

유지구 설계가 주조연결강도에 미치는 영향에 관한 삼차원 유한요소법적 연구

김정우¹ · 정창모^{2*} · 전영찬² · 윤미정¹

부산대학교 치과대학 치과보철학교실 ¹대학원생, ²교수

연구목적: 본 연구에서는 주조연결부의 하중 전달기전과 함께 연결강도를 증진시킬 수 있는 기계적 유지구 설계 방법을 주조연결한 3-unit 고정성 국소의치의 삼차원 유한요소 모형으로 응력분포를 비교 관찰하여 알아보고자 하였다.

연구 재료 및 방법: 10개의 유한요소 모형을 형성하였다. (모형 A: 1개의 유지구, 모형 B: 2개의 유지구, 모형 C: 3개의 유지구, 모형 D: 4개의 유지구, 모형 E: 1개의 수평구와 2개의 수직구, 모형 F: 2개의 수평구와 1개의 수직구, 모형 G: 크기가 증가된 1개의 유지구, 모형 H: 크기가 증가된 2개의 유지구, 모형 I: 높이가 증가된 1개의 유지구, 모형 J: 기저부 너비가 증가된 1개의 유지구). 하악 제 1대구치에서 이차 주조체 양측의 근심와와 원심와에 수직하중을 가하였다.

결과: 일차 주조체와 이차 주조체 간의 유지력과 유지구 형성 후에 남아 있는 일차 주조체 연결부의 두께가 주조연결부의 강도에 영향을 주는 주요소였다. 유지구의 개수나 크기 증가에 따른 유지력 증가는 응력을 분산시키는 효과를 나타냈으나 경우에 따라서는 상대적으로 일차 주조체의 연결부 두께를 감소시켜 응력 값이 증가하는 결과를 초래하였으며, 주조연결부의 기계적 실패는 이차 주조체보다는 일차 주조체에서 일어날 가능성이 높았다.

결론: 주조연결을 위한 유지구 형성 시에는 일차 주조체 연결부의 잔존 금속 두께를 고려하여 유지구의 개수를 제한하고, 이와 함께 일차 주조체와 이차 주조체 간의 유지력을 최대화하기 위하여 유지구의 기저면보다는 깊이를 증가시키는 유지구 설계가 바람직한 방법으로 생각된다. (대한치과보철학회지 2009;47:29-38)

주요단어: 주조연결, 유지구, 연결강도, 삼차원 유한요소법

서론

주조연결법 (casting connection)은 납착이 어렵고 일정한 납착 결과를 얻기 힘든 비귀금속 합금 주조체의 적합오차 수정을 위해 납착의 대안으로 Weiss와 Munyon¹에 의해 처음 소개되었다. 주조연결법은 분할된 일차 주조체의 인접면에 기계적인 유지구를 형성하고 왁스나 패턴 레진으로 고정된 후 매몰하여 동일한 금속으로 이차 주조하는 방법이다.²

주조연결법은 고정성 국소의치의 적합오차 수정은 물론 결합부 수리³ 또는 기능운동로 기법을 이용한 교합면형성⁴에 사용되고 있으며, 가철성 국소의치에서는 도재합금 가공치와 금속구조물 연결⁵에 이용되기도 한다. 특히 근자에는 납착부가 많고 납착 부위가 서로 근접하여 납착이 어려운 임플란트 보철물의 주조체 연결⁶까지 점차 그 응용범위가 확대되어가고 있다.

주조연결법의 장점은 특수한 장비 없이 비교적 쉽고

간단하게 모든 금속의 주조체에 적용이 가능하며⁶, 특히 연결부위가 다수일 경우 시간절약 효과가 크다는 것이다.⁵ 또한 Zoidis 등⁸, 그리고 Romero 등⁹은 주조연결법으로 적합오차를 수정한 보철물의 적합도가 납착법보다 우수하였음을 보고하였다.

이러한 여러 가지 장점에도 불구하고 주조연결법의 가장 큰 임상적 제한점은 취약한 연결강도이다.^{2,10,11} Bertolotti와 Napolitano¹²는 니켈-크롬 합금 보철물에서 주조연결부의 항복강도가 일체 주조체의 약 60% 정도라고 하였으며, 정 등¹⁰은 니켈-크롬-베릴리움 합금의 주조체에서 일체 주조체에 비해 납착부는 약 82%의 굽힘강도를 갖는데 비해, 주조연결부는 유지구의 크기나 형태에 따라 약 25%에서 40%의 굽힘강도만을 갖는다고 보고하였다. 한편 DeHoff 등²은 도재실패를 의미하는 0.1%의 임계변형률에서의 주조연결부 강도는 일체 주조체의 21.3%에 불과하다고 하였다.

이처럼 주조연결부의 연결강도가 취약한 이유는 일차

교신저자: 정창모

602-739 부산시 서구 아미동 1가 10 부산대학교 치과대학 치과보철학교실 051-240-7438; e-mail, cmjeong@pusan.ac.kr

원고접수일: 2008년 6월 19일 / 원고최종수정일: 2008년 12월 11일 / 원고채택일: 2008년 12월 30일

※ 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비 (2년)에 의하여 연구되었음.

주조체와 이차 주조체가 산화막에 의해 분리되어 있어 연결강도는 완전히 기계적 유지력에 의존하게 되며, 연결부에서의 응력 집중은 일차 주조체와 이차 주조체 사이의 연성 분리를 일으키기 때문이다.¹² 따라서 응력이 집중되는 부위에 주조연결법을 사용할 경우에는 연결부나 피복 도재의 실패가 일어날 가능성이 매우 높아지게 된다.

주조연결부의 연결강도에 영향을 미치는 요소로는 사용된 금속의 기계적 특성과 유지구의 설계를 생각할 수 있다. 따라서 선택 사용한 금속 주조체의 주조연결부 강도를 증진시키기 위해서는 적절한 형태, 개수, 크기의 유지구가 부여되어야만 한다. 그럼에도 불구하고 주조연결법이 갖고 있는 임상적 효용성에 비해 지금까지 주조연결강도를 최대화할 수 있는 유지구 설계에 관한 연구는 매우 미흡한 편이었다.

이에 본 연구에서는 주조연결부의 하중 전달기전과 함께 연결강도를 증진시킬 수 있는 기계적 유지구 설계 방법을 주조연결한 3-unit 고정성 국소의치의 삼차원 유한요소 모형으로 응력분포를 비교 관찰하여 알아보고자 하였다.

연구재료 및 방법

1. 유한요소 모형 형성

하악 제 1대구치가 결손된 경우를 가정하여 제 2소구치와 제 2대구치를 지대치로 하고 전방 지대치는 금속도재관으로 가공치와 후방 지대치는 금속관으로 수복한 통상적인 3-unit 고정성 국소의치 모형을 설계하였으며 (Fig. 1), 이때 가공치 중앙부위에 0.75 mm 두께의 이차 주조체가 위치되도록 하였다. 다음 실험 변수에 따라 이차 주조체와 접하고 있는 일차 주조체에 다양한 개수, 크기, 모양을 갖는 수평 및 수직 유지구가 서로 직교하도록 유지구를 설계하였다. 지대치의 형태와 크기는 손 등¹³과 Wheeler¹⁴의 보고를 참고로 설계하였으며, 치근 주위 치주인대는 Carranza 등¹⁵을 참고로 균일하게 0.2 mm로 하였고, 그 주위를 해면골이 감싸고 있는 형태로 하였다. 본 연구의 주목적은 주조연결부의 응력분포 비교이기 때문에 모형의 단순화를 위하여 실험결과에 영향을 적게 미칠 것으로 생각되는 치수, 치조백선, 백악질, 피질골 등의 구조물은 생략하였으며, 이러한 기하 모델형성은 CATIA

(version 17, Dassault Systems, France)를 이용하여 시행하였다.

유한요소 모형은 ANSYS (version 11, ANSYS Inc., USA)에서 제공하는 육면체 20절점 요소를 사용하였으며, 세밀한 관찰을 요하는 주조연결 부위의 요소는 가급적 작게 분할하였다. 생성된 전체 유한요소 모형은 평균적으로 약 193,300개의 절점과 63,600개의 요소로 구성되었다 (Fig. 2).

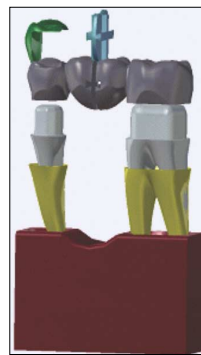


Fig. 1. Geometric model.

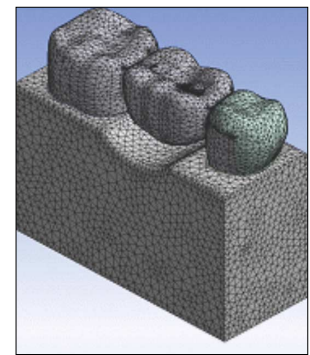


Fig. 2. Three-dimensional finite element model.

2. 유지구 설계

일차 주조체에 십자형으로 형성되는 단면이 사다리꼴인 유지구는 다음과 같은 변수에 따라 달리 설계하였다 (Table I).

· 실험 1. 유지구의 개수 변화 (Fig. 3)

밀변 1.5 mm, 윗변 0.8 mm, 높이 1.0 mm의 수직구 및 수평구를 1개, 2개, 3개, 4개씩 형성하였다.

· 실험 2. 수평 및 수직 유지구의 상대적 위치 변화 (Fig. 4)

밀변 1.5 mm, 윗변 0.8 mm, 높이 1.0 mm의 유지구를 수평구 1개와 수직구 2개 또는 수평구 2개와 수직구 1개로 형성하였다.

· 실험 3. 유지구의 크기 증가 (Fig. 5)

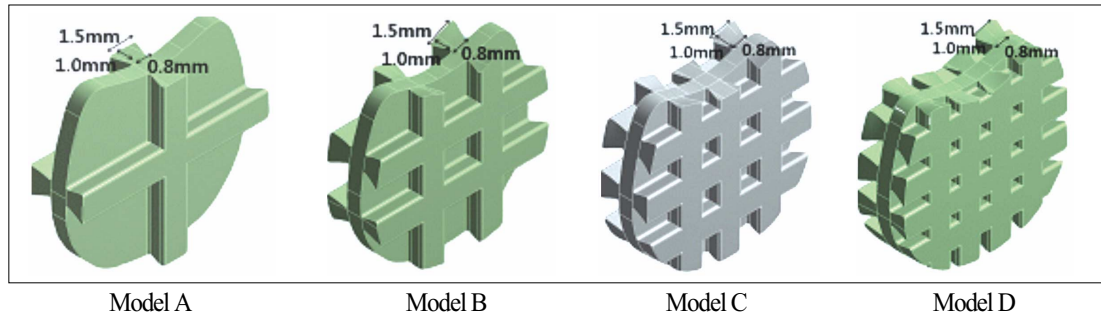
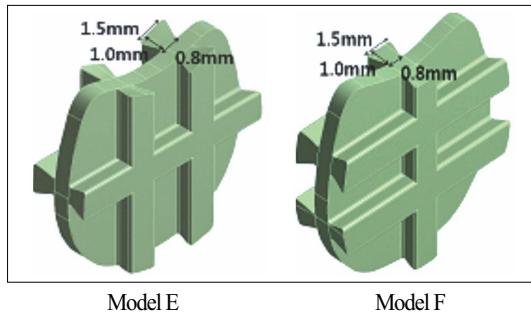
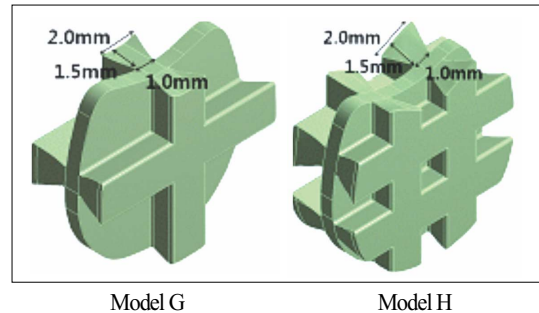
밀변 2.0 mm, 윗변 1.0 mm, 높이 1.5 mm로 크기를 증가시킨 수직구 및 수평구를 각각 1개 또는 2개 형성하였다.

· 실험 4. 유지구의 높이 또는 기저부의 너비 증가 (Fig. 6)

위 실험 3의 유지구 크기를 변화시켜 밀변 2.5 mm, 윗변 1.0 mm, 높이 2.5 mm로 높이를 증가시키거나, 밀변 3.0 mm, 윗변 1.0 mm, 높이 1.5 mm로 밀변을 증가시킨 수직구 및 수평구를 각각 1개씩 형성하였다.

Table 1. Experimental condition of the casting connection

Experiment	Model	Variation		Retentive groove			
				Lower side (mm)	Upper side (mm)	Height (mm)	Angle (°)
1	A	Number	One groove	1.5	0.8	1.0	70
	B		Two grooves	1.5	0.8	1.0	70
	C		Three grooves	1.5	0.8	1.0	70
	D		Four grooves	1.5	0.8	1.0	70
2	E	Position	One horizontal groove- two vertical grooves	1.5	0.8	1.0	70
	F		Two horizontal grooves- one vertical groove	1.5	0.8	1.0	70
3	G	Dimension	One groove with the enlarged dimension	2.0	1.0	1.5	70
	H		Two grooves with the enlarged dimension	2.0	1.0	1.5	70
4	I	Height	One groove with the increased height	2.5	1.0	2.5	70
	J	Base width	One groove with the increased width of base	3.0	1.0	1.5	53


Fig. 3. Experiment 1: Retentive grooves with the different numbers.

Fig. 4. Experiment 2: Retentive grooves with the different positions.

Fig. 5. Experiment 3: Retentive grooves with the enlarged dimension in comparison with model A and B of experiment 1.

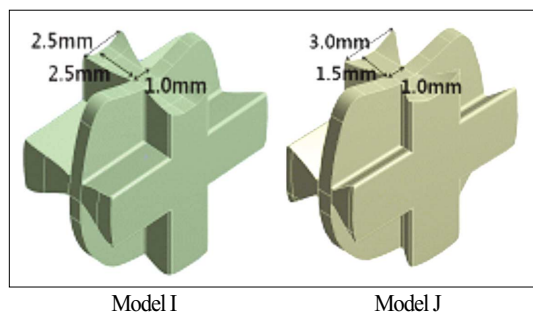


Fig. 6. Experiment 4: Retentive grooves with the increased height (model I) or width of base (model J) in comparison with model G of experiment 3.

3. 물성치

유한요소 모형의 각 재료별 탄성계수 (Young's modulus of elasticity: E)와 포와송비 (Poisson's ratio: ν)는 선행학들의 보고를 참고로 Table II 와 같이 부여하였으며¹⁶⁻²⁰, 이차 주조체에도 일차 주조체와 동일한 물성을 적용하였다. 전체 모형의 물리적 특성은 선탄성, 균질성, 등방성으로 가정하였다.

Table II. Material properties

Material	Young's modulus E (N/mm ²)	Poisson's ratio
Ni - Cr alloys	188,000	0.28
Porcelain	68,900	0.28
Dentin	18,600	0.31
Periodontal ligament	70.3	0.45
Cancellous bone	1,500	0.30

4. 하중 및 경계 조건

1) 하중조건

제 1 대구치 교합면에서 이차 주조체 양측의 근심와와 원심와에 최대교합력에 대한 보고²¹를 참고로 450 N의 수직하중을 각각 가하였다.

2) 변위경계조건

하중 시 유한요소 모형을 고정하기 위하여 모형 하단면에 수평 및 수직 변위에 대한 고정점을 설정하여 구속하였다.

3) 일차 주조체와 이차 주조체간의 접촉경계조건

접촉경계조건의 정식화로 penalty method를 사용하여 수직방향의 접촉거동은 압축에는 반응하도록 수직방향

의 접촉강성을 접촉하중에 따라 재계산하였고, 인장에는 반응하지 않도록 접촉 물체간의 분리는 허용하였으며, 금속과 금속간의 일반적인 마찰계수인 0.322를 적용하여 접선방향의 접촉 거동을 계산하였다.

5. 응력 분석 및 비교

3차원 유한요소분석 프로그램인 ANSYS (version 11, ANSYS Inc., USA)를 이용하여 해석 작업을 수행하였으며, 계산된 여러 가지 응력 값 중에서 유효응력 (von Mises stress)을 택하여 비교에 이용하였다.

유한요소분석 후 각 모형의 변위양상과 응력분포 관찰을 통해 주조연결부의 하중 전달기전을 알아보고, 여러 가지 응력 값 중 일차 주조체와 이차 주조체 연결부의 최고유효응력 값과 그 발생 부위를 선택하여 유지구 설계에 따른 연결강도의 차이를 비교분석하였다.

연구성적

1. 전반적인 응력분포 경향

유한요소분석 결과 유지구 설계에 관계없이 주조연결된 고정성 국소의치에 하중이 가해지면 보철물의 굽힘 변형과 함께 주조연결부를 포함한 가공치 교합면에는 압축력이 조직면에는 인장력이 발생하였다. 주조연결부의 전반적인 응력분포를 보면 주로 상부와 하부에서 응력집중이 관찰되었는데, 상부에서는 압축력으로 인한 응력집중이 교합면 전체에 걸쳐 나타났으며 인장력을 받는 하부에서는 유지구 연결부에만 응력이 집중되었다. 응력집중은 주조연결부의 상부보다 하부에서 더 높게 나타났다.

이차 주조체의 양측 연결부위에서의 응력 분포는 지대치인 소구치 쪽으로 더 큰 응력집중이 관찰되었기 때문에, 본 연구에서는 이차 주조체의 전방 지대치 쪽 연결부의 응력분포만을 비교에 이용하였다.

최고유효응력은 모든 실험 모형에서 이차 주조체 보다 일차 주조체의 연결부에서 더 높게 나타났으며 (Table III 과 Fig. 7), 최고유효응력이 발생하는 부위는 특히 유지구의 개수에 따라 다른 양상을 보였다. 최고유효응력은 수평구와 수직구 개수가 각각 1개일 경우에는 일차 주조체에서는 수평구와 수직구의 교차부위나 수직구 하단부에서, 이차 주조체에서는 주로 수평구와 수직구의 교차부위에서 발생하였다. 한편 유지구가 2개, 3개, 4개일 때는 일차 주조체에서는 주로 최하방 수평구와 최외방 수

직구의 교차점 외하방 부위에서, 이차 주조체에서는 주로 수직구 하단부에서 최고유효응력이 관찰되었다.

2. 유지구 설계에 따른 응력 비교 (Fig. 8)

1) 유지구의 개수 변화 (Model A에서 D까지)

일차 주조체와 이차 주조체 모두에서 수직구 및 수평구가 각각 1개인 경우보다 2개인 경우에 최고유효응력은 감소하였으나, 유지구를 3개, 4개로 증가시킴에 따라 최고유효응력이 매우 크게 증가되었다.

2) 수평 및 수직 유지구의 상대적 위치변화 (Model E와 F)

수직구가 2개인 경우에는 하부의 응력이 주로 두 수직구 부위에 집중되었으나 수평구가 2개인 경우에는 수직구 부위뿐만 아니라 수평구에도 응력전달이 관찰되었다. 최고유효응력은 일차 주조체와 이차 주조체 모두에서 수직구가 2개인 경우가 수평구가 2개인 경우보다 작았으나, 수직구 2개와 수평구 2개인 경우 (모형 B)를 포함하여 이 세 가지 설계 모두에서 큰 차이를 보이지 않았다.

3) 유지구의 크기 증가 (Model G와 H)

개수에 관계없이 유지구의 크기를 증가시킴으로써 하부에서 수직구에 집중되던 응력이 수평구로 분산되는 양상을 보였고, 수직구 및 수평구가 각각 1개인 경우에는 유지구의 크기를 증가시킴으로써 모형 A보다 최고유효응력이 감소되었다. 그러나 유지구가 각각 2개인 경우에는 응력이 수평구로 분산되는 양상을 보였음에도 불구하고 오히려 모형 B보다 최고유효응력 값이 크게 나타났다.

4) 유지구의 깊이 또는 기저부의 너비 증가 (Model I와 J)

유지구의 깊이를 1.5배 증가시켰을 경우에는 하부에서 수직구에 집중되던 응력이 수평구로 분산되는 양상을 보였으며, 유지구의 기저부 너비를 1.5배 증가시킨 경우에도 응력이 수평구로 분산되는 양상을 보였으나 다른 모형들에 비해 이차 주조체의 수직 유지구 하단부에 더 높은 응력집중이 관찰되었다. 그 결과 모형 A나 G보다 두 모형 모두 일차 주조체와 이차 주조체의 최고유효응력 값이 감소하였지만 유지구의 너비보다는 깊이를 증가시키는 것이 응력분산에 더 유리하였다. 유지구의 깊이를 증가시키고 수직구 및 수평구가 각각 1개인 모형에서 다른 모형들에 비해 가장 낮은 최고유효응력이 발생하였다.

Table III . Maximum von Mises stresses (MPa) of the primary and the secondary cast in the connection area

Experiment	Model	Primary cast	Secondary cast
1	A	752	582
	B	739	553
	C	757	644
	D	1024	710
2	E	734	545
	F	745	554
3	G	730	455
	H	755	617
4	I	701	369
	J	713	400

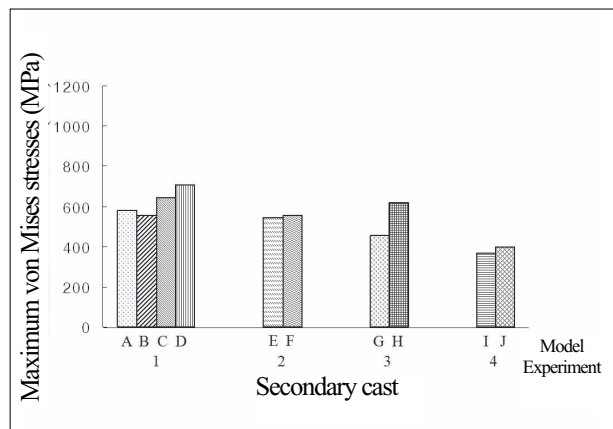
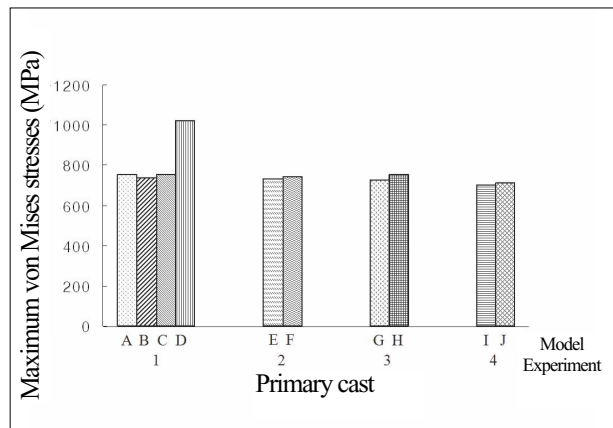


Fig. 7. Diagrams of maximum von Mises stresses of casting connection area.

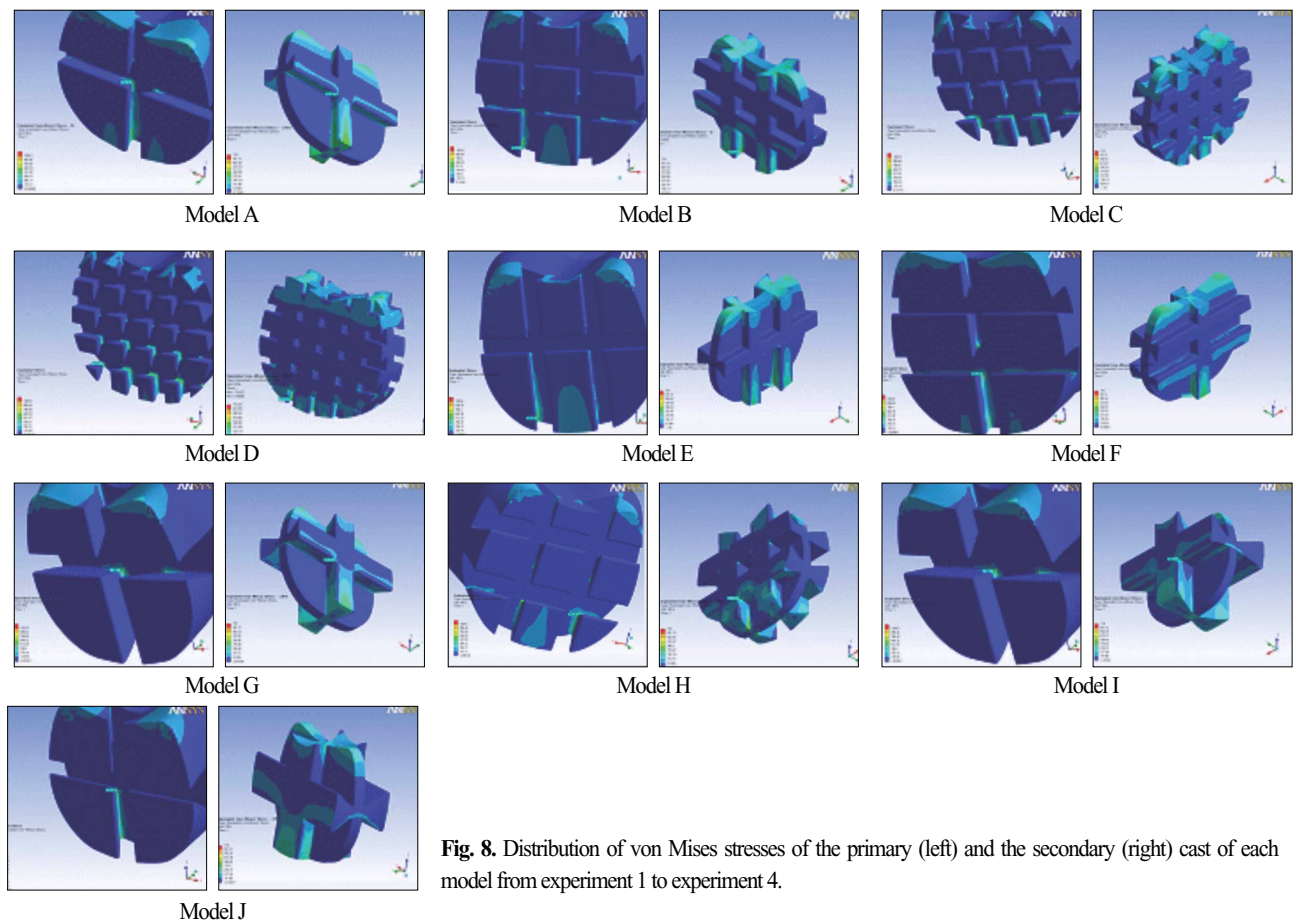


Fig. 8. Distribution of von Mises stresses of the primary (left) and the secondary (right) cast of each model from experiment 1 to experiment 4.

총괄 및 고찰

주조연결법은 납착법에 비해 적합오차가 작고, 모금속과 동종금속을 사용하고, 연결부에서 금속의 양과 위치 조절이 용이하고²³, 연결부위가 다수인 경우 시간을 절약할 수 있다는 장점이 있다.⁵

Zoidis 등⁸은 제 4형 주조용 금합금으로 주조된 임플란트 bar를 분할하고 다시 다양한 방법을 이용하여 연결한 결과 납착 시에는 평균 $86.5\ \mu\text{m}$ 의 수직이개와 $48\ \mu\text{m}$ 의 수평이개가, 레이저용접 시에는 평균 $240.7\ \mu\text{m}$ 의 수직이개와 $80.7\ \mu\text{m}$ 의 수평이개가, 주조연결 시에는 평균 $44\ \mu\text{m}$ 의 수직이개와 $34\ \mu\text{m}$ 의 수평이개가 관찰된다고 보고하였다. 또한 Romero 등⁹도 금합금으로 주조된 임플란트 bar를 방전가공으로 적합오차를 수정한 경우에는 $7.5\ \mu\text{m}$ 의 수직오차가 발생하였으며, 분할하고 납착한 경우에는 $72\ \mu\text{m}$ 의 수직오차가, 주조연결한 경우에는 $15\ \mu\text{m}$ 의 수직오차가 발생하는데 주조연결과 방전가공 사이에는 유의한 차이가 없다고 하였다. 한편 설 등¹은 임플란트 보철물의 삼차원 스트레인 게이지 측정을 통해 레이저용

접과 일체주조에서는 주로 수평적 왜곡이 발생하는데 반해, 납착에서는 수직 및 수평적 왜곡 모두가 관찰된다고 보고하였다.

이처럼 주조연결법은 적합도가 우수하고 특수한 장비 없이 쉽게 주조오차를 수정할 수 있는 유용한 방법임에도 불구하고 취약한 연결부의 연결강도^{2,10,11}로 인해 연결부 자체나 피개 도재의 파절이 일어날 가능성이 높다는 것이 임상적 문제점으로 지적되어 왔다. 과거 주조연결부의 연결강도를 증진시키기 위해 특히 기계적 유지구의 형태나 개수가 연결부 강도에 미치는 영향에 관한 몇몇 연구가 있어 왔다. DeHoff 등²은 여러 가지 유지구 형태 중에서 사다리꼴의 유지구를 수직, 수평으로 형성하였을 때 가장 높은 주조연결부 강도를 가진다고 하였다. 정 등¹⁰은 언더컷이 없는 십자형 유지구를 형성하여 주조연결한 니켈-크롬-베릴리움 주조체에서 일체 주조체에 비해 유지구가 하나일 때 약 25%, 유지구가 두 개일 때 약 38%의 굽힘강도를 보였다고 하였으며, 정¹¹은 언더컷이 있는 십자형 유지구를 형성하였을 경우에는 유지구가 하나일 때 약 30%, 유지구가 두 개일 때 약 34%의 굽힘강

도를 갖는다고 하였다. 또한 유지구에 언더컷을 부여한 경우에는 대부분 유지구 주변 모금속의 파절이 관찰되었기 때문에 유지구의 유지력 뿐만 아니라 이차 주조체 및 유지구 형성 후 남아 있는 주변 모금속의 두께 또한 중요한 요인으로 생각된다고 하였다."

Smyd⁴는 저작하는 동안 치아, 치주조직, 그리고 수복물에 압축력, 인장력, 전단력, 굽힘력, 신장력, 염력에 의한 변형이 발생한다고 하였다. 고정성 국소의치 교합면에 하중을 가하면 일반적으로 지대치와 가공치 연결부에 응력이 집중되며 가공치의 교합면에는 압축력이, 조직면에는 인장력이 발생하는데^{25,26}, 이번 연구에서도 동일한 경향을 관찰할 수 있었다. 그러나 이전 연구들과 응력분포를 비교해볼 때 일체 주조된 고정성 국소의치에서보다 주조연결된 고정성 국소의치의 가공치의 교합면과 조직면에 더 높은 응력집중이 관찰되었는데, 이는 산화막으로 분리되어 있는 일차 주조체와 이차 주조체의 구조적 불안정성 때문이다.⁶ 주조연결부 상부에서는 압축력에 의한 응력집중이 교합면 전체에 걸쳐 나타났으나 하부에서는 인장력에 의한 분리에 저항하는 유지구에 높은 응력이 집중되었고, 상부보다 하부의 응력크기가 더 크게 나타났다. 특히 주조연결부에서 가장 응력이 높게 나타나는 부위는 일차 주조체의 최하방 수평구와 최외방 수직구의 교차점 외하방 부위로서 이 부위는 가공치의 형태가 구강청결을 위해 기저면으로 내려올수록 좁아져 다른 부위에 비해 면적이 더 작아지기 때문이다. 따라서 정²의 보고처럼 이 부위에서 소성변형이나 파절이 시작될 가능성이 높아진다.

수직구와 수평구가 각각 1개인 경우보다 2개인 경우 최고유효응력이 일차 주조체와 이차 주조체 모두에서 낮게 나타났는데 유지구의 개수가 늘어나면 일차 주조체 연결부의 잔존 금속 두께가 감소하지만 유지력이 증가함으로 인해, 최고유효응력은 감소한 것으로 생각된다. 그러나 유지구를 3개, 4개로 증가시킨 경우에는 최고유효응력이 매우 크게 증가하였는데 유지구의 개수가 늘어남에 따라 유지력은 증가하였지만 상대적으로 일차 주조체 연결부의 두께, 특히 최외하방 부위의 두께가 크게 감소하였기 때문으로 생각된다. 따라서 이러한 결과는 유지구에 의한 유지력 보다는 유지구 부여 후 남아 있는 일차 주조체 연결부의 잔존 금속 두께가 주조연결부의 연결강도에 미치는 영향이 더 클 수도 있음을 시사한다.

주조연결 시 임상적으로 고려해야할 사항은 연결강도 외에 연결부의 연성 분리가 있다. 본 연구에서 수평 및 수직 유지구의 상대적 위치 변화에 따른 일차 주조체와 이

차 주조체의 최고유효응력 값은 수직구가 2개이고 수평구가 1개인 경우가 수평구가 2개이고 수직구가 1개인 경우보다 약간 작게 나타났으나 큰 차이를 보이지는 않았다. 따라서 수평구와 수직구의 상대적 위치는 주조연결부의 연결강도에 미치는 영향이 적다고 할 수 있다. 그러나 유지구의 상대적 위치에 따라 응력분포에 큰 차이를 보였는데 수직구가 2개인 경우에는 하부의 응력이 주로 두 수직구 부위에 집중되었으나 수평구가 2개인 경우에는 수직구 부위뿐만 아니라 수평구에도 응력전달이 관찰되었다. 이처럼 수직구에 우선적으로 응력이 집중되는 이유는 인공치 기저면, 즉 이개 시작점에 가까이 위치한 수직구가 일차적으로 인장력에 저항하기 때문이다. 따라서 연결강도는 유사하더라도 수직구가 두 개일 때보다 한 개일 때 기저면의 연성 이개량이 커질 가능성이 높아질 것이다.

도재 실패가 일어나는 임계변형률은 매우 낮기 때문에 주조연결부의 작은 분리도 피개하고 있는 도재를 파절시킬 수 있다. 특히 연성분리 문제를 신중히 고려해야할 부위는 상악 전치부로서 교합력이 가해지면 주조연결부의 설면에는 압축력이 순면에는 인장력이 발생되므로 연성 이개에 의한 순면 도재의 파절이 발생할 수 있다. 따라서 상악 전치부에서는 구치부의 수직구에 해당하는 순설방향의 유지구를 주의 깊게 부여하는 것이 주조연결부를 피개하고 있는 도재의 파절을 감소시키는데 도움이 될 것으로 생각된다.

유지구의 크기를 증가시킨 경우, 수평 및 수직 유지구가 각각 1개인 경우에는 하부에서 수직구에 집중되던 응력이 중앙에 있는 수평구로 분산이 되고 최고유효응력이 감소되었다. 하지만 유지구가 2개인 경우에는 유지구의 크기가 커짐에 따라 수평구로 응력이 분산되었지만 일차 주조체의 최고유효응력 값에는 차이가 거의 없었으며 이차 주조체에서는 오히려 작은 유지구에 비해 최고유효응력 값이 커졌다. 따라서 유지구의 크기는 유지력에 영향을 미쳐 응력분포에 영향을 주며, 또한 유지구가 너무 커지게 되면 일차 주조체 연결부의 두께 감소로 인해 유지구 개수를 너무 많이 부여한 것과 같이 연결강도를 저하시킬 수 있음을 알 수 있다.

수평 및 수직 유지구가 각각 1개인 모형 G에서 유지구의 깊이를 더 증가시키거나 유지구의 기저부 너비를 더 증가시켜 언더컷 양을 증가시킨 경우 모두 유지력 증가로 인한 응력분산효과와 함께 최고유효응력 값이 감소되었으며, 특히 유지구의 깊이를 증가시킨 경우에는 전체 실험 모형 중 가장 작은 최고유효응력 값을 나타내었다. 이러한 결과는 유지력 증가를 위해 일차 주조체 연결

부의 잔존 두께를 더 크게 감소시키는 유지구의 너비 증가보다는 깊이를 증가시키는 것이 연결강도에 유리하다는 것을 의미한다.

이상을 종합해 보면 유지구의 개수, 크기, 형태의 변화는 일차 주조체와 이차 주조체간의 유지력에 영향을 미치고, 이러한 유지력 변화에 따라 주조연결부의 전체적인 응력분포 양상이 달라짐을 확인할 수 있었다. 또한 주조연결부에 나타나는 최고유효응력 값은 유지력 뿐만 아니라 유지구 형성 후 남아 있는 일차 주조체 연결부의 금속 두께에 의해서도 영향을 받는 경향을 보였다. 따라서 주조연결부의 연결강도를 위해서는 유지구의 언더컷 양을 증가시키면서 주조체 연결부의 잔존 금속 두께를 가능한 보존시킬 수 있는 유지구 설계가 필요하다.

본 연구는 유지구 설계요소가 주조연결강도에 미치는 영향만을 상호 비교하여 보았다. 비록 연구결과를 통해 수평구와 수직구를 각각 1개 형성하고 유지구의 깊이를 증가시키는 것이 연결강도에 유리하다는 것을 알 수 있었지만 추후 최적의 유지구 크기에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 본 실험에서는 유한요소 모형의 단순화를 위하여 치수, 치조백선, 백악질, 피질골 등의 구조물을 생략하였으며, 가정된 모형의 물리적 특성이나 경계조건 등을 적용하였다. 따라서 본 응력분석 결과 계산된 응력수치는 실제와 차이가 나기 때문에 기계적인 연결강도 측정을 통해 추가적인 검증이 필요할 것으로 생각된다.

결론

본 연구에서는 주조연결부의 고정성 국소의치에서 유지구 설계가 연결강도에 미치는 영향을 3-unit 고정성 국소의치의 삼차원 유한요소모형 분석을 통해 알아보고자 하였다.

연구결과 일차 주조체와 이차 주조체 간의 유지력과 유지구 형성 후에 남아 있는 일차 주조체 연결부의 두께가 주조연결부의 강도에 영향을 주는 주요소였다. 유지구의 개수나 크기 증가에 따른 유지력 증가는 응력을 분산시키는 효과를 나타냈으나 경우에 따라서는 상대적으로 일차 주조체의 연결부 두께를 감소시켜 응력 값이 증가하는 결과를 초래하였으며, 주조연결부의 기계적 실패는 이차 주조체보다는 일차 주조체에서 일어날 가능성이 높다는 것을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 주조연결을 위한 유지구 형성 시에는 일차 주조체 연결부의 잔존 금속 두께를 고려하여 유지구의 개수를 제한하고, 이와 함께 일차 주조체와 이차

주조체간의 유지력을 최대화하기 위하여 유지구의 기저면보다는 깊이를 증가시키는 유지구 설계가 바람직한 방법으로 생각된다.

참고문헌

1. Weiss PA, Munyon RE. Repairs, corrections and additions to non-precious ceramo-metal frameworks (II). *Quintessence Dent Technol* 1980;4:45-58.
2. DeHoff PH, Anusavice KJ, Evans J, Wilson HR. Effectiveness of cast-joined Ni-Cr-Be structures. *Int J Prosthodont* 1990;3:550-4.
3. Minagi S, Tanaka T, Sato T, Matsunaga T. Double-casting method for fixed prosthodontics with functionally generated path. *J Prosthet Dent* 1998;79:120-4.
4. Fehling AW. Cast connectors as cores for ceramometal pontics on removable partial dentures and for splinting anterior crowns. *J Prosthet Dent* 1990;63:167-71.
5. McCartney JW, Pearson R. Stabilization investment template for direct casting connection of implant framework segments. *J Prosthet Dent* 1997;78:106-8.
6. Fehling AW, Sansom BP, Meiser ET, Johnson PF. Cast connectors: an alternative to soldering base metal alloys. *J Prosthet Dent* 1986;55:195-7.
7. Seol YH, Jeong CM, Jeon YC, Kang SW. Fit of implant frameworks fabricated by one-piece casting, laser welding, soldering, and electric discharge machining. *J Korean Acad Prosthodont* 2002;40:156-71.
8. Zoidis PC, Winkler S, Karellos ND. The effect of soldering, electrowelding, and cast-to procedures on the accuracy of fit of cast implant bars. *Implant Dent* 1996;5:163-8.
9. Romero GG, Engelmeier R, Powers JM, Canterbury AA. Accuracy of three corrective techniques for implant bar fabrication. *J Prosthet Dent* 2000;84:602-7.
10. Jeong CM, Jeon YC, Lim JS. Flexure strength of cast-joined connector with Ni-Cr-Be alloy. *J Korean Acad Prosthodont* 1998;36:858-66.
11. Jeong CM. Effect of the undercut in retention grooves on flexure strength of cast-joined connector with Ni-Cr-Be alloy. *J Pusan National University Hospital* 2000;8:221-7.
12. Bertolotti RL, Napolitano LH. Strength of cast-joined non-precious alloy frameworks. *J Dent Res* 1984;63(special issue):208(abstr no. 334).
13. Son HO, Lee TJ, Jeong JH, et al. *Dental anatomy*. 5th ed. Seoul:Jeesung Publishing Inc.;2001. pp. 151-7, 179-92.
14. Wheeler RC. *Dental anatomy, Physiology and occlusion*. 6th ed. Philadelphia;WB Saunders; 1984. pp. 184-287.
15. Carranza FA. *Glickman's clinical periodontology*. 7th ed. Philadelphia;WB Saunders; 1990. pp. 47-8.
16. Goel VK, Khera SC, Gurusami S, Chen RC. Effect of cavity depth on stresses in a restored tooth. *J Prosthet Dent* 1992;67:174-83.

17. Farah JW, Craig RG, Meroueh KA. Finite element analysis of three- and four-unit bridges. *J Oral Rehabil* 1989;16:603-11.
18. Khera SC, Goel VK, Chen RC, Gurusami SA. A three-dimensional finite element model. *Oper Dent* 1988;13:128-37.
19. Morris HF. Veterans Administration Cooperative Studies Project No. 147/242. Part VII: The mechanical properties of metal ceramic alloys as cast and after simulated porcelain firing. *J Prosthet Dent* 1989;61:160-9.
20. Benzing UR, Gall H, Weber H. Biomechanical aspects of two different implant-prosthetic concepts for edentulous maxillae. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1995;10:188-98.
21. Howell AH, Manly RS. An electronic strain gauge for measuring oral forces. *J Dent Res* 1948;27:705-12.
22. Rabinowicz E. Friction and wear of materials. 2nd ed. John Wiley & Sons Inc.;1995. pp. 117.
23. Thoupos GA, Zouras CS, Winkler S, Roussos VG. Connecting implant framework segments. *Implant Dent* 1995;4:97-9.
24. Smyd ES. Dental engineering. *J Dent Res* 1948;27:649-60.
25. Yang HS, Lang LA, Felton DA. Finite element stress analysis on the effect of splinting in fixed partial dentures. *J Prosthet Dent* 1999;81:721-8.
26. Jeong CM, Lee HY. A finite element stress analysis of the stress distribution and the shock absorption in an osseointegrated implant-natural tooth supported fixed partial denture. *J Korean Acad Prosthodont* 1992;30:582-610.

Three-dimensional finite element analysis for the effect of retentive groove design on joint strength of casting connection

Jung-Woo Kim¹, DDS, MSD, Chang-Mo Jeong^{2*}, DDS, MSD, PhD,

Young-Chan Jeon², DDS, MSD, PhD, Mi-Jung Yun¹, DDS, MSD

¹Graduate Student, ²Professor

Department of Dentistry, Graduate School, Pusan National University

Statement of problem: A casting connection technique is widely used for repair, correction and addition to base metal framework. However, a casting connection technique may increase the risk of failure in clinical situations when high stresses exist. **Purpose:** The purpose of this study was to investigate the mechanical retentive groove design comparatively to increase the joint strength by using the three-dimensional finite element analysis model of a 3-unit fixed partial denture. **Material and methods:** Ten finite element models were constructed. (Model A: One retentive groove, Model B: Two retentive grooves, Model C: Three retentive grooves, Model D: Four retentive grooves, Model E: One horizontal groove and two vertical grooves, Model F: Two horizontal grooves and one vertical groove, Model G: One groove with the enlarged dimension, Model H: Two grooves with the enlarged dimension, Model I: One groove with the increased height, Model J: One groove with the increased width of base). The vertical force was applied to the mesial and the distal fossa to the casting connection of mandibular first molar. **Results:** The main factors, affecting joint strength of casting connection were both the retention between the primary cast and the secondary cast and the thickness of the primary cast remaining after preparing retentive groove. The increase of retentive force, according to the numbers and the dimension of retentive groove had an effect on distributing stress. However, in some cases, the increase of retentive force resulted in the increase of stress by reducing thickness of the primary cast in the connection area. **Conclusion:** The design of retentive groove that limits number of retentive groove for metal thickness and increases the depth of retentive groove for retention is highly recommended. (*J Korean Acad Prosthodont* 2009;47:29-38)

Key words: Casting connection, Retentive groove, Joint strength, Three-dimensional finite element analysis

Corresponding Author: **Chang-Mo Jeong**

Department of Dentistry, Graduate School, Pusan National University, 10 Ami-dong 1ga, Seo gu, Busan, 602-739, Korea

+82 51 240 7438: e-mail, cmjeong@pusan.ac.kr

Article history

Revised June 19, 2008 / Last Revision December 11, 2008 / Accepted December 30, 2008.