

도재 냉각방법의 차이가 금속—도재간 열팽창 양상과 결합력에 미치는 영향

경희대학교 치과대학 보철학교실

임애란 · 임호남 · 박남수

〈 목 차 〉

- I. 서 론
- II. 실험재료 및 방법
- III. 실험성적
- IV. 총괄 및 고안
- V. 결 론
- 참고문헌
- 영문초록

I. 서 론

근래에 도재전장 주조관 제작시 열팽창량의 조화에 대한 관심이 점차 높아져 가고 있다⁽¹⁾. 도재와 금속의 열팽창 부조화에 관한 연구는 도재-금속 수복물을 소성한 뒤 냉각시키는 과정에서 도재 전장층의 균열과 변형이 형성되는 것을 설명하고자 금속과 도재의 서로 다른 수축량에 관한 실험이 이루어지기 시작하였다⁽²⁻⁵⁾.

이러한 금속과 도재의 열팽창 혹은 수축량의 부조화는 잔류응력을 유발할 수 있으며⁽⁶⁻⁹⁾, 이것은 자연적인 응력이 수복물에 가해질 때 용이하게 수복물의 파절을 일으켜 임상적 실패를 일으킬 수 있는 것으로 간주되

고 있으며^(8, 10-13), 나이가 외부에서 가해지는 하중이 없어도 시간 경과에 의해 임상적 실패를 보일 수 있는 것으로 보고되고 있다^(14, 15).

도재와 금속이 결합하고 있다는 전제조건하에, 도재와 금속간에 유발된 잔류 응력은 도재 금속 수복물에서 여러가지 현상을 보이거나 상관성을 가지는 것으로 고려되어 왔다^(6, 16). 이러한 응력에 의해 유도될수 있거나 혹은 관찰된 현상으로 부터 열팽창량의 차이가 고려되는 측정의 대상으로는 균열의 형성⁽¹⁷⁾, 수복물이나 시편의 변형⁽¹⁸⁻¹⁹⁾, 그리고 결합부위에서의 결합력의 저하^(16, 21, 22) 등으로 나누어 질 수 있다⁽¹³⁾.

이중 균열 형성에 관한 열팽창 연구로는, 도재전장층의 균열 형성을 실험하는 과정에서 도재의 냉각속도 혹은 열팽창량의 차이가 상관성을 가지는 요인으로 작용하고 있다는 것이 알려진 후⁽²³⁾, 도재전장층 균열 형성은 냉각 속도에 의해 영향을 받을 수 있는 도재의 열팽창량 부조화에 의해 이루어진다는 결론이 내려졌고⁽¹⁷⁾, 최근에는 잔류응력이 시간 경과에 의해 균열 진행이 가능한지 여부에 관해 연구가 이루어지고 있다⁽¹⁴⁾.

도재-금속 수복물의 변형에 관한 연구는 열팽창 부조화에 의해 변형이 발생한다는 전제조건하에 연구가 시작된 것이 아니라 변형에 관한 연구가 진행되던중 열팽창량의 차이에 관하여 검정이 이루어졌다^(18, 24). 판형⁽¹⁰⁾ 원통형⁽²⁵⁾ 원기둥형⁽²⁶⁾ 반원형^(23, 27) 디스크형⁽²⁸⁾ 구형⁽²⁹⁾ 등 다양한 시편의 형태에 관하여 연구가 진행되

어 왔고, 가장 최근 형태로는 완전한 원형 혹은 반원형의 매우 작은 틈의 변화를 연구하는 방법이다^(30,31).

그러나 변형은 전반적인 구조체 형태에서 일어나는 변형^(24,32)과 두께가 얇은 금속 구조체 마진에서의 변형이 서로 다른 양상을 보이는 것으로 밝혀져⁽³³⁻³⁸⁾ 변형에 관한 연구는 근래에 들어 두가지 양상의 실험으로 나누어지고 있는 실정이다⁽³⁹⁾.

변형의 원인으로 금속산화물 형성⁽⁴⁰⁾이나 합금조성 차이로 설명하였으며, 이들의 실험 결과는 sag 정도의 차이에 의한 변형량의 변화와 열팽창계수의 차이에 의한 변화 두가지로 가능성이 시작되었으며, 이때 부터 금속의 열팽창계수의 차이가 변형을 유도할 수 있다고 결론이 내려졌다⁽⁴¹⁾.

그러나 그후 변형과 열팽창의 상관성이 의문시 된다는 주장이 나타나, Faucher와 Nicholls(1980)⁽⁴²⁾는 마진 형태가, 그리고 Buchanan 등(1981)⁽³⁷⁾과 DeHoff와 Anusavice(1984)⁽³⁶⁾의 연구에서는 고온에서의 크리프 저항도⁽⁴²⁾가 가장 큰 영향을 가진다고 하여 결론적으로 최근에 변형에 관한 주요한 이론은 과거의 sag에 관한 이론으로 돌아가고 있는 실정이다⁽⁴³⁾. 이에 최근 열팽창에 관한 연구의 실험방법적 동향은 변형에 관한 것보다는 좀 더 근본적인 팽창량의 차이를 인지하고 이를 확인하고자 하는 실험이 주종을 이루고 있다⁽⁴⁴⁾.

따라서 치과계에서 도재와 금속간의 열팽창량의 차이에 의해 나타날 수 있는 응력(σ)의 양을 표현하기 위한 노력이 진행되고 있는데, 주로 다음과 같은 Timoshenko의 응력 공식이 기본으로 이용되고 있다.

$$\sigma = K \Delta \alpha \Delta T$$

여기서 K는 시편형태와 기타변수를 고려한 함수이며, $\Delta \alpha$ 는 열팽창계수의 차이를, 그리고 ΔT 는 냉각시에 사용된 온도 구간을 의미한다.

이 공식을 적용한 선행들의 연구로는 Tuccillo와 Nielsen(1972)^(6,26), Farah와 Craig(1975)⁽⁴⁵⁾, Bertolotti와 Shelby등(1979)⁽⁷⁷⁾ 그리고 Bertolotti(1980)⁽⁸⁾ 등이 있으며, 이 공식의 타당성은

이들에 의해 이미 밝혀진 바 있다.

위의 공식을 ΔT 를 지정하기 위한 개념으로 변형시키면,

$$\sigma = K \int_{T_0}^{T_g} (\Delta \alpha) dT$$

의 형식으로 변형될 수 있다^(10,11,46). 이에 관하여 DeHoff와 Anusavice(1989)⁽²⁷⁾은 T_g 는 도재의 유리화 온도로서 이 온도 이상에서는 도재가 액체로 존재하므로 응력 발생과 관련이 없다고 하였으며 이는 많은 연구자들에 의해 밝혀졌다. T_0 는 대상으로 하는 실온 혹은 구강내의 온도로 간주되어 진다. 따라서 T_g 와 T_0 의 온도 구간에 의해 이 응력의 양이 결정되는 공식이 된다.

즉 T_g 의 값에 의해 도재와 금속간에 발생할 수 있는 응력 σ 는 심하게 영향을 받을 수 있으며, 따라서 T_g 값의 결정에 관해 많은 실험이 이루어지고 있다⁽⁴⁷⁾. 한편 T_g 의 명칭에 관해서도 유리화 온도(glass transition temperature), 연화온도, 그리고 경화온도등 많은 용어로 표현되어 왔고, Bertolotti와 Fukui⁽³⁰⁾는 이것이 도재 열팽창계수 측정에서 가장 어려운 문제점이라고 하였다.

도재의 유리화 온도 측정과 이에 의해 결정되는 도재의 열팽창계수 평가에 많은 변수가 가해져 실험이 진행되고 있는데, Fairhurst(1989)⁽⁴⁸⁾의 연구 결과에 의하면, 도재의 열력(thermal history)에 의해 가장 심하게 영향을 받는다고 하였고, Tuccillo와 Nielsen⁽⁶⁾은 도재 유리화 온도의 산출 방법에 의해서, 그리고 최근 DeHoff와 Anusavice⁽²⁷⁾는 유리화 온도 이상의 온도에서 도재의 점도 양상에 의해 영향을 받는다고 하였다.

도재의 열력에 관한 연구는 도재 냉각속도^(49,50), 열팽창 측정시의 도재 가열속도⁽⁵¹⁾, 그리고 도재 소성횟수^(34,37) 등에 관하여 이루어지고 있으며, 이들 요인에 의해 도재-금속 시편의 열팽창 양상이 심하게 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

이밖에도 시편의 형태나 실험적 변수로서 도재의 열처리⁽¹⁷⁾, 금속과 도재의 두께 비^(52,53), 열팽창계수 측정장

치의 능력⁽⁵⁴⁾ 등이 고려되고 있다.

Timoshenko의 공식을 이용하여 도재와 금속의 적합지수(compatibility index)를 결정하는 방법⁽¹³⁾은 Fairhurst(1981)⁽⁴¹⁾에 의해 발표되었는데, 이는 Timoshenko 공식의 변형으로서 T_g 의 개념이 좀더 보강된 형태이며, 도재와 금속의 계면에 존재하는 응력의 양과 정비례의 관계를 가진다. 이에 관하여 Twigg등(1980)⁽⁶⁾은 냉각방법에 따른 적합지수의 변화를, Anusavice 등(1982)⁽⁵⁵⁾은 급냉효과를, DeHoff와 Anusavice(1985)⁽⁵⁶⁾는 다점구조체에서의 적합을 계산한 바 있다.

실험적으로 측정된 도재와 금속의 적합지수 혹은 잔류응력의 양과 실제로 나타날 수 있는 효과를 확인내지 증명하기 위하여 여러 실험방법들이 고안 사용되었는데, 그 중 대표적인 분석모형방법으로서 Anusavice 등(1980)⁽⁵⁷⁾은 유한요소법을 이용하여 시편의 내부에 나타날 수 있는 응력의 종류를 연구하는 유한요소법을 이용하여 시편의 내부에 나타날 수 있는 응력의 종류를 연구하였고, DeHoff(1982)⁽⁵⁸⁾는 4점 굴곡실험을 유한요소법으로 시행하였으며 Anusavice와 Hojatti(1987)⁽⁹⁾ 주조관형태에서의 응력을 연구하였다.

그러나 Anusavice와 DeHoff(1984)⁽³⁶⁾는 자신들이 시행한 유한요소법의 문제점을 제기하였는데, 중요한 문제점으로서 도재와 금속간 결합이 완벽한 경우에만 이 방법이 타당성이 있다는 것과 유한요소법으로 산화막 형태를 부여하여 줄수 없다는 것이었다. 이후 유한요소법의 이용은 매우 제약적이고 한정적인 실험조건을 묘사하기 위해서만 응용되고 있다⁽⁵⁹⁾.

한편 실험적 모형방법으로서 Buchanan 등(1981)⁽³⁷⁾은 원형시편의 변형으로 열팽창양상의 차이를 재현하고자 하였으나 이론과 실제의 차이를 보여 적용되지 않고 있으며, 이 형태를 변형하여 서로 상호억제작용을 할 수 있는 여러결의 형태를 가진 원형시편이 변형되는 정도로서 열팽창 양상의 차이가 묘사될 수 있도록 하는 실험이 DeHoff와 Anusavice(1985)⁽⁵⁶⁾에 의해 시행되었으나, 아직 실험적으로 완전한 재현성이 확인되고 있지는 못하며 도재의 유리화 온도측정에만 사용되고 있다.

DeHoff(1982)⁽⁵⁸⁾는 자신이 행한 유한요소법의 문제점중 계면에서 형성된 응력의 분산이 실제로는 도재와 금속 결합부의 양끝단에 집중적으로 나타나는 사실을 인지하고 시편의 형태를 실험하중의 그 부위에 집중적으로 가해질 수 있도록 하는 시편을 고안하였는데⁽⁶⁰⁾, 이는 과거에 사용되어 오던 3점하중법⁽⁶¹⁾의 변형으로서 4점하중법을 소개하였으며, 이의 타당성을 검증하였다. 이 방법의 장점으로는 시편제작이 용이하고, 재료두께가 임상적으로 타당성이 있으며, 실험 과정이 용이하고 그리고 가장 중요한 사항으로서 도재와 금속간 파절이 계면부에서 정확히 일어난다고 하는 것이다^(12,62).

이러한 장점을 지닌 4점굴곡하중법이 소개된 직후 Lund등(1989)⁽⁶³⁾이 이론과 실제값을 검증하기에 이르렀으나, 그 후 이 방식의 또 다른 실험결과 보고는 아직 이루어지지 않고 있는 실정이다.

한편 열팽창의 관점에서 많은 실험들이 결합력의 평가를 통하여 이루어졌는데, Shelland와 Nielsen⁽¹⁶⁾, Tuccillo와 Nielsen⁽⁶⁾, Fairhurst 등⁽⁴⁸⁾은 열력이 결합력에 미치는 효과를, DeHoff⁽⁵⁸⁾와 Coffey 등⁽²¹⁾은 금속의 종류나 냉각방법에 의한 효과를 검토한 바 있다⁽⁶⁴⁾.

대부분의 실험들은 아직까지 비귀금속류에 관하여 이루어지고 있으며⁽⁶⁵⁻⁶⁸⁾, 적합지수의 재현성을 검토하는데 중점을 두고 있다⁽⁶⁹⁾. 그러나 최근 Anusavice 등(1985)⁽⁴³⁾은 팔라듐-동 합금에서 변연부의 변형을 관찰하던중 현저한 변화를 관찰하고 이것을 두가지 관점에서 고찰하였는데, 고온에서 크리프량이 많은 경우이거나, 열팽창 부조화에 의한 것으로 고찰하였다. 이에 착안하여, Walton과 O'Brien(1985)⁽³⁵⁾은 팔라듐-은 합금에서 도재층 균일형성을 관찰하였고, Anusavice와 Carro II(1987)⁽³³⁾은 주조체의 적합도 감소를 보고하였으며, Goodacre(1989)⁽⁷⁰⁾는 문헌적 고찰을 통하여, 이 합금의 도재와의 열적 적합성을 우려한 바 있다⁽⁷¹⁻⁷⁴⁾.

이에 본 실험에서는 도재용 합금으로서 니켈-크롬 합금과 팔라듐-은 합금을, 그리고 시판 도재로는 열팽창량이 서로 다른 것으로 알려진 두 도재를 대상으로 하여, 각각의 냉각속도를 달리 한 경우와 소성횟수

를 증가시킨 경우에 있어서, 열팽창양상 측정기 (Dilatometer)로 각각의 열팽창량을 측정하였으며, Fairhurst 등(1989)⁽⁴⁸⁾이 이용한 방법^(25,75)으로 도재의 유리화온도에서 열팽창량의 차이를 얻어 각 시편의 열부조화 정도를 계산하였고 이를 실험적으로 제작된 4 점굴곡시편에서 측정된 금속-도재 결합강도와 비교조사 하였다.

II. 실험재료 및 방법

실험재료는 도재용 합금으로 팔라듐-은 합금 (Pors on 4 : P)과 니켈-크롬합금(Rexillium III : N)

을 택하였고 도재는 Ceramco도재(C)와 Vita 도재 VMK 68(V)를 선정하였다(Table 1).

실험 조건으로 대기중에서 커버 유리를 덮은 상태에서 냉각시켜 냉각속도를 빨리한 경우(Rapid cooling : R), 도재료를 담은 채 실온까지 냉각될 동안 방치하여 서냉시킨 경우(Slow cooling : S) 그리고 두번 소성과정을 거친 경우(Double firing : D) 등 세군으로 분류하였다.

금속의 경우 주조상태의 조건을 추가하였고 이것의 코드는 X로 하였다. 합금 표면 처리는 산화처리를 한 경우와 그렇지 않은 경우 현저한 차이가 나타날 수 있고 산화막 개재로 인하여 열팽창 양상의 변화를 초래할 수 있다고 하는 선학들의 연구를 토대로 균질한 조

Table 1. Materials used in this study.

Classification I	Classification II	Commercial products	Manufacturer
Ceramic Alloys	Pd-Ag alloy Ni-Cr alloy	Pors-on IV Rexillium III	Degussa AG, W. Ger. Jeneric Gold, USA
Porcelains		Vita Ceramco	GmbH & Co. W. Ger. Ceramco Co, USA.

Table 2. Specimen codes and experimental conditions.

	As-cast	Rapid cooling	Slow cooling	Double firing
Alloy specimens				
Pd-Ag alloy	PX	PR	PS	PD
Ni-Cr alloy	NX	NR	NS	ND
Porcelain specimens				
Vita porcelain		VR	VS	VD
Ceramco porcelain		CR	CS	CD
Combinations of alloy and porcelain				
Pd-Ag alloy & Vita porcelain		PVR	PVS	PVD
Pd-Ag alloy & Ceramco porcelain		PCR	PCS	PCD
Ni-Cr alloy & Vita porcelain		NVR	NVS	NVD
Ni-Cr alloy & Ceramco porcelain		NCR	NCS	NCD

건을 부여키 위하여 산화처리를 시행하지 않았고, 또한 표면 연마작업이나 sand blast는 시행하지 않았다. Table 2에 있는 바와 같이 합금 종류 2가지 도재 종류 2가지 그리고 실험조건 3가지 등 모두 12가지 조건을 실험 대상으로 하였다.

도재료를 담은 채 약 3시간에 걸쳐 서냉시키는 S조건은 Raymond와 Bertolotti의 방법(8)에 준한 것으로서 물론 도재로의 종류에 따라 차이가 있겠으나, 분당 약 3℃의 냉각속도가 되는 것으로 알려져 있다.

열팽창측정용 시편의 제작

금속의 열팽창곡선을 구하는데 사용되는 시편 제작을 위하여 직경 5.1mm 높이 13mm의 원통형 납형을 준비하였고, 하나의 링에 하나의 납형을 인산염 매물재에 매몰하여(Thermovest, Kerr) gas-oxygen 불꽃으로 용융시켜 원심주조기에서 주조하였다. 주조체 표면에 결함이 없는 것을 택하였고, 증류수에서 10분간 초음파 세척하였다.

이때의 원통형 주조체를 X시편으로 하였으며, 그후 R,S,D 조건의 금속 시편은 도재를 올리지 않은 상태에서 도재시편과 동일한 소성과정을 부여하였다. 하나의 조건당 3개 시편을 제작 모두 24개 시편을 준비하였으며, 각각의 코드는 Table 2와 같다.

도재 시편은 7mm×7mm×30mm의 몰드에 증류수와 혼합한 도재분말을 주입하고 1차 소성하였으며, 1차 소성된 도재시편을 원래의 몰드에 도로넣어 도재수축에 의해 생긴 틈을 다시 증류수와 혼합한 도재분말로 채워 넣고, 2차 소성을 행하였다. 2차 소성이 종료된 후, 냉각시킬 때 R조건과 S조건을 차이를 두어 냉각하였으며, D조건시편은 R조건으로 냉각시킨 후 도재분말을 추가하지 않은 상태에서 2회를 더 소성하였고, 모두 4회 소성한 뒤 R조건으로 냉각시켰다.

약 6mm×6mm×27mm정도의 크기로 소성된 도재 시편을 trimming하여 5mm×5mm×25mm의 시편으로 제작하였다. 조건당 3개 시편을 마련하여 모두 18개 시편을 준비하였다(Fig. 1).

열팽창량 측정 및 열팽창계수의 계산

모든 시편의 원래 길이(L₀)를 측정한 뒤, 열팽창량

측정기(Dilatometer, Dilatronic—II and—III, Tokyo Ind. Co., Japan)에 위치시키고 분당 10℃의 속도로 가열하였다. 금속의 경우는 대기중에서 실험을 시행할 경우 표면의 산화막 형성에 의해 열팽창 계수가 감소되는 현상을 막기 위하여 76mmHg의 진공하에서 시행하였으며 push rod방식으로 약 10그램 정도의 하중이 시편에 가해지도록 한 상태에서 약 900℃까지 측정하였고, 도재는 예비 실험결과 도재내에 존재하는 기포 때문에 진공을 가해질 경우 실험 도중 파절을 일으켰기 때문에 도재 시편에는 진공을 가해 주지 않고 시차열팽창량 측정기(differential dilatometer, Dilatronic, Theta Industries, U.S.A)에서 백금을 기준시료로하여 약 600℃까지 측정하였다.

매1도 간격으로 실제 팽창량 ΔL을 측정하여, 시편마다 원래의 길이 L₀가 다르기 때문에 시편원래 길이로 나누어 열팽창 곡선을 그린 것이 Fig. 2이며 이것은 온도증가에 따라 시편 길이가 증가하고 있는 양상을 보이고 있다.

조건당 3개씩 시편을 측정하였기 때문에, 이들의 평균을 구하는 방법으로 특정 수치의 값을 평균하는 방법을 이용하지 않고 전체적인 열팽창곡선 3개를 전운 도구간에서 합성한뒤 Fig. 3과 같이 하나의 곡선을 형성하여 이를 그 조건에서의 열팽창곡선으로 하였다.

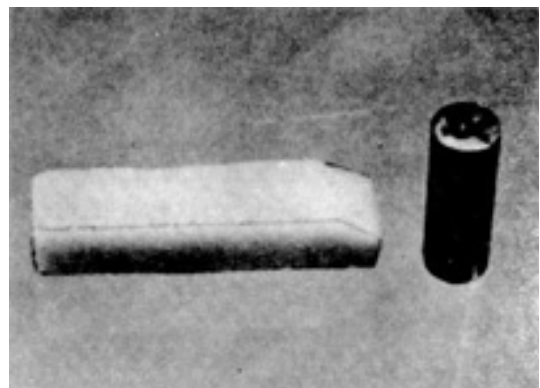


Fig. 1. For the dilatometric measurements, cylindrical alloy specimens and bar-shaped porcelain specimens were prepared with the dimension of 13mm x 5mm for alloy and 5mm x 5mm x 25mm for porcelain after final trimming.

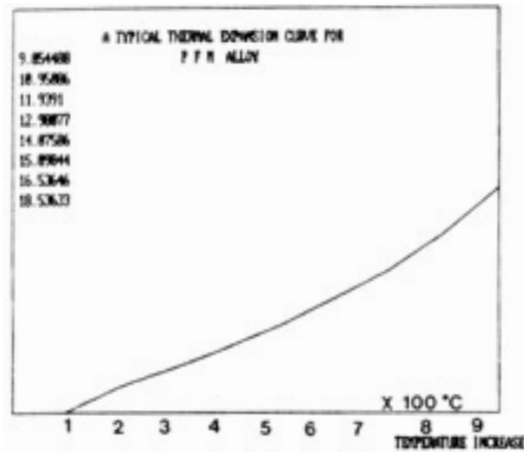


Fig. 2. A typical expansion curve for a PFM alloy. There were no evidence of significant changes of a slope of curve for the interest temperature range from room temperature to 900°C.

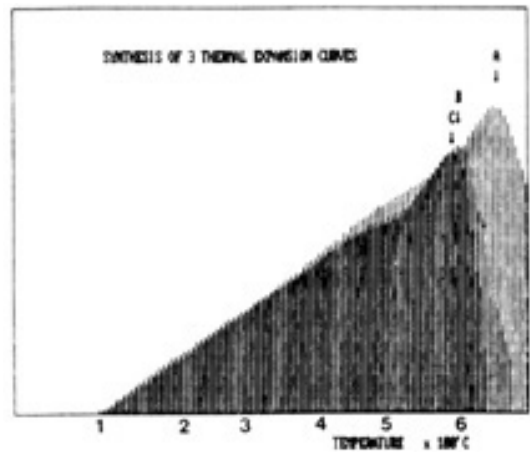


Fig. 3. Synthesis of three expansion curves obtained from Dialtometer to form a mean curve. For the total temperature range, the mean point of three data at each temperature were calculated and plot on the graphic mode of computer. Final graph synthesized was used for the comparison with another conditioned curves and for the determination of glass transition temperature.

유리화 온도의 결정

열팽창량측정기로 부터 측정되어 나오는 자료는 원래의 길이에 비하여 증가된 ΔL 값만 온도의 증가에 따라 측정이 되므로, 매 온도에서의 열팽창량 dL 는 $\Delta L, T_0 - \Delta L, T_0 + 1$ 에 의해 계산하였고, Fairhurst등⁽⁴⁸⁾이 주장한 바에 따라 dL 의 값이 최대일때를 최대 유리화 온도($T_{g \max}$)로 간주하였으며, 최소 유리화 온도($T_{g \min}$)는 일점을 정하기가 어려워 유리화온도로 사용하지 않았다.

부조화량의 계산

전 온도 구간의 도재 열팽창 곡선과 금속 열팽창 곡선을 함께 그리고 위에 밝힌 바와같은 유리화 온도 평가방법으로 계산된 $T_{g \max}$ 온도에서의 열팽창 계수 α T_g 를 각각 구하도록 하였으며, 이들의 차 $\alpha_{\text{metal}} - \alpha_{\text{porcelain}}$ 를 구한 뒤, T_g 를 곱하여 부조화 양으로 간주하였다.

결합력측정용 시편의 제작

Coffey 등⁽²¹⁾과 Lund 등⁽⁶³⁾이 이용한 방법으로 각

합금당 18개씩의 21mm×7mm×0.6mm판형 주조체를 준비하였고 표면 처리는 열팽창 계수 측정시편의 경우와 동일하게 시행하였다. 시편 표면을 산화처리나 연마 및 sand blasting을 하지 않았기 때문에 주조상태의 거칠은 정도가 그대로 결합력에 나타나도록 불화수소산에서 10분간 초음파 세척한 후 증류수에서 5분간 초음파 세척하였다.

증류수와 혼합한 opaque 도재분말을 도포한 뒤, 700°C에서 건조시켰고, 920°C까지 760mmHg의 진공하에서 온도를 올려 소성하였다. 도재 분말은 1회만 도포하였으며, 두께 측정기(Dial thickness gauge, Pea Cock Co., Japan)에서 최종적으로 측정된 opaque도재층의 두께는 약 0.3mm였다.

Body도재 분말두께가 약 1.2mm가 되도록 축성한 뒤, 700°C에서 건조시켰고, 동일한 온도인 920°C까지 가열하여 1차 소성을 하였고, 다시 전체 두께가 약 2.4mm가 되도록 도재를 축성하여 2차 소성을 시행하였다. 이때 R 조건과 S조건을 차이를 두어 생각하였으며, D조건은 R조건으로 생각한 뒤 추가도재 분말을

축성하지 않고 2번을 더 소성하였으며, 역시 R조건으로 생각시켰다. 진공소성은 열팽창계수 측정시 진공을 가하여 줄 수 없었기 때문에 시편의 제작시에도 시행하지 않았으며 최종 소성시의 온도유지 시간은 3분으로 하였다. 최종적으로 소성된 시편을 trimming하여 1.5mm두께의 도재층이 되도록 하였고, 도재-금속 경계부에 부착되어 있는 여분의 도재를 삭제하였다.

결합강도의 측정

만능시험기(Universal Testing Machine, Model 1124, Instron Co., U.S.A)에서 Fig. 4와 같이 하중 전달 장치를 시편 상하에 위치시키고, 분당 0.2mm의 속도로 하중을 가하여 금속과 도재의 계면에서 분리가 일어나 기록기상에 하중이 급격히 감소하는때의 하중을 본 실험에서 요구하는 하중 값으로 하였다.

III. 실험성적

금속의 열팽창 곡선과 열팽창계수

Fig. 5에 보이는 바와 같이 전반적으로 금속의 열팽창양상은 시편의 도재소성과정에 의해 거의 영향을 받지 않는 것으로 사료되었으며, 전 온도구간에 걸쳐 만곡을 이루며 비교적 온도의 증가에 비례하는 것으로 관찰되었다.

Fig. 5-1에 있는 것은 팔라듐-은 합금의 각 조건

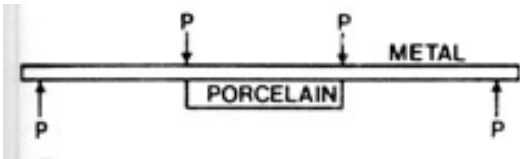


Fig. 4. Four point flextural test arrangement. Upper two loads were 7mm apart and the distance between two supports was 14mm. The width of metal- porcelain strip was 7mm also, and the thickness of metal strip was 0.7mm and that of porcelain was approximately 1.5mm included the layer of opaque with the thickness of 0.3mm approximately.

에서 얻어진 열팽창 곡선을 전 온도구간 900℃까지 비교한 것으로서 PR과 PD는 고온에서 거의 일치하며, PS가 낮은 열팽창계수를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 5-2는 세가지 조건에서의 니켈-크롬 합금 열팽창 곡선 전체를 비교한 것이다. 낮은 온도 범위에서 NS와 ND의 곡선이 비교적 유사한 양상의 곡선 형태를 보이고 있으며, NR시편의 곡선이 가장 낮은 위치에 자리하고 있어 저온에서는 NR시편이 가장 적은 열팽창을 나타내었다. 그러나 600℃를 넘어 900℃에 이르는 고온에서는 거의 유사한 정도의 열팽창 곡선 형태를 보이고 있다.

Fig. 5-3에 있는 것은 주조상태에서의 팔라듐-은 합금의 열팽창곡선과 니켈-크롬 합금의 열팽창곡선을 전 온도구간에서 비교한 것으로서 전체적으로 팔라듐-은 합금이 니켈-크롬 합금에 비하여 높은 열팽창량을 보이는 것으로 나타났으며, 고온으로 이동할수록 이와 같은 차이는 점차 커지는 것으로 나타나고 있다.

금속의 열팽창에 관한 자료중 도재의 유리화 온도(T_g)에서 계산된 열팽창계수(α_M)가 Table 3과 Fig. 6에 있다.

팔라듐-은 합금(P)은 급속냉각시(PR) $18.04 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 를, 서냉시에는(PR) $17.37 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 열팽창계수를 그리고 소성횟수가 많은 경우에는(PD) $18.63 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 열팽창 계수를 보여 소성횟수가 많은 경우 열팽창계수의 증가를 보였다.

이에 비하여 니켈-크롬 합금(N)은 급속냉각시킨 경우(NR) $16.70 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 열팽창계수를 보였고, 서냉시킨 경우(NS)는 $16.22 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 를 그리고 소성을 여러번한 경우(ND)는 $16.89 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 정도의 열팽창계수를 보여 서냉시킨 경우가 가장 적은 열팽창계수를 보였다.

도재의 열팽창 곡선

온도의 증가에 대한 단위길이 시편의 길이증가로 표시되는 도재 열팽창 곡선이 Fig. 7이다. 도재 열팽창 곡선은 금속의 경우와는 달리 도재 소성온도에 훨씬 못 미치는 온도에서 길이 감소가 나타나기 시작하였고, 도재 소성방법의 차이에 의해 금속의 경우에서 보

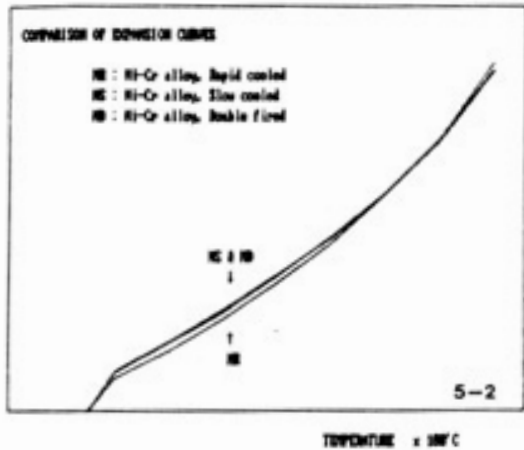
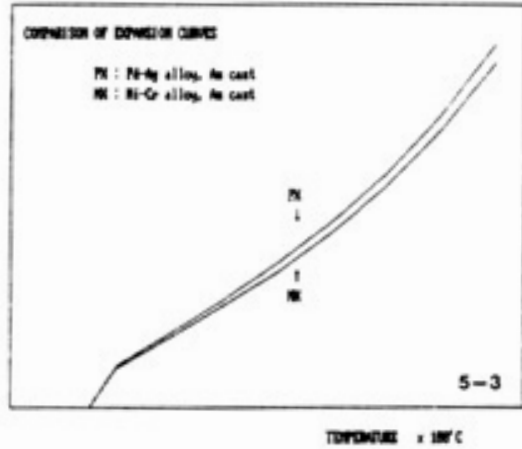
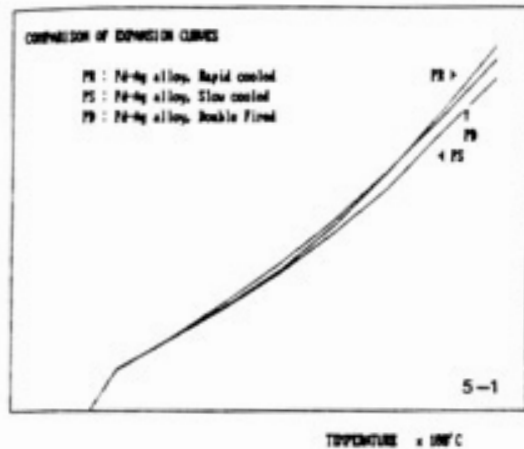


Fig. 5. Total comparison of expansion curves of alloys at three experimental condition, as rapid cooled(R), slow cooled(S), and double fired(D). The upper one (5-1) is a comparison of Pd-Ag alloys at three condition(R,S,D), and lower one [5-2] is a comparison of Ni-Cr-Be alloys at three condition (R,S,D), last one [5-3] is a comparison of alloy systems as-cast condition without fring Pd-Ag (px) vs. NI-Cr-Be (NX).

Table 3. Thermal expansion coefficient of ceramic alloys at approximate glass transition temperature of porcelains.

	Rapid cooling	Slow cooling	Double firing
Pd-Ag alloy	18.04	17.37	18.63
Ni-Cr alloy	16.70	16.22	16.89

$$\alpha^m = \frac{\Delta L}{L_0/T_0} \times 10^6$$

Unit: $\times 10^{-6} \mu\text{m}/\mu\text{m}/^\circ\text{C} = \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

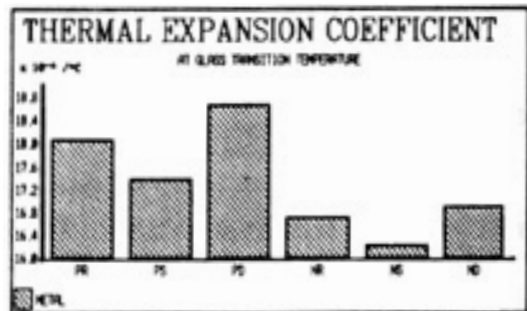
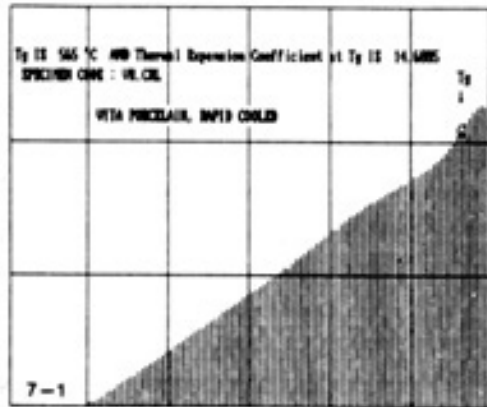
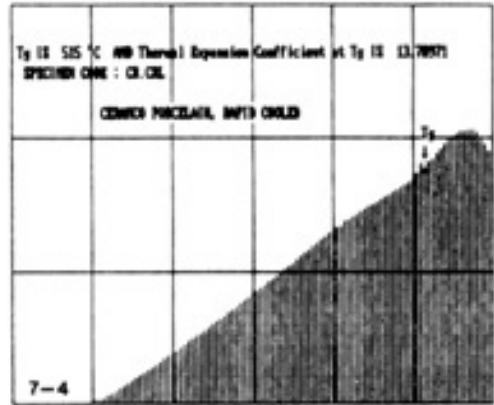


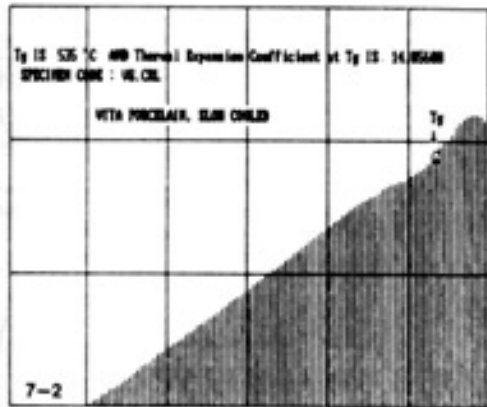
Fig. 6. Comparison of the thermal expansion coefficient of PFM alloys.



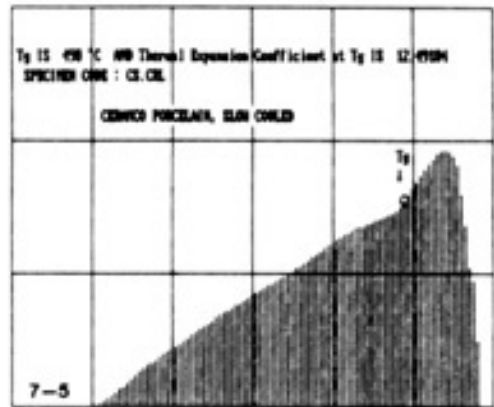
TEMPERATURE x 100 °C



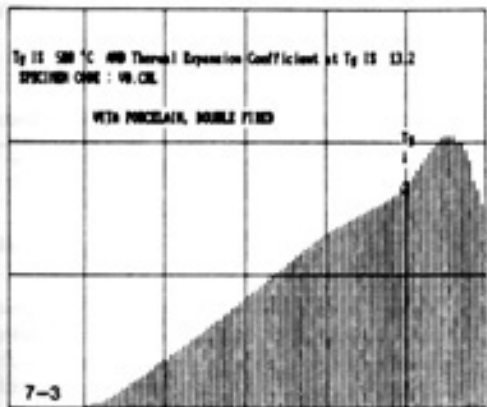
TEMPERATURE x 100 °C



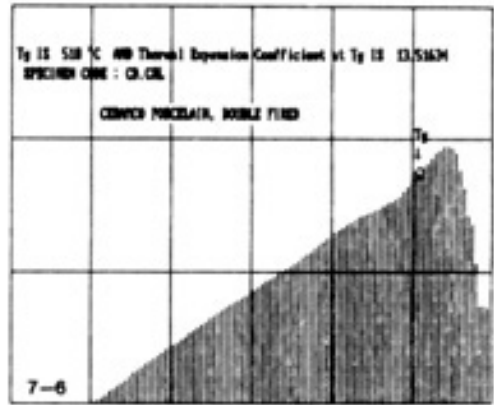
TEMPERATURE x 100 °C



TEMPERATURE x 100 °C



TEMPERATURE x 100 °C



TEMPERATURE x 100 °C

Fig. 7. Each expansion curves for VR(Vita-rapid cooled, 7-1), VS(Vita-slow cooled, 7-2), VD(Vita-double fired, 7-3), CR(Ceramco-rapida cooled, 7-4), CS(Ceramco-slow cooled, 7-5), and CD(Ceramco-double fired, 7-6). A small circle formed on every curves at right-upper corner is showing the position of glass transition temperature for each conditioned specimens. A curve of porcelain was differ with one for alloys, there were formed a peak on the temperature between 500°C and 600°C, and after a peak rapid shrinkage due to the melting of porcelain matrix was observed. Interfacial mismatch calculated from the expansion curves of metal and ceramic at glass transition temperature determined on the curves of porcelain expansion curve.

다 곡선이 현저하게 좌우로 이동하는 양상을 보였다.

Fig. 8-1은 Vita 도재 시편 3가지조건을 비교한 곡선이며, Fig. 8-2는 Ceramco도재에서 3가지 조건을 비교한 것이며, Fig. 8-3은 급냉시킨 시편에서 Vita 도재(VR)와 Ceramco도재(CR)를 비교한 것이다.

Vita도재 시편의 경우는, 도재를 급속냉각한 경우인 VR시편이 비교적 높은 온도에 까지 열팽창을 보였고, 여러번 소성한 VD 시편이 가장 낮은 온도에 열팽창을 종료하였다.

Ceramco 도재시편에서도 역시 CR이 가장 높은 온도에 까지 팽창을 지속하였으며, 소성횟수가 많았던 CD나 서냉시킨 CS의 경우는 거의 유사한 정도의 비

교적 저온에서 팽창의 지속을 종료하고 있음을 보이고 있다.

즉, Vita도재와 Ceramco도재의 비교에 있어서는 Fig. 8-3에 보이는 바와같이 Vita도재가 현저히 높은 온도에 까지 팽창을 지속할 수 있어 현저히 높은 부위까지 팽창곡선이 지속되고 있음을 보이고 있다.

유리화 온도(T_g)에서 도재의 열팽창계수(α_p)

Fig. 9은 도재의 유리화 온도를 결정하는 방법을 보이고 있는 것이다. 곡선의 높이는 매 5°C당 팽창하는 양(dL)이며 이 팽창량이 최대로 되는 때의 위치에 화살표로 표시되는 온도가 도재 유리화 온도(T_g)에 해당

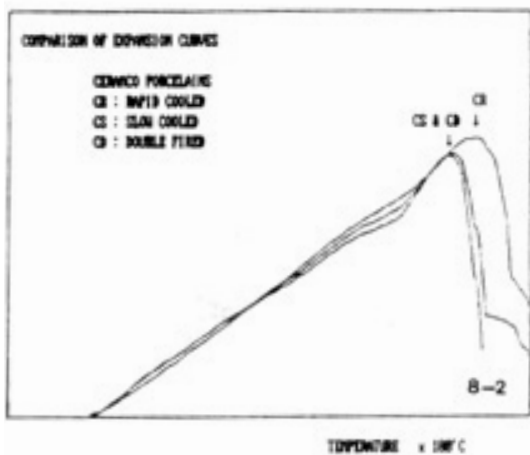
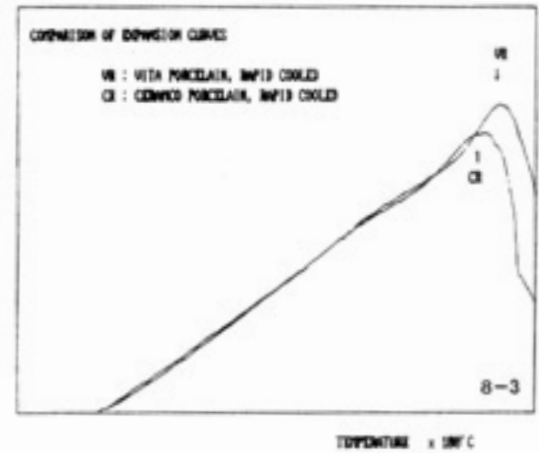
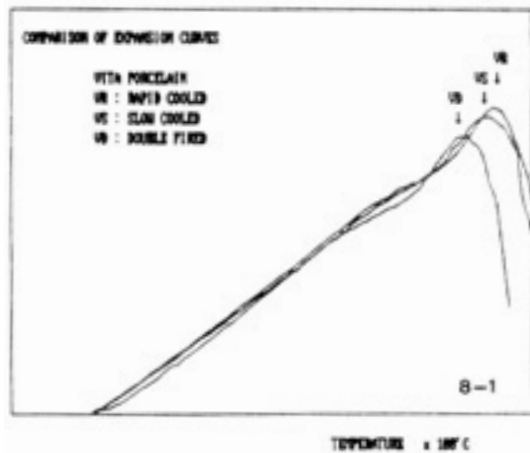


Fig. 8. Comparisons of the total curves for temperature range. 8-1 was formed by overlapping curves gotten from three condition(R,S,D) from Vita and 8-2 was from Ceramco with same method. Last one 8-3 was a comparison of two porcelain products as condition of rapid cooled. Generally, a shift of peak to higher temperature was found on the condition of rapid cooled compared to other condition. However from room temperature to about 400°C, there was formed a slop with almost same inclinations. When compare two commercial products(8-3), specimens from Vita exhibited the peak on higher temperature than Ceramco.

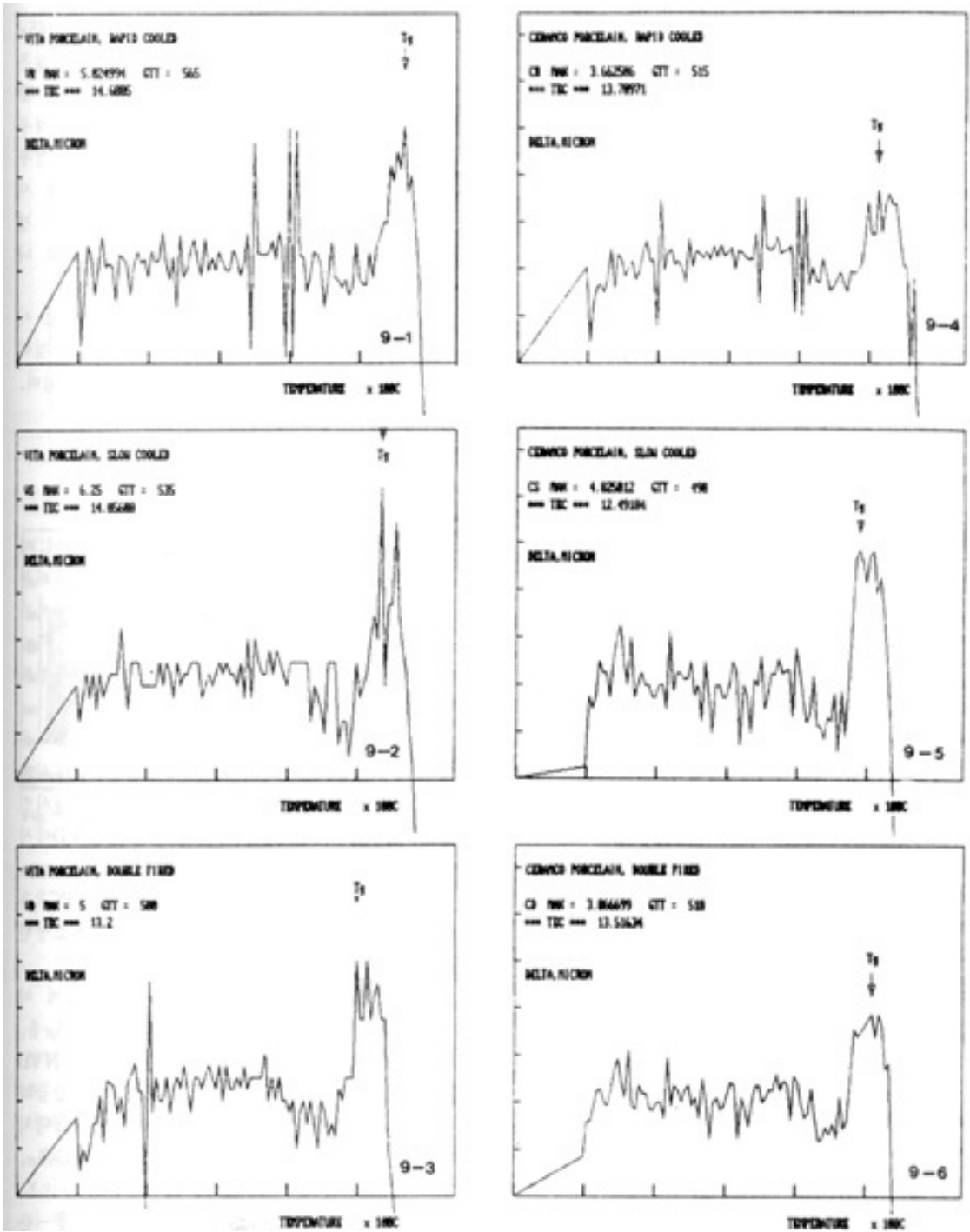


Fig. 9. Graphs showing the pattern of the change of increment at each temperature, for the temperature range of from 100°C to over the peak temperature. There was a sharp increase of increment for each porcelain specimens, and it was selected as glass transition temperature. Although $T_{g\max}$ and $T_{g\min}$ were found, but $T_{g\min}$ was difficult to determine only $T_{g\max}$ was utilized as reference temperature. VR(9-1), VS(9-2), VD(9-3), CR(9-4), CS(9-5), CD(9-6).

한다(Table 4, Fig. 10). 즉 유리화 온도는 열팽창 곡선에서 최대점이 아닌 곡선의 경사가 갑자기 증가하게 되는 때의 온도가 되며, 이는 어느 정도 열팽창 곡선의 최대치의 위치와 상관성을 가진다.

Table 4고 Fig. 10에 있는 바와같이 Vita도재 시편은, 급냉시킨 VR에서 565°C에서 그리고 서냉시킨 VS에서는 535°C소성횟수가 많은 경우인 VD에서는 500°C라는 낮은 온도에서 유리화 현상을 보이는 것으로 나타났다. 즉 유리화 온도 역시 급냉시킨 경우가 가장 높은 온도에서 유리화가 이루어졌고, 소성횟수가 많을수록 낮은 온도에서 유리화가 이루어졌다.

한편 Ceramco 도재 시편의 경우는 급냉시킨 경우 490°C 그리고 소성횟수가 많은 경우에는 510°C에서 유리화가 이루어져 서냉시킨 경우가 가장 낮은 온도에서 유리화를 보임을 알수 있었다.

전체적으로 Vita도재 시편은 500°C 내지 565°C의 온도 범위에서 유리화 현상을 보였으며, Ceramco도재 시편은 490°C 내지 515°C 온도범위에서 유리화를 나타내 Vita도재의 유리화 온도가 Ceramco도재의 유리화 온도에 비해 높은 것으로 나타났다.

유리화가 일어나는 순간의 팽창량은 Vita도재의 경우 5 μ 내지 6.25 μ 그리고 Ceramco도재 시편은 3.6 μ 내지 4.8 μ 정도의 팽창량을 보여 Vita 도재 시편의 유리화 온도에서 순간 팽창량이 비교적 많은 것으로 나타났으나, 이는 본 실험 결과와 특징적인 상관성을 가지지 않기 때문에 실험 결과로는 인용하지 않았다.

시편의 실온에서 유리화 온도까지의 열팽창량은 팽창곡선에서 기저선으로 부터 곡선까지의 거리를 의미하며, 이는 $\alpha P \times (T_g - T_0)$ 로 표현될 수 있다. 이 수치는 금속의 수치가 고정적이라고 가정하면 적합지수를 결정하는 가장 중요한 요인이며 유리화온도에 의해 현저한 영향을 받는 변수로 작용한다.

도재의 총팽창량은 Vita 도재에서 급속냉각 시킨 경우(VR) 207 μ , 서냉시킨 경우(VS) 188 μ 그리고 여러 번 소성한 경우(VD) 165 μ 의 팽창을 보여 급속냉각시킨 경우 가장 많은 팽창량을 보였으며, Ceramco 도재 시편은 급냉시킨 경우(CR) 176 μ 을, 서냉시킨 경우(CS) 153 μ 그리고 소성 횟수가 많은 경우(CD) 172 μ 의 총팽창량을 보였다. 실험에 사용된 도재는 냉각 속도

가 빠른 경우가 느린 경우에 비하여 더 많은 팽창을 보이는 것으로 나타났다.

이때의 총팽창량을 유리화 온도로 나누고 이것을 다시 시편의 원래 길이로 나누어 준 것이 유리화 온도에서의 도재 열팽창계수가 되며, Table 5와 Fig. 11에 비교하였다.

금속과 도재의 부조화 양

Fig. 12에서 보이는 것은 금속과 도재의 팽창곡선을 함께 그래프 처리한 것이다. 따라서 금속의 총팽창량과 도재의 총팽창량의 차이가 바로 부적합 지수로 간주될 수 있으며, Fig. 12에서 유리화 온도(T_g)에서 두 팽창 곡선의 높이차이가 그것을 의미한다.

Table 6에 보이는 바와같이 팔라듐-은 합금과 Vita도재로 이루어진 시편중 급냉시킨 PVR시편에서 47.4 μ 를 나타내었고, 서냉시킨 PVS시편에서 44.3 μ 을, 반복소성한 PVD에서는 68 μ , 그리고 팔라듐-은 합금과 Ceramco 도재로 이루어진 시편중 급냉시킨 PCR은 55.8 μ 를, 서냉시킨 PCS는 59.8 μ , 반복소성한 PCD는 65.3 μ 를 보였다.

니켈-크롬 합금에서는 Vita도재와 함께 이루어지는 시편 중 급냉시킨 NVR은 38.5 μ 를, 서냉시킨 NVS는 28.9 μ 를, 반복소성한 NVD는 46.1 μ 를 나타내었으며, 동종의 합금과 Ceramco도재를 조합하는 경우에 있어 급냉시킨 NCR은 38.5 μ , 서냉시킨 NCS는 45.6 μ , 반복 소성한 NCD는 43 μ 를 보이였다.

Fig. 13에 보이는 바와 같이, 팔라듐-은 합금에서는 급냉이나 서냉시키는 경우, Ceramco 도재에 비하여 Vita도재의 열적 적합성이 우수한 것으로 나타났으며, 도재의 종류에 상관 없이 팔라듐-은 합금에서는 여러번 소성하는 것이 가장 나쁜 조건을 형성하는 것으로 나타났고 이는 니켈-크롬 합금에서도 마찬가지로 양상을 보이고 있다.

열 적합성의 관점에서 대체로 높은 차이값을 보이는 것은 팔라듐-은 합금으로서 이합금이 열적 부조화에 의한 문제를 제기할 수 있음을 보이고 있다.

Vita 도재로 제작된 시편중 팔라듐-은 합금에서는 서냉시킨 경우가, 그리고 니켈-크롬과는 급냉시키거나 서냉시킨 경우가 가장 열적 안정성을 보였으며,

Table 4. Glass transition temperature of porcelain(T_g)

	Rapid cooling	Slow cooling	Double firing
Vita porcelain	565	535	500
Ceramco porcelain	515	490	510

Unit: °C

Table 5. Thermal expansion coefficient of porcelain(α_p) at glass transition temperature(T_g)

	Rapid cooling	Slow cooling	Double firing
Vita porcelain	14.69	14.06	13.2
Ceramco porcelain	13.71	12.49	13.52

$$\alpha^P = \Delta L_s / L_s / T_g \times 10^6$$

Unit : $\times 10^{-6} \mu\text{m}/\mu\text{m}/^\circ\text{C} = \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

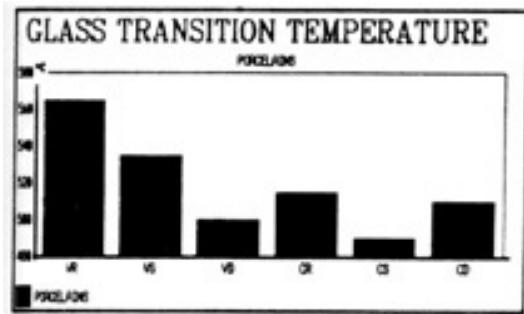


Fig. 10. Glass transition temperature, $T_{g \max}$, for six kinds of porcelain specimens. For two porcelain products, when cooled rapidly, rise of glass transition temperature was found. And for Vita the lowest value was found on the condition of double fired, and for Ceramco it was a slow cooled specimen. Generally the glass transition temperature from Vita were higher than of Ceramco.

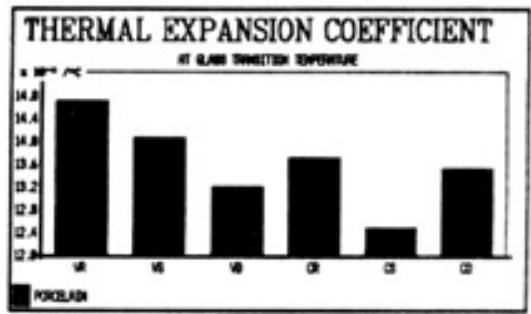
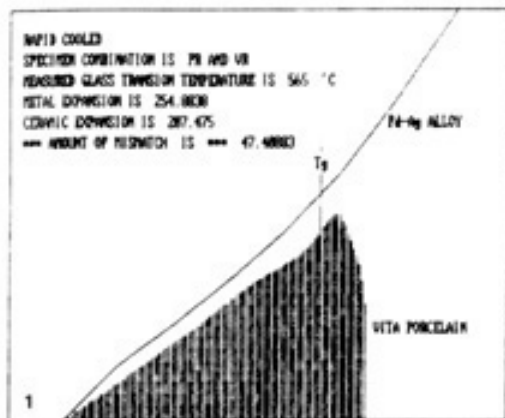


Fig. 11. Thermal expansion coefficient of porcelain at measured glass transition temperature for each specimens. There were same trend with a graph for glass transition temperature Fig. 10.

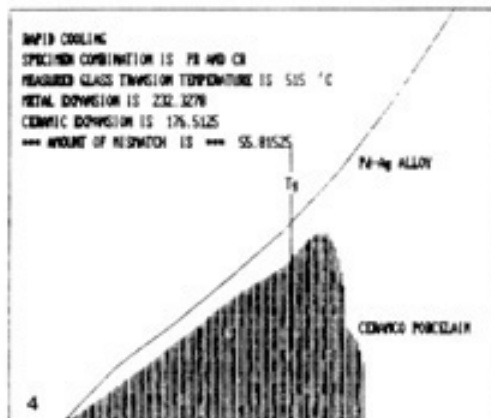
Ceramco도재로 제작된 시편에서는 급냉시킨 경우가 모든 합금계에서 적합성을 보였고, 기타의 경우는 모두 어느정도의 부적합성을 보였다.

모든 실험 조건에 있어서 도재를 여러번 소성하는

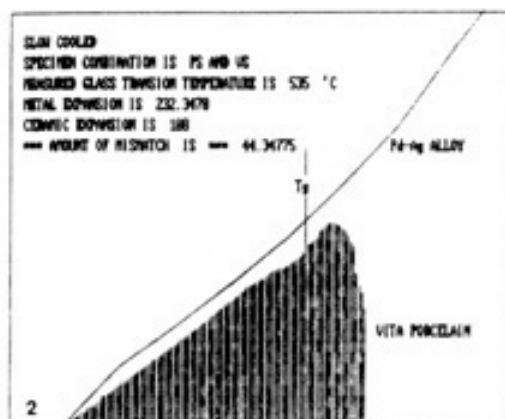
것은 열적 부적합의 문제점을 보일 수 있는 것으로 나타났다으며, 팔라듐-은 합금과 Vita 도재로 제작된 시편중 소성을 여러번 시행한 것이 가장 큰 문제점을 일으킬 수 있는 것으로 나타났다.



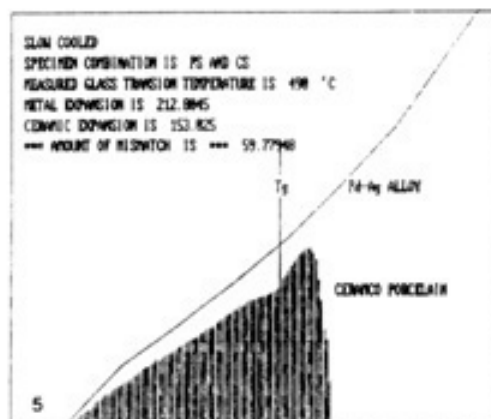
TEMPERATURE INCREASE



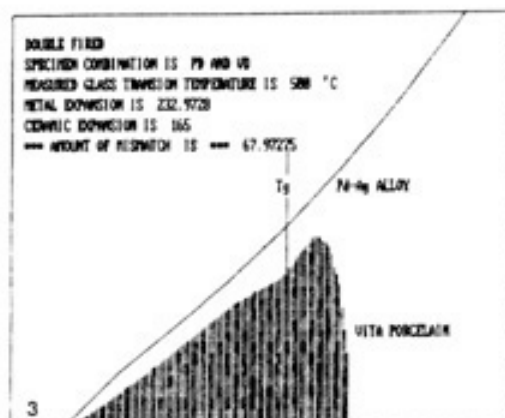
TEMPERATURE INCREASE



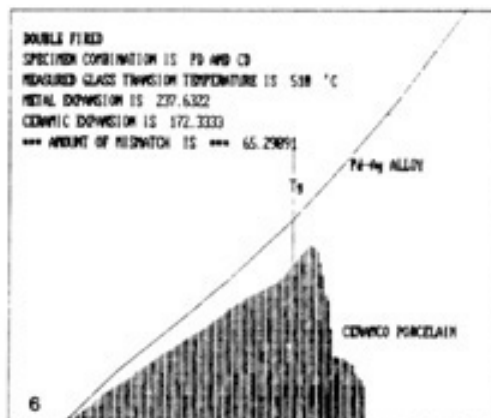
TEMPERATURE INCREASE



TEMPERATURE INCREASE



TEMPERATURE INCREASE



TEMPERATURE INCREASE

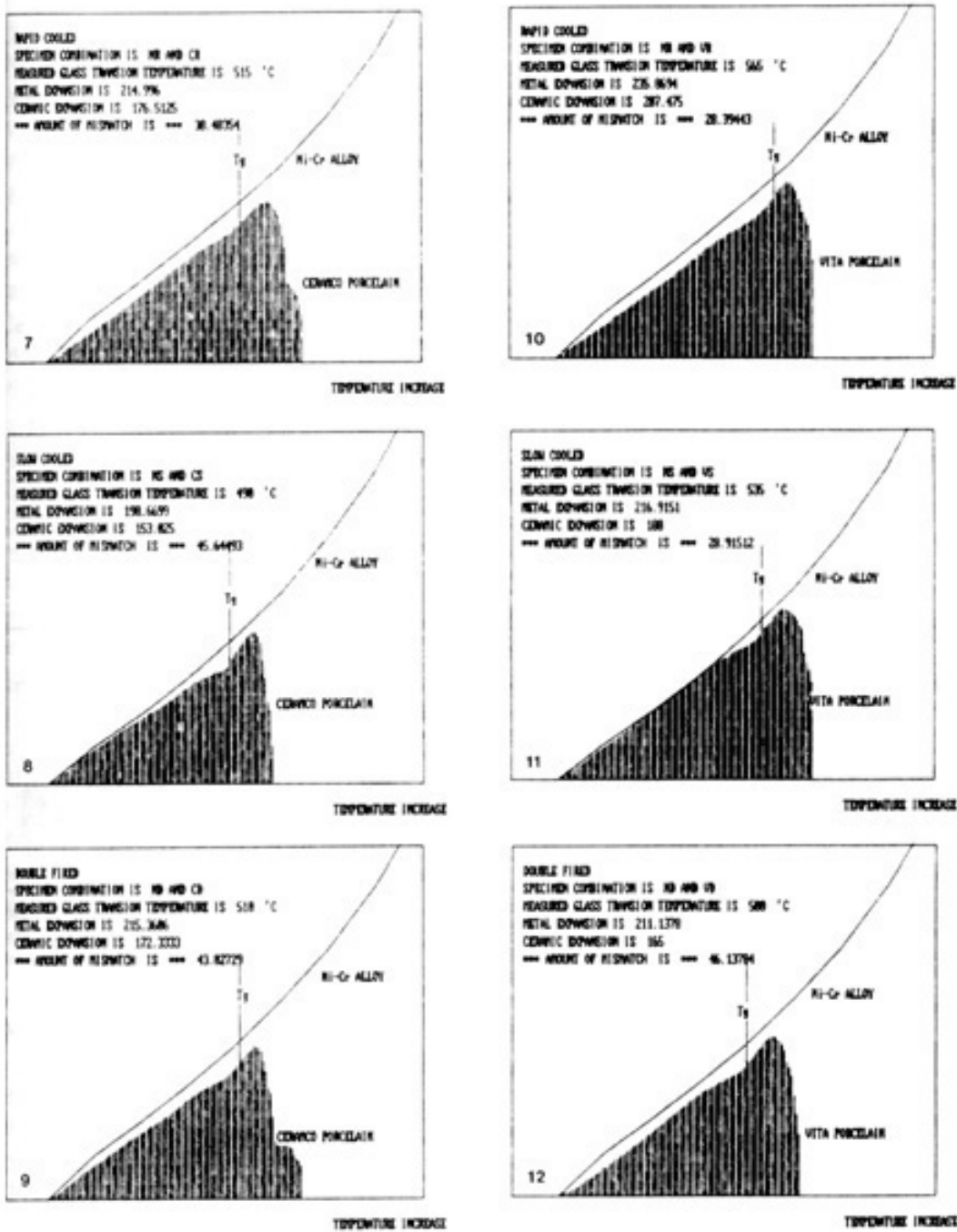


Fig. 12. Measurement of interfacial mismatch by comparing the calibrated expansion curves for metal and ceramic at same time. Measurement were done at the point temperature of glass transition temperature selected from Fig. 8. Pd-Ag and Vita(12-1,2,3) Pd-Ag and Ceramco(12-4,5,6) Ni-Cr and Vita(12-7,8,9) Ni-Cr and Ceramco(12-10,11,12) were matched at three experimental condition as rapid cool(R), slow cool(S) and double fired(D)

Table 6. Mismatch amount of metal and ceramic(σ^{M-P}) at glass transition temperature(T_g) of porcelains.

Combinations	Rapid cooling	Slow cooling	Double firing
Pd-Ag alloy & Vita porcelain	47.4	44.3	68.0
Pd-Ag alloy & Ceramco porcelain	55.8	59.8	65.3
Ni-Cr alloy & Vita porcelain	28.4	28.9	46.1
Ni-Cr alloy & Ceramco porcelain	38.5	45.6	43.0

Unit: μ

Table 7. Bond strength between porcelain and metal strip by four point flexural bending test.

Combinations	Rapid cooling	Slow cooling	Double firing
Pd-Ag alloy & Vita porcelain	37.28	39.77	24.84
Pd-Ag alloy & Ceramco porcelain	25.86	29.54	23.29
Ni-Cr alloy & Vita porcelain	47.31	51.05	34.35
Ni-Cr alloy & Ceramco porcelain	41.26	38.21	37.49

Unit: Kg

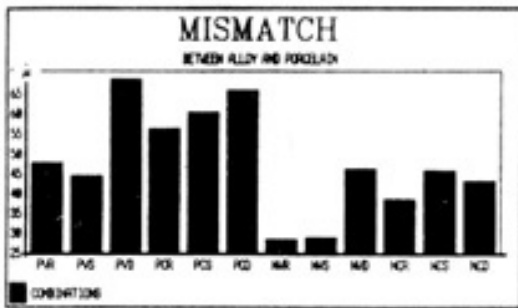


Fig. 13. Interfacial mismatch calculated from the expansion curves of metal and ceramic at glass transition temperature determined on the curves of porcelain expansion curve.

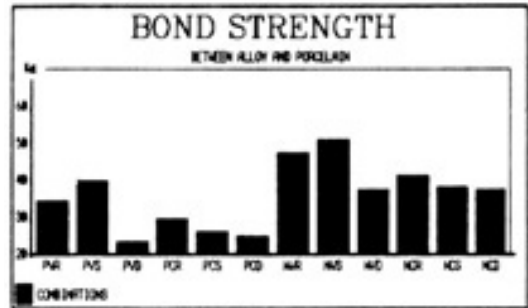


Fig. 14. Comparison of the effect of cooling rate and the number of firings on the mean flexural failure loads determined from the four point flexural test.

4점 굴곡실험에 의한 결합강도

Table 7과 Fig. 14에 보이는 바와 같이, 열부적합 정도와 결합력간의 상관성을 검증하고자 시행한 굴곡 시험에 의한 금속-도재 분리시의 하중치는 팔라디움-은 합금과 Vita도재로 이루어진 시편의 경우 급냉시킨 PVR에서는 34kg, 서냉시킨 PVS에서는 40kg, 반복소성한 PVD에서는 23kg을 보였고, 이 합금과 Ceramco 도재의 조합으로 이루어진 시편을 급냉시킨

PCR이 26kg, 서냉시킨 PCS가 30kg, 반복소성한 PCD가 25kg를 보였다.

니켈-크롬 합금과 Vita 도재로 이루어진 시편에서는 급냉시킨 NVR이 47kg, 서냉시킨 NVS가 51kg, 반복소성한 NVD가 37kg에서 도재와 금속간 분리가 이루어졌으며, 같은 합금과 Ceramco 도재로 이루어진 시편중 급냉시킨 NCR은 41kg, 서냉시킨 NCS는 38kg 그리고 반복소성한 NCD가 37kg에서 분리되었

다.

팔라디움 합금에서 가장 큰 결합력을 보인 것은, Vita 도재와 결합시켜 서냉시킨 PVS에서였고, PVD는 예견된 바와같이 가장 적은 결합력을 보였다. 니켈-크롬 합금에서도 Vita 도재와 결합시켜 서냉시킨 NVS가 가장 큰 결합력을 보였고, NVD와 NCD가 가장 적은 결합력을 보였다.

Vita 도재 시편의 경우, 예견된 바와는 달리 서냉시킨 시편에서 가장 큰 결합력을 보였고, 반복소성에서 가장 약한 결합력을 보였다. Ceramco 도재 시편에서는 급냉시킨 시편에서 가장 큰 결합을 보였고, 역시 반복 소성에서 가장 적은 결합력을 보였다.

IV. 총괄 및 고안

도재전장 수복물의 임상적인 성공을 위해서는, 금속과 도재의 결합력과 함께, 도재 자체의 인장강도가 고려되어야 하며, 아울러 도재와 금속의 열팽창량 차이로 인하여 발생하는 부조화 및 잔류응력의 상태가 반드시 고려되어야 한다⁽⁶³⁾.

더욱이 근래 도재와 도재용 합금의 상품수의 급증은 양자간의 열적합성을 유추할 수 있는 표준화된 실험방법이 요구되고 있으나 아직까지 도재와 금속의 열적합성을 유추하는 방법⁽¹¹⁾은 완전히 정립되어 있지 못하고, 시술후 실패의 정도로 그러한 문제점을 거론하고 있는 실정이다⁽⁶⁾.

도재와 금속간 열팽창량 차이가 수복물에 미치는 영향중 결합력에 관한 사항은 근래에 와서야 거론되고 있으며⁽⁷⁵⁾, 과거에는 주로 수복물의 변형과 그로 인하여 야기되는 주조체의 적합도 감소를 설명하는데 이용되어 왔다⁽⁷⁶⁾. 그러나 주조체의 도재 소성에 의한 변형에는 매우 많은 요인이 작용하고 있어 실험적으로 항상 균일한 결과를 얻는 것이 불가능하였으며, 다만 열팽창계수의 부조화가 수복물의 변형을 초래할 수 있을 것이라는 가정이 존재하였다^(19,20). Bryant와 Nicholls⁽²⁴⁾는 열팽창계수로 변형을 설명하였으며, 100 내지 150 μ 정도의 변형을 보일수 있으며, 시멘트에 의해서 이 공간이 메꾸어지게 된다고 주장하였다.

그러나 Moffa 등⁽³⁾은 이와 상반되는 결과를 보고하여 금속의 종류가 변형을 지배하는 요인이라고 하였고, 이러한 사항은 Vincent 등⁽⁴⁾에 의해 확인이 되었다. 그러나 Gardner⁽³⁸⁾가 마진의 형태에 의해 나타나는 것이라고 하였고, Buchman⁽³⁷⁾이, 이것은 DeHoff와 Anusavice의 연구⁽²⁷⁾에 의해 다시 반복되었다. 가장 최근의 변형에 관한 이론은 고온에서의 크리프 양상에 기인하는 것으로 되어 있으며^(24,42,43), 본 실험에서는 이들 선학들의 연구에서 논란의 대상이 되어 온 팔라디움계 합금을 열팽창 부조화 효과를 비귀금속의 것과 비교코자 하였다.

열부조화와 현저한 상관성을 가지는 현상을 찾기 위하여 많은 연구들이 진행되어 오고 있으며^(6,8,9,25,26,46,59), DeHoff 등⁽⁵⁶⁾은 잔류응력의 양을 계산하여 이것을 결합력의 감소로 재현할 수 있다고 주장하였다. 잔류응력의 계산 방법은 금속 열팽창량으로부터 도재의 열팽창량을 뺀 결과에 시편 형태적 요인을 가하는 방법이 주로 이용되고 있고, 그 결과에서 음수 값을 보이는 것은 도재와 금속의 계면중 도재쪽에 인장응력을 발생시키기 때문에 도재층 균열을 형성할 수 있는 것으로 되어 있으며, 미약한 양수 값을 가지는 것은 도재층에 압축응력을 형성하여 도재 자체 강도를 우수하게 하고, 도재전장 수복물의 파절강도를 증가시키며, 도재의 강도증진으로 인한 결합력의 증가를 유도할 수 있는 것으로 되어 있다. 그러나 이때 양수의 값이 지나치게 큰 경우에는 도재층 박리를 일으키려는 경향을 보이게 되며, 따라서 도재와 금속간 결합력은 저하되는 것으로 알려져 있다^(13,16,75).

본 실험 결과에서는 열부조화 양이 모두 양수값으로 나타났는데, 이는 실험 재료로서 열팽창계수를 조절할 실험도재를 사용하지 않고 시판도재를 사용하였기 때문이며, 시판 도재에서는 이미 어느 정도 열팽창량을 금속의 것과 조화를 이룰수 있도록 하고 있기 때문인 것으로 사료된다.

치의학 분야에서는 열팽창양상의 평가를 위해서 두 가지 종류의 열팽창측정기가 이용되고 있다. 가장 널리 사용되는 방식은 push rod형식이지만, 이 형식은 측정시 시료에 10gm 내지 20gm 정도의 하중이 가해지게 되기 때문에 시료가 고온에서 변형이 되지 않는

경우에만 이용할 수 있고^(25,27), 도재와 같이 고온에서 점성을 가지게 되는 재료인 경우에는 이 정도의 하중에 의하여 시편의 길이가 짧아지게 될 수 있다. 따라서 이러한 경우에는 비교적 하중이 적게 가하여지는 시차 열팽창 측정기를 이용하도록 되어 있어 본 실험에서는 금속의 열팽창측정에는 push rod 방식을 그리고 도재의 열팽창 측정에는 시차분석 방식을 이용하였다⁽⁴⁶⁾.

Dederich 등⁽³⁴⁾은 금속의 열팽창 측정시 표면에 형성되는 산화막에 의해서 금속의 열팽창양상이 심하게 영향을 받을 수 있다고 하였으며, 이러한 이유로해서 그때까지 열팽창 부조화와 변형효과간의 상관성을 찾지 못한 것이라고 주장하고 금속의 열팽창측정시에는 진공을 가해야 한다고 하였고⁽⁴⁰⁾, 도재 소성시에는 금속 표면에 도재가 접촉되어 있어 산소 공급을 차단하는 효과를 어느 정도 가질것이기 때문에 본 실험에서 금속 열팽창 측정시에는 진공을 가하여 측정하였다. 물론 도재 소성시 공기를 접촉시키지 않아도 도재의 SiO₂로 부터 어느 정도 산소는 공급을 받을 수 있는 것으로 되어 있으나, 선학들의 연구방법^(46,51)을 토대로 하여 진공하에 측정하였다. 그러나 도재는 열팽창 측정을 위하여 이미 소성된 도재 시편을 가열하면, 시편 속에 내재되어 있던 기포가 팽창하여 시편 파절을 일으켜 열팽창곡선 측정이 불가능하였기 때문에 대기압을 가해준 상태로 열팽창 양상을 측정하였다.

열팽창 측정기의 온도 상승속도를 분당 10℃로 하여준 것은 선학들의 연구방법에 준한 것으로서 최근 이부분에 관하여 도재로의 온도 상승속도와 일치하지 않는다는 지적에 의해 온도 상승을 도재로의 온도상승속도와 같게하여 측정한 연구⁽⁵¹⁾가 있었으나, 결과에서 큰 차이는 없었다고 하였다. 이에 본 실험에서는 온도 상승속도를 선학들의 연구^(26,37)와 동일하게 시행하였다.

도재 전장 수복물은 900℃이상의 온도에서 소성과정을 거치게 되며, 이때 어느 온도에서 부터 도재는 용융이 되어 점성과 유동성을 나타내게 되며, 이 성질에 의해 그때까지 도재와 금속의 사이에 존재하던 잔류응력이 풀어져 버리게 된다. 따라서 냉각시에도 이 온도를 지나면서 부터 도재와 금속간 계면에 응력이 생기

게 되는데 이때의 온도를 유리화 온도로 하고 있다. 유리화 온도라고 하는 것은 도재를 가열하여 나가는 과정에서 생기는 것으로서 냉각시에 생기는 이 온도점은 유리화 온도와 차이를 보이는 hysteresis 현상을 보일 수 있다. 이와같은 이유로 하여 치과 도재학 분야에서는 도재의 유리화 온도⁽⁴⁷⁾ 혹은 연화 온도⁽³⁰⁾라는 용어가 사용되어 왔으며, 냉각의 관점에서는 도재의 응고 온도⁽²¹⁾라는 용어가 함께 사용되고 있다.

물론 양자의 차이에 의해 결과 변화가 있을 수 있으나, 선학들의 연구⁽⁴⁷⁾에 의하면, 그 차이는 매우 적으며, 더우기 열팽창계수 측정장치가 보이는 정도의 속도에서는 거의 일치한다고 하였다. 엄밀한 의미에서는 도재 열팽창 곡선보다 도재 수축곡선을 얻어야 실험결과와의 타당성이 있을 것이나, 아직은 치과용 도재의 냉각곡선이 발표되고 있지 않으며, 이는 앞으로의 연구 과제라고 사료된다.

본 실험의 결과에도 나타나 있듯이 열팽창량 측정기로 부터 측정된 자료를 가공하여 매 온도당 중량을 표현하여 보면 400℃ 정도까지는 거의 일정한 팽창률을 보이다가 팽창률이 감소하며, 그 이후 다시 급격하게 증가하는 양상을 보인다. Lund등의 연구⁽⁶³⁾에서는 팽창률이 감소하는 때를 유리화가 일어나기 시작하는 온도로서 최소 유리화 온도로 정하였으며, 급격히 팽창량이 커지는 때를 최대 유리화 온도로 정하여 사용하고 있으나, 두가지 유리화 온도중에서 어느 것이 점성과 더 상관성을 가지는지는 아직 밝혀지고 있지 않다⁽⁷⁷⁾. 본 실험에서는 우선 최소 유리화 온도를 결정하는 것이 어렵고, 선학들의 연구⁽⁷⁶⁾에서 최대 유리화 온도를 최대 유동성이 나타나기 시작하는 때의 온도로 간주하였기 때문에 본 실험에서도 최대의 유리화 온도를 공식에 적용하였다⁽²⁰⁾.

이와 같이 유리화 온도는 일점으로 나타나지 않고 어느 정도 범위를 가지고 나타나는데, 이는 선학들의 연구결과⁽⁷⁶⁾와도 일치하였다. 과거에는 컴퓨터 이용이 어려웠기 때문에 한때는 열팽창 곡선에서 직접 유리화 온도를 판독하는 방법을 이용하였는데⁽⁶³⁾, 곡선의 기울기가 급격히 변화하는 때의 온도를 유리화 온도로 사용하였으며, 이는 앞에 밝힌 두 가지 유리화 온도중에서 최대 유리화 온도정도에 해당하는 것이다. 그러

나 도재의 점성과 유동성⁽⁷⁷⁾은 최대 유리화 온도이전에도 나타날 것이기 때문에 이에 관하여 향후의 연구가 필요하다고 사료된다.

본 실험에서는 금속과 도재의 열팽창량의 차이로 인하여 나타난 응력이 모두 잔류응력으로 존재한다고 하는 가정하에 실험이 시행되었다. 그러나 DeHoff와 Anusavice⁽⁴⁷⁾에 따르면, 열부조화에 의해 발생한 응력은 시간의 경과에 따라 재료가 가지는 탄성율과 항복강도에 의해 재료로 흡수되어 버리게 되는 것이 밝혀지고 있다. 즉 시간의 경과에 의해 재료의 변형이 나타나고, 그만큼 응력이 감소한다는 것으로서 응력을 두가지로 나누어 재료가 흡수해버리지 못하고 영원히 남게 되는 잔류응력과 시간의 경과에 따라 변형이나 균열을 보이고 없어져 버리는 임시응력으로 나누고 있다. 따라서 본 실험에서는 임시응력의 소실에 의해 부조화가 결합력에 미치는 효과가 감소되는 것을 막기 위하여 48시간후 실험을 시행하였다⁽²³⁾.

이러한 현상은 최근 균열 형성 이용법에 의해 관찰이 되었는데, Anusavice 등⁽²³⁾은 도재표면에 미세경도시험기로 결손부위를 만들어준 뒤, 수중에 보관하면⁽¹⁴⁾, 결손부위를 중심으로 균열이 형성되어가는 것을 확인한 바 있다⁽¹⁷⁾.

통상 도재는 탄성이 없는 것으로 간주되고 있으며, 금속은 상당히 탄성을 가지는 것으로 생각하고 있다. 본 실험에 사용된 공식은 도재탄성이 전혀 없는 경우에 해당한다. 만약 도재가 탄성을 가지고 있는 경우에는 두 탄성체가 부조화 양만큼 팽창이 적은 쪽으로 변형이 되어버리며, 도재와 금속계면에서의 응력은 나타나지 않게 될 것이다. 도재가 가열되면, 어느 정도 탄성을 가진다는 것이 최근 밝혀진 바 있으며, 따라서 이와 같은 상황을 고려하기 위해서는 Timoshenko's 공식이 변형되어야 하며, 최근의 연구^(8,77)에서는 이러한 작업이 진행되고 있으나, 아직 현저한 결과는 보고되고 있지 않다.

이러한 일련의 이론들을 밝히고자 최근 원통형 시편에 매우 적은 틈을 내고 도재를 소성시켜가면서, 이 틈의 온도 증가에 따른 변화양상과 열전대에서 온도 증가량을 시차분석하는 방법⁽³⁰⁾이 소개되었으나, 아직은 실험적으로 완전하다고 할 수는 없다.

Soherer⁽³¹⁾는 도재 유리화 온도가 시편 크기에 의해서 영향을 받을 수 있다고 하였으며, 도재 두께를 4배로 증가시켰을 때 유리화 온도는 60℃ 정도 상승한다고 하였다. 본 실험에서는 이러한 사항을 변수로 채택하지 않았기 때문에 확인할 수 없었다.

본 연구에서 측정된 Vita 도재의 유리화 온도는 Lund 등의 연구결과⁽⁶³⁾에 비해서 다소 큰 것으로 나타났다. Ceramco 도재의 경우는 대개 495℃ 정도로 DeHoff와 Anusavice의 결과⁽²⁷⁾와 유사하게 나타났다. 한편 Ceramco 도재에 비하여 Vita 도재의 유리화 온도가 높게 나타났는데, 이는 그만큼 금속과의 적합성이 우수함을 의미한다고 사료된다.

Twiggs 등⁽⁵¹⁾은 도재 냉각이나 가열을 빨리 한 경우가 유리화 온도가 높게 나타났다고 하였다. 본 실험에서도 대부분 시편에서 도재 냉각을 빨리한 경우가 서냉한 경우에 비하여 높은 유리화 온도를 보여 이들의 연구결과와 일치함을 보였다. 그러나 본 실험의 결과에서 보이고 있듯이 유리화 온도의 증가양상이나 정도는 도재 종류에 따라 차이가 심하여, 일률적으로 표현하기에는 무리가 있다고 사료되었다.

Bertollotti와 Fuku⁽³⁰⁾는 Ceramco 도재의 경우 응력을 나타내기 시작하는 온도가 593℃ 정도였다고 하였는데 이는 고온에서 도재의 점성에 대해 좀더 연구가 필요함을 알리는 결과라고 할 수 있다⁽⁸⁾.

초기에 도재와 금속간 적합 정도를 정의하기 위한 기준으로서 20℃부터 600℃까지의 열팽창계수가 가능한한 일치하여야 한다고 하였고, 이를 도재-금속 적합실험(PACT)이라고 불렀다. 그후 실제로 도재와 금속간에 존재하는 응력을 표현하고자 하는 노력이 이루어졌으며, 이에 미국치과의사협회에서는 다음과 같은 기준을 설정하기에 이르렀다. 1. 도재와 금속의 열팽창 곡선의 측정 2. 급냉실험^(50,55) 3. 결합력 측정 4. 길이가 긴 시편의 반복 소성등이 그것이다. 이에 본 실험에서는 이 기준에 준하여 실험계획이 설정되었다⁽¹³⁾.

이 기준이 마련된 후 최근에는 적합지수가 고안되어 사용되고 있다⁽¹⁰⁾. 그러나 적합지수라고 하는 것은 매우 불확실한 정의로서 아직은 일반화되어 있지 않으며⁽¹²⁾, 계산근거 역시 종래의 부조화양에 항수를 곱하여 계산하고 있어 부조화양에 선화들의 항수⁽¹¹⁾를 곱하여

주면 지수로 변환할 수 있으나, 선학들이 사용한 항수의 근거가 아직은 완전히 설정되어 있지 않기 때문에 산출된 부조화의 양을 그대로 사용하여 비교하였다.

Fairhurst 등⁽⁴¹⁾은 항수로서 0.05를 곱하고 있으나, 이의 산출근거에 관해서는 밝히고 있지 않으며, 이들이 사용한 특정재료이외 재료에서는 이 항수가 변화할 것으로 사료된다.

이에 관하여 Anusavice 등⁽²³⁾은 열팽창량 차이의 일부가 변형에 사용되는 현상을 보고하였는데, 열팽창 계수가 $14.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 인 금속에서 도재의 열팽창 계수가 $13.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 인 때 변형정도가 475μ 이었으며, $11.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 인 때 789μ 의 큰 변형을 나타내 응력의 소실이 즉시 이루어질 수 있다고 하였다. 따라서 Fairhurst 등⁽⁴¹⁾이 사용한 항수는 아직 사용되기에 무리가 있다.

DeHoff와 Anusavice⁽⁵⁶⁾는 본 실험에 적용한 공식을 변형하여 다접구조체에 이용할 수 있는 공식을 만들어 도재 층내에서 생길 수 있는 응력을 연구한 목적 중의 하나는 금속의 표면에 형성되는 산화막의 역할을 분석코자한 것이었으나, 그러한 목적은 이루지 못하였다. 즉, Timoshenko's 공식을 이용하여 산화막의 효과까지 고려하는 것은 무리이며, 따라서 서로 다른 합금계산의 결합력을 비교하는 것은 불가능하다고 사료되었다.

도재의 소성 온도가 도재의 열팽창계수에 미치는 영향은 그다지 크지 않은 것으로 알려져 있다. Anusavice와 Lee⁽¹⁴⁾의 연구결과에 따르면, 도재를 고온에서 소성하여도 열팽창계수는 $0.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 정도의 변화량 밖에 보이지를 않아 유의성이 없는 것으로 밝혀졌다. 따라서 본 실험에서 도재의 소성 온도를 통법에 준하여 시행한 것은 실험결과에 큰 영향을 미치지 않았을 것으로 사료된다.

이외에 도재의 열팽창계수는 영향을 미치는 많은 요인들에 관하여 실험이 이루어졌는데, 도재의 냉각속도, 도재의 고온에서의 점도⁽²⁷⁾, 합금의 크리프⁽⁴²⁾, 도재의 열전도성, 도재와 금속의 두께의 비⁽⁵³⁾ 등이 고려되어 왔다.

Anusavice 등⁽²³⁾은 금속과 도재의 열팽창계수의 차이가 얼마나 될 때 결합력의 저하를 초래할 수 있는가

에 관하여 금속의 것이 도재의 것에 비하여 $1.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 내지 $2.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이상 차이를 보이는 경우 결합력의 감소를 보인다고 하였다. 본 실험에서는 PVR이 $3.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, PVS가 $3.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, PVD가 $5.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, PCR가 $4.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, PCS가 $4.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, PCD가 $3.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, NVR이 $2.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, NVS가 $2.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, NVD가 $3.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, NCR이 $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, NCS가 $3.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 그리고 NCD가 $3.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 정도의 열팽창량의 차이를 보여 니켈-크롬 합금과 Vita 도재 분말을 사용한 경우 도재의 냉각속도에 관계없이 우수한 열 적합성을 보이는 것으로 나타났다. 니켈-크롬 합금에 비하여 팔라듐-은 합금은 전반적으로 큰 열팽창계수의 차이를 보여 이들 합금에 사용되는 도재의 선택에 관해 앞으로의 연구가 요망된다고 사료되었다.

도재의 열팽창계수에 비하여 금속의 열팽창계수가 많이 큰 경우에는 결합력의 저하는 보일 수 있으나, 만약 금속과-도재간의 결합이 완벽하다면, 이는 도재층에 금속-도재 계면에 대해 평행한 방향을 가지는 균열을 형성할 수 있다. 그러나 본 실험에 사용된 시편의 크기는 도재의 층이 $7\text{mm} \times 7\text{mm}$ 로 비교적 작았기 때문에 사선으로 형성된 균열의 존재여부는 확인하지 못하였다. 시편의 크기를 길게해주는 경우에는 균열의 형성과 함께 금속판의 변형도 관찰될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에 사용한 4점하중 굴곡강도 시험법은 DeHoff 등⁽⁵⁸⁾의 개념을 도입한 것으로서 금속-도재 잔류응력의 존재를 결합강도 측정으로 인지할 수 있다고 하는 것이다. 이러한 사점 하중법은 과거에 사용되어 오던 3점 하중법을 개량한 것으로서⁽⁶⁰⁾ 특징은 하중을 받았을 때, 시편내의 응력이 도재와 금속 결합부에 정확히 가하여 진다는 것이며, 이는 유한 요소법으로 Anusavice 등⁽⁵⁷⁾에 의해 검정이 이루어진 바 있다. 이 실험 방법의 장점은 시편제작이 용이하고, 도재층의 두께와 금속판의 두께가 임상적으로 타당성이 있으며⁽⁵³⁾, 실험 과정이 용이하고, 파절부위가 정확히 금속과 도재 접촉면에서 일어나 준다고 하는 것이다⁽⁶¹⁾. 본 실험 결과에서도 부조화 양이 큰 경우에는 결합력이 적은 것으로 나타나 선학들의 연구 결과와 일치하는 양

상을 보였다.

지난 20년간 도재와 금속의 결합은 실험적으로 무수히 측정되어 왔으며, 다양한 형태의 시편 모양으로 변화되어 왔다^(2,16,22,62,64). 이에 대하여 Anusavice 등⁽⁵⁷⁾은 유한 요소법으로 각 실험에 사용된 시편의 형태에서 나타날 수 있는 응력 분포를 분석하였는데, 그 결과에 따르면, 다양한 형식의 응력 집중이 시편 형태에 따라 다르게 나타날 수 있어 실험방법 종류의 차이에 따라 결합력 순위가 영향을 받을 수 있다고 하였다. 따라서 본 실험에 나타난 순위가 재료의 결합력을 직접 의미한다고는 할 수 없으며, 다만 동종 재료내에서 결합 기전이 다르지 않은 범위에서 비교가 가능하다고 생각된다.

본 실험에 사용된 재료와 동일한 재료를 대상으로 열팽창 차이에 의한 변형을 관찰한 DeHoff와 Anusavice⁽²³⁾의 연구에 따르면, Ceramco 도재에 비하여 Vita 도재가 변형이 적게 나타나는 것으로 발표하여 본 실험결과와 일치하였으나, 금속 종류에 따른 변형량은 팔라듐-은 합금에 비하여 니켈-크롬 합금에서 더 많이 나타난 Bridger와 Nicholls의 결과⁽¹⁸⁾와 상반되는 결과를 보이고 있다⁽⁷³⁾. 이는 산화막의 형성에 기인하는 것으로 사료된다.

냉각속도가 결합력에 미치는 영향을 관찰한 Coffey 등⁽²¹⁾의 연구에 의하면 본 실험의 결과와 동일한 도재 유리화 온도 증가를 보고하고 있어, 냉각 속도가 빨라진 경우가 유리화 온도의 증가를 나타내는 것을 확인할 수 있었다⁽⁵¹⁾. 그러나 Asaoka와 Task의 연구⁽⁷⁵⁾에서는 이와 같은 유리화 온도의 증가 및 열팽창량의 증가에 의해 금속의 열팽창량을 초과하여 균열을 형성하는 것으로 보고하고 있으나, 본 실험에서는 인장성의 조건을 확인할 수 없었다. 그 이유는 급냉시키는 조건이지만, 냉각비커를 덮어서 냉각시켰기 때문인 것으로 사료되며, 도재 표층의 균열의 형성으로 인하여 결합력이 측정되기 이전에 도재의 파열이 일어나는 것을 방지하기 위해서였다⁽⁷⁸⁻⁸⁰⁾.

본 실험에서 사용한 서냉조건은 Anusavice 등⁽¹⁷⁾과 DeHoff와 Anusavice⁽²⁷⁾가 고안하여 사용된 서냉법을 이용하였다. 이 방법에서는 냉각속도가 분당 3°C가량 된다고 하였다. 이에 비하여 통법으로 사용되는 냉각

방법은 도재의 유리화 온도를 통과할 때 냉각 속도가 600°C가량된다고 하며, 그후 냉각 속도가 감소하는 것으로 되어 있다⁽⁵¹⁾.

대부분의 지침서에는 도재전장 수복물을 냉각 비커에서 비교적 서냉시키도록 하고 있으나, Phillips⁽¹⁵⁾는 대기중에서 그냥 급냉시키는 것이 도재표층의 열처리 효과를 가져와 강도 및 결합력이 증가될 수 있다는 주장을 한 바 있다. 현재 사용되고 있는 도재전장 수복물의 냉각 방법은 매우 인위적인 것으로서 과학적인 근거를 거의 지니지 못하고 있다. 본 실험에서는 인지되지 않았으나, 좀더 세분화된 냉각방법을 이용하여 결합력에 미치는 냉각속도 효과를 연구하는 것은 앞으로 상당한 가치를 가진다고 사료되었다.

이러한 목적으로 Guinn 등⁽⁴⁹⁾은 다양한 종류의 냉각 방법을 이용하였으나, 냉각방법자체가 실험적으로 조절되지 않은 것이어서 그 결과를 인용하기에는 문제가 있다고 사료된다.

도재를 냉각하는 방법은 하부의 금속을 열처리하는 것과 같기 때문에, 그에 따른 금속의 물성변화에 관해서도 연구가 요망된다⁽⁷⁴⁾.

소성횟수에 관해서는 Bertolotti⁽⁸⁾와 Fairhurst 등⁽¹¹⁾의 연구가 있는데, 각각 3회 소성과 5회 소성을 그 대상으로 하였다. 그 실험의 결과에 의하면, 니켈-크롬에 비하여 팔라듐-은 합금의 팽창량이 크다는 것은 본 실험 결과와 일치하였으나, 소성횟수 증가에 의해 열팽창량 변화에 관해서는 Bertolotti⁽⁸⁾의 결과와는 차이를 보이고 있으며, Fairhurst 등⁽¹¹⁾의 결과와는 일치하는 소견을 보인다. 이는 양자간 실험방법의 차이에 기인하는 것으로 사료된다.

금속 열팽창 곡선은 도재의 경우와는 달리 온도 증가와 단순 비례관계를 보였으며, 가열속도와는 거의 상관이 없는 것으로 알려져 있다. 선행들의 연구 결과⁽⁶³⁾에 의하면 본 실험에 사용된 Rexillum III의 열팽창계수는 $14.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 밝혀져 있으나 본 연구에서는 $16 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 정도로 다소 증가되었는데, 이는 측정 시 진공에 의한 영향과 실온에서 기준온도의 결정방법의 차이에 기인한 것으로 사료된다. 이와 유사한 현상에 관한 연구로 Bridger와 Nicholls⁽¹⁸⁾의 결과에 따르면, 도재에 의해 덮이지 않는 주조체 내면이 도재를 소

성하는 동안 산화막을 형성하여 산화막이 열팽창계수나, 산화막 자체의 치밀구조를 이루기 위하여 수축을 하기 때문에 구조체의 변형이 초래된다고 하였다^(18,65).

근래 도재를 소성하는 동안에 금속 산화물이 도재 내로 확산이동하여 도재의 열팽창계수를 변화시킬 수 있다고 하는 이론이 있으나⁽⁶⁵⁾, 아직 실험적으로 입증되고 있지 않다.

선학들의 연구결과^(21,56)나 본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 도재의 열팽창 곡선은 비선형으로 나타나는데 이의 원인으로는 백류석의 형성에 의한 것이라는 이론이 지배적이다⁽⁷⁵⁾. 이상과 같이 본 연구에 사용된 금속과 도재중에서 열적합성을 결정하는 것은 도재였으며, 이는 많은 선학들의 연구결과^(1,56)와 일치하였다.

치과용 도재의 기질로 사용되는 장식에는 백류석이 함유되어 있는데, 이것이 균열 형성과 전이를 억제하는 것으로 알려져 있으며⁽⁸¹⁾, 도재 강도를 증가시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 백류석은 부수적 기능으로 열팽창량을 조절하는 기능을 함께 가지는데⁽⁸²⁾, 따라서 시판 도재의 경우 팽창량이 큰 것이 큰 강도를 나타내는 이유가 이것 때문이다⁽⁸³⁾.

통상 실험 도재에서 열팽창계수 조절을 위하여 75μ 이하의 백류석을 첨가하여 주는데, 50%까지 증가시키면 $16.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 까지 열팽창계수가 증가하는 것으로 알려져 있다. 한편 백류석에 의해 도재 소성온도 저하 효과도 나타날 수 있는 것으로 알려져 있는데, 도재 소성온도를 내림으로서 비귀금속의 산화물 억제하여 도재와 금속간 결합의 증진을 피하고자 하는 것으로 되어 있다⁽³⁾.

백류석은 열팽창계수가 $20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 에 이르며, 도재내 포타쉬 성분으로 부터 고온에서 생성될 수 있고, 티타늄이 있을때 이러한 효과가 극대화되는 것으로 알려져 있다. 냉각속도 조절이 열팽창을 결정하는 이유는 이러한 반응이 일어나는 때의 속도를 지나기 때문인 것으로 생각되나, 아직 이에 관한 보고는 되고 있지 않다.

팔라듐-은 합금에 관한 연구는 주로 은함량을 비롯되는 부식과 변색으로 주종을 이루어왔고^(32,72,73) Anusavice 등⁽⁵⁵⁾에 의해 보고된 급냉충격 실험에서

다른 종류 합금과 유사한 정도의 내성을 보였다고 보고하였으나, Waltone과 O'Brien⁽²⁹⁾은 다양한 종류의 도재와 결합시켰을때 균열이 많이 생겼다고 하였다. 근래에는 팔라듐-동 합금에서의 변형에 관한 연구가 이루어진 바 있으나, 이것은 팔라듐-동 합금의 고온에서의 크리프 저항도가 낮은 것에 기인하는 것으로서 열팽창과는 상관이 없다고 하였다⁽⁴²⁾. 따라서 본 실험에서는 이러한 사실을 참고로 하여 팔라듐-은 합금을 선택하였다⁽⁷¹⁾.

결합력 측정용 시편에서 도재 두께가 얇은 경우에는 도재층의 파절이 일어날 수 있으며, 이때 측정되는 하중은 결합력이 측정되는 것이 아니고, 도재의, 인장강도가 측정되기 때문에 선학들의 연구에서와 같이 대략 금속 : 도재의 비가 1 : 2 이상이 되도록 하였다⁽⁵³⁾.

본 실험에 사용된 4점 하중법의 문제점⁽⁶⁸⁾은, 금속판의 탄성율에 의해서 심하게 영향을 받는다는 것으로, 도재의 굴곡이 일어나기 이전에 반드시 금속판 굴곡이 일어나야 하므로 우선, 금속판 굴곡에 필요한 하중이 측정되는 것이다. 따라서 탄성율이 큰 금속인 경우는 더욱 큰 결합강도를 보이는 것으로 나타나게 되며 이를 다시 동일한 탄성율로 환산한 경우에만 비교가 가능해지는 것이다^(3,86,88). 따라서 본 실험의 결과에서도 팔라듐-은 합금의 결합력이 니켈-크롬 합금에 비하여 전반적으로 적게 나타났는데, 이는 비교의 대상이 될 수 없다^(67,87). 그 이유는 Rexillum III의 경우 $28 \times 106\text{Mpa}$ 의 탄성율을 가지는 반면⁽⁶⁵⁾ Pors on 4는 $17 \times 106\text{Mpa}$ 정도의 탄성율을 가지게 되기 때문이다⁽¹³⁾.

도재 탄성회복에 대해서는 아직 연구가 이루어진 바 없다. 즉, 도재와 금속 사이에 응력이 존재하고 있다면, 도재가 원형으로 돌아가려는 경향을 보일 것이며, 따라서 일정한 시간이 경과된 위에 도재는 외력이나 저작압이 가해지지 않아도 구강내에서 탈락을 일으킬 수 있을 것이다. 또 다른 방법으로 도재 전장 수복물이 열팽창계수 차이에 의해 변형과 함께 응력을 가지고 있다면, 불화수소산으로 도재를 모두 제거한 경우 도재전장관은 또 다른 변형을 보일 수 있어야 한다.

이외에 왜력측정기로 변형의 양을 측정하거나, 금속의 조직을 판독하여 구조적으로 존재하는 잔류응력

의 양을 계산하거나 유추하는 방법이 있으나⁴⁶⁾, 치과 도재용 합금은 순수물질과 단순 결합이 아니기 때문에 실험방법으로서의 사용이 거의 불가능하다고 사료된다.

V. 결론

최근 금속-도재간 열팽창양상의 부조화가 다양한 형태의 임상적 실패를 야기할 수 있다는 가설을 실험적으로 증명하고자 제한된 실험재료와 조건을 대상으로 많은 연구가 이루어지고 있으나, 도재의 냉각속도 혹은 금속과 도재 종류에 따른 열팽창양상의 차이가 도재 전장의 결합에 어떻게 영향을 미치는가를 예측하고 이를 실험하여 밝힌 연구는 거의 시행된 바 없다. 이에 본 연구에서는 소성이 끝난 뒤, 도재 수복물의 냉각속도 차이와 소성횟수 증가가 열팽창의 부조화 및 잔류응력에 어떻게 영향을 미치는가를 분석하고 실제 측정된 결과와 비교하고자 하였다.

분석 연구에서는 두가지 종류의 합금과 도재의 열팽창 양상에 따른 열 적합성을 비교하였고, 실험 연구는 4점 굴곡하중에서 결합강도를 측정하는 방법을 이용하였다. 도재용 합금으로는 팔라듐-은 합금(Porsion 4)과 니켈-크롬-베릴리움 합금(Rexillum III)을 그리고 도재는 Vita와 Ceramco를 대상으로 하였다.

열팽창의 분석을 위한 금속 시편은 직경 5mm 높이 13mm의 원통형이 되도록 원심주조한 뒤, 도재를 축성하지 않은 상태에서 도재 소성과정을 거쳤으며, 도재는 소성한 뒤 5×5×25mm의 크기가 되도록 절단하여 시편을 준비하였다. 합금의 열팽창곡선은 push rod dilatometer에서 진공하에 측정하였고, 도재는 differential dilatometer로 대기중에서 측정하였다. 가열속도는 분당 10도로 하였으며, 구해진 곡선으로부터 도재의 유리화 온도를 결정하였고, 유리화 온도에서의 금속과 도재의 열팽창량을 환산하여 부조화 양으로 평가하였다.

판형의 금속 주조체 위에 도재를 소성 결합시킨 뒤, 4점 굴곡실험을 통하여 도재와 금속간의 결합력을 만능시험기로 측정하였는데, 기록되는 하중이 급격히 감

소하는 때를 도재와 금속의 분리하중으로 인지하고 계산된 응력과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모든 시험 시편에서, 도재를 소성하는 횟수가 많을수록 결합력이 저하되었다.
2. 열팽창곡선으로 부터 유도된 응력의 계산치가 커질수록, 4점 굴곡하중법에 의해 얻어지는 실험적 결합력은 작아지는 것으로 나타났다.
3. 팔라듐-은 합금이 니켈-크롬 합금에 비해 더 큰 열팽창량을 보였다.
4. 합금의 열팽창 양상은 온도의 증가와 정비례관계를 보였고, 도재의 소성 및 냉각방법에 의해 열적 거동이 거의 영향을 받지 않았으나, 도재는 냉각 방법에 의해 열팽창곡선과 유리화 온도가 영향을 받았으며, 냉각을 빨리한 시편이 가장 높은 유리화 온도를 보였다.
5. 금속-도재 열 적합성은 합금보다 도재에 의한 영향이 더욱 컸다.

Reference

1. Anusavice, K.J. : Noble metal alloys for metalceramic restorations, Dent. Clin. North Am., 29 : 789-803, 1985.
2. Milton, A.B, Klein, G., and Howard, M.C. : An evaluation and comparison of porcelains fused to cast metals, J. Prosthet. Dent., 10 : 1055-1064, 1960.
3. Moffa, J.P, Lugassy, A.A., and Gettleman, L. : An evaluation of nonprecious alloys for use with porcelain veneers, Part I. Physical properties, J. Prosthet. Dent., 30 : 424-431, 1973.
4. Vincent, P.F., Stevens, L., and Basford, K.E. : A comparison of the casting ability of precious and nonprecious alloys for porcelain veneering, J. Prosthet. Dent., 37 : 527-536, 1977.
5. McLean J.W. : Physical and chemical characteristics of alloys used for ceramic bonding. In : Yamada, N.H., ed. Dental porcelain : the state of the art-1977. Los Angeles : University of Southern California, 1977 : 79-84.
6. Tuccillo, J.J., and Nielsen, J.P. : Shear stress Measurement at the dental porcelain gold

- interface, *J. Dent. Res.*, 51 : 626–633, 1972.
7. Campbell, S.D. : A comparative strength study of metal ceramic and all-ceramic esthetic materials, modulus of rupture, *J. Prosthet. Dent.*, 62 : 476–479, 1989.
 8. Bertolotti, R.L. : Calculation of interfacial stress in porcelain fused to metal systems, *J. Dent. Res.*, 59 : 1972–1977, 1980.
 9. Anusavice, K.J., and Hojjatie, B. : Stress distribution in metal–ceramic crowns with a facial porcelain margin, *J. Dent. Res.*, 66 : 1493–1498, 1987.
 10. Scherer, G.W. : Use of a bimaterials strip to predict expansion compatibility, *J. Dent. Res.*, 66 : 1340, 1987.
 11. Fairhurst C.W., Anusavice K.J., Ringle to R.D., and Twiggs S.W. : Porcelain metal thermal compatibility, *J. Dent. Res.*, 60 : 815–819, 1981.
 12. Bagby, M., Marshall, S.J., and Marshall, G.W. : Metal ceramic compatibility, a review of the literature, *J. Prosthet. Dent.*, 63 : 21–25, 1990.
 13. Prasad, A., Day, G.P., and Tobey, R.G. : A new dimension for evaluation of porcelain alloy compability, in *Perspectives in Dental Ceramics*, 1st ed., p.65, Quintessence pub. co., 1988.
 14. Anusavice, K.J., and Lee, R.B. : Effect of firing temperature and water exposure on crack propagation in unglazed porcelain, *J. Dent. Res.*, 68 : 1075–1081, 1989.
 15. Phillips, R.W. : Skinner’s science of dental materials, 8th ed., Philadelphia : W.B. Saunders Company, pp. 502–503, 1982.
 16. Shell, J.S., and Nielsen, J.P. : Study of the bond between gold alloys and porcelain, *J. Dent. Res.*, 41 : 1424–1437, 1962.
 17. Anusavice, K.J., DeHoff, P.H., Hojjatie, B., and Gray, A. : Influence of tempering and contraction mismatch on crack development in ceramic surfaces, *J. Dent. Res.*, 68 : 1182–1187, 1989.
 18. Bridger, D.V., and Nicholls, J.I. : Distortion of ceramometal fixed partial dentures during the firing cycle, *J. Prosthet. Dent.*, 45 : 507–514, 1981.
 19. Hobo, S. : Distortion of occlusal porcelain during glazing, *J. Prosthet. Dent.*, 47 : 154–156, 1982.
 20. Hamaguchi, H., Cacciatore, A., and Tueller, V.M. : Marginal distortion of the porcelain bonded to metal complete crown, an sem study, *J. Prosthet. Dent.*, 47 : 146–153, 1982.
 21. Coffey, J.P., Anusavice, K.J., DeHoff, P.H., Lee, R.B., and Hojjatie, B. : Influence of contraction mismatch and cooling rate on flexural failure of PFM systems, *J. Dent. Res.*, 67 : 61–65, 1988.
 22. Gavelis, J.R., Lim, S.B., Guckes, A.D., Morency, J.D., and Sozil, R.B. : A comparison of the bond strength of two ceramometal systems, *J. Prosthet. Dent.*, 48 : 424–428, 1982.
 23. Anusavice, K.J., DeHoff, P.H., Gray, A., and Lee, R.B. : Delayed crack development in Prosthet. Dent due to incompatibility stress, *J. Dent. Res.*, 65 : 1086–1091, 1988.
 24. Bryant, R.A., Nicholls, J.I. : Measurement of distortions in fixed partial dentures resulting from degassing, *J. Prosthet. Dent.*, 42 : 515–520, 1979.
 25. DeHoff, P.H., Anusavice, K.J., and Boyce, R.J. : Analysis of thermally–induced stresses in porcelainmetal systems, *J. Dent. Res.*, 62 : 593–597, 1983.
 26. Nielsen, J.P., and Tuccillo, J.J. : Calculation of interfacial stress in dental porcelain bonded to gold alloy substrate, *J. Dent. Res.*, 51 : 1043–1047, 1972.
 27. DeHoff, P.H., and Anusavice, K.J. : Effect of visco–elastic behavior on stress development in a metal–ceramic system, *J. Dent. Res.*, 68 : 1223–1230, 1989.
 28. Anusavice, K.J., DeHoff, P.H., Twiggs, S.W., and Lockwood, P.C. : Thermal shock resistance of porcelain discs, *J. Dent. Res.*, 62 : 1082–1085, 1983.
 29. Walton, T.R., and O’Brien, W.J. : Thermal stress failure of porcelain bonded to a palladium–silver alloy, *J. Dent. Res.*, 64 : 476–480, 1985.
 30. Bertolotti, R.L., and Fukui, H. : Measurement of softening temperatures in dental bake on porcelains, *J. Dent. Res.*, 61 : 480–483, 1982.
 31. Derand, T. : Residual stresses in metal–ceramic crowns, *J. Oral Rehabil.*, 8 : 69–74, 1981.
 32. Niemi, L., and Holland, R.I. : Tarnish and corrosion of a commercial dental Ag–Pd–Cu–Au alloy, *J. Dent. Res.*, 63 : 1014–1018, 1984.
 33. Anusavice, K.J., and Carroll, J.E. : Effect of incompatibility stress on the fit of metal–ceramic crowns, *J. Dent. Res.*, 66 : 1341–1345, 1987.
 34. Dederich, D.N., Svare, C.W., Peterson, L.C., and Turner, K.A. The effect of repeated firing on the margins of nonprecious ceramometals, *J.*

- Prosthet. Dent., 51 : 628-630, 1984.
35. Vermilyea, S.G., Kuffler, M.J., and Tamura, J.J. : Casting accuracy of base metal alloys, *J. Prosthet. Dent.*, 50 : 651-653, 1983.
 36. DeHoff, P.H., and Anusavice, K.J. : Effect of metal design on marginal distortion of metal-ceramic crowns, *J. Dent. Res.*, 63 : 1327-1331, 1984.
 37. Buchanan, W.T., Svare, C.W., and Turner, K.A. : The effect of repeated firings and strength on marginal distortion in two ceramometal systems, *J. Prosthet. Dent.*, 45 : 502-506, 1981.
 38. Gardner, F.M. : Margins of complete crowns, literature review, *J. Prosthet. Dent.*, 48 : 396-400, 1982.
 39. Duncan, J.D. : The casting accuracy of nickel-chromium alloys for fixed prostheses, *J. Prosthet. Dent.*, 47 : 63-68, 1982.
 40. Robert, J.D., Preston, J.D., Moffa, J.P., and Caputo, A. : Effect of oxidation on ceramometal bond strength, *J. Prosthet. Dent.*, 47 : 59-62, 1982.
 41. Hamaguchi, H., Cacciatore, A., and Tueller, V.M. : Marginal distortion of the porcelain bonded to metal complete crown, and sem study, *J. Prosthet. Dent.*, 47 : 146-153, 1982.
 42. Bertolotti, R.L., and Moffa, J.P. : Creep rate of porcelain bonding alloys as a function of temperature, *J. Dent. Res.*, 59 : 2062-2070, 1980.
 43. Anusavice, K.J., Shen, C., Hashinger, D., and Twiggs, S.W. : Interactive effect of stress and temperature on creep of PFM alloys, *J. Dent. Res.*, 64 : 1094-1099, 1985.
 44. Tucillo, J.J., and Nielsen, J.P. : Creep and sag properties of a porcelain gold alloy, *J. Dent. Res.*, 46 : 579-583, 1967.
 45. Farah, J.W., and Craig, R.G. : Distribution of stresses in porcelain-fused-to-metal and porcelain jacket crowns, *J. Dent. Res.*, 54 : 255-261, 1975.
 46. Tesk, J.A., Hinman, R.W., Widera, G.E.O., Holmes, A.D., and Cassel, J.M. : Effects of Porcelain/alloy interfacial diffusion zones on thermo-mechanical strain, *J. Dent. Res.*, 62 : 585-589, 1983.
 47. DeHoff, P.H., and Anusavice, K.J. : Analytical model to predict the effects of heating rate and applied load on glass transition temperatures of dental porcelain, *J. Dent. Res.*, 65 : 643-647, 1986.
 48. Fairhurst, C.W., Hashinger, D.T., and Twiggs, S.W. : The effect of thermal history on porcelain expansion behavior, *J. Dent. Res.*, 68 : 1313-1315, 1989.
 49. Guinn, J.W., Griswold, W.H., and Vermilyea, S.G. : The effect of cooling rate on the apparent bond strength of porcelain-metal couples, *J. Prosthet. Dent.*, 48 : 551-554, 1982.
 50. Anusavice, K.J., Ringle, R.D., Morse, P.K., Fairhurst, C.W., and King, G.E. : A thermal shock test for porcelain-metal systems, *J. Dent. Res.*, 60 : 1686-1691, 1981.
 51. Twiggs, S.W., Searle, J.R., Ringle, R.D., and Fairhurst, C.W. : A rapid heating and cooling rate dilatometer for measuring thermal expansion in dental porcelain, *J. Dent. Res.*, 68 : 1316-1318, 1989.
 52. Warpeha, W.S., and Goodkind, R.J. : Design and technique variables affecting fracture resistance of metal ceramic restoration, *J. Prosthet. Dent.* 35 : 291-298, 1976.
 53. Barghi, N., and Lorenzana, R.E. : Optimum thicknesses of opaque and body porcelain, *J. Prosthet. Dent.*, 48 : 429-431, 1982.
 54. Schwickerath, H. and Mokbei, A.M. *Über den Einfluss unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten in der Metalkeramik*, *Dtsch. Zahnärztl. Z.*, 38 : 1033-1036, 1983.
 55. Anusavice, K.J., Twiggs, S.W., DeHoff, P.H., and Fairhurst, C.W. : Correlation of thermal shock resistance with thermal compatibility data for porcelain-metal systems, *J. Dent. Res.*, 61 : 419-411, 1982.
 56. DeHoff, P.H. and Anusavice, K.J. : Analysis of alloy-porcelain compatibility using a multi-component material strip equation, *J. Dent. Res.*, 64 : 1337-1344, 1985.
 57. Anusavice, K.J., DeHoff, P.H., and Fairhurst, C.W. : comparative evaluation of ceramic-metal bond tests using finite element stress analysis, *J. Dent. Res.*, 59 : 608-613, 1980.
 58. DeHoff, P.H., Anusavice, K.J., and Hathcock, P.W. : An evaluation of the four point flexural test for metal-ceramic bond strength, *J. Dent. Res.*, 61 : 1066-1069, 1982.
 59. Anusavice, K.J., and Hossatie, B. : Influence of incisal length of ceramic and loading orientation

- on stress distribution in ceramic crowns, *J. Dent. Res.*, 67 : 1307-1311, 1988.
60. Caputo, A.A., Dunn, B., and Resibick, M.H. : A flexural method for evaluation of metal-ceramic bond strength, *J. Dent. Res.*, 56 : 1501-1506, 1977.
 61. Schaffer, S.P. : An approach to determining the bond strength of coramometral systems, *J. Prosthet. Dent.*, 48 : 282-284, 1982.
 62. Pezzoli, M., Angelini, E., and Bruzzone, G. : Metal porcelain bonding to a magnetizable alloy, *J. Prosthet. Dent.*, 62 : 38-44, 1989.
 63. Lund, P.S., Goodkind, R.J., and Swanson, S. : Residual stress in several ceramometal systems, *J. Prosthet. Dent.*, 62 : 278-283, 1989.
 64. Diaz-Arnold, A.M., and Aquilino, S.A. : An evaluation of the bond strengths of four organosilane materials in response to thermal stress, *J. Prosthet. Dent.*, 62 : 257-260, 1989.
 65. Pask, J.A., and Tomsia, A.P. : Oxidation and ceramic coatings on 80Ni20Cr alloys, *J. Dent. Res.*, 67 : 1164-1171, 1988.
 66. Winkler, S., Morris, H.F., and Monteiro, J.M. : Changes in mechanical properties and microstructures following heat treatment of a nickel-chromium base alloy, *J. Prosthet. Dent.*, 52 : 821-827, 1984.
 67. Kelly, J.R., and Rose, T.C. : Nonprecious alloys for use in fixed prosthodontics, literature review, *J. Prosthet. Dent.*, 49 : 363-370, 1983.
 68. Blanco-Dalmau, L. : The nickel problem, *J. Prosthet. Dent.*, 48 : 99-101, 1982.
 69. Baran, G.R. The metallurgy of Ni-Cr alloys for fixed prosthodontics, *J. Prosthet. Dent.*, 50 : 639-650, 1983.
 70. Huget, E.F., and Civjan, S. : Status report of palladium-silver-based crown and bridge alloys, *J. Am. Dent. Assoc.*, 89 : 383-385, 1974.
 71. Payan, J., Moya, G.E., Meyer, J.M., and Moya, F. : Changes in physical and chemical properties of a dental palladium-silver alloy during metal-porcelain bonding, *J. Oral Rehabil.*, 13 : 329-338, 1986.
 72. Mezger, P.R., Stols, A.L.H., Vrijhoff, M.M.A., and Greener, E.H. : Metallurgical aspect of high palladium alloys, *J. Dent. Res.*, 67 : 1307-1311, 1988.
 73. Myers, G.W., and Cruickshanks-Boyd, D.W. : Mechanical properties and casting characteristics of a silver-palladium bonding alloy, *Br. Dent. J.*, 153 : 323-326, 1982.
 74. Jochen, D.G., Caputo, A.A., and Matyas, J. : Effects of cooling methods on silver-palladium castings, *J. Prosthet. Dent.*, 59 : 311-314, 1988.
 75. Asaoka, K., and Tesk, J.A. Transient and residual stress in a porcelain-metal strip, *J. Dent. Res.*, 69 : 463-469, 1990.
 76. Bagby, M., Marshall, S.J., and Marshall, G.W. Metal compatibility, a review of the literature, *J. Prosthet. Dent.*, 63 : 21-25, 1990.
 77. Bertolotti, R.L., and Shelby, J.E. Viscosity of dental porcelain as a function of temperature, : *Dent. Res.*, 58 : 2001-2004, 1979.
 78. Klausner, L.H., Cartwright, C.B., and Charbeneau, G.T. : Polished versus autoglazed porcelain surfaces, *J. Prosthet. Dent.*, 47 : 157-162, 1982.
 79. Newitter, D.A., Schlissel, E.R., and Wolff, M.S. An evaluation of adjustment and postadjustment finishing techniques on the surface of porcelain bonded to metal crowns, *J. Prosthet. Dent.*, 48 : 388-395, 1982.
 80. Sulik, W.D., and Plekavich, E.J. : Surface finishing of dental porcelain, *J. Prosthet. Dent.*, 46 : 217-221, 1981.
 81. White, J.M., and O'Brien, W.J. The colors of mixtures of dental opaque porcelains, *J. Dent. Res.*, 68 : 1319-1322, 1989.
 82. Sozio, R.B., and Riley, E.J. : The shrink free ceramic crown, *J. Prosthet. Dent.*, 49 : 182-187, 1983.
 83. Kelly, J.R., Campbell, S.D., and Bowen, H.K., Fracture surface analysis of dental ceramic, *J. Prosthet. Dent.*, 62 : 536-541, 1989.
 84. Resenstiel, S.F., and Porter, S.S. : Apparent fracture toughness of all ceramic crown systems, *J. Prosthet. Dent.*, 62 : 529-532, 1989.
 85. Johnson, L.N. : The physical properties of alternative alloys, *Int. Dent. J.*, 33 : 41-46, 1983.
 86. Baran, G. : Phase changes in base metal alloys among metal porcelain interfaces, *J. Dent. Res.*, 58 : 2095-2104, 1979.
 87. Morris, H.F.M. : Veterans administration cooperative studies project no 147 part IX : A comparison of the mechanical properties of several alternative metal ceramic alloys cast in clinical and research laboratories, *J. Prosthet. Dent.*, 62 : 146-153, 1989.

=Abstract=

INFLUENCE OF COOLING RATE ON THERMAL EXPANSION BEHAVIOR AND FLEXURAL FAILURE OF PFM SYSTEMS

Ae-Ran Lim, Ho-Nam Lim, Nam-Soo Park

Department of Prosthodontics, College of Dentistry, Kyung Hee University

Although a number of studies have been performed to assure that residual stress caused by a mismatch of alloy porcelain thermal expansion can contribute to clinical failure of a ceramometal restoration, the interactive influence of cooling rate on the magnitude of thermal expansion difference and on bond strength between them have not been extensively analyzed. The objective of this study was to determine the influence of cooling rate and the number of firing cycles on the expansion mismatch and the flexural failure resistance of metal porcelain strip. Tested alloys included one Pd-Ag alloy, one Ni-Cr-Be alloy with two kinds of porcelain, Vita and Ceramco.

Metal specimens were cast into rods with a height of 13mm and a diameter of 5mm. Subsequently, the castings were subjected to scheduled firing cycles without porcelain. And the porcelain specimens after being fired were trimmed into a bar with a final dimension of 5 x 5 x 25mm. Thermal expansions of the alloys and porcelains were measured by using a push rod or a differential dialometer respectively. Porcelain glass transition temperatures and expansion values were derived alloy- porcelain pairs were assessed by comparing expansion values of the components at a porcelain glass transition temperature. Calculations were made using combinations of a Ni-Cr alloy or Pd-Ag alloy with each of two porcelain products.

Metal- porcelain strip specimens were subjected to four point loading in an Instron testing machine until crack occurred at the metal-ceramic interface at the time of sharp decrease of load on recorder.

On the basis of this study, the following conclusions may be stated :

1. Regardless of the kinds of ceramometal combinations, both of calculated and experimental data revealed that the double fired specimens exhibited a significantly lower flexural strength.
2. By the rise of the amount of mismatch, bond strength were decreased.
3. Thermal expansion value of Pd-Ag alloys were higher than of Ni-Cr alloys.
4. Expansion curves of metal were proportional to the increase of temperature and were not affected by the experimental conditions, however porcelains did not show the same magnitude of metal, and a shift of the glass transition temperature to higher temperatures was observed when cooled rapidly.
5. Alloy- porcelain thermal compatibility appeared more dependent on the porcelain than the alloy.