

초청강연 논문 4

계육 단백질의 gel화 특성

계육 단백질의 gel화 특성

이 성 기

강원대학교 축산가공학과

1. 서론

닭고기는 다른 적육에 비해 가공적성이 낮고, 동일한 고기일지라도 부위별 차이가 많이 나며 최종 가공제품의 색깔로 인해 소비자로 부터 기호도가 떨어지기 쉽다. 그러나 원료육이 비교적 저렴하고, 최신 발골기계의 보급과 부위별 판매에 따른 잡육의 생산 증가, 노계육의 활용 증가에 힘입어 더욱 저렴한 원료육을 확보할 수가 있게 되었다. 닭고기로 분쇄육, 재결합육, 프레스햄과 같은 가공 육제품을 제조할 때 가열처리를 하므로서 나타나는 색깔, 향기, 다즙성, 조직감이 적육으로 제조하는 것보다 다른 특성을 지닌다. 가열에 의한 조직감과 다즙성의 변화는 육단백질의 gel화 현상과 관련이 가장 깊으며, 이것은 제품의 조직감을 결정짓는 대표적 가공적성중의 하나이다.

Gelation이란 육단백질이 소금 등에 의해 추출되어 서로 결합하거나 3차원의 그물망 구조가 형성된 후 가열처리로 고착되는 현상을 말한다. 육단백질간 단단하게 결합될수록 gel 강도가 높아지고, 높은 gel 강도의 단백질일수록 결합력과 탄력성이 있는 고급 육제품의 원료육이 될 수 있다. Gel의 물성학적 특성은 염용성 단백질의 종류나 농도에 따라 밀접한 관계가 있다. Gel을 형성하는 육단백질은 myosin, actin, actomyosin 등과 같이 주로 염용성 단백질이 결정적으로 관여한다. Myosin은 단독으로도 열에 의해 훌륭히 gel이 형성되고 actin과 혼합비율에 따라 상승작용 또는 역작용이 일어난다는 보고도 있다. 그렇지만 육제품에서는 단백질외에도 세포막, 유기물, 근장단백질 등도 직간접적으로 영향을 끼치게 된다. 특히 닭이 성장함에 따라 뼈, 근육, 지방 등 각 조직의 발달이 다르고 노계와 같이 노화될수록 근육의 이화학적 성질도 변하게 된다. 뿐만 아니라 동일한 닭고기일지라도 가슴과 다리 등 부위별 육 특성이 현저히 다르게 나타난다. 이와같이 다양한 상태에서 유통되는 닭고기를 가공용 원료육으로 이용하기 위해서 계육 단백질에 의한 gel 특성을 이해하고 증진시킬 수 있는 방안이 필요하다.

2. 육단백질의 열변성과 gel 형성

2-1 단백질의 열변성과 상호간 결합

육단백질이 열을 받으면 가역적 또는 불가역적 변성이 일어난다. 변성이란 단백질 분자내 폴리펩타이드가 원래상태에서(native, folded) 호트러지거나 변성된 상태로(unfolded, disordered) 변화된 과정을 의미한다. 단백질 변성의 척도로 원래상태에서 50% 변성된 상태에 이르는 변성온도(T_d)나 변성에 필요한 열량인 엔탈피의 변화(ΔH)를 사용한다. 엔탈피는 van't Hoff 공식($\Delta H = RT^2$)에 의해 계산할 수 있고, 또는 DSC(differential scanning calorimetry)로 직접 측정할 수 있다. 육단백질의 gel화와 같이 외부로부터 많은 열을 가하여 불가역적인 변성이 일어난다. 불가역적인 변성은 열이 자동적으로 수반되는 exothermic aggregation(발열성 응집)을 억제시키고, 외부로부터 열 공급이 요구되는 endothermic 변성(unfolding)이나 응집으로 유도하여야 한다. DSC에 의한 엔탈피는 가열속도에 영향을 받으므로 가능한 빠른 가열속도를 이용한 T_{max} 를 사용한다. Wright와 Wilding(1984)은 가열속도를 증가시킬수록 myosin이 변성하는데 있어서 ΔH 와 T_{max} 가 증가하였다고 보고한 바 있다. 측정방법에 따라 myosin의 열변환(transition)은 pH, 이온강도, 고기자체의 pH 등에 의해 달라진다. Xiong(1992)에 의하면 닭고기 근원섬유 단백질이 pH 5.5에서 6.5로 증가시킬수록 3개에서 1개사이로 열변환점(thermal transition)이 줄어든다고 하였으며 pH 7.0과 7.5에서는 가슴육에서는 변환점이 한개이지만, 다리육과 혼합육에서는 발견되지 않았다고 하였다.

육단백질이 초기에 열을 받으면 변성온도(T_d)보다 낮은 온도에서 단백질과 단백질과 상호작용에 의하여 응집(aggregation)되기 시작한다. 단백질간 상호결합 상태는 gel 강도나 미세구조에 영향을 끼치게 된다. 가열에 의해 변성되기 시작하는 myosin이나 actomyosin 결합정도는 흡광도에 의한 탁도(turbidity)로 측정할 수 있다. 보통 육단백질의 결합현상(탁도증가)은 gel 형성전에 매우 짧은 시간과 온도에서 일어나 응집된다(Foegeding 등, 1986). 계육에서 추출한 염용성 단백질의 탁도는 35℃에서 급격히 증가하기 시작하여 그 이상의 온도에서 계속적으로 증가하는 경향을 보였다(이 등, 1995).

2-2 Gel 형성과 조직감 증대

고기를 세절하여 소금으로 염용성 단백질을 추출하면 물리적인 힘에 의해 불규칙적인 그물망 조직이 형성된다. 이때 열을 가하여 단단한 조직이 형성되면서 물과 지방을 유지시키는 일종의

Table 1. Least protein concentration for gelation test

Protein concentration(mg/ml)	4 weeks		8 weeks		24 months	
	Breast	Leg	Breast	Leg	Breast	Leg
1	-	-	-	-	-	-
2	2/5	-	-	-	-	-
3	3/5	1/5	-	-	-	-
4	5/5	3/5	2/5	-	-	-
5	+	5/5	4/5	-	-	-
6	+	+	5/5	-	-	-
7	+	+	+	-	-	-
10	+	+	+	2/5	1/5	-
11	+	+	+	3/5	2/5	-
12	+	+	+	5/5	4/5	-
13	+	+	+	+	5/5	-
14	+	+	+	+	+	2/5
15	+	+	+	+	+	4/5
16	+	+	+	+	+	5/5
17	+	+	+	+	+	+

*Number of gel formed/Number of sample

Table 2. Effect of pH, type and age on protein solubility(PS) of extracted salt soluble protein

pH	Protein solubility(%)					
	4 weeks		8 weeks		24 months	
	Breast	Leg	Breast	Leg	Breast	Leg
4.8	-	-	0.78	0.78	3.31	0.56
5.2	-	-	3.12	10.91	-	-
5.3	-	11.69	-	-	10.63	3.08
5.4	23.37	-	-	-	-	-
5.6	-	-	-	-	16.5	12.03
5.7	23.37	17.92	12.47	-	-	-
5.8	-	-	-	28.05	-	-
6.0	76.36	81.81	-	-	39.65	44.19
6.3	92.72	83.37	58.44	45.97	-	-
6.5	-	-	-	-	40.84	40.84
6.7	91.94	-	-	-	-	-
6.8	-	83.37	60.77	44.41	-	-
7.0	93.50	84.15	60.77	45.19	-	-
7.1	-	-	-	-	33.65	38.04
7.8	95.06	84.15	-	-	-	-
7.9	-	-	60.77	45.97	42.37	43.35
8.3	-	-	-	-	43.63	43.91
8.4	95.06	82.59	63.89	47.00	-	-

Table 3. Turbidity of salt soluble protein*

		Turbidity(O.D. 660nm)	
		2(mg/ml)	4(mg/ml)
4 weeks	Breast	1.40 ^a	2.09 ^a
	Leg	1.35 ^a	1.95 ^a
8 weeks	Breast	1.20 ^b	1.82 ^b
	Leg	1.09 ^d	1.72 ^c
24 months	Breast	1.11 ^c	1.77 ^{bc}
	Leg	1.08 ^d	1.67 ^c

* Salt soluble protein solution(1M KCl, pH 7.0)

^{a-d}Mean values with different superscript within the same column are significantly (P<0.05)

matrix를 형성되는 것을 gelation이라고 한다. Myosin의 gel 형성은 40-50℃에서 시작하여 60℃까지 강도가 증가하다가 60-70℃에서 일정한 수준을 유지한다. 온도증가에 따른 육단백질의 열변환(transition)은 축종에 따라 다르지만 50-58℃에서 강도가 급증한다. 염용성 계육 단백질의 점도 변화를 보면 40℃에서 급격히 증가하기 시작하여 55-60℃ 이후부터 완만한 경향을 보였다. 열에 의한 계육 염용성 단백질의 gel화는 가슴육 단백질이 pH 6.0, 다리 단백질이 pH 6.5에서 가장 높은 수준을 보였고, 다리살보다 가슴살에서 잘 진행되었다고 하였다(이 등, 1995). 보통 gel 강도는 상온에서 측정하며 failure shear stress나 failure shear strain으로 측정한다. Gel 강도는 가열속도와 시간 및 가열 온도 영역에 따라 다르다. 예를들면 단시간에 가열처리를 하면 gel 강도가 떨어지지만 서서히 가열하면 gel 안정도가 증가된다. 어육을 이용한 surimi gel은 단순히 90℃에서 15분간 가열시키는 것보다 일단 40℃에서 1시간동안 둔 후에 90℃에서 15분간 가열처리하는 것이 더 강도가 높다고 한다. 이와같이 1시간 두는 것을 setting 현상이라고 하고, 일본에서는 suwari라고 한다. 그러나 축육단백질도 동일한 효과가 있는 지 아직 명확한 보고가 없는 것 같다.

가열에 따라 육단백질의 변성에 의한 보수력도 변한다. 보통 단순한 가열로 유리수분이 소실되는 것은 가열수출이라고 하고, 가열하고 나서 원심분리나 압착과 같은 물리적인 힘을 가한 후 나머지의 수분 함량비를 보수력이라고 한다. 육조각에서 40-50℃에 gel의 구조가 형성되기 시작하지만, 유리수분이 거의 발생하지 않는 것으로 보아 수분을 유지할 만한 충분한 그물망 조직이 형성되지 못하였다고 보아야 할 것 같다. 그러나 60℃까지 온도를 증가시키면 유리수가 증가하면서 gel이 형성되고 gel 강도도 동시에 증가하게 된다.

3. 닭 근육의 연령별 gel 특성

닭 근육의 이화학적 조성은 병아리에서 노계까지 끊임없이 변한다. 성장초기에는 근육이 유약하나 일령이 증가할수록 지방침착이 많고 인대, 건과 같은 결합조직이 발달하여 가공육의 원료로서의 가공적성이 저하된다(성과 이, 1989). 김 (1995)에 의하면 계육 4주, 8주, 24개월된 가슴살과 다리살로부터 염용성 단백질을 추출하여 gelation을 비교한 바 있다. 전기영동상에서 4주는 myosin light chain 1과 3이 다량 선명히 존재하였으나, 8주나 24개월령에서는 거의 나타나지 않았다. 추출 단백질 농도를 증가시킬수록 점도와 탁도가 증가하였는데, 동일한 단백질 농도에서는 계육 연령이 높을수록 낮았다고 하였다. 또한 gelation을 위한 최소농도 단백질 측정에서도 일령이 높을수록 gel화에 필요한 많은 량의 단백질이 필요할 것으로 나타났다. 그러므로 동일한 단백질일지라도 연령이 낮을수록 gel 형성이 유리하며, 반대로 노계육일수록 열에 의한 gel 형성이 불리한 것으로 보고되고 있다(Table 1-3). 결론적으로 계육 연령과 관련하여 보면 영계에 비해 노계일수록 가공적성이 떨어지는 원인이 노계육에 포함된 다량의 인대, 결합조직, 지방, 불용성 물질에 그 원인이 있지만 이외에도 근원섬유 단백질(myofibril) 자체도 노령화에 따라 가공적성, 적어도 근원섬유 단백질의 gel 형성 저하에도 원인이 있는 것으로 지적되었다.

4. Gel 증대를 위한 기계발골계육의 수세 (Surimi 제조)

4-1 발골계육의 종류

최근 가공육의 추가가공 제품이 늘어남에 따라 발골계육의 수요도 늘고 있다. 전통적으로 발골 작업은 손작업으로 이루어져 왔지만 최근에는 기계를 이용하여 발골하는 경우가 많다. 기계발골에는 고기의 조직을 모두 파괴시키지 않고 부위별 원형고기를 얻거나 부위와 상관없이 육괴를 얻는 기계발골 계육(MDCM, mechanically deboned chicken meat)과 분할하고 남은 잡육에서 뼈를 분리하거나 산란노계의 통닭으로부터 압착, 추출시켜 분리하는 기계회수계육(MRCM, mechanically recovered chicken meat)이 있다. 기계회수계육은 조직형태가 없고 뼈 성분 외에 모든 성분이 함께 포함되어 있으므로 더 저급육이라 할 수 있다. 기계발골방법 나사식 압출법, 수압식 압출법, 회전식 정형방법이 있다.

4-2 기계발골계육의 특성

대부분 기계발골계육의 수율은 40-60%이고 일반성분의 조성을 보면 수분 63%, 단백질 14-16%, 지방 12-14%, 회분 4-5%이다. 특히 지방함량은 원료육 부위별로 차이가 많이 난다. 칠면조의 등뼈로부터 발골한 세절육의 지방함량은 9.1%, 가슴뼈, 목으로부터 얻은 것은 22.1%이다. 기계발골육은 뼈성분을 제외한 정육, 혈액, 건, 인대, 콜라겐 등 모든 성분이 포함되어 있다. 일부 뼈가루가 혼입되므로써 무기질이 많다.

기계발골육, 특히 회수육이 가공제품의 원료육으로서 이용되기에는 많은 문제점이 있다.

- ① 기계 발골육은 대부분 압출에 의해 분리되므로 미세한 뼈조각이 유입된다. 특히 구형 나사식으로 압출할 경우 기계육에 보통 직경이 100-300μm의 뼈조각들이 있어 문제가 된다.
- ② 기계 발골육은 지방산패가 일반 정육보다 훨씬 빨리 일어난다. 압출과정에서 뼈가 파괴되어

Table 4. Approximate composition of washed MRCM

Treatments	Moisture(%)	Protein(%)	Fat(%)	Ash(%)	Bone(%)
UW	70.8	17.8	10.3	1.21	1.09±0.07
CDW	75.7	15.8	6.5	1.14	0.95±0.05
NP	82.8	12.7	3.2	1.10	0.85±0.10
SB	82.9	12.8	3.4	1.13	0.87±0.10

UW: Unwashed, CDW: Cool distilled water, NP: Sodium phosphate buffer (0.04M, pH 8.0), SB: Sodium bicarbonate buffer (0.5%, pH 8.0)

Table 5. Properties used or proposed for grading surimi (Ockerman and Hansen, 1988)

Chemical and visual
Moisture level
pH
Whiteness - Hunter color meter
Impurities - black skin and bones
Physical properties
Expressible drip - pressed
Viscosity - in 3/5% NaCl solution
Gel-forming ability (constant moisture)
Gel strength - plunger
Folding test - crack when folded
Firmness - sensory
Chewiness - energy used with repeated compression
Elasticity - tensile force to break sheet
Water binding - slope of gel strength versus moisture
Frozen storage
Freeze - thaw cycles - pressed fluid

골수성분이 유입되고 헤모글로빈이 3배나 많다. 여기에 함유된 유리철(free iron)이 다량의 지방과 접하게 되고, 작업과정에서 기계적 접촉에 따른 금속물질의 촉매작용으로 말미암아 산화가 촉진된다. 따라서 쉽게 산패취가 발생한다.

③ 일반 정형육보다 기계적 세절작용을 거치므로 미생물의 오염에 의해 쉽게 부패된다.

④ 기계 발골육은 근육조직외에도 가공적성에 저해되는 각종 물질이 함께 포함되어 있다.

⑤ 일부 기계 발골계육에는 우리 몸에 해로운 광물질이 들어 있다. 성계 암컷으로부터 얻은 발골육은 불소(F)가 다량 들어 있으므로 미국에서는 유아식에 넣어서는 안되며, 일반 식육가공 제품의 원료로 20% 이상 첨가하여서도 안된다고 규제하고 있다. 노계 공팔에는 카드뮴(Cd)이 다량 들어있기 때문에 이를 섭취하면 6-12세의 성장기 어린이에게 해롭다고 한다. 그러므로 미국에서는 노계로 처리하기 전에 공팔을 제거하도록 규제하고 있다.

4-3 기계 발골육의 수세 (Surimi 제조)

발골계육의 품질증대를 위하여 수세(washing) 처리를 실시한다. 수세란 용액에 발골육을 넣어 휘저어서 혈액, 뼈, 인대, 지방 등을 제거하고 가공적성에 좋은 염용성 단백질만을 회수하는 작업이다. 발골계육의 수세방법과 원리는 어육에서 오래전부터 surimi를 제조하기 위해 채육 및 수세 과정을 실시하여 온 것을 모방하여 발전되었다. 어육 surimi의 산업화는 일본에서 최초로 1960년대부터 본격적으로 시작되었고, 연구는 그 이전부터 진행되어 왔었다. 어육 surimi를 제조하므로써 고급 근원섬유단백질이 주종을 이루는 살코기를 이용하여 탄력성이 강한 고급 연제품을 생산하여 왔다. 따라서 최근에는 서구에서도 수세한 축육고기를 축육 surimi라고 명명하는데 일반화되었다.

Surimi의 제조기술은 잡육을 정제, 냉동시키는 과정까지의 제조단계 기술과 이미 제조된 surimi의 근원섬유 단백질을 이용하여 열처리에 따른 gel화 증진기술로 분류할 수 있다. Surimi 제조단계에는 고기 : 물의 비율을 3 : 1로 10분간 하면 충분하다는 보고도 있으나 몰대신 0.5% NaHCO₃로 처리하고 중화한 다음 0.1-0.5% NaCl로 마지막 수세한 후 원심분리시켜 탈수작업을 하면 좋다는 보고도 있다. 이물질들을 제거하기 위해 screen법을 쓰기도 하고 탈수시키기 위해 원심분리나 압착방법을 시도하기도 하였다. 이외에도 수세후 색깔, 수율, 이물질들을 더 제거하기 위하여 인산염, ascorbic

acid, acetone, sodium acetate, hydrogen peroxide, sodium metasilphite 등을 도입한 바 있다. 이 등 (1994)에 의하면 기계회수계육(MRCM)에 증류수, sodium phosphate (0.04M, pH 8.0), sodium bicarbonate (0.5%, pH 8.0) 용액으로 수세처리하였을 때 수분함량이 약간 증가하였으나 sodium phosphate buffer로 수세하였을때 69.2%의 지방이 제거되었고 sodium bicarbonate buffer로 처리하였을때 단백질함량 기준으로 수율이 73.5%로 최고 높았다고 보고하였다(Table 4). 또한 수세처리한 MRCM의 육단백질은 SDS-PAGE로 관찰한 결과 대조구에 비해 마이글로빈 밴드 등이 보이지 않아 수세과정에서 대부분의 근장단백질이 제거되었음을 알 수 있었다. 또한 수세된 MRCM의 색택도 백색도(L value)가 증가하고 적색도(a value)는 현저히 감소하였다고 하였다. 일반적으로 surimi의 pH가 높을수록 색깔과 기능성이 좋아지나 수분함량이 많다. 탈수완료된 어육 surimi는 4% sorbitol, 4% sucrose, 0.2-0.3% sodium polyphosphate 등과 같은 냉동변성 방지제를 혼합하여 -20℃에서 1년이상 저장이 가능하다.

이와같이 surimi를 원료육으로 이용하여 탄력성과 견고성이 강한 육제품으로 제조하기 위해서는 염용성 단백질의 추출기술과 열처리에 의한 gel 형성 기술이 요구된다. 수세하여 얻은 정제된 고기(=surimi)의 품질은 주로 열에 의해 형성되는 gel화(교질화) 정도에 의해 평가된다(Table 5). 정제가 잘된 수세발골 계육일수록 gel 강도가 높아서 육가공 원료육으로 이용하기에 적합하다.

5. 향후과제

축육을 이용한 surimi의 제조와 gel화에 관한 연구가 어육보다 훨씬 늦은 80년대에 들어와서 본격적으로 시작되었다. 특히 노계육이나 기계발골계육은 가공용 원료육으로서 품질이 현저히 떨어지기 때문에 수세의 산업화나 gel 형성에 관한 연구가 다른 가축보다 비교적 활발하게 진행되고 있다. 그렇지만 어육 surimi와 달리 계육 surimi의 제조에 관한 일반화된 방법은 아직 알려지지 않고 있다. 더구나 제조된 계육 surimi의 냉동보존방법, 냉동중 단백질 변성방지법, 산화억제 기술, 열에 의한 gel 형성 특성에 관한 정보가 미흡한 실정인어서 계속적으로 연구가 진행중에 있다.

6. 참고문헌

1. Foegeding, E.A., Allen, C.A., and Dayton, W.R.. 1986. Effect of heating rate on thermally formed myosin, fibrinogen and albumin gels. J. Food Sci. 51:104.
2. Foegeding, E.A. : Thermally induced changes in muscle proteins. Food Technol., 42,58 (1988).
3. Mackie, I.M. : Surimi from fish; Knight, M.K. : Red meat and poultry surimi. In *The Chemistry of Muscle-based Foods*, Ledward, D.A., Johnston, D.E., and Knight, M.K. ed., The Royal Society of Chemistry, UK. p. 193 (1992).
4. Ockerman, H.W. and Hansen, C.L. : Animal by-product procesing. Ellis Horwood, Chichester (1988).
5. Wright, D.J. and Wilding, P. 1984. Differential scanning calorimetric study of muscle and its proteins: Myosin and its subfragments. J. Sci. Food Agric. 35:357.
6. Xiong, Y.L. 1992. Thermally induced interactions and gelation of combined myofibillar protein from white and red broiler muscles. J. Food Sci. 57:581.
7. 김희주 : 일령 및 부위에 따른 계육 단백질의 gel화 특성에 관한 연구. 강원대학교 농학석사학위논문 (1995).
8. 성삼경, 이신호 : 노계육의 preblend와 기계발골육의 특성 및 이용에 관한 연구 II. 기계발골 노계육 preblends의 기능적 특성과 그 유화물의 조직적 특성. 한국축산학회지. 31,12 (1989).
9. 이성기, 김희주, 강창기, 채영석. : 성장단계에 따른 적색 및 백색계육 염용성 단백질의 gel화 특성에 관한 연구. 한국축산학회지 37, 87 (1995).
10. 이성기, 정재경, 조규석, 채영석, 강창기, 김종원 : 수세용액과 Oleoresin 향신료 첨가가 기계발골계육의 품질특성에 미치는 영향. 한국축산학회지 36,76 (1994).