

齒科陶材用 合金과 陶材間의 殘留應力 및 結合強度에 關한 實驗的 研究

전북대학교 치과대학 보철학교실

김기진 · 배태성 · 송광엽 · 박찬운

I. 서 론

상실된 치아를 심미적으로 수복하기 위해 도재 전장 주조관이 많이 이용되고 있으며, 열팽창 및 수축의 차이에 의한 잔류응력이 도재와 금속간의 결합력에 영향을 미친다고 알려져 있다.

도재와 금속간에 성공적인 결합이 이루어지기 위해서는 도재와 금속의 열팽창 또는 수축량의 조화¹⁻⁴⁾, 내부 구조인 금속의 적절한 설계⁵⁻⁶⁾, 합금의 금속학적 조성⁷⁻¹⁰⁾, 도재의 적용 기술¹¹⁻¹²⁾, 그리고 적절한 냉각 속도¹³⁻¹⁴⁾ 등이 요구된다. Hull¹⁵⁾, Zaccay¹⁶⁾ 등은 도재-금속간의 결합력 증진을 위해서는 금속에 대한 도재의 젖음성(wettability)이 좋아야 하고, 열팽창으로 인한 응력이 도재의 인장강도를 초과해서는 안된다고 보고하였다.

현재까지 알려진 도재와 금속간의 결합기전으로는 화학적 결합¹⁷⁻²³⁾, 기계적 결합²⁴⁻²⁷⁾, 분자간 인력(van der Waals forces)에 의한 결합²⁸⁻²⁹⁾, 그리고 도재와 금속의 열팽창 계수의 차이에 의한 수축 결합^{1, 9, 11, 30-32)} 등이 있으며, 그중에서 화학적 결합이 강한 결합력을 가진다고 보고되고 있다.^{11, 33-34)}

화학적 결합에 관하여, Al-Jassim¹⁷⁾은 도재와 금속의 계면에서 금속측 산화물과 도재측 산화물이 화학적 결합을 이룬다고 보고하였고, Von Radnoth¹⁹⁾은 도재 용착후 계면에 주석 산화물이 존재함을 보고하였으며, Moffa²¹⁾은 크롬산화물을 갖는 비귀금속 합금의 결합력이 귀금속 합금의 결합력보다 높다고 보고하였다.

도재-금속 system에서 도재와 금속간의 열팽창 및 수축의 차이로 잔류응력이 발생하고^{3, 14, 35-39)}, 이 응력과 저작 등에 의한 응력, 구강내 온도 변화에

의한 열응력 등이 결합력을 감소시켜 임상적으로 수복물의 파절을 가져오는 큰 원인으로 보고되고 있으며^{4, 13, 39-40)}, 도재와 금속간의 열팽창의 차이는 도재의 균열형성⁴¹⁻⁴²⁾, 수복물이나 시편의 변형⁴³⁻⁴⁴⁾ 및 도재-금속간의 결합력 저하^{7, 40, 45-47)} 등의 원인으로 간주되고 있다.

도재와 금속간의 열팽창량의 차이에 의해 나타날 수 있는 응력을 표시하기 위하여 주로 Timoshenko⁴⁸⁾의 열응력 공식이 이용되었고, 여기에 유리화 온도(glass transition temperature, Tg)의 개념을 도입하여 비선형 팽창 거동에 적합하도록 변형시켰으며^{3, 49-50)}, 열적합지수의 개념을 도입하여 열팽창에 의한 변형률을 표시하였다.^{2, 3, 27-51)}

Ringle^{3, 51)}, Caputo⁶⁾는 도재-금속 strip의 열수축의 차이에 의한 응력을 표시하기 위하여 열적합지수의 개념을 도입하였고, Twigg³⁶⁾은 금냉 방법에 따른 열적합지수의 변화를 관찰하였으며, Fairhurst³⁾, Anusavice²⁾은 도재와 금속간의 열적합지수를 측정하였다.

Tg는 유리화 온도(glass transition temperature) 또는 연화 온도(softening temperature) 등의 용어로 표현되어 왔으며, 이 온도 이상에서 도재는 액체로 존재하므로 응력의 발생과는 관련이 없다고 하였다.^{31, 39)} 도재의 유리화 온도와 열팽창계수는 도재의 냉각속도^{2, 4, 14, 52)}, 열팽창 측정시의 가열속도⁵³⁾, 그리고 도재의 반복 소성 횟수⁵⁴⁻⁵⁵⁾ 등의 도재의 열력(thermal history)에 의존한다고 알려져 있다.

잔류응력을 측정하기 위한 수단으로는 X-ray 회절을 이용하는 방법⁵⁶⁻⁵⁷⁾과 strain gauge를 이용한 응력이완방법⁵⁸⁻⁵⁹⁾ 등이 이용되고 있으며 X-ray 회절은 탄성 변형률의 측정이 가능하고, strain

gauge는 탄성과 소성 변형률의 측정이 가능하다. Bagby등³⁹⁾ X-ray회절을 이용하여 도재-금속 수복물의 열팽창계수의 차이에 의한 잔류응력 측정을 시도하였고, Dérand³⁷⁾은 strain gauge를 이용하여 도재 표면의 잔류응력을 측정하였다. Tuccillo와 Nielsen등^{35,61)}은 stip technique을 사용하여 도재측에 발생하는 잔류응력의 존재를 관찰하였으며, Dehoff등⁴⁰⁾은 열팽창계수의 차이가 도재-금속간의 결합강도에 영향을 미친다고 보고하였다.

도재와 금속간의 결합 실패는 정적 피로(static fatigue), 잔류인장응력, 그리고 구강내의 저작에 의한 인장응력의 조합으로 미소 균열부에 응력이 집중함으로써 균열이 성장하여 파괴된다고 하였다.^{46,61)} Coffey등⁴⁶⁾은 4-point 굽힘시험을 통하여 열팽창계수의 부조화와 냉각속도가 도재-금속간의 결합력에 미치는 영향에 대하여 보고하였고, Dehoff¹⁴⁾, Asaoks⁶⁰⁾ 등은 도재-금속간의 열팽창계수의 부조화에 의하여 계면에 잔류응력이 존재하는 경우의 결합 강도와 thermal shock에 의한 응력 변화를 strain gauge와 유한요소법을 이용하여 분석, 비교하였다.

도재와 금속간의 결합력 증진을 위해서는 도재와 금속의 열팽창계수(α)를 일치시켜야 한다는 이론과 구강내 조건에서 도재측에 압축 잔류응력이 작용하여야 한다는 이론이 제기되고 있으나^{46,47)}, 도재 표면의 응력이 지나치게 큰 경우에는 도재와 금속간의 결합력이 저하되는 것으로 보고되고 있다.⁷⁾ 이에 본 연구에서는 도재와 금속간의 잔류응력이 결합력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 열팽창 곡선과 유리화 온도를 측정하여 열적 부조화의 양을 계산하였고, 압축시험에 의하여 도재의 탄성계수를 측정하였으며, 도재-금속 system에 나타나는 잔류응력과 인장시험을 통한 결합강도 및 파절시에 나타나는 도재 표면의 응력을 측정하여 다소의 지견을 얻었기에 이에 보고하는 바이다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험재료

실험재료는 도재용 합금인 Au-Pd합금과 Ni-Cr합금을 사용하였고, 도재는 Ceramco 도재(opaque 93, body : 82)와 Vita도재(opaque : A 3, body

Table 1. Materials used in this study

Material	Brand	Code	Manufacturer
Au-Pd alloys	Jelenko 'O'	J	J.F. Jelenko
	PG 86	G	Goo Jung
	PG 77	D	Dong Myung
Ni-Cr alloys	Rexillum III	R	Generic
	Excelloy	E	Excelco
	Verabond	V	Aalba Dent
Porcelains	Ceramco	C	Ceramco
	Body	Cb	
	Opaque	Co	
	Vita VMK 68	V	H.R. GmbH
	Body	Vb	
	Opaque	Vo	

: A 3)를 사용하였다(Table 1). 도재의 탄성계수(Young's modulus), 도재와 금속간의 잔류응력, 그리고 도재와 금속간의 응력 및 변위를 측정하기 위하여 strain gauge(Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.)를 이용하였다.

2. 실험방법

1) 열팽창계수

a) 시편의 제작

금속의 열팽창계수 측정용 시편 제작을 위하여 직경 5.3mm, 길이 20mm의 원통형 납형을 제작하였고, 인산염 매물제인 Hi-Temp 2(Whip Mix Co.)로 제조자의 지시에 따라 매물하였고, 통법에 따라 소환하여 고주파 유도 주조기(High-frequency Induction Casting Machines : Bego Co., Fornax 35 Eum)로 주조하였으며, 상온에서 냉각하였다. 도재의 열팽창계수 측정용 시편 제작을 위하여 도재 분말을 증류수와 혼합한 후 직경 6mm, 길이 20mm의 봉형을 제작하였으며, 전기도재로(Jelenko Co., Model LTII VIP)를 이용하여 제조회사의 지시에 따라 소성하였다. 도재와 금속 시편을 선반을 사용하여 직경 5mm가 되도록 정밀 가공하였으며, 저속 다이아몬드 절단기(Beuhler Ltd.)를 이용하여 길이 7mm가 되도록 절단하여, 금속 시편은 각각 2개씩 도재 시편은 3개씩 준비하였다(Fig. 1).

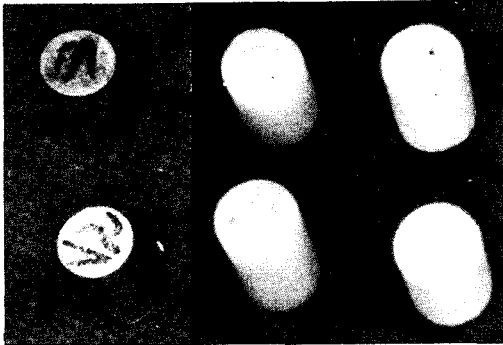


Fig. 1. The cylindrical specimens prepared with the dimension of diameter 5mm and length 7mm(a : metal specimens, b : porcelain specimens).

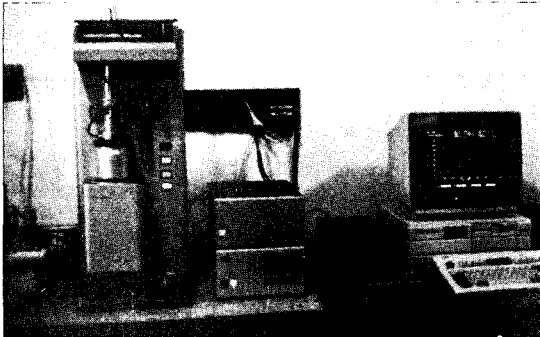


Fig. 2. Thermo-mechanical analyzer(Stanton Co., Model TMA 1500).

b) 측정방법

모든 시편의 원래길이(L_0)를 micrometer로 측정한 후, 열-기계적 분석기(Thermo-mechanical Analyzer, Stanton Co., TMA 1500, Fig. 2)를 이용하여 일반적으로 많이 이용되는 온도상승속도 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 에서 열팽창계수를 측정하였다. 시료의 열팽창계수를 측정하기 전에 표준시편(alumina, 순도 : 99.9%)을 이용하여 calibration을 시행하였고, 동일 조건에서 기기 자체의 열팽창량을 base line으로 설정하고, 얻어진 열팽창 곡선에서 base line만큼 삭제하여 시편의 순수한 열팽창 곡선을 구하였다. 얻어진 열팽창량은 표준화를 위하여 원래의 길이로 나누어 단위 길이당의 치수 팽창량으로 환산하였고, 각 온도 구간에서의 열팽창계수는 최소제곱법(Least Square Method)을 적용한 직선회귀식 (1)로부터 구하였다.^{3,6,51,62-64)}

$$\alpha = \frac{\Delta T}{L_0 \Delta T} \quad (1)$$

여기에서 α 는 열팽창계수, ΔL 은 시편의 길이 변화, ΔT 는 온도 구간을 나타낸다.

c) 도재의 유리화 온도

도재 시편의 유리화 온도(glass transition temperature : T_g)를 측정하기 위하여 각 군당 동일 시편 3개를 온도상승속도를 달리하여 가열하였고, 얻어진 결과를 비교 검토하여 온도 기울기가 급격히 증가하는 점 부근에서 온도에 따른 치수 팽창량과 곡선의 기울기를 비교하여 유리화 온도로 하였다.

d) 도재와 금속간의 열적합지수

opaque도재와 금속, opaque도재와 body 도재 사이의 열팽창량의 차이에 의해 발생하는 응력(α)을 평가하기 위하여 일반적으로 Timoshenko의 열응력 공식(2)가 이용되고 있다.^{3,49)}

$$\alpha = K \Delta T \quad (2)$$

여기에서 K 는 재료의 종류와 시편의 형상에 의해서 결정되는 정수이고, $\Delta\alpha$ 는 열팽창계수의 차이를 나타내며, ΔT 는 고려되는 온도 구간을 표시한다. 위의 공식 (2)를 유리화 온도의 개념을 도입하여 비선형 팽창 거동에 적합하도록 변화시키면 식 (3)으로 표현된다.^{3,49)}

$$\sigma = K \int_{T_g}^{T_0} \Delta\sigma dT \quad (3)$$

여기에서 T_0 는 대상으로 하는 온도 한계로 실온 또는 구강내 온도이며, T_g 는 도재의 유리화 온도이다.

식 (3)을 토대로 열적합지수(thermal compatibility index, C_i)에 관한 공식을 표시하면 식 (4)로 표현된다.^{3,6,51)}

$$C_i = \alpha / K \quad (4)$$

열적합지수는 가열 속도 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 에서 온도의 상한치(T_1)를 유리화 온도(T_g)로, 하한치(T_0)를 50°C 로 하는 열팽창의 차이에 의한 단위 길이당의 변형률로 표시하였다.

2) 도재의 탄성계수

a) 시편의 제작

도재봉의 탄성계수를 측정하기 위하여 도재 분말을 증류수와 혼합한 후 직경 5mm, 길이 25mm의

봉으로 제작하였고, 전기도재료를 이용하여 제조 회사의 지시에 따라 1회 소성하였다. 소성된 도재봉을 선반을 이용하여 직경 4mm가 되도록 가공하였으며, 저속 다이아몬드 절단기를 이용하여 길이 20mm가 되도록 절단하였다. 준비된 시편의 중심에 gauge length 1mm의 strain gauge(Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., Model FLA- IAS- IL)를 접착하였다. 시편에 gauge의 부착 위치를 표시한 후 gauge 위에 비접착성인 폴리에틸렌 시이트를 덮고 시아노아크릴레이트계 접착제(Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Lte, Model CN)를 이용하여 gauge를 접착하였다.

b) 측정방법

만능시험기(Universal Testing Instrument, Instron Co., Model 4201, Fig. 3)에 압축시험용 장치를 부착한 후 준비된 시편을 위치시키고, strain gauge를 정변형률 측정기(Automatic Multichannel Strain Meter, Minebea Co., Ltd. Shinkoh communication Div., Model DPU- 101)에 결선하였다. 압축시험은 용량 50kg의 load cell을 이용하여 cross- heap speed 0.2mm / min에서 매 2kg 간격으로 48kg까지의 변형률을 측정하였다.

응력과 변형률 사이의 관계는 식 (5)로 표시되는 Hooke의 법칙이 이용되고 있다.⁶²⁾

$$\alpha = E\varepsilon \quad (5)$$

여기에서 α 는 응력, E는 탄성계수, ε 는 변형률을 표시한다.

탄성계수를 계산하기 위하여 측정된 결과를 컴퓨터에 입력시킨 후 최소제곱법을 적용한 직선회



Fig. 3. Compression test(Instron Co, Model 4201).

귀식 (6)을 사용하여 도재의 탄성계수를 계산하였다.⁶³⁻⁶⁴⁾

$$E = \frac{m \sum \varepsilon \cdot \alpha - \sum \varepsilon \cdot \sum \alpha}{m \sum \varepsilon^2 - (\sum \varepsilon)^2} \quad (6)$$

여기에서 m은 sample size, ε 은 변형률, α 는 응력을 표시한다.

3) 도재-금속 system의 변위 및 응력

a) 시편제작

시편의 제작을 위하여 내경 8mm, 길이 8mm 및 도재층 두께 0.3mm 금속층 두께 0.5mm가 되도록 납형을 준비한 후 열팽창계수 측정용 시편과 동일한 방법으로 매몰하여 Ni-Cr계 합금인 Verabond와 Au-Pd계 합금인 Jelenko 'O'의 금속 시편을 주조하였다. 주조된 금속 시편은 매몰재를 제거한 후 공기중에서 냉각시켰고, 도재층 금속면을 0.3mm가 되도록 정확히 조절하였으며, 도재와 결합되는 금속면을 균일화하기 위하여 600 grit SiC 연마지(Beuhler Ltd.)로 최종 연마하였다. 준비된 금속 시편은 도재의 축성전에 증류수에 10분간 끓인 후 초음파 세척기를 이용하여 10분간 세척을 시행하였다. degassing은 전기도재료를 이용하여 제조회사의 지시에 따라 시행하였고, Ceremco도재와 Vita도재를 사용하여 opaque도재의 두께가 0.2mm가 되도록 1회 소성한 후 두께를 조절하였으며, body도재는 두께

Table 2. Classification of specimen

Combination of alloy and porcelain	Code
Ceramco & Verabond	CV
Ceramo & Jelenko 'O'	CJ
Vita & Verabond	VV
Vita & Jelenko 'O'	VJ

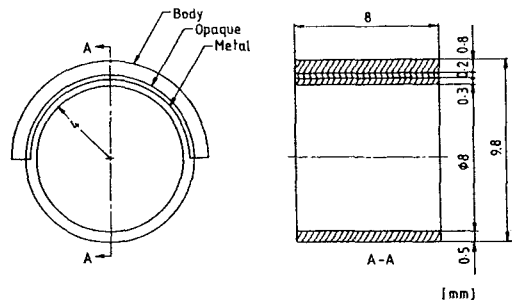


Fig. 4. Dimension of ceramo-metal specimen.

가 0.8mm가 되도록 2회 소성하여 전체 두께가 1.3 mm가 되도록 조절하였다(Table 2, Fig. 4). 준비된 시편의 잔류응력 측정용 시편은 도재의 중앙부, 결합강도 측정용 시편은 도재와 금속의 중앙부에 각각 반경 방향과 수직하게 gauge length 1mm의 strain gauge(Tokyo Sokki Kenkyuju Co., Ltd., Model FLAIII-11)를 접착하였다.

b) 잔류응력 측정

도재측에 접착된 strain gauge를 정변형률 측정기에 결선한 후 저속 다이아몬드 절단기를 이용하여 금속측을 절단하였으며, 이때 도재 표면에 나타나는 변형률을 측정하였다(Fig. 5).

3) 도재-금속 system의 결합강도 및 변위의 측정

만능시험기(Fig. 6)에 인장력 측정용 장치를 부

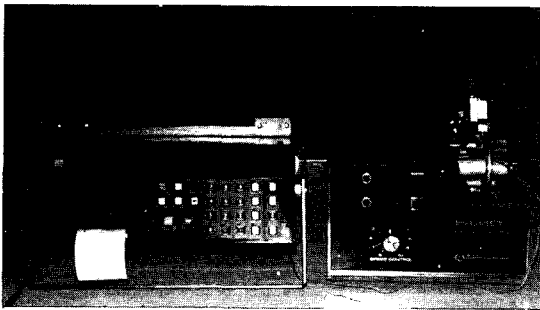


Fig. 5. Measurement system of residual stress for the porcelain surface.

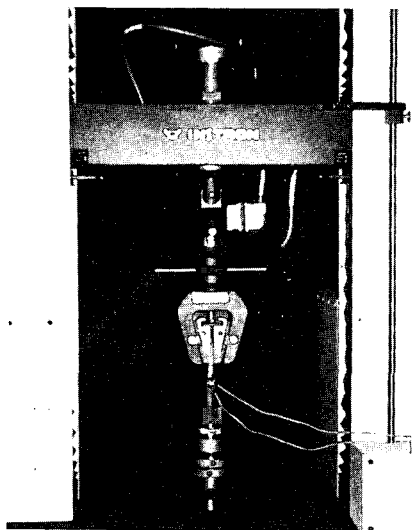


Fig. 6. Tension test(Instron Co, Model 4201).

착한 후 준비된 시편을 위치시켰고, strain gauge를 정변형률 측정기에 결선하였다. 인장 시험은 용량 500kg의 load cell을 이용하여 cross-head speed 0.2 mm/min에서 금속과 도재 계면에서 파절이 일어나는 순간까지 시행하였고, 변형률은 500g의 하중 간격으로 측정하였다.

4) 통계적 분석

각 구간 of 평균의 통계적 유의성을 분산 분석(one way analysis)을 통하여 검증한 후 Scheffe의 다중 범위 검증법(multiple range test)에 의하여 평균치를 개별 비교하였다.

III. 실험성적

1. 열팽창계수

1) 금속의 열팽창계수

금속의 열팽창곡선은 10°C/min의 온도상승속도로 도재의 소성 한계 이상인 900°C까지 측정하여 단위 길이당의 팽창량으로 환산하여 도시하였다. 열팽창곡선은 약 600°C 이하의 온도에서 대체로 온도에 비례하여 증가하는 선형적인 관계를 보였으나, 그 이상의 온도에서는 만곡을 이루었으며,

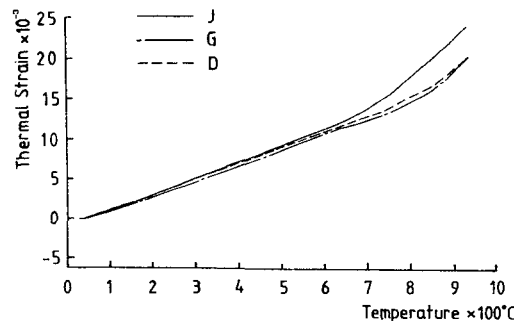


Fig. 7. Curves of thermal expansion for Au-Pd alloys.

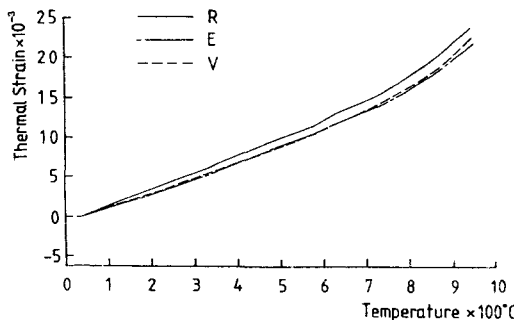


Fig. 8. Curves of thermal expansion for Ni-Cr alloys.

Table 3. Coefficients of thermal expansion for alloys

Material	Code	Range of temperature(°C)				
		100 - 200	200 - 300	300 - 400	400 - 500	500 - 600
Au-Pd alloys	J	17.18	19.20	18.86	17.27	17.34
	G	15.68	16.13	16.47	17.61	18.97
	D	16.93	17.50	17.86	16.32	17.38
Ni-Cr alloys	R	15.68	19.11	19.79	18.95	20.09
	E	13.53	16.60	18.79	20.02	19.09
	V	13.86	17.13	18.52	18.31	20.11

[$\mu/\text{°C}$]

Au-Pd계 합금이 Ni-Cr계 합금보다 더 선형적인 관계를 보였다.

금속의 열팽창량은 도재의 소성 한계내에서 Ni-Cr계 합금인 Rexillum III에서 가장 크게 나타났고, Au-Pd계 합금인 PG 86에서 가장 작게 나타났으며, 전체적으로 도재의 유리화 온도(Tg) 부근에서 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 7, 8).

금속의 열팽창계수는 100°C에서 600°C까지 100°C 간격으로 계산하여 표로 나타내었다. 열팽창계수는 최소 13.53 $\mu/\text{°C}$ 에서 최대 20.11 $\mu/\text{°C}$ 사이로 나타났고, 도재의 유리화 온도 근처인 500°C로부터 600°C 사이에서는 Au-Pd계 합금에서는 J : 17.34 $\mu/\text{°C}$, G : 18.97 $\mu/\text{°C}$, D : 17.38 $\mu/\text{°C}$ 로 나타났고 Ni-Cr계 합금에서는 R : 20.09 $\mu/\text{°C}$: 19.09 $\mu/\text{°C}$, V : 20.11 $\mu/\text{°C}$ 로 나타났으며, Ni-Cr계 합금이 Au-Pd계 합금보다 더 큰 열팽창계수를 보였다(Table 3).

2) 도재의 열팽창계수

온도상승속도 10°C/min에서 측정된 단위 길이 당의 도재의 열팽창량을 도시하였다. 도재의 열팽창곡선은 저온부에서 길이의 감소를 나타냈고, 전 온도 구간에 걸쳐 만곡을 이루며 금속과는 다른 양상을 보였으나, 유리화 온도 부근에서의 열팽창량은 금속과 큰 차이를 보이지 않았다. 유리화 온도 부근의 열팽창량은 Ceramco도재의 경우는 body도재에서, Vita도재의 경우는 opaque도재에서 약간 더 크게 나타났다(Fig. 9-10). 도재의 열팽창계수는 100°C에서 500°C까지 100°C 간격으로 계산하여 표로 나타내었다. 열팽창계수는 최소 7.72 $\mu/\text{°C}$ 에서 최대 31.24 $\mu/\text{°C}$ 사이로 금속과는 달리 온도의 상승에 따라 크게 증가하는 양상을 보였다(Table 4).

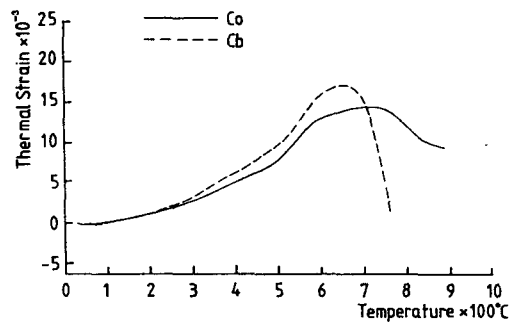


Fig. 9. Curves of thermal expansion for Ceramco porcelains(Co : Ceramco opaque, Cb : Ceramco body).

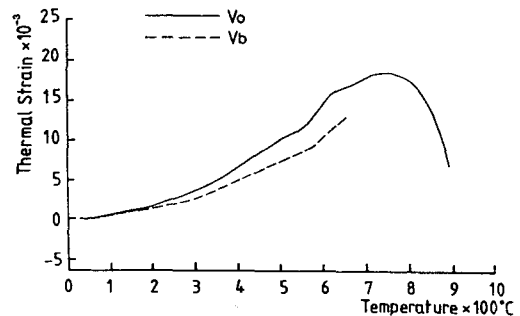


Fig. 10. Curves of thermal expansion for Vita porcelains (Vo : Vita opaque, Vb : Vita body).

도재의 유리화 온도는 열팽창 곡선에서 곡선의 기울기가 급격히 증가하기 시작하는 온도 부근에서 온도에 따른 곡선의 치수 팽창량과 곡선의 기울기를 비교하여 정하였으며, 온도상승속도에 관계없이 거의 변화하지 않고 일정한 온도로서 일치를 보였다. 유리화 온도는 Ceramco도재 시편에서는 Co : 512.99°C, Cb : 523.29°C, Vita도재에서는 Vo :

Table 4. Coefficients of thermal expansion for porcelains

Brand	Code	Range of temperature(°C)			
		100 - 200	200 - 300	300 - 400	400 - 500
Ceramco	Co	7.95	14.52	21.36	24.97
	Cb	11.47	18.16	27.15	30.78
Vita	Vo	11.25	18.18	27.29	31.24
	Vb	7.72	11.93	19.42	20.43

[μ/°C]

Table 5. Glass transition temperature of porcelains

Brand	Code	Tg(°C)
Ceramco	Co	512.99
	Cb	523.29
Vita	Vo	557.93
	Vb	567.85

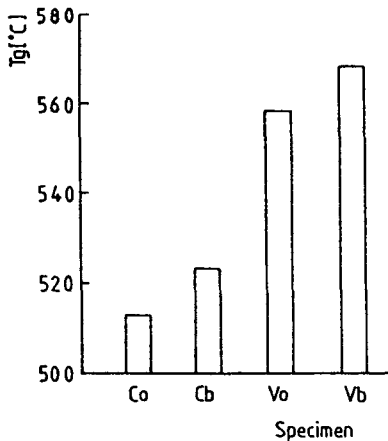


Fig. 11. Diagram of glass transition temperature of porcelains.

557.93°C, Vb : 567.85°C로 나타났다. 유리화 온도는 body도재보다 opaque도재에서 더 낮게 나타났고, Vita도재의 경우보다 Ceramco도재에서 더 낮은 온도를 보였다(Table 5, Fig. 11).

3) 도재와 금속간의 열적합지수

도재와 금속간의 열팽창의 차이에 의한 열적합지수는 온도의 상한치(T1)를 유리화 온도(Tg)로, 하한치(T0)를 50°C로 하는 변형률로 표시하였다. Ceramco도재에서 opaque도재와 금속간의 열적합지수는 0.38~1.49μm/mm로 Rexilliyum III에서 가장 크게 나타났고, Vita도재에서 opaque도재와 금속간의 열적합지수는 -0.51~-1.73μm/mm로 PG 86에서 가장 크게 나타났으며, Ceramco도재에는 음(-), Vita 도재에는 양(+)의 열적합지수를 보였다(Table 6).

opaque도재와 body도재 사이의 열적합지수는, Ceramco도재에서는 -2.05μm/mm로 나타났고, Vita도재에서는 2.71μm/mm로 나타났다(Table 7).

2. 도재의 탄성계수

도재봉을 1회 소성한 후 48kg의 하중까지 압축하였을 때의 응력과 변형률을 도시하였으며(Fig. 12-15), 직선 회귀식(5)로부터 탄성계수(Young's modulus)를 계산하였다. 탄성계수는 Ceramco도재

Table 6. Thermal compatibility index of alloys vs opaque porcelains

Porcelains	Alloys					
	J	G	D	R	E	V
Co	1.28	0.38	0.80	1.49	0.65	0.65
Vo	-0.75	-1.73	-1.27	-0.51	-1.44	-1.44

[μ/°C]

Table 7. Thermal compatibility index of opaque vs body porcelains

Opaque and body porcelains	
Ceramco	Vita
-2.05	2.71

[$\mu/^\circ\text{C}$]

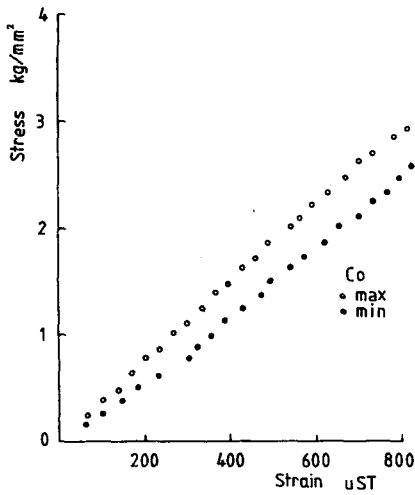


Fig. 12. Stress-strain relations of opaque porcelains of Ceramco Co(Co : Ceramco opaque).

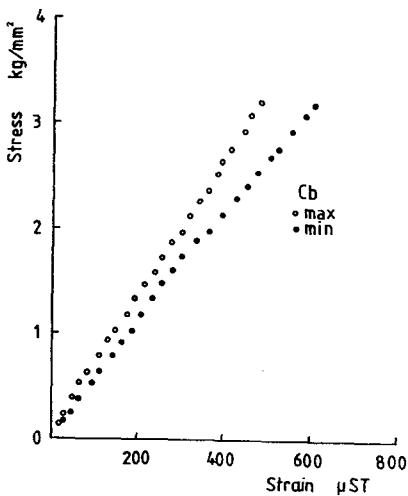


Fig. 13. Stress-strain relations of body porcelains of Ceramco Co(Cb : Ceramco body).

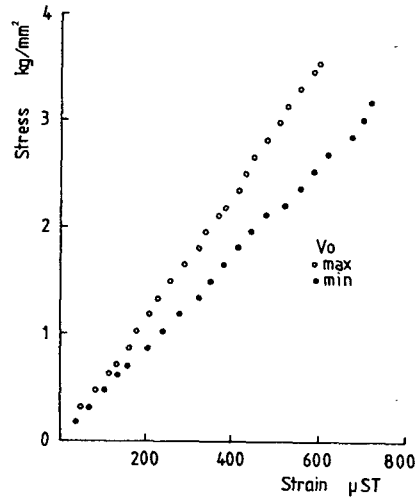


Fig. 14. Stress-relations of opaque porcelains of Vita Co(Vo : Vita opaque).

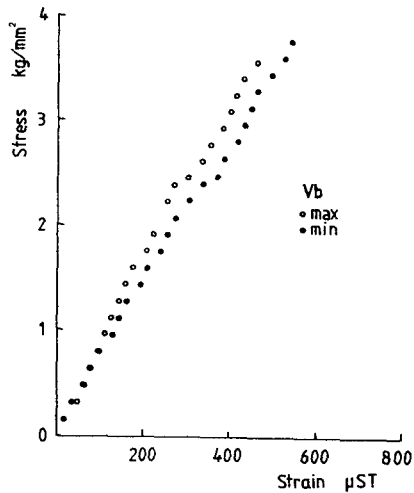


Fig. 15. Stress-strain relations of body porcelains of Vita Co(Vb : Vita body).

시편에서는 Cb : 6475.43kg/mm², Co : 3796.57kg/mm², Vita도재 시편에서는 Vb : 8018.10kg/mm², Vo : 5385.77kg/mm²으로 나타났다.

통계적 유의성을 검증한 결과 Cb과 Co, Vb와 Vo 사이에서는 유의수준 $\alpha=0.01$ 로써 통계학적으로 유의한 차이를 보였고($P<0.01$), Cb와 Vb, Co와 Vo 사이에서는 유의수준 $\alpha=0.05$ 로써 통계학적으로 유의한 차이를 보였다($P<0.05$)(Table 8, Fig. 16).

Table 8. Experimental modulus of porcelains determined from the compression test

Code	Sample no.	Mean	S.D.
Co	5	3796.57	225.35
Cb	7	6475.43	694.04
Vo	6	5385.77	694.04
Vb	8	8018.10	460.38

[kg/mm²]

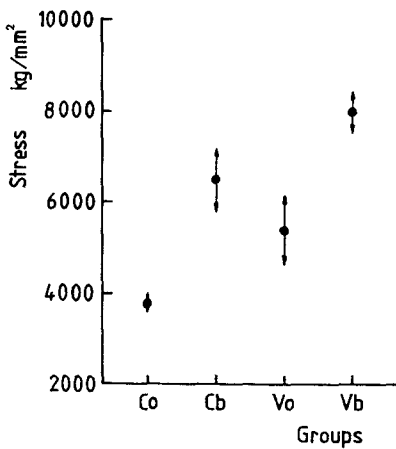


Fig. 16. Diagram of Young's moduli of porcelains determined from the compression test.

3. 도재-금속 system의 변위 및 응력 분석

1) 잔류응력 측정

도재와 금속간의 잔류응력을 측정하기 위하여 준비된 시편(Fig. 6)의 금속측을 저속 다이아몬드 절단기로 절단하여 도재 표면의 변형률을 측정하였다. 변형률은 CV : 210.25 μ ST, CJ : 188.67 μ ST, VV : 307.25 μ ST, VJ : 284.50 μ ST로 나타났다. 금

속측은 절단한 후 도재 표면에 나타나는 변형률 사이의 통계적 유의성을 검증한 결과, CV와 VV, CJ와 VV, VJ 사이에 유의수준 $\alpha=0.05$ 로써 유의한 차이를 보였다($P<0.05$).

측정된 탄성계수와 변형률로부터 body도재 표면에 나타나는 잔류응력을 계산한 결과, CV : 1.36 kg/mm², CJ : 1.22kg/mm², VV : 2.46kg/mm², VJ : 2.28kg/mm²으로 나타났다. 통계적 유의성을 검증한 결과, CV, CJ와 VV와 VJ 사이에 유의수준 $\alpha=0.01$ 로써 유의한 차이를 보였다($P<0.01$)(Table 9, Fig. 17).

2) 도재-금속 system의 결합 강도 및 변형률 측정

도재와 금속간의 결합강도와 도재 표면의 변형률을 측정하기 위하여 준비된 시편(Fig. 6)의 인장시험을 실시하여 파절이 일어나는 순간까지의 하중과 변형률의 관계를 도시하였다(Fig. 18-23).

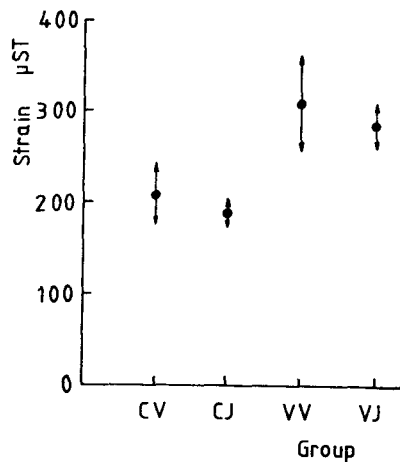


Fig. 17. Diagram of residual strains of ceramo-metal specimens in the porcelain surface.

Table 9. Residual strains and stresses in the surface of ceramo-metal specimens

Code	Sample no.	Strain(μ ST)		Stress(kg/mm ²)	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.
CV	6	210.25	35.50	1.36	0.23
CJ	4	188.67	14.98	1.22	0.10
VV	6	307.25	53.34	2.46	0.43
VJ	4	284.50	23.70	2.28	0.19

[μ /°C]

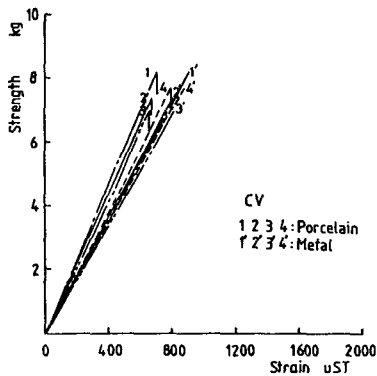


Fig. 18. Diagram of the tensile loads and strains of the porcelain surface and metal surface (CV : Ceramco-Verabond).

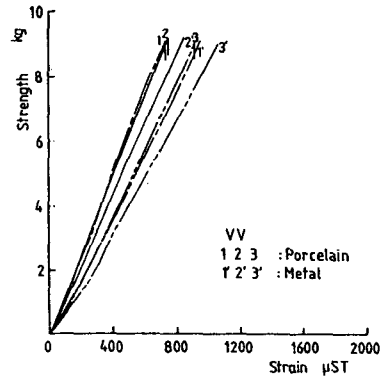


Fig. 21. Diagram of the tensile loads and strains of the porcelain surface and metal surface (VV : Vita-Verabond).

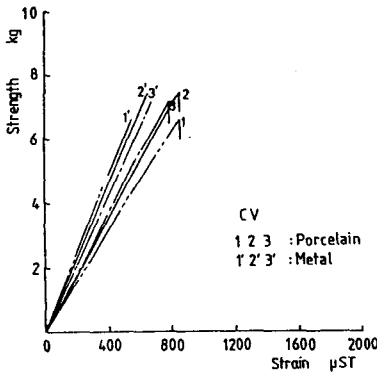


Fig. 19. Diagram of the tensile loads and strains of the porcelain surface and metal surface (CV : Ceramco-Verabond).

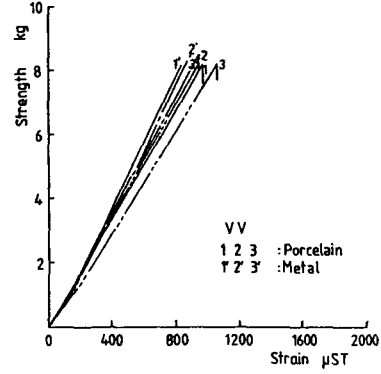


Fig. 22. Diagram of the tensile loads and strains of the porcelain surface and metal surface (VV : Vita-Verabond).

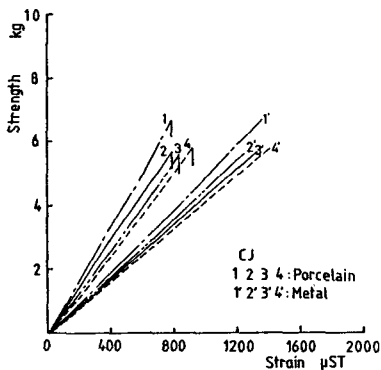


Fig. 20. Diagram of the tensile loads and strains of the porcelain surface and metal surface (CJ : Ceramco-Jelenko).

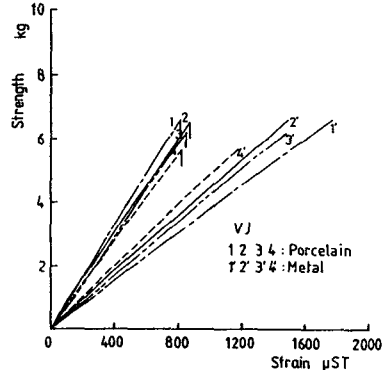


Fig. 23. Diagram of the tensile loads and strains of the porcelain surface and metal surface (VJ : Vita-Jelenko).

Table 10. Tensile strengths and strains of the porcelain and metal surface of ceramometal specimens

Code	Sample no.	Bond strength (kg)		Strain of porcelain surface(μ ST)		Strain of metal surface(μ ST)	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
CV	7	7.34	0.51	751.14	79.55	745.86	1340
CJ	4	5.95	0.44	828.50	75.87	1286.25	1150.3
VV	6	8.72	0.47	899.83	129.24	928.16	85.62
VJ	4	6.23	0.46	833.50	26.41	1473.75	238.86

[μ / $^{\circ}$ C]

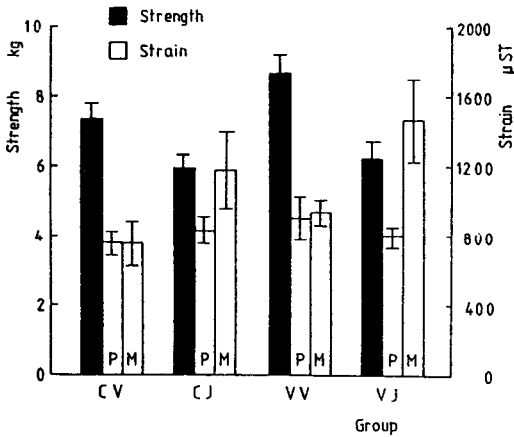


Fig. 24. Diagram of tensile strengths and strains of the porcelain and metal surface of ceramo-metal specimens.

평균 결합강도는 CV : 7.34kg, CJ : 5.95kg, VV : 8.72kg, VJ : 6.23kg으로 나타났다. 파절강도의 통계적 유의성을 검증한 결과, VV와 나머지 군간에 유의수준 $\alpha=0.01$ 로써 통계학적으로 유의한 차이를 보였고($P<0.01$), CV와 CJ, VJ 사이에 유의수준 $\alpha=0.05$ 로써 통계학적으로 유의한 차이를 보였다($P<0.05$)(Table 11, Fig. 24).

인장시험에 의한 도재의 파절시의 변형률은 CV : 751.14 μ ST, CJ : 828.50 μ ST, VV : 899.83 μ ST, VJ : 833.50 μ ST으로 나타났다. 통계적 유의성을 검증한 결과, CV와 VV 사이에 유의수준 $\alpha=0.01$ 로써 통계학적으로 유의한 차이를 보였고($P<0.01$), CV와 CJ 사이에서 유의수준 $\alpha=0.05$ 로써 통계학적으로 유의한 차이를 보였다($P<0.05$)(Table

Table 11. Tensile stresses of the porcelain surface of ceramo-metal specimens.

Code	Sample no.	Stress of porcelain surface(kg/mm ²)	
		Mean	S.D.
CV	7	4.86	0.52
CJ	4	5.36	0.49
VV	6	7.22	1.04
VJ	4	6.68	0.20

10, Fig. 24). 도재의 파절시에 나타나는 금속면 중앙부의 변형률은 CV : 745.86 μ ST, CJ : 1286.25 μ ST, VV : 928.16 μ ST, VJ : 1473.75 μ ST으로 나타났다. 통계적 유의성을 검증한 결과, CV, VV와 CJ VJ 간에 유의수준 $\alpha=0.01$ 로써 통계학적으로 유의한 차이를 보였다($P<0.01$)(Table 10, Fig. 24).

측정된 탄성계수와 변형률로부터 도재 표면의 응력을 계산한 결과, CV : 4.86kg/mm², CJ : 5.36 kg/mm², VV : 7.22kg/mm², VJ : 6.68kg/mm²으로 나타났다. 통계적 유의성을 검증한 결과, CV와 VV, VJ 사이에서 유의수준 $\alpha=0.01$ 로써 통계학적으로 유의한 차이를 보였다($P<0.05$)(Table 11).

IV. 고 찰

도재전장 구조관의 임상적 성공을 위해서는 도재와 금속간의 결합강도^{11,18,61)}, 도재 자체의 인장강도^{65,66)}, 도재와 금속간의 열팽창량의 차이 및 도재내의 잔류응력의 상태가 고려되어야 하며^{1-4,41-47)}, 내부 구조인 금속의 적절한 설계⁵⁻⁶⁾, 도재의

응용 기법¹¹⁻¹²⁾, 합금의 금속학적 조성⁷⁻¹⁰⁾, 도재의 금속에 대한 젖음성¹⁵⁻¹⁶⁾ 및 적절한 냉각속도^{2,4,13-14, 52-53)} 등이 요구된다.

주조체의 도재 소성에 의한 변형의 요인을 살펴보면, Bagby등³⁸⁾은 주조과정과 금속면의 전처리 과정에서 야기되는 잔류응력이 변형을 야기시킨다고 하였고, Hobo⁴⁴⁾, Hamaguchi등⁶⁷⁾은 열팽창계수의 부조화가 수복물의 변형을 초래할 수 있다고 하였으며, Moffa등²¹⁾은 금속의 종류가 변형을 지배하는 요인이라고 하였다. 그리고, Bryant등⁶⁸⁾, Anusavice등^{69,70)} Kingery등⁷¹⁻⁷²⁾은 재료의 변형 거동이 creep 양상에 기인한다고 하였으며, creep 거동의 중요한 변수로는 미세 구조, 화학 조성, 격자 결함 및 기공률 등이 있다.

치의학 분야에서 열팽창 양상을 평가하기 위하여 시차열 분석(differential thermal analysis, DTA)^{66,73-74)}과 열기계적 분석(thermomechanical analysis TMA) 방식^{39,52)}이 이용되고 있다. 시차열 분석은 전이온도, 조성과 열처리가 전이온도에 미치는 영향, 전이열의 측정 등에 이용되고, 열기계적 분석은 하중이 작용하거나 작용하지 않는 상태에서 물체의 온도 변화에 따른 길이의 변화를 측정하는데 이용된다. Dederich등⁵⁴⁾은 금속의 열팽창은 측정시 표면에 형성되는 산화막에 의해서 영향을 받을 수 있다고 하였으며, Robert등⁷⁵⁾은 금속의 열팽창 측정시 산화를 억제하기 위하여 진공을 가해야 한다고 하였다. 열팽창 측정에 널리 이용되는 방법은 puch-rod 형식으로, 측정시 시료에 미소한 하중을 가하게 되며, 도재와 같이 고온에서 점성을 갖게 되는 재료의 경우에는 변형을 일으킬 수 있다고 하였다.⁴⁹⁾ 유리화 온도 이하에서 금속의 산화나 도재의 점성의 영향은 미소하였으므로, 본 연구에서는 하중이 거의 작용하지 않는 상태에서 일반적으로 이용되는 온도상승속도 10°C/min에서 금속과 도재의 열팽창을 측정하였다.

도재의 소성과정에서 어느 온도에 달하면, 도재는 용융되어 점성과 유동성을 나타내며 계면에 잔류응력이 존재하지 않게 되지만, 이 온도 이하에서는 도재와 금속 계면에 응력이 발생하게 되는데, 이때의 온도를 유리화 온도로 하고 있다. Lund등³⁹⁾ 열팽창 곡선의 기울기가 급격히 증가하는 온도를 유리화온도로 정하였으며, 유리화온도 이

상에서 도재는 비교적 낮은 점성을 가지며 응력이 작용하지 않지만, 유리화 온도 이하에서 도재는 응력에 저항한다고 하였다. 본 연구에서는 동일 시편 3개를 5°C/min, 10°C/min, 15°C/min의 온도상승속도로 가열하여 얻은 열팽창 곡선에서 기울기가 급격히 변화하는 점으로부터 유리화 온도를 측정하였으며, 유리화 온도는 온도상승속도에 관계없이 거의 일치를 보였다. 측정된 유리화 온도는 온도상승속도에 관계없이 거의 일치를 보였다. 측정된 유리화 온도는 Ceramco도재의 경우, Co : 512.99°C, Cb : 523.29°C로 나타났고, Vita도재의 경우, Vo : 557.92°C, Vb : 567.99°C로 나타났으며, 이 결과는 Lund등³⁹⁾의 측정치와 유사하였다.

금속의 열팽창곡선은 도재의 소성에 필요한 온도구간에서 거의 직선적인 팽창 양상을 보였지만, 도재는 상온으로부터 유리화 온도에 달할 때까지 거의 비선형 팽창거동을 보였다. Anusavice등⁴⁾은 금속과 도재의 열팽창 계수의 차이가 1.7~2.2μ/°C 이상일 때 결합강도가 감소할 수 있음을 보고하였고 Lund등³⁹⁾은 열팽창 곡선으로부터 도재의 유리화 온도를 결정한 후, 금속과 도재의 열팽창계수를 100°C 간격으로 측정하였으며, 금속과 도재의 열팽창 계수의 차이는 1.6μ/°C 이하라고 보고하였다. 본 연구에서는 100°C로부터 유리화 온도까지 금속과 도재의 열팽창계수를 구하였으며, 열팽창계수는 금속과 도재간에 차이를 보였으나, 유리화 온도 부근에서 금속과 opaque 도재의 열팽창의 차이는 최대 1.73μm/mm로 큰 차이를 보이지 않았다.

도재-금속 system에서 도재와 금속간의 열팽창 및 수축의 차이에 의한 부조화를 설명하기 위하여, Tuccillo와 Nielsen등^{35,61)}은 strip technique을 사용하여 도재측에 발생하는 잔류응력의 존재를 관찰하였고, Ringle등⁵¹⁾, Caputo등⁶⁾은 도재-금속 strip의 열수축의 차이에 의해 나타나는 응력을 표시하기 위하여 열적합지수의 개념을 도입하였고, Twigg등⁵⁰⁾은 급냉 방법에 따른 열적합지수의 변화를 관찰하였으며, Fairhurst등³⁾은 4종의 금속과 6종의 도재간의 열팽창계수를 측정하여 도재와 금속간의 열적합지수를 계산하였다. 열적합지수는 불확실한 정의로서 충분히 일반화되어 있지 않으며, Fairhurst등³⁾, Anusavice등²⁾은 적절한 상수를 곱하여 산출하였다. 열적합지수(Ci)의 해석은 접

합된 재료의 형상, 결합상태 및 냉각속도 등에 의존하며, 도재-금속 strip의 길이의 변화를 나타낸다. 양의 열적합지수는 도재-금속 strip의 도재 내에 접선 방향의 압축 잔류응력을 야기시키며, 음의 열적합 지수는 인장 응력의 상태를 야기시킨다. 본 연구에서는 6종의 금속과 2종의 도재간의 열변형률을 계산하여 열적합 지수로 표현하였는데, 금속과 Ceramco사의 opaque도재에서는 양으로, Vita사의 opaque도재에서는 음으로 나타났고, body도재와 opaque도재 사이에서는 Ceramco도재에서는 음으로, Vita도재에서는 양으로 나타났으며, Fairhurst등³⁾의 결과와 유사한 양상을 보였다.

Strain gauge에 의한 변형률로부터 도재 표면의 응력을 계산하기 위하여 도재봉의 압축 시험을 실시하였으며, 최소제곱법을 적용하여 응력과 변형률이 선형적인 관계를 갖는 부분으로부터 도재의 탄성계수를 구하였다. 도재의 탄성계수에 관하여 Dérand³⁷⁾은 $8.16 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$, Anusavice등⁷⁶⁾은 $7.02 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$, Tesk등⁷⁷⁾은 $8.43 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ 를 이용하였다. 본 연구에서는 1차 소성한 후의 압축 탄성계수를 측정하였으며, $C_o : 3.80 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$, $C_b : 6.48 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$, $V_o : 5.39 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$, $V_b : 8.02 \text{ kg/mm}^2$ 으로 opaque도재와 body도재 사이에서 유의한 차이를 보였다($P < 0.01$).

금속내의 잔류응력은 주로 과정과 도재 소성전의 금속면 처리에 의해서 야기되며, 산화막 형성과 도재의 소성 중에 제거된다.³⁰⁾ 도재-금속 수복물에 나타나는 도재 내부의 잔류응력은 도재와 금속간의 열팽창계수의 부조화로 간주되었으며, 도재와 금속간의 결합력 증진을 위해서는 열팽창계수를 일치시켜야 한다는 이론과 구강내 조건에서 도재측에 약간의 압축 잔류응력이 작용되도록 하여야 한다는 이론이 제기되고 있다.⁴⁷⁾ 도재와 금속의 선택시 도재의 표면에 압축 잔류응력이 나타나도록 하기 위해서는 열적합지수가 양의 값을 갖도록 선택하여야 할 것으로 사료된다.

잔류응력을 측정하는 방법으로는 X-ray회절을 이용한 방법^{56, 57, 58)}과 strain gauge를 이용한 응력이완방법⁵⁹⁾등이 있다. X-ray회절은 탄성 변형률이 측정 가능하고, 통과 깊이가 10~30 μm 에 불과하므로 표층의 응력을 측정할 수 있으며, 2mm의 좁은 영역의 측정이 가능하므로 국부 응력이나 큰 응력

기울기를 갖는 부분의 측정이 가능하지만, 시편이 곡면인 경우에 측정상의 어려움이 있으며, 표면 아래 부분의 응력을 측정하기 위해서는 새 표면이 드러날 때까지 재료를 제거해 주어야 한다. strain gauge를 이용한 기계적 응력 측정은 측정하고자 하는 부분의 표면에 strain gauge를 부착한 후 시편의 일부를 제거하여 나머지 부분에 변형률을 유발시키는 응력이완방법으로 간단히 측정할 수 있으나, gauge의 크기, 절단시에 나타나는 열 및 변형 등이 문제시된다.

잔류응력 측정에 관하여, Bagby등³⁸⁾은 X-ray회절을 이용하여 도재-금속 strip의 열팽창계수의 차이에 의한 잔류응력 측정을 시도하였으나 유의한 응력의 차이를 발견하지 못하였고, Dérand³⁷⁾은 strain gauge를 사용하여 도재 표면의 잔류응력 측정을 시도하여 도재 표면에 압축 잔류응력이 나타남을 보고하였고, Tuccillo와 Nielsen^{35, 61)}은 strip technique을 사용하여 도재 표면에 압축 잔류응력이 나타남을 보고하였으며, Lund등³⁹⁾은 잔류응력은 금속보다 opaque도재에 더 의존한다고 보고하였으며, Lund등³⁹⁾은 잔류응력은 금속보다 opaque도재에 더 의존한다고 하였다. 본 연구에서는 strain gauge를 사용하여 압축 잔류응력 측정을 시도하였고, 압축 잔류응력은 $CV : -1.36 \text{ kg/mm}^2$, $CJ : -1.22 \text{ kg/mm}^2$, $VV : -2.46 \text{ kg/mm}^2$, $VJ : -2.28 \text{ kg/mm}^2$, 으로 Ceramco도재의 경우보다 Vita도재의 경우에 더 크게 나타났다.

도재-금속간의 잔류응력과 결합력 측정에 이용된 시편에 관하여 살펴보면, bimaterial strip^{35-36, 61, 79)}, split ring^{41, 80)}, semicircular arch⁴¹⁾, disc⁴¹⁾ porcelain-coated ring^{29, 81)}등의 여러가지 형태가 이용되었다. 도재전장주조관의 금속측의 두께에 대하여 살펴보면, gold alloy에 대하여 Mumford⁸²⁾는 0.3~0.4mm 정도, Strausberg등⁸³⁾등은 최소 0.5mm를 제안하였고, 비귀금속에 대하여 Hobb⁸²⁾는 0.3mm, Miller⁵⁾는 전치의 순면은 최소 0.3mm, 전치의 설면과 절단면, 그리고 구치부 교합면은 0.5mm를 추천하였고, Weiss⁸⁵⁾는 비귀금속의 경우 높은 탄성계수와 항복강도를 고려하여 금속측의 두께를 0.1~0.2mm를 추천하였으며, Anusavice⁷⁶⁾는 도재전장주조관의 금속 두께에 따른 유한요소 응력분석을 시행하였다.

본 연구에서는 도재층의 금속 두께를 0.3mm, 나머지 부분을 0.5mm가 되도록 원통형 시편을 제작하였으며, 그 위에 opaque도재의 두께가 0.2mm, body도재의 두께가 0.8mm가 되도록 원통형 시편의 반절을 도재로 소성하였다.

도재와 금속간의 결합강도를 측정하기 위하여, Dehoff⁴⁾은 원통형 도재-금속 시편을 제작하여 이론적인 방법과 strain gauge를 사용하여 도재 표면의 응력을 측정한 후 유한요소법을 이용하여 응력양상을 관찰하였고, Coffey⁵⁾은 4점 굽힘시험을 통하여 열팽창계수의 부조화와 냉각속도가 도재 금속간의 결합력에 미치는 양상을 관찰하여 굽힘시킨 경우의 굽힘 결합강도가 서냉시킨 경우보다 더 크게 나타남을 보고하였다. 본 연구에서는 주조 후 즉시 매몰재를 제거한 후 공기중에서 냉각시킨 경우의 인장 결합강도를 측정하였다. 도재 파절시에 나타나는 결합강도는 금속의 경우 귀금속 합금보다 비귀금속 합금에서 더 크게 나타났고, 도재의 경우 유리화 온도가 높고 압축 잔류응력이 더 크게 나타난 도재에서 더 높은 강도를 보였다. 도재의 파절시에 나타나는 도재 표면의 인장 변형률을 살펴보면, CV : 754.14 μ ST, CJ : 828.50 μ ST, VV : 899.83 μ ST, VJ : 833.50 μ ST으로 변형률이 약 750~900 μ ST일 때 도재에 파절이 일어났으며, 각각의 파절시의 표면 응력은 CV : 4.86kg/mm², CJ : 5.36kg/mm², VV : 7.22kg/mm², VJ : 6.68kg/mm²으로 Ceramco 도재보다 Vita도재에서 더 큰 값을 보였다.

도재-금속간의 잔류응력이 결합강도에 미치는 영향은 많은 변수를 포함하고 있으며, 열팽창의 차이가 결합강도에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 금속의 주조 과정이나 전처리 과정에서 금속내에 잔류하는 응력등의 파악이 선행되어야 할 것으로 사료된다.

V. 결 론

도재와 금속의 종류에 따른 도재내의 잔류응력 및 도재와 금속간의 결합강도를 측정하기 위하여 10 $^{\circ}$ C/min의 온도상승속도에서 금속과 도재의 열팽창곡선을 구한 후 부조화의 양을 평가하였고, strain gauge를 사용하여 압축시험에 의한 도재의

탄성계수를 측정하였고, 준비된 시편의 금속층을 절단하여 도재 표면에 나타나는 잔류응력을 측정하였으며, 도재와 금속간의 인장 결합강도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 금속의 열팽창계수는 100 $^{\circ}$ C로부터 600 $^{\circ}$ C까지의 온도 구간에서 최소 13.53 μ / $^{\circ}$ C, 최대 20.11 μ / $^{\circ}$ C로 나타났고, 도재의 열팽창계수는 100 $^{\circ}$ C로부터 500 $^{\circ}$ C까지 최소 7.73 μ / $^{\circ}$ C, 최대 31.24 μ / $^{\circ}$ C로 나타났다.
2. 도재의 유리화 온도는 온도상승속도의 변화에 관계없이 유사한 값을 보였으며, 도재와 금속간의 열적 부조화는 금속보다 도재에 의한 영향이 더 크게 나타났다.
3. 도재의 탄성계수는 opaque도재보다 body도재에서 더 크게 나타났다(P<0.01).
4. 도재 표면에 나타나는 잔류응력은 금속보다 도재의 종류에 의해 더 크게 영향을 받는 것으로 보였다.
5. 도재와 금속간의 결합강도는 귀금속보다 비귀금속 합금에서 더 크게 나타났고, 파절시에 나타나는 도재 표면 응력은 도재의 종류에 따라 차이를 보였다.

REFERENCES

1. Cascone, P. J. : The effect of thermal properties on porcelain to metal compatibility. J. Dent. Res. 58 : 682, 1969.
2. Anusavice, K. J., Twigg, 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, 1982.
3. Fairhurst, C. W. Anusavice, K. J., Ringle, R. D., and Twigg, S. W. : Porcelain-metal thermal compatibility. J. Dent. Res. 60 : 815, 1983.
4. Anusavice, K. J., Dehoff, P. H., Twigg, S. W., and Lockwood, P. C. : Thermal shock resistance of porcelain discs. J. Dent. Res. 62 : 1082, 1983.
5. Miller, L. L. : Framework Design in Ceramometal Restorations. Dent. Clin. North Am. 21 : 4, 1977.

6. Caputo, A. : Effect of surface preparation on bonding strength of nonprecious and semi-precious alloys. *J. Calif. Assoc.* 6 : 42, 1978.
7. Shell, J. S., and Nielsen, J. P. : Study of the bond between gold alloys and porcelain. *J. Dent. Res.* 41 : 1424, 1962.
8. Nalley J. N. : Chemico - physical analysis and mechanical test of the ceramo - metallic complex. *Int. Dent. J.* 18 : 309, 1968.
9. Anusavice, K. J., Ringle, R. D., and Fairhurst, C. W. : Bonding mechanism evidence in a ceramic non - precious alloy system. *J. Biomed. Mater. Res.* 11 : 701, 1977.
10. Baran, G. R. : Phase changes in base metal alloys along the metal porcelain interface. *J. Dent. Res.* 58 : 2095, 1979.
11. McLean, J. W. : and Sced, I. E. : Bonding of dental porcelain to metal. II : The base metal alloy / porcelain bond. *Br. Ceram. Soc. Trans.* 72 : 235, 1973.
12. Kashiwase M. : Effect of metal surface preparation on bubbles in metal ceramics. *Shikwa Gakuho* 78 : 1171, 1978.
13. Guinn III, J. W. et al : The Effect of cooling rate on the apparent bond strength of porcelain - metal couples. *J. Prosthet. Dent.* 48 : 551, 1982.
14. Dehoff, P. H., Anusavice, K. J., and Boyce, R. J. : Analysis of thermally - induced stresses in porcelain - metal systems. *J. Dent. Res.* 62 : 593, 1983.
15. Hull. A. W. and Berger E. E. : Glass to metal seals. *Physics* 5 : 384, 1934.
16. Zackay, V. F., et al : Fundamental of glass - to - metal bonding. *J. Cera. Soc.* 36 : 84, 1953.
17. Al - Jassim G. A., et al : Oxidation effects on the metal - porcelain bond of palladium - silver and base metal alloy. *J. Dent. Res.* 61 : 284, 1952.
18. Mitoff, S. P. : Fundamentals of glass to metal bonding II. Reactions of tantalum and sodium silicate glass. *J. Am. Ceram. Soc.* 40 : 118, 1957.
19. Von Radnoth, M. S., and Lautenschlager, E. F. : Metal surface changes during porcelain firing. *J. Dent. Res.* 48 : 321, 1969.
20. Nally, J. N., and Meyer, J. M. : Chemical bonding in the porcelain baked to metal technique. *J. Dent. Res.* 50 : 760, 1971.
21. 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, 1973.
22. Daftary, F., Pameijer, C., and Karfman, E. : Pretreatment effect of metal - porcelain bonding of nonprecious dental alloy, *J. Dent. Res.* 59 : 1011, 1980.
23. Anusavice, K. J. : Noble metal alloys for metal ceramic restorations. *Dent. Clin. North Am.* 20 : 798, 1985.
24. Avery, J. K., Visser, R. L., and Knapp, D. E. : The pattern of mineralization of enamel, *J. Dent. Res.* 40 : 1004, 1961.
25. Carpenter, M. A. and Goodkind R. J. : Effect of varying surface texture on bond strength of one semiprecious and one nonprecious ceramo - alloy. *J. Prosthet. Dent.* 42 : 86, 1970.
26. Lubow, R. M., and Looley, R. L. : Effect of air powder abrasive instruments on Restorative materials, *J. Prosthet. Dent.*, 55 : 462, 1986.
27. Tanaka, T., et al : Surface treatment of nonprecious alloys for adhesion fixed partial dentures. *J. Prosthet. Dent.* 55 : 456, 1986.
28. Shell, T. S., and Niesel, J. P. : Study of bond between gold alloy and porcelain, *J. Dent. Res.* 41 : 1424, 1982.
29. Phillips, R. W. : *Skinner's Science of Dental Materials.* 8th ed., 334, W. B. Saunders Co., 1982.
30. Fairhurst, C. W., Hashinger, D. T., and Twiggs, S. W. : Glass transition temperatures of dental porcelain. *J. Dent. Res.* 60 : 995, 1981.
31. Tesk, J. A., Hinman, R. W., Whitlock, R. P., Holmes, A, and Parry, E. E. : Temperature dependence of shear viscosity for several dental porcelains. *IADR. Progr. & Abst.* 60 : No. 839, 1981.
32. Ringle, R. D. : Hashinger, D. T. : Anusavice, K. J. : and Fairhurst, C. W. : Thermal contraction behavior of alloy - opaque porcelain - body porcelain

- systems. IADR Progr & Abst 58 : No. 606, 1979.
33. Kuwata, M. : Theory and practice for ceramic-metal restorations, Quintessence Pub. Co., Chicago, 1980.
 34. Yamamoto, M. : Metal Ceramics, Principles and method of Makoto Yamamoto, Quintessence Pub. Co., Chicago, 1985.
 35. Tuccillo, J.J. and Nielsen, J.P. : Shear stress measurements at the dental porcelain - gold interface. J. Dent. Res. 51 : 626, 1972.
 36. Bertolotti, R.L. : Calculation of interfacial stress in porcelain - fused - to metal systems. J. Dent. Res. 59 : 1972, 1980.
 37. Tore Dérand : Residual stresses in metal - ceramic crowns. J. of Oral Rehabilitation. Vol. 8 : 69, 1981.
 38. Bagby, M. : Marshall, S.J. : Marshall Jr., G.W. : Residual stress in two alloys during porcelain application X-Ray Stress-strain determination, fractography : 255, 1988.
 39. Lund, P.S., Goodkind, R.J., and Swanson, S. : Residual stress in several ceramo - metal systems. J. Prosthet. Dent., 62 : 278, 1989.
 40. 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, 1982.
 41. Anusavice, K.J., Dehoff, P.H., Gray, A. : and Lee, R.B. : Delayed crack development in porcelain due to incompatibility stress. J. Dent. Res. 67 : 1086, 1988.
 42. Bridger, D.V., and Nicholls, J.I. : Distortion of ceramometal fixed partial dentures during the firing cycle. J. Prosthet. Dent. 45 : 507, 1981.
 43. Bridger, D.V., and Nicholls, J.I. : Distortion of ceramometal fixed partial dentures during the firing cycle. J. Prosthet. Dent. 45 : 507, 1981.
 44. Hobo, S. : Distortion of occlusal porcelain during glazing. J. Prosthet. Dent. 47 : 154, 1982.
 45. Gavelis, J.R., et al : A comparison of the bond strength of two ceramometal systems. J. Prosthet. Dent. 48 : 424, 1982.
 46. 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, 1988.
 47. Dehoff, P.H., Anusavice, K.J. : Analysis of alloy - porcelain compatibility using multi - component material strip equation. J. Dent. Res. 64 : 1337, 1985.
 48. Timoshenko, S. : Analysis of bimetal thermostats, J. Opt. Soc. Am. 11 : 233, 1925.
 49. Tesk, J.A. et al : Effect of porcelain / alloy interfacial diffusion zones on thermo - mechanical strain. J. Dent. Res. 62 : 585, 1983.
 50. Twigg, S.W., Anusavice, K.J., and Fairhurst, C.W. : Effects of cooling rates on porcelain - alloy compatibility AADR. Progr. & Abst. 59 : 350, 1980.
 51. Ringle, R.D., Webber, R.L., Anusavice, K.J., and Fairhurst, C.W. : Thermal expansion / contraction behavior of dental porcelain - alloy, LADR Progr & Abst 57 : 294, 1978.
 52. 임애란, 임호남, 박남수 : 도재 냉각법의 차이가 금속-도재간 열팽창 양상과 결합력에 미치는 영향. 대한치과보철학회지 28 : 165, 1990.
 53. Twigg, 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, 1989.
 54. Dederich, D.N., Svare, C.W., Peterson, L.C., and Turner, K.A. : The Effect of repeated firings on the margins of nonprecious ceramometals. J. Prosthet. Dent. 51 : 628, 1984.
 55. Buchanan, W.T., Svare, C.W., and Turner, K.A. : The effect of repeated firing and strength on marginal distortion in two ceramometal systems. J. Prosthet. Dent. 45 : 502, 1981.
 56. Cullity, B.D. : Elements of X - ray Diffraction. 2nd ed., 1977.
 57. 한봉희 역 : X선 회절. 반도출판사, 1990.
 58. 한웅교 : 스트레인 게이지 - 이론과 응용 -. 1988.
 59. Doyle, J.F., Phillips, J.W. : Manual on Experimental Stress Analysis. SEM, 1989.

60. Asaoka, K., and Tesk, J. A. : Transient and residual stress in a porcelain-metal strip. *J. Dent. Res.* 69 : 463, 1990.
61. Nielsen, J. P. and Tuccillo, J. J. : Calculation of interfacial stress in dental porcelain bonded to gold alloy substrate. *J. Dent. Res.* 51 : 1043, 1972.
62. Crandall, S. H., Dahl, N. C. : An introduction to mechanics of solid. 2nd ed., McGraw Hill, 1972.
63. 장옥배, 김순기 : 교양통계학. 1986.
64. 한상영, 오해석 : 전자계산 수치해석. 1987.
65. William J. O'Brien : Dental Metals : Properties and Selection. Quintessence Co., 1989.
66. Craig, R. G. : Restorative Dental Materials. 7th ed., Mosby Company, 1985.
67. Hamaguchi, H., Cacciato, A., and Tueller, V. M. : Marginal distortion of the porcelain bonded to metal complete crown. SEM Study, *J. Prosthet. Dent.* 47 : 146, 1982.
68. Bryant, R. A., Nicholls, J. K. : Measurement of distortions in fixed partial dentures resulting from degassing. *J. Prosthet. Dent.* 42 : 515, 1979.
69. Anusavice, K. J., et al : A thermal shock test for porcelain-metal structures. *J. Dent. Res.* 59(A) : 431, 1980.
70. Anusavice, K. J., et al : Interactive effect of stress and temperature on creep of PFM alloys. *J. Dent. Res.* 64 : 1094, 1985.
71. 김병훈 외 : 세라믹스 총론. 반도출판사, 1983.
72. Kingery, W. D., Bowen, H. K., Uhlmann, D. R. : Introduction to ceramics. Cambridge, Massachusetts, 1975.
73. 허준호, 김철위 : 치과용 왁스의 시차열 분석, 대한치과기재학회지 16 : 19, 1989.
74. 김성욱, 김철위 : 치과용 레진의 시차열 분석, 대한치과기재학회지 16 : 33, 1989.
75. Robert J. D., Preston, J. D., Moffa, J. P., and Caputo, A. : Effect of oxidation on ceramo-metal bond strength. *J. Prosthet. Dent.* 47 : 59, 1982.
76. Anusavice, K. J., Dehoff, P. H., and Fairhurst, C. W. : Comparative evaluation of ceramic-metal bond tests using finite elements stress analysis. *J. Dent. Res.* 59 : 608, 1980.
77. Tesk, J. A., Whitlock, R. P., Widera, G. E. O., Holmes, A., and Parry, E. E. : Consideration of some factors influencing compatibility of dental porcelain and alloys. Part I : Stress. in Precious metals. Proceeding of the 4th international precious metals institute conference, McGachie, R. D. and Bradley, A. G., Eds., Toronto, Ont., Canada : Pergamon Press, 1980.
78. Eckard macherauch : X-ray stress analysis. experimental mechanics. 1966.
79. Dorsch, P. : Measurement and calculation of stress in metal-ceramic systems. *J. Thermal Annual* 21 : 89, 1981.
80. Bertolotti, R. L., Fukui, H. : Measurement of softening temperatures in dental bake-on porcelains. *J. Dent. Res.* 61 : 480, 1982.
81. Oram, D. A., Davies, E. H., Cruickshanks-Boyd : Fracture of ceramic and metaloceramic cylinders. *J. Prosthet. Dent.* 52 : 221, 1984.
82. Mumford, G. : The porcelain-fused-to-metal restoration. *Dent. Clin. North Am.* 9 : 241, 1965.
83. Strausberg, G., Katz, G., Kuwata, M. : Design of gold supporting structures for fused-to-porcelains. *J. Prosthet. Dent.* 16 : 928, 1966.
84. Hobo, S., Shillingburg, H. T. : Porcelain fused to metal : Tooth preparation and coping design. *J. Prosthet. Dent.* 30 : 28, 1973.
85. Weiss, P. A. : New design parameters : Utilizing the properties of nickel-chromium superalloys. *Dent. Clin. North Am.* 21 : 769, 1977.

-Abstract-

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE RESIDUAL STRESS AND BOND STRENGTH OF CERAMO-METAL SYSTEM

Gi-Jin Kim, D.D.S., M.S.D., Tae-Seong Bae, M.E,
Kwang-Yeob Song, D.D.S., M.S.D., Cham-Woon Park, D.D.S., Ph.D.

Department of Prosthodontics, College of Dentistry, Chonbuk National University

This study was carried out to investigate the residual stress caused by the mismatch of thermal expansion and the bond failure resistance of alloy-porcelain specimens.

The thermal expansions of alloys and porcelains were measured by using a straight push-rod dilatometer. Porcelain glass transition temperatures, thermal expansion coefficients, and thermal compatibility indices were derived from length-versus-temperature curves.

Strain gauges were used to experimentally determine the Young's moduli of porcelains, the residual stresses of porcelain surface, and tensile bond strengths of the specimens of simulated porcelain metal crown.

The obtained results were as follows :

1. The coefficients of thermal expansion for alloys were the minimum of $13.53 \mu/\text{C}$ and the maximum of $20.11 \mu/\text{C}$ in the range of $100\sim 600\text{C}$ and those for porcelains were the minimum of $7.72 \mu/\text{C}$ and the maximum of $31.24 \mu/\text{C}$ in the range of $100\sim 500\text{C}$.
2. The glass transition temperature of porcelains exhibited the same value without any relation to the heating rate, and the thermal disharmony of porcelain and alloy was more affected by porcelains than by the alloys.
3. The Young's moduli of body porcelains were larger than those of opaque porcelains ($P<0.01$)
4. It seemed that the residual stresses of porcelain surfaces in the porcelainalloy systems were more affected by porcelains than by alloys.
5. The bond strengths of the porcelain-base metal alloy systems were larger than those of the porcelain-precious metal alloy systems. The fracture strengths of porcelain surfaces showed significant difference between porcelains ($P<0.05$).