

스테인리스강과 탄소강 용접부의 부식거동 해석

권재도* · 이우호** · 김길수*** · 장순식*** · 진영준****

Corrosion Behavior Analysis of the Weld Joint
between Stainless Steel and Carbon Steel

J. D. Kwon*, W. H. Lee**, K. S. Kim***, S. S. Jang*** and Y. J. Jin****

Key Words : Galvanic corrosion(갈바닉 부식), Weld joints(용접부), Electrochemical polarization experiments(전기화학 분극실험), Corrosion rate(부식률),

Abstract

In order to investigate the quantitative behavior of galvanic corrosion in weld joints between stainless steel and carbon steel, electrochemical polarization experiments were performed at pH4, pH7 and pH10 with boric acid concentration 4000ppm, and water temperature were selected as 35 °C and 60 °C.

As the results, the galvanic corrosion phenomena of carbon steel weld material at 60 °C was revealed 2½ times higher corrosion rate than that at 35 °C condition. The corrosion rate of stainless steel was almost independent of the variation of pH. The significant corrosion rates of carbon steel and the weld joint of carbon-carbon steel were observed at pH 4.

1. 서 론

플랜트 특성에 따라 설비는 내식성과 기계적 성질이 우수한 스테인리스강을 소재로 사용하고 있으나 환경 조건, 재료특성 및 경제성 등을 감안하여 꼭 필요한 부분만 스테인리스강을 사용하고 나머지는 탄소강을 사용하는 경우가 있으며, 원자력발전소의 가압기 등 주요기기도 탄소강에 스테인리스강을 라이닝하여 사용하고 있고, 주요기기와 배관의 연결부위도 탄소강과

스테인리스강을 용접하여 사용하고 있다.¹⁾

스테인리스강 플랜지에 탄소강 볼트를 사용할 경우 선택적 부식을 받으므로 갈바닉 부식(Galvanic Corrosion)에 의해 부식에 민감한 탄소강 볼트가 손상되는 사례가 일어나고 있어 스테인리스강과 탄소강을 용접하여 사용할 경우에도 탄소강이 부식 가속화 현상인 갈바닉 부식(Galvanic Corrosion)이 발생할 가능성이 있다.^{2~5)}

일반적으로 갈바닉 부식에 따른 부식의 가속화 정도는 부식조건 또는 분위기에 따라 큰 차이가 나타난다.

※ 1998년 12월 29일 접수

* 정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학부

** 정회원, 원자력안전기술원 안전규제부

*** 비회원, 원자력안전기술원 안전규제부

**** 비회원, 충주산업대 기계설계과

• 이우호 : k231LWH@kins.re.kr

이와 같은 갈바닉 부식에 따른 내식성을 평가하는 방법으로는 단시간에 정량적으로 부식량의 확인이 가능한 전기화학적 방법이 개발됨에 따라 많은 연구가 수행되고 있다.^{3~5)}

따라서 본 연구에서는 스테인리스강과 탄소강의 이중금속 용접부에 대해 전기화학적 방법을 이용하여 부식진행 정도를 평가하기 위하여 스테인리스강 및 탄소강 동종의 용접부와 각각의 모재와의 부식진행 정도를 비교 평가하였으며, 이 결과를 발전소, 화학플랜트 등 스테인리스강과 탄소강의 용접구조물 평가 및 설계에 활용하고자 한다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험용 재료 및 용접조건

본 연구에 사용된 연구용 재료로서 모재인 스테인리스강(ASTM A-240)과 탄소강(ASTM A36)의 화학적 성분 및 기계적성질은 Table 1과 같으며, 용접부의 화학적 성분은 Table 2와 같다.

용접은 TIG 및 SMAW 용접을 자격인증된 용접사가 실시하였고, 용접봉은 ER-308L, ER-309L 및 E7016을 사용하였으며, 시험편의 용접 조건은 TIG의 경우 65.7A, 용접봉 직경 2.4 ϕ , 용접속도 1.4cm/min으로 하였고, SMAW의 경우 110A, 용접봉 직경 3.2 ϕ , 용접속도 1.56cm/min으로 하였다.

2.2 실험 및 실험방법

이중금속 용접부에 대한 부식거동을 파악하기 위해 본 연구에 사용된 전기화학적 분극 실험장치(E.G.&G. Princeton Applied Research의 Model 273A)의 계통도를 Fig. 1에 나타내었으며, 분극실험

시 표준전극(Reference Electrode)은 SCE(Saturated Calomel Electrode)를 사용하였다.

본 연구에 사용된 시험편 형상은 ASTM G5-72규격에 따랐으며, 시험편은 두께 $t=5\text{mm}$, 단면적 $13 \times 13\text{mm}$ 로 하였다.⁶⁾ 그리고 시험편의 한 면을 경납을 사용하여 전선과 연결하였으며, 시험편 주위는 절연성 피복재인 에폭시 수지로 마운팅한 후 시험편의 표면을 에머리 페이퍼(Emery Paper)로 #1500까지 폴리싱하고 산화알루미늄으로 연마한 후 아세톤과 알콜로 세척한 다음 실험을 수행하였다.

시험용액은 붕소농도를 4000 ppm으로 일정하게 유지한 후 수용액 온도를 35 $^{\circ}\text{C}$, 60 $^{\circ}\text{C}$ 와 pH 농도를 4, 7, 및 10으로 변화를 주면서 수용액 온도와 pH 변화에 따른 이중금속 용접부의 부식 손상정도를 검토하였다.

분극실험은 용액 1000 ml를 분극조 내에 채우고 대조전극(Counter Electrode), 시편전극(Working Electrode) 및 모세관(Luging Capillary)을 설치한 후 약 5분 정도 유지한 다음 주사속도(Scan Rate)를 0.5 mV/sec로 동일한 조건하에서 수행하였다. 그리고 수용액의 온도는 열판을 이용하여 오차범위 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 로 가열하였으며, 농도 및 pH를 일정하게 하기 위해 Magnetic Stirrer에 의한 교반작업을 병행하면서 실험을 수행하였다.

연간 부식속도는 아래의 식(1-1)을 사용하였고, I_{CORR} 은 분극실험장치에서 계산된 값을 적용하였으며, 3회 실험결과를 평균하여 적용하였다.

$$\text{Corrosion Rate}(mmpy) = C \frac{I_{\text{CORR}}(EW)}{\quad} \quad (1-1)$$

2.3 조직관찰

탄소강-스테인리스강 용접부의 조직을 관찰하기 위

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of ASTM A-240 and A36

재 질	Composition, wt. %							Yield Point	Tensile Stress	Elongation
	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni			
A-240	0.05	0.30	0.045	0.13	0.52	18.30	8.40	276 MPa	627 MPa	66.2 %
A 36	0.15	0.03	0.150	0.61	0.27			270 MPa	440 MPa	27 %

Table 2. Chemical composition of undiluted weld metal (%)

용접부 성분	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Cu
E 309L	0.02	0.004	0.019	1.12	0.78	22.79	12.60	0.03	0.05	0.06
E 308L	0.02	0.002	0.020	0.88	0.68	19.25	9.75	0.02	0.04	0.04
E 7016	0.07	0.001	0.022	1.14	0.47	0.03	0.03	-	0.012	-

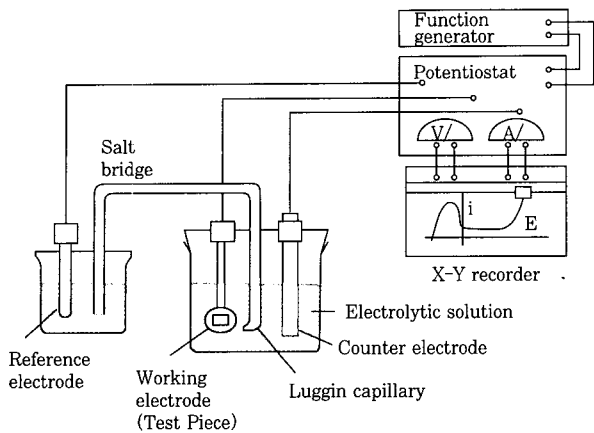
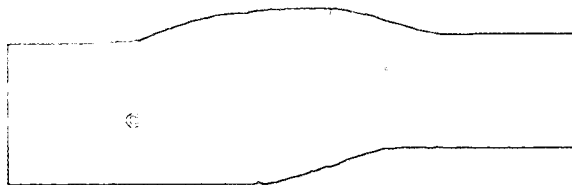


Fig. 1 Diagram of electrochemical polarization apparatus



A : 용착금속 C : 탄소강 D : 스테인리스강 B, E : 본드부

Fig. 2 Sectional view of carbon-stainless steel welding material

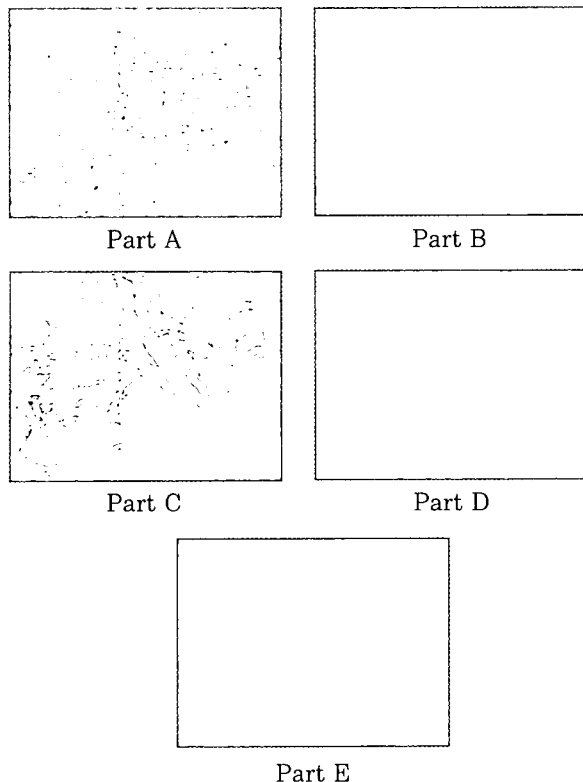


Fig. 3 Microstructure of carbon-stainless steel welding material(400X)

하여 용접부의 단면을 절단하여 5%의 나이탈 용액과 HCl+HNO₃ 용액으로 에칭시켜 금속 광학현미경으로 조직을 관찰한 결과를 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 2에서 A 부분은 용착금속, B 부분은 용착금속과 탄소강의 경계부, C 부분은 탄소강, D 부분은 스테인리스강 그리고 E 부분은 용착금속과 스테인리스강의 경계부를 각각 나타내고 있다.

Fig. 3에서 A 부분, D 부분 및 E 부분은 급냉된 오스테나이트 조직으로 주상정 조직을 나타내고 있으며, 탄소강 모재인 C부분은 펄라이트와 페라이트 조직이 나타남을 관찰할 수 있다.⁷⁾ 특히, 탄소강과 스테인리스강 경계부인 B 부분에서는 두 재료의 경계층을 뚜렷하게 관찰할 수 있었다.

3. 실험결과 및 해석

3.1 일정온도와 pH 하에서 용접재질에 따른 분극곡선

붕소농도 4000ppm, 수용액 온도 35℃에서 pH를 4, 7 및 10으로 변화시켜 가면서 5종류의 시편에 대해 분극실험한 결과의 대표적인 그래프를 비교해서 나타낸 것이 Fig. 4, 5 및 6으로, Fig. 4의 pH 4 경우는 탄소강 모재 및 탄소강-탄소강 용접부를 동일 전위 상에서 비교시 스테인리스강 모재 및 스테인리스강-스테인리스강 용접부 보다 더 큰 전류밀도를 나타내는 것으로 보아 일반적 부식경향과 일치함을 보였다.

스테인리스강 및 스테인리스강-스테인리스강 용접부는 부동태의 형성 및 부식의 진행 정도가 안정적으로 진행되는 반면에 탄소강 및 탄소강-탄소강 용접부는 노이즈의 동반과 동시에 부식의 진행이 빨라지고 부식량이 증가되는 것을 알 수 있다.

탄소강-스테인리스강 용접부의 경우는 탄소강의 영향으로 부식이 먼저 시작은 되지만 스테인리스강의 영향으로 오히려 탄소강 모재 보다도 부식정도는 더 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 결과 탄소강-스테인리스강 용접부는 이종금속에 의한 부식 위험성이 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5의 pH 7 경우는 각 시편에 따른 부식전위가 pH 4의 경우만큼 많은 차이는 보이지 않았고, 이종금속인 탄소강-스테인리스강 용접부에서 부식의 가능성이 크지 않은 것으로 나타났고, Fig. 6의 pH 10 경우는 pH 7에 비해 뚜렷한 부동태 영역이 존재하나 탄소강 모재를 제외한 나머지의 시편들은 자연부식전위 E_{corr}이 pH 7에 비해 다소 귀한(Noble한) 방향에 존재

해 있다.

Fig. 4, 5 및 6을 비교해 보면 스테인리스강 모재와 스테인리스강-스테인리스강 용접부의 경우는 강 알카리성 경우가 중성보다 내식성이 다소 떨어지나, 산성은 유사하게 나타났다.

Fig. 7, 8 및 9는 붕소농도 4000ppm, 수용액 온도가 60℃인 상태에서 pH를 4, 7 및 10으로 변화시키면서 5종류의 시편에 대해 분극실험한 결과로서, 산성쪽에서는 탄소강계의 부식정도와 스테인리스강계의 부식정도의 차이가 현저하며, 특히 탄소강계의 재료들

이 부식정도가 심함을 알 수 있다. 전체적인 부식거동은 35℃상태와 유사한 경향을 나타내고 있지만 부식률은 온도상승에 따라 더 증가함을 알 수 있었다.

3.2 부식속도 계산 결과

Fig. 10 및 11은 붕소농도 4000ppm, 수용액 온도 35℃ 및 60℃의 조건에서 pH를 4, 7 및 10으로 변화시키면서 각각의 조건 및 재료에 따라 연간 부식속도의 변화 추이를 나타낸 그림이다.

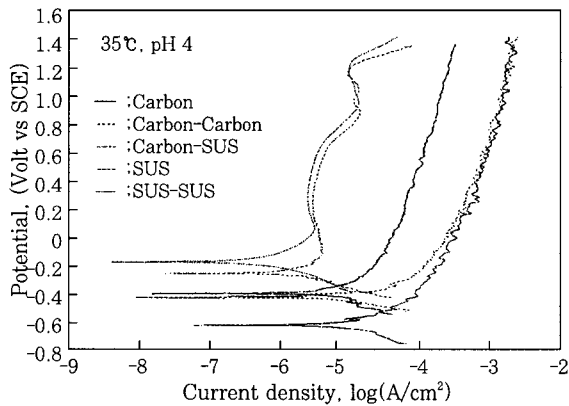


Fig. 4 Polarization curve at pH 4, 35℃

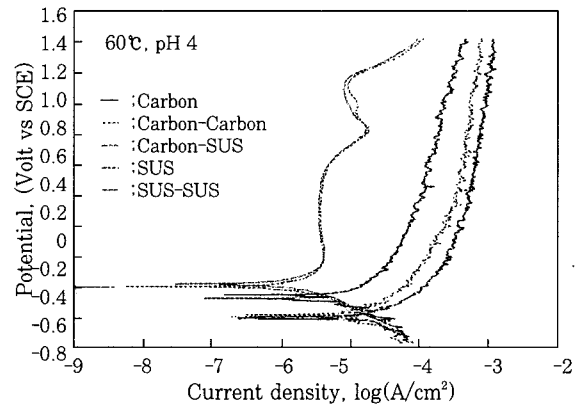


Fig. 7 Polarization curve at pH 4, 60℃

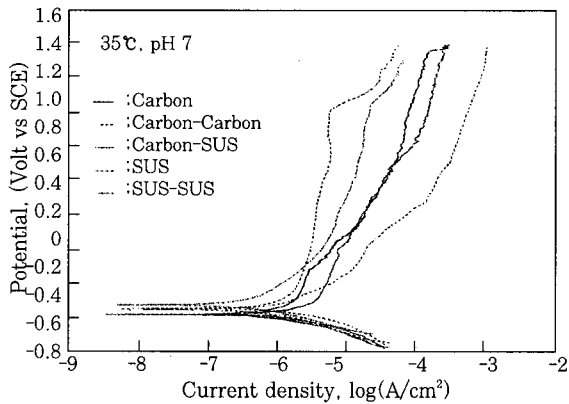


Fig. 5 Polarization curve at pH 7, 35℃

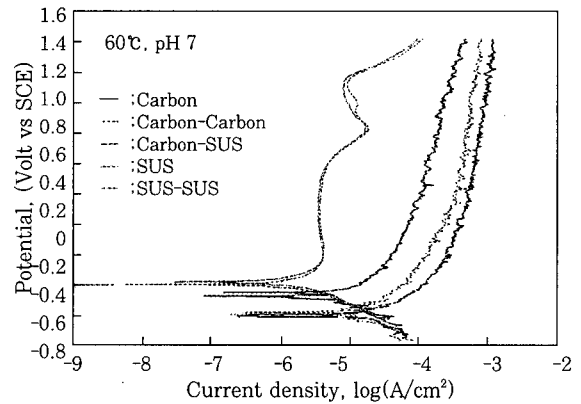


Fig. 8 Polarization curve at pH 7, 60℃

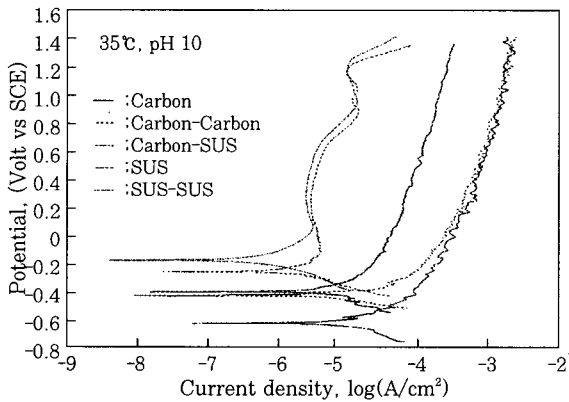


Fig. 6 Polarization curve at pH 10, 35℃

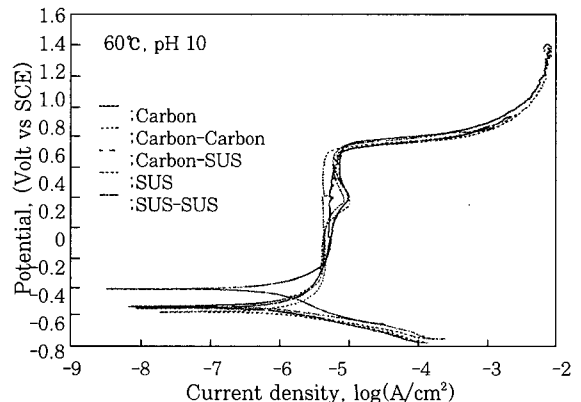


Fig. 9 Polarization curve at pH 7, 60℃

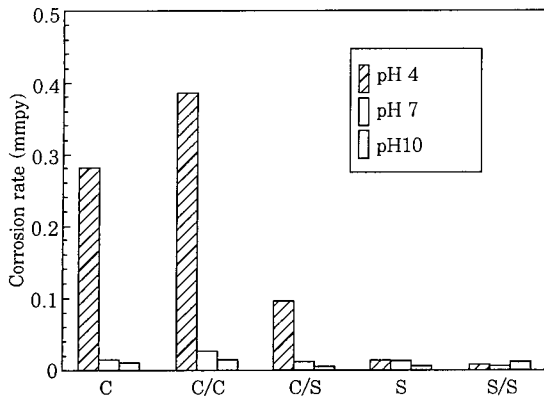


Fig. 10 Corrosion rate VS. pH variation at 35°C

수용액 온도 35°C에서 5종류의 시편에 대해 pH 4, 7 및 10으로 변화시키면서 연간 부식속도를 계산한 결과는 Fig. 10으로서 탄소강 모재 및 탄소강-탄소강 용접부의 경우 산성쪽으로 갈수록 부식속도가 현저히 증가되고, 알칼리성쪽으로 갈수록 부식속도가 안정됨을 보이고 있고, 탄소강-스테인리스강 용접부는 스테인리스강 모재 및 스테인리스강-스테인리스강 용접부와 큰 차이는 보이지 않고 있다.

수용액 온도 60°C에서 pH 4, 7 및 10으로 변화시키면서 연간 부식속도를 계산한 결과는 Fig. 11로서 35°C의 경우와 유사한 경향을 보이고 있으나, pH 4에서 탄소강 모재 및 탄소강-탄소강 용접부의 경우는 부식속도가 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10 및 11에서 탄소강계는 온도상승에 따라 부식속도가 많이 증가하나, 스테인리스강계는 온도변화에 따른 부식속도의 차이가 거의 없음을 알 수 있고, 탄소강의 경우 35°C 보다 60°C가 약 2.5배 부식량이 증가하였음을 알 수 있다.

4. 결 론

스테인리스강과 탄소강 이종 용접부의 전기화학분극 실험을 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) pH 변화에 대한 부식속도를 비교하여 본 결과, 스테인리스강 모재 및 스테인리스강-스테인리스강 용접부는 pH 4 및 pH 10에서 부식 진행정도가 유사하게 나타났고, 탄소강 및 탄소강-탄소강 용접부는 pH 4인 산성에서 부식의 진행정도가 매우 심하게 나타났다. 따라서 산성분위기에서 장시간 사용하는 장소에서는 스테인리스강과 탄소강을 용접하여 사용하지 않는 것이 효과적이라 판단된다.
- 2) 60°C에서 탄소강의 부식속도는 35°C보다 약 2.5배로 나타났으므로, 스테인리스강과 탄소강을 용접하여 사용할 경우 사용 온도 조건이 고려되어야 함을 알 수 있었다.

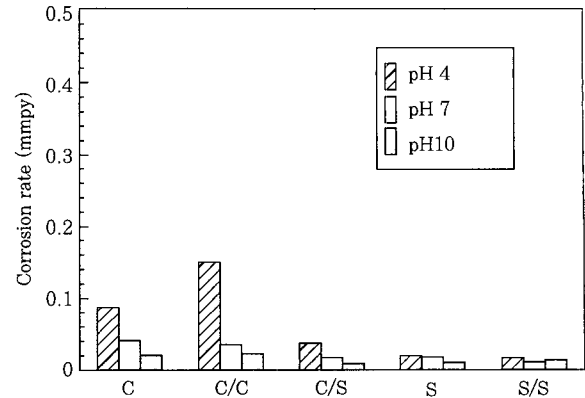


Fig. 11 Corrosion rate VS. pH variation at 60°C

3) 탄소강-스테인리스강 용접부는 부식정도가 탄소강 및 탄소강-탄소강 용접부와 스테인리스강 및 스테인리스강-스테인리스강 용접부의 중간특성을 띄고 있고, 탄소강의 영향으로 부식이 먼저 시작되지만 스테인리스강의 영향으로 오히려 탄소강 모재 보다도 부식정도가 더 작아짐을 알 수 있었고, pH 10인 강알칼리성에서는 5종류의 시편 모두 부식 진행정도가 유사하게 나타났다. 따라서 본 연구의 결과 알칼리성 분위기에서는 부식속도 차이가 적으므로 스테인리스강과 탄소강을 용접해서 사용하여도 부식에 의한 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

4) 실제 현장에서 틈새내 pH 감소나 부식생성물 등에 의한 갈바니 부식영향은 크다고 판단되나 본 실험의 조건에서는 감안하지 않았으며, 추후 세부 조건에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 고리 1호기 최종안전성분석보고서, 한국전력공사, pp. 5.2.61-64
2. 김대용, 윤병하, 1994, "금속전기화학의 이론과 응용", 형설출판사, pp. 147-164
3. Denny A. Jones, 1991, "Principles and prevention of corrosion", pp. 4~326.
4. H. P. Hack, 1987, Metal Handbook, Vol. 13, Corrosion, 9th ed., ASM, Metals Park, OH, pp. 234-236
5. M. G. Fontana, 1986, Corrosion Engineering, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, pp. 46-49
6. ASTM G5-72, 1972 "Standard Reference Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurement", pp.1-11.
7. 김정근, 이순린, 1986, 금속컬러조직, 장왕 출판사.