

단조소입법으로 제조된 컨넥팅로드의 기계적 특성에 관한 연구

최문일* · 강성수**

(1997년 1월 20일 접수)

A Study on the Mechanical Properties of Connecting Rod Manufactured by Direct Quenching

Munil Choi and Seongsu Kang

Abstract

In order to study the manufacturing possibility of connecting rod by direct quenching method, the difference between connecting rod by direct quenching and that by general heat treatment were investigated by observing microstructure, by measuring mechanical properties, by conducting fatigue testing, and by measuring the amount of tool wear in actual cutting. Connecting rod manufactured by direct quenching had better fatigue life than that by general heat treatment, which was due to homogeneous microstructure, and higher strength. The amount of cutting tool wear of connecting rod by direct quenching was higher than that by general heat treatment, which was due to low machinability and high toughness of tempered martensite microstructure. Therefore it will be added the study of heat treatment and cutting condition for manufacturing by direct quenching.

Key Words : Direct Quenching Method(단조소입법), Fatigue Life(피로 수명), Homogeneous Microstructure(균질 미세조직), Tool Wear(공구 마모), Tempered Martensit(소려된 마르텐사이트), Toughness(인성)

1. 서론

가공열처리란 가공과 열처리를 유기적으로 결합시킴으로써 강의 기계적 성질 등을 향상시키는 제조야금학적 기술이다. 가공열처리(thermo-mechanical treatment)는 온도-시간-외력을 합쳐서 단순열처리로는 기대할 수 없는 미지의 재료특성을 발견함으로써 강의 기계적 성질을 개선하고자 하는 새로운 방법이다.

일반적으로 금속재료의 강도를 열처리에 의해 증가시키면 인성은 저하되므로 강성과 인성을 모두 필요로 하는 경우에 가공열처리 방법을 도입하여 보통의 가공 또는 열처리에서 얻을 수 없는 금속조직을 구하기도 한다.

강의 열처리는 일반적으로 가열, 냉각의 조작으로 되고, 이러한 처리 사이에 통상 변태를 수반한다. 따라서 열처리의 어떤 단계에서 가공을 하는가에 따라서 공정조합이 가능하고 여기에 따라 기계적 성질도 달라진다. 이와 같

* 창원전문대학 자동차과

** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

은 공정조합에 대하여 가공을 가하는 시기를 변태의 표준으로 해서 분류하면 특징이 이해하기 쉽게 된다.

Table 1은 가공열처리의 분류를 한 것이며, 제각기의 처리법 위치를 나타내고 있다. 또 Table 1과 강의 등은 변태곡선을 같이 생각하면 요구되는 가공조건이나 작업의 난이도에 대한 주장이 가능할 것이다.

Table 1에서 단조소입(direct quenching)이란 안정 γ 영역에서 열간 단조를 행한 후 바로 소입을 행하여 마르텐사이트 변태를 발생시키는 방법이다. 즉, 재결정이 일어나기 전에 바로 소입하여 가공경화의 효과와 마르텐사이트화의 효과를 동시에 기대하는 처리방법으로서 이는 열간 단조후에 재결정을 진행시켜 결정입자의 조대화에 의한 소입성 향상을 도모하고자 함이다. 즉, 강을 단조가열온도로 유지해서 이것을 단조한 다음 곧바로 유냉등의 급냉조작을 실시함으로써 단조후 공냉 또는 서냉한 후 다시 소입을 행하는 일반열처리에 비해 기계적 성질이 개선되어질 수 있다. 단조가열온도는 보통 안정 오스테나이트 영역 내에서 선택되는 것으로 이와 같은 온도에서는 소성변형에 의해 결정 내에 축적된 변형에너지는 여러 차례의 재결정에 의해 재빨리 방출되어 소위 회복을 위한 재질의 강화는 그다지 쓸모가 없지만 단조소입의 경우엔 열간 가공 후 곧바로 담금질, 즉, 변태 전에 가공(안정 오스테나이트 범위

에서 가공후 급랭시키는 방법)을 하여 재결정화를 저지하는 강의 강화 법으로서 의미가 있다. 이 방법은 비교적 적용이 용이한 가공열처리방법이며 열간 단조후 냉각, 재가열, 소입이라는 일반열처리 방법에 비해 단조후 직접 소입한다는 공정구성 측면에서 공정의 단순화라는 경제적인 가치를 갖는다.

컨넥팅로드는 엔진의 운전중 압축과 인장을 반복적으로 받으므로 이에 상당한 피로 강도에 견딜 수 있도록 강성과 인성을 모두 고려하여 설계, 제작되어야 하며 특별히 강도만을 고려한 설계는 중량을 증가시켜 엔진과 차체의 동적 특성에 나쁜 영향을 미친다. 따라서 컨넥팅로드는 중량이 최소화되면서도 강도는 유지되도록 하기 위해 일반적으로 I형 단면으로 된 것을 사용한다. 이와 같이 차량용 엔진의 동력전달 시스템에서 핵심역할을 수행하고 있는 컨넥팅로드의 기계적 성질이 좋으면서 중량도 가벼워야 하고 가공성도 용이해야하는 특수성 때문에 소재 개발에 신중해야 한다.

따라서 본 연구는 1차적으로는 컨넥팅로드를 가공열처리의 일종인 단조소입 방법을 이용, 실험 제작해 본 결과를 해석하여 최적 공정설계에 필요한 데이터를 수집, 그에 따른 공정조건을 설정코자 하였으며 2차적으로는 일반 열처리 공정에 의해 제조되고 있는 현재의 컨넥팅로드의 제

Table 1 Classification on thermo-mechanical treatment of steel

Classification	Common remarks	
I. Treatment before transformation	<ul style="list-style-type: none"> a. Quenching after processing in the stable austenite range b. Martensite transformation after processing in the meta-stable austenite range c. Austempering after processing in the meta-stable range 	<ul style="list-style-type: none"> · Direct quenching method · Ausforming · Hot-cold-working · Ausrolltempering
II. Treatment during transformation	<ul style="list-style-type: none"> a. Plastic working during transformation (martensite: pearlite) 	<ul style="list-style-type: none"> · Subzeroll · Iso-forming
III. Treatment after transformation (especially, raising temperature)	<ul style="list-style-type: none"> a. Martensite treatment b. Tempererd martensite treatment c. Pearlite or bainite treatment 	<ul style="list-style-type: none"> · Marforming · Warm working · Patenting and drawing

조공법과 비교하여 그 특징과 장단점을 도출, 활용하고자 하였다. 즉 일반열처리 공법을 이용, 단조후 열처리(소입, 소려)하여 제조하고있는 기존의 컨넥팅로드를 가공열처리 방법인 단조소입법으로 제조하여 각각의 미세 조직과 기계적인 특성, 가공성 등을 비교해봄으로써 단조소입법의 적용을 통한 공정의 단순화(가공경비 측면) 뿐만 아니라 기계적 성능 향상을 위한 재료학적 미세조직의 제어 가능성을 알아보하고자 하였다.

2. 실험 방법

Table 2는 실험에 사용된 S48C소재의 화학성분을 나타낸 것으로 성분을 스펙트로메타와 I.C.P로 분석해본 결과 Spec.(JIS G 4051, SES N 3103)의 요구 화학조성비를 만족하는 것으로 나타났다.

단조소입법을 이용한 컨넥팅로드의 실험은 Fig.1의 정순서에 의하여 진행되어졌으며 일반열처리 방법에 의한 컨넥팅로드의 제조와 단조소입에 의한 컨넥팅로드의 제조 공정중 열처리 조건은 Fig.2와 Fig.3에 각각 비교하여 나타내었다.

이상과 같이 일반열처리와 단조소입, 열처리한 소재들의 미세조직 및 기계적 성능을 비교하기 위한 강도 테스트를 실시하였는데 이는 단조소입 방법의 일반 열처리 대체 가능성을 파악하기 위함이다.

미세조직의 비교 분석결과 단조후 일반 열처리 소재는 Fig.4의 B부분에서 표면에 침탄층이 형성되어 있음을 확인할 수 있었고 미세조직은 표면에서 내부로 갈수록 Fig.5와 같이 소려된 마르텐사이트 조직으로부터 펄라이트와 페라이트가 혼재되는 경향을 나타내고 있다. 그리고 A 및 C부분의 조직은 Fig.6과 같이 펄라이트와 페라이트가 공존하는 조직을 나타내었고 페라이트가 입계근처에 많이 존재하고 있음을 나타내고 있다. 그리고 단조소입 소재의 경우엔 전체적으로 Fig.7과 같이 전형적인 소려된 마르텐사이트 조직이었으며 조직이 미세하게 나타나고 있다.

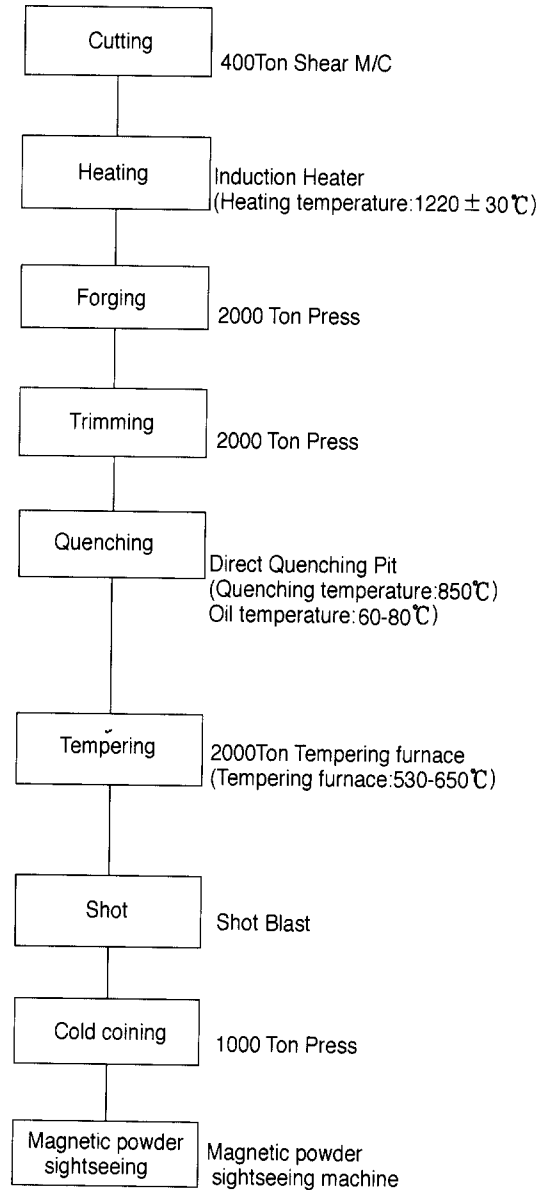


Fig.1 Test process of direct quenching

Table 2 Analysis of chemical composition

Element	C	Si	Mn	P	S	Pb
Specification(S48C)	0.45-0.51	0.15-0.35	0.60-0.90	0.03below	0.035 below	0.04-0.10
Test Material	0.468	0.263	0.891	0.0178	0.0246	0.0968

Item	Quenching	Tempering	Remarks
Heat treatment furnace type	Continuous furnace (atmosphere furnace)	electric furnace	
Heat treatment			
Distribution of heat treatment hardness(HRc)	41-44	24-28	
Heating temperature	1250 ± 50°C		
Micro structure formation	Micro-proeutectoid ferrite+pearlite		

Fig.2 General heat treatment conditions

Item	Quenching	Tempering	Remarks
Heat treatment furnace type	200Ton oil tank, continuous furnace	electric furnace	
Heat treatment			Temperature of oil during oil-cooling after quenching: 47°C deposition time : 4.5min
Distribution of heat treatment hardness(HRc)	24 - 27		
Heating temperature	1250 ± 25°C		
Micro structure formation	Tempered martensite		

Fig.3 Heat treatment conditions of direct quenching method

그리고 두 소재의 경도를 로크웰 경도기를 이용하여 HRc/150 kg/sec 조건으로 측정해 본 결과 일반 열처리 소재의 경우 A, B, C부분의 평균 경도가 각각 25.2, 28.1, 22.8 HRc로 대체로 JIS의 요구조건(22-30 HRc)을 만족하였으나 C부분의 경도 값이 비교적 낮은 이유는 초석 페라이트의 과다한 석출에 기인하는 것으로 판단된다. 단조소입 소재의 경우엔 각 부분 모두 조건을 만족하는 것으로 측정되었으나 하한 치로 경도 관리를 하는 것이

가공성 향상에 도움이 될 것으로 사료된다.

기계적 성능 실험의 시험방법은

- (1) 인장 강도시험
컨넥팅로드 대단부와 소단부를 그룹에 고정 후 인장 하중을 가한다.
- (2) 압축 강도시험
컨넥팅로드 대단부와 소단부를 그룹에 고정한 후 압

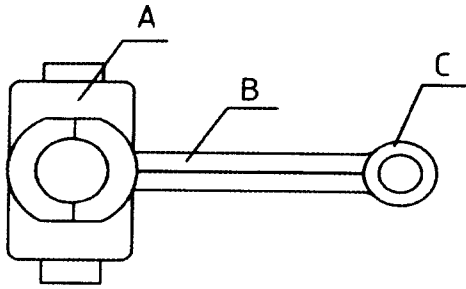


Fig.4 Microstructure measuring points of connecting rod material



Fig.5 Internal structure of B part (case of general heat treatment)

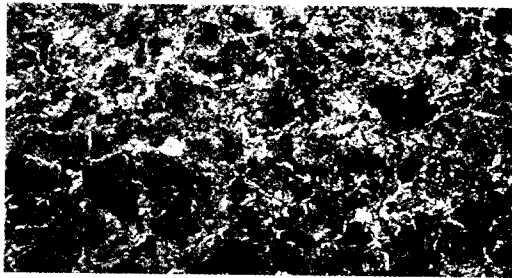


Fig.6 Internal structure of A & C parts (case of general heat treatment)



Fig.7 Internal structure of all parts (case of direct quenching)

속 하중을 가한다.

이때 지그장착도 및 하중방향은 인장 강도시험의 지그장착도와 동일하고 가하는 하중 방향만 반대다.

(3) 굽힘 강도시험

컨넥팅로드 대단부와 소단부를 자체 제작한 지그에 고정한 후 굽힘 하중을 가한다.

(4) 비틀림 강도시험

컨넥팅로드 대단부와 소단부를 자체 제작한 지그에 고정한 후 소단부에 비틀림 하중을 가한다.

3. 실험결과 및 고찰

단조후 일반 열처리 소재와 단조소입 소재의 미세조직 관찰 결과를 토대로 기계적 성능에 영향을 미치는 결정입자 유동의 구성 형태를 파악하는 것이 다음 강도 실험의 분석에 유용하리라 생각되어 80% HCL에 24시간 부식시켜 유동의 연속성 및 데드 존의 존재여부, 밀도, 쏠림, 불연속성등을 조사해 본 결과, 일반열처리 소재의 경우 Fig.8과 같이 전체적으로 고밀도이며 데드 존이 없었으며 대체적으로 유동은 연속적이었으나 국부적으로 불연속 유동 및 쏠림이 존재하여 단조 실험시 개선점으로 지적되나 강도와 가공상 문제는 없을 것으로 사료된다. 단조소입 소재의 경우에도 Fig.9와 같이 결정입자 유동(grain flow)은 연속적이고 고밀도이며 데드 존이 없는 양호한 유동형태를 보였으나 머리부분(cap)의 유동이 반대 방향이어서 기계적인 이방성 유동라인(flow line) 형성으로 인한 강도상의 문제가 우려되어 결정입자 유동이 압연 방향으로 형성되도록 단조 작업시 원소재의 방향을 바꾸는 공정상의 개선이 요구되었다.

상기 내용을 참고하여 기계적 성능 시험을 한 결과는 다음과 같다.

Fig.10의 인장강도 비교시험의 경우, 결과 그래프에서 최대 인장하중 파단변위에 대한 데이터를 수집하여 상대비교한 결과는 Table 3과 같으며 이때 각 소재에 대한 평균하중은 일반 열처리 소재가 7,825 kgf, 단조소입 소재가 7,908 kgf로 단조소입 소재가 일반열처리 소재보다 약 80 kgf 높은 값을 나타내었다.

Fig.11의 압축강도 비교시험의 경우, 결과 그래프에서 최대압축 하중시의 변위에 대한 데이터를 수집하여 상대비교한 결과는 Table 4와 같으며 이때 각 소재에 대한 평균하중은 일반열처리 소재가 7,487 kgf, 단조소입 소재가 7,908 kgf로 단조소입 소재가 일반열처리 소재보다 약

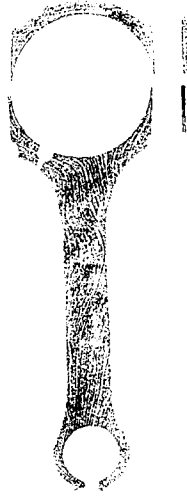


Fig.8 Grain flow of general heat treatment material

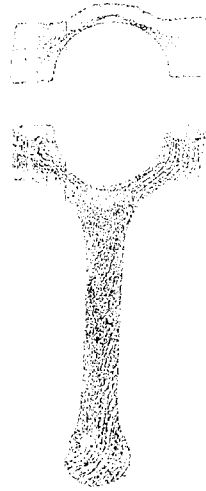


Fig.9 Grain flow of direct quenching material

Table 3 Tensile strength test result

Material for general heat treatment			Material for direct quenching			Remarks
NO.	tensile strength (Kgf)	dis placement (mm)	NO.	tensile strength (Kgf)	displacement (mm)	
1	7,530	6.3	1	7,908	7.3	maximum tensile load fracture displacement (δ)
2	8,036	8.0	2	7,908	7.6	
3	7,908	7.3	3	7,908	7.5	

420 kgf 높은 값을 나타내었다.

Fig.12의 굽힘강도 비교시험의 경우, 결과 그래프에서 굽힘하중시의 변위에 대한 데이터를 수집하여 상대 비교한 결과는 Table 5와 같으며 이때 각 소재에 대한 평균하중은 일반열처리 소재가 1,088 kgf, 단조소입 소재가 1,267 kgf로 단조소입 소재가 일반열처리 소재보다 약 180 kgf 높은 값을 나타내었다.

Fig.13의 비틀림 강도 비교시험의 경우, 결과 그래프에서 비틀림하중시의 각도에 대한 데이터를 수집하여 상대

비교한 결과는 Table 6과 같으며 이때 각 소재에 대한 평균 비틀림 하중은 일반열처리 소재가 6.5 kgf-m, 단조소입 소재가 6.3 kgf-m로 단조소입 소재가 일반열처리 소재보다 약 0.2 kgf-m 낮은 값을 나타내었으나 큰 차이는 없었다.

이상의 4가지 실험을 실시해본 결과 일반 열처리 소재에 비해 단조소입 소재의 기계적 성질이 비교적 우수하였으나 그 차이는 크지 않았다. 그리고 일반열처리 소재 대비 단조소입 소재의 내마모 성능을 비교하기 위하여

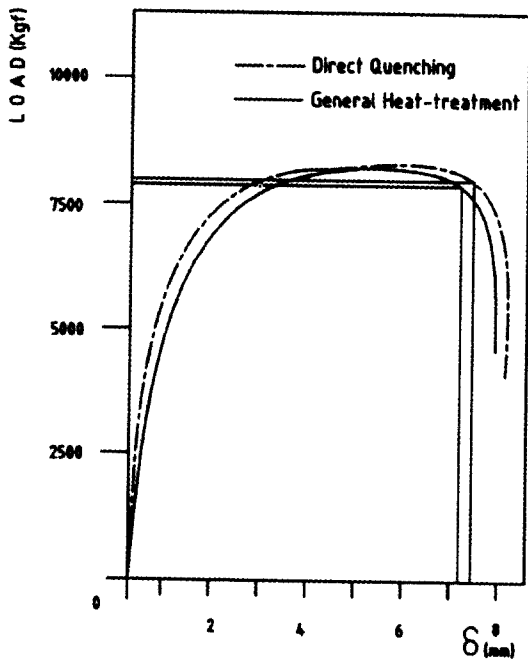


Fig.10 Comparison graph of tensile strength test result

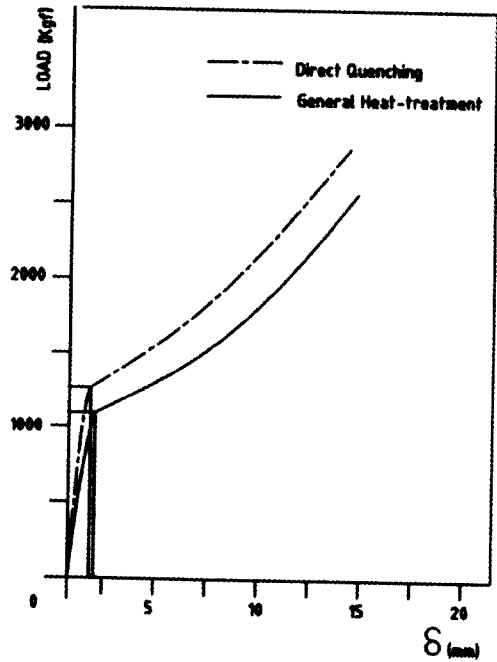


Fig.12 Comparison graph of bending strength test result

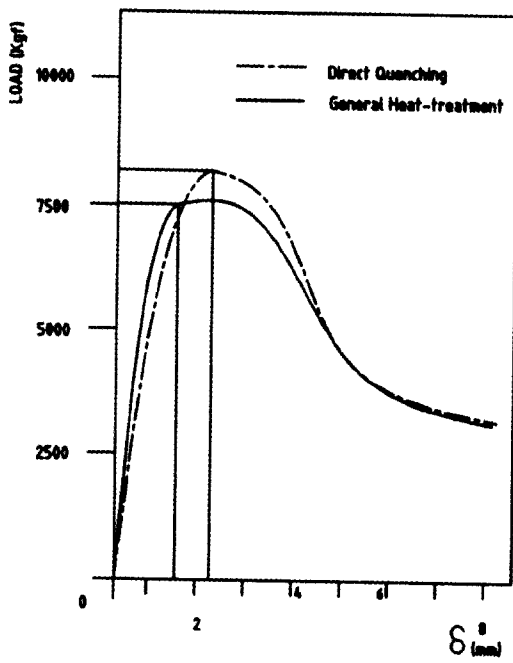


Fig.11 Comparison graph of compression strength test result

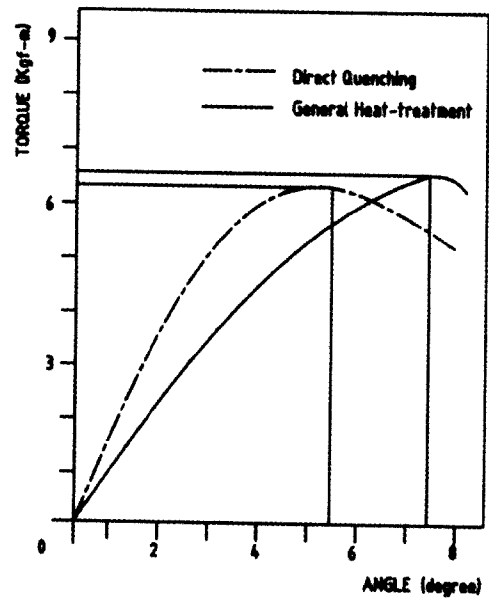


Fig.13 Comparison graph of torsional strength test result

Table 4 Compression strength test result

Material for general heat treatment			Material for direct quenching			Remarks
NO.	Compression strength (Kgf)	displacement (mm)	NO.	Compression strength (Kgf)	displacement (mm)	
1	7,276	1.5	1	7,908	2.2	-Maximum compression load(P) -Displacement during maximum compression load (δ)
2	7,531	1.8	2	7,653	2.3	
3	7,653	1.8	3	8,163	2.3	

Table 5 Bending strength test result

Material for general heat treatment			Material for direct quenching			Remarks
NO.	Bending strength (Kgf)	displacement (mm)	NO.	Bending strength (Kgf)	displacement (mm)	
1	1,148	2.0	1	1,327	1.3	-Bending strength (P) -Displacement during bending load (δ)
2	1,071	1.8	2	1,250	1.8	
3	1,046	2.0	3	1,224	2.1	

Fig.14와 같이 피로 내구성 시험을 실시하였는데 가스압력에 의한 최대 압축력과 T.D.C 및 B.D.C에서의 관성력으로부터 피스톤 1회 왕복운동시 컨넥팅로드가 받는 최대 인장 및 압축 조건은 6500 rpm에서 압축 1,398 kgf, 인장 990 kgf (mean load = -204 kgf로 일정)로 계산하였으며 평균하중은 일정하게 유지하고 하중 진폭을 증가시켜 부품의 하중-수명 상관관계를 구한 결과, Fig.15와 같으며 그래프에서 데이터를 수집하여 비교한 결과는

Table 7과 같다.

시험결과, 단조소입 소재는 전 하중 영역에서 일반열처리 소재와 피로 강도가 거의 대등한 수준으로 나타나며 파단부위는 단조소입소재 대부분이 유공(oil hole)부분에 집중되었으나 일반열처리 소재는 I부 및 소단부와 유공부분 등에 걸쳐 넓게 파단되는 경향을 나타내었다. 결론적으로 단조소입 소재의 경우 정적 강도 면에서는 머리(cap)부분의 굽힘 강도 및 I부의 압축강도가 일반열처리 소재

Table 6 Torsional strength test result

Material for general heat treatment			Material for direct quenching			Remarks
NO.	Torsional strength (Kgf-m)	Torsional angle (ANGEL)	NO.	Torsional strength (Kgf-m)	Torsional angle (ANGEL)	
1	6.8	7.8	1	6.6	5.5	- Torsional load (T) - angle during torsional load (ANGEL)
2	6.2	7.0	2	6.5	6.0	
3	6.4	7.5	3	5.9	5.3	

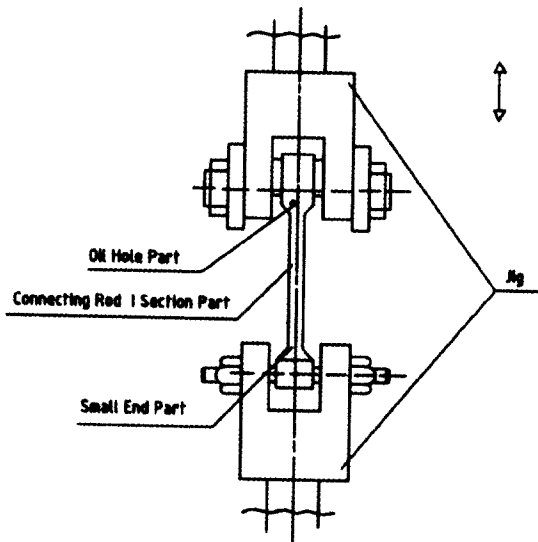


Fig.14 Schematic view of fatigue durability test

보다 다소 낮고 I부의 굽힘 강도는 대등하며 인장강도는 다소 우세한 경향을 나타내었다. 피로내구 시험결과와 전 하중 영역에서 단조소입 소재의 피로강도가 일반열처리 소재와 대등한 수준이라고 판단되나 유공부분에 파단이 집중되는 현상이 나타났다. 이는 응력 집중부에 단조소입 소재의 파단이 집중되었음을 뜻하므로 인성이 부족한 것

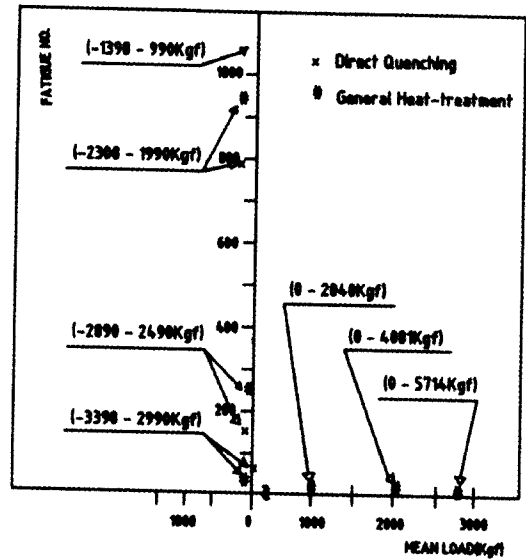


Fig.15 Comparison graph of fatigue test Result

으로 보여 열처리 조건의 설정시 이에 대한 고려가 필요하다. 그리고 단조소입 소재의 유공부분에 대한 근본적인 파단방지 대책으로는 유공부분의 위치변경과 유공부분에 모떼기(chamfering)를 함으로써 피로 수명이 증가되어 유공부분의 응력집중 완화효과를 기대하는 방법도 고려할 수 있다.

Table 7 Fatigue durability test result

Condition of load	Material for direct quenching		Material for general heat treatment		Frequency	Remarks
	fracture method	fracture region	fracture method	fracture region		
-1398Kgf-990Kgf	>1,000,000		>1,000,000		9Hz	
-2398Kgf-1990Kgf	794,814	oil hole	915,310	small edge part	"	
-2899Kgf-2490Kgf	189,791	oil hole	195,596	I부	"	
	193,260	oil hole	259,705	oil hole	"	
			284,260	oil hole	"	
-3390Kgf-2990Kgf	82,418	oil hole	66,539	small edge part	"	
-0Kgf-5714Kgf	8,940	oil hole	9,789	small edge part	"	ref
-0Kgf-4081Kgf	14,100	oil hole	12,101	small edge part	"	ref
-0Kgf-2040Kgf	20,348	oil hole	14,140	oil hole	"	ref

4. 결 론

본 연구에서는 단조소입법을 이용한 컨넥팅로드의 양산 가능성을 알아보고자 컨넥팅로드를 단조소입법으로 제조하고 이것의 기계적 특성 검토 및 개선을 위한 실험을 수행하였다. 따라서 이 연구 결과가 컨넥팅로드의 기계적 특성 및 생산성 향상뿐만 아니라 여타 단조소재의 개선에 그 기초 데이터로 활용되어질 수 있기를 기대하며 다음과 같이 결론을 정리하였다.

(1) 기존 일반열처리 공법을 적용한 컨넥팅로드 제조의 경우엔 가공시의 쾌삭성능을 좋게 하기 위하여 거의 전 부분을 펄라이트 및 펄라이트 공존조직으로 구성하면서도 I 부위는 강도를 향상시키기 위하여 미세 펄라이트 조직으로 형성시켜야하는 까다로운 재료학적 조직 제어를 필요로 하였다.

(2) 일반열처리 공법보다 비교적 공정이 단순하여 생산성 향상이 기대되는 단조소입법(direct quenching method)에 의한 컨넥팅로드의 제조 실험 결과, 전체적으로 균질 템퍼드 마르텐사이트 조직의 소재가 얻어졌다.

(3) 일반열처리 소재와 단조소입 소재의 강도 및 피로 내구 비교 실험 결과, 단조소입 소재가 일반열처리 소재보다 비교적 우수하여 기계적 특성의 측면에서는 양산 가능한 수준의 결과를 얻을 수 있었으나 후가공, 즉 절삭가공

시엔 공구의 조기 마모와 약간의 구성인선 발생 경향이 있어 가공성은 다소 저하되었다.

(4) 단조소입법으로 제조되는 컨넥팅로드의 가공성을 향상시키기 위해서는 단조소입 공정에서의 열처리 조건 변경을 통한 미세조직의 변화나 템퍼드 마르텐사이트 조직 소재의 절삭조건에 대한 추가 연구가 필요하나 단조소입법의 공정 특성상 우려되는 대량 생산시의 제품별 산포에 대한 문제는 여러 회에 걸친 양산 실험결과, 안정된 열처리 조건에 대한 데이터의 확보 및 적용, 관리로 개선 가능하다는 결론을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) 日本金屬學會, 1988, “合金의 時效 過程 과 그 解釋”, pp.313~406.
- (2) J. W. Christian, 1985, “The Theory of Transformation in Metals”, Pergamon, Oxford, pp.247~252.
- (3) 박정웅, 방명성, 1991, “鋼의 加工熱處理 와 時效強

- 化”, 圓昌出版社, pp.111~159.
- (4) 關口秀夫, 1990, “加工熱處理 方法에 의 한 材質改善 및 制御”, 材料科學會誌, pp.113~116.
- (5) 鈴木康末, 1986, “溫間鍛造의 現狀”, 鐵鋼72-10, pp.1488~1497.
- (6) 牧正支, 1986, “鋼의 加工熱處理의 金屬學”, 塑性と加工 25-284, pp.772~779.
- (7) 小林勝, 1985, “加工, 結晶粒 微細化とこの效果, 塑性と加工”, pp.45~53.
- (8) 關口秀夫, 1986, “新素材의 加工”, 27-300, 日本精密工學會, pp.45~53.
- (9) 熱處理研究會, 1993, “機械部品の 熱處理”, 技術研究社, pp.396~403.
- (10) D. L. MacDanel, 1985, “Metal Trans”, 16 A-1105, pp.110~119.
- (11) K. Kreider and M. Marciano, 1989, “Metallurgical society of AIME”. Vol. 245 pp.1279~1286.
- (12) A. Kelly and G. J. Davies, 1985, “Metallurgical reviews”, Vol.10, pp.37~77.
- (13) 원동연, 김홍, 1987, “材料科學”, 集文堂, pp.144~145.
- (14) 犬飼一雅, 宮坂金佳, 1989, “鋼의 加熱切削”, 日本精密工學會誌, Vol. 55, No.7 pp. 1283~1288.
- (15) 田忠影, 1985, “鋼의 機械加工”, 養賢堂, pp.7~11.
- (16) 井良文, 1984, “鋼의 超精密加工”, 日刊工業新聞社, pp.11~23.