

# 인장시험체 맞대기 용접부의 피로강도

## Fatigue Strength of Tensile Specimen with Butt Welded Joints

조 재 병\*  
Jo, Jae Byung

### Abstract

Fatigue tests were carried out for butt welded joints with SM520-TMC steel plate with thickness between 20mm and 80mm . The test results were analysed statistically and the effect of plate thickness on the fatigue strength investigated. The fatigue strengths based on nominal stress range satisfy the requirement of the standards. Due to misalignment of the specimens, the measured stresses are higher than the nominal stresses especially for 20mm thick plates. If fatigue strengths are evaluated based on the measured stresses, then the fatigue strengths are greater than those based on nominal stresses. The results show that the thickness effect is similar to the formula proposed by Gurney.

**key words** : SM520TMC, butt welded joint, fatigue test, fatigue strength, thickness effect

### 요 지

축방향 인장응력이 작용하는 두께 20-80mm의 SM520-TMC강 맞대기 용접부를 대상으로 피로시험을 수행하였다. 시험 결과를 통계 분석하여 두께의 변화 및 용접방법에 따른 피로 강도를 검토하였다. 공칭응력을 기준으로 한 피로강도는 국내외의 기존 기준을 만족한다. 두께가 작은 경우에는 시험체의 제작오차에 따른 휨응력이 상당히 큰 것으로 나타났다. 측정값을 기준으로 한 피로강도는 공칭응력을 기준으로 한 경우보다 두께가 작은 20mm 경우 크게 증가하였다. 피로강도의 감소는 Gurney의 제안식과 유사한 것으로 나타났다. **핵심용어** : SM520TMC, 맞대기 용접부, 피로시험, 피로강도, 두께영향

### 1. 서 론

최근 장대 교량과 같은 대형 강구조물에 강도가 높고 두께가 큰 강재가 요구되고 있다. 그동안 일반적으로 사용해오던 종래의 용접구조용압연강재(KS D3515)를 고강도 극후판으로 제작하여 사용할 경우에는 용접성이 떨어져 용접부 균열, 용접결함, 열영향부의 인성 저하 등의 문제가 발생할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 강도, 용접성, 용접부 인성 등 재료의 성질이 우수하고, 경제적으로도 타당성이 있는 구조용 강재가 요구된다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 국내에서도 실제 구조물에 사용할 수 있는 TMC강을 생산, 공급하고 있다. TMC강은 열가공 제어공정(Thermo Mechanical Control Process)을 거쳐서 만든 강으로써 탄소당량이 작고, 조직이 미세하

며, 강도 및 인성이 좋다. 종래의 강에 비해 용접성이 뛰어나고, 취성과파괴에 대한 저항성능이 우수하며, 극후판 강재에서도 고강도, 고인성을 확보할 수 있다. 강판의 두께가 40mm를 초과하는 경우에도 종래의 강재와는 달리 강재의 강도 저감이 없다.

국내에서 생산된 TMC강의 우수한 성능은 그동안 진행된 TMC 강의 용접성에 관한 연구(김영식, 1990), 건축구조용 TMC 극후강재의 성능에 대한 시험적 연구(김동규, 1991), TMC 강의 피로 특성에 관한 연구(용환선, 1995, 1996) 등 여러 시험과 연구를 통하여 입증된 바 있다. 그러나 TMC강을 반복하중이 작용하는 교량과 같은 구조물에 적용하기 위해서는 TMC강을 사용한 교량의 구조상세에 대한 피로 거동을 시험적으로 확인하여야 할 것이다(대한토목학회, 2003).

\* 정희원, 경기대학교 토목환경공학부 부교수, 공학박사 (E-mail: jbj@kyonggi.ac.kr)

TMC강은 재료의 우수한 특성 때문에 두께 40mm 이상의 부재에 많이 사용될 것으로 예상된다. 현재 세계 각국에서 사용하고 있는 피로설계기준은 주로 두께 25mm 이하의 시험체에서 얻은 피로시험결과에 근거하고 있다. 그러나 오래 전부터 강판의 두께가 증가함에 따라서 피로강도가 감소하게 될 가능성이 제기되었다. Gurney는 파괴역학적 방법에 의한 분석과 피로시험 결과 등을 근거로 판의 두께가 피로강도에 미치는 영향이 상당히 클 수 있다고 지적하였다(Gurney,1979). 또한 두께 50mm까지의 강판을 사용한 피로시험 결과 얻은 몇몇의 피로강도곡선으로부터 판 두께의 영향을 고려하여 피로강도를 수정하는 식을 다음과 같이 제안하였다(Gurney, 1981).

$$S_r = S_{r,o} (t_o/t)^{0.25}$$

여기서  $t_o$  : 기준 판두께

$t$  : 시험체의 판두께

$S_{r,o}$  : 기준이 되는 두께의 강판을 사용하는 경우의 피로강도

$S_r$  : 두께  $t$ 의 강판을 사용하는 경우의 피로강도

Maddox는 두께 8-80mm의 맞대기용접 상세와 횡방향 보강재를 필릿 용접한 상세에 대한 제한된 숫자의 피로시험 결과로부터 하중 반복횟수 100만회에 대한 피로강도 값이 Gurney의 식과 잘 일치하는 것을 보여 주었다(Maddox, 1991). 이러한 연구 결과를 바탕으로 일본(피로설계지침)과 유럽(Eurocode,2003)에서는 강판의 두께 25mm 이상의 경우, 시험체 판두께에 대한 기준 판두께 25mm의 비를 각각 0.25승, 0.2승 한 값에 따라 피로강도를 감소시키도록 규정하였다.

이러한 연구결과를 해석적 방법에 의한 분석이거나 주로 필릿 용접부 상세를 대상으로 휨응력을 가하여 수행한 피로시험 결과를 근거로 하고 있다. 피로 강도는 용접 형상, 용접표면 개선, 용접방법 등에 따라 큰 차이를 보이므로 국내에서 교량에 처음 사용하게 되는 SM520-TMC 강의 경우에는 강교량의 대표적인 용접 상세 중 하나인 맞대기 용접부에 대해 시험을 통한 피로강도 검증이 있어야 할 것이다.

본 연구에서는 부재의 축방향으로 인장응력이 작용하는 두께 20-80mm의 SM520-TMC강 맞대기 용접부를 대상으로 하였다. 시험체 제작에 적용된 용접 방법은 극후판의 볼트이음이 실용적이지 못한 점을 감안하

여 현장용접에 적용할 수 있는 FCAW(플럭스코어드아크용접)를 선정하였다. 피로시험 결과를 통계 처리하여 판의 두께에 따른 피로강도를 중점적으로 검토하였다.

## 2. 피로시험

### 2.1 시험편

#### 2.1.1 형상 및 치수

피로 시험체는 맞대기 용접부가 용접축에 직각방향의 인장력을 받는 경우를 대상으로 설계하였다. 즉 인장강도 시험편과 유사한 형상으로 하되 시험편 중앙에 횡 방향으로 맞대기 용접부가 위치하도록 하였다. 시험장비의 용량과 크기를 고려하여 시험편의 상세와 치수를 다음 fig. 1과 같이 정하였다. 시험 단면의 폭은 두께의 1.5배가 되도록 하였으며, 맞대기 용접한 부분에 가능한 한 균일한 응력분포가 이루어지도록 그림 사이에 일정단면 구간을 충분히 두었다. 시험체는 2개의 판을 맞대기 용접한 후 절단, 가공하여 제작하였다. 모든 시험체의 앞면(용접 표면이 있는 쪽)에는 용접부 중앙을 중심으로 두께 20mm 경우 35mm, 두께 40-80mm 경우 45mm 떨어진 곳에, 그리고 뒷면(루트가 있는 쪽)에는 25mm 떨어진 곳에 각각 변형률 게이지 3개씩 부착하였다.

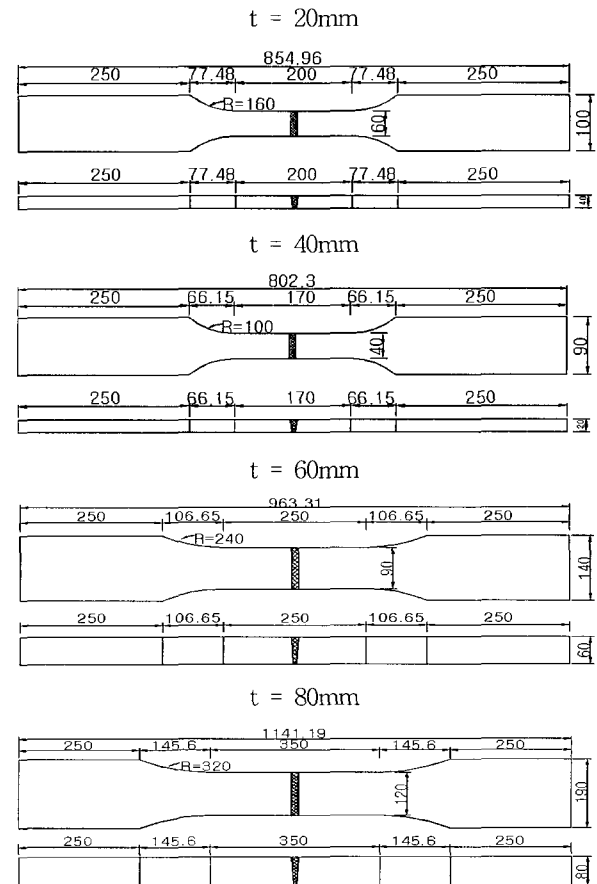


Fig. 1. 피로 시험편 형상

### 2.1.2 용접상세

용접법은 FCAW를 적용하였다. V 개선을 하였으며, 세라믹 백킹을 사용하였다. 용접부 상세는 table 1과 같다. 용접부 전면의 덧살과 뒷면의 루트부는 용접된 상태로 사용하였다.

### 2.1.3 재하

본 연구에서 사용된 피로시험기는 동적재하 200톤과 100톤의 재하능력이 있는 전기유압식 장비로 table 2와 같다. 재하 하중은 일정진폭의 정현파이며, 시험편에 축방향 인장력으로 작용하도록 하였다. 작용 하중에 의

한 단면 응력의 비  $R(f_{min}/f_{max})$ 는 0.1로 하였고, 하중재하속도는 시험기기의 능력과 시험환경을 고려하여 각 경우별로 6Hz~15Hz까지 적용하였다. 각각의 피로 시험편에 적용한 응력범위는 AASHTO(2002)의 피로 범주 B등급의 피로한계강도  $\Delta f_H$ 를 기준으로 각각 1.0배, 1.25배, 1.5배에 해당하는 크기가 되도록 하였다.

## 3. 시험결과 및 분석

### 3.1 피로시험 결과

피로시험 결과를 시험체 별로 나타내면 table 3과 같다. 응력범위와 파단까지의 하중 반복횟수, 파단에

Table 1. 용접상세의 치수

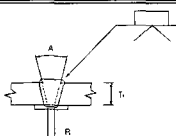
구분 기호	용접방법	시험체 판두께 (mm)	개선형상			
			R (mm)	A (°)	T1 (mm)	
F	FCAW (CO <sub>2</sub> )		20	10	30	20
			40	10	30	40
			60	10	30	60
			80	10	30	80

Table 2. 피로시험에 사용된 시험기기

구분	시험기 용량		제작회사
	정적시험	동적시험	
200톤 피로시험기	±300톤	±200톤, 20Hz	미국 MTS
100톤 피로시험기	±200톤	±100톤, 20Hz	일본 MHI

Table 3a. 피로시험 결과 (두께 20mm)

시험체 번호	응력범위 (MPa)		피로수명 (10 <sup>4</sup> 회)	초기균열 (위치)	비고
	공칭값	계측값			
20-F-1	109.8	125.3	400.0		RUN OUT
20-F-2	109.8	118.8	400.0		RUN OUT
20-F-3	109.8	121.9	109.6	앞면 지단	설치 오류
20-F-4	137.3	147.2	400.0		RUN OUT
20-F-5	137.3	152.4	400.0		RUN OUT
20-F-6	137.3	152.4	400.0		RUN OUT
20-F-7	164.7	182.9	125.1	모재부	모재결합
20-F-8	164.7	182.9	121.9	앞면 지단	
20-F-9	164.7	191.6	66.6	앞면 지단	

Table 3b. 피로시험 결과 (두께 40mm)

시험체 번호	응력범위 (MPa)		피로수명 (10 <sup>4</sup> 회)	초기균열 (위치)	비고
	공칭값	계측값			
40-F-1	109.8	116.2	400.0		RUN OUT
40-F-2	109.8	116.3	400.0		RUN OUT
40-F-3	109.8	115.4	400.0		RUN OUT
40-F-4	137.3	150.4	400.0		RUN OUT
40-F-5	137.3	142.4	165.8	앞면 지단	
40-F-6	137.3	134.7	317.3	앞면 지단	
40-F-7	164.7	175.8	47.2	루트 지단	
40-F-8	164.7	177.1	100.4	앞면 지단	
40-F-9	164.7	177.8	128.8	루트 지단	

Table 3c. 피로시험 결과 (두께 60mm)

시험체 번호	응력범위 (MPa)		피로수명 (10 <sup>4</sup> 회)	초기균열 (위치)	비고
	공칭값	계측값			
60-F-1	109.8	116.8	362.1	루트 지단	
60-F-2	109.8	118.1	133.7	루트 지단	
60-F-3	109.8	112.6	387.5	루트 지단	
60-F-4	137.3	144.5	381.6	앞면 지단	
60-F-5	137.3	142.4	148.0	루트 지단	
60-F-6	137.3	142.5	154.5	앞면 지단	
60-F-7	164.7	177.1	113.7	앞면 지단	
60-F-8	164.7	171.2	27.4	루트 지단	
60-F-9	164.7	174.7	105.4	앞면 지단	

Table 3d. 피로시험 결과 (두께 80mm)

시험체 번호	응력범위 (MPa)		피로수명 (10 <sup>4</sup> 회)	초기균열 (위치)	비고
	공칭값	계측값			
80-F-1	109.8	108.3	177.8	루트 지단	
80-F-2	109.8	108.4	269.2	루트 지단	
80-F-3	109.8	105.7	250.4	루트 지단	
80-F-4	137.3	137.5	69.0	루트 지단	
80-F-5	137.3	134.7	114.9	루트 지단	
80-F-6	137.3	133.9	115.3	루트 지단	
80-F-7	164.7	183.4	46.0	앞면 지단	
80-F-8	164.7	166.4	49.7	루트 지단	
80-F-9	164.7	166.9	47.5	루트 지단	

이르게 된 균열의 시작점 위치, 그리고 시험체의 이상 유무 등을 기록하였다. 여기서 응력범위의 공칭 값은 재하 하중을 시험체 공칭단면적으로 나눈 값을 기준으로 한 것이다. 각 시험체의 앞뒷면에 부착된 12개의 게이지에서 측정된 값 평균은 공칭응력 값과 거의 일치하고 있다. 이것은 게이지가 용접 지단으로부터 약 20mm 떨어져 있어서 용접 형상에 따른 응력 집중의 영향은 거의 받지 않은 것으로 추정된다. 시험체 앞뒷면 용접부 상하의 위치별 측정값은 서로 상당한 차이를 보이고 있다. 이것은 시험체 축방향의 힘에 의한 응력 이외에 시험체의 제작에 따른 정렬 오차와 열 변형으로 인한 용접부의 각입각에 의해 발생한 휨응력 때문인 것으로 판단한다. 특히 두께가 작은 20mm의 경우에는 정렬오차에 따른 영향이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. table 3에서 사용한 응력범위 계측값은 시험체의 앞뒷면에 부착한 변형률 게이지의 측정값을 기준으로 한 것으로, 피로 균열이 시작된 쪽에 위치한 3개의 게이지 값을 평균하여 사용하였다. 하중반복 400만 회까지 피로 균열이 발생하지 않아서 시험을 중단한 런아웃 경우는 각 위치의 게이지 값들을 평균한 값 중 가장 큰 값을 사용하였다.

총 36개의 시험체에 대하여 피로시험을 수행하였는데, 파단으로 진행된 균열의 시발점이 시험체 앞면의 용접 지단인 경우는 11개, 뒷면의 용접 루트 지단인 경우는 15개, 그리고 용접의 영향을 받지 않은 모재의 결함 부에서 발생한 균열이 파단에 이른 경우가 1개이다.

하중반복횟수 400만회에 도달한 런아웃 경우는 모두 9개인 것으로 나타났다. 판 두께별로 런아웃 경우를 집계하면 t=20mm와, 40mm에 각각 5개와 4개이고 60mm와 80mm에는 런아웃된 것이 없다.

시험체 20-F-03는 시험체를 설치하는 과정에서 의도하지 않은 과도한 압축력이 작용한 이력이 있다. 변형률 게이지 측정값도 다른 경우와는 판이하게 다르며 피로수명도 같은 조건의 다른 시험체 경우보다 매우 짧게 나타났다. 따라서 다음의 피로강도 통계분석에서는 20-F-03에 대한 시험자료를 제외시켰다.

피로시험 결과를 판 두께 별로 구분하여 공칭응력을 기준으로 Log 축척의 좌표계에 나타내면 fig. 2, 계측 응력을 기준으로 나타내면 fig. 3와 같다. 이들 그림에는 AASHTO의 피로강도곡선도 함께 표시하여 비교할 수 있도록 하였다.

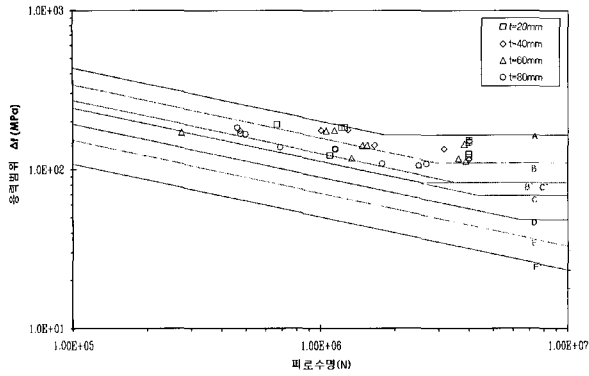


Fig. 2. 피로시험 결과 (공칭응력 기준)

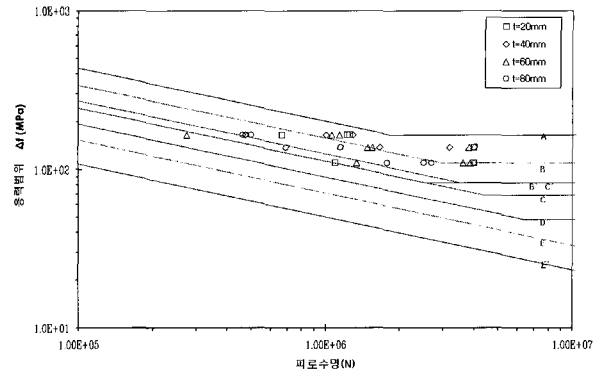


Fig. 3. 피로시험 결과 (계측응력 기준)

### 3.3 피로강도 통계분석

#### 3.3.1 통계분석 방법

우선 피로시험에서 얻은 응력범위와 피로수명 자료를 각 시험체 종류별로 통계 처리하였다. 각 시험체 종류별, 응력범위별 피로시험 자료가 많지 않은 점을 감안하여 피로강도 곡선의 기울기  $m=3$ 으로 고정하고 최소자승법을 적용하여 확률 50%에 해당하는 피로강도 곡선의 식을 구하였다. 피로수명이 Log-정규 분포하는 것으로 가정하고, 피로수명에 대한 표준편차와 생존확률 95%의 피로강도 곡선의 식을 구하였다. table 4 에는 이들 피로강도 곡선으로부터 구한 피로수명 200만회에서의 피로강도 값( $\Delta f_A$ )과 피로수명에 대한 표준편차의 값을 나타내었다. 피로시험 자료를 통계 처리할 경우 런아웃 된 자료를 처리하는 방식에 따라 결과가 달라진다. 런아웃 자료를 무시한 경우는 피로강도를 실제보다 낮게 평가하게 된다. 런아웃 수명(본 연구의 경우 400만회)을 피로수명으로 간주한 경우는 런아웃 자료를 무시한 경우에 비해 확률 50%의 피로강도는 증가하나 편차가 커져서 확률 95%의 피로강도는 오히려 감소할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 런아웃 자료에 대한 피로수명을 공칭응력범위가  $\Delta f_H$  수준인 경우 400만회를 기준으로 하고,  $1.25 \Delta f_H$ 와  $1.5 \Delta f_H$  경우에는 기울기 1:3인 피로강도 곡선을 따라 감소시킨 피로수명 205만과 119만회로 가정하였다.

#### 3.3.1 분석 결과 및 고찰

본 연구의 응력 범위-피로수명 자료를 통계 분석하고, 시험체의 두께별, 용접 방법별로 피로수명에 대한 표준편차와 피로수명 200만회에서의 생존확률 95%의 피로강도  $\Delta f_A$ 의 값을 정리하면 table 4와 같다. 모든 경우의 피로강도는 AASHTO의 C등급 규정 강도 90MPa를 초과하고 있다.

두께에 따라 구분하여 통계 처리한 피로강도를 그림으로 나타내면 fig. 4와 같다. 공칭응력을 기준으로 한 경우의 피로강도는 모두 일본 도로교 피로설계지침과 유럽 Eurocode 3의 규정 피로강도를 모두 초과하는 것으로 나타났다. 두께의 증가에 따른 피로 강도의 감소는 이들 기준에서 제안하고 있는 것과 비슷하게 나타났다.

계측응력을 기준으로 한 경우는 공칭응력을 기준으로 한 경우보다 피로강도가 큰 것으로 나타났다. 특히 20mm의 경우에는 시험편의 제작오차로 인한 휨응력의 크기가 상당하기 때문에 차이가 크게 났다. 계측응력을 기준으로 한 피로강도는 Gurney의 식에 따른 피로강도의 감소를 고려한 AASHTO의 B등급(두께 25mm이하 부재, 200만회에서의 피로강도 125MPa)을 만족한다.

판두께의 증가에 따른 피로 강도의 감소 정도는 Gurney에 의해 제시된 강도감소공식과는 거의 비슷한 경향을 보이고 있다.

Table 4. 피로강도 통계분석

시험체 종류	$\Delta f_A$ (MPa)		표준편차	
	공칭값	계측값	공칭값	계측값
20mm	120.7	137.5	0.09	0.07
40mm	110.1	118.1	0.16	0.14
60mm	93.1	96.9	0.25	0.26
80mm	94.7	97.3	0.10	0.08

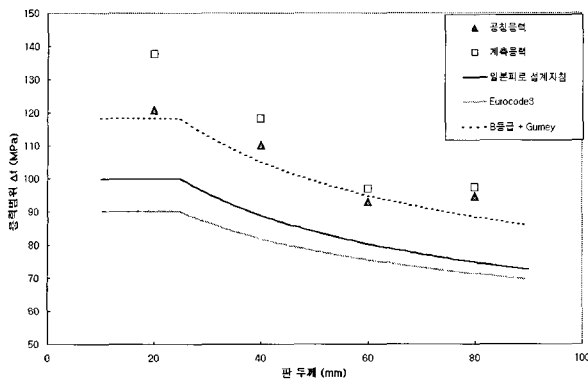


Fig. 4. 판 두께에 따른 피로강도

#### 4. 결 론

피로시험을 통하여 SM520-TMC 강의 피로강도를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모든 경우의 피로강도는 AASHTO의 C등급 규정 강도 90MPa를 초과한다.
2. 공칭응력을 기준으로 한 피로강도는 모두 일본도로교 피로설계지침과 유럽 Eurocode 3의 규정 피로강도를 초과한다.
3. 계측응력을 기준으로 한 피로강도는 Gurney의 식에 따른 피로강도의 감소를 고려한 AASHTO의 B등급을 만족한다
4. 판두께의 증가에 따른 피로 강도의 감소는 Gurney의 제안식과 거의 비슷한 경향을 보인다.

#### 참 고 문 헌

김영식 (1990). TMCP 강재의 용접성, 한국강구조학회 논문집 제2권 4호, pp. 23-32.  
 김동규 (1991). 건축구조용 TMCP 극후강재의 성능평가에 관한 실험적 연구 (I), (II) 한국강구조학회 논문

문집 제3권 3호, pp50-58, 제3권 4호 pp. 62-67.  
 용환선, 김석태 (1995). TMCP강의 피로, 한국강구조학회 논문집 제7권 4호, pp. 193-202.  
 용환선, 김석태, 조용식 (1996). HT60급 TMCP강 용접부 피로거동 한국강구조학회 논문집 제8권 4호, pp. 133-142.  
 대한토목학회(2003). "TMCP 강의 강교량 적용에 관한 설계기준 개발" 연구보고서.  
 Gurney T. R. (1979). "The influence of thickness on the fatigue strength of welded joints", Proc. 2nd International Conference on the Behavior of Offshore Structures, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England, Vol. 1, Paper 41, pp. 523-534.  
 Gurney, T. R (1981). "Some comments on fatigue design rules for offshore structures", Proc. 2nd international Symposium on Integrity of offshore Structures, Applied Science Publishers, Barking, Essex, England, pp. 219-234.  
 Maddox S. J. (1991). "Fatigue strength of welded structures", 2nd ed. Abington Publishing, England, 1991  
 AASHTO (2002). LRFD bridge design spec. 2nd edition.  
 Eurocode 3 (2003). prEN1993-1-9, Eurocode 3 Part 1.9 : Fatigue, stage 49 draft, May 2003.  
 피로설계지침 : "강도로교의 피로설계지침" 일본도로협회.

- ◎ 논문접수일 : 2004년 10월 11일
- ◎ 심사의뢰일 : 2004년 10월 12일
- ◎ 심사완료일 : 2004년 11월 02일