

## CO<sub>2</sub> 가스 용접된 강관파일의 피로수명

"Fatigue life estimation of CO<sub>2</sub> gas arc welded carbon steel tubes"

이 역 섭 ( 인하대 기계공학과 ), 김 동 준 ( 인하대 원 ), 김 승 권 ( 인하대 원 )

O.S. Lee ( Inha Univ. ), D.J. Kim ( Graduate school, Inha Univ ), S.G. Kim ( Graduate school, Inha Univ )

### ABSTRACT

In this study, the fatigue lives of two kinds of specimens made by CO<sub>2</sub> gas weld were assessed. The materials for two kinds of specimens were taken out of the virgin carbon steel tubes and the used carbon steel tubes, respectively. As a result, it was found that the fatigue lives of two groups of specimens were in the same order of magnitude

### 1. 서 론

대형 구조물의 시공시 기초 구조물인 강관 파일은 그 기능상 구조물의 안전에 큰 영향을 미치게 되는데, 이 강관파일이 지지하고 있는 구조물 위를 고속차량이 반복적으로 운행하는 경우, 고속차량의 주행으로 인한 피로 하중의 발생으로 구조물 안전에 영향을 미치게 된다.

파일 항타 작업시 설계깊이 ( 소요 지지력 확보 깊이 )까지 항타하기 위해서는 7ton 햄머를 사용하여 최대 2,000타가 항타된다. 자연적으로 피할수 없는 편심률 차이 때문에 파일 상단부의 응력 분포는 균일 하지 않게 된다. 때로는 이러한 편심률이 부분적 비틀림과 연결되어 파일 상단부의 소성변형의 원인이된다. 강관 파일들을 지반에 설치한 후 남게되는 강관 파일 중 길이가 3m 이상이 될 경우 상단부 0.5m는 절단해야 하고 파일의 외경 차이가 ±6mm 이내가 되도록 해야 한다. 또한 용접하기전 두 파일의 직경 차이는 최대한 3mm로 한다.<sup>(7)</sup> 그리고 각 파일은 외간 검사를 한 후 ( 기계적 손실을 받아서는 안된다. ) 양호한 강관 파일들을 CO<sub>2</sub> 가스 아크 용접하여 재사용 할수 있는지의 기술적인 검토가 필요

하다.

본 연구에서는 새 강관 파일과 재생 강관 파일과의 피로 수명을 비교 분석함으로써 재사용 가능 여부를 검토하였다.

### 2. 실험 장치 및 방법

#### 2.1 시험편 및 실험 장치

본 실험에서 사용된 시험편은 지름이 609.6mm, 길이 7m, 두께 12mm의 sws 41 용접 구조용 압연 강재에서 채취한 것으로서 지반에 설치하기전의 파일(신파일)과 서론에서 언급한 방법으로 재생한 파일(재생파일)에서 각각 시편 재료들을 채취하였다.

용접방법으로는 CO<sub>2</sub> 가스 아크 용접이며 여기에 사용된 wire의 화학 성분을 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of Wire.

wire	화학 성분(%)				
	C	Si	Mn	P	S
(AWS E70T-1)	0.05	0.75	1.56	0.014	0.011

Table 2에는 시험편 모재의 화학 성분을 나타내었다.

Table 2 Chemical compositions of specimen base metal.

	종별	화학 성분 (%)				
		C	Si	Mn	P	S
모재	sws 41	0.23 이하	0.1 이하	2.5×C 이상	0.04 이하	0.05 이하

각시험편의 용접조건은 Table 3에 자세히 나타내었다.

Table 3 Welding condition.

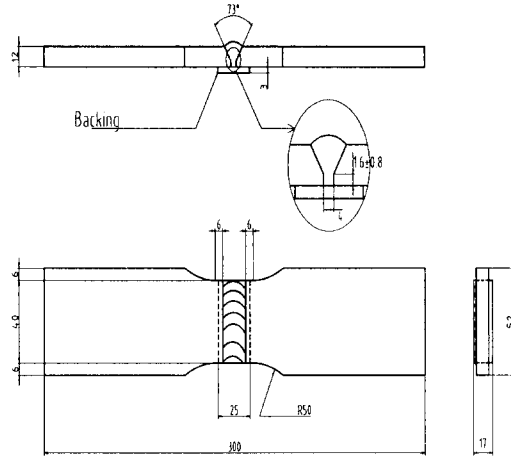
종별	T(mm)	wire φ(mm)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)
CO <sub>2</sub> gas welding	12	1.6	400~450	33~36	40

KSD 3566에 따라 신 강관파일과 재생 강관파일의 용접부에 대한 인장 강도 시험 과 KSB 0810에 따른 충격 시험의 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Comparison of mechanical properties of each specimen.

시험 방법	구 분	재생시험편 (sws 41)			신시험편 (sws41)		
		# 1	# 2	#3	# 1	# 2	#3
인장 시험	인장강도 N/mm <sup>2</sup>	478	464	472	456	446	461
	내력 N/mm <sup>2</sup>	348	334	339	349	332	352
	연신율 %	34	35	34	37	38	35
충격 시험	샤르피 흡수에너지 J	166	104	166	39	49	39

피로수명 측정을 위한 시험편의 기하학적 형상은 Fig. 1과 같다.



단위 : mm

\*Backing : 용접시 용입의 갑작스런 증가로 생길 수 있는 용접결함 즉, 기포, 간열 및 용각( burn through )을 방지하기 위해 쓰이는 것으로 재질은 모재와 같은 것을 사용한다.

Fig. 1 Configuration of specimen.

아래의 Fig. 2는 피로시험기 ( 10ton Saginomiya Fatigue Test Machine )에 시험편을 장착한 사진이다.

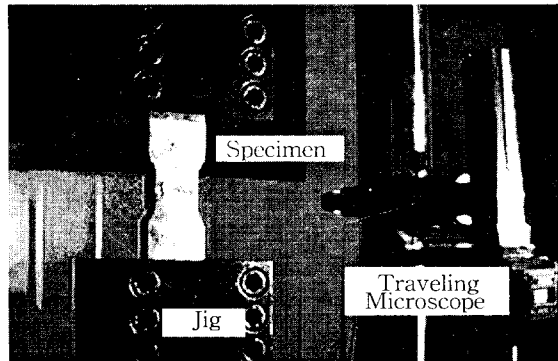
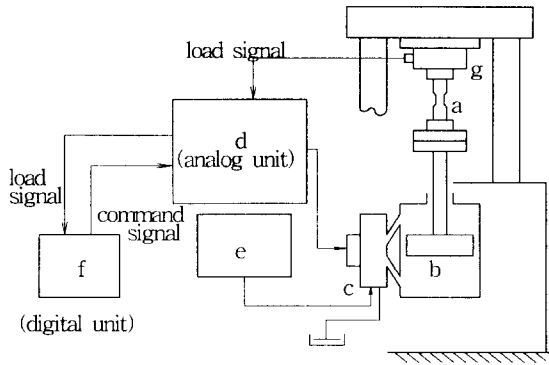


Fig. 2 10ton Saginomiya fatigue test machine.

Fig. 3은 피로시험기의 작동원리를 간략히 나타낸 계통도로써 유압모터에서 발생한 동력으로 액츄에이터를 상하 왕복운동 시켜 Jig에 장착된 시험편에 인장 및 압축하중을 주게된다.<sup>(1,2)</sup> 그리고, 시험편에 적용될 하중의 형태를 반복 하중으로 가하기 위해서 제어기가 사용되며 오실로스코프를 통해 보다 정확한 하중 조건과 하중 범위를 설정하게 된다.



(a) specimen (b) hydraulic actuator  
 (c) servo-valve (d) controller  
 (e) hydraulic motor (f) oscilloscope (g) load cell

Fig. 3 Fatigue test system.

### 2.2 실험 방법

재생시편과 신시편의 피로 수명에 대한 비교분석을 용이하기 위해 S-N 곡선<sup>(1)</sup>에서 하중을 6 ton 이상, 9 ton 이하의 범위로 설정하였고 하중변화량을 약 0.6 ton으로 하였다.

Table 5는 신 강관파일 시편과 재생 강관파일 시편에 대한 각각의 피로 하중 조건이다.

Table 5 Applied fatigue loading

구분 \ 하중	Load ( ton )				
	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
재생시편	7.347	6.735	6.122	7.959	8.571
신시편	7.347	6.735	6.122	7.959	8.571

모든 시험편에 Sine파형의 일정한 반복하중을 가하였고 주파수는 10Hz로 하였다. Fig. 4는 본 실험에서 사용된 반복하중인 Sine파형의 모양이다.

이 파형은 편진 응력하중의 파형으로써  $P_{min}=0$ 이 되고, 하중진폭  $\Delta P$ 가  $P_{max}$ 이 되는 하중 조건이다.<sup>(1,2)</sup>

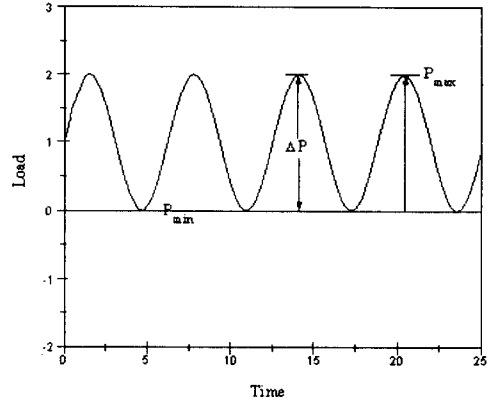


Fig. 4 Applied fatigue load of sine curve

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 피로 실험을 수행한 후 각각의 시편들이 파단된 모양이다

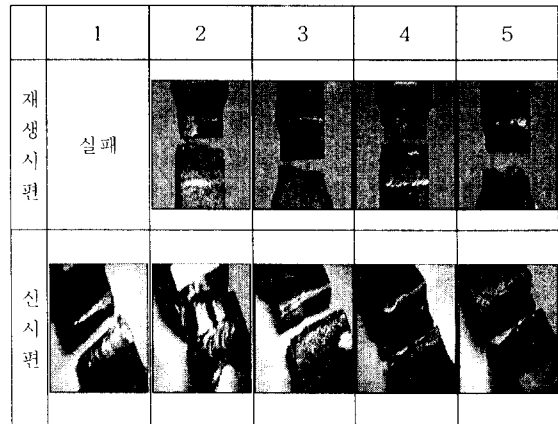


Fig. 5 Photographs of fractured specimen after fatigue testing.

강관파일의 피로특성의 규명에 역점을 두고 실험을 한 결과 로크웰경도 시험, 인장 시험 및 충격 시험에서 나타난 결과와 같이, 신 강관 파일과 재생 강관 파일의 피로 수명은 Table 6에서 보인 것과 같이 큰 차이점이 나타나지 않았다.

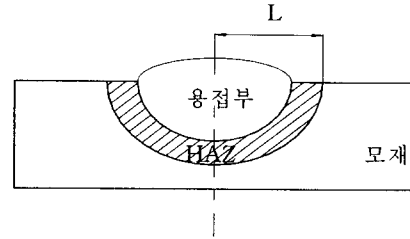
Table. 6 Loading condition & fatigue life for various specimens.

구분	결과	시편 번호	R ( $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ )	$\sigma_{max}$ (MPa)	cycles (N)
재생 시편		1	0	150	실패
		2	0	137.5	2,050,000
		3	0	124.9	3,110,000
		4	0	162.5	1,920,000
		5	0	174.9	1,870,000
신 시편		1	0	150	1,370,000
		2	0	137.5	260,000
		3	0	124.9	240,000
		4	0	162.5	3,740,760
		5	0	174.9	1,980,000

Fig. 5에서 재생 시편 ①번을 사용한 실험은 본 피로실험을 수행하기에 앞서 실험에 알맞은 하중조건을 결정하기 위한 예비실험이었고, 신 시편 ②번에서 피로 수명이 짧게 나타난 것은 파일 제작시 실제 용접을 하기전 가용접을 한 영향으로 보인다.

본 연구에서 사용된 지름 609.6mm인 경우 모두 50mm 간격으로 6군데 이상 8군데 이하를 가용접 하도록 AWS ( American Welding Society )에서 규정하고 있으나<sup>(3)</sup> 신시편 ②번을 채취할 때 사전에 예열을 하지 않는 가용접 부위를 채취한 것이다. 즉, 용접시 발생하는 고열에 의해 용접부 주위는 HAZ ( Heat Affected Zone )이 형성되며 이 부분은 열변형으로 인해 연성이 크게 저하하며 결함이 쉽게 발생한다. 특히 동절기 용접작업시 대기온도가 0℃ 이하일 경우, 용접 하기 전에 용접할 부위의 예열폭을 최소한 50mm이상으로 하고 온도를 101℃ 이상 가열한 뒤 실제 본 용접을 실시해 HAZ영역을 최대한 줄여야 한다.<sup>(4)</sup>

본 실험과 유사한 조건하에 실시된 열영향부 측정에 관한 연구<sup>(5)</sup> 결과를 보면 SS41의 CO<sub>2</sub> 가스 아크 용접된 부위의 중심으로부터 약 6mm 떨어진 곳에서 HAZ가 발견된 것으로 나타나 있다. 본 연구의 경우도 다음의 Fig. 6과 같이 몇몇 시편을 제외한 대부분의 경우 HAZ와 모재의 경계면인 용접부의 중심으로부터 약 7mm~11mm 떨어진 곳에서 피로 파괴되었다.



\* L : 용접부 중심으로부터 HAZ와 모재의 경계면까지의 거리

Fig. 6 Cross section of CO<sub>2</sub> gas arc welded specimen

HAZ를 제거하기 위하여 수행하는 용접부위의 예열작업이 생략된 가용접 부위에서 채취한 ②번 시편은 HAZ의 범위가 더 넓어졌기 때문에 위의 Fig. 5에서 보인 것과 같이 용접부 주변이 아닌 곳에서 피로 파괴되는 현상이 밝혀졌다.

③번 시편의 경우 Fig. 5에서와 같이 용접부에서 피로 파괴되었다. 대부분의 용접재의 경우 아래의 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 용접부에서는 모재보다 조직이 더욱 치밀해져 용접부위에선 피로 파괴가 모재보다 먼저 일어나지 않고 조직이 변화하는 HAZ와 모재 사이의 경계 영역에서 균열이 시작되어 파괴가 된다.<sup>(5)</sup>

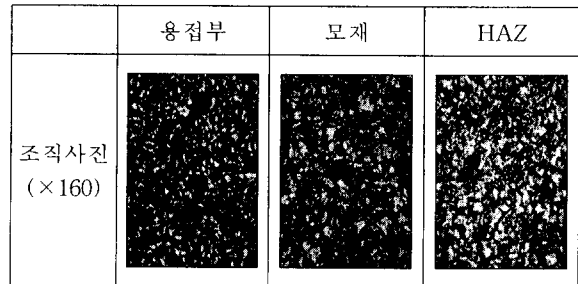


Fig. 7 Microstructure of each part.

가용접으로 인한 열변형된 ②번 시편과 용접부 내에 용접결함을 내포한 ③번 시편에 대한 실험결과는 신 강관파일과 재생 강관파일의 용접부위에 대한 순수 피로수명을 예측하는데 사용되지 못할 자료이다.<sup>(7)</sup> 왜냐하면 이러한 가용접 부위의 열변형과 기타 여러 용접 결함은 신 강관파일과 재생 강관파일 모두에 발생할 수 있는 용접 상의 문제이기 때문이다.

이로써 신 강관 재료를 용접하여 만든 시편의 피로 수명과 재생 강관 재료를 용접하여 만든 시편의 피

로 수명은 아래의 Fig. 8과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 큰 차이점이 없음을 본 연구를 통해 알 수 있었다.

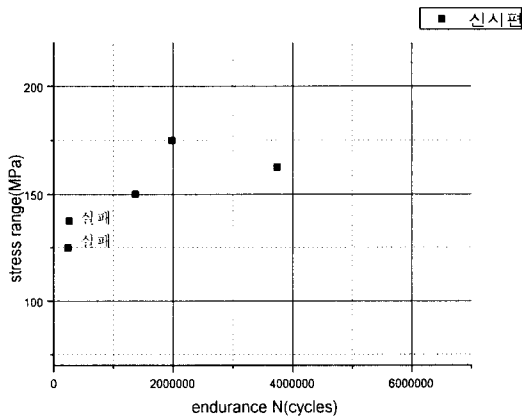
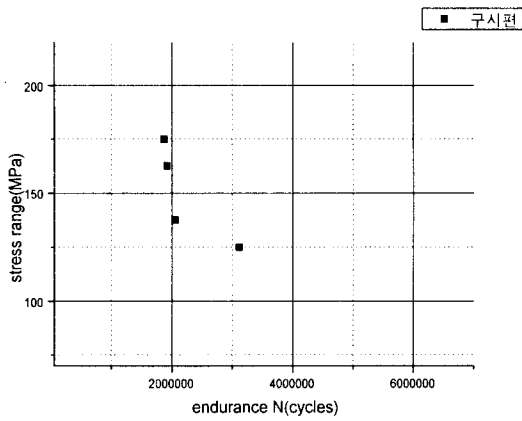


Fig. 8 S-N curves of two carbon steel tubes.

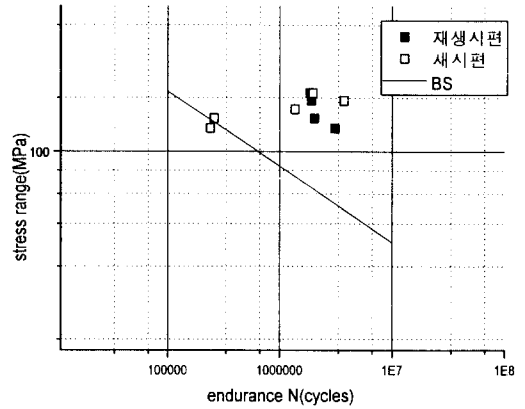


Fig. 9 Comparison of BS ( British Standard )

후기: 본 연구에 협조하여 주신 동부건설 시험실의 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 4. 참고문헌

- 1] J. A. Bannantine, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, pp. 1~29, 1990
- 2] E. Zahavi. "Fatigue Design", CRC, pp. 42~49, 1996
- 3] AWS D1.1 structure welding code, 13th, p. 225, 1996
- 4] S. V. Dubovetskii, G.I. Sergatskii, and O.G. Kasatkia : "Optimization of CO<sub>2</sub> Welding Conditions, Automatic Welding, Vol. 33, No. 12, pp. 22~26, 1980
- 5] Journal of KWS, Vol. 10, No. 4, pp. 222~229, Dec., 1992
- 6] G. E. Linnere. "Welding Metallurgy, vol. 1" American welding society, pp. 263~268, 1967
- 7] G. E. Linnere. "Welding Metallurgy, vol. 2" American welding society, pp. 283~289, 1967
- 8] BS 5400, Code of practice for fatigue, Part 10, p. 21, 1980