

## Zn-Fe합금전기도금강판의 마찰특성

김영근, 김명수

포항종합제철(주) 기술연구소 광양연구팀

## Frictional Characteristics of Zn-Fe Alloy Electroplated Steel Sheets

Y. C. Kim and M. S. Kim

Kwangyang Research Team, Technical Research Lab., POSCO  
699 Kumho-dong, Kwangyang-city, Chonnam, 544-090, Korea

### Abstract

The effects of iron content in coated layer, surface roughness and lubricants on the formability of commercial Zn-Fe alloy electroplated steel sheets used for automotive bodies were investigated. The higher the iron content in deposit, the lower the friction coefficient of Zn-Fe alloy electroplated steel sheets. The surface roughness of coated layer hardly influenced the frictional characteristics. The formability of Zn-Fe alloy electroplated steel sheets was found to be more affected by the lubricant than by iron content in Zn-Fe alloy electrodeposit.

### 1. 서 론

최근 자동차 차체의 고내식성 요구에 부응하여 표면처리강판의 사용량이 급증하고 있다. 자동차용 강판의 내, 외판에 널리 사용되고있는 표면처리강판으로서 용융도금강판에는 용융아연도금강판(GI), 합금화용융아연도금강판(GA) 및 GA의 상층에 Fe-rich계를 얇게 전기도금한 2층형 합금화용융아연도금강판이 있고, 전기도금강판으로는 전기아연도금강판(EG)과 합금전기아연도금강판(Zn-Fe EGF, Zn-Ni EGN) 및 그 상층에 Fe-rich계를 전기도금한 이층전기도금강판이 있으며 그 외에 Zn-Ni계 합금전기도금강판의 상층에 수지를 코팅한 유기피복강판도 사용되고 있다<sup>1)</sup>.

이들 중 순수 아연도금강판은 가공시 다이에 도

금층이 용착되기 쉽고 성형성이 열악한 것에 비해 아연합금도금강판은 성형성과 도장후내식성을 동시에 개선시킨다. 그러나 도금강판을 프레스 가공할 때 도금층은 소재의 기계적성질, 윤활특성 및 재료유입성 등에 영향을 미치고 도금층박리 현상이 나타나기도 한다<sup>2, 3)</sup>. 판재류는 성형성의 척도로 소성이방성( $r$ )과 윤활성이 적용되며 도금층이 존재하므로써  $r$ 값은 0.1~0.2정도 저하한다고 알려져 있다<sup>4, 5)</sup>. 이것은 가공시 인장방향으로는 도금층이 균열되므로써 변형에 대한 저항을 나타내지 않지만 동시에 발생하는 폭방향의 압축응력에 대하여는 저항으로 작용하기 때문에 모재의 변형을 구속하게 되는 것이다<sup>5)</sup>.

이와같은 성형성을 실험실적으로 시뮬레이션하기 위해서는 여러가지의 시험기가 사용된다. 평판

인발시험기는 강판과 다이와의 접촉상태를 가장 단순화하였기 때문에 결과를 해석하기 쉬우나 접촉면적이 크기 때문에 균일성이 문제가 된다. 따라서 bead를 이용한 인발시험기가 강판의 마찰계수를 측정하는데 이용되고 있고 심가공의 성형성을 평가하기 위하여 원통형 컵 시험기(cup drawing test)에 의한 한계성형비나 최대 punch하중을 구하는 방법 등이 있다<sup>1)</sup>.

한편 주로 자동차용강판으로 사용되는 Zn-Fe합금도금강판은 도금층의 Fe함량에 따라 도장후내식성, 가공성, 도장성 및 용접성이 크게 달라진다. 용접성은 도금피막층의 Fe함량이 20wt.% 이상이 되어야 우수하나 가공성은 반대로 20wt.% 이상에서는 도금층에 취약한  $\gamma$ 상의 등장으로 인하여 급격하게 하락한다. 따라서 가공성 및 용접성이 양호한 피막층의 Fe함량은 14~25wt.%이며, 도장성은 50wt.% 이상에서 우수하나 도장후내식성은 15~30wt.%가 적합하다. 특히 피막층의 Fe함량이 10wt.% 이하에서는  $\eta$ 상의 존재비가 높아져 도금층의 경도가 낮아지고 전착도장후의 부식과정에서는 도막의 부풀음현상(blister)이 급격하게 촉진된다. 피막층의 Fe함량이 20wt.%를 넘으면  $\gamma$ 상의 등장으로 내 blister성은 좋아지나 도금층 경도가 증가하여 도금층이 취약해지고 구멍부식이 증가하게 된다. 따라서 자동차용강판으로서의 여러가지 성질을 고루 만족시키기 위한 최적의 Fe함량은 14~20wt.%이다<sup>6, 7)</sup>.

이와같이 피막층의 Fe함량은 도금층의 표면특성 즉 도금층경도, 도금층의 상, 표면형상, 표면조도 등에 대한 차이를 유발시키고 이것은 자동차용강판의 성형시 스탬핑 금형과 도금강판의 마찰저항을 다르게 하는 원인이 된다<sup>8, 9)</sup>. 도금강판의 스탬핑 성형 가능범위가 좁은 이유는 도금층의 마찰불량에 기인하는 것이 대부분이다<sup>10)</sup>.

따라서 본 연구에서는 자동차용 Zn-Fe합금전기도금강판에서 도금층의 Fe함량에 따른 도금층 표면특성이 마찰거동에 미치는 영향과 윤활유 종류에 따른 Fe함량별 마찰특성을 파악하여 인자별 적정

스탬핑 조건을 도출하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2. 1. 도금층 분석 및 인장실험

실험에 사용된 Zn-Fe합금도금강판(EGF)은 광양제철소 전기도금공장(Electro-galvanizing Line, EGL)에서 생산되는 제품으로 두께는 0.6~0.8mmt이며 도금 부차량은 20/40, 40/40 g/m<sup>2</sup> (20 g/m<sup>2</sup> → 3 $\mu$ m, 40 g/m<sup>2</sup> → 5.7 $\mu$ m)의 2층을 사용하였고 이것과 비교하기 위하여 EGL의 입축소재인 냉연강판(CR)이 사용되었다.

도금층의 Fe함량을 분석하기 위하여 도금층을 Inhibitor가 소량 첨가된 염산수용액(염산 1:증류수 3)에 용해하여 원자흡광광도계(AA)로 Zn과 Fe를 분석하였다. 도금층의 조직관찰은 주사전자현미경(SEM, Philips) 및 광학현미경을 사용하였고 표면조도는 Taylor-Hobson사의 Surtronic-3P 조도계를 사용하여 cut off 0.8mm로 하여 20mm를 측정하였다. 소지강판 및 도금강판의 기계적성질을 분석하기 위하여 KS규격의 full size로 압연방향에 대하여 각각 0°, 45°, 90°로 punching하여 인장실험을 하였다. Table 1은 본 실험에서 사용한 강판 종류별 기계적성질의 관리범위를 나타낸 것이다.

Table 1. Mechanical properties of tested steel sheets

Grade*	YP (kg/mm <sup>2</sup> )	TS (kg/mm <sup>2</sup> )	El(%)	r	$\eta$ -value
EDDQ	≤16	≤28	≥46	≥1.80	≥0.220
DDQ	≤17	≥28	≥44	≥1.70	≥0.220
LQ	≤20	≥28	≥40	≥1.50	≥0.20
HSS	≤20	≥36	≥36	≥1.0	≥0.190

EDDQ : Extra deep drawing quality,

DDQ : Deep drawing quality

LQ : Lock forming quality,

HSS : High strength steel

### 2. 2. 드로오버이드 마찰실험

도금층의 표면특성에 따른 마찰계수는 Fig. 1과

같은 드로오비드 실험장치<sup>11-13)</sup>를 통하여 측정하였으 며 이때 실험에 사용된 시편 크기 및 드로오비드 실험장치의 실험조건은 Table 2와 같다.

시편은 압연방향으로 40W×400L(mm) 크기로 절단하고 가장자리의 버어를 완전히 제거하였다. 이 시편에 윤활유를 적당히 도포하고 고정 비이드와 롤러 비이드를 사용하여 500mm/min 속도로 150mm 인발한 다음 각각의 드로잉 하중과 가압력에 의하여 다음과 같은 식으로 마찰계수를 구하였다.

$$\mu = \text{마찰하중/가압력} = (F_D - R_D) / \pi F_P \quad \dots (1)$$

여기서  $F_D$ 는 고정 비이드를 사용할 때의 인발하중으로 강판이 비이드를 통과할 때의 굽힘-굽힘 풀림 변형에 대한 소성변형 하중과 마찰하중의 합으로 나타내진다.  $R_D$ 는 롤러비이드를 사용할 때의

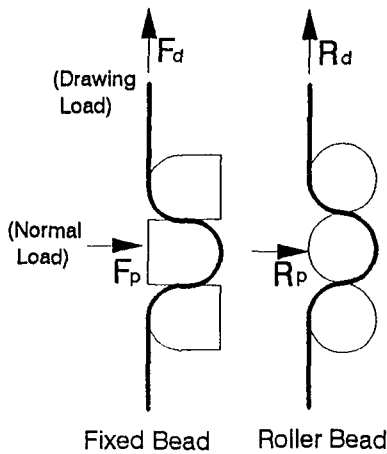


Fig. 1. Fixed and roller bead configuration of draw bead simulator.

Table 2. Experimental conditions for draw bead friction test

Male bead interleaf distance	9.53mm
Drawing speed	500mm/min
Lubricant	rust preventive oil
Specimen size	40W×400L(mm)
Drawing length	150mm
Bead and roller radius	4.76mm
Bead material	STD 11(tool steel)

인발하중으로 이 경우는 마찰을 무시할 수 있으므로 드로오 비이드부에서의 마찰하중은  $F_D - R_D$ 로 주어진다.  $F_P$ 는 고정 비이드를 사용할 때의 가압력이다.

또한 윤활유 종류에 따른 마찰특성을 평가하기 위하여 Table 3에 나타낸 바와같이 3종류의 방청유를 사용하였다.

Table 3. Properties of lubricants

Lubricant code	Type	Viscosity (40°C, cSt)	Specific gravity (15/4°C)
a	Rust preventive oil	25.8	0.880
b	" (L. oil)	22.8	0.932
c	" (E.P.A)*	16.2	0.992

\* E.P.A : Extreme Pressure Additive

방청유 a는 도금강판의 내식성 향상만을 목적으로 사용되는 일반 방청유이고, b는 일반 방청유에 윤활성을 향상시키기 위하여 윤활제를 소량 첨가한 것이며, c는 극압제를 소량 첨가한 것이다. 극압첨가제는 금형과 강판의 접촉 경계면에서 연한 산화 피막을 만들어 금형과 강판의 직접 접촉을 억제하므로써 강판의 윤활성을 향상시키는 역할을 하는 것이다.

### 2. 3. Cup drawing 시험

도금층이 존재하므로써 소재의 기계적성질 저하 및 마찰특성의 차이가 심가공 공정에서의 성형성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 도금강판과 도금층을 제거한 것에 대하여 cup drawing 실험을 실시하였다. 실험장치는 동경시험기제작소에서 제작한 50톤 만능박판성형시험기(USM-50D-02)를 이용하였으며 Fig. 2에 cup drawing test의 단면도를 나타내었다. 펀치는 직경이 40mm이고 펀치와

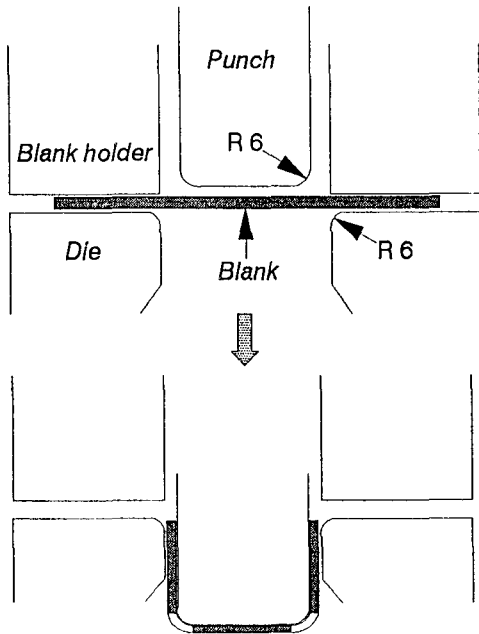


Fig. 2. Schematic diagram of cup drawing test.

다이 사이의 간격은 강판의 두께보다 충분히 크게 하여 펀치와 다이 내부에서 강판에 아이어닝 현상이 일어나지 않도록 하였다. 원형 blank의 직경은 미리 예비실험을 거쳐 소지강판의 균열이 발생하지 않는 84mm로 하였으며 마찰실험에서와 같이 윤활유를 시편에 적당량 도포한 경우와 무도유 상태의 2종류로 하였다. Blank holding force는 도금층의 Fe함량에 따른 강판의 균열여부를 파악하여 29.4 kN로 고정시켰고 punch 속도는 자동차강판의 부위별 가공속도가 다르기 때문에 크게 2가지로 나누어 저속인 경우는 500mm/min로 고속인 경우는 20m/min으로 변경시키면서 실험하였다.

### 3. 결과 및 고찰

도금강판의 소재로 사용되는 냉연강판의 표면조도(Ra)가 도금강판의 조도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 도금되기 직전의 냉연강판과 도금후 강판의 조도를 측정하여 그 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 냉연강판의 조도가 Ra 1.3 이하인 영역에서

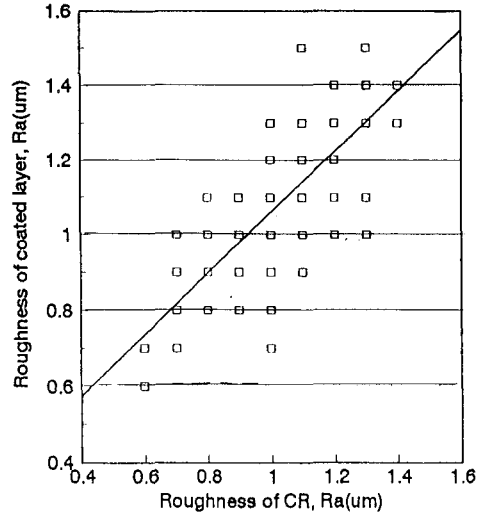


Fig. 3. Effect of roughness of cold rolled steel sheets on surface roughness of Zn-Fe alloy electroplated layer.

는 도금강판의 조도가 냉연강판보다 약 Ra 0.1 높게 나타나나 원판의 조도가 Ra 1.3 이상에서는 도금강판의 조도가 소재조도 보다 약간 감소하거나 같게 나타난다. 따라서 이와같은 결과는 원판의 조도가 도금강판에 그대로 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. Fig.4는 조도범위가 Ra 0.8~1.2인 냉연강판 위에 Zn-Fe합금도금을 하였을 경우 도금층 Fe함량에 따른 도금층조도와 소재조도의 차이를 나타낸 것이다. 실험 범위인 16wt.% 이하의 Fe함량에서는 조도차( $\Delta Ra$ )가 양(+)의 값을 나타내므로 도금후 도금층조도가 소재조도 보다 증가하였음을 알 수 있으며 그 조도차는 도금층의 Fe함량이 낮을 수록 증가하였다. 이와같이 Fe함량이 낮을 수록 조도 차이가 커지는 것은 Fe함량이 낮으면 조직이 조대하고 치밀하지 못하기 때문이다<sup>14)</sup>. 일반적으로 전류밀도가 낮은 경우에는 도금층의 Fe함량이 낮아지고 이렇게 되면 조직이 조대화하고 표면이 거칠어지면서 표면광택도가 감소하기 때문에 표면조도가 증가하게 된다. 그러나 고전류밀도에서 도금하면 피막중 Fe함량이 증가하여 조직이 아주 미세하고 치밀해지기 때문에 표면광택도가 증가한다<sup>14)</sup>.

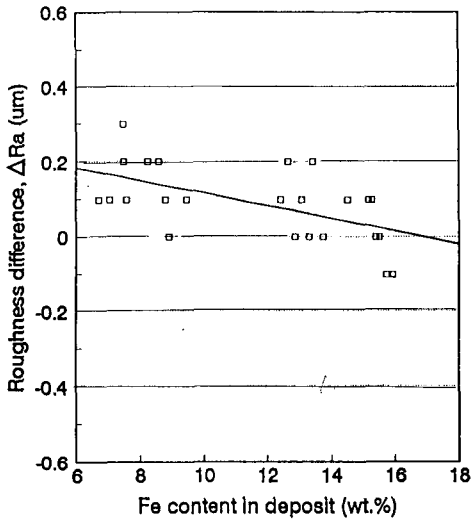


Fig. 4. Effect of Fe content in deposit on surface roughness difference of coated layer and cold rolled steel sheets.

Fig. 5는 도금층의 Fe함량이 13wt.%로 일정하나 표면조도가 Ra 1.0~1.4로 각각 다른 Zn-Fe도금강판에 대하여 윤활유 종류별로 표면마찰특성을 평가하기 위하여 마찰계수를 측정된 결과이다. 도금강판의 방청성만을 향상시킬 목적으로 도포되는 일반방청유를 2g/m<sup>2</sup> 도포한 경우에는 마찰계수가 약 0.2로 가장 크고, 여기에 일반방청유인 a를 20g/m<sup>2</sup>로 증가시킨 경우에는 마찰계수가 0.18 정도로 감소하였으며, 윤활제나 극압제가 첨가된 b와 c를 20g/m<sup>2</sup> 도포한 경우에는 마찰계수가 약 0.16으로 일반 방청유를 도포한 a에 비하여 윤활특성이 우수하였다. 그러나 측정하고자 하는 조도가 Ra 1.0~1.4로 좁은 범위에서는 강판 조도에 따른 마찰계수의 변화는 찾아볼 수 없었다.

Fig. 6은 Zn-Fe도금강판의 도금층 Fe함량에 따른 표면마찰계수를 측정된 결과이다. 사용한 윤활유가 일반방청유이기 때문에 비교적 높은 마찰계수를 나타내고 있으나 피막층의 Fe함량이 증가할수록 마찰계수가 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이와같이 피막층의 Fe함량이 증가함에 따라서 마찰계수가 감소하여 좋은 윤활특성을 나타내는 것은 Fe함량이 낮을 때는 피막층에 연질인 η상의 존재

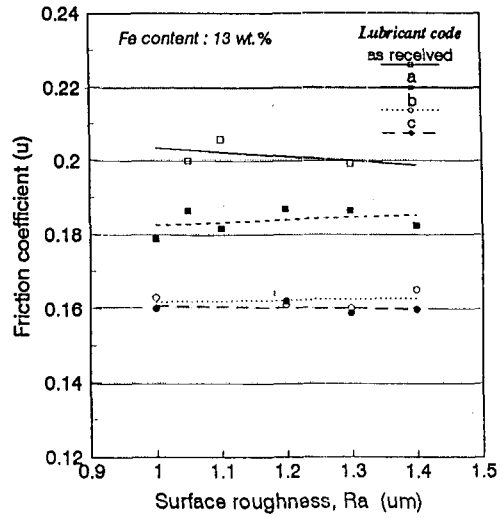


Fig. 5. Effect of surface roughness Zn-Fe alloy electroplated steel sheets on friction coefficient for various lubricants.

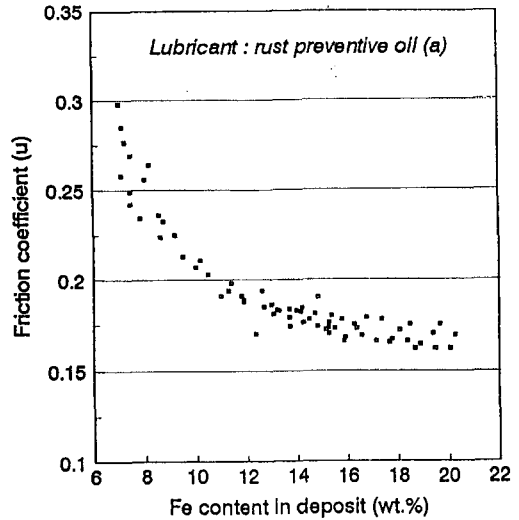


Fig. 6. Effect of content in Zn-Fe alloy electroplated layer on friction coefficient

비율이 많아 다이와 강판 사이에 접촉저항을 증가시키지만 Fe함량이 증가함에 따라 경질인 δ 및 γ상이 증가하여 다이와 강판의 접촉저항을 감소시켜 주므로서 마찰저항이 감소하기 때문이다<sup>8, 9)</sup>. 따라서 Zn-Fe합금도금강판의 표면마찰계수를 감소시켜 좋은 윤활특성을 갖기 위해서는 피막층의 Fe함

량을 최소 13wt.% 이상 함유하도록 해줄 필요가 있다.

Fig. 7은 Zn-Fe의 피막중 Fe함량이 7.8wt.%와 16.2wt.%로 서로 다른 두개의 강판에 대하여 인발속도가 마찰계수에 미치는 영향을 조사한 것이다. 여기에 사용된 윤활유는 일반 방청유이며 강판의 두께는 0.76mm이고 재질은 EDDQ급이었다. 앞에서도 언급한 바와같이 피막중 Fe함량이 낮으면 마찰계수가 증가하지만 인발속도를 200mm/min에서 1100mm/min로 증가시키면 마찰계수가 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 가압하중이 일정하고 동일한 윤활조건하에서는 피막중의 Fe함량이 낮은 경우 도금층의 경도가 감소하여 다이와 도금층 표면의凸부와의 접촉저항을 증가시키지만 강판에 걸리는 인발속도를 증가시키면 도금층의 凹부에 함유돼 있던 윤활유가 다이와 강판의 경계면에 윤활작용을 크게하기 때문에 마찰저항을 작게하여 마찰계수가 감소한다<sup>15)</sup>. 그러나 피막중의 Fe함량이 높아 도금층의 경도가 높은 경우에는 도금층 자체의 마찰특성이 지배적으로 작용하기 때문에 인발속도에 의한 마찰계수의 영향은 적어진다. 따라서 Zn-Fe합금도금강판의 성형시 도금층의 Fe함량이 낮을 경

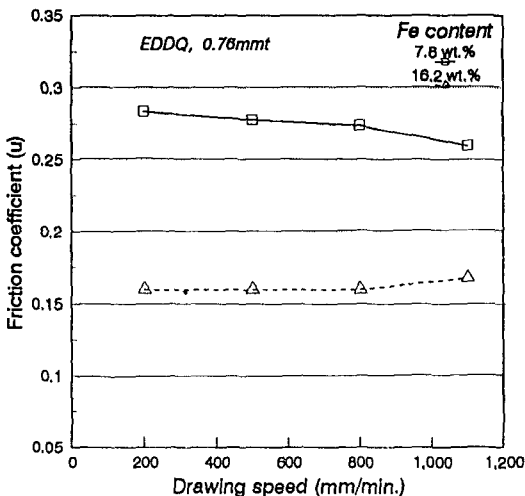


Fig. 7. Effect of drawing speed on friction coefficient of Zn-Fe alloy electroplated steel sheets.

우에는 강판표면의 마찰저항을 최소화하기 위해서 가공속도를 크게할 필요가 있다.

Fig. 8은 Zn-Fe도금강판의 도금층 Fe함량이 7.9wt.%로 낮은 경우와 16.6wt.%로 높은 두 경우에 대하여 SEM으로 관찰한 도금층 표면조직(a)과 드로오비이드 실험에서 고정비이드를 통과한 시편에 대하여 광학현미경으로 관찰한 표면(b)을 각각 나타낸 것이다. 앞에서도 언급한 바와같이 피막중 Fe함량이 낮은 경우에는 도금층이 연하기 때문에 다이에 도금층이 심하게 밀리면서(ironing현상) 다이와 강판의 접촉을 크게하였음을 알 수 있다. 그러나 Fe함량이 높은 경우에는 도금층의 경도가 높기 때문에 도금층이 다이에 의해 밀린 현상은 없고 단지 인발의 직각방향으로 미세하게 도금층이 균열되어 있을 뿐이다.

Fig. 9는 Zn-Fe의 피막중 Fe함량에 따른 윤활유 종류별로 cup drawing 실험을 실시하여 최대 인발력을 구한 것이다. 이때 사용된 도금강판은 0.76mm의 두께이며 재질은 EDDQ급이고 인발속도는 500mm/min로 비교적 저속이었으며 blank holding force는 29.4kN을 적용하였다. 방청유 종류에 관계없이 피막중 Fe함량이 높을 수록 최대 인발력이 감소하여 마찰저항이 작다는 것을 알 수 있다. 특히 피막중 Fe함량이 8.8wt.%로 낮은 경우에는 EGL 출측에서 일반방청유로 도포한 경우(as received)와 그 위에 실험실에서 일반방청유를 한번 더 도포한 경우(a)에는 최대 인발력 52.5kN 이상에서 강판에 crack이 발생하였다. 이는 피막중 Fe함량이 낮고 일반 방청유가 도포된 상태에서 가공하면 다이에 대한 강판의 마찰저항이 커져 성형시 쉽게 강판의 crack을 발생시킬 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 피막중 Fe함량이 낮아도 윤활성이 좋은 방청유(b)를 사용하든가 극압제가 첨가된 방청유(c)를 사용하면 강판의 마찰저항을 감소시켜 성형시 crack을 대폭 감소시킬 수 있다.

Fig. 10은 두께가 0.7mm이고 재질이 고장력강인 냉연강판의 표면조도에 따른 윤활유 종류별 최대 인발력을 구한 것이다. 이때 punch 속도는 500mm

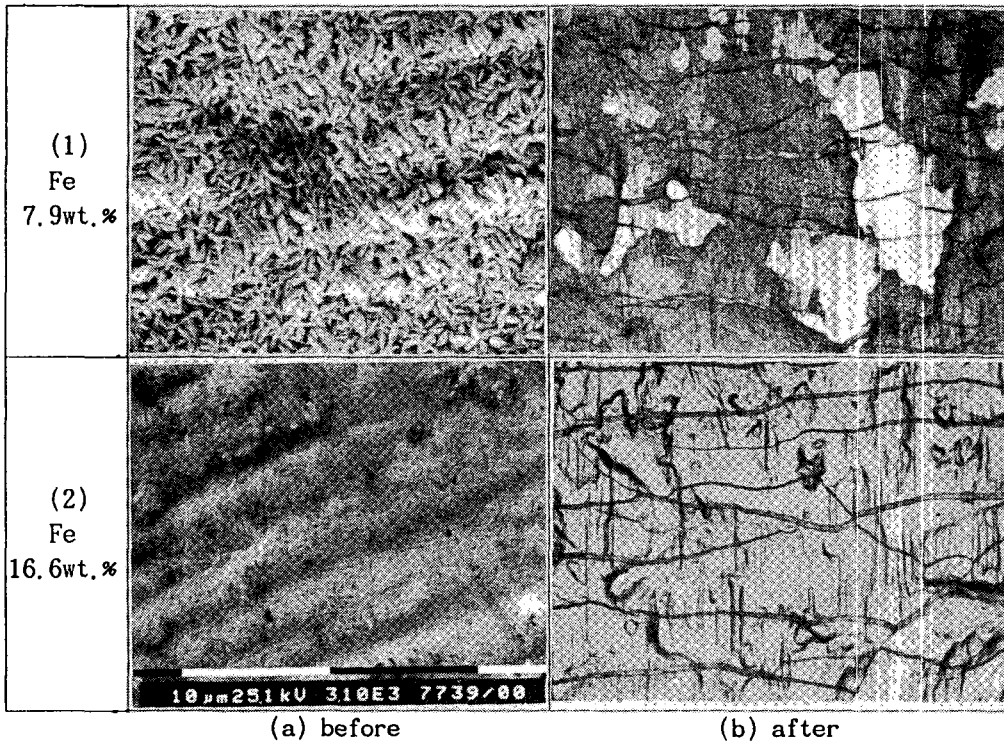


Fig. 8. Surface morphologies of Zn-Fe alloy electroplated steel sheets with Fe content (a) before and (b) after draw bead simulation. Fe contents were (1) 7.9wt.% and (2) 16.4wt.%, respectively.

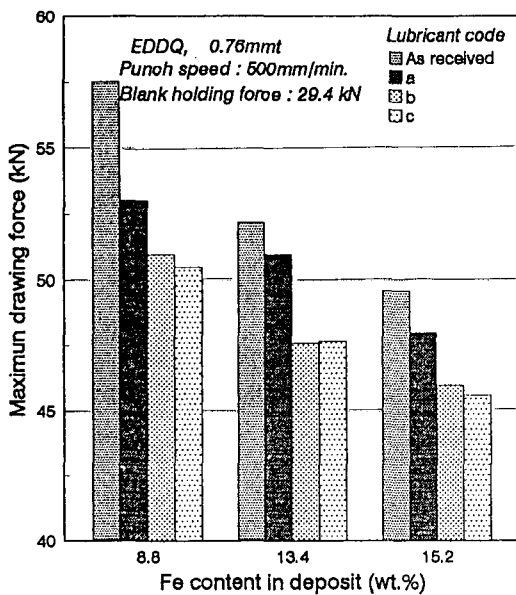


Fig. 9. Effect of content in Zn-Fe alloy electroplated layer on the formability with various lubricants.

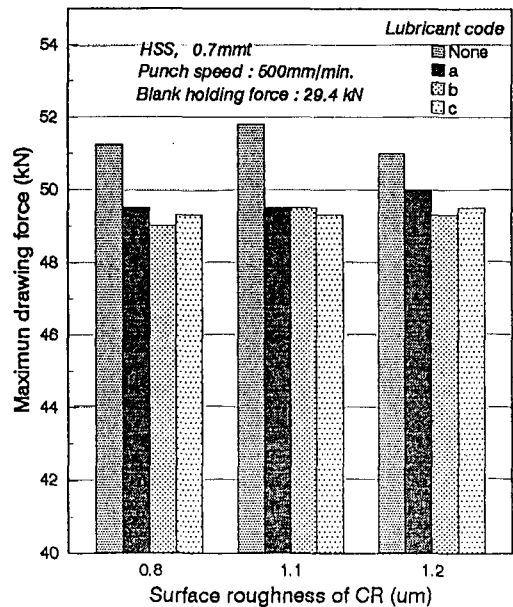


Fig. 10. Effect of surface roughness of cold rolled steel sheets on formability with various lubricants.

/min로 하였고 blank holding force는 29.4kN을 적용하였다. 이 결과로 부터 알 수 있는 바와같이 냉연강판은 표면조도가 Ra 1.2일 때만 약간 최대 인발력이 증가하였을 뿐 거의 변화가 없다.

Fig. 11은 재질이 EDDQ이고 두께가 0.76mm로 일정한 냉연강판(CR), Zn-Fe합금전기도금강판(Fe 13wt.%) 및 합금화용융아연도금강판(GA)에 대하여 punch 속도를 500mm/min와 20m/min로 변경시키면서 최대 인발하중을 측정하였다. 시편종류에 관계없이 punch 속도가 증가하면 최대 인발하중이 감소하는데 이는 성형속도가 증가하면 다이와 강판 사이의 마찰저항이 감소하기 때문이다.

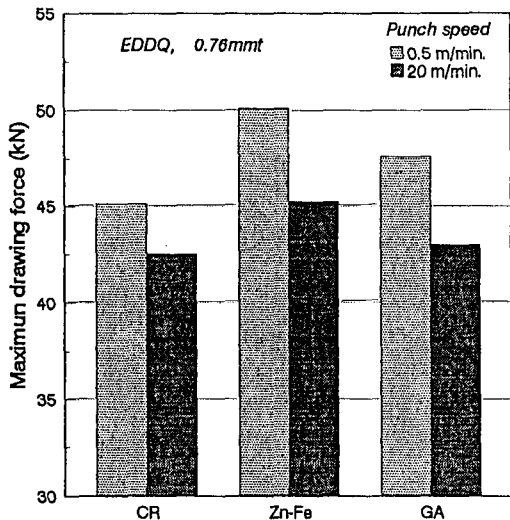


Fig. 11. Effect of punch speed on the formability with various steel sheets.

#### 4. 결 론

자동차용 Zn-Fe합금전기도금강판의 표면마찰특성과 성형성의 최적조건을 도출하기 위하여 피막중 Fe함량, 표면조도 및 윤활유 등을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 도금층의 표면조도는 원판의 조도에 직접적으로 영향을 받으며 도금층의 Fe함량이 낮을 경우에는 원판의 조도 보다도 증가하고 약 16wt.%Fe 이상에서는 원판조도 보다 약간 감소한다.

2) 도금층의 Fe함량이 약 13wt.%까지는 표면마찰계수가 급격하게 감소하여 마찰특성이 열악하지만 13wt.%Fe 이상에서는 마찰계수가 작으면서 완만하게 감소하거나 거의 일정하여 마찰특성이 우수하다.

3) 도금층의 Fe함량이 표면마찰계수 및 성형성에 미치는 영향보다는 윤활성이 우수한 방청유의 영향이 더 현저하다.

4) 도금강판의 성형성은 도금층의 Fe함량이 증가할 수록 혹은 punch 속도가 클 수록 우수하다.

#### 후 기

본 연구는 포항종합제철(주)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 村木正芳：“潤滑經濟”，5月號（1993）29
2. 村木正芳, 井出英夫, 田川一生, 中村保：J. of Japanese Society of Tribologists, 38, 4 (1993) 367
3. 村木正芳, 井出英夫, 田川一生, 中村保：J. of Japanese Society of Tribologists, 38, 10 (1993) 903
4. 大坪博之, 芝野徹阿, 加藤健三：金屬表面技術, 31 (1980) 128
5. 徳永良邦, 堀田孝：塑性と加工, 26 (1985) 355
6. M. Kimoto, T. Sakane, T. Tsude, and Y. Hayashi：J. of the JSTP, 30 (1989) 1639
7. 福塚敏夫, 梶原和一, 三木賢二：鐵と鋼, 66 (1980) 807
8. 菱田祐次, 久恒智彦, 由田征史, 尾野忠：CAMP-ISIJ, 2 (1989) 1695
9. T. Hira, I. Yarita, A. Yasuda, and H. Abe：J. of the JSTP, 34 (1993) 1141
10. S. J. Shaffer, A. M. Philip, and J. W. Morris



- : GALVATECH, Tokyo (1989) 338
11. S. P. Keeler and T. W. Dwyer : SAE paper No. 860433 (1986)
  12. H. K. Nine : Drawbead Forces in Sheet Metal, Plenum Press, (1978) 179
  13. 김영석, 장래웅, 최원집 : 대한기계학회지, 16 (1992) 658
  14. T. Irie, K. Kyono, H. Kimura, T. Honjo, K. Yamato, T. Yoshihara, and A. Matsuda : AES Fourth Continuous Strip Plating Symposium (1984) 1~24
  15. 比良隆明, 遺田征雄, 安田顯, 阿部英夫 : 塑性と加工, 34 (1993) 1141