SM520C-TMC 강재의 피로강도에 대한 두께효과

Thickness Effects on the Fatigue Strength of Butt Welded Specimens using SM520C-TMC Steel

김 경 남[1] · 정 인 수[2] · 황 낙 연[3] · 정 경 섭[4]
Kim, Kyoung Nam *Jung, In Su* *Hwang, Nak Yeon* *Jung, Kyoung Sup*

요 약 : 피로설계에 대한 기준, 시방서 또는 추천안 등은 일반적으로 두께 10~30mm의 강판으로 만든 실험체의 피로실험을 통해 얻은 피로강도곡선을 근거하고 있다. 그러나 강판의 두께가 증가함에 따라서 피로강도가 감소하게 될 가능성에 대해 관심을 갖게 되었고, 파괴역학적 방법에 의한 분석과 강재 용접에 따른 영향을 근거로 하여 강판의 두께에 따른 영향이 상당히 클 수도 있다고 지적되었다. 기존의 몇몇 피로실험 결과로부터 얻은 피로강도곡선으로부터 강판 두께에 대한 영향을 고려하여 피로강도를 수정하는 식이 제안되어왔다. 본 연구에서는, 두께 80mm까지의 국내생산 SM520C-TMC 강재에 대한 피로강도시험을 실시하고, 그 결과로부터 강재의 두께에 따른 영향을 평가하였다. 최종적으로, 강판 두께에 대한 영향을 고려하여 피로강도를 수정하는 제한적인 시편에 대한 수정식을 제공하고, 이를 기존의 연구결과와 비교 검토하였다. 결과로서, 두께에 따른 강도감소효과는 기존의 연구와 유사한 경향을 갖고 감소하나 그 정도는 적어지고 있는 결과를 얻을 수 있었다.

ABSTRACT : The criterion or specification on fatigue design has been generally based on fatigue strength curve derived by tests on specimens with varying thickness (10-30mm). Making the plate thicker, however, also decreases fatigue strength. It has been noted from the test results and the results of the analysis by fracture mechanics that the effect of thickness cannot be bypassed. From the several fatigue strength curves of specimen tests, modification of fatigue strength on plate thickness has been proposed. In this study, fatigue tests on SM520C-TMC were carried out, and the effects of thickness were evaluated. Finally, in consideration of the thickness, the modification of fatigue strength was derived. Comparing the results of this paper with those of previous studies, an outline of the behavior obtained is similar to previous ones, but the rate of decrease is smaller.

핵 심 용 어 : SM520C-TMC, 피로실험, 피로강도곡선, 두께효과, 수정식
KEYWORDS : SM520C-TMC, Fatigue test, Fatigue strength curve, Thickness effect, Modification

1. 서 론

POSCO에서는 1984년부터 TMCP강 제조설비 및 Software 개발을 위하여 연구개발에 착수하여, 1988년 11월 PILAC (POSCO in line accelerated cooling)설비 설치와 함께 TMCP강 제조설비에 필요한 최적제조여건을 초기에 도출하였다(포항종합제철, 1990).

TMCP란, Thermo mechanical conrtol process의 약자로써, normalizing 등의 열처리재에 상응되는 기계적성질을 후속 열처리 공정없이 압연상태에서 얻기 위해 최근 개발된 일종의 제어압연 공정이다. Fig. 1은 가속냉각형 TMCP를 도식적으로 보여주고 있는데, TMCP는 오스테나이트 온도영역에서의 제어압연, 변태온도영역에서의 가속냉각, 그리고 자연냉각과정으로 구성되어 있다. 따라서 TMCP는 기존의 제어 압연공정에 가속냉각과정을 단순하게 추가한 것이라 할 수 있다(김희진, 1990).

1) 정회원, 충북대학교 대학원 박사과정
(Tel: 043-261-2408 Fax: 043-261-2408, E-mail: kkn74@hanafos.com)
2) 충북대학교 대학원 석사과정(jungis95@hotmail.com)
3) 정회원, 충북대학교 대학원 박사과정(a008526@dwconst.co.kr)
4) 정회원, 충북대학교 구조시스템공학과 교수, 공학박사(ksjung@chungbuk.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2005년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

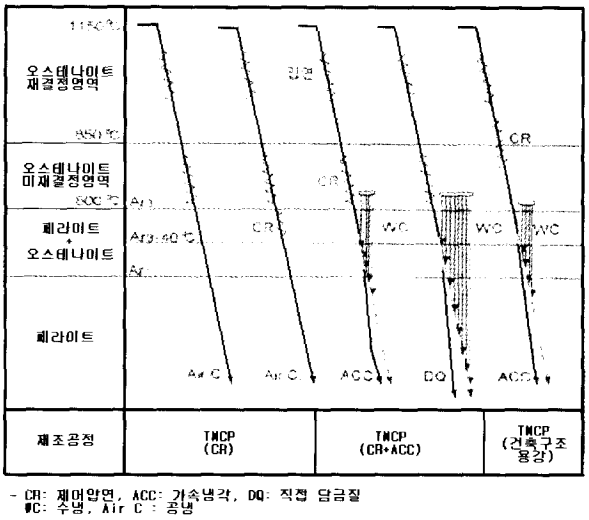


그림 1. TMCP 강재의 제작 Process

이러한 TMCP강재는 고강도를 확보하면서, 저 탄소당량으로 제조가 가능하여, 용접성 확보 및 저온 특성 등이 우수하여 후판으로 사용할 경우에도 예열 및 후열처리가 필요 없거나 용이하고, 때에 따라서는 설계기준강도의 저감없이 사용이 가능하다. 그러나, 설계 공정의 특성으로 인하여, 용접 및 후열처리 등에 의해 발생되는 연화현상(윤중근 등, 1988; 용환선 등, 1995) 및 후판의 경우 피로강도에 영향을 미치게 되는 두께효과(Gurney, 1981(a); Gurney, 1981(b); Booth, 1987)등에 대한 문제가 아직도 해결되지 못하고 있다.

이 중, 연화현상에 대하여는 국내 학술지를 통하여 많은 연구가 보고되고 있는 실정이지만, 피로강도에 대하여는 제작비 및 실험비 등의 제약으로 인하여 국내에서는 거의 이루어지지 못하고 있다. 특히, 모재 두께에 따른 용접부의 강도에 대하여는 정적 인장시험의 경우, 문태섭 등(1999)에 의하여 평가된 바 있으나, 피로강도에 대한 결과는 제외되어 있다.

본 연구에서는, 현재 국내에서 생산 보급되고 있는 SM520C-TMC 강재를 대상으로 피로실험을 실시하여, 강재의 두께에 따른 용접부의 피로강도를 수정하는 제한적인 시험편에 대한 기존 연구 평가식과 제시된 취득 데이터를 비교, 검토하여, 극후판의 두께효과를 실험적으로 규명하고자 하였다.

2. 시 험

2.1 소재 특성

표 1은 TMC 강재의 화학성분을 분석한 결과로 KS규격, 포스코 사규, 최대값, 최소값, 평균값 그리고 분산을 나타내었다. 여기서, KS 규격은 강재의 두께가 50mm이상에서의 규격값을 의미한다. 한편 최대값과 최소값 및 평균값 그리고 분산은 표본 강재의 측정값이다. 저온균열과 연관이 있는 Ceq와 PCM 값을 분석한 결과 모든 강재가 KS규격을 만족하고 있다.

표 1. TMC 강재의 화학성분

구 분	화학성분(%)												Ceq (%)	PCM (%)
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	V	B	Al		
KS	≤0.20	≤0.55	≤1.60	≤0.035	≤0.035	-	-	-	-	-	-	-	≤0.42	≤0.27
포스코	≤0.20	≤0.55	≤1.60	≤0.020	≤0.010	-	-	-	-	-	-	≥0.015	≤0.40	-
최대값	0.1625	0.467	1.4	0.012	0.002	0.26	0.02	0.23	0	0.024	0.0001	0.037	0.4	0.25
최소값	0.1371	0.418	1.06	0.007	0.001	0.15	0.01	0.16	0	0	0	0.022	0.36	0.23
평균값	0.1485	0.4449	1.2382	0.01	0.0018	0.1871	0.0124	0.1876	0	0.0097	0	0.0301	0.38	0.24
σ	0.0071	0.0135	0.1149	0.0016	0.0004	0.0295	0.0044	0.0214	0.0093	0.0088	0	0.0042	0.0166	0.0064

표 2. TMC(PILAC-BT36)강재의 기계적 성질

두 께	구 분	YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	vEo (J)	RAz(%) #1	RAz(%) #2	RAz(%) #3	RAz(%) 평균
40<t≤80	KS	335/-	520/640	-	≥21	≥27	-	-	-	-
	강구조	355/-	520/640	≤80	≥21	≥27	≥15	≥15	≥15	≥25
	최대값	501	626	80	36	290	77	70	72	70.6
	최소값	361	524	67	23	28	24	25	25	25
	평균값	419	552.9	75.7	30.4	160.5	41	40.4	40.5	40.6
	σ	25	17.5	2.9	3.2	73.4	13.6	11.5	12.9	12.3

SM520C-TMC(PILAC-BT36) 강재의 기계적 성질을 분석한 결과를 표 2에 나타내었다. 분석결과 모두 KS규격은 물론 강구조 설계 기준을 만족하고 있다. 특히 KS규격에서 관리하고 있지 않은 항복비와 두께방향 단면 수축율에도 아무런 문제가 없음을 알 수 있다.

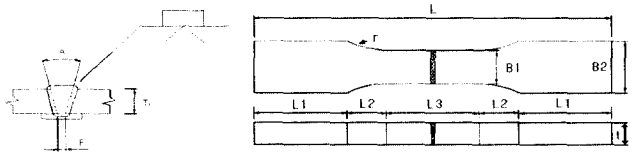
2.2 시험편 형상

시험편의 형상은 그림 2(b)에 보여지는 맞대기 이음 상세와 같고, 시험편의 수는, 모재 두께 20, 40, 60, 80mm에 대하여, 각각 18EA로서 총 72개의 시험편이 제작되었다.

2.3 용접 방법

시험편의 용접방법은 SAW(Submerged arc welding), FCAW(Flux cored arc welding)의 2가지 방법에 의하여 각각 모재 두께별로 9개씩 제작되었다. 용접조건은 SAW의 경우, 용접봉 H-14 4.8mm를 사용하여 평균 용접속도 31cm/min, 전류 704A, 전압 37V를, FCAW의 경우는 용접봉 SF-71 1.4mm를 사용하여 용접속도 35cm/min, 전류 376A, 전압 38V로 용접하여 각각의 입열량은 53.4KJ/cm, 27.1KJ/cm이다. 또한, 평균 용접 패스의 수는 20, 40, 60과 80mm 에 대하여 SAW는 7, 14.5, 22, 30회이고, FCAW는 10, 20.5, 31.5,46회이었다.

용접 상세 형상은 그림 2(a)와 같이 72개 시편 모두 V개선(AWS D1.1/D1.1M:2002의 B-U2a-GF, B-U2-S 상세 적용)처리하였고, 그림 2의 시편 크기 및 제 변수는 표 3과 같다.



(a) 용접 상세 (b) 시험편 형상

그림 2. 용접상세 및 피로 시험편의 형상

표 3. 각 시편별 크기 및 제 변수

구분	20mm		40mm		60mm		80mm	
	SAW	FCAW	SAW	FCAW	SAW	FCAW	SAW	FCAW
A ( )	30	30	30	30	20	30	20	30
R (mm)	6	10	6	10	16	10	16	10
Ti (mm)	20	20	40	40	60	60	80	80
L (mm)	802.3		854.96		963.31		1141.19	
L1 (mm)	250		250		250		250	
L2 (mm)	66.15		77.48		106.65		145.6	
L3 (mm)	170		200		250		350	
r (mm)	100		160		240		320	
B1 (mm)	40		60		90		120	
B2 (mm)	90		100		140		190	
t (mm)	20		40		60		80	

2.4 인장 시험

인장시험편은 맞대기 용접이음부를 시험체 중앙부 중앙에 횡방향으로 위치하도록 하였으며, 용량300톤 시험기를 사용하여 두께 20, 40, 60mm에 대하여 각각 용접방법별로 3개씩을 시험하였다.

2.5 피로 시험

피로시험은 포항산업과학기술원 강구조연구소(경기도 기흥소재)에서 보유하고 있는 전기유압식 피로시험기를 사용하였고, 용량은 표 4와 같고, 그림 3에 피로시험기를 나타내었다.

표 4. 사용 피로시험기 (H: 높이, L: 길이)

구분	최대 능력		시험 범위	
	정적	동적	압축인장	휨시험
200톤 피로시험기	±300톤	±200톤 20Hz	H = 5m	L = 15m
100톤 피로시험기	±150톤	±100톤 20Hz	H = 2m	L = 4m

그림 3. 200톤 피로시험기

그림 4. 제작 시편

용접부는 시험체 중앙에 횡방향으로 위치하도록 하였다. 반복하중은 일정진폭의 sin파를 적용하였고, 피로시험기의 용량범위 안에서 응력비 R=0.1을 기준으로 적용하였다. 응력범위는 피로한계강도의 1.0, 1.25, 1.5배로서, 각각 110, 137.5, 165 MPa로 정하였다. 20, 40mm 시편은 100톤 피로시험기를 이용하여 15Hz의 하중반복속도를 적용하였고, 60, 80mm 시편은 200톤 피로시험기를 이용하여 6Hz로 시험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장시험

표 5는 용접방법별 3개 인장 시험편의 시험 결과를 평균하여 항복강도, 인장강도로 각각 나타낸 것이다.

표 5. 인장시험 결과

두께 (mm)	용접방법	항복강도 (kgf/mm^2)	인장강도 (kgf/mm^2)	항복비	파단시 변형량(mm)
20	SAW	45.34	58.45	0.776	22.722
	FACW	46.69	60.96	0.776	20.18
40	SAW	47.10	59.79	0.786	22.277
	FACW	46.93	60.39	0.776	21.01
60	SAW	48.4	59.95	0.806	24.417
	FACW	49.27	60.85	0.810	26.934

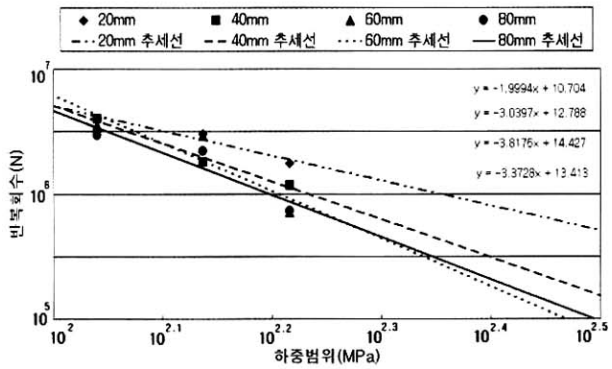
인장강도시험 결과, 모든 시험체가 모재부 또는 열 영향부에서 파단되었다. 이것은 용착금속부의 기계적 성질이 모재부에 비해 우수함을 나타내며, 시편의 파단이 열 영향에 기인하기 때문으로 판단된다.

SAW와 FCAW방법을 비교하면, 항복강도, 인장강도에서는 큰 차이가 발생하지 않으며, FCAW가 오히려 약간의 큰 강도를 갖는다. 또한 두께별로 비교해보면 항복강도와 인장강도의 큰 변화는 없으며 SAW의 경우 두께가 증가할수록 미세한 양이지만 항복강도와 인장강도가 증가되었고, FCAW의 경우 항복강도는 다소 증가하였지만 인장강도는 거의 변화가 없었다. 정적 재하시험 만의 결과를 볼 때, SAW과 FCAW의 차이는 발생하지 않는 것으로 판단되어, 문태섭 등의 연구와 동일한 결과가 도출되었다.

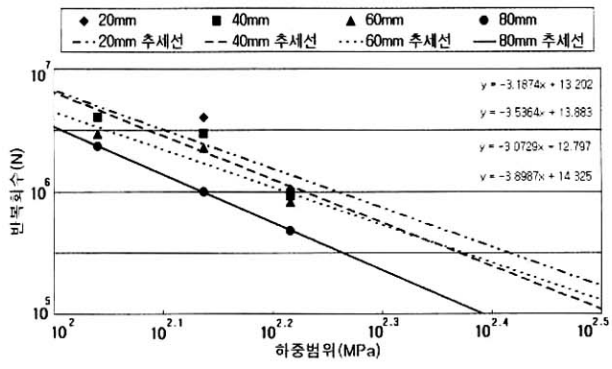
3.2 피로시험

시험 결과는 판두께 20mm의 경우, 응력범위를 피로한계강도와 같게 한 시험체들은 대부분 RUN-OUT되었으나, 시편 중 2개는 용접금속부 불량 및 사전 압축변형의 발생으로 실험 중단 및 잘못된 결과가 도출되어 결과에서 제외시켰다. 20mm시편 모두는 예상 피로범주 C등급을 넘어 B′등급 이상에 속하는 것으로 나타났다. 판두께 40mm의 경우도 피로한계강도에 대한 응력범위의 비가 1.0이 되도록 한 것은 RUN-OUT 되었고 모두 양호한 피로수명을 기록하여 모두 B′이상이다. 판두께 60mm의 경우는 한 개의 시편을 제외하고는 C′등급을 만족하고 있는 것으로 나타났다. 판두께 80mm의 경우는 시험편 한개가 C′등급에 속해있고, 나머지 시험편들은 모두 B′등급을 만족하였다(장승필 등, 2003).

그림 5는 피로 시험 결과를 두께별로 정리하여 나타낸 것이다. 두께와 하중 재하범위가 동일한 시편 3EA에 대하여 평균값을 취하여 하나의 데이터로 취급하였으며, SAW 및 FCAW 용접방법에 대하여 나누어 각각 도시하였다.



(a) SAW



(b) FCAW

그림 5. 용접방법별 두께에 따른 용접부의 피로강도곡선

그림 5에 따르면, AASHTO 시방규정(2002)에서 피로강도곡선의 기울기(m)를 -3으로 규정하고 있는 것에 반하여, 시험결과는 좀 더 작게 평가(-3 〉 m)되었다.

응력범위가 1.0에서 1.25, 1.5로 증가함에 따라 RUN-OUT된 시편이 줄고, 기준에 미달하는 시편이 발생하고 있다. 또한, FCAW에 의한 용접 시편보다 SAW에 의한 시편결과가 반복회수의 편차가 적게 발생하고 있는 것으로부터, SAW의 용접관리 및 용접성능이 좀 더 우수함을 알 수 있었다. 그러나, FCAW 및 SAW에 의한 시편 모두, C′등급 이상을 모두 만족하고 있었다(장승필 등, 2003).

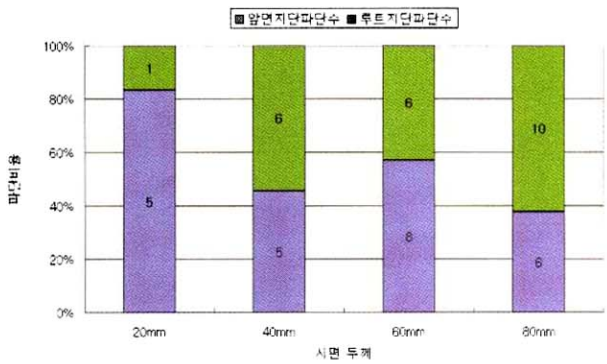


그림 6. 두께에 따른 균열시작 위치

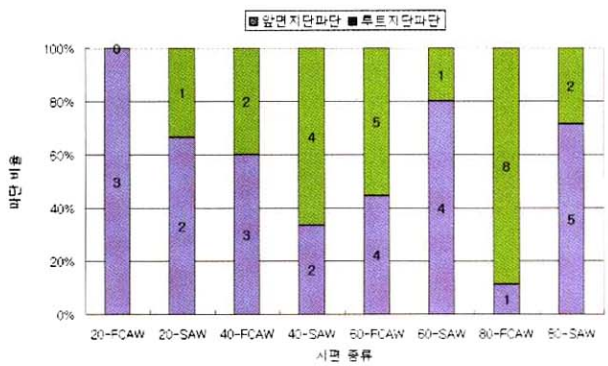


그림 7. 두께 및 용접방법에 따른 균열시작 위치

그림 6에 따르면, 두께에 따른 파단 시편의 수는 20, 40, 60, 80mm에 대하여 5, 11, 14, 16 으로 점점 증가하여 두께가 두꺼울수록 강도가 감소하는 것과 유사한 경향이라 할 수 있으며, 20mm의 경우에는 1개 시편을 제외한 파단된 모든 시편이 앞면용접지단에서 피로균열이 시작되어 열영향부를 관통한 후 파단되었다. 이러한 경향을 용접방법에 따라 구분하기 위하여 그림 7과 같이 구분하여 나타내본 결과, FCAW의 경우에는 앞면지단에서 파단된 경우가 두께가 증가함에 따라 0/3, 2/5, 5/9, 8/9로 증가하고 있으며, SAW의 경우에

는 특별한 상관관계는 없으나 루트지단보다는 앞면용접지단에서 피로파단이 시작되어 파단에 이른 시편이 더 많았다. 이렇게 FCAW와 SAW의 피로균열 발생시점이 차이가 나는 것은 용접 Layer의 수, 즉 용접 Pass의 수가 더 많은 FCAW가 앞면 용접지단의 형상 불균일로 인한 응력집중 때문인 것으로 파악된다.

3.3 기존 연구 결과와의 비교검토

두께에 따른 강도 감소효과만을 분석하기 위하여, 이하 시험데이터들은 모두 피로 시험의 평균치, 즉 50% 비파괴확률에 의한 결과로 정리된 것이며, 이 데이터 자체로서 시방서상의 피로범주와 그대로 비교될 수는 없다. 다만, 시험의 결과를 분석하여 나온 표준편차를 이용할 경우, 68%, 95.5% 및 97.7%등의 비파괴확률 하한선을 이용하여 시방서상의 피로범주와 비교가 가능하게 된다.

피로강도에 대한 두께효과를 연구한 자료는 Gurney에 의해 제안된 강관 두께의 영향을 고려한 피로강도의 수정식이 있다. 이는 두께 50mm까지의 강판을 사용한 피로 실험의 결과로서 식(1)과 같다.

$$S_r = S_{r,o}(t_o/t)^{0.25} \quad (1)$$

여기서, t_o : 기준이 되는 강판의 두께, 22mm

t : 강판의 두께

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

S_r : 두께 t의 강판을 사용하는 경우의 피로강도

그림 8은 본 연구에서 시험한 피로시편의 강도를 선행연구와 같은 방법으로 비교 평가하기 위하여, 두께 20mm에 대한 피로 강도 곡선의 기울기에 맞추어 다른 두께의 데이터들을 정리하여 나타낸 것이다.

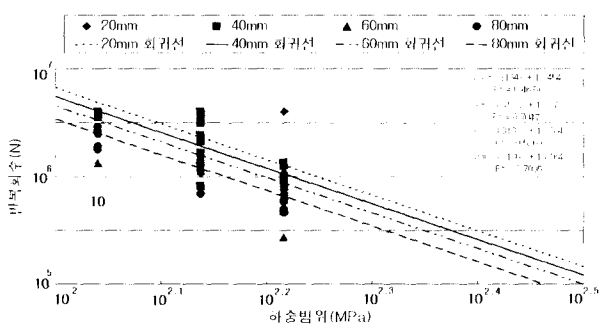


그림 8. 20mm 결과의 기울기로 환산한 두께에 따른 용접부의 피로강도곡선

그림 8의 결과를 Gurney의 연구 결과와 비교 검토하기 위하여, 식(1)과 같은 형태로 적용하면 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 여기에 들어가는 파라메터는 두께에 따라 달라지는 값으로 표 6에 나타내었다.

$$S_r = S_{r,o}(t_o/t)^{ipt} \quad (2)$$

여기서, t_o : 기준이 되는 강판의 두께, 20mm

ipt : 판두께 지수

표 6. 실험에 의한 200만회 피로강도 및 식(2)의 판두께 지수 (20mm기준)

두께 t (mm)	**20**	40	60	80
200만회 피로강도(MPa)	**144.15**	135.99	128.10	117.80
판두께 지수 ipt	-	0.0840	0.1074	0.1456
판두께 지수 0.25 적용시 각 두께별 피로강도(MPa)	144.15	121.22	109.53	101.93

표 6에 따르면, 두께가 증가함에 따라 200만회 피로강도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 극후판에서 두께효과가 명확히 발생하는 것을 알 수 있으며, 그 효과를 정량적으로 파악하기 위하여, 기존의 연구결과에서 사용된 식(2)의 형태를 이용하여 비교한 결과, 판두께 지수가 0.0840~0.1456 정도로서 Gurney의 0.25보다 두께의 효과가 적게 평가되는 것을 확인하였다. 이는 강판 생산 기술의 발달과 함께 강재의 품질 관리와 용접 기술의 향상으로 인한 것으로 판단된다.

또 다른 연구로서, Booth(1987)는 두께 25mm~100mm의 BS4360, Grade60D 강판을 이용하여, 폭은 두께의 3~5, 6배를 사용하고, 수동 피복아크 용접을 용접면 경사각 60°의 수직자세로 용접한 시편을 응력비 R=0, 4점 휨 형태로 실험을 수행하였다. 그 결과를 두께 38mm에 대하여 피로강도 곡선을 긋고, 다른 결과는 그 기울기에 맞추어 피로곡선을 적용하였다. 그림 9에 Booth의 연구 결과를 나타내었다.

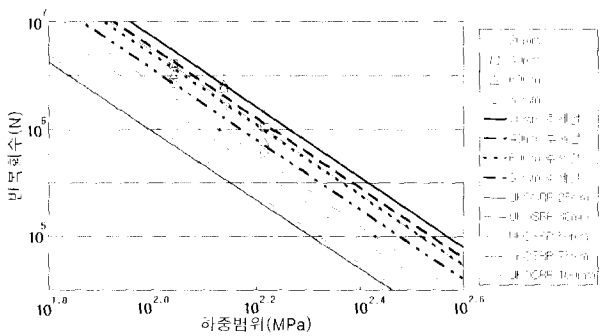


그림 9. UKOSRP 피로실험 결과(Booth, 1987)와 40mm 결과의 기울기로 환산한 두께에 따른 용접부의 피로강도곡선

표 7. 실험에 의한 200만회 피로강도 및 식(2)의 판두께 지수 (40mm기준)

두께 t (mm)	20	**40**	60	80
200만회 피로강도(MPa)	148.58	**138.39**	132.43	120.34
판두께 지수 ipt	0.1025	-	0.1086	0.2016

본 연구에서 시험한 피로시편의 강도를 Booth의 연구에서와 같은 방법으로 비교 평가하기 위하여, 두께 40mm에 대한 피로 강도 곡선의 기울기에 맞추어 다른 두께의 데이터들을 정리하여 그림 9에 함께 나타내었다. 여기서 측정데이터들은 그림 5에서 표시한 형식과 같이 동일한 응력범위, 용접방법을 사용한 3EA의 시험편들을 미리 평균낸 것이다.

Gurney와 Booth, Mohaupt 등(1987) 과 Morgan (1983)에 의해서 연구된 결과와 마찬가지로 두께가 두꺼워질수록 피로강도가 감소함을 확실히 확인할 수 있었다. 특히, 60mm와 80mm의 차이는 다른 곡선간의 절편차이가 0.101, 0.062인 것보다 큰 0.136의 절편 차이가 발생하고 있다. 이들 값의 차이가 반복횟수의 Log값에 대한 차이인 것을 고려할 때, 실제반복횟수에서는 큰 차이가 발생하게 된다.

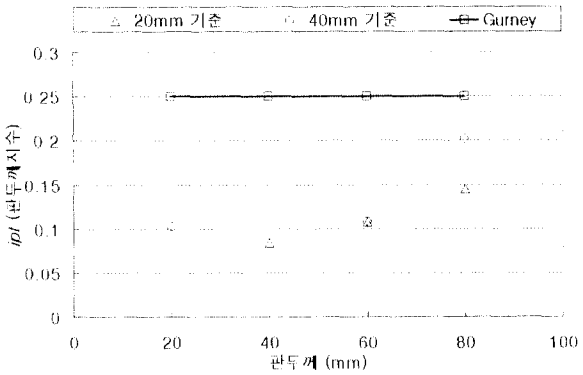


그림 10. 판두께지수의 변화 추이

그림 10에서 20mm기준의 판두께지수를 검토하면, 판두께 20mm인 경우 0.0840, 60mm일 때 0.1074, 80mm일 때 0.1456으로 두께가 증가하면서 판두께 효과가 더욱더 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 80mm로 증가할 경우, 판두께에 의한 강도감소효과가 극대로 나타나고 있어, 아직도 80mm 후판의 경우 재질향상을 위한 기술 개발이 필요함을 알 수 있다.

또한, 그림 10의 40mm기준 판두께지수는 값의 변화가 일률적인 형태로 되지 않고 있다. 그러나, 표7의 결과에서와 같이 두께가 두꺼워질수록 200만회 피로강도는 감소되므로 똑같은 현상을 나타내고 있는 것이다.

그림 10의 각 방법에 의한 판두께지수의 변화와 피로강도 산정식을 두께별로 구할 수 있도록 식으로 나타내면 식(3)~식(6)와 같다.

$$ipt = 0.0015 \times t + 0.02 \quad (3)$$

$$S_r = S_{r,20} \times \left(\frac{20}{t}\right)^{ipt} \quad (4)$$

$$ipt = 0.005 \mid 40 - t \mid \quad (5)$$

$$S_r = S_{r,40} \times \left(\frac{40}{t}\right)^{ipt} \quad (6)$$

여기서, t : 강판의 두께

ipt : 판두께 지수

$S_{r,20}$: 20mm 판의 실험 피로강도

$S_{r,40}$: 40mm 판의 실험 피로강도

식(3)은 두께 20mm를 기준으로 하였을 경우, 식(5)는 두께 40mm를 기준으로 하였을 경우에 각각 판두께지수를 구하는 식으로, 본 실험에 의해 구한 실험식이다. 또한, 식(4)와 식(6)은 구한 판두께지수를 이용하여 특정 두께의 판에 대한 피로강도를 계산하는 식이다.

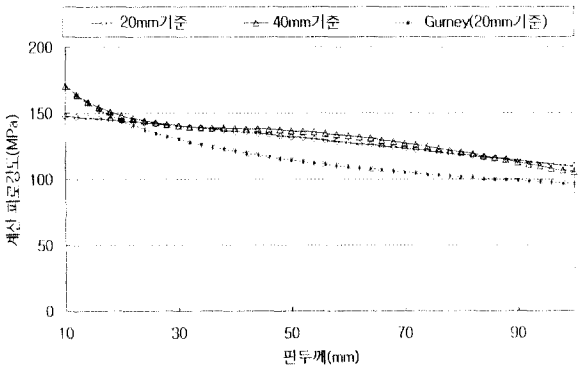


그림 11. 각 방법별 계산 피로강도 변화 추이

그림 11에 식(4)과 식(6)에 의해 계산된 200만회 예상 피로강도와 Gurney의 연구 결과를 20mm강도를 기준으로 하여 구한 예상 피로강도를 나타내었다. 이에 따르면, Gurney의 연구는 20mm 기준강재 미만의 두께에 대하여는 피로강도를 상당히 과대 평가하고 있으며, 기준강재 초과 두께에 대하여는 과소 평가하는 경향이 있다. 그러나, 본 연구에서 제시한 2가지 평가 방법에 의할 경우, 판두께지수 ipt가 서로 상이하였으나, 기준두께 이상에 대하여 두께에 따른 피로강도에는 서로간에 큰 차이가 없이 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 판두께가 100mm정도로 근접하면서 Gurney의 예상 피로강도와 근접하게 되는 경향을 보였다. 그러나, 40mm를 기준으로 하는 방법은 40mm를 기준

으로 부호를 반대로 하기 위해 절대값을 취해야 하는 불편이 있고, 20mm 미만 강재에 대하여 피로강도를 과대평가하는 경향이 있다. 그러나, 20mm를 기준으로 할 경우, 20mm미만의 강재에 대하여도 식을 그대로 적용할 수 있어 용이하기 때문에 두께에 따른 피로강도 감소효과를 나타내는 데에는 20mm두께를 이용한 피로강도를 기준으로 하는 것이 나을 것으로 판단된다.

이상의 기존 연구와 비교한 결과, 어떤 시편을 기준으로 하느냐에 따라 정리한 데이터에 약간의 차이가 발생되고 있다. 그러나, 두 가지 결과 모두에서 기존의 연구결과보다 두께증가에 따른 강도 감소효과가 적게 발생되고 있어, 국내 생산 TMCP강재의 피로강도를 기 연구자들의 제안식을 그대로 적용하여 규정하는 데에는 문제가 있다고 판단된다. 또한, 결과로부터 판두께가 두꺼워질수록 강도 감소효과가 더 크게 발생되는 경향이 있으므로, 이에 대한 추가 연구가 필요하고, 60mm를 초과하는 극후판에 대한 국내 생산 TMCP강재의 재질향상에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단되었다.

4. 결 론

본 연구는 국내생산 SM520C-TMC강재의 두께에 따른 피로강도의 영향을 평가하기 위하여, 기준두께 20 및 40mm를 기준으로 다른 두께의 피로강도를 평가한 것이다. 시험시 제작 및 비용의 제약으로 인하여 제한된 3가지 종류의 응력범위에 대하여만 시험을 하였고, 시간의 제약으로 인하여 400만회에서 시편을 RUN-OUT함으로써, 상대적으로 얇은 20mm를 포함하여 많은 시편이 RUN-OUT되었다. 이 영향으로 피로강도곡선의 기울기 산정시 여러 어려움이 있었고, 제한된 시편에 의한 결과로서, 이번 검토 결과를 토대로 추후 연구를 위한 계획의 참고자료가 되고자 하였다.

이상의 연구결과를 분석 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 두께에 따른 피로강도 감소 효과는 기존 연구결과에서와 동일한 양상을 보였으나, 강재 생산 기술 및 용접기술의 발달로 두께 효과가 감소하고 있음을 확인하였다.

(2) SAW, FCAW의 용접법에 관계없이, 두께에 따른 피로강도 감소 효과는 동일하게 발생하였고, 80mm의 후판에서 FCAW의 강도 감소효과가 더 컸다.

(3) 두꺼운 후판일수록 판두께의 효과는 더 크게 작용되었다.

(4) 제한된 시편의 결과 분석을 통하여, 두께에 따른 판두께지수와 피로강도를 예측하는 실험식을 제안하였다.

감사의글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구 (과제번호 : R01-2001-00484) 지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

본 연구는 포항종합제철(주)로부터 대한토목학회에 연구의뢰한 SM520C-TMC강재 연구결과의 일부분입니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김희진 (1990.6), 선박용 강재로서의 TMCP강의 경제성, **대한용접학회지**, 대한용접학회, 제8권, 제2호, pp.13-26.

장승필, 조재병, 박영석, 정경섭, 배두병 (2003.9), **TMCP강의 강교량 적용에 관한 설계기준 개발**, 연구보고서, 대한토목학회.

용환선, 김석태 (1995.12), TMCP강의 피로, **한국강구조학회논문집**, 한국강구조학회, 제7권, 제4호, pp.193-202.

윤중근, 김희진 (1988.6), TMCP강재의 연화현상, **대한용접학회지**, 대한용접학회, 제6권, 제2호, pp.9-18.

포항종합제철(주) (1990.8), 건축구조용 TMCP강재, **한국강구조학회지**, 한국강구조학회, 제2권, 제3호, pp.43-48.

AASHTO LRFD Bridge Design Specification-U.S. Units 2002 Interim Revisions (2002.5).

Booth, G. S. (1987), The effect of Thickness on the Fatigue Strength of Plate Welded Joints, *Paper TS 2*, Int. Conf. Steel in Marine Structures, Delft.

Mohaupt, U. H., Burns, D. J., Kalbfleisch, J. G., Voskovski, O. and Bell, R. (1987), Fatigue Crack Development, Thickness and Corrosion Effects in Welded Plate to Plate Joints, *Paper TS 3*, Int. Conf. Steel in Marine Structures, Delft.

Morgan, H. G. (1983), The Effect of Section Thickness on the Fatigue Performance of Simple Welded Joints, SNPDL Report No. NDR 941(S).

Gurney, T. R. (1981a), The influence of thickness on the fatigue strength of welded joints, *Proc. 2nd International Conference on the Behavior*

of Offshore Structures, Vol. 1, Paper 41, pp. 523-534, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England.

Gurney, T. R. (1981b), Some comments on fatigue design rules for offshore structures, *Proc. 2nd International Symposium on Integrity of Offshore Structures*, pp. 219-234, Applied Science Publishers, Barking, Essex, England.

(접수일자 : 2004. 8. 17 / 심사일 2004. 9. 23 / 심사완료일 2004. 11. 16)