

<論 文>

# 高張力 鋼板과 亞鉛鍍金 鋼板間의 疲勞特性(Ⅱ)

徐 昌 敏\* · 姜 成 守\*\*

(1988年 10月 7日 接受)

## Fatigue Characteristics of Spot Welding between High Strength Steel and Galvanized Steel Sheet(Ⅱ)

Chang-Min Suh and Sung Su-Kang

**Key Words:** Fatigue Crack Initiation(피로균열 발생), Hardening Region(硬化域), Fracture Behavior(파괴거동), Monogalvanized Steel Sheet(편면도금강판)

### Abstract

The influence of monogalvanized layer to fatigue strength of two different mating metal specimens (HS×GA, HS×GAB) of high strength steels(HS) and of monogalvanized steel sheets(GA, GAB) were investigated under tensile-shear repeated load, and hardness test. Some of the results are ;

- (1) The main cause of crack initiation and growth at high load range is plastic bending hinge.
- (2) In low load range, the cracks initiated near the nugget front where the hardness variation is steep.

### 1. 序 論

자동차 차체에 사용되는 강판은 최근에 와서 크게 변했다. 경량화를 위한 고장력강의 사용과 북미, 캐나다의 염해대책을 위한 아연도금 강판의 사용이 늘고 있어서<sup>(1)</sup> 이들의 동종 용접재는 물론이고 異種용접재의 사용의 경우도 많아 이에 대한 피로강도의 평가가 절실한 실정이다<sup>(1,2)</sup>.

점용접이 시행된 박판구조는 박판특유의 대변형과 비선형 변형을 보여주고 소성좌굴의 국부변형등 복잡한 양상을 보이고 있기 때문에 점용접에 의한 조직변화 및 경도변화를 피로거동과 연결시키는 것은 쉽지 않은 실정이다<sup>(3,4,8)</sup>.

兩面 아연도금 강판의 경우 아연이 전극침에 침입하여 황동화시켜 전극침 수명을 단축시키며, 점

촉저항을 감소시켜 용접성을 해치므로 그 해결책으로 한 쪽면만 용접한 片面鍍金 강판의 사용이 늘고 있다<sup>(1,2)</sup>. 편면도금 강판의 피로거동에 관한 연구는 거의 찾아보기 어렵고 더우기 아직 피로거동이 완전히 규명되지 않은 복합조직 고장력 강판과의 異種熔接材의 피로거동에 관한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 편면도금 강판과 복합조직 고장력 강판간의 異種 熔接材의 피로거동을 연구하고자한다. 즉 유한요소법으로 응력분포를 조사하고 그 결과와 피로균열발생 위치를 비교 검토해 보고자 한다.

### 2. 실험재료 및 실험방법

#### 2.1 실험재료

본 실험에 사용된 재료는 0.7mm 두께의 복합조직의 고장력강판(HS)과 편면도금 강판(GA)이다.

\* 正會員, 慶北大學校 工科大學 機械工學科

\*\* 正會員, 釜山大學校 工科大學 機械工學科



Fig. 1 Microstructure of dual phase steel

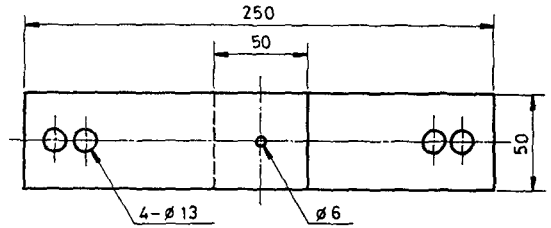


Fig. 2 Dimension of fatigue specimen(mm)

복합조직의 고장력강은 軟質의 페라이트와 5~30% 정도의 체적율로 분산시킨 마르텐사이트를 주된 구성요소로 한 고장력강으로 ① 항복점이 뚜렷하지 않고, ② 항복비가 아주 낮으며, ③ 가공경화 계수가 큰 것으로 알려져 있다<sup>(3,4,6)</sup>.

이 복합조직 고장력강은 중래의 고장력강(석출강화강, 분산강화강)에 비해서 프레스 성형성과 形狀凍結性이 양호하며 스프링 백 현상도 적어서 국내 자동차 산업계에서는 주로 이 고장력강을 널리 사용하고 있는 실정이다.

Fig. 1에는 고장력강의 복합조직을 나타내며 마르텐사이트 조직이 대체로 연결된 것이 작고 分散되어 있기 때문에 편면도금강의 강도와 그다지 차이가 크지 않은 것으로 생각된다<sup>(13)</sup>.

편면도금 강판의 미세조직은 일반 연강과 거의 같았고 탄소량이 극히 적어 (0.01%, 탄소당량 0.04%) 베이크 硬化(Bake hardening)의 영향은 작았다.

Table 1에 각 재료의 화학적 조성을 나타내었고 Table 2에 기계적 성질을 나타내었다.

용접시험편은 고장력 강판과 편면도금 강판의 도금된 면을 용접한 시험편을 HS×GA로 칭하고, 고장력 강판의 도금되지 않은 면을 용접한 시험편을 HS×GAB로 칭한다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용한 시험편의 모양은 Fig. 2와 같고 용접조건은 Table 3과 같다. 용접조건은 필(peel)테스트와 인장시험으로 최적 용접조건으로 판정된 용접조건을 택하였고 용접기는 定置式 점용접기(PA-150)\*를 사용하였다.

피로시험은 전기유압식 피로시험기(Instron

1332)를 사용하였고 25Hz, 응력비 R=0 조건 하에서 하중제어 피로시험을 실시하였다. 본 실험에서 결정하는 피로수명(N<sub>f</sub>)은 균열이 점용접부의 내부에서 발생, 성장하여 표면을 관통하며 성장하므로 부하하중이 떨어지는 시점을 기준으로 하였다. 본 실험을 통하여 관찰한 결과 대체로 너깃(nugget) 적정 정도의 피로균열이 표면에 나타나면 피로시험기에 부하된 균일하중이 갑자기 떨어지기 시작하였다.

硬度試驗은 마이크로 비커스경도기를 사용하였고 0.5mm간격으로 경도를 측정하였으며 측정하중은

Table 1 Chemical composition of base metal

Materials	C	Mn	Si	P	S	Ceq
HS	0.05	0.2	0.02	0.06	0.007	0.105
GA	0.01	0.11	0.01	0.012	0.005	0.04

$$Ceq = C\% + \frac{Mn}{4}\% + \frac{Si}{4}\%$$

Table 2 Mechanical properties of base metal

Materials	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
HS	215.7	339.3	39	142
GA	186.3	299.1	49	117

Table 3 Welding condition of specimens

Materials	Squeeze force (N)	Squeeze time (cycles)	Weld time (cycles)	Hold time (cycles)	Current (A)
HS×GA	2942	40	12	12	9100
HS×GAB	2942	40	12	12	9100

\* 정격용량 150KVA, 최대단락전류 40,000A 최대가압력 14,710N

0.98N이다. 또한 조직검사의 부식액은 마블액 (marble's reagent)을 사용하였다.

2.3 응력해석

Fig. 3에는 유한요소법을 이용하여 점용접부상의 응역을 계산하는 모델을 도시하였다. 용접부는 대칭이므로 한쪽만 계산하였고 上端이 고정된 시험편에 대하여 상대시험편의 너깃부를 통해서 단순인장 하중을 가하는 것으로 가정하였다. 하중의 분포는 너깃의 단위면적당 동일한 하중을 분담하고 각 요소의 해당 면적에 작용하는 하중의 1/3상당분을 각 절점에 작용하는 것으로 하였다.

너깃의 직경은 6mm로 하였고  $E=206GPa$ , 프

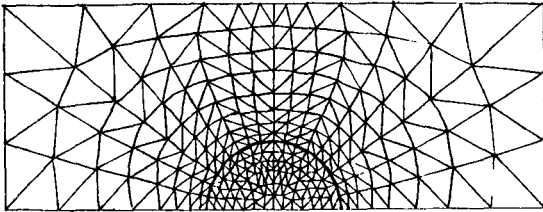


Fig. 3 Model of stress analysis

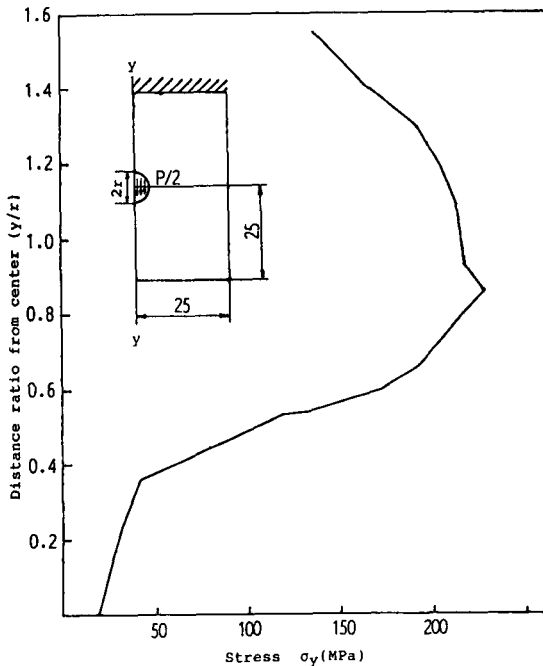


Fig. 4 Stress distribution near nugget

와송비  $\mu=0.3$ , 판두께는 0.7mm로 하여 계산하였다.

HS×GA시험편의 경우에는 HS재에 피로균열이 발생하는 1863N의 하중을 작용하는 것으로 계산하였다.

Fig. 4에 용접부의 거리비에 대한 응력분포  $\sigma_y$ 의 변화를 나타내었다.

계산결과 너깃에 생기는 GA材 및 HS材의 최대 응력은 각각 모재의 항복응력 186.3MPa 및 215.7 MPa를 넘었다. 그러나 항복응력을 넘은 부분은 극히 제한적이며 너깃은 용접열에 의하여 母材보다 2~3배 경화되었다.

실제로 피로시험에 의하여 생기는 굽힘변형은 熱硬化部를 지난 母材部에 일어나고 있음을 관찰할 수 있었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로시험 결과

Fig. 5는 HS×GA시험편과 HS×GAB 시험편간의 피로수명을 서로 비교한 것이다. 剛性이 큰 고장력강에다 도금된 면을 용접시킨 HS×GA쪽이 도금되지 않은 면을 용접시킨 HS×GAB 시험편의 피로시험 결과보다 대체로 전 수명 구간에서 피로 수명이 증가된 경향을 나타내고 있다.

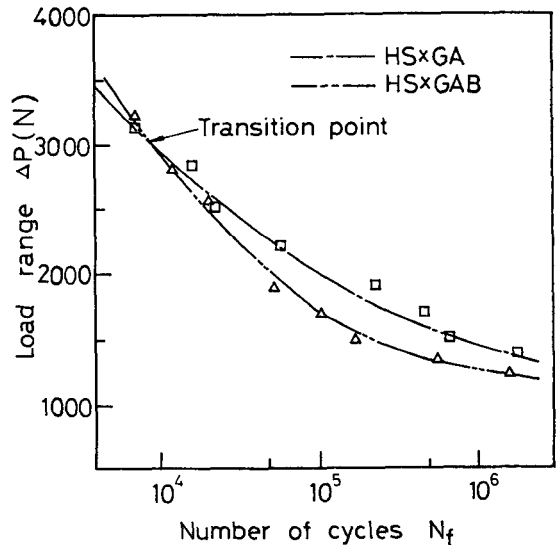


Fig. 5 Comparison of fatigue characteristics between HS×GA and HS×GAB specimens

그러나 고하중 범위에서는 두 시험편간에는 거의 비슷한 특성을 나타내고 있다. 그리고 상대편 부재가 도금면인 경우와 비도금인 경우에 따라 동일한 재료를 사용한 두 용접시험편 사이에는 큰 피로수명의 차이가 생기고, 하중범위 1471N인 경우 HS×GA材가 HS×GAB材보다 320%만큼 증가하였다.

3.2 경도분포

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 HS×GA시험편과 HS×GAB시험편의 경도분포를 나타내었다. 두 그림상에서 HS×GA쪽이 HS×GAB쪽 보다 너깃상의 경도분포가 넓은 범위에 걸쳐서 硬化되었음을 보여주고 있다.

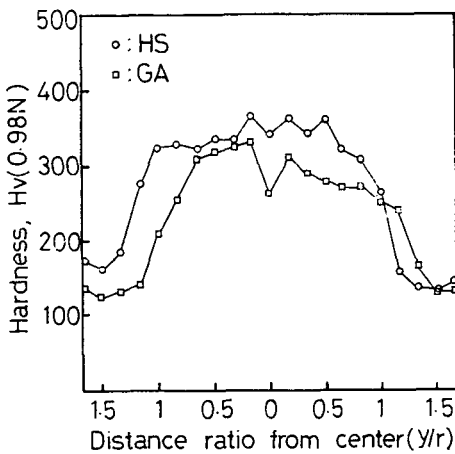


Fig. 6 Hardness distribution of HS×GA specimen

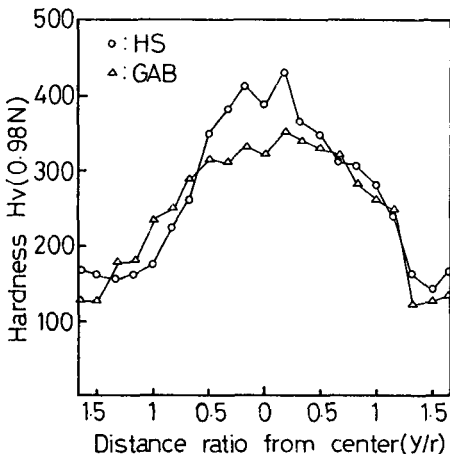


Fig. 7 Hardness distribution of HS×GAB specimen

이것은 아연도금층의 존재에 의한 접촉저항의 저하로 넓은 범위로 전류를 통전시킨 결과로 판단되며<sup>(9)</sup> 최고 경도치도 HS×GA재가 크게 저하된 것으로 생각된다. HS×GAB시험편의 최고 경도치는 430정도로 시험편중 가장 높았다. 이것은 HS재와 비도금면 GAB재 사이의 높은 접촉저항과 용접전극과 도금면 사이의 높은 通電의 결과로 판단된다.

HS×GA재의 경화역에 비해 비교적 좁게 나타난 HS×GAB재의 硬化域은 높은 접촉저항에 의한 비교적 높은 전류밀도에 기인한 것으로 판단된다<sup>(9)</sup>.

Fig. 8은 HS×GA 시험편의 너깃접합부를 나타낸 단면조직사진이며, 접합부 근처는 飛散(expulsion)에 의해 조금 벌어져 있음을 관찰할 수 있고 너깃부의 조직은 모재보다 미세함을 관찰할 수 있다.

점용접 너깃부위는 아크용접에 비교해서 용융부위가 작고 냉각속도가 4~25배 큰 것으로 보고되고 있다<sup>(14)</sup>.

Fig. 9는 HS×GA材의 용접부위의 조직을 확대시켜 나타내었다. 이 사진상의 HS材의 마르텐사이트조직은 Fig. 1의 조직보다 너깃선단에서 많이 변화되었음을 보여주고 있다. Fig. 10에는 HS材의 열영향부 표면 상세부를 나타내었는데 미세한 비산



Fig. 8 Microstructure near nugget

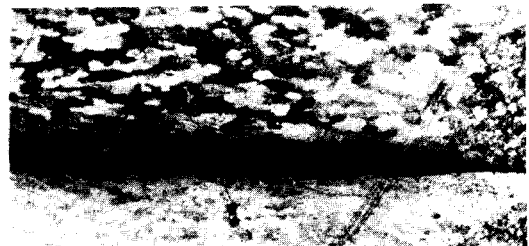


Fig. 9 Photo of magnification before nugget

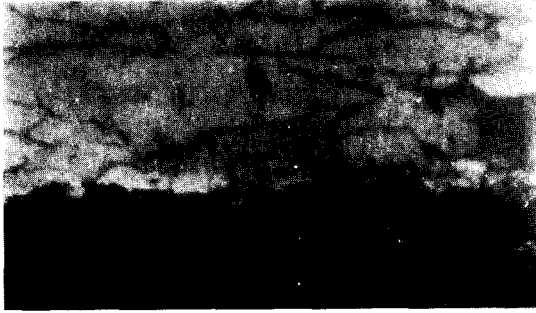


Fig. 10 Detail of heat affected zone of HS plate

이나 높은 접촉저항의 결과로 판단되며 GA재보다 표면부가 상당히 劣化되었음을 나타내고 있고 이 표면상태의 不良함이 표면균열의 발생점으로 작용할 수 있음을 짐작할 수 있다.

3.3 균열발생 위치의 변화

Fig. 11에 HS×GA시험편과 HS×GAB시험편의 균열 발생위치를 수명영역에 따라 조사한 결과이다. 고하중인 단수명 영역에서는 HS×GA시험편, HS×GAB시험편 공히 정도의 상승이 큰 너깃 바깥에서 피로균열이 발생 성장 되었지만 저하중의 단수명 영역에서는 HS×GAB시험편은 너깃 내부에서 피로균열이 발생 성장 되었음을 알 수 있다.

Fig. 12는 HS×GA시험편의 너깃근방에서 발생된 균열의 상태를 나타내었고 Fig. 13에는 HS×GAB시험편상의 균열거동을 나타내었다. 두가지 시험편에는 1863N의 하중을 작용시킨 예를 나타낸 것이다. 특히 HS×GA시험편의 경우에는 너깃 근방에서 네개의 피로 균열이 발생 성장함을 알 수 있고 이중 너깃밖에서 발생된 한개의 피로균열이

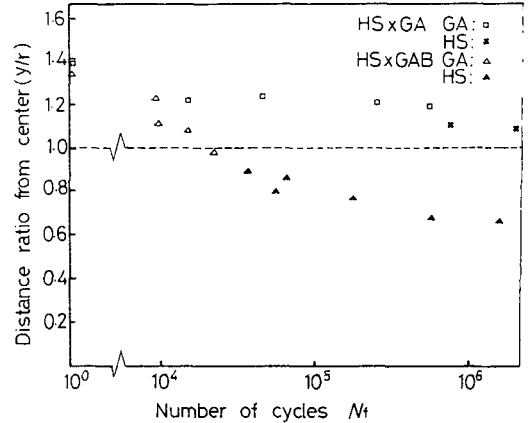


Fig. 11 Relationship between distance ratio from center  $y/r$  and number of cycles  $N_f$ .

시험편의 표면까지 관통되었다. 또한 HS×GAB시험편의 경우에는 너깃내부에서 두개의 피로균열이 발생 성장하였고 이것 중에 한개가 표면까지 관통하였다. 이와 같이 Fig. 11, Fig. 12 및 Fig. 13의 결과 및 관찰에서 얻은 결과는 다음과 같이 생각해 볼 수 있다.

고하중인 단수명 범위에서는 대체로 정적 굽힘이 일어나는 곳 근처에서 균열이 발생, 성장하나 저하중 범위에서는 이러한 정적 굽힘이 일어나기 어려워지므로 HS×GA시험편은 Fig. 8에 나타낸 것처럼 미소한 비산 등에 의한 표면의 상태가 불량해진 곳이나 너깃선단의 열영향부에서 균열이 발생, 성장하고 있는 것으로 판단 된다.

HS×GAB시험편은 Fig. 7에 나타낸 것처럼 반경에 의한 거리비  $y/r$ 가 1 근처이며 압접부와 모재와의 급격한 경도 변화가 생기는 부분에서 피로



Fig. 12 Pattern of crack initiation and growth of HS×GA specimen is case of  $\Delta p=1863N$ ,  $N_f=2.58 \times 10^5$  cycles



Fig. 13 Pattern of crack initiation and growth of HS×GAB specimen in case of  $\Delta p=1863N$ ,  $N_f=5.5 \times 10^4$  cycles

균열이 발생 성장되는 것으로 추측된다. 이와같이 균열발생위치가 너깃선단에 가까우므로 응력집중이 용이해져 HS×GAB시험편의 수명을 HS×GA시험편보다 결정적으로 감소시키는 것으로 생각된다.

Fig. 4와 같이 단순인장하의 응력해석 결과를 보더라도  $y/r=1.2$  정도까지는 모재항복 응력이상을 유지하나 그 이상에서는 응력이 급격하게 저하하고 있는 점 등을 알 수 있다. 이와같이 고하중에서는 굽힘변형은 인장응력보다는 굽힘모멘트의 영향을 많이 받으며 너깃의 경화역을 벗어난 母材部에서 소성현지가 발생하였다. 그러나 저하중에서는 고하중에 비하여 굽힘변형은 크게 생기지 않지만 너깃의 중심 가까운 부분에 응력의 집중정도가 클 것이므로 장수명 영역의 저하중이 될수록 피로균열의 발생위치가  $y/r=1$ 보다 적은 너깃중심부 가까이로 접근하고 있는 것으로 생각된다.

이상의 결과를 종합하면 고하중 범위에서는 소성현지가 발생 그 점에서 반복 소성변형에 의하여 균열이 발생 성장하는 것으로 보이고 저하중 범위에서는 소성현지가 발생하지 못하고 수명이 거의 다할때까지 인장응력과 굽힘응력의 작용에 의하여 표면균열, 또는 너깃내부의 경도급변 근방에서 피로균열이 발생 성장하는 것으로 생각된다.

#### 4. 結 論

고장력강(HS)을 편면도금면(GA)과 비도금면(GAB)을 서로 점용접시킨 두가지 시험편(HS×GA, HS×GAB)으로 제작하여 피로시험을 실시한 결과 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

(1) 고하중인 단수명 영역 범위에서는 소성굽힘변

형이 균열발생의 주 원인이 되며 연성이 큰 GA 및 GAB材에 피로 균열이 먼저 발생, 전파되었다.

(2) 저하중 범위인 장수명 영역에서는 소성현지가 발생하지 못하고 너깃선단 근방의 경도 급변부에서 피로균열이 발생 성장하였다. 이와같은 피로균열의 발생거동은 하중범위와 두 재질간에 크게 의존하였다.

(3) HS×GA材는 HS×GAB材보다 너깃상의 硬化部가 아연의 작용으로 넓게 고르게 분포하므로 너깃 중심으로부터 비교적 먼 곳에서 피로균열이 발생, 성장되었다. 이것이 장수명 영역에서 HS×GA시험편의 피로수명을 HS×GAB시험편보다 약 300%정도 연장시킨 큰 요인이 되었다.

#### 參 考 文 獻

- (1) 近藤正桓, 齊藤 亨, 1986, “最近の自動車用 亞鉛×ツギ鋼板及び高張力鋼板の抵抗スポット 溶接, 日本溶接學會誌 第2卷, 第2號, pp. 97~106.
- (2) Suzanne Mathieu, 1985, “Zinc Coating Influence on Spot Weldability of Hot-Dip Galvanized Steel Sheets”, SAE 850273, pp. 1~7.
- (3) 友田陽, 田村今男, 1982, “延性 2 相鋼板의 強度, 延性と組織”, 鐵と鋼, 第68卷, 第9號, pp. 1147~1158.
- (4) 김정규, 1982, “複合組織鋼과 自動車輕量化”, 대한기계학회지, 제22권, 제1호, pp. 2~8.
- (5) 서창민, 1987, “點溶接 構造의 疲勞強度 및 壽命推定法”, 대한기계학회지, 제27권, 제5호, pp. 413~420.
- (6) 조용환, 1983, “自動車用 高張力鋼板(1)”, 대한기계학회지, 제23권, 제2호, pp. 102~110.
- (7) 中尾嘉邦, 大重廣明, 野井伸吾, 西泰彦, 1987, “溶

接熱影響部における低焼入性の生成の要因”, 日本溶接學會論文集, 第5卷, 第3號, pp. 410~422.

- (8) 須藤正俊, 野村伸吾, 1982, “高强度薄鋼板のスポット熔接性” 鐵と鋼 第68卷, 第9號, pp. 286~294.
- (9) 柳炳吉, 姜春植, 1987, “Galvanized Steel의 點熔接성에 관한 연구”, 대한용접학회지, 제5권, 제1호, pp. 64~71.
- (10) JIS-Z 3138-1983, スポット熔接継手の疲勞試驗方法.
- (11) R.M. Rivett; “Assessment of Resistance Spot Welds in Low Carbon and High Strength Steel Sheets”, SAE 830126, pp. 1~10.
- (12) 長江守庸, 加藤昭彦, 1982, 高强度薄鋼板の疲勞強度, 鐵と鋼, 第68卷 第9號, pp. 304~310.
- (13) 金楨圭, 宋森弘, 李漲鉉, 1982, “鋼의 微視 및 巨視的 破壞舉動에 미치는 第二相形態의 研究”, 대한기계학회논문집, 第6卷, 第3號, pp. 239~246.
- (14) 康仁燦, 金錫胤, 1982, “熔接工學” 成敗社, p. 96.