

반추위 이상발효의 생화학적 대사기전 및 예방대책 (上)

李 仁 浩*

서 론

반추가축은 일반적으로 단위가축과는 相異한 반추위(Rumen)라는 특수한 소화기관을 가지고 있기 때문에 사료의 소화와 이용과정이 복잡하고 또 단위가축과는 판이하게 다르다.

특히 반추위내에는 m^2 당 약 $10^{10} \sim 10^{12}$ 정도의 수많은 미생물이 존재하여 섭취한 사료의 많은 부분이 반추위내에 서식하는 무수한 미생물의 작용에 의해 분해, 이용되게 한다. (Bryant, 1979; Czerkawski, 1986; Ørskov, 1982; Russell과 Hespell, 1981; Van Soest).

반추위는 일반적으로 후위미생물 발효작용(Postgastric fermentation action)을 하는 단위가축의 소화기관과는 달리 섭취한 사료의 많은 부분이 장내소화효소에 의해서 가수분해되기 전에 반추위내에 서식하는 다수의 미생물에 의해서 전위발효작용(Pregastric microbial fermentation action)이 연속 발효체계(Continous fermentation system)에 의해서 이루어져 숙주(Hosts) 동물의 영양에 지대한 영향을 미치기 때문에 <그림 1> 많은 종류의 반추위내 미생물이 숙주인 반추가축과 전형적인 반추공생관계(Ruminant symbiosis)를 영위할 수 있는 반추가축 고유의 특성으로 인

해 반추가축이 안정된 혐기성미생물군을 유지할 수 있는 이상적인 환경을 제공한다. (Yokoyama와 Johnson, 1988; W.L.Jenkins, 1989; Barnett와 Reid, 1961; Czerkawski, 1986; Bryant, 1959; Russell과 Allen, 1986; Lewis, 1960; Hungate, 1966; Church, 1973; Palmquist와 Baldwin, 1966; Ogimoto, 1980; Bryant, 1970; Kay 등, 1983; Eckert와 Pandall, 1988; Demeyer와 Van NeVek, 1987; 梅津, 1973).

반추가축의 영양생리적 특성은 소화효소가 타액이나 반추위내에서 분비되지 않고 반추위내에 서식하는 미생물이 여러가지 효소(Cellulase, Urease, Lipase)를 분비하고 인간의 식량문제에 있어서 가장 경합이 적고 인간이나 단위가축이 영양원으로 이용하지 못하는 물질인 섬유소(Cellulose)의 분해나 비단백태질소화합물(NPN) 등의 분해와 재합성을 통한 미생물단백질(Microbial Protein)의 합성을 하여 사료로서 이용케 하며 또한 불포화지방산의 포화화(Hydrogenation) <그림 2>, 비타민 B군 및 K의 합성을 하여 반추가축의 독특한 대사를 진행시키고 이것을 다시 축체의 에너지 유지는 물론 비유(Lactation), 產肉源으로서 이용케하는 장점을 가지고 있다(Yokoyama와 Johnson, 1988; W.L.Jenkins, 1988; Barnett와 Reid, 1961; Czerkawski, 1986; Reid, 1971; 梅津, 1973; Rockebusch, 1979; Russell과 Allen,

* 건국대학교원

<출처> N.B.Kay

The Veterinary Record. 1983. 6月号

Saliya(fluidity-Stat+DH-stat)
+buffer
+Surf actant

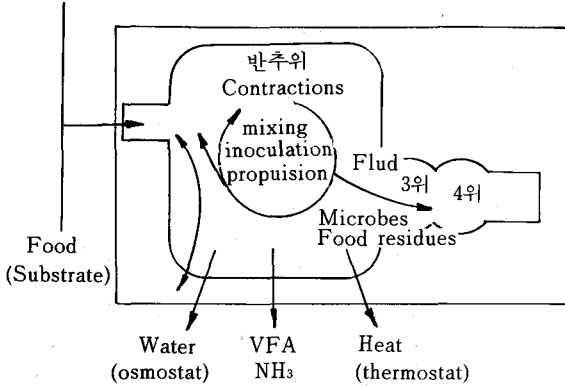


그림 1. 반추위에서 Continuous fermentative digestion을 유지하는데 관여하는 주요과정.

1986;Huffman, 1953;Markoff, 1913;Schwarz와 Steinmetzer, 1924;Mangold, 1929;Weinger, 1940;Wolin 등, 1985; 鶴飼信義, 1984; 廣瀬可恒, 1973).

또한 반추위내 미생물은 반추가축의 생명유지에 없어서는 안될 중요한 기능을 담당하나 양질의 사료(순수단백질, 전분)를 미생물이 분해함으로써 사료 이용효율을 떨어뜨리며 발효열 및 가스의 생산으로 상당량의 에너지를 유실시키는 단점을 가지고 있다.

반추위내에 서식하고 있는 미생물군은 반추위내의 pH, 공급되는 사료의 영양소 성분 및 형태 등에 따라 매우 다양하다. 반추위내 세균류에 대한 분류는 세균분리 및 배양의 까다로운 조건등으로 어려움이 있으나 일반적인 생리기능상으로

<출처> 田中桂一. 1974. 日畜會報

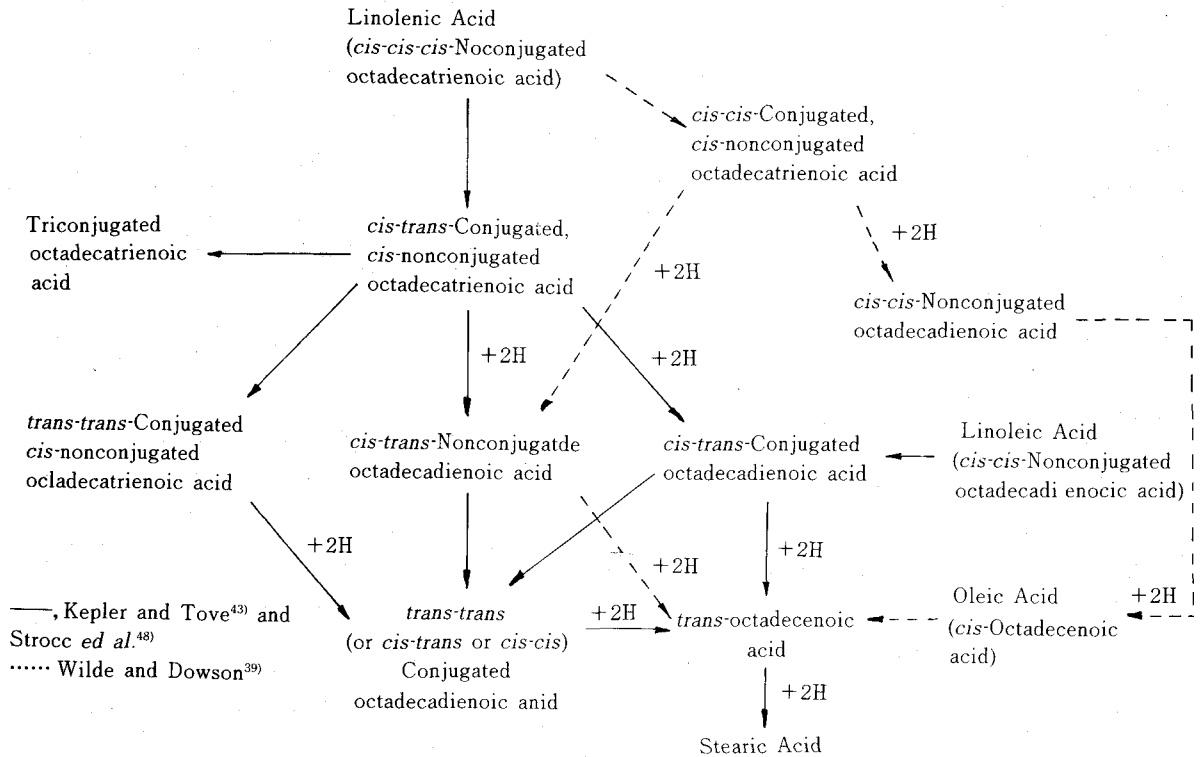


그림 2. 반추위 미생물에 의한 Unsaturated fatty acids의 Saturated fatty acids로의 생합성 대사경로.

불패 섬유소나 전분 및 당(Sugars)을 분해하는 *Bacteroides succinogenes*, *Bacteroides rumi-*
nicora, *Butyrivibrio fibrisolvens* 등과 같은 비아
포성혐기성간균, *Clostridium butyricum* 등과 같
은 아포형성혐기성간균, *Streptococcus bovis*,
Ruminococcus albus 등과 같은 혐기성구균과
Bacteroides succinogenes, *Ruminococcus albus*,
Ruminococcus faciens, *Cillobacterium rumi-*
nantium, *Butyrivibrio*, *Veillonella alcalescens*,
Megasphaera elsdenii 등의 일부에서와 같이 프
로피온산, 낙산 또는 유산(Lactic acid)을 생성
또는 이용하는 세균군, *Methanobacterium for-*
micum, *Methanobacterium soehngeni*, *Met-*
hanosarcinae 등과 같은 메탄을 생산하는 세균군
(Gram 양성간균) 등 여러종류가 있다(Hungate,
1966; Bryant, 1973; Clarke 등 1969; Bryant,
1977; Wojeiehowicz와 Zirolecki, 1979).

반추위내에서 일어나는 모든 발효활동은 결국
반추위내에 서식하는 모든 미생물간의 교호작용
(Interrelationships)에 의한 종합적인 결과라고
할 수 있다(Warner, 1962).

반추위내 미생물간의 교호작용은 크게 2가지로
구별할 수 있는데 그것은 첫째 경쟁적인 관계이
며 둘째로는 상호이익이 되는 공생관계라 할 수
있다.

반추위 미생물 상호간에는 매우 복잡한 관계가
유지되고 있으며 어느 종류의 미생물에 주어진
기질(substrates)의 최종산물은 다른 종류의 미생
물의 기질이 될 수 있다. 즉 미생물의 영양소 공
급면에서 사료중의 영양소를 발효시켜 이용하는
집단과 앞의 집단에서 생성한 발효산물을 다시
이용하는 미생물집단으로 나눌 수 있는데 後者는
최종산물의 이동에 매우 중요한 기능을 수행하여
前者의 순환에 필수적인 요인이 된다(Russell과
Hespell, 1981; Van Soest, 1982).

연속발효체계(Continous fermentation system)
의 소화작용이 이루어지는 반추위내 환경은 완충
능력이 높은 알칼리성 타액(주성분 : NaHCO_3)

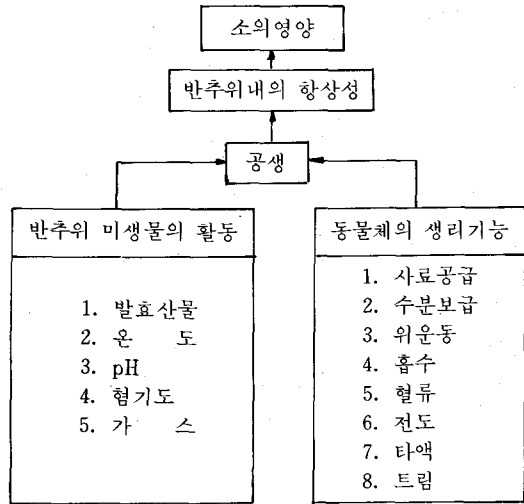


그림 3. 제1위내의 항상성을 유지하는 여러 가지
인자(安保“後“).

의 분비, 트림반사, 반추, 반추위운동, 흡수등에
의해서 비교적 협범위내에서 일정하게 유지되어
반추위의 항상성이 유지되고 있다. 이러한 반추
위내 항상성(恒常性)의 유지가 숙주동물인 소의
체내환경의 항상성을 유지하는데 불가피한 조건
이다(小原嘉昭, 1985)〈그림 3〉.

반추가축은 자신이 갖는 영양섭취과정의 특이
성 때문에 사료의 질, 양, 사료형태의 변화등에
의해서 항상성이 혼란되서 대사성질병이나 소화
기질병의 원인이 되며 반추위 미생물의 수와 종
류의 주된 변화요인으로서는 사료의 종류, 희석
율 및 pH 등을 들 수 있다.(小原嘉昭, 1985; 최,
1987).

반추가축이 발효되기 쉬운 고탄수화물성사료
(전분질 사료)를 일시에 다량으로 급여하게될 경
우에 반추위내에서 일어나는 생리적인 변화는 반
추위내에서는 유리포도당(Free Glucose)이 축적
되고 따라서 *Streptococcus*의 빠른 증식이 이루
어지면서 반추위내 pH는 낮아지게 되어 결과적
으로 *Lactobacilli*의 증식과 함께 조섬유분해세균
(Cellulolytic bacteria)의 숫자가 줄고 대신에 전
분분해세균(Amylolytic bacteria)의 숫자가 증가
하면서 다량의 산이 생성되어 체내에 흡수되고
이러한 정도가 동물체내의 중화능력을 초과해서

〈출처〉 Howard. 1986. Current Veterinary therapy.

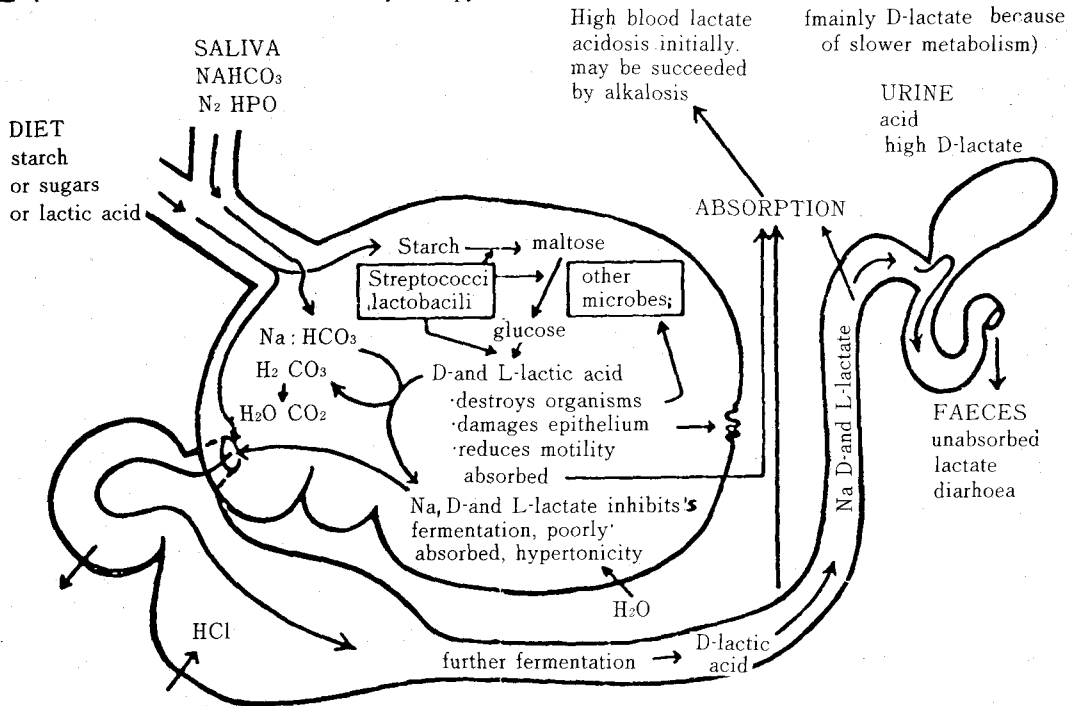


그림 4. 반추위내에서 Lactic acidosis의 진행 과정에 대한 요약.

Lactic acid를 이용할 수 있는 미생물(*Megasphaera elsdenii*와 *Veillonella alcalescens*)이 *Streptococcus bovis*나 *Lactobacillus*의 증식으로 사멸되면 체내에서 이용되지 못하는 D-Lactate의 축적량이 더욱 많아져 반추위내에서 Lactic acidosis가 유발되게 된다(하, 1989; Mann, 1970; Nakamura 등, 1971; Russell, 1985)〈그림 4〉.

반추위내에 정착하는 미생물군은 급여사료의 종류 및 양과 반추위내 환경조건에 의해서 반추위내 세균 및 원충의 수와 종류가 달라지게 되기 때문에 사료의 급변(Abrupt change) 시에는 일정한 미생물 적응기간이 지난 뒤에 비로서 미생물종의 종류와 수가 일정하게 된다(Warner, 1962). 따라서 반추가축이 갑자기 사료의 급변을 받게 되면 반추위내 조건이나 미생물종이 크게 혼란되고, 반추위의 정상적인 발효진행이 저해되기 때

문에 반추위내에서 이상발효가 일어나고 不消化物이 발생해서 사료의 낭비손실이 생길뿐 아니라 생체에도 악영향을 미쳐서 반추가축의 능력을 저하시키게 된다(鶴飼信義, 1984; 大森昭一郎, 1988).

농후사료의 과다섭취나 사료의 급격한 변화, 오염된 환경, 밀사, 한냉, 혹서의 기후, 수송, 질병, 초유부족, 과중한 항생물질의 치료 또는 제1위과산증(Rumer acidosis)의 스트레스로 반추위내에서 이상발효가 발생되면 반추위미생물의 활성변화로 인한 소화기장애의 발생비율이 높아지며 이때 항생제, 설파제 또는 반추위내 pH를 현저히 변화시키는 약품을 경구투여하면 때로는 반추위내 세균, 원충 및 효모 등에 악영향을 미칠 수도 있다는 것이 알려지고 있다(Prins, 1987).

오래전부터 외국에서는 소화기질병에 걸린 반

추가에게 건강한 소의 반추위에서 추출한 내용물 (Rumen extract)이나 *Laotobacillus*나 *Streptococcus*속의 생균을 주劑로한 단일 또는 복합의 생균제를 투여하여 소화기질병을 예방·치료함으로써 반추가축의 소화능력이 촉진되고 각종 영양소의 이용능력이 크게 향상되었다는 논문과 임상결과와 이와 상반되는 연구결과가 발표되고 있다.

국내에서도 소화기질병의 예방 및 보조치료를 위해 반추위에서 추출한 내용물을 주劑로한 단일 또는 복합제품이나 반추위내 세균내용물+유산균+효소제+보조제를 첨가한 제품들이 개발되어 반추가축의 영양소 이용을 개선, 성장촉진 및 성숙의 반추위내 대사기능을 간접적으로 조절가능케 하는데 일익을 담당하고 있다. 따라서 본고에서는 이들 제제에 대한 작용기전의 연구가 국내에서는 확립되어 있지 못하기 때문에 필자는 국내외의 최신자료를 정리하여 관련자료로서 제공하고자 한다.

1. 반추위세균의 종류와 기능

현재 국내에서 개발된 제제들에 포함된 생균과 성숙의 반추위내에 서식하고 있는 기존의 미생물과의 상호관계에 대한 기초연구가 전혀 확립되어 있지 않기 때문에 이 부분에 대한 연구와 이론체계의 확립이 시급하다고 할 수 있다. 따라서 본고에서는 반추위내에 서식하는 세균중에서 Rumen acidosis와 관계있는 유산생성 이용세균의 특성에 대해 집중적으로 기술하고자 한다(그림5).

Streptococcus bovis, Orla-Jensen(1919)

*Streptococcus bovis*는 반추위내에서 농후사료 다습시에 흔히 생성되는 호발효형 연쇄상구균으로서 세포직경이 0.7~1.0 μ m의 크기의 구균으로 二連鎖 또는 각종의 鎖長의 連鎖(Pairs, 1988)를 형성한다.

혈액평판상에서는 보통의 균주는 α 용혈, 즉

<출처> 乳牛 科學. pp: 138 梅津元昌. 1965.

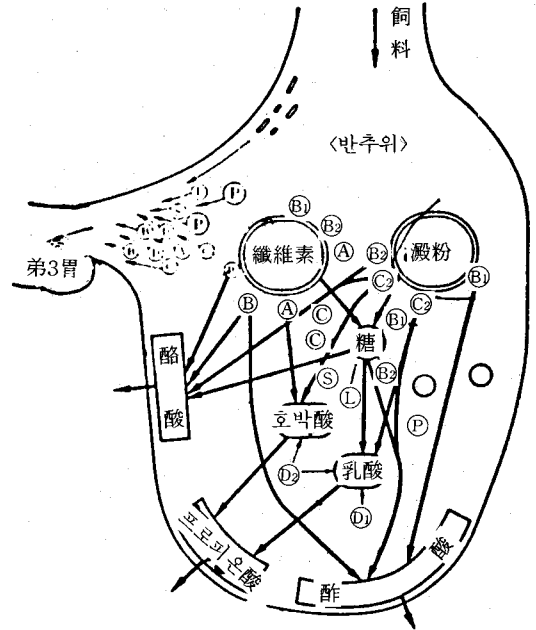


그림 5. 反芻가축 반추위내 內微生物社會의 模式像.

- A: 好纖維素性纖維素分解菌群
Ruminococcus flave faciens
Bacteroides succinogenes
- B1: 好分解性纖維素分解菌群
(Ruminococcus albus 등)
- B2: 好糖性纖維素分解菌群
Butyrvibrio sp., Eubacterium sp.等
- C1: 好澱粉性糖榮養菌群
Streptococcus bovis
Bacteroides amyloplulus 등
- C2: 澱粉分解性糖榮養菌群
Butyrvibrio. sp., Succinimonas sp.
Succininvibrio sp. 등
- D1: 乳酸榮養菌群 I
Peptostreptococcus elsdenii
- D2: 乳酸榮養菌群 II
Veillonlla alcalcescens
- S: Selenomonas sp.
- L: Lactobacllus sp.
- : 기타의 細菌群
- P: 原虫類, ○: 一過性の細菌群

집락의 주위에 협소한 녹색환을 형성하지만 그 가운데는 α 용혈, 즉 집락의 주변에 어떠한 변화를 일으키지 않는 것도 있다. 혈청학적 분류에서는 Lancefield의 D군에 속한다. 본균종 가운데는

근연의 균주에 발육저지작용을 갖는 Bacteriocin을 생성하는 균주가 있지만, 반추위 유래의 균주에서는 이러한 산생능력을 갖는 균주는 적다(Iverson과 Mills, 1976).

Glucose, Fructose를 위시해서 다종류의 가용성당류를 자원화하는 것 외에 Starch, Pectin, 단백질 등을 분해한다(Ziolecki 등, 1972). *Streptococcus bovis*은 廣食性的의 전분분해균이다.

Glucose로부터는 유산, 초산, 규산, 탄산가스를 대개 9.9 : 0.5 : 0.2 : 0.4의 몰(mole)비로 생성한다.

균체내의 DNA염기중의 구아닌+시토신(GC)는 38~42몰 %이다.

본 균종은 반추가축의 소화기관 외에도 사람의 분변, 사람의 심내막염의 환자의 병성감정재료로부터도 분리되고 있다.

본 균종은 타균종에 비해서 숫적으로 소수이지만 항상 검출되고 있다. 그러나 조사료(건초)로부터 농후사료(곡류) 다급시에 급격한 전환으로 급성소화불량증에 걸린 소의 반추위내에서는 이균이 급증하고 있다. 또한 이 균은 균체의 다당체(Extracellular Polysaccharide)를 생성하지만 이것이 농후사료 다급으로 고창증에 걸린 소의 반추위내에서 보이는 강고한 포말형성의 주요 요인으로 고려되고 있다. 또한 비육우의 혈중에서는 이 다당체에 대한 항체가 검출되고 있다(Hor-

<출처> CRC Critical Reviews in Microbiology

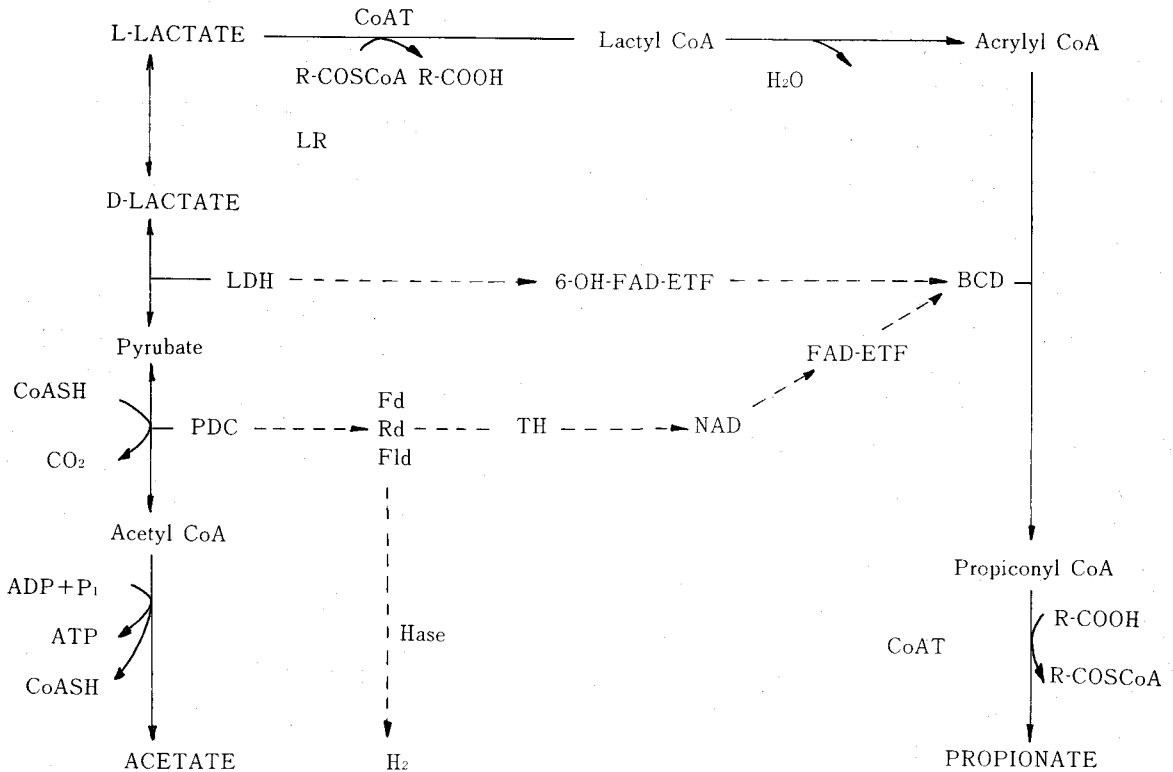


그림 6. *M. elsdenii*균의 Lactate대사와 전자전달과정.

효소명의 약자: LR, lactate racemase; LDH, D-lactate denarogenase; PDC, pvruate denhydrogenase conpiex; CoAT, coenzyme A transierase; Fd, ferredoxin; Rd, rubredoxin; Fld, flavodoxin. Hase, hydrogenase; TH, ferredoxin; NAD oxidoreductase; ETF, electron-transierring flavoorotein; 6-OH-FAD, 6-hydroxu-7,8-dimethyl-10-ribityl-5-ADP)-isoalloxazine; BCD, butryl-CoA dehydrogenase. Solid arrows indicate teaction pathways while dasned lines indicate the transier ot reducing ogyvuvaebts.(Frin Brixman H.L.and Wood W.A.With permission of the American Society for Microbiology.)

aceK 등, 1977).

반추위내에서는 본 균종 이외의 *Streptococcus* 균속으로서 숫적으로 소수이지만 *Streptococcus faecalis*, *Streptococcus Liquefaciens*, *Streptococcus faecium* 등이 검출되고 있다.

B. *Megasphaera elsdenii*(*Peptostreptococcus elsdenii*), Gutierrez 등, 1959, Rogosa, 1971).

세포직경이 1.2~2.6 μ m의 대형구균으로 통상 2連球이지만 때로는 2연구의 8~10개가 鎖狀으로 연결되어 있다.

본균은 Cellulose나 Starch를 이용하지 않지만, Glucose나 Fructose를 포함해서 약 6종의 당류를 이용한다. 또한 D유산 또는 L유산을 이용하는 것이 특징으로 중간대사물 이용균이다.

본균은 유산으로부터 초산, 프로피온산, 낙산, 고급지방산(n-Valeric acid과 n-Caporic acid), 탄산가스, 수소가스를 보통 2 : 2.4 : 2.7 : 7.5 : 0.5몰비로 생성한다.

균체내 DNA의 GC함량은 53.6 \pm 0.5 몰%이다.

본균은 반추위내 이외에 돼지의 맹장, 돼지나 사람의 장관내에 생식한다.

본균의 탄수화물대사에 대한 연구는 여러가지 진보가 보이고 있다. Phosphoenolpyruvate 의존형의 Sugar phosphotransferase 활성은 과당이나 Glucose에 의해서 유도된다.(Dillis 등, 1981). 본균은 유산 Lactase 활성을 갖는다. D-Lactate dehydrogenase는 전자전달성 flavoprotein의 존재하에서 Butyryl-CoA dehydrogenase를 환원한다. 이러한 계는 Crotonyl-CoA를 Butyryl-CoA로 환원한다.(Brockman과 Wood, 1975). Butyryl-CoA dehydrogenase는 정제되어서 보결분자측으로서 Flavin adenine dinucleotide(FAD)를 함유하며, 분자량은 약 15만으로서 녹색이다(Engle과 Massey, 1971). D-Lactate dehydrogenase도 정제되어서 FAD와 보조효소 인자로서 금속을 함

유하고 있다. 본균은 균체내에 저장다당체를 함유하지만 그것은 Amylopectin형의 Glucose polymer이다(Brown 등, 1975).

본균의 막지질의 대사의 연구에서는 Phosphatidyl ethanolamine(PE)는 Phosphatidyl serine(PS)의 Decarboxylation에 의해 생성되는 것으로 증명되고 있다(Prins 등, 1974). 본균의 막부분의 주요한 인지질(Phospholipids)은 PS, PE, Serine 및 ethanol-amine-flamarogen이다. 이러한 인지질은 다른 혐기성균에 비해서 Branched-chain fatty acid(BCFA) 잔기를 함유하고 이것이 균체의 freeze-etching 처리시, 지질과 단백질의 분리를 저지하고 있다(Verkley 등, 1975).

*Megasphaera elsdenii*균은 어린 송아지의 반추위에 많이 존재하나 성장함에 따라 반추위내에서 *M.elsdenii*균의 농도는 감소된다(그림 6).

C. *Veillonella alcalescens*, Prévot, 1933.

세포직경이 0.3~0.5 μ m의 미소구균으로 2련, 단쇄(Singly), 집리(Bolus)를 형성한다.

본균은 Hexose나 Pentose 등을 에너지원으로 이용하지는 않지만 Pyruvate, Lactate, Oxaloacetate, fumaric acid 등을 자원화 한다. 따라서 본균은 반추위내에서의 중간대사물 이용균이다.

유산염으로부터 초산, 프로피온산, 탄산가스, 수소가스를 보통 4.9 : 5.9 : 3.5 : 1.5의 몰비로 생성한다.

본균내 DNA의 GC함량은 42.3몰%이다.

본균은 반추위내 이외에 사람, 햄스터, 랫트 및 토끼의 구강내, 사람, 소, 토끼나 돼지의 하부소화관내에도 생식한다.

본균은 에너지원으로서 Hexose를 이용하지는 않지만 이것은 Hexose 투과효소의 결손에 의한 것은 아니고 Hexokinase, phosphoglyceridase나 Pyruvatekinase 등의 해당제(Embden-Meyerhof glycolytic pathway)의 효소를 결손했기 때문이다(Michaud와 Delwiche, 1970). 한편, 본균은 에너지원으로서 Pentose를 이용하지는 않지만

Pentose Phosphate의 모든 효소를 갖고 있다. 이 모순은 균체내에서의 Fructose-1.6-2Phosphate 수준이 Pentose Phosphate Pathway를 억제하는 사실에 의해서 증명되고 있다. 5탄당으로서의 Ribose는 그대로의 형태로 대부분이 핵산부분에 들어온다(Kafkewitz와 Delwiche, 1972). 유산으로부터 프로피온산의 생성경로는 Succinic acid 경유의 decarboxylic acid 경로의 효소를 갖는 것이 알려지고 있지만 본균은 decarboxylic acid 경로의 효소를 갖고 있다. acetatekinase는 본균의 에너지 생산에 있어서 중요한 요소이지만 균주에 따라서 다르고, Succinic acid 의존성과 비의존성의 효소가 있다(Yoshimura등, 1980). 아초산 환원효소가 정제되고, 이체에 ferredoxin이 관여하는 것이 증명되고 있다(Yordy와 Delwiche, 1979).

D. Lactobacillus

반추위내에서는 많은 종류의 lactobacillus가 발견되고 있다. lactobacillus는 어린 송아지의 반추위세균총의 중요한 구성성분이며 때로는 성숙의 반추위에서도 다량 발견되고 있다.

lactobacillus의 대부분은 호모발효형으로서 산성조건하에서 5.0 부근의 pH에서 복합영양소+발효탄수화물을 공급함으로써 증식할 수 있다. 반추위내의 산성조건은 lactobacillus의 뚜렷한 증식과 관련이 있고 반추위내에 서식하는 lactobacillus의 영양소 요구량은 다른 lactobacillus 보다 간단하다.

반추위 내용물에서는 *Lactobacillus lactis*, *Lactobacillus bifidus*, *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus buchneri*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus fermenti*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus cellobiosus* 등이 분리되고 있다(Hungate, 1966).

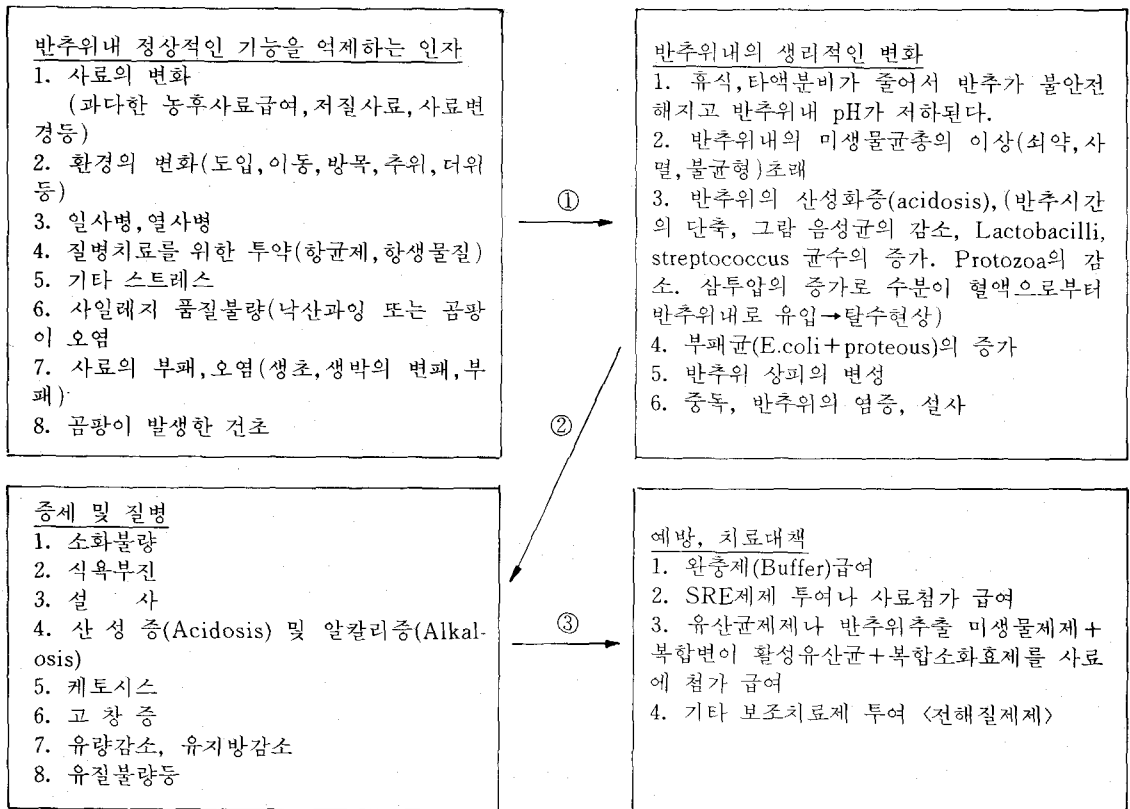


그림 7. 반추위의 정상적인 기능을 억제하는 인자와 질병과의 관계 (이인호 작성, 1989).