

소성학의 역사 I - 1950년까지 소성역학과 금속소성학의 연구자들 -

小坂田宏造¹

History of Engineering Plasticity and The Pioneers

K. Osakada

1. 서론

소성역학은 1864년 트레스카(Tresca)의 논문으로부터 시작되었을까? 예전에는 소성변형 관련 연구가 없었을까? 트레스카(Tresca)는 어떤 방법으로 항복조건을 도출하였을까? 이러한 질문에 대답하기란 곤란하다. 왜냐하면 학문은 선배 학자들의 성과를 이용하거나 비판하거나 하면서 발전하기 때문이다. 따라서 선인들의 업적뿐만 아니라 그 업적이 어떻게 이루어지게 되었는지를 파악하는 것도 후대 학자로서 의미가 있는 일이다.

소성학에는 소성변형의 역학(소성역학)이나 금속물리(금속소성학)이라고 불리는 기초적인 학문과 이들을 응용하고 있는 금속가공기술과 관련된 학문(소성가공학, 소성공학), 암석의 소성변형에 의한 습곡산맥의 형성 등을 연구하는 지구물리학 등이 포함되어 있다. 1950년 이후, 소성공학에 대한 연구는 폭발적으로 증가하여 저자의 자료수집 능력을 초과하였기에, 본 논문에서는 1950년까지 소성역학과 금속소성학의 연구자들에게 초점을 맞추어 소개하고자 한다.

2. 초기 소성학

2.1 재료역학의 시작

레오나르도 다 빈치(Leonardo da Vinci, 1452~1519)는 논문이나 책을 쓴 적은 없지만 과학이나 기술에 대하여 큰 재산을 남겼다. 그 중에서 철사에 매달려

있는 용기에 작은 돌을 넣어 철사가 파단될 때까지의 하중을 기록하여 철사의 강도를 측정하는 그림도 있다[1]. 따라서 다 빈치가 처음으로 재료강도를 과학적으로 생각하였다고 말할 수 있다.

갈릴레오 갈릴레이(Galileo Galilei, 1635~1704)는 1638년에 출판된 [두 개의 새로운 과학]에서 다리의 강도에 대하여 기술하였다. 다리의 강도에 대한 기술은 디모센코의 [재료역학사]에 상세하게 소개되어 있다.

로버트 후크(Robert Hooke, 1635~1704)는 1683년에 [스프링에 대하여]라는 책을 출판하였고, 이 책에서는 스프링이나 긴 강선에 가하는 힘과 변형 사이에 비례관계가 있다고 기술하였다[1]. 스프링의 탄성에 대하여 생각한 것은 후크가 로버트 보일(Robert Boyle, 1627~1691 기체의 체적과 관련된 보일의 법칙으로 알려져 있는 물리실험학자)의 조수로서 기체의 체적과 압력에 관련된 연구를 수행한 것과 관련이 있다고 생각된다.

2.2 쿠롬

1784년에 프랑스 과학아카데미에서 제출한 철선의 비틀림 실험 관련 논문에서, 쿠롬은(Coulomb, 1736~1808)는 비틀림 진동의 주기로부터 전단탄성계수를 구하였고 비틀림 후의 왕복각도를 측정하였다. 철선의 길이는 243.6mm, 직경은 0.51mm이었고 실험에서 얻은 전단탄성계수는 8200kgf/mm²이었다[2].

비틀림 횡수와 하중제거 후의 회복각도의 실험

1. Osaka 대학 명예교수
- 기술해설 : 塑性加工(日本 塑性加工 學會誌) 第49卷 第 574 号 pp. 1066-1077(2008.11)
- 번역자 : 김영석(경북대학교 기계공학부, caekim@knu.ac.kr), 나경환(한국생산기술연구원, khna@kitech.re.kr)

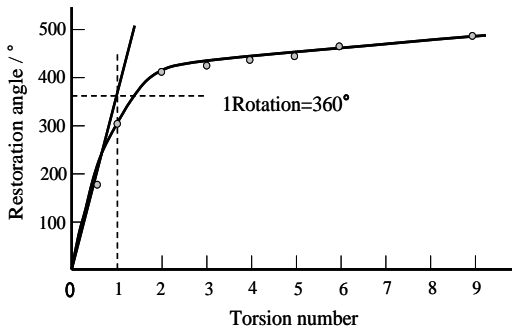


Fig. 1 Change of restoration angle according to the torsion number of steel wire (Coulomb, 1784, Ref.2)

관계를 Fig. 1에 나타내었다. 비틀림 양이 0.5회 이하에서는 거의 완전히 원 위치로 돌아오지만, 그 이후에는 회복 각도가 비틀림 각도보다 작게 된다. 이 현상은 약 0.5회의 비틀림에서 표면으로부터 소성변형이 시작되어 소성영역이 중심부까지 확산되며, 비틀림 양이 2회 이상에서는 전 영역이 소성영역으로 되어 가공경화가 진행된 것으로 해석할 수 있다.

0.5회의 비틀림에서 표면 전단 변형률은 약 0.003이고, 전단탄성계수를 $G=8200\text{kgf/mm}^2$ 으로 하여 전단응력을 계산하면 24kgf/mm^2 정도가 된다. 이 치수는 연강의 항복응력으로는 조금 높지만, 표면의 소성변형이 어느 정도 진행하였다고 생각하면 적합한 값이라고 할 수 있다.

비틀림 변형에 의해 전 영역의 전단응력이 일정한 값 k 에 달하고 있는 선재의 탄성 회복각도를 450° 로 가정하면, 비틀림 전단응력은 $k=50\text{kgf/mm}^2$ 정도로 계산된다. 이 값은 연강의 대 변형에서의 전단변형 값인 $40\sim 45\text{kgf/mm}^2$ 에 가까운 값이다.

쿠룸은 1773년의 논문에서, 압축의 파괴가 전단 응력에 의해 시작된다는 것을 제시하였다. 최대전단응력설의 항복조건을 쿠룸이 최초에 제안하였다고 하는 설도 있지만 그는 항복조건을 취급한 것은 아니다. 또한 쿠룸은 1781년에 마찰에 관한 연구를 수행하고 마찰계수일정(쿠룸 마찰)의 마찰 법칙을 제안하였다.

쿠룸은 파리에서 초등학교를 졸업한 후 공병대에 들어가서, 프랑스 본토에서 멀리 떨어진 서인도 마루치니꾸 섬에서 근무하고 있을 때 최초의 논문(1773년)을 프랑스 과학아카데미에 제출하였다. 고등교육을 받지 못하였지만 쿠룸은 독립적으로 역사에 남을 창의적인 연구를 하였다는 것은 천

부적인 연구재능을 가졌기 때문이라고 생각된다.

2.3 응력-변형선도의 측정

금속의 응력-변형률 선도에 대한 최초의 실험은 1824년 독일 베미쉬 공과대학의 게르스토나 (F. J. Gerstner, 1756~1832)에 의해 수행된 것으로 생각된다. 직경 0.63mm, 길이 1.47m의 피아노선에 연직 방향으로 하중을 가하여 길이 변화를 측정하였다. Fig. 2는 그의 실험결과를 나타낸 것으로 명확하게 영구(소성)변형이 측정되고 있음을 알 수 있다.

19세기 전반기에는 5% 정도의 변형률 범위내의 응력도 측정할 수 있었다. 폼슬레(J. V. Poncelet, 1788~1867, 기하학, 동역학, 재료역학에서 인장실험선도를 제안)는 Ardant에 의해서 측정된 1%아연, 연강, 황동, 경화된 연강 등 선재를 이용한 응력-변형률 선도를 소개하였다(1841)[2]. 이것들은 현재까지 알려져 있는 응력-변형률 선도와는 큰 차이가 없다. 선재의 인장실험에 의한 소성영역에서의 응력-변형률 선도의 측정은 19세기 전반기에 이미 확립되었다.

2.4 트레스카

트레스카(Henri E. Tresca, 1814~1885)는 아연판재를 소재로 하여 편칭, 압출, 압축 등의 소성가공 실험을 수행하였고, 가공 힘과 변위의 관계를 구하였다. 그는 방대한 수의 실험을 하여 1864년 프랑스 과학아카데미에 제출하였다. Fig. 3에 아연 판재를 20장 겹쳐서 만들어진 원기둥의 전방 압출 후의 단면을 나타내었다. 여기서 유체에서와 같은 유선이 얻어지고 있음을 알 수 있다[2].

압출 다이의 입구직경을 R , 출구직경을 R_1 , 전단유동응력을 k 라고 하면, 트레스카는 압출력 P 를 다음 같은 식으로 나타내었다.

$$P = k \times \pi (R^2 - R_1^2) \left\{ 3 + \frac{2R^2}{R^2 - R_1^2} \log(R/R_1) \right\} \quad (1)$$

압출 비 $r = R^2/R_1^2$, 압출 압력을 P_T 라고 하면 위의 식을 아래와 같은 식으로 된다.

$$P_T = k \left\{ 3 \left(1 - \frac{1}{r} \right) + \log r \right\} \quad (2)$$

따라서 전단응력 k 값은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$k = P_T \left\{ 3 \left(1 - \frac{1}{r} \right) + \log r \right\} \quad (3)$$

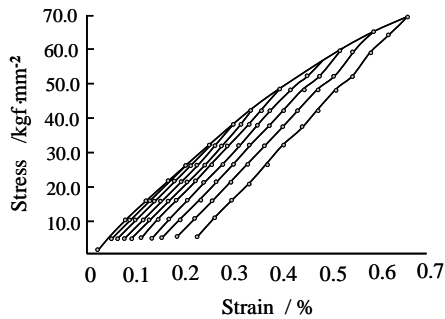


Fig. 2 Stress-strain curve measured by Gerstner(1983, Ref.2)



Fig. 3 Extrusion experiment by Tresca(1864)

Table 1 Shear flow stress measured by Tresca

Material	Shear flow stress /kgf · mm ⁻²
Pb	1.82
Sn	2.09
Pb-Sn alloy	3.39
Zn	9.00
Cu	18.93
Fe	37.57

만약 서로 다른 압축 비 r 의 실험으로부터 얻어진 k 값이 같으면, 최대 전단응력 k 값이 일정한 상태에서 소성변형이 일어나고 있는 것이 된다. 표 1[3]은 이와 같은 방법으로부터 얻은 각종 금속재료의 전단유동응력 k 의 값을 나타내고 있는데, 현재의 지식으로도 적합한 값이라고 할 수 있다.

트레스카가 사용한 식을 검증해 보기로 하자. 현재까지 측 대칭 압출압력을 계산하기 위한 엄밀한 해는 없기 때문에 널리 사용되고 있는 다음의 근사식[3]과 비교하는 것으로 한다.

$$P_a = \sqrt{3}k \left\{ \frac{2\alpha}{3} + \left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha}\right) \ln r \right\} \quad (4)$$

여기에서 α 는 다이 반각, μ 는 다이 부에서의 마찰계수이며 컨테이너 부에서의 마찰계수는 0으로 설정하였다.

Fig. 3에서는 $\alpha = \pi/4$ (직각다이)이고 압출비는 49이기 때문에 $\mu = 0$ 인 경우, 식 (4)는 $P_a = 4.7k$ 가 된다. 식 (2)에서 대수의 밑을 10으로 하면 $P_{T10} = 4.66k$ 가 되어 양자는 잘 일치하게 된다.

정도가 정확하지 않은 근사값을 이용하여 전단유동응력을 측정하고, 그 값이 거의 일정하게 되었기 때문에 [최대전단응력이 일정한 값으로 되면 소성변형이 일어난다]라고 결론짓는 트레스카의 방법은 논리적이 아니다. 그러나 결과적으로는 상당히 현실적인 전단유동응력이 구해지고 있어 트레스카는 직감적인 공학센스가 있는 것 같다.

트레스카는 1814년에 프랑스에서 태어났고 19세(1833년)에 에콜 폴리텍를 졸업하여 토목건축설계를 하는 것을 목표로 하였다. 그러나 매번 심각한 병에 걸려 뜻을 이루지는 못했고 졸업 후 20년 가까이 건설, 유압기계의 테스트에 불과한 일들을 하였다.

38세(1852년)에 Paris의 중심에 있는 공예학교(Conservatoire Arts et Metiers) 기술자로 근무하였고, 49세(1863년)에 주임 실험물리학자로서 연구를 시작한, 늦게 꽃이 핀 연구자이다. 이때부터 열심히 소성변형에 대하여 실험을 하여 이듬해에 논문을 냈고, 53세(1867년)에 역학에 관련된 상을 수상하였다. 58세(1872년)에는 프랑스 과학아카데미의 회원으로 선발되었다.

2.5 샌브난과 레비

트레스카가 논문을 발표하는 시기, 프랑스아카데미에서는 샌브난(Saint-Venant)이 탄성역학, 재료역학의 분야에서 최고자이었다. 그는 트레스카의 실험결과로부터 미소변형 소성영역에서 최대전단응력이 일정하다고(완전소성) 가정하고, 봉의 비틀림, 구형단면 빔의 굽힘 실험, 내압원통의 탄소성 해석을 수행하였다. 변형에 따른 체적변화를 0으로 하고, 최대전단응력과 최대전단변형방향을 일치시키는(전 변형) 구성 식을 이용하였다. 대 변형의 트레스카의 실험결과를 보면, 미소소성변형의 탄완전소성모형을 생각하고 있었던 것은 소성변형에 대하여 관찰력이 있었기 때문이다.

젊은 시절 샌브난은 나폴레옹 군대에서 이탈하였다고 하여 군대가 관리하고 있는 에콜 폴리텍

으로 부터 추방당하였지만, 갖은 고생을 한 끝에 토목대학교에 입학하여 연구자가 되었다. 탄성역학의 半逆解法등 획기적인 방법을 제안하였고, 탄성역학을 실용화시켜, 학회에서의 지위를 실력으로 구축하였다[1]. 트레스카의 연구가 인정된 것은 과학아카데미에서 힘을 가지고 있었던 샌브난의 지원이 있었기 때문이라고 생각된다.

샌브난의 제자 레비(Maurice Levy, 1838~1910)는 트레스카의 항복조건과 증분형의 구성식(레비-미세스의 구성식)을 이용하여 해석을 하였다. 레비는 1858년에 에콜 폴리텍을 졸업하였고, 에콜 폴리텍의 조교시절인 1870년에 소성해석을 수행하였고, 후에는 파리 중앙공학교 응용역학의 교수, 과학아카데미의 회원이 되었다[1].

2.6 바우싱거

19세기 후반기가 되면서 소성학에 관련된 분야에서 독일의 연구가 두드러지게 되었다. 독일의 연구는 기계공학 등 실용적인 공학에 관계가 있는 실험적인 연구가 중심이었지만 이것을 추진한 것은 에콜 폴리텍을 벤치마킹해서 19세기에 설립된 공과대학이었다.

바우싱거(Johann Bauschinger, 1833~1893)는 문헌 공과대학에서 금속의 응력-변형률 관계에 대하여 많은 실험을 수행하였다. 특히 인장 소성 변형 후에 응력을 역전시켜 압축하였을 때의 항복응력이 최초 인장항복응력보다 작게 나타나는 현상은 바우싱거 효과로 알려져 있다. Fig. 4는 1886년에 발표된 인장소성변형 후 압축실험에서의 응력-변형률 선도이다. 최초의 인장에서 항복응력은 $20.91\text{kgf}/\text{mm}^2$ 이지만 그 후 압축에서는 최초의 절반 값인 $9.84\text{kgf}/\text{mm}^2$ 에서 항복하였다.

바우싱거는 문헌 공과대학을 졸업하고, 33세(1866년)에 문헌의 짐나지움(Realgymnasium)의 교수가 되었고, 35세(1868년)에 새로 설립된 문헌 공과대학의 교수가 되었다. 응력방향을 역전시킨 실험은 바우싱거가 재료시험소 소장으로서 100톤의 인장압축시험기와 鑄式연신계를 개발하였기 때문에 가능했던 것으로 생각된다[1].

2.7 모어

1882년에 트레스텐 공과대학의 모어(Otto Mohr, 1835~1913)는 한 점에서 응력상태를 횡축에 수직 응력, 종축에 전단응력을 표시한 좌표에서 (응력) 원으로 표시할 수 있다는 것을 제안하였다. 원의

중심의 횡좌표는 압력을 나타낸다. Fig. 5는 주철의 압축, 전단, 인장 파괴시의 응력 원이고 응력 원의 외접선이 파단한계이다. 이와 같이 압력에 의해 파괴응력이 변화하는 파괴조건을 [몰-쿠롬의 파괴조건]이라고 한다.

몰은 연성재료의 항복도 Fig. 5와 같이 응력 원의 포락선에 의해 표현할 수 있다고 생각하였다. 항복응력이 압력에 의존하지 않은 금속의 항복조건을 몰의 응력 원으로 표시하면, 원의 반경(최대전단응력)은 압력에 관계없이 일정한 값이 된다. 20세기 전반에는 파괴와 동일하게 압력의존성이 있는 전단항복조건을 이용하여 해석이 수행되었고, 이 항복조건 식을 [몰의 항복조건]이라고도 한다.

몰은 하노버 공과대학을 졸업하고 철도건설구조기사로 근무한 후 33세 (1868년)에 슈투트가르트 공과대학의 교수가 되었고, 1873년에 트레스텐 공과대학 교수로 옮겼다. 응력 원은 1882년에 제안되었기 때문에 트레스텐 시절의 연구라고 볼 수 있다[1].

3. 항복조건

3.1 맥스웰

전기방정식으로 유명한 맥스웰(James Clerk Maxwell, 1831~1879)이 톰슨(William Thomson 卿, 1824~1907, 열역학, 전기분야에서 많은 업적이 있는 영국의 물리학자)에게 보낸 1856년 편지에서 항복조건에 대하여 쓴 것이 81년 후의 1937년에 발행한 서간집에서 발견되었다[1]. 그는 탄성변형 에너지를 체적변화의 에너지와 전단변형(distortion, 전단변형률)의 에너지로 분류하여 생각할 수 있다고 보고 [비틀림에너지가 일정한 값에 달했을 때 요소는 파손이 시작된다는 것을 믿을 수 있는 확증이 있다]고 기술하였다.

종 탄성계수를 E, 포와송비를 ν , 주 응력을 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 라고 하면, 탄성변형률에너지는 다음과 같다.

$$F = \frac{1}{2} \left\{ \frac{E}{3(1-2\nu)} \right\} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{3} \left\{ \frac{E}{3(1-2\nu)} \right\} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \} \quad (5)$$

여기서 $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ 는 정수압 응력이기에 우

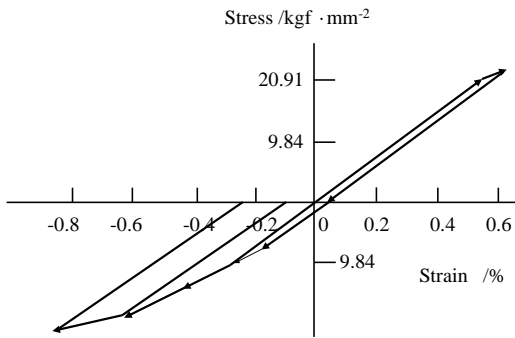


Fig. 4 Bauschinger effect(1886, Ref.2)

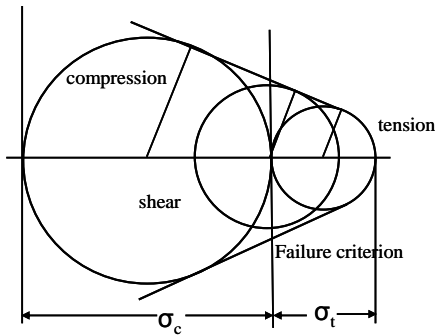


Fig. 5 Fracture criterion evaluated by Mohr's stress circle of cast iron

변 제1항은 등압 압축 혹은 인장에 의한 체적변화의 변형에너지이다. 제2항은 전단변형에너지이고, 이 항이 일정한 값에 달하면 파손된다는 것이 맥스웰의 생각이다.

3.2 후버 [4]

맥스웰이 편지를 쓴 4년 후인 1904년에 후버(Maksymilian Tytus Huber, 1872~1950)는 정수압 응력이 압축일 경우 전단탄성 변형에너지가 일정한 값에 달하면 금속은 항복한다고 생각하였다.

$$\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\} = Y^2 \quad (6)$$

여기서 Y는 단축인장에 있어서의 항복응력을 의미한다.

후버의 논문은 폴란드어로 쓰여져 있기 때문에 사람들의 주목을 끌지 못하였지만, 헝키(H. Hencky, 후술)가 1924년에 이 논문을 소개하게 되어 그

존재가 알려지게 되었다.

후버는 1895년에 Lwow(당시는 오스트레일리아·헝가리제국의 Lemberg, 현재는 Ukraina의 Lviv)의 공과대학을 졸업하고, 1899년에 쿠라쿠브(Krakow 폴란드 남부의 구 수도)에 있는 대학교 수준의 공업학교에서 항복조건에 대하여 논문을 썼다. 1914년에 시작된 제 1차 세계대전에서 오스트리아-헝가리군대에 징집되어 러시아군의 포로가 되었고 제 1차 세계대전 후 포로교환으로 Lwow 공과대학교로 돌아왔고, 그 후 와르샤바 공과대학으로 옮겼다. 제 2차 세계대전에서 독일군에 부인과 함께 수용소에 억류당하였지만 전쟁 후 1945년부터 사망할 때까지 구다니스크의 광산금속공업대학교에서 연구를 하였다.

3.3 미세스

미세스(Richard von Mises, 1883~1953)는 1913년의 논문에서 전단 변형에너지 설과 같은 형식의 조건식을 편차응력의 제 2 불변 양과 수학적으로 관계지어 제안하였다. 아래에서 그의 이론적 전개를 소개하기로 한다.

그는 먼저 3주 응력면에 있어서 최대전단응력:

$$\tau_1 = \frac{(\sigma_3 - \sigma_2)}{2}, \tau_2 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}, \tau_3 = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{2} \quad (7)$$

을 고려하여 이들의 제곱 합을 아래와 같은 식으로 나타내었다.

$$k^2 = \tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2 = \frac{1}{4}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\} \quad (8)$$

τ_1, τ_2, τ_3 을 좌표 계에서 표시하면 이 식은 Fig. 6과 같이 반경 k인 구면을 나타낸다. 최대전단응력 설에서의 항복조건은

$$|\tau_1| \leq k, \quad |\tau_2| \leq k, \quad |\tau_3| \leq k \quad (9)$$

이고, 그림에서 중앙의 입방체를 나타낸다.

또한 전단응력의 합이 0 ($\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 0$)인 것은 식(7)로부터 항상 성립하고 각 축에 등가의 방향을 가지고 있는 평면이다. 이 평면과 항복조건인 입방체와의 교차로 구해지는 육각형이 최대전단응력 설의 항복조건이다. 이 평면과 Fig. (8)의 구의 교선은 최대전단응력 설의 육각형의 외접원이 된다. 미세스는 최대전단응력 설을 수학적으로

취급하기 쉬운 근사식으로 제안하였다고 생각하였다.

미세스는 오스트리아-헝가리 제국의 영역이었던 램베르크(현재는 우크라이나 리베이브)에서 출생하였고, 형은 유명한 경제학자인 루드빅 폰 미세스(Ludwing von Mises, 1881~1971)이다

미세스는 25 세(1908 년)에 빈 공과대학에서 박사학위를 취득하고, 브르노대학(현재는 체코)의 하멜(G.Hamel, 1877~1854, 독일의 수학자)의 조교가 되었고, 이듬해에 교수자격(Habilitation)을 얻게 되었다. 26 세 (1909 년)에 스트라스플대학(현재는 프랑스의 알자스 로렌 지역)의 응용역학의 교수가 된 수재이다. 항복조건은 1913 년의 학회지에 게재되어서 스트라스플대학 시절의 연구라고 볼 수 있다.

1914 년부터 시작한 제 1 차 세계대전에서 오스트리아-헝가리 군대에 테스트 파일럿으로서 참가하고, 후에 항공기의 설계를 지도하였다. 미세스는 1919 년에 크레스텐 공과대학의 유체역학의 교수로 되었으며 이듬해 베르린대학에 새로 설계된 응용수학연구소로 옮겼다. 그는 [응용수학 및 역학잡지 Zeitschrift fur Angewandte Mathematic un Mechanik]가 1921 년에 발행될 때부터 1933 년까지 편집장을 하였다는 것으로 유명하다.

미세스는 카톨릭교도이었지만 유대인의 선조가 있었기에 나치(Nazis)보다도 비 귀족인으로 분류되었고, 나치가 정권을 잡은 1933 년(50 세)에 토르코의 이스탄불 대학교의 수학교수로 옮겼다. 또한 1939 년에 토르코의 정권이 불안정하게 되자 미국으로 이주하여, 1944 년에 하버드 대학교의 항공역학 및 응용역학의 교수로 취임하였다.

3.4 항복조건에 검증

1900 년에 영국의 게스트(J. Guest, 1917 년의 논문에서는 런던 대학교 University College 소속)은 내압원통의 인장이나 비틀림 실험에 의한 다축 응력실험을 수행하였고, 연강 등의 연성재료의 항복조건에 대하여 조사하였다. 샌브난(B. Saint-Venant)의 최대변형 설이나 랭킨(W. J. Rankine, 1820~1872, 스코트랜드의 물리학자, 글래스코 대학교수, 열역학, 탄성역학, 파동이론 등)의 최대주 응력 설 등의 파손강도이론을 검증한 결과를 발표하였다. 19 세기에는 취성파괴와 연성재료의 항복과의 구별이 엄밀하지 않았지만 게스트는 항복과 취성파괴의 차이를 명확히하여 항복조건에

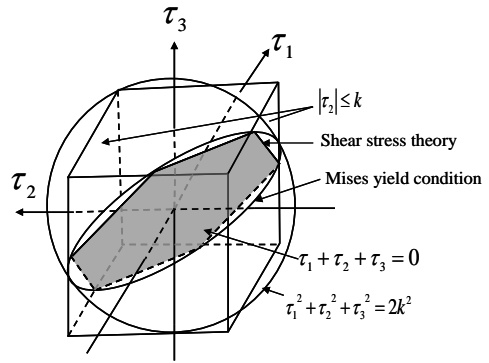


Fig. 6 Explanation of Mises yield criterion

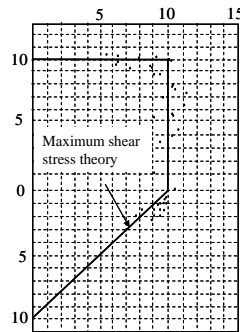


Fig. 7 Verification of yield criterion by Guest(1900)

대하여 검증하였다.

Fig. 7 은 연강의 내압원통을 비틀림 실험을 할 때의 항복한계를, 두 주 응력을 좌표축으로 한 그림 위에 정리한 것이다. 실험 결과는 최대전단응력 설과 잘 일치하였으며, 그는 최대전단응력이 일정한 값에 달했을 때 항복이 일어난다고 결론지었다.

게스트는 트레스카의 연구에 대해서도 언급하였는데, 그가 조사한 탄성한계로서 초기항복과 트레스카가 수행한 대 변형소성 유동은 다른 현상이라고 이해하였기 때문에 새로운 항복조건을 제안해야 한다고 생각하였다. 현재까지 최대전단응력에 의해 항복조건을 트레스카-게스트의 항복조건이라고 한다.

1932 년에 영국의 G. I. Taylor 과 H. Quinney 는 최대전단응력 설(몰 설이라고 한다)과 전단 변형에너지 설을 실험적으로 검토하였다. 그는 비틀림과 인장의 조합응력 하에서 알루미늄, 동, 아연, 연강, 탈탄강 등은 전단 변형에너지 설에 가깝다는 것을 보였다.

3.5 소성방정식

소성 구성식은 탄성변형에 있어서 구성식인 후크의 식(응력성분과 변형률 성분과의 관계)에 대응한다. 소성변형에 있어서 구성식으로서 편차응력성분과 (소성)변형률 증분이 비례한다는 관계는 1870 년에 레비(M. Levy)에 의해 발견되었다. 레비의 연구는 프랑스 이외에서는 별로 알려지지 않았기 때문에 본 미세스(R. von Mises)는 같은 관계를 1913 년의 논문에서 제안하였다.

탄소성변형에서는 탄성변형과 소성변형에 대응하는 방정식을 동시에 취급할 필요가 있다. 플란틀(L. Prandtl, 1870~1953)은 1924 년에 평면문제에 대해서 탄소성방정식을 제안하였고, 루이스(A. Reuss, Budapest 공과대학 교수)는 1930 년에 탄소성방정식을 3 차원문제로 일반화시켰다.

4. 슬립선장이론

4.1 플란틀

루트빅 플란틀(Ludwig Prandtl: 1870~1953)은 1920 년에 압력의존성이 있는 모어의 항복조건식에 따르는 강소성재료를 검토하여, Fig. 8 과 같은 평평한 펀치의 압입에 있어서 최대전단응력방향을 연결한 선(슬립선)을 편미분방정식의 특성방정식으로 나타내었다. 항복조건이 압력에 의존하지 않는 특별한 경우에는 $\alpha = 45^\circ$ 이고 전단항복응력을 k 라고 하면 압입압력 p 는

$$p = 2k(1 + \frac{\pi}{2}) \quad (10)$$

가 되어 정확한 해가 얻어진다.

플란틀은 뮌헨 근교의 프라이석에서 태어나 뮌헨 공과대학에서 고체물리학을 공부하고 A. 프로플(A. Foppl, 1854~1924, 뮌헨 공과대학 교수로 재료역학으로 유명)의 조교가 되어 원판의 굽힘 등 재료역학을 연구하였다. 한때 산업체에 근무한 후 30 세(1900 년)에 하노버 공과대학의 공업역학 교수가 되었고 유체역학을 연구하였다. 1904 년에 쾨팅겐대학의 응용역학연구소의 교수로 초빙되어 소성좌굴, 슬립선장이론 등 소성연구를 시작하였다[1]. 또한 동 대학의 항공역학실험실의 책임자로서 3 차원 익형이론, 초음파 충격파이론 등 유체역학분야에서 중요한 연구를 수행하였다.

플란틀은 많은 연구자들을 키운 것으로 유명하다. 압연이론과 유체역학의 카르만(Th. Von Karman,

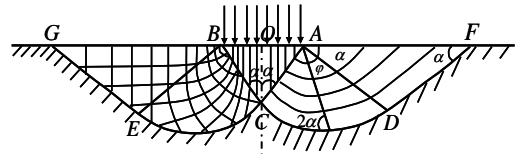


Fig. 8 Slip line field proposed by Prandtl for flat punch indentation(1920)

캘리포니아공과대학 교수), 재료역학의 티모센코(S.P. Timoshenko, 스텐포드대학 교수), 소성역학의 나다이(A. Nadai, Westinghouse 연구소) 그리고 프래거(W.Prager, 브라운대학 교수) 등, 응용역학분야에서의 20 세기 지도자들의 대부분이 플란틀연구소 출신이다[1].

4.2 헵키

1923 년에 헵키(Heinrich Hencky, 1885~1951)는 압력의존성이 없는 재료의 평면변형상태하에서 재료의 소성변형 응력에 관한 일반식을 도출하였다. 그는 소성변형 재료 내부의 평형상태를 나타내는 편미분방정식을 특성곡선법으로 풀면 슬립선은 특성곡선과 일치한다는 것을 보였고 특성곡선에 따라 응력을 구하는 기초식을 유도하였다. 그 외에도 슬립선장에 관한 헵키의 정리가 있으며 헵키의 연구결과에 의해 슬립선장이론이 거의 완성되었다.

헵키는 독일의 바이에른 주에서 태어났고 28 세(1913 년)에 다름슈타트 공과대학을 졸업하고 우크라이나(당시는 오스트리아-헝가리 제국)의 철도회사에 근무하였다. 1914 년에 제 1 차 세계대전이 시작되었을 때 우크라이나 지역은 러시아 군에 의해 점령당해 헵키는 우크라이나 외국인 캠프에 수용되었고 여기서 러시아 여성과 결혼하였다.

제 1 차 세계대전 후에 독일로 귀국하였지만 정식직업은 없었고 드레스덴 공과대학에서 교수자격(Habilitation)을 얻은 후 37 세(1922 년)때에 도르프크 공과대학에서 종신직원이 아닌 강사 직을 얻어 1929 년까지 근무하였다. 여기서 슬립선장이론을 연구하였다.

헵키는 45 세(1930 년)에 미국 MIT 의 교수가 되었지만 응용공학이 주류를 이루었던 당시 미국에서는 그의 이론적인 방법이 받아들여지지 않았기에 2 년후 MIT 를 사직하였다. 51 세(1936 년)에는 소련연방의 갤러킨(B.G.Galerkin, 1871~1945, 변분법의 해석으로 유명한 수학자)의 초청을 받아서 모스크바 대

학 등에서 연구하였지만 2년 후인 1938년에는 독일과 소련의 관계악화로 독일로 추방되어 죽을 때까지 마인츠의 버스 제조회사에서 근무하였다.

4.3 가이링거

소성변형재료에 대해서 힘의 평형조건식만으로 구한 해는 완전한 해라고 볼 수 없기 때문에 이 힘에 의해 야기되는 변형(속도성분)이 각종의 조건을 만족할 때 처음으로 완전한 해가 된다. 1930년에 가이링거(Hilda Geiringer, 1893~1973)가 속도에 관한 편미분 방정식을 평면변형 강완전소성재료에 대해서 작성하였고 정해(正解)에서는 최대전단응력선이 속도불연속(슬립선)과 일치한다는 것을 보였다.

가이링거는 오스트리아 빈에서 출생하여 1917년에 푸리에 급수에 관한 연구로 빈 대학에서 박사학위를 받았다. 1921년부터 미세스의 조교가 되어 베르린 대학에서 연구하였고 1927년에 강사(Privatdozent)가 되었으며 1930년에 슬립선에 관한 논문을 발표하였다. 그녀는 유태인이었기 때문에 나치정권에 의해서 1933년에 대학을 그만두게 되었고 미세스, 프래거와 함께 토르코 이스탄불 대학의 수학 교수가 되었다. 토르코가 나치 독일에 가까웠기 때문에 1939년에 아인슈타인의 도움으로 미국으로 건너갔지만 당시 미국 유명대학이 여성교수를 채용하지 않았기 때문에 처우가 좋지 않은 대학에서 근무하게 되었다. 50세(1943년)때 미세스와 결혼하여 미세스가 사망한 후에는 하버드 대학의 연구원으로 미세스가 완성하지 못한 확립통계에 관한 저서를 완성하였다.

4.4 1930년~1950년의 슬립선장 연구

슬립선장에 관한 기초연구가 거의 일단락된 1933년에 독일에서는 나치가 정권을 갖고 유태인을 확대하기 시작하여, 주요 소성역학연구자들이 독일을 떠나 독일에서 발전해온 소성역학의 연구가 미국, 영국, 소련연방으로 옮겨지게 되었다.

독일로부터 토르코를 경유하여 미국 브라운 대학으로 옮긴 프래거(William Prager, 1903~1980)는 슬립선에서의 응력불연속에 관한 연구를 수행하여(1948), 브라운 대학의 소성역학의 중심이 되었다.

영국 켄팅겐 대학의 힐(R. Hill)은 쇠기의 압입, 박판의 압축, 인발과 압출, 노치시편의 인장 등의 슬립선장 해를 발표하였다. 이때 켄팅겐 대학에서는 독일에서 학위를 받은 오로완(E. Orowan)이 소성학연구의 리더이었다.

소련연방에서는 제 2차 세계대전 이전부터 슬립선장에 관한 연구가 수행되었다는 것은 소코로브스키(V.V.Sokolovski)가 보고하였다.(1946) 소련연방에서는 제 2차 세계대전 이전에 헝키가 모스크바 대학 등에 초청되어 많은 수의 소성역학 연구자를 교육하였다고 생각된다.

5. 슬래브법에 의한 소성가공해석

5.1 시벨

슬립선장의 연구가 시작된 1923년에는 소성가공 하중의 근사계산을 위한 슬래브법이 시벨(Erich Siebel, 1891~1961)에 의해서 제안되었다. 그는 Fig. 9와 같은 직경 d , 높이 $2h$ 인 원주의 9 압축에 있어서 높이가 원주와 동일하고 폭 (dx)이 작은 細長 영역(슬래브, slab)에 대한 평형방정식에 항복조건을 적용하여 변형저항 Y , 마찰계수 μ 를 이용하여 평균압축변압 \bar{q} 를 다음과 같이 구하였다.

$$\bar{q} = Y \left[1 + \frac{1}{3} \mu \left(\frac{d}{h} \right) \right] \quad (11)$$

현재의 슬래브법에서는 원주압축의 평균면압은

$$\bar{q} = 2Y \left(\frac{h}{\mu d} \right)^2 \left\{ \exp \left(\frac{\mu d}{2h} \right) - \frac{\mu d}{2h} - 1 \right\} \cong Y \left[1 + \frac{1}{3} \mu \left(\frac{d}{h} \right) \right] \quad (12)$$

가 된다. 마지막 식은 $\mu d/h$ 가 1.0과 비교하여 작을 때의 근사식이지만 이것은 시벨이 얻은 식과 일치한다. 이 이론해에 근거하여 시벨은 구체적으로 단조를 예로서 수치계산을 행하였고 후방압축에 대해서도 이 방법을 적용하였다.

시벨은 32세(1923년) 때 베를린 공과대학에서 단조와 압연에 있어서 가공력과 가공에너지의 계산을 위한 기초연구로 박사학위를 받았다. 철강회사에 근무한 후 1925년에 뒤셀도르프의 카이저 연구소(철강)의 가공부문의 리더가 되어 압연, 단조 등의 연구를 활발히 수행하였다. 1931년에 슈트트가르트 공과대학의 교수가 되어 딥드로임과 인발을 포함한 많은 소성가공방법의 해석을 하였으며 소성가공에 대한 이론연구의 기초를 만들었다. 카이저 연구소의 그의 연구실에는 일본으로부터 오사카대학의 나카하라 교수와 큐슈대학의 이시바라 교수들이 유학하기도 하였다.

5.2 카르만[5]

아헨공과대학 교수인 카르만(Theodore von Karman,

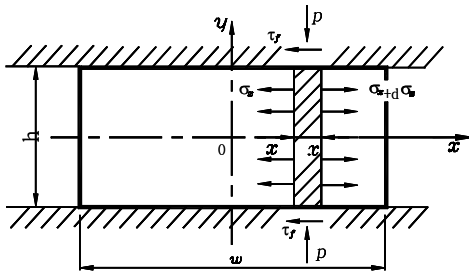


Fig. 9 Analytic model for cylinder compression by Siebel(1923)

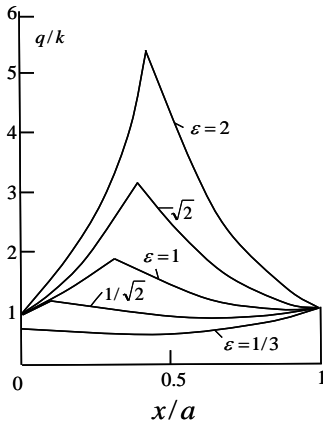


Fig.10 Pressure distribution of rolling process by Karman(1925)

1881~1963)은 1925년에 현재의 카르만 압연방정식으로 알려진 압연기초식을 발표하였다. 이 논문은 3쪽으로 짧지만 미소영역에서의 힘의 평형방정식(압연방정식)을 만들어 이것을 근사적으로 푸는 수치해석을 수행하여 Fig. 10에서와 같이 롤 면압분포와 에너지 효율을 구했다

카르만은 헝가리 부다페스트 출생으로 부다페스트 공과대학을 졸업하고 1906년부터 독일 쾨팅겐대학의 플란틀에게 유학하였다. 쾨팅겐대학의 강사로서 카르만은 연구를 인정받아 31세(1912년)에 아헨 공과대학에서 신설한 항공연구소의 소장이 되었다. 제1차 세계대전에서는 오스트리아-헝가리 군을 위한 헬기의 연구에 종사하였고 1918년에 독립한 헝가리 민주공화국의 교육부 장관을 역임하였지만 정권붕괴 후에는 아헨 공과대학으로 돌아왔다. 압연방정식은 1925년에 발표되었기 때문에 아헨공과대학 시절의 업적이다. 카르만은 46세(1927년) 때에 가와나시 항공기(현재 신메이화공업)의 컨설턴트 자격으로 일본에서 효고현과

다카라즈카에 거주하면서 풍동건설을 지휘하였고 1930년부터는 캘리포니아대학의 구겐하임 항공연구소 소장으로서 유체역학분야에서 활약하였다. 카르만은 공학문제와 자연현상을 수식적으로 모델화하여 해석을 하는 천재로 미국 국가과학상의 최초 수상자이기도 하다.

5.3 싸크

베르린의 독인 카이저 연구소(금속)에서 금속 소성변형에 대해서 연구하고 있던 싸크(G.Sachs)는 1927년에 인발에 대한 슬래브법 해석을 발표하였다. 싸크는 금속의 소성변형을 단결정의 변형으로부터 소성가공의 가공력까지 넓은 범위에서 다루었다. 싸크의 연구실에는 동경대학의 지마(이화학연구소의 연구원을 겸임), 이화학연구소의 오스시 등이 유학하여 일본의 금속소성의 기초를 만들었다.

6. 소성변형의 금속물리

6.1 단결정의 소성변형[2]

브릿지만(P. W. Bridgman)이 1923년에 용융금속으로부터 저속으로 들어올리는 방법으로(브릿지만법이라고 함) 금속 단결정을 만드는 법을 개발하였지만 사실 라우에(M. von Laue, 1978-1960, 베를린 대학교수로 1914년에 노벨 물리학상을 수상)가 1912년에 X선으로 결정방위의 결정방법을 확립하였기 때문에 금속단결정의 소성변형의 연구가 가능했다. 1923년에 켈브릿지대학의 테일러(G. I. Taylor)와 엘람(C. F. Elam)은 알루미늄 단결정의 인장시험을 수행하여 임계전단응력이 일정한 값이 되면 소성변형이 시작된다는 것을 밝혔고 그 후도 철, 금, 동, α 황동 등 단결정 재료에 대해서 실험을 수행했다.

동일한 시기에 독일의 슈미드(E. Schmid)(1926), 싸크(1927) 등도 단결정의 실험결과를 발표하였고 여러 곳에서 단결정의 변형에 대한 연구가 행해지고 있었으며 일본에서도 이화학연구소의 지마 연구실에서 싸크와 공동으로 단결정의 소성변형에 대한 연구를 수행하였다.

6.2 다결정의 소성변형

카이저 연구소의 싸크는 다결정 금속의 항복응력을 여러 방위의 단결정의 평균값으로 구했다. (1928년) 단결정의 임계전단응력이 τ_{cr} 일 때 인장항복응

력 σ 의 평균값은 $\sigma_y = 2.238\tau_{cr}$, 전단항복응력의 평균값은 $\tau_y = 1.293\tau_{cr}$ 이다. 이것으로부터 인장과 전단에서의 항복응력의 비는 $\sigma_y/\tau_y = 0.577$ 가 되고 미세스의 항복조건에 있어서 인장항복응력과 전단항복응력의 비와 일치한다. 따라서 미세스 항복조건이 금속학적으로 증명되었다고 볼 수 있다. 그러나 정수 2.238은 실제로 측정된 값보다 매우 작다.

다결정 금속의 항복을 다루는 경우에는 인접한 결정립 사이에 공극을 만들지 않도록 변형하여야 한다는 것을 고려해야 하는데 이런 다결정체의 소성변형에 대한 역학을 만든 것이 테일러이다. 변형이 구속되어 있는 경우는 단결정의 인장과 같이 하나의 슬립면에서 변형이 진행되는 것은 아니고 복수의 슬립면에서 동시에 슬립이 생기는 다중슬립이어야 한다. 테일러는(1938년) 결정의 방위에 의존하지 않고 동일한 변형이 생긴다고 가정하여 이 조건 하에서 여러 슬립면에서의 총 슬립량이 최소가 되도록 하는 조합(최소슬립원리)를 구하였다. 이 경우는 인장에서 평균인장응력은 $\sigma_y = 3.96\tau_{cr}$ 가 되어 실험값에 보다 더 근접한다.

단결정을 소성변형시키면 결정이 회전하여 결정방위가 변화하고 Fig. 11에서와 같이 슬립면은 재료의 연신방향으로 평행하게 변화하기 때문에 초기에 무질서한(random) 방위를 갖는 다결정 재료라도 소성변형의 진행과 더불어 결정방위가 특정방향으로 나열되는 異方性을 갖게 된다. 다결정에서는 인접 결정의 구속에 의한 다중슬립이 생기기 때문에 이것을 고려한 이방성 발달에 대한 이론이 요구된다. W.Boss, E.Schmid(1930년)가 다중슬립에 의한 이방성 발달의 원리에 대해서 처음으로 설명하였고 G.I.Taylor(1938년), E.A.Calnan, C.J.Crew(1950년) 등이 발전시켰다.

6.3 전위이론

금속의 슬립면에서 슬립이 생겨 소성변형하는 경우에 하나의 면 전체가 한번에 슬립하려면 매우 큰 전단응력을 필요로 한다. 실제에는 슬립면 전체가 한번에 슬립하는 것은 아니고 결정의 선결합(轉位)이 움직이는 것에 의해 부분적으로 변형이 생겨 작은 임계전단응력으로 소성변형이 진행된다. 전위에 의한 소성변형기구는 1934년에 G.I Taylor, E.Owovan, M.Polanyi에 의해 독립적으로 제안되었다고 알려져 있다.

1953년에 일본에서 개최된 국제물리학회에서

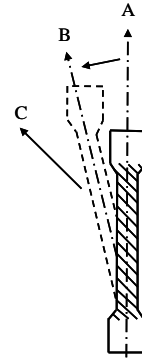


Fig.11 Rotation of single crystal at plastic deformation

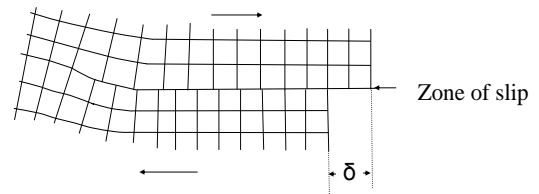


Fig.12 Dislocation model proposed by Yamaguchi (1925)

동 학회 회장인 모트(N.F.Mott, 1905~1999, 당시에 브리스톨대학 교수, 1954년에 캠브릿지대학 교수, 전위론 등 금속물리학, 1977년에 노벨물리학상 수상)는 [세상에서 처음으로 전위에 주목한 사람은 일본의 야마구치 박사이다]고 밝혔다.

야마구치의 논문은 1923년에 이화학연구소의 영문보고서에 실렸는데 그 후 [금속가공경화의 가설]로 Fig. 12와 같은 전위모델을 소개하였다. 야마구치는 단결정 시험편을 테일러 교수로부터 제공받아서 이 영문논문을 테일러 교수에게도 보냈다고 생각한다. 테일러는 야마구치의 논문에서 그가 전위 같은 것을 제안하고 있는 것을 알고 있었지만 무시하였던 것은 아마도 야마구치가 제안한 것이 테일러가 제안한 전위와 동일한 것이라고 생각하지 않았기 때문인 것 같다. 그러나 같은 영국 캠브릿지대학 출신의 모트가 야마구치의 논문을 소개한 것을 보면 역시 영국은 역시 신사의 나라이다.

6.4 테일러

테일러(Geoffrey Ingram Taylor, 1886-1975)는 금속물리, 유체역학, 파동론 등에서 유명한 물리학자이다. 단결정이 인장실험을 수행한 1923년에는 Royal Society의 연구교수로 임명되어 연구에 전념하였던 것 같다. 테일러의 금속학적 연구는 단결

정과 다결정의 소성변형, 전위론에 머물지 않고 소성발열(1925년), 구성식의 검증(1930년), 소성과(1942년), 고속변형(1946년) 등 여러 분야를 망라하고 있다.

1942년부터 시작된 제2차 세계대전에도 전공을 살려 폭발에 의한 충격파의 응용연구를 수행하여 미국에서 원자폭탄개발의 맨하튼 계획에 종사하여 1944년에 백작이 되었다. 전후에는 항공역학의 연구를 계속하여 여러 업적을 올렸고 초음속 항공기 개발에 참가하였다. 1952년에는 연구의 일선에서 퇴임하였지만 간단한 장치를 이용한 연구를 그 후 20년 이상 계속하였다.

6.5 폴라니

폴라니(Michael Polanyi, 1901-1976)는 부타페스트 대학 의학부를 졸업한 후 독일 칼스루에 공과대학에서 화학연구를 하였고 1917년에 가스 흡착으로 박사학위를 받았다. 1020년에 베르린의 카이저 연구소(섬유화학)에서 섬유와 금속결정의 X선 해석을 하였고 1023년에는 물리화학부문의 책임자가 되었다. 1934년에 발표한 전위의 연구는 카이저 연구소 시절에 연구한 것이다. 나치정권의 유대인 교수의 해고에 저항하여 1933년에 교수 직을 사임하였지만 메사추세츠대학에 물리화학교수로 초빙되었다.

물리화학의 연구를 열심히 하면서도 폴라니의 관심은 과학과 인간의 관계에 있었다. 나치의 경험뿐 아니고 제2차 세계대전 당시 영국의 전시체제로부터도 과학이 국가로부터 통제되어 과학적인 독창성과 진리의 탐구가 없어지는 위험성을 느끼고 있었다. 그는 [과학의 자유협회]를 창설하여 정치와 경제로부터 과학의 독립을 주장하였고 과학의 목적화를 부정하는 입장을 취했다.

6.6 오로완

오로완(E. Orowan, 1902~1989)은 헝가리의 부타페스트에서 태어나 오스트리아 빈 대학에서 공부하였고 1932년에 운모의 파괴에 관한 연구로 베르린 공과대학에서 박사학위를 받았다. 독일에서는 정식 직업을 얻지 못하고 헝가리 연구소에 근무하면서 베르린에서 알고 지냈던 同郷의 폴라니와 연락하면서 전위를 연구하였다.

1937년부터 영국 버밍엄대학의 파이엘스(D. Peierls, 1907~1955, 원자간 힘 등의 금속물리 연구자, 후에 옥스포드대학 교수) 밑에서 금속피로에

관한 연구를 수행하였고 1939년에는 켈브릿지 대학으로 옮겨 브라그(W.L.Bragg, 1890~1971, X선 회절로 유명, 1951년에 노벨물리학상을 수상)의 추천으로 X선 회절연구를 하였다. 제2차 세계대전 중에는 압연(1943년) 및 저온취성에 관한 연구를 하였다. 1950년에 MIT로 옮겨 금속학 연구를 하면서 소성역학을 이용한 대륙의 이동과 빙하의 움직임 등 지구물리학의 연구를 하였다.

6.7 야마구치

야마구치(1898-1941)는 1922년 동경대학을 졸업하고 동경의 園田伸銅所에 근무하면서 경도대학에서 열처리와 압연을 연구하였다. 27세(1925년)에 이화학연구소의 지마 연구실에서 촉탁으로 금속소성변형에 관한 연구를 시작하였다. 1929년에 발표한 전위의 연구는 이화학연구소에서 수행한 연구이다. 1930년에 오오사카대학 공학부의 전신인 오오사카 공업대학의 조교수가 되었고 같은 해에 [AI의 소성변형]으로 동경대학으로부터 공학박사 학위를 받았고 다음 해에는 오오사카 공업대학의 교수로 승진하였다. 1933년에 오오사카 공업대학이 오오사카대학으로 되어 오오사카대학의 교수가 되었고 1936-37년에 독일, 프랑스, 미국에 유학하여 오오사카대학 금속학과의 기초를 만들었지만 1941년에 학회출석 중 42세의 젊은 나이로 사망하였다.

7. 고속 및 고압하에서의 소성변형

7.1 고속변형의 응력-변형률 선도

저속변형에서의 응력-변형률 선도는 19세기 초반부터 측정되었지만 19세기 후반에는 고속변형 특성에도 관심을 갖게 되었다. B. Dunn은 1897년에 추의 수직낙하에 의해 시험편을 압축하여 수직 추의 변위를 광학적으로 증폭하여 측정하고 회전하는 드럼에 기록하였다. 수직 추의 변위를 시간 미분하는 것에 의해 속도를 구하고 속도를 미분하여 가속도를 구하여 압하력을 계산하고 고속에서의 응력-변형률 선도를 구했다. 이후 동일한 측정이 유럽 각지에서 행해졌다.

고속·고온의 재료실험으로는 1931년에 동경대학의 이치하라(1898~1943)가 고속비틀림 실험결과를 1940년에는 M. J. Manjoine와 A. L. Nada가 고속인장실험결과를 발표하였다.

또한 긴 봉 사이에 얇은 판을 끼워 한쪽 끝을

고속으로 때려서 비교적 작은 변위에서의 큰 변형률 속도에서의 응력-변형률 선도를 측정하는 스프릿-홉킨슨 붕 방식이 1949년에 H. Kolsky에 의해 시작되었다.

7.2 이치하라의 고속 비틀림실험

이치하라는 Fig. 13과 같은 비틀림 시험장치를 이용하여 연강과 등의 고속 비틀림 실험을 -170~1000 C° 에서 수행하였다. 비틀림 힘은 탄성 붕(로드셀)의 미소 비틀림 각으로, 변형량은 비틀림 쪽의 회전각으로 검출하여 결과를 광학적으로 기록하였다. 고온·고속변형에 있어서 응력-변형률 선도의 정밀 측정은 당시로는 세계적으로도 선구적인 연구였다. 이 연구는 1940년의 나다이 등의 연구보고서에도 인용되었지만 대학의 연구 보고에 수록되었기 때문에 널리 알려지지 못했다.

이 연구를 수행하였을 때 이치하라는 동북대학의 조교수였고 1937년에 [충격 비틀림실험]으로 동북대학에서 박사학위를 받고 교수로 승진하였다. 피로시험, 인장과 비틀림 항복점의 관계, 경도 시험, 정밀연마, 절삭가공 등 재료와 가공의 연구를 수행했지만 1943년에 차량(전차)의 시험운전 중 45세의 젊은 나이로 사망하였다.

7.3 소성과

고속현상에서는 파의 전파가 문제가 되지만 소성변형에서 파의 진행에 대해서는 제2차 세계대전 중인 1942년에 군사연구소에서 테일러와 카르만이 이론연구를 하였고 두위즈(P.E.Duwez)가 실험을 수행하였다는 보고가 있다[2]. 이들 연구는 군사연구이었기 때문에 전후인 1946년이 되어서야 공표되었다. Fig. 14는 붕의 한쪽 끝을 고속으로 타격하였을 때의 잔류변형률에 관한 카르만, 두위즈의 이론과 실험의 비교이다(1946).

7.4 고압하에서 소성변형과 브릿지만

카르만은 1911년에 대리석을 고압 하에서의 압축할 때 응력-변형률 선도 및 파괴변형률이 압력의 영향을 크게 받는 것을 보였다. 이 연구는 대기압 하에서는 취성적인 거동을 보이는 石材로 수행해졌기 때문에 연성재료와는 매우 다른 특성을 보였다.

이 무렵 하버드 대학의 브릿지만(P.W.Bridgeman, 1882~1961)은 고압 하에서 인장실험을 하여 1909년에 최초로 발표하였다. 그는 그 후 50년 가까이

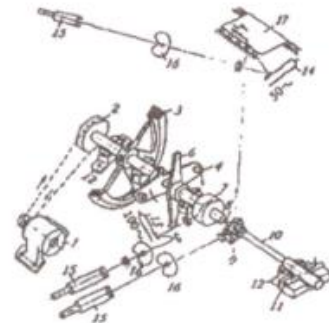


Fig.13 High speed rotation tester proposed by Ichihara(1923)

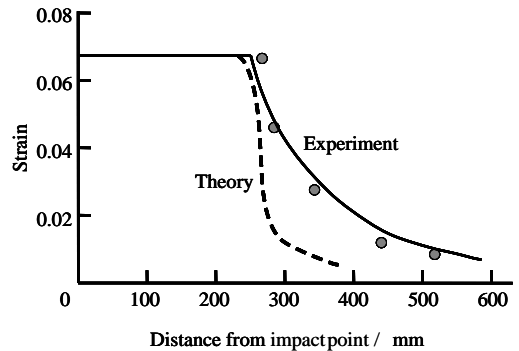


Fig.14 Propagation of plastic wave for sudden impact at one end of bar(Karman, Duwez, 1946, Ref.2)

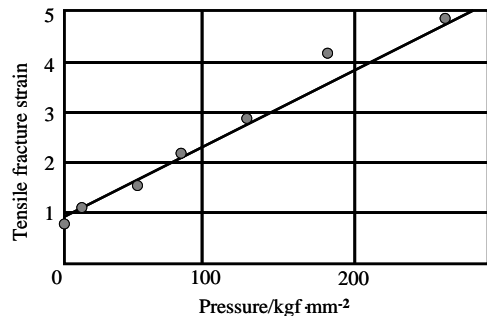


Fig.15 Relation between pressure and fracture strain for 0.45% carbon steel quenched at salt bath of 427°C temperature (Bridgman, Ref.7)

고압 하에서의 재료의 물성에 관한 연구를 계속하여 그 결과를 [Studies in Large Plastic Flow and Fracture]에 정리하였다[7]. 브릿지만은 금속의 소성변형에서는 Fig. 15와 같이 압력에 따라 연성이 증가하는 것은 당연하다고 생각했던 것 같고 변형저항에 대한 영향을 주로 연구하였다.

브릿지만은 미국 메사추세츠주 캠프릿지에서 태어나 1900년에 하버드대학에 입학하여 물리학을 배웠다. 28세(1910년)부터 하버드대학의 교원이 되었고 37세(1919년)에 교수가 되었다. 대학원 시절에 물질의 성질에 관한 연구를 시작하였고 고압장치의 개조를 계속하였다. 고압유체 자체의 압력을 이용하여 액체를 밀봉하는 브릿지만 밀봉법이나 고체의 압축압력을 이용하여 초고압을 발생시키는 브릿지만 앙빌이라고 부르는 방법도 개발하였다. 당시의 장치가 300MPa의 압력 정도 밖에 발생할 수 없었지만 이 장치는 10GPa 이상의 고압을 발생하였다.

개발한 고압장치를 이용하여 고압 하에서의 물질의 전기저항 등 물성연구를 수행하여 1946년에 고압물성물리연구로 노벨 물리학상을 수상하였다. 또한 단결정을 성장시키는 브릿지만법이나 인장 시험편의 넥부의 응력계산법 등도 제안하였다.

8. 소성학에 관한 저서

8.1 나다이

소성역학의 최초의 영문서적인 나다이(Arpád L. Nadai, 1883~1963)의 [Plasticity-A mechanics of the Plastic State of Matter](1931)은 1927년에 독일어로 쓰여진 것을 영역한 것이다. 이 책의 특징은 금속의 소성변형을 다루는 제1부와 압반의 습곡이나 대륙의 이동을 다룬 제2부로 구성되어있다는 것이다. 제1부는 응력과 변형률의 정의, 항복조건과 구성식, 인장, 압축, 비틀림, 전단, 보의 굽힘, 내압원통, 슬립선장과 경도 등 기초적인 내용을 중심으로 정리되어 있다. 몇회의 개정을 거친 후 1950년에는 제1부가 [Theory of Flow and Fracture of Solids]이란 이름으로 출판되어 널리 읽히고 있다. 나다이는 헝가리에서 태어나서 부타페스트 공과대학을 졸업한 후 28세(1911년)에 독일의 베르린 공과대학에서 박사학위를 받았고 1918년 경에 쾨팅겐대학의 프란틀의 연구소의 연구원이 되었다. 1923년에는 쾨팅겐대학의 교수가 되었지만 44세(1927년)에 티모셴코의 후임으로 미국 웨스팅하우스의 연구소에 초청되어 미국으로 옮겼다. 그는 전단변형에너지 설의 항복조건을 팔면체 전단응력으로 설명한 것으로도 유명하다(1937년).

8.2 나카하라

나카하라와 시라하라의 공저인 [금속소성학]

(1935년)은 일본에서 최초로 출판된 소성학 관련 저서이다. 내용은 제2장 재료의 성질, 제3장 파괴, 제4장 탄성한계 이상의 변형 및 이에 수반한 제현상(인장, 압축, 비틀림, 경도시험 등), 제5장은 이론해석 및 그 응용(항복조건과 내압원통이론) 등 나다이의 책의 제 1부와 유사한 내용이다.

나카하라는 동경대학을 26세(1921년)에 졸업하고 1922년에 요코하마고등공업학교의 강사, 교수를 경유하여 1927년에 동경대학의 강사가 되었다. 1929년에는 오오사카 공업대학 조교수, 1933년에 오오사카 공업대학을 모체로 하여 발족한 오오사카대학의 기계공학과(재료역학)의 조교수가 되었다. 39세(1934년)에 [주석의 기계적 성질과 그 소성이론]으로 경도대학에서 공학박사를 받았고 같은 해 오오사카대학 교수로 승진하였다. 1937~38년에 독일 카이저연구소(철강)의 씨벨의 연구실에 유학하였고 1943년에는 오오사카대학에서 동대학의 산업과학연구소로 전환 배치되었다.

1946년에 오오사카대학 산업과학연구소 교수인 나카하라의 조교이었던 오야네박사(1922~, 교토대학 명예교수)는 나카하라가 소성변형 연구를 시작한 것은 1923년의 관동대지진의 화재 당시, 땅이 갈라졌는데도 주석 수도관은 파괴되지 않고 늘어나 있는 것을 본 것이 계기가 되었다고 들었다고 하였다.

나카하라 교수가 공학부로부터 산업과학연구소로 옮기게 된 것은 다른 교수들과의 트러블 때문이었다고 한다. 이때부터 건강이 나빠져서 1946년에는 주 2회 정도만 대학에 출근하였고 58세인 1953년에 사망하였다.

8.3 힐 [8]

힐(Rodney Hill, 1921~)의 저서 [The Mathematical Theory of Plasticity](1950)은 현재의 소성역학의 기준을 만든 소성역학의 바이블이라고 불린다. 이 책의 특징은 기초이론과 各論간에는 일반정리로서 소성포텐셜, 해의 유일성, 극한정리와 변분원리 등 난해한 항이 포함되어 있기 때문에 초보자용 책은 아니다.

힐은 1941년에 캠프릿지대학 수학과를 졸업하고 제2차 세계대전 중에 모트가 이끄는 그룹에서 금속박판의 탄환관통에 관한 연구를 하였고 췌기압입시의 슬립선장(1945년)을 제안하였다. 1946년부터 오로완이 이끄는 금속물리 그룹에서 소성역학의 연구를 수행하여 이방성재료의 소성변형에

관한 논문을 썼다.(1948년) 1948년에 완성한 박사 논문을 기초로 1950년에 책을 발행하였을 때가 약관 29세이었다.

1949년에 셰필드의 철강연구소(BISRA)에 신설된 금속유동연구부문의 책임자가 되었고 소성역학에 관한 많은 논문을 썼다. 또한 30세(1952년) 때 창간한 *Journal of Mechanics and Physics of Solids*의 편집장이 되어 자신의 논문을 많이 게재하여 수리소성역학의 중심적인 저널로 만들었다

1953년에는 53세로 노팅엄대학의 응용수학과 교수가 되었고 1962년에 명예교수(Honorary Professor)가 될 때까지 동 대학의 응용수학부문을 최고로 만드는데 최선을 다하였다. 1962년에는 *Royal Society*의 페로우가 되었고 1963년부터는 캠브릿지대학으로 돌아와 연구를 계속하였다.

힐은 젊었을 때는 캠브릿지대학 체스팀 대표로 활동하는 등 사람들과 잘 사귀었지만 소성역학분야의 중심인물이 된 후에는 소성역학 관련 회의에 일절 참석하지 않았다. 1951년에 힐의 책을 번역한 일본의 구토박사(1924~2001, 요코하마대학교 교수)가 영국 유학 중에 힐 교수에게 면담을 요청하였지만 힐 교수는 [수학적인 문제를 논한다면 만나겠다]고 하여 면담을 거절한 적이 있다.

9. 결 론

위대한 연구자들에 의해서 소성학이 많이 발전한 20세기 전반은 제1차 세계대전, 제2차 세계대전이 있었던 혼란의 시대이었으며 소성학의 연구자들도 이 격동의 시대를 살아왔다.

20세기 후반은 냉전의 시대이었지만 공업발전의 시대이기도 하고 소성학은 소성가공의 가공력 등 계산에 유용하게 이용되었고 컴퓨터의 발달과 더불어 FEM등 해석수법에 도입되었다.

20세기 후반에 소성가공학의 발전은 특히 일본에서 돋보였는데 이것은 일본소성가공학회가 다른 나라에는 없는 전문학회로써 발족한 것과 관계가 있다고 생각한다.

그러나 일본의 소성학 연구는 가공분야에 주로 편중되어 있어 지구물리학 등 보다 광범위한 분야로 발전하지 못했다. 또한 전쟁 전 국내연구와의 연속성이 떨어져 일본의 선배 학자들의 업적이 충분히 활용되고 있지 못하다.

금후 소성역학은 가공기계나 금형의 변형, 윤활제의 거동, 금속조직, 연성과괴 등의 이론과 조합되고 보다 정교한 해석이 되어 많은 공업분야에서 실용화될 것이라고 생각한다. 그 가운데에서도 세계로 전파되는 일본발 연구가 많이 나오면 좋겠다.

암석의 소성거동이나 습곡산맥 생성, 대륙이동 등의 지구물리학에 대한 연구는 1950년까지 수행되었지만 그 후는 별로 발전하지 않았다. 이런 연구도 수행하여 지진발생기구의 규명이라는 거대한 꿈에 도전하는 것도 좋다.

본고를 집필하는데 귀중한 정보를 제공해준 오오사카대학의 마츠모토, 우즈노미야 교수, 가토 명예교수, 구마모토대학의 오오츠 준 교수, 도요하시기술과학대학의 모리 교수, 교토대학의 오야네 명예교수, 동경대학의 하리모토 교수, 동북대학의 후지타 교수에게 지면을 빌려 감사드립니다.

후 기

본 자료의 일부 번역과 그림의 재 편집을 도와준 경북대학교 대학원의 윤철호에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Timoshenko, S. P., 1983, *History of Strength of Materials*, Dover, New York.
- [2] Bell, J.: *Mechanics of Solids*, 1, 1984, *The Experimental Foundations of Solid Mechanics*, Springer-Verlag.
- [3] Lange, K., 1985, *Handbook of Metal Forming*, Chap. 13, p. 25, McGraw-Hill.
- [4] Engel, Z., 1994, *Huber's Yield Criterion in Plasticity*, 1-7, AGH, Krakow.
- [5] Von Karman, Th., with Edson, L., 1967, *The Wind and Beyond; Pioneer in Aviation and Pathfinder in Space*, Little Brown
- [6] Miki, Y.: *Materia Japan*, 1991, Vol.30, pp.839-845.
- [7] Bridgman, P. W., 1964, *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*, Harvard University Press.
- [8] Hopkins, H. G. & Sewell, M. J., 1980, *Mechanics of Solids-The Rodney Hill 60th Anniversary Volume*, Pergamon Press.

1950년까지의 소성학 년표

1784	C. A. Coulomb : Recheres theoretiques et experimentales sur la Force de torsion et sur l'elasticite des fils de metal. Historie de l'Academie Royale des Sciences, Paris, pp. 229-269
1831	E. J. Gerstner, Handbuch der Mechanik, Vol. I, Leipzig : Herbig.
1841	J. V. Poncelet, Introduction a la Mecanique Industrielle, Physique ou Experimentale. Metz.
1864	H. Tresca : Memoire sur l'encoulement des corps solides a de forced pression, Comptes Rendus Acad. Sci. Paris, 59, pp. 754-758.
1870	B. de St. Venant : Sur ;'etablissement des equations des mouvements interieurs operas dans des corps solides ductiles au dela limites ou l'elasticite pourrait les ramener a leur premier etat, Comptes Rendus Acad. Sci. Paris, 70, pp. 473-480.
1870	M. Levy : Memoire sur les equations generales des mouvements interieurs des corps solides ductiles au dela limites ou l'elasticite pourrait les ramener a leur premier etat, Comptes Rendus Acad. Sci. Paris, 70, pp. 1323-1325.
1886	J. Bauschinger : Uber die Veranderung der Elastizitatsgrenze und der Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken und \Quetschen, durch Erwarmen usd Abkühlen und durch oftmals wiederholte Beanspruchung, Mitt. Mech-Techn. Lab. K. Techn. Hochsch. Munchen 13, Spaltem pp.1-116.
1897	B. Dunn : A photographic impact testing machine for measuring the varying intensity of an impulsive force, J. Franklin Inst. 144-5, pp.321-348.
1900	O. Mohr : Welche Umstande benigen die Elastizitatsgrenze und den Bruch eines Materials?, Z. Vereins Deutscher Ingenieure, 34, pp.1524-1530, pp. 1572-1577.
1900	J. Guest : On the strength of ductile materials under combined stress, Phil. Mag., fifth series, 50, pp. 369-413.
1904	M. T. Huber : Wlasciwa praca odkształcenia jako miara wyteżenia materyalu (specific strain work as a measure of material effort), Czasopismo Techniczne (Lwow), 22, pp.38-40, pp.49-50, pp.61-62, pp. 80-81.
1911	Th. Von Karman : Festigkeitsversuche unter allsitigem Druck, Z. Vereins Deutscher Ingenieurem 55, pp.1749-1757.
1913	R. von Mises : Mechanik der Korper im plastische-deformablen Zustand, Nachrichten von der Koniglichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Gottingen, Math-physik. Kl., pp.582-592.
1920	L. Prandtl : Uber die Harte plastischer Korper, Nachrichten von der Koniglichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Gottingen, Math-physik. Kl., pp.74-85.
1922	E. Siebel: Untersuchungen uber bildsame Formänderung unter besonderer Berücksichtigung des Schmiedens, Maschinenbau/Betrieb, 9, pp. 307-312.
1923	H. Hencky : Uber einige statisch bestimmte Falle des Gleichgewichts in plastischen Korpern, Z. Angew. Math. Mech., 3, pp. 241-251.
1923	G. I. Taylor, C. F. Elam : The distortion of an aluminium crystal during a tensile test, Proc. Roy. Soc. (London), A102, pp. 643-647.
1924	L. Prandtl : Spannungsverteilung in plastischen Korpern, Proc. 1 st Int. Congr. Appl. Mech. Delft, pp. 43-54.
1924	H. Hencky : Zur Theorie plastischer Deformationen und der hirdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen, Z. Angew. Math. Mech., 4, pp. 323-334.
1925	Th. Von Karman: Beitrag zur Theorie des Walzvorges, Z. Angew. Math. Mech., 5, pp. 139-141.
1925	G. I. Taylor, W. S. Farren : The heat developed during plastic extension of metals, Proc. Roy. Soc. (London), A107, pp. 422-451.
1926	T. Nishihara : On the bending beyond elastic limit, The Japan Soc. Mech. Engng., 29-116, pp. 711-745.

1926	E. Schmid : Uber die Schubverfestigung von Einkristallen bei plastischer Deformation, Z. Physik, A40, pp. 54-74.
1927	V. Goler, G. Sachs : Das Verhalten von Aluminiumkrystallen bei Zugversuchen, I. Geometrische Grundlahen, Z. Physik, A41, pp. 103-115.
1927	G. Sachs : Zur Theorie des Ziehvorganges, Z. Angew. Math. Mech., 7, pp. 235-236.
1928	G. Sachs : Zur Ableitung einer Fliebedingung, Z. Vereins Deutscher Ingenieure, 72, pp. 734-736.
1929	K. Yamaguchi: Slip-bands of compressed aluminium crystals, Part I.-Distortion by single slipping and a tentative theory of work-hardening of metals, Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research, 11-205, pp. 223-241.
1930	A. Reuss : Berucksichtigung de elastishcen Formanderng in der Plastizitatslehle, Z. Angew. Math. Mech. 10, pp. 266-274.
1930	H. Geiringer : Beit zum vollstandigen ebenen plastiziotats problem, Proc. 3rd Int. Congr. Appl. Mech., Stockholm, 2, pp. 185-190.
1930	W. Boas, E. Schmid : Uber die Temperatuabhangigkeit der Kristallplastizitat, Z. Phusik, A61, pp. 767-781.
1931	A. Nadai : Plasticity-A Mechanics of the Plastic State of Matter, McGraw-Hill.
1932	G. I. Taylor, H. Quinney : The plastic distortion of metals, Phil. Trans. Roy. Soc. (London), 230, pp. 323-362.
1933	M. Itihara : Impact torsion test, The Technology Report of The Tohoku Imperial University, Sendai, japan, 11-1 , pp. 16-50
1934	M. Orowan : Zur Kristallplastizitat I : Tieftemperatur-plastizitat und Beckersche Formel. Z. Physik, A 89, pp. 660-664
1934	M. Polanyi : Uber eine Art Gitterstörung, die einen Kristall plastisch machen konnte, Z. Physick, A 89, pp. 660-664.
1935	I. Nakahara, Plasticity of Metals, Kurobakurkwashu Co.
1935	S. Fukui, A study of deep drawing-1, The Japan Soc. Mech. Engng., 38-221 , pp.635-636
1937	A. L. Nadai : Plastic behavior of metals in the strain-hardening range Part I, J. Applied Physics, 8, pp. 205-213.
1938	G. I Taylor : Plastic strain in metals, J. Inst. Metals, 62, pp.635-636.
1939	K. Yamaouchi, Plastic Deformation of Metals, Chobanshobo
1940	M. J. Manjoine, A. L. Nadai : High-speed tension tests at elevated temperatures, Proc. American Soc. Testing Materials, 40, pp. 822-839.
1941	A. L. Nadai, M. J. Manjoine : High-speed tesion tests at elevated temperatures Parts II and III, Trans Am. Soc. Mech. Engrs, A63, pp. 77-91
1942	G. I. Taylor : The plastic wave in a wire extended by an impact load, British Ministry of Home Security, Civil Defense Research Committee Report, R. C. 329.
1942	Th. Von Karman : On the propagation of plastic deformation in solids, U.S.A. National Defense Research Council, Report A-29.
1942	P. E. Duwetz, D. S Wood, D. S. Clark : The propagation of plastic strain in tension, U. S. A. National Defense Research Council, Progress Report A-99, OSRD No.931.
1943	E. Orowan : The calculation of roll pressure in hot and cold flat rolling. Proc. Inst. Mech. Eng. 150, pp. 140-167.
1944	I. Terazawa, Plasticity for Steels, Gasutzshobo.
1945	R. F. Bishop, R. Hill, N. F. Mott : The theory of indentation and hardness tests, Proc. Phys. Soc., 57, pp. 147-159.

1946	Th. Von Karman, P. E. Duwetz : The propagation of plastic deformation in solids, the Sixth International Congress for Applied Mechanics, Paris.
1946	P. W. Bridgman : Genaral survey of certain results of high pressure physics, Nobel Lecture, Stockholm.
1946	G. I. Taylor : The testing of materials at high rates of loading, J. Inst. Civil Engrs, 26, pp. 502-532
1946	P. W. Bridgman : The tensile properties of several special steels and certain other materials under pressure, J. Applied Phys., 17, pp. 201-212.
1946	V. V. Sokolovskii : The theory of plasticity-Outline of work done in Russia, Trans. American Soc. Mech. Eng. (Trans ASME), J. Appl. Mech., 13, pp. A1-A9.
1948	W. Prager : Problem types in the theory of perfectly plastic solids, J. Aeronaut. Sci., 15, pp. 33-341
1948	R. Hill : A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, Proc. Roy. Soc. (London), A193, pp. 281-297
1949	H. Kolsky : An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading, Proc. Ro. Soc. (London), B62, pp. 676-700.
1950	E. A. Calnan, C. J. Crew : Deformation texture in face-centred cubic metals, Phil. Mag. 41, pp. 1085-1100.
1950	R. Hill : The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford at the Clarendon Press.
1950	A. Nadai : Theory of Flow and Fracture of Solids, Vol.1, Second edition, McGraw Hill.
1950	Science Research Institute of Tokyo University, Theory and Application of Plastic Deformation