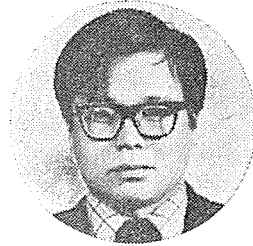


# Turbulently Heated Belt pinhc



김 상 훈  
漢陽大學校原子力學科

## 머리말

모든 Plasma-confinement 실험들의 궁극적인 목적은 deuterium과 tritium과 같은 가벼운 核子(nuclei)들의 융합에 의하여 核 energy의 有用한 방출에 있다.

이러한 융합을 일으키기 爲해서 이 核子들은 그들의 核電氣와 結合된 Coulomb 力을 극복하기 爲해 충분히 큰 상대적인 速度를 가지고 충돌하지 않으면 안된다.

實際적인 融合爐에 있어서 한 核子에 對한 質量中心界에 있어 energy는 10~100Kev 이어야만 한다. <sup>(1)</sup>

Lawson<sup>(2)</sup>은 얼마나 많은 energy가 많은 가벼운 核子들의 集合(Plasma)을 모으고 유지하기 爲해 必要하며 얼마나 많은 energy가 이 核子사이의 融合反應에 依해 방출되는가를 密度와 溫度의 函數로서 나타내는 간단한 問題를 생각하였다.

그는 실제 融合爐에 있어 融合反應이 지속되게 하기 爲해 高溫度 ( $T > 10\text{KeV}$ )에 있는 粉子들의 밀도  $n$ 와 이밀도에서 Confinement 時間  $\tau$ 는 特定한 값을 초과하지 않으면 안된다. 즉 d-t 反應에 있어서는  $n\tau > 10^{14}$  이고 d-t 반응에 있어서는  $n\tau > 10^{16}$  (C. G. S. 단위)을 算出했다.

이것은 Lawson 조건이라고 잘알려져 있고 제어 융합연구의 단기적인 目的은 이 條件을 우선 達成하자는 것이다.

현재까지 開發된 모든 Plasma confinement實驗은  $T > 10^4$  를만족시키면  $\tau$ 가 아주 짧아져서  $n\tau \ll 10^{14}$  이든가,  $n$ 를 아주크게 하면 高溫度를 만들기가 곤란하다는등  $T, n, \tau$ 가  $T > 10\text{Kev}, n\tau > 10^{14}$ 를 만족시키지 못하고 있다.

融合實驗에 있어 가스는 高溫度에 있으므로 완전히 이온화되어 있으며 (fullyionized), 이온이나 電子의 平均運動에너지가 커서 Coulomb力을 이기고 核자끼리 갈수있으므로 Coulomb 力의 상호작용에 대한 충돌단면적은 아주적어져서 극소수의 융합을 일으키는 충돌을 제외하고 二原間의 충돌 (binary collision)은 Lawson 조건에 주어지는 融合爐의 시간정도에는 무시될 수 있다.

實際의 融合爐에 있는 Plasma 반의 粒子들은 가장 가까운 이웃 粒子와의 충돌에 依한 상호작용보다 많고 널리떨어져있는 粒子全體와의 장거리 Coulomb 상호작용이 훨씬크다.

실제로 平均 二系子間 충돌시간은 매우커서 Lawson 조건에 주어지는 Confinement 시간 ( $n$ 이  $10^{14}/\text{cm}^3$  이면  $\tau=1\text{sec}$ ) (Reactor time scale) 동안은 이 충돌이 완전히 무시되나, 멀리 떨어져

진 粒子全體와의 集團的인 상호작용은 Plasma 주기 ( $\tau_p = 2\pi/\omega_p$ ,  $\omega_p = \text{Plasma frequency}$ ) 정도의 시간에 일어나는 현상을 만들며 이 Plasma 주기가  $\tau$ 보다 훨씬 짧다.

융합실험장치에 있는 Plasma는 일반적으로나 熱力學的으로 평형에 있지도 않고, 安定(Stable)하지도 않기 때문에 이 集團的인 상호작용에 의해 運動 energy의 分布에 있어서는 Maxwellian 分布를 돌아갈려고 하며, 위치 energy의 分布에 있어서는 역시 Boltzmann 分布로 돌아 갈려고 하기 때문에 Plasma는 벽과 같은 溫度로 되려고 하며 벽으로 向해 움직인다.

그래서 제어융합연구의 일반적인 問題로보아 熱力學的으로 不安定한 Plasma는 될수있는한 느리게 Relaxation이 일어나는 것이 요구된다. 그러나 Plasma를 어떻게 核融合溫度( $T > 10\text{keV}$ )로 加熱시키느냐 하는 問題에 있어서는, 가령 Plasma 안으로 energy가 큰 中性粒子束 (energetic neutral particle beam)을 집어넣은 경우처럼 外部의 다른 energy를 빨리 熱 energy로 바꾸기爲해 빠른 relaxation이 요구된다.

relaxation이 빠를때에는 plasma가 보통 조용한 狀態에 있지않고 Turbulent 狀態에 있으며 일반적으로 加熱이 쉽고, 高溫度에 도달하는 核融合裝置의 Plasma는 強하게 Turbulent 되어 있다.

이러한 Turbulence를 일으키는 원인은 Plasma의 不安定 (instability)이 일반적으로 거시적 不安定 (macroinstability) 또는 위치공간의 不安定 (configuration space instability) 이라고도 불리워지는 流體力學的의 不安定 (hydrodynamic instability)<sup>(3)</sup>과 速度空間의 不安定 (velocity space instability)이라고도 불리워지는 미시적 不安定 (micro instability)으로 二別된다.

일반적으로 流體力學的의 不安定은 流體力學的의 방정식부터 유도되는 것이며, 이 不安定으로부터 일어나는 파동은 느리고, Plasma 진동수 (plasma frequency)나 Plasma gyro frequency 보다 훨씬 적은 진동수를 가지며, 파장은 iongyroradius 보다 훨씬 큰 파장을 가진다. <sup>(4)</sup>

그와 반대로 미시적 不安定은 流體力學的의 방

정식 부터는 유도되지 않고 단지 미시적인 방정식 즉 Boltzmann 방정식부터 유도되며 이로부터 일어나는 파동은 流體力學的의 不安定과 반대의 성질을 갖는다.

또한 速度空間의 不安定이라고도 불리워지는 것으로부터 알수 있는것 같이 이 不安定은 速度 分布가 Maxwellian 分布로 부터 멀어짐과 결부되어 있고 이 不安定이 二原子間 충돌 (Binary Collision)과 비슷한 效果를 만들어 融合實驗에 있어 여러가지 非正常的인 현상 (Anomalous phenomena), 예컨대 비정상적인 저항도 ion이나 電子의 비정상적인 加熱速度, 비정상적 확산등의 현상을 만든다.

Plasma 안에 큰 진폭의 交流를 보냈을때는 이 Plasma 電流에 의하여 Plasma 안의 粒子들의 速度 分布는 Maxwellian 分布가 못되므로 熱力學的으로 不安定하기 때문에 어떤 特定한 진동수와 파장을 가진 파동이 생기면 이 파동運動은 時間에 따라 그진폭이 증가된다.

Plasma 안에는 물론 여러가지의 진동수와 파장을 가진 파동運動들의 중첩으로 Turbulence가 存在하기 때문이다.

이 電流가 어떤 미시적인 不安定이 있을때는 이 不安定條件에 特有한 운동들은 증폭된다.

이 파동 運動과 粒子들의 상호작용 (interaction)에 의해 粒子가 加熱되는 것을 Turbulent Heating 이라고 부른다. 거의나 最終的으로 融合溫度以上の 加熱은 Turbulent Heating 이라고 볼 수 있다.

가령 레이저에 의한 Pellet의 융합도 레이저 光線이 매개적 不安定 (Parametric instability)을 Plasma 안에 유기시켜서 加熱이 일어나며, Tokamak의 경우 마지막단계에 있어서의 電流에 의한 加熱도 저항도가 벌써 二原子間 충돌에 의한 저항도 (Spitzer resistivity)<sup>(5)</sup> 보다 훨씬 크므로 Turbulent Heating이 일어난다고 볼 수 있다

## 2. Turbulent Heating

여러가지 加熱方法中 電流에 의해서 유기된 미시불안정에 의해 일어나는 Turbulent Heating

은 電流를 흐르게 하기 爲해 外部에서 供給하는 energy를 plasma의 熱 energy로 바꾸는 效率이 좋을뿐 아니라 (25% 까지), 加熱速度를 二原間층물(Dinary)에 依한 加速度(Spitzer Ohmic Heating)와 비교해서 Turbulence에 대한 직접적인 情報를 줄수 있어 그自體로서의 研究對象의 값어치가 크다.

앞서 말한바와 같이 모든 融合實驗에 있어 融合溫度以上 ( $T > 10\text{Kev}$ )의 加熱은 Turbulent Heating이 반드시 일어나므로 加熱過程에 있어 Turbulence의 Mechanism을 더 규명해야만 하고, Confinement 問題에 있어서도 不安定한 Plasma의 relaxation을 될수있는한 늦게 일으키는 要因을 發見하기 爲해 이 不安定에 依해 일어나는 Turbulence 研究가 重要하다.

이 Turbulent Heating과 일반적인 Turbulence를 研究하기 爲한 代表的인 實驗裝置는 그림1과 같은  $\theta$ -pinch 이고 plasma 密度를 낮게 하고 Coil에 電流를 흘려보내야 한다.

이때 유기된 方向의 電류와  $\theta$  a×B에 依해 압축될때 ion 보다 훨씬 가벼운 電子가 먼저 中心軸으로 유동(drift) 함에 따라 생기는 흐름에 依한 不安定으로 Turbulent Heating이 일어난다.

처음 Plasma의 密度가 높은가 電流가 급격히 흐르지 않으면 Turbulent Heating 보다 압축에 依한 斷熱加熱(adiabatic compressional heating)이 더크게 된다.

이 實驗에서 plasma와 진공과의 境界에서는 미시적불안정에 依해 저항도가 커져 磁線은 “열

어 붙지 않기” 때문<sup>(6)</sup>에 外部의 磁線이 압축과정 동안 一部침투한다.

이 침투하는 모양은 처음에 걸어둔 bias 磁場이 압축시키는 外部磁場과 平行한가 또는 反平行한가에 따라 크게 달라진다.<sup>(7)</sup> 反平行인 경우 침투하는 磁場은 Pston과 Shock wane에 해당하는 모양을 이룬다<sup>(8)</sup> 그뿐만 아니라 ion, 電子의 加熱速度와 最大 ion, Turbulent 電場의 세기, 전기, 저항도 마지막 ion 溫度와 전자온도와의 비는 이 두경우 크게 달라지며 아직 정확히는 이 이유를 설명 못하고 있다.<sup>(9)</sup> 그리고 압축과정 (pinch) 동안 어떠한 미시적불안정이 存在해서 加熱시키느나는 問題에 있어서 여러가지 均一한 또는 비균일한 Plasma 내에 있을수있는 미시적 不安定中 Buneman, Electron Cycrotron, Electron Cycrotron Drift, Ion Sound, Lower Hybrid 등이 후보자로 고려되었으나<sup>(7)</sup> 이들로선 압축후 ion溫度가 전자온도 큰實驗의 사실을 설명할 수 없다.

이 實驗은 Confinement 時間이 너무짧아 特殊한 진단(diagnostic) 裝置를 爲한 충분한 時間을 주지 못하고 있다.

### 3. Belt Pinch

이 Turbulent Heating의 代表的인 裝置는 university of Maryland의 커다란  $\theta$ -pinch이며 이 裝置에 依해 Ion 最大溫度 30Kev, 最大密度  $10^{14}/\text{cm}^3$ 에 到達하였으나 Confinement 시간은 0.3  $\mu\text{sec}$  정도 ( $n\tau \sim 3 \times 10^7$ )에 지나지 않았다.

이 裝置의 利點은 Ion 溫度를 쉽사리 融合溫度로 올릴수있고 效率이 좋은것 뿐 만이 아니라 Plasma의 氣體壓力과 内部磁場에 依한 壓力과의 比, 가 큰 것이다. (80%) 融合爐에서는 B값이 큰 것이 必要하다. <sup>(9)</sup>

이러한 利點을 Turbulently Heated  $\theta$ -pinch는 가지고 있지만 confinement 시간의 密度가 적어  $n\tau > 10^{14}$ 를 만족 만시킨다.

왜 Confinement 시간이 적은가에 대해서는 線型  $\theta$ -pinch의 모양에서 알수 있는 바와 같이 Plasma가 압축될때 양단으로 熱과 粒子들이 새

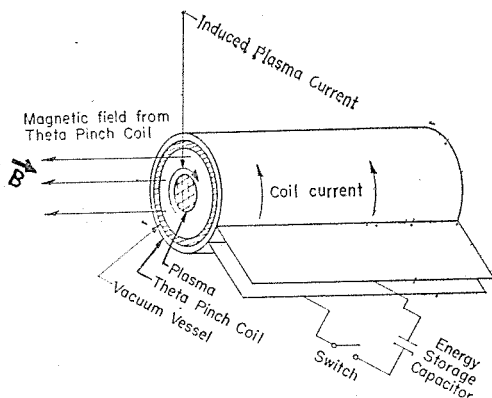


그림 1. Schematic of  $\theta$ -Pinch

어 나갈수있다고 짐작될수 있기 때문이다. <sup>(10)</sup>

만약 실제 양단에서의 누출(leakage)이 Confinement 시간을 짧게하는 主要原因이라고하면, Plasma를 Torus 모양의 용기에 넣고  $\theta$ -pinch 처럼 압축하는 Closed System의 장치를 생각해 볼 수 있다. 이것을 Toroidal  $\theta$ -pinch라고 부른다. 이 Toroidal  $\theta$ -pinch는 그림 2와 같이 Poloidal 전류만이 유도되어 고무튜브에 空氣를 넣을때 主半徑(major radius) R이 증가하고 空氣를 빼면 R이 감소 하는것처럼 압축과정동안 Plasma의全體가 벽으로 向해 움직인다. <sup>(11)</sup>

즉 Toroidal  $\theta$ -pinch안의 Plasma는 Toroidal equilibrium을 갖지않는다. Toroidal equilibrium을 갖기위해 Plasma의 용기를 전도도 좋은 금속으로 싸고 그림, 3과 같이 Coil을 Screw 모양으로

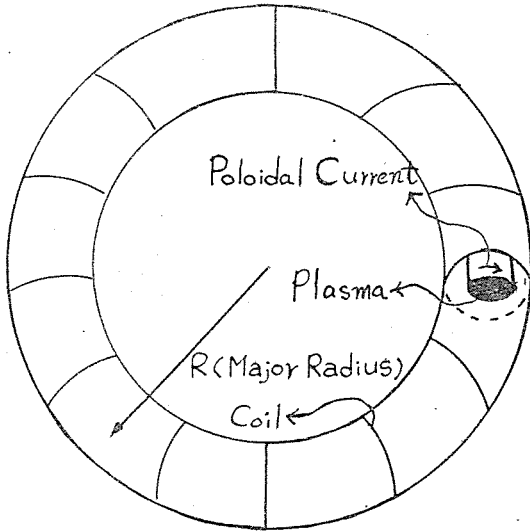


그림 2. Schematic of Toroidal  $\theta$ -pinch

로 감아 Toroidal Component의 電流를 Plasma 內에 유도해야 한다.

이 이유는 Poloidal Current 보다 Toroidal Current가 外部양도체 容器에 image current를 만들어 이들 사이의 반발력이 커서 Plasma全體가 벽으로 向해 움직이면 이 반발력이 움직임을 방해하기 때문이다.

그러나 실제적으로는 Toroidal equilibrium에 필요한 Toroidal Current가 가장 파괴적인 Kink에 대해 安定한 한계 값인 Kruskal-Shafranor

한계<sup>(12)</sup>를 초과 한다. 이 때문에 이 Kink instability를 제어하기 위해 Dynamic Stabilization의 方法을 쓰거나 Plasma의 단면적을 길게 하여야만 한다. 그 이유는 그림 4에서와 같이 Plasma가 Toroidal Current 없이 toroidal equilibrium에 있다면 MHD 方程式들

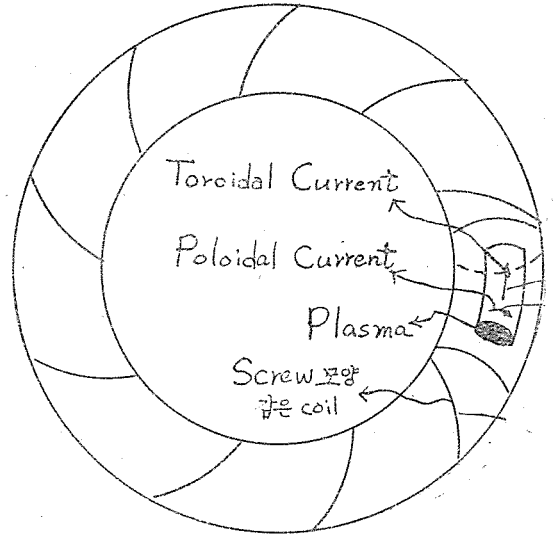


그림 3. Schematics of screw pinch

$$\nabla P = \frac{1}{C} \vec{j} \times \vec{B} \quad (1)$$

$$\Delta \times \vec{B} = \frac{4\pi}{C} \vec{j} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

을 만족하여야만 한다. 이들을 원통좌표에서 다시 쓰면, axisymmetry Condition

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0 \text{ 과 } B_r = B_x = 0 \text{ (Toroidal current} = 0)$$

$$\text{으로 부터 } \frac{\partial}{\partial r} \left( p + \frac{1}{8\pi} B^2 \theta \right) = \frac{B^2 \theta}{4\pi r} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( p + \frac{1}{8\pi} B^2 \theta \right) = 0 \quad (5)$$

가 된다 (5) 식에서

$$p + \frac{1}{8\pi} B^2 \theta = f(r) \quad (6)$$

이며 이것과 (4) 로부터

$$B \theta = B(r), \quad p = P(r), \quad (7)$$

즉  $B \theta$ 와  $P$ 는 3-dependency가 없다.

이 3-dependency를 적게 하기 위해서는 Plasma

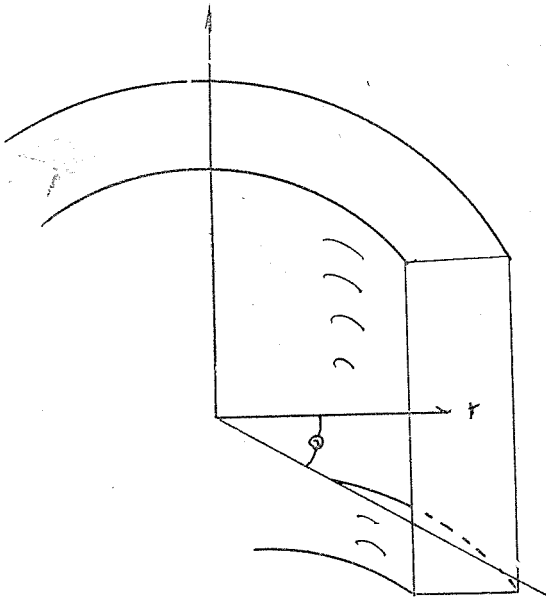


그림 4. Cylindrical Coordinates for Torus

의 단면적을 길게 하여야 한다. plasma 단면적이 길면 길수록 理論적으로 적은 Tordal current를 가지고, 즉 Kruska-shafranov 한계아래에 있는 Toroidal Current 가지고 Toroidal equilibrium이 가능하다.

이래서 이 pinch의 모양은 그림 5와 같이 Belt의 모양이 된다. 아직까지 압축加熱에 의한 Belt

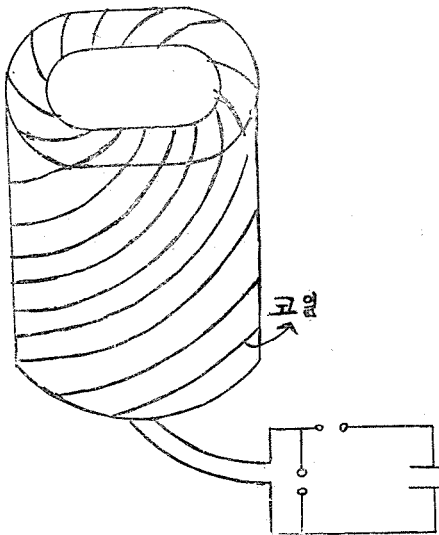


그림 5. Schematic of belt pinch

pinch는 Max-Planck Institute에서 건설되어 實驗中에 있으나 이 時點에서 Turbulently Heated Belt pinch는 University of Maryland에서 設計計劃中에 있다.

여기서 부기할것은 이 實驗用으로서 또는 未來의 Pulsed fusion reactor의 모형으로서 쓸수 있는 Turbulently Heated Belt Pinch의 製造價格은 약 1million dollar로 다른 融合實驗裝置보다 훨씬 적게 든다.

#### 4. 맺는 말

先進國에 있어서의 核融合研究는 主 plasma 加熱 Confaiment 裝置開發, 진단 方法 및 裝置開發, Plasma physics의 理解로 大別되고, plasma physics는 미시적 不安定의 理解가 主된 目的이라고 볼 수 있다.

이러한 미시적 不安定에 對한 研究는 다른 技術의 進歩 (예컨대 Tunable Dye Laser Spectroscopy의 開發, Far Infrared Spectroscopy, X-Ray, Visible Light Spectroscopy의 開發等)에 對해 incentive도 주며 이들의 發展과 함께 더 잘 理解되어가고 있다. 이러한 研究는 너무 專門化 또는 高度化될뿐 아니라 항상 融合實驗이 成功할 가능성이 보일때에는 비밀화 하여 왔다. (13)

그래서 先進國家에서도 獨者의인 研究가 必要하다. 特히 이 研究를 爲해 belt Pinch는 값이싸고 (14) 建設이 비교적 용이하고, Turbulence Mechanism을 잘살펴 볼수 있다는 點에서 重要한 裝置라고 볼 수 있다.

#### References

- (1) D. J. Rose and M. Clark, Jr, "Plasmas and controlled Fusion," Wiley, New York, 1961.
- (2) J. D. Lawson, Proc. Phys. Soc. (London) B70 : 6 (1957).
- (3) S. H. Kim and H. E. Wilhelm, Phys. Rev. 4A, 2308 (1971).
- (4) M. N. Rosenbluth, Microinstabilities, in "Plasma Physics", IAEA, Vienna, 1965.
- (5) L. Spitzer, Jr., "Physics of Fully Ionized Gases", 2nd ed., Interscience, New York, 1965.
- (6) N. A. Krall and A. W. Trivelpiece, "Principles of Plasma Physics", McGraw-Hill, Inc., New York, 1973, p.106.
- (7) W. D. Davis and A. W. De Silva, Phys Fluids 16, 1470 (1973)