

진공증착법으로 제조된 Al-Cr 박막의 밀착성에 관한 연구

주봉환, 이규환*, 권식철*, 백운승*, 임수근

경상대학교 금속재료공학과, *한국기계연구원 재료공정연구부

A Study on the Adhesion Property of Al-Cr Alloy Films
by Evaporation

B. H. Joo, K. H. Lee*, S. C. Kwon*, W. S. Baek*, and S. K. Lim

Dept. of Metallurgical & Material Eng., Gyeong Sang National University,

* Dept. of Materials Processing, KIMM, Chang Won 641-010

Abstract

A study on adhesion property of evaporated Al-Cr films was conducted on steel sheet by using two-source evaporator. Adhesion of Al-Cr coated steel was evaluated by tape test after 180° bending. Adhesion was decreased with increasing the Cr content in Al-Cr films. It was thought that the decrease in adhesion with increasing Cr content be related to insufficient wetting and diffusion of Cr atoms in the film. Best adhesion was achieved in the case of pure aluminum film.

1. 서 론

Al도금 강판은 내식성, 밀착성, 열반사성 등의 특성이 우수한 표면처리 강판으로 가격도 비교적 저렴하기 때문에 자동차 배기장치 미칼러, 소각로 부품재료, stove의 열 반사장치, 건축재료 등에 널리 이용되고 있으며 그 제조방법은 용융도금법에 의해 생산되는 것이 일반적이다. 그러나 이 용융도금법으로는 첨가할 수 있는 원소가 Al용융욕 중에 용해될 수 있는 원소 및 용해량에 제한이 있으며 도금 특성상 30 μ m 이상 두께계 도금이 된다는 단점이 있다. 또한, 작업온도가 700°C 이상에서 수행되므로 강판과 Al도금층 계면에서 매우 취성이 큰 Fe-Al계 금속간 화합물을 형성하여 가공시에 박리를 일으키는 단점이 있다.^{1,2)} 이와같은 여

러 문제점에 대처하기 위하여 최근 일본 등지에서는 진공증착법³⁾에 의한 전식 Al도금기술을 새롭게 개발, 실용화를 위한 노력이 진행되고 있다. 진공증착법은 증착시의 강판온도를 낮게 할 수 있으므로 소지강판과 증착층 계면에 Fe-Al계 금속간 화합물의 생성을 피할 수 있고, heating power에 의해 합금원소의 증발량을 조절함으로써 원하는 조성과 두께를 얻을 수 있으며, 또한 환경공해문제도 적다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 진공증착법을 이용하여 내식성이 뛰어난 Al합금으로 알려진^{4,5)} Al-Cr합금 코팅층을 강판의 전처리 조건, 작업온도, Cr함량 등의 변화에 따라 형성하여 코팅층이 나타내는 밀착 거동을 조사하고자 하였고, 아울러 코팅층의 조직도 알아보하고자 하였다

2. 실험 방법

2. 1. 실험 장치

본 실험에 사용된 진공증착장치는 Al과 Cr을 동시에 증발시키기 위한 two-source 증발장치³⁾를 사용하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 장치의 개략도를 나타낸 것으로 진공용기 내부에는 Cr을 증발시키기 위한 전자빔 발생장치와 Al을 가열하기 위한 저항가열원을 나란히 위치시켰고 증발물질이 충분히 가열되는 동안 불필요한 증착을 방지하기 위하여 shutter를 증발원 50mm 위에 설치하였다. 저항 가열원은 질화붕소 저항가열체(BN boat)를 사용하였고 저항 가열원 바로 뒤편에 연속공급장치를 설치하여 일정하게 feeding하였다. 증발원 250mm 위에 직경 130mm의 시편홀더를 설치하였고, 시편홀더는 코팅층이 균일하게 증착되게 하기 위하여 5rpm의 회전속도로 회전시켰다. 온도조절은 시편홀더에 내장된 니크롬선으로 가열하여 200, 300, 400°C로 조절하였고, 온도측정은 시편홀더에 설치된 K형 열전대를 사용하였다.

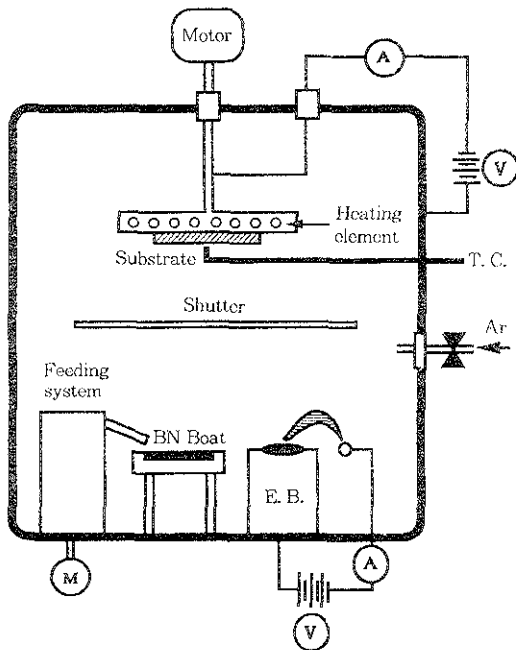


Fig. 1. Schematic drawing of evaporation system.

진공배기는 rotary vane pump와 diffusion pump를 직렬로 연결하여 최대진공도가 8×10^{-6} torr 가 되도록 하였고, 진공도 측정은 10^{-3} torr 이상은 thermocouple gauge, 10^{-3} torr 이하는 ion gauge를 사용하였으며, 진공용기의 leak속도는 0.001 SCCM 이하로 유지하였다.

전원공급은 전자빔 발생과 boat를 가열하기 위한 AC power supply와 스퍼터링 청정(sputter cleaning)을 위한 D. C power supply를 사용하였다.

2. 2. 시편 준비

밀착력은 소지와 코팅층의 계면에서 작용하는 결합력으로서 계면사이에 작용하는 여러 인자에 의해 좌우된다. 본 실험에서 밀착력은 Table 1과 같은 3가지 전처리 조건 수행후 Al과 Cr의 조성비를 변화시키면서 조사하였다. 또한 각 조성에서 소지의 온도를 200°C, 300°C, 400°C로 변화시켰다.

소지의 청정은 소지를 진공 용기내에 장입하기 전에 이루어지는 전처리와 용기내에서 이루어지는 스퍼터링 청정으로 나누어 실시하였다. 본 실험에서는 Table 1과 같은 전처리 조건을 수행한 후 일칼리 탈지를 수행하였고, 수세 후 아세톤으로 10분간 초음파 세척을 수행하였다. 시편을 진공용기내에 장입하여 진공도를 약 3×10^{-6} torr 이하 까지 배기시킨 후, Ar가스를 흘려 진공이 5×10^{-2} torr 이하가 되게 하여 1000V의 negative bias전압을 소지에 걸어 글로우방전 plasma로 스퍼터링 청정을 하였다.

Table 1. Pretreatment condition of steel sheet substrate and deposition temperature

Pretreatment condition	Substrate temperature(°C)
1) as-received	200, 300, 400
2) polishing(SiC sand paper No. 1000)	200, 300, 400
3) as-received→Al precoating	300

2. 3. Al-Cr코팅층의 제조

본 실험에서의 Al-Cr 코팅층의 제조는 다음과 같다. 우선 증발원, 증발 재료 등을 정해진 위치와 방법에 따라 설치한 후 전처리된 소지를 설치하고 진공도가 3×10^{-6} torr 이하가 될 때까지 대기하였다. 그 후 Ar가스를 이용한 스퍼터링 청정을 수행하는데 청정시간은 30분이 적당하였다. 소지청정이 완료되면 원하는 소지의 온도를 맞추고 증발원인 boat와 전자빔의 power를 서서히 증가시켰고, 이때 증발원 위에 shutter를 설치하여 불순물과 원하지 않는 증착을 막았으며, 증발원이 충분히 예열되어 증발이 안정되었을때 shutter를 열고 Al과 Cr이 소지에 증착되도록 하였다. Table 2는 Al-Cr 코팅층 제조시의 증착조건을 나타낸 것이다.

Al은 10^{-4} torr에서 안정된 증발을 위하여 약 1000°C 이상 가열하여야 하는데, Al은 모든 재료와 젖음성이 좋기 때문에 용융이 되면 용기에서 넘쳐 나오는 성질이 있다³⁾. 그래서 기화시 일정한 증기압을 유지하기 위하여 stepping motor로 구동되는 연속 공급장치를 이용하여 wire형태의 Al이 일정한 속도로 feeding되어 flash evaporation이 되도록 하였다. 이때 wire의 지름은 1mm이었

Table 2. Deposition condition for Al-Cr Evaporation

Deposition parameter	Value
• Initial pressure	3×10^{-6} torr
• Substrate temperature	200, 300, 400°C
• Evaporation method	Al-Resistance Heating (BN boat, ϕ 1mm wire feeding) Cr-Electron Beam
• Composition ratio control	Electron Beam power
• Coating thickness	$3 \mu\text{m}$
• Deposition rate	$0.25 \mu\text{m}/\text{min}$
• Sputter cleaning gas	Ar
• Sputter cleaning time	30min
• Evaporation power	Boat power : 9V 250A Electron Beam power : 7kV 10-150mA

고 공급속도는 7cm/min이었다. Cr의 경우는 용점은 높으나 승화가 잘 되기 때문에 전자빔으로 조사하여 증발시켰는데 Cr증발재료의 형태는 tablet이었다.

2. 4. Al-Cr 코팅층의 분석, 평가

1) 코팅층 분석

코팅층의 형상은 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM, JEOL 35CF)을 이용하여 표면 및 단면을 관찰하였다. 코팅층의 조성분석은 EPMA(electron probe micro analyzer, JEOL JXA-8600)를 이용하여 저배율($\times 80$)에서 임의의 3곳을 측정하여 평균하였으며 정량분석 오차는 1% 미만이었다. Al-Cr코팅층의 상(phase)과 우선방위 등의 결정학적 구조는 X선 회절시험(x-ray diffraction, Rigaku D/MAX-3C)을 이용하여 관찰하였는데 Cu target에 가해진 전압과 전류는 30kV, 15mA이었다. 코팅층의 두께는 시편의 단면을 연마하여 광학현미경으로 측정하였으며, 또한 주사전자현미경으로도 관찰하였다.

2) 밀착력 시험

밀착력은 코팅된 시편을 굽힘시험기(Erichsen社, Model 266, ϕ 4mm)를 사용하여 180° 굽힘 후 굽은 부위에 tape(한국3M社, 밀착강도 : 48.89g/mm)를 붙여 tape test를 수행하고, 이때 도금층의 박리상태를 광학현미경으로 촬영 후 전체인적에 대한 박리면적으로써 정량적으로 하였다. Fig. 2에 180° 굽혔을때의 시편의 형상을 그림으로 나타내었다.

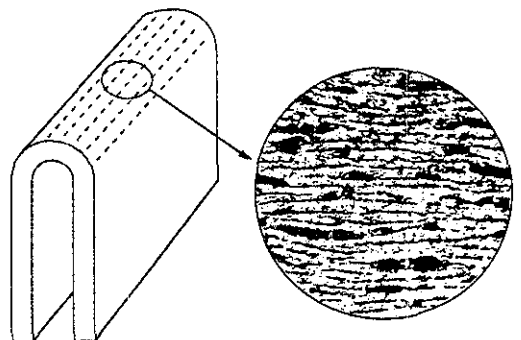


Fig. 2. Schematic drawing of specimen after 180°bended tape test.

3. 실험 결과 및 고찰

3. 1. 미세조직

진공증착법에 의해 일어나는 코팅층의 미세구조는 소지온도, 증착 진공도, 합금원소의 조성 및 증착속도 등의 실험조건과 소지의 미세구조, 표면상태 등의 소지 조건에 따라 많이 달라지게 된다. 본 연구에서는 소지온도와 Cr 함량을 변화시키면서 진공증착된 Al-Cr합금 코팅층 표면미세조직을 주사전자현미경으로 관찰하였다.

Fig. 3는 소지온도 200°C에서 Cr함량이 0, 5, 15, 25wt%로 코팅된 시편의 미세조직을 나타낸 것이다. Fig. 3. (a)는 순수한 Al인 코팅층의 미세조직으로서 표면은 약 1 μ m이하 크기의 입자들이 모여 있는 전형적인 진공증착층의 형상

을 보여준다. Cr량이 증가함에 따라 점점 porous한 표면조직이 보여지며 25wt%인 Fig. 3. (d)에서는 매우 porous하면서도 부분적으로 거친 표면이 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 4는 소지온도 300°C에서 Cr함량을 변화시켜 코팅한 시편의 미세조직이다. 200°C에 비해 입자의 크기가 성장했고 입자가 서로 연결이 일어나는 것을 볼 수 있는데, 이것은 소지온도가 증가함에 따라 원자들의 표면확산이 용이하여 입자가 성장된 것으로 판단되었다. Cr함량이 증가함에 따라 입자의 크기는 감소하였으며 15wt%, 25wt%로 Cr의 함량이 증가할수록 porous한 코팅층의 양상이 나타났다. 소지온도가 400°C인 Fig. 5의 경우에는 더욱 더 화연한 표면조직의 변화를 보여주고 있다. 높은 소지온도로 인하여 원자들의 표면확산은 더욱더 용이하게 되었고, 순수한 Al인 Fig. 5. (a)에서는 입자들이 거의

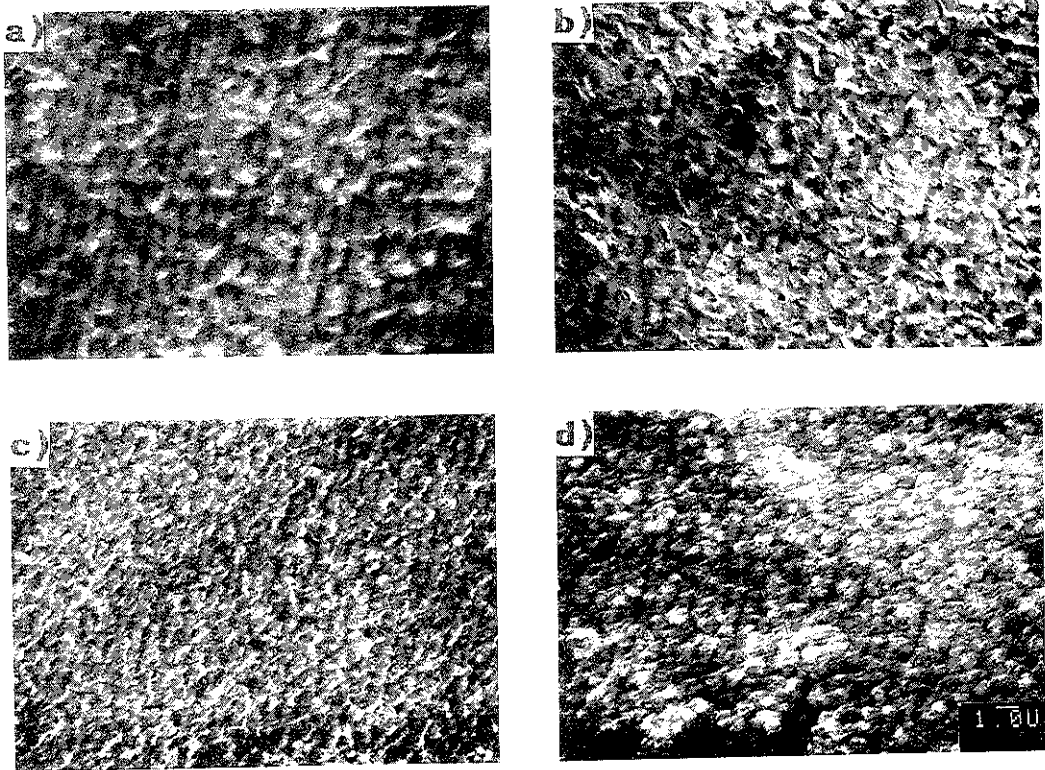


Fig. 3. SEM micrographs of Al and Al-Cr films coated at 200°C.

a) Al b) Al-5wtCr c) Al-15wt%Cr d) Al-25wt%Cr

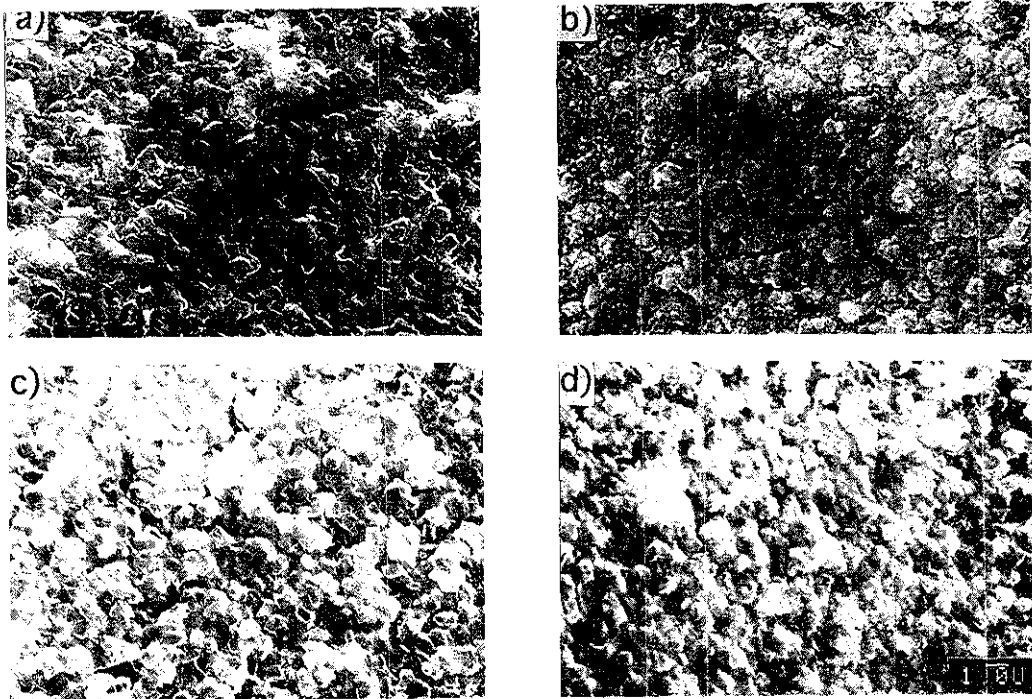


Fig. 4. SEM micrographs of Al and Al-Cr films coated at 300°C.
 a) Al b) Al-5wt%Cr c) Al-15wt%Cr d) Al-25wt%Cr

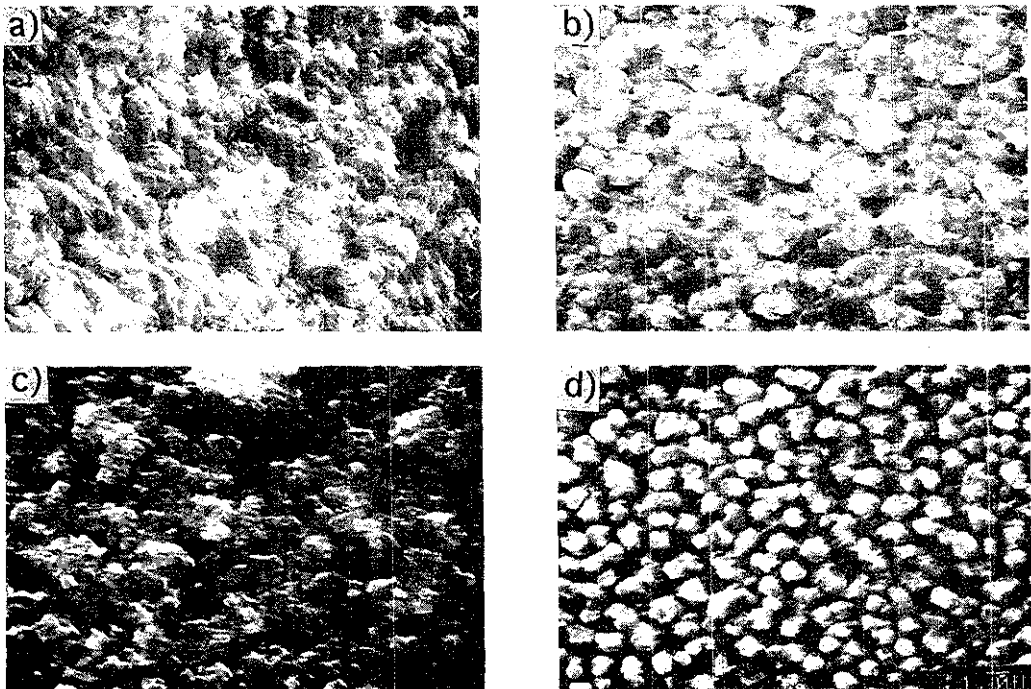


Fig. 5. SEM micrographs of Al and Al-Cr films coated at 400°C.
 a) Al b) Al-10wt%Cr c) Al-15wt%Cr d) Al-34wt%Cr

연결이 일어난 연속된 막의 형태에 가까운 미세조직을 보여준다. 400°C에서도 Cr함량이 증가함에 따라 입자들의 크기는 작아졌고, 15wt%가 되면서 porous하고 거친 표면상태를 나타내었으며, Fig. 5. (d)의 Cr량이 34wt%나 함유된 경우에는 입자들이 서로 연결이 진행되지 못한 코팅층의 형상을 보여 주고 있다. 이와같이 Cr량이 증가함에 따라 입자의 크기가 작아지고 코팅층이 porous한 거친 표면을 나타내는 것은 높은 용점을 가진 Cr이 Al원자의 표면확산을 일부 방해하였고, 또한 Al에 Cr함량이 증가함에 따라 Al과 Cr이 어떤 반응을 일으킨 결과로 판단된다. 그리하여 X선회절방법을 통한 결정구조분석으로써 보다 자세히 알아보고자 하였다.

3. 2. 결정구조

Fig. 6, Fig. 7은 소지온도 200°C에서 Cr함량의 변화에 따른 코팅층에 대한 X선 회절시험 결과이다. 본 연구에서 얻은 Al peak를 관찰해보면 (200)면의 intensity가 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데 JCPDS card에 의하면 표준 분말시편의 경우 intensity는 (111), (200), (311), (220)면으로 우선 배향되어 있는 것과 비교해 보면 진공증착으로 얻어지는 Al코팅층은 (200)면으로 우선 배향되어 있는 것으로 나타났으며 이것은 M. Neirynek⁷⁾와 권식철⁸⁾ 등의 결과와 일치하는 것이었다. M. Neirynek 등은 이런 (200)면의 우선배향을 재결정의 결과로 가정했으며, V. M. Kosevich⁹⁾는 Al코팅에서 재결정은 200°C이상의 소지온도에서 가능하고 350°C이상에서 액상까지 응축이 발생한다고도 하여 코팅층은 재결정이 일어난 것으로 생각된다. Al에 Cr이 10wt% 포함된 Fig. 6. (c)의 경우에는 Al peak 이외의 Cr 또는 금속간화합물의 peak가 나타나지 않아 Al내에 Cr이 과포화상태로 고용된 것으로 판단되었다. 그러나 Fig. 6. (c)의 15wt%Cr에서는 2θ값이 40°~45°부근에서 새로운 peak들이 나타나기 시작했고, Fig. 6. (d)의 22wt%Cr에서 $Al_{13}Cr_2$ (θ상)의 금속간화합물 peak가 발견되어 Al내에 과

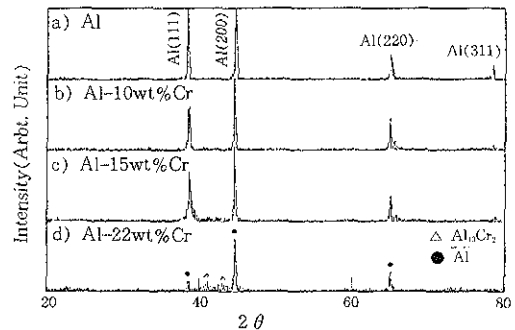


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of Al and Al-Cr films coated at 200°C.

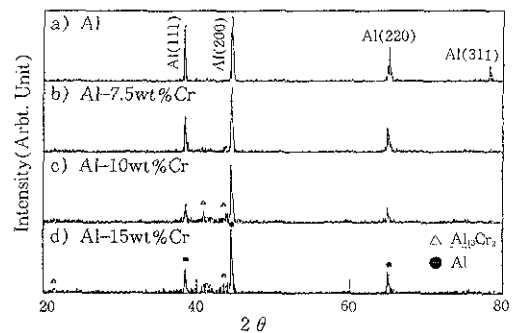


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of Al and Al-Cr films coated at 400°C.

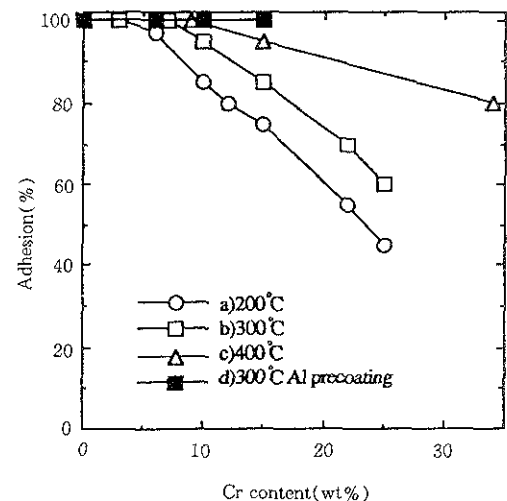


Fig. 8. Adhesion of Al-Cr films coated on unpolished surface(a, b, c) and Al precoated surface(d) at various temperatures.

포화로 고용된 Cr이 Al과 반응을 일으킨 것으로 사료된다.

Fig. 7은 400°C에서의 코팅층의 X선 회절시험 결과이다. 역시 Al(200)면에서 우선 배향되는 것을 볼 수 있었으나 400°C에서는 Fig. 7. (b)의 7.5wt%Cr일때 2θ 각이 $40^\circ \sim 45^\circ$ 부근에서 새로운 peak들이 발생되기 시작했고 Fig. 7. (c)인 10wt%Cr에서 $Al_{13}Cr_2$ 의 금속간화합물 peak가 발견되었다. 이와같이 소지온도가 증가하면

서 Cr함량에 따라 금속간화합물의 peak가 빨리 나타난 것은 온도가 증가함에 따라 원자들의 표면확산이 훨씬 더 용이하고 또한 Al과 Cr의 반응을 보다 활성화시키기 때문인 것으로 사료되었다.

3. 3. 코팅층의 밀착 특성

Fig. 8의 (a), (b), (c)는 연마되지 않은 시편에 소지온도와 Cr함량의 변화에 따라 진공증착된

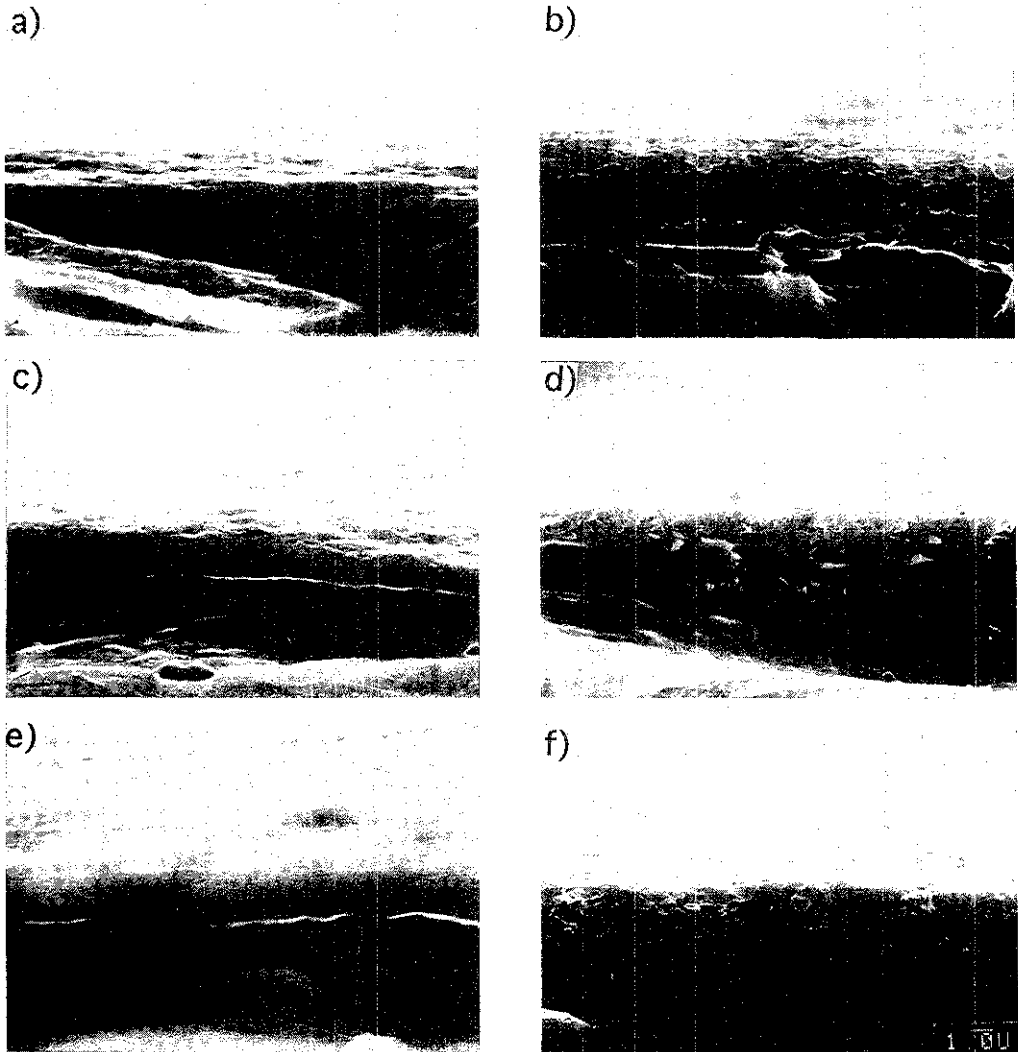


Fig. 9. SEM micrographs of cross-sections of Al(a, c, e) and Al-6.5wt%Cr (b, d, f) films coated at various substrate temperatures.

- | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| a) Al, 200°C | b) Al-6.5wt%Cr, 200°C | c) Al, 300°C |
| d) Al-6.5wt%Cr, 300°C | e) Al, 400°C | f) Al-6.5wt%Cr, 400°C |

Al-Cr코팅층의 밀착력시험 결과이다. 순수한 Al의 경우 어느 온도 범위에서나 우수한 밀착력을 나타내었고 소지온도가 증가함에 따라 밀착력은 증가하였다. 그러나 Cr함량이 증가함에 따라 밀착력은 감소하였고 200°C에서는 Cr함량이 5wt%가 되면서부터 부분적으로 박리되는 경향이 나타났으며 Cr함량이 20wt%인 경우 40%나 박리되었다. 이와같은 결과는 Al이 연성이 뛰어나 180° bending test에서도 충분히 견딜 수 있을 뿐 아니라 모든 재료에 젖음성이 뛰어나³⁾ 소지표면에 넓게 젖게 됨으로써 우수한 밀착력을 보이거나 여기에 강도가 높은 Cr이 첨가됨으로써 180° bending test에 취약함을 보이고, 3.1절의 주사전자현미경 사진에서 나타났듯이 1860°C의 매우 높은 용점을 가진 Cr이 소지온도가 400°C이하인 본 실험조건에서 충분한 확산과 젖음성을 나타내지 못하여 밀착력을 감소시키는 것으로 판단되었다. 그리고 3.2절의 X선 회절시험 결과에서 보여준 Cr함량 증가에 따라 상형가공성이 취약한 금속간화합물의 형성도 밀착력 감소의 한 요인으로 사료되었다. Fig. 9는 순 Al과 6.5wt%Cr이 함유된 코팅층의 단면을 주사전자현미경으로 촬영한 사진이다. 순수한 Al인 Fig. 9. (a), (c), (e) 경우, 사진에서 볼 수 있듯이 치밀한 코팅층의 형상을 나타냈고 소지온도가 400°C로 증가함에 따라 거의 연속된 막에 가까운 코팅층을 보여주었다. 그러나 Cr이 6.5wt%인 Fig. 9. (b), (d), (f)에서는 입자들이 순수한 Al에 비해 매우 porous한 것을 보여주고 있는데 이런 조직적 결함이 180° bending과 tape test에서도 취약함을 나타내는 것으로 판단되었다.

Fig. 10은 SiC sand paper No. 1000으로 연마된 시편에 소지온도와 Cr함량의 변화에 따라 전공중착된 Al-Cr코팅층의 밀착력시험 결과이다. 소지온도가 높아질수록 밀착력은 개선되고 Cr함량이 증가함에 따라 밀착력은 감소를 나타내는 Fig. 8. (a), (b), (c) 결과와 동일한 양상임을 알 수 있으나 연마하지 않은 시편에 비해 전체적으로 개선된 밀착력을 나타내어 300°C에서는 10wt%Cr, 400°C에서는 15wt%Cr에서

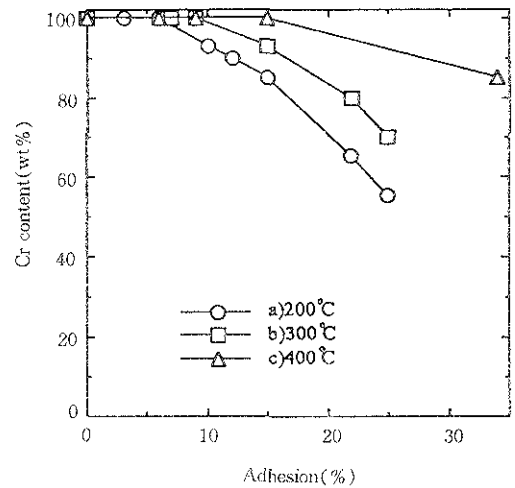


Fig. 10. Adhesion of Al-Cr films coated on polished surface at various temperatures.

도 양호한 밀착력을 보였다. 이것은 연마하지 않은 시편에서는 steel strip생산과정에서 생긴 산화물들이 strip표면에 존재하여 단시간 cleaning만으로는 완전히 제거가 되지 않고 남아서 소지와 코팅층 사이 계면에서 밀착력을 감소시켰으나 연마를 함으로써 이런 산화물들이 일부 제거되어 보다 깨끗한 표면을 가진 소지에 코팅층을 형성함으로써 소지와 코팅층간에 개선된 밀착력을 보인 것으로 판단된다.

본 실험에서는 Table 1의 (1), (2)와 같은 전처리 조건에서 밀착력 시험을 한 결과 순수한 Al이 뛰어난 밀착력을 나타내고 여기에 Cr이 첨가됨에 따라 밀착력은 감소된다는 것을 결과로 얻었다. 그러나 서두에서도 언급했듯이 밀착력이란 소지와 코팅층의 계면에 존재하는 결합력이고, 그런 이유로 만약 계면에 밀착력이 뛰어난 Al을 precoating하여 중간층을 형성한 후 그 위에 Al-Cr합금층을 형성한다면 소지와 코팅층의 계면에는 밀착력이 뛰어난 Al이 존재하기 때문에 밀착력은 개선될 것으로 생각되었고 또한 이와같은 실험을 수행한다면 Table 1의 전처리 조건 (1), (2)에 대한 결과를 보다 확신할 수 있으리라 판단되었다.

Fig. 8. (b)는 소지온도 300°C에서 연마되지

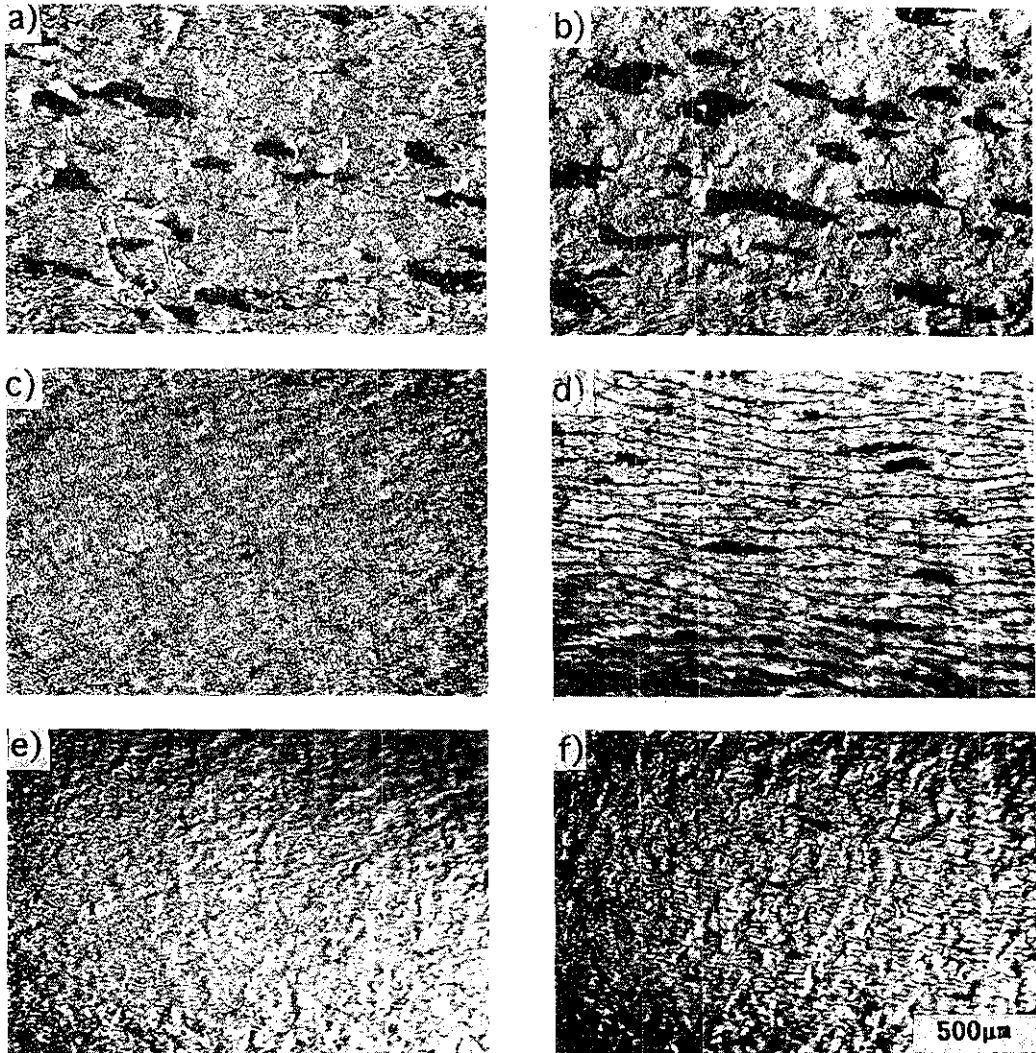


Fig. 11. Stereoscopic photographs of the bending zone of Al-10wt%Cr (a, c, e) and Al-15wt%Cr (b, d, f) films coated on various surface pretreatment conditions at 300°C.

a) as-received b) as-received c) polishing
d) polishing e) Al pre-coating f) Al pre-coating

않은 시편에 Al을 0.1 μ m pre-coating한 후 그 위에 Al-Cr코팅층을 형성한 시편의 밀착력시험 결과이다. 앞의 Table 1의 (2), (3) 전처리 조건에서는 Cr함량이 10wt%이상에서는 코팅층의 박리가 일어났음에도 불구하고 Al을 0.1 μ m pre-coating한 경우에는 15wt%Cr까지도 양호한 밀착력을 나타내어 Table 1의 전처리 조건 (1), (2)에 대한 결과와 관련지을 수 있었다. 이것은 소지위에 밀착력이 뛰어난 Al을 pre-coating한

으로써 표면을 활성화시켰고 그위에 Al과 친화력이 좋은 Al-Cr합금층을 형성함으로써 소지에 직접 Al-Cr코팅층을 형성한 것보다 뛰어난 밀착력을 나타내는 것으로 사료되었다²⁾.

Fig. 11은 Table 1의 전처리 조건으로 형성된 코팅층 가운데 Cr함량이 10wt%, 15wt%일때의 시편을 밀착력 시험 후 그 박리된 부위를 stereoscope로 촬영한 것이다. 시편을 연마하지 않은 경우인 Fig. 11. (a), (b)에서는 10wt%Cr에

서 박리가 일어난 것을 볼 수 있고, 15wt%Cr에서는 더욱 증가했다. 연마한 경우인 Fig. 11. (c), (d)에서는 10wt%Cr에서는 박리가 없었으나 15wt%Cr에서는 박리가 되었다. 그러나 Fig. 11. (e), (f)의 Al을 0.1 μ m precoating한 시편은 약간의 crack은 발생했으나 15wt%Cr에서도 박리가 일어나지 않아 계면간에 Al이 밀착력을 개선시키는데 효과적인 것으로 판단되었다.

4. 결 론

Cr함량을 34wt%까지, 소지온도를 200~400 $^{\circ}$ C로 변화시켜 진공증착된 Al-Cr코팅층의 밀착성을 주어진 실험방법에 따라 조사한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Cr량이 증가함에 따라 밀착력은 감소하였고 300 $^{\circ}$ C에서는 10wt%Cr이상에서 코팅층의 박리가 일어났다.

2) 표면이 연마될수록, 소지온도가 높을수록 밀착력은 증가되었다.

3) 순수한 Al코팅층에서 가장 뛰어난 밀착력을 보였고, 표면을 연마하지 않은 시편에 Al을 0.1 μ m precoating했을 경우 밀착력은 개선되었다.

4) Cr량이 증가할수록 입자들은 점점 작아지고 porous한 코팅층이 나타났으며, 소지온도

가 증가함에 따라 원자들의 표면확산에 의해 입자들은 점점 커졌다.

참 고 문 헌

1. 佐藤廣士 : 特公平 1-188666(1989) 369
2. Kazutoshi Shimogori, Hiroshi Sato, Masao Toyama, Hidetoshi Niishimoto, Koki Ikeda, and Junji Kawafuku : GB 2214934A(1989) 1
3. R. F. Bunshah Deposition Technologies for Films and Coating, Noyes Publications (1982) 83-189
4. W. C. Moshier, G. D. Davis, and G. O. Cote : J. Electrochem. Soc., 136 (1989) 356
5. W. C. Moshier, G. D. Davis, J. S. Ahearn, and H. F. Hough : ibid. 134 (1987) 2677
6. Varian Korea Ltd. : Basic Vacuum (1985) 218
7. M. Neiryneck, W. Samaey, and L. Van Poucke : J. Vac. Sci. Technol., 11 (1974) 647
8. 권식철, 백운승 : 내식용 알루미늄 IVD 기술 개발, 한국기계연구원 연구보고서 (1988) 48-52
9. V. M. Kosevich and L. S. Palatnik : Fiz. Met. Metalloved, 25(1968) 62