

# 다구찌 직교배열 실험을 이용한 무한궤도용 트랙 슈의 충격인성 향상 연구

김영석\*, 장근성<sup>2</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 기계공학부, <sup>2</sup>현대제철(주) 포항공장 중기생산부

## Impact toughness improvement of an undercarriage track shoe using the Taguchi orthogonal array experiment

Young Suk Kim<sup>1</sup>\*, Keun Sung Chang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, <sup>2</sup>Hyundai Steel Co.

**요약** 트랙 슈는 건설 중장비의 무한궤도에 사용되는 중요한 핵심 부품으로 열악한 환경에서 사용되기 때문에 충분한 강도와 충격인성이 확보되어야 한다. 본 연구에서는 보론 첨가강으로 만들어지는 트랙 슈의 경화능을 조미니 H-밴드법을 통해 먼저 확인한 후, 충격인성 개선을 목표로 다구찌의 직교배열실험법을 사용하여 트랙 슈의 제조공정을 최적화하여 트랙 슈의 충격인성 향상을 꾀하고자 하였다. 공정변수로는 트랙 슈의 제조과정에 있는 블룸소재별 압하비, 뜨임 온도, 뜨임 유지 시간을 택하였으며, 직교배열 실험을 수행하여 이들 변수가 샤프티 충격실험으로 평가한 충격인성에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과, 트랙 슈의 충격인성은 압하비가 높은 쪽이 유리하고, 뜨임 온도는 210°C, 뜨임 유지 시간은 80분이 유리하다는 것을 알 수 있다.

**Abstract** This study examined the toughness improvement of a track shoe used as the undercarriage of excavator and bulldozer parts. The excavator is operated under poor conditions, such as the build-up field and quarry. Therefore, the track shoe requires high strength and impact toughness to endure immense shock while at work. The track shoe was made of heat treated boron steel. The sufficient possibility of hardenability with the theoretical Jominy curve for boron steel was confirmed while quenching. The Taguchi orthogonal array experiment method was used to optimize the process variables, such as area reduction ratio and heat treatment conditions (tempering temperature and holding time), to achieve toughness improvement. The toughness of the track shoe increased with increasing area reduction, and a tempering temperature of 210°C and a tempering time of 80 min are beneficial for improving the toughness of the track shoe.

**Key Words** : Boron steel, Jominy curve, Optimization, Taguchi orthogonal array experiment, Track shoe

### 1. 서론

건설 중장비, 탱크 또는 트랙터와 같은 중장비에 사용되고 있는 무한궤도(Undercarriage)용 차량의 주행 장치인 Fig.1의 무한궤도는 여러 개의 트랙 슈(Track Shoe)

들이 크롤러(Crawler)의 길이 방향으로 다수 개 배치되어 트랙 링크(Track Link)와 트랙 핀(Track Pin)에 의해 서로 연속된 구조를 갖는다.(Fig.2)

통상 트랙 슈는 다음과 같은 공정을 거쳐 생산된다 : 냉간 프레스에 의한 압연재 절단-> 냉간 프레스에 의한

이 논문은 2013년도 경북대학교의 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임.

\*Corresponding Author : Prof. Young-Suk Kim (Kyungpook National Univ.)

Tel: +82-53-950-5580 email: caekim@knu.ac.kr

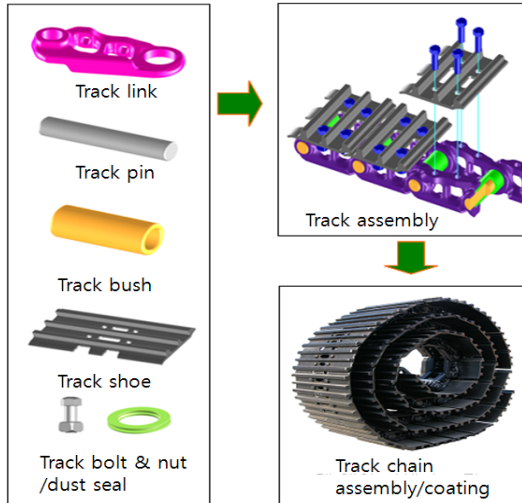
Received August 28, 2014

Revised October 21, 2014

Accepted March 12, 2015

Published March 31, 2015

U노치 펀칭->870℃ 전후의 담금질 가열->열간 프레스에 의한 볼트 체결용 홀 펀칭->담금질 열처리(quenching, 퀴칭)->270℃ 전후에서 저온 뜨임처리(tempering, 템퍼링)->볼트 홀 펀칭 시에 발생한 버(burr) 제거를 위한 챔퍼링->자분탐상시험->출하.



[Fig. 1] Manufacturing process of track shoe of undercarriage vehicle



[Fig. 2] Section view of track shoe

트랙 슈는 전진이나, 석산 등에서 브레이크(Break) 작업 시에 발생하는 각종 피로나, 충격 인장 및 마모 하중에 견딜 수 있도록 충분한 강도, 인성(toughness) 및 내구성을 가져야 하므로, Table 1과 같이 최소한의 물성조건을 요구한다.

[Table 1] Mechanical properties needed for track shoe

Reduction ratio of Area (RA)	Section hardness (HRc)	Charpy Impact value ( $Kg_m/cm^2$ )
> 6	> 32	> 6

이를 위해 니켈(Ni)이나, 몰리브덴(Mo) 등과 같은 고가의 합금 첨가제의 소재를 사용하고 있는데 이는 건설 장비 및 무한궤도 제조관련업체의 수익성을 악화시키는 요인이 되고 있다. 따라서 상대적으로 저렴하면서 소량 첨가시 강도향상효과가 큰 보론(B)이 최근 주목받고 있다. 보론은 30PPM 정도의 소량 첨가만으로도 담금질 열처리 시에 결정입계에 보론을 편석시키고 초석페라이트(ferrite)의 생성을 늦추며, 입계 결합력과 기지강도를 현저히 개선시키는 경화능(hardenability, 또는 소입성)이 우수하기 때문이다.

이와 같은 보론 효과에 주목하여 현대제철(주)에서는 15B26Cr 보론강(Boron steel)을 트랙 슈의 제작에 적용하고 있다. 보론 강도의 일반적인 담금질 효과에 대해서 박철우 [2]와 조삼규 [3] 등의 연구가 있으나 트랙 슈와 같이 실제 제품을 대상으로 한 연구 사례는 거의 보고되고 있지 않다.

본 연구에서는 실험계획법으로 널리 알려진 다구찌의 직교배열실험법(Taguchi's orthogonal array experiment method) [4,5,6]을 사용하여 트랙 슈의 제조공정을 최적화하여 트랙 슈의 충격인성(Impact toughness) 향상을 꾀하고자 하였다. 공정변수로는 트랙 슈의 제조과정에 있는 블룸(Bloom) 소재별 압하비, 뜨임 온도, 뜨임 유지 시간을 택하였으며, 직교배열 실험을 수행하여 이들 변수가 충격인성에 미치는 영향을 평가였다. 또한 선정된 최적 공정변수를 적용하여 기존의 트랙 슈를 생산하고 있는 연속가열로에서 뜨임작업을 수행하여, 샤르피(Charpy impact test) 충격시험으로 충격값(Impact Value, I.V)의 변화를 확인하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 조미니 H-밴드법

담금질 경화능 표시방법으로는 입계직경에 의한 경화는 표시방법과 조미니 H-밴드법(Jominy H-band method)이라고 불리는 한쪽 끝단 담금질 방법(Jominy end-quench hardenability test) [7,8]에 의한 경화능 표시방법이 있다. 입계직경에 의한 경화능 표시방법에서는 입계냉각속도가 몇 ℃/초일 때 몇 mm 깊이까지 완전 경화되는지 또는 어느 정도의 크기일 때 어떤 냉각을 하면 표면으로부터 몇 mm까지 경화되는지를 확인하는 방법이다.

한편 기계구조용 탄소강, 저합금강의 경화능 시험에 자주 이용되는 조미니 시험(Jominy test)은 강을 담금질 열처리했을 때 경화깊이가 요구되는 품질 규격대로 잘 될 수 있는지를 보증하는 시험이다. 조미니 H-밴드법은 한쪽 끝단을 담금질 열처리하여 중심부까지 경화되는 임계직경과 끝단부로부터 안쪽으로 경도(HRc)를 측정하여 측정값들로 경화능 곡선(hardenability curve, H-curve) 또는 조미니 곡선(Jominy curve)을 구하는 방법이다. 통상 같은 규격의 강일지라도 조성이나 결정립의 크기가 다르기 때문에 측정값의 편차가 존재하여 조미니 선도에 H-밴드라고 불리는 폭이 생긴다. 이 H-밴드가 정해진 강을 H-강이라고 한다. 이 실험에서는 직경 25mm, 길이 100mm 시편을 사용한다.

## 2.2 보론강의 조미니 곡선 예측

보론강의 트랙 슈에 담금질 열처리를 통해 충분한 강도와 인성을 부여하기 위해서는 원 소재를 압연하기 전에 반드시 블룸 소재에 대한 경화능을 확인하여야 한다. 이를 위해서 조미니 시험을 실시하여 보론이 소입성 향상에 유효하게 기여하는지를 확인을 하여야 하며, 또한 소입성을 예측하여 열처리 조건을 설정하는 것이 바람직하다.

보론강의 화학적 성분을 이용하여 조미니 곡선과 각 조미니 거리에서의 조미니 경도를 예측할 수 있는 방법들이 알려져 있는데 본 연구에서는 고마츠 제작소(일본) 기술규격집을 참조하였다. [9]

## 2.3 트랙 슈의 강도와 인성향상을 위한 열처리

강의 조직 중에서 오스테나이트는 탄소를 잘 고용하나 페라이트는 탄소를 잘 고용하지 않는다. 따라서 강을 A3,2,1변태점보다 30~50℃정도 높은 온도로 일정시간(1인치당 30분) 가열하여 오스테나이트 상태로 한 후 담금질 하게 되면 오스테나이트에 고용되어 있던 탄소가 페라이트에 역지로 고용당한 경질의 마르텐사이트(Martensite)가 얻어지고 강도와 경도가 상승하게 된다. [8] 본 연구에서는 퀸칭시 마르텐사이트 개시온도 Ms (Martensite start point)와 종료온도Mf (Martensite finish point) 를 다음 식에 의해 추정하였다. [10]

$$Ms = 550 - (350 \times \%C) - (40 \times \%Mn) - (35 \times \%V) - (20 \times \%Cr) - (17 \times \%Ni) - (10 \times \%Cu) - (10 \times \%Mo)$$

$$- (5 \times \%W) + (15 \times \%Co) + (30 \times \%Al) + (0 \times \%Si) \quad (2.1)$$

$$Mf = Ms - 215 (\pm 15^\circ C) \quad (2.2)$$

담금질한 강은 경도는 크지만, 그 반면에 충격에 취약하기 때문에 A1변태점 이하의 적당한 온도에서 적정시간을 유지하는 뜨임처리를 하여 담금질 시 발생한 내부응력을 감소시키고 충격인성을 개선하여야 한다. 또한 결정립이 미세화 할수록 강도와 취성파괴 저항(인성)이 높아지기 때문에 블룸 소재에 적당한 압하율을 가하는 것이 필요하다. [12]

## 3. 트랙 슈의 충격인성

### 3.1 트랙 슈의 압하비

트랙 슈의 단면 압하비는 블룸 소재의 단면에서 트랙 슈 단면으로 압연될 때에 결정되는 소재 단면의 축소 변화량이다. 본 연구에서는 먼저 단일 블룸의 단면에 대하여 트랙 슈의 단면 크기가 각기 다른 3종류(트랙 슈 1(28RA), 2(11RA), 3(6RA)으로 명명)를 선정하여 트랙 슈의 압하비(=블룸 단면적/트랙 슈 단면적)가 충격인성에 미치는 영향을 파악하였다.

### 3.2 트랙 슈의 조미니 경도 시험

Table 2에 동일한 블룸으로부터 압하비를 달리한 트랙 슈 1, 2, 3의 화학적 성분과 조미니 경도를 나타내었다. 표에서 트랙 슈 1, 2, 3의 단면감소율은 각각 29, 11, 6이다. 트랙 슈의 화학성분으로부터 고마츠 제작소(일본) 기술규격집 [8]에 따라 계산한 조미니 경도의 이론값은 Table 3과 같이 샘플 3개 모두가 규격 상한부근(탄소량 0.23%에서 조미니 경도(1.5mm지점)가 HRc46.1 이상)에서 만족하고 있다. 이는 소재의 화학성분이 열처리 시에 99% 이상의 마르텐사이트(Martensite) 조직을 얻을 수 있도록 성분이 조성되어 있다는 것을 의미한다.

하지만 실제 제강 과정에서의 합금, 특히 보론의 고용이 경화에 유효하게 기여하였는지를 파악하기 위해 실제 조미니 경도 시험을 병행하여 조미니 경도를 조사하였다.

조미니 시편은 블룸(200mm×200mm) 소재에서 단면(100mm×100mm)을 채취하여 전기로(Electric furnace)에서 1200℃ 가열 및 90분간 유지 후 원형(Ø35)으로 압연

[Table 2] Chemical composition of 15B26Cr steel and Jominy hardness

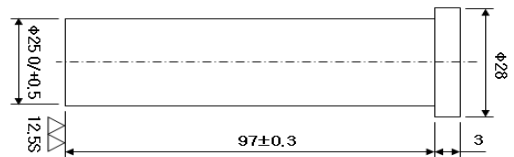
Materials	Chemical composition												Jominy hardness (HRc)	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	Al	B	J1.5	J11
	× 100			× 1000		× 100			× 1000			ppm		
Specification	20 ~26	15 ~30	80 ~110	< 30	< 15	< 30	10 ~20	< 5	< 30	< 35	< 40	5 ~40	42 ~49	22 ~38
Track shoe1	23	22	104	17	13	6	14	3	16	29	26	22	-	-
Track shoe2	24	21	105	17	14	6	15	3	15	31	27	24	-	-
Track shoe3	23	22	103	18	13	6	14	3	14	34	27	24	-	-

[Table 3] Jominy hardness calculated from KOMATSU technical manual using chemical composition of track shoe

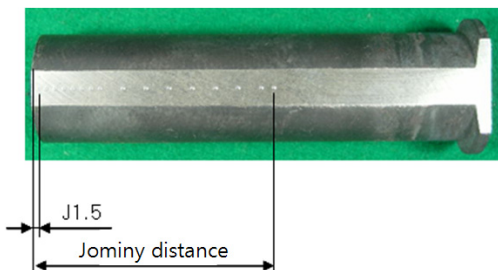
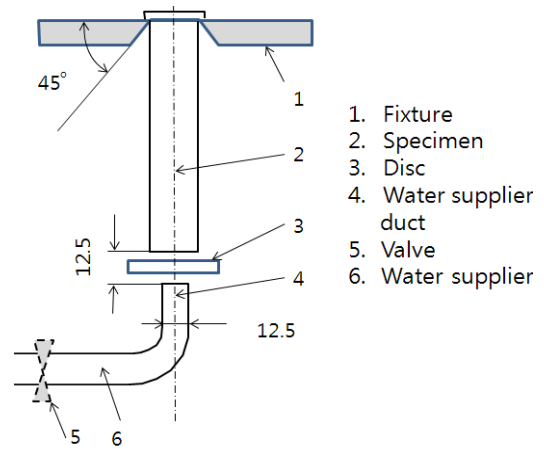
item	Jominy distance	DIB	Jominy distance factor	Jominy hardness(HRc)
Track shoe 1 29RA (6T)	1.5	72	1.000	46.1
	3		1.000	46.1
	5		1.006	45.8
	7		1.360	44.5
	9		1.083	42.6
	11		1.220	37.8
	13		1.415	32.6
	15		1.603	28.8
	20		2.231	20.7
	25		2.695	17.1
30	3.065	15.0		
Track shoe 2 11RA (10T)	1.5	72.5	1.000	46.7
	3		1.000	46.7
	5		1.005	46.5
	7		1.035	45.1
	9		1.080	43.2
	11		1.210	38.6
	13		1.395	33.5
	15		1.585	29.5
	20		2.210	21.1
	25		2.675	17.5
30	2.695	17.3		
Track shoe 3 6RA (16T)	1.5	70	1.000	46.1
	3		1.000	46.1
	5		1.010	45.6
	7		1.040	44.3
	9		1.095	42.1
	11		1.260	36.6
	13		1.495	30.8
	15		1.700	27.1
	20		2.315	19.9
	25		2.780	16.6
30	3.045	15.1		

하여 자연 냉각시켜 얻는다. 이후 시편 제작용 압연기로 압연하여, 자연 냉각된 원형강재를 Fig.3과 같이 가공한다. 가공된 시험편을 전기로에서 870℃로 가열 및 30분간 유지 후 시험편을 Fig.4의 조미니 고정 장치에 수직으로

설치하고 냉수를 수직 선단에 분사하여 급랭시킨다.



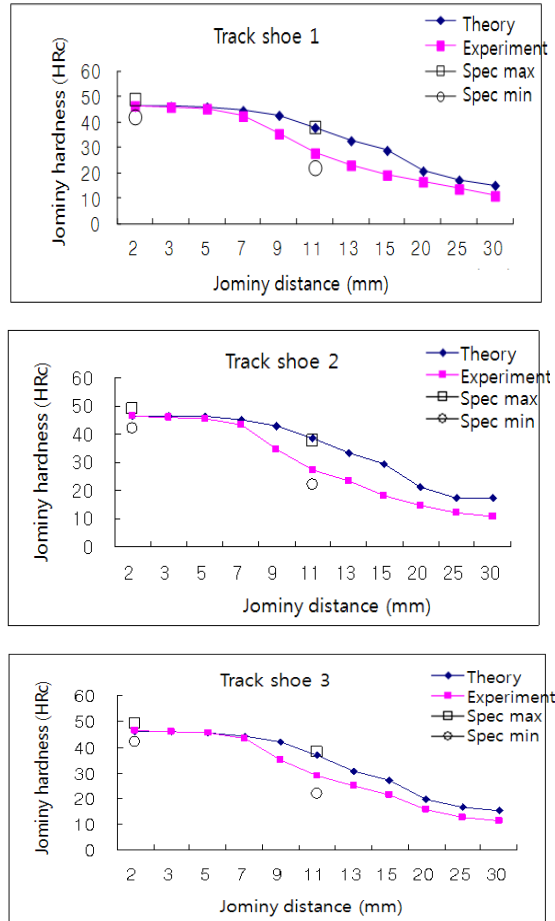
[Fig. 3] Specimen for Jominy hardness test machined in lathe



[Fig. 4] (a) Cooling apparatus for Jominy test  
(b) Jominy hardness test site  
(test position : 1.5, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 20, 25, 30 mm)

[Table 4] Comparison of Jominy hardness between manual based calculation from chemical composition by KOMATSU Co. and experiment

Jominy distance (mm)	Jominy hardness (HRC)					
	29RA (6T)		11RA (10T)		6RA (16T)	
	Theory	Experiment	Theory	Experiment	Theory	Experiment
1.5	46.1	46.3	46.7	46.5	46.1	46.5
3	46.1	45.8	46.7	46.3	46.1	45.9
5	45.8	45.2	46.5	45.8	45.6	45.5
7	44.5	42.3	45.1	43.3	44.3	43.2
9	42.6	35.3	43.2	34.6	42.1	35.2
11	37.8	27.7	38.6	27.3	36.6	28.8
13	32.6	22.9	33.5	23.3	30.8	25.0
15	28.8	19.1	29.5	18.3	27.1	21.5
20	20.7	16.4	21.1	14.6	19.9	15.9
25	17.1	13.6	17.5	12.2	16.6	12.7
30	15.0	10.9	17.3	10.8	15.1	11.2

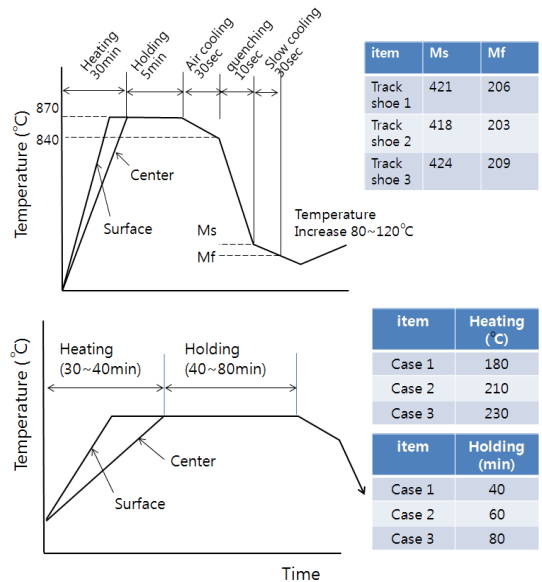


[Fig. 5] Comparison of Jominy hardness between manual calculation and experiment for track shoe 1, 2, 3.

냉각한 시편은 연삭기에서 서로 180°에 대응하는 위치를 시편편의 전 길이에 걸쳐 각각 0.4mm를 연마 제거한 후, 쇼미니 경도 측정기로 물이 분사 접촉된 선단부터 Fig.5의 J1.5, J3, J5, J7, J9, J11, J13, J15, J20, J25, J30 지점의 경도(HRC)를 확인하였다. 그 결과를 Table 4와 Fig.5에 나타내었다. 쇼미니 경도의 경향이 J7 지점에서부터 이론경도보다 낮은 경향을 나타내지만 3개의 시편 모두 쇼미니의 경도 규격을 만족하고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 트랙 슈의 담금질 효과

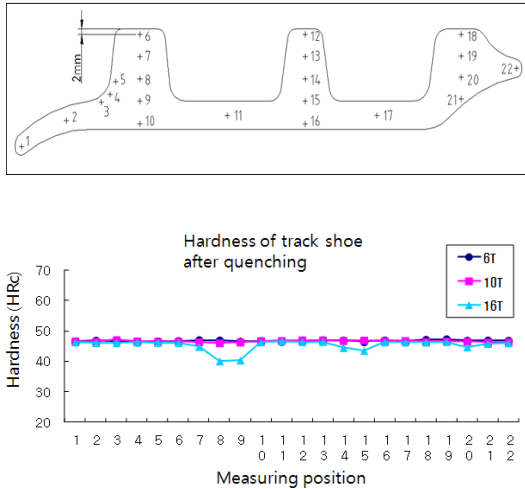
무한궤도의 트랙 링크, 트랙 핀, 트랙 부쉬, 트랙 슈의 중요 부품은 전량 열처리를 실시하고 있다. 여기서는 담금질이 트랙 슈의 충격인성에 미치는 영향을 검토하였다. 기존 트랙 슈를 양산하고 있는 연속가열로에서 Fig.6과 같이 870°C 승온 및 5분간 유지 후 W.S.Q(Water spray quenching)를 실시하였다.



[Fig. 6] Heat cycle of (a) quenching and (b) tempering

담금질 냉매는 5~30°C 맹물에서 실시하였다. 담금질 후 트랙 슈의 단면경도 검사결과는 Fig.7과 같이 마르텐사이트 경도의 99.9% 정도를 나타내고 있다. 즉, 1.5mm에서 쇼미니 경도 규격이 트랙 슈(6T)의 경우는 HRC 46.1이지만 실험결과는 HRC 46.3, 트랙 슈(10T)의 경우는 HRC 46.7이지만 실험결과는 HRC 46.5, 트랙 슈(16)의 경우는 HRC 46.1이지만 실험결과는 HRC 46.5 이었다. 하지만 압하비가 7로 낮은 트랙 슈의 심부 단면 일부

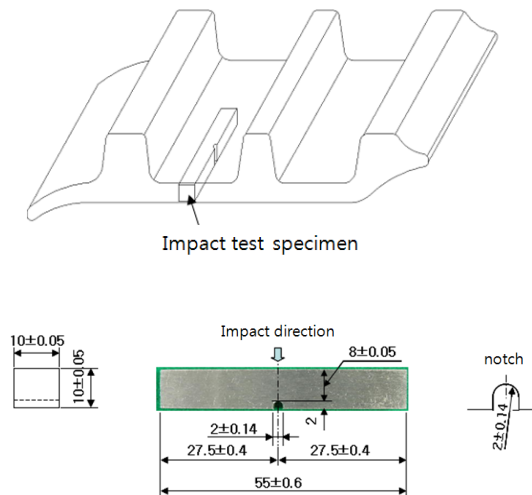
에서 경도가 떨어지는 현상이 발견되었다. 이는 열처리 시에 압하비가 11과 29로 큰 것 보다 상대적으로 단중이 무거운 질량효과(Mass effect)에 의한 것에 기인한 것으로 생각된다.



[Fig. 7] Hardness in section of track shoe

### 3.4 충격시험

트랙 슈의 충격시험용 시편을 Fig.8(a)와 같이 채취하였으며, KS 0810 3호에 준하여 Fig.8(b)와 같이 시편을 제작하였고 Tinius Olsen 샤르피 충격시험기로 충격시험을 실시하였다.



[Fig. 8] (a) Specimen obtained from track shoe  
(b) Specimen for Charpy impact test (Specification, KS B 0810)

## 4. 직교배열시험

트랙 슈의 제조공정에서 트랙 슈의 품질(강도, 충격인성, 내구성 등)에 중요한 영향을 미치는 변수들의 영향을 파악하기 위해 충격 인성에 미치는 특성이 규명되지 않은 3개의 공정변수 트랙 슈의 단면 압하비(RA : Reduction ratio of area), 뜨임 온도(T : Tempering temperature), 뜨임 유지시간(C : Tempering temperature continuance)에 대해 다구찌의 직교배열실험법을 적용하였다. 각 공정변수에 대해서 Table 5와 같이 각각 3수준의 제어인자를 설정하고 담금질 온도(Q : Quenching temperature)는 동일수준으로 하여 Table 6과 같이  $L_9$  직교배열표를 작성하였다. 직교배열표에 인자를 할당하여 샤르피 충격시험을 실시하여 식 (3.1)의 망대특성인 손실함수 SN비 (Signal to noise ratio)로 평가한 실험한 결과를 Table 7에 나타내었다. [4]

$$\eta(\text{망대특성 } SN\text{비}) = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (3.1)$$

$$No.1\text{의 } SN\text{비} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{5.8^2} \right] = 15.27(dB)$$

[Table 5] Factors and their levels

Factors	Level 1	Level 2	Level 3
A(RA)	29	11	6
B(T) (°C)	180	210	230
C(C) (min)	40	60	80
D(Q) (°C)	870	870	870

[Table 6] Matrix experiments of Taguchi orthogonal array experiment ( $L_9$ )

Experiment No.	A(RA)	B(T)	C(C)	D(Q)
1	1 (29)	1 (180)	1 (40)	1 (870)
2	1 (29)	2 (210)	2 (60)	1 (870)
3	1 (29)	3 (230)	3 (80)	1 (870)
4	2 (11)	1 (180)	2 (60)	1 (870)
5	2 (11)	2 (210)	3 (80)	1 (870)
6	2 (11)	3 (230)	1 (40)	1 (870)
7	3 (6)	1 (180)	3 (80)	1 (870)
8	3 (6)	2 (210)	1 (40)	1 (870)
9	3 (6)	3 (230)	2 (60)	1 (870)

[Table 7] Comparison of impact value

Experiment No.	IV (Impact value)	SN value (dB)
1	5.8	15.27
2	11.4	21.14
3	11.6	21.29
4	6.0	15.56
5	9.6	19.64
6	7.8	17.84
7	6.2	15.85
8	7.3	17.27
9	8.6	18.69
평균	8.3	18.06

최적 수준을 찾기 위해 특성값의 SN 비를 이용하여 평균분석(Analysis of Mean, ANOM)과 분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)을 수행하였다. 여기서

$$\text{Sum of square due to factor } j = 3(m_{j1} - m)^2 + 3(m_{j2} - m)^2 + 3(m_{j3} - m)^2 \quad (3.2)$$

$$m \text{ (Overall mean value of } \eta) = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \eta_i = 18.06 \text{ (dB)}$$

$$\begin{aligned} \text{Sum of square due to factor B} &= 3(15.56 - 18.06)^2 + 3(19.35 - 18.06)^2 + 3(19.27 - 18.06)^2 \\ &= 28.13 \text{ (dB)} \end{aligned}$$

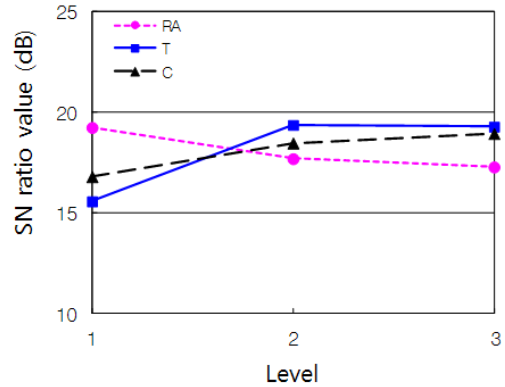
여기서 m은  $m = 1/9 \sum SN_i = 18.06$  (dB)으로 정의되고, 9회 해석 결과로부터 계산되는 SN<sub>i</sub>의 평균값이 되고, m<sub>j</sub>는 각 인자와 수준별 평균값이다. m<sub>ji</sub> = 1/3 ∑(SN<sub>j</sub>)<sub>i</sub>로 주어지며, j인자에 대해 i수준(i=1,2,3)에서의 SN비 값이고, SN<sub>j</sub> 평균제곱 (Mean square)을 나타낸다.

그 결과를 Table 8에 나타내었다.

[Table 8] Analysis of Charpy impact value (ANOM and ANOVA)

Factors	Average $\eta$ by Factor Level (dB)			Sum of square	DoF	Sum of mean square	F
	1	2	3				
A	19.23*	17.68	17.27	6.41	2	3.20	0.15
B	15.56	19.35*	19.27	28.13	2	14.07	0.68
C	16.79	18.46	18.93*	7.59	2	3.30	0.18
D	-	-	-	-	-	-	-
Total				42.13	6	21.07	

분산분석의 결과로부터 뜨임 온도(B)는 전체 제곱 합 (Total sum of squares)에 대하여 68%의 영향을 미치고, 압하비(A)와, 뜨임 유지시간(C)을 합한 것은 32%의 영향을 미친다. 이와 같이 분산분석을 하는 목적은 목적 함수에 미치는 각 인자의 영향에 대한 상대적 크기를 결정하고, 오차를 고려하여 그 정도를 평가하는데 있다. [13]



[Fig .9] SN value for each level

상기의 분석결과, 충격 인성을 최대화 하는 최적인자의 조합은 A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>D<sub>1</sub> 수준, 즉 압하비 29, 뜨임 온도 210°C, 뜨임 유지시간 80분, 쿨링 온도 870°C 임을 알 수 있다. 따라서 이 최적조건을 적용한 충격값에 대한 이론적 계산값 SN<sub>opt</sub>은 다음 식으로 나타내진다.

$$\begin{aligned} SN_{opt} &= m + (m_{A1} - m) + (m_{B3} - m) + (m_{C3} - m) \\ &= 18.06 + (19.23 - 18.06) + (19.35 - 18.06) + (18.93 - 18.06) \\ &= 21.39 \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (3.3)$$

여기서 m은 SN의 전체 평균이며, m<sub>A1</sub>, m<sub>B3</sub>, m<sub>C3</sub>는 A, B, C의 인자가 1, 2, 3수준 경우의 SN 평균이다. 직교 배열 실험에서 최적의 인자 조건을 찾고, 이 조건에서의 실험결과를 예측한 후에 이와 같은 조건에서 실험을 수행한 결과를 Table 9에 나타내었다. 망대특성 SN비의 최적값이 이론은 21.39dB이며, 실험값은 21.65dB로서 매우 근접한 결과이기 때문에 트랙슈 열처리 최적화된 템퍼링 공정 변수가 충격인성을 향상시키고 있음을 알 수 있다. 따라서 트랙 슈의 충격인성을 향상시키기 위해서는 압하비는 29로서 압하비가 높을수록 좋고, 뜨임 온도는 210°C

가 적당하며 또한 뜨임 온도의 유지시간은 80분으로서 오래 유지 할수록 좋은 것으로 나타났다. 이는 세멘타이트 조직 내의 탄소가 확산되어 페라이트의 분율을 높일 수 있도록 확산시간을 충분히 확보했기 때문으로 생각된다.

[Table 9] SN value at the impact experiment of optimum condition

Experiment No.	I.V (Impact value)	SN value (dB)
10	12.1	21.65

$$\eta(\text{망대특성 } SN\text{비}) = -10\log\left[\frac{1}{I.V^2}\right] \quad (3.4)$$

$$No.10\text{의 } SN_{opt} \text{ 비} = -10\log\left[\frac{1}{12.1^2}\right] = 21.65(dB)$$

## 5. 시험 결과 및 고찰

### 5.1 조미니 경도

화확성분에 의한 이론 조미니 3개의 시편 모두가 경화능 상태가 우수한 것으로 나타났다. J1.5 지점에서는 규격 상한에 있고, J11 지점에서는 3개의 샘플 모두가 규격 상한에 근접하고 있다. 반면에 실측값의 시편은 3개 모두 공허 J1.5에서 J5까지는 이론치와 비슷한 경향을 보이나, J7 부근에서 부터는 이론값보다 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 제조과정에서 발생하는 여러 변수에 의한 경화능 저하로 인해 이론과 실제 조미니 경도값에서 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 하지만, 실제 조미니 곡선의 분포가 규격 내에 안정하게 분포되어 있어 본 시험에 제공된 시험편은 열처리 경화능이 충분히 확보된 것으로 판단된다.

### 5.2 열처리

담금질 후 단면경도는 압하비 29와 11에서는 HRc 46.5~47.1로서 균일한 분포의 경도를 보였으나, 압하비 7에서는 HRc 40.1~46.5로서 트랙 슈의 단면 중심부에서 경도가 낮은 것으로 나타났다. 뜨임 후의 경도변화는 압하비 29, 11, 7 모두에서 HRc 0.5~2 정도의 경도저하의 폭이 낮게 나타났다.

### 5.3 충격값에 의한 직교 배열 시험

트랙 슈의 충격값은 망대특성으로서 9회의 시험에서

뜨임 온도가 충격값의 결정에 68%를 기여하여 가장 높으며, 각 조건에서는 압하비 29, 뜨임온도 210℃, 뜨임 유지시간 80분에서 충격값이 가장 많이 향상되는 것으로 분석되었다. 이를 근거로 한 최적조건에서의 해석값과 실험값이 거의 일치하고 있다. 이는 본 연구에서 최적화된 트랙 슈의 템퍼링 열처리 조건을 도출한 것이 타당하다는 것을 알 수 있다.

## 6. 결론

트랙 슈의 충격인성 향상을 위하여 트랙 슈의 압하비, 뜨임 온도, 뜨임 유지시간을 변수로 택하여 다구찌기법의 직교배열실험법을 통해 충격인성 향상에 미치는 요인들을 분석하였다. 그 결과 트랙 슈의 압하비는 압연 조직을 치밀하게 만드는 압하비가 높은 쪽이 유리하고, 뜨임 온도는 210℃에서 충격인성이 값이 높다. 이는 온도가 증가 할수록 충격치에 유리하게 작용하며, 저온뜨임의 청열취성 구역인 250℃부근에 가까워질수록 충격값이 저하되기 때문이다. 또한 뜨임 유지 시간에서는 80분과 같이 장시간 적용하는 것이 충격인성에 유리하다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 다구찌 직교배열실험법의 적용을 통하여 트랙 슈의 충격치 향상에 필요한 최적조건을 도출하였으며, 이는 열악한 조건에서 작업되는 트랙 슈의 충격인성 향상에 크게 기여할 것으로 기대한다. 향후 연구 과제로서 트랙 슈의 화확성분을 재구성하여, 강도와 충격인성 등 기계적 물성값의 향상과 원가절감을 동시에 개선할 수 있도록 연구를 수행하고자 한다.

## References

- [1] C.S. Lim, C.H. Kim, Cooling system for track shoe, Korea Patent, No.1-1998-003084-8, 2009.
- [2] C.W. Park, "Effect of boron addition on carbonizing gear steel", Technical Report, Research Institute of Hyundai Steel Co., pp.1-3, 2009.
- [3] S.G. Choi, "Effect of alloy composition and deformation condition on the ductility of boron steel", PhD thesis, Kyungpook National University, 1995.
- [4] C.H. Yoon, M.S. Chae, G.J. Moon, Y.S. Kim, "Optimization of process variables of tube bending using



Taguchi orthogonal array”, Korea Soc. Tech. Plasticity, Vol.18, No.1, pp. 67-72, 2009.

- [5] M.S. Choi, "A study on the elongation of polymer extrusion film", J. Korea Academia-Industrial Coop. Soc., Vol.15, No.2, pp.660-665, 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.2.660>
- [6] B.S. Byun, G.Y. Kim, "Optimization design of the clinch stud using finite element analysis and the Taguchi method, J. Korea Academia-Industrial Coop. Soc., Vol.14, No.7, pp.3135-3141, 2013.
- [7] B.C. Kandpal, A. Chutani, A. Gulia, C. Sadanna, "A review on Jominy test and determination of effect of alloying elements on hardenability of steel using Jominy end quench test", Int. J. Adv. Eng. Tech. Vol.1, No.3, pp.65-71, 2011
- [8] G.E. Totten, *Steel Heat Treatment-Metallurgy and Technologies*, CRC press, pp.233-243, 2007.
- [9] Japan KOMATSU, "Technical specification on hardenability of Boron Steel", N. KES (KNOW HOW) 07. 216. 2, pp. 2~11, 1992.
- [10] S.P Lee, *Solution and Problem of Heat Treatment*, Daekwang Publisher, 1993.
- [11] C.M. Suh, *Engineering Material*, Wonchang Publisher, 2000.
- [12] K.H. Park, B.I. Hwang, "Development of marine FH40 Inverted Angle", Technical Report, Research Institute of Hyundai Steel Co., pp.4-15, 2009.
- [13] Y.S. Kim, "Engineering material for press engineers", Note for the Industry-Graduate School Program of Hwashin Co. 2-A, pp.38-74, 2007.
- [14] M.S. Choi, "A study on the elongation of polymer extrusion film", J. Korea Academia-Industrial Coop. Soc., Vol.15, No.2, pp.660-665, 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.2.660>

**장 근 성(Keun-Sung Chang)**

[정회원]



- 2010년 8월 : 경북대학교 특수대학원 (공학석사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 현대제철 중기생산부 차장

<관심분야>

국삭기 무한궤도설계제작 및 공정관리

**김 영 석(Young-Suk Kim)**

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1986년 4월 : 일본 Kobe 대학교 기계공학 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1994년 2월 : 포항 산업과학연구원 연구실장
- 1994년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

생산공학, 소성역학, 나노/마이크로역학, FEM Biomechanics