

## 자동차차체용 고연성 알루미늄다이캐스팅합금 개발<sup>1)</sup>

渡邊修一郎 · Ruediger Franke\*

伊藤忠非鐵マテリアル(株) 原料第一グループ

\*Aluminium Rheinfelden GmbH

## New Die Casting Alloy with High Ductility in As Cast State for Automotive Structural Components

Shiichiro Watanabe and Ruediger Franke\*

ITOCHU Non-Ferrous Materials Co., Ltd

\*Aluminium Rheinfelden GmbH

번역 : 홍성길<sup>2)</sup>

### 1. 서 언

자동차에 있어서 지구온난화의 원인이 되는 이산화탄소 배출량의 삭감을 위한 연비개선은 지속적인 과제이다. 그러기 위한 하나의 수단으로써 철강재료부터 알루미늄재료로의 대체에 의한 차체경량화가 진행되고 있다[1,2].

최근 고진공다이캐스팅을 비롯하여 각종 고품질다이캐스팅 기술[3] 및 고강도 고연성을 발휘하는 고품질다이캐스팅합금의 실용화에 의해서 대형다이캐스팅부품이 승용차차체의 구조부품으로써 채용되고 있다[4,5]. 고품질다이캐스팅합금으로써는 Al-Si-Mg계 합금이 주로 이용되고 있다. Al-Si-Mg계 다이캐스팅합금은 마그네슘함유량의 조절과 열처리를 함으로써 넓은 범위의 기계적 특성을 얻을 수 있기 때문에 지금까지 다양한 차체구조 부품의 요구성능에 대응해 오고 있다[6].

한편 고품질다이캐스팅합금이 자동차차체부품으로 널리 응용되는 것과 동반하여 합금에 있어서 현존하는 문제점과 새로운 요청이 뒤따르고 있다. 예를 들면, 상술한 Al-Si-Mg계 다이캐스팅합금에서는 차체구조부품으로써 필수조건인 연신율 10% 이상의 고연성을 얻기 위해서는 주조 후에 용체화처리를 포함한 열처리를 해야 할 필요가 있으며, 열처리변형의 교정과 같은 작업을 수반해야하므로 생산공정상 큰 문제가 되고 있다. 그래서 비열처리로 고연성을 발휘할 수 있는 합금이 업계에서 요구되고 있다. 또한 최근의 엔진 고출력화, 디젤엔진의 채용으로 엔진으로부터의 방열에 의한 온도상승에 기인하여 Al-Si-Mg계 다이캐스팅합금 제품의 기계적특성이 장기간에 걸친 사용중에 특성이 변화하는 것이 문제점으로 지적되고 있다. 거기에 차체의 조립공정에 있어서는 이종재료와의 접합을 포함한 접합기술의 개발이 요구되고 있다.

그래서 본 연구에서는 자동차공업계로부터의 새로운 요구를 배경으로 엔진으로부터의 방열에 의한 가열이 있어도 경년시효

경화를 하지 않고, 또한 용체화 처리를 하지 않아도 즉, 주조한 그대로(이후 as-cast라 칭함)의 상태로 아주 높은 연신율을 얻을 수 있고 동시에 주조성이 우수한 다이캐스팅합금을 개발하고자 하였다. 또한 이종재료와의 접합을 가능하게 하는 접합 기술로써 self piercing rivet접합의 가능성을 검토하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 개발목적

자동차공업계로부터의 요구를 기초로 하여 Table 1에 나타난 개발목표를 설정하고 실험을 진행하였다. 실험은 순차 해결하는 형태로 진행하였다.

Table 1. Requirements/development target for new alloy.

Item	Requirement
High ductility in as cast state	Elongation higher than 10%
Moderate yield strength	Yield strength higher than 120 MPa
No long term ageing behavior	No age hardening
Good castability	Easy castability for complex design with less wall thickness

Table 2. Chemical composition of experimental alloys for examining influence of Magnesium content. (mass%)

	Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Sr
1	10.2	0.09	0.60	0.003	0.081	0.013
2	10.1	0.09	0.60	0.020	0.080	0.012
3	10.4	0.10	0.60	0.040	0.084	0.015
4	10.3	0.09	0.59	0.082	0.088	0.012
5	10.3	0.09	0.61	0.102	0.084	0.012

<sup>1)</sup>일본 주조공학회지: 鑄造工學 제 79권(2007) 제6호 page 297~302에 게재된 자료임.

<sup>2)</sup>전남대학교 신소재공학부(Dept. of Materials Science and Engineering, Chonnam National University)

2.2 실험내용

먼저 경년시효에 의한 특성변화의 방식에 관해서 검토하였다. Al-Si-Mg계 다이캐스팅부품의 사용 환경 하에서의 온도상승에 의한 특성변화는 Mg<sub>2</sub>Si의 석출에 기인한 결과라고 추정하고 Table 2에 나타낸바와 같이 Mg 함유량을 0.003%~0.1%까지 변화시킨 Al-Si-Mg계 다이캐스팅재를 제조하여 경년시효변화에 대한 Mg함유량의 영향을 조사하였다.

다음으로 as-cast상태에서의 합금의 기계적 특성(내력)향상을 목적으로 천이원소 즉 Mn, Mo, Zr 첨가의 효과를 검토하였다. Mo 및 Zr을 첨가원소로 채택한 것은 예비실험에서 내력 향상효과가 우수하였기 때문이다. Mn 첨가효과 실험에 사용한 합금조성을 Table 3에 나타내었다. 또한 Mo 및 Zr 첨가효과를 검토하기 위해 사용한 합금조성을 Table 4에 나타내었다.

위 두가지 실험을 통해서 기계적 특성에 대한 개발목표를 달성하는 것이 확인되어 최적으로 판단되는 조성을 가진 합금(후술, Table 6참조, 이하 개발합금이라 함)에 대해서 as cast 상태에서의 기계적 특성에 대한 다이캐스팅두께(냉각속도)의 영향 및 미세조직을 조사하여 합금조성과의 관계를 고찰하였다.

또한 범용실용형 다이캐스팅을 실시하여 다이캐스팅중의 연신율분포를 조사함으로써 합금의 주조성을 조사하였다.

마지막으로 개발합금의 as-diecast재를 이용하여 시행착오(try and error)적으로 각종 조건에서 기계적 접합기술중 가광을 받고 있는 "self piercing rivet 접합"의 가능성을 검토하였다.

2.3 다이캐스팅 및 기계적 특성 측정조건

합금의 기계적 특성 측정에 사용한 시험편의 다이캐스팅조건은 다음과 같다.

강제 탈가스 장치를 부착한 형체력 3900 kN의 블러사제 다이캐스팅장비를 사용하여 Fig. 1에 나타낸바와 같은 형태의 다이캐스팅재(치수:220×65 mm, 두께: 2,3,4,6 mm)를 주조하고 장방향의 시험편을 채취하여 기계적 특성을 측정하였다.

용탕은 고순도 지금(地金)을 배합하여 가스 가열식 도가니로

를 사용하여 용해하였으며, 임펠러식 탈가스장치로 Ar가스를 취입하여 탈가스 및 탈재처리를 한 후 Sr은 Al-10%Sr 모합금을 첨가하여 20분 후에 Table 5에 나타낸 조건으로 주조하였다. 용탕품질은 initial bubble test를 실시하여 주조개시직전에 평가하여 가스함유량(목표: 1 ml/100 gAl 이하)을 확인한 후 주조하였다. 주조온도는 983~993K, 금형온도는 고정형과 가동형 모두 473 K로 조정하였다.

다이캐스팅재의 기계적 특성은 주조직후에는 오차가 크므로 주조 후 2일 이후에 안정하였으므로 2일 후에 측정하였다. 기계적 특성 측정에는 10개 이상의 시험편을 사용하여 그 평균치를 결과로 나타내었다.

실용다이캐스팅중의 연신율분포에 대해서는 다이캐스팅 게이트로부터의 거리차이에 따라 3곳으로부터 채취한 시험편의 인장시험결과로부터 얻었다. 본 시험에 사용한 다이캐스팅은 주조온도 963~973 K, 금형온도 467~473 K 조건에서 형체력 20MN의 고진공다이캐스팅장비를 사용하여 주조한 제품질량 6kg, 평균두께 3 mm의 실용다이캐스팅이다. 결과데이터는 10개 시험편의 평균치이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Al-Si-Mg계 다이캐스팅합금의 경년시효성에 미치는 Mg 함유량의 영향

엔진주변부품이 받는 열이력(373K정도로 승온)을 고려한 촉진조건으로써 393 K에서 1000 hr 시효처리 조건을 선택하고, 시효처리 후와 as-cast재에 대한 기계적 특성 차이를 측정하여 경년시효성을 평가하였다. 두께 3 mm 다이캐스팅재를 시험하였다.

그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 시험에 제공한 Mg함유량의 변화는 0.10%까지이지만 Mg함유량의 증가와 함께 시효처리에 의해 내력이 크게 증가하고 있다. 한편, 합금의 연신율은 시효처리를 함으로써 전반적으로 1~2% 저하하고 있지만 Mg함유량의 변화에 따른 변화량의 차

Table 3. Chemical composition of experimental alloys for examining effect of Manganese addition. (mass%)

	Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Sr
1	10.2	0.09	0.39	0.01	0.083	0.013
2	10.0	0.08	0.60	0.01	0.085	0.013
3	10.3	0.08	0.81	0.01	0.081	0.012
4	10.1	0.09	0.98	0.01	0.084	0.012
5	10.1	0.09	1.17	0.01	0.083	0.012

Table 4. Chemical composition of experimental alloys for examining effect of Molybdenum and Zirconium. (mass%)

	Si	Fe	Mn	Mo	Zr	Mg	Ti	Sr
1	10.0	0.09	0.49	0.00	0.00	0.01	0.090	0.013
2	10.1	0.09	0.49	0.21	0.00	0.01	0.088	0.013
3	9.8	0.09	0.50	0.39	0.00	0.01	0.084	0.012
4	9.9	0.09	0.49	0.00	0.21	0.01	0.082	0.012
5	10.0	0.09	0.50	0.14	0.15	0.01	0.082	0.012

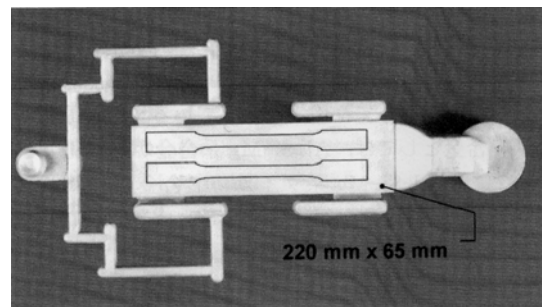


Fig. 1. High pressure die casting plate for tensile test. Size: 220×65 mm, wall thickness 2, 3, 4 and 6 mm.

Table 5. Die casting condition for tensile test plate.

Die casting machine	3900 kN Buhler B-machine
Venting system	BDW system
Die-Lubricant	FTW 05 (HA) 1 : 180
Die temperature	473 K
Melt temperature	983~993 K

는 거의 나타나지 않는다. Mg 함유량변화에 따른 내력증가에의 영향은 Mg양 0.08%이상에서 특히 커짐을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, 사용 중에 엔진으로부터의 방열에 의한 가열의 영향을 받는 것이 걱정되는 부품에 대응하기 위해서는 Mg함유량을 0.04%이하로 제한할 필요가 있음이 확인되었다.

이런 시효처리 즉, 경년시효에 의한 내력의 증가는 Mg함유량과 관련된 것으로 봐서 Mg<sub>2</sub>Si의 석출에 기인한다고 판단된다.

### 3.2 Al-Si-Mg계 다이캐스팅재의 기계적 특성에 미치는 천이원소의 첨가효과

우선 Al-10%Si 다이캐스팅합금의 기계적 특성에의 Mn첨가효과를 측정하였다. 그 결과를 Fig. 3에 나타낸다. Fig. 3에 나타난 것처럼 Mn양을 1.2%까지 첨가하였는데, Mn첨가량에 따른 내력의 향상은 인정되지 않았다. 그래서 Mn함유량에 관해서는 다이캐스팅시의 금형에의 소착방지의 관점으로부터 표준치로써 0.5%를 선택하기로 하였다.

다음으로, 예비시험 결과로부터 내력 향상에 효과가 컸던 Mo과 Zr을 선택하여 Al-10%Si-0.5%Mn합금 다이캐스팅재의 기계적 특성에의 이들 원소들의 첨가효과를 측정하였다. Fig. 4에 다이캐스팅재의 내력에 대한 Mo 및 Zr의 단독첨가효과 그리고 복합첨가효과에 대해서 나타낸다. Fig. 4에 나타난 것처럼 Mo과 Zr의 단독첨가, Mo과 Zr의 복합첨가에 의해서 내력이 10% 향상되었으며, 내력의 목표치인 120 MPa 이상을

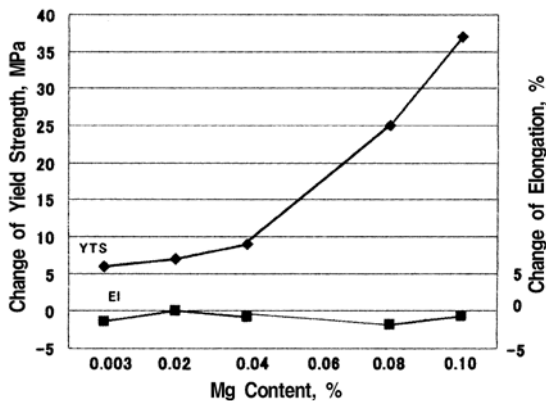


Fig. 2. Influence of Magnesium content on long term ageing of Al-10%Si-0.5% Mn alloy die casting.

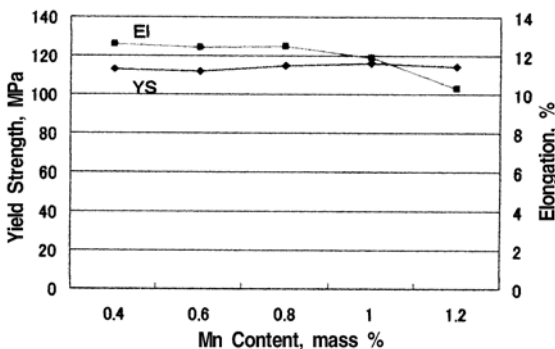


Fig. 3. Effect of Manganese content on mechanical property of Al-10%Si-Mn alloy die casting.

달성함이 인정되었다. 특히 복합첨가가 첨가량에 대한 내력의 향상정도로부터 알 수 있듯이 단독첨가보다 더욱 효과적임이 확인되었다. 한편, 연신율은 Mo, Zr 첨가에 의해 거의 변화가 없으며 목표치인 10%를 넘는 12~13%를 나타내었다.

위 결과로부터 Mo 및 Zr을 각각 0.15% 첨가하는 복합첨가를 최적첨가량으로 평가하여 Table 6에 나타낸 조성의 합금을 개발합금으로 하여 다음과 같은 각종 시험에 사용하였다.

### 3.3 개발합금의 미세조직

Fig. 5에 개발합금 다이캐스팅재(4 mm 판)의 미세조직을, Mg을 함유하는 Al-10%Si-0.5%Mn-0.2%Mg합금과 비교하여 나타낸다. 또한 Fig. 6에 NaOH 수용액으로 부식시켜 관찰한 SEM조직을 나타낸다.

Fig. 5 및 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 Sr에 의한 개량효과에 의해 공정Si은 미세화 되었으나 두 합금을 비교하면 개발합금의 공정Si이 더 미세화 되었음이 관찰되었다. Mg 함유량을 억

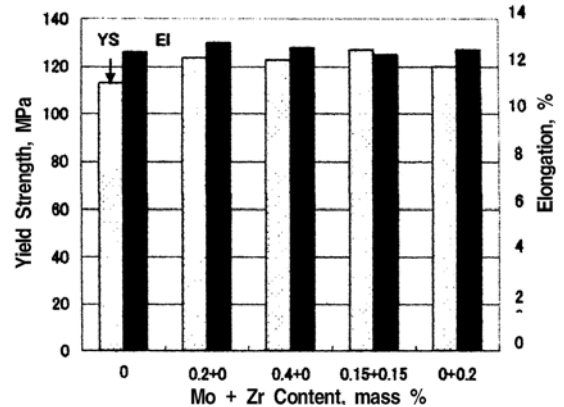


Fig. 4. Effect of Molybdenum and Zirconium content on mechanical property of Al-10%Si-0.5%Mn alloy die casting.

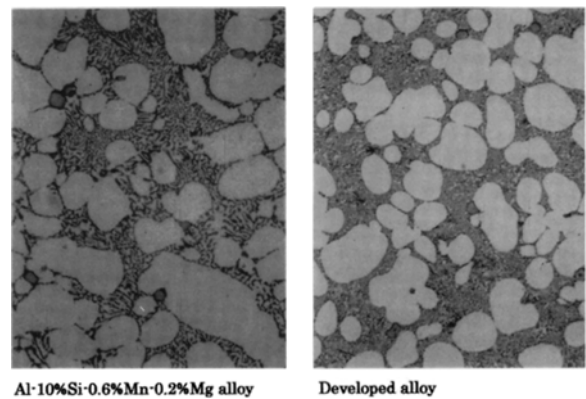


Fig. 5. Microstructure of Strontium modified Al-Si-Mg alloy and developed alloy die casting.

Table 6. Chemical composition of developed alloy used for further test.

Element	Si	Fe	Mn	Mg	Mo	Zr	Sr
mass%	10.0	0.10	0.50	0.01	0.15	0.15	0.015

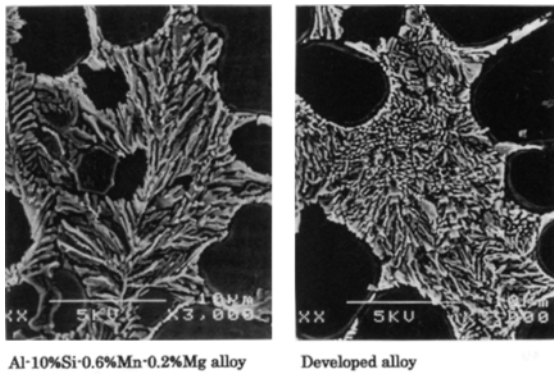


Fig. 6. Scanning electron microstructure of eutectic silicon.

제함으로써 공정Si을 더욱 미세화 시킬 수 있음은 당연히 예측된 결과이다. 일반적으로 Ca, Li 등이 함유되면 Na이나 Sr에 의한 개량처리가 방해된다는 것은 널리 알려져 있으며, Mg도 이런 원소들과 같은 성질을 가진 원소이므로 공정Si의 미세화 저해원소로 추정된다.

Al-Si-Mg계 다이캐스팅합금에 있어서 Mg 함유량과 기계적 특성과의 관계에 대해서는 이미 보고되어 있지만 Mg 함유량이 0.1%부터 0.4%까지 증가함에 따라 as-cast재의 연신율이 10%에서 6%로 저하한다[6]. 이처럼 Mg 함유량의 증가와 더불어 연신율이 저하하는 것은 α-Al상에서의 Mg의 고용경화에 기인한 결과로 예상되지만 Fig. 5 및 Fig. 6의 미세조직에 나타난 것처럼 Mg이 함유됨으로써 공정Si의 형상과 크기의 차이도 영향을 미치고 있다고 생각된다.

개발합금의 연신율은 as-cast상태에서 Fig. 4에 나타난 것처럼 12~13%이며, Al-Si-Mg합금이 10%이하임에 비하여 우수함이 인정되었다. 이처럼 개발합금의 연신율향상은 Mg함유량을 억제함으로써 얻어지는 Sr의 개량효과에 의한 공정Si의 미세화로부터 발생한 결과라고 생각된다.

천이원소의 경우, 미세조직상에서 Mn은 2~3 µm 크기의 괴상인 Al<sub>12</sub>Mn<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>의 화합물이 α-Al상과 공정Si과의 경계에 정출하고 있음이 관찰되지만 Fig. 5에 나타낸바와 같이 Mn에 대해서는 비교적 조대한 화합물로 정출하기 때문에 분포밀도가 낮아서 함유량을 증가시켜도 내력 향상에 기여하지 않는다고 여겨진다.

### 3.4 개발합금의 기계적 특성에 대한 두께의 영향

Fig. 7은 개발합금의 기계적 특성(내력, 연신율)과 다이캐스팅재의 두께(냉각속도)와의 관계를 나타낸 것이다. 두께가 얇아지면 내력이 증가하고 두께가 두꺼워지면 내력이 저하하는 경향이 있다. 연신율은 큰 차를 보이지 않지만 두께가 커질수록 약간 증가하는 경향이 있다.

Mo 및 Zr에 대해서는 3.3에 서술하였듯이 현미경조직에서는 그 존재가 관찰되지 않는다. 이것은 이런 화합물이 극히 미세함을 시사하고 있다고 생각된다. 이와 같은 원소의 조직적동정에 대해서는 앞으로 더 많은 연구를 기다려야 하지만 존재크기가 작고 균일하게 분포하고 있다고 가정하면 Mo과 Zr 첨가가 내력 향상에 기여하고 있음을 이해할 수 있다. 또한, 두께가 감소한다는 것은 주물의 응고속도의 증가를 의미하므로 일

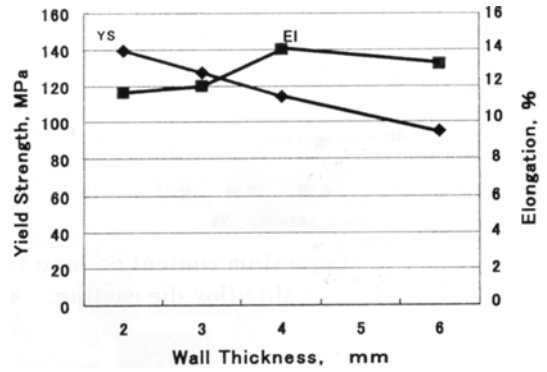


Fig. 7. Mechanical property of developed alloy die casting in as cast state versus wall thickness.

반적으로 천이원소의 화합물은 응고속도가 증가 할수록 미세하게 정출하는 경향이 있다고 볼 수 있다. Fig. 7에 나타낸 것처럼 두께가 감소하는 것 즉, 응고속도의 증가에 따른 내력의 증가는 Mo 및 Zr 화합물의 미세화와 분포가 더욱 효과적으로 영향을 미치는 결과라고 생각된다.

### 3.5 다이캐스팅중의 연신율분포

고진공다이캐스팅으로 주조한 실용 다이캐스팅의 게이트로부터의 거리가 다른 세 곳(게이트근처, 양단의 최종충진부)로부터 채취한 시험편에 대해서 기계적 특성을 측정된 결과를 Table 7에 나타낸다.

Table 7에 나타난 것처럼 게이트로부터 떨어진 최종충진부에서도 게이트근처와 거의 같은 높은 연신율이 얻어졌다. 또한 최종충진부의 파단부에서도 응고 cavity와 같은 구조결함은 관찰되지 않았다. 주물전반에 걸쳐서 균일하고 높은 연신율이 얻어진 것은 충돌시의 충격흡수능이 요구되는 부품에 있어서 적용이 기대된다. 종래의 Al-Si-Mg계 고품질다이캐스팅합금의 구조에 있어서 최종충진부의 기계적 특성(연신율)이 게이트근처와 비교하여 낮은 것이 문제시 되어있다[7,8]. 그 원인으로는 Al-Si-Mg계 다이캐스팅 합금은 다이캐스팅 금형 내에서의 용탕유동성 문제로 최종충진부에 응고수축으로 발생하는 cavity등의 결함이 집중하기 쉽다는 것이 보고되어 있다. 그 대책으로 주조온도를 높게 하고[9] 용탕의 충전속도를 증가시키는[8] 등의 방법이 제안되어 있다.

본 실험에서 얻어진 결과로부터 개발합금의 다이캐스팅 용이성이 종래의 Al-Si-Mg계 다이캐스팅합금보다 우수하다는 것이 확인되었다. 다시 말해서, 본 개발합금을 사용함으로써 종래의 Al-Si-Mg계 합금에서는 필수적으로 요구되었던 대책을 강구하지 않아도 다이캐스팅 부품 전체에 균일한 연신율을 가진, 보다 고품질의 다이캐스팅 제품이 제조가능하다고 생각된다.

Table 7. Elongation value sampled from practical die casting product.

Sampling portion	Near gate	Top end far from gate (A)	Top end far from gate (B)
Elongation Value (%)	14.9	13.8	13.8
(standard dev.)	(1.34)	(1.69)	(1.80)

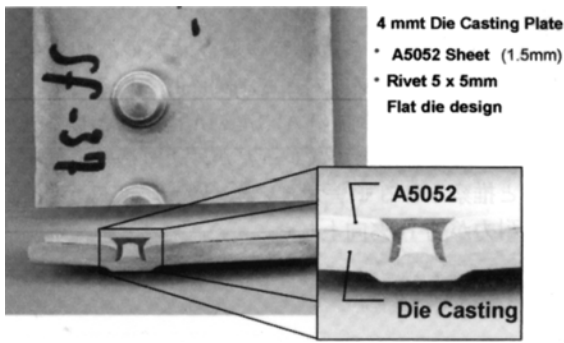


Fig. 8. Self pierce riveting trial of developed alloy plate in as cast state.

**3.6 개발합금 as-cast재의 self piercing rivet접합의 가능성과 접합조건 검토**

알루미늄재료가 자동차의 차체로 사용되는 경우에는 점용접 (spot welding)을 대체한 self piercing rivet(이후 SPR이라 함) 접합이 채용된다. 다이캐스팅재를 표준조건에서 SPR접합을 하려고 하면 재료의 연신율에 한계가 있어서 균열이 발생한다.

그래서 다이캐스팅재에 적합한 SPR접합조건을 검토하였다. SPR접합에서는 리벳이 상판을 관통하고 하판에서는 넓어져서 상판과 하판이 접합된다. SPR접합의 가부는 상판의 두께 및 다이(die)의 형상이 중요하므로 이런 요인을 검토하였다.

A5052판재 및 개발합금 다이캐스팅판재를 사용하여 각종 검토를 한 결과 다음과 같은 조건에서 개발합금 다이캐스팅재의 SPR접합이 가능하였다. 즉, 다이캐스팅재의 변형을 극히 작게 하기 위하여 리벳다이(rivet die)의 형상은 표준의 곡면다이(아닌, 저면은 편평하고(plat shape) 측면은 콘상(cone shape)인 테이퍼다이(taper die)의 채용과 다이캐스팅재가 상판의 경우에는 다이 깊이를 얇게 함으로써 가능하였다. 상판과 하판의 조합에서는 판 두께의 관리가 중요하며 다이캐스팅재가 상하 어느 경우에도 하판을 상판보다 두껍게 할 필요가 있다. 이렇게 함으로써 개발합금 as-cast재의 SPR접합이 가능하게 되었다.

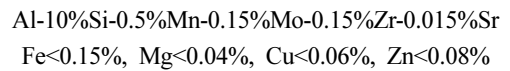
한편, Al-Si-Mg계 합금에 있어서 T4재 및 T7재에서는 접합이 가능하였으나 as-cast재에서는 균열이 발생하여 SPR접합은 불가능하였다. 실시 예로써 Fig. 8에 개발합금 as-cast재(4 mm

판)와 알루미늄합금판(AA5052, 1.5 mm)의 SPR 접합 예를 나타내었다. 균열발생도 없고 양호하게 접합되어 있다.

**4. 결 론**

고품질 다이캐스팅용 Al-Si-Mg계 합금을 실용화 해온 자동차업계로부터 향후 자동차차체용 다이캐스팅합금에 대한 개발이 요청되고 있다. 이런 요청을 개발목표로 설정하여 고품질 다이캐스팅합금의 개발을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 목표를 달성하는 합금이 개발되었다. 개발합금의 조성적 특징은 종래의 Al-Si-Mg계 합금과 비교하여 Mg함유량을 제한하고 Mo 및 Zr을 첨가하는 것이다. 합금의 표준조성은 다음과 같다.



(2) 개발합금은 as-cast 상태에서 연신율 10%이상의 고연성과 내력 120 MPa 이상의 중간 정도의 강도를 발휘한다.

(3) 개발합금은 엔진주변의 부품에서 문제시 되고 있는 즉, 엔진으로부터의 방열로 발생하는 온도 상승에 의한 기계적 특성변화가 없다.

(4) 개발합금의 다이캐스팅에서는 Al-Si-Mg계 합금과 비교하여 응고수축에 의한 cavity생성이 적고 주물전체가 균일한 고연성을 가짐으로써 고품질의 다이캐스팅부품이 얻어진다.

(5) 개발합금 as-cast재에서 self piercing rivet접합이 가능하다. 저면 플랫(plat)의 taper die의 개발로 가능하게 되었다.

(6) 개발합금의 최대 특징은 Mg함유량을 제한하는 것으로 Al-Si-Mg계 다이캐스팅합금과 비교하여 공정Si이 더욱 미세화 된다. 그러므로 비열처리재로 고연성을 얻을 수 있다고 생각된다.

(7) 기계적 특성(내력)의 향상에 대한 천이원소의 첨가효과는 생성된 화합물의 크기가 관계하고 있다고 생각된다. 2~3 μm 크기의 Al-Si-Mn 화합물로서 정출하는 Mn의 첨가효과는 없었지만, 보다 더 미세하게 정출하고 있다고 추정되는 Mo과 Zr의 복합첨가에서는 내력이 약 10% 향상하였다.