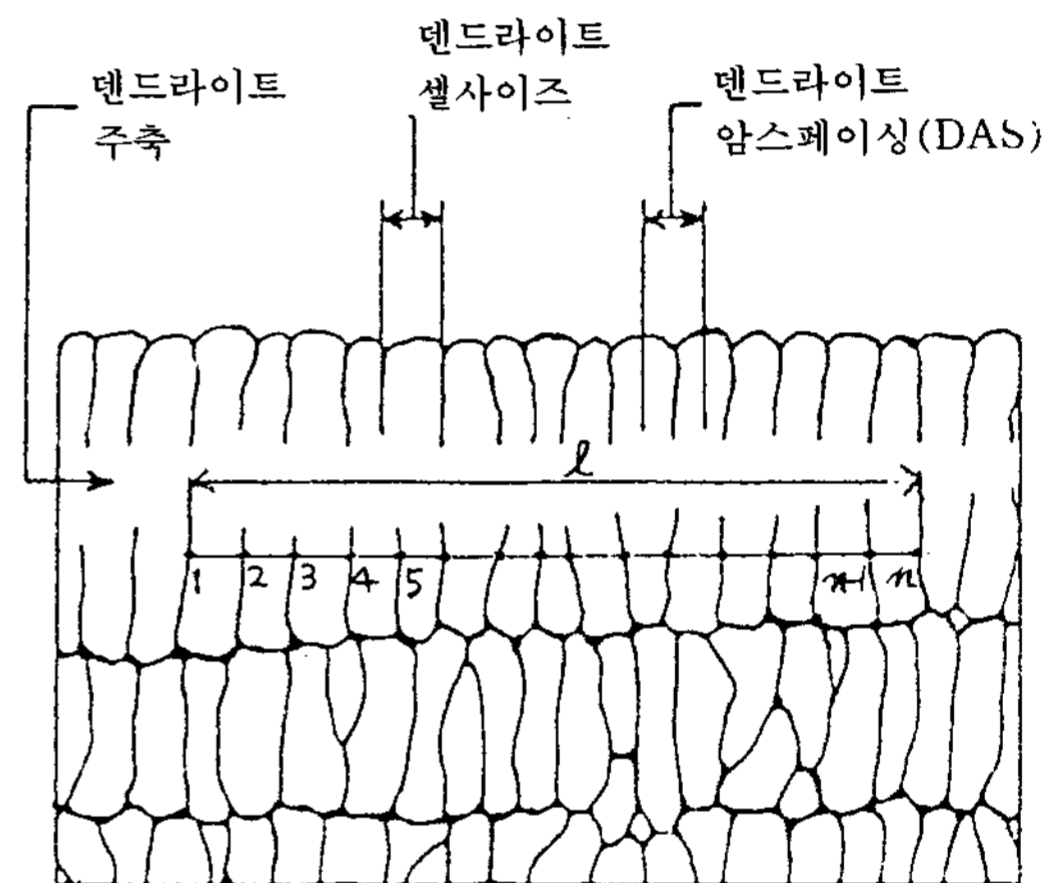


그림 1. 알루미늄 주조 조직의 모식도[1]

짐에 따라 그 중요성이 대두되어, 알루미늄 주물의 중요한 관리 대상으로 부각되고 있다. 이는 DAS가 미세화될 수록 재료 내부에 핀홀등 결함이 감소하게 되어 고온 피로 특성이 向上되는데 기인한다고 생각된다.

本 發表에서는, 자동차 엔진用 알루미늄합금 주물에 있어서 DAS의 미세화가 기계적 성질에 미치는 영향을 고찰해 보고자 한다. 또한 特定 부위의 조직을 미세화하기 위한 表面改質 處理를 소개한다.

2. 冷却速度와 引張特性

냉각속도, C와 DAS, d와의 사이에는, 그림 2에 나타내는 바와 같이 Log-Log Plot에서 직선 관계에 있고, DAS는 냉각속도의 1/3승에 역비례 한다고 알려져 있다. ($DAS = At_f^{1/3}$, $t_f = \text{Local}$

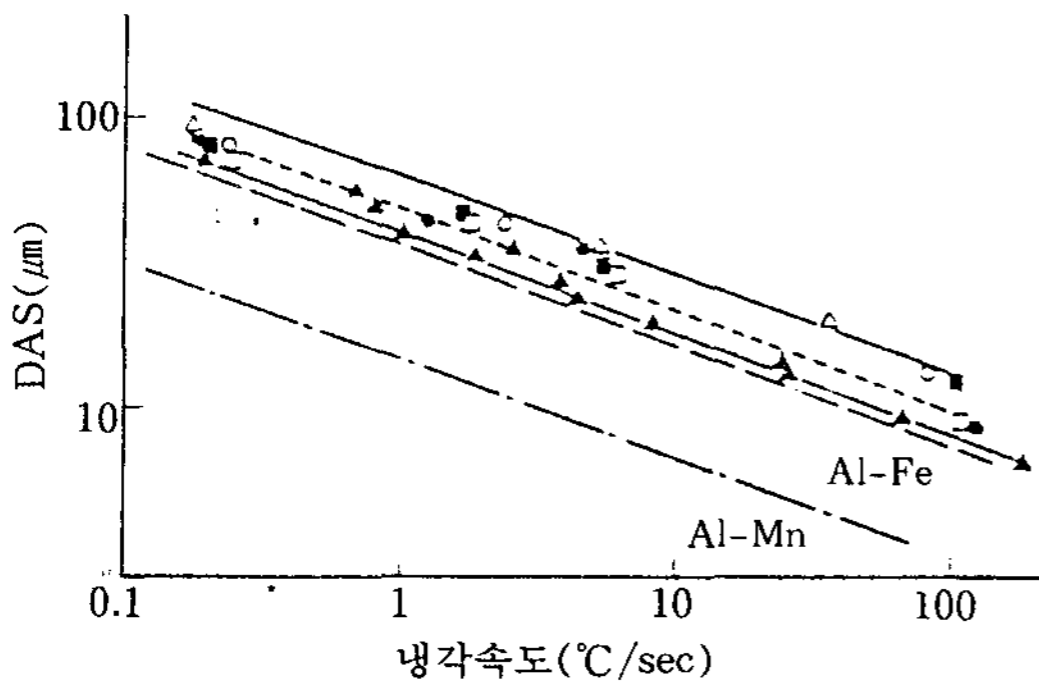


그림 2. 각종 알루미늄 합금의 DAS와 냉각속도와의 관계[2]

- 43 합금(Al-5%Si)
- 220 합금(Al-Mg)
- 142 합금(Al-Ni-Mg-Cu)
- 319 합금(Al-Si-Cu)
- ▲ 355 합금
- △ 356 합금(Al-Si-Mg)

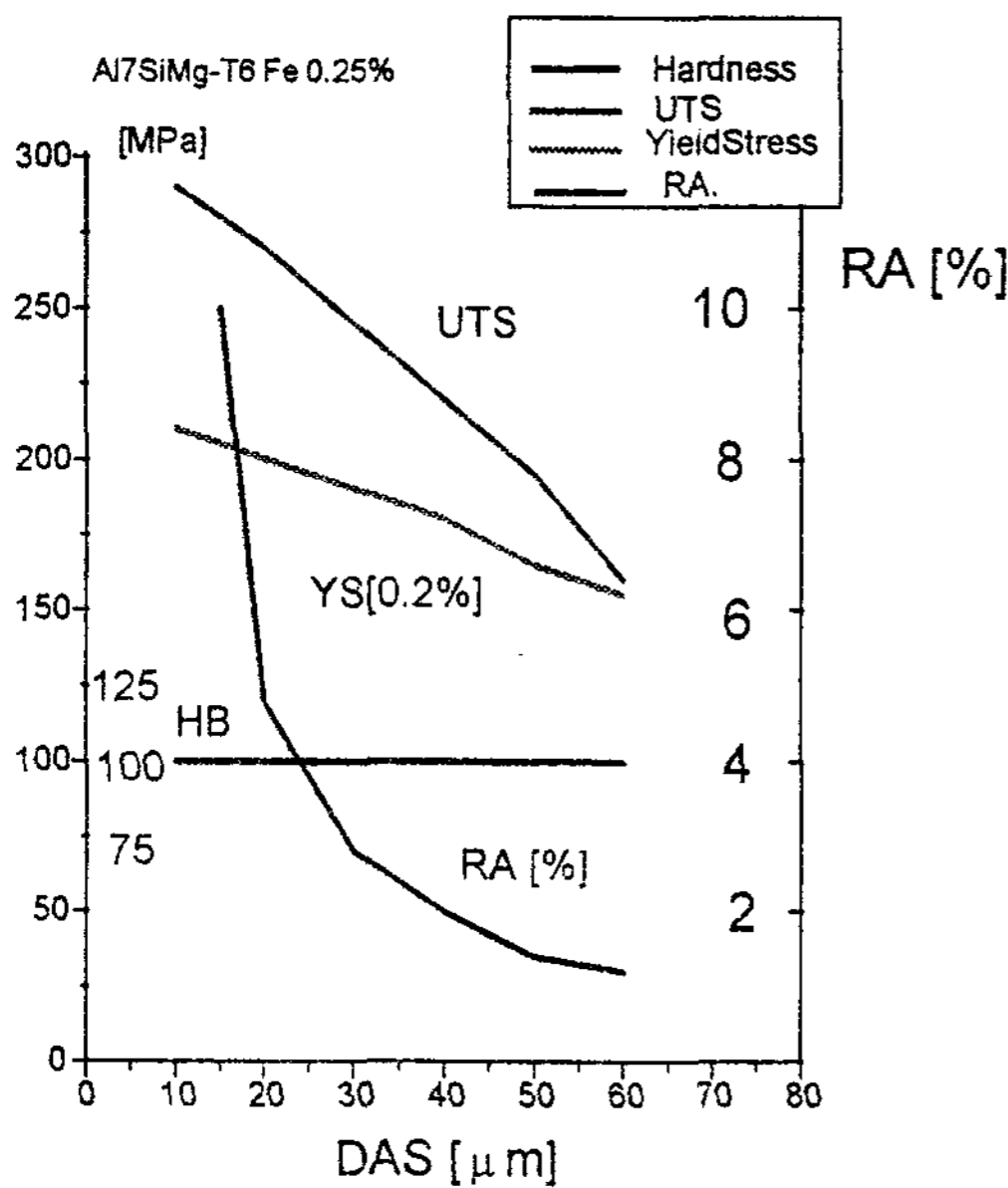


그림 3. 인장특성에 미치는 DAS의 영향[3]

Solidification Time, A=材質에 따른 상수) 이 관계는 모든 合金系, 合金조성에 대해 거의 一致 한다.

알루미늄合金 주물(AC4CH, Al-7Si-Mg)의 DAS와 기계적 성질과의 관계를 그림 3에 나타낸다. 강도 및 연성 모두 DAS의 증가와 더불어 저하 하지만, 特히, 신율, 충격치 등의 인성의 저

하가 현저하다. 경도의 경우는, 덴드라이트와 共晶에서의 Mg_2Si 석출물의 分布가 냉각속도와는 무관하기 때문에, DAS에 그다지 영향을 받지 않는다. 냉각속도가 일반 單調의 인장특성에 미치는 영향은 많은 연구자들에 의해 조사되어져 왔으나, 피로강도에 대한 체계적 연구는 그다지 많이 發表되어 있지 않다.

3. 피로특성

여러가지 다양한 주조공법으로 제작된 알루미늄 합금 부품의 피로강도나 혹은 한 부품에 있어서 여러 다른 부위의 피로강도를 예측하기 위해서는, 피로강도를 局部的인 냉각속도에 연계시켜 봄이 바람직하다. 이점에 있어서, DAS와 혹은 기타 기공을, 金屬間化合物相等의 영향으로 구분해서 생각해 볼 수 있다.

피로수명은 균열의 生成(Nucleation)과 전파(Propagation)라는 양측에 의해 결정된다. 물론 이들은 모두 주물의 응고時 냉각속도에 의해 영향을 받는다.(그림 4) 균열은 보통 기공이나 β -플레이트 부위에서 生成되고, 균열의 진전은 결함(가끔은 共晶)에 의해 촉진된다. 냉각속도가 매우 늦게 되면, S-N곡선 상에 있어서 기울기는 낮아지고, 절점은 보다 큰 사이클 方向으로 이동하게 된다. 이것은 균열의 생성기가 축소되고,

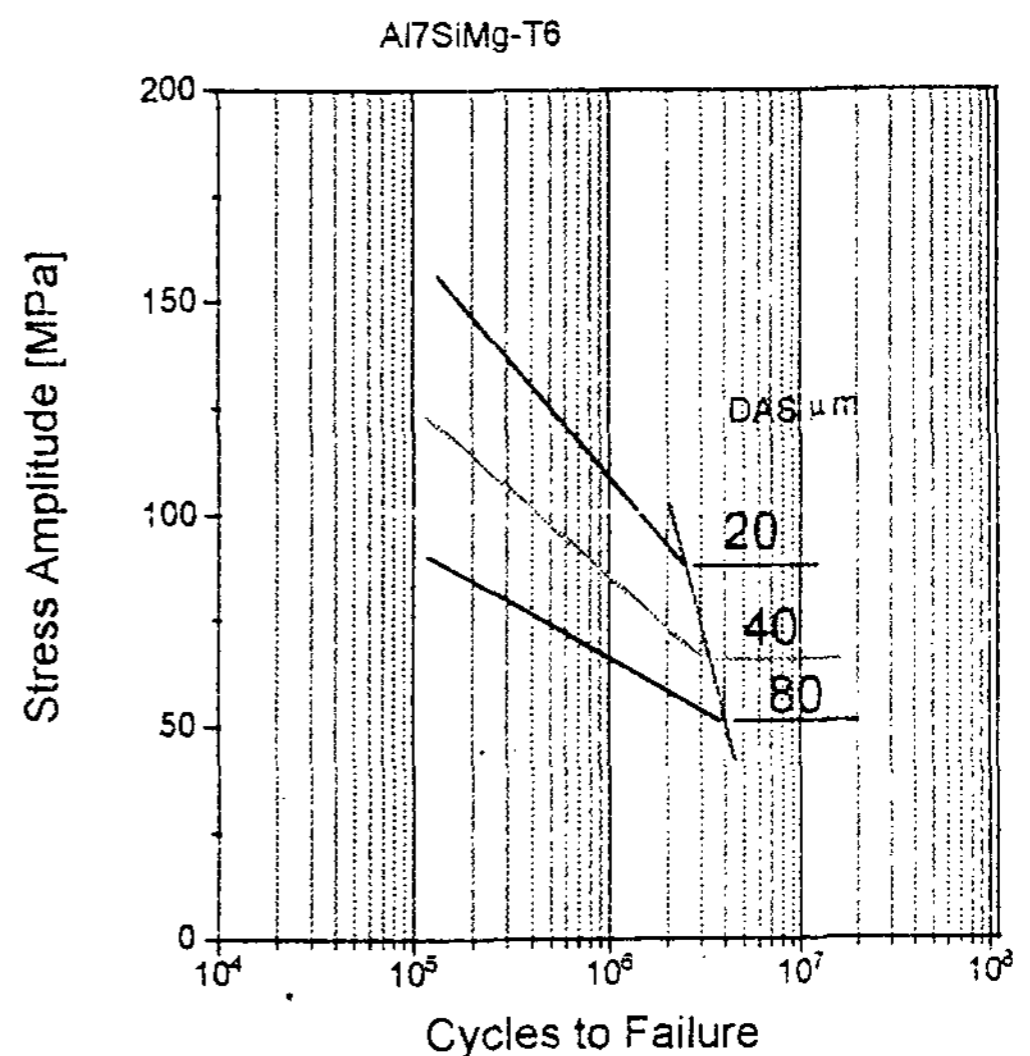


그림 4. 피로 S-N Curve에 미치는 DAS의 영향[3]

따라서 피로수명은 大部分이 전파기간에 의해 결정된다는 것을 의미한다.

이점에 있어서, 기공의 영향은, Fe첨가의 영향보다 훨씬 크다고 보고 되었지만[3,4], 하여튼 기공과 金屬間化合物相의 전반적 영향은 피로강도에 결정적이라고 말할 수 있다. 이들의 영향은 냉각속도에 의해 조절되어서, DAS라는 미세단위에 의해 計量化가 시도 되었다. 즉 피로강도는 다음 식과 같이 $(DAS)^{-1/2}$ 에 비례 한다고 發表 되었다.(그림 5) 즉, $\delta_s(N) = A + B(DAS)^{-1/2}$ [3]. 여기서, $\delta_s(N)$ 은 주어진 사이클에서 강도의 진폭을 나타낸다.

이 관계식에 의해서 우리는 비교적 용이하게, DAS가 주물 두께별로 결정될 수 있다면(그림 6), 한 부품에서 여러 다른 부위의 피로 S-N곡선을 예측할 수 있게 된다. 물론 다른 공법으로 주조된 부품의 피로 수명도 예측 가능하게 되는 것이다.

4. 熱疲勞強度

最近, 日本의 通山 哲 等[5]은, 자동차 알루미늄 주물의 耐熱性 향상을 목적으로 해서, 응고시의 냉각속도, 열처리, 合金成分, 表面改質처리 등

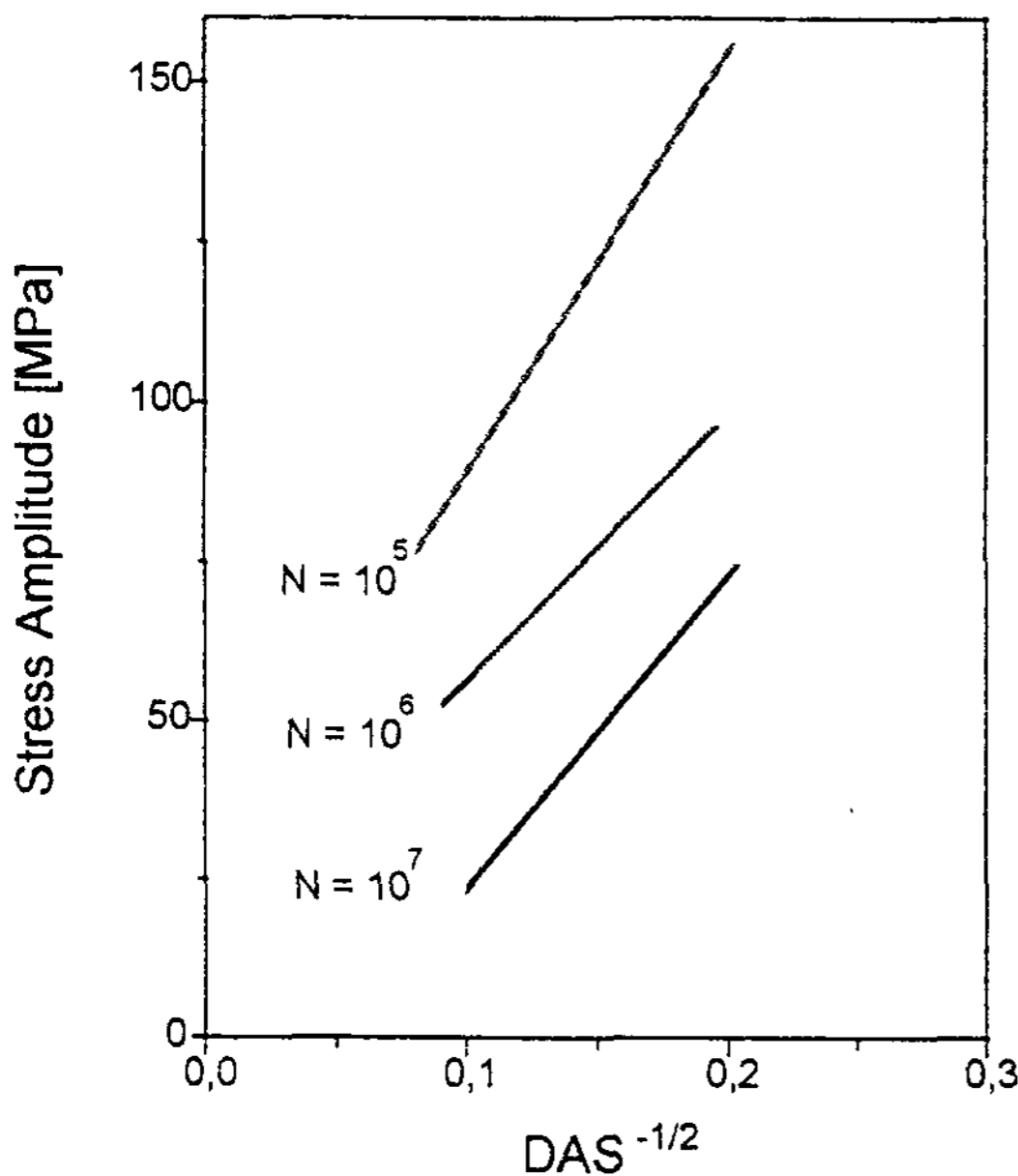


그림 5. 응력진폭과 DAS와의 관계[3]

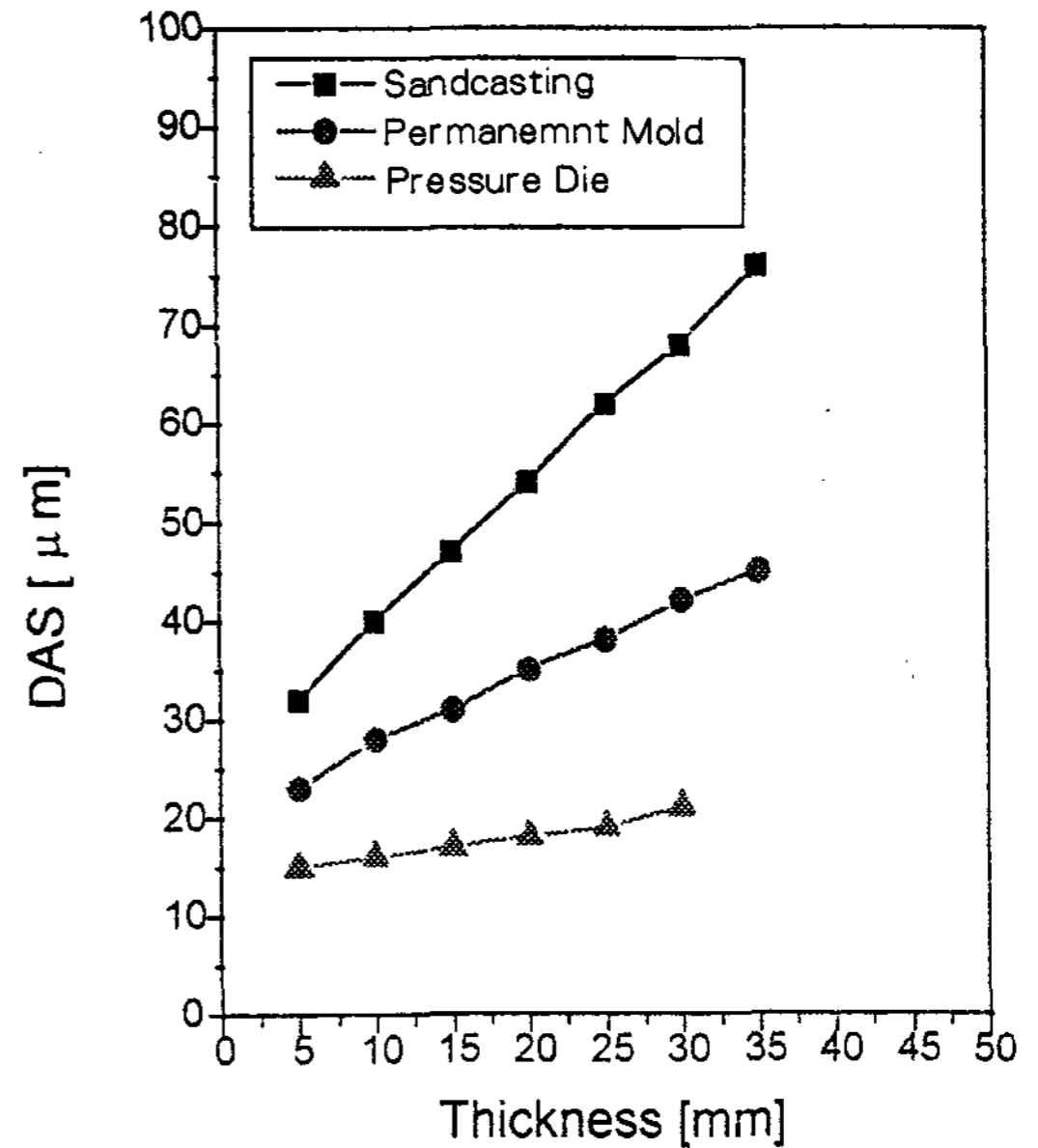


그림 6. 알루미늄합금의 각 주조공법에 따른 두께별 DAS의 변화[3]

의 제조 조건을 변화시켜 열피로 시뮬레이션 시험을 行하여서 매우 흥미로운 결과를 도출하였다. 그림 7는 온도범위 100~250°C, 10min/cycle로 시험을 실시한 疲形을 나타내고 있다. 구속률을 변화시켜 全歪범위 $\Delta\epsilon_p$, 탄성歪범위 $\Delta\epsilon_e$, 소성歪범위 $\Delta\epsilon_s$ 각각의 수명관계를 求하였다. 모든 경우에 있어서, 열피로 강도에 미치는 汎用的인 두가지 파라메타가 提案되었다.

소성歪의 발생이 작고, 신율이 큰 材料는 $\Delta\epsilon_p / \delta(\delta; \text{재료의 파단신율})$ 값이 작아서, 低사이클($N < N_r$)측의 열피로 수명이 향상된다.(그림 8) 여기서 N_r 은 천이 피로 수명점. 또 인장강도가 큰 材料는 $Ce(\text{피로강도계수} = \Delta\epsilon_p N^{kp})$ 값이 증대해서, N_r 이 높은 歪側에 위치해서, 주로 $N > N_r$ 의 사이클 영역에 있어서 열피로 강도 향상에 유효하다.(그림 9) 냉각속도의 증대에 의한 조직미세화(DAS치, 기공율의 저감)는 材料의 신율, 강도를 동시에 개선하는 효과가 있어서, 열피로 강도 향상의 유효 수단이라고 결론지을 수 있다.

그림 10은 상기 두가지 파라메타($\Delta\epsilon_p / \delta, \sigma_B / E$)에 미치는 응고시의 냉각속도, T6처리, 合金成分의 各영향에 대해서 정리해 본 것이다. AC2B材, AC4C材 양재료 모두 응고시의 냉각속도를 키우는 것이 $\Delta\epsilon_p / \delta$ 의 감소와 σ_B / E 의 증대

에 효과가 있고, 열피로 강도 개선에 유효한 수단인 것을 알 수 있다. 역으로 T6처리에 대해서는 σ_B/E 가 대폭적으로 향상하지만 $\Delta\epsilon_p/\delta$ 가 줄어들지 않아 저사이클側の 열피로 강도는 개선되

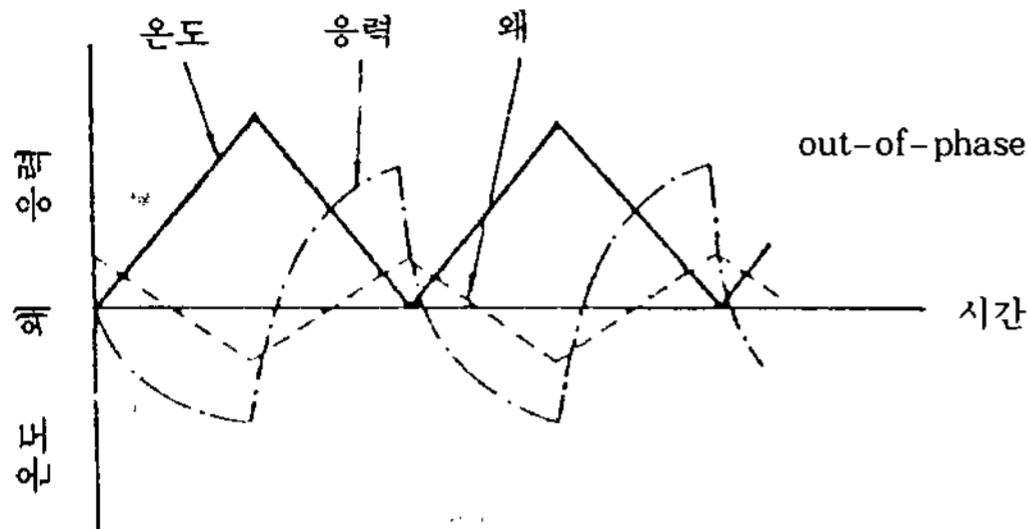


그림 7. 열피로시험에 있어서 疲形[5]

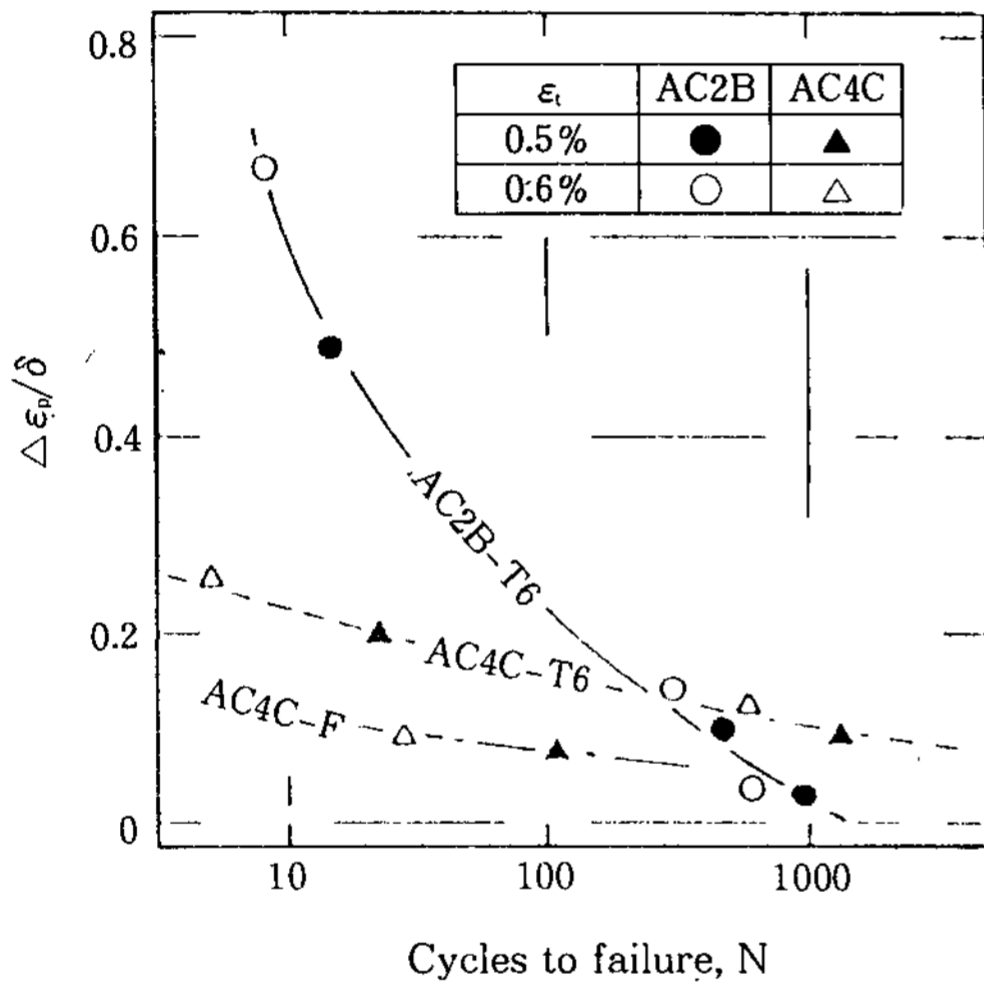


그림 8. $\Delta\epsilon_p/\delta$ 와 열 피로수명과의 관계[5]

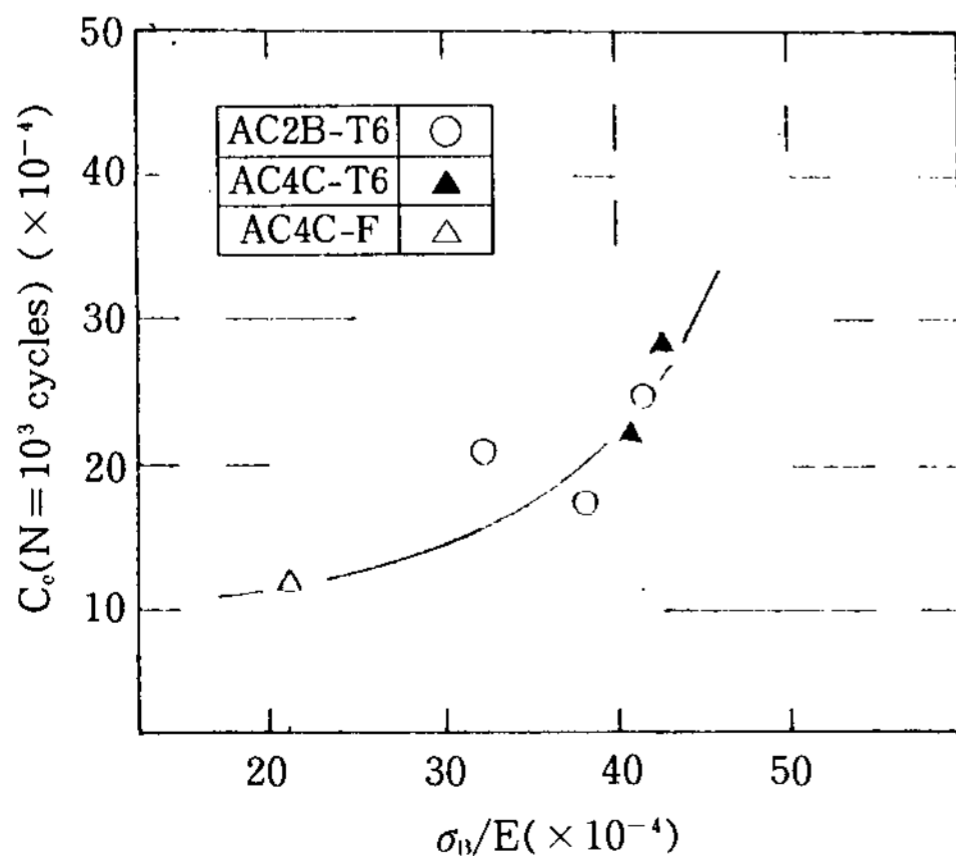


그림 9. 열 피로수명에 미치는 재료강도의 영향

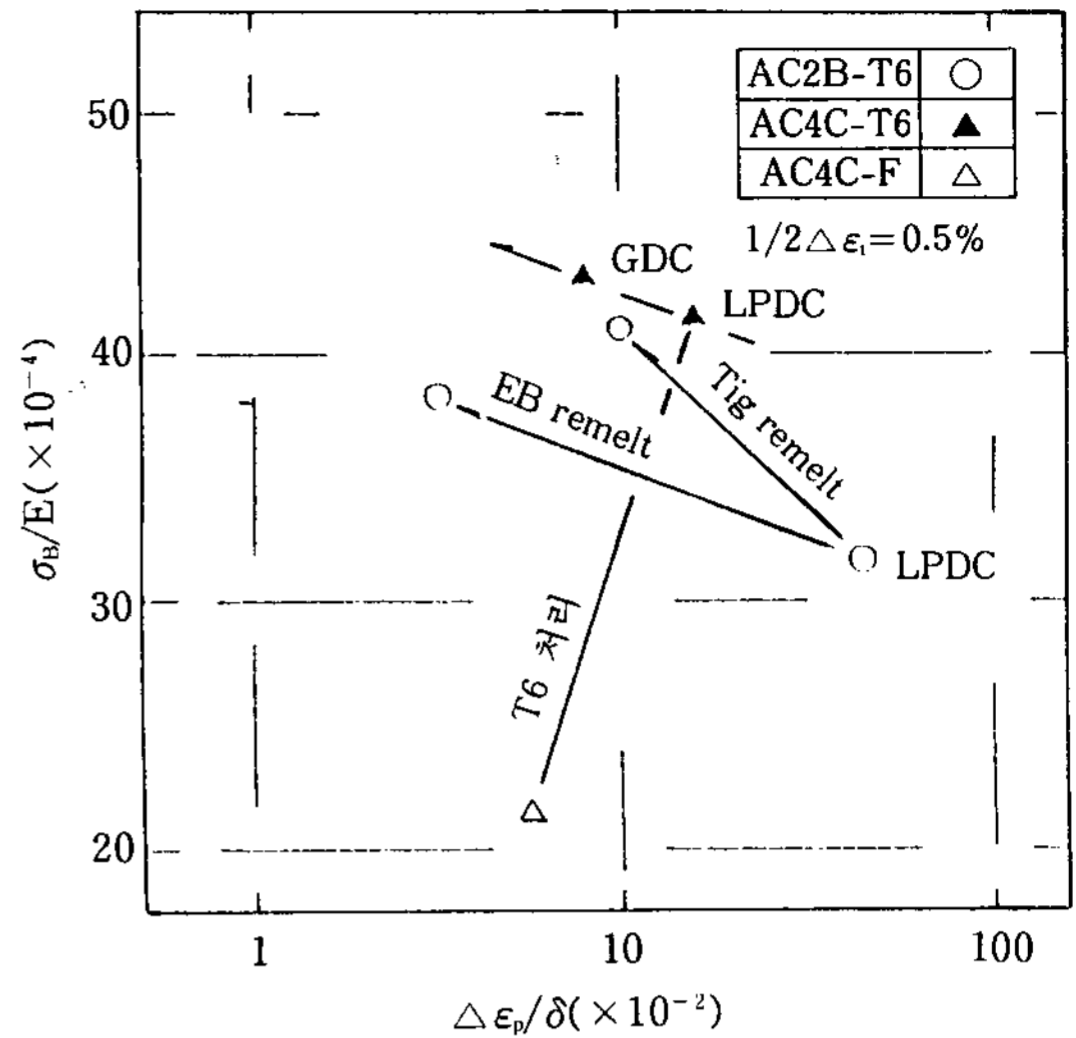


그림 10. 열 피로강도에 미치는 재료특성의 영향

지 않는다. 表面改質 처리(EB remelt, TIG remelt等)의 상세 영향에 대해서는 다음 항에서 살펴 보기로 한다.

5. 表面改質 (TIG Surface Remelting)

위에서 살펴 본 바와 같이 알루미늄 주물의 냉각속도를 빠르게 하는 것이 강도를 향상시키는데 매우 효과적 이라는 것을 알 수 있다. 그러나, 자동차 부품에서와 같이 복잡형상과 비교적 큰 사이즈를 갖는 부품들은 실제의 주조 공정에서 냉각속도를 제어하는 것이 여간 어려운 일이 아닐 것이다. 이러한 관점에서 特定 부위만 가열, 급냉하는 方法이 提案되었는데, 이것이 높은 에너지 밀도의 소스를 활용하는 재용해(Remelting)법이다. 가장 잘 알려져 있는 경우가 캠샤프트 주물의 耐마모성 향상을 위한 재용해 국부 경화 方法이다. 알루미늄합금을 局部 재용해해서 급냉하는 方法은 최근에 特히 高出力 디젤엔진 실린더헤드의 알루미늄화에 크게 기여하게 되었는데, 밸브 포트 주위를 強化하는데 매우 효과적으로 알려져 있다.[6]

TIG arc, 플라즈마 arc, 레이저 빔 및 전자 빔 등 4가지 고밀도 에너지 소스가 거론되지만, TIG프로세스가 설비 투자비, 운영비 면에서 유리한 立場이어서 주된 적용 대상으로 되고 있다. (그림 11)

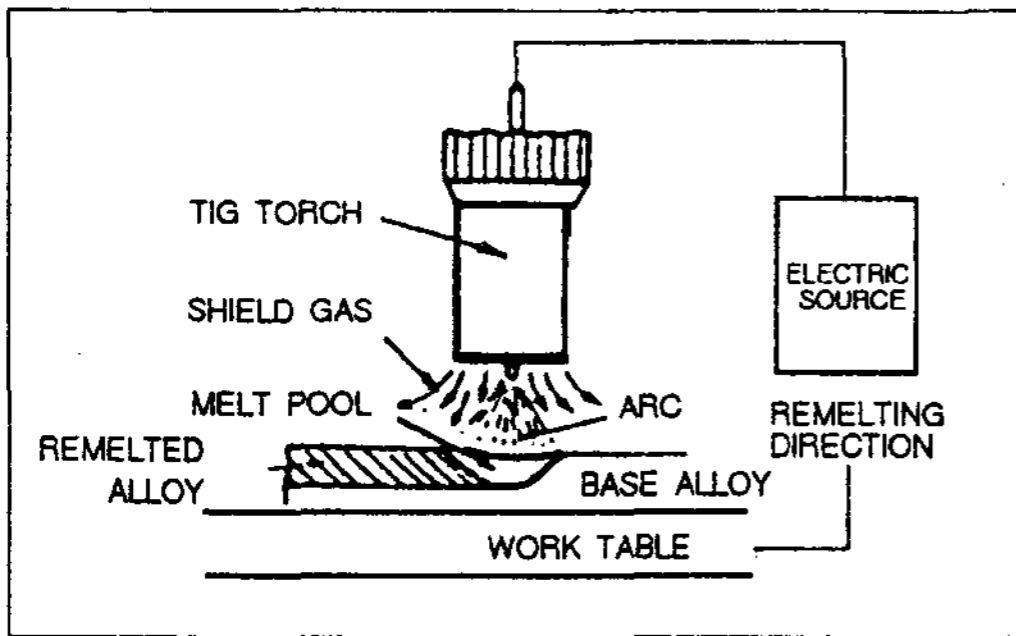
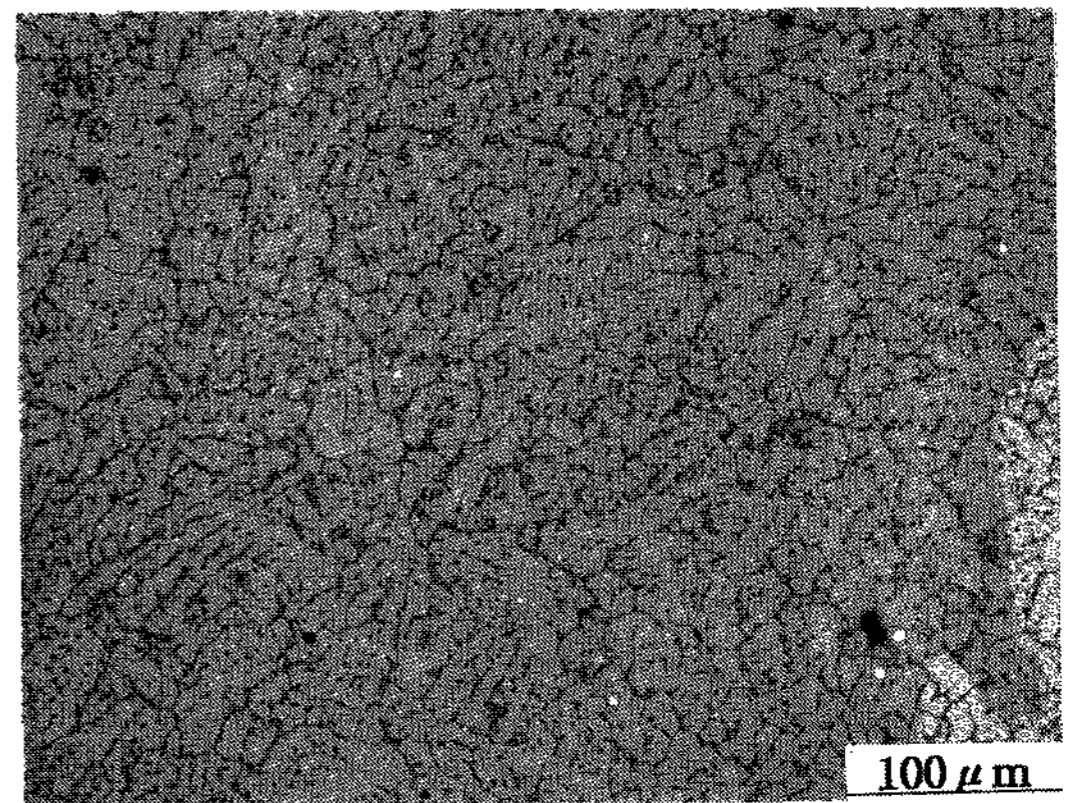


그림 11. TIG Remelting Process의 모식도

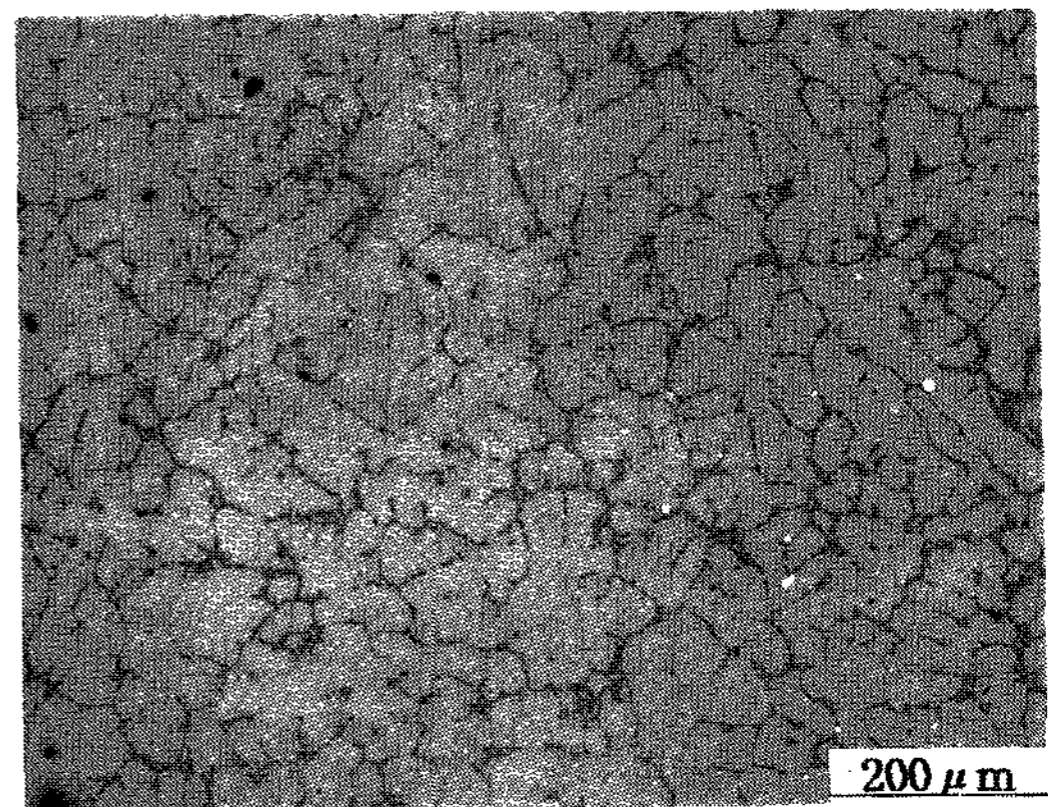
TIG 熱源의 주요 요구조건 으로서는, 주조 조직의 정련효과, 주조결합의 제거능력, 용해깊이의 確保, 전극 소모량의 최소화 등을 열거할 수 있다. 이것들을 최적화 하기 위한 공정변수는 여러가지 거론되나, 주물의 미세조직에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 전류밀도와 용해속도로, 일반적으로 아크 전류를 감소하고, 용해속도를 증가시키면 DAS는 미세화 한다고 알려져 있다.

자동차用 주물의 알루미늄化는 현재 가솔린 엔진 블럭을 中心으로 進行되고 있으나, 디젤엔진에도 경량화가 要求되어 실린더 헤드가 중점 부품으로 되고 있다. 이와 더불어 높은 회전력과 出力이 要求되기 때문에, 실린더 헤드의 열적 내구성을 향상시키는 것이 무엇보다 중요하게 대두되고 있다. 특히 밸브포트 주위에서의 高溫균열진전 저항 이라는 特性이 絶실히 要求된다. 그림 12에 실린더 헤드(AC4D상당)의 TIG Remelting 처리한 부위와 통상의 주조 조직을 비교해서 나타내었다. 재용해된 조직은 통상의 조직에 비해 훨씬 미세화된 DAS(9 μ m)와 완전히 결합이 제거된 모습을 보여주고 있다. 이렇듯 1/7 정도로 미세화된 조직은 물론 응고시 빠른 냉각 속도의 영향으로, 이 급냉 方法은 부품 자체의 Chill 효과에 의해 달성될 수 있다.

이러한 TIG 재용해 方法으로 처리된 시편의 인장강도, 연신율, 충격치 등은 앞서서 언급한 바와 같이 DAS가 미세화 되고 결합이 大體적으로 감소함에 따라, 향상된다고 보고되고 있다. TIG 재용해 법이 다른 어떠한 成分의 개선이나 주조 공법 개량보다도 주물의 強化에 매우 효과적이라는 것을 그림 13에 개념적으로 나타내고 있다.



재용해처리 조직(DAS=9 μ m)



처리되지 않은 조직(DAS=67 μ m)

그림 12. 실린더 헤드에 있어서 TIG Remelting에 의해 미세화된 주조조직(AC4D)

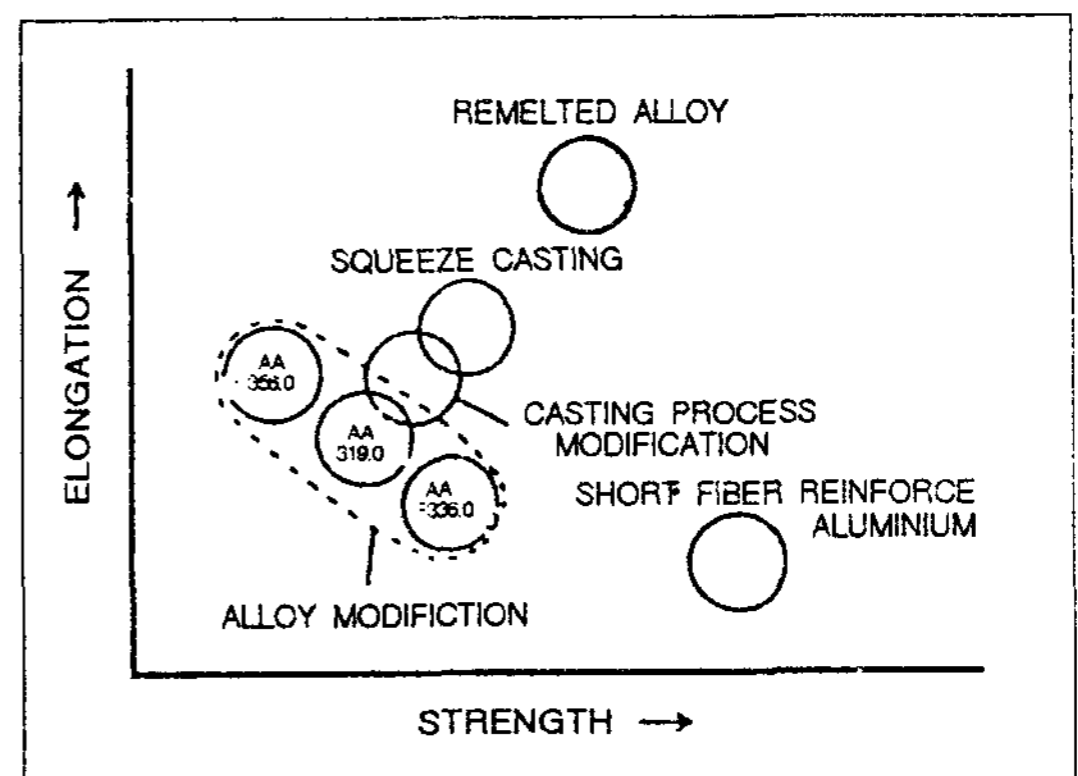


그림 13. 알루미늄 합금의 여러공정別 강도와 연신율 비교[6]

고온 균열 진전 저항도 TIG 처리된 알루미늄 합금주물 시편에 대해 평가되어 보고된 바 있다. 고온 균열 저항은 상온에서 약 350℃ 사이로 열 Cycle을 부여 했을때 소정의 시편에서 발생되는 총 균열의 길이로 평가된다. 그림 14에서 보는바와 마찬가지로 TIG 재용해 처리된 경우는 통상에 비해 약 3배 이상의 고온 균열 수명을 갖는 것으로 나타났으며, 이것은 평가된 모든 알루미늄 합금 주물에서도 비슷한 양상을 보여 주었다.

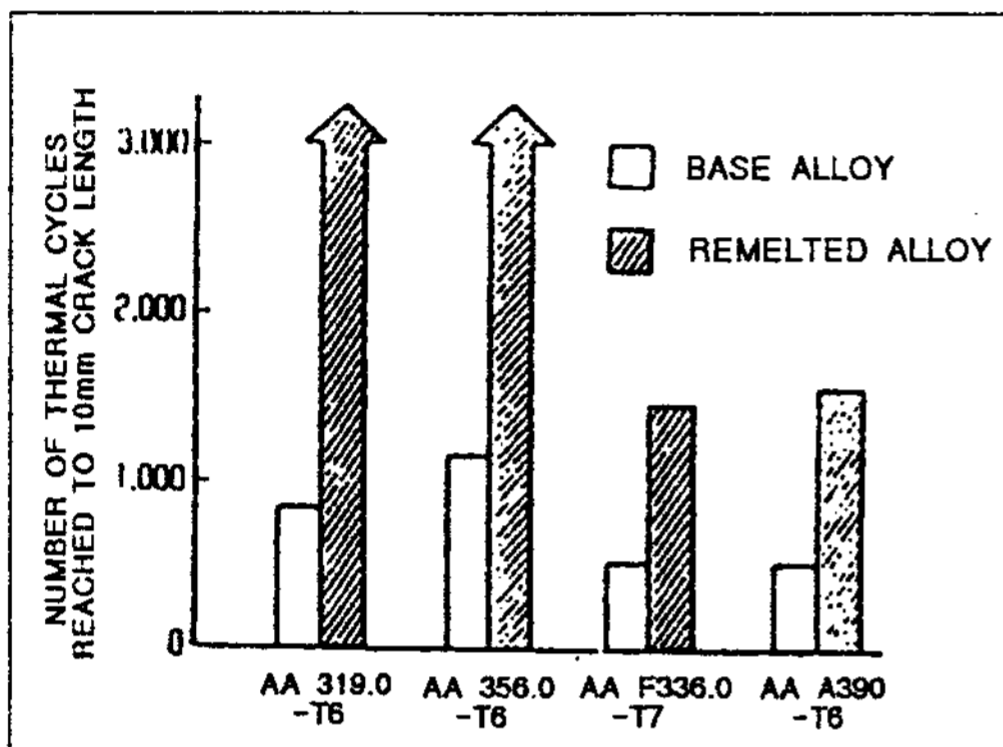


그림 14. 각 알루미늄 합금에 있어서 TIG Remelting이 고온 균열저항에 미치는 영향[6]

6. 맺음말

최근 자동차의 輕量化 추세와 高出力, 長壽命 엔진의 요구는 실린더 블럭, 헤드 등 알루미늄

합금 주물의 보다 높은 신뢰성과 내구성의 확보를 필요로 한다. 이런 관점에서 本 發表에서는, 凝固時 냉각 속도의 증대에 의한 조직 微細化 (DAS, 기공의 저감)가 재료의 強度와 延性を 동시에 개선해서, 피로강도(高溫 포함) 향상의 유효 수단이라고 판단되어, 관련 기본 자료들을 고찰해 보았다.

향후 우리 업계는, 생산성, 제조원가를 포함한 기타 요인을 고려하여, 어떠한 鑄造工法(表面 改質 포함) 이 이러한 고강도 알루미늄 엔진 주물의 신뢰성 향상에 효과적인 가를 체계적으로 접근하여 기술 개발에 매진해야 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 日本 輕金屬協會, 알루미늄 주단조기술 편람, 1991, Pp.123~128
- [2] 日本 輕金屬協會, 알루미늄 합금의 조직과 성질, 1992, Pp.245
- [3] A. Wickberg, G. Gustafsson and L. E. Larsson, SAE Paper 840121
- [4] M. Harada, T. Suguhi, and I. Fukui, Imono, Journal of the Japan Foudrymen's Society, 55(1983), No. 2, Pp.80
- [5] S. Tohriyama, M. Kumano, 日本自動車技術, 49(1955), No. 5, Pp.33~38
- [6] M. Koyama, J. Miyake and K. Sakaguchi, SAE Paper 891989