

# 建築構造 이론의 發展과 課題

李 甲 造

## 1. 머릿말

건축분야의 탐구는 人間을 대상으로 한다는 관점에서 사회과학, 인문과학계통의 많은 요소를 포함하고 있으며, 아름다워야 한다는 점에서 藝術性이 요구되며 構造物이라는 뜻에서 과학技術性이 필요하다.

建築士로서 업무와 연관하여 생각해 볼때, 비록 건축을 설계, 구조, 시공, 설비등으로 편의상 細分하여 취급하기는 하지만 建築士는 전분야의 고르고, 광범위한 지식기반을 갖추어야 한다고 생각한다.

건축의 업무가 방대하고, 또한 깊어짐에 따라 자기의 전공분야에만 置重하게 되는 경우가 있으며 특히 建築士중에 적지않은 사람은 건축의 藝術性에만 관심을 가진 나머지 構造계의 관심을 의식적으로 피하는 경우도 있다.

건축構造分野탐구의 진정한 의의는 난해한 公式이나 복잡한 수치의 자체에 있는 것이 아니고 건축물을 物체나 構造物으로서 構造學的인 견지에서 이해하고 통찰력을 갖추므로써 합당하게 構造計劃을 세울 수 있도록 하는데 더큰 뜻이 있다.

現在 적지 않는 경우에 구조분야의 역할은 基本設計가 완성된 project 를 정확히 부재치수나 配筋를 결정해 주는 “설계의 하녀”이었다.

이러한 構造分野의 沒理解는 많은 不作用을 가져 왔으며, 시정되어야 할 사항이라고 생각되어 이 분야의 관심을 가진 사람으로써 構造이론의 발달과정을 정리하여 기왕에 배운 여러理論을 새로운 각도에서 이해하고, 또한 선진국의 새로운 構造力學的의 윤곽과 우리나라 실정과 과제, 새로운 力學이론의 중요한 배경이 되는 탄성 이론의 획기적인 발달과 실험기재등에 관한 의견을 발표하여 일반 건축사업무를 담당하는 사람에게는 이 분야에 대한 理解를 돕고, 특히 관심이 큰 사람에게는 전체 윤곽을 정리한 資料로 提供코져 한다.

“우수한 건축은 構造的으로도 우수하다. 라는 말이 있는데 이는 이태리 Nervi 교수의 수많은 작품에서나 丹下健三의 1963년도 東京올림픽 실내수영장등에서 실감할 수 있다.

## 2. 構造理論의 發達과정

비록 오늘날의 構造계 資料는 난해한 기호와 복잡한 數式으로 머리를 혼란시켜 아예 손댈 엄두가 안날 지경이지만 원래는 自然에 대한 소박한 好奇心에서 出發하여 오랜 세월이 걸친 많은 사람들의 실수와 努力으로 점철된 거대한 체제로까지 발전한 것이다.

우리들은 力學교과서를 통해서 이러한 努力의 結果를 무슨法則이다, 무슨原理다 하여 배우고 있지만, 이것들의 歷史이래로 실패와 오류도 포함하여 발전되어 나온과정을 통해서 理解하는 것도 한 방법이라고 생각된다.

이는 최근 加速化된 과학기술의 배경과 함께 構造理論이 방대해 감에 따라 한 特定分野의 전반적인 면에서 位置를 이해하고, 또한 우리나라의 현실적인 課題를 파악하기 위해서도 좋은 방법일 것으로 생각된다.

力學이란 『힘과 변형』을 Numerically, Graphically and Experimentally 규명해 나가는 것이라고 정의 할때 힘과 운동의 관계를 이해하는데도 원시인들에게는 용이하지 않았던것 같다. 기록에 의하면 5500년전 메소포타미아의 Sumer 人들이 수레를 만들어 사용하였다고 하는 바 오늘날 미개인들 중에도 사람의 노력에 의해 만든 움직이는 장치에 놀라움을 나타내는 경우가 있다고 하는데 인간이 두뇌를 써서 힘을 절약하는 노력을 한 시초라고 생각할 수 있다. Egypt의 Pyramid 나, 메소포타미아의 지구 랫트등은 당시 힘에 관한 탐구를 시작하는 중요한 계기이었을 것이다.

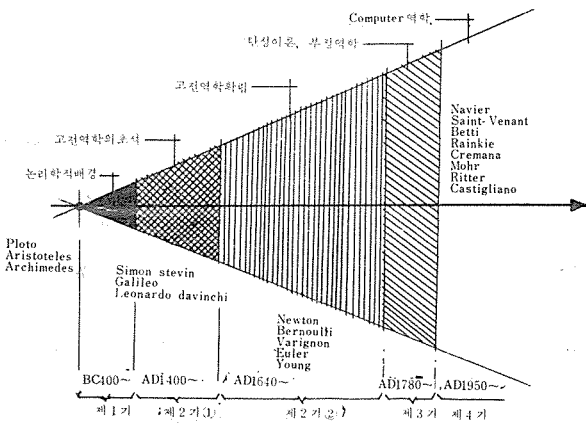
힘의 평형에 관한 법칙을 발견한 Archimedes(287-212 BC)가 “나에게 지렛대만 주면 지구도 움직일 수 있다”라고 한 말에서 이러한 힘에 관한 발전된 견해를 짐작할 수 있다.

그러나 힘에 관한 理論은 우선 다른 학문의 始初와 같이 그리스의 Platon(427-347BC)의 論理的 方法論의 전개에서 비롯된다고 할 수 있으며 이후 Aristoteles(384-322 BC)는 自然현상과 힘에 관한 많은 法則을 만들었으며 많은 오류도 내포하였으나 16C 까지도 별 修正없이 사용되었다.

物理學의 이름아래 力學이 실증적인 방법에 의해 오늘날 학문체제에 까지 연결된 직접적인 礎石을 놓은 사람은 物理學의 아버지”라고 불리는 Galilei Galileo(1564~1642)이었다.

그는 新科學對話(1636)라는 저서에서 진자의 운동, 낙하운동, 쾨티레바시험등 획기적인 이론을 전개함으로써 力學성립의 완벽한 기반을 구축하였다.

이 이후의 발달과정을 도표로 작성하면 (도표-1) 과 같다.



(도표-1) 구조이론의 확장과정표

이후 영국의 Sir Issac Newton(1642-1727)의 큰 업적이 추가되면서 힘에 관한 자연의 탐구는 완전한 골격을 갖추게 되었다.

Newton에 의한 운동법칙, 만유인력의 법칙들은 오늘날 現代構造理論의 중요한 근거가 되고 있으며 이후 미적분등 수학理論이 活用되어 많은 整理가 이루어지고 있다.

뉴턴이후 Pierre Varignon, Bernoulli家의 여러학자들(Jacob Bernoulli, Daniel Bernoulli, John Bernoulli 등), Leonhard Euler, Thomas Young 등이 古典力學의 내용을 充實하게 하는데 공헌을 했으나 이때까지의 연구는 주로 힘의 평형을 중심으로 한 靜定力學이었다.

그러던 중 1825년 Louis Marie Henri Navier가 구조물의 Elasticity를 고려하여 不靜定構造物도 풀이될수 있다고 발표하고 트러스에 이 方法을 적용, 不靜定力學의신기원을 이룩하였다.

이 사실이 構造理論발전의 중대한 전환점이 되어 각국의 학자들은 앞을 다투어 많은 연구발표를 하였는데 이때는 주로 탄성체로써 材料의 応力에 관한 연구, 不靜定解法에 관한 것이 위주가 되었다. 이때의 업적을 나열하자면 Mohr(1835~1918독)에 의한 moment-area method, Mohr's circle, Maxwell Jane Clerk(1831~1879)에 의한 unit-load method Castigliano(1847-1884이)의 최소일의 원리, clay peron (1799~1864 불)의 three moment equation 등을 들 수 있다.

또한 이 시대는 산업혁명이후 놀라운 발전이 이루어 지던 시되었으며, 1824년 영국의 Aspdin이 포트랜드 시멘트 특허를 얻었고 1855년 Simens-martin법, Bessemer 법 등 제련법이 개발되고, 1867년 프랑스의 monier가 철근콘크리트 구조를 착안하였다.

이러한 신재료의 개발로 이론의 영역이 더욱 넓어지고 따라서 意匠면에 까지 큰 영향을 끼쳐 수많은 造型운동이 생겨났고 이어 “바우하우스운동”을통해서 國際建築樣式이 생기게 된 것이다.

사실 材料의 變化는 構造面에는 물론 건축意匠 면에도 큰 영향을 끼치는 것이다. 이러한 사실은 중세이전에는 주로 石材 벽돌재가 사용되어 Arch, Vault, Pylon, Dome flying buttress등의 제한된 의장이었으나 근대재료의 변화로 shell, plate, folded plate, Lamera Skew Grid, P. S concrete, 조립식구조, 고층건물등의 새롭고 자유로운 의장이나 설계가 가능하게 된 사실에서도 알수 있다.

이러한 발전의 또 한차례의 변화기점을 1950년대로 잡을 수 있는데 이는 전자계산기의 개발을 바탕으로 이루어진 것이다.

이전까지는 건물이나 구조물의 규모가 2차원적인 가정에 의해 풀이 될 수 있고 그 오차가 무시될만 했으나 점차 규모가 커지자 이러한 방법으로써는 합리적인 해석이 어렵고 略算式의 개발에도 한계를 느끼던 중 1946년 2월 ENIAC라는 세계 최초전자계산기가 생긴 이래 사회 전반에 걸쳐 깊은 변혁을 일으켰는데 역시 건축구조 이론도 획기적인 발전의 계기를 얻은 것이다.

즉 1850년 Cayley가 개발한 수확의 matrix 이론을 구조이론에 도입하여 computer를 전제로 한 理論편성이 시도되었고, 이미 이루어진 풍부한 탄성역학, 재료역학의 배경과 함께 유한 요소법(Finite element method), 나아가서 System공학과 관련 최적설계(Optimum Design)라는 새로운 학문영역이 전개되고 있다.

1950년대 이후의 발전은 아래 (도표-2)과 같이 細分할 수 있다.

1950년대 (1세대)	기존 구조해법을 Computer에 의해 풀이, 수동 작업량을 줄이는 노력 (연속보의 모멘트 분배법, 트러스해석, 소형라멘)
1960년대 (2세대) 컴퓨터비약의시대	matrix 방법의 대형 program (구조부재 최적설계, Finite element method, 동력학적 구조해석, Topological formulation 등 요소설계의 초기)
1960년중반 (3세대)	대형뿐 아니라 소형개발도 눈부심 (최적설계, Finite element method, 고층건물의 진동주기에 관한 문제)

(도표2) 컴퓨터 구조해석의 발달

또한 과학적인 정밀한 실험시설의 개발(3000t 규모의 초대형 universal testing machine, 전기저항 strain-gage photo-elastic Apparatus)로 실험역학도 중요한 발전을

이룩하고 있는데 지금까지의 구조이론 발전단계의 年表는 아래와 같다.

구 분	년 대	학 자	업 적 및 특 기 사 항
제 1 기 (논리학적 배경의 확립)	BC 400	Plato (1) (427~347BC) Aristoteles (384~322BC) Archimedes (287~212BC)	논리학적인 방법으로 자연현상 탐구 자연현상에 관한 많은 이론-오류 많음 평형법칙, 지렛대의 원리
제 2 기 (고전 역학이 시작됨)	AD 1400 AD 1640 AD 1700	Leonardo da Vinci (1452~1519) Simon Stevin (1548~1620) Galileo Galilei (1564~1642) Sir Isaac Newton (1642~1727) Johann Christian Beame (1654~1705) Pierre Varignon (1654~1722) John Bernoulli (1667~1748) Leonhard Euler (1707~1787) Daniel Bernoulli (1700~1782) Joseph Louis Lagrange (1736~1813) Thomas Young (1773~1829)	비탈면, 관성의 발견 힘의 평행 4 변형 법칙 진자, 낙하운동 단면의 쾨티테버 시험 운동법칙, 관성, 작용반작용법칙, 만유인력 미분방정식 beam elastic curve 모멘트의 정리 principle of Virtual displacement column theory(특히 장주의 좌굴이론) Elastic curve(Euler 식을 근거로 함) Principle of virtual work Torsion, 탄성계수 등 탄성이론의 공헌 이
제 3 기 (부정적 역학이 시작됨)	AD 1780	Louis Marie Henry Navier (1785~1836) Saint-Venant (1797~1886) Clapeyron (1799~1864) Enrico Betti (1823~1892) Karl Culman (1821~1881) W.J. Macquorn Rankine (1820~1872) Luigi Cremona (1830~1903) J. Clerk Maxwell (1831~1879) Otto C. Mohr (1835~1918) August Ritter (1847~1906) C. Alberto Castiglione (1847~1884) ★ Bassemmer, Siemens-Martin 법 등 제련법 개발 (1855) 1855 ★ Monier (1867) 철근 콘크리트 이용법을 개발하기 시작 ★ 1875 미국에 최초의 철근콘크리트 건물이 건축됨 Hennebique (1892) 철근 콘크리트 철골근 보강이론 C. Wilson (1913) 광탄성 이론에 의한 보의 집중하중연구	구조물의 Elasticity 그 러 부정적 구조해석 Navier 지식을 보완한 제자 three moment equation, work-strain energy Betti의 법칙 Graphic statics (Culman 트러스해법) stress transformation equation 크레모나 도해법 Unit-load method, reciprocal displacement theorem Mohr의 circle, moment area method, Williot-Mohr diagram Ritter 법 (트러스 해법) principle of least work
제 4 기 (컴퓨터 역학이 시작됨)	AD 1950	R. W. Carlson (1930)	electric resistance strain gage matrix structural analysis Finite element method Structural optimization

(도표-3) 구조이론 발달과정 년표

### 3. 構造分野現況과 課題

전장에서 概略적으로 구조이론의 발전과정을 살펴 보았다. 이렇게 이루어진 내용은 建築構造분야로서 아래와 같이 区分할 수 있다.

1. 재료역학(mechanics of Materials)
2. 구조역학(structural mechanics)
3. 연속체역학(Continuum mechanics)
4. 매트릭스 구조분석(matrix structural Analysis)
5. 탄성 안정론(Elastic stability)
6. 동역학(Structural Dynamics)
7. 탄성론(Theory of Elasticity)
8. 판과 쉘(Theory of plates and shells)
9. 유한요소법(Finite element method)
10. 철근 콘크리트(Reinforced concrete)
11. 최적설계(structural optimization)
12. 고층건물설계(Design of high-rise structure)
13. 철골 구조(steel structure)
14. 철근 콘크리트 쉘(Design of Reinforced concrete shell)

그런데 최근의 構造이론발전은 짧은 기간동안에 큰 발전을 보여 그 방향을 예측하기 곤란한 지경이고 각 연구기관에서 충분한 재정지원, 조직적인 Teamwork, 인접분야의 신속한 지원협조체재등 거대한 규모로써 발전되고 관련분야가 함께 수시로 世界的인 학술발표회등을 통해 情報를 교환하고 있기 때문에 우리나라의 현 실정상 新理論을 신속히 흡수, 理解하기에도 어려움이 많을 지경이다.

이러한 고도의 研究분위기를 잠시 살펴보면 이론의 실험적인 뒷받침을 하기 위해 실제 건축물을 Model로 지어서 3000t의 universal testing machine,  $10^{-6}$ 까지도 변형을 측정할 수 있는 Electric-resistance strain gage 등 정밀한 시험을 하기도 하며, 재료에 관한 연구로써 미국에서는 현행  $150\sim 300\text{kg/cm}^2$ 의 콘크리트에서  $350\sim 420\text{kg/cm}^2$ 을 개발사용하며, 연구실에서는  $700\text{kg/cm}^2$ 을 제조할 수 있으며, 장래  $1400\text{kg/cm}^2$ 까지도 개발할 수 있다고 하며, 철근재료도 현행  $1600\text{kg/cm}^2$ 의 허용응력을  $4000\text{kg/cm}^2$ 까지 발전시킬 수 있다고 한다.

Computer를 전제로한 matrix구조이론, 유한 요소법, 최적설계도 일련의 관련성을 가지는데 有限要素法은 물체의 要素의 단위의 物理的 성질을 탄성론적인 견지에서 규명하여 미소변형과 응력간의 선형관계식(linear relation)을 이용 기본공식을 유도하고 이에 의해 전체 구조물의 變形 및 応力까지 산출하는 방법으로써, 이 이론은 발전을 거듭해서 탄성체가 아닌 연속고체역학에 도입되었고, 다시 고체만이 아닌 연속체(기체, 유체등도 포함)에 관한 이론으로 확대되고, 이제는 물체가 아닌 어떤 동일한 현상이 일어나는 連續系에 까지 이론범위를 확대하고 있다.

또한 구조해석을 과학적인 관리技法과 관련시켜서 합리

적인 구조설계를 추진하는 최적설계(optimum design)라는 분야를 개척하고 있다.

물론 현재 構造계획이라고 하는 개념적 최적설계(Conceptual optimization)에 까지 미치지 못하고 수리적인 방법에 의한 최적 断面의 추적에서 최적形狀 cost 문제에 까지 도달하고 있으나 아직 이론이 難解하고 관리기 법에 대한 인식도 일반화되지 못해 實用化에는 다소 尠弱하다고 한다.

이러한 背景속에서 우리나라 現實情上 두가지 방향에서 생각할 일이 있는데 첫째는 신이론을 신속히 흡수하는 체제를 이룩하는 문제이며 둘째는 현행 기계적인 구조계산 작업과정을 computer에 의해서 시간을 줄이고 일반 건축인의 구조분야에 대한 인식을 새로히 유도하는 문제라고 생각한다.

우선 신이론도입에 관한 문제는 1962년 KIST에 전자 계산기가 도입된 이래 많은 computer가 도입, 활용되고 있으며 산발적으로 각 대학을 중심으로 신이론이 연구되고 있다.

이와 관련, 건축학회지의 목차를 참고로 하면 1969. 12월 김형걸박사에 의해 matrix구조물해석이 간단히 소개되었고, 간간히 육사출신 학자들에 의해서 그 概念이나人間 정도의 글이 소개되고 있으며 73년 11월 5일부터 10일간 유한요소법에 관한 Seminar가 개최된 바 있으나, 최근에는 이 계통에 관한 글이 빈번히 실리고 있는 실정이다. 또한 토목학회지를 참고로 하면 66년 초 김덕현박사의 multiple shell의 matrix해법이 처음 나타났다가 74년 유한요소법에 관한 동경학술발표회에 참석했던 두 학자(신영기 박사, 유철수 박사)에 의해 유한요소법강좌가 紹介된 바 있으며 최근 토목구조부분은 이 신이론이 주류가 되어 있다.

그러나 앞으로 더욱 체재를 갖춘 신이론에 대한 대비를 위해서는 충분한 수학 또는 어학배경을 구비한 젊은 사람들이 진취적으로 뛰어 들어야 하리라고 생각된다. 외국의 대학에서도 학부에서는 기본이론을 철저히 하고 신이론은 대학원 과정에서 실시하고 있다고 하는데 우리나라는 교과수준은 외국에 비해서 손색이 없다고 하나 응용력과 깊이가 부족하다고 생각된다.

두번째로 현재 구조실무계를 중심하여 문제점을 생각해 보면 일반적으로 과도기적인 상황가운데서 제한된 시공경비로 어려운 여건하에서 수익성을 추구하는 건축주와 그러한 풍토속에서 가장 민감하게 나타나는 것이 우선 藝術性的의 결벽이고, 다음으로 구조물의 安全性에 까지 큰 영향을 끼친다. 이러한 현상은 선진국에서도 20 C전후 나타났던 현상으로 우리나라도 청구대 도괴사건, 와우아파트 붕괴사건등의 사고가 잦았으나 이를 계기로 72년 이후 각 構造別 계산규준이 확립되었다.

그러나 앞으로는 많은 과제가 남아 있으나 특히 구조분야에 대한 올바른 인식을 일깨워 설계자가 자신의 해석과

판단으로 정확한 응력을 산출치 못하더라도 안정성에 지장을 주지 않고 합리적인 설계를 할 수 있는 구조개념과 원리를 일반화시키는 문제나 현재 구조실무자들이 수동작업과 略算式을 활용하는 절차를 전환하여 간단히 사용할 수 있는 program개발과 computer를 익숙하게 하는 노력도 급선무일것으로 생각한다.

4. 탄성이론의 發展배경

항상 理論은 실험의 實証的인 妥当性이 比較, 검증되어야 한다.

현재 構造物의 대다수를 이루는 不靜定구조물의 解析은 材料力学과 탄성이론의 發展으로 부터 가능했고 또한 有

限요소법理論도 이것을 中대한 基반으로 하고 있다.

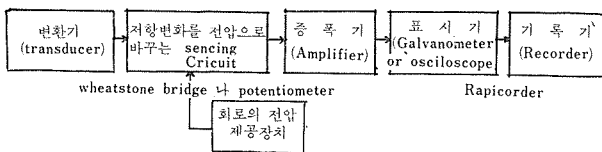
따라서 새삼스러운 시험장치는 아니나 또한 국내에도 여러 곳에 비치되어 사용되고 있는 재료의 應力에 관한 시험장치를 소개함으로써 내용을 간추리고자 한다.

우선 “strain gage”는 원자거리까지 미소한 변위까지도 변형측정이 가능하고 또 탄성이론에 의한 변형과 응력간의 관계식에 의해서 정확한 응력의 解析이 가능한 시험장치인데 정확히는 “Electric-resistance Strain gage”이고 이는 1856년 영국의 Load Kelvin의 “전기저항 변화는 길이 변화에 비례한다는” 실험결과에서 발전된 장치이며 그 발달과정의 도표는 아래와 같다.

연 대	발 표 자	내 용
1856	영 Lood Kelvin	“전기저항 변화는 길이의 변화에 비례관계이다”라고 발표
1878	Tomlison	단위저항에 추가된 저항의 증가를 정량적으로 측정, 저항변화가 재료 치수 변화의 원인이 됨을 규명
1920	P. W Bridgman	kelvin 실험을 재확인함
1930	R. W. Carlson	carlson 형 strain gage(Unbonded gage) 실용화
1935	A. Block	탄소박판사용 bond gage 만듦
1938	E. E. Simons와 A. C. Ruge(미)	금속저항선 사용한 bond gage 발견(현재 사용하는 것)
1940		① 전자관 증폭기 (Brige Amplifier 로 $10^6$ 까지 변형 측정—Computer에 의해 전기적으로 해석) ② Society for ExperimentaI strees anlysis 창립 s

(도표- 4) 전기저항 스트레인 게이지 발달과정

이 장치는 靜的, 動的시험에 모두 이용할 수 있고, 일종의 비파괴시험장치이고 다른 시험장치와 併用될 수 있는데 이 장치의 연결과 외관은 다음과 같다.

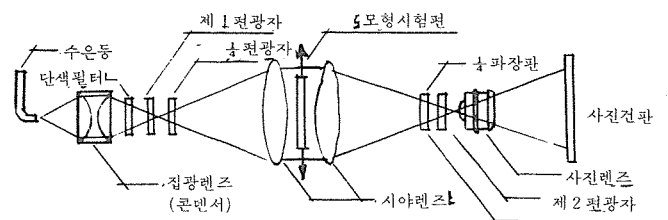


(도표- 5) 전기저항 strain gage의 연결도

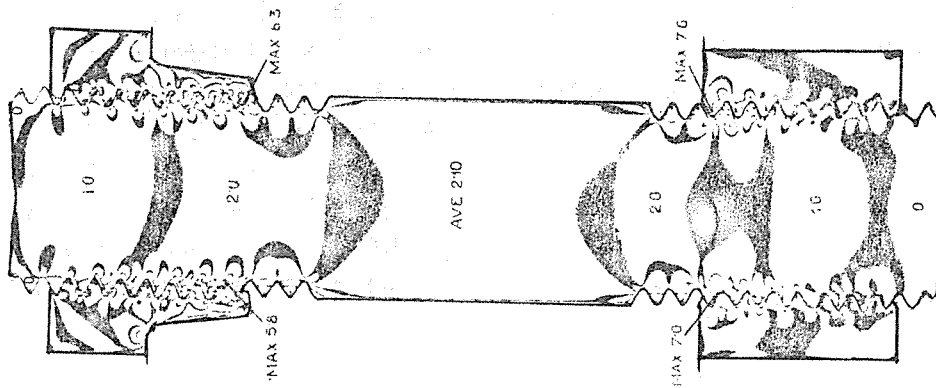
두번째로 광탄성 시험장치(Photo elasticity Apparatus)는 2장의 직교하는 편광 filter 사이에 투명한 탄성체에 힘을 가하면 탄성체 내부조직의 일시적 2중굴절로 인해 내부의 응력상태를 나타내는 천연색사진으로 감광될 수 있는데 이는 원래 물리학자인 영국의 Da' id Brewster가 1816년 이 원리를 발견했으나 이것이 오랫동안 무시되었고 후에 Maxwell에 의해서 이 color pattern과 수학적 이론과의 비교연구가 발표되어(1891) 이것

이 Cwilson에 의한 단순보의 집중하중에 대한 응력연구, A. Mesnager에 의한 아취교의 연구에서 활용된 이래, 큰 역할을 하고 있다.

물론 이 시험장치에 의한 資料에 의하면 Strain gage와 같이 정확한 應力측정은 곤란하고 주응력선은 等色線과 等傾線의 分析으로 파악되어 전체 응력분포상태를 파악할 수 있고 이러한 결과를 바로 일반 구조물의 해석에 참고할 수 있는 것이다.



(도표- 6) 2차원 광탄성 시험장치



(사진-1) 광탄성 시험장치에 의한 볼트내부의 응력사진

이 시험장치는 2차원적인 응력상태를 주로 하여 개발이 되었으나, 최근에는 reflectiontype이 실용화되고, 3차원적인 structure of elastic skeleton에 관한 실험적 연구가 진행중인데, 이 2차원 시험장치의 구성과 이장치에 의한 볼트의 응력사진은 다음과 같다.

#### 5. 맺음말

현재 우리나라의 건축제는 국가발전과 더불어 과도기적

인 현상을 벗어나, 새로운 건축질서의 기틀이 다지어지고 있는데 이를 계기로 구조분야에 대한 올바른 인식을 갖도록 다같이 노력하고, 또한 새로운 외국의 이론을 빠른 시일내에 정착시켜 나가는 노력이 함께 이루어져야 한다고 생각하며 연구논문 형식이 아니므로 참고문헌 인용이나註는 생략하도록 하겠다.

(끝)

三元社건축설계사무소代表