

합금화용융아연코팅강판의 코팅층 접합강도 평가를 위한 단일 겹치기이음 시험의 적용

이정민* · 이찬주* · 이상곤* · 고대철** · 김병민†

Application of Single Lap-Shear Test for Extracting Adhesive Bonding Strength of Coating Layer on Galvannealed sheet

Lee Jungmin, Lee Chajoo, Lee Sanggon, Ko Daecheol and Kim Byungmin

Key Words : Single lap-shear test(단일겹치기이음시험), Galvannealed steel sheet(합금화용융아연도금강판), Adhesive bonding strength(접합강도)

Abstract

This paper is designed to estimate the adhesion strength of coating layer on galvannealed steel sheet using lap shear test. The single lap shear test is the most commonly used standard test for determining the strength of medium-strength and high strength bonds. The bond strength of bonded single lap joints on subjecting the substrates to loads is determined by lap shear forces in the direction of the bonded joint. In this study, specimen for adhesion strength test was made to attach coated sheet to cold rolled sheet and were heated in temperature of 180 for 20minutes. After test, detached parts of coatings on coated sheet were observed using SEM and EDX to identify substrate and complete detachment. The tested results showed that adhesive strength of coating is unrelated to anisotropy of sheet and is difficult to be extracted using conventional theory because of fine cracks of coating layers which were created during annealing process.

1. 서론

최근 자동차의 내식성 향상을 위한 아연계코팅강판의 적용이 증가하면서, 강판의 프레스 성형에 있어 코팅강판의 코팅층 박리 및 파괴에 따른 성형성 악화가 큰 문제점으로 대두되고 있다.⁽¹⁾ 이러한 코팅층 파괴는 제품의 불량뿐만 아니라 도장 및 용접특성 변화를 야기하고, 심지어 프레스 성형 중 금형과 강판사이의 마찰특성을 악화시켜 재료의 성형성을 크게 변화시킨다. 일반적으로 아연계코팅강판의 코팅층은 부착방법과 후처리공정에

따라 약간씩 다르지만 대부분 낮은 경도와 낮은 모재와의 접합특성을 가지고 있다. 특히 강판의 수% 이내의 인장변형과 비틀림에도 코팅층은 쉽게 균열이 발생하며 파괴되어 탈락되는 특성을 가지고 있다.⁽¹⁾ 따라서 아연계코팅강판의 양호한 프레스 성형성과 완제품 특성을 확보하기 위해서는 무엇보다 코팅층과 모재의 접합특성을 평가하는 것이 중요하다.

일반적으로 두 물체사이의 접합특성은 측정방법에 따른 탈착특성으로 표현된다. 이러한 탈착특성은 외부의 작용응력 상태와 파괴모드 및 영역, 코팅/모재 두께 및 기계적 특성, 시편 크기 및 상태, 온도 등에 크게 의존하는 값이다. 현재 가장 보편적으로 사용되는 시험법은 압입과, 스크래치(Scratch), 맞대기 이음, 겹치기이음, 풀오프(Pull-off), 필(Peel)시험 등이 있다. 이 중 압입과 스크래치 시험은 압입자를 이용하여 직접 재료에 변형을 가한 후, 작용하중과 발생된 크랙 양상의 관찰을

† 김병민, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3074 FAX : (051)581-3075

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 산학협력단

통해 평가하는 방법으로 주로 경도가 높고 취성이 강한 코팅(TiN, CrN, 등)재료와 모재에 사용된다. 이에 반해 인장 및 겹치기이음, 풀오프, 필 시험은 두 물체 사이의 기계적 및 화학적 접합상태(볼트, 용접, 접착제, 복합재료)에 있어서 접합특성을 평가하기 위해 주로 사용되고 있다.⁽²⁾

아연계코팅강판의 코팅층은 낮은 경도값을 가지면서도 순수아연(Zn)과는 다르게 약간의 취성을 가지고 있다. 일반적으로 아연계코팅층 파괴는 파우더링(Powdering)과 플레이킹(Flaking), 골링(Galling), 크랙킹(Cracking)으로 구분되며 이것은 강판의 변형모드(인장, 압축, 이축인장, 드로잉 모드)와 밀접한 관련이 있다.⁽³⁾ 보통 파우더링과 플레이킹은 셀로판 테이프를 통해 묻어 나오는 상대적인 코팅층량을 통해 평가한다.⁽⁴⁾ 또한 골링과 크랙킹에 대해서는 다양한 연구결과⁽⁴⁾들이 보고되고 있지만 아직 만족할 만한 정량적인 평가방법은 문헌상으로 보고되지 않았다. 그러나 이러한 코팅층의 파괴 특성은 모두 금형과의 상대적인 마찰과 강판의 변형모드에 의존하는 것으로 엄밀하게 말해 코팅층과 모재사이 계면의 접합특성을 의미하는 것은 아니다.

따라서 본 연구는 아연계 코팅강판 특히 합금화용융아연코팅강판(이후 GA 강판:Galvannealed steel sheet)의 코팅층과 모재사이 계면 접합강도를 평가하기 위해 고안되었다. 평가는 단일겹치기이음 시험법을 통해 이루어졌으며 겹침부 사이는 구조용 접착제를 이용하여 고정되었다. 단일겹치기이음에서 응력해석과 파단해석은 Golland-Reissner⁽⁵⁾ 해석을 기초로 수행되었다. 마지막으로 시험후 시편의 겹침부위는 코팅층 탈락을 확인하기 위해 SEM 과 EDX 를 이용하여 관찰되었다.

2. 단일 겹치기이음 시험의 메커니즘

접착제를 이용한 겹치기이음은 결합방법이 간단하고 또한 결합부위의 부식 저항증가, 무게 감소, 응력집중 제거가 가능하기 때문에 볼트결합과 같은 기계적 결합을 대신하여 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 겹치기이음 시험은 원래는 접착제의 파단강도를 평가하기 위한 것으로 ASTM D1002 에 그 표준시험 방법이 명시되어 있다.⁽⁶⁾

Fig. 1 은 단일 겹치기이음 시험에서 시편의 변형양상을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 하중 적용시, 하중작용부의 편심으로 인해 접합부에 벤딩이 발생하며 이 때 접합부의 접착제에는 전단응력뿐만 아니라 시편의 항복강도를 초과하는 수직응력이 생성된다. 결과적으로 단일 겹치기이음 시험에서의 접착제의 파단은 모드 I(수직응력)과 모드 II(전단응력)가 혼합된 혼합모드(Mixed mode)의 파단조건을 따르게 된다.⁽⁷⁾

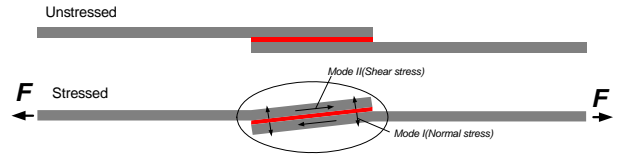


Fig. 1 Schematic representation of a single lap-shear joint

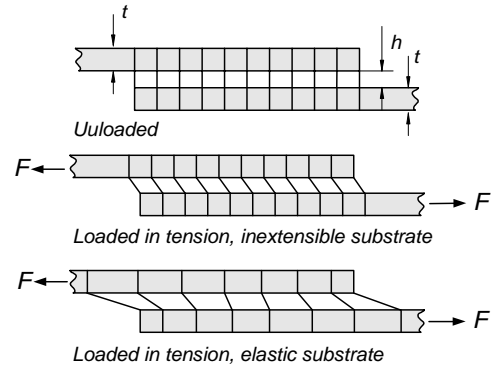


Fig. 2 Volkersen's schematic representation of a single lap-shear joint

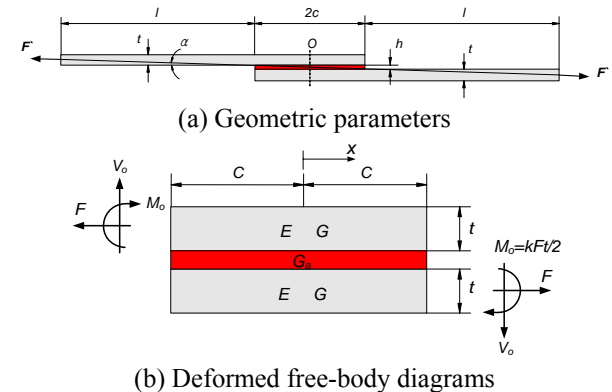


Fig. 3 Golland-Reissner's schematic representation of a single lap-shear joint

2.1 선형탄성해석

단일 겹치기이음 상태의 응력해석은 Volkersen⁽⁸⁾에 의해 가장 먼저 수행되었다. 그는 Fig. 2 와 같이 시편을 평면변형율과 축대칭 상태에서 접착제는 선형탄성체로 오직 시편의 축방향 연신에 의한 전단변형을 받는 것으로 가정하였다.

이때 최대전단응력 $\tau_{xy(max)}$ 은 평균전단응력과 관련이 있으며 식(1)로 표현된다.

$$\eta_{c(max)} = \frac{\tau_{xy(max)}}{\tau_0} \quad (1)$$

여기서 η_c 는 응력집중값이고 τ_0 는 적용하중을 접합부 면적으로 나눈 평균전단응력값(식(2))이다.

$$\tau_0 = \frac{F}{bl_a} \quad (2)$$

여기서 b 는 겹침부 폭이며 l_a 는 겹침부 길이이다. 다시 시편과 접착제의 계면에서의 응력집중값은 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$\eta_c = (\Delta/2)^{1/2} \coth(\Delta/2)^{1/2} \quad (3)$$

여기서 Δ 는 무차원 계수로 식(4)와 같다.

$$\Delta = \frac{G_a l_a}{E_s t h} \quad (4)$$

G_a 는 접착제의 전단탄성계수이고 E_s 는 시편의 탄성계수, t 는 시편두께 h 는 접착제의 두께이다. Volkersen⁽⁸⁾의 해석에서 접착제의 전단응력은 겹침부 길이와 접착제의 탄성계수가 감소할수록 감소하며 접착제 두께, 시편두께, 시편의 탄성계수가 증가할수록 감소한다.

2.2 Golland-Reissner 의 해석

Golland-Reissner⁽⁵⁾는 단일 겹치기이음에서 시편의 벤딩의 효과를 고려하기 위해 시편과 접착제 사이에 식(5)의 벤딩 모멘트 계수(k)를 적용하였다. Fig. 3 은 Golland-Reissner⁽⁵⁾에 의해 사용된 겹치기이음 형상 및 재료변수와 변형된 자유물체도를 나타낸 것이다.

$$k = \frac{\cosh(\zeta c)}{\cosh(\zeta c) + 2\sqrt{2} \sinh(\zeta c)}, \quad \zeta = \sqrt{\frac{3F}{2Et^3}} \quad (5)$$

여기서 F 는 단위폭당 작용하중, $\bar{E} = E/(1-\nu^2)$, t 는 시편의 두께이다. 따라서 적용된 하중의 함수로써 모멘트(M_0)와 수직하중(V_0)은 식(6)과 같다.

$$M_0 = \frac{1}{2} k F t, \quad V_0 = k F \sqrt{3 \frac{F}{tE}} \quad (6)$$

최종적으로 겹침부의 수직응력 σ_{\max} 과 전단응력 τ_{\max} 분포는 식(7)과 같이 표현되며 겹침부 모서리부에서 최대값을 갖는다.

$$\tau_{\max} = -\frac{1}{8} \eta \left(F + \frac{6}{t} M_0 \right) \frac{\cosh(\eta c)}{\sinh(\eta c)} - \frac{3}{8c} \left(F - \frac{2M_0}{t} \right)$$

$$\sigma_{\max} = \gamma^2 M_0 \frac{\sinh(2\gamma c) - \sin(2\gamma c)}{\sinh(2\gamma c) + \sin(2\gamma c)} + \gamma V_0 \frac{\cosh(2\gamma c) + \cos(2\gamma c)}{\sinh(2\gamma c) + \sin(2\gamma c)} \quad (7)$$

여기서 $\eta^2 = \frac{1}{Et} \frac{8G_a}{h}$ 이고 $\gamma^4 = \frac{E_c}{2hD}$, $D = \frac{\bar{E}t^3}{12}$ 이다.

3. 실험 및 결과

3.1 코팅층 특성 및 시편 준비

Fig. 4 는 GA 강판의 코팅층 단면과 표면 SEM 측정결과를 나타낸 것이다. 합금화 용융아연도금 강판은 용융아연도금 강판(Galvanized steel: GI)의 단점인 용접성과 도장성을 보완하기 위해 아연도금층을 응고 직전에 460~540°C의 가열로를 통과시켜 10% 이내의 철-아연(Fe-Zn) 합금층을 형성한 것이다. 본 연구에 사용된 GA 강판의 경우, 합금화 처리 온도는 약 520°C 전후이며, 모재와의 계면에서 약 0.5 μm 두께의 Γ 상이 관찰되었고 표면에서는 δ 상이 고르게 분포되어있다. 본 연구에서 정의된 코팅층의 접합력은 모재와 Γ 상의 분리를 의미하며 이를 확인하기 위해 시험후 탈락부에 SEM 과 EDX 관찰을 수행하였다.

겹치기이음 시편의 형상 및 치수는 Fig. 5 에 나타내었다. 시험을 통해 코팅층의 분리를 명확히 하기 위해 시편에서 상부 시편은 코팅강판으로 하였고, 하부 시편은 코팅강판과 동일한 기계적 성질을 가진 냉연강판으로 설정하였다.

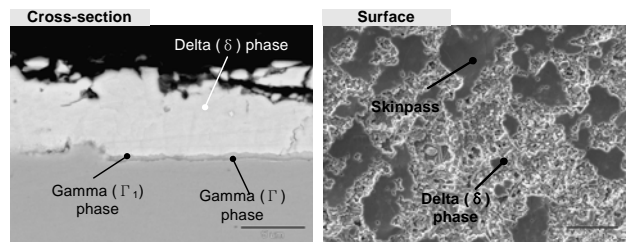


Fig. 4 SEM images of cross-section and surface of GA coated sheet steel

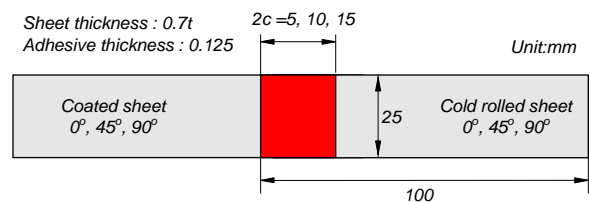


Fig. 5 Dimensions and geometry of single lap joint

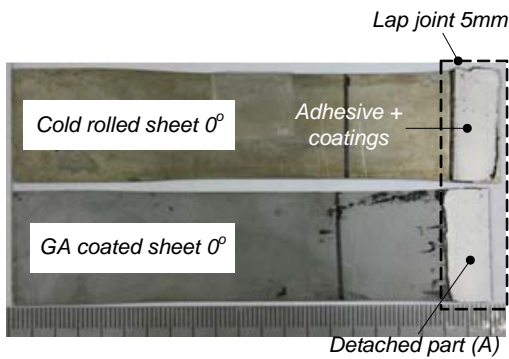
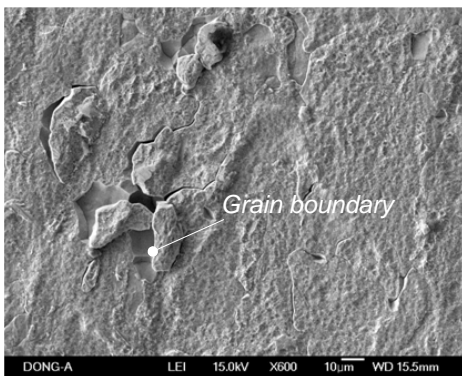
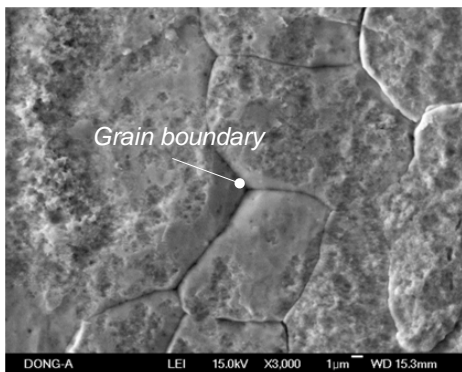


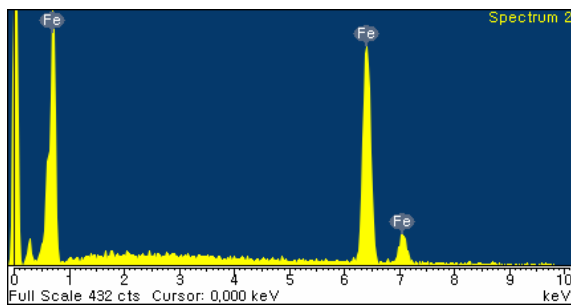
Fig. 6 Separated specimens after tensile test (lap joint length: 5mm)



(a) SEM image(X 600)



(b) SEM image(X 3000)



(c) EDX observation

Fig. 7 SEM image and EDX observation of detached part of coatings on coated sheet after single lap-shear test

Fig. 5 는 본 연구에서 사용된 겹침기이음 인장 시편의 치수 및 형상을 나타낸 것이다. 겹침부 길이는 각각 5, 10, 15mm 로 하였고, 각 길이마다 표점거리는 50mm 로 일정하게 고정하였다. 또한 시편의 이방성을 고려하여 코팅강판 및 냉연강판 각각 0°, 45°, 90° 방향에 대해 시험을 수행하였다. 시험은 1 케이스당 3 번씩 수행하였으며 총 81 번을 수행하였다. 인장시험에서 인장속도 1mm/min 로 설정하였다. 겹침부의 접합은 Henkel 사의 열경화성 접착제를 이용하였으며 시편에 도포후 180° 에서 약 20 분 간 가열되어 경화되었다.

3.2 시험 결과

Fig. 6 은 인장시험 결과로써 강판의 0도 방향에서 겹침부 길이 5mm 에 대한 파단된 시편을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시편은 모두 코팅강판에서 쪽에서 파단이 발생되었으며 파단부의 접착제에는 코팅강판의 은색 코팅층 묻어 있는 것이 육안으로 관찰되었다. 또한 인장시험 중 시편의 연신은 대부분 겹침부를 제외부위에 발생하며 겹침부의 폭은 거의 감소 않는 것으로 나타났다. 따라서 앞선 겹침기이음 시험의 선형탄성 해석은 유효한 것으로 판단된다.

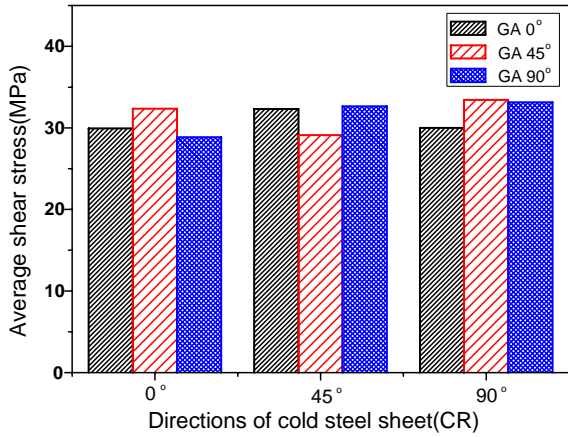
Fig. 7 은 코팅강판의 탈락부(Fig. 6 (A)) 표면에 대한 SEM 과 EDX 관찰 결과를 나타낸 것이다. 결과는 탈락부 표면에 어떠한 코팅층 상들도 관찰되지 않았으며 탈락부는 100% Fe 만 구성된 것으로 확인되었다. 특히 일부 모재 표면에서 결정립을 따라 모재가 파괴되는 현상이 관찰되었다. 이것은 코팅층 형성시 모재와 코팅층 사이에 합금화가 이루어짐에 따라 모재 표면 일부가 약간의 취성으로 변해 발생하는 것으로 판단된다. 결과적으로 본 시험은 모재와 접한 Γ상까지 탈락되는 실질적인 GA 코팅층과 모재의 접합강도 평가 시험으로 판단할 수 있다.

Fig. 8 은 강판의 방향에 따른 겹침부 길이별 인장시험결과로써 평균전단응력 값을 나타낸 것이다. 결과는 상대적으로 겹침부 5mm 가 10, 15mm 에 비해 훨씬 높게 나타났다. 평균전단응력값은 전체적으로 10~30MPa 범위로 겹침부 두께에 따라 다양하게 변하였다. 실질적으로 겹침기 이음에서 전단응력 값은 접착제 두께 및 길이 뿐만 아니라 겹침부 길이에도 크게 의존하는 것으로 판단된다. 그 외 강판의 방향에 따른 코팅층 접합강도의 영향은 관찰되지 않았다.

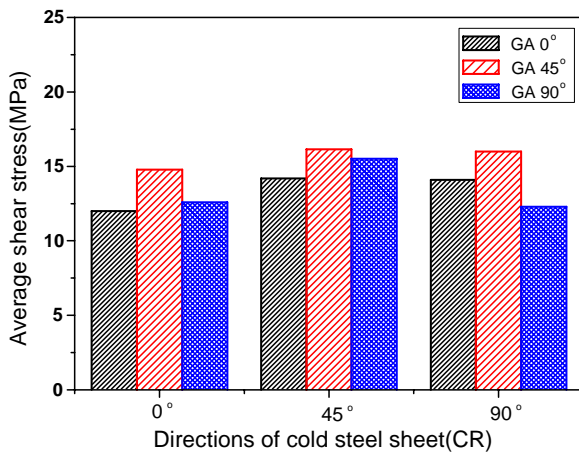
4. 고찰

Table 1 은 식(7) 적용을 위한 시편과 접착제의 재료변수와 그 값을 나타낸 것이며 Table 2 는 해석 결과를 나타낸 것이다. 식(7)의 해석결과, 최대

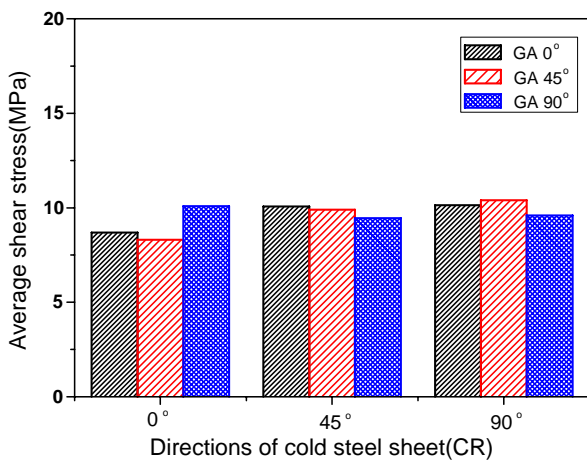
전단 및 수직응력은 겹침부 모서리에서 작용하며 겹침부 길이가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 원래 겹침부 길이가 무한히 증가하면 최대 전단응력은 거의 일정값을 가진다.



(a) Lap joint length 5mm



(b) Lap joint length 10mm



(c) Lap joint length 15mm

Fig. 8 Average shear stress of sing lap-shear joint by overlap lengths and anisotropy of sheet

그러나 시험에서는 평균전단응력값이 겹침부 길이가 증가할수록 감소하였다. 이것은 인장시험에서 겹침부 길이가 증가할수록 하중이 증가하지 않고 거의 일정한 값을 가지며 과단되었기 때문으로 이론적인 해석과는 상이한 결과이다. 이러한 원인은 GA 강판의 도금층 특성 때문으로 사료된다. 원래 이론해석에서는 겹침부 길이에 걸쳐 결합없이 균일한 재료특성으로 가정하였으나 GA 코팅의 경우, 합금화 공정동안 무수한 미소크랙이 존재해 있다. 이러한 미소크랙들은 겹침부 내에서 최대전단 및 수직응력을 발생시키는 모서리 역할을 하고 이로 인해 겹침부 전체 면적으로 나눌 경우 평균전단응력값은 감소하는 것으로 판단된다. 이러한 문제는 추후 다시 논의될 것이다.

Table 1 Mechanical properties of adherent and adhesive

Materials	E(GPa)	G(GPa)	v(%)	thickness
Sheet	210	-	0.3	0.7
Adhesive	3	1.15	0.32	0.125

Table 2 The results of lap-shear joint analysis and test

Overlap length (c)	Test (τ_0 :MPa)	σ_{max}	τ_{max}
2.25 mm	31.30	46.38	45.83
5 mm	14.17	33.98	31.47
7.25 mm	9.62	28.84	27.72

5. 결론

본 논문에서는 GA 코팅강판의 코팅층 접합강도를 예측하기 위해 강판의 방향별, 겹침부 길이별 겹치기이음 인장시험을 수행하였다. 이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- (1) 단일 겹치기이음 인장시험에서 코팅층 평균 항복강도는 겹침부 길이가 증가할수록 감소하였다.
- (2) GA 코팅강판의 코팅층 접합강도는 강판의 이방성과는 무관하다.
- (3) GA 코팅강판의 코팅층 경우, 단일 겹치기이음 시험을 통해 쉽게 코팅층의 탈락이 가능하다. 그러나 겹침부 내 코팅층에 미세 균열에 의해 기존의 이론 해석을 통해 정량적인 접합강도를 도출하기는 어렵다.

후기

이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된

참고문헌

- (1) Kim, Y. S. and Choi, W. J., 1994, "A cup drawing test for measuring the coefficient of friction in sheet metal forming", *J. of KSAE*, Vol. 2, No. 1, pp. 96~105.
- (2) Mittal, K. L., 1978, "Adhesion measurement: recent progress, unsolved problems, and prospects", American society for testing and materials, pp. 5~17.
- (3) Marder, A. R., 2000, "The metallurgy of zinc-coated steel", *Progress in materials science*, Vol. 45, pp. 191~271.
- (4) Pak, S. W., 1991, "Study on the deformation behavior of electrogalvanized coatings", *Doctor of philosophy*, Northwestern university, pp. 61~62.
- (5) Golland, M. and reissner, E., 1944, "The stresses in cemented joints," *J. Appl. Mech.*, Vol. 11, pp. 17~22.
- (6) Volkersen, O., 1938, "Die niekraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschnitten," *Luftfahrtforschung*, Vol 15, pp. 41~47.
- (7) Yen, H. Y. and Tandjung, D., 2005, "Mixed mode fracture analysis of the lap shear specimen test per ASTM D1002", *J. reinforced plastics and composites*, Vol. 24, No. 8, pp. 839~853.
- (8) Hu, G., 1995, "Mixed mode fracture analysis of adhesive lap joints", *Composite engineering*, Vol. 5, No. 8, pp. 1043~1050.