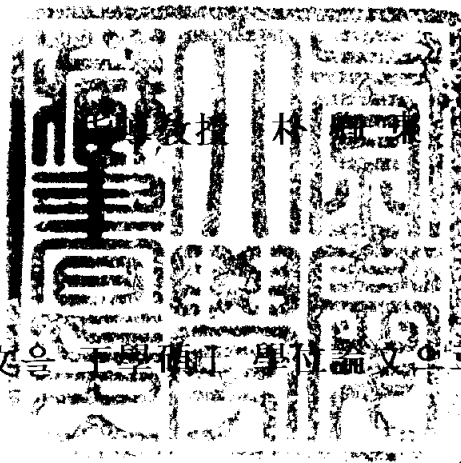


工學碩士學位論文

亞鉛淘金爐製作用鋼의 有限要素解析
및 短期加速 Creep試驗을 통한
信賴性 評價



이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함

2004년 2月

釜慶大學校大學院

機械工學科

柳燦旭

이 論文을 柳燦旭의 工學碩士
學位論文으로 認准함

2003年 12月 26日

主 審 教授 金 亨 資



委 員 教授 金 榮 大



委 員 教授 朴 卿 東



목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 탄소강의 기본개요	3
2.1. 탄소강의 성질	3
2.2. 탄소강의 용도	6
제 3 장 시험재료	8
3.1. 시험재료의 특징 및 선정요인	8
3.2. 시험편	10
제 4 장 유한요소해석	12
4.1. 구조해석	12
4.2. 연성해석	21
제 5 장 단기 가속 크리프 시험	26
5.1. 크리프 시험의 개요	26
5.2. 단기 가속 크리프 시험	27
5.3. 실험결과와 유한요소해석결과 비교 및 고찰	32
5.4. 크리프 시험 파단면의 특성	34

제 6 장 결 론	36
참 고 문 헌	38
Abstract	39

제 1 장 서 론

설계과정 중 적절한 재료를 선정하는 것은 재료를 선정하는 설계의 성공과 관련하여 매우 중요한 결정과정이다. 이 선정과정이 매우 중요하고 어려운 일이라고 생각되는 이유는 현재 사용되고 있는 금속재료의 수가 약 40,000종에 달하고 또한 금속재료가 아닌 다른 재료의 종류도 역시 그와 비슷한 수치에 가까운 현실을 감안하면 쉽게 이해될 수 있다. 재료를 잘못 선정한 경우 부품 또는 장치의 파손의 위험뿐만 아니라 제품가격의 상승을 초래할 수 있다. 최적의 재료를 선정한다는 것은 사용상의 성능을 보장할 수 있다는 것 외에 제품생산을 위한 올바른 생산공정과 관련된 여러 이득을 생각할 수 있다. 고로 잘못된 재료선정은 생산공정의 비용을 증가시켜서 제품의 단가를 상승시키는 요인이 되며 제품이 제 기능을 발휘할 수 없게 할 수 있다. 이와 같은 이유 때문에 재료선정의 기준은 제품의 성능과 관련된 재료의 특성과 생산공정에 관련된 가공성을 동시에 고려하여 결정하여야 한다.¹⁾

많은 경우에 재료선정이 과거의 경험에 의하여 이루어지는 경우가 있으나 과거의 경험이 완전한 해답이 될 수 없는 경우가 많이 있다. 왜냐하면 과거의 재료선정은 성공적인 설계를 위하여 그렇게 중요하게 고려되지 않았으며 과거에는 재료의 종류가 그렇게 많지도 않았고 특성도 다양하지 않았기 때문에 단지 재료편람의 제한된 자료를 이용하여 선정하는 것이 상례인 경우가 있었기 때문이다. 그러나 현대에는 아주 간단하고 분명한 설계이외에는 이러한 재료선정방법이 용납되지 못하는 것이 보통이다. 최첨단 우주 항공 산업 또는 에너지 관련 산업의 경우 올바른 재료선정이 그 부품 또는 장치의 능력 상한선을 결정짓고 있기 때문이다. 또한 제품의 성능이 그렇게 중요하지 않은 제품의 경우 가격이싼 재료를 이용하여도 같은 성능이 얻어지는 경우 제품의 가격을 절감하기 위해 저렴한 재료를 선정할 필요가 있다.

본 논문의 실험재료로 사용된 강재는 최고 500℃의 고온에서 Pb(용융점 327.4℃)와 Zn(용융점 419.5℃)을 용융 상태로 유지하는 용융로로 사용되는 재료이다. 때문에 고온사용환경을 감안하여 충분한 인성과 연

성을 확보하기 위해 강도가 저하됨에도 불구하고 탄소와 규소의 함유량을 극소로 낮춘 재질로서 저렴한 생산가격으로 고온에서의 사용목적과 외부에서 가해지는 열원을 소실 없이 전달할 수 있는 성능을 만족시키는 것에 목적을 두었다. 본 논문에서는 기초적인 재료시험과 크리프실험을 통해 이 강재의 기계적 특성을 알아보고 더불어 구조 및 열에 대한 유한요소해석을 통하여 현장에서 실제 사용되는 구조하중과 고온환경조건에서의 열하중을 부하하여 재질의 신뢰성을 파악해보고자 한다.

제 2 장 탄소강의 기본개요

2.1. 탄소강의 성질

2.1.1. 물리적 성질

금속은 크게 철과 비철로 나누어지고, 철은 함유된 탄소량에 따라 세분화된다. 철과 탄소의 합금 중 탄소량이 0.04~2.1(wt%) 정도인 것을 강이라 부르고, 그 이하는 ‘철’ 그 이상은 ‘주철’이라 한다.

탄소강은 철과 탄소를 주성분으로 하는 강이며, 철에 함유되어 있는 탄소(C)는 미량으로서도 그 성질에 큰 영향을 미친다. 탄소강은 탄소량이 증가함에 따라 용융점, 밀도, 선팽창 계수, 열전도율 등은 감소하고, 비열, 전기저항 등은 증가한다.

2.1.2. 기계적 성질

탄소강의 기계적 성질은 탄소함량에 따라 변한다. 경도, 인장강도, 항복점 등은 탄소함량과 더불어 증가하여 공석강(0.8% C)에서 최대가 되고, 연신율, 단면 수축율 및 충격값 등은 탄소함량의 증가에 따라 감소한다. 따라서 저탄소강일수록 가공성이 우수하다.

탄소강의 인장강도와 경도는 온도가 올라가면 약 100℃ 부근에서 상온 때보다 약간 낮아지고, 200~300℃에서 가장 높으며, 그 이상의 온도에서는 급격히 떨어진다. 또, 연신율은 200~300℃에서 최소값을 나타내고, 온도가 상승함에 따라 그 값은 증가한다. 충격값은 400~500℃ 부근에서 가장 낮다. 탄소강은 200~300℃ 부근에서 단면 수축율과 연신율이 상온보다 낮아지고, 인장강도와 경도가 커져서 깨지기 쉽게 되는데, 이 온도는 연마한 철강의 표면이 청색으로 변하는 온도에 해당하므로 이때의 메짐을 청열취성(blue shortness)이라 한다. 일반적으로 이러한 원인은 질소의 영향으로 알려져 있다. 철강이 함유되어 있는 S의 양이 많을 때 또는 Mn 함량이 적을 때, 황은 철과 결합하여 FeS를 생성하여 약 950℃전후의 고온에서 적열취성(red shortness)을 일으킨다. 또, 상온에서 충격값이 매우 낮고 취성이 있는 성질을 상온취성(cold shortness)이라고 하는데, 이는 철강에 P가 함유된 경우에 나타난다.

2.1.3. 탄소이외의 원소가 탄소강에 미치는 영향

탄소강은 Fe와 C와의 합금이라고 말할 수 있으나 실용되고 있는 탄소강은 Fe과 C이외에 Si, Mn, S, P, Cu 등의 원소와 가스를 품고 있을 수 있는데 이는 선철로부터 시작하여 제강시에도 완전히 제거되지 않아 남아 있는 경우도 있고 탈산제를 사용하여 탈산시킬 때 함유되는 경우가 있다. 이러한 불순물들은 대개 미량 함유되어 있으나 때로는 이것들이 탄소강의 성질에 영향을 주는 경우가 있는데 각 원소별의 영향은 다음과 같다.²⁾

i) 규소(Si)

Si는 선철 및 탈산제로부터 함유되기 쉬운 것으로 보통강에 0.3% 정도까지 함유되어 있다. Si는 보통 페라이트 중에 전부 들어가 고용체를 만들게 되므로 큰 영향은 없으나 강의 인장강도, 탄성한계, 경도를 증가시키나 탄화물과 석출물의 응집 조대화를 촉진시켜 재료의 인성을 저하시키고 연신율과 충격값이 감소되어 강을 취약하게 만든다.³⁾

또한 이것은 결정립자를 조대화 시키고 단조결합성을 감소시킨다. 그러나 규소가 1%이하로 함유될 경우 강도는 증가하나 연신율은 거의 변하지 않아 탄소강의 성질에 큰 영향을 주지 않으나 강판, 박판, 세선 등을 제조할 경우 냉간 가공하게 되므로 Si가 함유되어 있으면 가공경화가 일어나 그만큼 가공하기 힘들고 로울, 다이스 등의 소모도 빠르다.

따라서 상기의 것들을 제조하는데 사용되는 Si를 탈산제로 사용하지 않는 것이 좋다.

ii) 망간(Mn)

Mn은 선철중에 존재할 수 있고 또한 탈산제로부터 함유되기 쉬운 것으로 보통강에 0.2%로부터 최고 1%까지 함유할 수 있다. Mn의 일부분은 α -Fe중에 고용되고 나머지는 S과 결합하여 MnS를 형성하는데 이것은 결정립 내에 산재하게 된다.

또한 Mn은 강의 변태점을 낮추는데 0.4~0.6% 정도 Mn이 함유될 경우 A_1 점은 720°C(순Fe-C 726°C)로 낮아져 퀴칭성을 좋게 하여 경화능이 좋아진다. 고온에서 결정의 성질 즉 결정이 조대해지는 것을 감소시키

고 어느 정도까지 강의 연신율을 감소시키지 않으며 경도와 강도를 증가시킨다.

또한 강의 점성을 증가시켜 열간가공이 용이하나 냉간가공에는 나쁜 영향을 주고 공구강에서는 퀴칭균열이 생기기 쉬우므로 공구강을 제조하는데 사용되는 강은 Mn의 함유량을 0.2~0.4%정도로 조정할 필요가 있다. 그러나 유냉으로 퀴칭할 경우에는 Mn의 함유량을 약간 높게 하여도 무방하다.

iii) 인(P)

P은 유해한 원소로서 광석, 연료 등을 통하여 강중에 함유될 수 있는 것으로 제강작업시 탈인작업을 철저히 한다고 하나 보통 0.02%~0.08% 정도 함유될 수 있다.

강중의 P은 Fe의 일부분과 결합하여 인화철(Fe_3P)이라는 화합물을 만드는데 이것은 입계편석하여 재료를 취약하게 만든다. 또한 이 인화철은 확산속도가 대단히 늦어서 어닐링 처리하여도 없어지지 않고 떠모양의 조직으로 남게 된다. 이와 같은 떠모양의 조직은 P이 편석을 이루고 이 편석을 이룬 강은 소성가공할 경우 가공방향으로 페라이트가 층상을 이루며 배열하는 조직으로 충격치를 감소시켜 파괴의 중심이 된다.

P의 성분이 증가할수록 강도 및 경도는 증가하나 연신율은 감소하며 특히 충격값은 현저히 감소한다. 또한 이 충격값은 상온에서 급격히 감소하여 강을 취약하게 만드는데 이것을 상온취성(cold brittleness)이라고 한다. 그러나 온도가 높게되면 인성을 갖게 되어 취성을 염려할 필요가 없으므로 고온도에서의 단조, 압연 등의 가공을 할 경우 아무런 지장이 없다. 이것은 취성에 있어서 S과 다른 것이다.

P의 영향은 C의 함유량과도 밀접한 관계가 있는데 C의 함유량이 많을수록 P의 영향은 커진다.

상기의 Fe_3P 은 MnS 또는 MnO 등과 같이 모일 수가 있는데 이것은 소성가공시 긴 떠모양으로 나타나 고스트라인이라는 파괴의 원인이 되는 결합을 만들게 된다.

iv) 황(S)

선철제조시 연료로 코크스 등이 사용되기 때문에 S이 함유될 수 있다. 그러나 강과 제조시 Fe-Mn으로 탈산시켜 주는 관계로 Mn이 함유되고 Mn이 있으면 S은 MnS이 되는데 이것은 가볍기 때문에 대부분 용강의 표면으로 떠올라 슬래그로 제거된다.

그러나 만약 강중의 Mn이 충분하지 못하여 S이 남게되면 이것은 FeS이 되어 Fe과 공정을 만들어 입계에 층상으로 분포되기 쉽다.

이러한 상태로 분포된 황은 0.02% 정도 이상만 되어도 인장강도, 연신율, 충격값 등을 감소시킨다.

특히 FeS는 용점이 낮기 때문에 열간 가공시 파괴의 원인이 되는데 이것을 적열취성(red brittleness)이라고 한다. 따라서 실용되고 있는 강재의 S 함유량은 보통강은 0.05% 이하로 고급강에서는 0.02% 이하로 제한하고 있다. 그러나 Mn이 충분히 첨가되어 S이 MnS로 되면 이것은 용점이 높고 점성이 좋기 때문에 적열취성이 방지된다.

2.2. 탄소강의 용도

구조용 강재중 압연 강재는 기계 구조물 이외에 건축, 교량, 차량 등의 일반 구조물용으로 사용된다. 압연강에는 용접성, 연성 등을 고려하여 저탄소강이 사용된다.

2.2.1. 일반 구조용 압연강재

일반구조용 압연강재(KS D3503 - 98)는 구조용 강에서 그 사용량이 가장 많은 열간 압연 강재로 SS재(Steel Structure)라 불린다. 주로 림드강(rimmed steel)을 열간 압연으로 강판, 강대, 평강, 형강, 봉강 등으로 가공한 것이다.

SS재는 언제나 압연상태의 것을 기계가공해서 열처리 없이 사용된다. SS재의 단점은 단조성이 나쁘고 전이온도가 높으므로 단조할 때에는 주의하여야 하며 저온용 재료로는 적당하지 않다. 또 용접성도 보장할 수 없으므로 두꺼운 판의 용접을 피하는 것이 좋다. SS재의 인장강도, 항복점(내력) 등의 기계적 성질은 정해져 있으나 P, S 이외의 화학조성

은 SS554 이외에는 규정되어 있지 않다.

SS재의 탄소량은 강종에 따라 다르나 0.30% 이하로 한다. SS540은 고장력강 중에 포함되어 사용되는 경우가 많다. SS330은 용접성과 가공성은 우수하나 강도가 떨어져 많이 사용되지 않는다. 그러나 SS400은 SS재 중에서 가장 많이 사용된다. 즉 교량, 건축물, 선박, 차량 등의 구조용 재료 외에도 비교적 강도가 요구되는 볼트, 너트, 핀, 작은 축 등의 기계요소 재료로 사용된다. 또, SS490과 540은 탄소량이 비교적 많아서 용접성이 떨어지므로 리벳이나 볼트 결합철골 구조물용으로 사용된다.

2.2.2. 용접구조용 압연강재

용접구조용 압연강재의 형상, 용도는 일반구조용강과 거의 동일하나 특히 용접성을 고려한 열간 압연강재이다. 용접부의 취성과 저온취성이 문제될 수 있는 건축, 교량, 선박, 차량, 석유저장 탱크 등의 용접 조립용 일반구조용재로 널리 사용된다. 용접구조용재로 사용하기 위해서 C량의 상한을 제한하여 용접성을 높이고, 그 대신 필요한 강도를 얻기 위해 Si, Mn을 탄소강 이상으로 첨가한다.

화학성분에 대한 일반적인 경향은 0.2% C이하, 1.5% Mn이하, 0.55% Si이하로 조정하여 강도를 확보하고 있다. Mn은 용접할 때 침입하는 산소와 결합하여 탈산작용을 함과 동시에 결정립을 미세화하고 페라이트를 강화하는 작용을 한다. 최근 기계구조물의 용접화가 진전되면서 용접성이 우수한 강재의 중요성이 요구되고 있다. 따라서 용접구조용 강재는 고장력강에 포함되거나 그 기초가 된다고 볼 수 있다.

제 3 장 시험재료

3.1. 시험재료의 특징 및 선정요인

재료 선택은 매우 어려운 일이다. 왜냐하면 재료 자체의 여러 가지 성질에 관한 자료가 없거나 또는 정확하지 않을 뿐만 아니라 재료가 사용될 제품의 기능이 정립되지 않은 상태에서 선택하려는 재료와 제품에 사용될 경우 제품이 갖는 특성이 정립되지 않고 또 둘간의 상호 제약 특성이 해결되지 않는 상태에서 재료를 선정하여야 할 때가 많기 때문이다. 선정되어야 할 어떤 재료의 성능 또는 기능상의 요구사항은 물리적, 기계적, 열적, 전기적, 화학적 성질로 표시될 수 있다. 재료의 성질은 그 재료를 구성하는 기본성분 및 구조와 그 재료로 제조된 부품의 사용상의 성능을 연결시켜주는 주요 요인이다. 일반적으로 선정되는 재료는 한가지 이상의 요구되는 성능을 만족시킬 수 있는 것이 좋다.

항복강도 같은 기계적 성질을 기존 재료의 그것보다 월등히 높이자면 조성의 변화를 통한 구조의 조절과 제조 공정중의 부가적인 조치를 취하여야 한다. 이 논문에서 취급하는 재료도 강도를 높이자면 Ni, Cr 같은 고가의 합금 원소를 첨가하거나 Quenching, Tempering 같은 열처리를 통하여야 한다. 그러나 합금의 가격은 합금을 구성하는 첨가요소들의 구성비에 따른 각각의 원소의 가격에 의하여 결정되는 것이 아니라 오히려 어느 특성의 불순물의 함량을 어느 수준까지 낮게 유지하도록 하는가에 달려 있을 때가 흔히 있다. 가격대비 성능 지수가 재료 선택을 최적화 하는데 매우 유용한 요건이다.

고온용 기계, 구조물에서는 온도상승에 따른 열팽창이 일어나면 열응력이 생겨 부재에 균열이 발생해서 파괴되는 일이 있다. 이와 같은 현상은 취성재료에서는 열충격파괴, 연성재료에서는 열피로파괴로 나타난다. 열전도도가 작으면 같은 부재내에서 온도와 불균일이 생기기 쉽고 열팽창계수가 큰 재료에서는 열응력이 일어나기 쉽다.⁴⁾

열팽창계수는 온도상승에 따라 점차 크게 된다. 탄소강에 합금원소를

첨가하면 감소하나 austenite stainless 강에서는 탄소강보다 크게 된다. 열전도도는 Fig. 1에서 보듯이 합금원소가 첨가되면 낮아지고 상온에서는 강종에 따라 차이가 크나 고온이 되면 그 차이는 적어진다. 탄소강에서는 변태점까지는 온도상승에 따라 열전도도는 낮아지나 austenite stainless 강에서는 반대로 증가한다. 이와 같이 austenite stainless 강은 탄소강에 비하여 열전도도가 작고 또 열팽창계수가 크므로 고온에서 사용할 때는 열응력의 발생에 대한 대책을 강구하여야 한다.⁵⁾ 따라서 저렴한 생산가격과 고온 사용환경에서의 충분한 연성확보, 열원의 손실 감소, 열팽창의 영향 감소 등의 복합적인 이유로 이 아연도금 로제작용강을 재료로 선택하여 사용하게 되었다.

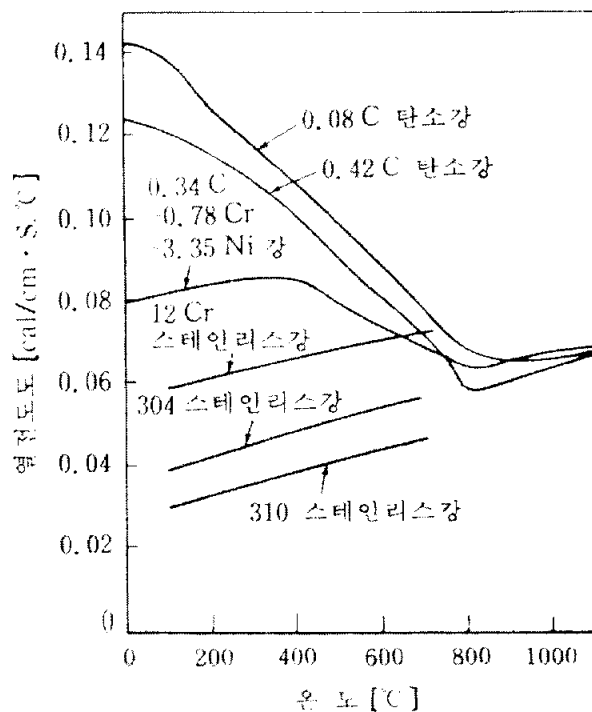


Fig. 1 Correlation between heat conductivity and high temperature

3.2. 시험편

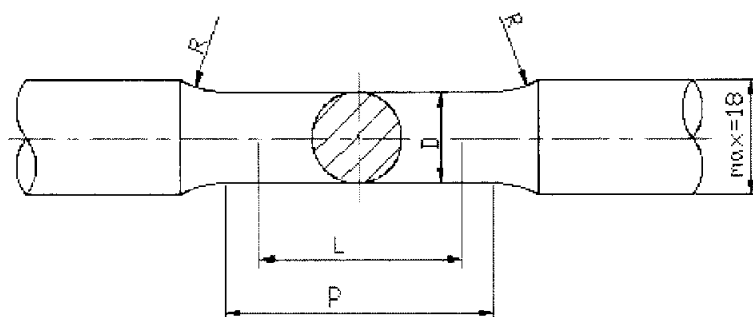
본 연구에 사용된 시험편은 국내 중소업체에서 아연 도금로(Zinc Pot) 제작용으로 탄소와 규소의 함유량을 극소로 낮추어 주문제작한 강이며 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition of specimen (wt., %)

C	Si	Mn	P	S
0.0421	0.024	0.28	0.008	0.003

본 시험편은 인장강도를 측정하기 위하여 한국공업규격 금속 재료 인장 시험편(KS B 0801 제 4호)의 기준에 따라 가공하였다.

Fig. 2는 시험편의 규격으로 아연 도금로의 제작을 용이하게 하기 위해 bending을 실시한 방향인 T-S 방향으로 채취하였다. 그리고 시험편의 평행부내에서 파단을 유도하기 위해 시험편의 정 중앙부에 0.2mm의 노치를 주어 실제 시험편의 직경은 13.6mm로 하여 시험하였다.



표점거리 L = 50 mm 평행부의 길이 P = 약 60 mm
 지름 D = 14 mm 어깨의 반지름 R = 15 mm 이상
 전체길이 250 mm 이상

Fig. 2 Demension of specimen

인장시험은 만능재료시험기인 UH F100A(100 ton, Shimadzu Co.)를 사용하여 하중속도 2mm/min로 실온에서 position제어방식으로 길이방향 인장 시험하였다. 게이지 간격 50mm의 연신률 측정장치 extensometer ST50-50-25(Shimadzu Co.)를 시험편의 평행부에 부착하여 변형량을 측정하였다. 실험 후 얻은 응력-변형률 그래프와 기계적 성질의 결과를 Fig. 3과 Table 2에 각각 나타내었다.

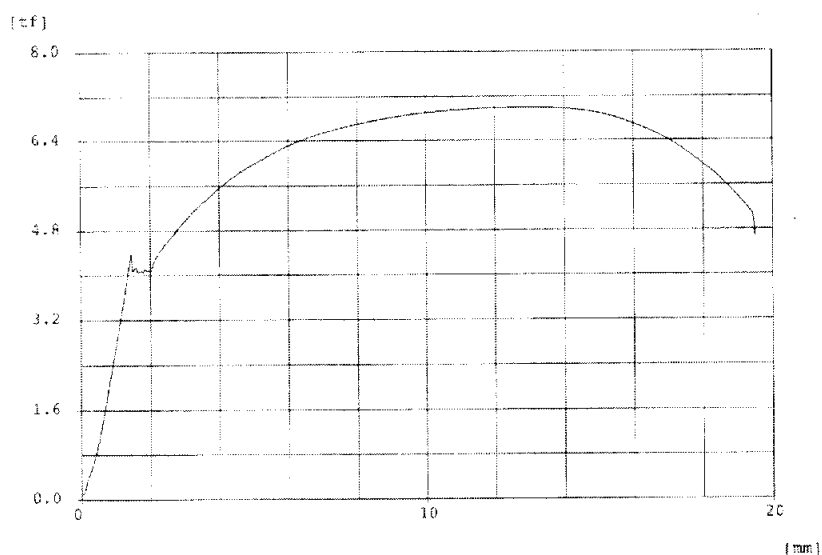


Fig. 3 Stress-strain curve the specimen

Table 2. Mechanical properties of specimen

tensile Stress (MPa)	yield Stress (MPa)	elongation (%)
471.61	293.86	31.35

제 4 장 유한요소해석

유한요소법에 의해 계산된 결과는 모델링을 구성하는 mesh의 형태와 크기, 그리고 비율에 따라 많은 차이를 나타낸다. 유한요소법에서 촘촘한 mesh가 항상 정확한 결과를 계산하지 못한다. 오히려 계산결과가 발산하여 오차범위가 더 커질 수도 있을 뿐만 아니라 계산과정이 지나치게 성글게 mesh를 만들면 계산과정은 단축되지만 필요한 지점에서의 계산결과를 얻지 못할 수도 있다. 이 때문에 적합한 mesh를 결정하는 것이 중요하다.⁸⁾

아연 도금로에 부하 되는 구조응력과 열응력의 영향을 조사하기 위하여 실제조건과 같이 경계조건을 주어 각각의 경우에 아연 도금로에 발생하는 응력의 변화를 알아보았다. 구조물에 작용하는 하중은 열응력을 고려하여 구조해석을 먼저 실시하고 이어서 열응력의 영향을 알아보기 위해 연성해석을 구분하여 수행하였다.

4.1. 구조해석

아연 도금로의 해석모델은 유한요소 상용 코드를 이용하여 Fig. 4와 같이 Solid 요소를 사용하여 모델링 하였다. 유한요소모델(Finite element model)에는 8절점의 솔리드 요소(8-node 3D structural element)를 사용하였다. 일반적으로 구조해석에서 용접부위를 모델링 하지 않고 용접 결함을 고려하여 10% 낮은 탄성계수를 사용한다.⁹⁾

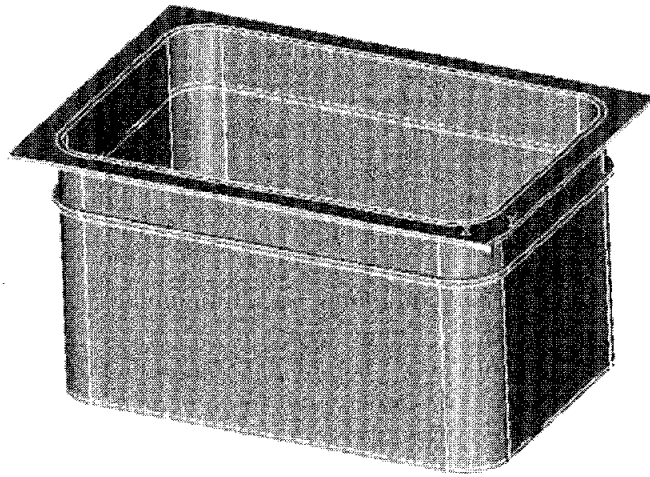


Fig. 4 Zinc Pot Finite element model

아연 도금로의 모든 하중조건에 대하여 경계조건은 하부 위치에서 3축 방향 변위를 구속하였다. 사용된 node 및 element수는 각각 16,868개와 14,075개이다.

아연 도금로의 중량은 Table 3과 같으며, 작용하는 하중조건은 Table 4에 요약되어있다.

Table 3. Zinc Pot's weight and environment temperature

	weight	remark
Zinc Pot	14ton	
Pb	165ton	s = 11.4
Zn	20ton	s = 6.9
temperature	500℃	MAX

Table 4. The summary of load at Zinc Pot

load condition	value	direction	form
weight	neglect	neglect	neglect
vertical load	201096 Pa	direction-Y	distribution load
horizontal load	201096 Pa	direction-X	un-distribution load

아연 도금로의 하부 전면에 내화 벽돌의 고정으로 자중에 의한 하중 조건은 무시하였다. Pb와 Zn에 의한 하중은 고온의 상태에서 유체의 상태로 존재하므로 정지유체의 압력으로 보며, 최대 상태를 고려하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{비중량} \times \text{높이} = \text{압력} \quad \rightarrow \quad 11.4 \times 9800 \times 1.8 = 201096 \text{ Pa}$$

정지된 유체의 면압에 작용하는 깊이에 따른 비균일 분포하중을 적용하였다. 주문제작강이므로 재료 물리적 성질이 정립되어 있지 않아 이 재료와 가장 유사한 화학적 물성치를 지닌 표준재료 JIS SS400 재의 물성치로 대신하였다.¹⁰⁾ 그 수치는 다음 Table 5와 같다.

Table 5. Physical property of specimen

	property
modulus of elasticity	2.663×10^5 MPa
Poisson's ratio	0.28
thermal conductivity	64W/m · K
coefficient of heat expansion	1.88×10^{-5}

Fig. 5는 Deformed mesh를 나타내며, Fig. 6은 아연 도금로의 전체 응력 분포를 나타낸다. 그리고 전체 응력 분포 중 최대응력집중은 Fig. 7에서 나타난 것과 같이 아연 도금로 하부 안쪽 corner 중심부근에서 발생되고 있다. 중심부 부근에서 변형과 응력은 횡방향이 종방향에 비해 큰 것으로 나타났다.



Fig. 5 Deformed mesh

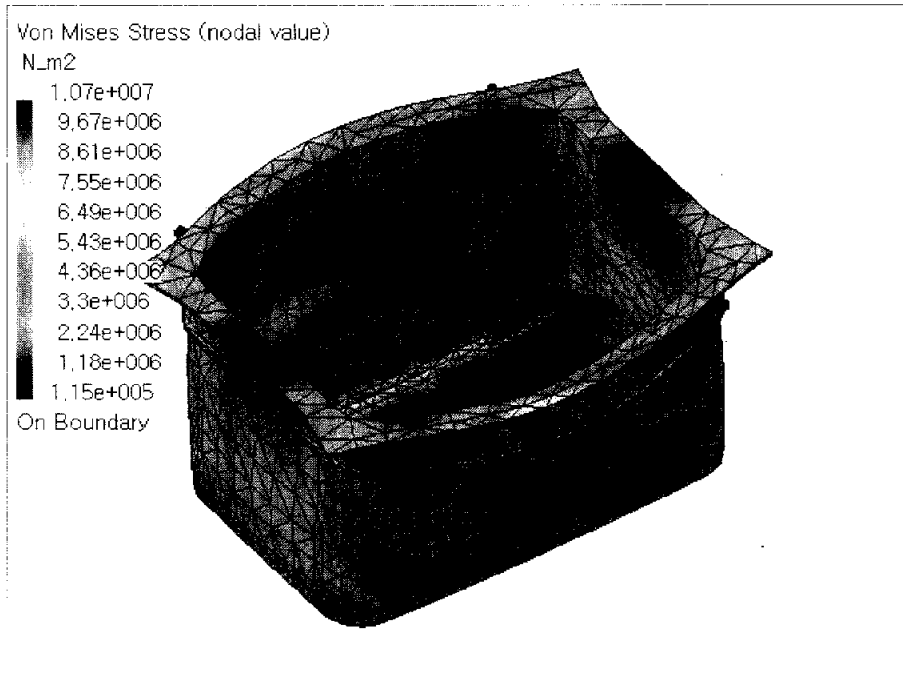


Fig. 6 Distribution of stress at whole model

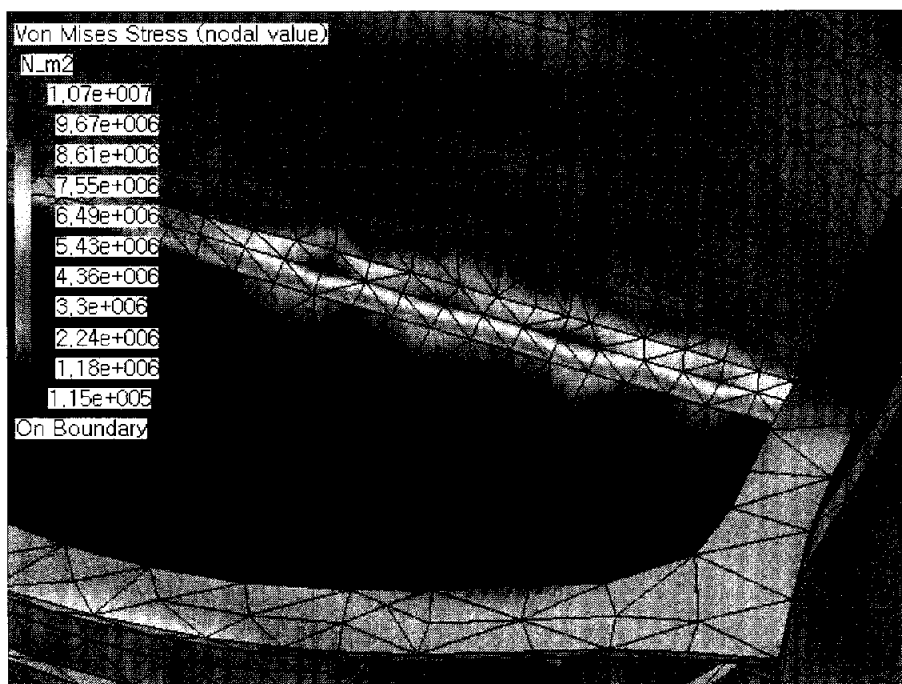


Fig. 7 Distribution of stress at stress concentration part

구조해석에서의 최대응력부 응력분포는 Fig. 8, 9에 나타내었다.

아연 도금로의 형상과 하중이 대칭이므로 해석대상의 1/2을 모델링 하였다. ¹¹⁾ Fig. 9에서 보듯이 최대응력은 아연 도금로 내측 하부 corner 부에서 나타나고 있으며, 하중조건에서 최대응력은 재료의 항복강도보다 적절히 작은 값을 나타내었다.



Fig. 8 Result of stress analysis at a cross section



Fig. 9 Result of stress analysis at a stress concentration part of cross section

4.2. 연성 해석

고온, 고압 하에서 사용되는 구조물의 경우 정적, 동적 하중조건하에서 발생하는 응력외에도 일정하지 않은 온도분포로 인한 열팽창과 이로 인한 응력의 발생도 중요한 관심 대상이 되는데, 이때 복잡한 운전조건하에서의 구조물 내부의 열전달 해석이 필수적이며, 열전달 해석의 결과로 얻어지는 구조물의 정확한 온도분포는 열응력을 계산하는데 중요한 요소가 된다. ¹²⁾

연성해석이란 두가지 이상의 해석분야가 복합된 해석을 말한다. 이 논문에서 적용하게될 열전달 해석과 구조해석이 복합된 문제가 그 대표적인 예라 할 수 있다. ANSYS에서는 두 해석분야의 문제를 동시에 풀 수 있는 연성요소를 사용하여 한번에 풀 수도 있지만, 대부분 한 가지의 해석을 우선 수행하고 그 결과를 다른 해석에 하중으로 적용하는 간접 연성 해석 방법으로 행하는 것이 더 보편적으로 수행된다. 다음의 Fig. 10은 열-구조 연성해석의 전체적인 흐름도이다.

열-구조 연성 해석의 흐름

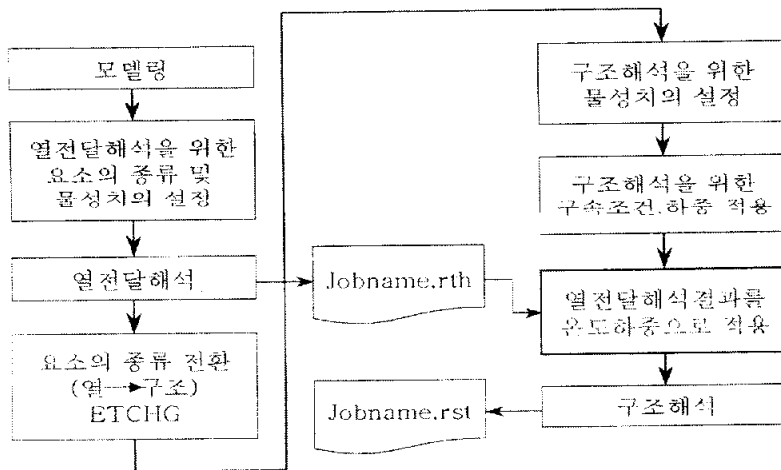


Fig. 10 Flow chart of thermal-structure couple field analysis

Fig. 11, 12에 전체적인 열분포를 나타내었다.

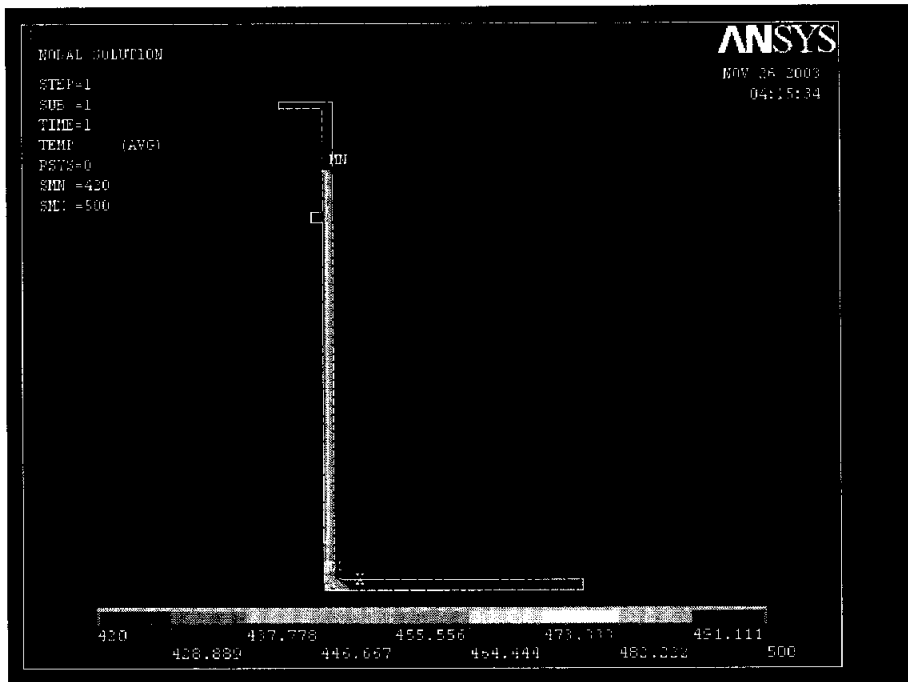


Fig. 11 Result of heat distribution at a cross section

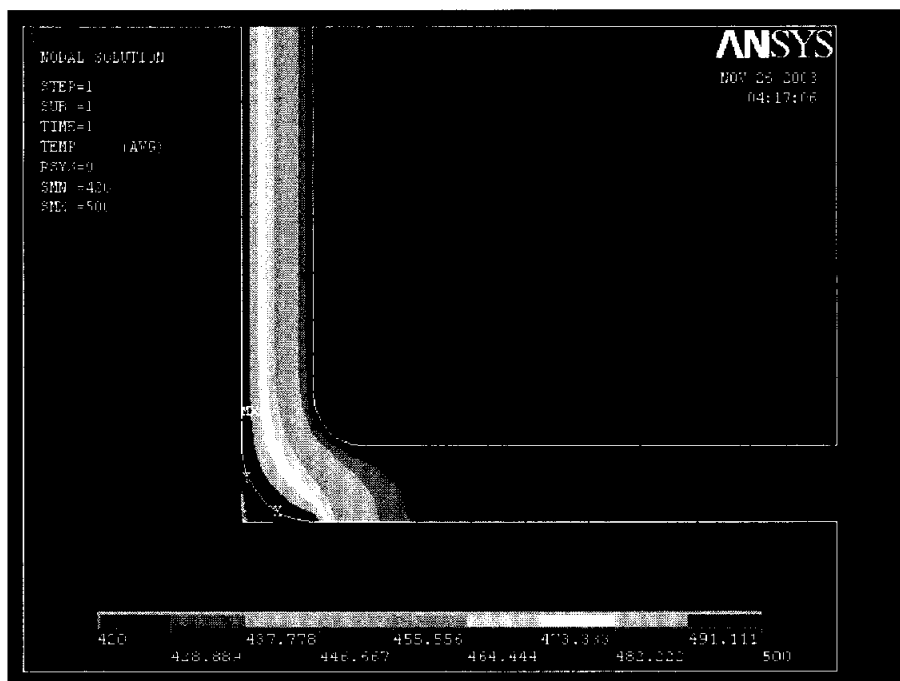


Fig. 12 Result of heat distribution at a cross section (Enlarged)

Fig. 13, 14에 열응력의 분포를 나타내었다. 열응력을 고려한 경우에는 하중조건에서 최대응력이 구조해석에 비해 다소 높은 값을 나타내었다.

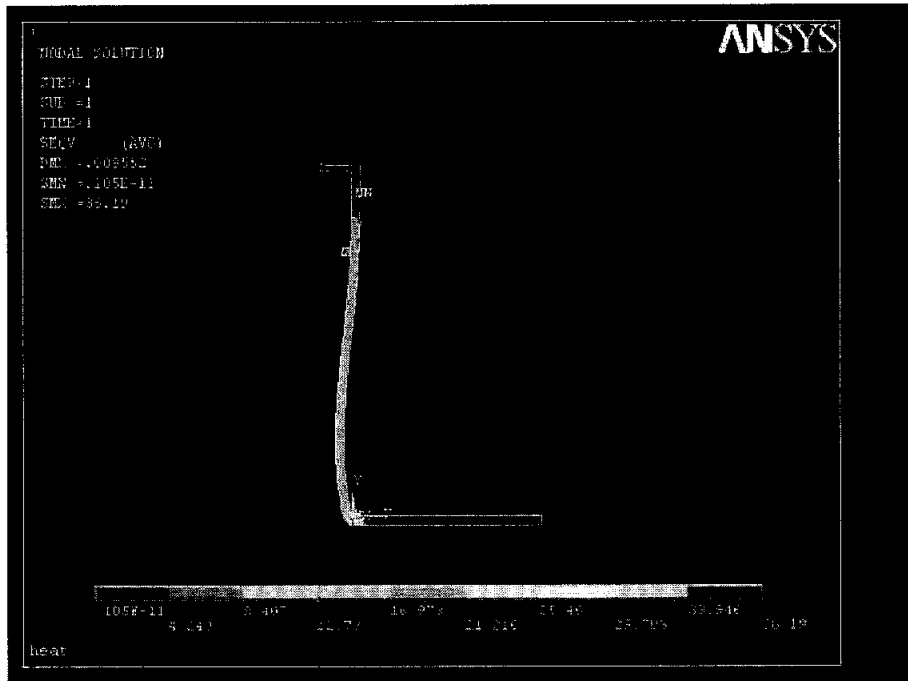


Fig. 13 Result of thermal stress analysis at a cross section

제 5 장 단기 가속 크리프 시험

5.1. 크리프의 개요

재료에 어떠한 일정한 하중을 가하고 어떤 온도에서 긴 시간동안 유지하면 시간이 경과함에 따라 변형이 증가된다. 이 현상을 크리프라고 하며, 그 결과로서 일어나는 파괴를 크리프파단(rupture)이라고 한다. 크리프 변형을 ε 이라 하고, 시간을 t 로 하였을 때, $d\varepsilon/dt$ 를 크리프율 (또는 크리프속도)이라고 한다. 크리프율은 온도의 영향이 크며 실제로 금속에서는 $T_M/2$ (T_M : 용점, K) 이상의 온도가 되면 실용적으로 크게 문제가 된다. 저온에서는 변형에 따라 가공경화가 일어나지만, 고온에서는 가공경화에 수반하여 회복연화가 진행하기 때문에 크리프가 현저해진다. 따라서 회복연화하기 쉬운 재료는 저온에서는 강력하더라도 고온에서도 역시 강력한지는 알 수가 없다. 고온에서는 조직이 시시각각 변화하는 것이 보통이기 때문에, 비록 단시간 측정하여 얻어진 크리프율은 작을지라도 장시간 동안 측정하면 크리프율이 커지는 경우가 있다. 따라서 고온에서 부하되는 재료의 변형저항은 크리프 실험에 의해 구해야 한다. 용융점이 낮은 금속, 예를 들면 Pb, Cu 등의 순금속 및 연한 경합금 등은 상온에서도 크리프현상이 나타난다. 그러나 철강 및 강력한 경합금 등은 250℃ 이상의 온도가 아니면 현저한 크리프 현상이 나타나지 않는다. 최근에 발달된 제트기관, 로켓, 증기터빈, 가스터빈 등은 450℃ 이상의 고온상태에서 재료가 사용되고, 또한 화학공업에서도 대단히 높은 고온 및 고압에서 사용되는 일이 많다. 그러므로 크리프 현상은 중요한 공학의 문제로 등장하고 있다. 또한 크리프 시험은 고온에서 재료의 변형기구를 해명하는 방법으로서도 널리 행해지고 있다.¹³⁾

크리프율은 절대온도의 상승과 함께 지수함수적으로 증가하기 때문에 온도에는 세심한 주의가 필요하다. JIS에서는 300~600℃에서 $\pm 4^\circ\text{C}$, 800~1000℃에서 $\pm 6^\circ\text{C}$ 이내의 정도가 요구된다.

금속은 고온에서 크리프율이 응력의 3~7승에 비례하여 증가하고, 또한 $\exp(-Q/T)$ 에 비례하여 증가한다(T 는 절대온도로 나타낸 시험온도,

Q는 크리프의 활성화에너지라고 하는 상수이며, 그 금속의 확산 활성화 에너지와 거의 같다). 따라서 시험편의 직경과 온도제어에는 세심한 주의가 필요하다. 표점거리 50mm의 시험편에서 $\pm 2^\circ$ 의 온도변동은 $\pm 2\mu$ 의 신장이 되기 때문에 온도의 변화를 극히 작게 한다.

5.2. 단기 가속 크리프 시험

단시간의 크리프 곡선에서 수년 후의 상태를 예측하는 것은 큰 위험을 수반한다. 그럼에도 불구하고 한정된 시간 내에서 재료의 우열을 비교시키는 부득이한 경우가 많다.

시험에서 얻어지는 기본적인 정보는 일정 온도, 주어진 응력하에서 파단까지 걸리는 시간이다. 파단까지의 연신율, 단면적 감소도 측정할 수 있다. 도표로 나타낼 때는 응력축과 파단 시간을 log-log 관계로 나타낸다. 이런 경우 주어진 온도에서 흔히 직선으로 나타난다.

시험을 마친 후 원하는 데이터를 구하기 위해 긴 시간까지 외삽을 시켜야 한다. 크리프 또는 응력파단 데이터를 데이터가 없는 지역까지 외삽시키는 것은 중요한 일이다. 크리프와 응력 파단 곡선을 장시간까지 신뢰할 수 있도록 외삽시키기 위해서는 구역에서 조직변화에 따른 곡선 기울기의 변화가 없음을 확인해야만 한다. 시험에서 기울기의 변화는 입내 파괴에서 입계파괴로의 변화, 산화, 재결정과 결정 성장 등과 같은 조직 변화나 또는 구상화, 흑연화, 시그마(σ)상의 형성 등과 같은 조직 변화에 기인한다. 이렇게 기울기가 변할 수도 있다는 것을 알아두는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 이러한 기울기 변화를 검출해 내지 못했음에도 불구하고 데이터를 보다 긴 시간까지 연장할 경우에는 심각한 오류를 범할 수 있기 때문이다.¹⁴⁾

실제로는 추정되는 사용온도 근처에서 허용되는 범위내에서 장시간 시험으로 잔여수명을 추정하고 조직관찰, 기계적 특성변화, 기존의 크리프-파단 자료 등과 비교함과 함께 각종 비파괴검사를 병행하면서 열화 정도를 평가하여 교체시기를 결정하게 된다.

실험에 사용한 크리프 시험기는 용량 5ton의 SATEC Model DLF-10 servomaster creep / stress relaxation machine 이다. 시험편 가열을 위한 전기로는 개폐식을 사용하고 제어 장치에 부착된 노의 온도를 제어하는 자동온도 조절장치는 1200℃까지 전 범위의 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, 노 전체의 구간은 Top, Middle, Bottom zone의 3영역으로 온도구배는 2°C 정도이다. 온도 측정은 K type 열전대를 사용한다. 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않은 무부하 상태에서 약 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 원하는 온도까지 가열하고 부하를 작용시키기 전에 시험편의 온도부하가 균일하게 유지되도록 30~40분 정도 균열시킨 후 하중을 작용시켜 시험을 수행한다. 크리프 시험중 발생하는 연신을 측정하기 위하여 시험편의 중앙부, 표점거리 30mm되는 양단에 flange를 기준으로 하여 연신은 extensometer와 LVDT(Linear Voltage Differential Transformer)로 측정하여 제어장치에 부착된 기록계로 기록하여 이들로부터 크리프 곡선을 작성하였다. Fig. 15는 실험에 사용된 장치이고 Fig. 16에 크리프 시험편의 실제 사진과 규격을 나타내었다.

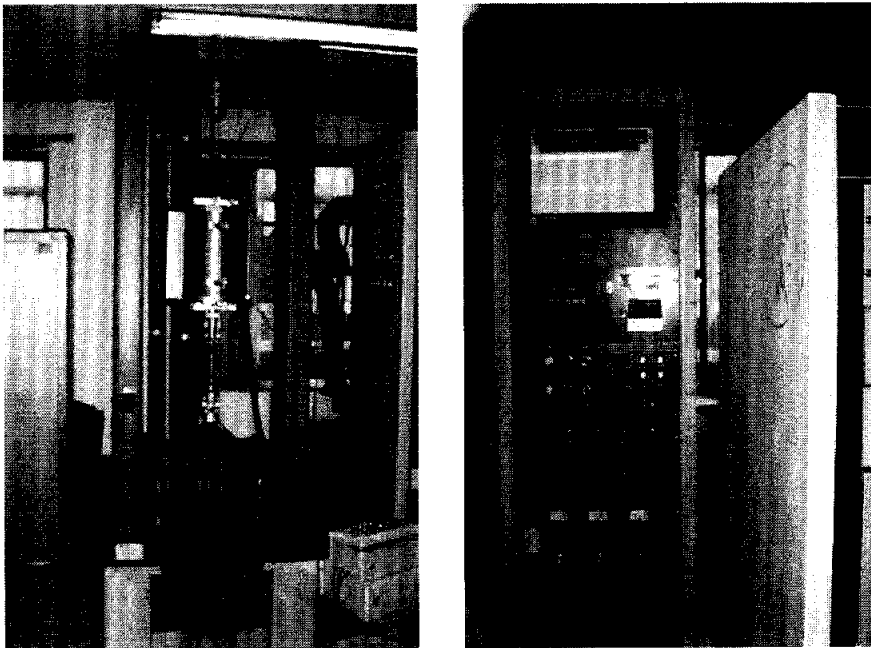


Fig. 15 Apparatus of Creep test machine (SATEC Model DLF-10)

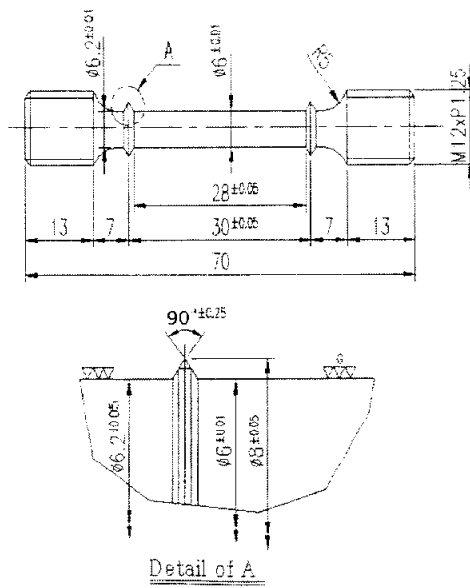
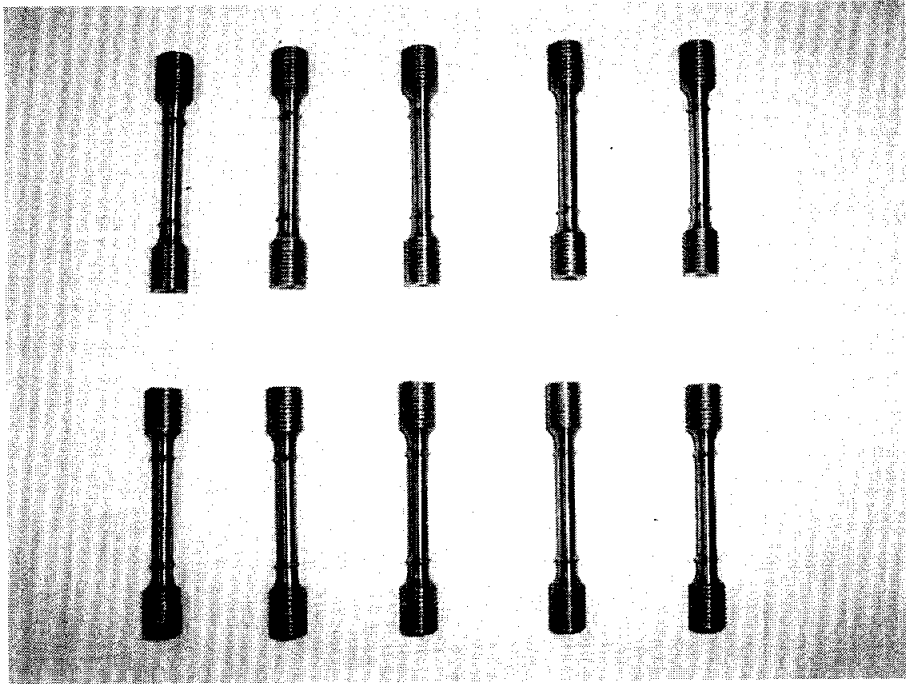


Fig. 16 Picture and dimension of creep specimen

Fig. 17은 이 실험재료의 최고 사용환경 온도인 500℃에서 하중을 150MPa, 200MPa, 240MPa, 260MPa로 각각 달리하여 크리프 시험을 실시한 결과들이다.

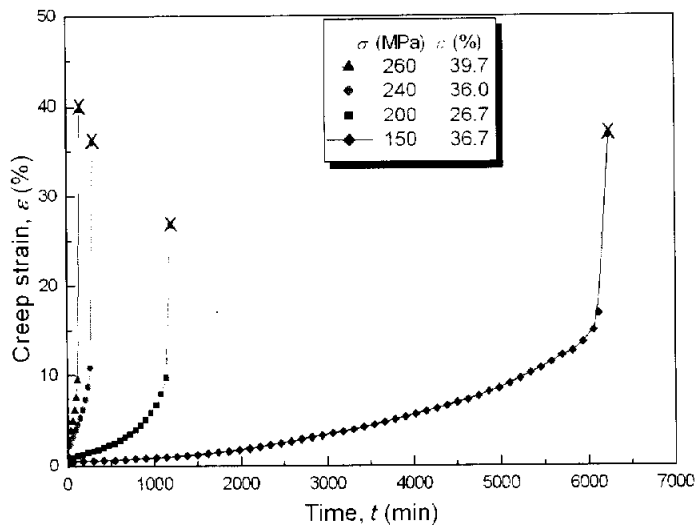


Fig. 17 Creep curve for POS AG steel at 500℃

Fig. 18는 앞선 실험 결과를 토대로 하여 크리프 수명과 크리프 응력을 log-log 좌표로 나타낸 것이다. 강은 500℃까지는 상의 변화가 없기 때문에 선형적으로 이 그래프에 외삽을 실시하면 요구수명인 1년 (530000 min)을 사용할 수 있는 크리프 최대 응력은 약 73 MPa로 나타난다.

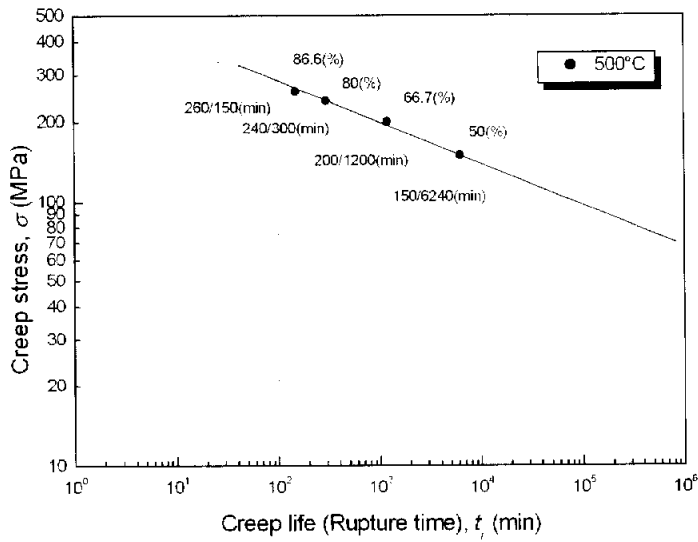


Fig. 18 Diagram of creep stress-strain curve for POS-AG steel

5.3. 시험결과와 유한요소해석결과 비교 및 고찰

Table 6에 재료의 구조적 항복강도와 열적 항복강도 값과 해석 Tool로 구한 이론치를 비교하였다.

구조와 열적으로 최대 약 50MPa 정도의 하중이 부하되는 것으로 조사되었다. 이는 요구수명 1 Year를 충족할 크리프하중 최대값인 73MPa에 비하면 작은 값이긴 하나 안전계수를 고려해 볼 때 2/3가 넘는 고응력에 해당하는 값이다. 고온환경에서 사용할 경우 상당한 무리가 따를 것으로 사료된다.

Table 6. Maximum stress by load of condition (unit : MPa)

condition		yield strength	maximum stress
horizontal	structural	293.86	11.8
	thermal	157.2	38.19

Table 6에 적힌 고온 항복강도 값은 일반적인 탄소강의 성질을 나타낸 그래프인 Fig. 19에서 읽어온 추정치이다.

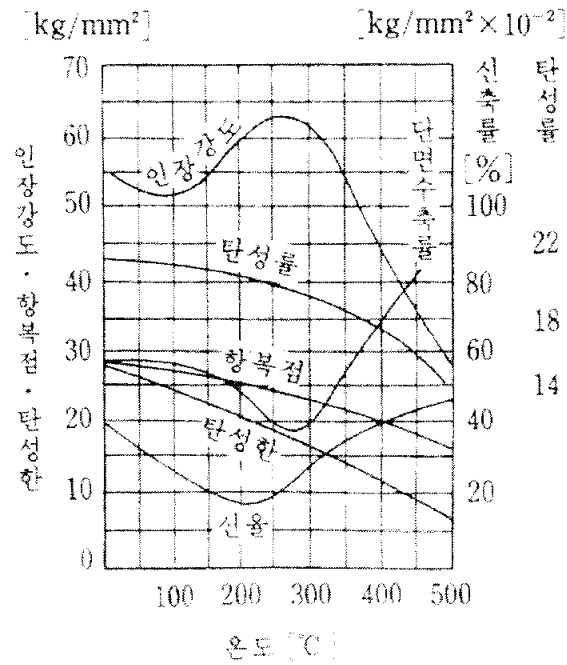
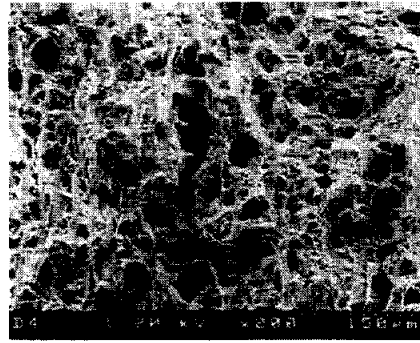
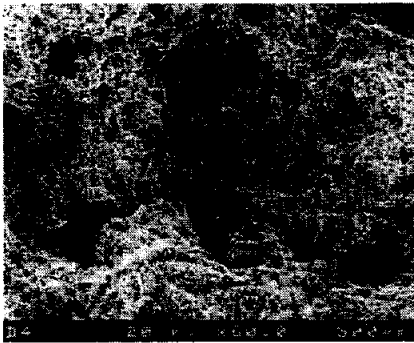


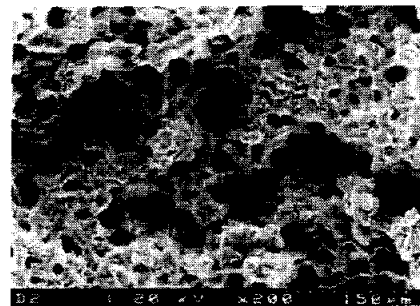
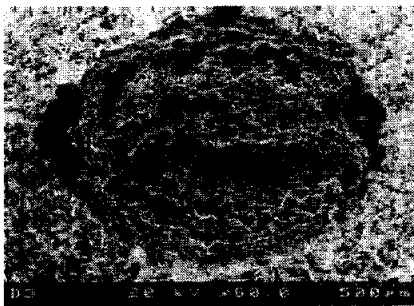
Fig. 19 General characteristic of carbon steel in high temperature

5.4. 크리프 시험 파단면의 특성

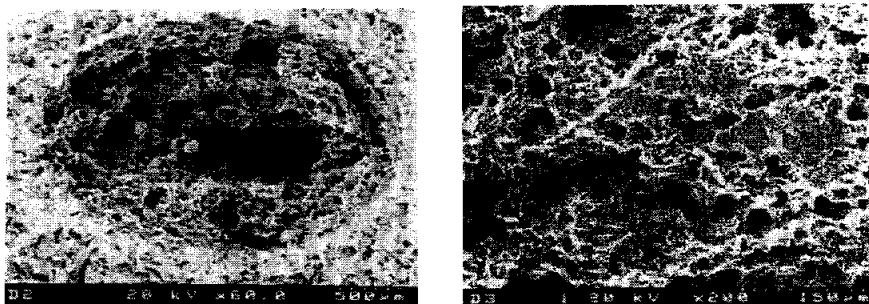
크리프 손상은 파괴가 발생하기 전에 현미경조직 내에서나 또는 파괴 발생 후 파괴표면 근처에 기공이 존재하는 것이 특징이다. 기공이 최대 인장응력 방향에 수직방향으로 진행하는 입계, 특히 석출물에 집중되어 형성된다. Fig. 20에 크리프 시험 후 부하된 압력별로 각 파면의 실물 사진을 나타내었다. 덩플과 유사한 공동형 기공들이 뚜렷하게 관찰되었다.¹⁵⁾ 이들 크리프 손상 기공의 상호성장으로 인해 크리프균열이 초래되는 것이다.



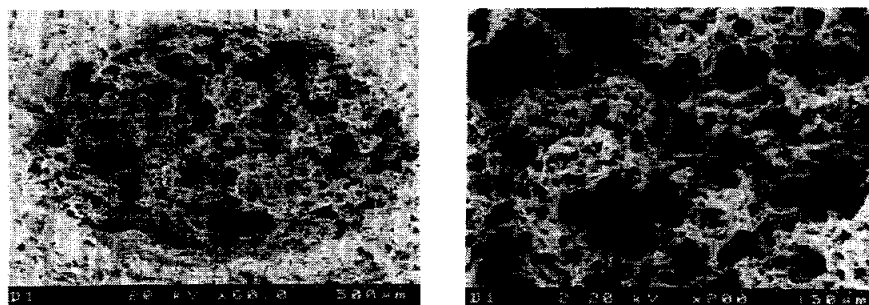
(a) tensile test room tem. ($\times 60$, $\times 200$)



(b) creep test 500°C, 200Mpa ($\times 60$, $\times 200$)



(c) creep test 500°C, 240Mpa ($\times 60$, $\times 200$)



(d) creep test 500°C, 260Mpa ($\times 60$, $\times 200$)

Fig. 20 Fracture surface of specimen

제 6 장 결 론

아연도금로제작용강판의 재료시험과 이 재료를 사용하여 실제 산업체에서 사용되고 있는 규격과 형태로 제작한 아연도금로의 구조해석 및 열응력해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구조해석의 경우 각 하중조건에서 최대응력은 횡방향에서 아연 도금로 내측 하부 corner 중심부에서 발생되고 있으며, 이에 발생하는 최대응력은 항복강도에 비해 이론상 1/25에 해당하는 적절히 작은 값이다.

(2) 열응력 해석의 결과에서 최대응력의 값이 고온항복강도의 1/4을 조금 넘는 크기로 구조해석 결과에 비해 훨씬 크게 나타났다. 어느 방법을 취하는가는 설계구상에 의해 다르지만 현재는 일반적으로 인장강도의 1/3 혹은 항복점의 1/2라는 수치가 허용응력으로 자주 사용되고 있으므로 500℃의 고온환경에서 사용이 가능하다.

(3) 아연도금로의 요구수명인 1 Year를 사용하는데 있어 최대한의 크리프 허용응력은 73MPa 이다. 이는 이 재료에 작용하는 총응력(구조응력과 열응력의 합)보다 큰 값이기는 하나 안전율을 고려해 볼 때 고온에서 장시간 사용시 상당한 무리가 따를 것으로 사료된다.

(4) 크리프의 영향으로 인한 수명단축 외에도 용접부의 열영향, 화실내부의 불균일한 온도 관리, 아연 도금로의 길이방향 하부에 집중되는 응력을 분산시키기 위한 설계변경 등 다양한 변경요소들이 존재한다. 이 모든 것에 대한 영향분석을 수행하여 이 소재의 정확한 물성치를 정립할 수 있도록 해야 하겠다.

이상의 결과로부터 아연 도금로는 충분한 정적강도를 가지고 있는 것으로 판단되나, 고온의 환경에서의 사용을 고려한 설계시 아연 도금로 구조설계와 재료의 크리프 강도에 대한 보다 충분한 검토가 요구된다.

더 정확한 해석 및 설계를 위해서 고온환경에서의 아연도금로재작용강에 대한 장기적인 기계적 실험 및 검토가 필요하다고 사료된다.

재료 선택의 중요한 요점은 그 재료로 제작된 부품 또는 제품이 사용중 어떠한 이유로 파손되는지를 알아 본 후 이 조건에서 파손되지 않을 재료를 선정하는 것이다. 아무리 재료의 특성을 잘 알고 또 요구되는 사용 조건을 잘 안다고 하여도 재료가 감당해야 할 능력에는 어느 정도의 불확실성이 항상 존재하기 때문이다.

※ 참고문헌

- (1) 오정남, 배차현, 조정웅, 노무근, 원창출판사, 최신철강재료, pp.18~20 (1997)
- (2) 양형렬, 김형철, 박인선, 강보안, 송광호, 보문당, 기계금속재료, pp.115~117 (2003)
- (3) 김정태, 과학기술원, 고온재료의 Creep 강화기구 규명 및 물성예측 DB구축, pp.34~38 (2002)
- (4) 양훈영, 문운당, 신 금속재료학, pp.242~246 (1992)
- (5) 김인곤 외 9명, 피어슨 에듀케이션 코리아, 공업재료과학, pp.541~543 (2001)
- (6) 박래윤, 박일부, 대광서림, 비파괴검사공학, pp. 489~496 (2001)
- (7) 박정민, 김태곤, 이규식, 도서출판 효성, 비파괴공학, pp. 228~233, (2002)
- (8) 김경수, 심천식, 이재욱, 조형민, 유한요소법을 이용한 피로하중을 받는 균열선단의 소성영역크기에 대한 연구, 한국해양공학회 추계학술대회 논문집 pp. 151~154, (2002)
- (9) 박형진, ANSYS를 이용한 유한요소해석, 광문각, pp.175~178 (2001)
- (10) 이성규, 한국종합특수강주식회사, 특수강, pp.263 (1978)
- (11) 김지용, 도서출판 계림, ANSYS 예제 모음집, pp. 129~134, (2002)
- (12) 고재용, 시그마프레스, ANSYS와 유한요소법, pp.6~9, (2001)
- (13) 윤한기, 오환섭, 박원조, 최병기, 원창출판사, 재료시험법 입문, pp.260~262 (1994)
- (14) 최종술, 권숙인, 김송희, 회중당, 금속강도학, pp.195~199 (1990)
- (15) 김정근, 박해웅, 도서출판 골드, 금속재료의 균열과 파괴, pp.57~61 (2003)

Reliability Evaluation for POS-AG Steel by Finite Element Analysis and Short-period acceleration Creep Test

Chan-uk Ryu

**Dept. of Precision Mechanical Engineering,
Graduate School of Pukyong National University**

Abstract

Generally as contain a little percentage of carbon as carbon steel decrease at strength and hardness but it increase at toughness and degree of impact. In this thesis deal with a smelting furnace is made of low carbon and low silicon steel put in melting conditions Pb and Zn in high temperature (The maximum temperature is 50 0°C). In spite of strength was weaken, it was reduced the composition of carbon and silicon for get enough toughness and ductility. It is purpose to use in high temperature environment and reduce the lose heat from the outside to a minimum in the lowest cost of production. This thesis study in low carbon · low silicon steel's mechanical characteristic by tensile test and creep test. In addition, it loads real structural load and thermal load to this material for reliability evaluation by structural and thermal finite element analysis.

Key words : Low carbon steel(저탄소강), Short-period Acceleration Creep Test (단기 가속 크리프실험), Finite Element Analysis(유한요소해석), Coupled Field Analysis(연성해석)