

|||||
論 文
|||||

질화처리강의 열물성치측정

손병진*, 이관수*, 이흥주**, 김성근***, 김호준***

Measurement of the Thermal Physical Properties of Nitrided Steels.

Byung Jin Son,* Kwan Soo Lee,* Hung Joo Lee,**
Sung Kun Kim,*** and Ho Jun Kim**

ABSTRACT

The thermophysical property values were determined and compared with each other according to the time of surface treatment.

The diffusivity values were obtained by the flash method, and the specific heat values were measured by the differential scanning calorimeter. The thermal conductivity values were calculated from the values of the thermal diffusivity, specific heat, and density.

The nitrided steels were the structural carbon steels, carbon tool steels, alloy tool steels, and high speed tool steels.

1. 서 론

표면처리방법중 하나인 질화법은 금속재료의 내마멸성, 내열성, 내피로성등을 향상시키기 위하여 1923년 독일의 Krupp사의 A.FRY에 의하여 개발되었다. 선진공업국에서는 이미 이 질화법을 자동차의 크랭크축과 베어링등과 같은 내마멸성이 요구되는 기계부품에 이용하여 왔고, 우리나라에서도 이 질화장치를 개발하여 질화로 인한 재료의 마멸과 피로특성의 변화를 규명하

려는 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻⁹⁾ 그러나 질화처리하는 마찰면의 내마멸성을 증진시킬 목적으로 표면처리하는 경우가 많으므로 마찰면의 온도제어를 위해서는 무엇보다 열물성치를 정확히 측정할 필요가 있다.

본 연구에서는 여러 산업현장에서 많이 사용되는 기계구조용 탄소강, 탄소공구강, 합금공구강, 고속도공구강의 활용도를 높이기 위하여 이온질화처리 전, 후의 열확산계수, 열전도계수 및 비열을 측정하였다. 열확산계수의 측정은 섬광법⁽¹⁰⁻¹⁸⁾으로 하였고, 비열의 측정은 시차열용량법⁽¹⁹⁾으로 하였다. 열전도계수는 이들 값을 이용하여 계산하였다.

* 한양 대학교 기계공학과

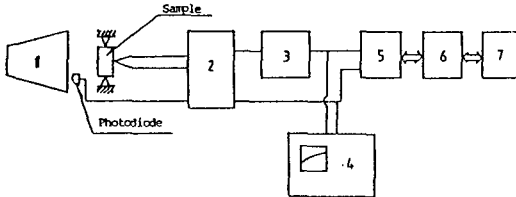
** 육군 사관학교 병기공학과

*** 한양 대학원 기계공학과

2. 실험

2-1. 실험 방법

본 연구에서는 열확산계수는 점광법으로 측정되었고, 이 실험장치의 개략도는 Fig.1 과 같다.



- 1. Xenon Flash Lamp
- 2. OP-Amplifier
- 3. Low Pass Filter
- 4. Digital Storage Oscilloscope
- 5. A/D Converter
- 6. N.E.C. PC8801 Micro Computer
- 7. X-Y Plotter

Fig.1 The Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

이 실험은 상온에서 행하여 졌고, 열흡수를 균일하게 하고, 또한 이를 증가시키기 위하여 시편전면에 Camphor Black 으로 검게 칠하였다. 열전대는 Omega Engineering Inc.에서 제작한 직경 0.127 mm chromel-constantan 열전대를 사용하였다. 직경이 작은 열전대를 사용하므로 온도상승으로 인한 기전시간이 짧아 열전대 자체의 열질량(thermal mass)에 의한 반응지연시간을 감소시킬 수 있었다. 온도측정에서는 열전대를 ceramic tube 에 넣고 optical bench 위에 설치된 lens holder 를 3점 지지나사를 조정하여 고정된 후 holder 를 앞, 뒤로 움직여 열전대에 접촉력이 일정하게 유지되도록 시편에 압착시켰다. 열전대에서 발생된 150 ~ 300 μV 정도의 미세한 기전력은 일본의 Yokogawa Electric Works 에서 제작한 TYPE 3131, 3132 D.C.amplifier 를 사용하여 측정하였다. 이 때 signal 은 약 20,000 배로 증폭되었고, 증폭에 따른 불필요한 noise signal 을 cut-off frequency 10Hz 인 low-pass filter 로 제거하였다.

열원의 강도를 측정하는 photodiode 로는 Korea photo electronics SP-1KL planer type

silicon photo diode 를 flash lamp 바로 앞에 설치하여 heat pulse 의 발생시간을 측정하였다. 이 때 diode 의 출력이 매우 작으므로 D.C.amplifier(gain 50)로 증폭하였다. 증폭한 열전대 및 photodiode 의 출력은 Textronix Inc. 에서 제작한 Model 5223 digital storage oscilloscope 로서 동시에 CRT 상에 나타낸 후 polaroid camera 로 촬영하여 half time(t_h)과 maximum time(t_{max})을 구하였다. 또한 정확도를 높이기 위하여 A/D converter 로 800 μsec 마다 sampling하여 N.E.C PC8801 micro computer 에 data 를 저장하고 이 data 를 X-Y Plotter 로 도시하였다. 여기서 사용한 A/D converter 는 8bit 이고 channel 당 maximum conversion time 이 2 μsec 이다. Fig.2 에서 heat pulse

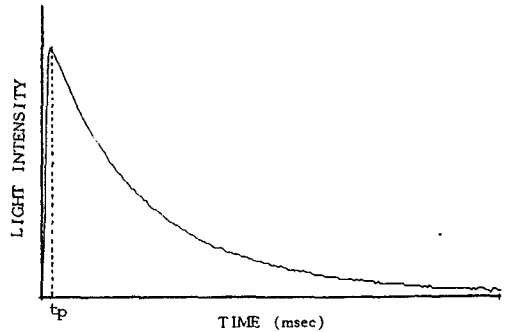


Fig.2 Photodiode Output of Xenon Flash Lamp.

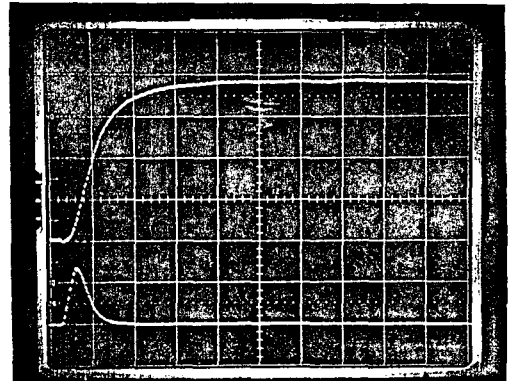


Fig.3 Temperature Rise VS. Time for SM 55C Sample. (X-axis ; 100 msec/div, Y-axis ; IV/div)

의 최대강도에 도달하는데 소요된 시간인 peak time(t_p)는 0.35 msec이다. Fig.3은 SM55C의 온도상승곡선과 photodiode의 출력곡선을 동일 CRT 상에 나타낸 사진이고, Fig.4는 S.S. 316 표준시편 후면의 온도상승을 백분율로 표시한 그림이다.

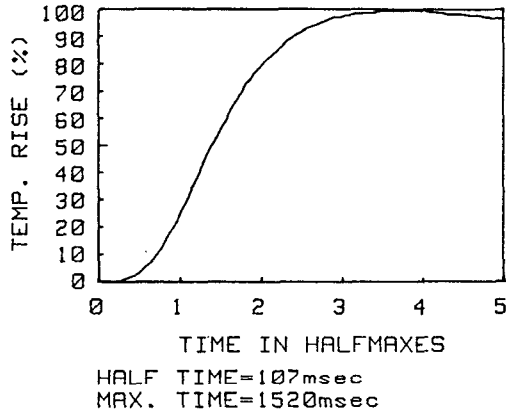


Fig.4 Computer Plot of Percentage Temperature Rise VS. Time in Halfmaxes for S.S.316 Standard Sample

섬광법에서 데이터거법으로 열확산계수와 열전도계수를 구하는데 필요한 시편의 비열값은 비교법을 응용 발전시켜 일반적으로 널리 사용되고 있는 시차열용량법(Differential Scanning Calorimeter)을 이용하여 측정하였다.

2-2. 실험의 고찰

본 실험에서 열원으로 사용한 xenon flash lamp는 tube에서 heat pulse가 발생할 때 순간적으로 매우 큰 전류가 tube의 filament에 흐른다. 그러므로 flash tube 주위에 순간적인 자기장의 변화를 일으켜 일종의 도선역할을 하는 열전대에 유도기전력을 발생시킨다. 이것은 열전대의 출력에 변화를 주어 출력곡선이 기준점에서 갑자기 떨어졌다가 다시 올라가는 deep valley를 만든다. 본 실험에서는 이러한 deep valley를 제거하기 위하여 aluminum foil로 감아서 자기적 차폐(magnetic shielding)를 하였다.

Fig.5의 A는 B와 같은 조건에서 자기적 차폐를 한 경우이다. A가 B에 비해서 deep valley가 거의 제거되므로 보다 정확한 half time을 구할 수 있다.

한편 열전대의 미소한 기전력을 측정이 용이하도록 증폭을 하면 60 Hz의 전기적인 line noise도 따라 증폭되므로 이 noise를 제거하기 위해 10 Hz low-pass filter를 사용하였다. 그러나 filtering으로 인한 지연시간(delay time)이 발생한다. 이러한 지연효과 때문에 측정된 half time을 정확한 값으로 볼 수 없다.

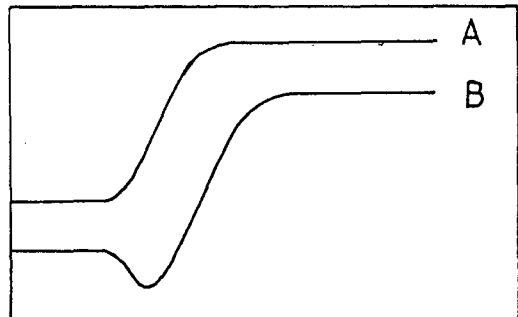


Fig.5 Comparison of Deep Valley in Thermocouple Output.

Fig.6은 heat source의 response signal을 나타낸 것으로 A는 low-pass filter를 통과한 것이고 B는 통과하지 않은 것이다. Fig.6의 A와 B를 비교해보면 low-pass filter의 지연효과

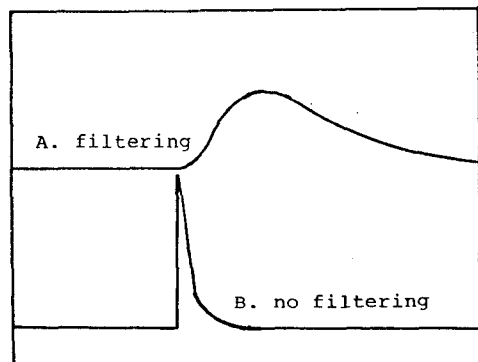


Fig.6 Comparison of Heat Pulse Response.

과를 확실하게 확인할 수 있다. 이와 같이 밝혀진 사실로 실제의 측정시간에서 수정시간을 빼주어야만 정확한 값을 구할 수 있음을 알았다. 측정된 half time 은 열전대의 시정수(time constant)와 low-pass filter 및 triggering에 의한 지연효과 때문에 정확한 half time 으로 볼 수 없다.

2-3. 시험편

본 실험에서는 국내에서 기계의 부품이나 공구용으로 널리 사용되고 있는 구조용 탄소강과 공구강으로 시편을 만들었다. 공구강은 그의 용도에 따라 일반적으로 많이 사용되는 탄소공구강과 탄소 이외의 원소를 조금 첨가시킨 합금공구

Table 1. Experimental Results of Armco Iron Test Sample at 293 K

Property	Measured value	TPRC value	# Deviation (%)	Remark
Thermal Diffusivity	$20.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	+ 20.6 $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{K}$	1	$t_h = 57.45 \text{ ms}$
Thermal Conductivity	74.2 W/m·K	++ 71.1 W/m·K	4	$t_{max} = 5282 \text{ ms}$
Specific Heat	453 J/kg·K	+++ 449 J/kg·K	1	$t_h^{\text{measured}} = 128.89 \text{ ms}$ $t_{max}^{\text{measured}} = 5253.44 \text{ ms}$
Density	$7.874 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	-	-	$\Delta t^* = 71.44 \text{ ms}$

+ TPRC Recommended Value from Ref.(20)

++ Obtained Value from Ref.(21)

+++ Obtained Value from Ref.(22)

Deviation % = (Measured Value - TPRC Value) / TPRC Value × 100

* Δt = Compensate Time (sec)

실험에서 발생하는 지연효과로 인한 수정시간을 구하기 위해서 참고문헌(18)에서 유도한 식을 이용하였다. 본 논문에서는 이미 열물성치를 알고 있는 S.S.316 표준시편을 이용하여 보정시간 Δt 를 구하였다. 그 결과 71.44 msec이었다. 여기서 보정시간의 효용성을 검사하기 위하여 TPRC에서 사용하는 표준시편 armco iron을 가지고 확인실험을 실시하였다. 확인을 위한 실험에서 측정된 armco iron 시편의 half time 과 maximum time 및 이들을 이용하여 구한 열확산계수 및 열전도계수를 보이면 Table.1과 같다. Table.1에서는 실험을 통하여 구한 열물성치를 TPRC 값과 상호 비교하였으며 그 결과 5%미만의 차이밖에 나타나지 않았다.

강 및 고온에서도 오랫동안 사용할 수 있도록 만든 고속도공구강으로 나누어 시편을 제작하였다. 이 시편의 화학적 조성은 Table.2와 같다.

구조용 탄소강시편은 0.1 ~ 0.6%의 탄소를 포함하고 있으며 그 이외에도 Si 나 Mn 또는 P나 S를 조금 포함하고 있다. 탄소공구강 시편은 0.6 ~ 1.5%의 탄소를 함유하고 있으며 그 외에도 소량의 Si 나 Mn을 가진 강재로 만들어졌으며 특수한 원소를 포함하고 있지 않다. 탄소공구강은 탄소의 함유량이 높을수록 내마멸성이 좋은 반면에 인성이 저하되는 특성을 가지고 있다. 합금공구강 시편은 쉽게 변형이 일어나지 못하도록 탄소공구강의 결점을 개선한 후 다시 내마멸성을 더 높이기 위하여 Cr이나 W 또는 V

이나 Si 및 Mn 등의 원소를 다시 첨가하여 단단하게 만든 탄화물로 이루어진 재료로 만들었다. 고속도공구강 시편은 고온에서도 내마멸성과 양호한 기계적 성질을 가지도록 제작하여 절삭공구에 많이 사용하는 재료로 만들었다. 이는 다른 공구강에 비하여 Cr이나 W 또는 Mo이나 V 및 Co 등을 훨씬 많이 첨가시킨 것이다.

비열을 측정할 때에는 실험기기의 특성과 이 기기에 의한 측정치의 정확성, 소요시간의 절감 및 취급의 용이성등을 위하여 시편을 작게 만들었으며 무게를 50 ~ 60 mg이하로 가공하였다. 이때에는 시편의 크기가 매우 작기 때문에 시편을 바이트에 물리고 줄칼로 갈아낸 후 이물질 제거를 위하여 알콜로 세척하였다. 미세중량의 측정을 위하여 100분의 1 mg까지 측정가능한 미국의 METTLER사의 H54AR Analytical Balance Meter 를 사용하였다.

도상승시간을 micro computer 로 측정된 $t_h^{measured}$ 와 $t_{max}^{measured}$ 에서 보정시간을 빼서 t_h 와 t_{max} 을 구하였다.

각 시편의 t_h 와 t_{max} 및 반경 a 와 두께 l 그리고 열원의 peak time ($t_p = 0.35 msec$)의 값을 참고문헌(18)에 있는 무차원온도 V 에 대입하여 반경방향과 축방향의 고유치를 구하고, $V = 0.5$ 일 때의 열확산계수 α 를 데이터소거법으로 구하였다. 그리고 각 시편의 열전도계수 k 는 $k = \alpha \rho C_p$ 의 관계식으로 부터 구하였다.

본 연구를 통하여 얻은 열물성치(비열, 열확산계수, 열전도계수)는 Table.3 과 같다.

Fig.7은 구조용탄소강의 열확산계수를 질화시간에 따라 나타낸 것이다. 구조용탄소강에서는 질화시간이 1시간까지는 열확산계수가 증가하다가 3시간에서는 감소하는 경향을 나타냄을 볼 수 있다.

Table 2. Chemical Composition of Samples.(Weight %)

Spec of STDS *	No.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Sn	W	V	Co
SM 15C	1	0.16	0.29	0.49	0.012	0.030	-	0.018	0.015	-	-	-	-	-	-
SM 20C	2	0.21	0.24	0.47	0.028	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SM 30C	3	0.33	0.28	0.72	0.030	0.013	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SM 40C	4	0.42	0.23	0.68	0.019	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SM 45C	5	0.453	0.276	0.650	0.014	0.0097	0.155	0.027	0.067	0.008	0.0043	0.0175	-	-	-
SM 48C	6	0.467	0.280	0.711	0.0252	0.0124	0.119	0.039	0.182	0.019	0.0113	0.0241	-	-	-
SM 50C	7	0.503	0.275	0.687	0.0209	0.0120	0.157	0.050	0.129	0.004	0.0105	0.0141	-	-	-
SM 55C	8	0.528	0.298	0.780	0.0128	0.0097	0.137	0.037	0.106	0.032	0.0208	0.0154	-	-	-
SK 2	9	1.02	0.34	0.50	0.016	0.034	-	0.01	0.13	-	-	-	-	-	-
SK 3	10	0.88	0.29	0.47	0.020	0.028	-	0.01	0.04	-	-	-	-	-	-
SKS 2	11	1.00	0.35	0.77	0.025	0.030	-	0.01	0.90	0.02	-	-	1.47	-	-
SKS 3	12	0.91	0.34	1.02	0.030	0.016	-	0.01	0.88	0.02	-	-	0.95	-	-
SKS 4	13	0.50	0.26	0.40	0.024	0.024	-	0.01	0.80	0.02	-	-	0.96	-	-
SKH 9	14	0.9	0.29	0.28	0.021	0.005	0.06	0.12	4.13	4.94	0.014	-	6.39	1.68	-
SKH 55	15	0.84	0.29	0.39	0.020	0.004	0.09	0.23	4.11	4.91	0.012	-	6.18	-	4.83

* Spec of STDS = Specification of Standards

** Data from Sammi Steel Laboratory

*** Data from KOREA Heavy Machinery Industries, LTD.

**** Data from KOREA Heavy Industries & Construction co, LTD.

2-4. 실험결과

섬광이 발생된 때로부터 시편후면에서의 온

Fig.8의 탄소함유량에 따른 열확산계수의 변화는 탄소함유량의 증가에 따라 열확산계수는 0.453%까지는 감소하다가 0.503%에서 약간

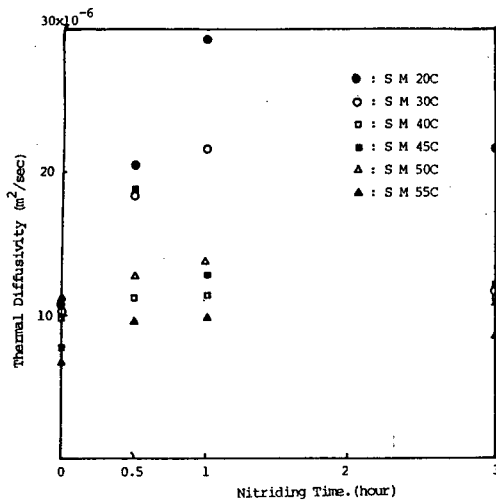


Fig.7 The Variation of Thermal Diffusivity for the Ion-Nitriding Time. (Structural Carbon Steels)

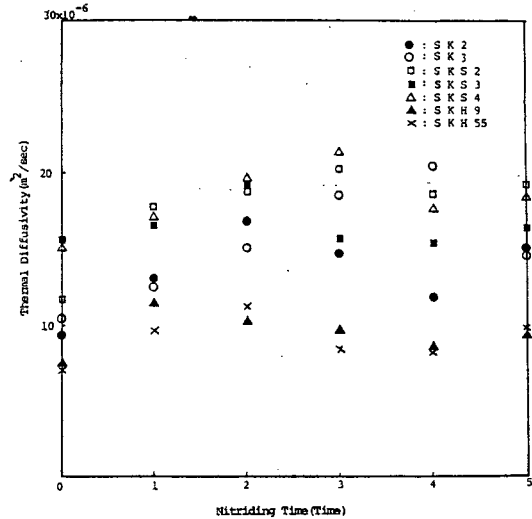


Fig.9 The Variation of Thermal Diffusivity for the Ion-Nitriding Time.(Tool Steels)

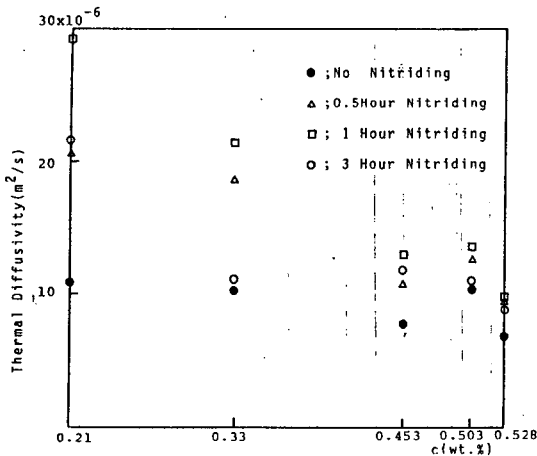


Fig.8 The Variation of Thermal Diffusivity for Carbon Contents.

증가하였고, 그 이후 감소하였다. 이 처럼 구조용탄소강의 열확산계수가 다양한 값을 갖는것은 열확산계수가 transport property로서 합유원소의 조성뿐만 아니라 조직의 변화에 따라 크게 영향을 받기 때문이다.

공구강의 열확산계수에 대한 질화시간에 따른 변화는 Fig.9에 도시되어 있다. 공구강에서는

질화시간이 2시간까지는 대부분의 경우 열확산계수의 값이 증가하다가 그 이후는 감소하면서 3시간 또는 4시간에서 극부적인 극소값을 가진 후 5시간이 경과하면 다시 증가함을 보인다. 그러나 SK3에서는 질화시간이 4시간까지는 열확산계수의 값이 계속 증가하다가 5시간이 경과하면 열확산계수의 값이 떨어지고 있으며, SKH 9에서는 질화시간이 1시간일때 최대값을 가지며 4시간까지 계속하여 감소하였다가 5시간에서는 다시 증가하였다. 이와같이 몇몇의 공구강에서 일반적인 경향과 다른 현상을 나타내는 것은 극부적인 재료의 불균일성과 다양한 첨가원소의 상호작용의 이질성때문에 유발된 것으로사료되나 그의 구체적인 원인을 설명하기 위하여는 질화처리로 인한 각 원자의 조성비의 변화 및 그의 조직에 대한 심층적인 분석이 요구된다. 그러나 본 연구에서는 실험여건상 이를 실시하지 못하였다.

시차열용량법에 의하여 측정된 시편의 비열에 대한 질화시간에 따른 변화는 Fig.10과 Fig. 11에 나타내었다.

Table 3. The Thermal Properties of Materials used in Experimental at 293K

sample	sample no	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg·k)	k (W/m·k)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	sample	sample no	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg·k)	K (W/m·k)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)
SM 15C	a	7770	475	60.133	16.293	SM 55C	a	7814	445	24.130	6.939
	b	7819	472	28.980	7.853		b	7919	455	33.963	9.426
	c	7929	454	41.691	11.582		c	7898	469	35.097	9.475
	e	7949	455	77.783	21.506		e	7954	475	33.489	8.864
SM 20C	a	7896	461	39.611	10.882	SK 2	a	7694	447	32.325	9.399
	b	7712	462	73.448	20.614		c	7498	429	41.911	13.029
	c	7604	458	101.790	29.228		d	8386	400	56.703	16.904
	e	7881	462	79.124	21.731		e	7540	399	44.315	14.730
SM 30C	a	7805	469	37.932	10.363		f	7234	421	36.776	11.906
	b	7846	494	72.468	18.697		g	7789	407	47.733	15.057
	c	8383	473	84.806	21.388		SK 3	a	7464	421	31.707
	e	7771	463	40.772	11.332	c		7527	388	36.936	12.647
SM 40C	a	7854	472	37.121	10.013	d		7478	413	46.867	15.175
	b	7910	466	40.633	11.024	e		7597	411	57.955	18.561
	c	7884	454	40.573	11.335	f		7188	392	57.470	20.396
	e	7875	451	39.847	11.219	g		7441	406	43.695	14.463
SM 45C	a	7805	449	27.486	7.843	SKS 2		a	7488	403	35.547
	b	7962	464	40.238	10.892		c	7440	476	63.191	17.843
	c	7981	440	45.292	12.898		d	7442	395	55.307	18.815
	e	7927	467	44.047	11.899		e	7442	389	58.694	20.275
SM 48C	a	7909	455	128.659	35.752		f	7259	394	52.852	18.479
	b	7914	469	81.816	22.043		g	7369	377	52.881	19.035
	c	7936	454	41.271	11.601		SKS 3	a	7622	486	57.209
	e	7830	469	45.771	12.464	c		7516	491	60.093	16.284
SM 50C	a	7840	477	40.138	10.733	d		7597	488	68.685	18.527
	b	7912	479	47.967	12.657	e		7604	528	62.636	15.601
	c	7903	485	51.952	13.554	f		7209	496	54.638	15.281
	d	7863	470	40.646	10.998	g		7799	511	65.218	16.365

sample	sample no	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg·k)	K (W/m·k)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)
SKS 4	a	7434	516	60.004	15.643
	c	7445	514	65.716	17.173
	d	7681	501	73.25	19.035
	e	7584	516	84.157	21.505
	f	7423	553	73.184	17.828
	g	7603	521	72.217	18.231
	SKH 9	a	7868	370	22.342
c		7680	388	34.245	11.492
d		7916	387	31.226	10.193
e		7918	370	28.933	9.876
f		7451	380	23.266	8.217
g		7590	376	26.841	9.405
SKH55		a	7672	505	28.637
	c	7810	501	37.678	9.629
	d	7786	504	43.750	11.149
	e	7866	490	31.899	8.276
	f	7385	552	34.992	8.584
	g	7590	485	35.751	9.712

- a; No ion-nitriding
- b; Nitriding time is 0.5 hour
- c; Nitriding time is 1 hour
- d; Nitriding time is 2 hour
- e; Nitriding time is 3 hour
- f; Nitriding time is 4 hour
- g; Nitriding time is 5 hour

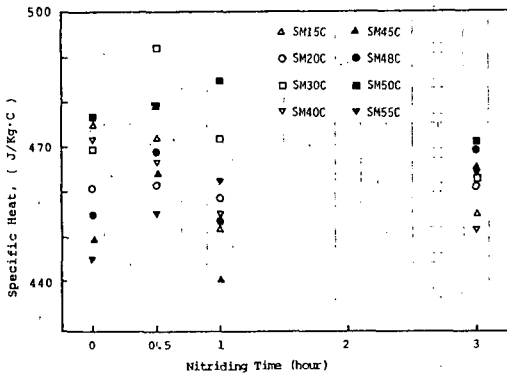


Fig.10 Effects of Nitriding Time on Specific Heats of Several Carbon Steels at 293K

구조용탄소강과 공구강에서는 질화처리시간에 따라 어떤 일정한 형태를 나타냄이 없이 감소하

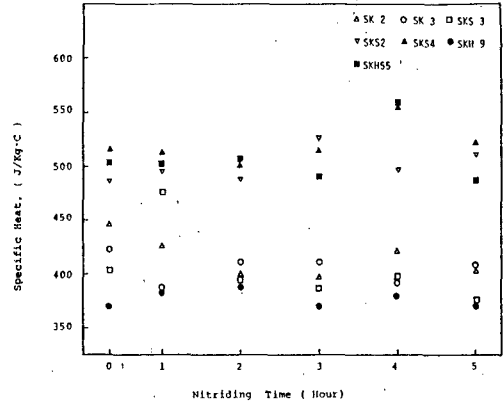


Fig.11 Effects of Nitriding Time on Specific heats of Several Tool Steels at 293K

다가 증가하고 다시 감소하다가 증가하는 파도 (wave)모양을 나타낸다. 이러한 현상은 다양한 첨가원소의 상호작용에 따른 조직 및 밀도의 변화 등 복잡한 상호관계에 기인한 것으로 판단되며 그 규명을 위하여 보다 깊은 연구가 요망된다.

3. 결 론

질화처리된 기계구조용 탄소강과 공구강의 열물성치(열확산계수, 열전도계수, 비열)를 구한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 설팅법을 사용하여 질화처리된 기계구조용 탄소강, 탄소공구강, 합금공구강, 고속도공구강의 열확산계수, 열전도계수, 비열의 값을 구하였다.

(2) 기계구조용 탄소강에서 열확산계수는 질화처리 시간의 영향을 받았고, 1시간 처리강인 경우 최대값을 나타내는 경향이 있다.

(3) 기계구조용 탄소강의 열확산계수는 탄소함

유량 0.21 ~ 0.453 % 범위내에서 탄소함유량 증가에 따라 감소하였고, 0.5 %근방에서 2 차 첨점 (secondary peak) 이 나타났다.

(4) 공구강에서 질화시간 2 시간까지는 열확산 계수의 값이 증가하는 추세를 보였고, 그 이후는 감소하면서 3 시간 또는 4 시간에서 극부적인 극소값을 가진 후 5 시간이 경과하면 다시 증가하는 경향이 있다.

(5) 구조용탄소강과 공구강의 비열은 질화시간에 따라 영향을 받았다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구지원으로 수행되었으며 이에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

(1) 송삼홍, "피로강도의 변동에 대하여," 대한기계학회지, 17(2), 77-88,(1977).
 (2) 서진석, "A Study on Ion Nitriding", 한국과학기술원 석사학위 논문.
 (3) 강무진, 이정오, "피로강도에 미치는 이온질화처리의 영향", 대한기계학회 논문집 3(3), 98-103,(1979).
 (4) 이상길, 이흥주, 이정오, "Measurement of Thermal Diffusivity of Ion-Nitrided Steel by Flash Method", 대한기계학회 논문집, 3(4), 143-150,(1979).
 (5) K.S. Cho and C.O. Lee, "The Effects of Ion Nitriding", J. Engineering Materials and Technology, Trans. ASME,(1980).
 (6) K.S. Cho and C.O. Lee, "Wear Characteristics of Ion Nitrided Steel", Wear, Vol. 64, 303-310,(1980).
 (7) 광병만, 김재도, "Determination Mechanical of Ion-Nitrided Steel and Residual Stress

Ditribution", 대한기계학회 논문집, 5(1),23-29,(1981).
 (8) 김희송, 조규식, 강명순 "이온질화에 있어서 첨가탄소량이 경도 및 마모 특성에 주는 영향", 대한기계학회 논문집, 7(1), 19-27, (1983).
 (9) 황은하, 엄윤용, "이온질화된 고속도강의 마모특성", 기계학회 추계학술 대회 초록집, 366-369,(1982).
 (10) W. J, Parker, R. J. Jenkins, C.P. Bulter and G.L. Abbott, "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity", J. Appl. Phys. 32, 16790, 84,(1961).
 (11) R.D. Cowan, "Pulse Method of Measuring Thermal Diffusivity at High Temperature", J. Appl. Phys. 34, 926-7, (1963).
 (12) J.A. Cape and G.W. Lehman, "Temperature and Finite Pulse Time Effects in the Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity", J. Appl. 34, 1909-13,(1963).
 (13) K.B. Larson and K.Koyama, "Correction for Finite Pulse Time Effects in very Thin Sample Using the Flash Method of Measuring Thermal Diffusivity", J. Appl. Phys. 382, 465-74, (1967).
 (14) R.C. Heckman, "Finite Pulse Time and Heat Loss Effects in Pulse Thermal Diffusivity Measurement", J. Appl. Phys., 44, 1455-60,(1973).
 (15) L. M. Clark and R.E, Taylor, "Radiation Loss in the Flash Method for Thermal Diffusivity", J. Appl. Phys., 46, 714-19, (1975).
 (16) H.J. Lee, "Thermal Diffusivity in Layered and Dispersed Composites", Ph. D Thesis, Purdue University, (1975).
 (17) 이관수, 손병진, 이흥주, "Analysis for

- Measuring the Thermal Diffusivity of
Multilayered Composites in Flash Method",
대한기계학회 논문집, 8(4), (1983).
- (18) 차경옥, 이관수, 이홍주, "불꽃 시험용 표준
시편의 열물성치에 대한 연구", 대한기계학회
논문집, 8(3), 319-327, (1983).
- (19) 한철희, "질화처리 탄소강의 비열에 관한 연
구" 한양대학교 산업대학원 석사학위논문,
(1985).
- (20) Y. S. Touloukian, P.W. Powell, C.Y.H, and
M.C. Nicolau, Thermal Diffusivity, 82,
1973.
- (21) H.W. Deen, USAEC Rept. BMI -849, 1-9,
1953.
- (22) I. B. Fieldhous, J.C. Hedge, J. I. Lang,
A.N. Tanaka, and T.E. Waterman, WADC
TR 55-495 Pt.1, 1-64, 1956.