

강교량 필렛용접이음부의 루트부 피로파괴 방지

Prevention of Fatigue Failure at Root Region in the Fillet Welded Joint of Steel Bridge

임 청 권¹⁾ · 박 문 호²⁾

Lim, Cheong Kweon Park, Moon Ho

요 약 : 본 연구는 용접지단부의 후처리 결과, 상대적으로 피로강도가 낮아진 용접루트부에 초점을 맞추었다. 용접루트부의 피로강도를 향상시키기 위하여 부분용입용접을 실시한 십자 리브 시험체와 보통의 필렛용접이음 십자 리브 시험체를 대상으로 피로시험을 행하였다. 그 결과, 부분용입용접을 한 시험체이더라도 용접그대로인 시험체의 경우는 보통의 필렛용접이음과 거의 동등한 피로강도를 보였다. 이것은 피로파괴가 지단부로부터 시작되었기 때문에 용접루트부의 보강체인 부분용입용접의 효과가 나타나지 않았다고 생각된다. 이에, 지단부의 피로파괴를 막기 위해 지단부를 후처리시킨 부분용입용접이음 시험체를 대상으로 피로시험을 한 결과, 보통의 필렛용접이음보다 상당한 피로강도 향상을 보였다. 그러므로 본 연구는 지단부로부터 피로균열 발생을 억제한다면, 부분용입용접이음으로 루트부의 피로강도를 향상시켜, 결국 전체적인 파단수명을 향상시킬 수 있을 것으로 생각한다.

ABSTRACT : There was extreme improvement in the processing result of weld toe, but there is possibility that the fatigue failure occurs from the weld root part where the fatigue strength became low relatively. This study did the fatigue test at the cross rib specimens which implemented a partial penetration weld to improve the fatigue strength of the weld root part. As a result of the fatigue test of the partial penetration weld and the fillet weld specimens, almost the same fatigue strength appeared. Because the fatigue failure began from toe, there was not a reinforcement effect in the weld root part by the partial penetration weld. So, it examined fatigue strength at the partial penetration welding specimens which processed toe to stop the fatigue failure of toe part. As a result, there was big fatigue strength improvement from the partial penetration weld than the fillet weld. Therefore, if fatigue crack occurrence can be restrained from toe, it thinks that the fatigue strength of the root part can improve by the partial penetration weld, after all, it thinks that the overall fatigue life can improve.

핵심용어 : 필렛용접, 부분용입용접, 용접지단부, 용접루트부, 피로파괴, 용접개선형상

KEYWORDS : Fillet Weld, Partial Penetration Weld, Weld Toe, Weld Root, Fatigue Failure, Weld Groove Type

1) 정회원, 서일대학교 토목공학과 교수
2) 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2000년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

강교량 용접이음부의 피로파괴는 지단부에서 발생하는 경우와 루트부에서 발생하는 경우로 크게 나눌 수 있다⁽¹⁻³⁾. 그런데, 전편의 연구보고⁽⁴⁾에서 다른 바와 같이, 용접지단부는 표면의 후처리에 의해 상당한 피로강도 향상을 보였다. 그러나, 용접지단부의 피로강도 상승으로 인해 상대적으로 강도가 낮아진 용접루트부에서 피로파괴가 발생하는 경우도 발견되었다.

필렛용접을 이용한 용접루트부에는 루트면 슬리트와 같은 큰 미 용착부가 존재할 가능성이 높다⁽²⁾. 이러한 미 용착부의 존재가 높은 응력집중을 야기시키고 용접부에서의 높은 인장잔류응력과의 중첩에 의해 피로강도의 저하가 예상된다. 따라서, 지단부의 형상이 개선되고 지단부의 피로강도가 루트부보다 상대적으로 증가하면, 전 논문⁽⁴⁾에서 살펴 본 바와 같이 루트부에서 파괴가 발생한다. 그러므로, 루트부의 높은 응력집중을 저감시킬 수 있다면, 루트부로부터 균열이 발생하지 않고, 따라서 용접이음부 전체의 피로강도가 더욱 향상될 수 있음을 예상할 수 있다⁽⁵⁾.

이에, 본 연구는 루트부의 응력집중을 저감시키기 위한 방법으로, 완전 용입용접(full penetration weld)이나 부분 용입용접(partial penetration weld)을 고려하였고, 이것이 루트면의 슬리트 길이를 없애거나 작게 할 수 있으므로 루트부의 응력집중을 완화시킬 수 있으리라 생각된다.

완전 용입용접을 이용한 경우, 루트부의 미 용착부가 완전히 없어질 수 있으며, 용접결합이 없다면 피로균열의 발생은 없을 것이다. 그러나, 완전 용입용접에는 가우징(gouging)^(6, 7) 등의 작업을 동반해야 하기 때문에, 작업효율이 떨어지며 또한 상당한 경비를 요하게 된다. 그리고, 완전 용입용접에 따른 용접량도 증가하기 때문에, 용접 변형이나 잔류응력이 증가하게 된다⁽⁸⁾.

한편, 부분 용입용접을 이용한 경우, 루트부에 미 용착부가 남아 있을 가능성은 있지만, 가우징

의 작업을 생략할 수 있으며, 용접패스 수도 상당히 줄일 수 있어, 완전 용입용접에 의한 작업효율이나 경비 면과 비교한다면 상당한 장점을 지니고 있다.

그러므로, 본 연구는 부분 용입용접을 이용하여, 용접루트부의 응력집중을 저감시킬 수 있는 효과를 실험과 유한요소 해석을 통해 검토하였다. 그리고, 보통의 필렛용접이음을 이용한 경우와 비교·검토하기 위한 실험과 해석도 행하였다.

2. 부분용입용접과 필렛용접 이음의 피로강도 비교

본 연구에서 루트부 파괴를 방지하기 위하여 이용한 부분 용입용접이음과 보통의 필렛용접(fillet welding)이음의 피로강도를 비교하였다.

부분 용입용접이음은 루트면이 2mm와 6mm가 잔류하는 시험체를 대상으로 하고, 이들과 필렛용접이음을 비교·검토하였다. 시험체는 종리

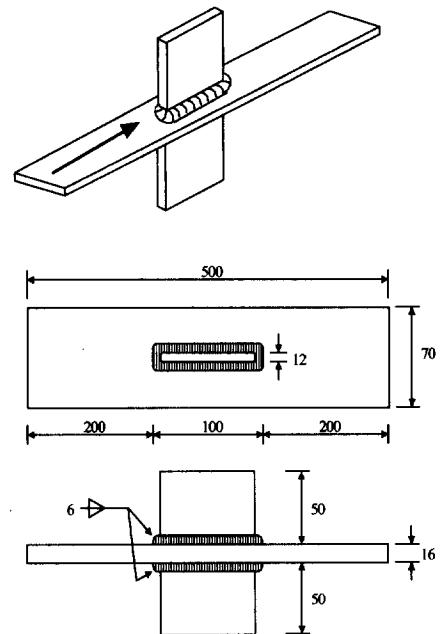
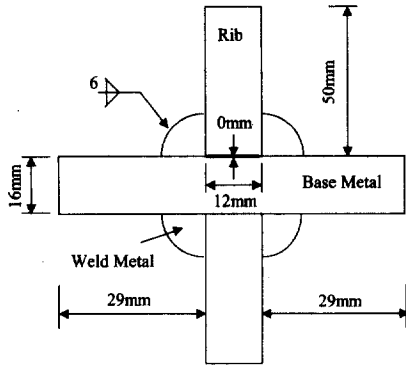
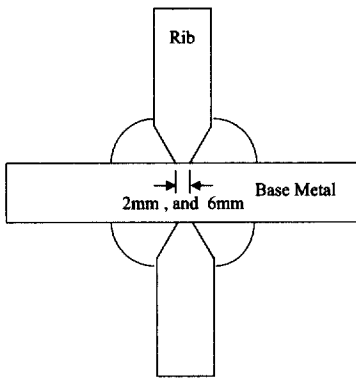


그림 1. 시험체 형상 및 치수



(a) 필렛용접의 루트부 형상



(b) 2mm 부분 용입용접의 루트부 형상

그림 2. 용접이음부 형상

브 십자이음형식이며 그림 1에 전체적인 시험체의 형상과 치수를 나타내었다. 그림 2는 그림 1 중의 화살표 방향인 용접선 방향으로 필렛이음과 부분 용입된 시험체의 단면형상과 용접 개선부 형상을 보인다. 필렛이음과 부분 용입용접이음 모두 용접그대로(as-weld)의 시험체를 이용하며, 용접패스 수도 동일하게 3패스로 하였고 루트부 간격은 모든 시험체에서 0mm로 하였다.

강재는 양쪽 모두 570 MPa급 고강도 강을

표 1. SM570강의 기계적 성질 및 화학적 성분

Mechanical Property			Chemical Property (%)								
Yield Stress	Tension Stress	Elongation	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
555 (MPa)	626 (MPa)	40 (%)	0.14	0.35	1.32	0.009	0.002	0.001	0.02	0.03	0.01

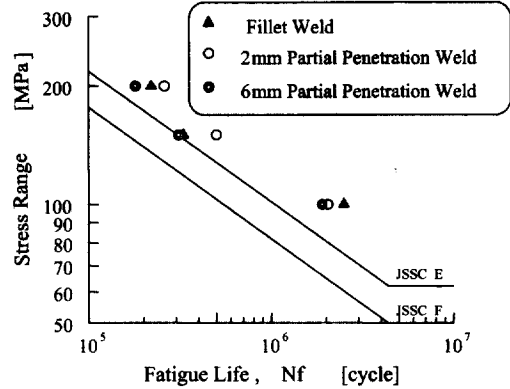


그림 3. 용접그대로 시험체의 피로시험결과

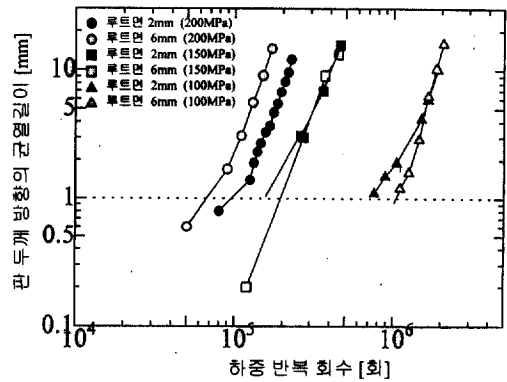


그림 4. 균열길이와 하중반복회수의 관계

사용하였으며, 표 1에 기계적 성질 및 화학성분을 나타내었다. 그리고 응력비는 0, 주파수는 4~9 Hz, 하중 파형은 정현파의 편진 인장 피로 시험을 행하였다.

피로시험 결과는 그림 3과 같다. 그림에서 6mm 잔류 부분용입 시험체가 대체로 낮은 피로 강도를 보였지만, 2mm 잔류 부분 용입 시험체나 보통의 필렛용접 시험체에 비교해서 큰 차이는 없었다. 또한, 그림 4는 부분 용입용접이음

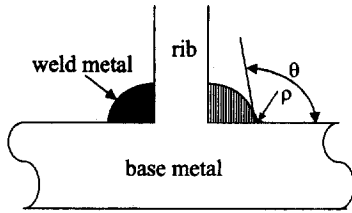


그림 5. 지단부의 기하학적 형상

그 원인을 밝히기 위해서는 더욱 다양한 개선 형상을 지닌 시험체에 대해 폭넓은 응력범위에서 실험을 수행할 필요가 있다고 생각한다. 그러나, 본 연구는 루트부에 남아있는 개선형상의 잔류량에 대한 문제보다는 부분 용입용접 자체에 의한 루트부 피로강도 향상을 밝히는게 목적이므로 6mm 잔류보다는 2mm 잔류 부분 용입용접이 효과를 보이는데 주목해서, 2mm 잔류 부분 용입용접에 대한 역학적 피로강도 향상 효과를 밝히고자 한다.

따라서 본 연구는 2mm 잔류 부분 용입용접이 음 시험체와 필렛용접이음 시험체를 대상으로 유한요소해석을 하여 응력집중계수를 구하였다.

그림 5와 같이, 형뜨기 실험으로부터 구한 두 시험체의 지단부에서의 곡률반경과 플랭크 각은 동일하였으며, 그 값은 곡률반경이 0.65, 플랭크 각이 126° 였다. 그리고 용접루트부는 그림 2와 같은 단면을 사용하였고, 전체적인 유한요소 해석 모델은 시험체가 대칭인 점을 감안하여 그림 6과 같이 1/8 모델을 설정하였다.

그림 7은 유한요소 해석 결과로부터 산정한 응력집중계수이다. 양쪽 시험체의 지단부와 용접 금속부에서 거의 동일한 응력집중 분포를 보였기 때문에, 그림 7은 용접루트부 근처를 확대하여 양쪽 시험체에서 모재와 리브가 만나는 점을 원점으로 루트면 슬리트방향 1mm까지의 응력집중 분포를 도시하였다. 루트부의 응력집중은, 루트부 간격 2mm의 부분 용입용접 이음에서 상당한 저감효과를 알 수 있으며, 이로부터 본 연구의 루트부 균열발생 방지를 위한 목적으로 2mm 잔류 부분 용입용접이음을 이용하는데 역학적 의미를 부여할 수 있다고 생각된다.

그러나, 본 연구는 피로균열이 용접 지단부로부터 발생한 것에 주의하여, 용접 개선형식이나 용입형식이 다른 부분 용입용접 이음이라도 피로균열이 지단부로부터 발생한다면, 보통의 필렛용접이음과 동등한 강도를 보인다고 생각한다.

따라서, 부분용입 용접이음의 피로강도 향상

그림 6. 유한요소 해석 모델 (1/8 모델)

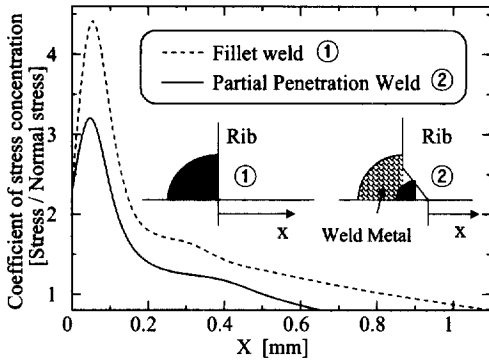


그림 7. 응력집중 계수의 비교

시험체에서 피로시험 도중에 행한 비치-마크 시험을 통해 구한 균열길이를 피로시험 회수와 비교한 대수 그래프이다. 그림 4에서, 100~150 MPa정도의 비교적 저응력범위에서는 용접 개선형상에 따른 차이가 거의 보이지 않으며, 200 MPa의 응력범위에서 6mm 잔류 부분 용입용접 이음 시험체가 상당히 빠른 균열진전형상을 보이고 있음을 알 수 있다.

표 2. 용접재료의 기계적 성질 및 화학적 성분

	용접 방법	용접 재료	기계적 성질			화학적 성분 (%)								
			항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	늘음 (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
쉬일링 용접	CO ₂ 반자동	MG-50	530	630	22	0.06	0.76	1.04	0.72	—	—	—	—	0.28
본 용접	피복아아크 용접	L-60G	555	626	32	0.14	0.35	1.32	0.009	0.002	0.001	0.02	0.03	0.01

표 3. 플랭크 각과 곡률반경의 측정결과

시험체	측정	곡률반경 (mm)			플랭크 각 (Deg)		
		max	min	mean	max	min	mean
As-weld (2mm 부분용입)		1.6	0.3	0.65	130	120	126
Peening (1 pass)		7	6	6.5	115	110	113
Peening (3 pass)		8	6	7	130	110	115
Grinding		9	4	7.25	160	140	158

효과를 검증하기 위해서는 지단부로부터 균열이 발생하지 않도록 지단부 처리를 한 후, 피로강도 향상효과에 대해서 검토할 필요가 있다고 생각한다.

3. 후처리한 부분용입 용접이음의 피로 강도

필렛용접이음과 부분 용입용접이음의 피로강도가 비슷한 점을 감안하여, 본 절에서는 용접 그대로인 2mm 잔류 부분용입 시험체와, 이 시험체를 지단처리한 시험체들의 피로강도를 비교하고자 한다.

3.1 시험체 및 실험의 개요

강재와 시험체는 그림 2의 2mm 잔류 부분 용입용접의 용접부 및 개선 형상과 동일하다. 본 시험체의 홈 형식으로는 용입 부족이 생길 가능성을 배제할 수 없기 때문에, 홈 내부는 CO₂ 반자동으로 쉬일링(sealing) 용접을 행한 후 본 용접을 행하였다. 용접 재료의 기계적 성질 및 화학적 성분을 표 2에 보인다. 또한, 용접 전에는 가스 버너로 50℃의 예열을 하였다.

본 연구의 지단처리 시험체는 전 논문⁽⁴⁾의 필렛용접이음을 이용한 실험 중, 루트부 파괴에 이른 피닝3패스(Peening 3pass) 및 피닝 1패스, 그라인딩(Grinding)처리 시험체, 용접 그대로의 시험체를 대상으로 부분 용입용접이음의 피로강도 향상을 평가하였다.

지단부의 기하학적 형상은, 그림 5와 같이 인상에 의한 형뜨기로부터 플랭크 각 θ 와 곡률반경 ρ 를 측정하였다. 표 3은 플랭크 각과 곡률반경의 측정결과이며, 유한요소해석 모델의 용접부 형상을 결정하는데 이용하였다.

표 3에서 곡률반경의 평균치를 비교하면, 지단처리를 한 시험체의 곡률반경이 용접 그대로의 시험체에 비해 상당히 큰 것을 알 수 있으며, 이로 인해 지단처리의 시험체에서 응력집중 계수가 낮아질 것으로 판단된다.

피로시험은 동적 최대 부하능력이 $\pm 294\text{KN}$, 최대 변위 $\pm 25\text{mm}$ 의 유압 서보 제어시험기를 이용하여 하중제어를 하였다. 재하는 편진 인장으로, 응력비는 거의 0, 하중파형은 정현(sine)파, 그리고 주파수는 8~16Hz로 하였다.

균열의 발생은, 앞선 시험과 동일하게 변형을 게이지의 변화를 조사함으로써 감지하였으며, 250

MPa 정도의 응력범위에서 소정의 반복횟수에 이르는 시험체를 대상으로 2단 다중 반복 응력시험(비치-마크 시험)을 행하여, 판 두께방향의 균열 길이와 표면 균열길이를 측정하였다. 또, 표면 균열에 대해서는 자분탐상법에 의해 길이를 측정한 후, 파단된 시험체의 비치-마크 시험결과와 비교·검토하였다.

3.2 피로시험 결과

부분 용입용접 이음의 시험체들에서, 용접 그대로의 시험체와 그라인딩 및 피닝 1 패스 처리 시험체의 피로파면을 그림 8에 보인다. 그림 8에서, 용접 그대로의 시험체와 그라인딩 처리 시험체는 지단부에서, 피닝 1 패스 처리 시험체는 루트부에서 각각 파단되어 있음을 알 수 있다.

그림 9는 부분 용입용접의 용접 그대로인 시험체와 각각의 지단처리를 행한 시험체의 피로시험 결과를 JSSC 피로설계 지침에 의한 피로설계 곡선과 함께 비교한 것이다. 그리고 전 논문⁽⁴⁾에서 밝힌 보통의 필렛용접이음에서 피닝1패스와 피닝3패스로 지단부처리를 한 시험체의 피로강도를 그림 중에 검은 마킹처리를 하여 본 논문의 부분 용입이음 시험체와 같이 비교하였다.

그림 9에서 알 수 있듯이, 필렛용접에서 피닝 처리를 한 시험체보다는 2mm 부분 용입용접에서 피닝처리를 한 시험체의 피로강도가 많이 향상된 것을 알 수 있다. 그리고, 부분 용입시험체 중에서도 특히 피닝 3패스 처리 시험체는 500만 회에서도 파괴되지 않은 점으로 판단하여 A등급 이상을 만족하고 있었다.

한편, 피닝 1 패스 처리 시험체는 약 250 MPa 정도의 응력범위에서 루트파괴에 도달한 경우도 있었다. 부분 용입용접은 루트부에서의 균열 발생을 막기 위해 도모된 것이므로, 루트부에서 균열이 발생된 경우라도 응력집중이 개선되어 필렛용접의 피닝 1패스와 비교하여 용접부의 피로 발생수명이 상당히 증가하였다면, 이것도 피로강

(a) As-weld (Toe Failure)

(b) Grinding (Toe Failure)

(c) Peening 1 pass (Root Failure)

그림 8. 부분용입용접이음 시험체들의 피로파면

도가 향상되었다고 말할 수 있겠다.

그리고 부분 용입용접된 피닝 1패스 처리 시험체가 루트파괴를 일으킨 이유를 밝히기 위해 매크로 시험과 마이크로스코프를 이용하여 루트부의 형상을 정밀 관찰하였다.

그림 10은 피닝 1패스 처리 시험체의 매크로 시험에 의한 루트부의 형상이다. 이 그림의 타원으로 표시된 부분에서, 루트부의 홈에 남아있는 2mm의 잔류 루트면 외에, 미소하지만 용접봉이 루트까지 들어가지 않았기 때문에 생긴 미 용착

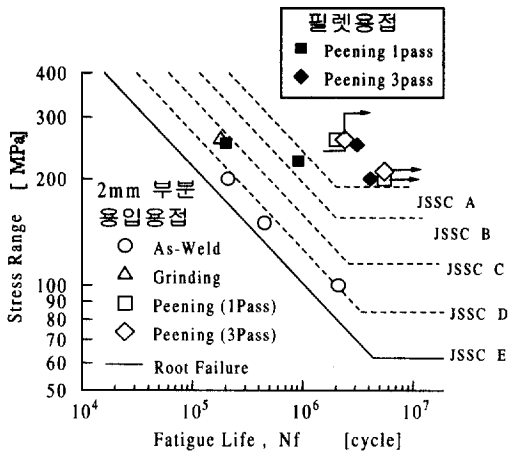


그림 9. 후처리한 시험체의 피로시험결과

있으나, 루트부에 발생하기 쉬운 여분의 미 용착부가 생기지 않도록 홈 형식이나 용접봉의 선택에 매우 주의를 기울일 필요가 있다고 생각한다.

4. 결론

루트부의 피로파괴를 막기 위해 본 연구에서 고안된 부분 용입용접이음을 이용하여 피로강도를 향상시키기 위해서는, 우선 지단부의 피로파괴를 방지해야만 향상 효과를 거둘 수 있다는 것을 알았다.

지단부로부터 균열이 발생한 경우는 부분용입 용접과 필렛용접 이음의 피로강도는 거의 동일한 정도였다. 하지만, 지단부에서 피로균열이 발생하지 않도록 지단부에 피닝처리를 한 시험체는 루트부의 피로강도가 부분 용입용접에 의해 상당히 향상되었고, 결과적으로 전체적인 피로강도가 거의 몇 등급이상, 혹은 A등급이상 향상되는 효과를 나타내었다.

그러므로, 지단부 처리를 한 시험체들에서 보여지는 루트부의 피로파괴를 방지하기 위하여, 루트부의 용입 형상을 변화시킨 부분용입 용접이음을 결들인다면 상당한 피로강도 향상 효과를 거둘 수 있다고 생각한다.

참고 문헌

- (1) 太田省三郎, 石塚桂太: 荷重非伝達すみ肉溶接継手の疲勞におけるルート破壊の防止, 日本溶接學會論文集, No. 14-4(1996), pp. 773~780.
- (2) Yamada, K. and Hirt, M.A. : Fatigue crack propagation from fillet weld toes, ASCE, Vol. 108, No. ST7, 1982.
- (3) 上田幸雄, 福田敏二, 中長啓治: 初層すみ肉溶接における残留應力と割れの形態について, 日本溶接學會誌, No.44-3(1975), pp. 250~257.
- (4) 임청권, 박문호: 필렛용접이음부의 후처리에 따른 피로강도 향상 메커니즘의 연구, 한국강

그림 10. 피닝 1매스 부분용입용접 이음부의 매크로 시험관찰도

부가 보여진다. 이러한 여분의 잔류 미 용착부에 의해, 부분 용입용접이음에서 루트파괴가 발생하였다고 생각한다. 따라서, 지단처리에 의한 용접이음부의 피로강도 향상을 도모하기 위해서는, 본 연구가 이용한 부분 용입용접이음이 상당한 효과가

- 구조학회 논문집, 제 11권, 3호, 1999. 6.
- (5) 三木千壽, 沱恒達, 田中雅人 : すみ肉溶接部の疲勞強度とルート部の缺陷について, 構造工學論文集, Vol. 36A, 1990.3, pp. 959-966.
- (6) 渡辺正紀, 佐藤邦彦 : 溶接力學とその応用, 朝倉書店 (1971).
- (7) KH委員會 : 調子津高張力鋼 (HT-100)溶接工作法研究報告書, 川崎重工業株式會社, 1988.
- (8) 임 청권, 박 문호 : 용접상세의 변화에 따른 용접이음부의 잔류응력에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 제10권, 제10호, 1998. 12.

(접수일자 : 1999년 9월 3일)